

## 轧制变形对重轨脱碳深度的影响

喻 威 刘 升 杭乃勤 李浩进 孙志亮  
(武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081)

**摘 要** 钢厂轧制 U75V 钢(% : 0.71 ~ 0.80C, 0.50 ~ 0.80Si, 0.70 ~ 1.05Mn, 0.04 ~ 0.12V, 0.23Cu) 60 kg/m 重轨的铸坯尺寸为 380 mm × 280 mm, 经第 2 架粗轧后坯料的断面面积为 18 015 mm<sup>2</sup>。通过轧制变形试验和显微镜观察测试, 结合生产现场技术参数建立了有限元模型, 以研究分析轧制变形对脱碳层影响。得出经第 1 粗轧机架和第 2 粗轧机架孔型轧制后, 轨头脱碳层从 1.2 mm 降至 0.53 mm, 轨腰脱碳层从 1.5 mm 降至 0.54 mm, 轨底脱碳层从 1.5 mm 降至 0.83 mm。实测成品轨头的脱碳层为 0.2 mm。

**关键词** 重轨 轧制 脱碳层 有限元法

## Effect of Rolling Deformation on Depth of Decarburized Layer of Heavy Rail

Yu Wei, Liu Sheng, Hang Naiqin, Li Haojin and Sun Zhiliang  
(College of Science and Metallurgy Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

**Abstract** The section size of casting bloom to roll 60 kg/m heavy rail of steel U75V (% : 0.71 ~ 0.80C, 0.50 ~ 0.80Si, 0.70 ~ 1.05Mn, 0.04 ~ 0.12V, 0.23Cu) is 380 mm × 280 mm and the section area of rolled piece out of second stand rougher mill is 18 015 mm<sup>2</sup>. A finite element model is established by rolling deformation test and microscopic observation and measure combining with technical parameters at production situs to study and analyze the effect of rolling deformation on depth of decarburized layer of heavy rail. It is obtained that as the bloom is rolled by primary stand mill and second stand rougher mill, decarburized layer of rail head decreases to 0.53 mm from 1.2 mm, decarburized layer of rail waist decreases to 0.54 mm from 1.5 mm and decarburized layer of rail bottom decreases to 0.83 mm from 1.5 mm. The measured decarburized layer of finished rail head is 0.2 mm.

**Material Index** Heavy Rail, Rolling, Decarburized Layer, Finite Element Method

国内外对重轨钢坯加热脱碳做过大量的研究, 但对钢坯轧制过程脱碳层变化情况的研究较少<sup>[1-3]</sup>。本文用实验室轧制设备, 进行了 U75V 钢 60 kg/m 重轨轧制变形实验; 通过显微镜测法, 测出轧制前后坯料脱碳层的变化情况。并结合重轨现场生产工艺, 运用 ABAQUS 有限元仿真软件进行模拟分析, 得出脱碳层在轧制过程中的变化规律。

### 1 有限元模型

#### 1.1 建模思想

忽略轧制过程中的氧化铁皮脱落及轧制过程中的二次氧化铁皮损失, 根据体积不变定律, 轧件在轧制前的坯料体积等于成品轧件的体积, 假设坯料的原始脱碳均匀一致, 过程变形均匀, 假设钢坯表面脱碳均匀分布在成品外表面上<sup>[4]</sup>。

建模时, 重轨在各道次中轧制, 都需要重新对坯料进行网格划分; 并且在进入下一道次孔型时, 坯料

必须是已经过上一道次轧制完成的成品。在运用有限元软件时, 还需做出如下假设: (1) 网格的大小与坯料的脱碳层呈线性比例关系, 即将实际测得的初始脱碳层深度值按照一定的比例体现在有限元模型中; (2) 每个轧制道次重新划分网格时, 网格的初始值都与上一道次轧制完成后的脱碳层深度值一致; 模拟结果中脱碳层测量, 采用测量软件轧制前后脱碳层取均值的方法<sup>[5]</sup>。

#### 1.2 模型的建立

如表 1 所示为重轨 BD1 和 BD2 轧制规程, 其中“T”表示对应的轧制道次需要进行翻钢; 图 1 所示为第 2 架粗轧机的现场孔型图; 图 2(a) 中所示为进行第 1 道次轧制对应的 B2 孔, 第 1 架粗轧机共对应 7 个孔; 图 2(b) 为 BD2 有限元建模的孔型图, 其从右至左依次为 E、D、C、B、A 5 个孔型。

