

摘要

张力减径过程是极为复杂的三维变形过程。对张减过程的研究目前有一些问题尚未很好解决,如钢管头尾壁厚增厚区过长、断面内多边形等问题。这些问题影响了产品质量,提高了生产成本。借助计算机模拟技术,国内外对上述问题进行了一些研究,也取得了一定的进展。但建立在对上述问题深入研究基础上的张力减径过程计算机工艺设计与仿真通用软件的开发,是我国一个迫切的课题。

本文利用商用有限元软件对张减过程钢管头尾增厚现象进行了模拟研究;对传统张减工艺设计过程进行了分析,指出了其存在的主要问题。针对这些问题提出了修正的张减工艺设计方法,形成了新的张减工艺设计体系。此体系在张减过程变形量分配、张力分配、壁厚分配、轧辊转速等方面都提出了新的或改进的计算方法。在上述研究工作的基础上,编制了相应的计算机程序,初步形成了张减工艺设计与仿真的通用软件。利用此软件提供的多种设计方法,可以快速可靠地完成张减工艺设计;借助本软件的仿真功能,可以实现张减工艺的最优化设计。

关键词 钢管 张力减径 软件

ABSTRACT

Stretch-Reducing is a complex three-dimension deformation process. At present there are some problems still have not solved in the process, such as: extreme length of excessive wallthickness of tube ends; polygon in cross section. All these problems may lead to the poor qualities of finish tubes and the high costs of the tube-making. Using the thechnoly of the computer simulation, researches wre developed and achievements were made .However, by now only a few papers delt with the development of general software in Stretch-Reducing procedure design and simulation, which is a problem need to besolved urgently in China.

With the use of finite element software ,simulations which mainly concern the phenomenon of excessive wallthickness of tube ends were done. Main shortbacks were explained after analyaing the traditional way of Stretch-Reducing procedure designe. New methods were provided,which involves new or improved ways to distribute the amount of deformation,stesses,wallthicknesses and calculate the rotating speed of rollers. Based on the researches which have been done, a general software of Stretch-Reducing procedure designe and simulation were made out. With the aids of the software, Stretch-Reducing procedure designing can be made rapidly, reliably and optimumly.

Key words: tube Stretch-reducing software

引言

热轧无缝钢管自诞生以来，广泛应用于石油、地质、汽车、核电、化工、造船、汽车、锅炉、医学、航空航天等各个领域。

近年来，焊管的生产和应用获得很大进步。与无缝钢管相比，焊管的壁厚精度高，壁厚偏差小，在要求壁厚精度较高的领域对无缝钢管形成了很大的竞争压力。同时，各无缝钢管生产企业都在积极提高产品质量，降低生产成本，开发新的生产工艺，以期在市场竞争中赢得优势。

无缝钢管的尺寸精度对其使用性能及加工成本均有着重要的影响。无缝钢管的尺寸精度主要是指管子的外径精度和壁厚精度。外径精度反映的是钢管的椭圆度，壁厚精度反映的是钢管的壁厚均匀度。无缝钢管的质量很大程度上取决于其尺寸精度。根据钢管不同的用途对钢管的精度提出了不同的要求。某些特殊用户对无缝钢管壁厚精度的实际要求往往高于标准要求，这就促使生产厂家采用更为严格的内部标准或根据用户的特殊要求来组织生产。

张力减径是配备张力减径机组的热轧无缝钢管生产中的最后一道塑性成型工序，是在整个变形过程伴随着应力场、应变场、速度场、温度场变化的三维变形过程。在张力减径过程中，钢管经几个或至多达数十个机架连轧减径成各种口径的成品管，外径通过轧辊孔型来控制，壁厚则是通过改变张力设定来控制。同时张减轧制过程中头尾非稳态所占比例很大，使变形过程更为复杂。张力减径工艺的好坏对成品管的质量有着重要的影响，对以热轧状态交货的无缝钢管尺寸精度起着重要作用。张力减径工序不仅决定了管子外径精度，而且对管子的壁厚精度也有着重要作用。另外，钢管的内外表面缺陷主要来源于张力减径工序。

由于缺乏有效的研究手段，张力减径理论仍然在五、六十年代的基础上未有大的突破，仍以试验修正的试错法及简化的理论计算方法为主。因此，生产中出现的一些问题不能得到有效地解决：如钢管头尾壁厚增厚区过长的问题，钢管横向壁厚不均问题，钢管青线问题等。这些问题造成的经济损失是巨大的。仅以钢管头尾壁厚增厚问题为例，目前的情况是，头尾要产生各约 1~4 米的切损，切损率达数个百分点，全国每年因此造成数亿元的损失。

计算机数值模拟技术的飞速发展,为研究复杂的张力减径变形过程提供了有效的研究工具,国内外已借助这一技术对张减过程进行了大量研究工作。同时,借助自动控制技术,近年来,国外出现了一系列新技术:张力减径机组的头尾壁厚控制技术、连轧机组液压压下及管端轧薄技术、张力减径机组的平均壁厚控制技术、张力减径机组的局部壁厚控制技术等。德国和日本近十年来对张力减径过程的研究投入了较大力量,出现了上述新技术,主要研究手段就是计算机仿真和控制技术。但这些技术理论并不完善,目前面临的主要问题是:张力减径过程断面平均壁厚变化规律、周向壁厚分布规律、头尾动态轧制过程特征等问题。这些问题还没有完全解决,商业性通用张力减径过程软件包还没有出现,研究工作仍在进行之中。我国以宝钢钢管公司为首的企业,已经开始进行这些新技术的研究与应用,也非常需要尽快解决上述理论问题。

成功的解决上述这些问题,对张力减径理论的进一步发展具有积极的推动作用,可以促进计算机技术在轧钢领域的应用,也会给各钢管生产企业带来明显的经济效益。

针对上述情况,本文利用商用有限元软件对张减过程进行了模拟研究,重点模拟了钢管头尾壁厚增厚现象,给出了计算钢管各道次壁厚的经验公式;对传统张减工艺设计过程进行了分析,指出了其存在的主要问题。并提出修正的张减工艺设计体系,此体系在张减过程变形量分配、张力分配、壁厚分配、轧辊转速等方面都提出了新的或改进的计算方法。在进行了上述研究工作的基础上,编制了相应的计算机程序,初步形成了张减工艺设计与仿真的通用软件。

第一章 文献综述

1.1 概述

钢管是中空体闭环断面钢材，广泛应用于国民经济各部门。

按制管方法可以把钢管分为无缝钢管和焊接钢管两大类。无缝钢管是把圆形或方形的实心管坯或钢锭，用某些方法穿孔后，再用各种轧制方式，挤压方式和顶管方式加工成要求的钢管几何尺寸。焊接钢管是用带钢卷和钢板，在辊式成型机或压力机上成型为圆形后，将结合处用一定的焊接方法加工成要求的钢管几何尺寸。热轧无缝钢管的生产方法很多，按其设备主要有以下几种：自动轧管机组；连轧管机组；周期轧管机组；三辊（阿塞尔）轧管机组；顶管机组；挤压管机组。这些无缝钢管生产方法各有其特点，适用范围也不同。按照目前的技术发展条件^[1]，从产品规格上来说，连轧管机组一般适于生产小直径钢管（ $\phi 140$ 毫米以下），自动轧管机组适于生产中小直径钢管（ $\phi 426$ 毫米以下），周期轧管机组适于大中直径（ $\phi 660$ 毫米以下）钢管的生产。三辊轧管机组适于生产 $\phi 200$ 毫米以下的精度要求高的轴承钢管和机械用管。顶管方法可以用来生产 $\phi 177$ 毫米以下的小直径钢管，也可用来生产特大直径的管筒，最大直径可达 1500 毫米。挤压机所生产的钢管规格，随着挤压机吨位的不断增大而日益扩大，一般来说，主要用来生产 $\phi 230$ 毫米以下的钢管和各种异型管。焊管的成型方法和焊接方法是各式各样的。按照产品的规格和钢种以及产量的要求，可以采用不同的焊管机设备。当一般无缝钢管应用于比较重要的部位时，为使钢管达到较高的质量和较高的尺寸精度，用上述方法得到的钢管需要在进行冷加工。冷加工法是以热状态下生产的无缝钢管或焊接钢管为坯料，在冷状态下进行压力加工的方法。主要包括冷拔法和冷轧法。

按照用途的不同，可以将钢管分为以下几类：

- 1) 配管，用来输送流体或某些固体，包括石油和天然气输送管和水煤气管等。
- 2) 热交换用管，通过管壁进行热交换，包括锅炉管、热交换器用管等。
- 3) 结构管，制造各种机器和构筑物用的钢管，包括管桩、轴承管、各种结构用

第一章 文献综述

1.1 概述

钢管是中空体闭环断面钢材，广泛应用于国民经济各部门。

按制管方法可以把钢管分为无缝钢管和焊接钢管两大类。无缝钢管是把圆形或方形的实心管坯或钢锭，用某些方法穿孔后，再用各种轧制方式，挤压方式和顶管方式加工成要求的钢管几何尺寸。焊接钢管是用带钢卷和钢板，在辊式成型机或压力机上成型为圆形后，将结合处用一定的焊接方法加工成要求的钢管几何尺寸。热轧无缝钢管的生产方法很多，按其设备主要有以下几种：自动轧管机组；连轧管机组；周期轧管机组；三辊（阿塞尔）轧管机组；顶管机组；挤压管机组。这些无缝钢管生产方法各有其特点，适用范围也不同。按照目前的技术发展条件^[1]，从产品规格上来说，连轧管机组一般适于生产小直径钢管（ $\phi 140$ 毫米以下），自动轧管机组适于生产中小直径钢管（ $\phi 426$ 毫米以下），周期轧管机组适于大中直径（ $\phi 660$ 毫米以下）钢管的生产。三辊轧管机组适于生产 $\phi 200$ 毫米以下的精度要求高的轴承钢管和机械用管。顶管方法可以用来生产 $\phi 177$ 毫米以下的小直径钢管，也可用来生产特大直径的管筒，最大直径可达 1500 毫米。挤压机所生产的钢管规格，随着挤压机吨位的不断增大而日益扩大，一般来说，主要用来生产 $\phi 230$ 毫米以下的钢管和各种异型管。焊管的成型方法和焊接方法是各式各样的。按照产品的规格和钢种以及产量的要求，可以采用不同的焊管机设备。当一般无缝钢管应用于比较重要的部位时，为使钢管达到较高的质量和较高的尺寸精度，用上述方法得到的钢管需要在进行冷加工。冷加工法是以热状态下生产的无缝钢管或焊接钢管为坯料，在冷状态下进行压力加工的方法。主要包括冷拔法和冷轧法。

按照用途的不同，可以将钢管分为以下几类：

- 1) 配管，用来输送流体或某些固体，包括石油和天然气输送管和水煤气管等。
- 2) 热交换用管，通过管壁进行热交换，包括锅炉管、热交换器用管等。
- 3) 结构管，制造各种机器和构筑物用的钢管，包括管桩、轴承管、各种结构用

管。

4) 石油管, 石油天然气钻采用管, 包括钻杆、套管和油管等。

5) 其它, 包括电缆管、高压容器用管等。

目前, 无缝钢管主要用作石油管、锅炉管、热交换器官、轴承管以及一部分高压输送管等。焊管一般用作输送管、一般配管、管桩以及各种结构管等。

1. 2 热轧无缝钢管技术的发展

1. 2. 1 国外无缝钢管的发展历程

十九世纪中期, 开始了大规模的炼钢生产, 因而促进了无缝钢管制造方法的迅速发展。1854 年斯达烈恩将铸钢管用锤打延伸加工钢管的外径和长度的方法取得了专利。1882 年埃里奥特想出了由钢水进行挤压的制管法, 他是现在使用的申格挤压制管法的前身。1881 年里度墨德提出深拉法制造无缝钢管。1885 年布洛莫用深拉法制做出了无缝钢管, 也在同年, 曼内斯曼兄弟用斜轧穿孔法通过一道工序将实心棒材变成无缝钢管, 这是制管技术的一大革命。1892 年, 曼内斯曼兄弟研制成功周期轧管机。美国人于 1903 年研制出了第一台自动轧管机, 两年后又增设了均整机和定径机。20 世纪 30 年代又出现了狄塞尔轧管机, 连轧管机和 Assel 轧管机。1949 年, 与轧管机匹配的张力减径机投产^[2]。

20 世纪 50 年代以前, 世界各国热轧无缝钢管生产主要以自动轧管机和周期轧管机为主。1957—1973 年间, 国外基本未再建新的自动轧管机组。1974 年和 1975 年原苏联建了两套 $\phi 140$ 单槽串列式自动轧管机组, 提高了自动轧管机组的生产能力, 改善了产品质量和操作条件, 使自动轧管机组的发展进入了一个新的阶段。至 70 年代末, 原西德、日本和原苏联等国均采用这种新型的自动轧管工艺。与此同时, 60 年代末至 70 年代初, 主要用于生产中小直径无缝钢管的连轧管机组也受到世界各国的普遍重视, 发展十分迅速。特别是 1972 年以后投产的 9 套连轧管机组 (包括 80 年代初投产的 3 套连轧管机组) 分别采用了三种不同的连轧管工艺, 即全浮动芯棒方式、限动芯棒方式和半浮动芯棒方式。80 年代中后期投产的连轧管机多为限动芯棒轧管机。此外, 70 年代末和 80 年代初以来, 新型狄塞尔轧管机、新型三辊轧管机、PSW

轧管机、Mini-MPM 轧管机以及菌式穿孔机和狄塞尔穿孔机等，都在无缝钢管生产中发挥着重要的作用^[3,4,5]。

目前，世界无缝钢管的年产量约为 3000 余万吨，与焊管的比例基本稳定在 4：6。

1. 2. 2 国内无缝钢管的发展历程

我国无缝钢管生产的发展大致经历了以下三个阶段^[6,7]：第一阶段是从 50 至 60 年代，1953 年鞍钢无缝钢管厂 $\varnothing 140\text{mm}$ 自动轧管机组的投产标志着我国有了自己的无缝钢管工业，当时主要按照前苏联标准生产一般无缝钢管、石油套管、锅炉管等钢管。第二阶段是 60 至 70 年代，我国兴建了多套 $\varnothing 76\sim 100\text{mm}$ 自动轧管机组以及大口径无缝钢管机组，如： $\varnothing 318\text{mm}$ 、 $\varnothing 216\text{mm}$ 周期轧管机组及 $\varnothing 400\text{mm}$ 自动轧管机组，钢管生产规模由 $\varnothing 140\text{mm}$ 扩展至 $\varnothing 630\text{mm}$ ，生产的品种由不锈钢管、高压锅炉管、石油地质钻杆、航空用高精度钢管等要求较高的钢管。第三个阶段是 80 年代至今，这期间，具有现代水平的宝钢 $\varnothing 140\text{mm}$ 连轧管机组、大冶钢厂 $\varnothing 170\text{mm}$ 三辊轧管机组、成都无缝钢管厂 $\varnothing 177\text{mm}$ 精密轧管机组、天津钢管公司 $\varnothing 250\text{mm}$ MPM 机组相继投产，并开始采用连铸圆管坯直接生产无缝钢管，钢管的质量水平有了明显提高。为了适应生产的发展，对 70 年代制定的行业标准进行了全面修订，将其升极为国家标准，使其达到国际一般水平及国际先进水平^[8]。最近几年，我国钢管行业的基建又有较大的投入，如包钢 $\varnothing 180\text{mm}$ 轧管机组、衡阳钢管厂 $\varnothing 89\text{mm}$ 半浮动连轧管机组和上海钢管厂 AcuRoll 轧管机组等^[9]。

我国无缝钢管的年产量约为 340 万吨，与焊管的比例大约为 5：5。

1. 3 张力减径

1. 3. 1 张力减径的概念

张力减径是一种空心轧制的多机架连轧，被轧制的钢管不仅受到径向压缩，同时

受到纵向拉伸,即存在张力,故称为张力减径。在张力的作用下,钢管在减径的同时实行减壁,张力越大,减壁量越大。因此,根据生产品种的需要,灵活给定张力值,通过轧辊转速系列实现减径和减壁的适当配合,从而获得所需要的规格。对于焊管,其焊缝经过张减热变形,质量将有较大的提高。

1. 3. 2 钢管张力减径工艺的发展和应用

早在 19 世纪末,就已经开始研究连续式钢管减径机的制作问题。1920 年左右建成了第一台不带芯棒的减径机。减径机的发展过程基于相同的变形方式,分为三种类型:定径机、无张力减径机和张力减径机。定径的目的是由荒管轧制出圆的、尺寸精确的成品管,而不进行显著的外径减少。为了增加机组的产品规格范围,定径机的减径量越来越大,致使定径机的机架数越来越多,发展成为无张力减径机组,其特点是在微量管壁增厚的同时将管子外径显著减少。但因为减径过程中管子的壁厚是自由变形,壁厚较难控制。为解决这个问题,1932 年开发研制出了张力减径机。早期的张力减径机由于轧辊驱动结构设计问题无法采用三辊式布置,都是二辊式的。由于三辊式的布置在变形均匀性和防止内外表面缺陷的产生有许多的优越性,因此在三辊式轧辊驱动的结构设计问题解决之后,张力减径机都是采用三辊式布置。目前绝大多数二辊式张力减径机已经改造为三辊式张力减径机^[10]。

目前连轧管机的单机产量每年已达几十万吨^[11]。在其后配置一套张力减径机作为成型机组,即可以满足连轧管机的产量要求,又可以解决产品规格的要求,用一种或两种连轧荒管即可以生产几百种不同规格的热轧管。这标志着钢管生产的最新发展方向,使无缝钢管的生产实现大型化、高速化和连续化。

随着电子工业和机械制造业的不断发展,张力减径机的生产工艺也获得了新的发展。采用大型冷床和排锯为张力减径机的高速化打下了基础^[5];管理计算机和过程控制机的投入使用^[12],使张力减径即管端增厚控制 CEC(Crop End Control)得以实现,使单机架的传动日益成熟^[11]。这样能在更大程度上满足工艺的要求,为张减生产的高产、优质、低耗开拓了更加广阔的前景,也为张减生产的连续化和高速化铺平了道路。随着连轧技术的日益成熟,张减管生产的钢种也将由普碳管、低合金管发展到高合金管。

1. 3. 3 张力减径的纵向壁厚不均研究和过程控制

在张力减径工艺中采用较大的纵向张应力,一般认为有这些好处^[10]:控制管壁厚,提高轧制产品质量。由于张应力限制着管子内表面的自由变形,阻止或防止在内表面产生轧制疵病,如起皱和过分粗糙。薄壁管减径时,是靠张应力使之稳定,防止发生很大的圆周压应力而使管子沿径向塌瘪。同时借助于正确调整张应力可以有效地减少不均匀成型,而这种不均匀性在张力减径时在工件横截面上一般都会存在,同时这种不均匀性或多或少地使管子的内轮廓出现多边形化。

但必须注意到的是,采用较大的纵向张应力,除有上述工艺方面的优点外,也会产生纵向壁厚不均的问题,即管子首末端壁厚增厚。产生这种管端增厚的原因是由于管端的有效张应力下降。与稳定条件下轧制的管子的中心段相比,管端壁厚要厚的多,并且越靠近管端,增厚越大。如果壁厚超过该轧制管尺寸的公差范围,其末段管段必须从成型管中切除。如果不采取适当的优化工艺措施,则这些材料损失可达一个无缝钢管厂年产量的数个百分点,具体数字取决于毛管长度、轧管工艺以及品种规格等方面^[11]。

管子端部比中心段的延伸率小,最主要的原因是由于在一般情况下按稳定轧制状态设计的轧辊速率比值,不能在管端建立起所需的最大张力。管端的壁厚情况,管前端与管末端并不相同,其区别在于:管端增厚段的最大壁厚值不同;壁厚增厚的形成过程不同;增厚段的长度不同。在纵向张力高和单机架减径比率高的场合,管末端的增厚段长度可以超过管前端的增厚段长度的两倍^[11]。

德国曼内斯曼公司研究认为^[10],管端增厚程度在以下条件下增大:

- 1) 平均张力较高;
- 2) 总减径率较大;
- 3) 机架间距较大;
- 4) 管径对轧辊直径的比值较大;
- 5) 摩擦系数较小;
- 6) 管径对壁厚比值较大。

根据日本的研究^[1]表明,在以上诸因素中,机架间距和张应力系数对管端增厚程度的影响较大,摩擦系数的影响通常是最小的。

对张减机传动电机的转速进行可选择的调整可以使管子端部的应力, 应变状态尽可能接近稳态变形条件, 从而实现对管子的壁厚控制^[11]。原西德根据这一原理开发出了一系列壁厚控制技术, 目前不仅能实现对张力减径机的管端增厚现象进行有效控制, 降低张减管的切头损失, 而且在轧件之间以及同一轧件的局部都可以对其纵向壁厚变化实现在线控制, 如: 头尾控制 CEC 制度, 平均壁厚控制 WTCA 制度, 局部壁厚控制 WTCL 制度^[13]。

CEC 控制是指: 在张力减径咬入和抛出阶段动态调整钢管头部和尾部轧制若干机架的轧辊转速, 增大轧制过程轧入阶段和轧出阶段的转速比例, 从而增大作用于管端的张力以使管子端部壁厚超差的现象得以克服, 这样就可以减少由于管端增厚而产生的切头损失^[11]。

WTCA 控制是在张力减径过程中, 当成批的荒管的平均壁厚与工艺参数中设定的平均壁厚有偏差时, 调整各个机架的速度设定值, 从而调整了张力减径过程中管子的平均张力。也就是说: 当张力减径机入口的原料壁厚偏大时, 从入口向出口方向逐渐增大各机架的轧制速度, 增大张力减径过程的平均张力, 从而使张力减径过程中管子的减壁量增大, 以消除来料平均壁厚增加产生的影响。当张力减径机入口的原料壁厚偏小时, 其控制过程与原料壁厚偏大的控制过程相反^[11]。

WTCL 控制是在张力减径过程中, 当来料的壁厚发生变化时动态调整轧机出口处几个机架的轧制速度, 从而消除张力减径的来料局部壁厚变化产生的影响。具体的说: 当检测到来料的局部壁厚偏厚时, 增加轧机出口几个机架的轧制速度, 也就增加了壁厚偏厚的一段管子的张力, 从而增加了张力减径过程中的减壁量, 消除来料荒管局部壁厚偏厚的影响。当检测到来料的局部壁厚偏薄时, 降低轧机出口几个机架的轧制速度, 也就减少了壁厚偏薄的一段管子的张力, 从而减少了张力减径过程中的减壁量, 消除来料荒管局部壁厚偏薄的影响^[11]。

德国曼内斯曼德玛格公司开发出张减过程模拟管理系统 (即 CARTA® 工艺系统), 用于减径机的调整和控制。首先通过一个物理模型对其孔型和调节参数等进行最佳优化设计和设定, 然后在张力减径生产过程中, 通过输入荒管和成品管的壁厚数据, 对张减轧制过程进行最佳化调节控制。结果是平均壁厚的偏差显著减小, 从通常的 $\pm 5\%$ 减小到 $\pm 1\%$ 甚至更小。管段损耗也减少了 50%, 可使成材率相应提高 7% 左右^[14]。

原苏联使用在连轧机上对荒管管端预轧薄的技术,从而进一步降低张力减径后的管端增厚段的长度,提高了热轧钢管的收得率^[15]。

日本住友公司和歌山钢铁厂在全浮动芯棒连轧机组上采用液压压下技术,成功的减少了全浮动芯棒连轧机产生的“竹节”现象。住友公司海南钢管厂在连轧管机和张减机上均配有管端壁厚控制系统^[16]。

国内对张力减径管端增厚问题也作了大量研究。方平^[17]分析了钢管在张力减径过程中产生管端增厚的原因,提出了针对管前端和管后端的不同的 C.E.C 控制方法,指出 C.E.C 制度的技术关键在于:各种工艺参数的合理确定;所选张力减径机的机型性能;检测、控制系统的灵活性和可靠性;计算机控制软件的可靠性。

卢于速、杨华峰^[18]在 $\varnothing 114\text{mm}$ 集体传动—集中差速式张力减径机和 $\varnothing 108\text{mm}$ 集体传动—液压单独差速式张力减径机进行了试验。试验用管为 $\varnothing 114\sim 115 \times 4.0\sim 4.5\text{mm}$ 普碳钢管。在实测管端增厚段壁厚分布形态后采用无约束最优化方法中的 BFGS 变量度算法进行壁厚曲线拟合,得出张减管管端增厚段壁厚分布数学模型为:

$$S(x)=(\beta_1x+\beta_2)\exp(\beta_3x^2-\beta_4x)+S_k$$

其中 β_1 为与减径量有关的因子; β_2 为与张力、传动形式、减径量、来料壁厚有关的因子; β_3 为机架影响因子,头部取负值,尾部取正值; β_4 为壁厚系数影响因子,头部 $\beta_4 <$ 尾部 β_4 。 S_k 为成品管稳定段壁厚。

