维普资讯 http://www.cqvip.com

全浮动芯棒连轧管机组轧件与芯棒速度及摩擦系数研究(上)

赵志毅[1]，董 凯[1]，余 勇[2]，赵 佳[1]，潘 峰[2]，周晓岚[2]
（1.北京科技大学材料科学与工程学院，北京 100083；2.宝山钢铁股份有限公司钢管分公司，上海 201900）

摘 要：对宝山钢铁股份有限公司的全浮动芯棒连轧管机组各机架轧制压力、芯棒运动速度等一系列参数进行了综合测试，获得了轧件速度曲线，并探讨了轧件与芯棒速度之间的关系；分析了轧件与芯棒间的摩擦状态，并推算出两者间在各机架处的摩擦系数(为0.033~0.074)，该系数沿轧制方向呈增大的趋势。以上结果为清楚认识连轧管过程中金属变形规律和芯棒摩擦作用机理提供了依据。

关键词：连轧管；轧制压力；芯棒速度；摩擦系数
中图分类号：TG33 **文献标识码**：B **文章编号**：1001-2311(2006)06-0017-05

Study on Workpiece vs Mandrel Velocity and Friction Factor Relationship of Fully-floating Mandrel Mill(Part I)

Zhao Zhiyi[1], Dong Kai[1], Yu Yong[2], Zhao Jia[1], Pan Feng[2], Zhou Xiaolan[2]
(1. College of Material Science and Engineering, Beijing S & T University, Beijing 100083, China;
2. Steel Tube Co., Baoshan I & S Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

Abstract: An overall measurement of all the relevant parameters of each roll stand of the fully-floating mandrel pipe mill located at Baoshan I & S Co., Ltd., including rolling force and mandrel velocity, etc., resulting in the workpiece speed characteristics. Furthermore, the workpiece vs mandrel velocity relationship is studied, and the friction condition between the workpiece and the mandrel is analyzed. It is identified that the friction factor of the two at each individual roll stand is 0.033 ~ 0.074, and the factor goes up along the rolling direction. The conclusion provides basis for identifying the metal deformation law and the mandrel friction effect mechanism during the mandrel mill rolling process.

Key words: Mandrel pipe mill; Rolling force; Mandrel velocity; Friction Factor

0 前 言

在全浮动芯棒连轧管机组的生产过程中，连续轧管是钢管成型的关键工序，它将直接影响到钢管的尺寸精度和表面质量。由于连轧管过程中轧件变形规律较为复杂，不但受到温度、变形、速度、张力等制度的影响，同时还受到芯棒的受力情况、运动速度以及摩擦状态等因素的影响。目前对于以上几个方面的理论推导较多，对实际工况的测试研究较少，对该过程中芯棒运动规律和轧件变形方式缺乏足够的测试数据，导致现有的工艺制度不尽合理，连轧孔型设计不够完善。因此对该机组进行全面测试，有助于更清楚认识连轧管过程中金属变形规律和芯棒摩擦作用机理。

1 测试内容及设备

本次综合测试选择较难轧制的钢种T91为主要实验对象，采集对钢管变形影响较大的前6架轧机的轧制压力，并同时测试芯棒运动速度、电机电流、轧辊转速及轧件温度等数据。根据宝山钢铁股份有限公司(以下简称宝钢)的连轧管机组生产线的布置，共使用了10台由北京科技大学设计制造的

赵志毅(1962-)，男，副教授，副主任，主要从事压力加工工艺研究。

维普资讯 http://www.cqvip.com

长期在线轧制压力传感器和1台芯棒测速装置进行测试，各测试点布置见图1。图1中P_{ij}为各传感器的编号(i代表轧机编号，1~8；j代表各架轧机传感器的位置：1代表自由端，2代表接手端)；v为芯棒速度。

