

## 全浮动芯棒连轧管机孔型对钢种适应性的模拟研究

万 锋, 李胜祇, 尹元德, 邓世峰, 汪甜甜, 黄 曼

(安徽工业大学材料科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243002)

**摘 要:** 应用 MSC.SuperForm 有限元仿真软件, 基于现场生产工艺, 模拟了  $\Phi 140$  mm 全浮动芯棒连轧管机  $\Phi 195$  mm 孔型的钢管连轧过程, 研究了连轧过程中 C22 和超级 13Cr 两种钢的金属流动、轧制力等规律性。结果表明: 与 C22 相比较, 超级 13Cr 更易产生宽展, 金属横向流动倾向性更大, 所以在高合金管轧制用孔型设计时, 需特别注意金属过充倾向; 超级 13Cr 的轧制力较 C22 增大 60% 以上, 机架、轧辊的弹性变形量更大, 在轧辊辊缝预调时, 应加大超级 13Cr 的预压靠量, 在孔型设计时, 也需考虑其弹性变形量, 以补偿高合金钢轧制时大轧制力引起的机架、轧辊的弹性变形量的影响。

**关键词:** 全浮动芯棒连轧管机; 孔型; 钢种适应性; 壁厚收缩缺陷; 金属流动; 轧制力; 有限元模拟

**中图分类号:** TG335.71 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-2311(2013)06-0024-04

## Numerical Simulation of Adaptability of Roll Pass of Full-floating Mandrel Pipe Mill to Steel Grade Variation

WAN Feng, LI Shengzhi, YIN Yuande, DENG Shifeng, WANG Tiantian, HUANG Man

(School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China)

**Abstract:** Based on the site-used manufacturing processes, the finite element (FE) simulation software MSC SuperForm is used to simulate the continuous rolling process for steel pipes by the  $\Phi 140$  mm full-floating mandrel mill with the  $\Phi 195$  mm roll pass. Also analyzed with the method are the regularities of metal flow and rolling force, etc. of the C22 steel and the super 13Cr steel. The result reveals that compared with the C22 steel, the super 13Cr steel spreads more easily, and has a bigger tendency of transverse metal flow. So, great attention should be paid to roll pass design for high alloy pipe rolling so as to avoid groove overfilling. Likely, compared with the C22 steel, the rolling force of the super 13Cr steel is 60% bigger than that of the C22 steel, resulting in bigger elastic deformations of the stand and the roll. Therefore in case of rolling the super 13Cr steel, it is necessary to increase the amount of pre-pressure when pre-adjusting roll gaps, and also to determine the elastic deformation when designing the roll pass in order to offset the influence by big elastic deformation amounts of the stand and the roll as caused by the big rolling force in case of rolling high alloy tubes.

**Key words:** full-floating mandrel pipe mill; roll pass; adaptability to steel grade variation; wall-thickness shrinkage; metal flow; rolling force; FEM simulation

热轧无缝钢管壁厚收缩(内表面凹坑)是连轧过程中的常见缺陷,尤其在轧制高合金荒管时最容易出现<sup>[1-3]</sup>。高合金钢延伸困难、热塑性差、热加工温度区间窄,其在连轧过程中的金属流动和变形特点与碳钢、低合金钢均不相同,因此使用生产碳

钢、低合金钢产品的孔型及轧制工艺来生产高合金钢产品显然是不合适的。目前,虽然有部分文献涉及全浮动芯棒连轧管机钢管连轧过程的研究<sup>[4-9]</sup>,但是关于连轧管机孔型对钢种的适应性、钢种对壁厚收缩缺陷的敏感性研究却鲜有报道。本文基于宝山钢铁股份有限公司(简称宝钢股份) $\Phi 140$  mm 全浮动芯棒连轧管机组  $\Phi 195$  mm 孔型的实际参数,应用 MSC.SuperForm 软件建立  $\Phi 195$  mm $\times$ 10.25 mm

万 锋(1988-),男,助理工程师,硕士,主要从事钢管轧制工艺研究。

荒管连轧过程的三维弹塑性热力耦合有限元模型,研究同一孔型轧制不同钢种时的金属流动、轧制力变化等,以期优化高合金钢连轧孔型、减少甚至是消除荒管壁厚收缩缺陷提供可靠依据。

## 1 全浮动芯棒连轧模型的建立

### 1.1 连轧模型的工艺参数

全浮动芯棒连轧管机生产时芯棒处于全浮动状态,毛管在由芯棒和轧辊构成的孔型中发生塑性变形,相邻机架辊缝互成 $90^\circ$ 。本实验模型基于宝钢股份 $\Phi 140$  mm全浮动芯棒连轧管机组的 $\Phi 195$  mm孔型参数,用 $\Phi 218$  mm $\times 18.75$  mm毛管轧制 $\Phi 195$  mm $\times 10.25$  mm荒管。其模拟工艺参数见表1。

