

摘要

386170

(包头钢铁公司无缝钢管厂为了提高其 $\Phi 400\text{mm}$ 自动轧管机组的外径精度和扩大产品的规格范围,从德国引进了一台 12 机架三辊式微张力定径机,以代替现有的七架二辊式定径机。为了消化这套机组的工艺特点,掌握技术关键,发挥机组功能并为开发新产品提供依据,)本文从微张力定径的原理入手,对这套定径机组的孔型系统进行了全面、深入的分析,并与其它同类型的机组进行了全面对比,掌握了这套机组的孔型设计特点和孔型设计方法。在此基础上,对微张力定径机的工艺核心问题即张力—壁厚—转速之间的关系进行了深入的研究,确定了轧辊转速的计算方法,并与实际结果进行了对比;计算了轧制时的力能参数和电机功率;通过实测数据的分析,确定了切头切尾长度,有助于提高金属收得率;提出了这套机组在工艺上的不足之处。最后,根据以上研究结果,提出了定径机轧制表的编制方法。

关键词:微张力定径机 孔型系统 切头尾^X

Abstract

In order to improving the accuracy of external diameter of tubes of $\Phi 400\text{mm}$ plug mills, the seamless steel tube plant of BAOTOU iron & steel company introduced a 12-stands three-roll slight stretch sizing mill for substituting it for existing the 7-stands two-high sizing mill. For digesting the technical characters and mastering the technical key of these mills, the text made a comprehensive and detailed analysis on the groove system from the principle of slight stretch sizing and made a comprehensive contrast with same-type other mills while proposing some way of groove design. On the basis of above, author made a deep investigation on the technological system so that mastering the way of determining the velocity system of the mills and made a contrast with the practical result, calculating the energetic parameter and electric power of processing. By analysis on the data of practical survey, author determined the length of crop-end that is helpful to improving the ratio of metal harvest and proposed the shortcoming of these mills in technical processing. Finally, according to the result of researching, this text proposed the processing form of sizing mills applying to the practical processing.

Key: Slight Stretch Sizing Mills

Groove System

Crop End

1 问题的提出

包钢无缝钢管厂是由前苏联提供的、具有 50 年代末技术水平的国内唯一的一套大型自动轧管机组。它的热轧区域工艺流程为：穿孔（1#）→斜轧延伸（2#）→自动轧管→均整→定径→冷床。经过几十年的生产运行，该机组暴露出设备精度低，工艺装备差，工艺落后等缺点，导致产品尺寸精度低，外观质量差，在市场上缺乏竞争力。以石油套管为例，根据我国 SY/TS990—94 标准（相当于 API），壁厚公差为 $\pm 12.5\%$ ，外径公差为 $\pm 0.75\%$ ，而无缝厂的产品，外径偏差为 $\pm 1\%$ ，壁厚公差 $\pm 12.5\%$ 以上，而且不稳定。面对这种状况，包钢决定对 $\Phi 400$ 机组工艺线进行全面改造。经过与外方多次接触，最终选定由德国曼内斯曼公司总负责，对我厂热轧线进行全面改造。为了提高产品的外径精度和扩大品种，在保留原有二辊式定径机的基础上，引进一台十二机架三辊微张力定径机。

该套微张减机组是目前世界上最大的一套微张减机组，且具有 90 年代的技术水平。但是，引进时，德方只提供了一本操作手册和一些技术资料，没有给出相关的计算公式和计算方法，即只给出了“是什么”而没有说明“为什么”。

为了消化这套机组的工艺特点，掌握技术关键，发挥机组功能，并为开发新品种提供依据，包头钢铁公司与北京科技大学签定了《三辊微张力定径机的工艺消化与研究》的科研合同，本文研究工作是其中之一。

本文的研究内容是：在消化德方提供的全部工艺资料和现场实验的基础上，深入分析孔型系列划分、孔型设计方法、张力—壁厚—转速的关系、切头尾长度的确定、力能参数的计算等定径工艺的核心问题，并对产品精度状况进行分析。

2.文献综述

根据本文的研究内容,本章重点综述了微张力减径机的发展概况、发展趋势、工艺要素。最后,在综述的基础上提出本文的研究思路与方法。

2.1 微张力减径的发展概况

热轧钢管生产由三个基本工序组成:穿孔→延伸→定(减)径(精轧)。定(减)径是钢管生产中最后一道热轧工序,是决定成品管外径精度的最重要工序,也是影响壁厚精度的重要工序之一。

钢管定径、减径和张力减径过程均是空心体不带芯棒的连轧过程。定径的任务是在较小的总减径率和单机架减径率条件下将钢管轧成具有要求的尺寸精度和真圆度的成品管。其工作机架数量较少,一般为3~12架。减径的任务除了起定径作用外,还要求有较大的减径率,以实现用大管径毛管生产小口径钢管的目的,因而其工作机架较多,一般为9~24架。张力减径则除了有减径的作用之外,还要达到用各机架间建立的张力来实现减壁的目的,因此其工作机架更多,一般为12~24架,多者达30架。

包钢无缝厂引进的定径机,其实质是微张力减径机。微张力减径机不带或只带微张力轧制,在减径过程中壁厚稍有增加,总减径率在30%左右。而张力减径机在减径过程中机架间存在着张力,使得减径的同时减壁,进一步扩大了产品的规格范围。微张减与张减工艺及设备基本相同,但也存在一些差异,表2—1给出了微张力减径机与张力减径机在设备及工艺上的一些区别【1】【2】。

表2—1 微张减与张减在设备及工艺上的区别

	微张力减径	张力减径
张力系数	较小,最大可达0.5左右	相对较大,最大可达0.8左右
机架数量	一般为10~14架	一般12~24架,多者达30架
单机架减径率	最大为3~5%,常被限制在3.5%以下	最大可达12%
总减径率	30%左右	最大可达80%
壁厚变化	壁厚稍有增加	可以增壁、等壁、减壁
管端增厚段长度	短	长

从表2—1可以看出,二者工艺原理基本相同,设备也大体相似。但是,张减与微张减的最大区别是使用范围不同。张力减径机的主要用途是轧制小规格的钢管,特别是轧制多倍尺管时,最能发挥其效能。因此张力减径机适宜于与生产规模大、荒管尺寸较长的轧

管机配合使用。而微张力减径机主要用来与规格变化范围较小、壁厚变化范围不大、荒管长度较短的轧管机相匹配【3】【4】。

2.1.1 张力减径机的分类及比较【2】【3】

张力减径机按结构形式分为二辊式、三辊式、四辊式。见图 2—1。

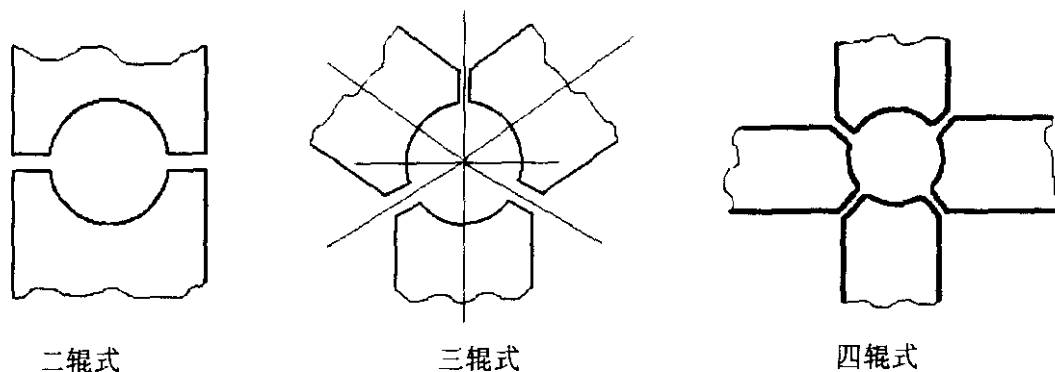


图 2—1 张力减径机结构形式

按传动形式可分为：成组传动、单独传动、液压——差速、集中——差速传动。见图 2—2。

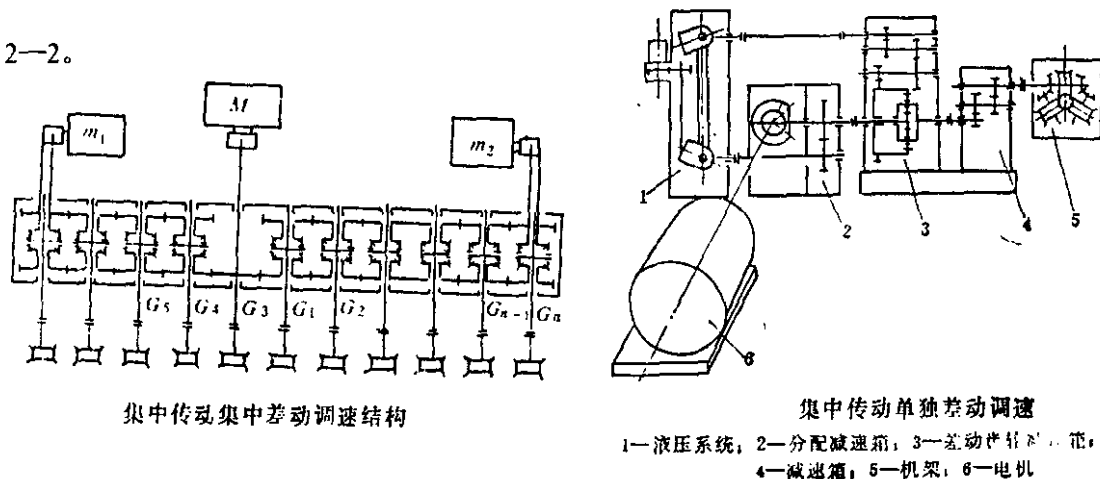


图 2—2 集中——差速传动示意图

从结构形式方面比较，二辊式张力减径机的机架布置比较简单，三辊式张力减径机比二辊张力减径机的机架布置复杂一些，而四辊的张力减径机因其结构极为复杂，目前已逐步淘汰。

从传动形式方面比较，对于成组传动的张力减径机，它由一台交流电机传动各机架，速比固定不变，各机架转速不能单独调整，产品范围窄，因此基本上已不使用。

单独传动的张力减径机，每个机架由一台直流电机传动。这种方式可保证轧辊转速在较大范围内调整。为了保证在轧制过程中速度稳定，要求有较大的电机功率和硬的电机特

性,因此设备比较复杂,造价高。

液压——差速传动的张力减径机,由一台交流(或直流)电机作为主传动,每个机架有一套单独的液压调速系统作为辅助传动,通过差速器将两种传动叠加,从而在一定范围内可以无级变化轧辊的速度。

集中——差速传动的张力减径机由一台交流(或直流)电机作为主传动,一台直流电机作为叠加传动,经差速机构将两种传动叠加,从而使轧辊在一定范围内按一定比例关系改变转速。

2.1.2 张力减径机的发展概况【2】【4】【5】

自1932年美国国家钢管公司的JOHN.W.OFFUT取得专利以来,至今已有六十多年的历史。经过几十年的发展,张力减径技术在国外已很成熟,应用越来越广,在连轧管机组(等热轧无缝钢管机组)及焊管机组后都可配张力减径机。表2—2是几个张力减径机组的资料。

表2—2 张减机组设备性能

国家名称	西德	日本	西德	法国	美国	中国
公司名称	RK1	住友海南	RK2	圣索夫	费尔菲尔厂	宝钢
投产时间	1966年	1968年	1972年	1978年	1983年	1988年
张 型式	三辊式	三辊式	三辊式	三辊式	三辊式	三辊式
力 机架数	24	24	28	24	24	28
减 出口速度 (max), m/s	9	11.2	16	13	5.94	16
机 轧出最大长度 (max), m	100	98	165	110(150)	80	160

从表2—2可以看出,现代的张力减径机都是三辊式,二辊式张力减径机已经淘汰。这是因为变形时,三辊式比二辊式应力均匀。

在张力减径工艺中,纵向拉伸应力高,在轧制技术方面具有明显的优越性,但也有不尽人意之处。由于建张过程和张力释放过程会导致管端增厚,与稳定轧制的管材中间段相比,壁厚增加,而且越靠近末端,增厚越严重。如果末端壁厚超过轧管规格的允许公差范围,必须将其从成品管上切下。如不采取措施,无缝管生产厂的材料损失将是非常大的。根据管坯的长度以及钢管生产工艺和生产计划,材料损失可达到年产量的数个百分点。

管端增厚随以下参数增大而增大:(1)张力系数。(2)总减径率和单机架减径率。

(3) 机架间距。

为了降低张减管的切头长度,近年来出现了管材端部控制(C.E.C=Crop End Control)技术,就是有针对性地改变张力减径机的传动马达的转速,使轧管末端产生与稳定状态变形条件尽可能相近的应力及轧制条件。具体做法是在轧管生产线的进出口段提高转数比,从而增加管端的张力并以此防止管壁厚度超过允许公差范围,最终可以降低由于末端增厚造成的材料损失。

大型化、连续化、高速化是钢管生产的发展趋势。随着电子工业和机械制造业的不断进步,张力减径机生产工艺也获得了巨大发展。目前,以宝钢无缝钢管厂张力减径机和包钢 $\Phi 250$ 机组张力减径机为代表的新建张力减径机普遍都配有大型冷床、排锯,这为张减机的高速化奠定了基础;都配有管理计算机和过程控制机,可以实现张减机切头长度控制;通过计算机自动控制,大大提高了对钢材尺寸、形状和表面质量的控制精度。

2.1.3 微张力减径机的发展趋势【2】【4】【6】【7】

应该说,自从有了钢管生产,就有了定径机。定径机与钢管生产几乎是同龄的。而微张力减径机是在张力减径机的基础上发展而来的。经过多年的发展,微张力减径机已经非常成熟,得到了广泛的应用。表2—3是几个微张力减径机组的资料。

表2—3 微张减机组设备性能

国家名称		原苏联	天津	大冶	包钢	包钢
公司名称		乌拉尔厂	钢管公司	$\Phi 170$	$\Phi 250$	$\Phi 400$
投产时间		1962年	1988年	1991	2000	1997
微张力 减径机	型式	三辊式	三辊式	二辊式	三辊式	三辊式
	机架数量	11	14	12	12	12

从表2—3可以看出,微张力减径机分二辊式和三辊式。二辊式微张减其轧辊强度、刚度都优于三辊式,适合于轧制厚壁管,这是大冶选用二辊式的主要原因。近几年建造的微张减几乎都是三辊式。虽然三辊式机架在机械结构布置方面会产生一些困难,但三辊式同二辊式比较,它有很多优点。三辊式机架的主要优点为:

同二辊式机架相比,轧辊表面和管子表面之间具有较小的相对滑移,因此摩擦损失比较小,变形效率比较高。这样,为了取得较大的减径量,可以采用宽展较小的轧辊孔型,

也可采用直径较小的轧辊和较小的机架间距。由于摩擦损失小,所需要的电机功率显著降低。

微张力减径机的机架数量一般为 12~14 架。机架数量多,减径能力相对增大。这不仅可以扩大机组生产的品种规格,增加轧制长度,而且减少前部工序要求的毛管规格数量以及相应的管坯规格数量和工具备品等,简化生产管理。

微张力减径机的传动方式也发展很快。我国早期研制的微张力减径机均采用集中传动单独差动调速的传动方式。这种传动方式的好处是结构紧凑、装机容量小。同时也存在着维修困难、调速系统刚性差等缺点。为了提高刚性,往往采用增大马达容量的方法,造成“大马拉小车”的现象。但因马达的制造技术和伺服系统不过关,产品质量不尽如人意。

为了克服单独差动调速的缺点,出现了集中传动集中差动调速的传动方式。这种方式的特点是结构简单、传动系统刚性好、投资少。缺点是调速范围不够广,导致所生产的规格范围比较小。

以上两种传动方式缺点都很明显。因此转而出现在单独马达传动方式,得到了推广。它有以下优点:(1)结构简单,设备维修方便。(2)调速范围广,适应于各种钢管的调速需要。(3)传动较简单,转动惯量小,提高了调速系统的灵敏度,减小了动态速降恢复时间。当然,单独传动也有其缺点:(1)由于转动惯量小,因此传动特性曲线软,动态速降大。(2)总的设备制造费用大。但现在已有电枢可控硅闭环反馈技术,单独传动的动态速降问题得到了圆满的解决,从而使单独传动的优点得到了较好的发挥。这种传动方式得到了广泛的应用。包钢 $\Phi 400$ 自动轧管机组的微张力减径机就采用这种传动方式。

作为钢管生产中的精轧机组,微张力减径机的发展趋势是:(1)进口管径越来越大,生产过程日趋大型化。包钢 $\Phi 400$ 自动轧管机组引进的三辊微张力减径机入口管径最大可达 450mm。(2)采用电子计算机自动控制技术。采用电子计算机技术自动调速,可使轧辊转速精确度达到 1/1000;壁厚公差达到 $\pm 3.5\%$;通过采用计算机控制切头尾长度,可使切头尾长度大幅度降低,提高收得率,经济效益非常明显。通过计算机自动控制,大大提高了对钢材尺寸、形状和表面质量的控制精度。

2.2 微张力减径的工艺要点

2.2.1 减径率 ρ 及其分配【1】【3】

总减径率是成品管（ D ）和来料外径（ D_0 ）的变化比，可以表示为

$$\rho = \frac{D_0 - D}{D_0} \times 100\%$$

。总减径率和单机架减径率是微张减工艺中的两个重要参数，成品管的质量主要取决于这两个参数的大小。不适当地加大单机架减径率或单机架减径率不变增加机架数提高总减径率都会恶化成品管横截面的壁厚均匀性，加大首尾厚壁段的增厚程度，严重时会出现“外圆内六方”现象。管子的尺寸精度要求限制了微张减的减径率。因生产某一具体规格时，入口毛管直径与出口直径都已确定，即总减径率已经确定。在这种情况下，余下的任务就是把总减径率合理地分配到各个机架上。

从经济观点出发，一台微张力减径机最好具有最少的机架数，而使每架孔型的减径量达到允许的最大值。但每架孔型的减径量受到诸多因素的限制。限制孔型减径量的因素有：

咬入角：如果咬入角太大，将无法咬入。

管壁损坏：如果减径量过大，特别是壁厚系数较小时，由于管子轮廓被压扁或管壁被轧辊边缘咬入并挤出，因而导致管壁损坏。

内孔变方：过大的减径量往往使得管壁沿圆周不均匀增厚，甚至出现“内六方”现象。单架减径率越大时，内孔变方的程度越剧烈。

轧辊磨损：减径量越大，管子咬入和轧出的速度差也越大，在轧辊轧槽上的刮擦作用也越大，因此，加大减径量使轧辊表面的磨损增大，且易造成管子的划痕。

当总减径率一定时，各孔型中减径量的分配取决于很多因素。对这个问题的看法早些时候一直不统一，未能形成一个权威的分配方案。各个厂家在分配减径率时，基本上都是采用经验方法。

文献【3】介绍，英国采用的方法是前面机架维持单机架减径量绝对值为一常数，在减径机的末端减径量按抛物线的轨迹逐渐减小。而同期美国所采用的方法是：前面机架维持单机架减径率为一常数，减径机末端减径率按抛物线的轨迹逐渐递减。因为早期微张减和张减的入口管径较小，所以应当说以上两种方法有相同之处。

经过多年的发展，张力减径和微张减工艺已经很成熟。在减径率分配这个问题上已经

取得了共识。微张力减径同张力减径相比,单机架减径率要小的多,但减径率的分配原则一样。由于工作情况不同,将机架分成初始机架、中间机架、终轧机架三部分。通常,使张力升起并达到最大值的始轧机架多为三架左右,而使张力降落到零的终轧机架多为2~3架。见图2—3。

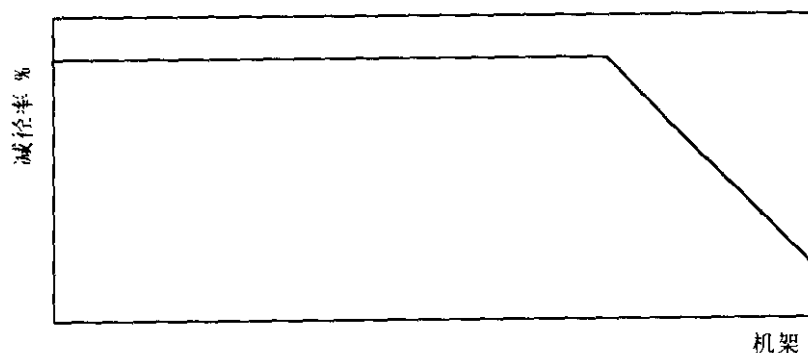


图 2—3 减径率分配曲线

微张减与张减相比,减径率小得多,其减径率分配原则是:没有始轧机架,前面几个粗轧机架均匀分配,均采用最大减径率,终轧机架逐渐减小,到成品机架时接近于零。

2.2.2 张力系数的选择【2】【3】【4】【8】【9】

张力的建立是靠消耗变形区中的剩余力来实现的,因此,它与单机架减径率、机架数目有关。单机架减径率大,机架数目多,则 \bar{Z} 可加大。根据文献【9】介绍,机架数目和可建立的 \bar{Z}_{\max} 的关系的统计值见表2—4。

表 2—4 机架数目和可建立的 \bar{Z}_{\max} 的关系

机架数目	3	4	5	6	7	8	9
\bar{Z}_{\max}	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.32	0.35
机架数目	10	11	12	14	16	≥ 18	
\bar{Z}_{\max}	0.40	0.45	0.49	0.54	0.60	≥ 0.65	

微张力定径($n \leq 12 \sim 14$)时,选定 \bar{Z} 的基本规律是:

(1) $\bar{Z} \leq 0.5$, 防止轧件打滑;

(2) 除受来料限制,微张力定径机必须靠大一些的 \bar{Z} 才能获得要求的成品管壁厚外,一般均采用小张力或微张力,以减少切头损失。因为 \bar{Z} 越大,张应力越大,管体与头、尾的壁厚差别就越大,切头损失就越大。

(3) 为了防止定减径时堆钢,也为了防止定减径后弯曲,绝大部分产品带张力轧制(即

使 $\bar{z}=0.02\sim 0.03$)。

(4) 不管 z_i 多大, 它都在中间机架达到最大。如图 2—4。

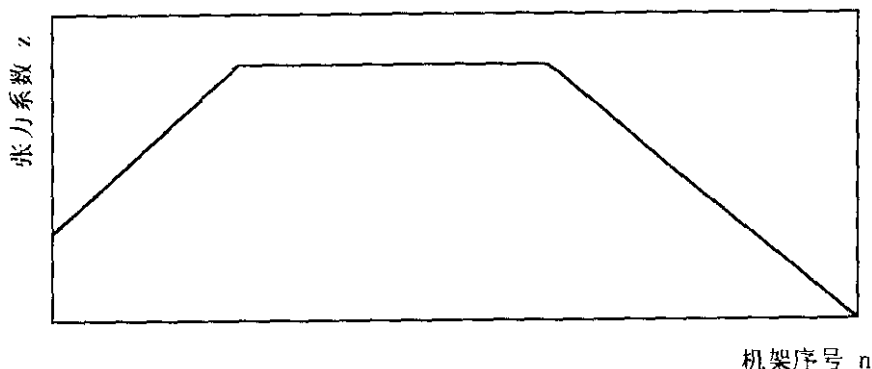


图 2—4 张力分配曲线

2.2.3 轧辊转速

轧辊转速是工艺设计中的一个重要参数。张力系数的大小归根结底要靠各机架之间的相对转速来保证。轧辊转速计算一般在轧制表和孔型设计完成后进行。计算时遵循体积不变定律, 即各机架秒流量相等的原则。计算时先按前述方法求出各机架钢管横断面积 F_i , 然后将它代入 $F_i V_i = \text{常数}$ 的公式中, 即可求出各机架的轧辊转速 n_i 。其中确定各机架轧辊的工作直径以及各机架轧后毛管壁厚是难点, 也是重点。

2.2.3.1 各机架轧后毛管壁厚的计算【1】【3】【9】【10】【11】

截止到目前为止, 减径量、增厚量以及张力之间的关系尚不十分明了, 不断有人在这方面进行尝试。最早是在无张力的普通定径机单机架下研究减径量和增厚量之间的关系, 并取得了一定成果, 在当时有一定意义。因结果比较繁琐, 用起来十分不便。而且因为没有考虑张力, 使用范围受到很大限制【3】。

文献【10】的作者在这方面进行了进一步的探索。作者从钢板连轧得到启发, 从连轧力学关系入手, 运用轧制理论, 导出钢管张力微分方程式, 最后得出稳态时的壁厚公式:

$$S_{i+1} = \frac{1}{2} \left(D_{i+1} - \sqrt{D_{i+1}^2 - 4S_i \left(D_i - S_i * \frac{1}{\mu_{i+1}} \right)} \right)$$

现在国内普遍采用的是文献【9】介绍的方法。其原理是从变形关系入手, 逐步迭代, 直到前后变化量小于某一给定的精度值为止。包钢 $\Phi 400$ 自动轧管机组和 $\Phi 250$ 机组均采用这种方法。

2.2.3.2 轧辊工作直径【3】【8】【9】【12】

同其它轧钢生产一样,在微张减工艺中,金属与轧辊之间也存在着滑移现象。见图 2

—5

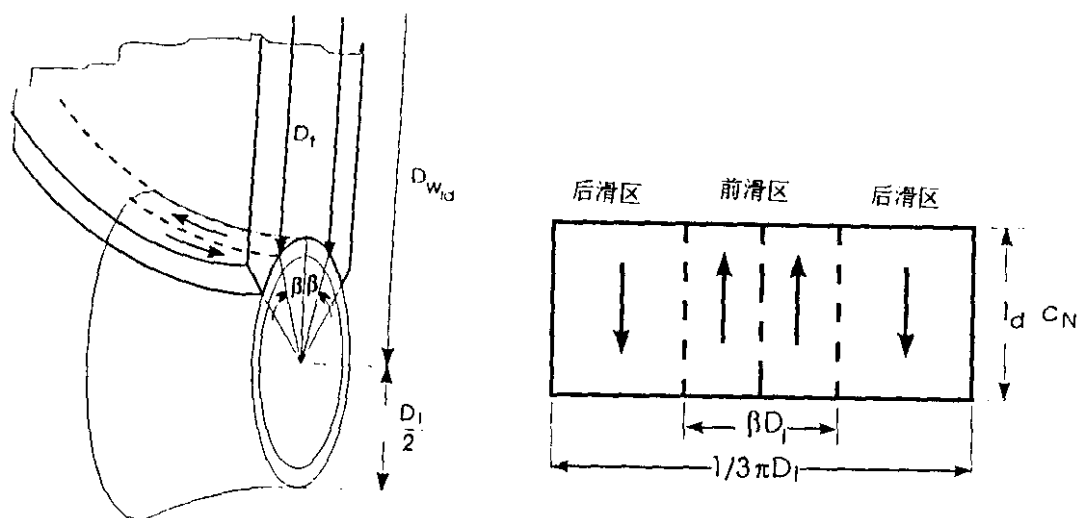


图 2—5 金属与轧辊之间的滑移

如果在孔型的某一点上,该点的线速度恰好与轧件出口速度相等,则在该点金属既没有前滑也没有后滑,该点所对应的轧辊直径即为轧辊工作直径。

轧辊工作直径是一个很重要的参数,它直接影响着轧辊转速。如果确定不准确,会导致前后机架张力关系不准确,影响壁厚精度。

因为影响轧辊工作直径的因素很多,故确定起来有一定难度,目前还没有精确的计算公式。

文献【3】认为,在无张力时,对于一定的轧辊直径,其工作直径近似地保持恒定,其值等于从轧辊中心到 $0.91P$ 那一点的距离 (P 为孔槽高度, $0.91P$ 由孔型中心线量起)。

针对三辊机架而言, $D_g = RR - a - 2 * 0.91(b - \frac{a}{2})$

式中, D_g ——第 i 机架的轧辊工作直径,

RR ——轧辊名义直径,

a ——孔型长半轴,

b ——孔型短半轴。

Stewarts&Lloyds 公司对此式进行过测量,测量结果认为无张力时此式是正确的。当

有张力时此结果偏小【3】。

天津钢管公司在这方面也进行过研究。天津钢管公司引进的是一套 14 架三辊式微张力减径机组。他们采用的是统计的方法。他们总结出轧辊工作直径近似公式为：

$$D_g = RR - y * D_i。$$

式中， y ——无滑移点位置系数。第一架 $y_1 = 0.86$ ，其余各架 $y = 0.96$ 【12】。

D_g ——第 i 机架的工作辊径系数；

RR ——轧辊名义直径；

D_i ——第 i 机架孔型平均直径。

2.2.4 切头长度的确定【3】【4】【5】【10】【11】【13】

同张力减径一样，在微张减过程中，由于对壁厚的变化做到准确控制还比较困难，并且钢管头部、尾端分别在张力建立和张消失的过程中进行轧制，就必然产生钢管端部增厚现象。前部壁厚由最厚降到稳定轧制时的最薄值，尾端又由最薄增加到最厚。这种现象导致在张减工艺和微张减工艺中，切头重量高于其它定减径工艺。

准确确定切头尾长度是无缝钢管生产中的一个重要课题。若切头长度短于应切长度，则影响钢管尺寸精度；若切头长度大于应切长度，则影响金属收得率，影响工厂效益。

影响切头长度的因素有：（1）电机的速度特性。（2）机架间距。（3）来料规格。

（4）总减径率。（5）单机架减径率。

到目前为止，还没有一个专门的微张减切头长度公式，相关文献中介绍的切头公式都是适用于张减机的。

（1）A.A.Плеханов 公式：

$$L = 2C_d \sqrt{\mu_{\Sigma}}$$

式中， L ——切头长度；

C_d ——机架间距；

μ_{Σ} ——张力减径时的总延伸系数。

（2）答里包尔公式：

$$L = \mu_{\Sigma} \cdot 2C_d \cdot \left(\frac{d_0 - d}{d}\right) \left(1 - \frac{S_0 - S}{S_0}\right) + 150$$

式中, S_0 为原料壁厚;

S 为成品壁厚;

C_d 为机架间距;

d_0 为荒管外径;

d 为成品管外径。

(3) 天津无缝钢管厂根据生产积累的数据得出的经验公式:

$$L = k \cdot \mu_{\Sigma} \cdot C_d$$

式中, μ_{Σ} 为总延伸率;

C_d 为机架间距;

k 为切头长度修正系数。

由于不同的公式所考虑的工艺与设备不同, 适用条件也不同, 因此, 按不同公式确定的切头长度相差很大。而且, 由于微张减与张减工艺有很大差别, 因此, 在微张减工艺中, 不能完全照搬上述公式。各个采用微张减的钢管厂都是根据自己的实际情况, 选用合适的公式, 并进行必要的修正。

2.3 本文的研究内容和研究思路

本文的研究内容和研究思路见图 2—6。

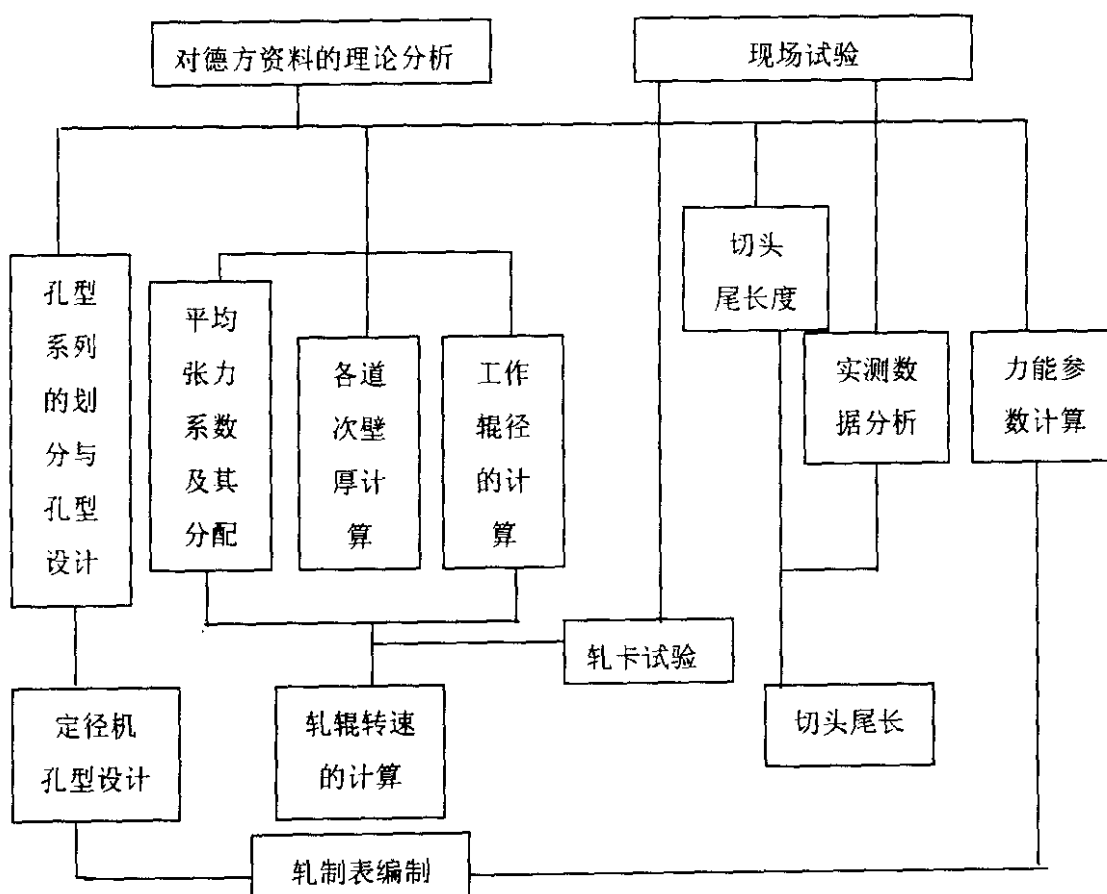


图 2—6 研究内容框图

本文的研究采用理论分析与现场实验相结合的方法。首先全面分析德方提供的 5 个孔型系列的划分方法，各系列参数特征及孔型设计方法，提出了适用于本机组的孔型设计的近似方法；重点分析研究平均张力系数、各道次壁厚计算和工作辊径，确定轧辊转速的计算方法，并与轧卡试验进行了对比分析；其次，通过现场实例数据分析，确定了切尾长度，最后研究了力能参数的计算方法。

3 现有孔型分析

定减径机一般都划分为若干个系列，它是组织生产的主要依据。德方提供了 5 个孔型系列及相应的孔型基本参数（长轴与短轴）。本章着重分析划分孔型系列的依据、各系列的特征并与天津钢管公司 $\Phi 250$ 机组定径机、包钢连轧钢管厂 $\Phi 180$ 定径机和张力减径机进行了比较。最后，对这套孔型系统进行了评价。

3.1 设备特点

3.1.1 轧机参数

型号：MW750J12	机架数量：12 架
入口速度：0.5~0.8 米/秒	入口管径：最大 450mm
轧辊材质：专用球墨铸铁	轧辊硬度：最小 440HV，最大 530HV
轧辊直径（理论）：750mm	轧辊长度：420mm
机架间距：700mm	机架长度：9700mm
轧辊转速：14—35rpm	过载系数：1.6

3.1.2 轧机传动方式

这套轧机采用单机架传动方式，电机功率为：176KW \times 12。12 机架的传动比（见表 3—1）为：

表 3—1 $\Phi 400$ 定径机组各架传动比

机架序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
传动比	48.4733					47.047	45.738	44.385	43.275	42.155		

这种传动方式与天津 $\Phi 250$ mm 机组 14 机架定径机的由一台 750Kw 直流电机和一台 750KW 直流叠加电机组成的集中差速传动相比，其主要优点是调速范围大，适应了生产 $\Phi 177.8$ mm~ $\Phi 431.8$ mm 产品规格的需要，但要有较大的电机功率和硬的特性曲线，以保证轧制时速度平稳。

3.1.3 机架与机座特点

轧机机架为方形，由呈“C”形的两个铸钢件组合而成。轧机为中间剖分式，左右两片完全对称。轧机上有一个驱动轴，其上装有齿形离合器。另外两个轴由驱动轴和齿轮带动。三个轧辊互成 120°，安装在不可调的轧辊轴上。

机座有 12 个机架位置，用来放置轧制机架、输送机架、入口和出口导卫装置。主机座采用导轨式，能快速将机架拉出、推入，并且能快速地将机架定位、夹紧。这大大地减少了换工具时间。装在传动侧的是可自动离合的齿形离合器。当轧机推入机座时，借助于弹力，齿形离合器将轧机的传动轴与齿轮箱的输出轴连接起来。机架可以快速推入、拉出，传动部位也可以实现快速离合。

本微张力定径机有一个特点：可以生产方矩管，即在多架圆孔型机架之后配备两架矩形机架即可生产出热轧方矩形钢管。

3.2 现有孔型分析

3.2.1 孔型系列分析

现有孔型共分为 A、B、C、D、E 5 个系列，其中 A、B、C、D 系列又分为椭圆和圆两种孔型类型，E 系列只有椭圆形孔型。每个孔型系列的特征参数见表 3—2。表中， D_0 为入口荒管直径， D_c 为成品管直径， S_0 —荒管壁厚， S_c —成品管壁厚。

表 3—2 孔型系列特征值

荒管规格	成品外径	O 系列			R 系列			总减径率(%)	平均减径率(%)	机架数	规格数
		S_0 (mm)	S_c (mm)	$D_c S_c$	S_0 (mm)	S_c (mm)	$D_c S_c$				
A 系列 减径率 3% D_0 240mm	177.80	5.7~15.11	5.87~17.45	30.28~10.19	16.51~19.28	19.05~22.23	9.33~8	25.9	2.4	11	10+3
	180.00	5.7~14.81	6~17.00	30~10.59	15.69~25.16	18~40	10~4.5	25.0	2.5	10	16+15
	193.70	6.7~17.22	7.1~19.05	27.28~11.25	18.08~36.37	20.00~40.00	9.69~4.84	19.3	2.4	8	16+8
	194.00	5.7~17.19	6.0~19.00	32.33~10.21	18.09~36.39	20.00~40.00	9.7~4.85	19.2	2.4	8	18+11
	194.50	15.00~	15.80	12.31				19.0	2.4	8	1+0
	196.90	14.40	15.11	13.04				18.0	2.6	7	1+0
	203.00	5.7~17.57	6.0~19.00	33.83~10.68	18.50~37.16	20.00~40.00	10.15~5.075	15.4	2.6	6	18+03
	215.90	18.31~	19.20	11.24				10.0	2.5	4	1
	219.00	5.8~7.7	6~8	36.5~27.38				8.8	2.2	4	4
	219.10	6.1~19.81	6.35~20.62	34.5~10.63	21.32~38.50	22.2~40	9.87~5.48	8.7	2.2	4	31+10
	222.00	10.70	11.00	20.18				7.5	1.9	4	1
	228.40	13.95	14.20	16.08				4.8	1.6	3	1
B 系列 减径率 2.30% D_0 290mm	232.00	10.4~15.2	11~16	21.09~14.5				20.0	2.0	10	2
	242.00	15.20	16.00	15.13				16.6	2.1	8	1
	244.00	20.50	22.20	10.99				15.9	2.0	8	1
	244.50	6.7~20.50	7.10~22.2	34.44~11.01	23.09~37.03	25~40	9.7~6.11	15.7	2.0	8	17+6
	245.00	16.75	17.50	14.00				15.5	1.9	8	1
	250.00	12.00~23.35	12.5~25.00	20~10				13.8	2.0	7	2
	253.40	13.60	14.20	17.85				12.6	2.1	6	1
	254.40	20.91	22.20	11.46				12.3	2.0	6	1
	256.00	26.46	28.00	9.14				11.7	2.0	6	1
	257.00	15.40	16.00	16.06				11.4	1.9	6	1
	260.00	23.80	25.00	10.40	28.57	30.00	8.67	10.3	2.1	5	1+1
	264.00				30.71	32.00	8.25	9.0	1.8	5	1
	265.00	12.1~19.22	12.5~20.0	21.2~13.25				8.6	1.7	5	2
	266.00				26.96	28.00	9.50	8.3	2.1	4	1
	269.40	21.51	22.00	12.25				7.1	1.8	4	1
	269.90	21.04	22.27	11.89				6.9	1.7	4	1
	270.00				29.10	30.00	9.00	6.9	1.7	4	1
	272.00	15.60	16.00	17.00	35.06	36.00	7.56	6.2	2.1	3	1+1
	273.00	6.20~24.77	6.35~25.4	43~10.75	27.31~39.03	28.00~40.00	9.75~6.83	5.9	2.0	3	34+7
	274.00				31.27	32.00	8.56	5.5	1.8	3	1
	275.00	13.9~24.47	14.20~25.00	19.37~11				5.2	1.7	3	3
C 系列 减径率 2.10% D_0 345mm	280.00	18.12	20.00	14.00	36.31	40.00	7.00	18.8	1.9	10	1+1
	281.00	25.42	28.00	10.04				18.6	1.9	10	1
	282.00				32.77	36.00	7.83	18.3	1.8	10	1
	284.40	20.27	22.20	12.81				17.6	1.8	10	1
	285.00				27.44	30.00	9.50	17.4	1.7	10	1
	289.00				29.47	32.00	9.03	16.2	1.8	9	1
	290.00	16.5~23.05	17.5~25	16.57~11.6	36.93~	40.00	7.25	15.9	1.8	9	2+1
	295.00	13.40	14.20	20.77				14.5	1.8	8	1