1.1 轧制压力传感器

本次测试使用的轧制压力传感器分别被安装在各架轧机的压下螺丝下。这些轧制压力传感器是根据现场技术条件，专门为该连轧管机组设计制作的，具体装置见图2。

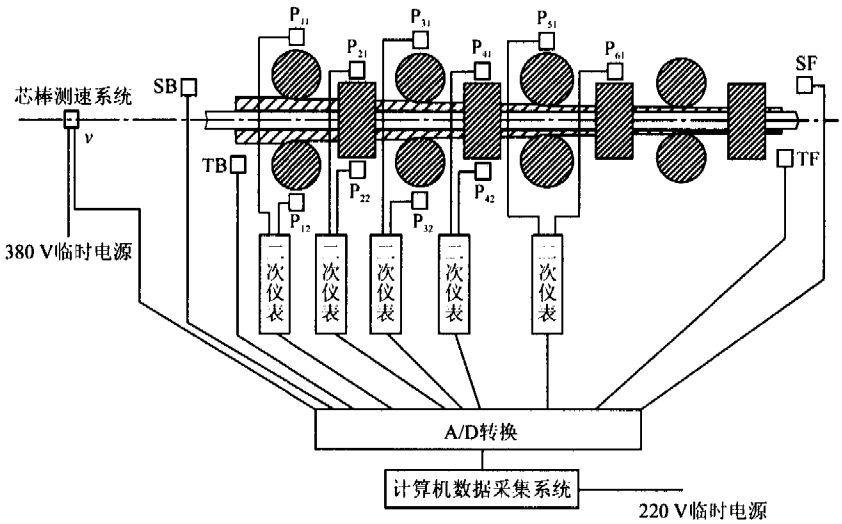


图1 连轧管机组在线测试点布置示意

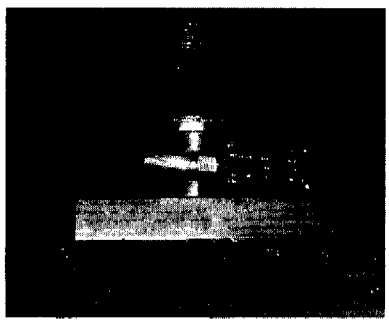


图2 轧制压力传感器

1.2 芯棒测速装置

自主设计制造的芯棒测速装置见图3。主要由3部分构成：扭矩电机、绕线筒和测速电机。扭矩电机接380 V交流电，由控制器调节其扭矩的大小，可施加的最大力为200 N；绕线筒的直径为317 mm(周长996 mm)；测速电机为小型直流测速电机，其输出电压的系数为0.032 V·min/r。

2 测试结果

所测钢种的轧制参数：轧件材质T91，芯棒直径136.5 mm，轧制规格Φ152.5 mm×5.75 mm，成品规格Φ73.03 mm×5.51 mm，入口温度1 170 ℃，出口温度1 100 ℃。测得该钢种各架轧机轧制压力与芯棒速度曲线见图4(为方便分析，此处将芯棒速度放大20倍，与轧制压力曲线绘于同一图中)。

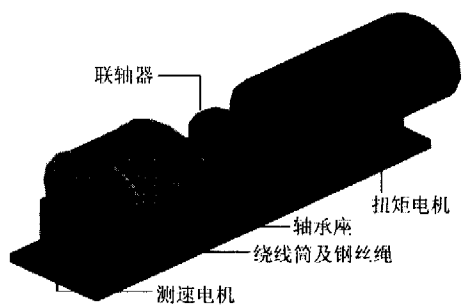


图3 芯棒测速装置示意

3 结果分析

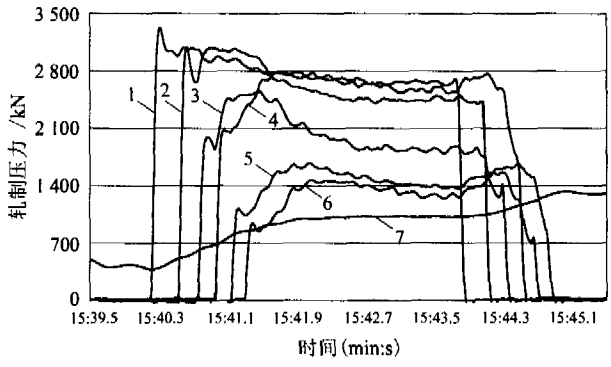
结合本次现场测试结果，首先研究了轧件与芯棒的运动速度及其相互关系，然后对连轧管过程中轧件与芯棒间的摩擦状态进行了理论分析。

3.1 轧件与芯棒速度研究

3.1.1 轧件速度曲线

通过图4中T91轧制压力曲线，可以得到轧件咬入和抛出时刻轧制压力曲线上升或下降部分的

维普资讯 http://www.cqvip.com



1—1 号轧机 2—2 号轧机 3—3 号轧机 4—4 号轧机
5—5 号轧机 6—6 号轧机 7—芯棒速度

图4 T91总轧制力与20倍芯棒速度(m/s)曲线

峰值，由此可以找出轧件咬入及抛出时刻(此处规定轧制压力出现明显上升或下降趋势的时刻为咬入和抛出时刻，达到咬入峰值50%时刻为咬入结束时刻)，将峰值和各时刻总结于表1和表2[1]。

