

基于改善 30CrMo 钢大棒材心部致密度轧制工艺有限元模拟

王东兴 张凌峰 周颂红 任毅 钟荣 曹海
(芜湖新兴铸管, 芜湖 241002)

摘要 对表面和心部温度分别为1 150 ℃和1 240 ℃的30CrMo钢350 mm×450 mm铸坯轧制Φ230 mm棒材的工艺过程进行有限元模拟,以研究单道次10%~30%压下率、100 mm总压下量时双道次50 mm-50 mm、10 mm-90 mm、90 mm-10 mm等轧制工艺对棒材心部致密度的影响。结果表明,单道次压下率20%时心部致密度有一定改善,压下率30%改善明显;总压下量100 mm时50 mm-50 mm轧制工艺心部致密度改善最不明显,10 mm-90 mm工艺心部致密度改善最明显。现场轧制结果符合模拟结果。

关键词 大型棒材 热轧工艺 有限元模拟 心部致密度

Improvement of Centre Density of 30CrMo Steel Heavy Bar by Finite Element Simulation on Rolling Process

Wang Dongxing, Zhang Lingfeng, Zhou Songhong, Ren Yi, Zhong Rong and Cao Hui
(Wuhu Xinxing Ductile Iron Pipes, Wuhu 241002)

Abstract Finite element simulation on rolling process for 30CrMo steel 350 mm×450 mm casting bloom with surface 1 150 ℃ and centre 1 240 ℃ rolling to Φ230 mm bar products is carried out to study effect of rolling parameters including single pass 10%~30% reduction ratio, double pass reduction 50 mm-50 mm, 10 mm-90 mm and 90 mm-10 mm at total reduction 100 mm on centre density of bar. Results show that with single pass reduction ratio 20% the centre density has definite improvement, and with 30% centre density has obvious improvement; at total reduction ratio 100 mm, the improvement of centre density is not obvious by 50 mm-50 mm rolling process but the improvement of centre density is most obvious by 10 mm-90 mm rolling process. The rolling results at situ are corresponding to the simulation results.

Material Index Heavy Bar Product, Hot Rolling Process, Finite Element Simulation, Centre Density

针对芜湖新兴大棒车间的生产情况,采用数值模拟手段,通过建立体积可压缩刚塑性有限元模型,模拟轧制过程中坯料心部致密度变化情况,单道次不同的压下率,坯料心部的致密度的变化情况,以及在总压下量不变的情况下改变道次压下率后坯料心部致密度的改善情况,并将模拟结果与现场工艺试验相结合,通过低倍以及探伤的手段来验证心部致密度的改善情况^[1-3]。

1 有限元模型的建立

假设条件:(1)材料各项同性,且连续可压缩;(2)不考虑体积力;(3)质量不变;(4)材料变形服从Levy-Mises流动理论;(5)不考虑材料弹性变形^[1]。

坯料实际尺寸(mm)为350×450×5 900,对应轧制规格为Φ230 mm。采用1/4对称模型(图1),坯料网格单元50 000个,采用四面体单元,横截面网格单元见图2(b)所示;坯料初始温度场的1/4剖切模型见图1(b)所示,外表面1 150 ℃,心部1 240 ℃。

坯料为微可压缩材料,根据连铸坯低倍情况,赋予坯料的初始致密度见图2(a),设最外圈相对密度

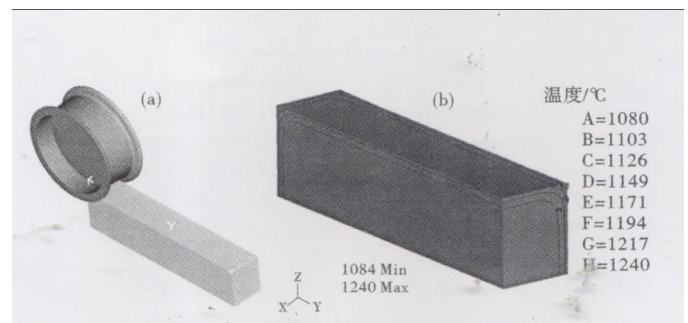


图1 轧制模型示意图(a)及坯料初始温度场(b)