### 2 轧制变形实验与检验

#### 2.1 孔型中脱碳层有限元模拟

表 1 重轨第 1 机架 (BD1) 和第 2 机架 (BD2) 轧制规程  
Table 1 Pass schedule of primary stand (BD1) and second stand (BD2) for heavy rail

道次	轧机	孔型 No.	尺寸	
			面积/mm <sup>2</sup>	dh/mm
1	BD1	2/B2	95 357	50
2	BD1	2/B2	86 077	40
3	BD1	2/B2 T	74 557	48
4	BD1	2/B2	69 485	20
5	BD1	4/B4 T	61 724	44
6	BD1	4/B4	56 391	25
7	BD1	4/B4 T	52 400	24
8	BD2	E	43 361	55
9	BD2	D T	35 591	45.5
10	BD2	C T	27 071	95
11	BD2	B	20 935	20
12	BD2	A	18 015	10

实验原理:(1)利用铅块与热轧时的重轨有相似的力学性能,进行实验室铅块的轧制工艺代替现场重轨的热轧工艺;(2)根据现场测得的出加热炉时重轨坯料的脱碳层深度,在铅块上刻画出相应的网格;根据现场重轨生产工艺,分别测量坯料上的网格依次在箱型孔型、闭口切深孔型以及开口切深孔型中的相应变化情况,进而获得坯料脱碳层深度的变化规律<sup>[6]</sup>。

实验材料及制备方法:铅块尺寸 40 mm × 40 mm × 12 mm,其头部和尾部均进行网格划分,网格尺寸为 2 mm × 2 mm。切深孔型的材料,为上一道次加工的成品尺寸,将其断面磨平抛光,重新画上网

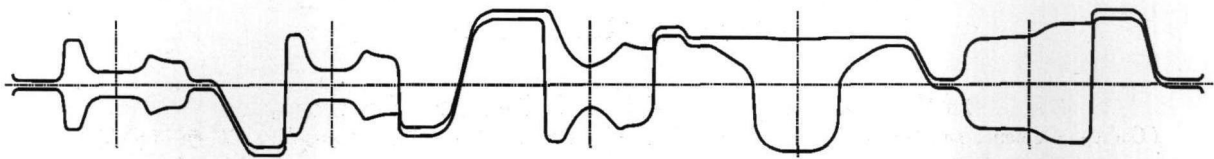


图 1 第 2 架粗轧机孔型图  
Fig. 1 Roll pass outline of second stand (BD2) rougher mill

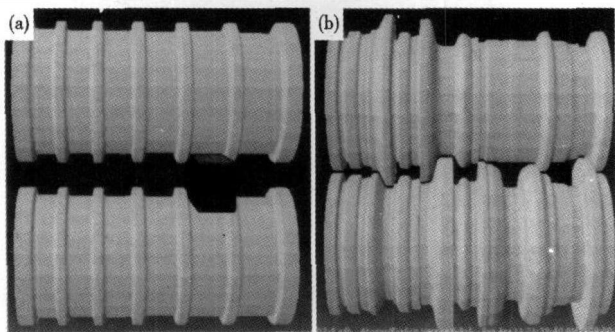


图 2 有限元模型:(a)第 1 架粗轧机孔型 B2 图;(b)第 2 架粗轧机孔型图

Fig. 2 Finite element model: (a) schematics of pass B2 of primary stand rougher mill; (b) schematics of pass of second stand rougher mill

格;后续孔型轧制材料的制备与此一致。图 3 所示为经 3 个孔型轧制后,坯料的网格照片。

通过坯料在各孔型轧制前后网格的变化情况,实验测量结果如下:

(1)箱型孔型中的变化:实验中坯料压下量为 17 mm,脱碳层网格轧制前为 2 mm,轧后测得为 1.84 mm,减至 92%;宽展面为 2.15 mm,增至 107.5%。