	296.00	26.08	28.00	10.57				14.2	1.8	8	1
	297.00				33.61	36.00	8.25	13.9	1.7	8	1
	298.40	8~12.80	8.46~13.56	35.27~22				13.5	1.9	7	5
	298.50	14~20.38	14.78~21.80	20.2~13.7				13.5	1.9	7	2
	299.40	20.79	22.20	13.49				13.2	1.9	7	1
	300.00				28.14	30.00	10.00	13.0	1.9	7	1
	302.00	15.20	16.00	18.88				12.5	1.8	7	1
	304.00				30.02	32.00	9.50	11.9	1.7	7	1
	305.00	23.63	25.00	12.20	37.85	40.00	7.63	11.6	1.9	6	1-1
	311.00	26.73	28.00	11.11				9.9	2.0	5	1
	312.00				34.43	36.00	8.67	9.6	1.9	5	1
	314.40	21.30	22.20	14.14				8.9	1.8	5	1
	315.00	28.82	30.00	10.50				8.7	1.7	5	1
	317.00	15.50	16.00					8.1	1.6	5	1
	319.00				30.93	32.00	9.96	7.5	1.9	4	1
	320.00	24.20	25.00	12.80	38.74	40.00	8.00	7.2	1.8	4	1-1
	323.80	6.20~30.92	6.35~31.75	51~10.20				6.1	1.5	4	23
	323.90	6.94~29.22	7.10~30.00	45.62~10.797	31.23~38.97	32.00~40.00	10.12~8.10	6.1	1.5	4	15-3
	325.00	7.31~29.27	7.50~30.00	43.3~10.83	31.22~39.04	32.00~40.00	10.16~8.13	5.8	1.9	3	22-6
	326.00	27.36	28.00	11.64				5.5	1.8	3	1
	327.00				35.23	36.00	9.08	5.2	1.7	3	1
	328.00	9.35~24.95	9.53~25.40	34.42~12.91				4.9	1.6	3	3
	329.40	21.80	22.20	14.84				4.5	1.5	3	1
	330.00	29.50	30.00	11.00				4.3	1.4	3	1
	332.00	15.79	16.00	30.75				3.8	1.9	2	1
D系列 减径率 1.8% D ₀ 395mm	334.00	29.60	32.00	10.44				15.4	1.5	10	1
	335.00	16.50~23.15	17.50~25.00	19.14~13.4	37.07	40.00	8.38	15.2	1.5	10	2-1
	339.70	8.00~12.4	8.38~13.06	47.14~30.25				14.0	1.6	9	5
	340.00	19.00	20.00	17.00				13.9	1.5	9	1
	341.00	26.16	28.00	12.18				13.7	1.5	9	1
	342.00				33.69	36.00	9.50	13.4	1.7	8	1
	344.40	21.00	22.20	15.51				12.8	1.6	8	1
	345.00	28.19	30.00	11.50				12.7	1.6	8	1
	349.00	30.25	32.00	10.91				11.6	1.7	7	1
	350.00	23.66	25.00	14.00	37.88	40.00	8.75	11.4	1.6	7	1-1
	351.00	7.6~32.23	8~34	43.87~10.32	33.18~37.93	35~40	10.03~8.77	11.1	1.6	7	24-4
	355.00	16.75	17.50	20.29				10.1	1.7	6	1
	355.60	6.10~30.53	6.35~32.00	56~11.11	34.35~38.17	36.00~40.00	9.88~8.89	10.0	1.7	6	37-2
	356.00	26.72	28.00	12.71				9.9	1.6	6	1
	357.00				34.41	36.00	9.92	9.6	1.6	6	1
	360.00	19.25~28.79	20~30	18~12				8.9	1.5	6	2
	364.00	30.88	32.00	11.36				7.8	1.6	5	1
	364.40	21.50	22.20	16.41				7.7	1.5	5	1
	365.00				38.66	40.00	9.13	7.6	1.5	5	1
	365.10	22.22	23.00	15.88				7.6	1.5	5	1
	370.00	24.32	25.00	14.80				6.3	1.6	4	1
	372.00	35.12	36.00	10.33				5.8	1.5	4	1
	375.00	17.15	17.50	21.43				5.1	1.7	3	1
	376.00	27.45	28.00	13.43				4.8	1.6	3	1
	377.00	8.45~35.35	9.00~36.00	41.89~10.72	37.31~39.28	38~40	9.92~9.425	4.6	1.5	3	23-2
	380.00	19.74~29.60	20~30	19~12.67	39.43	40.00	9.50	3.8	1.3	3	1
E系列 减径率 1.80% D ₀ 450mm	384.00	29.72	32.00	12.00				14.7	1.6	9	1
	384.40	21.00	22.20	17.32				14.6	1.6	9	1
	390.00	23.39	25.00	15.60				13.3	1.7	8	1

392.00	33.79	36.00	10.89				12.9	1.6	8	1
396.00	26.40	28.00	14.14				12.0	1.7	7	1
400.00	19~37.92	20~40	20~10				11.1	1.6	7	3
402.00	8.6~38.02	9~40	44.67~10.05				10.7	1.5	7	25
404.00	30.47	32.00	12.63				10.2	1.7	6	1
404.40	21.25	22.20	18.22				10.1	1.7	6	1
406.40	6.1~38.22	6.35~40	6.4~10.16				9.7	1.6	6	39
410.00	23.98	25.00	16.40				8.9	1.5	6	1
412.00	34.63	36.00	11.44				8.4	1.7	5	1
416.00	27.05	28.00	14.86				7.6	1.5	5	1
420.00	19.5~38.84	20~40	21~10.5				6.7	1.7	4	3
424.00	31.22	32.00	13.25				5.8	1.4	4	1
424.40	21.75	22.20	19.12				5.7	1.4	4	1
426.00	8.80~39.12	9~40	47.33~15.65				5.3	1.8	3	25
431.80	23.05	23.40	18.45				4.0	1.3	3	1

由上表可以看出，该孔型系列的主要特征是：(1) 孔型系列划分的主要依据首先是入口管径的大小，与 A、B、C、D、E 五大系列对应的入口管径分别是 240 mm，290 mm，345 mm，395 mm，450 mm。其次是单机架减径率，与 A、B、C、D、E 对应的减径率分别是 3%，2.3%，2.1%，1.8%，1.8%，详见表 3—3。

表 3-3 总减径率及平均减径率与孔型的关系

孔型系列	AO、AR	BO、BR	CO、CR	DO、DR	EO
总机架数 N	11	10	10	10	9
最大总减径率 $\sum \rho_{\max}(\%)$	25.9	20.0	18.8	15.4	14.7
粗机架减径率 %	3	2.3	2.1	1.8	1.8
平均减径率 $\bar{\rho}(\%)$	2.4	2.0	1.9	1.5	1.6

(2) 每个孔型系列又分为椭圆孔型 (O) 和圆型孔型 (R) 两大类，分别适用于生产薄壁管和厚壁管。生产某一规格时，具体是选择原孔型还是椭圆孔型，关键是看其外径与直径的比值，即径壁比 (D/S) 是选择原孔型还是椭圆孔型的一个判据，而且是一个唯一判据。大体上以 10 为界，具体取值范围见下表 (3—4)：

表 3-4 D/S 与椭圆、圆孔型的选择

孔型种类	D/S 比值范围							
	A	B			C		D	E
椭圆系 (O)	>10.15	>9.7	=9.14	>9.75	>10.00	>10.156	>10.03	全是 E10
圆系列 (R)	≤10.15	≤9.7		≤9.75	≤10.00	≤10.156	≤10.03	无

(3) 各系列使用的机架数不同, 如表 3—2 所示。A、B、C、D、E 各系列最多适用的机架数分别为 11、10、10、10、9; 最少适用的机架数分别为 3、3、2、3、3。

(4) 各系列所能生产的产品规格数不同。表 3—2 最后一列“规格数”中, 前一个数字是用椭圆孔型生产的薄壁管规格数, 后一个数字是用圆孔型生产的厚壁管规格数。

3.2.2 孔型参数分析

三辊定径机孔型结构如图 3—1 所示, 参数有:

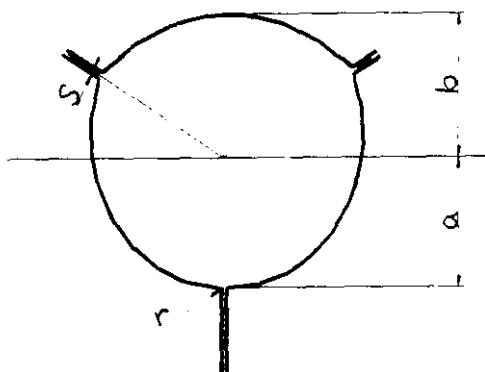


图 3—1 三辊定径机孔型结构图

a —孔型长半轴, mm;

b —孔型短半轴, mm

d —孔型平均直径, mm, $d = a + b$;

s —辊缝, $s = 0.6 \sim 0.8$ mm;

r —辊缘半径, $r = 2$ mm;

α_i —孔型椭圆度, $\alpha_i = \frac{a_i}{b_i}$;

e_i —辊面弧线中心相对于孔型中心的偏心距, mm, $e_i = \frac{a_i^2 - b_i^2}{2b_i - a_i}$;

R —辊面圆弧半径, mm, $R_i = \frac{a_i^2 + b_i^2 - a_i b_i}{2b_i - a_i}$;

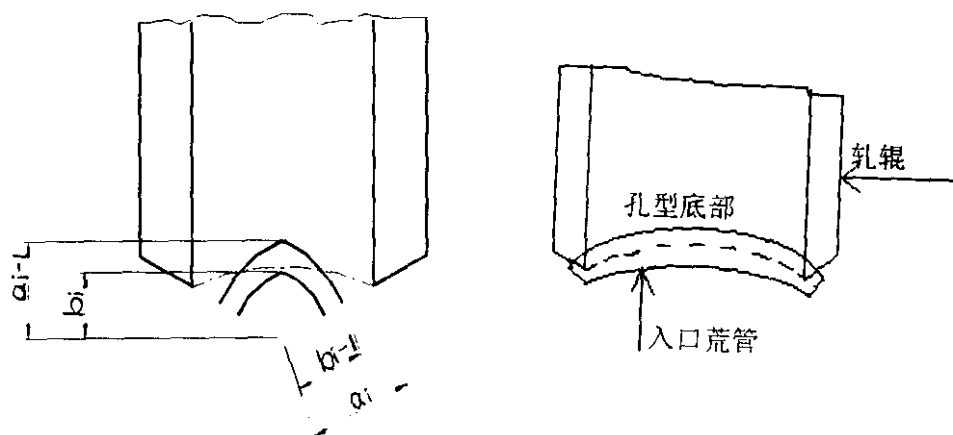
c_i —宽展量, mm, $c_i = a_i - b_{i-1}$;

ξ_i —宽展系数, $\xi_i = \frac{b_{i-1}}{a_i}$

h_i —压下量, mm, $h_i = a_{i-1} - b_i$;

λ_i —压下系数, $\lambda_i = \frac{h_i}{c_i}$

在同一系列中, 当孔型外径相同时, 圆孔型和椭圆孔型的长半轴和短半轴是不同的, 见图 3—2。



椭圆孔型: $a_i - b_{i-1} > 0$

圆孔型: $a_i - b_{i-1} < 0$

图 3—2 圆孔型和椭圆孔型的定义

在德方提供的资料中, 只给出了 a_i, b_i, d_i, α_i , 而没有给出孔型设计分析所必须的 $R_i, c_i, \xi_i, h_i, \lambda_i, e_i$ 值。因此, 为了深入消化德方提供的孔型设计方法, 下面分椭圆孔型和圆孔型对全部参数进行分析。

孔型配置的说明: (1) 包钢 400 定径机组共有 12 个机架位置, 生产圆管时最多用 11 架, 另外一个机架位置为为生产方矩形管所预留。(2) 机架分粗轧机架和精轧机架两种。(3) 机架号码共有 5 位: 第一个大写字母表示孔型系列, 第二个大写字母表示孔型种类。后三位为阿拉伯数字。当阿拉伯数字的最后一位为 0 时, 表示该机架为粗轧机架; 当最后一位不为 0 时, 表示该机架为精轧机架。精轧机架号码的首位数字表示生产该规格所使用的粗轧机架的数量。

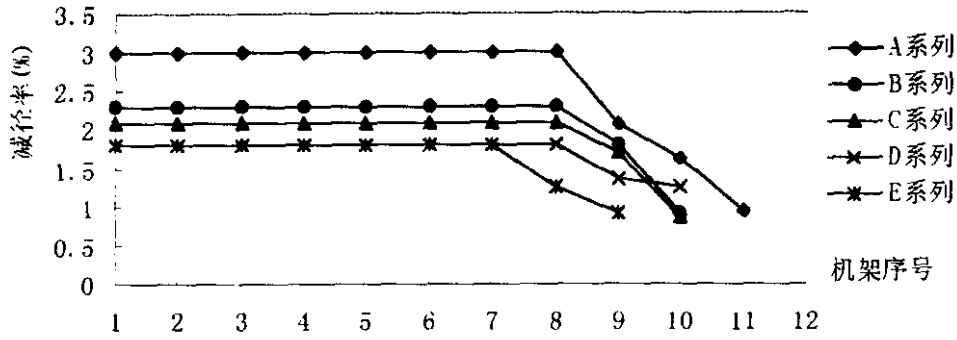
每个系列规格很多, 为有代表性, 各系列均采用所用机架数最多的规格为代表规格进行分析。

3.2.2.1 椭圆孔型参数分析

椭圆孔型系列的参数见附录 1。

下面根据附录 1 中各参数的分布进行分析, 目的在于找出不同系列各参数的变化规律, 为孔型设计提供依据。各系列的代表规格均为适用机架数最多的规格。

(1) 减径率 (图 3—3):



3—3 减径率分配曲线图

对每个系列而言，粗轧机架均采用相同的减径率，精轧机架逐渐减小。最后一架采用很小的减径率。

在五个孔型系列中，随着入口管径的增大，粗轧机架减径率由大至小。A系列入口管径最小，粗轧机架减径率达到了3%，E系列入口管径最大，粗轧机架减径率只有1.8%。

从图中还可以看出：整个机组所有规格的减径率在0.7—3.0%之间波动。

(2) 椭圆度 (图 3—4)

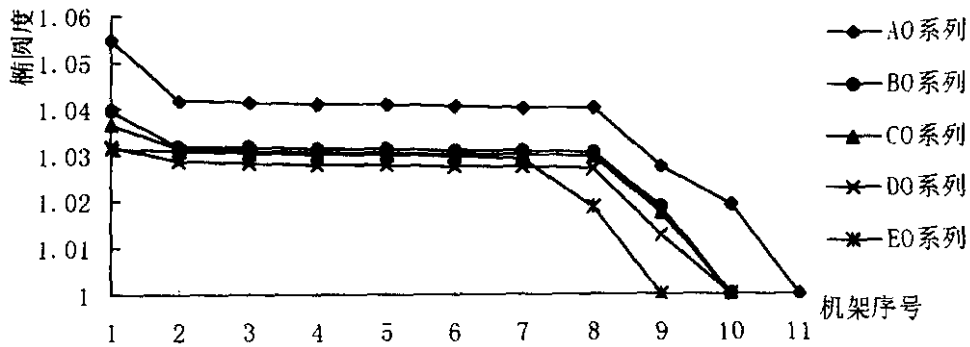


图 3—4 椭圆度分布曲线

由图 3—4 可以看出，入口机架孔型椭圆度最大，这是为了适应来料尺寸的波动。在随后的粗轧机架中孔型椭圆度基本不变。精轧机架的孔型椭圆度逐渐减小，成品机架的椭圆度为1。另外，随着入口管径的增大，同一系列入口机架与其它粗轧机架的孔型椭圆度差值减小。整个机组规格范围内，椭圆度在1—1.06范围内波动。

(3) 宽展系数 (图 3—5)

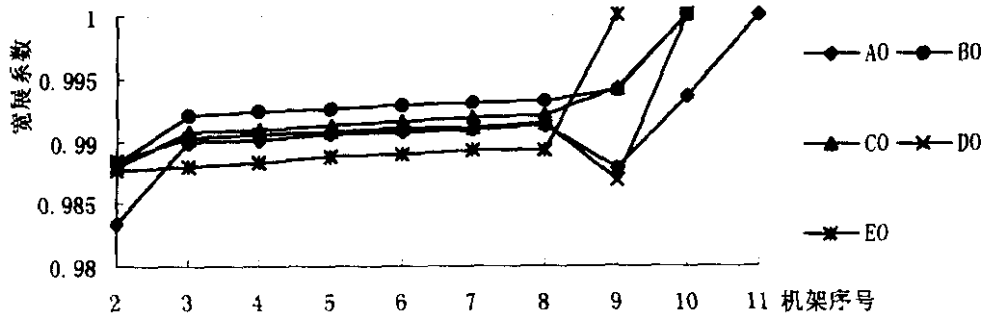


图 3—5 宽展系数分布曲线图

从图中可以看出，椭圆孔型宽展系数小于 1。在粗轧机架范围内，宽展系数逐渐增大，近似为水平直线。至精机架时，宽展系数快速增大至 1。

(3) 宽展量 (图 3—6)

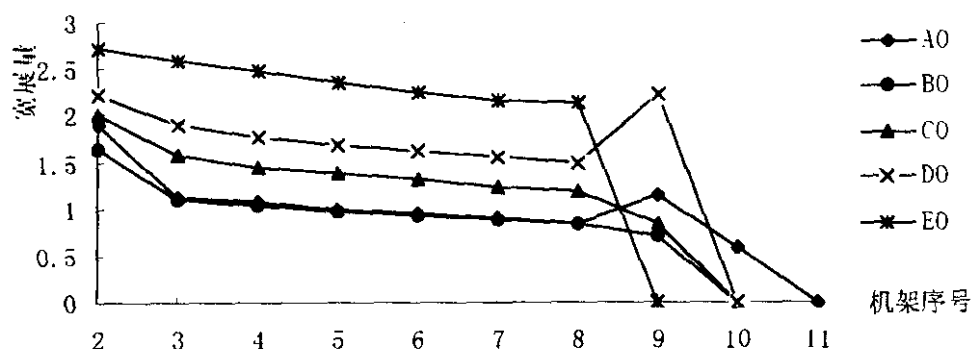


图 3—6 宽展量分布曲线图

从图中可以看出，每个系列的第一架均采用较大的正宽展，宽展量约在 1.6~2.8mm 左右。中间机架宽展量逐渐减小，近似呈一条斜线，并且随着入口管径的增大，同一机架所对应的宽展量也依次增大，最后一架宽展量为零。

(5) 压下量 (图 3—7)

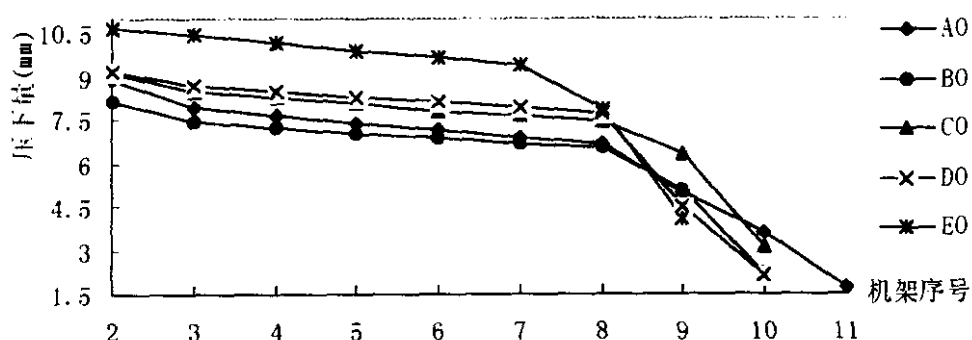


图 3—7 压下量分布曲线

压下量与宽展量应成正比，即压下量较大时宽展量也应较大。从图 3—7 正好可以看出这种规律。压下量的变化规律与宽展量的变化规律基本相似。第一架采用较大的压下量，随后机架的压下量逐渐减小。精轧机架的压下量在 2~3mm 左右。

(6) 压下系数 (图 3—8)

从图 3—8 可以看出，第一架选用较小的压下系数，中间机架的压下系数逐渐增大。从 A0~E0 系列，随着入口管径的增大，相应的压下系数依次减小。

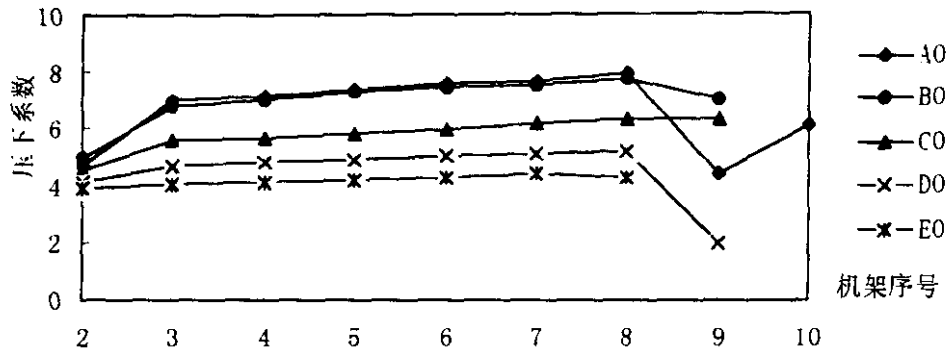


图 3—8 压下系数分布曲线

(10) 偏心距 (图 3—9)

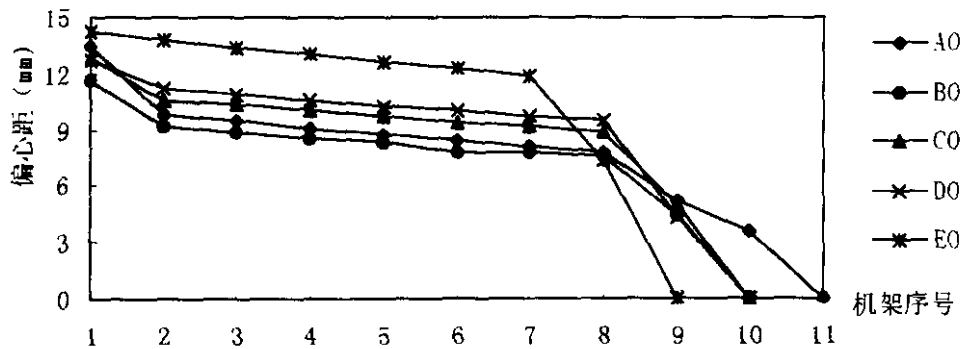


图 3—9 偏心距分布曲线图

由孔型加工原理可知（第 5 章将进行介绍），在同一系列中，偏心距直接决定了孔型的椭圆度，偏心距越大，孔型的椭圆度越大。由图 3—9 可以看出，在同一系列中，偏心距逐渐减小，但在粗机架范围内，减小比较缓慢，在精机架阶段减小比较快。这和同一系列中孔型椭圆度的变化规律基本相同。由 A~E 系列，随着入口管径的增大，偏心距逐渐减小。这说明孔型椭圆度并不完全取决于偏心距，还与偏心距与孔型尺寸的相对大小直接相关。

3.2.2.2 圆孔型系列孔型参数分析

圆孔型孔型系列的参数见附录 1 表 6~表 9。

圆孔型孔型参数分析：

(1) 减径率 (图 3—10)

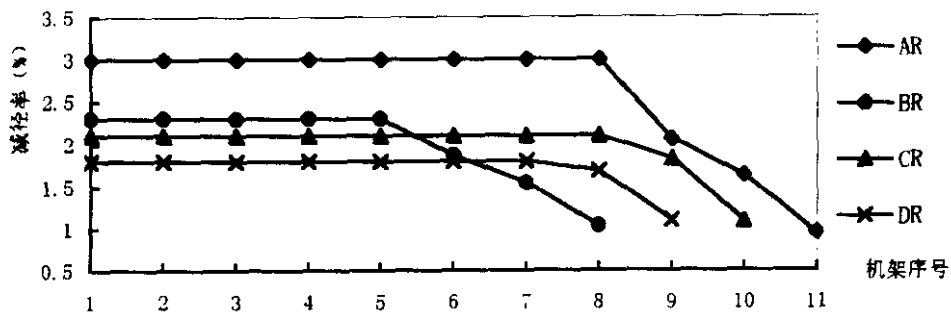


图 3—10 减径率曲线分布图

圆孔型减径率无论在数值上还是变化规律上与椭圆孔型都完全相同。

(2) 椭圆度 (图 3—11)

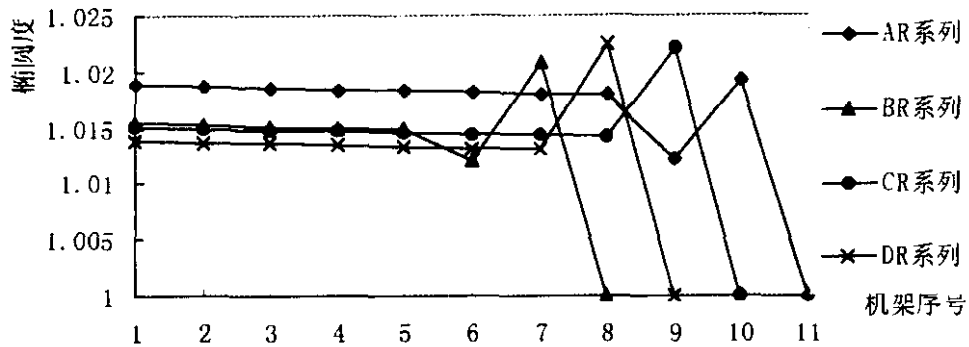


图 3—11 椭圆度曲线图

将图 3—11 与图 3—4 比较可以看出：①椭圆孔型的椭圆度比圆孔型的椭圆度大。②从 A—E，随着入口管径的增大，同一机架位置所对应的椭圆度依次减小。③在椭圆孔型中，第一架孔型与第二架孔型的椭圆度差值比在圆孔型中的大。④在圆孔型系列中，孔型椭圆度在精轧机架部分存在明显的起伏，而在椭圆孔型中，精轧机架椭圆度是均匀减小的。

(3) 宽展量 (图 3—12)

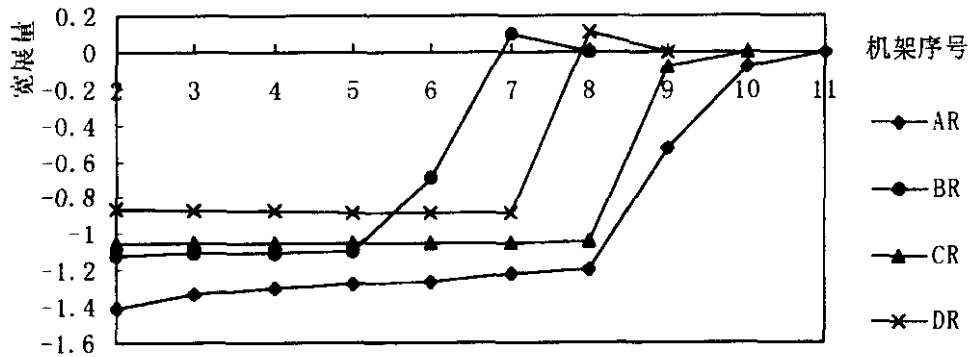


图 3—12 宽展量曲线图

从图 3—12 可以看出，除个别精轧机架的宽展量大于 1 而外，整个圆孔型系列的宽展量都为负值。AR~DR 系列中间机架宽展量逐渐减小。终轧机架宽展量为零。从 AR~DR，随着生产管径的增大，同一机架位置所对应的宽展量也依次减小。

(4) 宽展系数 (图 3—13)

圆孔型的宽展系数大于 1。在粗轧机架范围内，宽展系数逐渐增大，近似为一直线。至精轧机架时，宽展系数逐渐减小，终轧机架宽展系数为 1。从 AR~DR，随着生产规格的增大，同一

机架位置所对应的宽展系数相应减小。

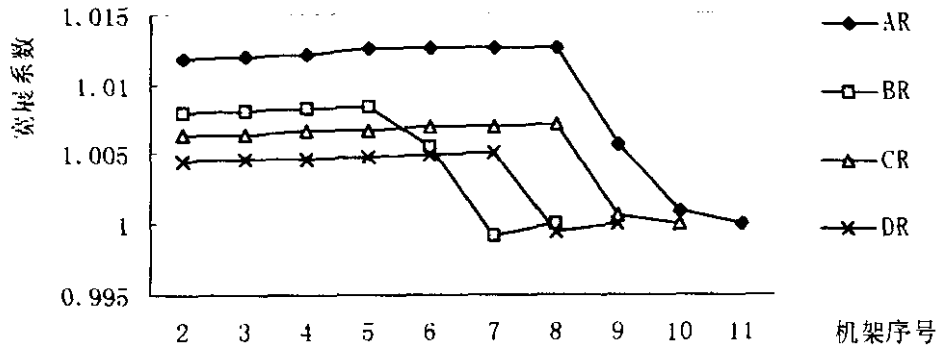


图 3—13 宽展系数曲线图

(5) 压下量 (图 3—14)

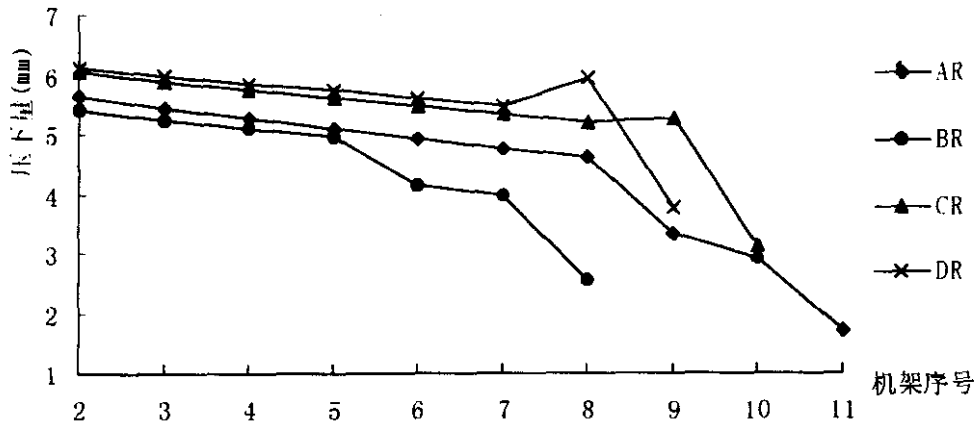


图 3—14 压下量曲线图

由图 3—14，第一架采用了较大的压下量。在中间机架，压下量逐渐减小。终轧机架的压下量最小，在 1.6~3.4mm 之间波动。

(6) 压下系数 (图 3—15)

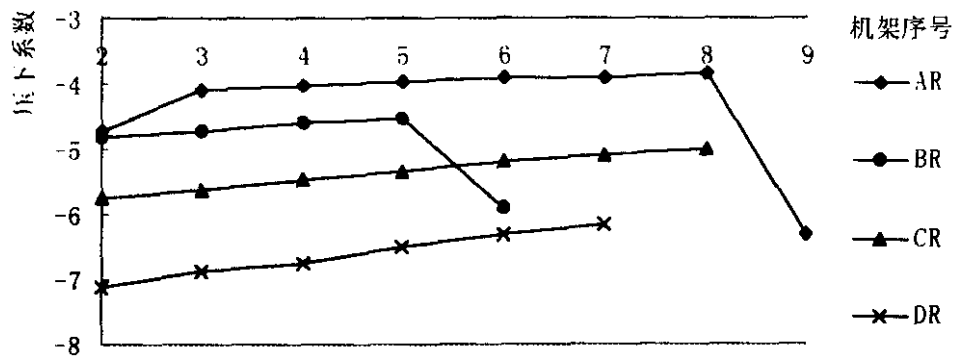


图 3—15 压下系数曲线图

由图 3—15 可以看出，圆孔型的压下系数为负值。第一架选用绝对值较大的压下系数，且中间机架的压下系数逐渐减小。从 AR~DR，同一机架位置所对应的压下系数逐渐增大。

3.2.2.3 同一系列中因规格不同导致机架数量不同时孔型参数的变化趋势

在同一孔型系列中，入口毛管直径是相同的，轧制不同规格的成品管时，必须采用不同数量的机架。以入口管径为 $\Phi 240\text{mm}$ 的A系列为例，生产不同规格时所使用的机架数有所不同，见表3—5。

表 3—5 A 系列生产不同规格时所需的机架数

规格	177.8	180	193.7	194	194.5	196.9	203	215	219	219.1	222	228.4
架数	11	10	8	8	8	7	6	4	4	4	4	3

下面以椭圆孔型为例分析在这种情况下孔型参数的变化趋势。

(1) 减径率 (图 3—16)

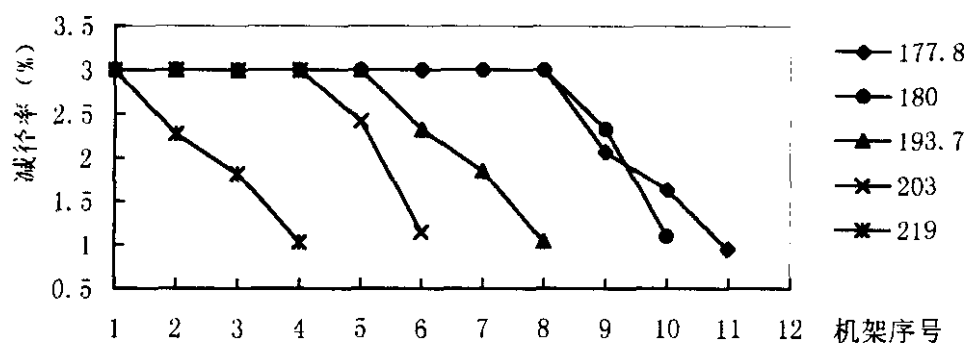


图 3—16—A 系列

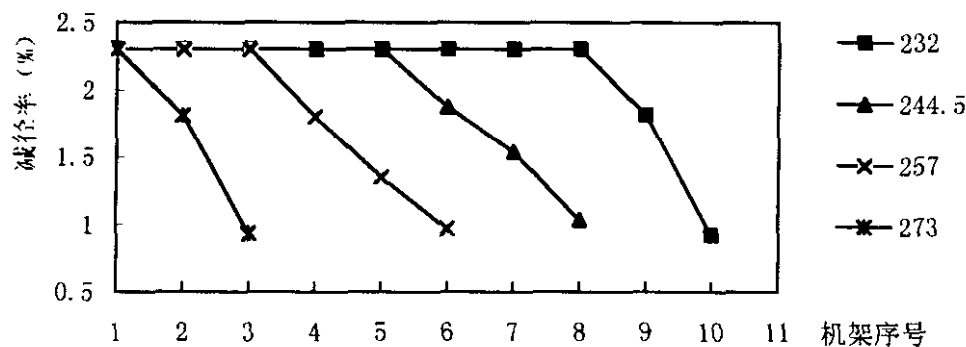


图 3—16—B 系列

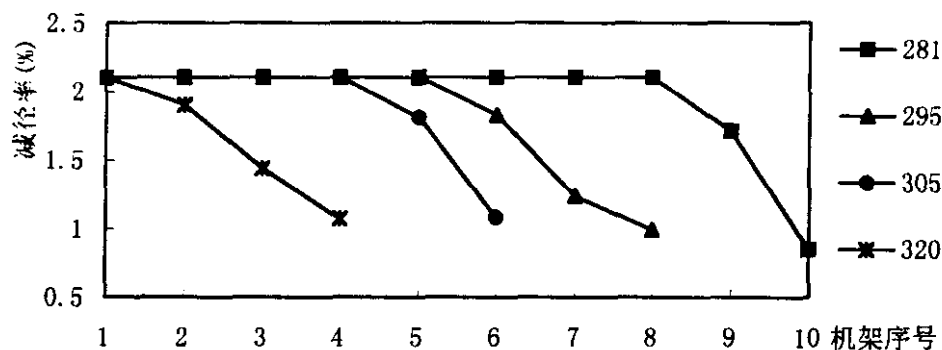


图 3—16—C 系列

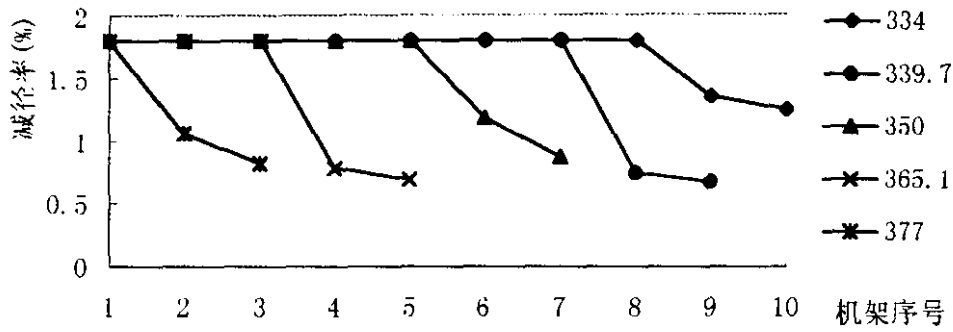


图 3—16—D 系列

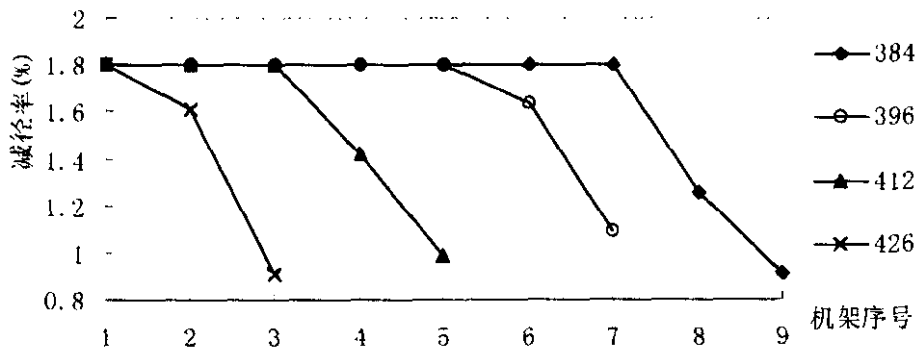


图 3—16—E 系列

由图 3—16 可以看出，在同一系列中，因规格不同导致机架数量不同时，减径率分配上有如下特点：（1）在轧制不同的成品管时，根据规格要求，从入口机架开始，选定不同数量的粗轧机架，然后配上 2~3 架精轧机架。因此，粗轧机架的减径率维持原先的数值不变。（2）为了保证成品质量，精轧机架减径率逐渐减小，均采用较小的减径率，特别是终轧机架，均维持在 1% 左右。（3）在同一系列中，每个规格精机架减径率的递减速率相差不大，精轧段减径率曲线大体上平行。