马继仁、张勇刚^[19]认为:在设备条件和孔型系统一定的条件下,钢管经张力减径后,影响增厚段长度的主要因素是工艺因素;头部尾部增厚段壁厚分布有各自不同的规律,且其分布形态基本不受工艺因素的影响。并且得到与卢于速类似的壁厚分布拟合函数。

张力减径机是宝钢 $\varnothing 140\text{mm}$ 连轧管机组轧制质量控制的最后工序,因此为了实现张减机基础自动化,提高张减机转速控制精度,并为实施张减机头尾增厚端 CEC 控制、平均壁厚 WTCA 控制及局部壁厚 WTCL 控制创造条件,宝钢 $\varnothing 140\text{mm}$ 连轧管机组从 1988 年开始至 1999 年 6 月止,实施了张力减径机组改造项目,参加单位有宝钢钢管厂、钢铁研究总院、浙江大学、燕山大学、北京计算机所,对张减机 28 个机架主传动系统全面进行了改造,淘汰了原有模拟量控制系统,全部改为数字直传动

控制系统，提高了控制精度。特别是对张减机头尾增厚端 CEC 控制（宝钢张减机头、尾增厚端控制专有技术）的实施和精度的提高得到了根本的保证，生产实际证明，切头损失减少了约 50%。

1. 3. 4 张力减径横向壁厚变化规律

钢管经张力减径后，其横断面会出现内棱，轧制厚壁管时这种情况会比较明显。原苏联学者 A. A. 舍普琴科^[15]解释了钢管出现内多边形的原因，主要有：

- 1) 由于管子和轧辊孔型截面与圆形的偏差导致沿圆周方向不同的半径缩减；
- 2) 由于轧辊和工件之间的接触长度有所不同，沿圆周方向会产生不同的流动阻力；
- 3) 在塑性变形区的临界应力引起管子壁厚变化的差异；
- 4) 变形特别是发生在轧辊与工件接触面积外的弯曲变形，引起纵向张力对接触面积的影响。

日本学者认为^[20]，产生内多边形的主要原因为：

- 1) 因为孔型是椭圆形的，管子在通过某一机架后，在下一机架咬入时，首先与轧辊孔槽底部接触，管子周向其他部分逐渐充满孔型。由于管子接触孔型底部的那部分金属先变形，所以这部分金属相对于其他部分金属向前延伸，同时还产生了沿管子切向的金属流动，在轧辊出口处，与孔槽底部接触的管壁与其他部分相比，减壁量大。
- 2) 张力越大，与孔槽底部接触以外的管子其他部分接触到轧辊孔型慢。上述影响效果越大，孔型底部的减壁量就越大。

文献研究^[21]表明，以下参数发生变化时内多边形的程度增大：

- 1) 孔型的椭圆度增大时；
- 2) 总减径量较大时；
- 3) 管子直径较大时；
- 4) 张力较大时；
- 5) 壁厚系数较小时；
- 6) 轧辊直径较小时。

以上因素中椭圆度是首要因素。为了覆盖较宽的壁厚范围并顾及管子的质量和轧

机负荷,从避免轧辊过度磨损以及改善表面质量的角度出发,通常当管子壁厚较薄时,采用较大的单架减径率和较大的孔型椭圆度;当管子的壁厚较厚时,为了改善内多边形,采用较小的单架减径率和较小的孔型椭圆度^[11]。应当指出:调节平均张力以及纵向张力值,可以有效地减轻内多边形现象^[15]。

潘克云、王先进^[30,31]对我国宝钢目前常用的两套张减机孔型系统中主变形单机架和四机架连轧的张力减径过程进行了三维弹塑性有限元数值模拟和分析,得出结论:管子经不同孔型系统张力减径后横向等效应变呈不均匀分布的规律不同,这是不同孔型系统轧辊磨损情况不同的内在原因;各孔型系统经张力减径后管子横向壁厚不均与主变形机架数近似呈直线关系。并提出了降低孔型椭圆度、采用逐点数控孔型加工方法改善孔型的曲线形状等措施来降低张力减径过程引起的管子横向壁厚不均现象。

1.4 计算机仿真技术及其应用

1.4.1 计算机仿真技术

仿真就是通过对系统模型的实验来研究一个存在的或设计中的系统。计算机仿真技术,是指人们根据系统分析的目的,深入分析研究仿真对象的各要素性质、相互关系和规律,通过抽象建立能够描述该仿真对象的结构和行为且具有一定逻辑关系和数学关系的理论模型,然后采用编程技术将这些模型编制成计算机系统能够识别的程序,再由计算机演示该现实系统,用以分析和研究系统性能,达到认识和调节系统性能的目的。

实现计算机仿真技术的一套软硬件系统称为仿真系统。硬件系统是实现仿真系统功能的基础。硬件设备的性能决定了仿真系统所允许的信息流通量、存储空间、实时运算速度等性能。硬件系统主要有图形计算机及局域网络、输入输出接口、仿真控制台盘和电源几部分组成,其中局域网络由计算机主机服务器和多个工作站、PC机或X终端共同组成。软件系统是仿真系统的核心,它决定了仿真系统的水平,主要由仿真支撑软件和模型应用软件两大部分组成。仿真支撑软件是基于计算机操作系统的专门用于仿真系统研制开发的专用平台和开发工具。例如在60~70年代出现的通用大型有限元分析软件MARC, I-DEAS, ANSYS等。模型应用软件则是仿真系统核心中的核心,是对仿真对象的高度概括,仿真模型软件合适与否,决定了该仿真系统的效果。因此,

对仿真对象的建模是建立仿真系统的关键,一个复杂对象的建模往往是多学科联合攻关的结果,需要耗费大量人力。一个成功的模型只能出自对所研究系统非常了解的专家之手。其次,按照所用的数值计算方法建立仿真模型,又称二次建模;最后通过计算机求解,并用数字或图表或图形形式表示其结果^[22]。

用计算机仿真技术制成的生产过程仿真系统,可以在不影响过程运行的情况下,研究、分析运行参数对各工况的影响,从而使生产过程达到最佳状态。还可以用仿真系统人为的设置各种异常状态,研究和分析处理这些事故及应采取的措施。仿真系统还可以用于模拟一套尚未建设的工业设备,根据其工作原理和环境要求,建立理论模型,利用计算机建立“虚拟样机”(仿真系统),并能够在造价昂贵的物理样机(真实系统)建造前,分析他的工作性能、工业过程,改善并优化系统设计,对工艺流程的投入、产出,原料对产品的影响进行研究,从而大大降低开发成本。所以计算机仿真技术是低成本进行复杂工艺开发研究的重要手段^[22]。

1.4.2 计算机仿真技术在张力减径过程的应用

计算机仿真的应用已经有很长的历史,大致经历了5个发展阶段^[23]:

- 1) 50年代以前主要是物理模拟,也就是在物理模型上进行实验。物理模拟结果可靠,但投入大,周期长,有时由于条件限制,甚至是难于实现的。
- 2) 50年代主要是模拟计算机仿真,数字计算机仿真才刚刚开始发展。
- 3) 60~70年代数字计算机仿真和混合计算机仿真都得到迅速发展。
- 4) 80年代以来全数字仿真逐步取代混合仿真。
- 5) 当前由于多媒体技术的发展而产生了多媒体仿真。

近年来,国际钢铁工业竞争日趋激烈,降低生产成本,提高产品质量是各企业共同的目标。为达到减少研发经费,缩短研发周期的目的,钢铁工业对新设备、新工艺的研发,旧设备、旧工艺的改进,工艺参数优化,产品质量,能源消耗等诸方面均提出了更高的要求。而计算机仿真技术是达到这一目的的必不可少的手段。

钢铁工业中所遇到的问题主要是弹塑性变形及热传导问题,广泛采用的计算机方法主要是有限元法。有限元方法是建立在考虑多因素影响且对分割的小单元单独处理的塑性加工分析方法基础上的。在处理几何非线性、材料非线性和边界非线性的二维和三维问题时,该方法具有非凡的能力。它不仅可以精确计算加工载荷、压力分布、

应力应变分布,还可以定量描述和模拟整个工艺过程,包括卸载后的回弹、残余应力应变、失稳、裂纹形核、裂纹增长和缺陷的分布。由此可以对塑性加工过程进行超前规划,正确地进行工具设计,合理地制定生产工艺^[24]。采用有限元法解决工程问题的一般过程为:首先建立问题的数学力学模型,通常是用力平衡方程、几何方程、材料本构方程、边界条件、初始条件等一组微分方程来表示;然后建立有限元模型,用有限个离散的单元体表示原来的连续体;然后进行问题求解及计算结果处理^[23]。

钢管在轧制过程中,变形相当复杂,对其认识相对较浅,目前的轧制工艺经验因素较多,理论分析相对不足,生产上也存在一些问题,如张减管管端增厚较长、壁厚不均、管体外表面出现青线等问题。计算机仿真技术可以模拟张力减径过程中钢管的变形过程,帮助我们认识轧制机理,优化轧制工艺。国内外利用有限元模拟技术对张力减径过程进行了大量研究。日本采用三维刚塑性技术,使用八节点各向同性的六面体单元对单机架三辊张力减径过程进行了模拟,得到结论:管子减径后壁厚分布不均呈多边形,且孔型椭圆度越大多边形化越严重。增加前后张力可以减轻多边形化的程度^[25]。

德国曼内斯曼公司利用有限元软件 MARC 对单机架张力减径过程进行了三维模拟分析,其模拟结果与试验结果基本吻合。但由于张减过程的复杂性目前还没有实现全机架轧制过程的模拟^[26]。德国曼内斯曼梅尔公司利用有限元模拟软件,并结合轧制试验,对张力减径过程中出现的轧制问题进行了分析。在开发新的张力减径机孔型时,有限元模拟的应用起到了突破性的作用,通过计算机模拟,证明了开发计划的可行性,大大减少了耗资巨大且必须进行的轧制试验次数。应用有限元法设计出了各种针对不同问题的新的孔型形状和孔型系列,在进行轧制试验时取得了良好的效果^[27]。

国内也在钢管张力减径计算机模拟方面进行了大量研究。杜凤山、刘才、黄庆学^[28,29]采用三维弹塑性有限元法,利用单组元建模技术,同时考虑金属变形的复杂性和影响金属流动的关键因素,如孔型形状及配置、张力作用等,建立耦合计算连轧模型,通过张力、位移加载和信息变换实现对整个轧制过程的模拟,并分析了不同情况下各机架出口断面横向壁厚的分布。

双远华、樊建成^[32]采用人工神经网络 BP 算法,通过自编程序对某钢铁公司张减过程的不同来料工艺与管材的厚度、长度进行了分析,应用多层神经网络建立输入与

输出间的数学模型,对测试样本进行有师学习训练,所得的网络权值和阈值作为已知数学模型的映射关系,对其他空心管坯进行精度预测。此外,在张力减径新产品的工艺制定中,也可用神经网络对其预测,减少调试过程的消耗,缩短周期。大量实测结果证明,该神经网络对成品管材的精度预测可以控制在 $\pm 5\%$ 内。

邱永泰、肖松良^[24]采用有限元方法,利用三维动态显性算法,分析和模拟了钢管连轧过程中金属的变形过程,开发了 $\phi 89\text{mm}$ 连轧管过程分析和模拟的实用软件。在有限元编程中,采用了一些和一系列最新算法,使有限元分析程序可以在微机上运行。

韩宝云、金明^[34]等提出了通用的张减过程轴对称模型建模方法,即将张减过程三维问题简化为二维问题,不考虑各参量在圆周方向的变化,在圆周方向上以均值处理,但考虑各参量在轧制方向及径向上的分布。利用商用有限元软件,针对张减过程轴对称模型及三维模型,分别进行了模拟工作。重点研究了钢管头尾壁厚增厚、内六角及青线等现象。对 CEC 制度进行了模拟分析,为制定 CEC 制度提供了依据。经过大量模拟计算分析,给出了轧辊转速—张力—钢管壁厚间的定量关系。对传统张减工艺设计方法提出了具体修正方案,给出了工艺改进措施。

1.5 本论文的研究目的及意义

软件产业是高新技术产业的重要组成部分,我国在这方面起步较晚,与先进发达国家存在一定的差距。近年来,国家高度重视自主软件技术的开发,积极倡导并制定一系列政策并给予资金支持以促进软件产业的快速发展。

目前,应用于传统工业领域的专业软件的开发工作在我国做的还远远不够。造成这一现状的原因是多方面的。首先传统产业虽然迫切需要引入先进的计算机技术实现对生产设备的管理与改造、生产工艺的优化和改进及企业物流与资金流的管理,但目前对此项工作的认识和投入还远不令人满意;其次目前大多数软件企业将目光投向了各类商用软件的开发,考虑到工程软件开发成本高,开发周期长,市场覆盖面小,一般不愿涉足这一领域;还有出色的工程软件的开发必须依赖本领域的专家和计算机技术人员的合作,软件也要在生产现场经受大量实际生产的检验从而不断完善。以上诸种原因导致目前工程领域专业软件的开发还有大量工作要做。国外的一些工程专业软件投入市场后,已取得了巨大的经济效益。

综合考虑上述情况,拟通过本课题的研究,形成张力减径机组孔型和工艺参数设计及优化、张减过程动态仿真的通用软件包。此软件包具有工艺设计和仿真两大功能。工艺设计部分可以完成张减设备参数与张减轧制过程参数的设计。工艺设计的结果通过仿真验证,从中优选出最优工艺设计方案。同时通过本软件的仿真功能,可以为研究张减过程纵向及横向壁厚不均问题和各种壁厚控制技术提供有力的研究工具。这将是国内外迄今为止报道较少的研究领域,必将为张减过程与计算机技术的结合发挥积极作用,并为广大钢管生产企业带来明显的经济效益。

1.6 本论文研究的主要内容及方法

根据以上分析,本课题拟研究的主要内容及方法如下:

- 1) 对传统张力减径机组变形量分配、张力设定、孔型设计和轧辊转速设计等设计方法及算法的修正。
- 2) 张力减径过程平均壁厚变化规律的研究。
- 3) 张力减径过程全部机架连轧动态仿真“逐点跟踪法”算法实现。
- 4) 以上工艺设计算法及仿真算法的编程处理,形成张力减径工艺设计与仿真软件。编程语言采用面向对象的 VISUAL BASIC6.0。

1.7 本章小结

本章概述了国内外无缝钢管的发展历程,介绍了张力减径工艺的基本理论及其发展和应用。

详述了国内外张力减径过程的纵向壁厚精度和横向壁厚精度的研究情况。介绍了目前采用的控制钢管纵向壁厚不均和横向壁厚不均的一些技术。

介绍了目前国内外在张力减径计算机模拟和张力减径软件开发方面的研究现状。介绍了本课题研究的主要目的、意义、内容及方法。

第二章 张力减径基本理论

2.1 张力减径变形理论

2.1.1 理想薄壁管的变形理论

在钢管变形过程中,由于工艺参数、几何尺寸和材质的不同会导致各自不同的变形特点。其受力状态或为纯压缩,或为纯拉伸,或两者兼而有之。然而我们可以抓住他们的共性,进行研究。作如下假定:管壁是理想薄膜;材质为各向同性的理想塑性材料。

在各种应力状态下,钢管减径变形过程中的外径、壁厚均有着不同的变化关系,然而我们可以用一种统一的形式把它表示出来。

$$F = \pi (d-s) s$$

其中: F 为钢管横截面积

d 为钢管外径

s 为钢管壁厚

$$\epsilon_r = \ln \left(\frac{s_i}{s_{i-1}} \right)$$

其中: ϵ_r 为径向对数变形

$$\epsilon_l = \ln \left(\frac{l_i}{l_{i-1}} \right) \approx \ln \left(\frac{F_{i-1}}{F_i} \right)$$

其中: ϵ_l 为轴向对数变形

$$\epsilon_\theta = \ln \left(\frac{d_{mi}}{d_{m-1}} \right)$$

其中: ϵ_θ 为周向对数变形

i 为机架序号

$$d_m = d - s$$

其中: d_m 为钢管平均直径

$$t = s/d$$

第二章 张力减径基本理论

2.1 张力减径变形理论

2.1.1 理想薄壁管的变形理论

在钢管变形过程中,由于工艺参数、几何尺寸和材质的不同会导致各自不同的变形特点。其受力状态或为纯压缩,或为纯拉伸,或两者兼而有之。然而我们可以抓住他们的共性,进行研究。作如下假定:管壁是理想薄膜;材质为各向同性的理想塑性材料。

在各种应力状态下,钢管减径变形过程中的外径、壁厚均有着不同的变化关系,然而我们可以用一种统一的形式把它表示出来。

$$F = \pi (d-s)s$$

其中: F 为钢管横截面积

d 为钢管外径

s 为钢管壁厚

$$\epsilon_r = \ln\left(\frac{s_i}{s_{i-1}}\right)$$

其中: ϵ_r 为径向对数变形

$$\epsilon_l = \ln\left(\frac{l_i}{l_{i-1}}\right) \approx \ln\left(\frac{F_{i-1}}{F_i}\right)$$

其中: ϵ_l 为轴向对数变形

$$\epsilon_\theta = \ln\left(\frac{d_{mi}}{d_{m-1}}\right)$$

其中: ϵ_θ 为周向对数变形

i 为机架序号

$$d_m = d - s$$

其中: d_m 为钢管平均直径

$$t = s/d$$

其中: t 为钢管壁厚系数

$$x_1 = \frac{\sigma_1}{k_f}$$

其中: x_1 为张力系数

σ_1 为轴向应力

k_f 为材料的变形抗力

从塑性变形的理论对上述钢管的三向变形过程进行推导, 根据在某一方向的对数变形和该方向的正应力 σ 及平均应力 σ_m 之差成正比这一塑性变形基本假设可以得出金属流动的基本方程式:

$$(\sigma_r - \sigma_m) : (\sigma_1 - \sigma_m) : (\sigma_\theta - \sigma_m) = \varepsilon_r : \varepsilon_1 : \varepsilon_\theta \quad (2-1)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_r + \sigma_1 + \sigma_\theta)$$

根据圣维南最大剪应力定律及莫尔理论:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{k_f}{2} \quad (2-2)$$

材料产生塑性变形时有:

$$\sigma_1 - \sigma_\theta = k_f \quad (2-3)$$

近似认为径向应力 $\sigma_r = 0$, 则由 (2-2)、(2-3) 式可得: $\sigma_m = \frac{1}{3} (2\sigma_1 - k_f)$

将 σ_r 及 σ_m 值代入 (1) 并化简得:

$$(1-2x_1) : (1+x_1) : (x_1-2) = \varepsilon_r : \varepsilon_1 : \varepsilon_\theta \quad (2-4)$$

此方程即为张力减径变形理论方程。

1. 纯压缩变形

此时 $\sigma_1 = 0$, $x_1 = 0$

由 (2-4) 式得: $1 : 1 : (-2) = \varepsilon_r : \varepsilon_1 : \varepsilon_\theta$

又由体积不变定律: $\varepsilon_r + \varepsilon_1 + \varepsilon_\theta = 0$

当金属处于纯压缩状态时, 在径向和轴向是均等的流动, 即轴向延伸与径向增厚的对数值相等而周向为轴向与径向对数变形量的两倍, 轴向延伸与径向增厚由周向收缩而来, 总的体积不变。这种应力状态对应的钢管变形即为在普通减径机中的情形。在普通减径机中, 钢管在每一机架孔型中只是承受着径向压缩的压应力, 而没有轴向

作用力。此时，钢管径向壁厚的增厚百分数为周向外径减缩的一半。这是理想塑性材料与理想薄膜管的纯理论变形关系。正是由于普通减径机中钢管减径变形建立在上述理论基础上，其变形能力受到极大限制。

2. 纯拉伸变形

此时，钢管仅受轴向拉伸，即 $\sigma_1 = k_f$ ， $x_1=1$

由 (2-4) 式得： $(-1): 2: (-1) = \varepsilon_r: \varepsilon_1: \varepsilon_\theta$

即金属的流动是由径向（壁厚减薄）与周向（外径减缩）均等地向轴向（延伸）流动的。此时减径量与减壁量相等。

这种变形只是在理论上存在，实际中，当张力系数达到 1 时，轴向应力与金属的变形抗力相等，钢管已断裂。

3. 压缩并拉伸

钢管变形过程中既有径向压缩又有轴向拉伸，此时： $0 < \sigma_1 < k_f$ ， $0 < x_1 < 1$ 。

这种变形状态是在张力减径机的工作范畴内。事实上，为安全起见，一般取 $x_1 < 0.85$ 。

2.1.2 钢管减径的理论变形方程

由于径向应力 σ_r 实际上是不可忽略的，上述金属流动情况只是近似的。

径向应力 σ_r 在钢管外表面最大，到内表面为 $\sigma_r' = 0$ ，故平均径向应力为：

$$\sigma_{\bar{r}} = \frac{\sigma_r + \sigma_r'}{2} = \frac{\sigma_r}{2}$$

由图 2-1 所示钢管变形断面的微观受力图的力平衡可知：

$$2s\sigma_\theta = \sigma_r d$$

$$\text{即： } \sigma_r = \frac{2s\sigma_\theta}{d} = 2t\sigma_\theta$$

$$\text{故 } \sigma_{\bar{r}} = t\sigma_\theta$$

以 $\sigma_{\bar{r}}$ 代表 σ_r ，则平均应力为：

$$\sigma_{\bar{m}} = \frac{1}{3}(\sigma_r + \sigma_1 + \sigma_\theta) = \frac{1}{3}(2\sigma_1 - k_f) + \frac{t\sigma_\theta}{3} = \frac{1}{3}[\sigma_\theta(2+t) - k_f(1+t)]$$

将上式代入式 (2-1) 则有：

$$[2x_1(t-1)+(1-2t)]: [x_1(1-t)+(1+t)]: [x_1(1-t)-(2-t)] = \varepsilon_r: \varepsilon_1: \varepsilon_\theta \quad (2-5)$$

此方程即为实际中的张力减径变形理论方程式。它比较真实地反映了张力减径过程中各向变形与钢管壁厚系数 t 及施于管子的轴向应力 σ_1 的解析关系。

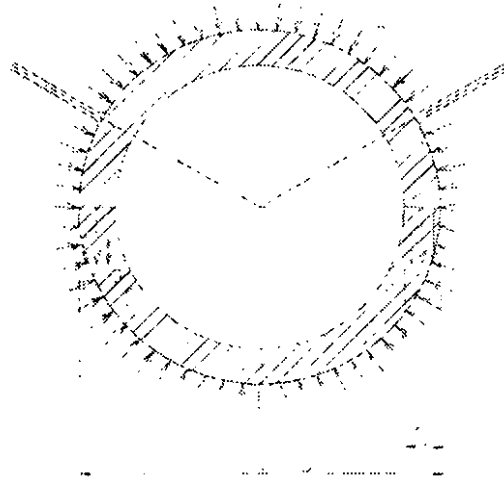


图 2-1 钢管变形区横截面受力示意图

2.3 本章小结

本章阐述了张力减径变形过程的基本理论，并推导出张减过程的基本理论变形方程。

第三章 张力减径机组孔型设计

3.1 张力减径机组传统减径率分配方法

分配管子在张力减径机组全部机架的变形量是进行张力减径工艺设计的首要任务,在此基础上才能进行孔型设计和轧辊转速的设定。传统设计方法以减径率为依据分配管子在张力减径机组全部机架的变形量。从经济的角度考虑,一般总希望增加单机架的减径率,以减少达到一定总减径量所需的总减径机架数。但是单机架减径率的增加是受多种因素限制的,只有权衡利弊、综合考虑才能得出一个既合理又经济的减径率分配方案。