(2)闭口切深孔型中变化:脱碳层网格轧制前为 2 mm,轧后测得切深面为 0.94 mm,减至 47%;宽展面为 1.84 mm,减至 92%。

(3)开口切深孔型中变化:脱碳层网格轧制前为 2 mm,轧后测得压下面为 1.86 mm,减至 93%;宽展面为 2.2 mm,增至 110%。

### 2.2 现场成品脱碳层检验

脱碳层显微测量实验材料选自钢厂 U75V 钢

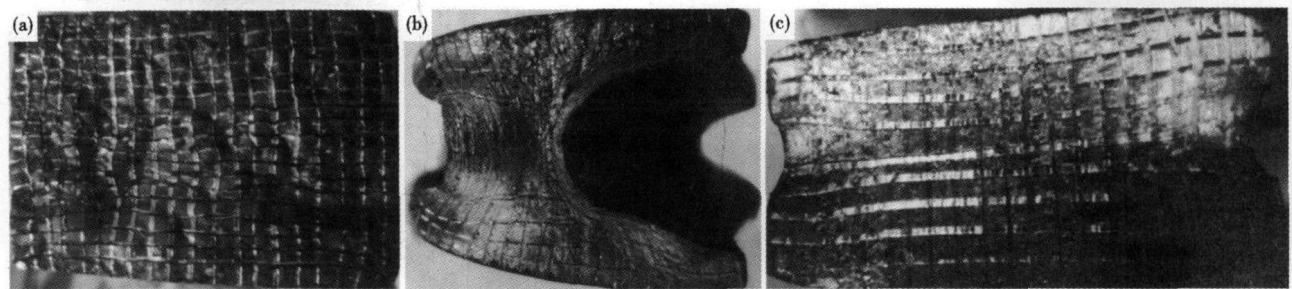


图 3 轧制后坯料断面的网格图:(a)箱型孔型;(b)闭口切深孔型;(c)开口切深孔型

Fig. 3 Grid picture of section of piece rolled by box pass (a), closed deep-cutting pass (b) and opened deep-cutting pass (c)

表 2 U75V 钢连铸坯化学成分/%

Table 2 Chemical composition of casting bloom of steel U75V /%

C	Si	Mn	P	V	Cu
0.71~0.80	0.5~0.8	0.7~1.05	≤0.03	0.04~0.12	0.023

(表 2)60 kg/m 的重轨连铸坯, 进入加热炉时坯料尺寸为 380 mm × 280 mm, 并且在加热炉中坯料将为轨头的一面添加涂料, 其余各面均不添加涂料; 进入第 2 架粗轧机时坯料尺寸为 240 mm × 220 mm, 然后依次进入切深孔型中完成粗轧。

为研究成品脱碳层深度, 采用线切割加工方式取样, 如图 4 所示, 分别取重轨成品的轨头、轨腰和轨底中心部分的一块 6 mm × 6 mm 的断面试样。根据 TB/T2344-2003 标准, 我国重轨脱碳层的检验标准是针对总脱碳层(全脱碳层 + 部分脱碳层)的深度要求, 重轨脱碳层测量方法按照 GB/T224-2003 规定的方法, 脱碳层深度为轨头表面至连续的封闭的铁素体网界限的距离。

《GB2585-2007 铁路用热轧钢轨》标准中规定“钢轨脱碳层深度不大于 0.5 mm”。

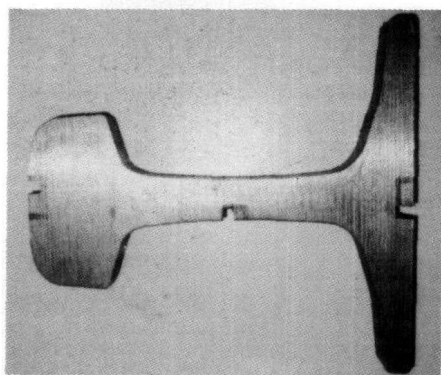


图 4 重轨成品取样位置

Fig. 4 Sampling location of heavy rail products

坯料刚出炉时的添加涂料一面的脱碳层深度为 1.2 mm(图 5a); 没有涂料面的脱碳层深度为 1.5 mm; 成品轨头部分脱碳层深度为 0.2 mm(图 5b)。