（2）椭圆度（图 3—17）

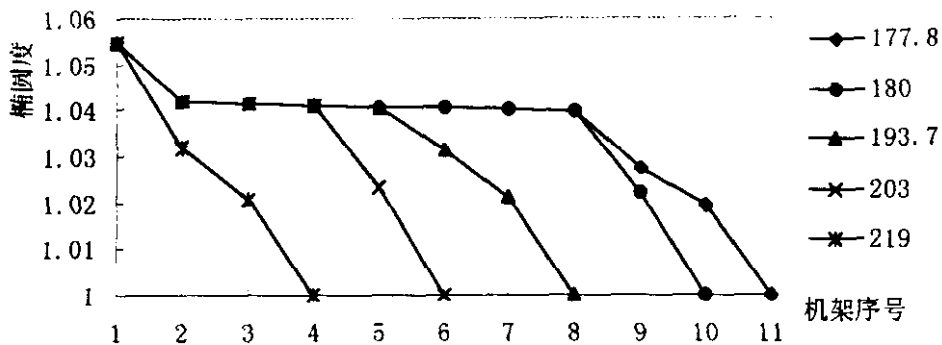


图 3—17—A 系列

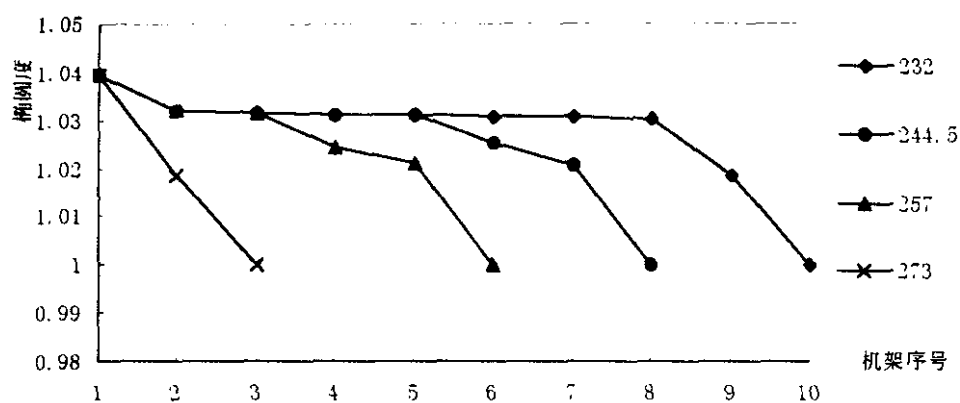


图 3—17—B 系列

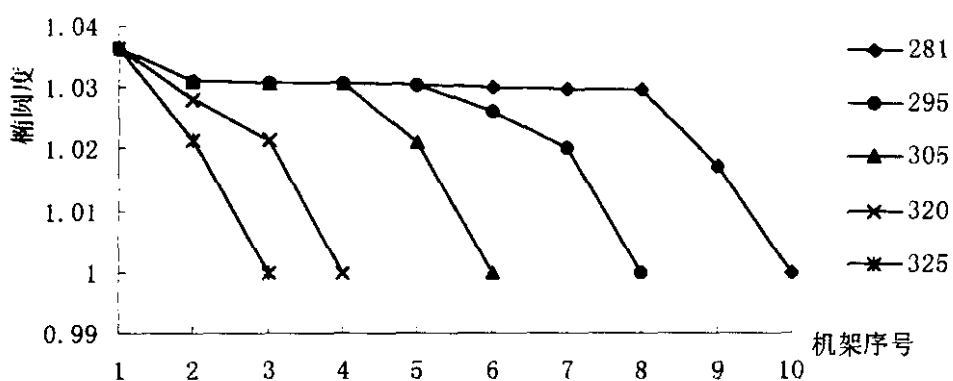


图 3—17—C 系列

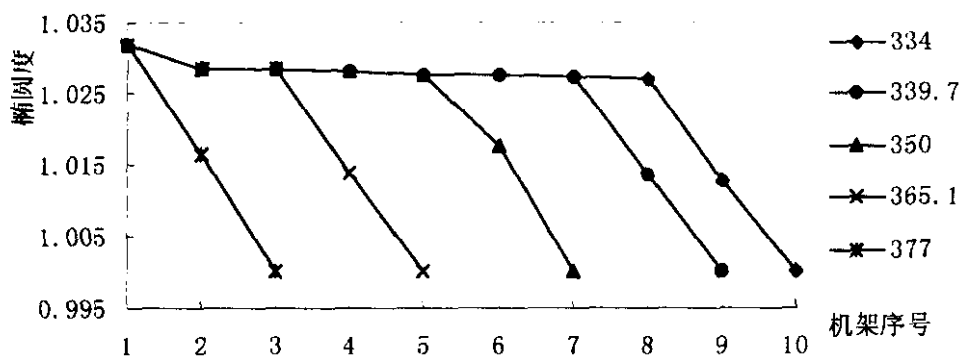


图 3—17—D 系列

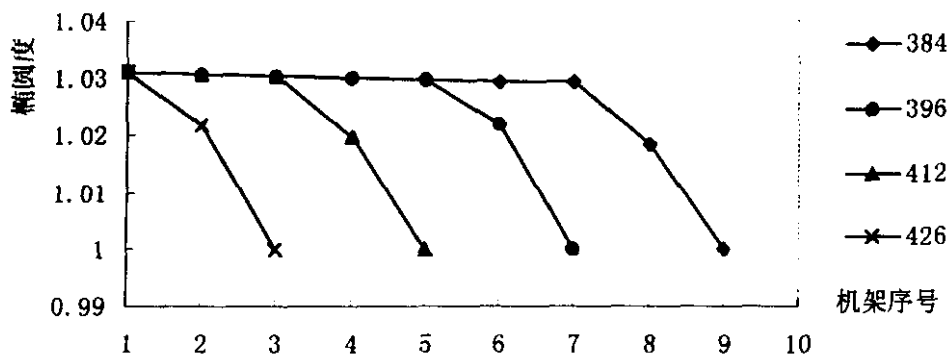


图 3—17—E 系列

由图中可以看出：(1) 每个系列精轧机架均为 2~3 架，采用较小的椭圆度。随着孔型的逐渐归圆，椭圆度逐渐减小。终轧机架椭圆度为 1。(2) 在每个系列中，各个规格精轧段椭圆度变化曲线都基本平行，变化速率基本相等。

3) 宽展系数 (3—18)

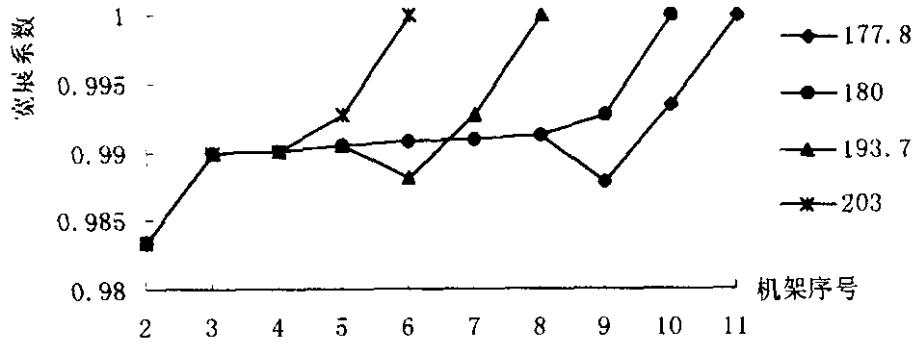


图 3—18—A 系列

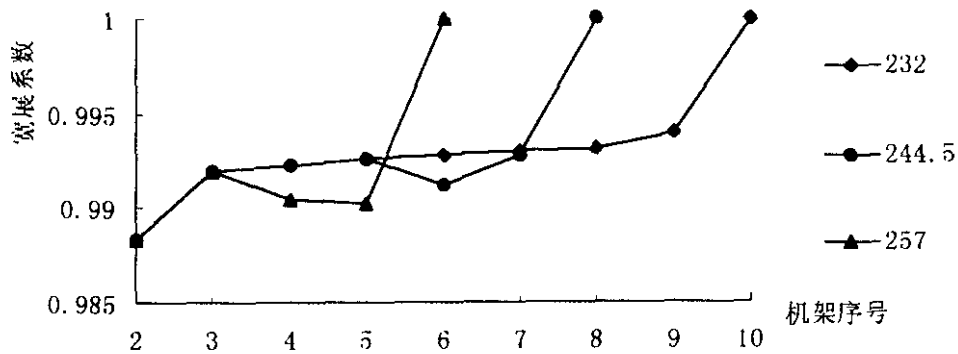


图 3—18—B 系列

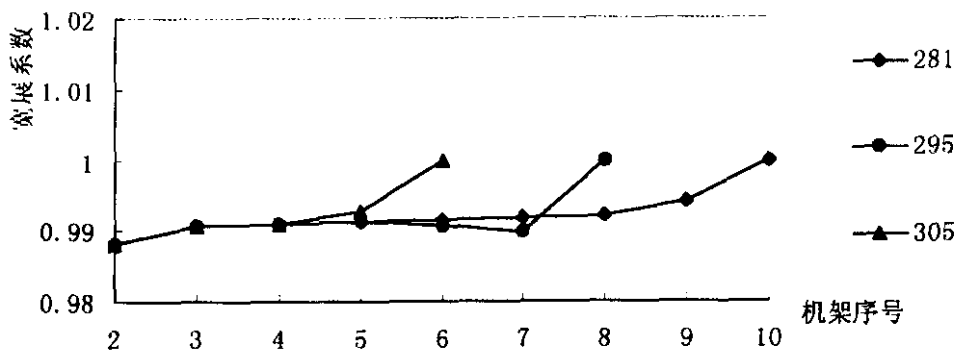


图 3—18—C 系列

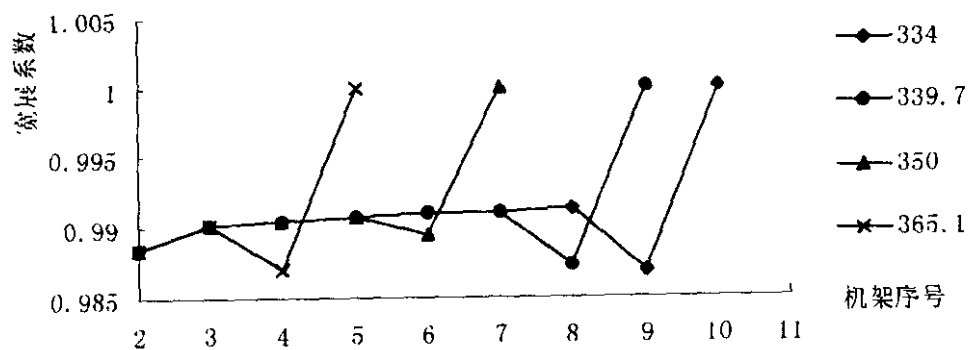


图 3—18—D 系列

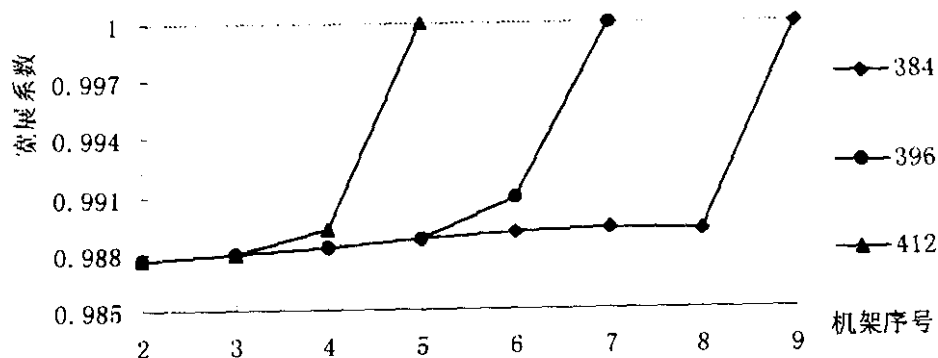


图 3—18—E 系列

由图中可以看出：(1) 从前到后，每个系列各个规格宽展系数都是逐渐增大，精轧机架宽展系数快速增大。终轧机架宽展系数均为 1。(2) 同一系列中，各个规格精轧段的宽展系数曲线基本平行。

3.3 不同类型定径机组孔型参数的比较

为了深入消化德方孔型参数的特点，本文选用了包钢无缝厂 $\Phi 180$ MINI—MPM 机组 12 架定径机（因西公司）、天津钢管公司 $\Phi 250$ 机组 14 架定径机（德马克·米尔）与包钢 $\Phi 400$ 机组定径机进行对比分析。

3.3.1 孔型系列的比较（见表 3—6）

表 3—6 $\Phi 250$ 机组和 180 机组的孔型特征参数

机组名称	孔型系列	入口管径	减径率%	成品外径	壁厚 mm	D/S	摘要
天津钢管公司定径机组	AO	173.4	3.1 (max)	114.3	4.54~13.62	28.18~8.39	外径: 114.3~273 壁厚: 4.54~40.4 D/S: 6.17~42.92
				140.4	6.26~10.64	22.42~13.2	
				141.3	4.83~19.24	29.25~7.34	
				153.7	14.14~17.2	10.87~8.95	
				159	6.36~25.25	25~6.3	
				168.3	4.83~27.27	34.84~6.17	

包钢 180 定径机组	AM	225.8	1.7 (max)	177.8	24.24	7.33	外径: 168~245.6 壁厚: 6.3~25 D/S: 6.72~38.98
				178.7	6.98~13.86	25.6~12.89	
				194.5	16.16~20.2	12.04~9.63	
				219.1	5.15~35.35	42.54~6.2	
	AR	281	1.34 (max)	232	26.26~30.3	7.66	
				244.5	26.26~30.3	9.31~8.67	
				273	6.36~40.4	42.92~6.76	
				168	6.3~25	26.67~6.72	
	B	255	4.39 (max)	178.7	7.1~25	25.17~7.15	
				180	7.1~25	25.35~7.2	
				194.5	7.1~25	27.39~7.78	
				215.9	7.1~25	30.41~8.64	
				219.1	7.1~25	30.86~8.74	
				220.22	7.1~25	31.02~8.81	
				244.5	6.3~25	38.81~9.78	
				245.6	6.3~25	38.98~9.82	

由表 3—6, $\Phi 180$ 定径机组只有一个圆孔型系列, 对应一种入口荒管; $\Phi 250$ 定径机组有三个孔型系列, 对应三种入口荒管, 每个系列没有再划分椭圆和圆孔型。

3.3.2 孔型参数的比较

为了增加可比性, 本文选用 $\Phi 250$ 定径机组中的 AM 系列(代表规格 $\Phi 177.8$, 入口管径 $\Phi 225.8$), $\Phi 180$ 定径机组(代表规格 $\Phi 168$, 入口管径 $\Phi 255$)与包钢 $\Phi 400$ 定径机组中的 AR 系列, AO 系列(代表规格 $\Phi 177.8$, 入口管径 $\Phi 240$)进行比较。

$\Phi 180$ 定径机组, $\Phi 250$ 定径机组相关参数见表 3—7, 表 3—8, $\Phi 400$ 机组的相关参数见附录 1。

表 3—7 $\Phi 250$ 机组 AM 系列

入口管径 $\Phi 225.8\text{mm}$ 。

成品规格	机架号码	孔型直径 D	长半轴 a	短半轴 b	椭圆度 α	宽展量 c	宽展系数 ε	减径率 ρ
$\Phi 177.8$	0100	221.96	111.88	110.08	1.0164			1.7
	0200	218.19	109.97	108.22	1.0162	-0.11	1.0010	1.7
	0300	214.48	108.1	106.38	1.0162	-0.12	1.0011	1.7
	0400	210.83	106.26	104.57	1.0161	-0.12	1.0011	1.7
	0500	207.25	104.44	102.81	1.0159	-0.13	1.0012	1.7
	0600	203.73	102.67	101.06	1.0158	-0.14	1.0014	1.7
	0700	200.26	100.91	99.35	1.0158	-0.15	1.0015	1.7
	0800	196.86	99.19	97.67	1.0157	-0.16	1.0016	1.7
	0900	193.51	97.50	96.01	1.0156	-0.17	1.0017	1.7
	1000	190.22	95.84	94.38	1.0155	-0.17	1.0018	1.7
	1100	186.99	94.21	92.78	1.0154	-0.17	1.0018	1.7
	1200	183.81	92.61	91.20	1.0154	-0.17	1.0018	1.7
	1201	181	91.22	89.78	1.016	0.02	0.9980	1.5
	1202	179.96	89.78	89.78	1.000	0	1	0.08

表 3—8 包头 $\Phi 180$ 定径机组。

入口管径 255mm。

成品规格 Φ	机架号码	孔型直径 D	长半轴 a	短半轴 b	椭圆度 α	宽展量 c	宽展系数 ε	减径率 ρ
$\Phi 168\text{mm}$	0100	250.63	126.96	123.69	1.0266	-0.54		1.71
	0200	241.71	122.63	119.08	1.0298	-1.04	1.0085	3.56
	0300	231.90	117.74	114.16	1.0314	-1.34	1.0114	4.06
	0400	221.73	112.56	109.17	1.0310	-1.60	1.0142	4.39
	0500	212.08	107.65	104.43	1.0308	-1.52	1.0141	4.35

0600	202.90	102.97	99.93	1.0304	-1.46	1.0142	4.33
0700	194.18	98.53	95.65	1.0301	-1.40	1.0142	4.30
0800	185.89	94.31	91.58	1.0298	-1.34	1.0142	4.27
0900	178.27	90.30	87.97	1.0265	-1.28	1.0142	4.10
0901	172.87	86.99	85.88	1.0130	-0.98	1.0113	3.03
0902	170.10	85.40	84.70	1.0083	-0.48	1.0056	1.60
0903	169.40	84.70	84.70	1.0000	0.00	1.0000	0.41

孔型特点比较:

(1) 减径率 (图 3—19)

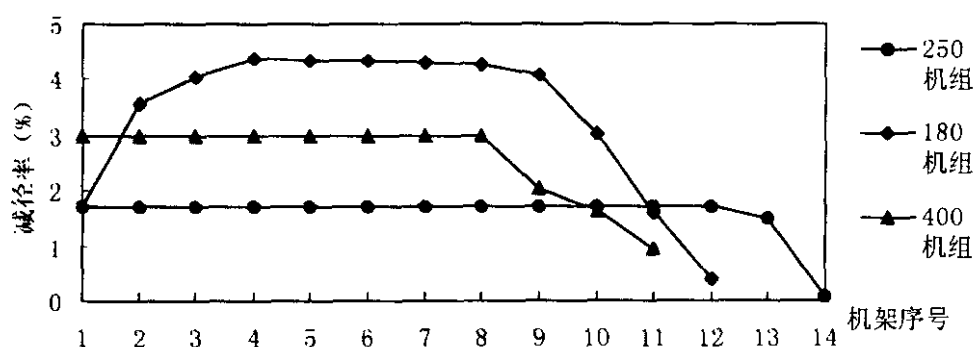


图 3—19 减径率曲线图

1) 在图 3—19 所比较的规格中, 包钢 $\Phi 180$ 机组总减径率达到了 33.57%, 故主变形机架的单机减径率也比较大, 最大达 4.39%; $\Phi 250$ 机组总减径率为 21.26%, 最大单机架减径率为 1.7%; 而 $\Phi 400$ 机组总减径率为 25.21%, 单机减径率最大只有 3%。

2) $\Phi 180$ 机组前面配置了减径率升起机架, 到第 3~4 架时, 减径率才达到最大值。而 $\Phi 250$ 机组和 $\Phi 400$ 机组没有配置减径率升起机架, 第一架即采用了最大减径率。

3) 三个机组的减径率分配有一个共同点就是, 粗机架减径率较大, 精机架减径率较小, 终轧机架减径率小于 1%。

(2) 椭圆度 (图 3—20)

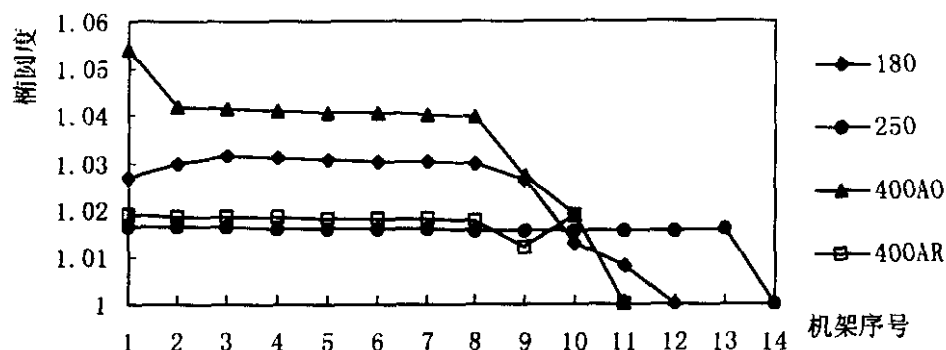


图 3—20 椭圆度曲线图

总趋势都是: 由前至后椭圆度逐渐减小, 但在粗机架范围内减小幅度不大, 近似一水平

直线，精机架范围内椭圆度急剧减小至 1。

$\Phi 180$ 定径机组、 $\Phi 400$ 定径机组 AO 系列的椭圆度较大，而 $\Phi 250$ 定径机组、 $\Phi 400$ 定径机组 AR 系列的椭圆度较小，这与 $\Phi 180$ 机组、 $\Phi 400$ 机组减径率较大， $\Phi 250$ 机组减径率较小是吻合的。

$\Phi 400$ 机组减径率小于 $\Phi 180$ 定径机组，但 $\Phi 400$ 机组的椭圆度与 $\Phi 180$ 定径机的椭圆相差无几，这说明 $\Phi 400$ 定径机的椭圆度偏大。采用大的椭圆度是 $\Phi 400$ 定径机组的又一特点。在减径率较大的粗轧区域内，对应的椭圆度也较大。

(3) 宽展系数 (图 3—21)

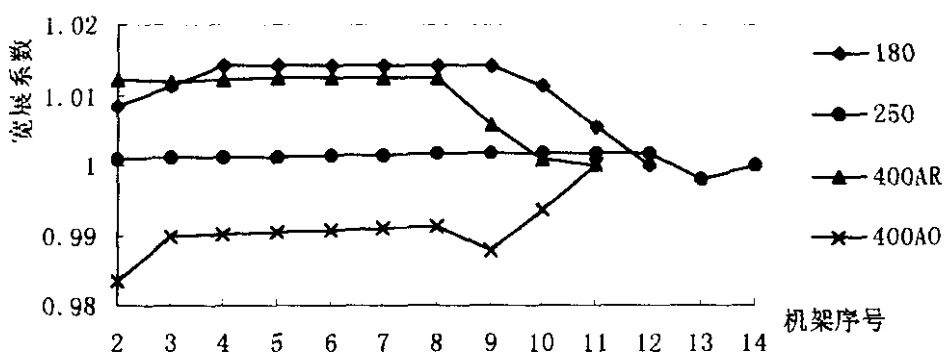


图 3—21 宽展系数曲线图

由图 3—21 可以看出：

1) $\Phi 180$ 定径机组和 $\Phi 250$ 定径机组、 $\Phi 400$ 定径机组有一个共同点：粗机架时宽展系数稍微增大，精机架时逐渐趋近于 1。

2) $\Phi 180$ 机组和 $\Phi 250$ 机组的宽展系数大于 1，即前一架的短半轴大于后一架长半轴，也就是采用了负宽展。 $\Phi 400$ 定径机组根据 D/S 将孔型分成两大类：椭圆孔型和圆孔型。椭圆孔型采用正宽展，专门生产薄壁管；圆孔型采用负宽展，专门用于生产厚壁管。孔型按专门用途分类，这是 $\Phi 400$ 定径机组与前两者明显不同之处，也是它的一大显著特点。而 $\Phi 180$ 机组， $\Phi 250$ 机组并没有按 D/S 分类，也就是说，厚壁管和薄壁管用的是同样的孔型，都是负宽展。这样带来一个隐患：生产薄壁管时，由于孔型宽展量有可能不够，金属有可能进入辊缝，轻者形成青线，重者形成外折叠。天津 $\Phi 250$ 机组试生产时已出现这个问题。这说明包钢 $\Phi 400$ 机组的宽展系数分配更具合理性【32】。

3.4 $\Phi 400$ 定径机组与 $\Phi 180$ 张减机组分析与对比

如上所述，微张力定径机是在张力减径机的基础上发展而来的，两者的设备结构、孔型设计方法有类似之处。为了进一步分析微张力定径机与张力减径机的不同之处，下面将 $\Phi 400$ 定径机组与 $\Phi 180$ 张减机组分析与对比。

3.4.1 $\Phi 180$ 张减机组的孔型系列见表 3—9表 3—9 $\Phi 180$ 张减机组孔型特征参数

孔型系列 B 入口管径 264mm	成品外径	壁厚 mm	D/S	外径 60—159 壁厚 3.1—25 D/S 6.18—35.36
	60	3.1—8.0	18.75—7.5	
	60.3	3.2—8.0	18.84—7.54	
	68	3.4—11.0	20—6.18	
	76	3.6—11	21.11—6.91	
	89.3	3.6—12.5	24.81—7.14	
	102.1	4.0—14.2	25.53—7.19	
	114.3	4.5—16	25.4—7.14	
	127	4.5—17.5	28.22—7.26	
	133	4.5—20	29.56—6.65	
	140	4.5—20	31.11—7.0	
	159	4.5—25	35.33—6.36	

3.4.2 孔型参数的分析比较

$\Phi 400$ 定径机组生产圆管时最多只有 11 架, 而 $\Phi 180$ 张减机组共有 24 个机架位置, 为了增加可比性, 本着机架数量尽可能相等的原则, 选用 $\Phi 180$ 张减机组 $\Phi 114.3$ 规格与 $\Phi 400$ 定径机组的 AO 系列和 AR 系列中 $\Phi 177.8$ 、 $\Phi 250$ 机组中的 $\Phi 114.3$ 规格相比较。另外, 为了突出张减机的特性, 又选用了 $\Phi 60$ 规格, 一起进行比较。

$\Phi 180$ 张减机组孔型及相关参数见表 3—10、3—11

表 3—10($\Phi 180$ 机组)

成品规格	机架号码	孔型直径 D	长半轴 a	短半轴 b	椭圆度 α	宽展系数 ε	减径率 ρ
成品规格 $\Phi 114.3$	1	161.39	81.70	79.69	1.0252		1.59
	2	156.96	79.38	77.58	1.0232	1.0039	2.74
	3	151.97	76.94	75.03	1.0254	1.0083	3.18
	4	146.95	74.41	72.54	1.0257	1.0083	3.3
	5	142.1	71.95	70.15	1.0256	1.0082	3.3
	6	137.41	69.58	67.83	1.0259	1.0082	3.3
	7	132.87	67.28	65.59	1.0257	1.0082	3.3
	8	128.49	65.05	63.44	1.0254	1.0083	3.3
	9	124.25	62.91	61.34	1.0256	1.0084	3.3
	10	120.15	60.84	59.31	1.0257	1.0082	3.3
	11	117.18	58.92	58.26	1.0113	1.0066	2.47
	12	115.55	57.96	57.59	1.0064	1.0052	1.39
	13	115.18	57.59	57.59	1	1	0.32

表 3—11($\Phi 180$ 机组)

成品规格	机架号码	孔型直径 D	长半轴 a	短半轴 b	椭圆度 α	宽展系数 ε	减径率 ρ
成品规格 $\Phi 60$	1	161.39	81.70	79.69	1.0252		1.59
	2	155.38	79.02	76.36	1.0349	1.0085	3.72
	3	148.36	75.51	72.84	1.0367	1.0113	4.52

4	141.13	71.82	69.31	1.0362	1.0142	4.87
5	134.31	68.34	65.97	1.0359	1.0143	4.83
6	127.85	65.04	62.81	1.0355	1.0143	4.81
7	121.76	61.93	59.83	1.0351	1.0142	4.76
8	116	58.99	57.01	1.0348	1.0142	4.73
9	110.55	56.21	54.34	1.0344	1.0142	4.70
10	105.39	53.58	51.81	1.0241	1.0142	4.67
11	100.51	51.09	49.42	1.0338	1.0142	4.63
12	95.89	48.73	47.16	1.0333	1.0142	4.60
13	91.51	46.50	45.01	1.0331	1.0141	4.57
14	87.36	44.38	42.98	1.0325	1.0142	4.54
15	83.44	42.38	41.06	1.0321	1.0142	4.49
16	79.71	40.48	39.23	1.0319	1.0142	4.47
17	76.18	38.68	37.50	1.0315	1.0142	4.43
18	72.84	36.98	35.86	1.0312	1.0142	4.38
19	69.66	35.36	34.30	1.0309	1.0142	4.37
20	66.64	33.82	32.82	1.0305	1.0142	4.34
21	63.87	32.36	31.51	1.0270	1.0142	4.16
22	61.91	31.16	30.75	1.0134	1.0112	3.07
23	60.78	30.45	30.33	1.0039	1.0099	1.83
24	60.34	30.17	30.17	1.0000	1.0053	0.72

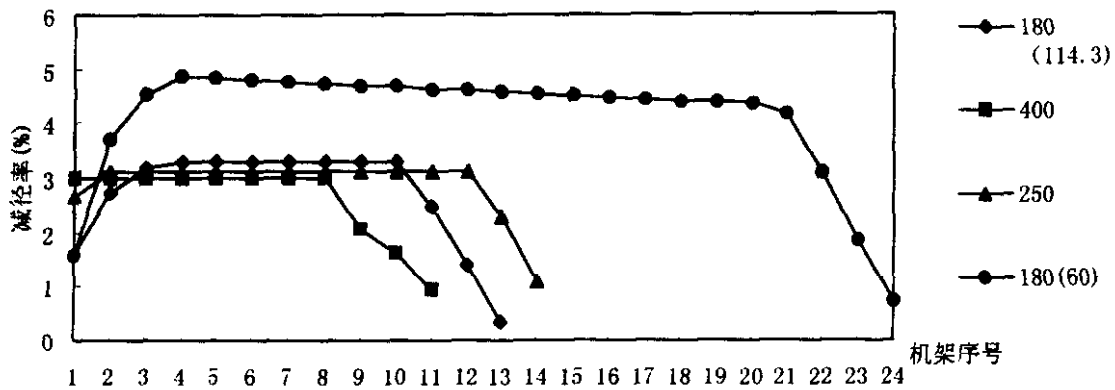
Φ250 机组规格孔型参数见表 3—12:

表 3—12

Φ250 机组规格孔型参数

成品规格	机架号码	孔型直径 D	长半轴 a	短半轴 b	椭圆度 α	宽展系数 ε	减径率 ρ
Φ 114.3	1	168.8	85.99	82.81	1.0384		2.65
	2	163.57	83.31	80.26	1.0379	0.9940	3.1
	3	158.5	80.71	77.79	1.0375	0.9944	3.1
	4	153.9	78.19	75.4	1.037	0.9948	3.1
	5	148.83	75.75	73.08	1.0366	0.9954	3.1
	6	144.21	73	70.82	1.0363	1.0011	3.1
	7	139.44	71	68.64	1.0358	0.9975	3.1
	8	135.41	68.88	66.53	1.0354	0.9965	3.1
	9	131.21	66.74	64.47	1.0351	0.9969	3.1
	10	127.14	64.66	62.48	1.0348	0.9971	3.1
	11	123.20	62.64	60.56	1.0344	0.9974	3.1
	12	119.38	60.69	58.69	1.0341	0.9979	3.1
	13	116.68	58.96	57.72	1.0215	0.9954	2.3
	14	115.44	57.72	57.72	1	1	1.1

(1)减径率 (图 3—22)



1) $\Phi 180$ 张减机组 $\Phi 114.3$ 规格总减径率达到了 29.77%，最大单机架减径率达到了 3.3%，而 $\Phi 60$ 规格总减径率达到了 63.21%，最大单机架减径率达到了 4.87%。比较而言，张力减径机变形能力大，可以采用大的单机减径率，这是它的一个显著优点。

2) $\Phi 180$ 张减机组用满 24 个机架时，总减径率达到了 63.21%，而只用 13 个机架时，总减径率只达到 29.77%，最大单机减径率由 4.87% 减小至 3.3%，与 $\Phi 400$ 定径机组、 $\Phi 250$ 定径机组大体相当。这说明当使用的机架数量较少时，张减机的作用仅相当于一个微张力定径机。

3) $\Phi 180$ 张减机组的减径率升起机架和降落机架均为 3 架，中间为主变形机架，减径率保持不变。 $\Phi 250$ 机组配置了一架减径率升起机架；而 $\Phi 400$ 机组以为其减径率小，没有配置减径率升起机架，第一架即采用了最大减径率。

(2) 椭圆度 (图 3—23)

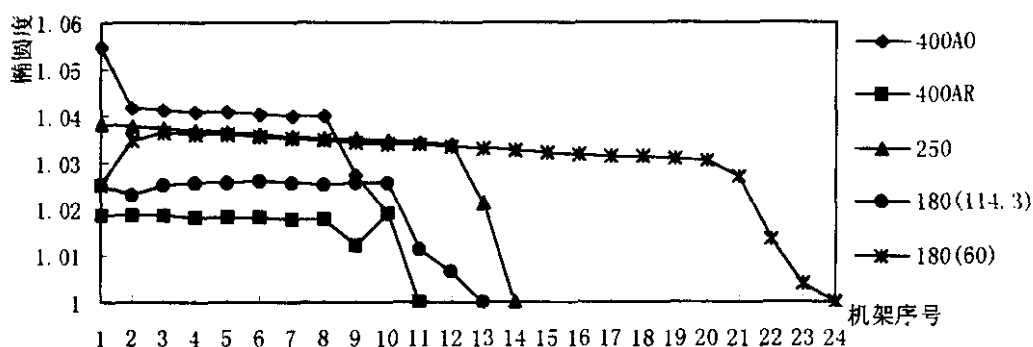


图 3—23 椭圆度曲线图

1) 由前至后，椭圆度逐渐减小。粗机架范围内，变化比较平缓；精机架范围内，椭圆度逐渐减小至 1。这是 $\Phi 400$ 定径机组、 $\Phi 250$ 机组和 $\Phi 180$ 张减机组的一个共同之处。

2) 减径率较大的区段，其椭圆度也较大；减径率较小的区段，其椭圆度也较小，呈明显的对应关系。这是 $\Phi 400$ 定径机组、 $\Phi 250$ 机组和 $\Phi 180$ 张减机组的另一共同之处。

3) $\Phi 400$ 定径机组 AR 系列采用了小椭圆度，这是为了防止生产厚壁管时出现“内六方”。 $\Phi 400$ 定径机组 AO 系列、 $\Phi 250$ 机组和 $\Phi 180$ 张减机组均采用较大的椭圆度。

4) $\Phi 180$ 张减机组使用 13 架时，孔型椭圆度与定径机接近，其作用与定径机大体相当。

(3) 宽展系数 (3—24)

1) $\Phi 250$ 机组宽展系数在 1 以下，表明其采用了正宽展； $\Phi 400$ 定径机组将孔型分成椭圆孔型和圆孔型两大类，AR 系列宽展系数大于 1，AO 系列宽展系数小于 1。而 $\Phi 180$ 张减机组宽展系数大于 1，表明其采用了负宽展。张力减径机因为张力较大，可以采用负宽展，这是张减机组的一大特点。

2) $\Phi 180$ 张减机组粗机架的宽展系数基本维持一条水平直线，而 $\Phi 400$ 定径机组 AO 系列和

AR 系列、 $\Phi 250$ 机组的宽展系数除个别异常点外，均呈缓慢增加态势。

3) $\Phi 400$ 定径机组 AO 系列精轧机架宽展系数逐渐增大，直至趋近于 1；AR 系列精机架宽展系数逐渐减小，逐渐趋近于 1，而 $\Phi 180$ 张减机组和 $\Phi 250$ 机组精机架的宽展系数逐渐减小，逐渐趋近于 1，变化速度明显比 $\Phi 400$ 定径机组平缓。

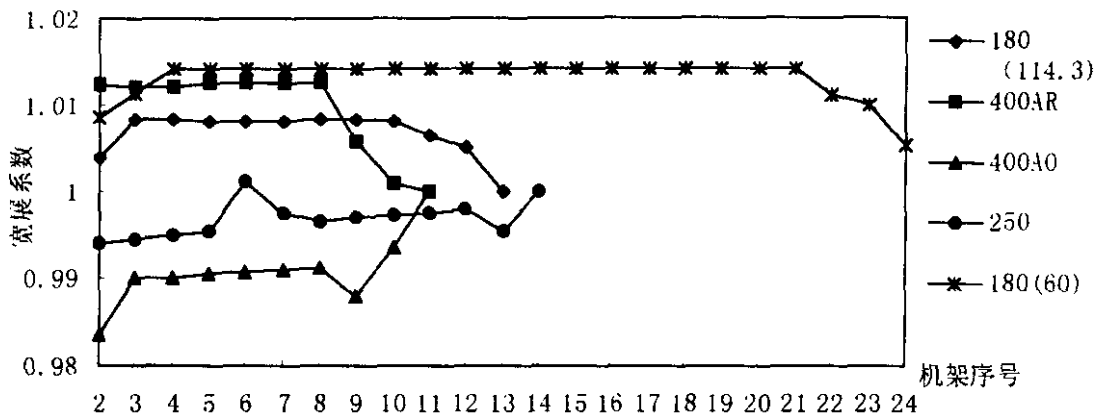


图 3—24 宽展系数曲线图

本章小结：

通过以上 5 个孔型系列各参数的分析及与天津 $\Phi 250\text{mm}$ 机组定径机、包钢 $\Phi 180\text{mm}$ 机组定径机、张力减径机的比较，可以看出 $\Phi 400$ 机组定径机孔型系统有以下特点：

(1) 为了适应产品规格跨度大($\Phi 177.8\text{mm}$ — $\Phi 431.8\text{mm}$)的需要，孔型划分为 5 个孔型系列，这是迄今为止，孔型系列最多的定径机组。孔型系列划分的主要依据是入口管径和减径率，并且各孔型系列的孔型参数有不同的取值范围，见表 3—13。

表 3—13

各孔型系列孔型参数的取值范围

孔型系列	A		B		C		D		E
孔型类型	椭圆	圆	椭圆	圆	椭圆	圆	椭圆	圆	椭圆
减径率%	0.95~3		0.92~2.3		0.85~2.1		0.67~1.8		0.91~1.8
椭圆度 max	1.0541	1.0189	1.0394	1.0154	1.0364	1.0151	1.0319	1.0138	1.0312
宽展系数	0.9834~1.000	1~1.0126	0.9883~1.000	0.9992~1.008	0.9874~1.000	1~1.0071	0.9868~1.000	0.9957~1.005	0.9877~1.000

(2) 该孔型系统的另一个显著特点是同一孔型系列 (E 系列除外)，大体上以 $D/S=10$ 为界又细分为用于轧制薄壁管的椭圆孔型 ($D/S>10$) 和用于轧制厚壁管的圆孔型 ($D/S<10$)。椭圆孔型采用正宽展 (宽展量为正，宽展系数小于 1) 和较大的椭圆度，圆孔型采用负宽展 (宽展量为负，宽展系数大于 1)。

在实际生产中，在轧制薄壁管时没有出现明显的青线等缺陷，轧制厚壁管时没有出现明显的“内六方”缺陷，这说明德方提供的 5 种孔型系列和椭圆、圆两种孔型类型是合理的，在正确使用的前提下能满足生产的需要。

(3) 根据前面的分析可知，D0 系列 $\Phi 334\text{mm}$ 第 0801 架和 AO 系列第 0801 架孔型设计存在不合理之处。因为根据前面的分析，在一个孔型系列内，压下量与宽展量应成正比，即压下

系数为一常数。由图 3—8, A0 系列 0801 架和 D0 系列 0801 架压下系数明显偏小, 显然不合理。

根据前面的分析, 从前至后, 椭圆度都是逐渐减小的, 精轧阶段采用很小的椭圆度。而由图 3—11, 成品前孔椭圆度较大, 出现了明显起伏, 这说明所选规格成品前孔即 AR0802 架、BR0512 架、CR0801 架、DR0701 架设计不合理。