张力减径机组可以划分为三个机组系列,位于最前面的是张力递升机组(也叫建张机组),随之是工作机组,最后是成品机组,也叫精轧机组。张力要经过建张机组的几个机架之后才能达到预定的最大张力系数,构成该机组的机架数视预定的最大张力系数的大小而定,该值愈高,则所需建张机架数愈多,一般建张机组为一至三架。钢管的大部分减径量是在工作机组上完成的。该机组不仅机架数多,而且每个机架的减径量较其他两个机组高。为了在减径的同时确保有足够的减壁量,该机组将在预定的最大张力系数下工作。成品机组一般为三至五架。该机组各机架的张力系数随机架序号呈递减关系,至出口处张力系数降为零。为确保成品管有精确的尺寸和形状,该机组各架的减径量都很小,其中最末成品架的减径量除少数外,一般为零。对于张力减径机各机架减径量的分配可以按前述三个机组分别考虑。对于张力升起机组和成品机组,分别递增和递减分配减径量。

以宝钢为例,建立张力机架采用三架,各架的对数减径率分别为2%,3%,4%;成品机架一般采用五架,总对数变形小于等于10%。大部分的减径量都发生在工作机组上。工作机组减径量分配目前在生产中采用的主要有两种:相对减径量(或对数减径率)为常数;相对减径量(或对数减径率)递减。宝钢采用相对减径量递减的分配方法。见表3-1所示。两种方法比较,相对减径量递减的分配方法更为合理,这是因为:减径管的温度随着机架序号的增加而下降,随之材料的变形抗力 k_r 明显提高,同时亦由于温度的下降,轧件与轧辊间的摩擦系数 μ 增大。除此之外,由连轧秒体积不变定理可知,轧辊的线速度随机架序号的增加而增加,如果各机架的塑性变形量相

第三章 张力减径机组孔型设计

3.1 张力减径机组传统减径率分配方法

分配管子在张力减径机组全部机架的变形量是进行张力减径工艺设计的首要任务，在此基础上才能进行孔型设计和轧辊转速的设定。传统设计方法以减径率为依据分配管子在张力减径机组全部机架的变形量。从经济的角度考虑，一般总希望增加单机架的减径率，以减少达到一定总减径量所需的总减径机架数。但是单机架减径率的增加是受多种因素限制的，只有权衡利弊、综合考虑才能得出一个既合理又经济的减径率分配方案。

张力减径机组可以划分为三个机组系列，位于最前面的是张力递升机组（也叫建张机组），随之是工作机组，最后是成品机组，也叫精轧机组。张力要经过建张机组的几个机架之后才能达到预定的最大张力系数，构成该机组的机架数视预定的最大张力系数的大小而定，该值愈高，则所需建张机架数愈多，一般建张机组为一至三架。钢管的大部分减径量是在工作机组上完成的。该机组不仅机架数多，而且每个机架的减径量较其他两个机组高。为了在减径的同时确保有足够的减壁量，该机组将在预定的最大张力系数下工作。成品机组一般为三至五架。该机组各机架的张力系数随机架序号呈递减关系，至出口处张力系数降为零。为确保成品管有精确的尺寸和形状，该机组各架的减径量都很小，其中最末成品架的减径量除少数外，一般为零。对于张力减径机各机架减径量的分配可以按前述三个机组分别考虑。对于张力升起机组和成品机组，分别递增和递减分配减径量。

以宝钢为例，建立张力机架采用三架，各架的对数减径率分别为 2%，3%，4%；成品机架一般采用五架，总对数变形小于等于 10%。大部分的减径量都发生在工作机组上。工作机组减径量分配目前在生产中采用的主要有两种：相对减径量（或对数减径率）为常数；相对减径量（或对数减径率）递减。宝钢采用相对减径量递减的分配方法。见表 3-1 所示。两种方法比较，相对减径量递减的分配方法更为合理，这是因为：减径管的温度随着机架序号的增加而下降，随之材料的变形抗力 k_r 明显提高，同时亦由于温度的下降，轧件与轧辊间的摩擦系数 μ 增大。除此之外，由连轧秒体积不变定理可知，轧辊的线速度随机架序号的增加而增加，如果各机架的塑性变形量相

等, 则变形速度必然随机架序号递增, 这将从另一个角度导致变形抗力的增加。而变形抗力和摩擦系数的增加会带来如下不良影响: 当减径量一定时, k_f 与 μ 的增加使管子与轧辊表面切应力增大, 从而加剧管子与轧辊孔槽间的刮擦作用, 加速了轧辊孔槽磨损, 也破坏了管子的表面质量。同时当减径量一定时, k_f 与 μ 的增加会导致机架稳定轧制力与尖峰轧制力的增加, 从而加大了轧机的弹跳, 这对于管子的尺寸精度不利。因此, 工作机组相对减径量随机架序号的增加而递减, 才能有效减轻 k_f 与 μ 的增加带来的不利影响。

表 3-1 宝钢 119A 孔型系相对减径率分配

机架序号	1	2	3	4	5	6	7
钢管外径 mm	116.67	113.27	108.11	100.14	92.18	84.92	78.30
相对减径率%	2.00	3.00	4.77	7.96	8.64	8.55	8.45
机架序号	8	9	10	11	12	13	14
钢管外径 mm	72.26	66.73	61.66	57.02	52.75	48.83	45.22
相对减径率%	8.36	8.29	8.22	8.14	8.09	8.03	7.98
机架序号	15	16	17	18	19	20	21
钢管外径 mm	41.94	38.91	36.41	33.58	31.23	29.06	27.04
相对减径率%	7.82	7.79	7.66	7.62	7.52	7.47	7.47
机架序号	22	23	24	25	26	27	28
钢管外径 mm	25.20	23.40	22.38	21.89	21.60	21.51	21.51
相对减径率%	7.05	7.03	4.84	2.21	1.33	0.42	0.00

宝钢 $\phi 140\text{mm}$ 机组张力减径机组减径量分配方法如下:

3.1.1 已知参数

连轧管外径 d_{ak} ; 最小张减成品管外径 d_{aRmin} ; 第一至三机架入口管外径与出口管外径的比值:

$$\Delta_1 = \exp\left(\ln \frac{d_{ak}}{d_1}\right) = 1.02$$

$$\Delta_2 = \exp\left(\ln \frac{d_1}{d_2}\right) = 1.03$$

$$\Delta_2 = \exp\left(\ln \frac{d_2}{d_3}\right) = 1.04$$

成品机组入口管外径与出口管外径的比值:

$$\Delta_{\text{成品机组}} = \exp\left(\ln \frac{d_{23}}{d_{27}}\right) = 1.10$$

3.1.2 计算公式

工作机组总对数减径率:

$$\gamma_{\text{tam}} = \ln\left(\frac{d_{ak}}{d_{aR \min}}\right) - \ln(\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3 \Delta_{\text{成品机组}}) \quad (3-1)$$

理论中间直径:

$$d_{im} = \sqrt{\frac{d_{ak}}{\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3} d_{aR \min} \Delta_{\text{成品机组}}} \quad (3-2)$$

当 $d_{i0} \geq d_{im}$ 时 (d_{i0} —机架 i 入口处的管子外径):

$$\gamma_i = \gamma_{\text{tam}} + 0.007 \frac{d_{i0} - d_{im}}{\frac{d_{ak}}{\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3} - d_{im}} \quad (3-3)$$

当 $d_{i0} < d_{im}$ 时:

$$\gamma_i = \gamma_{\text{tam}} - 0.007 \frac{d_{im} - d_{i0}}{d_{im} - d_{aR \min} \Delta_{\text{成品机组}}} \quad (3-4)$$

由 (3-3)、(3-4) 两式可求出工作机组各机架的对数减径率。因为 d_3 为已知值, 故可以顺序算出第 4~23 机架的孔型直径值, 这样就完成了减径量的分配工作。图 3-1 给出了 152.5 孔型系工作机组对数减径率分布曲线, 其减径率即用上述 (3-3)、(3-4) 两式求得。

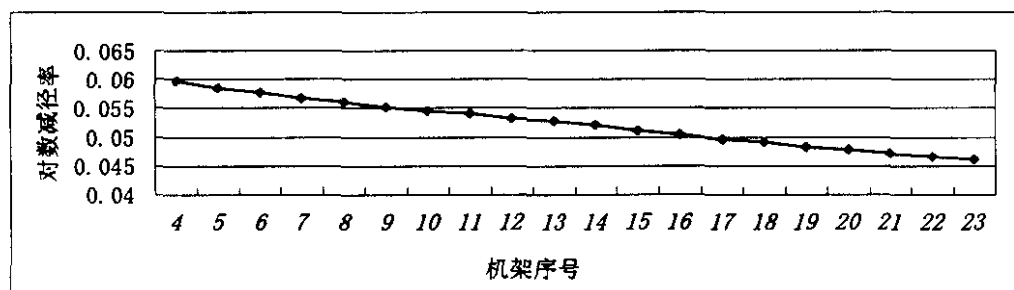


图 3-1 对数减径率在工作机架的分配

3.2 基于延伸率的张减管变形量分配

传统设计方法依据减径率在工作机架的递减来分配变形量，也就是说，对于一定的成品管外径，轧制一定壁厚范围的管子，使用的都是同一减径系列。

在张力减径变形过程中，变形量体现为管子外径的变化和壁厚的变化。外径的变化可以用减径率来表示，它只体现了变形量的一个方面。延伸率可以反映外径和壁厚两者的变化情况，因此，以延伸率为依据来分配变形量更为合理。传统设计方法中，一定外径的成品管所对应的壁厚范围中，最大壁厚可以是最小壁厚的数倍，那么，它们在实际轧制过程中的变形阻力相差很大，相应的轧制力和轧制力矩也存在较大的差异，这种情况的出现显然不利于轧机的工作。那么传统方法仅以减径率为依据分配张减管的变形量显然是不合理的。

3.2.1 基本设计思想

延伸率的基本数学表达公式为：

$$\lambda_i = \frac{F_{i0}}{F_{i1}} = \frac{(d_{i-1} - s_{i-1})s_{i-1}}{(d_i - s_i)s_i} \quad (3-5)$$

其中： λ_i 为单机架延伸率

F_{i0}, F_{i1} 为第 i 机架管子的入口截面积和出口截面积

d_i, s_i 为第 i 机架管子外径、壁厚

事实上，在进行初始设计时管子在各架的入口壁厚和出口壁厚是未知的。为使计算顺利进行，取荒管壁厚和成品管壁厚的平均值作为各架的壁厚值进行计算。由于在实际轧制过程中架次之间的壁厚变化较小，而且延伸率的表达式为比值形式，所以上述近似完全可以满足计算精度的要求。利用计算机进行孔型设计时，可以用荒管壁厚和成品管壁厚的平均值作为初始值代入（3-5）式中进行计算，确定各架的延伸率分配，然后进行张力分配，进而求得各架的出入口壁厚，重新代入（3-5）式计算，以管子末架出口壁厚等于成品管壁厚为收敛判据，进行迭代，最终可以确定管子沿各机架实际的延伸率分配。

出于和传统分配减径量方法同样的考虑，为使轧机稳定工作，获得较好的成品尺寸精度和表面质量，张减管延伸率在整个轧机的分配如下：为了便于咬入和顺利进入

3.2 基于延伸率的张减管变形量分配

传统设计方法依据减径率在工作机架的递减来分配变形量，也就是说，对于一定的成品管外径，轧制一定壁厚范围的管子，使用的都是同一减径系列。

在张力减径变形过程中，变形量体现为管子外径的变化和壁厚的变化。外径的变化可以用减径率来表示，它只体现了变形量的一个方面。延伸率可以反映外径和壁厚两者的变化情况，因此，以延伸率为依据来分配变形量更为合理。传统设计方法中，一定外径的成品管所对应的壁厚范围中，最大壁厚可以是最小壁厚的数倍，那么，它们在实际轧制过程中的变形阻力相差很大，相应的轧制力和轧制力矩也存在较大的差异，这种情况的出现显然不利于轧机的工作。那么传统方法仅以减径率为依据分配张减管的变形量显然是不合理的。

3.2.1 基本设计思想

延伸率的基本数学表达公式为：

$$\lambda_i = \frac{F_{i0}}{F_{i1}} = \frac{(d_{i-1} - s_{i-1})s_{i-1}}{(d_i - s_i)s_i} \quad (3-5)$$

其中： λ_i 为单机架延伸率

F_{i0}, F_{i1} 为第 i 机架管子的入口截面积和出口截面积

d_i, s_i 为第 i 机架管子外径、壁厚

事实上，在进行初始设计时管子在各架的入口壁厚和出口壁厚是未知的。为使计算顺利进行，取荒管壁厚和成品管壁厚的平均值作为各架的壁厚值进行计算。由于在实际轧制过程中架次之间的壁厚变化较小，而且延伸率的表达式为比值形式，所以上述近似完全可以满足计算精度的要求。利用计算机进行孔型设计时，可以用荒管壁厚和成品管壁厚的平均值作为初始值代入（3-5）式中进行计算，确定各架的延伸率分配，然后进行张力分配，进而求得各架的出入口壁厚，重新代入（3-5）式计算，以管子末架出口壁厚等于成品管壁厚为收敛判据，进行迭代，最终可以确定管子沿各机架实际的延伸率分配。

出于和传统分配减径量方法同样的考虑，为使轧机稳定工作，获得较好的成品尺寸精度和表面质量，张减管延伸率在整个轧机的分配如下：为了便于咬入和顺利进入

工作机架，建立张力机架各架的单架延伸率可以采用较小的值，并依次递增。以宝钢 $\phi 140\text{mm}$ 连轧管机组为例，建立张力机组采用三架，延伸率依次确定为 1.02，1.03，1.04。在考虑工作机架延伸率分配时，各机架延伸率须随机架号的增加而逐架递减。对于一定的孔型系统，其原料的荒管外径和壁厚为已知，孔型系统的工作机架平均单架延伸率可选定，其范围约为：1.04~1.1。工作机架各机架的延伸率分配原则为：以孔型系统中部第十四机架的单架延伸率为平均延伸率。由于管子在轧制过程中产生延伸，从入口向出口各机架轧制速度逐渐增大，为了考虑各机架的轧机负荷，从中间机架往入口方向的各机架延伸率逐渐增加，从中间机架往出口方向的各机架延伸率逐渐减少，相邻机架间延伸率的差值约为 0.0003~0.0009，平均延伸率大时取较小值，平均延伸率小时取较大值，从而得到工作机架各架的延伸率 λ_i 的分配。成品机架的延伸率分配逐架递减，直至最末一架成品机架的延伸率为 1.0。以宝钢为例，其成品机架采用五架，从成品机架的首架到最后一架，延伸率的分配方法为：成品机架总延伸率 $\lambda_{tc}=1.05\sim 1.12$ 。各架延伸率分配见表 3-2 所示。

表 3-2：成品机架延伸率分配

机架号	1	2	3	4	5
各架延伸率	$\lambda_{n-4}=1+(\lambda_{tc}-1)*0.5$	$\lambda_{n-3}=1+(\lambda_{tc}-1)*0.3$	$\lambda_{n-2}=1+(\lambda_{tc}-1)*0.15$	$\lambda_{n-1}=1+(\lambda_{tc}-1)*0.05$	$\lambda_n=1$

3.2.2 设计步骤

1. 根据连轧管机组的生产情况选择一定外径和壁厚的荒管，建立张力机架选用三架，各架延伸率可以根据轧制条件和设备情况选定，逐架递增。

2. 选定工作机架平均延伸率，从中间机架往入口方向的各机架延伸率逐渐增加，从中间机架往出口方向的各机架延伸率逐渐减少，相邻机架间延伸率的差值约为 0.0003~0.0009，依延伸率的不同而选取不同的值。

3. 成品机架选用五架，确定总延伸率，将其分配至成品机架各机架。

4. 将拟轧制的成品管所对应的壁厚范围划分为三段，每段取平均壁厚作为计算值带入公式 (3-5)，最后可以得到三个不同的减径系列。

3.2.3 一个设计实例

为说明这种分配方法，现给出一个设计实例。基本参数如下：荒管外径 152.5mm，

采用 28 架全机架轧制。其对应的壁厚范围大约为 2.5~12.0mm 之间，将此范围划分为三段，取各段代表壁厚 2.9mm，6.5mm，10.0mm，分别代入公式 (3-5)，工作机架的平均延伸率选定为 1.05，最终得到三个不同的减径系列。如表 3-3 所示。

表 3-3：设计结果比较（单位：mm）

壁厚 机架号	2.9	6.5	10	某厂减径系 列数据
1	149.57	149.64	149.71	149.51
2	145.29	145.47	145.64	145.16
3	139.82	140.12	140.42	139.57
4	131.58	132.09	132.46	131.50
5	123.90	124.59	125.06	124.01
6	116.74	117.60	118.18	117.06
7	110.05	111.07	111.77	110.6
8	103.80	104.97	105.81	104.57
9	97.97	99.28	100.25	98.94
10	92.52	93.96	95.07	93.69
11	87.69	88.98	90.24	88.76
12	82.42	84.33	85.73	84.16
13	78.19	79.98	81.52	79.83
14	74.01	75.90	77.59	75.78
15	70.10	72.08	73.92	72.0
16	66.43	68.51	70.48	68.46
17	63.00	65.15	67.27	65.15
18	59.78	62.00	64.26	62.03
19	56.76	59.06	61.45	59.11
20	53.92	56.29	58.81	56.35
21	51.26	53.70	56.33	53.76
22	48.76	51.25	54.01	51.31
23	46.41	48.96	51.84	49.0
24	44.54	47.13	50.04	46.96
25	43.32	45.95	48.87	45.72
26	42.61	45.25	48.18	45.15
27	42.41	45.06	47.99	44.95
28	42.41	45.06	47.99	44.95

3.2.4 讨论

1.对于某一成品管外径，利用本设计方法可以得到三种变形系列，按减径程度的大小，从大到小分别对应薄壁管、中等壁厚管、厚壁管的轧制，这样就保证了不同壁厚的管子在变形区内有相近的变形量。在后续孔型设计中，可以针对三种减径系列，分别采用正宽展、零宽展和负宽展进行设计。在实际设计过程中，利用这种方法得到的三种孔型系列椭圆度与辊缝充满度在各机架间平稳变化，取得了令人满意的设计结果。

2. 本设计方法中，同一变形系列的孔型所轧制管子的壁厚范围较窄，这有利于轧机的稳定工作，同时也有效地改善了成品管质量。

3. 在具体设计过程中，建立张力机组和成品机组各架延伸率以及工作机组的平均延伸率可视钢管断面特性、轧制材料、轧机负荷、变形温度等实际情况做相应调整。

3.3 孔型设计

3.3.1 张力减径机的主要参数

某无缝钢管厂是从德国引进的全浮动芯棒连轧管机组，设计年生产能力为 58 万吨，其中张力减径机组由单独驱动的 28 个机架组成，设计张力减径机的主要参数如下：

连轧来料的荒管直径：	Ø119、Ø152.5、Ø162mm
连轧来料的荒管壁厚：	3.25~25mm
连轧来料的荒管长度：	8~33m
成品管直径：	Ø21.3~139.7mm
成品管壁厚：	2.0~25mm
张减管长度：	8.5~160m
最大出口速度：	16.0m/s
最大入口速度：	2.75m/s
最大轧制力：	18 吨
最大转矩：	2.5 吨米
主电机功率：	28×350kw (DC)
主电机转速：	800/2000r. p. m
主电机额定电压：	520v (DC)
主电机额定电流：	704A
轧辊直径：	330mm
轧辊间距：	310mm
平均张力系数：	$0 < x_1 \leq 0.65$

3.3.2 三辊张力减径机的孔型分类

三辊张力减径机的孔型系分为椭圆孔型系和圆孔型系。事实上圆孔型系也带有一定的椭圆度。椭圆孔型系一般用来轧制薄壁管，圆孔型系一般用来轧制厚壁管。

宝钢 $\varnothing 140\text{mm}$ 连轧管机组孔型系统根据进入张力减径机荒管外径的不同，共分为三个孔型系统，分别为：119 孔型系列、152.5 孔型系列和 162 孔型系列。其中 162 孔型系列专门生产管接头，不生产成品管。在同一原料规格孔型系列中根据主变形机架的平均减径量的不同又分为 A 类孔型系列和 B 类孔型系列。其中，A 类孔型系统的主变形机架单架减径量较大，平均对数减径量约为 7.0% 以下，用于生产直径较小的成品管。B 类孔型系统的主变形机架单架减径量较小，平均对数减径量约为 5.5% 以下，用于生产直径较大的成品管。为降低轧辊的磨损和成品管的壁厚精度，一般能用 B 类孔型系统生产的规格，尽量使用 B 类孔型系统生产。只有当成品规格超出 B 类孔型系统的生产范围时，才使用 A 类孔型系统生产。在同一原料尺寸的同类孔型系统中，根据成品管的径厚比不同又分为：椭圆孔型系和圆孔型系。其中椭圆孔型系用于生产 $D/S > 12.5$ 的薄壁管；圆孔型系用于生产 $D/S \leq 12.5$ 的厚壁管。

3.3.3 孔型设计的基本公式

主要参数计算公式如下：

$$\text{孔型直径} \quad d_i = a_i + b_i \quad (3-6)$$

其中 a_i , b_i 为孔型长短半轴

$$\text{椭圆度} \quad \alpha_i = \frac{a_i}{b_i} \quad (3-7)$$

$$\text{减径率} \quad \rho_i = \frac{d_{i-1} - d_i}{d_{i-1}} \times 100\% \quad (3-8)$$

$$\text{覆盖系数} \quad \xi_i = \frac{b_{i-1}}{a_i} \quad (3-9)$$

$$\alpha_i - \xi_i - \rho_i \text{ 关系} \quad \alpha_i = \frac{1}{\xi_i (1 - \rho_i)} \quad (3-10)$$

3.3.2 三辊张力减径机的孔型分类

三辊张力减径机的孔型系分为椭圆孔型系和圆孔型系。事实上圆孔型系也带有一定的椭圆度。椭圆孔型系一般用来轧制薄壁管，圆孔型系一般用来轧制厚壁管。

宝钢 $\varnothing 140\text{mm}$ 连轧管机组孔型系统根据进入张力减径机荒管外径的不同，共分为三个孔型系统，分别为：119 孔型系列、152.5 孔型系列和 162 孔型系列。其中 162 孔型系列专门生产管接头，不生产成品管。在同一原料规格孔型系列中根据主变形机架的平均减径量的不同又分为 A 类孔型系列和 B 类孔型系列。其中，A 类孔型系统的主变形机架单架减径量较大，平均对数减径量约为 7.0% 以下，用于生产直径较小的成品管。B 类孔型系统的主变形机架单架减径量较小，平均对数减径量约为 5.5% 以下，用于生产直径较大的成品管。为降低轧辊的磨损和成品管的壁厚精度，一般能用 B 类孔型系统生产的规格，尽量使用 B 类孔型系统生产。只有当成品规格超出 B 类孔型系统的生产范围时，才使用 A 类孔型系统生产。在同一原料尺寸的同类孔型系统中，根据成品管的径厚比不同又分为：椭圆孔型系和圆孔型系。其中椭圆孔型系用于生产 $D/S > 12.5$ 的薄壁管；圆孔型系用于生产 $D/S \leq 12.5$ 的厚壁管。

3.3.3 孔型设计的基本公式

主要参数计算公式如下：

$$\text{孔型直径} \quad d_i = a_i + b_i \quad (3-6)$$

其中 a_i , b_i 为孔型长短半轴

$$\text{椭圆度} \quad \alpha_i = \frac{a_i}{b_i} \quad (3-7)$$

$$\text{减径率} \quad \rho_i = \frac{d_{i-1} - d_i}{d_{i-1}} \times 100\% \quad (3-8)$$

$$\text{覆盖系数} \quad \xi_i = \frac{b_{i-1}}{a_i} \quad (3-9)$$

$$\alpha_i - \xi_i - \rho_i \text{ 关系} \quad \alpha_i = \frac{1}{\xi_i (1 - \rho_i)} \quad (3-10)$$

$$\text{孔型长半径} \quad a_i = \frac{d_i}{\left(1 + \frac{1}{\alpha_i}\right)} \quad (3-11)$$

$$\text{孔型短半径} \quad b_i = \frac{d_i}{(1 + \alpha_i)} \quad (3-12)$$

$$\text{宽展} \quad c_i = a_i - b_{i-1} \quad (3-13)$$

$$\text{刀具直径} \quad D_{xi} = b_i - \frac{b_i^2 - a_i^2}{D_0} - \frac{a_i}{2} + \frac{0.75a_i^2}{b_i - \frac{b_i^2 - a_i^2}{D_0} - \frac{a_i}{2}} \quad (3-14)$$

刀具到孔型中心面的距离

$$T_i = \sqrt{\left(\frac{D_0}{2} - b_i\right)^2 - \left(\frac{D_0 - D_{xi}}{2}\right)^2} \quad (3-15)$$