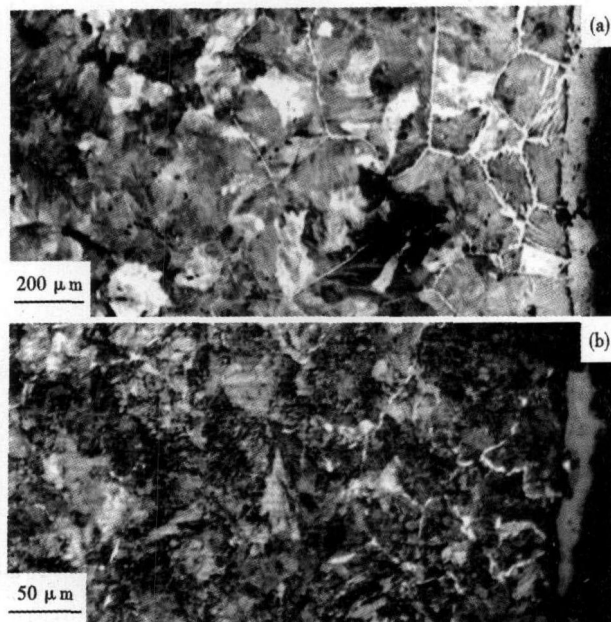


图 5 (a) 出炉后有涂层坯料的脱碳层深度-1.2 mm; (b) 成品轨头的脱碳层深度-0.2 mm

Fig. 5 (a) decarburized layer depth of heated bloom with painting layer- 1.2 mm; (b) decarburized layer depth of finished rail head- 0.2 mm

### 3 结果分析

#### 3.1 脱碳层变化

图 6 所示为模拟坯料脱碳层网格在孔型中轧制后的变化情况; 依据有限元模拟计算结果, 分别得出各道次变形后坯料脱碳层的变化情况, 如图 7 所示。

箱型孔型第 1 道次中, 实测脱碳层网格压下面减少 8%, 宽展面约增加 7.5%; 模拟得出脱碳层压下面减少 9%, 宽展面增加 7.3%, 两者基本吻合。

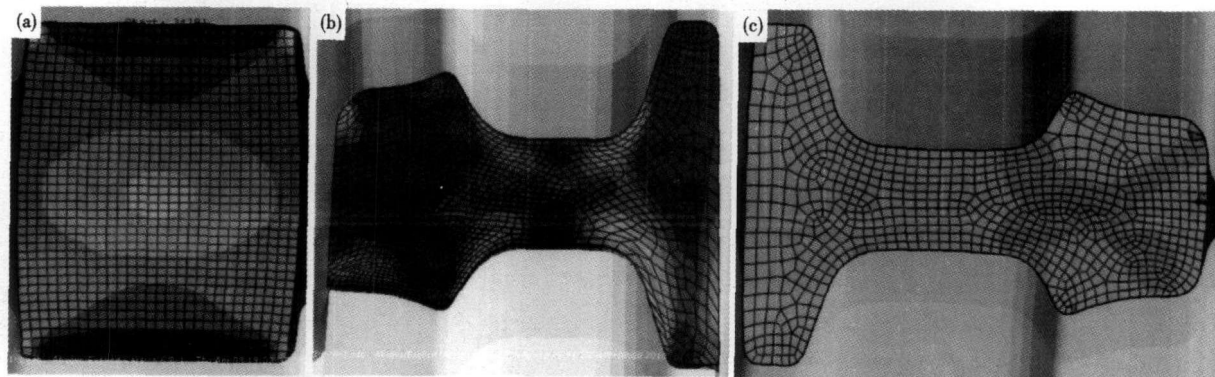


图 6 坯料脱碳层网格轧制后模拟分析: (a) 箱型孔型; (b) 闭口切深孔型; (c) 开口切深孔型

Fig. 6 Simulation analysis of decarburized layer grid of piece rolled by box pass (a), closed deep-cutting pass (b) and opened deep-cutting pass (c)

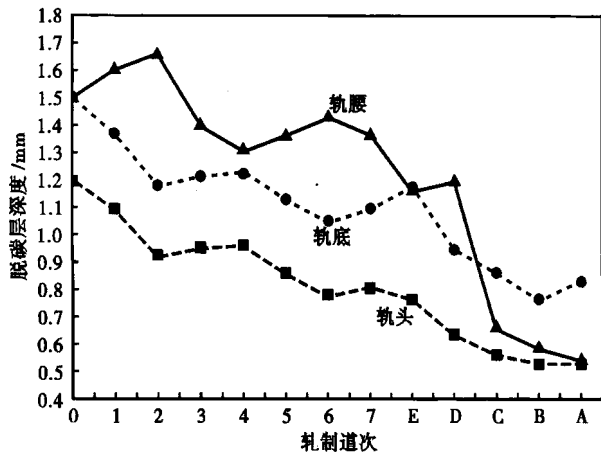


图7 各道次轨头、轨底和轨腰脱碳层变化曲线

Fig. 7 Change curves of decarburized layer of rail head, waist and bottom with each pass