4 孔型设计方法

微张力定径机的孔型设计是工艺的核心问题。孔型设计的任务是确定 a_i, b_i 以及加工参数。孔型设计的合理与否直接影响着成品的质量、影响轧辊的寿命，并能有效的防止缺陷的产生。在德方提供的工艺资料中，德方只提供了孔型参数，而没有提供孔型设计的方法。因此，为了深入消化德方提供的工艺资料，本章在上一章分析孔型参数的基础上，进一步分析德方的孔型设计方法，并与常规方法进行比较

4.1 孔型常规设计方法

现在的三辊式微张力定径机基本上都采用三弧孔型。这种孔型与二辊式微张力定径机相比减少了金属与轧件的接触面积，因而容易使管子从孔型中脱出。孔型的基本参数是长半轴 a_i ，短半轴 b_i ，其余都是派生参数，即都可以由 a_i 和 b_i 求出。

4.1.1 减径率的确定

进行孔型设计时，应先确定各机架的减径率，把总减径率合理地分配到各个机架上。具体分配时，应考虑到初始机架、粗轧机架、精轧机架的区别。一般情况下，对张减机而言，初始机架减径率逐渐升高；粗轧机架减径率近似为一恒定值，变化幅度不大；而精轧机架减径率逐渐减小，终轧机架减径率接近于 0。因为微张力定径机减径率较小，一般没有减径率升高机架，如图 4—1 所示。微张力定径的最大减径率在 3~3.5% 左右。

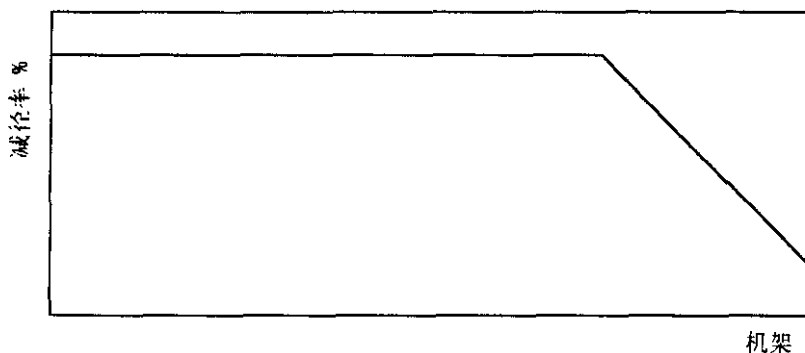


图 4—1 减径率曲线图

4.1.2 孔型设计

目前，三辊微张力定径机的孔型设计都是仿照三辊张力减径机的孔型设计方法进行的。

在各机架减径率确定以后，即可求出各架孔型的平均直径 D_i 。因 $D_i = a_i + b_i$ ，而孔

型椭圆度 $\alpha_i = \frac{a_i}{b_i}$ ，所以如果确定完毕各机架孔型的椭圆度，就可以由 $\alpha_i = \frac{d_i}{1 + \frac{1}{\alpha_i}}$ ，

$b_i = \frac{1}{\alpha_i + 1}$ 求出各机架的 a_i 和 b_i 。

4.1.2.1 椭圆度的确定

孔型椭圆度是一个很重要的参数。如果孔型椭圆度较小，轧制时容易出耳子，特别是对于 D/S 较大的薄壁管。当椭圆度较大时，容易出“内六方”，特别是对于 D/S 较小的厚壁管。因此，生产薄壁管的椭圆孔型和生产厚壁管的圆孔型的椭圆度是有很大的不同的。

分配椭圆度时，应遵守以下规律：由前至后，与减径率相对应，粗轧机架椭圆度较大，呈逐渐减小的趋势，但变化较平缓；精轧机架椭圆度变化较快，到终轧机架减小到 1。

如果仅仅依靠上述规律来分配椭圆度，显然带有很大的盲目性，随意性很大。分配椭圆度时还要考虑相邻机架的关系。根据前面的分析，宽展量为本机架的长半轴减去上一机架的短半轴；压下量为上一机架的长半轴减去本机架的短半轴。椭圆度的大小归根结底是要考虑孔型的压下量和宽展量。压下量和宽展量一般成正比，要增大压下量，就必须留出较大的宽展量。这是孔型设计的一大原则。

$$\text{由文献【35】孔型椭圆度 } \alpha_i = \frac{1}{\varepsilon_i (1 - \rho_i)} \quad (4-1)$$

式中， ρ_i 、 ε_i 为第 i 机架的减径率和宽展系数。在文献【35】以及其它介绍孔型设计的文章中，求椭圆度时都是先确定宽展系数，然后由式（4—1）求得椭圆度。

确定宽展系数时，基本上都是采用经验方法。常见的是图表法，见图 4—2。

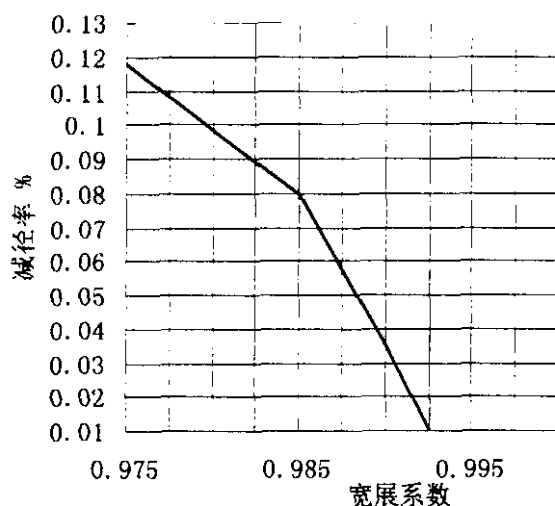


图 4—2 宽展系数与减径率对应经验曲线

由图 4—2 查出宽展系数后，代入式 4—1 求得孔型椭圆度及孔型尺寸后，还须用压下系数 λ_i 进行校核。校核的原则是 λ_i 近似为一恒定值，也就是压下量与宽展量大体成正比。

文献【35】推荐的 λ 值为：

$$\rho = 9\% \text{ 时, } \lambda = 11-12$$

$$\rho = 6\% \text{ 时, } \lambda = 10-11$$

$$\rho = 4\% \text{ 时, } \lambda = 8-9$$

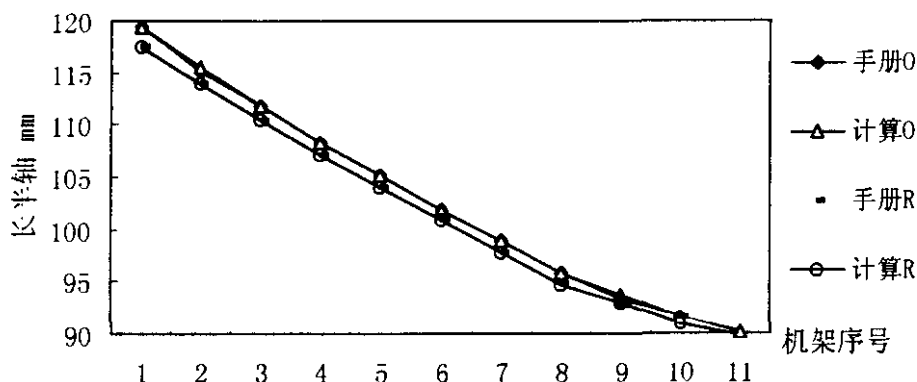
4.1.2.2 德方的孔型设计方法

为了验证德马克公司是否是按上述方法进行的孔型设计, 本文选用 AO 系列中的 $\Phi 177.8$ 和 AR 系列中的 $\Phi 177.8$ 进行验算, 验算结果见表 4—1。

表 4—1 $\Phi 177.8$ 规格验算对照表

机架序号	减径率 %	AO					AR				
		操作手册中的数据			本文计算数据		操作手册中的数据			本文计算数据	
		α_i	a	ε_i	α_i	a	α_i	a	ε_i	α_i	a
1	3	1.0541	119.50				1.0189	117.49		1.0184	
2	3	1.0417	115.21	0.9834	1.0483	115.57	1.0187	113.90	1.0123	1.0187	113.90
3	3	1.0414	111.74	0.9899	1.0414	111.74	1.0186	110.53	1.0120	1.0186	110.53
4	3	1.0410	108.37	0.9901	1.0412	108.38	1.0184	107.21	1.0121	1.0182	107.19
5	3	1.0407	105.10	0.9905	1.0408	105.11	1.0183	103.98	1.0125	1.0182	103.98
6	3	1.0405	101.94	0.9908	1.0405	101.94	1.0182	100.86	1.0125	1.0182	100.86
7	3	1.0401	98.87	0.9909	1.0404	98.88	1.0180	97.83	1.0125	1.0181	97.83
8	3	1.0399	95.89	0.9912	1.0401	95.90	1.0179	94.89	1.0126	1.0152	94.76
9	2.06	1.0272	93.35	0.9878	1.0336	93.64	1.0123	92.68	1.0057	1.0157	92.83
10	1.63	1.0192	91.47	0.9935	1.0232	91.65	1.0192	91.47	1.0009	1.0096	91.04
11	0.95	1	89.75	1	1.0096	90.18	1	89.75	1		89.75

将表 4—1 作成曲线, 见图 4—3。

图 4—3 $\Phi 177.8$ 规格验算对照图

由图 4—3 可以看出, 不论是圆孔型还是椭圆孔型, 计算值与手册提供的理论值基本上

都是完全重合的, 说明手册中的椭圆度 α_i 与 $\frac{1}{\varepsilon_i(1-\rho_i)}$ 相差不大, 可以认为相等, 所以,

德马克公司也是用的常规设计方法。

4.2 一种近似方法

由以上可以看出, 常规的孔型设计方法经验性强, 计算烦琐。本文介绍一种简单的计算孔型椭圆度的方法。

理论上很容易证明, 减径率 ρ_i 、宽展系数 ε_i 、椭圆度 α_i 存在着一定的函数关系, 因

而可以大大简化计算。由 (4—1), 孔型椭圆度 $\alpha_i = \frac{1}{\varepsilon_i(1-\rho_i)}$, 其中 ε_i 为第 i 机架的宽

展系数, $\varepsilon_i = \frac{b_{i-1}}{a_i}$; ρ_i 为第 i 机架的减径率。因 $\alpha_i = \frac{a_i}{b_i}$, 故 $\frac{a_i}{b_i} = \frac{1}{\frac{b_{i-1}}{a_i}(1-\rho_i)}$, 经推

$$\text{导, 得 } \frac{b_i}{b_{i-1}} = \frac{D_i}{D_{i-1}}. \quad (4-2)$$

$$\text{又 } \frac{D_i}{D_{i-1}} = \frac{(1+\alpha_i)b_i}{(1+\alpha_{i-1})b_{i-1}} \quad (4-3)$$

$$\text{比较 (4-2) 和 (4-3) 可知 } \alpha_i = \alpha_{i-1}. \quad (4-4)$$

式 (4-4) 就是式 (4-1) 和 (4-2) 的适用条件。即适用条件为椭圆度在前后变化不大的情况。由第 3 章孔型分析可知, 椭圆孔型在第一架即入口机架较大, 在整个粗轧机架范围内逐渐减小, 但变化较平缓, 近似为一水平直线。所以, 以上计算公式适用于整个粗轧机架范围。

4.2.1 椭圆孔型粗轧机架椭圆度的确定

为了寻找椭圆度—减径率之间的对应关系, 将德方提供的各系列粗轧机架的椭圆度取平均值, 列成椭圆度—减径率表 (见表 4-3)。

表 4-3 椭圆度—减径率对应关系表

减径率%	3	2.3	2.1	1.8
椭圆度	1.0408	1.0311	1.0303	1.0290

表 4-3 各点作成散点图, 见图 4-4。

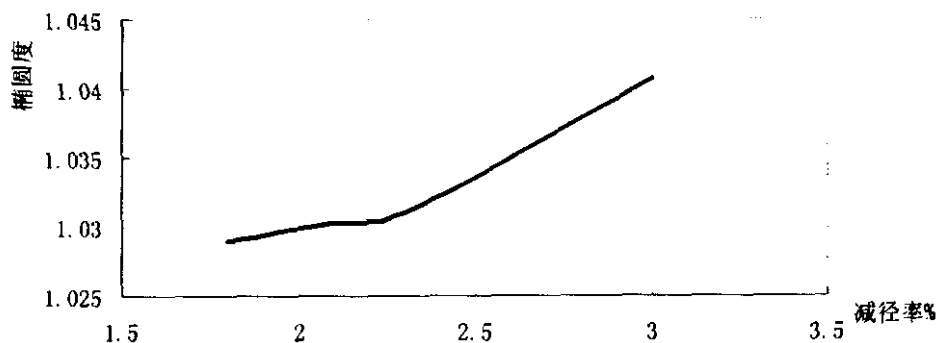


图 4-4 椭圆孔型椭圆度与减径率对应关系散点图

由图 4-4 可以看出, 椭圆度 α_i 与减径率 ρ_i 的关系可以用函数 $\alpha_i = a_0 a_1^x$ 进行拟合。

两边同时取对数, 有 $\ln \alpha_i = \ln a_0 + x \ln a_1$, 表示为 $y = \beta_0 + \beta_1 x$, 用线性回归方法求得

$\beta_1 = 0.0094$, $\beta_0 = 0.010848$, 即 $y = 0.010848 + 0.0094x$ 。两边同时进行主变量变换,

$$\text{得 } \alpha_i = 1.0109 * 1.0094^x. \quad (4-5)$$

式 (4-5) 就是椭圆孔型粗轧机架椭圆度的计算公式。式 (4-5) 是在本机组数据基础上

得出的, 故适用于本机组。

4.2.2 圆孔型粗轧机架椭圆度的确定

为了确定圆孔型粗轧机架椭圆度, 将德方资料中圆孔型各系列粗轧机架的椭圆度分别取平均值, 列成椭圆度—减径率对应关系表, 见表(4—4)。

表 4—4 椭圆度—减径率对应关系表

减径率%	3	2.3	2.1	1.8
椭圆度	1.0184	1.0151	1.0146	1.0134

将表 4—4 作成曲线图, 见图 4—5。

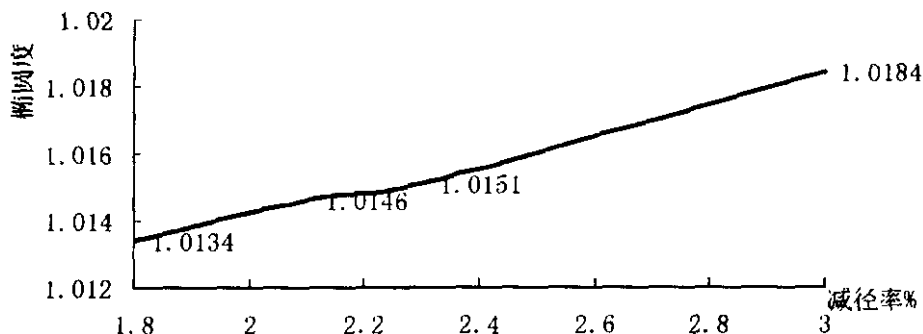


图 4—5 圆孔型椭圆度与减径率对应关系散点图

从图 4—5 可以看出, 圆孔型系列椭圆度—减径率的对应关系近似是一条直线, 所以可用目标函数 $y = ax + b$ 进行拟合。用线性回归方法求得 $\alpha_i = 1.00582 + 0.0047\rho_i$ 。(4—6)

这就是圆孔型系列粗轧机架椭圆度的计算公式, 适用于本机组。

4.2.3 精机架的孔型设计

精机架的孔型设计也是在各机架减径率分配完毕以后进行。

(1) 成品机架

设计成品机架时, 孔型直径为成品管的热态直径。又因为成品机架椭圆度为 1, 所以, 孔型的长半轴和短半轴相等。孔型的长半轴和短半轴都取为成品管热态直径的一半。即

$$a_i = b_i = \frac{1}{2} D_n。$$

(2) 成品前孔

因为成品机架的宽展量为零, 即成品架的长半轴减去成品前孔的短半轴等于零。所以,

$$b_{n-1} = a_n。用 a_{n-1} = D_{n-1} - b_{n-1} 即可求出 a_{n-1}。$$

(3) 如果精机架为 3 架, 确定第一架精轧机架椭圆度时, 可用插值法。可以认为精轧阶段机架椭圆度是均匀升降, 即认为在精轧阶段椭圆度—减径率的关系是一条直线。具体作法是: 用成品前孔的椭圆度、减径率值和最末一个粗轧机架的椭圆度、减径率值建立一条直线方程, 然后代入第一架精轧机架的减径率, 用数学插值法求得该机架的椭圆度。

下面以 $\Phi 177.8\text{mm}$ 为例, 用本文介绍的方法计算各机架的椭圆度, 并用孔型设计的原

则进行检验。计算结果见表 4—5。

表 4—5 近似方法设计结果

序号	减径率%	椭圆度	孔型直径	长半轴	短半轴	宽展量 c	压下量 h	宽展系数	压下系数
1	3	1.0412	232.8	118.75	114.05				
2	3	1.0397	225.82	115.11	110.72	1.06	8.03	0.9908	7.58
3	3	1.0397	219.04	111.65	107.39	0.93	7.72	0.9917	8.3
4	3	1.0397	212.47	108.3	104.17	0.91	7.48	0.9916	8.22
5	3	1.0397	206.1	105.06	101.04	0.89	7.26	0.9915	8.16
6	3	1.0397	199.91	101.9	98.01	0.86	7.05	0.9916	8.2
7	3	1.0397	193.92	98.85	95.07	0.84	6.83	0.9915	8.13
8	3	1.0397	188.1	95.88	92.22	0.81	6.63	0.9916	8.19
9	2.06	1.0215	184.23	93.09	91.14	0.87	4.74	0.9907	5.45
10	1.63	1.0132	181.22	91.47	89.75	0.33	3.34	0.9964	10.12
11	0.95	1	179.5	89.75	89.75	0	1.72	1	

压下量—宽展量对应关系见图 4—6。

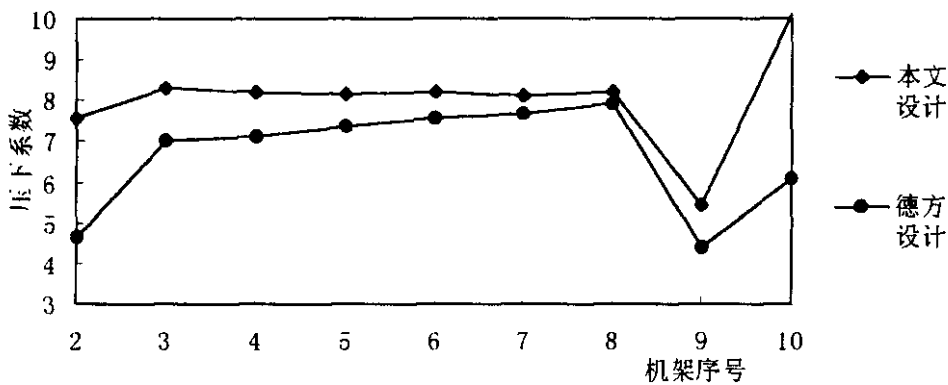


图 4—6 两种设计比较图

由图 4—6 可以看出，本文的设计结果以及德方的设计结果 h/c 都近似为一直线，这证明压下量与宽展量近似成正比。这说明本文介绍的方法也是可行的。

4.3 孔型的加工

4.3.1 孔型加工原理

加工孔型时，不必从机架上取掉轧辊，三个轧辊同时用一把刀具在一个公共台架上加工。成组加工与单个轧辊加工相比，可以避免装配公差。当切削刀具与轧辊啮合时，轧辊慢慢旋转。刀具则位于距离机架中心线 WA 的地方。在任一时刻，三把刀总是与三个轧辊相接触。通过刀头旋转，轧辊就沿着刀具直径 WD 进行加工。由于机架孔型加工是在机架中心线之前的位置完成的，所以，孔型就成为椭圆。随着距离 WA 增大，孔型椭圆度也增大。见图 4—7。

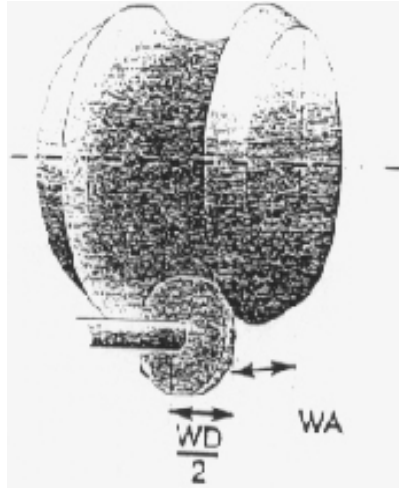


图 4—7 刀具加工示意图

4.3.2 孔型加工刀具直径 WD 和距离 WA 的确定

加工三辊式定径机孔型时的铣刀直径 WD 和刀具距离 WA 应该保证所得到的孔型余设计的孔型一致，即具有所要求的长半轴 a 和短半轴 b 。

4.3.2.1 轧辊孔槽表面的空间解析函数

见图 4—8。

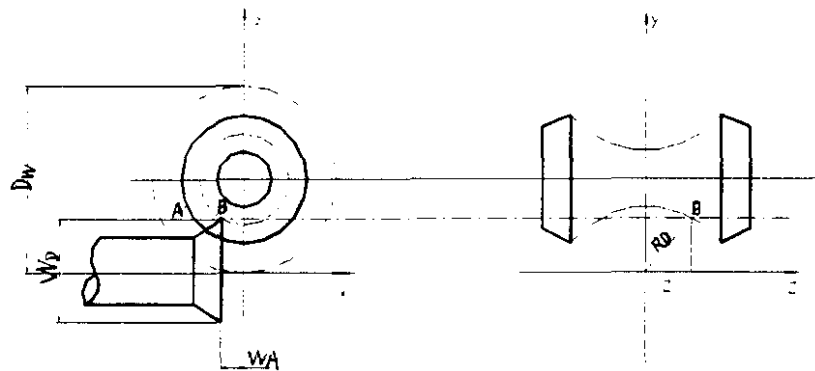


图 4—8 轧辊孔槽表面的空间解析示意图

由图 4—8 所示的空间几何关系，可以看出轧辊轧槽上任意一点 A 符合下列解析函数：

$$A \text{ 点: } R'^2 = x^2 + (R_w - y)^2 \quad (4-7)$$

而 B 点既在以 R' 为半径的圆上，又在刀具的前刃面上，即 B 点的坐标为：

$$x = w_{At}, \quad y = \sqrt{R_{Dt}^2 - Z_t^2}, \quad \text{所以 B 点的方程可写为}$$

$$R'^2 = w_{At}^2 + (R_w - \sqrt{R_{Dt}^2 - Z_t^2})^2 \quad (4-8)$$

由 (4—7)、(4—8) 联立后, 得 $x^2 + (R_w - y)^2 = w_{.di}^2 + (R_w - \sqrt{R_{Di}^2 - Z_i^2})^2$,

$$\text{即 } y = R_w \pm \sqrt{w_{.di}^2 - x^2 + (R_w - \sqrt{R_{Di}^2 - Z_i^2})^2} \quad (4-9)$$

这就是轧辊表面孔槽的解析方程式。

4.3.2.2 刀具直径 w_{Di} 和刀具距离 $w_{.di}$ 的计算

(4—9) 式中, 令 $x = 0$ (轧辊中心平面), 并取 “—” 号 (取孔型交线), 得

$$y = R_w - \sqrt{w_{.di}^2 + (R_w - \sqrt{R_{Di}^2 - Z_i^2})^2} \quad (4-10)$$

这是孔型弧的函数关系式。

见图 4—9。

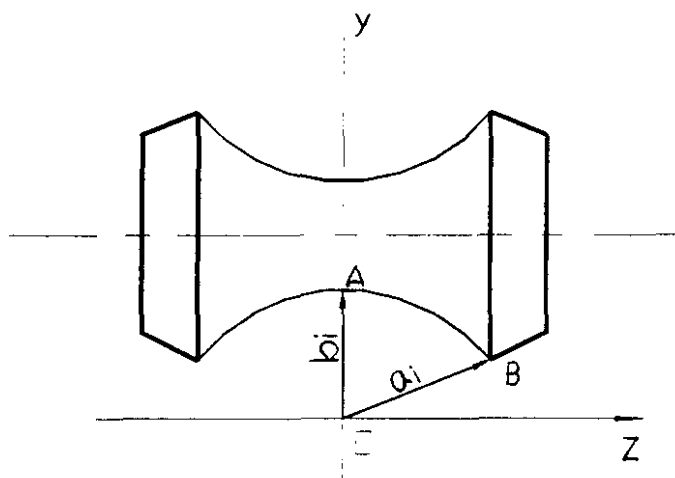


图 4—9 孔型弧的函数关系示意图

当 $x = 0$ 时, A 点: $y_A = b_i$, $Z_A = 0$ 。据 (4—10), 得

$$y_A = R_w - \sqrt{w_{.di}^2 + (R_w - R_{Di})^2}, \quad \text{则 } b_i = R_w - \sqrt{w_{.di}^2 + (R_w - R_{Di})^2},$$

$$\text{得到 } w_{.di} = \sqrt{(R_w - b_i)^2 - (R_w - R_{Di})^2} \quad (4-11)$$

这就是刀具距离计算公式。

再看图中的 B 点。B 点的坐标为 $y_B = \frac{1}{2}a_i$, $Z_B = \frac{\sqrt{3}}{2}a_i$ 。

$$\text{将 } Z_B = \frac{\sqrt{3}}{2}a_i \text{ 代入 (4—10), 得到 } y_B = R_w - \sqrt{w_{.di}^2 + (R_w - \sqrt{R_{Di}^2 - \frac{3}{4}a_i^2})^2}$$

代入 B 点坐标, 则得

$$w_{.di} = \sqrt{(R_w - \frac{1}{2}a_i)^2 - (R_w - \sqrt{R_{Di}^2 - \frac{3}{4}a_i^2})^2} \quad (4-12)$$

(4—11)、(4—12) 两式联立, 并去根号, 得

$$(R_{w_1} - b_i)^2 - (R_{w_1} - R_{D_1})^2 = (R_{w_1} - \frac{1}{2}a_i)^2 - (R_{w_1} - \sqrt{R_{D_1}^2 - \frac{3}{4}a_i^2})^2$$

利用平方差公式展开上式,

$$(R_{D_1} - b_i)(2R_{w_1} - b_i - R_{D_1}) = (\sqrt{R_{D_1}^2 - \frac{3}{4}a_i^2} - \frac{1}{2}a_i) \left[2R_{w_1} - \left(\sqrt{R_{D_1}^2 - \frac{3}{4}a_i^2} - \frac{1}{2}a_i \right) \right]$$

$$2R_{w_1}(R_{D_1} - b_i) - R_{D_1}^2 + b_i^2 = 2R_{w_1}(\sqrt{R_{D_1}^2 - \frac{3}{4}a_i^2} - \frac{1}{2}a_i) - (R_{D_1}^2 - \frac{3}{4}a_i^2) + \frac{1}{4}a_i^2,$$

因为 $D_{w_1} = 2R_{w_1}$, 经整理可得

$$\sqrt{R_{D_1}^2 - \frac{3}{4}a_i^2} = R_{D_1} - b_i + \frac{b_i^2}{D_{w_1}} + \frac{a_i}{2} - \frac{a_i^2}{D_{w_1}}$$

两边平方, 则

$$R_{D_1}^2 - \frac{3}{4}a_i^2 = R_{D_1}^2 - 2R_{D_1}(b_i - \frac{b_i^2}{D_{w_1}} - \frac{a_i}{2} + \frac{a_i^2}{D_{w_1}}) + (b_i - \frac{b_i^2}{D_{w_1}} - \frac{a_i}{2} + \frac{a_i^2}{D_{w_1}})^2$$

再整理, 得

$$w_{D_1} = 2R_{D_1} = b_i - \frac{b_i^2}{D_{w_1}} - \frac{a_i}{2} + \frac{a_i^2}{D_{w_1}} + 0.75 \frac{a_i^2}{b_i - \frac{b_i^2}{D_{w_1}} - \frac{a_i}{2} + \frac{a_i^2}{D_{w_1}}} \quad (4-13)$$

这就是刀具直径计算公式, 式中的 D_{w_1} 为轧辊理想直径。

综上所述, 刀具直径和刀具距离的计算公式为:

$$w_{D_1} = 2R_{D_1} = b_i - \frac{b_i^2}{D_{w_1}} - \frac{a_i}{2} + \frac{a_i^2}{D_{w_1}} + 0.75 \frac{a_i^2}{b_i - \frac{b_i^2}{D_{w_1}} - \frac{a_i}{2} + \frac{a_i^2}{D_{w_1}}}$$

$$w_{A_1} = \sqrt{(R_{w_1} - b_i)^2 - (R_{w_1} - R_{D_1})^2}$$

5. 轧辊转速的计算

在定径工艺中, 根据成品管的规格, 在确定来料规格、孔型系列、孔型类型和机架数量等工艺要素后, 各机架轧辊转速是唯一需要确定的调整参数。由于轧辊转速直接影响着机架间的张力, 进而影响壁厚。因此, 轧辊转速也是最重要的调整参数。

本章的目的在于确定张力→壁厚→转速三者之间的关系, 并用理论计算结果与德方提供的操作手册中的相应数据进行对比, 以确定轧辊转速的计算方法。本章的计算以 $\Phi 177.8 \times 5.87\text{mm}$ 为代表规格进行计算。入口毛管 $\Phi 240 \times 5.7\text{mm}$ 。

轧辊转速的计算步骤是: 选定平均张力系数和沿各机架的分配、各机架钢管壁厚的计算、轧辊转速的计算。下面按步骤逐步计算。

5.1 张力系数的选定

平均张力系数的选取和张力的分配是定减径工艺中计算张力、壁厚以及速度等的关键。分配张力之前应首先计算总的平均张力系数。

5.1.1 平均张力系数

$$\text{总平均张力系数} \quad \bar{z} = \frac{(1-2\nu_n) + (2-\nu_n)\beta_i}{(1-\nu_n)\beta_i - 2(\nu_n-1)} \quad (5-1)$$

式中, ν_n 为壁厚系数 $\nu_n = 0.5\left(\frac{S_0}{D_0} + \frac{S_e}{D_e}\right)$

$$\beta_i \text{ 为对数变形比} \quad \beta_i = \frac{\varepsilon_{\delta i}}{\varepsilon_{D i}}$$

$$\varepsilon_{\delta i} \text{ 为径向变形,} \quad \varepsilon_{\delta i} = \ln\left(\frac{S_e}{S_0}\right)$$

$$\varepsilon_{D i} \text{ 为切向变形} \quad \varepsilon_{D i} = \ln\left(\frac{D_e - S_e}{D_0 - S_0}\right)$$

下面以 $\Phi 240 \times 5.7\text{mm} \rightarrow \Phi 177.8 \times 5.87\text{mm}$ 为例进行计算说明。 $D_0 = 240\text{mm}$,

$S_0 = 5.7\text{mm}$; $D_e = 179.5\text{mm}$, $S_e = 5.93\text{mm}$ 。 D_0 、 S_0 为来料外径和壁厚, D_e 、 S_e 为成品管的外径和壁厚。

$$\text{壁厚系数} \quad \nu_n = 0.5\left(\frac{S_0}{D_0} + \frac{S_e}{D_e}\right) = 0.0284$$

$$\text{径向变形} \quad \varepsilon_{\delta i} = \ln\left(\frac{S_e}{S_0}\right) = 0.0393$$

$$\text{切向变形} \quad \varepsilon_{D i} = \ln\left(\frac{D_e - S_e}{D_0 - S_0}\right) = -0.3$$

$$\text{对数变形比} \quad \beta_i = \frac{\varepsilon_{\delta i}}{\varepsilon_{D i}} = -0.131$$

$$\text{总平均张力系数} \quad \bar{z} = \frac{(1-2\nu_n) + (2-\nu_n)\beta_1}{(1-\nu_n)\beta_1 - 2(\nu_n-1)} = 0.377$$

为了彻底消化德方提供的工艺资料。掌握德方的张力分配方法，本文对 A~E 系列不同架次生产各种壁厚时的机组平均张力系数都做了计算。典型规格见表 5—1。其余见附录 2。

表 5-1 不同系列、规格的机组总平均张力计算示例

A 系列 11 架不同壁厚规格的平均张力 (Do=240mm; De=177.8mm)														
So(mm)	5.7	6.5	7.6	8.6	9.8	10.8	11.8	12.8	15	15.11	16.51	17.87	19.28	
Se(mm)	5.87	6.91	8.05	9.19	10.36	11.51	12.65	13.72	15.86	17.45	19.05	20.62	22.23	
\bar{Z}_n	0.38	0.28	0.29	0.25	0.29	0.26	0.24	0.23	0.27	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	
B 系列 8 架不同壁厚规格的平均张力 (Do=290mm; De=244.50mm)														
So(mm)	6.7	7.5	7.6	8.4	8.4	9.4	9.6	10.4	11.4	11.8	13.2	13.4	15.2	16.75
Se(mm)	7.1	7.92	8	8.8	8.94	10	10.03	11	11.99	12.5	13.84	14.2	16	17.5
\bar{Z}_n	0.09	0.12	0.14	0.17	0.06	0.06	0.19	0.10	0.14	0.09	0.16	0.09	0.13	0.18
C 系列 4 架不同壁厚规格的平均张力 (Do=345mm; De=323.80mm)														
So(mm)	6.2	6.95	7.75	8.2	8.55	9.3	10.05	10.85	12.4	13.9	15.5	17.1	18.6	20.1
Se(mm)	6.35	7.14	7.92	8.38	8.74	9.52	10.31	11.13	12.7	14.27	15.88	17.48	19.05	20.62
\bar{Z}_n	-0.19	-0.28	-0.12	-0.12	-0.13	-0.17	-0.23	-0.23	-0.18	-0.24	-0.19	-0.13	-0.17	-0.22
D 系列 7 架不同壁厚规格的平均张力 (Do=395mm; De=351.00mm)														
So(mm)	7.6	8.1	8.6	9	9.6	10.5	11.5	12.4	13.4	14.4	15.4	16.25	17.25	18.25
Se(mm)	8	8.5	9	9.5	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
\bar{Z}_n	-0.09	-0.05	-0.02	-0.12	-0.04	-0.03	0.02	-0.04	0.02	0.04	0.06	-0.01	0.02	0.04
E 系列 7 架不同壁厚规格的平均张力 (Do=450mm; De=402.00mm)														
So(mm)	8.6	9.1	9.6	10.5	11.5	12.5	13.4	14.4	15.4	16.25	17.25	18.25	19.25	21
Se(mm)	9	9.5	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22
\bar{Z}_n	-0.05	-0.02	0.01	-0.06	-0.01	0.02	-0.03	0.01	0.04	-0.05	-0.02	0.01	0.04	-0.06

平均张力系数分析：(1) 由 \bar{z} 计算式可知， $\bar{z} = f(D_0, D_e, S_0, S_e)$ 。在 D_0, D_e, S_0, S_e 已定的情况下， \bar{z} 的取值直接影响 S_e ，即 ΔS_e 的变化。以 A 系列 $\Phi 240 \times 8.6 \rightarrow \Phi 177.8 \times 9.19$ 为例， \bar{z} 不同， S_e 不同， ΔS_e 也不同，见图 5—1。可见 \bar{z} 影响着 S_e ，而 \bar{z} 又是计算轧辊转速的基础数据，故 \bar{z} 的取值十分重要。

表 5—2 \bar{z} 对 S_e 的影响关系

\bar{z}	0.09	0.12	0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.30	0.33	0.36
S_e	9.72	9.64	9.56	9.49	9.41	9.32	9.24	9.15	9.06	8.97

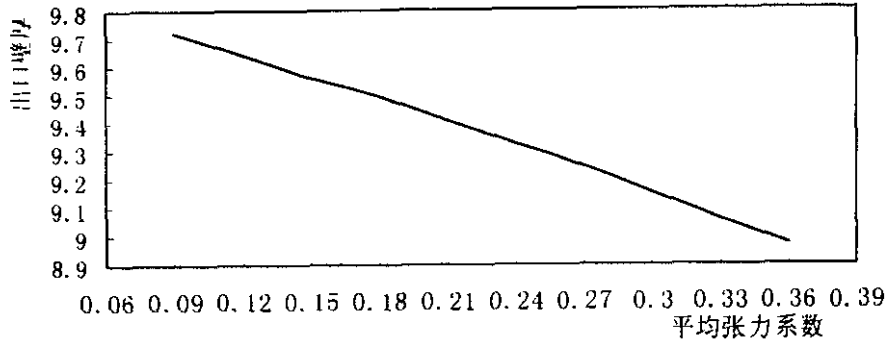
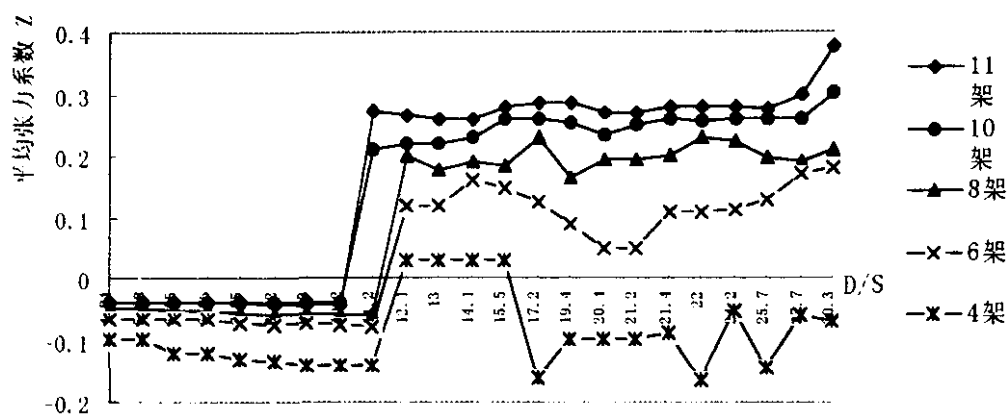


图 5—1 \bar{z} 对 S_e 的影响关系图

(2) \bar{z} 值与 D_e/S_e 存在明显的对应关系, 见图 5—2。

表 5—3 \bar{z} 值与 D_e/S_e 对应关系

D/S	11架	10架	8架	6架	4架
4.84	-0.04	-0.04	-0.048	-0.065	-0.1
5.38	-0.04	-0.04	-0.05	-0.065	-0.1
6.05	-0.04	-0.04	-0.053	-0.065	-0.12
6.76	-0.04	-0.04	-0.054	-0.067	-0.12
7.75	-0.04	-0.04	-0.055	-0.072	-0.13
8.62	-0.042	-0.04	-0.058	-0.074	-0.135
9.33	-0.041	-0.04	-0.057	-0.073	-0.14
10.19	-0.043	-0.04	-0.058	-0.076	-0.14
11.21	0.273	0.21	-0.06	-0.078	-0.14
12.11	0.265	0.22	0.199	0.117	0.029
12.96	0.26	0.22	0.1774	0.117	0.029
14.06	0.26	0.23	0.19	0.16	0.029
15.45	0.28	0.26	0.1823	0.149	0.029
17.16	0.286	0.26	0.2281	0.123	-0.16
19.35	0.284	0.254	0.1653	0.09	-0.098
20.35	0.27	0.234	0.1949	0.05	-0.098
21.18	0.27	0.25	0.1949	0.05	-0.098
21.37	0.28	0.26	0.2	0.107	-0.09
22.01	0.28	0.255	0.23	0.107	-0.163
24.21	0.28	0.26	0.2216	0.11	-0.053
25.73	0.276	0.26	0.1955	0.129	-0.144
27.69	0.3	0.259	0.19	0.17	-0.06
30.29	0.377	0.301	0.21	0.18	-0.07


 图 5-2 \bar{z} 值与 D_0/S_e 关系

- 1) 不论机架数多少, 当 $D_0/S_e > 10$ 时即薄壁管, 采用张力轧制, 张力系数为正, 且 D_0/S_e 增大时, \bar{z} 必定相应增大; $D_0/S_e < 10$ 时, 即厚壁管, 采用推力轧制, 张力系数为负, 但数值很小, 且基本不变, 可视为零张力轧制。
- 2) 机架数越多, 则 \bar{z} 越大; 机架数越少, \bar{z} 越小, 这是因为机架数少时无法建立足够大的张力。在本机组中, 机架数与可建立的 \bar{z} 的对应关系见表 5—4。