表1  $\Phi 140$  mm全浮动芯棒连轧模拟工艺参数

机架号	轧辊直径/mm	轧辊转速/(r·min <sup>-1</sup> )	减壁量/mm
1	538.8	145.63	6.45
2	565.7	169.70	6.75
3	533.9	195.56	1.65
4	581.3	189.08	1.35
5	553.4	207.96	0.40
6	592.3	209.33	0.40
7	524.0	250.47	0
8	520.0	241.25	0

### 1.2 几何模型的建立

由于连轧过程变形具有对称性,故只研究毛管横截面的1/4即可。为减少模型的计算时间,除将毛管定义为弹塑性变形体外,各机架轧辊及芯棒均简化为刚性体;机架间距设为300 mm,毛管长度取1 500 mm;网格划分采用8节点6面体等参单元,横截面上32个单元,长度上划分160份,单元间距约9.5 mm,共计5 120个单元、5 088个节点。 $\Phi 218$  mm $\times 18.75$  mm毛管的几何模型网格划分情况如图1所示。

### 1.3 连轧模型的初始条件及边界条件

毛管材质选取典型的高合金钢超级13Cr和碳钢C22,初始温度为1 100 ℃。为简化模型,各轧辊视为恒温刚性体,温度设定为150 ℃;芯棒设置为恒温刚性柱面,温度设定为100 ℃。轧制过程中的热传导现象是一个复杂的热力学问题。毛管的自由表面与周围环境存在对流和辐射的热交换,毛管与轧辊及芯棒接触面间存在接触传热,同时毛管本身由于摩擦及塑性变形会产生热量而导致温度升

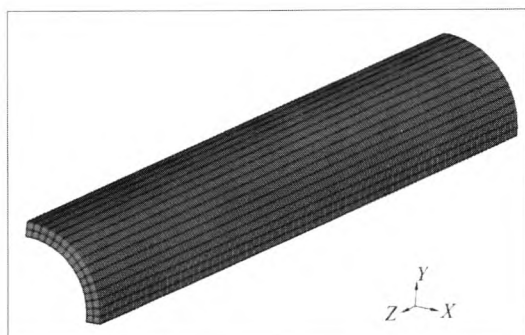
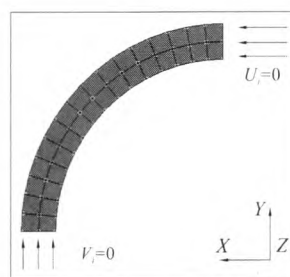


图1  $\Phi 218$  mm $\times 18.75$  mm毛管的几何模型网格划分

高。综合以上因素,轧辊及芯棒与毛管的接触热传导系数取 $20 \text{ kW}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$ ,包含对流和辐射的等效换热系数取 $0.18 \text{ kW}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$ <sup>[10]</sup>。

由于连轧模型是1/4对称的,因此在对称面上所有节点在X方向或Y方向固定。1/4毛管对称面上的位移边界条件如图2所示。



$U_i$ —X方向的位移边界条件  $V_i$ —Y方向的位移边界条件

图2 1/4毛管对称面上的位移边界条件

本模型假定在毛管与工具接触面上遵循库仑摩擦定律,即忽略速度和温度对摩擦因数的影响。据宝钢股份测得的数据,取轧辊与毛管间的摩擦因数 $\mu_w=0.30$ ,毛管与芯棒间摩擦因数 $\mu_D=0.07$ <sup>[11-12]</sup>。

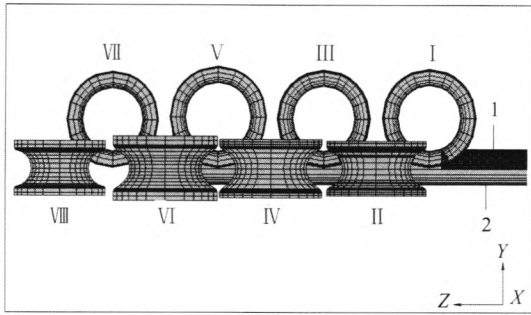
轧制 $\Phi 195$  mm $\times 10.25$  mm荒管的三维有限元模型如图3所示。在酷睿i5 CPU、2Gb内存的计算机上完成整个轧制过程的模拟,运行时间为1天左右。