3.3.4 椭圆孔型设计

能否成功完成轧制任务，除了轧机既定的设计性能和正确的地分配变形量外，孔型的合理设计同样是重要一环，特别是谋求良好内壁质量的时候。孔型的主要几何参数是长短半轴与椭圆系数 α ，而 α 是表征孔型设计特点的最重要参数，因而孔型设计的关键是如何根据变形参数与轧机其他性能确定各架孔型的 α 值^[35]。

3.3.4.1 椭圆孔型设计方法

椭圆孔型设计中 ξ 为小于 1 的正数，因为后一架的长半轴通常比前一架的短半轴大一些，这样对钢管的咬入及变形在一定程度上有利。 ξ 与 ρ 的关系如下表 3-4 所示。

表 3-4 系数 ξ 与 ρ 的关系

减径率	2%	4%	6%	7%	7.5%	7.9%
系数 ξ	0.9958~ 0.9961	0.9918	0.9883	0.9877~ 0.9889	0.9889~ 0.9895	0.9867~ 0.9894

按前述方法，求得各架的减径率分配后，依据 ξ 与 ρ 的关系求得各架的 ξ （不在表格中的值可以通过线性插值或二次插值求得），然后据公式 (3-10) 得到各架的 α ，分布，同时用公式 (3-11) 和 (3-12) 可以求得孔型长短半轴 a_i 和 b_i 。

3.3.5 圆孔型设计

据研究指出^[20],张力减径过程中,金属在孔型内的流动状态和轧辊接触弧长有关。在大椭圆度孔型内;钢管沿轧辊轴向各点与轧辊接触弧长度是不相等的,因而金属在孔型内各截面的包覆角也不相同。金属沿孔型圆周方向的受力状态、压下量、切向变形阻力的不同,造成变形不均匀,形成内多边形。因此,必须力求在圆周均匀状态下进行变形,使孔型接触形状与无芯棒拉拔情况类似。上述分析为张减机圆孔型设计提供了理论依据。

3.3.5.1 圆孔型基本设计原则和设计思想

圆孔型的基本设计原则是沿孔型宽度方向钢管与轧辊接触弧长度差值最小^[36]。

圆孔型系的设计思想是:

- 1.在减径量一定的条件下,所设计的孔型必须使得变形区压缩面积最接近矩形。
- 2.工作机组各架孔型的椭圆度值随着减径率的减小而逐渐减小,并使相邻机架椭圆度波动幅度尽可能小。

圆孔型设计必须解决的三个基本问题是:

- 1.计算钢管与孔型接触弧长度 L 和接触弧长度差值 ΔL 。
- 2.接触弧长度差值最小值 $\Delta L_{\min}$ 的求解。
- 3.调整各架孔型椭圆度值 α_i , 使其呈均匀下降分布。

3.3.5.2 圆孔型设计方法

设孔型宽度、高度及轧制方向的坐标分别为 z 、 y 、 x , 则轧件在任意 z 点处与轧辊的接触弧长为 L , 如图 3-2 所示。

$$L = \sqrt{(R_g - y_1)^2 - (R_g - y_0)^2} \quad (3-16)$$

其中: R_g 为轧辊名义直径

y_0 为轧件在 z 点处的入口高度

y_1 为轧件在 z 点处的出口高度

在三辊张减孔型中,当孔型的长短半轴 a_i , b_i 一定时,轧件在出口截面 z 点处的出口高度 y 为:

$$y = R_g - \sqrt{T^2 + \left(\sqrt{R_x^2 - z^2} - R_g \right)^2} \quad (3-17)$$

其中：\$R_x\$ 为加工刀具半径

\$T\$ 为加工刀具到孔型中心的距离

由于张减机相邻机架是交叉 \$60^\circ\$ 布置，所以必须进行坐标变换运算，将上式计算出的轧件在第 \$i-1\$ 架的出口高度换算成在第 \$i\$ 架的入口高度。设第 \$i-1\$ 架孔型的坐标系为 \$y-z\$，变换后的坐标系为 \$\bar{y}-\bar{z}\$ (如图 3-3 所示)，坐标变换公式为：

$$\begin{aligned} \bar{z}_{i-1} &= 0.5z_{i-1} - 0.866y_{i-1} \\ \bar{y}_{i-1} &= 0.866z_{i-1} + 0.5y_{i-1} \end{aligned} \quad (3-18)$$

所以，每当 \$i-1\$ 机架中的 \$z_{i-1}\$ 取一个数值时，就可以用(3-15)、(3-16)两式计算出轧件在第 \$i\$ 架的入、出口高度，并用下式计算出接触弧长：

$$L = \sqrt{(R_g - y_i)^2 - (R_g - \bar{y}_{i-1})^2} \quad (3-19)$$

当 \$z_{i-1}\$ 在一定范围内变化时，就可以得到若干个 \$L\$ 值，从中确定出最大值 \$L_{\max}\$ 及在一定的 \$a_i, b_i\$ 条件下接触弧长度差值 \$\Delta L\$：

$$\Delta L = L_{\max} - L_{\min} \quad (3-20)$$

在 \$d_i\$ 一定的情况下，当 \$b_i\$ 在一定范围内 (\$d_i - b_{i-1} \leq b_i \leq \frac{1}{2}d_i\$) 变化时，可以求出 \$K\$ 个 \$\Delta L\$ 值 (\$\Delta L_1, \Delta L_2, \dots, \Delta L_K\$)，找出其中最小的 \$\Delta L_{\min}\$ 值，它所对应的 \$a_i, b_i\$ 值就是所要求的最佳孔型参数。需要指出的是，当 \$b_i = \frac{1}{2}d_i\$ 时，虽然孔型的椭圆度值 \$a_i\$ 最小 (等于 1.0)，但孔型接触弧长度差值并不一定为最小。

设计得到的椭圆度分布曲线有可能呈锯齿状分布，这显然不符合工艺的要求，使得辊缝处的金属产生较强的弯曲交变应力，容易产生裂纹和折痕。因此，需要调整各架椭圆度值，其目的是使工作机架椭圆度值交替变化波动的幅度尽可能小，并随着减径率的减小，呈下降分布态势。

调整方法是，选择第三机架孔型直径 \$d_3\$ 作为主调整值，当 \$d_3\$ 在一定范围变化时，每给定一个 \$d_3\$ 值，就可以计算出对应的一套孔型参数和一条椭圆度值分布曲线，用下式计算出该曲线的长度：

$$R = \sum_{i=4}^n \sqrt{1 + (\alpha_{i-1} - \alpha_i)^2} \quad (3-21)$$

其中： α_{i-1} 、 α_i 分别为 $i-1$ 机架和 i 架的椭圆度值。

在若干个值中，找出最小值 $R_{\min}$ ，则 $R_{\min}$ 所对应的孔型参数即是最佳参数。 d_3 值改变后，各架的 $\Delta L_{\min}$ 值也会发生变化，但因 $\Delta L_{\min}$ 值也是优化值，所以这种影响很小。

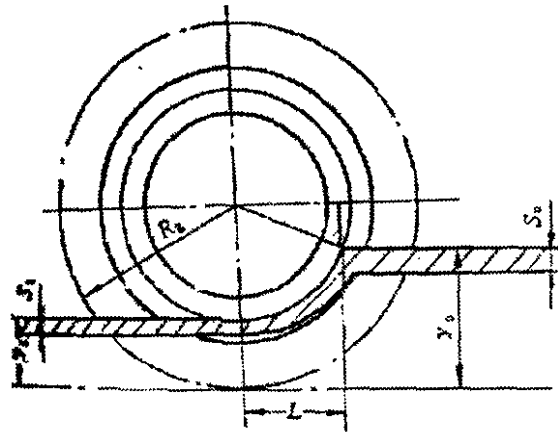


图 3-2 接触弧长的计算

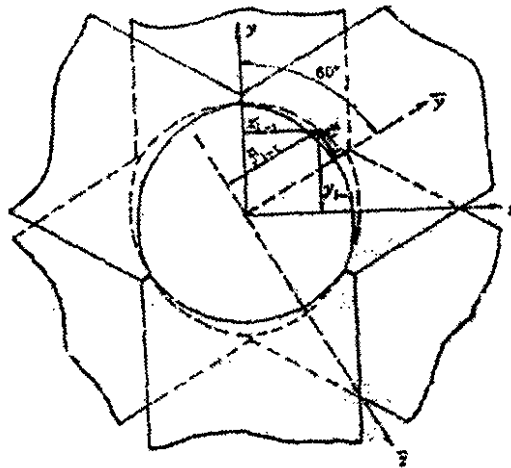


图 3-3 坐标变换图

3.3.5.3 圆孔型设计步骤

1. 分配减径率，计算各架孔型直径。
2. 设 $b_i = 0.5d_{i-1}$ ， z_{i-1} 在一定范围内变化 j 次，求出接触弧长度最大差值 $\Delta L_{\max}$ 。
3. b_i 在一定范围内变化 K 次，计算出 K 个 $\Delta L_{\max}$ 值，从中找出最小值 $(\Delta L_{\max})_{\min}$ 。

- 4.各架孔型按 2、3 两步进行设计，并计算出椭圆度值 α_i 。
- 5.用式 (3-21) 计算椭圆度值分布曲线长度 R 。
6. d_3 在一定范围变化，调整椭圆度曲线，找出最小值 $R_{\min}$ 。
- 7.用 $R_{\min}$ 所对应的各架 a_i ， b_i 值计算其它孔型参数。

3.3.6 成品机组孔型设计

3.3.6.1 设计思想和设计要求

成品机组孔型要能够适用于同一减径系列中不同孔型系（圆孔型系和椭圆孔型系）的使用，以提高成品机架的利用率和使用寿命，减少更换机架及加工机架的时间，并减少备用机架，简化机架的管理^[37]。

成品机组的减径率 ρ_i 、椭圆度 α_i 、辊缝充满度值 c_i 采用逐步减小、平滑下降的分配方法。

根据成品机架的总减径量的不同，采用不同的成品机架数。

当 $0.035 \leq \gamma_{\text{tal}} < 0.06$ 时，成品机架数为 4 个机架；

当 $0.06 \leq \gamma_{\text{tal}} < 0.10$ 时，成品机架数为 5 个机架。

成品机组各机架对数减径量见表 3-5。

表 3-5 成品机组各机架对数减径量分配

机架号	1	2	3	4	5
成品机架为 4 机架	$\gamma_{i-3}=0.6 \gamma_{\text{tal}}$	$\gamma_{i-2}=0.3 \gamma_{\text{tal}}$	$\gamma_{i-1}=0.1 \gamma_{\text{tal}}$	0	
成品机架为 5 机架	$\gamma_{i-4}=0.45 \gamma_{\text{tal}}$	$\gamma_{i-3}=0.3 \gamma_{\text{tal}}$	$\gamma_{i-2}=0.2 \gamma_{\text{tal}}$	$\gamma_{i-1}=0.05 \gamma_{\text{tal}}$	0

椭圆度值分配的特点是：

1. 椭圆度值随着各架减径率的减小而减小。
2. 各机架椭圆度取值范围见表 3-6。

由于成品机架是钢管进行最终变形的几个机架，并且要同时适用于椭圆孔型系和圆孔型系轧制薄壁管和厚壁管，因此辊缝充满度的选择有三个特点：

1. 由于减径量比较小，所以辊缝充满度值 c_i 比较小。
2. 为防止严重青线，采用正充满度值（ c_i 值 > 0 ）。

3. 限定后三架的辊缝充满度取值范围，其余机架采用等差级数的分配方法。见表 3-6。

表 3-6 成品机组各机架椭圆度取值范围

机架号	1	2	3	4	5
成品机架为 4 机架	$a_1 \geq 1.006 a_2$	$a_2 \leq 1.009 a_3$	$a_3 = a_4$	a_4 由 $x_4 \geq 4.0$ 决定取值	
成品机架为 5 机架	$a_1 \geq 1.006 a_2$	$a_2 \geq 1.006 a_3$	$a_3 \leq 1.009 a_4$	$a_4 = a_5$	a_4 由 $x_4 \geq 4.0$ 决定取值

由上述介绍可以看出，张减机成品孔型的设计参数主要有三个：减径率 ρ_i 、椭圆度值 a_i 、辊缝充满度值 c_i 。在设计中发现，要使 a_i 、 ρ_i 、 c_i 完全满足各自限制条件，需要对初始设计的参数进行调整。调整的方法和原则如下：

1. 为避免某一参数调整量过大，偏离设计原则较远，需同时调整 a_i 、 ρ_i 、 c_i 参数中的两个。

2. 调整后，第 1、2 架的减径量可以不同于表中的数值；第一二架的充满度值 c_i 可以略微变动，其余各架的减径率 ρ_i 、椭圆度 a_i 、辊缝充满度值 c_i 需符合表中的规定，并且与工作机架相连时， a_i 、 c_i 值无大的跳跃，各架 a_i 、 ρ_i 、 c_i 值需符合 $a_i \geq a_{i+1}$ 、 $\rho_i \geq \rho_{i+1}$ 、 $c_i > c_{i+1}$ (倒数第二架除外) 的规律。

表 3-7 成品机组各机架椭圆度取值范围

机架号	1	2	3	4	5
成品机架为 4 机架	$C_1 = \frac{c_{14} - c_2}{2} + c_2$	$c_2 = c_4 + (0.02 \sim 0.04)$	$C_3 = c_4 - 0.01$	$C_4 = a_4 - b_3$	
成品机架为 5 机架	$C_1 = \frac{c_{14} - c_3}{3} + c_2$	$c_2 = \frac{c_{14} - c_3}{3} + c_3$	$c_2 = c_4 + (0.02 \sim 0.04)$	$C_4 = c_5 - 0.01$	$C_5 = a_5 - b_4$

3.3.6.2 设计步骤

以设计 5 架成品机架为例：

1. 计算 γ_{tal} 值，确定成品机架数。

$$\gamma_{\text{tal}} = \ln \frac{d_{14}}{d_0} \quad (3-22)$$

2.按表 3-6 的减径量分配计算各架孔型直径 d_i 。

3. 用 (3-14)、(3-15) 式找出满足 $x \geq 4.0$ 条件的最后两架的孔型参数 a_5 、 a_4 、 b_5 、 b_4 、 c_5 、 c_4 。

4.计算第三架的孔型参数

$$b_3 = a_4 - c_4$$

$$a_3 = d_3 - b_3$$

$$\alpha_3 = \frac{a_3}{b_3}$$

$$c_3 = c_5 + (0.02+0.04)$$

5.计算

$$b_2 = a_3 - c_3$$

$$a_2 = d_2 - b_2$$

$$\alpha_2 = \frac{a_2}{b_2}$$

$$c_2 = \frac{c_{14} - c_3}{3} + c_3$$

6.计算第一架孔型参数

$$c_1 = \frac{c_{14} - c_3}{3} + c_2$$

$$b_1 = a_2 - c_2$$

$$a_1 = b_{1a} + c_1$$

$$d_1 = a_1 + b_1$$

$$\alpha_1 = \frac{a_1}{b_1}$$

7.校核各架 d_i 、 ρ_i 、 c_i 值，看是否符合表 3-5～表 3-7 的要求，如果不符合，则进行调整。

8.计算加工孔型用的其它参数。

3.4 孔型加工方法及其孔型曲面方程

3.4.1 孔型加工方法

张力减径机的孔型是在专用的三辊孔型加工机床加工出来的,因此有必要在这里介绍一个张力减径机的孔型加工方法。

无论是椭圆孔型系还是圆孔型系,当孔型设计好之后对于一个特定的孔型系统中的某一特定机架来说,孔型的长半轴 a_i 和短半轴 b_i 为定值。根据孔型长短半轴的尺寸,由下列公式计算出该孔型加工所使用的刀具直径和最后一道次加工时刀具的距离(刀具的刀刃边缘到轧辊中心平面的距离)。

刀具直径的计算公式和刀具距离的计算公式见 (3-14)、(3-15)。

孔型加工的空间几何关系如图 3-4 所示:

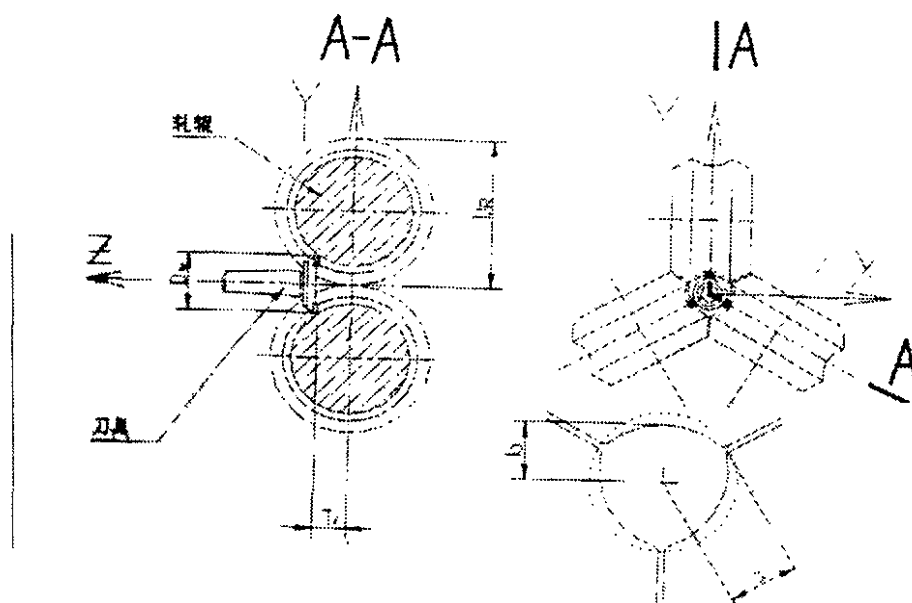


图 3-4 孔型加工中的三维几何关系

3.4 孔型加工方法及其孔型曲面方程

3.4.1 孔型加工方法

张力减径机的孔型是在专用的三辊孔型加工机床加工出来的,因此有必要在这里介绍一个张力减径机的孔型加工方法。

无论是椭圆孔型系还是圆孔型系,当孔型设计好之后对于一个特定的孔型系统中的某一特定机架来说,孔型的长半轴 a_i 和短半轴 b_i 为定值。根据孔型长短半轴的尺寸,由下列公式计算出该孔型加工所使用的刀具直径和最后一道次加工时刀具的距离(刀具的刀刃边缘到轧辊中心平面的距离)。

刀具直径的计算公式和刀具距离的计算公式见 (3-14)、(3-15)。

孔型加工的空间几何关系如图 3-4 所示:

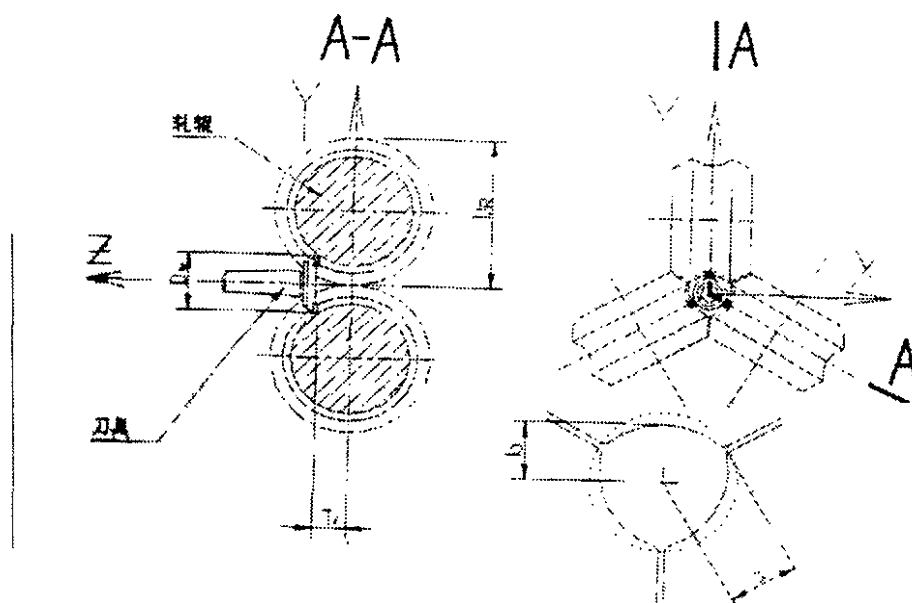


图 3-4 孔型加工中的三维几何关系

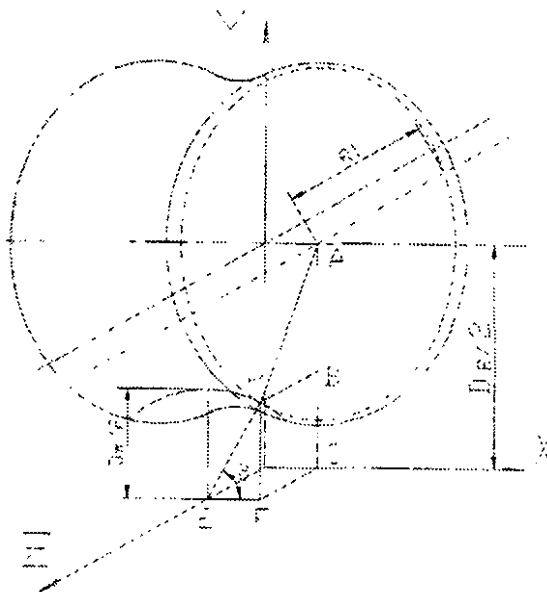


图 3-5 张减孔型加工过程中的三维几何关系和坐标系选定

在孔型车削加工过程中刀具做旋转运动,而刀具的距离是固定不变的.进刀是在一道次车削后在辊缝位置处手工进刀,当车削到刀具距离为(3-15)所计算的数值时,更换刀刃车削最后一刀。

3.4.2 孔型曲面方程解析

孔型的加工方法决定了加工出来的孔型曲面方程。由于张力减径机的孔型是由三个对称的轧辊孔槽组成，因此在解析孔型的曲面方程时，只需要计算一个轧辊即可。因为张力减径机的轧辊孔型加工是三维空间的几何关系，为求解方便，建立如图 3-5 所示的直角坐标系。

由图所示的孔型加工三维几何关系，则轧辊孔型曲面方程推导如下：

对理想轧辊直径为 D_g 的机架进行孔型加工，使用的刀具直径为 D_x ，刀具的距离为 T ，刀具的转角为 θ ，在任一加工点 P 点，其坐标为： $P(x,y)$ ，在刀具的加工截面上，则有：

$$x = \frac{D_x}{2} \times \cos \theta \quad (3-23)$$

$$y = \frac{D_x}{2} \times \sin \theta \quad (3-24)$$

$$z = T \quad (3-25)$$

因轧辊被车削加工，在 P 点垂直与轧辊的截面上则有孔型的曲线方程为：

$$\left(\frac{D_g}{2} - y \right)^2 + z^2 = R_1^2 \quad (3-26)$$

由三角形 $\triangle ABP$ 可知：

$$R_1^2 = AP^2 = AB^2 + PB^2$$

$$\text{而 } AB = \frac{D_g}{2} - BC$$

$$BC = PF = \sqrt{\left(\frac{D_x}{2} \right)^2 - EF^2} = \sqrt{\left(\frac{D_x}{2} \right)^2 - x^2}$$

PB = T，得：

$$R_1^2 = T^2 + \left\{ \frac{D_g}{2} - \left[\left(\frac{D_x}{2} \right)^2 - x^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^2 \quad (3-27)$$

由式(3-26)、(3-27)得出的轧辊孔型曲面的曲面方程如下：

$$\left(\frac{D_g}{2} - y \right)^2 + z^2 = T^2 + \left\{ \frac{D_g}{2} - \left[\left(\frac{D_x}{2} \right)^2 - x^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^2 \quad (3-28)$$

当 $z=0$ 时，则有：

$$\left(\frac{D_g}{2} - y \right)^2 = T^2 + \left\{ \frac{D_g}{2} - \left[\left(\frac{D_x}{2} \right)^2 - x^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^2 \quad (3-29)$$

该方程为传统方法所加工的孔型曲面在孔型中心点截面的曲线方程，一般称为孔型的曲线方程，在孔型设计中所计算的各种孔型参数都使用了上述几个方程式。

3.4.3 新型孔型加工技术

采用传统孔型加工技术，存在一些问题：

1) 所需机架较多，投资高，加工费和工具费昂贵，更换时间长，调节设备占用

场地大，孔型加工机床的数量也较多；

2) 孔型侧壁斜角相对较小，成型后钢管内壁凹凸不平；

3) 传统的椭圆孔型会使管壁上出现一条较尖的棱边，它与轧辊接触，造成轧辊很大的磨损，还使局部管壁应力过于集中引起薄壁现象，在钢管内壁形成一个很明显的六角形；

4) 对轧制条件的变化非常敏感，有时会出现一些难以解释的缺陷。另外，为了避免钢管内壁形成内六角形，通常要求轧制张力很小，但这样又影响了整个张力减径过程，导致壁厚误差和内外壁缺陷的形成。