 表 5—4 机架数与可建立的 \bar{z} 的对应关系

机架数量	11	10	9	8	7	6	5	4	3
\bar{z}_{max}	0.38	0.30	0.27 *	0.24	0.21 *	0.19	0.12 *	0.05	0.01 *

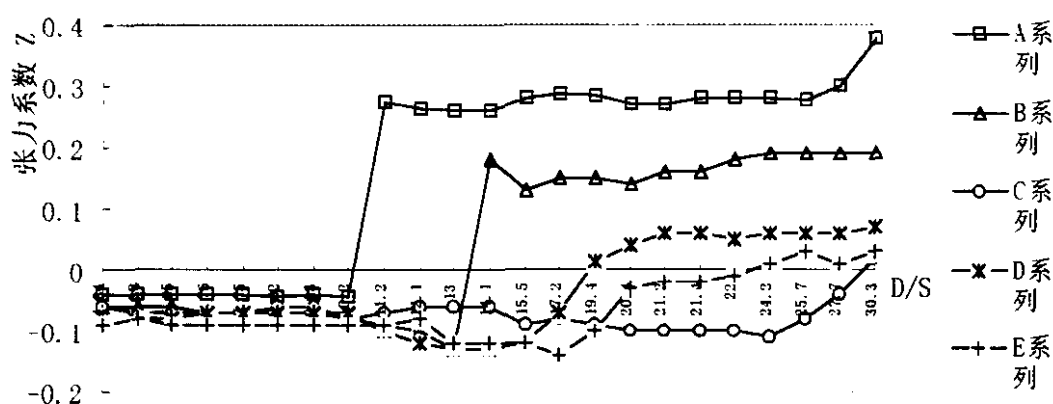
注: 带*号的为插入值。

- (3) 在不同的孔型类型中, 随着 D_0 的增大, 减径率降低, \bar{z} 也随之降低, 见图 5—3 和表 5—5。

 表 5—5 不同孔型系列 \bar{z} 的变化

D/S	A	B	C	D	E
4.84	-0.04	-0.06	-0.06	-0.09	-0.09
5.38	-0.04	-0.06	-0.07	-0.08	-0.08
6.05	-0.04	-0.06	-0.07	-0.08	-0.09
6.76	-0.04	-0.07	-0.07	-0.07	-0.09
7.75	-0.04	-0.07	-0.07	-0.07	-0.09
8.62	-0.042	-0.07	-0.06	-0.07	-0.09
9.33	-0.041	-0.07	-0.06	-0.07	-0.09
10.19	-0.043	-0.08	-0.08	-0.07	-0.09
11.21	0.273	-0.09	-0.07	-0.10	-0.09
12.11	0.265	-0.10	-0.06	-0.12	-0.08
12.96	0.260	-0.13	-0.06	-0.13	-0.12

14.06	0.26	0.18	-0.06	-0.13	-0.12
15.45	0.28	0.13	-0.09	-0.12	-0.12
17.16	0.28	0.15	-0.08	-0.07	-0.14
19.35	0.28	0.15	-0.09	0.012	-0.10
20.35	0.27	0.14	-0.10	0.04	-0.03
21.18	0.27	0.16	-0.10	0.06	-0.02
21.37	0.28	0.16	-0.10	0.06	-0.02
22.01	0.28	0.18	-0.10	0.05	-0.01
24.21	0.28	0.19	-0.11	0.06	0.01
25.73	0.28	0.19	-0.08	0.06	0.03
27.69	0.30	0.19	-0.04	0.06	0.01
30.29	0.38	0.19	0.02	0.07	0.03


 图 5—3 不同孔型系列 z 的变化曲线

5.1.2 张力系数的分配

在微张力定径工艺中，在总平均张力系数确定之后，只有合理地分配张力系数才会生产出壁厚精度合格的钢管。分配张力系数的依据是总平均张力系数以及最大张力系数

z_{\max} 。

最大张力系数主要取决于轧辊的咬入能力和钢管的断裂条件。张力系数太大时会造成钢管打滑，甚至造成钢管被拉断。

在分配张力系数时，应注意：

- 1) 各个机架的张力系数不应超过允许的最大值 z_{\max} 。
- 2) 应使尽可能多的机架具有最大值。
- 3) 综合起来看，张力系数肯定在中间的一架或几架达到最大值。

轧制 $\Phi 177 \times 5.87$ 规格时有 11 个机架，根据文献【9】，最大张力系数 z_{\max} 应取为 0.45。

根据微张减工艺的特点，取前面两个机架作为张力升起机架，后面两个机架作为张力降落

机架，中间几个机架以最大张力系数 z_{\max} 运行。为了验证德方的计算方法，本文特参照 CARTA 系统资料，张力系数的分配结果与 CARTA 完全相同。张力系数具体分配结果见图 5—4。

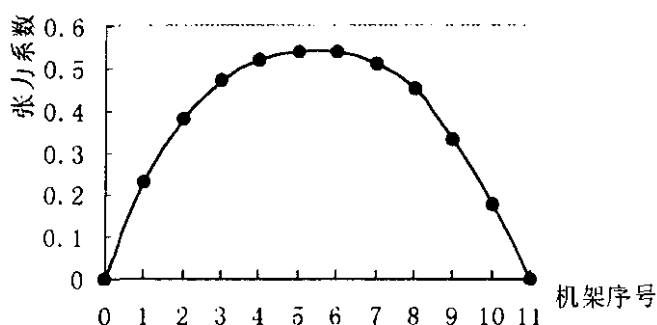


图 5—4 张力分配曲线

5.2 壁厚变化的计算

本文采用文献【9】介绍的迭代法。

1) 公式:
$$z_i = \frac{z_{H_i} + z_{h_i}}{2}$$

$$\gamma_i = \frac{1}{2} \left(\frac{s_i}{d_i} + \frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} \right) \quad (5-2)$$

$$\beta_i = \frac{2z_i(\gamma_i - 1) + (1 - 2\gamma_i)}{z_i(1 - \gamma_i) - (2 - \gamma_i)} \quad (5-3)$$

$$s_i = s_{i-1} \left(\frac{d_i - s_i}{d_{i-1} - s_{i-1}} \right)^{\beta_i} \quad (5-4)$$

式中:

s_i —第 i 机架的钢管轧后壁厚(mm);

d_i —第 i 机架的钢管轧后外径(mm);

s_{i-1} —第 i 机架的钢管轧前壁厚(mm);

d_{i-1} —第 i 机架的钢管轧前外径(mm);

z_i —第 i 机架的平均张力系数;

z_{H_i} —第 i 机架的前张力系数;

z_{h_i} —第 i 机架的后张力系数;

β_i —第 i 机架钢管的壁厚与中径对数比;

γ_i —第 i 机架的壁厚系数;

2) 计算方法

当孔型已定时, d_{i-1} 、 d_i 即为已知, 当选定张力系数后, 就可以利用以上公式由轧前壁厚计算每一机架的轧后壁厚。由于在计算 s_i 的公式 (5-4) 中本身含有 s_i , 因此要进行迭代计算, 从入口机架开始, 逐渐往后计算, 直到算出最后一个机架的壁厚为止。

先以 s_{i-1} 代替式 (5-2) 中的轧后壁厚 s_i 求出 γ_n 值, 代入式 (5-3) 求 β_i ; 再以此 β_i 代入式 (5-4), 并以 s_{i-1} 代替式 (5-4) 中括号内的 s_i , 用式 (5-4) 计算得一个值 s_i , 用此 s_i 作为已知代入式 (5-2) ~ (5-4), 计算得出一个新的 s_i 值。如此不断迭代, 直至前后两次所得的 s_i 值无明显变化 (两者差小于 0.01mm) 时把最后一次计算得的 s_i 值作为该机架的轧后壁厚。如此反复, 可以算出每一架中的轧后壁厚。

2) 计算结果

表 5-6 各架轧后壁厚

序号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
本文	5.7	5.75	5.81	5.82	5.81	5.80	5.79	5.78	5.79	5.80	5.83	5.86
手册	5.7	5.77	5.82	5.83	5.84	5.82	5.80	5.79	5.80	5.82	5.84	5.87

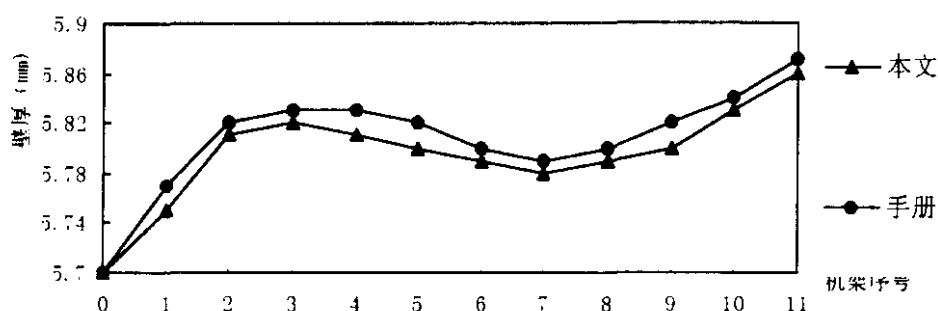


图 5-5 各架轧后壁厚计算结果

由图 5-5 可以看出, 按本文的计算方法计算时, 无论是壁厚变化趋势, 还是最后终轧结果, 与操作手册都完全相同。这说明德方的计算方法与本文的计算方法是一样的。但是, 本人认为, 在轧制 $\Phi 177.8 \times 5.87\text{mm}$ 时, 像操作手册那样, 将最大张力系数定为 0.54 有些不妥。因为只有 11 个轧制机架, 可建立的最大张力系数只有 0.45【9】。

5.3 轧辊转速的计算

5.3.1 计算第 i 架钢管出口速度 V_i

定径是空心体不带芯棒的连轧过程, 在轧制过程中遵循秒体积不变定律, 即秒流量相等 ($F_i V_i = F_{i-1} V_{i-1}$) 的原则。

第 i 机架钢管出口线速度 V_i 可由下式计算:

$$F_i V_i = F_{i-1} V_{i-1} \quad (5-5)$$

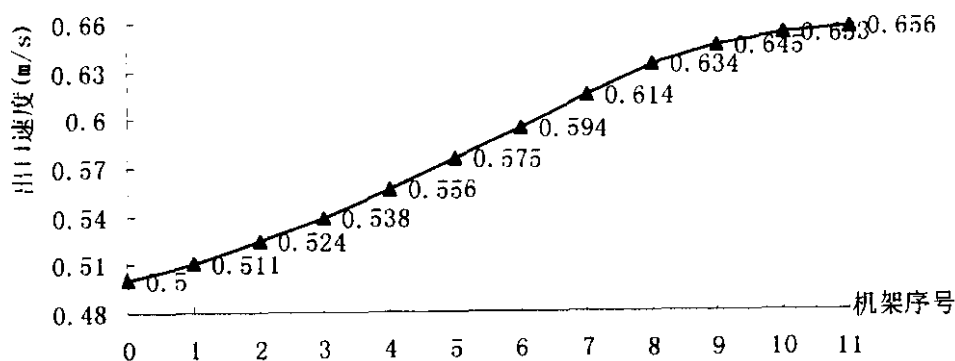
$$V_i = \frac{F_{i-1}V_{i-1}}{F_i} = \frac{(d_{i-1} - s_{i-1})s_{i-1}V_{i-1}}{(d_i - s_i)s_i} \quad (5-6)$$

d_{i-1} —第*i*机架的钢管轧前外径(mm);

s_{i-1} —第*i*机架的钢管轧前壁厚(mm);

 d_i —第*i*机架的钢管轧后外径(mm); s_i —第*i*机架的钢管轧后壁厚(mm);

计算结果：见图 5—6。



5—6 各架出口速度计算结果

5.3.2 计算各机轧辊工作直径 D_{ki}

在计算出钢管的出口速度后,还必须求出各机架的轧辊工作直径才可计算各机架轧辊转速。计算轧辊工作直径是计算轧辊转速工作的核心。本文用 B. II. 阿尼西伏罗夫法计算各机架的轧辊工作直径。见图 5—7。

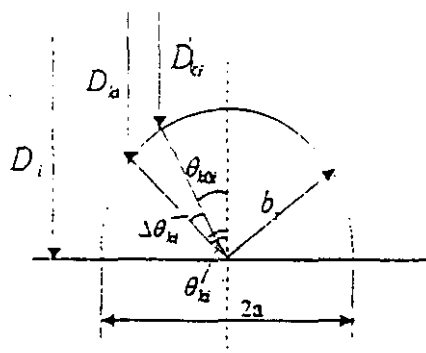


图 5—7 计算轧辊工作直径示意图

图 5-7 中 θ_k 表示第 i 架轧辊某一点的圆周速度和管子出口速度相等的中心角，这一点所对应的轧辊直径 D_k 就是工作直径。

$$D_k = D_w - 2b_i \cos \theta_k \quad (5-9)$$

式中：

b_i - 第 i 架孔型短半轴；

D_w - 轧辊名义直径。

当施加张力时，管子从孔型出来的速度增大了，相应地 θ_{k0i} 要增加一个增量 $\Delta\theta_k$ ，则 θ_k 角可写成：

$$\theta_k = \theta_{k0i} + \Delta\theta_k \quad (5-10)$$

式中：

θ_{k0i} - 无张力情况下第 i 架工作直径 D_k 对应的中心角。

对微张力减径机 θ_{k0i} 的计算本文采用 B. II. 阿尼西伏罗夫公式：

$$\theta_{k0i} = \frac{\psi_i}{2} \times \left(1 - \frac{L_{0i}}{fD_i}\right) \quad (5-11)$$

式中

ψ_i - 轧辊孔型对钢管的包角（三辊时 $\psi_i = \pi/3$ ，二辊时 $\psi_i = \pi/2$ ）；

f - 金属同轧辊间的摩擦系数；

L_{0i} - 孔型顶部咬入弧长，如图 5-8 所示：

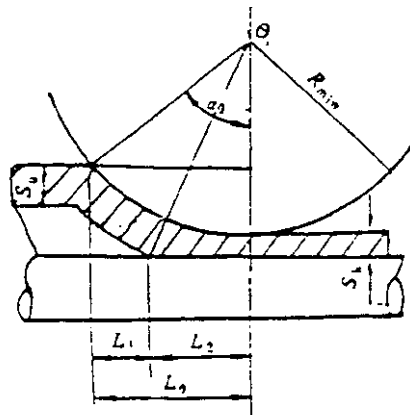


图 5-8 无芯棒轧管时的变形区示意图

$$L_{0i} = R_{\min} \sin \alpha_{0i} = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_{0i}} R_{\min}$$

$$\text{其中 } \cos \alpha_{0i} = 1 - \frac{d_{i-1} - d_i}{2R_{\min}}$$

式中 d_{i-1} ， d_i 分别为第 i 机架钢管的轧后、轧前外径；

$$R_{\min} - \text{第 } i \text{ 机架轧辊孔型顶部半径， } R_{\min} = \frac{D_w}{2} - b_i$$

增量 $\Delta\theta_k$ 同前后张力值的关系由下式确定：

$$\Delta\theta_n = \frac{\pi \sin\psi_i}{2n \sin \frac{\pi}{n}} \frac{d_{i-1}}{2f\eta_i L_{0i}} (Z_{Hi} - Z_{hi}\mu_i) \quad (5-12)$$

式中: d_{i-1} —钢管轧前外径 mm;

n —机架中轧辊数目;

Z_{Hi} , Z_{hi} —第 i 机架的前后张力系数;

$$Z_{hi} = Z_{Hi-1}$$

$$Z_{hi} = 2Z_i - Z_{Hi}$$

$$\therefore Z_{Hi-1} = 2Z_i - Z_{Hi} \quad (5-13)$$

张力系数分配完毕后 Z_i 即为已知, 又由成品前机架 $Z_{hi}=0$, 便可求出每一架 Z_{Hi} ,

Z_{hi} 。 μ_i —为第 i 机架的延伸系数:

$$\mu_i = \frac{s_{i-1}(d_{i-1} - s_{i-1})}{s_i(d_i - s_{i-1})} \quad (5-14)$$

η_i —考虑外区域和张力的影响系数, 可由下式决定:

$$\eta_i = 1 - r \frac{d_{i-1}}{L_{0i}} \sqrt{\frac{s_{i-1}}{d_{i-1}}} \quad (5-15)$$

上式中:

r —系数, 在此机组中取值为 0.5~0.6;

s_{i-1} —第 i 机架的钢管轧前壁厚 mm;

计算结果见图 5—9:

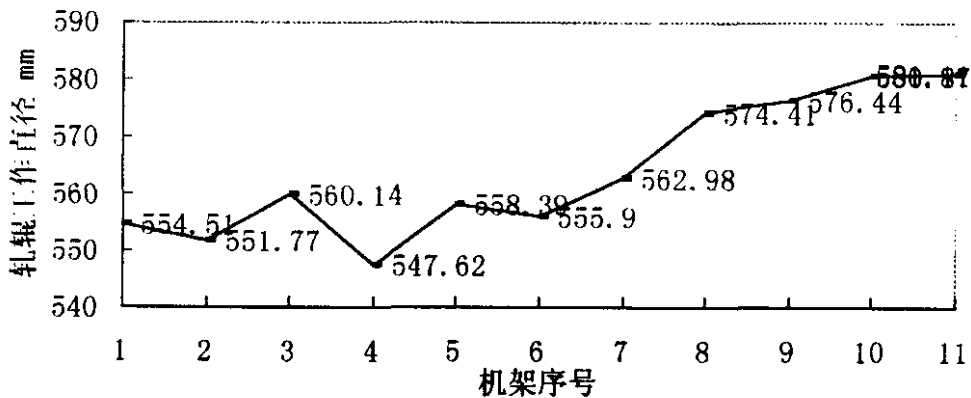


图 5—9 轧辊工作直径计算结果

5.3.3 轧辊转速的计算

由计算得到的轧辊工作直径 D_k ，代入 $n_g = \frac{60 \times 1000 \times v_l}{\pi \times D_k}$ 即可计算出各机架轧辊转速，见表 5—7。

表 5—7 各机架轧辊转速

机架	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
轧辊转速	17.6	18.14	18.34	19.39	19.67	20.41	20.83	21.08	21.37	21.47	21.56

从操作手册中给出的电机转速和传动比，计算轧辊转速，结果见表 5—8：

表 5—8 操作手册中给出的轧辊转速

机架	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
轧辊转速	17.72	17.91	18.51	19.12	19.76	20.36	20.95	21.45	21.72	21.87	21.92

将表 5—7 与表 5—8 比较，可以发现拟合的很好，见图 5—10。

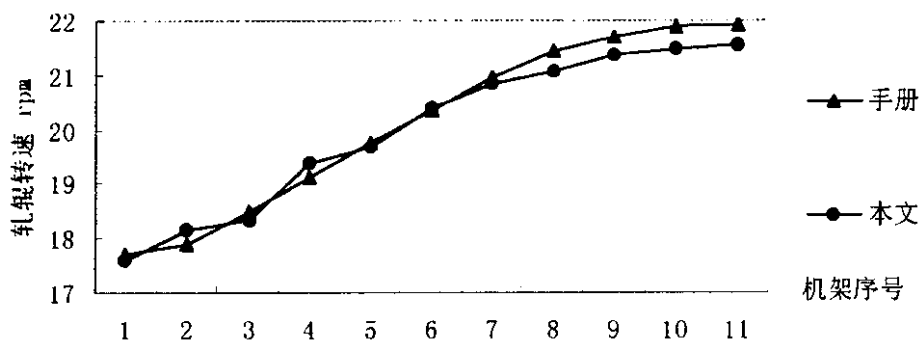


图 5—10 最终各架轧辊转速

5.3.4 轧辊工作辊径系数的分析

由以上轧辊转速的计算可以看出，准确计算转速的关键是确定轧辊工作直径 D_k 。为了避免复杂的计算，在实际生产中引入轧辊工作辊径系数 y_i ，其取值范围可用统计法确定。

令轧辊工作直径 $D_k = D_w - y_i * d_i$ ，其中 D_w 为轧辊名义直径， d_i 为第 i 架孔型平均直径，

y_i 为工作辊径系数。为了分析德方提供的有关轧辊转速的工艺资料，用与 $\Phi 177.8$ 同样的方法，从 B、C、D、E 系列中各取一个规格，计算各架的出口速度；用操作手册中的电机转速求出轧辊转速，然后求出轧辊工作直径和各架相应的轧辊工作辊径系数，结果见表 5—9 和图 5—11。

表 5—9 轧辊工作辊径系数表

规格	机架 序号	孔型平均 直径 mm	张力系数	轧辊工作 直径 mm	轧辊转速 rpm	工作辊径 系数
AO 177.8 × 5.87	1	232.8	0.23	554.51	17.72	0.84
	2	225.84	0.38	551.77	17.91	0.88
	3	219.04	0.47	560.14	18.51	0.87
	4	212.47	0.52	547.62	19.12	0.95
	5	206.10	0.54	558.39	19.76	0.93
	6	199.91	0.54	555.90	20.36	0.97
	7	193.92	0.51	562.98	20.95	0.96
	8	188.10	0.45	574.41	21.45	0.93
	9	184.23	0.33	576.44	21.72	0.94
	10	181.22	0.18	580.87	21.87	0.93
	11	179.50	0	581.11	21.92	0.94
BO 232 × 11	1	283.33	0.06	510.17	18.98	0.85
	2	276.81	0.15	506.22	19.43	0.88
	3	270.45	0.22	503.11	19.93	0.91
	4	264.23	0.31	501.85	20.36	0.94
	5	258.15	0.36	501.58	20.79	0.96
	6	252.21	0.36	503.40	21.17	0.98
	7	246.41	0.31	505.21	21.51	0.99
	8	240.74	0.23	508.65	21.74	1.00
	9	236.39	0.10	511.98	21.86	1.01
	10	234.22	0	514.53	21.90	1.01
CO 280 × 20	1	337.75	0	425.16	21.87	0.96
	2	330.66	-0.01	432.56	22.15	0.96
	3	323.72	-0.04	438.79	22.39	0.96
	4	316.92	-0.07	445.49	22.38	0.96
	5	310.26	-0.10	450.93	22.37	0.96
	6	303.75	-0.12	457.28	21.81	0.96
	7	297.37	-0.10	462.79	21.44	0.97
	8	291.12	-0.08	468.54	21.69	0.97
	9	285.78	-0.06	473.64	21.35	0.97
	10	282.66	-0.02	477.04	21.22	0.97
DO 339.7 × 8.38	1	387.89	0	436.33	22.98	0.81
	2	380.91	0.08	421.15	24.08	0.86
	3	374.05	0.16	409.85	25.07	0.91
	4	367.32	0.19	401.61	25.87	0.95
	5	360.71	0.21	397.26	26.49	0.98
	6	354.21	0.19	397.32	26.87	1.00
	7	347.84	0.17	400.66	26.98	1.00
	8	345.27	0.08	402.22	26.97	1.01
	9	342.96	0	404.39	26.92	1.01
EO 402 × 9	1	441.90	-0.03	359.61	26.82	0.88
	2	433.95	-0.04	347.99	27.99	0.93
	3	426.13	-0.08	339.68	28.90	0.96
	4	418.46	-0.08	336.50	29.40	0.99
	5	410.93	-0.08	342.19	29.19	0.99
	6	408.37	-0.04	344.56	29.10	0.99
	7	405.86	0	346.77	28.97	0.99

轧辊工作辊径系数曲线见图 5—11。

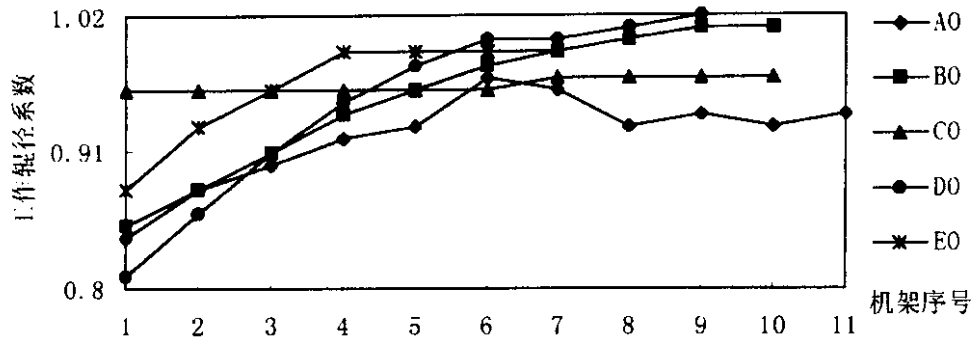


图 5—11 轧辊工作辊径系数曲线图

从图 5—11 可以看出：

- 1) 不论是每个系列，由入口机架至出口机架辊径系数都是有逐渐增大的。
- 2) 从 A~E 系列，随着入口管径的增大，管径系数呈下降趋势。
- 3) 辊径系数有大于 1 的现象。天津钢管公司在消化引进的 $\Phi 250\text{mm}$ 定径机工艺时也曾发现此现象。这个问题有待于本人以后在工作中继续研究。

6 现场实验

为了验证前面的理论，进一步明了张力—壁厚—转速三者之间的关系，进行了现场实验。

6.1 实验方法与实验条件

本次实验采用的是轧卡实验。轧卡方法是：待实验用的钢管前端轧出长度和尾部剩余长度大体相同时，紧急停车，然后电机反转，将钢管从定径机入口端退出来。实验时的工艺条件如表 6—1 所示。轧卡件冷却后，如图 6—1 所示，测量时头尾各去掉 10mm，然后从出口端开始测量，每隔 50mm 测量一个截面。在每个截面圆周上量取 6 个等分点的壁厚值。同时，在截面相垂直的两个方向上各量取一外径值。

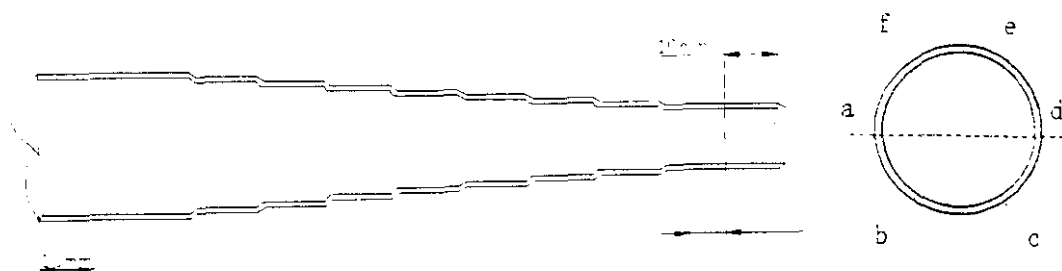


图 6—1 测量方法示意图

表 6—1 实验条件

机架号		1	2	3	4	5	6	7	8
电机转速		857	885	913	939	963	950	931	906
传动比		48.4733					47.047	45.738	44.385
孔型尺寸	孔型直径	232.8	225.82	219.04	212.47	206.1	201.47	197.87	195.86
	长半轴	119.5	115.21	111.74	108.37	105.1	102.24	99.94	97.93
	短半轴	113.30	110.61	107.30	104.10	101.00	99.23	97.93	97.93
入口钢管温度		920℃			钢种	20#钢			
钢管入口速度		0.5 米/秒							

轧卡件的实际测量数据详见附录 3。表 6—2 是取样结果的统计值。

表 6—2 轧卡件测量数据的统计值

机 架 号	0	1	2	3	4	5	6	7	8
\bar{S} (冷)	13.9	14.1	14.4	14.5	14.5	14.6	14.7	15.1	15.6
\bar{S} (热)	14.04	14.24	14.54	14.65	14.65	14.75	14.85	15.25	15.76
直 径 (冷)	242	230.7	223	216.3	210.3	203.6	198.6	196	193.7
直 径 (热)	244.42	233.00	225.23	218.46	212.40	205.64	200.59	197.96	195.64

由表 6—2 可以看出, 实际的来料规格 (表 6—2 中的 0 机架) 为 $\Phi 244.42 \times 14.04\text{mm}$, 成品规格 (表 6—2 中的 8 机架) 为 $\Phi 193.7 \times 15.6\text{mm}$ (冷), 增厚量为 1.72mm 。而轧制表上给定的来料规格为 $\Phi 240 \times 15.2\text{mm}$, 成品规格为 $\Phi 194 \times 16\text{mm}$ (冷), 增厚量为 0.96mm 。可见两者相差很大。为了分析差异的原因, 本文首先根据轧制表进行理论计算, 然后根据实例值计算。

6.2 $\Phi 194 \times 16\text{mm}$ 轧辊转速的理论计算

荒管尺寸为: $\Phi 240 \times 15.2\text{mm}$; 成品管尺寸为: $\Phi 195.86 \times 16.16\text{mm}$ 。

根据前面介绍的方法, 计算平均张力系数 $\bar{Z} = 0.20$ 。各架张力系数分配结果见表 6—3。

6—3 各架张力系数

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
前张力	0.16	0.24	0.30	0.32	0.30	0.22	0.06	0
后张力	0	0.16	0.24	0.30	0.32	0.30	0.22	0.06
\bar{Z}	0.08	0.20	0.27	0.31	0.31	0.26	0.14	0.03

用第 5 章介绍的迭代的方法计算各架轧后壁厚, 计算结果见表 6—4。

表 6—4 各架轧后壁厚计算结果

序号	0	1	2	3	4	5	6	7	8
壁厚	15.2	15.39	15.53	15.66	15.75	15.84	15.94	16.04	16.15

各架出口速度计算结果见表 6—5。

表 6—5 各架出口速度计算结果

机架序号	0	1	2	3	4	5	6	7	8
速度 m/s	0.500	0.511	0.523	0.537	0.552	0.568	0.579	0.587	0.590

各架轧辊工作直径见表 6—6。

表 6—6 各架轧辊工作直径

机架序号	1	2	3	4	5	6	7	8
工作直径	563.75	546.69	551.24	551.04	552.75	553.23	554.17	555.37

各架轧辊转速见表 6—7。

表 6—7 各架轧辊转速

机架序号	1	2	3	4	5	6	7	8
轧辊转速	17.31	18.27	18.61	19.13	19.63	19.99	20.23	20.29
手册	17.68	18.26	18.84	19.37	19.87	20.19	20.35	20.41

将表 6—7 上的计算值与手册上的给定值进行比较, 如图 6—2 所示。

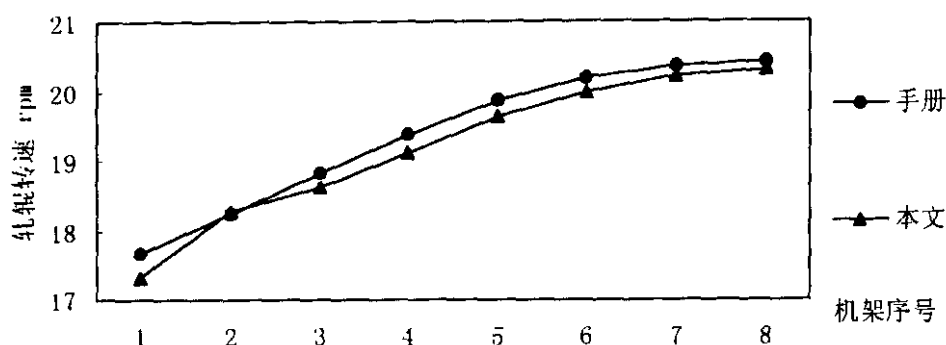


图 6—5 轧辊转速比较图

可以看出, 本文的计算结果与德方提供的操作手册吻合的非常好。这说明本文的计算方法与德方基本相同, 是正确的。

6.3 对实测结果的分析

既然理论计算是正确的, 那么增厚量差异的原因何在? 本文进行了以下分析。

假设钢管的原始状况是理想的, 即均整后的钢管外径、壁厚都是均匀的。以此为前提, 可以认为表 6—2 中机架序号为 0 的一段钢管的状态代表了整个钢管的原始状态; 机架序号为 8 的一段钢管代表了该钢管的轧后状态。

钢管的原始尺寸: $\Phi 242 \times 13.9$, 相应的热尺寸为: 244.42×14.04 。

钢管的轧后尺寸为: 193.7×15.6 , 相应的热尺寸为: 195.64×15.76 。

下面, 以壁厚均匀为假设条件, 计算轧辊转速。

(1) 张力系数

用前面叙述的方法, 计算轧制本规格时的总平均张力系数为: -0.027。

各架张力系数分配结果见表 6—8。

表 6—8 各架张力系数分配结果

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
前张力	-0.021	-0.034	-0.34	-0.039	-0.038	-0.028	-0.022	0
后张力	0	-0.021	-0.034	-0.034	-0.039	-0.038	-0.028	-0.022
\bar{Z}	-0.011	-0.028	-0.034	-0.037	-0.039	-0.033	-0.025	-0.011

根据各架轧后实际测量结果计算各架张力, 计算结果见表 6—9。

表 6—9 根据实际测量壁厚计算张力

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
张力	0.216	-0.148	0.277	0.464	0.290	0.233	-4.611	14.32

表 6—8 和表 6—9 的比较见图 6—3。

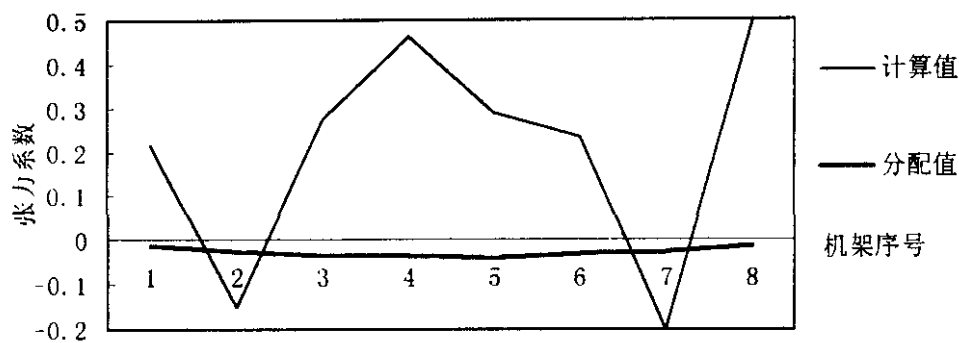


图 6—3 张力比较曲线图

由图 6—2 明显可以看出，由实际测量的壁厚值进行计算而得到的张力系数起伏很大，尤其最后两架其张力系数达到-4.611，14.32 这是不可能的。

(2) 壁厚计算

用第 5 章介绍的迭代的方法，根据表 6—3 上的数据计算各架轧后壁厚，计算结果见表 6—10。

表 6—10 各架轧后壁厚

序号	0	1	2	3	4	5	6	7	8
计算壁厚	14.04	14.37	14.61	14.84	15.05	15.30	15.49	15.59	15.68
实测壁厚	14.04	14.24	14.54	14.65	14.65	14.75	14.85	15.25	15.76

计算结果与测量结果的比较，见图 6—4：

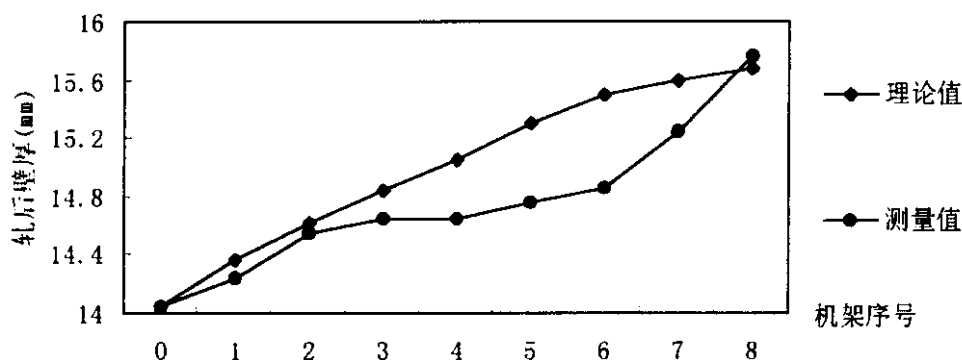


图 6—4 计算结果与测量结果比较图

从图 6—3 可以看出，理论计算的壁厚值是均匀增加的，而实际测量的壁厚值增加并不是很均匀，二者的壁厚曲线拟合不好。

(3) 轧辊转速的计算

根据表 6—5 上的壁厚计算各架出口速度计算结果见表 6—11。

表 6—11 各架出口速度计算结果

机架序号	0	1	2	3	4	5	6	7	8
速度 m/s	0.500	0.515	0.526	0.535	0.545	0.555	0.564	0.569	0.573

各架轧辊工作直径见表 6—12。

表 6—12 各架轧辊工作直径

机架序号	1	2	3	4	5	6	7	8
工作直径	529.66	535.60	543.92	549.78	555.15	559.96	563.23	566.61

各架轧辊转速见表 6—13。

表 6—13 各架轧辊转速

机架序号	1	2	3	4	5	6	7	8
轧辊转速	18.57	18.76	18.79	18.93	19.09	19.25	19.29	19.31

操作手册中给出的各架轧辊转速见表 6—14。

表 6—14 操作手册中给出的各架轧辊转速

机架序号	1	2	3	4	5	6	7	8
轧辊转速	17.68	18.26	18.84	19.37	19.87	20.19	20.35	20.41

将表 6—13 和 6—14 相对比, 可以看出轧辊转速也不能很好拟合。见图 6—5。

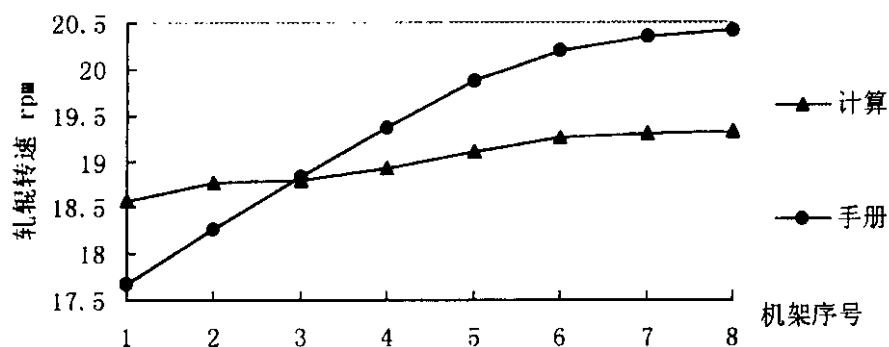


图 6—5 轧辊转速比较图

以上计算表明, 以假设壁厚均匀为前提的所有计算结果, 包括张力、壁厚和转速, 与实际值均不能很好拟合, 而计算过程和计算方法是正确的, 因此, 有理由认为, 差异的原因在于来料壁厚不均。实测结果 (见附录 3) 表明, 来料的壁厚波动为: $S_{\max}=14.9\text{mm}$, $S_{\min}=12.7\text{mm}$, $|\Delta S|=2.2\text{mm}$, $\bar{S}=13.9\text{mm}$, $+\Delta S\%=7.2\%$, $-\Delta S\%=8.6\%$, 这证明了本文的分析是正确的。

6.4 关于转速计算的讨论

由以上计算可以看出, 德方轧制表上提供的转速值, 是在以下两个前提下给出的:

(1) 来料壁厚均匀; (2) 同一批来料的壁厚必须一致。但是, 对包钢 $\Phi 400\text{mm}$ 自动轧管机组目前的设备条件、工艺条件而言, 同一批来料的壁厚波动经常在 1mm 左右。

6.5 实物质量的分析

6.5.1 内六方

为了确定本定径机组在轧制厚壁管时是否存在内六方现象,2000年7月13日,在 $\Phi 298.4 \times 20.3\text{mm}$ 规格上随机测量了五个截面,每个截面测量24个点,壁厚分布情况见表6—15。

表 6—15 各截面壁厚分布情况

序号	A	B	C	D	E
1	20.6	21	20.1	20.5	20.3
2	20.8	20.8	19.9	20.5	20.2
3	21.3	21.1	20.3	20.2	20.5
4	20.8	20.8	20.6	20.4	20.6
5	20.1	20.5	20.8	21.1	20.7
6	19.1	20.6	20.8	20.6	20.7
7	19.6	20.2	20.5	20.7	20.8
8	19.7	19.9	21.1	20.2	20.6
9	20	20	21.2	20.5	20.7
10	20.2	19.9	20.6	20.7	21.3
11	19.9	20	20.8	21.4	21.4
12	19.6	19.9	21.7	21.4	21.1
13	20.8	19.6	21.6	21	21.2
14	19.6	19.9	21	21.4	21.3
15	18.7	19.2	21.1	21.2	21.4
16	20.3	19.3	21	21.5	20.4
17	19.6	19.8	21	21.3	21.8
18	19.6	20.6	20.1	20.5	20.9
19	20.7	20.2	20.3	20.7	20.7
20	20.5	20.1	20.5	21.2	20.5
21	20	20.1	21	20.8	20.6
22	21	20.5	20.1	20.1	20.2
23	21.1	21	20.1	20.4	20.2
24	21.5	21.3	20.2	21.3	20.1