## 2 实验结果分析

### 2.1 两种钢金属流动的研究

#### 2.1.1 两种钢的宽展情况

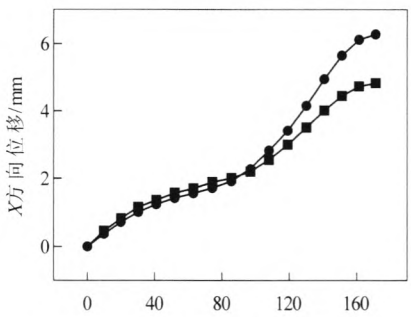
图4所示为130增量步时(第1机架抛出后,第2机架咬入前)两种钢变形区的宽展情况。由图4(a)可以看出同一横截面上,在孔型开口处,超级13Cr较C22有更大的X方向位移,而在孔顶及侧



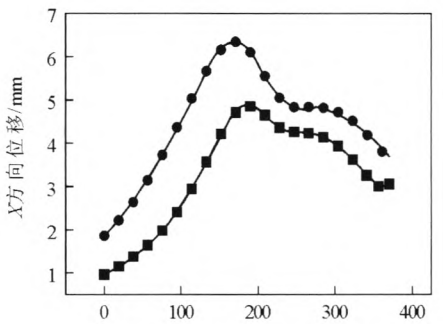
1—荒管 2—芯棒 I~VIII—轧辊编号

图3 轧制  $\Phi 195\text{ mm} \times 10.25\text{ mm}$  荒管的三维有限元模型

壁区则超级 13Cr 略小一点；图 4(b)为孔型开口处节点沿变形区纵向弧长的 X 方向位移，可以看出孔型开口处超级 13Cr 的 X 方向位移均大于 C22 的（最大位移处超过 C22 的 25%）。即与 C22 相比，超级 13Cr 金属更容易往孔型开口方向流动，形成“耳子”缺陷的趋势较为明显。因此，轧制高合金管的孔型设计需特别注意孔型开口处过充倾向。



(a)



(b)

图4 130 增量步时两种钢变形区的宽展情况

2.1.2 两种钢的纵向延伸情况

图 5 所示为同一增量步时钢管头部某一切片从

孔顶到孔型开口处外表面节点的 Z 向位移。从图 5 可以看出：孔顶处 Z 方向位移超级 13Cr 略大于 C22，而孔型开口处超级 13Cr 明显大于 C22；从孔顶处到孔型开口处两位移差逐渐增大，说明与 C22 相比，超级 13Cr 孔型开口处金属纵向延伸较孔顶处增大更加明显，该处金属被迫纵向延伸更加强烈，发生壁厚收缩缺陷的倾向性更大。两种钢的金属纵向延伸比较如图 6 所示。从图 6 可更加直观地看出两种金属纵向延伸的不同。

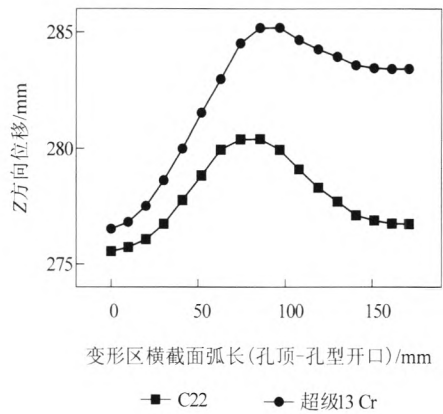


图5 外表面节点沿变形区横截面的 Z 向位移

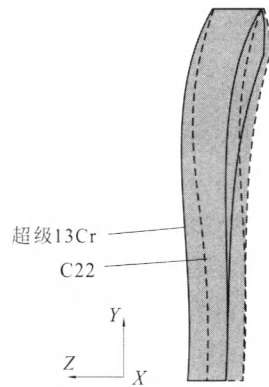


图6 两种钢的某切片纵向延伸的比较

综上所述，同一孔型同一工艺下，在孔型开口处，超级 13Cr 的轮廓宽展及纵向延伸均大于 C22。由于孔型开口处辊缝的存在，钢管外表面没有辊面的限制、内表面亦反弯脱离了芯棒的作用，实际上该处金属在径向上是处于自由变形的状态。图 7 所示为孔型开口处钢管壁厚沿变形区纵向弧长分布情况，根据塑性变形过程中金属体积不变原理，则孔型开口处超级 13Cr 钢管在径向厚度上必小于 C22，该结论从金属流动规律上证明了在孔型开口处高合

金钢管较普碳钢钢管易发生壁厚收缩缺陷。实际轧制高合金钢和普碳钢钢管均使用同一套孔型，而实验数据表明两种钢因金属流动特性不同在连轧过程中的宽展差异是很明显的；因此，有必要设计一套专用于生产高合金钢的孔型。