产生这些问题的根本原因在于传统的孔型加工机床有局限性：车刀固定之后只能绕单轴旋转；只能加工椭圆孔型。针对这些情况，德国梅尔公司利用计算机模拟技术成功地开发了张力减径机孔型加工计算机数控机床^[27]。这种机床的特点是：加工过程中车刀可以在三维方向任意移动，可以加工任何实用的孔型形状。经大量生产实践证明，新型孔型加工技术成功地消除了钢管内壁凹凸不平的现象，明显地减少了钢管内壁六角形的形成。

3.5 本章小结

本章给出了本论文研究对象—某厂张力减径机的主要参数。介绍了传统的分配张减管减径量的方法。提出一种基于延伸率的分配张减管变形量的新方法并对这种方法的基本设计思路、设计方法进行了阐述。

介绍了张力减径机组轧辊椭圆孔型、圆孔型、成品孔型的设计思想和设计方法。分析了张力减径的孔型加工方法，解析了孔型的曲面方程。

简单介绍了新型孔型加工技术、新型孔型加工机床。

第四章 张减过程计算机仿真

张力减径过程是复杂的多道次三维变形。由于张减变形过程本身的复杂性及计算时间的限制,采用三维模型模拟多道次张减过程目前还十分困难。

张力减径过程中存在的问题主要有两大类。一类是沿纵向(轧制方向)上的问题,如头尾壁厚变化规律,速度制度,张力制度,轧机轧制力、力矩、功率分布,道次变形量分布,轧制速度变化规律,钢管壁厚在轧制过程中的变化规律等。另一类是沿圆周方向上的问题,如周向壁厚不均(内六角)问题,周向张力分布问题,孔型充满度问题等。对第一类问题,由于考虑的均是过程参量分布问题,应采用全过程模拟才能获得可靠的结果。但由于目前计算机模拟技术的发展还不能很好地实现三维全过程模拟,因此这类问题可以采用轴对称模型来加以解决。对第二类问题必须采用三维模型。但由于不涉及过程参量,则不一定进行全过程模拟。

本研究课题的主要内容属第一类问题。因此,重点对轴对称模型进行探讨。

4.1 轴对称模型的建立

4.1.1 建模原则

建立张减过程轴对称模型,必须符合下述基本原则:

首先,轴对称模型必须正确模拟工艺过程参量。这些参量主要涉及:

(1) 钢管尺寸变化规律及变形量分配。为此,采用理想钢管直径 d_i 作为轴对称模型的钢管直径。采用断面平均壁厚为钢管壁厚 S_i 。相应各道次延伸系数为 λ_i 。

(2) 速度制度。

(3) 张力制度。

其次,轴对称模型应该满足屈服条件。

还有,轴对称模型应满足力平衡方程。

4.1.2 轴对称模型中性面轧辊直径的确定

在建立轴对称模型时,需要确定轧辊直径。为此,以张减理论为依据,在上述原则的基础上,提出如下通用方法来求轧辊直径。

第四章 张减过程计算机仿真

张力减径过程是复杂的多道次三维变形。由于张减变形过程本身的复杂性及计算时间的限制,采用三维模型模拟多道次张减过程目前还十分困难。

张力减径过程中存在的问题主要有两大类。一类是沿纵向(轧制方向)上的问题,如头尾壁厚变化规律,速度制度,张力制度,轧机轧制力、力矩、功率分布,道次变形量分布,轧制速度变化规律,钢管壁厚在轧制过程中的变化规律等。另一类是沿圆周方向上的问题,如周向壁厚不均(内六角)问题,周向张力分布问题,孔型充满度问题等。对第一类问题,由于考虑的均是过程参量分布问题,应采用全过程模拟才能获得可靠的结果。但由于目前计算机模拟技术的发展还不能很好地实现三维全过程模拟,因此这类问题可以采用轴对称模型来加以解决。对第二类问题必须采用三维模型。但由于不涉及过程参量,则不一定进行全过程模拟。

本研究课题的主要内容属第一类问题。因此,重点对轴对称模型进行探讨。

4.1 轴对称模型的建立

4.1.1 建模原则

建立张减过程轴对称模型,必须符合下述基本原则:

首先,轴对称模型必须正确模拟工艺过程参量。这些参量主要涉及:

(1) 钢管尺寸变化规律及变形量分配。为此,采用理想钢管直径 d_i 作为轴对称模型的钢管直径。采用断面平均壁厚为钢管壁厚 S_i 。相应各道次延伸系数为 λ_i 。

(2) 速度制度。

(3) 张力制度。

其次,轴对称模型应该满足屈服条件。

还有,轴对称模型应满足力平衡方程。

4.1.2 轴对称模型中性面轧辊直径的确定

在建立轴对称模型时,需要确定轧辊直径。为此,以张减理论为依据,在上述原则的基础上,提出如下通用方法来求轧辊直径。

1. 建立力平衡方程

取第 i 道次为研究对象，各参量如图 4-1 所示。各已知参量见表 4-1。各未知参量见表 4-2。

表 4-1 已知参量

名称	入口	出口	平均
孔型直径	d_{0i}	d_{1i}	$d_{im}=(d_{0i}+d_{1i})/2$
钢管壁厚	s_{0i}	s_{1i}	$s_{im}=(s_{0i}+s_{1i})/2$
张力系数	X_{0i}	X_{1i}	$X_{im}=(x_{1i}+x_{0i})/2$
轧制速度	V_{0i}	V_{1i}	$V_{im}=(v_{0i}+v_{1i})/2$
累积延伸系数	$\lambda \sum 0_i$	$\lambda \sum 1_i$	
摩擦系数	μ		

表 4-2 未知参量

名称	符号
单位压力	p_i
单位摩擦力	τ_i
中性角	θ_{ki}
轧辊平均半径	R_i
接触角	θ_{0i}
中性面处钢管直径	d_{ki}

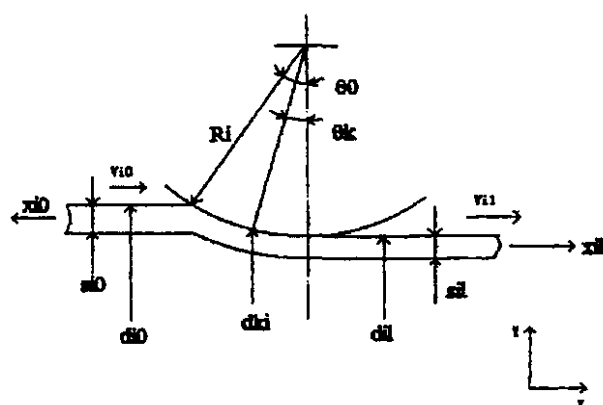


图 4-1 轴对称模型示意图

假设单位轧制压力均匀分布，为 p_i ，采用库仑摩擦定律，摩擦系数为 μ 。

$$\tau_i = \mu * p_i \quad (4-1)$$

管子在 x 方向上合力为零, $\Sigma F_x = 0$ 。在 x 方向的各力分别如下:

出口端张力 F_1 :

$$F_1 = X_{1i} * k_f * A_{1i}$$

其中: k_f 为流动应力

A_{1i} 为第 i 道次出口端钢管断面面积, $A_{1i} = A_0 / \lambda \Sigma l_i$

A_0 为原始坯料断面面积

$$\text{则有: } F_1 = X_{1i} * k_f * A_0 / \lambda \Sigma l_i \quad (4-2)$$

入口端张力 F_2 :

$$F_2 = x_{0i} * k_f * A_0 / \lambda \Sigma l_i \quad (4-3)$$

后滑区摩擦力分力 F_3 :

假设后滑区摩擦力合力作用在后滑区的中间。

$$F_3 = \pi * \mu * p_i * (\theta_{0i} - \theta_{ki}) * R_i * [(d_{0i} + d_{ki})/2] * \cos[\theta_{ki} + (\theta_{0i} - \theta_{ki})/2]$$

θ_{0i} , θ_{ki} 都比较小, $\cos[\theta_{ki} + (\theta_{0i} - \theta_{ki})/2] \approx 1$

$$F_3 = \pi * \mu * p_i * (\theta_{0i} - \theta_{ki}) * R_i * [(d_{0i} + d_{ki})/2] \quad (4-4)$$

前滑区摩擦力分力 F_4 :

假设前滑区摩擦力合力作用在前滑区中点。

$$F_4 = \pi * \mu * p_i * \theta_{ki} * R_i * (d_{0i} + d_{li})/2 \quad (4-5)$$

正压力在 x 方向的分力 F_5 :

$$F_5 = \pi * p_i * \theta_{0i} * R_i * (d_{0i} + d_{li})/2 * \theta_{0i}/2 \quad (4-6)$$

在 x 方向的合力为零, 即:

$F_1 - F_2 + F_3 - F_4 - F_5 = 0$, 将上述各式代入, 得:

$$X_{1i} * k_f * A_0 / \lambda \Sigma l_i - x_{0i} * k_f * A_0 / \lambda \Sigma l_i + \pi * \mu * p_i * (\theta_{0i} - \theta_{ki}) * R_i * [(d_{0i} + d_{ki})/2] - \pi * \mu * p_i * \theta_{ki} * R_i * (d_{0i} + d_{li})/2 - \pi * p_i * \theta_{0i} * R_i * (d_{0i} + d_{li})/2 * \theta_{0i}/2 = 0 \quad (4-7)$$

2. 屈服准则

根据 Tresca 屈服准则, 求出张力系数与单位压力之间的关系如下:

$$p_i = k_f * (1 - x_{im})^2 * \sin / \dim \quad (4-8)$$

3. 几何关系

$$R_i = (d_{0i} - d_{1i}) / [2 * (1 - \cos \theta_{0i})]$$

$$\theta_{0i} = \cos^{-1} [1 - (d_{0i} - d_{1i}) / 2 R_i] \quad (4-9)$$

$$d_{ki} = d_{1i} + 2 R_i (1 - \cos \theta_{ki}) \quad (4-10)$$

4. 中性面定义

在中性面处，轧辊线速度与轧件线速度相等。

轧辊线速度为 $\omega_i * R_i$ 。

轧件线速度近似计算为：

$$V_{ki} = V_{li} * (1 - \theta_{ki} / \theta_{0i}) + V_{0i} * (\theta_{ki} / \theta_{0i})$$

$$\text{则 } \omega_i * R_i = V_{li} * (1 - \theta_{ki} / \theta_{0i}) + V_{0i} * (\theta_{ki} / \theta_{0i}) \quad (4-11)$$

5. 求解

现有未知量 R_i 、 p_i 、 τ_i 、 θ_{ki} 、 θ_{0i} 、 d_{ki} 。联立方程(4-1)、(4-7)、(4-8)、(4-9)、(4-10)、(4-11)，方程数与未知量数目相等，可以求解。

求解采用迭代法，步骤如下：

Step1: 设定初始 $\theta_{ki} / \theta_{0i}$ 比值。

Step2: 以(4-11)式求出 R_i 。

Step3: 以(4-10)式求出 θ_{0i} 。

Step4: 由 $\theta_{ki} / \theta_{0i}$ 比值求出 θ_{ki} 。

Step5: 由(4-10)式求出 d_{ki} 。

Step6: 将以上各值代入(4-7)，如不满足平衡方程，改变 $\theta_{ki} / \theta_{0i}$ 值，重复上述计算，直至满足平衡方程为止。

通过上述步骤，可以求出轴对称模型的轧辊直径。

4.1.3 轴对称模型的建立

采用上述方法，求出轴对称模型中性面处轧辊直径之后，及一定的速度制度，可以建立轴对称模型。做如下假设：一个机架内的轧辊数为无限多(实际是三辊机架)

在 MARC/MENTAT 平台上，可以完成建模。为进一步提高计算效率，模型中采用的机架间距比实际的 310mm 小，分别为 80、100、150mm。利用 MRAC 软件的具体建模步骤本文略。

4.2 对 $\varnothing 60.3 \times 12.5\text{mm}$ 管的模拟分析

本研究的主要模拟工作使用的是 MARC 有限元软件，前后处理使用的是 MENTAT 软件。模拟对象为国内某钢管生产企业 $\varnothing 60.3 \times 12.5\text{mm}$ 管。

4.2.1 基本参数

孔型系：119BR

成品规格： $\varnothing 60.3 \times 12.5$

连轧荒管规格： $\varnothing 119.5 \times 12.5$

机架数：20

切头切尾长度：各 750mm

轧制温度：900℃

摩擦系数：0.4

轧辊转速：如表 4—3 所示。

表 4—3 生产 $\varnothing 60.3 \times 12.5\text{mm}$ 管所用轧辊转速系列

机架号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
轧辊转速	141.41	146.74	153.80	162.74	168.72	175.07	181.82	188.97	196.53	204.54
机架号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
轧辊转速	213.00	221.93	231.37	241.37	250.51	258.42	265.90	269.91	272.37	273.97

钢管材质及性能：以厂方提供的 37Mn5 数据为准。

4.2.2 模型建立、模拟方案及模拟结果分析

4.2.2.1 模型建立与模拟方案

为节约计算时间，模型机架间距取为 150mm，比实际机架间距的 310mm 小。这样不仅减少了计算时间，还能实现更多道次的连轧模拟。有关头尾增厚区的计算结果可以用模拟系数（实际机架间距除以模拟机架间距）来修正。

为对张减过程变形全过程进行研究，模型实现了全部机架的连轧模拟，这样能真实模拟张减全过程。

4.2 对 $\varnothing 60.3 \times 12.5\text{mm}$ 管的模拟分析

本研究的主要模拟工作使用的是 MARC 有限元软件，前后处理使用的是 MENTAT 软件。模拟对象为国内某钢管生产企业 $\varnothing 60.3 \times 12.5\text{mm}$ 管。

4.2.1 基本参数

孔型系：119BR

成品规格： $\varnothing 60.3 \times 12.5$

连轧荒管规格： $\varnothing 119.5 \times 12.5$

机架数：20

切头切尾长度：各 750mm

轧制温度：900℃

摩擦系数：0.4

轧辊转速：如表 4—3 所示。

表 4—3 生产 $\varnothing 60.3 \times 12.5\text{mm}$ 管所用轧辊转速系列

机架号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
轧辊转速	141.41	146.74	153.80	162.74	168.72	175.07	181.82	188.97	196.53	204.54
机架号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
轧辊转速	213.00	221.93	231.37	241.37	250.51	258.42	265.90	269.91	272.37	273.97

钢管材质及性能：以厂方提供的 37Mn5 数据为准。

4.2.2 模型建立、模拟方案及模拟结果分析

4.2.2.1 模型建立与模拟方案

为节约计算时间，模型机架间距取为 150mm，比实际机架间距的 310mm 小。这样不仅减少了计算时间，还能实现更多道次的连轧模拟。有关头尾增厚区的计算结果可以用模拟系数（实际机架间距除以模拟机架间距）来修正。

为对张减过程变形全过程进行研究，模型实现了全部机架的连轧模拟，这样能真实模拟张减全过程。

4.2.2.2 模拟结果分析

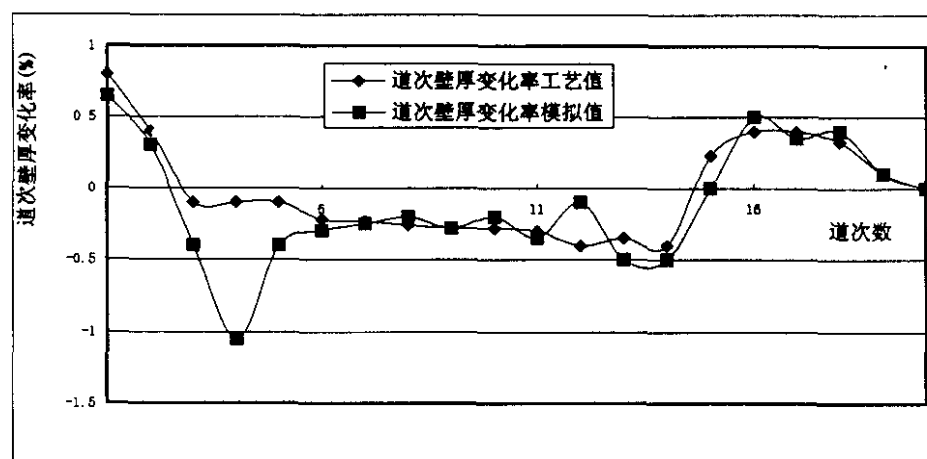
1. 钢管稳态壁厚在轧制过程中的变化

稳态轧制时, 钢管壁厚在各架间是变化的。认识该变化规律是解决张减工艺设计的关键。表 4-4 给出稳态轧制时钢管壁厚在各架的模拟值, 并与原工艺值进行比较。

表 4-4 $\varnothing 60.3 \times 12.5\text{mm}$ 管在各道次的稳态壁厚模拟值与工艺设计值

道次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
模拟值	12.58	12.62	12.57	12.43	12.38	12.35	12.32	12.30	12.27	12.25
工艺值	12.60	12.65	12.64	12.63	12.62	12.60	12.58	12.55	12.52	12.49
道次	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
模拟值	12.21	12.20	12.13	12.06	12.06	12.13	12.17	12.22	12.23	12.23
工艺值	12.46	12.41	12.37	12.32	12.35	12.40	12.45	12.49	12.50	12.50

从表中可见, 轧后钢管稳态壁厚值为 12.23, 与工艺要求值 12.5 相差 0.27mm, 相对误差是-2.4%。从现场抽取 5 根钢管进行实测, 每个断面测取 8 个壁厚, 取均值为该处壁厚。头尾各切取 750mm 长, 分 4 段进行测量。测量得到 5 根钢管中间段平均壁厚分别为: 12.21mm, 12.40mm, 12.35mm, 12.64mm, 12.39mm。5 根的平均值为 12.40mm, 模拟值为 12.23mm, 可见模拟精度较高。道次壁厚变化率模拟值与工艺值的比较如图 4-2 所示。

图 4-2 $\varnothing 60.3 \times 12.5\text{mm}$ 管道次壁厚变化率模拟值与工艺值比较

模拟结果显示, 前几道次对钢管壁厚有较大影响, 这说明连轧荒管的尺寸公差对成品管的尺寸精度有很大影响。实际生产过程中, 会由于荒管尺寸偏小使前面道次并

未实际轧制,这会影响到成品壁厚。另外由于连轧过程的竹节现象,会造成荒管头尾壁厚增厚及管径偏大,这会进一步加大张力减径前几道次钢管壁厚增厚率,加剧头尾增厚现象。

2. 头尾增厚区模拟结果与实测结果的比较

钢管头尾增厚区的壁厚分布模拟值分别如表 4-5, 表 4-6 所示。其中端面距离已采用模拟系数 2.0667(310/150)进行了修正。从现场抽取 5 根钢管进行实测,钢管头尾增厚区的壁厚分布模拟值与实测结果的比较如图 4-3, 图 4-4 所示。图中各管均以其中间段品均壁厚为基准计算增厚率。

表 4-5 $\varnothing 60.3 \times 12.5\text{mm}$ 管头部增厚区的壁厚分布模拟值

距端面距离(mm)	0	43	91	141	205	269	438
壁厚模拟值(mm)	14.51	14.07	13.60	13.14	12.99	12.97	13.01
增厚率(%)	18.93	15.33	11.48	7.70	6.48	6.31	6.64
距端面距离(mm)	546	653	709	763	806	895	961
壁厚模拟值(mm)	12.82	12.67	12.56	12.51	12.48	12.45	12.41
增厚率(%)	5.08	3.85	2.95	2.54	2.30	2.05	1.72
距端面距离(mm)	1081	1325	1505	1693	1903	2786	3000
壁厚模拟值(mm)	12.36	12.31	12.26	12.23	12.24	12.20	12.19
增厚率(%)	1.31	0.90	0.49	0.25	0.33	0	-0.1

表 4-6 $\varnothing 60.3 \times 12.5\text{mm}$ 管尾部增厚区的壁厚分布模拟值

距端面距离(mm)	0	41	79	120	161	205	279	397
壁厚模拟值(mm)	14.9	14.78	13.77	13.25	13.01	13.04	12.97	13.05
增厚率(%)	22.13	21.15	12.87	8.61	6.64	6.89	6.31	6.97
距端面距离(mm)	539	694	727	750	773	796	851	973
壁厚模拟值(mm)	12.65	12.59	12.57	12.57	12.50	12.44	12.46	12.42
增厚率(%)	3.69	3.20	3.03	3.03	2.46	1.97	2.13	1.80
距端面距离(mm)	1077	1164	1242	1445	1779	2114	2528	3000
壁厚模拟值(mm)	12.41	12.32	12.29	12.27	12.24	12.19	12.20	12.20
增厚率(%)	1.72	0.98	0.74	0.57	0.33	-0.1	0	0

从表中看出,在工艺设定切头尾长度 750mm 处,增厚率约 3%。实际生产中,由于连轧荒管头尾已有一定增厚,现场钢管的头尾增厚值要比模拟值高一些。从表中还可以看出,头尾壁厚分布基本一致,增厚区长度约为 2 米。

头尾壁厚增厚率与实测值比较后发现,在尾部模拟值与实测值比较吻合,而头部

的实测值明显高与模拟值。这是由于连轧荒管尾部的竹节现象比头部更明显，使得实际生产过程中张力减径后的钢管头部（荒管尾部）增厚表现得更剧烈。而模拟时采用的是理想的均匀的荒管。仅以模型的合理性而言，得到了验证，结果是可信的。

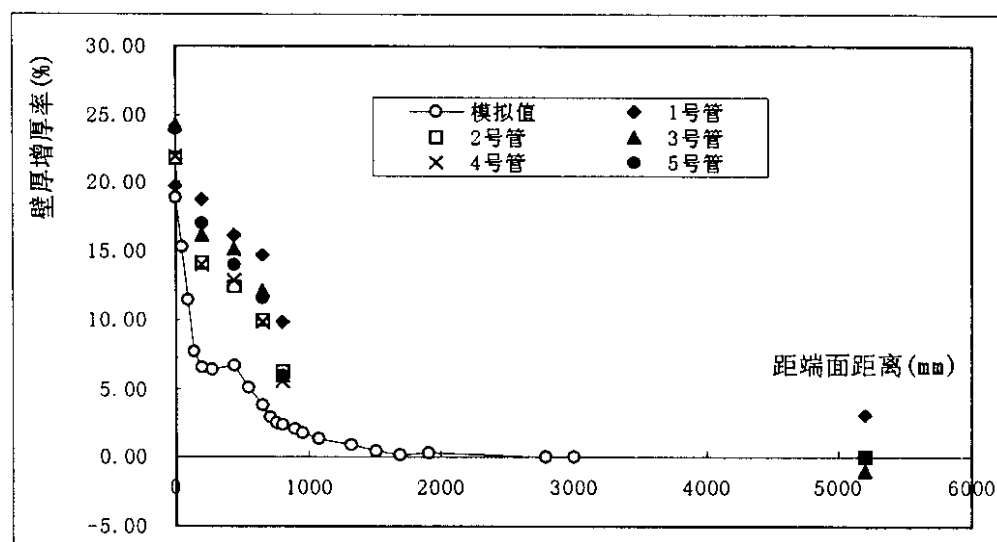


图 4-3 Ø60.3*12.5mm 管头部壁厚增厚模拟值与实测值比较

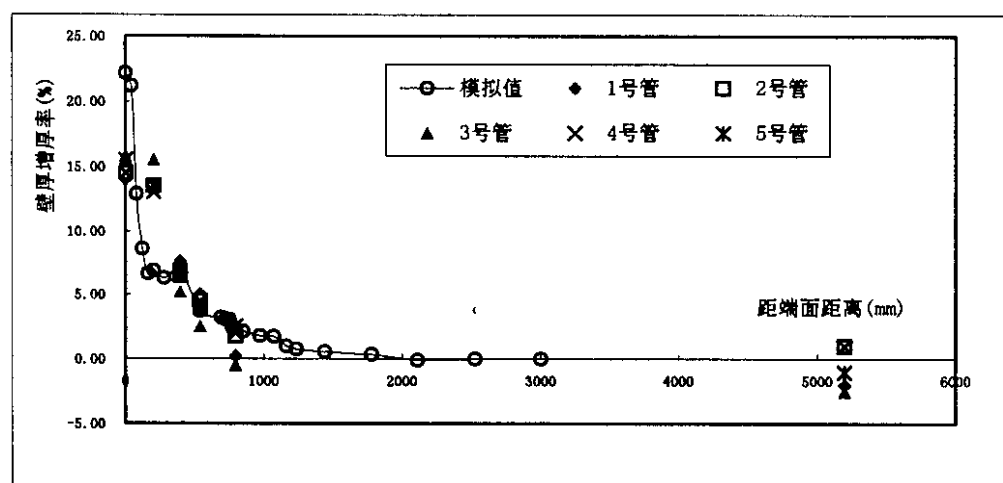


图 4-4 Ø60.3*12.5mm 管尾部壁厚增厚模拟值与实测值比较

4.3 对 Ø42.4*5mm 管的模拟分析

本研究的主要模拟工作使用的是 MARC 有限元软件，前后处理使用的是 MENTAT 软件。模拟对象为国内某钢管生产企业 Ø42.4*5mm 管。

4.3.1 基本参数

孔型系：119AR

成品规格： $\Phi 42.4 \times 5\text{mm}$

连轧荒管规格： $\Phi 118 \times 5.75\text{mm}$

机架数：19

切头切尾长度：各 2500mm

轧制温度：900℃

摩擦系数：0.4

钢管材质及性能：以厂方提供的 37Mn5 数据为准。

4.3.2 模型建立、模拟方案及模拟结果分析

4.3.2.1 模型建立与模拟方案

为节约计算时间，模型机架间距取为 150mm，比实际机架间距的 310mm 小。这样不仅减少了计算时间，还能实现更多道次的连轧模拟。有关头尾增厚区的计算结果可以用模拟系数（实际机架间距除以模拟机架间距）来修正。