图 6—6 是第五个截面的壁厚分布展开示意图,图 6—7 是第五个截面的壁厚分布雷达图,外圆是钢管的外径,内圆是钢管的内径。

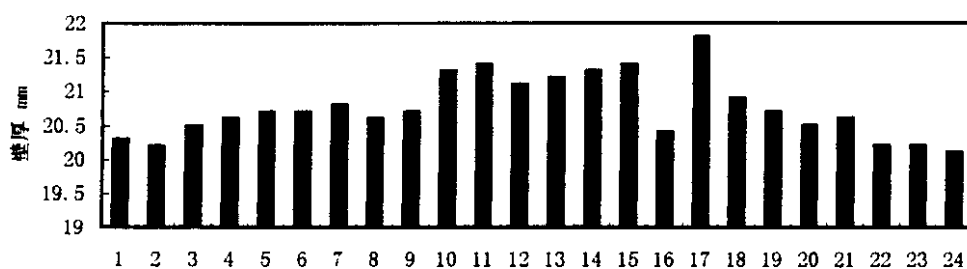


图 6—6 第五个截面的壁厚分布展开示意图

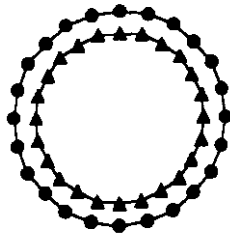


图 6—7 第五个截面的壁厚分布雷达图

从图 6—6 可以看出, 本定径机组的成品管圆周方向壁厚分布也有其规律: 总体上呈起伏波浪状, 每隔几点波动一次, 波动周期不固定。但波峰和波谷的数量均为 6 个。这说明本定径机组的厚壁管也存在内六方现象。观察图 6—7, 发现内六方的特征不如张力减径机那么明显。

衡量钢管内棱缺陷程度的是内棱值, 用 K 表示, K 越大, 内六方趋势越严重。

$$K = \frac{\Delta S}{\bar{S}} \times 100\%, \text{ 式中, } \Delta S \text{ 是钢管横向壁厚差值, } \Delta S = \frac{\sum_{i=1}^6 S_{\max i}}{6} - \frac{\sum_{i=1}^6 S_{\min i}}{6};$$

$$\bar{S} \text{ 是钢管横向平均壁厚值, } \bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^6 S_{\max i} + \sum_{i=1}^6 S_{\min i}}{12}。$$

表 6—15 中五个截面的内棱值见表 6—16。

表 6—16 五个截面的内棱值

截面序号	1	2	3	4	5
$\sum S_{\max i}$	123.6	123.5	126	127.9	126.3
$\sum S_{\min i}$	117.6	120.1	122.2	123.2	122.9
ΔS	1	0.57	0.63	0.78	0.57
\bar{S}	20.1	20.3	20.68	20.93	20.77
内棱值 $K\%$	4.98	2.81	3.05	3.73	2.74

从表 6—16 可以看出, 所取五个截面的内棱值都小于 5%, 内六方倾向不严重, 这说明本套机组生产厚壁管时内六方倾向不严重, 可以认为不存在内六方现象。

6.5.2 壁厚精度

见表 6—15, 此次所取试样壁厚精度为:

$$+S\% = \frac{S_{\max} - S_{\text{nom}}}{S_{\text{nom}}} \times 100\% = \frac{21.8 - 20.3}{20.3} \times 100\% = 7.39\%$$

$$-S\% = \frac{S_{\text{nom}} - S_{\min}}{S_{\text{nom}}} \times 100\% = \frac{20.3 - 19.1}{20.3} \times 100\% = 5.91\%$$

壁厚偏差在 $\pm 10\%$ 的高级管壁厚标准范围内。

6.5.3 外径精度

见附录 3，以轧卡件的出口端作为成品管，其外径精度为：

$$+D\% = \frac{D_{max} - D_{nom}}{D_{nom}} \times 100\% = \frac{194 - 194}{194} = 0$$

$$-D\% = \frac{D_{nom} - D_{min}}{D_{nom}} \times 100\% = \frac{194 - 193.5}{194} \times 100\% = 0.26\%$$

本定径机组的外径精度很好。

7 切头长度的确定

在微张减过程中, 由于对壁厚的变化做到准确控制还比较困难, 并且钢管头部、尾端分别在张力建立和张力消失的过程中进行轧制, 就必然产生钢管端部增厚现象。

准确确定切头切尾长度是微张力定径工艺中的一个重要内容。若切头长度短于应切长度, 则影响钢管尺寸精度; 若切头长度大于应切长度, 则影响金属收得率, 影响工厂效益。

在本文的文献综述中已经给出了张力减径工艺中常见的切头切尾计算公式。由这些公式可以看出, 切头尾长度与下列因素有关: (1) 机架间距; (2) 轧机的传动特性, 电机的刚性越好, 恢复转速的时间越短, 首尾管壁的偏厚值越小, 切头越短; (3) 延伸系数和减径率, 减径率越大, 则切头长度越长; (4) 机架间的张力, 张力越大时, 首尾相对中间的壁厚偏差就越大, 切头长度就越大。对于微张力定径机, 其工艺原理与张减相同, 但减径率、张力系数等工艺参数有其自身的特点, 因此, 现有的张减的切头尾长度的计算公式不适合于定径。德方提供的资料中, 给定的切头尾长度为 700mm (恰好等于一个机架间距), 没有考虑机架间的张力、减径率等其它因素。本文以实验数据为依据, 对切头尾长度进行了研究, 为现场准确确定切头长度提供了依据, 有利于提高本机组的成材率。

7.1 实验方案

在正常生产条件下, 从定径后不同规格管子的头尾端各取 1 米以上的管端。取样方案见表 7—1。

表 7—1 取样方案

钢管规格	D/S	孔型系列 孔型形状	机架数量	材质	取样长度 mm	备注
Φ194×16	12.13	AO	8	20#钢	1680	轧卡件
Φ180×8	22.5	AO	10		1000	正常轧制的成品管
Φ219×8	27.38	AO	4		1600	
Φ273×8	34.13	BO	3		1200	

7.2 测量方法

从端部开始 (每端去掉 10mm), 每隔 20mm (Φ180×8mm 规格间隔 50mm) 取一截面, 在每个截面在圆周方向上取六个等分点 a、b、c、d、e、f, (a、b、c、d、e、f 在钢管表面各成一条直线), 测量壁厚值。

测量方法见图 7—1。

测量结果见附录 4。

7.3 端部壁厚的分布与切头长度的确定

由附录 4 可以看出, 每个规格的切头长度都在 400mm 以内, 故研究其前 20 个截面即可。每个规格的壁厚分布见图 7—2。

图 7—2 中, min 是指每个截面的壁厚最小值, max 是指每个截面的壁厚最大值, 标准允许极限是按 ±10% 确定的壁厚公差线。

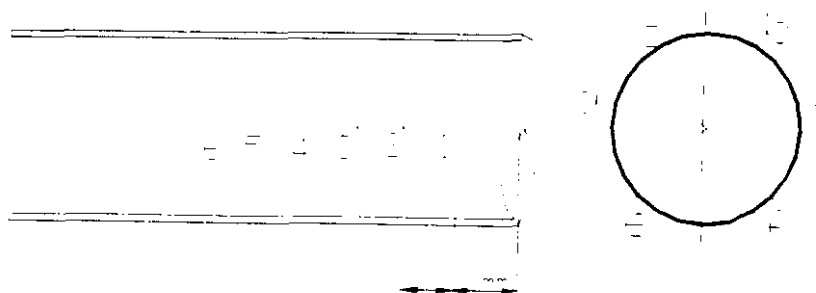


图 7—1 测量方法示意图

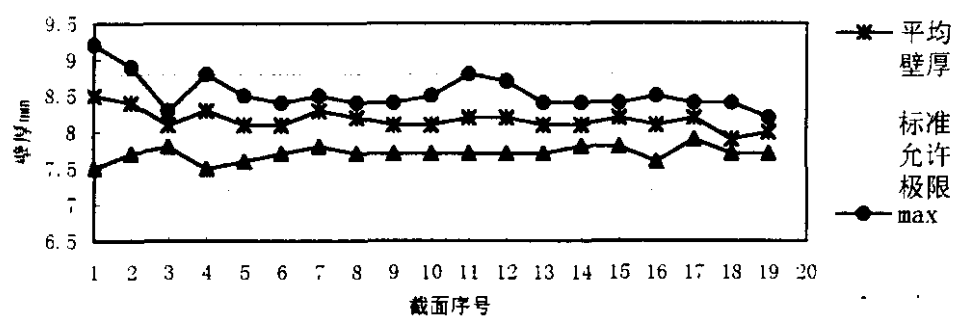


图 7—2—1 Φ180×8mm 头部壁厚分布曲线

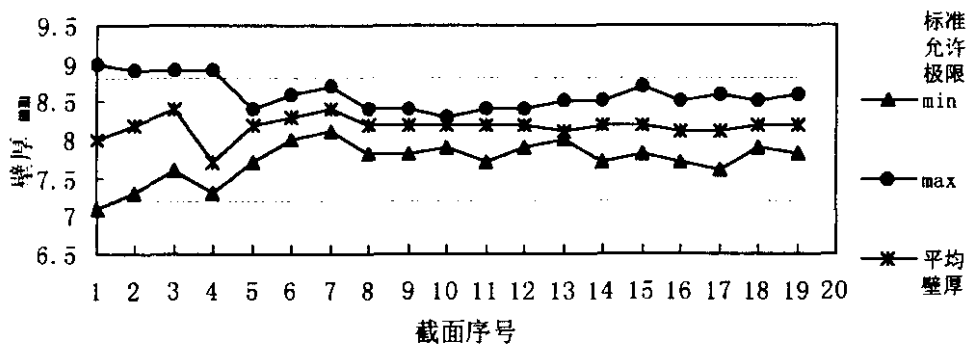


图 7—2—2 Φ180×8mm 尾部壁厚分布曲线

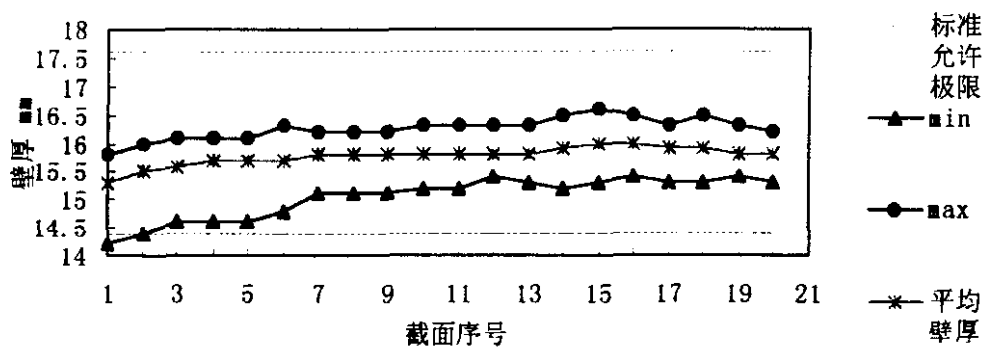


图 7—2—3 Φ194×16mm 头部壁厚分布曲线

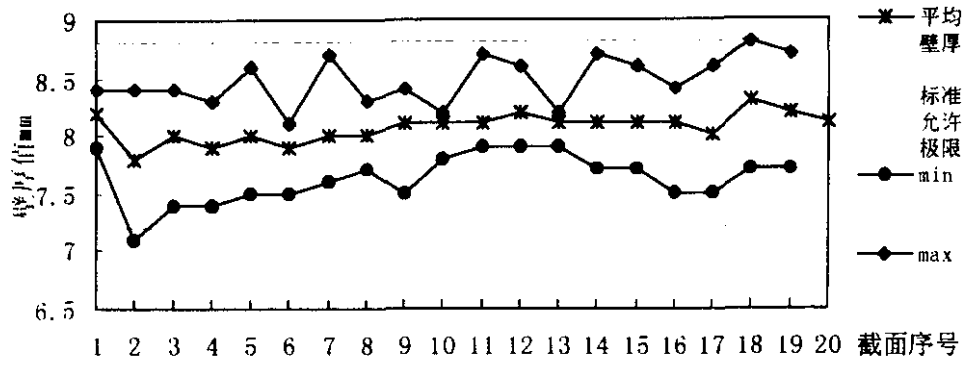


图 7-2-4 $\Phi 219 \times 8 \text{mm}$ 头部壁厚分布曲线

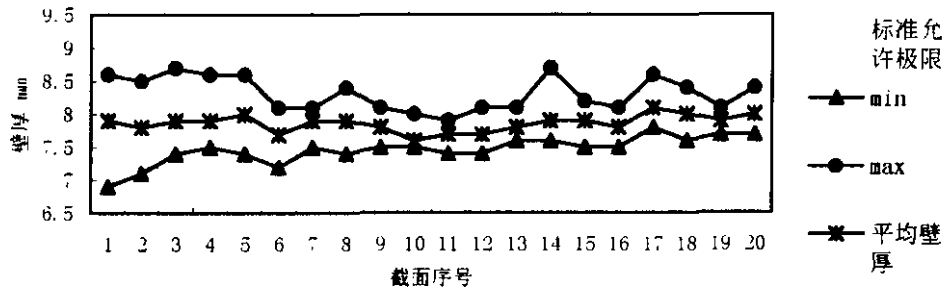


图 7-2-5 $\Phi 219 \times 8 \text{mm}$ 尾部壁厚分布曲线

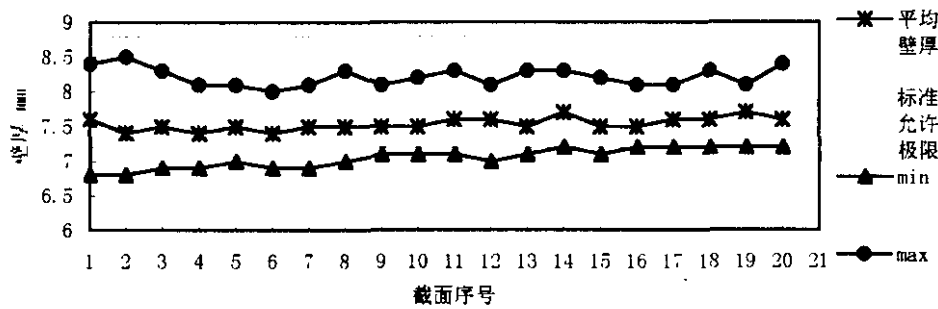


图 7-2-6 $\Phi 273 \times 8 \text{mm}$ 头部壁厚分布曲线

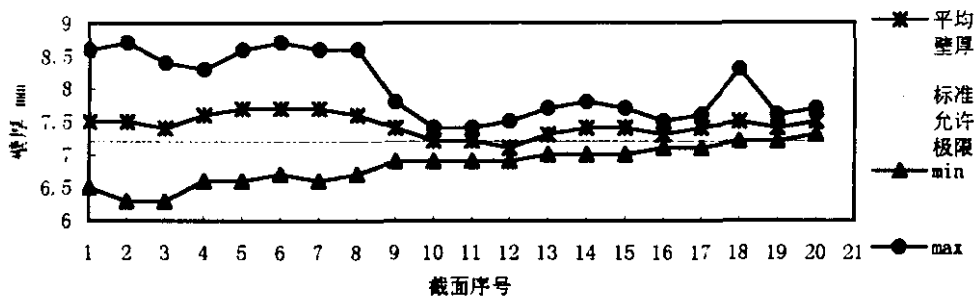


图 7-2-7 $\Phi 273 \times 8 \text{mm}$ 尾部壁厚分布曲线

表 7—2 各规格的切头尾长度

成品规格 mm	D/S	机架数量	切头长度 mm	切尾长度 mm	德方资料 mm
180×8	22.5	10	110	210	700
194×16	12.13	8	30	/	700
219×8	27.38	4	50	50	700
273×8	34.13	3	310	310	700

由图 7—2 和表 7—2 可以看出：（1）对于平均壁厚接近于名义壁厚的 $\Phi 180 \times 8 \text{ mm}$ 、 $\Phi 194 \times 16 \text{ mm}$ 和 $\Phi 219 \times 8 \text{ mm}$ 头尾增厚段长度很短，切头尾长度只有 210 mm（ $\Phi 180 \times 8 \text{ mm}$ 的尾部）。如果按（-12%~+15%）壁厚允许偏差计算，切头尾长度还可进一步缩短。

（2）对于平均壁厚偏离名义壁厚较大的 $\Phi 273 \times 8 \text{ mm}$ 规格，切头尾长度分别为 310 mm 和 350 mm。显然，如果提高来料壁厚精度，准确设定轧辊转速，使定径后平均壁厚更接近于名义壁厚，切头尾长度可以缩短。

（3）在正常来料壁厚的情况下，存在机架数量越多（张力系数较大）切头尾长度增长的趋势。但是，由于取样规格较少，尚未建立切头尾长度与规格、D/S、平均张力系数、机架数量之间的统计规律，这有待于本人在以后的工作中完成。

综合本次实测数据可以看出，在测量的规格范围内，按 $\pm 10\%$ 的壁厚公差计算，切头尾长度在 300 mm 以内，可以保证产品的尺寸精度，比之德方提出的 700 mm 可以明显提高金属收得率。

8 力能参数的计算

力能参数是轧机最重要的设备参数, 广泛的用于机械设备的强度设计和校核, 同时又是制订工艺制度、调整轧机、开发新品种以扩大产品范围、充分挖掘设备潜力的重要原始参数。力能参数的计算是在工艺参数计算的基础上进行的。本文以 $\Phi 402 \times 32\text{mm}$ 为代表规格进行计算。

力能参数的计算包括三部分: 轧制压力、轧制力矩、轧制功率、电机功率。

8.1 轧制压力

轧制压力 $P_i = \rho_i \cdot F_i$ 式中, F_i ——接触面积;

ρ_i ——单位压力。

$$\text{平均单位压力 } \rho_i = \eta_i k_f \frac{2S_{i-1}}{d_{i-1}} \left[1 - \left(\frac{1}{3} Z_i + \frac{2}{3} Z_{i-1} \right) \right] \quad (8-1)$$

式中, η_i ——变形抗力系数 (考虑未变形区和张力的影响);

k_f ——变形抗力, $k_f = 1.15\sigma_s$, N/mm^2 ;

S_{i-1}, d_{i-1} ——进入孔型的钢管壁厚、直径, mm ;

Z_i, Z_{i-1} ——该机架的前张力系数和后张力系数。

$$\text{变形抗力系数可按下式计算: } \eta_i = 1 + \frac{d_{i-1}}{2L_i} \sqrt{\frac{S_{i-1}}{d_{i-1}}} \quad (8-2)$$

式中, L_i ——孔型底部上的咬入弧长度, $L_i = \sqrt{R_{\min} \times \Delta h_i}$, mm ;

$$R_{\min i} \text{ ——孔型底部轧辊半径, mm. } R_{\min i} = \frac{1}{2}(D_p - 2b_i) = \frac{D_p}{2} - b_i; \quad (8-3)$$

$$\Delta h_i = a_{i-1} - b_i, \text{ mm.}$$

(2) 接触面积

$$F_i = (0.9 \sim 0.95) B_i \sqrt{(a_{i-1} - b_i) [D_{\min i} - (a_{i-1} - b_i)]} \quad (8-4)$$

式中, B_i ——每个轧辊上的轧槽宽度, $B = \sqrt{3}a_i$, mm ;

$D_{\min i}$ ——孔型底部轧辊直径, $D_{\min i} = D_p - 2b_i$, mm ;

a_i, b_i ——孔型长半轴, 短半轴, mm 。

8.2 轧制力矩

轧制时在每个机架上力矩变化如图 8—1。

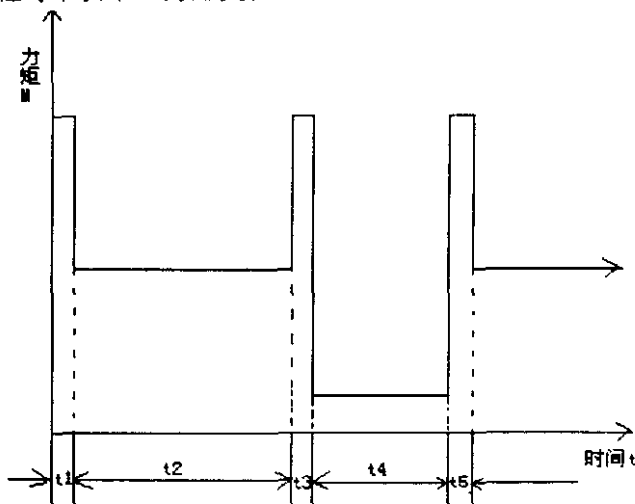


图 8—1 轧制时每个机架上力矩变化图

t_1 为钢管进入该机架的时间，这时由于张力尚未建立，故力矩较大。 t_2 为稳定轧制阶段。这时由于张力已经建立，轧制压力和力矩下降，且基本稳定。 t_3 为钢管脱离该机架的时间。由于张力消失，轧制压力和力矩再次升高。 t_4 为轧机间隙时间，为空转力矩。 $t_1 \sim t_4$ 为一个轧制周期 T 。

张力轧制时，轧制力矩由金属变形所需轧制力矩和形成张力差值所需力矩两部分组成。

(1) 金属变形所需轧制力矩

$$\text{按下式计算: } M_i = f P_i d_i \sqrt{3} \left[\frac{D_p}{d_i} \left(\frac{\pi}{3} - 2\theta_{ki} \right) - \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - 2 \sin \theta_{ki} \right) \right] \quad (8-5)$$

式中， f —金属和轧辊的摩擦系数，铸铁轧辊 $f=0.45$ ，铸钢轧辊 $f=0.40$ ，冷硬铸铁轧辊 $f=0.42$

P_i —轧制压力，N

d_i —孔型直径，mm

D_p —轧辊理论直径，对于包钢 $\Phi 400\text{mm}$ 三辊定径机组， $D_p=750\text{mm}$

θ_{ki} —孔型圆弧上管子运动速度同轧辊圆周速度一致处的中心角，弧度。

可由 $D_{gr} = D_p - 2b_i \cos \theta_{ki}$ 计算 θ_{ki} 。 D_{gr} 为轧辊工作直径， D_p 为轧辊名义直径， b_i 为孔型短半轴。

由式 (8—5) 可知，当 θ_{ki} 大于某一数值时， M_i 为负值，这时应取绝对值。

(2).形成张力差值所需轧制力矩

$$M_{Zi} = P_{Zi} R_{\min i} = \frac{1}{2} P_{Zi} (D_p - 2b_i) \quad (8-6)$$

式中, P_{Zi} —机架间的张力差值, N。

$$P_{Zi} = \pi k_f Z_{mi} [S_i (d_i - S_i) - S_{i-1} (d_{i-1} - S_{i-1})] \quad (8-7)$$

Z_{mi} —该机架的平均张力系数

(3)合成力矩

$$M_{\text{合}i} = M_i + M_{Zi} \quad (8-8)$$

8.3 轧制功率

(1)金属变形所需的单机架轧制功率 $W_i = \frac{n_i M_i}{975} \text{ kw} \quad (8-9)$

式中, n_i —轧辊转速, 转/秒

M_i —轧制力矩, N·m

(2) 电机功率

电机功率为轧制功率与机械损耗功率之和。机械损耗功率为轧制功率的15%左右。故电机功率 $M_D = 1.15M_i$ 。 (8-10)

下面以 $\Phi 450 \times 30.4\text{mm} \rightarrow \Phi 402 \times 32\text{mm}$ 为例, 对力能参数进行校核。相关数据见表 8—1。

表 8—1 力能计算示例相关参数

钢种	孔型系列	孔型类型	机架数量	屈服强度 N/mm^2
20*	E	O	7	235

各架孔型相关参数见表 8—2。

序号	1	2	3	4	5	6	7
孔型直径	441.90	433.95	426.13	418.46	410.93	408.37	405.86
长半轴	224.35	220.27	216.27	212.34	208.48	205.44	202.93
短半轴	217.55	213.68	209.86	206.12	202.45	202.93	202.93

计算结果见表 8—3。

表 8—3 力能参数计算结果

机架序号	1	2	3	4	5	6	7
单位压力 N/mm^2	74.88	70.98	81.22	89.82	89.53	103.98	125.95
接触面积 mm^2	10550	10848	9234.18	8016.03	7930.30	7501.44	5795.75
轧制压力 N	7.9×10^5	7.7×10^5	7.5×10^5	7.2×10^5	7.1×10^5	7.8×10^5	7.3×10^5
总力矩 N·m	76536	84365	88534	86642	85335	87219	2923.17
轧制功率 kw	55.87	121.99	150.17	43.13	42.08	59.99	1.46

参照定径机操作手册，本定径机的最大允许力矩为 $9 \times 10^4 \text{N} \cdot \text{m}$ ，最大允许轧制力为 $8 \times 10^5 \text{N}$ ，每台电机额定功率为 176kw。故上述结果均在允许范围内。

$\Phi 402 \times 32 \text{mm}$ 是入口管径最大的 E 系列的一个规格，同时也是产品大纲中最厚的规格之一。经本文计算，轧制此规格时的力能参数均在电机允许范围内，说明轧制最大、最厚规格时电机的能力也是足够的。据此，可以认为，电机的能力是足够的。

9 轧制表的编制

在无缝管生产中,将产品大纲中的每个产品规格,结合生产质量标准,轧机性能极限和工具等实际情况算出各轧机的变形量,得出相应的毛管、荒管、减径荒管和热轧管(光管)的长度,及其对应的直径和壁厚,将以上数据一起列成表格形式,就得到“轧制程序表”,也叫“轧制表”。轧制表是确定工具规格、轧机调整参数及轧机生产能力和计算设备能力参数的主要依据,同样它对辅助设备工艺参数和工艺平面布置的确定极为重要。正确地计算轧制表,能保证机组实现高产、优质、多品种、低能耗。

9.1 定径工序的轧制表编制步骤

(1) 原始数据:

已知成品管外径与壁厚各为 D_n 及 S_n (热尺寸)。

$$D_n = (1.01 \sim 1.015) D_{nc}$$

D_{nc} ——成品管外径冷尺寸。

(2) 确定荒管外径与壁厚 D_0 、 s_0 。

(3) 孔型系列的选择

根据给定的成品管外径,据表 3—1 选择适当的孔型系列。

(4) 根据 D/S 值,按表 3—4 选择孔型类型。

(5) 确定机架数量及其组成(粗、精轧)

在计算机架数量时,应首先粗略估计一下平均减径率 $\bar{\rho}$,然后根据总减径率和平均减

$$\text{径率 } \rho \text{ 来确定。公式为: } n = \frac{\ln \frac{D_n}{D_0}}{\ln(1 - \bar{\rho})} + q \quad (9-1)$$

式中, q 是考虑首尾各机架张力升起、降落和减径率减小所需机架的折合数,

D_n ——成品外径,(热尺寸)

D_0 ——入口荒管直径,(热尺寸)

(6) 参照表 3—3,按第 4 章介绍的近似方法,确定各机架的单架减径率 ρ_i ,求出每架钢管外径 d_i :

$$\rho_i = \frac{d_{i-1} - d_i}{d_{i-1}}$$

$$d_i = d_{i-1} (1 - \rho_i)$$

d_0 已知, 逐架给定 ρ_i , 则 d_i 可逐架算出。

(7) 按第 4 章介绍的椭圆度计算公式, 确定各架的椭圆度, 求出每一架的孔型长半轴和短半轴。

(8) 按照第 4 章推导的公式, 计算出各架加工孔型所需要的刀具直径和刀具距离。

(9) 计算各架轧辊转速。按第 5 章介绍的方法逐步计算轧辊转速。

(10) 从表 3—1 中查出各架传动比, 计算各架电机转速。

(11) 确定切头尾长度。

(12) 按照第 7 章介绍的方法, 计算力能参数。

9.2 举例

下面以 $\Phi 177.8 \times 5.87\text{mm}$ 为例, 说明定径工序轧制表的编制过程。

(1) 原始数据:

成品管外径与壁厚各为 D_n 及 S_n (热尺寸)。

$$D_n = (1.01 \sim 1.015) D_{nc} = 177.8\text{mm}$$

$$S_n = 1.015 \times 5.87 = 5.93\text{mm}$$

(2) 根据表 3—2 确定荒管外径与壁厚 D_0 、 s_0 分别为 240mm, 5.7mm。

(3) 荒管外径为 240mm, 据表 3—2 选择孔型系列 A 系列。

(4) 因为 $D_n/S_n = 30.29 > 10$, 按表 3—4 孔型形状选择椭圆孔型 (O)。

(5) 确定机架数量及其组成 (粗、精轧)

平均减径率 $\bar{\rho} = 3.0\%$ 。

$$n = \frac{\ln \frac{D_n}{D_0}}{\ln(1-\bar{\rho})} + q = \frac{\ln \frac{179.5}{240}}{\ln(1-3\%)} + q = 9.52 + q, \text{ 故选用 11 架。}$$

A 系列粗轧机架最多 8 架, 所以, 选用 8 架粗轧机架, 3 架精轧机架。

(6) 确定各机架的单架减径率 ρ_i , 求出每架钢管外径, 见表 9—1。

表 9—1 减径率和孔型直径

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
减径率%	3	3	3	3	3	3	3	3	2.06	1.63	0.95
钢管外径	232.8	225.82	219.04	212.47	206.10	199.91	193.92	188.10	184.23	181.22	179.50

(7) 确定各架的椭圆度, 求出每一架的孔型长半轴和短半轴, 见表 9—2。

表 9—2 孔型的主要尺寸

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
椭圆度	1.0412	1.0397	1.0397	1.0397	1.0397	1.0397	1.0397	1.0397	1.0215	1.0132	1
长半轴	118.75	115.11	111.65	108.30	105.06	101.90	98.85	95.88	93.09	91.47	89.75
短半轴	114.05	110.72	107.39	104.17	101.04	98.01	95.07	92.22	91.14	89.75	89.75

(8) 加工各架孔型所需要的刀具直径 W_D 和刀具距离 W_A 见表 9—3。

表 9—3 加工参数

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
W_D	244.57	236.87	229.85	223.03	216.46	210.01	203.81	197.74	189.27	185.66	179.50
W_A	64.99	63.40	63.05	62.65	62.36	61.86	61.48	60.97	44.39	41.81	0

(9) 计算各架轧辊转速。计算结果见表 9—4。

表 9—4 各架轧辊转速

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
n_g	17.58	18.10	18.38	19.27	19.58	20.35	20.72	21.23	21.47	21.58	21.75

(10) 计算各架电机转速。计算结果见表 9—5。

表 9—5 各架电机转速

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
n_d	852	877	891	934	949	957	948	942	929	910	917

(11) 参照第 7 章, 切头尾长度定为 100mm。

(12) 根据钢种, 查找 $\sigma_s = 121.3\text{N/mm}^2$, 计算力能参数。计算结果见表 9—6。

表 9—6 力能参数计算结果

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
轧制压力 KN	33.11	48.35	63.48	75.79	86.78	93.25	100.98	110.96	113.56	121.34	124.09
轧制功率 KW	31.68	26.4	22.88	22.88	26.40	29.92	35.20	45.76	44.00	44.00	36.96

综合以上计算结果, 列成 $\Phi 240 \times 5.7\text{mm} \rightarrow \Phi 177.8 \times 5.87\text{mm}$ 轧制表, 见表 9—7。

 表 9—7 $\Phi 240 \times 5.7\text{mm} \rightarrow \Phi 177.8 \times 5.87\text{mm}$ 轧制表

规格: $\Phi 177.8 \times 5.87\text{mm}$ 钢种: 20 σ_s : 121.3N/mm^2 切头尾: 100+100 温度: 950°C								
机架序号	平均直径 mm	长半轴 mm	短半轴 mm	刀具直径 mm	刀具距离 mm	电机转速 rpm	轧制功率 kw	轧制压力 kN
0	240							
1	232.8	118.75	114.05	244.57	64.99	852	31.68	33.11
2	225.82	115.11	110.72	236.87	63.40	877	26.4	48.35
3	219.04	111.65	107.39	229.85	63.05	891	22.88	63.48
4	212.47	108.30	104.17	223.03	62.65	934	22.88	75.79

5	206.10	105.06	101.04	216.46	62.36	949	26.40	86.78
6	199.91	101.90	98.01	210.01	61.86	957	29.92	93.25
7	193.92	98.85	95.07	203.81	61.48	948	35.20	100.98
8	188.10	95.88	92.22	197.74	60.97	942	45.76	110.96
9	184.23	93.09	91.14	189.27	44.39	929	44.00	113.56
10	181.22	91.47	89.75	185.66	41.81	910	44.00	121.34
11	179.50	89.75	89.75	179.50	0	917	36.96	124.09

10 结论

本文的研究目的是消化从德国引进的 12 架三辊微张力定径机的工艺关键技术。通过以上全面的、系统的研究，得出以下主要结论：

(1) 根据来料规格和减径率将孔型划分为 A、B、C、D、E 5 个孔型系列，能满足成品规格跨距大 ($\Phi 177.8 \sim \Phi 431.8\text{mm}$) 的需要；以 $D/S=10$ 为界，将 A、B、C、D 系列划分为椭圆孔型 ($D/S>10$) 和圆孔型 ($D/S<10$)，能有效地抑制轧制薄壁管时的青线缺陷和轧制厚壁管时的“内六方”缺陷。

(2) 孔型设计的方法采用常规设计方法，未发现有新的突破。孔型参数的计算正确，但个别参数尚需调整。本文提出的孔型设计近似方法可在现场试用。

(3) 轧辊转速是轧机调整的关键参数。本文的计算结果能与德方资料很好吻合。本文对平均张力系数和工作辊径系数的分析可供新产品开发时参考。

(4) 本文用实测统计法确定的切头尾长度明显小于德方的数据，可提高金属收得率。

(5) 本文的计算结果表明，电机能力能满足现有产品大纲规定的产品要求。

(6) 引进的这套定径机将产品外径精度提高到 $\pm 0.5\%$ ，壁厚精度有所改善，产品规格由 $\Phi 219 \sim \Phi 426\text{mm}$ 提高到 $\Phi 177.8 \sim \Phi 431.8\text{mm}$ ，对增强市场竞争力起到了重要作用。

参考文献

- 【1】王廷溥 主编, 轧钢工艺学, 冶金工业出版社, 1981 年版。
- 【2】龚尧, 周国盈, 连轧钢管, 冶金工业出版社, 1992 年 12 月。
- 【3】金如松, 李长穆等编译, 钢管张力减径, 中国工业出版社, 1964 年 9 月。
- 【4】马继仁, 钢管张力减径后增厚段壁厚分布规律的研究, 北京科技大学学位论文, 1997 年 6 月。
- 【5】H. J. Pehle, H. Eichholz, The Stretch-reducing of Tubes Technological Principle and Developments, Hüttentechnik.
- 【6】 $\phi 108$ 张力减径机工艺性能试验小结, 太重技讯, 1972 年 12 月。
- 【7】田晓红, 闫雄伍, 张力减径机的设计, 钢管, 1995 年第 1 期, 16~18。
- 【8】包钢 $\Phi 400\text{mm}$ 定径机试车资料 (内部资料)。
- 【9】钟锡汉, 张力减径机的张力系数和轧辊转速计算 (内部资料), 1996 年。
- 【10】尤敬成, 钢管张力分析及壁厚公式的建立, 上海工业大学学报, 第 8 卷第 1 期, 1987 年 2 月, 60~65。
- 【11】卢于逮, 杨华峰, 张力减径管增厚段壁厚分布数学模型, 钢管, 1990 年第 2 期, 32~37。
- 【12】张华, 热轧无缝方矩管的软件技术开发, 北京科技大学硕士学位论文, 2000 年 3 月。
- 【13】丁大字, 钢管张力减径工艺的切头控制, 钢管, 1994 年第 4 期, 23~26。
- 【14】陈懋熙, 集中变速传动张减机, 钢管技术, 1988 第 1 期, 33~39。
- 【15】高钢生, 焊接钢管深冷加工技术的进步及发展, 钢管学术交流会交流材料, 1997 年 10 月。
- 【16】丁大字, 我国钢管工业的发展及规划意见, 中国金属党委会无缝钢管学术委员会第三届二次年会论文, 1995 年 9 月。
- 【17】侯毅, 杨效勇, 三辊定径机的孔型设计及应用, 科学技术报告, 1995 年第 22 期, 1~6。
- 【18】侯毅, 三辊式脱管机和定径机孔型设计错误之纠正, 科学技术报告, 1995 年第 18 期, 1~10。
- 【19】王宁, 张减机椭圆孔型设计, 1990 年第 4 期, 26~30。
- 【20】刘高翔, 钢管微张力减径内棱缺陷的探讨, 钢管年 1990 年第 2 期, 38~41。
- 【21】王北明译, 热轧钢管的质量, 冶金工业出版社, 1987 年 6 月。
- 【22】王廷溥, 金属塑性加工力学, 冶金工业出版社, 1988 年 5 月。
- 【23】李连诗, 韩观昌, 钢管轧制、挤压和拉拔工艺理论, 冶金工业出版社, 1980 年 3 月。
- 【24】王北明, 国外连轧钢管, 冶金工业出版社, 1978 年 12 月。
- 【25】王宁, 一种设计张减机精轧孔型的经验方法, 轧钢, 1994 年第 4 期, 18~21。
- 【26】郑坚敏, 热轧张减管青线问题的探讨, 宝钢技术, 1997 年第 5 期, 15~18。
- 【27】宋箭平, 周志扬, 吴跃泉, 张减管外表青线产生机制浅析, 宝钢技术, 1997 年第 4

期, 40~43。

- 【28】邱永泰, 方平, 微张力减径的钢管质量及其控制, 钢管, 1991 年第一期, 25~30。
- 【29】张小蒂, 应用回归分析, 浙江大学出版社, 1991 年 8 月。
- 【30】蔡锁章, 计算方法, 中国科学技术出版社, 1993 年 6 月。
- 【31】童金波, 大冶钢厂 II 号三辊轧管机组新技术的应用, 钢管, 1995 第 5 期, 21~23。
- 【32】汪汉明, 论中国钢管的张力减径, 1995 年 5 月(会议资料)。
- 【33】凌仲秋, 张力减径壁厚系数 γ 辨析, 钢管, 1990 年第 4 期, 39~41。
- 【34】联邦德国 Ralf M. Wermuth, 加拿大 J. Bryan Code, 阿尔戈玛公司的新型微张力减径机, 国外钢铁, 1988 年第 9 期, 47~52。
- 【35】刘松泉, 钢管减径机的孔型设计, 钢管技术, 1985 年第 4 期, 10~13。
- 【36】钟锡弟, 陶学智, 张力减径对钢管壁厚的影响, 钢管, 1989 年第 1 期, 23~26。
- 【37】钢管张力减径工艺与力能参数计算, 武汉钢铁设计研究院资料, 1973 年。
- 【38】天津钢管公司 $\Phi 250\text{mm}$ 定径机组工艺资料 (内部资料), 1991 年。

致谢

论文终于脱稿了。本文是在导师朱景清教授的精心指导下完成的。朱老师严谨的治学态度、渊博的学识、敏锐的思维令我万分敬仰，使我受益非浅。在本文脱稿之际，特向朱老师表示衷心的感谢。在本文的成文过程中，曾多次得到付晨光老师的精心指点，并提出许多指导性意见，谨在此表示谢意。

在这里还需要感谢现场导师——无缝厂总工程师陈维津先生。几年来，从课题的立项、实验方案的制订，都得到了陈总的大力支持。陈总在百忙之中还审阅了本文初稿。在现场取样过程中，得到了技术科李小龙、热轧车间阎柱威等同志的关照，使实验得以顺利完成。在此表示感谢。