由表1和表2中咬入时刻、抛出时刻的时间差 t 以及机架间距 S (1 m)，可以得出轧件在第1~6机架之间的运动速度(这里假设轧件在各机架间咬入或抛出后为匀速运动)。以轧件在第1，2机架间的速度为例，计算过程如下：

$$v_1=\frac{S}{t}=\frac{1}{0.608-0.290}=3.145\ (\text{m/s})$$

依此过程计算轧件咬入和抛出时各机架间的速度，将经过各机架的时间与速度整理于表3。

表1 轧件咬入时刻及轧制压力峰值

轧机号	开始上升时刻	咬入峰值/kN	咬入峰值时刻	咬入峰值50%时/kN	咬入时刻	咬入时间/s
1	15:40.242	3 311.1	15:40.356	1 660	15:40.290	0.048
2	15:40.568	3 083.2	15:40.674	1 540	15:40.608	0.040
3	15:40.798	1 992.7	15:40.918	1 000	15:40.838	0.040
4	15:41.002	2 072.0	15:41.106	1 040	15:41.030	0.028
5	15:41.188	1 116.3	15:41.274	560	15:41.214	0.026
6	15:41.344	940.3	15:41.430	470	15:41.374	0.030

表2 轧件抛出时刻及轧制压力峰值

轧机号	结束下降时刻	抛出峰值/kN	抛出峰值时刻	抛出峰值50%时/kN	抛出时刻	抛出时间/s
1	15:43.908	2 704.1	15:43.794	1 350	15:43.856	0.062
2	15:44.194	2 420.3	15:44.084	1 210	15:44.144	0.060
3	15:44.422	1 408.6	15:44.330	700	15:44.370	0.040
4	15:44.608	1 626.7	15:44.518	810	15:44.558	0.040
5	15:44.762	764.5	15:44.692	380	15:44.730	0.038
6	15:44.940	805.2	15:44.850	400	15:44.884	0.034

表3 轧件咬入、抛出时通过各机架的时间与速度

机架	咬入阶段			抛出阶段		
	时间/s	总时间/s	速度/(m·s^{-1})	时间/s	总时间/s	速度/(m·s^{-1})
1~2	0.318	0.318	3.145	0.288	0.288	3.472
2~3	0.230	0.548	4.348	0.226	0.514	4.425
3~4	0.192	0.740	5.208	0.188	0.702	5.319
4~5	0.184	0.924	5.435	0.172	0.874	5.814
5~6	0.160	1.084	6.250	0.154	1.028	6.494

由表1和2中咬入、抛出时间及表3中机架间速度，可以得出轧件在各架轧机咬入、抛出阶段的加速度 a (这里假设轧件在咬入阶段为恒定加速度加速的过程)，计算过程如下(以第1机架咬入过程

维普资讯 http://www.cqvip.com

为例，轧件初始速度与测得的芯棒初始速度相同，为 1.88 m/s)：

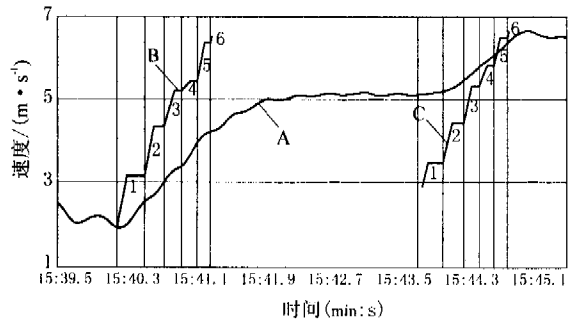
$a_1=(v_1-v_0)/t=(3.145-1.88)/0.048=26.4(m/s^2)$

同理，依此方法计算轧件在咬入和抛出时刻在每一机架的加速度，整理后见表 4。

表 4 轧件咬入和抛出时的加速度

机架号	咬入时/(m·s^{-2})	抛出时/(m·s^{-2})
1	26.4	-
2	30.1	15.9
3	21.5	22.4
4	8.1	12.4
5	31.3	17.9