Fig. 1 Schematics of rolling model (a) and initial bloom temperature field (b)

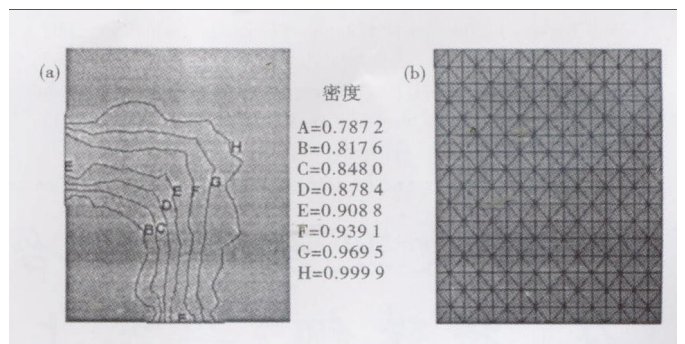


图2 初始密度(a)及1/4网格(b)示意图

Fig. 2 Schematics of initial density (a) and 1/4 mesh (b)

为 0.98,心部为 0.8,其他部分如等值线图所示。材料为 30CrMo 钢,泊松比 0.3,膨胀系数 $1.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{C}$,导热系数 $28 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{C})$,质量热容 $430 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{C})$,黑度 0.7,流变应力参数选自材料库。

轧辊网格单元控制在 20 000 个左右,采用四面体单元,轧辊角速度 5.24 rad/s ,考虑热力耦合及自由面与空气之间的热交换,换热系数 $0.02 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。环境温度 20 C ,坯料与轧辊的传热系数为 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。

2 模拟结果的分析

主要通过 3 组对比来探究压下率的分配对心部致密度的改善。

首先通过模拟单道次不同压下量来观察心部致密度的改善,分别取相对压下率为 10%、20% 和 30%。图 3 为断面相对密度均为 0.8 时的变化情况,可见压下率为 10% 时,变形主要集中在坯料表面部分,当压下率为 20% 时,心部变形增大,致密程度有所提高,当压下率增大到 30% 时,可以看到中心部分的相对密度有明显的提高^[4,5]。

其次,总压下量 100 mm 时,分别取道次压下量

为 50 mm-50 mm、10 mm-90 mm 以及 90 mm-10 mm (其中 90 mm 为 20% 压下率)进行对比分析,连铸坯断面初始密度模型如图 2 所示,道次之间停顿 20 s 用于热交换。

从图 4 可见,50 mm-50 mm 工艺中心部致密度改善不佳,其相对密度仅为 0.809,10 mm-90 mm 工艺中心部相对密度是最高的,可以达到 0.838,而 90 mm-10 mm 工艺中心部相对密度为 0.820(均为切除头部和尾部的非稳定轧制区域时的数据)。

分析指出在均匀压下道次分配的 50 mm-50 mm 工艺中,由于单道次压下率不足,心部组织没有受到足够的静水压力来改善其致密程度,变形没有渗透到心部区域。对于 10 mm-90 mm 和 90 mm-10 mm 工艺中,由于在热力耦合条件下,随着轧制的进行,坯料表面温度不断地下降,而心部温度变化不大,这导致坯料表面部分变形抗力增大,表面变形困难,此时坯料心部变形开始增大,促使在相同的压下量下 10 mm-90 mm 工艺的心部致密程度要明显优于 90 mm-10 mm 工艺^[4]。

最后在总压下量为 135 mm 时,分别选取压下

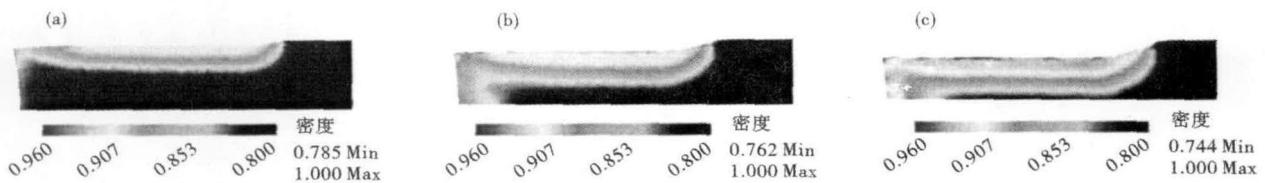


图 3 单道次压下率 10% (a), 20% (b) 和 30% (c) 的心部致密度(1/4 模型)