在几年的学习生活中，有幸结识了岳挺、臧悦、余长根等同学，结下了兄弟般的友谊，得到了他们的大力帮助，在此表示感谢。

最后，还要感谢那些在自己的学习期间给予了本人巨大大理解支持的亲朋好友，感谢他们对自己的无私帮助。没有他们的关心、支持，本人无法完成学业，这也是自己努力向上的动力之所在。

附录 1

表 1 AO 系列

入口管径 240mm

成品规格 Φ	机架 号码	孔型 直径 D	长半 轴 a	短半 轴 b	椭圆 度 α	宽展 量 c	宽展 系数 ε	减径 率 ρ	偏心 距 e	压下 量	压下 系数
177.8	0100	232.8	119.5	113.30	1.0541			3.00	13.48		
	0200	225.82	115.21	110.61	1.0417	1.91	0.9834	3.00	9.8	8.89	4.65
	0300	219.04	111.74	107.30	1.0414	1.13	0.9899	3.00	9.45	7.91	7.00
	0400	212.47	108.37	104.10	1.0410	1.07	0.9901	3.00	9.09	7.64	7.14
	0500	206.1	105.10	101.00	1.0407	1.00	0.9905	3.00	8.72	7.37	7.37
	0600	199.91	101.94	97.97	1.0405	0.94	0.9908	3.00	8.44	7.13	7.59
	0700	193.92	98.87	95.05	1.0401	0.90	0.9909	3.00	8.12	6.89	7.66
	0800	188.10	95.89	92.21	1.0399	0.84	0.9912	3.00	7.82	6.65	7.93
	0801	184.23	93.35	90.88	1.0272	1.14	0.9878	2.06	5.15	5.01	4.39
	0802	181.22	91.47	89.75	1.0192	0.59	0.9935	1.63	3.54	3.60	6.10
	0803	179.5	89.75	89.75	1.0000	0.00	1.0000	0.95	0.00	1.72	
180	0811	183.74	92.88	90.86	1.0222	0.67	0.9928	2.32	4.18	5.03	7.51
	0812	181.72	90.86	90.86	1.0000	0.00	1.0000	1.1	0.00	2.02	
193.7	0501	201.32	102.21	99.11	1.0312	1.21	0.9882	2.32	6.50	5.99	4.95
	0502	197.62	99.84	97.78	1.0211	0.73	0.9927	1.84	4.25	4.43	6.07
	0503	195.56	97.78	97.78	1.0000	0.00	1.0000	1.04	0.00	2.06	
203	0401	207.32	104.85	102.47	1.0232	0.75	0.9928	2.42	4.93	5.90	7.87
	0402	204.94	102.47	102.47	1.0000	0.00	1.0000	1.15	0.00	2.38	
219	0101	227.51	115.52	111.99	1.0316	2.22	0.9808	2.27	7.40	7.51	3.38
	0102	223.40	112.85	110.55	1.0208	0.86	0.9924	1.81	4.75	4.97	5.78
	0103	221.10	110.55	110.55	1.0000	0.00	1.0000	1.03	0.00	2.30	

表 2 BO 系列

入口管径 290mm

成品规格 Φ	机架 号码	孔型 直径 D	长半 轴 a	短半 轴 b	椭圆 度 α	宽展 量 c	宽展 系数 ε	减径 率 ρ	偏心 距 e	压下 量	压下 系数
$\Phi 232$	0100	283.33	144.40	138.93	1.0394			2.30	11.61		
	0200	276.81	140.58	136.23	1.0319	1.65	0.9883	2.30	9.13	8.17	4.95
	0300	270.45	137.33	133.12	1.0316	1.10	0.9920	2.30	8.83	7.46	6.78
	0400	264.23	134.15	130.08	1.0313	1.03	0.9923	2.30	8.53	7.25	7.04
	0500	258.15	131.05	127.10	1.0311	0.97	0.9926	2.30	8.28	7.05	7.27
	0600	252.21	128.02	124.19	1.0309	0.92	0.9928	2.30	7.82	6.86	7.46
	0700	246.41	125.07	121.34	1.0307	0.88	0.9930	2.30	7.81	6.68	7.51
	0800	240.74	122.18	118.56	1.0305	0.84	0.9931	2.30	7.58	6.51	7.75
	0801	236.39	119.28	117.11	1.0185	0.72	0.9940	1.81	4.46	5.07	7.04
	0802	234.22	117.11	117.11	1.0000	0.00	1.0000	0.92	0.00	2.17	
244.5	0511	253.31	128.23	125.08	1.0252	1.13	0.9912	1.87	6.54	5.97	5.28
	0512	249.41	125.99	123.42	1.0208	0.91	0.9928	1.54	5.30	4.81	5.29
	0513	246.84	123.42	123.42	1.0000	0.00	1.0000	1.03	0.00	2.57	
$\Phi 257$	0311	265.57	134.40	131.17	1.0246	1.27	0.9905	1.80	6.70	6.16	4.85
	0312	261.99	132.46	129.73	1.0210	1.29	0.9903	1.35	5.64	4.67	3.62
	0313	259.46	129.73	129.73	1.0000	0.00	1.0000	0.97	0.00	2.73	
$\Phi 273$	0141	278.20	140.39	137.81	1.0187	1.46	0.9896	1.81	5.31	6.59	4.51
	0142	275.62	137.81	137.81	1.0000	0.00	1.0000	0.93	0.00	2.58	

表 3 CO 系列

入口管径 345mm

成品规格 Φ	机架 号码	孔型 直径 D	长半 轴 a	短半 轴 b	椭圆 度 α	宽展 量 c	宽展 系数 ε	减径 率 ρ	偏心 距 e	压下 量	压下 系数
$\Phi 281$	0100	337.75	171.90	165.85	1.0364			2.10	12.79		
	0200	330.66	167.86	162.80	1.0311	2.01	0.9880	2.10	10.61	9.10	4.53
	0300	323.72	164.32	159.40	1.0308	1.58	0.9907	2.10	10.31	8.46	5.57
	0400	316.92	160.85	156.07	1.0306	1.45	0.9909	2.10	10.01	8.25	5.69
	0500	310.26	157.45	152.81	1.0303	1.38	0.9912	2.10	9.72	8.04	5.83
	0600	303.75	154.12	149.63	1.0300	1.31	0.9915	2.10	9.40	7.82	5.97

Φ 295	0700	297.37	150.87	146.50	1.0298	1.24	0.9918	2.10	9.14	7.62	6.15
	0800	291.12	147.68	143.44	1.0296	1.18	0.9920	2.10	8.87	7.43	6.30
	0811	286.14	144.29	141.85	1.0172	0.85	0.9941	1.71	5.01	6.35	6.29
	0812	283.70	141.85	141.85	1.0000	0.00	1.0000	0.85	0.00	3.12	
	0501	304.59	154.26	150.33	1.0261	1.45	0.9906	1.83	8.18	7.12	4.91
	0502	300.81	151.90	148.91	1.0201	1.57	0.9897	1.24	6.16	5.35	3.41
	0503	297.82	148.91	148.91	1.0000	0.00	1.0000	0.99	0.00	2.99	
	0441	311.18	157.22	153.96	1.0212	1.15	0.9927	1.81	6.73	6.89	5.99
	0442	307.92	153.96	153.96	1.0000	0.00	1.0000	1.08	0.00	3.26	
	0101	331.31	167.96	163.36	1.0282	2.11	0.9874	1.90	9.60	8.54	4.05
	0102	326.54	165.01	161.53	1.0215	1.65	0.9900	1.44	7.19	6.43	3.90
	0103	323.06	161.53	161.53	1.0000	0.00	1.0000	1.07	0.00	3.48	
Φ 325	0131	331.62	167.56	164.06	1.0213	1.71	0.9898	1.81	7.23	7.84	4.58
	0132	328.12	164.06	164.06	1.0000	0.00	1.0000	1.06	0.00	3.50	

表 4 DO 系列

入口管径 395mm

成品规格 Φ	机架号码	孔型直径 D	长半轴 a	短半轴 b	椭圆度 α	宽展量 c	宽展系数 ε	减径率 ρ	偏心距 e	压下量	压下系数
Φ 334	0100	387.89	196.99	190.90	1.0319			1.80	12.78		
	0200	380.91	193.13	187.78	1.0285	2.23	0.9885	1.80	11.17	9.21	4.13
	0300	374.05	189.63	184.42	1.0283	1.90	0.9902	1.80	10.87	8.71	4.71
	0400	367.32	186.19	181.13	1.0280	1.77	0.9905	1.80	10.56	8.50	4.80
	0500	360.91	182.82	177.89	1.0277	1.69	0.9908	1.80	10.29	8.30	4.91
	0600	354.21	179.51	174.70	1.0275	1.62	0.9910	1.80	10.03	8.12	5.01
	0700	347.84	176.26	171.58	1.0272	1.56	0.9911	1.80	9.75	7.93	5.08
	0800	341.58	173.07	168.51	1.0270	1.49	0.9914	1.80	9.50	7.75	5.20
	0801	339.34	170.74	168.60	1.0127	2.23	0.9869	1.35	4.36	4.47	2.01
	0802	337.20	168.60	168.60	1.0000	0.00	1.0000	1.25	0.00	2.14	
339.7	0711	347.58	173.79	171.48	1.0135	2.21	0.9873	0.74	4.71	4.78	2.16
	0712	342.96	171.48	171.48	1.0000	0.00	1.0000	0.67	0.00	2.31	
Φ 350	0511	356.47	179.79	176.68	1.0176	1.90	0.9894	1.18	6.39	6.14	3.23
	0512	353.36	176.68	176.68	1.0000	0.00	1.0000	0.87	0.00	3.11	
365.1	0331	371.15	186.85	184.30	1.0138	2.43	0.9870	0.78	5.21	5.33	2.19
	0332	368.60	184.30	184.30	1.0000	0.00	1.0000	0.69	0.00	2.55	
Φ 377	0121	383.76	193.45	190.31	1.0165	2.55	0.9868	1.06	6.44	6.68	2.62
	0122	380.62	190.31	190.31	1.0000	0.00	1.0000	0.82	0.00	3.14	

表 5 EO 系列

入口管径 450mm

成品规格 Φ	机架号码	孔型直径 D	长半轴 a	短半轴 b	椭圆度 α	宽展量 c	宽展系数 ε	减径率 ρ	偏心距 e	压下量	压下系数
384	0100	441.90	224.35	217.55	1.0312			1.80	14.26		
	0200	433.95	220.27	213.68	1.0308	2.72	0.9877	1.80	13.81	10.67	3.92
	0300	426.13	216.27	209.86	1.0305	2.59	0.9880	1.80	13.43	10.41	4.02
	0400	418.46	212.34	206.12	1.0301	2.48	0.9883	1.80	13.02	10.15	4.09
	0500	410.93	208.48	202.45	1.0298	2.36	0.9887	1.80	12.62	9.89	4.19
	0600	403.53	204.70	198.83	1.0295	2.25	0.9890	1.80	12.28	9.65	4.29
	0700	396.27	200.98	195.29	1.0292	2.15	0.9893	1.80	11.89	9.41	4.38
	0711	391.26	197.42	193.84	1.0185	2.13	0.9892	1.26	7.36	7.89	4.26
	0712	387.68	193.84	193.84	1.0000	0.00	1.0000	0.91	0.00	4.05	
Φ 396	0501	404.20	204.30	199.90	1.0220	1.85	0.9909	1.64	9.10	8.58	4.36
	0502	399.80	199.90	199.90	1.0000	0.00	1.0000	1.09	0.00	4.40	
Φ 412	0301	420.10	212.12	207.98	1.0199	2.26	0.9893	1.42	8.53	8.29	3.67
	0302	415.96	207.98	207.98	1.0000	0.00	1.0000	0.99	0.00	4.14	
Φ 426	0101	434.77	219.73	215.04	1.0218	2.18	0.9901	1.61	9.69	9.31	4.27
	0102	430.08	215.04	215.04	1.0000	0.00	1.0000	0.91	0.00	4.69	

表 6 AR 系列

入口管径 240mm

成品规格 Φ	机架 号码	孔型 直径 D	长半 轴 a	短半 轴 b	椭圆 度 α	宽展 量 c	宽展 系数 ε	减径 率 ρ	偏 心 距 e	压 下 量	压 下 系数
177.8	0100	232.80	117.49	115.31	1.0189			3.00	4.49		
	0200	225.82	113.90	111.86	1.0187	-1.41	1.0123	3.00	4.19	5.63	-4.71
	0300	219.04	110.53	108.51	1.0186	-1.33	1.0120	3.00	4.15	5.45	-4.10
	0400	212.47	107.21	105.26	1.0184	-1.30	1.0121	3.00	4.01	5.27	-4.04
	0500	206.10	103.98	102.12	1.0183	-1.28	1.0125	3.00	3.82	5.09	-3.98
	0600	199.91	100.86	99.05	1.0182	-1.26	1.0125	3.00	3.72	4.93	-3.91
	0700	193.92	97.83	96.09	1.0180	-1.22	1.0125	3.00	3.58	4.77	-3.91
	0800	188.10	94.89	93.21	1.0179	-1.20	1.0126	3.00	3.45	4.62	-3.85
	0801	184.23	92.68	91.55	1.0123	-0.53	1.0057	2.06	2.30	3.34	-6.30
	0802	181.22	91.47	89.75	1.0192	-0.08	1.0009	1.63	3.54	2.93	-36.63
	0803	179.50	89.75	89.75	1.0000	0.00	1.0000	0.95	0.00	1.72	
Φ 180	0811	183.74	92.88	90.86	1.0222	-0.33	1.0034	2.32	4.18	4.03	-12.21
	0812	181.72	90.86	90.86	1.0000	0.00	1.0000	1.10	0.00	2.02	
193.7	0501	201.32	101.36	99.96	1.0141	-0.76	1.0075	2.32	2.86	4.02	-5.29
	0502	197.62	99.84	97.78	1.0211	-0.12	1.0002	1.84	4.26	3.58	-29.83
	0503	195.56	97.78	97.78	1.0000	0.00	1.0000	1.04	0.00	2.06	
Φ 203	0401	207.32	104.85	102.47	1.0232	-0.41	1.0039	2.42	4.93	4.74	-11.56
	0402	204.94	102.47	102.47	1.0000	0.00	1.0000	1.15	0.00	2.38	
219.1	0111	227.56	114.58	112.98	1.0141	-0.73	1.0064	2.25	3.27	4.51	-6.18
	0112	223.48	112.88	110.60	1.0206	-0.10	1.0009	1.79	4.70	3.98	-39.80
	0113	221.20	110.60	110.60	1.0000	0.00	1.0000	1.02	0.00	2.28	

表 7 BR 系列

入口管径 290mm

成品规格 Φ	机架 号码	孔型 直径 D	长半 轴 a	短半 轴 b	椭圆 度 α	宽展 量 c	宽展 系数 ε	减径 率 ρ	偏 心 距 e	压 下 量	压 下 系数
244.5	0100	283.33	142.75	140.58	1.0154			2.30	4.44		
	0200	276.81	139.46	137.35	1.0153	-1.12	1.0080	2.30	4.32	5.4	-4.82
	0300	270.45	136.24	134.21	1.0151	-1.11	1.0081	2.30	4.15	5.25	-4.73
	0400	264.23	133.10	131.13	1.0150	-1.11	1.0083	2.30	4.03	5.11	-4.60
	0500	258.15	130.03	128.12	1.0149	-1.10	1.0084	2.30	3.91	4.98	-4.53
	0511	253.31	127.42	125.89	1.0121	-0.70	1.0055	1.87	3.12	4.14	-5.91
	0512	249.41	125.99	123.42	1.0208	0.10	0.9992	1.54	5.30	4	40.00
	0513	246.84	123.42	123.42	1.0000	0.00	1.0000	1.03	0.00	2.57	
Φ 256	0301	265.35	133.49	131.86	1.0124	-0.72	1.0054	1.89	3.32	4.38	-6.08
	0302	261.88	131.95	129.23	1.0210	0.09	0.9993	1.57	5.62	4.26	67.59
	0303	258.46	129.23	129.23	1.0000	0.00	1.0000	1.04	0.00	2.72	
Φ 273	0141	278.20	140.39	137.81	1.0187	-0.19	1.0014	1.81	5.31	4.94	-26.0
	0142	275.62	137.81	137.81	1.0000	0.00	1.0000	0.93	0.00	2.58	

表 8 CR 系列

入口管径 345mm

成品规格 Φ	机架 号码	孔型 直径 D	长半 轴 a	短半 轴 b	椭圆 度 α	宽展 量 c	宽展 系数 ε	减径 率 ρ	偏 心 距 e	压 下 量	压 下 系数
Φ 280	0100	337.75	170.14	167.61	1.0151			2.10	5.18		
	0200	330.66	166.56	164.10	1.0149	-1.05	1.0063	2.10	5.03	6.04	-5.75
	0300	323.72	163.05	160.07	1.0148	-1.05	1.0064	2.10	4.87	5.89	-5.61
	0400	316.92	159.62	157.30	1.0147	-1.05	1.0066	2.10	4.74	5.75	-5.48
	0500	310.26	156.25	154.01	1.0146	-1.05	1.0067	2.10	4.58	5.61	-5.34
	0600	303.75	152.96	150.79	1.0144	-1.05	1.0069	2.10	4.44	5.46	-5.20
	0700	297.37	149.74	147.63	1.0143	-1.05	1.0070	2.10	4.31	5.33	-5.08
	0800	291.12	146.59	144.53	1.0142	-1.04	1.0071	2.10	4.21	5.21	-5.01
	0801	285.78	144.45	141.33	1.0221	-0.08	1.0006	1.83	6.45	5.26	-65.75
	0802	282.66	141.33	141.33	1.0000	0.00	1.0000	1.09	0.00	3.12	
Φ 297	0521	305.03	153.39	151.64	1.0116	-0.62	1.0040	1.69	3.56	4.61	-7.44

	0522	302.41	152.49	149.92	1.0171	0.85	0.9994	0.86	5.27	3.47	4.08
	0523	299.84	149.92	149.92	1.0000	0.00	1.0000	0.85	0.00	2.57	
Φ312	0311	318.02	160.52	157.50	1.0192	-0.15	1.0009	1.76	6.22	5.55	-37.0
	0312	315.00	157.50	157.50	1.0000	0.00	1.0000	0.95	0.00	3.02	
Φ325	0131	331.62	167.56	164.06	1.0213	-0.05	1.0003	1.81	7.23	6.08	-121.6
	0132	328.12	164.06	164.06	1.0000	0.00	1.000	1.06	0.00	3.50	

表 9 DR 系列

入口管径 395mm

成品规格 Φ	机架 号码	孔型 直径 D	长 半 轴 a	短 半 轴 b	椭 圆 度 a	宽 展 量 c	宽展 系 数 ε	减 径 率 ρ	偏 心 距 e	压 下 量	压 下 系数
Φ335	0100	387.89	195.28	192.61	1.0138			1.80	5.45		
	0200	380.91	191.75	189.16	1.0137	-0.86	1.0045	1.80	5.29	6.12	-7.12
	0300	374.05	188.29	185.76	1.0136	-0.87	1.0046	1.80	5.16	5.99	-6.89
	0400	367.32	184.89	182.43	1.0134	-0.87	1.0047	1.80	5.02	5.86	-6.74
	0500	360.71	181.55	179.16	1.0133	-0.88	1.0048	1.80	4.88	5.73	-6.51
	0600	354.21	178.27	175.94	1.0132	-0.89	1.0050	1.80	4.75	5.61	-6.30
	0700	347.84	175.05	172.59	1.0131	-0.89	1.0051	1.80	4.61	5.48	-6.16
	0701	342.01	172.90	169.11	1.0224	0.11	0.9994	1.68	7.84	5.94	54.0
	0702	338.22	169.11	169.11	1.0000	0.00	1.0000	1.10	0.00	3.79	
Φ342	0601	348.87	176.23	172.64	1.0208	0.29	0.9984	1.51	7.41	5.63	19.41
	0602	345.28	172.64	172.64	1.0000	0.00	1.0000	1.03	0.00	3.59	
Φ357	0431	363.40	183.19	180.21	1.0165	0.76	0.9959	1.07	6.11	4.68	6.16
	0432	360.42	180.21	180.21	1.0000	0.00	1.0000	0.82	0.00	2.98	
Φ377	0121	383.70	193.45	190.31	1.0165	0.84	0.9957	1.06	6.44	4.97	3.55
	0122	380.62	190.31	190.31	1.0000	0.00	1.0000	0.82	0.00	3.14	

A系列11架不同壁厚规格的平均张力 (Do=240mm; De=177.3mm)													
毛管壁厚So	5.7	6.5	7.6	8.6	9.8	10.8	11.8	12.8	15	15.11	16.51	17.87	19.28
成品管壁厚Se	5.87	6.91	8.05	9.19	10.36	11.51	12.65	13.72	15.86	17.45	19.05	20.62	22.23
总平均张力	0.3769	0.2761	0.2854	0.2542	0.2863	0.2578	0.2362	0.2343	0.2726	-0.0434	-0.0407	-0.0419	-0.0400
De/Se	30.2896	25.7308	22.087	19.3471	17.1622	15.4474	14.0553	12.9592	11.2106	10.1891	9.33333	8.6227	7.9982

A系列10架不同壁厚规格的平均张力 (Do=240mm; De=180.00mm)													
毛管壁厚So	5.7	6.1	6.6	7.1	7.5	8	8.4	9	9.4	10.4	11.2	12.2	13.2
成品管壁厚Se	6	6.6	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	11	12	13	14
总平均张力	0.3013	0.2586	0.2737	0.2862	0.2519	0.2643	0.2343	0.2842	0.2568	0.2741	0.2281	0.2447	0.2580
De/Se	30	27.6923	25.7143	24	22.5	21.1765	20	18.9474	18	16.3636	15	13.8462	12.8571

A系列10架不同壁厚规格的平均张力 (Do=240mm; De=180.00mm)													
毛管壁厚So	15	14.81	15.69	16.56	17.44	19.19	20.95	21.93	22.71	24.17	26.24	28.01	29.79
成品管壁厚Se	16	17	18	19	20	22	24	25	26	28	30	32	34
总平均张力	0.2344	-0.0450	-0.0431	-0.0440	-0.0426	-0.0427	-0.0413	-0.0229	-0.0406	-0.0888	-0.0397	-0.0394	-0.0386
De/Se	11.25	10.5882	10	9.47368	9	8.18182	7.5	7.2	6.92308	6.42857	6	5.625	5.29412

A系列8架不同壁厚规格的平均张力 (Do=240mm; De=193.7mm)													
毛管壁厚So	6.7	7.2	7.6	7.9	8.4	9	9.4	10.4	11.8	12	13.4	14.4	15.2
成品管壁厚Se	7.1	7.62	8	8.33	8.8	9.52	10	10.92	12.5	12.7	14.2	15.11	16
总平均张力	0.1899	0.1955	0.2216	0.2127	0.2431	0.1949	0.1653	0.2281	0.1823	0.1865	0.1774	0.2226	0.2060
De/Se	27.2817	25.4199	24.2125	23.2533	22.0114	20.3466	19.37	17.7381	15.496	13.252	13.6408	12.8193	12.1063

A系列8架不同壁厚规格的平均张力 (Do=240mm; De=193.7mm)													
毛管壁厚So	17.22	18.08	20.07	22.62	25.35	27.18	29	32.68	36.37				
成品管壁厚Se	19.05	20	22.2	25	28	30	32	36	40				
总平均张力	-0.0575	-0.0574	-0.0581	-0.0553	-0.0543	-0.0524	-0.0531	-0.0496	-0.0478				
De/Se	10.168	9.685	8.72523	7.748	6.91786	6.45667	6.05313	5.38056	4.8425				

A系列8架不同壁厚规格的平均张力 (Do=240mm; De=195.56mm)													
毛管壁厚So	6.7	7.2	7.6	7.9	8.4	9	9.4	10.4	11.8	12	13.4	14.4	15.2
成品管壁厚Se	7.1	7.62	8	8.33	8.8	9.52	10	1.92	12.5	12.7	14.2	15.11	16
总平均张力	0.1907	0.1963	0.2224	0.2134	0.2438	0.1957	0.1663	1.7673	0.1832	0.1874	0.1784	0.2234	0.2069
De/Se	27.5437	25.664	24.445	23.4766	22.2227	20.542	19.556	101.854	15.6448	15.3984	13.7718	12.9424	12.2225

A系列8架不同壁厚规格的平均张力 (Do=240mm; De=195.56mm)													
毛管壁厚So	17.22	18.08	20.07	22.62	25.35	27.18	29	32.68	36.37				
成品管壁厚Se	19.05	20	22.2	25	28	30	32	36	40				

附录2

总平均张力	-0.0557	-0.0556	-0.0563	-0.0534	-0.0523	-0.0504	-0.0511	-0.0475	-0.0455					
De/Se	10.2656	9.778	8.80901	7.8224	6.98429	6.51867	6.11125	5.43222	4.889					
A系列6架不同壁厚规格的平均张力 (Do=24(mm); Ce=203.00mm)														
毛管壁厚So	5.7	6.2	6.7	7	7.6	8	8.6	9	9.4	10.4	11.4	12.4	13.4	14.4
成品管壁厚Se	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	11	12	13	14	15
总平均张力	0.1310	0.1585	0.1810	-0.0028	0.1285	0.0608	0.1668	0.1072	0.0503	0.0912	0.1231	0.1486	0.1694	0.1865
De/Se	33.8333	31.2308	29	27.0667	25.375	23.8824	22.5556	21.3684	20.3	18.4545	16.9167	15.6154	14.5	13.5333

A系列6架不同壁厚规格的平均张力 (Do=24(mm); Ce=203.00mm)														
毛管壁厚So	15.2	15.72	16.65	17.57	18.5	20.36	22.21	23.14	24.07	25.93	27.8	29.66	31.53	32.47
成品管壁厚Se	16	17	18	19	20	22	24	25	26	28	30	32	34	35
总平均张力	0.1172	-0.0776	-0.0753	-0.0776	-0.0756	-0.0725	-0.0736	-0.0726	-0.0718	-0.0708	-0.0678	-0.0680	-0.0665	-0.0650
De/Se	12.6875	11.9412	11.2778	10.6442	10.15	9.22727	8.45833	8.12	7.80769	7.25	6.76667	6.34375	5.97059	5.8

A系列4架不同壁厚规格的平均张力 (Do=24(mm); Ce=219.00mm)														
毛管壁厚So	6.1	6.5	6.8	6.85	7.5	7.65	7.7	7.9	8.4	8.5	8.6	9.2	9.6	9.8
成品管壁厚Se	6.35	6.71	7.04	7.1	7.72	7.92	8	8.18	8.74	8.8	9.84	9.52	10	10.16
总平均张力	-0.1554	-0.0155	-0.0615	-0.0806	0.0282	-0.0613	-0.1199	-0.0636	-0.1442	-0.0611	-5.5419	-0.0532	-0.1625	-0.0831
De/Se	34.4882	32.6379	31.108	30.8451	28.3679	27.6515	27.375	26.7726	25.0572	24.8864	22.2561	23.0042	21.9	21.5551

A系列4架不同壁厚规格的平均张力 (Do=24(mm); Ce=219.00mm)														
毛管壁厚So	10	10.6	10.8	11	12	12.2	13.8	13.8	14.6	15.4	15.4	17	17.75	18.3
成品管壁厚Se	10.31	11	11.13	11.43	12.5	12.7	14.2	14.27	15	15.88	16	17.5	18.26	19.05
总平均张力	0.0029	-0.0984	0.0089	-0.1195	-0.1598	-0.1486	0.0289	-0.0427	0.0497	-0.0024	-0.1151	0.0204	0.0287	-0.1411
De/Se	21.2415	19.9091	19.6765	19.1601	17.52	17.2441	15.4225	15.3469	14.6	13.7909	13.6875	12.5143	11.9934	11.4961

A系列4架不同壁厚规格的平均张力 (Do=24(mm); Ce=219.00mm)														
毛管壁厚So	19.21	19.81	21.32	21.34	21.35	22.11	24.02	26.91	28.84	30.77	34.63	38.5		
成品管壁厚Se	20	20.62	22.2	22.22	22.23	23.01	25	28	30	32	36	40		
总平均张力	-0.1457	-0.1419	-0.1469	-0.1464	-0.1752	-0.1384	-0.1393	-0.1350	-0.1314	-0.1286	-0.1250	-0.1204		
De/Se	10.95	10.6208	9.86486	9.85599	9.85155	9.5176	8.76	7.82143	7.3	6.84375	6.08333	5.475		

D系列不同机架不同壁厚规格的平均张力 (Do=395mm)														
机架数n	10	9						8				5	4	
成品管直径De	334	335				339.7				342	344.4	345	365	372
毛管壁厚So	29.6	16.5	23.15	37.07	8	9.2	10.4	11.6	12.4	33.69	21	28.19	38.66	35.12
成品管壁厚Se	32	17.5	25	40	8.38	9.65	10.92	12.19	13.06	36	22.2	30	40	36
总平均张力	-0.0742	0.0633	-0.0784	-0.0740	0.1196	0.1079	0.0987	0.0912	0.0723	-0.0882	-0.0221	-0.0964	-0.1709	-0.2418

附录2

De/Se	10.4375	19.1429	13.4	8.375	40.537	35.2021	31.1081	27.8671	26.0107	9.5	15.5135	11.5	9.125	10.3333
-------	---------	---------	------	-------	--------	---------	---------	---------	---------	-----	---------	------	-------	---------

D系列7架不同壁厚规格的平均张力 (Do=395mm; De=351.00mm)

毛管壁厚So	7.6	8.1	8.6	9	9.6	10.5	11.5	12.4	13.4	14.4	15.4	16.25	17.25	18.25
成品管壁厚Se	8	8.5	9	9.5	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
总平均张力	-0.0889	-0.0498	-0.0165	-0.1242	0.0372	-0.0292	0.0169	-0.0379	0.0022	0.0354	0.0632	-0.0134	0.0151	0.0396
De/Se	43.875	41.2941	39	36.9474	35.1	31.9091	29.25	27	25.0714	23.4	21.9375	20.6471	19.5	18.4737

D系列6架不同壁厚规格的平均张力 (Do=395mm; De=355.6mm)

毛管壁厚So	6.1	6.85	7.6	7.7	8.4	9.1	9.6	9.9	10.6	10.7	11.4	12	12.2	13.7
成品管壁厚Se	6.35	7.14	7.92	8	8.75	9.52	10	10.31	11	11.13	11.91	12.5	12.7	14.2
总平均张力	-0.0355	-0.0537	-0.0505	-0.0087	-0.0444	-0.1058	-0.0443	-0.0409	0.0067	-0.0248	-0.0853	-0.0441	-0.0352	0.0213
De/Se	56	49.8039	44.899	44.45	40.64	37.3529	35.56	34.4908	32.3273	31.9497	29.8573	28.448	28	25.0423

D系列6架不同壁厚规格的平均张力 (Do=395mm; De=355.6mm)

毛管壁厚So	14.5	15.2	15.4	16.75	18.25	19.25	19.75	21.25	22.73	23.84	24.22	25.72	26.51	
成品管壁厚Se	15.09	15.88	16	17.48	19.05	20	20.62	22.2	23.83	25	25.4	26.97	27.79	
总平均张力	-0.0315	-0.0843	-0.0097	-0.0688	-0.0719	-0.0106	-0.0745	-0.0828	-0.1304	-0.1334	-0.1341	-0.1320	-0.1276	
De/Se	23.5633	22.3929	22.225	20.3432	18.6667	17.78	17.2454	16.018	14.9224	14.224	14	13.185	12.796	

D系列3架不同壁厚规格的平均张力 (Do=395mm; De=377.00mm)

毛管壁厚So	8.85	9.34	9.84	10.8	11.8	12.76	13.75	14.75	15.74	16.7	17.7	18.7	19.65	21.6
成品管壁厚Se	9	9.5	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22
总平均张力	-0.3397	-0.3470	-0.3065	-0.4086	-0.3334	-0.4169	-0.3850	-0.3273	-0.3068	-0.3680	-0.3216	-0.3819	-0.3548	-0.3810
De/Se	41.8889	39.6842	37.7	34.2727	31.4167	29	26.9286	25.1333	23.5625	22.1765	20.9444	19.8421	18.85	17.1364

E系列不同机架不同壁厚规格的平均张力 (Do=450mm)

机架数n	9		8		5		4							
成品管直径De	384	384.4	390	392	412	416	420		424	424.4				
成品管壁厚Se	32	22.2	25	36	36	38	30	30	40	32	22.2			
总平均张力	-0.0824	0.0628	-0.0962	-0.0926	-0.1552	-0.1929	-0.1276	-0.2175	-0.2105	-0.2603	-0.1657			
De/Se	12	17.3333	15.6	10.8889	11.4444	14.8571	21	14	10.5	13.25	19.1171			

E系列7架不同壁厚规格的平均张力 (Do=450mm; De=402.00mm)

毛管壁厚So	8.6	9.1	9.6	10.5	11.5	12.5	13.4	14.4	15.4	16.25	17.25	18.25	19.25	21
成品管壁厚Se	9	9.5	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22
总平均张力	-0.0513	-0.0199	0.0074	-0.0648	-0.0143	0.0282	-0.0298	0.0066	0.0371	-0.0463	-0.0149	0.0122	0.0356	-0.0636
De/Se	44.6667	42.3158	40.2	36.5455	33.5	30.9231	28.7143	26.8	25.125	23.6471	22.3333	21.1579	20.1	18.2727

E系列7架不同壁厚规格的平均张力 (Do=450mm;
De=402mm)

附录 2

毛管壁厚So	22.8	23.75	24.7	26.6	28.5	30.4	32.31	33.26	34.21	36.12	38.02			
成品管壁厚Se	24	25	26	28	30	32	34	35	36	38	40			
总平均张力	-0.1236	-0.1233	-0.1230	-0.1224	-0.1219	-0.1215	-0.1173	-0.1172	-0.1172	-0.1138	-0.1140			
De/Se	16.75	16.08	15.4615	14.3571	13.4	12.5625	11.8235	11.4857	11.1667	10.5789	10.05			

E系列6架不同壁厚规格的平均张力 (Do=450mm; De=406.40mm)

毛管壁厚So	6.1	6.85	7.6	8.4	9.1	9.6	9.9	10.6	10.7	11.4	12	12.2	13.7	15.25
成品管壁厚Se	6.35	7.14	7.92	8.74	9.52	10	10.31	11	11.13	11.91	12.5	12.7	14.2	15.88
总平均张力	-0.0602	-0.0795	-0.0759	-0.0526	-0.1349	-0.0691	-0.0655	-0.0147	-0.0482	-0.1127	-0.0686	-0.0591	0.0014	-0.0632
De/Se	64	56.9188	51.3131	46.4989	42.6891	40.64	39.418	36.9455	36.5139	34.1226	32.512	32	28.6197	25.5919

E系列6架不同壁厚规格的平均张力 (Do=450mm; De=406.40mm)

毛管壁厚So	15.4	16	16.75	18.25	19.25	19.75	20.5	21.25	22.76	23.88	24.26	25.02	25.76	26.75
成品管壁厚Se	16	16.66	17.48	19.05	20	20.62	21.44	22.2	23.83	25	25.4	26.19	26.97	28
总平均张力	-0.0314	-0.0623	-0.0943	-0.0974	-0.0316	-0.1000	-0.1248	-0.1086	-0.1401	-0.1381	-0.1392	-0.1357	-0.1383	-0.1346
De/Se	25.4	24.3938	23.2494	21.3333	20.32	19.709	18.9552	18.3063	17.0541	16.256	16	15.5174	15.0686	14.5143

E系列3架不同壁厚规格的平均张力 (Do=450mm; De=426.00mm)

毛管壁厚So	8.8	9.3	9.8	10.75	11.75	12.74	13.7	14.7	15.65	16.65	17.65	18.6	19.6	21.55
成品管壁厚Se	9	9.5	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22
总平均张力	-0.3309	-0.2852	-0.2457	-0.3469	-0.2734	-0.2421	-0.2924	-0.2397	-0.3057	-0.2580	-0.2175	-0.2718	-0.2343	-0.2475
De/Se	47.3333	44.8421	42.6	38.7273	35.5	32.7692	30.4286	28.4	26.625	25.0588	23.6667	22.4211	21.3	19.3636

E系列3架不同壁厚规格的平均张力 (Do=450mm; De=426.00mm)

毛管壁厚So	23.5	24.5	25.42	27.38	29.33	31.29	33.25	34.22	35.2	37.16	39.12			
成品管壁厚Se	24	25	26	28	30	32	34	35	36	38	40			
总平均张力	-0.2581	-0.2293	-0.3061	-0.2977	-0.3014	-0.2939	-0.2873	-0.2935	-0.2902	-0.2842	-0.2787			
De/Se	17.75	17.04	16.3846	15.2143	14.2	13.3125	12.5294	12.1714	11.8333	11.2105	10.65			

B系列不同机架不同壁厚规格的平均张力 (Do=290mm)

机架数n	10	7	6	5	4									
成品管直径De	232	250	253.4	254.4	256	257	260	264	265	266	269.4	270		
毛管壁厚So	10.4	15.2	12	23.35	13.6	20.91	26.46	15.4	23.8	30.71	12.1	26.96	21.51	29.1
成品管壁厚Se	11	16	12.5	25	14.2	22.2	28	16	25	32	12.5	28	22.2	30
总平均张力	0.2094	0.2234	0.1493	-0.0836	0.0841	-0.0979	-0.1013	0.0720	-0.1208	-0.1351	-0.0388	-0.1563	-0.1935	-0.1944
De/Se	21.0909	14.5	20	10	17.8451	11.4595	9.14286	16.0625	10.4	8.25	21.2	9.5	12.1351	9

B系列8架不同壁厚规格的平均张力 (Do=290mm; De=244.50mm)

毛管壁厚So	6.7	7.5	7.6	8.4	8.4	9.4	9.6	10.4	11.4	11.8	13.2	13.4	15.2	16.75
--------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	-------

附录2

成品管壁厚Se	7.1	7.92	8	8.8	8.94	10	10.03	11	11.99	12.5	13.84	14.2	16	17.5
总平均张力	0.0928	0.1169	0.1389	0.1700	0.0600	0.0625	0.1860	0.1027	0.1400	0.0906	0.1581	0.0865	0.1296	0.1754
De/Se	34.4366	30.8712	30.5625	27.7841	27.349	24.45	24.3769	22.2273	20.392	19.56	17.6662	17.2183	15.2813	13.9714

B系列3架不同壁厚规格的平均张力 (Do=290mm; De=273.00mm)														
毛管壁厚So	6.2	6.35	6.94	7.6	7.8	8.55	8.6	8.7	9.05	9.75	9.95	10.75	10.9	11.15
成品管壁厚Se	6.35	6.5	7.09	7.8	8	8.74	8.8	8.89	9.27	10	10.16	11	11.13	11.43
总平均张力	-0.2439	-0.2262	-0.1662	-0.3073	-0.2854	-0.1817	-0.2116	-0.1706	-0.2420	-0.2809	-0.1488	-0.2083	-0.1478	-0.2619
De/Se	42.9921	42	38.5049	35	34.125	31.2357	31.0227	30.7087	29.4498	27.3	26.8701	24.8182	24.5283	23.8845

B系列3架不同壁厚规格的平均张力 (Do=290mm; De=273.00mm)														
毛管壁厚So	12.2	12.3	12.4	13.5	13.9	13.95	14.75	15.5	15.6	17.1	17.8	19.5	20.2	20.91
成品管壁厚Se	12.5	12.57	12.7	13.84	14.2	14.27	15.09	15.88	16	17.5	18.26	20	20.62	21.44
总平均张力	-0.2446	-0.1698	-0.2327	-0.2595	-0.1582	-0.1951	-0.1972	-0.2369	-0.2687	-0.2037	-0.2704	-0.2617	-0.1336	-0.2514
De/Se	21.84	21.7184	21.4961	19.7254	19.2254	19.131	18.0915	17.1914	17.0625	15.6	14.9507	13.65	13.2396	12.7332