闭口切深孔型中,脱碳层网格切深面减少53%,宽展面减少8%;模拟得出脱碳层切深面由1.20 mm减至0.65 mm,减少46%,宽展面由0.94 mm减至0.86 mm,减少8.5%。开口切深孔型中,脱碳层网格切深面减少7%,宽展面增加10%;模拟结果是脱碳层切深面由0.58 mm减至0.54 mm,减少6.8%,宽展面由0.76 mm变至0.83 mm,约增加9.2%。模拟结果与实验测得基本吻合。

### 3.2 分析

有限元模拟分析轧制前后的脱碳层深度时,将前一道次轧制变形后的脱碳层深度值作为下一道次轧制变形前的脱碳层的初始值<sup>[7]</sup>,根据箱型孔中各道次的变化情况,可以得出:

(1)坯料在第1架粗轧机箱型孔型各道次中轧制变形时,坯料压下面的脱碳层减小;坯料宽展面脱碳层增加。坯料在第2架粗轧机D孔型中轧制变形时,左右宽展面的作用不同,左宽展面在下一道次时将会作为切深面,在本道次变形中变形不均匀,由数据可知其脱碳层减少;而右宽展面测量的脱碳层处,相当于箱型孔型中的变化,脱碳层是增加的。

(2)坯料在第2架粗轧机C孔型和B孔型中轧制变形时,这两道次均是闭口切深孔型,坯料脱碳层在切深压下面均是减少,并且在左右宽展面的变化也是减少;在A孔型中轧制变形时,此道次是开口切深孔型,坯料脱碳层在轨腰压下面减少,而在轨头压下面和轨底压下面均是增加的。

(3)坯料在轧制过程中,脱碳层在不同的孔型中变化趋势不同;在同一孔型中,不同区域的脱碳层变化趋势也是不同,但是在整个轧制工艺流程中,坯

料的脱碳层总体变化趋势是减小。

(4)坯料出炉时脱碳层厚度是1.20 mm,根据模拟结果可以计算出经过第1架粗轧机孔型轧制以后,脱碳层在压下面均值变为0.80 mm;在宽展面均值变为1.36 mm;通过模拟结果分析计算出坯料在BD2孔型中,轨头部分脱碳层0.53 mm;轨腰部分脱碳层0.54 mm;轨底部分脱碳层0.83 mm。

(5)现场BD2轧机后布置有3机架万能连轧机组,坯料出BD2轧机后再经5道次万能连轧轧制成成品。万能孔型中坯料周边均匀压缩,表面脱碳层减小与轧件断面收缩率成正比。

## 4 结论

(1)坯料在箱型孔型各道次中轧制变形时,压下面的脱碳层减小;宽展面脱碳层增加。坯料经过BD1轧机7道次翻钢轧制,脱碳层轨头减至0.80 mm,轨腰减至1.36 mm,轨底部分减至1.09 mm。

(2)坯料在闭口切深孔型中,切深压下面脱碳层减少,宽展面脱碳层也减少;坯料在开口切深孔型中,轨腰压下面脱碳层减少,而在轨头压下面脱碳层和轨底压下面脱碳层均是增加的。

(3)坯料从出炉后经过第1架粗轧机和第2架粗轧机孔型轧制后,轨头脱碳层从1.20 mm减少至0.53 mm,减少约56%;轨腰脱碳层从1.50 mm减少至0.54 mm,减少约64%;轨底脱碳层从1.50 mm减少至0.83 mm,减少约45%。

### 参考文献

- 1 上田太郎,田中政夫,上田祐男. 炭素鋼における表面脱炭深さの非破壊測定に関する研究. 材料,1996,17(62):266
- 2 沈峰,吴夜明,张兴中,等. 国内外连铸生产重轨钢的工艺及特点. 连铸,2006(3):1
- 3 Chetan P. Malhotra Satyam S. Sahay. Model-based Control of Reheating Furnaces. Iron & Steel Review,2002,45(10):64
- 4 易然. 高速轧制和控冷条件下的钢材表面脱碳. 钢铁,1994,29(2):35
- 5 庄苗,由小川,廖剑辉,等. 基于ABAQUS的有限元分析和应用. 北京:清华大学出版社,2009
- 6 赵刚,胡衍生. 材料成型及控制工程综合实验指导书. 北京:冶金工业出版社,2008
- 7 石振东,刘国庆. 实验数据处理与曲线拟合技术. 哈尔滨:哈尔滨船舶工程学院出版社,1991

喻威(1982-),男,硕士研究生,轧制工艺优化及轧制过程的计算机模拟。

收稿日期:2010-07-06