模型实现了全部机架的连轧模拟。

4.3.2.2 模拟结果分析

1. 钢管稳态壁厚在轧制过程中的变化

表 4-7 给出稳态轧制时钢管壁厚在各架的模拟值，并与原工艺值进行比较。从表中可见，轧后钢管稳态壁厚值为 4.95，与工艺要求值仅相差 0.05mm。

表 4-7 $\Phi 42.4 \times 5\text{mm}$ 管在各道次的稳态壁厚模拟值与工艺设计值

道次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
模拟值	5.78	5.81	5.79	5.68	5.51	5.41	5.34	5.22	5.14	5.06
工艺值	5.77	5.80	5.81	5.73	5.64	5.56	5.47	5.38	5.30	5.21
道次	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
模拟值	4.99	4.94	4.92	4.87	4.93	4.93	4.95	4.95	4.95	

4.3.1 基本参数

孔型系：119AR

成品规格： $\Phi 42.4 \times 5\text{mm}$

连轧荒管规格： $\Phi 118 \times 5.75\text{mm}$

机架数：19

切头切尾长度：各 2500mm

轧制温度：900℃

摩擦系数：0.4

钢管材质及性能：以厂方提供的 37Mn5 数据为准。

4.3.2 模型建立、模拟方案及模拟结果分析

4.3.2.1 模型建立与模拟方案

为节约计算时间，模型机架间距取为 150mm，比实际机架间距的 310mm 小。这样不仅减少了计算时间，还能实现更多道次的连轧模拟。有关头尾增厚区的计算结果可以用模拟系数（实际机架间距除以模拟机架间距）来修正。

模型实现了全部机架的连轧模拟。

4.3.2.2 模拟结果分析

1. 钢管稳态壁厚在轧制过程中的变化

表 4-7 给出稳态轧制时钢管壁厚在各架的模拟值，并与原工艺值进行比较。从表中可见，轧后钢管稳态壁厚值为 4.95，与工艺要求值仅相差 0.05mm。

表 4-7 $\Phi 42.4 \times 5\text{mm}$ 管在各道次的稳态壁厚模拟值与工艺设计值

道次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
模拟值	5.78	5.81	5.79	5.68	5.51	5.41	5.34	5.22	5.14	5.06
工艺值	5.77	5.80	5.81	5.73	5.64	5.56	5.47	5.38	5.30	5.21
道次	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
模拟值	4.99	4.94	4.92	4.87	4.93	4.93	4.95	4.95	4.95	

工艺值	5.12	5.04	4.95	4.95	4.98	4.99	4.99	5.0	5.0	
-----	------	------	------	------	------	------	------	-----	-----	--

图 4-5 给出了单道次壁厚变化率模拟值与工艺计算值的比较。从趋势上看，模拟值与工艺计算值是基本一致的，但模拟值波动性更大。在前两道次及后六道次，由于张力较小，钢管壁厚增加。而在其他道次钢管壁厚减小。在第四道次，模拟的减壁率明显偏高，原因是该道次的张力高于其他道次。

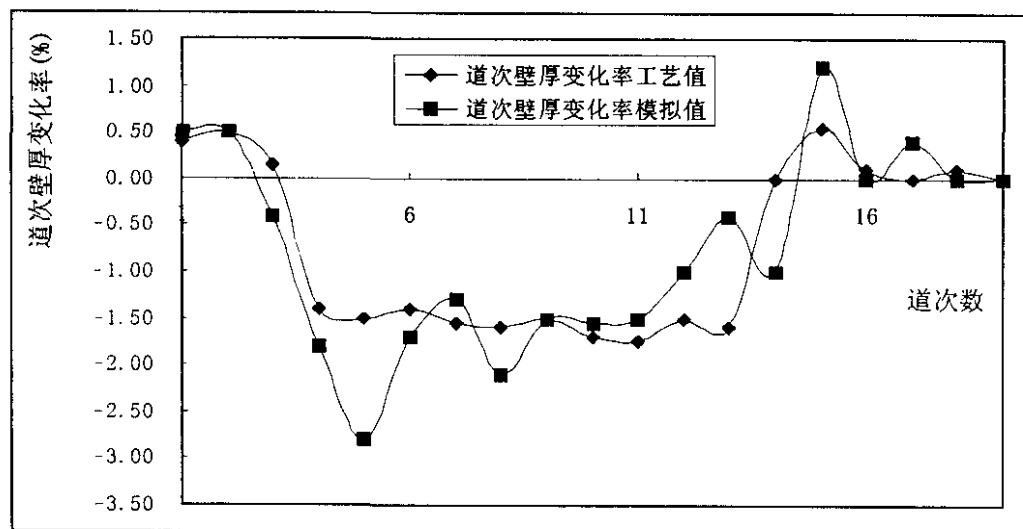


图 4-5 $\varnothing 42.4 \times 5\text{mm}$ 管道次壁厚变化率模拟值与工艺值比较

2. 头尾增厚区模拟结果

钢管头尾增厚区的壁厚分布模拟值分别如表 4-8，表 4-9 所示。其中端面距离已采用模拟系数 2.0667(310/150)进行了修正。头尾壁厚增厚区增厚率的比较如图 4-5 所示。从图中可以看出，头尾壁厚增厚的情况基本相同。

表 4-8 $\varnothing 42.4 \times 5\text{mm}$ 管头部增厚区的壁厚分布模拟值

距端面距离(mm)	0	37	66	116	279	362
壁厚模拟值(mm)	9.24	8.51	8.02	7.48	7.43	7.23
增厚率(%)	86.67	71.92	62.02	51.11	50.10	46.06
距端面距离(mm)	510	694	930	1135	1409	1653
壁厚模拟值(mm)	6.70	6.18	5.72	5.62	5.31	5.22
增厚率(%)	35.35	24.85	15.56	13.54	7.27	5.45
距端面距离(mm)	2009	2244	2697	3079	3753	5000
壁厚模拟值(mm)	5.14	5.03	5.00	4.95	4.94	4.95
增厚率(%)	3.84	1.62	1.01	0	-0.20	0

表 4-9 $\varnothing 42.4 \times 5\text{mm}$ 管尾部增厚区的壁厚分布模拟值

距端面距离(mm)	0	37	66	95	157	260	422
壁厚模拟值(mm)	8.6	8.33	7.71	7.49	7.28	7.23	6.6
增厚率(%)	73.74	68.28	55.76	51.31	47.07	46.06	27.73
距端面距离(mm)	597	736	866	1133	1364	1598	2114
壁厚模拟值(mm)	5.95	5.57	5.41	5.30	5.25	5.13	5.08
增厚率(%)	20.2	12.53	9.29	7.07	6.06	3.64	2.63
距端面距离(mm)	2383	2651	3022	3391	3749	4553	5000
壁厚模拟值(mm)	5.01	5.00	4.98	4.97	4.95	4.95	4.95
增厚率(%)	1.21	1.01	0.61	0.40	0	0	0

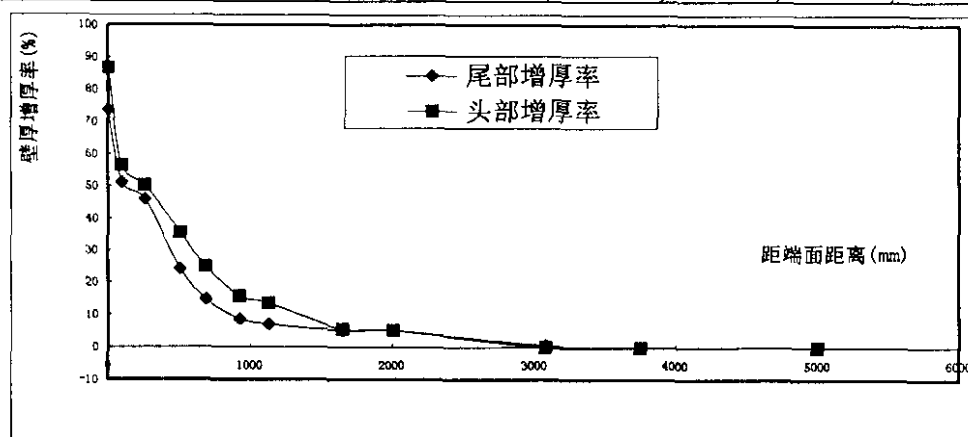


图 4-6 头尾壁厚增厚区增厚率比较

从图 4-6 可见，增厚区长度约为 3500mm，在工艺切头尾长度 2500mm 处，增厚率约为 1.5%，壁厚值在允许的公差范围之内。

4.4 壁厚变化规律分析

在进行了上述主要针对头尾增厚的仿真工作之后，希望找出影响壁厚变化的各参量与壁厚之间的关系。

为此，首先必须分析各影响参量。采用相似理论分析方法，确定张力减径过程中每个道次存在的如下各基本参量：

1. 前张力系数 x_0 ;
2. 后张力系数 x_1 ;
3. 入口钢管尺寸特性，以 d_0/s_0 表示;
4. 道次减径量，以 $\Delta d/d_0$ 表示;

5. 轧辊大小影响因子, 以 R/d_0 或接触角 α 表示, $\alpha = (1 - \Delta d/2R)^{\frac{1}{2}}$ 。

6. 壁厚变化量, 以 $\Delta s/s_0$ 表示。

据相似理论, 有:

$$\Delta s/s_0 = f(x_0, x_1, d_0/s_0, \Delta d/d_0, R/d_0) \quad (4-12)$$

对其进行级数展开。利用仿真得到的大量模拟数据取前面的数十项进行逐步回归。逐步回归的方法是从众多的项中选出最显著的项, 得到回归关系式, 然后从剩余的项中再选出最显著的项, 引入回归公式。对公式中的各项进行检查, 剔除不显著的项。这样逐步引入, 逐步剔除, 直至既无显著的项可引入, 亦无不显著的项可以剔除。最后得到最佳的回归公式, 公式中既包含了所有显著的项, 又不包含不显著的项。所得公式如下:

$$\begin{aligned} S_1 = & ((3.868/1000 - 3.7217 * X_0 - 0.2826 * (d_0/s_0) * X_1 - 0.1331 * X_0 * (\Delta d/d_0) \\ & - 3.5683/10000 * (d_0/s_0)^3 + 1.3193/1000 * (d_0/s_0)^2 * (\Delta d/d_0) \\ & + 8.4818/1000 * (d_0/s_0)^2 * (D_i/2d_0) - 0.8784 * X_0 * (D_i/2d_0)^2 \\ & - 5.5633/100 * (D_i/2d_0)^2 * (\Delta d/d_0)) / 100 + 1) * S_0 \end{aligned} \quad (4-13)$$

该公式相关系数 $R=0.9745$, 显著检验值 $F=151$, 属高度显著及相关。

公式(4-13)为计算壁厚的经验公式。当式中各参量已知时, 采用一定计算方法, 可以求得钢管在各道次的壁厚值。

从公式(4-13)可以看出, 相对于钢管尺寸, 轧辊半径的大小对壁厚变化率有明显的影响。实际的张力减径过程中, 钢管直径逐步减小, 轧辊半径却逐步增加, 使 R/d_0 值不断上升, 壁厚变化规律将产生明显变化。如果忽略这个因素, 将导致对各道次壁厚变化计算与实际不符, 直接影响张力分布的合理性。

4.3 本章小结

本章介绍了采用商用有限元软件 MARC 进行的张减过程仿真工作。对国内某钢管企业 $\varnothing 60.3 \times 12.5\text{mm}$ 管及 $\varnothing 42.4 \times 5\text{mm}$ 管在稳态轧制条件下壁厚变化、头尾壁厚增厚进行了模拟, 并与生产实测数据进行了比较, 模拟结果精度较高。利用仿真得到的大量模拟数据, 采用相似理论和逐步回归方法, 建立了计算各道次钢管壁厚的经验公式。

第五章 对传统张力减径工艺设计的修正

5.1 传统张力减径工艺设计方法

5.1.1 传统张力减径工艺设计方法的基本思路

传统张减工艺设计的基本思路为：

1. 已知基础数据： d_0 ； s_0 ； d_1 ； s_1 ； T ； μ ； D_g ； C_t ； v_0 。

其中：

d_0 、 s_0 为荒管直径和壁厚，mm；

d_1 、 s_1 为成品管直径和壁厚，mm；

T 为平均轧制温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

C_t 为尺寸热修正系数，宝钢取为 1.01；

v_0 为轧件入口轧制速度，mm/s。

2. 确定总道次数 N 。

3. 进行减径率的分配，确定各架孔型直径 d_i 。

4. 进行孔型设计。

5. 求出平均张力系数 x_{1m} 。

6. 各道次张力系数 x_{1mi} 。

7. 求出各道次钢管的壁厚 s_i 。

8. 确定各道次轧辊转速 n_i 。

5.1.2 传统张力减径工艺设计步骤

5.1.2.1 确定总变形道次数 N

张力减径机的总道次数由平均减径率来确定。平均减径率的选取应考虑荒管尺寸、成品管尺寸精度、成品管表面质量、轧辊寿命、孔型共用性、最大架次限制等因素。

第五章 对传统张力减径工艺设计的修正

5.1 传统张力减径工艺设计方法

5.1.1 传统张力减径工艺设计方法的基本思路

传统张减工艺设计的基本思路为：

1. 已知基础数据： d_0 ； s_0 ； d_1 ； s_1 ； T ； μ ； D_g ； C_t ； v_0 。

其中：

d_0 、 s_0 为荒管直径和壁厚，mm；

d_1 、 s_1 为成品管直径和壁厚，mm；

T 为平均轧制温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

C_t 为尺寸热修正系数，宝钢取为 1.01；

v_0 为轧件入口轧制速度，mm/s。

2. 确定总道次数 N 。

3. 进行减径率的分配，确定各架孔型直径 d_i 。

4. 进行孔型设计。

5. 求出平均张力系数 x_{1m} 。

6. 各道次张力系数 x_{1mi} 。

7. 求出各道次钢管的壁厚 s_i 。

8. 确定各道次轧辊转速 n_i 。

5.1.2 传统张力减径工艺设计步骤

5.1.2.1 确定总变形道次数 N

张力减径机的总道次数由平均减径率来确定。平均减径率的选取应考虑荒管尺寸、成品管尺寸精度、成品管表面质量、轧辊寿命、孔型共用性、最大架次限制等因素。

$$n = \frac{\ln\left(\frac{d}{d_0}\right)}{\ln(1-\rho_m)} + q \quad (5-1)$$

其中：n 为总机架数

ρ_m 为工作机架的平均减径率

q 是一个与张力升起与降落有关的值，通常在 2~4 之间。张力升起与降落越快，此值越小。

5.1.2.2 分配各道次的减径量

建立张力机架、工作机架、成品机架的减径量分配见节 3.1 的论述。

5.1.2.3 孔型设计

孔型参数的设计见节 3.3 的论述。

5.1.2.4 确定平均张力系数 x_m

传统张减工艺设计方法把复杂的三维变形过程简化为一个点应力应变状态，该点应力应变状态值为三维方向上的平均值。在该点采用 E.西贝尔等的金属流动理论可以得到：

$$\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_\theta} = \frac{2x_{1m}(t-1) + (1-2t)}{x_{1m}(1-t) - (2-t)} \quad (5-2)$$

$$\text{令 } k = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_\theta} = \ln\left(\frac{s_0}{s_1}\right) / \ln\left(\frac{d_0 - s_0}{d_1 - s_1}\right) \quad (5-3)$$

$$\text{令 } v = \frac{s_0 + s_1}{d_0 + d_1} \quad (5-4)$$

经变换得：

$$x_{1m} = \frac{(1-2v) + k(2-v)}{k(1-v) - 2(v-1)} \quad (5-5)$$

5.1.2.5 分配张力系数

张力系数是各机架中钢管所受张力（张应力）大小的表征，从而也就是该机架中

钢管壁厚变化程度的象征。张力系数大，则壁厚减薄就大；反之减壁量大，则张力系数也必然大。张力系数实际上是壁厚变化的一种直观的衡量方式，但由于减壁量的合理与否不如张力系数那样直观，因而张力系数常常作为检验与修正减壁量分配的一种有效方式。

各机架的张力系数，应当符合下面的条件：

1. 在轧机性能及实际变形所允许的情况下，应当使张力系数在尽可能多的机架中达到最大值。
2. 张力系数在所有各机架间应当平滑过渡。
3. 张力系数值必须限定在一定范围内，以保证轧制的顺利进行。其最大值一般在 0.65~0.85 之间波动，轧制温度高时，取下限。
4. 张力系数的分配针对不同的轧机性能、管坯规格等具体情况有不同的方法，没有完全固定的规律。

规定 i 与 $i+1$ 机架间管段上承受的张力为管子在第 i 机架的前张力， i 与 $i-1$ 机架间管段上承受的张力为管子在第 i 机架的后张力。某机架前后张力系数的算术平均值，就是作用与该机架的平均张力系数 x_{1i} 。求全部机架平均张力系数的公式为 (5-5)。按照上述关系求得的平均轴向张力系数不能大于 0.65，否则管子有可能拉断；同时平均张力系数也必须大于零，以防止机架间产生轴向压力而出现堆钢的危险。经验指出，所选取的轴向张力越大，则钢管多边形化的可能性就越大，因此要选择最佳的轴向张力以抑制多边形的形成。通常，轧制薄壁管时采用较大的轴向张力，轧制厚壁管时采用较小的轴向张力，再配上正确的孔型形状，就可以生产出内孔相当圆的钢管。由于钢管在首架机架前和末架机架后的张力为零，其张力是在张力升起机架中递增上去的，而后又在张力降落机架中递减为零，所以这些机架的张力系数 x_i 小于机组的平均张力系数 x_{1i} 。由此可见，工作机架的张力系数就必须大于机组平均张力系数 x_{1i} ，并且达到允许的最大张力系数 x_{1max} 。

单机架最大张力系数 x_{1max} 可由下式计算：

$$x_{1max} = \frac{x_{1m} \varepsilon_{\theta B} - \sum_0^n x_i \varepsilon_{\theta}}{\sum_0^k \varepsilon_{\theta}} \quad (5-6)$$

其中:

x_{1m} 为机组平均张力系数

ε_{θ} 为总周向变形, 由 (2-12) 式求得

$\sum_0^n x_i$ 为张力升起和降落机架的单机架张力系数

ε_{θ} 为单机架周向变形

$\sum_0^n \varepsilon_{\theta}$ 为具有最大张力系数 x_{1max} 的所有机架的周向变形之和

求得最大张力系数后, 可以按表 5-1 确定张力分布。

表 5-1 张力分布 (总机架数 ≥ 12)

机架号	$x_{1m}=0.00\sim 0.30$	$x_{1m}=0.31\sim 0.50$	$x_{1m}=0.51\sim 0.65$	$x_{1m}=0.66\sim 0.75$
1	$0.5 x_{1m}$	$0.4 x_{1m}$	$0.4 x_{1m}$	$0.4 x_{1m}$
2	x_{1max}	$0.8 x_{1m}$	$0.6 x_{1m}$	$0.6 x_{1m}$
3	x_{1max}	x_{1max}	$0.8 x_{1m}$	$0.8 x_{1m}$
4	x_{1max}	x_{1max}	x_{1max}	$0.9 x_{1m}$
5	x_{1max}	x_{1max}	x_{1max}	x_{1max}
...	...	...	...	...
n-5	x_{1max}	$0.8 x_{1m}$	$0.8 x_{1m}$	$0.8 x_{1m}$
n-4	$0.7 x_{1m}$	$0.6 x_{1m}$	$0.6 x_{1m}$	$0.6 x_{1m}$
n-3	$0.5 x_{1m}$	$0.4 x_{1m}$	$0.4 x_{1m}$	$0.4 x_{1m}$
n-2	$0.3 x_{1m}$	$0.3 x_{1m}$	$0.3 x_{1m}$	$0.2 x_{1m}$
n-1	$0.2 x_{1m}$	$0.2 x_{1m}$	$0.1 x_{1m}$	$0.1 x_{1m}$
n	$0.0 x_{1m}$	$0.0 x_{1m}$	$0.0 x_{1m}$	$0.0 x_{1m}$

5.1.2.6 确定各架钢管壁厚

求得各机架的钢管进口直径和出口直径, 以及按张力分布得出的各机架张力系数后, 即可利用径向变形和切向变形的比值公式来计算各机架的钢管壁厚。计算时可按机架顺序进行, 前一机架的出口壁厚即为下一机架的进口壁厚。

首先计算第一机架, 其进口壁厚即为荒管壁厚: $s_{01}=s_0$, 第一机架的出口壁厚 s_{11} 尚不知, 则先假设 $s_{11}=s_{01}=s_0$, 按下式求得切向变形 ε_{θ} 和平均壁径比 t 的初步值:

$$\varepsilon_{\theta} = \ln \frac{d_{10} - s_{10}}{d_{11} - s_{11}} = \ln \frac{d_0 - s_0}{d_{11} - s_0} \quad (5-7)$$

$$t = \left[\frac{s_{01}}{d_{01} - s_{01}} + \frac{s_{11}}{d_{11} - s_{11}} \right] / 2 = \left[\frac{s_0}{d_0 - s_0} + \frac{s_0}{d_{11} - s_0} \right] / 2 \quad (5-8)$$

将已知的第一机架的张力系数 x_{11} 和计算得到的 ε_r 、 t 值代入下面径向变形和周向变形的比值公式，从中可求出径向变形 ε_r 。

$$\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_\theta} = \frac{2x_{11}(t-1)+(1-2t)}{x_{11}(1-t)-(2-t)} \quad (5-9)$$

即：

$$\varepsilon_r = \frac{2x_{11}(t-1)+(1-2t)}{x_{11}(1-t)-(2-t)} \varepsilon_\theta \quad (5-10)$$

径向变形的定义为：

$$\varepsilon_r = \ln\left(\frac{s_{0t}}{s_{1t}}\right)$$

在壁厚变化不太大的情况下，可认为 ε_r 近似等于相对减壁量，于是得到：

$$\varepsilon_r = \frac{s_{01} - s_{11}}{s_{01}} = \frac{s_0 - s_{11}}{s_0} \quad (5-11)$$

即：

$$s_{11} = s_{01}(1 - \varepsilon_r) = s_0(1 - \varepsilon_r) \quad (5-12)$$

由式(5-12)就可初步得出第一机架的出口壁厚 s_{11} 值。将此值重新代入上述步骤进行计算，直至最终两次计算所得壁厚值的差值足够小。则最后一次求得的壁厚值即为第一机架的出口壁厚值。

以此方法逐架求出各架次钢管的平均壁厚，但一般最后求得的出口壁厚 s_{1n} 不一定正好等于成品壁厚 s_1 ，则以下式修正。

$$\Delta s = s_1 - s_{1n}$$

$$s_{1i}' = s_{1i} + \Delta s \times \ln\left(\frac{d_0}{d_{1i}}\right) / \ln\left(\frac{d_0}{d_1}\right) \quad (5-13)$$