B系列3架不同壁厚规格的平均张力 (Do=240mm; De=273.00mm)														
毛管壁厚So	21.65	21.68	23.24	24.38	24.77	27.31	27.86	29.26	30.97	31.21	35.12	39.3		
成品管壁厚Se	22.2	22.23	23.83	25	25.4	28	28.57	30	31.75	32	36	40		
总平均张力	-0.2518	-0.2508	-0.2491	-0.2486	-0.2482	-0.2406	-0.2455	-0.2391	-0.2347	-0.2376	-0.2281	-0.0694		
De/Se	12.2973	12.2807	11.4561	10.92	10.748	9.75	9.5548	9.1	8.59843	8.53125	7.58333	6.825		

C系列不同机架不同壁厚规格的平均张力 (Do=345mm)														
机架数n	10					9			8		7			
成品管直径De	280		281	282	284.4	285	290			295	296	298.4		
毛管壁厚So	18.12	36.31	25.42	32.77	20.27	27.44	16.5	23.05	36.93	13.4	26.08	8	9	10.5
成品管壁厚Se	20	40	28	36	22.2	30	17.5	25	40	14.2	28	8.46	9.52	11.05
总平均张力	-0.0608	-0.0559	-0.0614	-0.0598	-0.0660	-0.0633	0.0888	-0.0735	-0.0682	0.0419	-0.0840	0.0153	0.0126	0.0578
De/Se	14	7	10.0357	7.83333	12.8108	9.5	16.5714	11.6	7.25	20.7746	10.5714	35.2719	31.3445	27.0045

C系列4架不同壁厚规格的平均张力 (Do=345mm; De=323.80mm)														
毛管壁厚So	6.2	6.95	7.75	8.2	8.55	9.3	10.05	10.85	12.4	13.9	15.5	17.1	18.6	20.1
成品管壁厚Se	6.35	7.14	7.92	8.38	8.74	9.52	10.31	11.13	12.7	14.27	15.88	17.48	19.05	20.62
总平均张力	-0.1868	-0.2763	-0.1245	-0.1246	-0.1314	-0.1687	-0.2285	-0.2256	-0.1800	-0.2436	-0.1854	-0.1263	-0.1743	-0.2156
De/Se	50.9921	45.3501	40.8838	38.6396	37.0481	34.0126	31.4064	29.0925	25.4961	22.691	20.3904	18.524	16.9974	15.7032

C系列3架不同壁厚规格的平均张力 (Do=345mm; De=325.00mm)														
毛管壁厚So	7.31	7.8	8.3	8.8	9.3	9.75	10.75	11.75	12.7	13.7	14.65	15.6	16.65	17.6
成品管壁厚Se	7.5	8	8.5	9	9.5	10	11	12	13	14	15	16	17	18

附录2

总平均张力	-0.3171	-0.3044	-0.2541	-0.2114	-0.1748	-0.3002	-0.2246	-0.1658	-0.2327	-0.1816	-0.2379	-0.2886	-0.1548	-0.2009
De/Se	43.3333	40.625	38.2353	36.1111	34.2105	32.5	29.5455	27.0833	25	23.2143	21.6667	20.3125	19.1176	18.0556

C系列不同机架不同壁厚规格的平均张力 (Do=345 mm)														
机架数n	6		5											
成品管直径 De	305		311	312	314	315	317							
毛管壁厚So	23.63	37.85	26.73	34.43	21.3	28.82	15.5							
成品管壁厚Se	25	40	28	36	22.2	30	16							
总平均张力	-0.1086	-0.0976	-0.1274	-0.1277	-0.1407	-0.1483	-0.0755							
De/Se	12.2	7.625	11.1071	8.6667	14.1441	10.5	19.8125							

附录 3

轧卡样实际尺寸测量结果:

序 号	壁 厚 mm							平均外径 mm		备 注	
	a	b	c	d	e	f	平均		截面 面		区域
							截面	区域			
1	15.4	15.8	15.7	15.8	14.2	15.1	15.3	15.6	194	193.9	A-8
2	15.7	15.6	16.0	15.8	14.4	15.2	15.5		194		
3	16.1	15.8	16.1	15.9	14.6	15.1	15.6		194		
4	16.1	16.0	16.0	16.0	14.6	15.3	15.7		194		
5	16.1	16.1	16.1	15.9	14.6	15.2	15.7		194		
6	16.0	16.1	16.3	16.0	14.8	15.2	15.7		194		
7	15.9	16.1	16.2	16.0	15.1	15.2	15.8		194		
8	15.9	16.1	16.2	16.0	15.1	15.2	15.8		194		
9	16.0	16.2	16.0	16.0	15.1	15.2	15.8		194		
10	16.0	16.3	16.1	16.0	15.2	15.2	15.8		194		
11	16.0	16.3	16.2	15.8	15.3	15.2	15.8		194		
12	15.8	16.3	16.0	15.9	15.4	15.4	15.8		194		
13	16.0	16.3	16.1	15.9	15.4	15.3	15.8		194		
14	16.1	16.5	16.2	16.0	15.3	15.2	15.9		194		
15	16.3	16.6	16.3	15.8	15.4	15.3	16.0		194		
16	16.1	16.5	16.2	15.7	15.4	15.4	15.9		194		
17	16.0	16.5	16.3	15.8	15.4	15.3	15.9		194		
18	16.0	16.5	16.3	15.7	15.4	15.3	15.9		194		
19	15.8	16.3	16.2	15.8	15.5	15.4	15.8		194		
20	16.1	16.2	16.1	16.0	15.3	15.3	15.8		194		
21	16.0	16.3	16.3	15.9	15.4	15.4	15.9		194		
22	16.1	16.4	16.3	15.8	15.4	15.3	15.9		194		
23	16.1	16.3	16.3	15.8	15.4	15.2	15.9		194		
24	15.8	16.1	16.3	15.8	15.5	15.3	15.8		193.5		
25	15.9	16.3	16.1	15.9	15.5	15.4	15.9	193.5			
26	15.7	16.3	16.1	15.8	15.5	15.2	15.8	193.5			
27	15.7	16.3	16.1	15.7	15.4	15.4	15.8	193.5			
28	15.7	16.1	16.0	15.8	15.5	15.4	15.8	193.5			
29	15.8	16.3	16.0	15.8	15.4	15.5	15.8	193.5			
30	15.9	16.3	16.1	15.6	15.4	15.2	15.8	193.5			
31	15.8	16.4	16.0	15.5	15.4	15.4	15.8	193.5			
32	15.9	16.1	16.9	15.4	15.4	15.5	15.9	193.5			
33	16.0	16.3	16.1	15.4	15.2	15.2	15.7	193.5			
34	16.2	16.3	16.1	15.4	15.2	15.3	15.8	193.5			
35	16.0	16.1	16.1	15.4	15.2	15.4	15.7	193.5			
36	16.1	16.0	16.1	15.4	15.3	15.2	15.7	193.5			
37	16.2	16.3	16.0	15.5	15.4	15.2	15.8	193.5			
38	16.1	16.3	16.0	15.5	15.2	15.3	15.8	193.5			
39	15.9	16.2	15.9	15.6	15.3	15.4	15.7	193.5			
40	15.7	16.0	15.9	15.7	15.3	15.3	15.7	194			
41	15.8	16.0	15.9	15.7	15.3	15.2	15.7	194			
42	15.8	16.1	15.8	15.8	15.2	15.4	15.7	194			
43	15.7	16.1	15.8	15.8	15.4	15.3	15.7	194			
44	15.7	15.9	16.0	15.7	15.2	15.5	15.7	194			
45	15.7	15.8	15.8	15.7	15.3	15.4	15.6	194			
46	15.7	15.9	15.8	15.7	15.3	15.4	15.6	194			
47	15.8	16.0	15.8	15.7	15.4	15.5	15.7	194			
48	15.9	15.8	15.8	15.6	15.4	15.5	15.7	194			
49	16.0	15.9	15.8	15.5	15.2	15.2	15.6	193.5			
50	15.9	15.8	15.9	15.5	15.3	15.5	15.7	193.5			
51	16.0	16.0	16.0	15.6	15.3	15.4	15.7	193.5			

附录 3

52	15.8	15.9	15.8	15.6	15.3	15.6	15.7		193.5		
53	15.8	15.7	15.7	15.5	15.1	15.4	15.5		194		
54	15.8	15.8	15.6	15.5	15.3	15.5	15.6		194		
55	15.8	15.8	15.6	15.5	15.2	15.2	15.5		194		
56	15.7	15.8	15.8	15.4	15.2	15.4	15.6		194		
57	15.7	15.7	15.6	15.4	15.1	15.5	15.5		194		
58	15.7	15.7	15.5	15.4	15.2	15.4	15.5		194		
59	15.6	15.7	15.7	15.4	15.1	15.3	15.5		194		
60	15.5	15.7	15.5	15.4	15.1	15.5	15.5		194		
61	15.5	15.7	15.4	15.4	15.2	15.3	15.4		194		
62	15.5	15.6	15.3	15.4	15.2	15.4	15.4		194		
63	15.4	15.7	15.3	15.4	15.1	15.5	15.4		194		
64	15.5	15.6	15.2	15.5	15.1	15.4	15.4		194		
65	15.4	15.5	15.1	15.4	15.1	15.2	15.3		194		
66	15.4	15.6	15.2	15.4	15.2	15.5	15.4		194		
67	15.3	15.6	15.2	15.4	15.2	15.3	15.3		194		
68	15.2	15.6	15.2	15.4	15.1	15.3	15.3		194		
69	15.3	15.5	15.3	15.5	15.2	15.4	15.4		193.5		
70	15.4	15.5	15.1	15.4	15.1	15.2	15.3		193.5		
71	15.4	15.4	15.2	15.2	15.1	15.2	15.3		194		
72	15.3	15.4	15.4	15.3	15.1	15.3	15.3		193.5		
73	15.4	15.4	15.4	15.4	15.1	15.2	15.3		193.5		
74	15.5	15.4	15.1	15.3	15.2	15.2	15.3		194		
75	15.4	15.4	15.3	15.3	15.2	15.3	15.3		194		
76	15.4	15.4	15.4	15.2	15.2	15.2	15.3		194		
77	15.4	15.4	15.4	15.3	15.1	15.2	15.3		193.5		
78	15.4	15.2	15.5	15.2	15.2	15.3	15.3		193.5		
79	15.4	15.3	15.6	15.4	15.2	15.5	15.4		194		
80	15.4	15.4	15.4	15.4	15.3	15.3	15.4		193.7		
81	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.3	15.4		193.6		
82	15.4	15.3	15.5	15.4	15.4	15.4	15.4		194		
83	15.4	15.3	15.5	15.4	15.2	15.3	15.4		193.7		
84	15.7	15.5	14.9	15.7	15.6	15.1	15.4		193.5		
85	15.4	15.4	14.6	15.5	15.4	15.4	15.3	15.1	196	196	A-7
86	15.4	15.2	14.6	14.6	15.5	15.2	15.1		196		
87	15.3	15.4	15.1	14.6	15.4	15.2	15.2		196		
88	15.2	15.3	15.1	14.8	15.2	15.2	15.1		196		
89	15.5	15.5	15.5	15.2	14.9	15.2	15.3		196		
90	15.4	15.4	15.9	15.4	15.4	15.0	15.4		196		
91	15.3	15.3	14.8	14.7	15.2	15.3	15.1		196		
92	15.2	15.3	14.8	14.8	15.2	14.9	15.0		196		
93	15.2	15.2	14.7	14.9	15.2	15.1	15.1		196		
94	15.2	15.1	14.8	14.8	14.8	14.9	15.0		196		
95	15.2	15.2	14.8	14.9	15.1	14.8	15.0		196		
96	15.0	14.9	14.7	14.8	15.1	15.1	14.9		196		
97	14.9	14.9	14.8	14.7	14.9	16.1	15.1		196		
98	14.7	14.8	14.5	14.8	15.2	14.8	14.8		196		
99	14.9	14.7	14.5	14.5	14.9	15.1	14.8	14.7	199	198.6	A-6
100	14.7	14.8	14.5	14.6	14.9	14.9	14.7		198		
101	14.6	14.6	14.4	14.4	14.9	14.8	14.6		199		
102	14.7	14.8	14.3	14.3	14.9	15.1	14.7		199		
103	14.7	14.6	14.4	14.3	14.9	14.9	14.6		199		
104	14.9	14.6	14.5	14.3	15.1	15.1	14.8		199		
105	15.1	14.6	14.4	14.4	15.2	14.9	14.8		199		
106	14.9	14.6	14.3	14.3	14.9	15.1	14.7		198		
107	14.9	14.5	14.3	14.3	15.2	15.2	14.7		199		
108	15.0	14.7	14.3	14.3	15.1	15.0	14.7		199		

附录 3

109	15.0	14.9	14.3	14.4	15.2	14.9	14.8		198		
110	15.2	14.9	14.4	14.3	15.2	15.0	14.8		198		
111	15.4	14.8	14.5	14.4	15.1	15.2	14.9		198		
112	15.2	14.8	14.5	14.3	14.9	14.9	14.8		198		
113	15.1	15.1	14.6	14.5	14.8	14.8	14.8	14.6	204	203.6	A—5
114	14.3	14.5	14.7	14.2	14.3	14.4	14.4		204		
115	14.5	14.5	14.8	14.9	14.2	14.8	14.6		203		
116	14.2	14.3	14.5	14.8	14.5	14.6	14.5		203		
117	14.4	14.3	14.6	14.8	14.2	14.5	14.5		204		
118	14.8	14.9	14.5	14.7	14.6	14.4	14.7		204		
119	15.1	15.1	14.3	14.5	14.9	15.0	14.8		204		
120	14.7	14.8	14.6	14.3	14.4	14.9	14.6		203		
121	14.8	14.8	14.9	14.4	14.3	14.4	14.6		204		
122	14.4	14.5	14.4	14.8	14.9	14.6	14.6		203		
123	14.6	14.6	14.4	14.5	14.7	14.5	14.6		203		
124	14.7	14.7	14.6	14.7	14.6	14.4	14.6		204		
125	14.8	14.6	14.6	14.7	14.7	14.6	14.7		204		
126	14.9	14.8	14.5	14.3	14.8	14.8	14.7		204		
127	14.7	14.6	14.0	14.1	14.9	15.1	14.6	14.5	210	210.3	A—4
128	14.6	14.2	14.0	14.1	15.1	15.3	14.6		210		
129	14.6	14.3	13.9	13.8	14.8	14.9	14.4		210		
130	14.8	14.4	13.8	13.9	14.8	14.9	14.4		211		
131	14.7	14.6	14.0	13.9	14.8	14.8	14.6		210		
132	14.9	14.8	14.1	14.0	14.4	14.4	14.4		211		
133	14.6	14.5	13.9	13.7	14.9	14.8	14.4		210		
134	14.8	14.6	14.0	14.1	14.8	14.9	14.5		210		
135	14.6	14.7	14.0	13.8	14.4	14.7	14.4		210		
136	14.7	14.6	14.0	13.9	14.8	14.7	14.5		210		
137	14.8	14.6	14.2	14.2	14.5	14.6	14.5		211		
138	14.7	14.7	14.2	14.1	14.6	14.7	14.5		210		
139	14.8	14.9	14.0	14.2	14.8	15.0	14.6		211		
140	14.6	14.3	14.0	13.9	14.8	15.1	14.5		210		
141	14.6	14.4	14.3	14.8	14.6	15.0	14.6	14.5	216	216.3	A—3
142	14.4	14.5	14.3	14.5	14.3	14.7	14.5		216		
143	14.2	14.3	14.2	14.3	14.2	14.9	14.4		216		
144	14.2	14.0	14.6	14.2	14.3	14.8	14.4		217		
145	14.2	14.2	14.0	14.1	14.6	14.9	14.3		216		
146	14.2	14.2	14.1	14.0	14.2	14.4	14.2		217		
147	14.2	14.2	14.0	13.9	14.5	14.8	14.3		217		
148	14.3	14.3	14.0	13.9	15.1	15.2	14.5		216		
149	14.5	14.4	13.9	14.0	14.9	14.7	14.4		216		
150	14.5	14.6	14.0	14.0	14.9	14.9	14.5		216		
151	14.6	14.6	14.2	14.1	15.1	14.6	14.5		216		
152	14.9	14.8	14.2	14.2	15.0	14.6	14.6		217		
153	14.6	14.6	14.4	14.0	14.8	14.6	14.5		216		
154	14.8	14.7	14.8	14.2	15.2	14.5	14.7		216		
155	14.4	14.6	14.9	14.6	14.9	14.5	14.7	14.4	223	223	A—2
156	14.3	14.2	14.5	14.7	14.3	14.4	14.4		223		
157	14.3	14.3	14.2	14.6	14.5	14.6	14.4		223		
158	14.5	14.5	14.6	14.3	14.6	14.5	14.5		223		
159	14.4	14.6	14.5	14.6	14.8	14.3	14.5		223		
160	14.7	14.5	14.4	14.3	14.6	14.2	14.5		223		
161	14.2	14.1	14.3	14.2	14.0	14.5	14.2		223		
162	14.7	14.7	14.3	14.5	14.4	14.3	14.5		223		
163	14.8	14.5	14.6	14.2	14.3	14.4	14.5		223		
164	14.0	14.2	14.1	14.2	14.3	14.2	14.2		223		
165	14.1	14.3	14.2	14.4	14.2	14.1	14.2		223		

附录 3

166	14.2	14.0	14.3	14.1	14.2	14.2	14.2		223		
167	14.1	14.0	14.3	14.4	14.5	14.2	14.3		223		
168	14.0	14.1	14.2	14.5	14.3	14.2	14.2		223		
169	13.9	14.3	14.2	14.0	14.5	14.3	14.2	14.1	230.5	230.7	A-1
170	14.0	14.2	14.3	14.1	14.5	14.4	14.3		230.5		
171	14.1	14.3	14.1	14.2	14.4	14.5	14.3		231		
172	13.7	14.3	14.0	14.3	14.6	14.3	14.2		230.5		
173	13.8	14.2	14.0	14.2	14.4	14.3	14.2		230.5		
174	14.0	14.3	14.1	14.0	14.4	14.3	14.2		230.5		
175	13.7	14.0	13.9	13.9	14.2	14.2	14.0		231		
176	13.8	14.2	14.0	13.9	14.3	14.2	14.1		231		
177	13.9	14.1	13.9	14.1	14.2	14.0	14.0		230.5		
178	13.7	13.9	14.0	14.0	14.0	13.8	13.9		230.5		
179	13.7	13.9	14.0	14.1	14.0	14.1	14.0		230.5		
180	13.9	13.9	14.0	13.7	13.7	13.6	13.8		231		
181	13.7	13.7	14.0	14.2	14.0	14.3	14.0		231		
182	13.9	13.9	14.0	13.8	13.9	13.5	13.8		230.5		
183	13.6	13.8	14.0	14.1	13.8	13.9	13.9	13.9	244	242.0	A-0
184	13.6	13.7	14.1	14.0	13.9	13.9	13.9		244		
185	13.4	13.8	14.0	14.1	14.4	13.7	13.9		244		
186	13.6	13.6	13.7	14.2	13.4	13.3	13.6		244		
187	13.3	13.6	14.0	14.2	13.6	13.5	13.7		244		
188	13.4	13.6	14.0	14.3	13.3	13.5	13.7		244		
189	13.3	13.8	13.8	14.3	13.1	13.3	13.6		244		
190	13.3	13.1	13.6	14.8	13.4	13.4	13.6		243.5		
191	13.4	13.5	13.7	14.3	13.4	13.5	13.6		243.5		
192	13.2	13.3	13.7	14.0	13.3	13.3	13.5		243.5		
193	13.4	13.3	13.9	14.1	13.4	13.4	13.6		243.5		
194	13.5	13.4	13.7	14.3	13.2	13.4	13.6		243.5		
195	13.5	13.5	14.0	14.3	13.4	13.3	13.7		243.5		
196	13.6	13.8	14.0	14.2	13.0	13.6	13.7		243.5		
197	13.6	13.5	14.0	14.2	13.1	13.2	13.6		243		
198	13.5	13.6	14.0	14.2	13.0	13.6	13.7		243		
199	13.4	13.7	14.0	14.3	13.0	13.0	13.6		243		
200	13.5	13.5	13.9	14.3	13.0	13.0	13.5		243		
201	13.6	13.6	14.0	14.3	12.9	13.1	13.6		243		
202	13.6	13.6	14.0	14.3	12.9	12.7	13.5		243		
203	13.3	13.5	14.0	14.5	12.9	13.0	13.5		243		
204	13.4	13.6	14.0	14.5	12.7	13.4	13.6		242.5		
205	13.6	14.0	14.3	14.0	12.9	13.1	13.7		242.5		
206	13.6	13.6	14.0	14.3	12.9	13.1	13.6		242.5		
207	14.4	14.0	14.2	14.2	13.1	13.2	13.9		242.5		
208	13.7	13.8	14.3	14.3	13.1	13.3	13.8		242.5		
209	13.8	14.1	14.3	14.2	13.7	13.6	14.0		242.5		
210	14.1	14.3	14.2	13.3	13.2	13.1	13.7		242.5		
211	14.2	14.1	14.2	14.1	13.7	13.1	13.9		242		
212	14.2	14.4	14.3	14.0	13.0	13.0	13.8		242		
213	14.2	14.6	14.4	14.3	13.1	13.0	13.9		242		
214	14.2	14.3	14.6	14.6	13.1	13.6	14.1		242		
215	14.1	14.4	14.8	13.1	12.8	13.4	13.8		242		
216	14.2	14.5	14.3	14.5	12.7	13.1	13.9		242		
217	14.0	14.9	14.6	14.4	14.3	13.2	14.2		242		
218	14.2	14.3	14.5	14.3	13.7	13.5	14.1		241.5		
219	14.0	14.3	14.4	14.3	13.3	13.5	14.0		241.5		
220	14.1	14.2	14.3	13.4	14.3	13.5	13.8		241.5		
221	14.5	14.3	14.1	14.0	13.5	13.5	14.0		241.5		
222	14.6	14.5	14.4	13.9	13.3	13.5	14.0		241.5		

附录 3

223	14.7	14.5	14.3	14.4	13.7	13.2	14.1	241.5
224	14.8	14.7	14.4	14.2	13.7	13.3	14.2	241
225	14.8	14.9	14.6	14.3	13.4	13.1	14.2	241
226	14.5	14.5	14.2	14.3	13.6	13.1	14.0	241
227	14.5	14.5	14.2	14.2	13.6	13.3	14.1	241
228	14.2	14.5	14.9	14.3	13.5	13.6	14.2	241
229	14.3	14.3	14.5	14.1	13.5	13.1	14.0	241
230	14.3	15.1	14.2	14.3	13.7	13.3	14.2	241
231	14.3	14.3	13.7	13.9	13.6	13.2	13.8	241
232	14.2	14.3	14.0	13.8	13.8	14.0	14.0	241
233	14.3	14.4	14.9	14.2	13.9	13.6	14.2	241
234	15.4	14.2	13.8	13.4	14.0	13.4	14.0	241
235	14.5	13.3	14.6	14.2	14.5	13.4	14.1	241
236	14.3	14.4	13.8	13.9	13.9	14.2	14.1	240.5
237	14.3	14.3	13.5	13.3	13.8	13.6	13.8	240.5
238	14.1	14.3	14.2	13.8	14.6	13.8	14.1	240.5
239	14.3	14.2	13.5	14.1	13.9	14.1	14.0	240.5
240	14.3	14.4	13.2	14.2	14.3	13.7	14.0	240.5
241	14.5	14.7	13.9	13.3	13.8	13.9	14.0	240.5
242	14.3	14.3	13.5	14.6	14.3	14.0	14.2	240.5
243	14.0	14.6	13.6	14.1	14.6	14.4	14.2	240.5
244	13.9	13.9	13.8	13.3	13.9	14.6	13.9	240.5
245	13.8	14.6	14.0	14.0	14.0	14.0	14.1	240.5

附录 4

(1) $\Phi 219 \times 8 \text{mm}$ (头部)

序号	各截面壁厚 (mm)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
a	8.1	7.1	8.1	7.5	7.5	7.9	7.8	8.0	7.5	7.9	7.9	7.9	8.4	7.7	7.7	7.9	7.6	7.7	8.0	8.0
b	8.1	7.4	7.4	7.4	7.7	7.5	7.6	7.7	8.3	7.8	8.1	8.7	7.8	8.0	8.7	8.0	8.1	8.6	8.8	8.7
c	8.1	7.8	7.6	7.8	7.9	8.0	8.4	7.9	8.0	8.4	8.1	7.9	7.9	7.8	8.1	7.5	7.5	8.4	7.7	7.7
d	8.4	8.1	8.3	8.3	8.1	8.1	7.7	8.0	8.2	8.3	8.2	8.3	8.0	8.1	8.3	8.3	8.0	8.2	8.3	8.0
e	8.3	8.4	8.4	8.3	8.2	8.1	8.7	8.3	8.2	8.1	8.1	8.3	8.1	8.2	8.1	8.0	8.1	8.0	8.1	8.3
f	7.9	8.1	8.3	8.1	8.6	7.8	8.0	8.0	8.1	8.2	8.2	8.1	8.6	7.8	8.0	8.6	8.4	8.6	8.0	8.1

 $\Phi 219 \times 8 \text{mm}$ (头部) (续)

序号	各截面壁厚 (mm)																			
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
a	8.1	8.2	8.3	7.6	8.0	8.1	8.4	8.3	8.2	8.1	7.9	7.7	7.9	8.0	8.0	8.1	7.9	7.7	8.0	7.9
b	8.1	7.9	7.9	7.9	8.6	8.4	8.5	8.0	8.0	8.0	8.0	8.1	8.2	7.9	7.9	8.3	8.2	7.9	8.2	8.1
c	7.9	7.8	8.1	7.7	7.7	8.0	8.1	7.8	7.9	7.9	8.0	8.4	7.8	8.1	8.3	7.7	7.7	8.0	8.1	8.2
d	8.0	7.9	8.2	8.0	8.3	8.1	8.1	8.0	8.2	8.1	8.0	7.9	8.0	8.2	8.3	8.1	8.2	8.1	8.3	8.2
e	8.1	8.0	8.2	8.2	8.0	8.1	8.2	8.4	8.4	8.3	8.2	8.2	8.2	8.1	8.1	8.1	8.4	8.3	8.3	8.3
f	8.0	7.9	7.9	8.4	8.2	8.3	8.1	8.3	8.4	8.2	7.9	8.2	8.3	8.1	8.3	8.2	7.9	8.2	7.9	8.0

(2) $\Phi 219 \times 8 \text{mm}$ (尾部)

序号	各截面壁厚 (mm)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
a	7.6	7.8	7.8	7.5	7.4	7.4	7.6	7.6	7.5	7.5	7.5	7.4	7.7	7.7	7.6	7.6	8.3	8.4	7.7	7.8
b	7.8	7.2	7.4	7.7	8.1	7.2	7.6	8.1	7.6	7.6	7.7	7.8	7.8	7.8	8.2	7.6	7.9	7.8	8.1	8.0
c	6.9	7.1	7.4	7.5	7.8	7.5	7.5	7.4	7.8	7.5	7.4	7.4	7.6	7.6	7.5	7.5	8.1	7.6	7.8	7.7
d	8.0	8.0	8.0	7.9	8.6	8.0	8.0	8.1	8.0	8.0	7.8	7.8	7.8	8.7	8.2	8.1	8.1	8.0	8.0	8.1
e	8.5	8.5	8.7	8.6	8.0	8.1	8.1	8.4	7.9	7.7	7.8	8.1	7.7	7.7	7.9	8.1	8.6	7.8	7.9	7.8
f	8.6	8.4	8.2	8.0	7.8	7.7	7.6	7.6	8.1	7.5	7.9	7.7	8.1	7.6	7.7	7.7	7.8	8.4	7.7	8.4

Φ219×8mm (尾部) (续)

序号	各截面壁厚 (mm)																			
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
a	7.7	7.8	7.7	7.8	7.7	7.6	7.7	7.8	7.7	7.9	7.7	7.6	7.8	7.6	7.7	7.9	8.0	8.1	8.0	7.9
b	8.0	7.8	7.8	7.7	7.8	8.0	8.1	8.0	7.9	7.8	7.9	8.0	7.9	7.8	7.7	7.8	7.7	7.8	7.9	8.1
c	7.9	7.7	7.8	7.8	8.0	7.9	7.8	7.7	7.8	7.9	7.8	7.8	7.6	7.7	7.8	7.9	7.8	7.6	7.7	7.8
d	7.8	7.9	7.7	8.2	8.1	8.1	8.0	8.0	8.1	7.9	7.9	8.2	8.1	7.9	8.0	8.0	7.9	8.1	7.9	8.0
e	7.8	7.7	7.6	7.5	7.5	7.5	7.4	7.6	7.8	8.4	8.1	8.3	7.9	7.7	7.7	7.9	8.1	7.9	7.8	8.2
f	7.5	7.5	8.0	7.4	8.0	7.6	7.7	7.9	8.1	7.9	7.8	7.7	7.6	7.8	7.9	8.1	8.0	7.9	7.8	7.9

(3) Φ180×8mm (头部) (间距 50mm)

序号	各截面壁厚 (mm)																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
a	8.3	8.2	8.3	8.4	8.5	8.4	8.4	8.3	8.4	8.5	8.5	8.4	8.4	8.3	8.1	8.2	8.1	8.0	8.1
b	8.9	8.7	8.1	8.2	8.3	8.2	7.8	7.7	7.7	7.8	8.8	8.7	7.7	7.8	8.3	8.4	7.9	7.9	8.2
c	7.5	7.7	7.8	7.5	7.6	7.7	8.3	8.3	7.8	7.7	8.1	8.2	7.7	7.8	8.4	8.1	8.4	7.7	8.0
d	9.2	8.9	8.3	8.4	7.8	7.8	8.2	8.1	8.2	8.4	7.8	7.7	8.2	8.4	7.8	7.6	7.9	7.7	8.1
e	8.8	8.6	8.0	8.8	8.3	8.2	8.3	8.2	8.1	8.0	8.0	8.2	8.4	8.2	8.4	8.5	8.4	7.8	7.9
f	8.3	8.4	8.0	8.4	8.0	8.1	8.5	8.4	8.1	8.2	7.7	8.1	8.0	7.9	8.3	8.0	8.4	8.4	7.7

(4) Φ180×8mm (尾部) (间距 50mm)

序号	各截面壁厚 (mm)																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
a	8.0	7.9	7.6	7.3	7.7	8.3	8.6	8.4	8.2	8.0	8.1	7.9	8.0	8.3	8.3	7.7	7.6	8.4	8.5
b	7.1	7.3	8.2	7.4	8.4	8.4	8.2	8.1	7.8	7.9	7.7	8.0	7.8	8.3	8.1	8.2	8.1	8.2	8.3
c	7.3	8.5	8.9	8.9	8.4	8.0	8.4	7.8	8.1	8.3	8.4	8.3	8.3	8.5	8.7	8.5	8.6	8.5	8.6
d	8.8	8.9	8.7	7.0	8.1	8.5	8.7	8.1	8.1	8.2	8.1	8.2	7.8	7.7	7.8	7.9	7.9	8.1	7.8
e	8.0	8.3	8.2	8.2	8.1	8.2	8.4	8.3	8.4	8.3	8.4	8.4	8.5	8.1	8.2	8.2	8.3	8.2	8.1
f	9.0	8.4	8.8	7.6	8.3	8.6	8.1	8.2	8.3	8.2	8.4	8.3	8.3	8.2	8.2	8.2	8.0	7.9	7.8

(5) 273×8mm (头部)

序号	各截面壁厚 (mm)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
a	8.4	8.5	8.3	8.1	8.1	8.0	8.0	8.3	8.1	8.2	8.3	8.1	8.3	8.3	8.2	8.1	8.1	8.3	8.1	7.8
b	8.0	7.8	7.7	7.4	7.2	7.2	7.4	7.4	7.3	7.1	7.2	7.5	7.3	7.4	7.1	7.4	7.3	7.2	8.0	7.5
c	7.9	7.8	7.9	7.8	7.8	7.8	8.1	7.5	8.0	8.0	7.9	7.8	7.7	7.7	7.7	7.7	7.9	7.7	7.9	8.4
d	6.8	6.9	7.1	7.2	7.3	7.3	7.3	7.4	7.4	7.3	7.3	7.7	7.4	7.2	7.4	7.4	7.5	7.7	7.5	7.4
e	7.5	6.8	6.9	6.9	7.0	6.9	6.9	7.0	7.1	7.1	7.1	7.0	7.1	7.9	7.2	7.2	7.2	7.3	7.2	7.2
f	6.8	6.8	7.0	7.2	7.4	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.7	7.2	7.4	7.4	7.4	7.4	7.3	7.2	7.2	7.3

273×8mm (头部) (续)

序号	各截面壁厚 (mm)																			
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
a	7.8	7.8	8.1	7.9	8.1	7.8	8.6	8.2	8.0	7.8	7.9	7.9	7.9	7.8	7.8	7.8	8.7	7.9	8.3	7.8
b	7.8	7.3	8.1	7.3	7.4	7.7	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.3	7.3	7.4	7.3	7.4	7.2	7.5	7.4
c	7.8	7.8	7.8	7.6	7.5	7.6	7.7	7.7	7.7	7.8	7.8	7.8	7.9	7.8	7.7	7.6	7.7	7.7	7.8	7.9
d	7.3	7.2	7.4	7.4	7.3	7.4	7.4	7.4	7.5	7.6	7.5	7.5	7.5	7.4	7.2	7.4	7.4	7.7	7.4	7.7
e	7.3	7.4	7.2	7.2	7.3	7.4	7.2	7.2	7.2	7.3	7.2	7.5	7.3	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.8	7.7
f	7.3	7.4	7.5	7.4	7.3	7.3	8.0	7.5	7.4	7.4	7.6	7.5	7.4	7.3	7.4	7.4	7.5	7.7	7.7	7.5

(6) 273×8mm (尾部)

序号	各截面壁厚 (mm)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
a	8.5	8.4	8.4	8.3	8.6	8.4	8.6	8.5	7.5	7.3	7.2	7.0	7.4	7.4	7.6	7.3	7.6	7.5	7.6	7.7
b	8.6	8.7	8.4	8.3	8.6	8.7	8.6	8.6	7.8	7.4	7.4	7.5	7.7	7.8	7.7	7.5	7.5	8.3	7.5	7.6
c	7.6	8.0	7.4	8.0	8.2	8.0	7.7	7.6	7.3	7.2	7.2	7.1	7.4	7.3	7.4	7.2	7.3	7.4	7.4	7.4
d	6.5	6.3	6.3	6.6	6.6	6.7	6.6	6.7	7.7	7.2	7.4	7.0	7.0	7.0	7.0	7.4	7.6	7.2	7.2	7.3
e	6.8	6.9	6.8	7.3	7.2	7.2	7.2	7.2	7.4	7.4	7.2	7.1	7.4	7.5	7.4	7.1	7.4	7.2	7.2	7.4
f	6.9	6.8	6.8	7.2	7.0	6.9	7.2	7.2	6.9	6.9	6.9	6.9	7.0	7.5	7.0	7.1	7.1	7.3	7.4	7.3

273×8mm (尾部) (续)

序号	各截面壁厚 (mm)																			
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
a	7.6	7.6	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.7	7.5	7.8	8.0	8.4	8.3	7.5	7.8	7.9	7.5	7.8	7.5	7.3
b	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	8.4	7.7	7.8	7.6	7.5	7.8	8.3	7.4	7.4	7.5	7.4	7.8	7.8	7.4
c	7.6	7.4	7.4	7.3	7.9	7.7	7.4	7.3	7.3	7.4	7.5	7.7	8.0	7.6	7.7	7.7	7.6	7.7	7.3	7.2
d	7.2	7.2	7.2	7.2	7.3	7.3	7.5	7.4	7.3	7.7	7.3	8.1	7.6	7.4	7.4	7.4	7.6	7.3	7.6	7.5
e	7.4	7.4	7.4	7.3	7.6	7.4	7.7	7.6	7.6	7.7	7.4	7.5	7.3	7.5	7.7	7.8	7.7	7.5	7.5	8.3
f	7.3	7.3	7.6	7.4	7.3	7.3	7.5	7.6	7.9	7.4	7.3	7.5	7.4	7.3	7.4	7.2	7.3	7.4	7.4	7.4

180×8mm (中部) (1~8 间隔 400mm, 8~20 间隔 500mm)

序号	各截面壁厚 (mm)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
a	8.0	8.5	8.1	8.1	7.4	7.9	8.2	8.0	7.5	8.0	8.0	7.7	8.1	7.7	8.0	8.2	8.3	8.3	7.8	8.4
b	8.0	7.7	7.7	8.1	7.8	8.0	8.7	8.4	7.8	8.3	7.7	8.1	8.1	8.4	8.0	8.1	8.1	8.4	7.8	8.2
c	8.3	8.1	8.1	8.3	8.4	7.9	8.1	8.1	8.1	8.0	8.1	8.0	8.3	8.2	7.8	8.3	7.8	8.0	7.8	8.4
d	7.8	7.7	7.8	7.5	7.5	7.8	7.4	8.0	7.6	7.8	7.7	7.6	7.5	8.7	7.7	8.4	7.7	7.6	7.7	8.4
e	7.7	7.6	8.1	7.8	8.2	8.1	7.8	8.1	8.1	8.3	8.0	7.9	7.9	8.2	8.1	7.8	8.3	7.9	8.2	8.1
f	8.0	7.7	8.6	7.7	8.3	7.6	7.7	7.9	8.6	8.1	7.7	8.1	8.1	7.9	7.8	7.8	8.2	7.9	8.1	7.9

273×8mm (中部)

序号	各截面壁厚 (mm)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
a	8.0	7.8	8.0	7.8	7.8	8.1	8.1	8.1	7.8	7.9	8.0	8.0	7.8	7.8	7.6	7.7	7.6	7.7	8.1	7.9
b	7.4	7.4	7.6	7.3	7.7	7.5	7.3	7.5	7.5	7.7	7.7	7.5	7.7	7.6	7.8	7.5	7.4	7.4	7.8	7.5
c	7.8	7.7	8.1	7.8	7.6	7.8	7.8	7.7	7.5	7.5	7.6	7.6	7.5	7.5	7.6	8.1	7.7	7.7	7.4	7.5
d	7.5	7.4	7.3	7.2	7.2	7.4	7.4	7.5	7.4	7.2	7.3	7.2	7.1	7.3	7.2	7.6	7.1	7.4	7.3	7.2
e	7.6	7.2	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.2	7.1	7.1	7.2	7.0	7.1	7.0	7.1
f	7.1	7.2	7.0	6.9	6.9	6.8	7.2	7.1	7.2	7.3	7.2	7.2	7.2	7.3	7.4	7.4	7.1	6.9	7.3	7.2

附录 4

序号	各截面壁厚 (续) (mm)																								
	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
a	7.6	7.5	7.7	7.8	7.7	7.5	7.7	7.9	7.6	7.5	7.4	8.2	7.8	7.7	7.6	7.6	7.5	8.3	7.4	7.6	7.7	7.6	7.7	7.2	7.4
b	7.4	7.5	7.5	7.4	7.5	7.5	7.8	7.7	7.4	7.5	7.8	7.5	7.7	7.7	7.8	7.5	7.3	7.8	7.7	7.4	7.4	7.4	7.5	7.4	7.5
c	7.7	7.6	7.5	7.5	7.5	7.2	7.3	7.5	7.4	7.3	7.2	7.2	7.4	7.4	7.2	7.2	7.3	7.4	7.4	7.3	7.3	7.1	7.2	7.2	7.2
d	7.2	7.2	7.4	7.5	7.3	7.4	7.4	7.3	7.4	7.2	7.4	7.3	7.4	7.2	7.3	7.2	7.5	7.4	7.1	7.5	7.2	7.3	7.1	7.0	7.2
e	7.3	7.1	7.1	7.2	7.0	7.0	7.1	6.8	6.9	7.1	7.5	6.9	6.8	7.0	6.9	6.9	6.9	7.0	7.1	7.1	7.2	6.9	7.0	7.1	7.1
f	7.1	7.2	7.7	7.5	7.2	7.4	7.1	7.2	7.4	7.2	7.2	7.2	7.1	7.1	7.4	7.1	7.2	7.1	7.2	7.2	7.1	7.3	7.4	7.4	7.2