通过表 3 和表 4 中轧件的速度与加速度，可绘制出轧件前端与尾端分别在咬入和抛出时的速度曲线，此曲线与芯棒速度曲线见图 5。



A—芯棒速度 B—轧件前端咬入速度 C—轧件尾端抛出速度

图 5 轧件与芯棒速度曲线

3.1.2 轧件与芯棒速度分析

在图 5 中，3 条曲线阶段的划分与连轧管 3 个轧制阶段相对应，即咬入阶段、稳定轧制阶段和抛出阶段，见图 6。

(1) 咬入阶段。即轧件的头部从进入第 1 机架被咬入开始到即将离开第 8 机架的阶段，该段是一段非稳定轧制过程。随着轧件逐步进入后面机架，其前端的速度成阶梯状上升，此过程中芯棒的运动由轧件带动，二者的起始速度相近。由于芯棒为刚性体，在某一瞬间只能有一个速度值，它随着咬入过程的进行而不断上升，但总是低于轧件前端，直至到达稳定轧制状态而停止加速。

随着轧件头部进入第 1 架轧机，芯棒加速Δv_D，各架芯棒速度的变化又反过来影响各架金属流动。

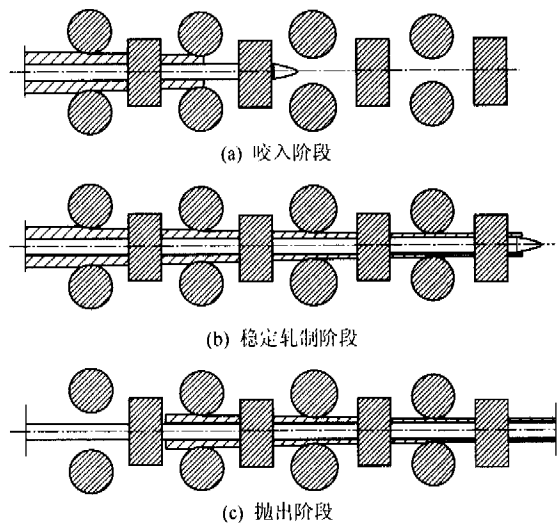


图 6 轧制过程三阶段示意

例如，与第 1 机架单机轧制相比，同时处于两个机架轧制时，第 1 机架不再是浮动芯棒轧制，而是拉力芯棒轧制，第 1 机架的金属速度将因此由 v_1 增至 $v_{1(1\sim2)}$，增速 Δv_1；而对于第 2 机架来说实际上是限动芯棒轧制，由此金属在第 2 机架的出口速度为 $v_{2(1\sim2)}$，将比单机轧制速度 v_2 低，因此金属流动速度的变化规律是：$v_1<v_{1\sim2}<v_2<v_{1\sim3}<v_3\cdots\cdots<v_{1\sim n}<v_n$。

(2) 稳定轧制阶段。即轧件的头部从离开第 8 机架开始到轧件的尾部即将离开第 1 机架的阶段。在该段轧制过程中，轧件处于 8 个机架同时轧制中，各机架的出口速度依实际延伸而增加，并保持稳定。轧件在第 8 机架咬入后，其速度在各机架间保持不变，但此时芯棒速度却继续升高，这是由于芯棒表面的摩擦力没有达到平衡，顺轧向的摩擦力仍然高于逆轧向的摩擦力，芯棒存在向前加速趋势。当芯棒速度升高到一定值时，其表面的摩擦力达到平衡，即在运动方向上合力为零，此时速度维持恒定。

(3) 抛出阶段。即轧件的尾部从离开第 1 机架开始到离开第 8 机架的阶段。该阶段是一个非稳定轧制过程。尾部的速度随着轧件逐步由后面机架抛出而不断成阶梯状上升，同时带动芯棒速度上升，最后在由第 8 机架抛出时，轧件尾端的速度与芯棒的速度保持一致。

在抛出阶段，位于各机架间的轧件尾端抛出速度较前端咬入时有所提高，其原因是：轧件前端咬入时，芯棒速度较慢，且在大部分机架中小于轧件

维普资讯 http://www.cqvip.com

速度，此时轧件与芯棒间的摩擦力对于芯棒来说与运动方向相同，提供向前的加速度；而对于轧件来说则与运动方向相反，形成向后的加速度，阻碍加速运动。然而，在轧件尾端抛出时，芯棒速度较咬入时有很大提高，在大部分机架中大于轧件尾端速度，此时的摩擦力对于芯棒来说与运动方向相反，一定程度阻碍了芯棒的加速；而对于轧件尾端来说则与运动方向相同，提供向前的加速度。在轧件前端咬入和尾端抛出的两个不同时刻，前端和尾端受力情况不同，导致轧件在机架间运动速度不同，尾端抛出时速度略高[2-4]。