在壁厚进行了人为修正后，张力系数分配实际上已发生了变化，应重新修正张力系数。但传统的设计方法没有进行这一步工作，因此所给出的张力分配与实际分布不一定一致。

5.1.2.7 确定速度制度

在完成变形计算和孔型设计之后，遵循体积不变定律，可对轧辊转速进行计算。

从第一机架到任一机架 i 的总延伸率 $\lambda_{1 \sim i}$ ：

$$\lambda_{1 \sim i} = \lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_i = \frac{F_0}{F_{1i}} \quad (5-14)$$

其中： F_0 为第一架荒管断面积

F_{1i} 为第 i 架出口钢管断面积

为计算轧辊转速，需引进轧辊等效工作直径的概念。当轧辊和钢管间不存在整体打滑时，总存在一个轧辊直径，其对应的轧辊线速度等于轧制速度，该直径定义为轧辊等效工作直径 D_i 。

$$D_i = D_g - c_i d_i \quad (5-15)$$

引入轧辊理想工作直径比值系数 f_i ：

$$f_i = \frac{D_g - 0.9d_0}{D_g - c_i d_{1i}} \quad (5-16)$$

速比 $n_i' = f_i \lambda_{1 \sim i}$

$n_0' = 1$

D_g 为轧辊理想直径，即轧辊轴线到轧制中心线的距离的两倍。一般 D_g 对某套张减机组是定值，宝钢机组为 330mm； c_i 为系数，指轧辊等效工作直径在孔型中的位置。 n_i' 是各架次相对“0”机架的相对转速，“0”机架是为计算方便所取的一个虚拟机架。

由入口轧制速度可以求出“0”机架轧辊转速：

$$n_0 = \frac{60V_0}{\pi(D_g - 0.9d_0)} \quad (5-17)$$

则其余各架轧辊转速为：

$$n_i = n_i' n_0 \quad (5-18)$$

前面在确定轧辊工作直径比值系数 f_i 时，是按张力恒定来考虑的。只有在张力恒定机架中的轧辊工作直径 D_i 可以近似的认为：

$$D_i = D_g - 0.9d_{1i} \quad (5-19)$$

对于张力升起机架，其轧辊工作直径将比上式计算的大；反之，对于张力降落机架，则变小。因此，导致张力建立机架速度设定过高，成品机架速度设定过低。为了

保证建立和卸除张力，张力建立机架和张力的下降机架的转速还应该进行修正，修正系数如下表 5-2:

表 5-2 轧辊转速修正系数

机架号	$x_{1m}=0.00\sim0.29$	$x_{1m}=0.30\sim0.43$	$x_{1m}=0.44\sim0.52$	$x_{1m}=0.53\sim0.59$	$x_{1m}\geq 0.6$
1	0.97	0.94	0.91	0.88	0.85
2	0.98	0.96	0.94	0.92	0.90
3	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95
4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
n-4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
n-3	1.010	1.010	1.010	1.010	1.010
n-2	1.016	1.016	1.016	1.016	1.016
n-1	1.022	1.022	1.022	1.022	1.022
n	1.028	1.028	1.028	1.028	1.028

至此完成了整个张力减径工艺设计。

5.2 传统工艺设计存在的主要问题

1.将复杂的三维变形问题简化成了一个点应力应变状态，虽然使问题得以方便求解，但是求解的精度必然受到限制。

2.实际的轧制过程是在速度制度下，张力和变形达到动态平衡。而在设计时是先给出张力分配，再确定转速制度，这样的转速制度能否产生力的平衡，不能得到直接的验证。这将使实际的张力值与设定值不符，其后果在某个机架可能产生钢管整体打滑或推钢，容易导致青线等缺陷的产生。打滑的产生也会进一步破坏张力平衡。

3.根据初始张力分布，求出各架壁厚分布，之后要对壁厚分布进行必要的修正，以使轧出的壁厚满足成品要求。但是壁厚修正后没有对张力分布重新修正。

4.确定各架轧辊工作直径位置时人为选取轧辊工作直径系数 c_i 均为 0.9，这将导致速度制度及张力制度设定不准确，特别在张力建立机架和张力的下降机架，这将导致产品质量问题。

5.设计壁厚的变化时，没有考虑孔型参数、轧辊大小及摩擦的影响。

5.3 对传统张力减径工艺设计方法的改进

5.3.2 张力减径工艺优化设计方法

5.3.2.1 设定初始张力系数分配

传统设计采用工作机架等张力系数法。这种方法存在的问题是其无法使各机架前后总张力平衡，导致轧制力矩升高，轧制状态不稳定，机架受到附加力矩。针对这种情况，提出采用工作机架等张力法，张力系数逐步升高，但各架前后总张力相等，轧制力矩下降，轧制状态稳定，并有利于断面性状的控制。但工作机架等张力法受到张力系数大小的限制，当无法采用时，仍采用工作机架等张力系数法。

工作机架等张力法各架张力系数确定如下。张力建立机架数为 m 架，成品机架数为 n 架，总架次数为 N 。

$$d_m = (d_0 + d) / 2$$

$$s_m = (s_0 + s) / 2$$

其中： d_m 、 s_m 为平均直径和壁厚

第一工作机架张力系数表示为 x_0 ，其余各架均以其为基础进行设定。

$$X_{li} = x_0 \left(\frac{i}{m} \right)^{1.2} \quad i = 1 \sim m \quad (5-20)$$

$$X_{li} = x_0 \frac{d_m - s_m}{d_i - s_m} \quad i = m+1 \sim N-n \quad (5-21)$$

$$X_{li} = x_0 \frac{d_m - s_m}{d_{N-n} - s_m} \left(\frac{N-i}{n} \right)^{1.2} \quad i = N-n+1 \sim N \quad (5-22)$$

这样即可以 x_0 为基础确定各架张力系数。

5.3.2.2 确定各道次壁厚

确定张力系数之后，可以依据公式（4-2）逐道次求出壁厚分布。如果求出的成品壁厚与要求不符，修正 x_0 值，直至满足要求为止。

5.3 对传统张力减径工艺设计方法的改进

5.3.2 张力减径工艺优化设计方法

5.3.2.1 设定初始张力系数分配

传统设计采用工作机架等张力系数法。这种方法存在的问题是其无法使各机架前后总张力平衡，导致轧制力距升高，轧制状态不稳定，机架受到附加力矩。针对这种情况，提出采用工作机架等张力法，张力系数逐步升高，但各架前后总张力相等，轧制力矩下降，轧制状态稳定，并有利于断面性状的控制。但工作机架等张力法受到张力系数大小的限制，当无法采用时，仍采用工作机架等张力系数法。

工作机架等张力法各架张力系数确定如下。张力建立机架数为 m 架，成品机架数为 n 架，总架次数为 N 。

$$d_m = (d_0 + d) / 2$$

$$s_m = (s_0 + s) / 2$$

其中： d_m 、 s_m 为平均直径和壁厚

第一工作机架张力系数表示为 x_0 ，其余各架均以其为基础进行设定。

$$X_{li} = x_0 \left(\frac{i}{m} \right)^{1.2} \quad i = 1 \sim m \quad (5-20)$$

$$X_{li} = x_0 \frac{d_m - s_m}{d_i - s_m} \quad i = m+1 \sim N-n \quad (5-21)$$

$$X_{li} = x_0 \frac{d_m - s_m}{d_{N-n} - s_m} \left(\frac{N-i}{n} \right)^{1.2} \quad i = N-n+1 \sim N \quad (5-22)$$

这样即可以 x_0 为基础确定各架张力系数。

5.3.2.2 确定各道次壁厚

确定张力系数之后，可以依据公式（4-2）逐道次求出壁厚分布。如果求出的成品壁厚与要求不符，修正 x_0 值，直至满足要求为止。

5.3.2.3 确定各架次轧辊转速

设定初始轧辊工作直径系数 c_i 值, 使 $c_i=0.9$, 以传统方法求出速度制度。

5.3.2.4 力平衡方程验证

将上述结果代入轴对称模型的力平衡方程进行验证, 如满足说明设定的张力可以实现, 如不满足, 重新修正张力系数, 重复上述计算, 直至满足力平衡方程为止。

$$\begin{aligned} & X_{1i} * A_0 / \lambda_{1i} - x_{0i} * A_0 / \lambda_{0i} + \pi * \mu * (1 - x_{1i}) * 2 * s_{1i} / d_{1i} * (\theta_{0i} - \theta_{1i}) * \underline{R}_i * (d_{0i} + d_{1i}) / 2 - \pi * \mu \\ & * (1 - x_{1i}) * 2 * s_{1i} / d_{1i} * \theta_{1i} * \underline{R}_i * (d_{1i} + d_{1i}) / 2 - \pi * (1 - x_{1i}) * 2 * s_{1i} / d_{1i} * \theta_{0i} * \underline{R}_i * (d_{0i} + d_{1i}) / 2 * \theta \\ &_{0i} / 2 = 0 \end{aligned} \quad (5-23)$$

轧辊工作半径 R 及轧辊平均半径 $\underline{R}$ 的意义不同, 轧辊工作半径指轧辊线速度与轧辊速度 (钢管在各架的出口速度) 相等时对应的轧辊半径, 用来确定轧辊转速制度。轧辊平均半径则是在轴对称模型中, 对应于轧制中性面的半径。两者的定义分别表示为:

$$R_i = (D_i - c_i * d_i) / 2 = V_{1i} / \omega_i \quad (5-24)$$

$$\underline{R}_i = [k_i * V_{0i} + (1 - k_i) * V_{1i}] / \omega_i \quad (5-25)$$

其中: ω_i 为轧辊角速度, 1/s

k_i 为中性角与接触角的比值

$\underline{R}_i$ 与 R_i 的关系通过 c_i 及 k_i 确定。实际上, 在张力建立机架, 变形区主要是前滑区, 轧辊等效工作直径靠近孔型环部, c_i 值接近 $\cos 0^\circ = 0.5$ 。在工作机架, 轧辊等效工作直径靠近孔型中部, c_i 值接近 $\cos 30^\circ = 0.866$, 近似取为 0.9; 当前张力比后张力明显大时, 即相当于在张力建立机架需要较大后滑区来平衡张力, 轧辊工作直径靠近轧辊辊环处, c_i 值接近 0.5, 此时对应的轴对称模型中性角接近接触角, k_i 值接近于 1。当后张力比前张力明显大时, 即相当于在成品机架需要较大前滑区来平衡张力, 轧辊工作直径靠近轧辊辊底处, c_i 值接近 1。而此时对应的轴对称模型中性角接近零, k_i 值接近于 “0”。则 $c_i=1$ 与 $k_i=0$ 相对应。在工作机架, 张力越大, 后滑区越大, 轧辊工作直径越靠近轧辊辊环处, c_i 值越小, k_i 值越大。

5.3.3 张减优化工艺设计步骤

1. 分配张力系数。

2. 计算壁厚，以出口壁厚为收敛判据，与张力分配形成迭代计算，直至最末机架出口壁厚等于成品壁厚为止。

3. 取初值 $c_i=0.9$ ，由传统算法求出各架轧辊转速 n_i 。

4. 采用轴对称模型，验证力平衡方程。

$$\underline{R}_i = \frac{d_{0i} - d_{1i}}{2(1 - \cos \theta_{0i})} \quad (5-26)$$

$$\theta_{0i} = \cos^{-1} \left(1 - \frac{d_{0i} - d_{1i}}{2\underline{R}_i} \right) \quad (5-27)$$

$$d_{ki} = d_{1i} + 2\underline{R}_i(1 - \cos \theta_{ki}) \quad (5-28)$$

在中性面处，轧辊线速度与轧件线速度相等。

$$\omega_i \underline{R}_i = V_{1i} \left(1 - \frac{\theta_{ki}}{\theta_{0i}} \right) + V_{0i} \frac{\theta_{ki}}{\theta_{0i}} \quad (5-29)$$

$$V_{1i} = V_{0i} \lambda_{1i} \quad (5-30)$$

$$V_{0i} = V_{01} \lambda_{0i} \quad (5-31)$$

5. 计算轧辊转速系列。采用迭代法，步骤如下：

(1). 设定初始 $k_i = \theta_{ki} / \theta_{0i}$ 比值；

(2). 以式(5-26)求出 $\underline{R}_i$ ；

(3). 以式(5-27)求出 θ_{0i} ；

(4). 由 k_i 比值求出 θ_{ki} ；

(5). 由式(5-28)求出 d_{ki} ；

(6). 代入力平衡方程(5-23)，如不满足平衡方程，改变 $\theta_{ki} / \theta_{0i}$ 比值，重复上述计算，直至满足平衡方程为止。这样可以确定各架 θ_{ki} 、 k_i 值，由此可以求出新的 c_i 值。计算如下：

$$k_i \frac{d_{ki} + d_{1i}}{d_{0i} + d_{1i}} = \frac{l_2 + l_3}{l_1 + l_2} \frac{3\alpha_i}{\pi} \quad (5-32)$$

$$l_1 = \sqrt{R_{\max,i}(b_{i-1} - a_i)} \quad (5-33)$$

$$l_2 = \sqrt{d_{\min,xi}(a_{i-1} - b_i)} \quad (5-34)$$

$$l_3 = d_{mi}\alpha_i \quad (5-35)$$

$$l_4 = \frac{\pi}{3}d_{mi} \quad (5-36)$$

$$l_5 = l_1 + \frac{(l_2 - l_1)(l_4 - l_3)}{l_4} \quad (5-37)$$

其中： L_1 为辊缝处变形区长度，当 $b_{i-1}-a_i \leq 0$ ，时，取 0。

L_2 为辊底处变形区长度

L_3 为前滑变形区宽度

L_4 为变形区宽度

L_5 为中性面处变形区长度

(7).将求得的新 c_i 值代替初值 0.9，重复(1)~(7)，直至两次求得的 c_i 值之差小于 0.001

至此，完成全部张减机轧辊转速设计。

以上五个步骤完成张力减径工艺设计。

5.4 本章小结

本章介绍了进行张减工艺设计的传统方法，指出其存在的主要问题。针对这些问题，提出了传统设计法的修正方法。详细介绍了使用这种新方法进行张力分配，壁厚分布，轧辊转速的新的算法。

第六章 钢管张力减径工艺设计与仿真软件的开发

6.1 开发背景

在热轧无缝钢管的生产中，张力减径是影响成品管质量的最后一道成型工序。张力减径工艺的好坏对成品管的质量有着重要的影响。传统张力减径工艺设计方法以半解析半经验为主，计算量大，计算过程复杂，难于满足所有约束条件，计算精度无法保证。计算机技术的引入可以有效地解决上述问题。对于多数材质，在张力减径变形过程中的基本变形机理相同，这样就可以建立统一的数学模型进行计算机处理，而且借助一定的优化方法，使设计结果可靠性大为增加，计算精度也大大提高。同时，利用计算机仿真技术，可以模拟整个张力减径过程中各工艺参数的变化，极大地节约了在线实验的资金与时间支出。

6.2. 软件设计思想

6.2.1 基本数学模型

工程软件的开发必须建立在对所研究对象深刻理解的基础上。张力减径过程是三维变形，过程复杂，涉及的机架数一般多达数十架。整个变形过程伴随着应力场、应变场、速度场、温度场的变化，过程参量多，各过程参量之间相互影响，相互制约。因此合理选取数学模型是张减工艺设计与仿真软件开发的关键所在。本软件系统采用的主要数学模型既有建立在钢管减径变形理论和张减设备原理基础上的理论公式，也有经过了大量生产实际检验的经验公式，具有可靠性。本软件使用的主要数学模型如表 6-1 所示。

6.2.2 系统结构

本软件系统包括两大系统：工艺设计系统和仿真系统。采用面向对象的 Visual Basic 语言编程，不同功能由各自独立的模块实现，各模块之间可以实现相互调用。模块化程序设计的好处在于：使系统结构简单明了，同时使程序易于维护，提高了程序的共用性。系统结构图如图 6-1 所示。

第六章 钢管张力减径工艺设计与仿真软件的开发

6.1 开发背景

在热轧无缝钢管的生产中，张力减径是影响成品管质量的最后一道成型工序。张力减径工艺的好坏对成品管的质量有着重要的影响。传统张力减径工艺设计方法以半解析半经验为主，计算量大，计算过程复杂，难于满足所有约束条件，计算精度无法保证。计算机技术的引入可以有效地解决上述问题。对于多数材质，在张力减径变形过程中的基本变形机理相同，这样就可以建立统一的数学模型进行计算机处理，而且借助一定的优化方法，使设计结果可靠性大为增加，计算精度也大大提高。同时，利用计算机仿真技术，可以模拟整个张力减径过程中各工艺参数的变化，极大地节约了在线实验的资金与时间支出。

6.2. 软件设计思想

6.2.1 基本数学模型

工程软件的开发必须建立在对所研究对象深刻理解的基础上。张力减径过程是三维变形，过程复杂，涉及的机架数一般多达数十架。整个变形过程伴随着应力场、应变场、速度场、温度场的变化，过程参量多，各过程参量之间相互影响，相互制约。因此合理选取数学模型是张减工艺设计与仿真软件开发的关键所在。本软件系统采用的主要数学模型既有建立在钢管减径变形理论和张减设备原理基础上的理论公式，也有经过了大量生产实际检验的经验公式，具有可靠性。本软件使用的主要数学模型如表 6-1 所示。

6.2.2 系统结构

本软件系统包括两大系统：工艺设计系统和仿真系统。采用面向对象的 Visual Basic 语言编程，不同功能由各自独立的模块实现，各模块之间可以实现相互调用。模块化程序设计的好处在于：使系统结构简单明了，同时使程序易于维护，提高了程序的共用性。系统结构图如图 6-1 所示。

孔型设计模块提供了传统设计方法和基于延伸率的优化设计方法。传统设计方法以减径率为依据来分配变形量，在孔型设计过程中不考虑壁厚的影响。基于延伸率的优化设计方法以延伸率为依据分配变形量，综合考虑壁厚和外径的影响，这种设计方法是本软件提出的一种优化设计方法。孔型设计模块可以设计椭圆孔型、圆孔型、中间孔型，相应的辊缝充满度分别为正宽展、负宽展和零宽展。同时可以得到其他必要的各架孔型参数：孔型直径，孔型长半径，孔型短半径，椭圆度，辊缝充满度，孔型加工参数等，这些参数可以在整个系统内被其他模块任意调用。

表 6-1：本软件使用的主要数学模型

序号	数学模型		基本原理与特点
1	变形分配算法	基于减径率	以减径率为分配依据，不考虑壁厚的影响。
		基于延伸率	以延伸率为分配依据，考虑壁厚的影响。
2	张力分配算法	等张力系数法	工作机架张力系数相等。
		等张力法	工作机架张力相等，张力系数逐架升高。
3	壁厚控制算法	传统方法	以周向、径向应变，张力系数为参量确定各架出口入口壁厚。
		优化算法	依据相似理论，采用逐步回归方法得到经验公式，结合张力分配确定各架出口入口壁厚。
4	轧辊转速系列算法	传统算法	假定各架轧辊工作位置都相同，以累积延伸系数为依据。
		变工作直径系数法	求得各架实际工作直径系数，以实际累积延伸系数为依据。
5	壁厚模拟算法	逐点跟踪法	一种基于本文工艺设计体系的算法，计算时间大为缩短。

轧辊转速设定模块采用传统方法和变工作直径系数法（对传统方法的修正）设定轧辊转速。此时得到的轧辊转速是对应稳态轧制条件的。在此模块中又包含了若干子过程，完成张力分配，壁厚控制及轧辊转速设定等工作。张力系数的计算可以采用工作机架等张力系数法和工作机架等张力法。其中等张力法在分配张力系数时由于张力系数在工作机架逐架升高，所以有可能超过设备所允许的最大张力，此时系统会自动给出提示采用等张力系数法重新进行张力分配。壁厚控制子过程可以采用传统和优化两种算法。轧辊转速子过程可以采用传统算法和变工作直径法进行设计。各子过程之间通过参数调用相互衔接。

根据管子轧制过程中张力的建立情况，仿真系统的静态模块和动态模块分别对应

轧制过程中管子的稳态轧制段和非稳态轧制段。所谓稳态轧制段是指在设定的轧辊转速系列下，建立起全张力后管子的轧制情况。所谓非稳态轧制段是指在设定的轧辊转速系列下，尚未建立起全张力时管端增厚端的轧制情况。各种仿真功能由各自独立的模块实现。

基本输入输出模块建立在 VB 语言的图形用户界面（GUI）的基础上。

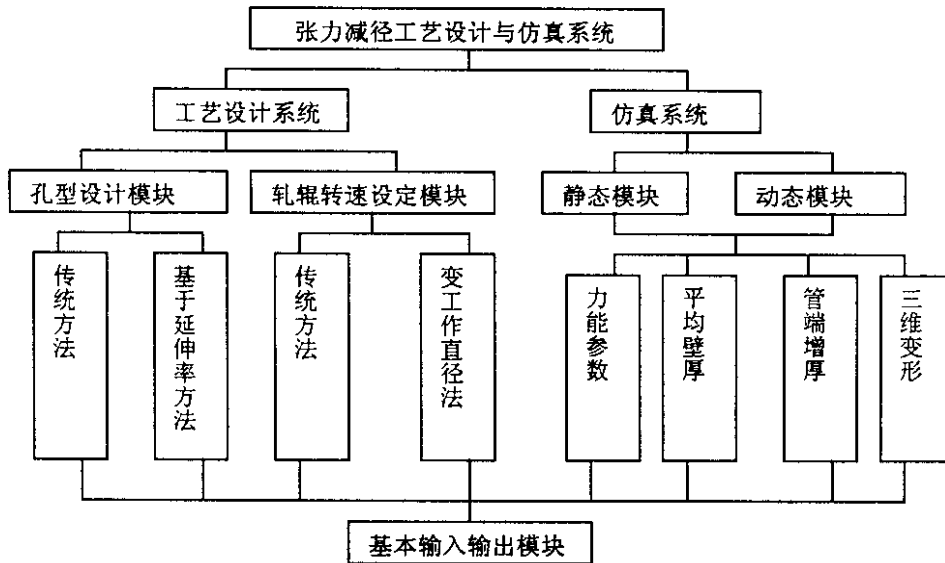


图 6-1 系统结构图

6.2.3 系统功能

本软件以国内某钢铁厂连轧无缝钢管机组的典型产品及基本工艺条件为基础，以通用性为基本设计原则，可以实现张力减径工艺设计与仿真两项基本任务。

工艺设计系统可以实现的主要功能为：

1) 用户输入必要参数之后，自动完成孔型直径沿建张机架、工作机架、成品机架的分配。

2) 张力系数在全部机架上的分配。

3) 圆孔型、椭圆孔型及中间孔型的设计。

4) 加工各机架孔型所需刀具参数。

5) 各架轧辊转速和管子的出口速度。

仿真系统可以实现的主要功能为：

1) 管子的平均壁厚在全部机架上的变化情况（静态，动态）。

- 2) 管端增厚区的形成过程及累积管端增厚区的长度。
- 3) 模拟力能参数, 轧机参数。

6.3 软件使用简单说明

本软件系统采用 Windows 向导风格, 将整个工艺设计和仿真过程分解为相互独立又相互衔接的若干步, 用户界面友好, 操作简单, 每一步用户只需输入或选择少量参数, 易于人机交互。当用户在任何步骤需要帮助时可以借助本软件的帮助系统获得必要的信息并继续完成后续工作。当用户输入的数据有误, 或出现运行错误, 逻辑错误等情况时, 系统会自动报错, 并给出问题出现的可能原因。当用户完成了所有的设计与仿真工作之后可以把设计和仿真结果保存到计算机上以备将来使用。

进入工艺设计系统之后, 选择一种工艺设计方法, 点击“下一步”继续进行设计。进入一系列选择工艺参数的窗体。所有的参数输入完毕并确认之后, 输出设计结果。按需要的文件格式保存设计结果。仿真系统的使用与工艺设计系统的使用类似。

6.4. 软件设计中存在的一些问题和解决方法

用户在使用计算机解决工程问题时, 首先是要借助一定的软件。软件设计的好坏直接关系到用户解决问题的能力。工程软件的编制, 首先要满足工程计算的要求, 即: 计算过程的可靠性、计算结果的精度、尽量少的计算时间。其次, 在人机交互方面, 要考虑到用户使用的方便与否。