Fig. 3 Distribution of centre density with single pass at reduction ratio (1/4 model): 10% (a); 20% (b) and 30% (c)

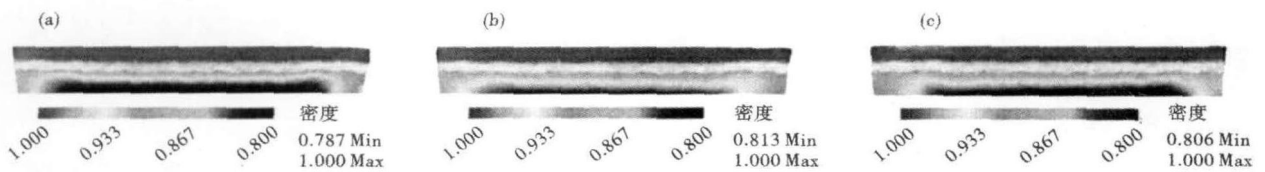


图 4 总压下 100 mm 的双道次工艺中的相对密度分布:工艺 50 mm-50 mm (a); 10 mm-90 mm (b) 90 mm-10 mm (c)

Fig. 4 Distribution of relative density with double pass process 50 mm-50 mm (a), 10 mm-90 mm (b) and 90 mm-10 mm (c) at total reduction 100 mm

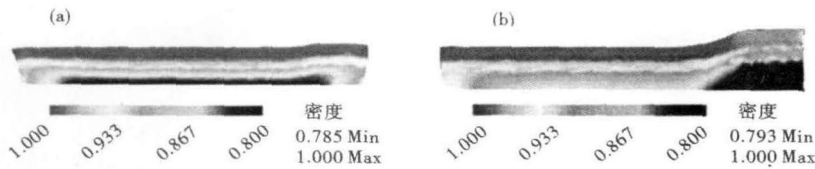


图 5 多道次压下量 50 mm-50 mm-35 mm (a) 与单道次压下量 135 mm (b) 工艺下的相对密度分布

Fig. 5 Distribution of relative density with 3 pass reduction 50 mm-50 mm-35 mm (a) and single pass reduction 135 mm (b)

量为 50 mm-50 mm-35 mm 三道次与 135 mm 单道次做对比,连铸坯密度分布模型见图 5。观察图 5 (a) 发现,表层相对密度达到了 0.999,而心部相对密度只能达到 0.817,而在图 5 (b) 表层相对密度为 0.995,而心部相对密度可以达

到 0.864, 可以看到采用单道次大压下工艺时坯料整体密度更均匀一些, 而且心部的致密程度也有较明显的提高。

轧制力预估结果可得, 在 1/4 模型下 50 mm-50 mm-35 mm 三道次轧制工艺时, 每道次最大轧制力为 1.94×10^6 、 2.39×10^6 、 2.07×10^6 N, 在 135 mm 单道次工艺下最大轧制力为 2.79×10^6 N, 增幅约为 14.3%。

3 现场实验结果对比

根据数值模拟结果显示, 在设备能力允许的前提下, 单道次压下率越大, 对心部组织的致密度改善就越好; 在多道次的压下量分配下, 小压下率和大压下率相配合能有较好的心部致密度, 且大压下率的道次安排越接近成品道次, 轧制出的产品心部致密度就越高。

依据模拟分析的结果, 采取了如下的工艺改进, 增加超过 20% 压下率的道次, 且在现有的坯型 (350 mm × 450 mm) 的情况下, 最终确定轧制工艺, 见表 1 中的工艺 B, 将工艺 A 中的第 6、7、8 三道次的压下量合并为工艺 B 中的第 6 道次, 此时该道次压下率达到 20.3%, 其他微调。

现场实验选取同一炉号的连铸坯 (350 mm × 450 mm 方轧制成 $\Phi 230$ mm 圆), 对同一炉号的 8 支连铸坯进行编号, 前 5 支连铸坯采用工艺 A 轧制, 后 3 支连铸坯采用工艺 B 轧制。加热工艺保持不变。