3.2 轧件与芯棒间的摩擦状态理论分析

宝钢的连轧管机组为全浮动芯棒轧制，芯棒在连轧的整个过程中受力见图7。

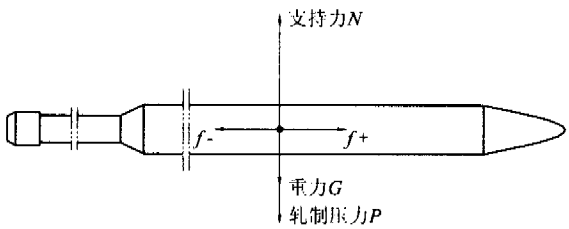


图7 芯棒受力示意

芯棒在某一机架中进行轧制时，在垂直方向上的受力为重力 G、轧制压力 P 和支持力 N，三者的关系为：$N=G+P$。由于此处芯棒的重力 G 相对于轧制压力 P 来说很小，可以忽略不计，所以在计算此机架摩擦力时将支持力 N 看作与轧制压力 P 相等。另外，由于芯棒被看作是刚性体，所以机架间轧件对于芯棒的抱紧力此处也可忽略不计。

在运动方向上，芯棒整体只受轧件对它施加的摩擦力，但是处于不同位置的芯棒所受摩擦力的方向也不同，主要由二者的运动速度决定。中性面以前(轧制方向为前)的机架称为导前机架，在导前机架中轧件速度高于芯棒速度；中性面以后的机架称为滞后机架，在滞后机架中轧件速度低于芯棒速度。轧件与芯棒在不同接触位置的相对速度不同(例如在稳定轧制时，在第1机架中轧件速度低于芯棒速度，在第6机架中轧件速度高于芯棒速度)，导致各接触位置作用于芯棒的摩擦力方向有所差别。当轧件速度高于芯棒速度时，该部分轧件对芯棒的摩擦力为正向($f+$)，产生正加速度，带动芯棒运动；当轧件速度低于芯棒时，该部分轧件对芯棒的摩擦力为负向($f-$)，产生负加速度，阻碍芯棒运动[2,3]。

为了便于对轧制过程中芯棒摩擦力状态进行研究，此处对中性面位于第1机架时的情况进行分析，见图8。

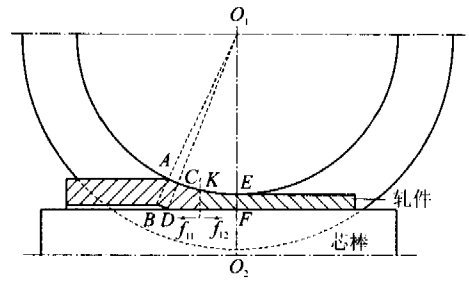


图8 K 截面位于第1机架变形区轧制情况示意

在图8中，轧件在 A 点与轧辊开始接触，经过弧 AE 抛出，完成该机架的轧制，直线 AB 与 CD 之间的区域为轧件减径区，CD 与 EF 之间的区域为减壁区。在减壁区内，轧件受轧辊与芯棒同时施加的压力，并与芯棒在运动方向上发生摩擦，产生摩擦力。关于摩擦力的方向，可归纳出如下3种情况：

(1) 如果中性面处于减壁前区域(直线 CD 的左边)，则在减壁区内轧件速度高于芯棒速度，摩擦力 f 方向与运动方向相同(向右)，轧件带动芯棒加速；

(2) 如果中性面处于减壁区内(直线 CD 与 EF 之间)，相对运动速度与摩擦力将会分为两部分：中性面与 CD 之间的区域，轧件速度低于芯棒速度，摩擦力 f_{11} (前面的数字代表机架号，后面的数字代表摩擦力相对于中性面的位置)与运动方向相反，阻碍芯棒运动；中性面与 EF 之间的区域，轧件速度高于芯棒速度，摩擦力 f_{12} 与运动方向相同，带动芯棒加速；

(3) 如果中性面处于减壁后区域(直线 EF 的右边)，则在减壁区内轧件速度低于芯棒速度，此时摩擦力 f_{11} 和 f_{12} 都与运动方向相反，轧件阻碍芯棒加速运动。

(待 续)

(修定日期：2006-09-09)