上述问题是本软件设计过程中必须要考虑的, 而且在本软件的设计过程中还有一些其他问题需要解决, 下面分别详细论述。

6.4.1 通用性

尽管不同钢管生产企业的张力减径机在轧机参数、孔型系列、传动方式等诸方面存在差异, 但以下因素的存在, 使设计张力减径工艺设计与仿真通用软件成为可能:

- 1) 对于多数材质, 张力减径过程中的基本变形机理相同;
- 2) 张减机组的构成相同, 一般都有张力建立机组, 工作机组, 成品机组。张力在建立张力机组逐架升高, 在工作机组等张力系数分配或等张力分配, 在成品机组逐架递减为零。减径率的分配与张力的分配类似;

3) 孔型形状均为具有一定椭圆度的椭圆孔型(所谓圆孔型事实上也具有一定的椭圆度), 其设计方法基本相同;

4) 设计轧辊转速系列时, 设计思路和设计方法基本相同。

那么, 上述设计方法均可以转化为一定的数学模型进行编程处理, 每一种设计方法和每一个设计步骤均设计为独立模块。在计算过程中涉及的一些参数, 可以设计为外部参数, 在计算过程中进行调用。不同的轧机参数和不同的工艺参数按值传递到模块中, 可以得到适合不同要求的设计结果。这种程序设计方法即体现了软件的通用性。当然这种通用性是建立在适合大多数用户的基础上的, 而非对所有问题都百分之百的适用。

6.4.2 计算方法

由于本软件是工程软件, 所以涉及到大量的工程计算, 反映在编程方面, 就是会有大量的多重循环和迭代计算, 而且很多时候是迭代内部会有循环, 或者在循环过程中有迭代计算; 同时, 由于存在大量的过程调用、模块调用、参数调用, 这些调用过程极易出错。因此, 选择合适的计算方法非常重要, 否则很可能导致计算过程不收敛或计算时间过长。本软件在设计过程中, 针对不同计算过程合理选择了不同的计算方法。经大量测试, 本软件计算过程稳定, 设计精度可以满足工程计算的要求, 并且计算时间较短。

6.4.3 人机交互

不同的软件有不同的界面风格。本软件考虑到张力减径过程中设计步骤较多而且是依次进行, 因此采用了 Windows Wizzard 的界面风格。用户在使用过程中每一步只须输入或确认少量参数即可。在设计过程中发现任何参数有误, 都可以及时地返回到当时参数输入的步骤, 进行修改或重新输入并继续进行设计。设计结果显示之后, 用户可以选择保存到硬盘, 以便日后调用。

6.5 讨论

1) 采用计算机进行工艺设计, 本软件建立了比较准确的数学模型, 采用了较为合理的计算方法, 其计算结果的精度和可靠性, 设计过程耗费的时间, 经大量测试都

要大大地优于半经验半解析的传统设计方法。

2) 利用本软件的仿真系统,可以预测一定规格的管子在轧制过程中的力能参数,轧机参数,壁厚的变化情况等,为用户制定合理的工艺制度提供可靠依据。

3) 本软件是以国内某钢管企业的张减机组为基础设计的。同时又具有通用性,无论是张减设备参数,如机架总数,建立张力机架数,工作机架数,成品机架数,机架间距,理想轧辊直径等,还是减径方案,既可以采用系统提供的默认值,也可以由用户自行输入或修改。本软件系统的数学模型适用于多种产品尺寸范围。

4) 在进一步的工作中,可以将张力减径新工艺,如壁厚控制 CEC 制度, WTCA 制度, WTCL 制度等嵌入到本软件中,针对现场管子的实际情况,为用户提供不同的壁厚控制方案,优化生产工艺。

6.6 程序运行的结果分析

本软件在编制过程中充分考虑了通用性,各模块相互独立。在进行工艺设计的各个步骤中有多种方法可供选择。分配变形量可以分别采用按减径率分配的传统方法和基于延伸率的新方法;分配张力可以分别采用等张力法和等张力系数法;分配壁厚可以分别采用传统算法和迭代的经验公式法;计算轧辊转速可以分别采用传统算法和变工作直径的新算法。这样,通过不同模块的组合,利用同样的已知参数,理论上就可以提供总共十六种工艺方案(事实上由于等张力法分配张力时有可能导致工作机组后部机架的张力系数过大,需要采用等张力系数法重新进行张力分配。因此,对于某些规格的管子本软件提供的工艺设计方案有可能少于十六种)。这其中必然包含最优的设计。那么可以通过后续计算机仿真程序的开发,从十六种工艺方案中选出最优化设计,这将大大改变目前设计方法的局限性,并且使设计结果更为合理。

6.6.1 采用传统张减工艺设计方法的设计结果

节 5.2 所述张减过程传统工艺设计方法是宝钢目前所采用的设计方法,本软件所提供的设计方法中包含这种设计方法。

以 $\varnothing 60.3 \times 12.5\text{mm}$ 管为例,宝钢工艺设计结果和本软件设计结果的比较分别见图 6-2, 图 6-3, 图 6-4 所示。图 6-2 为张力系数的比较,图 6-3 为壁厚分配的比较,

图 6-4 为轧辊转速的比较。

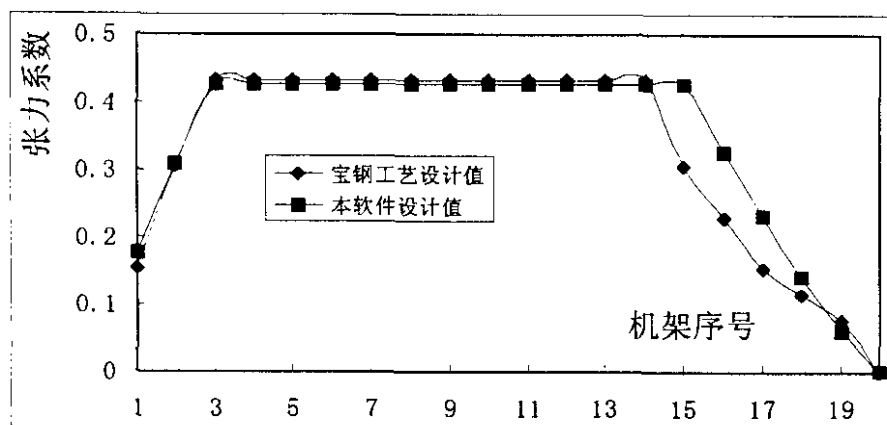


图 6-2 张力系数设计结果比较

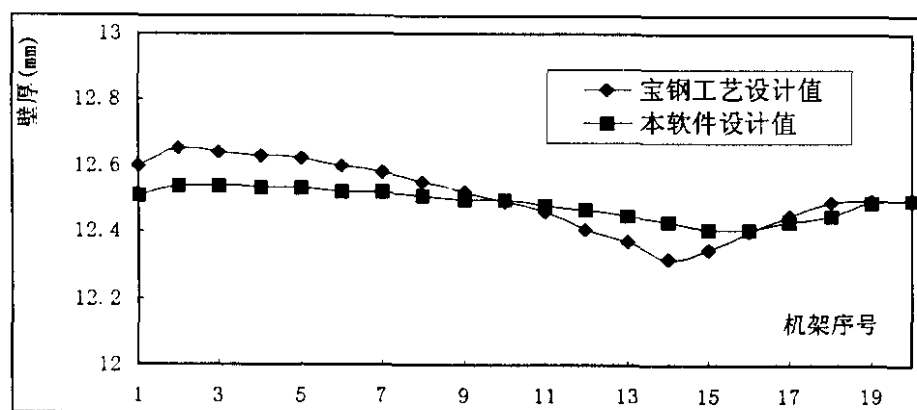


图 6-3 壁厚分配设计结果比较

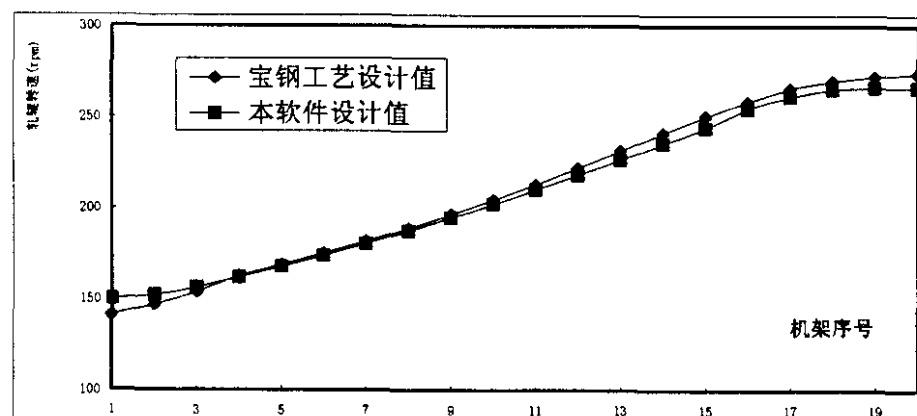


图 6-4 轧辊转速设计结果比较

从上图中可以看出，当采用传统设计方法时，本软件计算得到的设计结果与宝钢

目前采用的工艺设计值基本一致，说明本软件设计结果是可靠的。

6.6.2 等张力法与等张力系数法设计结果的比较

本软件设计采用了两种模型来进行张力分配，分别为等张力法和等张力系数法。

以 $\varnothing 42.4 \times 5\text{mm}$ 管为例，等张力法和等张力系数法设计结果如图 6-5 所示。从图中可以看出，两种张力分配方法在工作机组的平均张力系数相同（约为第十架的张力系数），但在整个工作机组的分配方式不同。

6.6.3 两种壁厚分配方法设计结果的比较

采用传统壁厚分配方法和改进的壁厚分配方法进行减壁量的分配，得到稳态轧制条件下管子壁厚的分布，两种方法减壁量的分配结果基本相同。采用两种壁厚分配算法的意义在于，当采用传统壁厚算法时，如果出口壁厚不符合成品尺寸要求，仅加一修正系数进行修正，而不对张力系数进行重新分配。而新的壁厚算法，将张力系数与壁厚迭代计算，当出口壁厚不符合成品尺寸要求时，保证每一次壁厚重新计算时，相应的张力分配也重新进行。图 6-6 给出 $\varnothing 42.4 \times 5\text{mm}$ 管采用两种壁厚算法相应的张力分配的比较。从图中我们可以看出，采用新壁厚算法所对应的张力分配要比传统方法对应张力系数小，造成这一现象的主要原因可能有：新方法中壁厚与张力形成迭代计算，而传统方法没有采用这种计算方法，因此有可能使张力分配偏大；另外，新壁厚算法是以壁厚作为收敛判据的，那么计算所得的张力值有可能与实际的张力分配不符。因为新的壁厚算法中张力分配与壁厚计算形成迭代计算，并且所得张力分配要经过力平衡方程的检验，因此，我们认为，采用新的壁厚算法所对应的张力分配更接近实际情况。

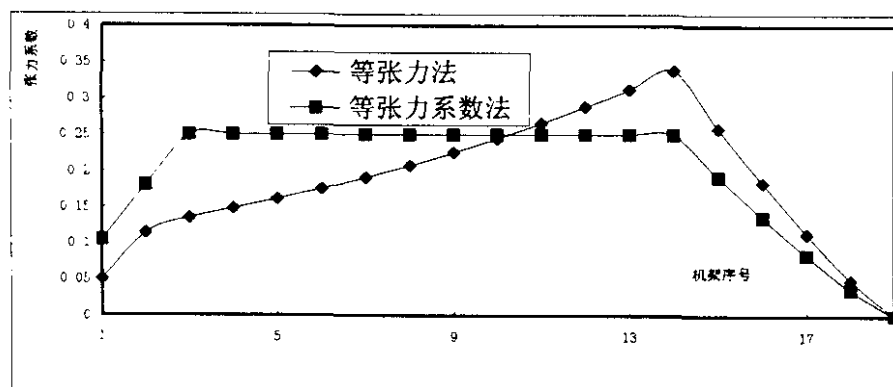


图 6-5 等张力法和等张力系数法设计结果比较

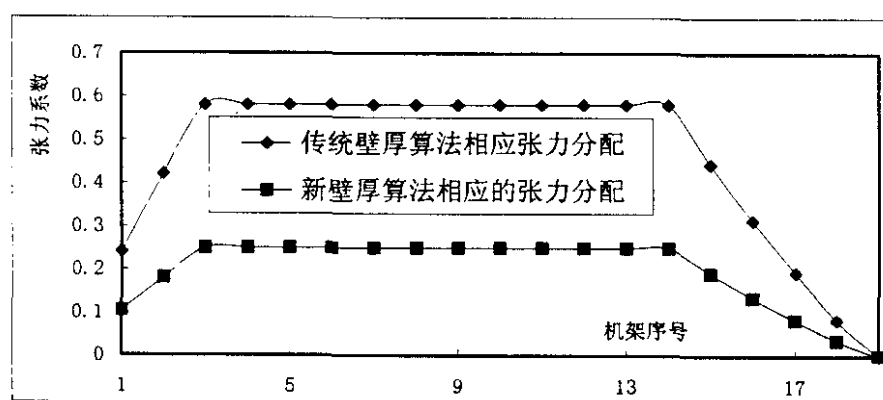


图 6-6 采用两种壁厚算法相应的张力分配的比较

6.6.4 两种轧辊转速设计方法设计结果的比较

修正的轧辊转速设计方法考虑了轧辊工作直径在实际轧制过程中的变化。而传统算法将各机架的工作直径视为定值。以 $\phi 60.3 \times 12.5\text{mm}$ 管子为例，两种设计方法得到的设计结果如表 6-2 所示。

表 6-2 两种轧辊转速设计方法设计结果比较（轧辊转速单位：转 / 分）

机架号	轧辊转速		工作直径系数	
	新方法	传统方法	新方法	传统方法
1	158.19	141.41	0.53	0.9
2	160.09	146.74	0.57	0.9
3	163.78	153.80	0.68	0.9
4	169.14	162.74	0.87	0.9
5	174.85	168.72	0.86	0.9
6	180.92	175.07	0.86	0.9
7	187.34	181.82	0.85	0.9
8	194.10	188.97	0.85	0.9

9	201.21	196.53	0.85	0.9
10	208.65	204.54	0.84	0.9
11	216.38	213.00	0.84	0.9
12	224.41	221.93	0.83	0.9
13	232.75	231.37	0.83	0.9
14	241.41	241.32	0.83	0.9
15	250.37	250.51	0.82	0.9
16	260.70	258.42	0.99	0.9
17	267.31	265.90	0.94	0.9
18	271.51	269.91	0.92	0.9
19	272.49	272.37	0.99	0.9
20	272.49	272.37	0.99	0.9

从表中我们可以看出,采用修正轧辊转速设计方法得到的轧辊转速系列要比传统方法的轧辊转速系列值为大。此表也清楚地表明,采用修正轧辊转速设计方法,工作直径系数是变化的。在建立张力机架,工作直径系数接近于 0.5;在工作机架,工作直径系数接近于 0.866;在成品机架,工作直径系数接近于 1。也就是说,在建立张力机架,工作直径位于轧辊辊环处;在成品机架,工作直径位于轧辊辊底处,而在工作机架,工作直径位于轧辊孔型的中间部位。这些结果与理论分析十分吻合,因此我们认为,采用修正轧辊转速设计方法比用传统方法更为合理。

6.7 本章小结

本章介绍了开发钢管张力减径工艺设计与仿真软件的基本设计思想,给出了系统构成结构图,简单介绍了本软件的系统功能及系统特点,并简单论述了在软件设计过程中遇到的一些问题及解决方法。给出了不同设计方法得到的设计结果并进行了比较和分析。

第七章 结论及后续工作

本论文对张减过程钢管头尾增厚现象进行了模拟研究;对传统张力减径工艺设计过程进行了修正;提出了进行张力分配、轧辊孔型设计、轧辊转速设计的新算法体系。在此基础上,编制了相应的计算机程序,经过调试,程序运行平稳可靠。建立在本论文研究基础上的张减工艺设计与仿真软件具有通用性,经过调试可以应用于不同的张力减径机组。如果这一研究成果获得应用,可以为配备张力减径机组的钢管生产企业带来明显的经济效益。

本论文的主要创新工作有:

(1) 在进行钢管张力减径过程模拟时,提出了一种二维轴对称模型。采用该模型,实现了对张减过程的全机架模拟。

(2) 在进行钢管变形量分配时,提出了一种基于延伸率的设计方法,充分考虑壁厚系数对张减过程的影响。

(3) 分配张力系数时,考虑了某一机架上的前后张力的平衡,提出等张力法分配机架间张力系数。

(4) 在分配壁厚时,以出口壁厚为收敛判据,与张力分配形成迭代计算,直至最末机架出口壁厚等于成品壁厚为止。

(5) 利用相似理论,并应用数理统计方法,得到一种新的壁厚计算模型。

(6) 在进行轧辊转速设计时,提出两点修正。第一条修正是通过迭代方法计算实际的轧辊工作直径系数;第二条修正是采用轴对称模型,将各架次孔型参数、张力、壁厚、壁径比、延伸系数等诸参数代入力平衡方程进行验证。这两点修正都提出了相应的计算方法。

以上各种计算方法已编制为计算机程序,经过大量调试,程序可以正常稳定的编译执行。结合某钢管生产企业的大量生产数据,得到下列结论:

(1) 采用基于延伸率的方法来分配张减过程变形量时,考虑了壁厚的影响,对于一定外径而壁厚不同的一系列管子,建议使用不同的孔型来轧制,这样有利于获得更好的成品管质量,也有利于延长轧辊寿命。

(2) 采用等张力法分配张力系数,可以保证各机架前后张力的平衡,有利于生

产稳定和减少设备损耗。某些规格的管子采用等张力法,有可能在工作机组的最末几个机架的张力系数超过允许的最大张力系数,此时要采用等张力系数法重新进行张力分配。

(3) 采用由相似理论和数理统计方法得到的壁厚模型,可以保证壁厚在各架次间平稳变化,并且由此模型计算得到的成品管壁厚等于要求壁厚,并且满足力平衡方程,因此此模型是合理的。

(4) 采用变工作直径算法得到的轧辊转速系列与原设计方法的轧辊转速系列各机架的转速有一定的差别,尤其在建立张力机架,这种差别体现地较为明显。采用变工作直径算法得到的各架轧辊工作直径系数值与理论分析基本吻合,并且考虑到变工作直径算法引入了力平衡方程,将各架次孔型参数、张力、壁厚、壁径比、延伸系数等诸参数代入力平衡方程进行验证时,若不满足时,张力系数、壁厚、轧辊转速都要同步重新设计,直到满足力平衡方程为止,而原设计方法仅引入修正系数对某些机架的轧辊转速进行修正,不对张力、壁厚进行重新设计,因此采用变工作直径算法进行轧辊转速设计更为合理。

本文的主要理论体系基础—轴对称模型方法得到了宝钢实测头尾壁厚数据的验证。采用本软件: 利用传统方法计算时,结果与宝钢工艺相符,说明软件体系通畅。本文提出的改进方案有待生产实践的检验。

由于时间所限,本课题还有很多的后续工作,主要有:

(1) 在对管端壁厚增厚机理深入研究的基础上,提出管端壁厚增厚实时模拟的计算方法。目前的初步设想是以钢管横截面的平均壁厚为研究对象,以本文计算体系为基础,实现张减过程全部机架的模拟,在满足工程计算精度要求的基础上尽可能地使计算时间大为缩短。

(2) 完成工作(1)之后,对钢管张减过程钢管横向壁厚不均进行研究,提出钢管断面横向壁厚变化实时模拟的计算方法。

(3) 对张减过程壁厚控制技术进行研究,并结合本课题目前已完成部分和后续工作(1)、(2),最终形成张力减径工艺设计与仿真通用软件包。

参考文献

- [1] 解春蓉 刘作环译 钢管概论 (日) 冶金工业出版社 1982 2~4
- [2] Chihiro Hayashi 轧管工艺的发展 钢管 1989 (2) 49~53
- [3] Hans Kraft 现代轧管工艺 钢管 1989 (2) 54~56
- [4] 金如崧 无缝钢管生产工艺的过去现在与将来 宝钢技术 1995 (6)
- [5] 金如崧 钢管生产技术的新进展 钢管 1991 (5) 6~10
- [6] 郑治平 钟倩霞 当代热轧无缝钢管生产技术述评 (I) 钢管 1996 (2) 14~16
- [7] 郑治平 钟倩霞 当代热轧无缝钢管生产技术述评 (III) 钢管 1996 (4) 1~2
- [8] 刘才俊 钢管质量一贯管理 钢铁 1990 25 (5) 73~76
- [9] 韩宝云 从焊管与无缝管的综合比较析钢管发展方向 轧钢 2000 (1) 43~47, 56
- [10] 金如崧 钢管张力减径工艺理论基础即其发展 金如崧译文集 冶金工业出版社 1990 77~90
- [11] 宝钢技术资料 曼内斯曼钢管公司提供宝钢钢管厂技术文件 上海宝山钢铁公司翻印 1992
- [12] Voswinkel Process Management for Stretch-Reducing Tube Rolling Mills Tube international 1995 64(14) 75~79
- [13] H.J Pehle H.Eichholz 管材张力减径技术原理及发展 上海宝山钢铁公司翻印 1992
- [14] H.J Pehle P.Thieven Improving the Quality of Stretch-Reduced Tubes Tube and Pipe International 2001(1) 81~83
- [15] 王北明编译 热轧钢管的质量 冶金工业出版社 1987
- [16] 侯凤桐 无缝钢管轧机控制技术的新发展 钢管 1990 (5) 33~39
- [17] 方平 钢管张力减径中管端增厚的控制 轧钢 1997 (1) 41~43
- [18] 卢于述 杨华峰 张力减径管增厚段壁厚分布数学模型 钢管 1990 (2) 32~37
- [19] 马继仁 张勇刚 张力减径管端增厚段壁厚分布规律的研究 钢铁 1999 (2) 31~34
- [20] 成友元译 热轧钢管 冶金工业出版社 1986
- [21] Sodani Hirakawa Mechanism of Polygoning Formation of Stretch-Reducing Advanced Technology of Plasticity Aug.1987 24~28

- [22] 曹传生 周渝根 计算机仿真技术在工业生产中的应用 宝钢技术 1998 (3) 44~47
- [23] 王治国 计算机仿真技术在钢管生产中的应用 宝钢技术 1998 (4) 33~35
- [24] 裘永泰 肖松良 钢管连轧过程有限元分析软件的开发 钢管 1997 (1) 9~12
- [25] Yamada Matsukura Internal Polygon Formation Stretch-Reduced Tubes—The Influence of Tension and Compression During Rolling on Internal Polygon Formation J.JPN.SOC. Technol Plast 1993(12) 34(395) 1326 ~1331
- [26] Process Simulation for the Development in Tube Rolling Technology Stahl 1992(4) 112(4)
- [27] H.J Pehle 采用新颖通用的张力减径机孔型加工技术的 KRIIICNC 计算机数控车床 曼内斯曼德玛格梅尔公司 6157 工艺计算部 1996 年 10 月
- [28] 杜凤山 刘才 管材减径过程的计算机模拟 力学与实践 1993 (2) 21 ~23
- [29] 杜凤山 黄庆学 管材减径过程的计算机预测 钢铁 1995 30 (7) 28 ~31, 14
- [30] 潘克云 王先进 椭圆孔型张力减径过程模拟及横向壁厚分布预测 宝钢技术 2000 (2) 44 ~47
- [31] 潘克云 王先进 圆孔型系统张力减径后钢管横向壁厚不均匀的模拟 钢铁研究学报 2000 (2) 29~32
- [32] 双远华 樊建成 人工神经网络对管材张减精度的预测 钢铁 2000 (2) 28 ~31
- [33] 潘克云 张力减径横向壁厚不均的模拟研究 工学博士论文 北京科技大学 1999
- [34] 韩宝云 金明钢管张力减径变形过程计算与图形后处理技术的研究 钢铁研究总院 1999.6
- [35] 王廷溥 轧钢工艺学 冶金工业出版社 1989

致谢

本课题是在导师韩宝云教授的精心指导下完成的。在我就读硕士研究生期间，韩宝云教授始终对我严格要求。在我的学业和课题研究工作中，他始终坚持严谨求实的原则，给予了我真诚切实的指导；在生活方面也给了我无微不至的关怀。在此，请允许我向导师表示衷心的感谢和真诚的祝愿。

另外，就读硕士期间，工程中心钢管事业部的各位工作人员，研究生部的各位老师都给了我极大的帮助，在此表示衷心的感谢。

郭烽

2002年4月15日