将工艺 A 下取得的试样编号为 1、2、3 号, 工艺 B 的试样编号为 4、5、6 号, 低倍照片可以看到 $\Phi 230$ mm 圆棒的偏析情况, 实际测量数据见表 2, 可以看到工艺 B 比工艺 A 轧制的 $\Phi 230$ mm 大棒材的致密

表 2 $\Phi 230$ mm 圆棒的偏析区域测量数据和探伤结果
Table 2 Measured data of segregation area of $\Phi 230$ mm round bar and nondestructive test results

试样号	宽/mm	高/mm	面积(S)/mm ²	缺陷当量/mm	离表面距离/mm
1	115	110	12 650	3.5	108
2	112	113	12 656	1.0	108
3	111	113	12 543	-	-
4	101	103	10 403	-	-
5	102	104	10 608	0.5	110
6	105	106	11 130	1.0	114

度有明显的改善。

本次抽取 1[#]、2[#] 以及 5[#]、6[#] 的第 1 支定尺 $\Phi 230$ mm 圆棒进行探伤检测, 结果如表 2 所示, 可以看到采用工艺 B 的比工艺 A 的缺陷当量要相对小一些, 且 B 工艺出现孔隙缺陷的部位比 A 工艺更靠近心部, 工艺 B 比工艺 A 有所改善。

4 结论

(1) 通过微可压缩模型, 用相对密度表征致密度, 单道次压下率 20% 时, 心部致密度即有一定的改善, 当压下率 30% 时, 心部致密度改善明显。

(2) 两道次的热力耦合模拟计算中, 总压下量不变时, 采用 10 mm-90 mm 工艺的心部致密情况改善最为有效, 而选用平均分配压下量的 50 mm-50 mm 工艺心部改善最不明显, 表明大压下率的道次越靠近成品道次, 对心部致密度提高越有帮助。

(3) 在多道次与单道次的对比中显示, 在总压下量不变的情况下, 采用单道次的工艺要比多道次的工艺对心部致密度改善要好。

(4) 通过对低倍组织的观察以及超声波探伤进行对比检测, 工艺 B 轧制棒材的心部质量有较明显改善, 现场实验结果与模拟结果能较好的吻合。

表 1 工艺 A 与工艺 B 的轧制参数

Table 1 Rolling parameters of process A and process B

工艺 A		轧槽	压下量/mm	相对压下率/%	工艺 B		轧槽	压下量/mm	相对压下率/%
RS1	3501	50	11.1		RS1	3501	50	11.1	
RS2→T	3501	60	15.0		RS2→T	3501	60	15.0	
RS3	3501	35	9.3		RS3	3501	55	14.7	
RS4→T	3501	45	13.2		RS4→T	3501	20	6.2	
RS5	3001	63	17.4		RS5	3001	68	18.7	
RS6	3001	15	5.0		RS6→T	3001	60	20.3	
RS7	3001	30	10.5		RS7	3007	53	15.7	
RS8→T	3001	15	5.9		RS8	3007	15	5.26	
RS9	3007	57	16.9		RS9	3007	35	12.96	
RS10	3007	20	7.14		RS10→T	BO14G	16	3.8	
RS11	3007	24	9.23		RS11	FRD230	49	17.5	
RS12→T	BO14G	18	7.62						
RS13	FRD230	49	17.5						

注: T 表示该道次轧制完后翻钢。

参考文献

- [1] 王瑁成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [2] 洪慧平, 康永林. 棒线型材轧制过程的计算机模拟仿真[J]. 技术讲座, 2004, 21(3): 38-47.
- [3] 白桦, 孟宪举, 陈连生, 等. 基于 DEFORM 的棒材热轧过程的数值模拟及缺陷分析[J]. 轧钢, 2008, 25(3): 28-30.
- [4] 王廷溥, 齐克敏. 金属塑性加工学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [5] 赵玲玲, 杜凤山, 许志强, 等. 大棒材热轧工艺的数值模拟[J]. 武汉科技大学学报, 2010, 33(4): 367-370.

王东兴(1964-), 男, 高级工程师, 副部长, 1986 年国防科技大学毕业, 轧钢工艺研究及质量控制。

收稿日期: 2013-01-25