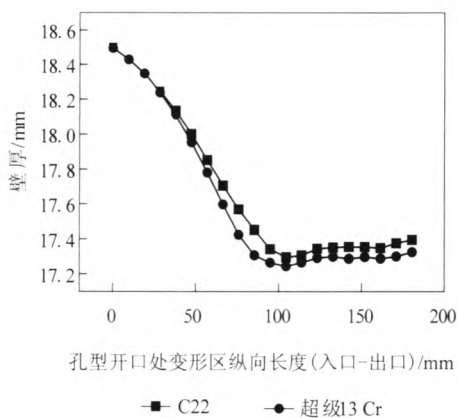


图7 孔型开口处钢管壁厚沿变形区纵向弧长分布情况

## 2.2 两种钢轧制力的研究

图8所示为两种钢轧制过程中的各机架最大轧制力分布情况。由图8可以看出：由于超级13Cr材料热塑性差、变形抗力高，其各机架最大轧制力超过C22的60%，最大达85%。因此，在连轧过程中，机架弹性变形、轧辊弹跳对荒管尺寸的影响，超级13Cr表现得更加明显。在轧辊辊缝预调时，应加大超级13Cr的预压靠量；在孔型设计时，也需考虑其弹性变形量，以补偿高合金钢轧制时大轧制力引起的机架、轧辊大弹性变形量影响。

## 3 结论

(1) 轧管过程中，超级13Cr较碳钢C22更易产生宽展，金属横向流动倾向性更大，因此，轧制高合金管的孔型设计，需特别注意金属过充倾向。

(2) 轧管过程中，各机架的最大轧制力超级13Cr较碳钢C22大60%以上，在轧辊辊缝预调时，应加大超级13Cr的预压靠量；在孔型设计时，也需考虑其弹性变形量，以补偿高合金钢轧制时大轧制力引起的机架、轧辊的弹性变形量影响。

## 4 参考文献

[1] 庄钢, 尹溪泉. 连轧无缝钢管产品缺陷(欠)分析[J]. 钢管, 2006, 35(5): 26-29.

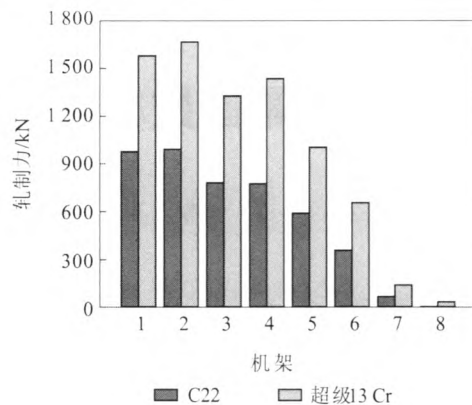


图8 两种钢轧管过程中各机架最大轧制力分布情况

- [2] 袁文宽, 付乃民, 孙强, 等. 热连轧无缝钢管内表面凹坑、孔洞缺陷的形成分析[J]. 天津冶金, 2004(6): 23-24.
- [3] 庄钢, 邱莉.  $\Phi 250$  mm 限动连轧机组轧制钢管裂孔产生原因的分析[J]. 特殊钢, 1998, 19(1): 40-42.
- [4] 匡阿根, 全小兵, 刘楠, 等. 宝钢 $\Phi 140$  mm 连轧管机组穿孔顶头提高寿命的研究[J]. 钢管, 2010, 39(5): 47-50.
- [5] 潘峰. 宝钢钢管全浮动芯棒连轧工艺的技术进步[J]. 钢管, 2006, 35(5): 30-33.
- [6] 赵志毅, 董凯, 余勇, 等. 全浮动芯棒连轧管机组轧制力测试与研究[J]. 钢管, 2006, 35(4): 1-5.
- [7] 赵志毅, 董凯, 余勇, 等. 全浮动芯棒连轧管机组轧件与芯棒速度及摩擦系数研究[J]. 钢管, 2006, 35(6): 17-21; 2007, 36(1): 16-20.
- [8] Li S Z, Xu J, Yin Y D, et al. The study of inner surface crack formation of seamless modified 9Cr-1Mo tube rolled on mandrel mill and its application[J]. Materials Science Forum, 2007, 61(4): 561-565.
- [9] 赵志毅, 谢建新, 洪慧平, 等. 不同钢种对全浮动芯棒钢管热连轧过程影响的模拟分析[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(5): 106-110.
- [10] 尹元德, 李胜祗. 芯棒对连轧管轧制过程影响的三维有限元分析[J]. 重型机械, 2005(1): 40-43.
- [11] 张丕军, 卢于速. 连轧管“竹节”问题的研究[J]. 钢铁, 1995(2): 37-44.
- [12] Zhao Zhiyi, Xie Jianxin, He Xiaoming, et al. Friction Coefficient between Rolling Tube and Mandrel of Full Floating Mandrel Mill[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2009, 16(2): 45-49.

(收稿日期: 2013-04-01; 修定日期: 2013-10-30)