\*\*\*\*\*\*\*

文章编号: 1000-8608(2011)05-0662-05

# 工艺参数对棒材粗轧过程晶粒尺寸影响模拟

岳重祥1,张立文\*1,阮金华1,顾森东1,廖舒纶2,高惠莉2

(1.大连理工大学 材料科学与工程学院,辽宁 大连 116024;2.东北特钢集团,辽宁 大连 116031)

摘要:利用商业有限元分析软件 MSC. Marc,建立了轴承钢 GCr15 棒材六道次粗轧过程的 三维有限元模型.借助 MSC. Marc 的二次开发功能,将轴承钢 GCr15 的微观组织演变模型与 棒材粗轧过程的热力耦合有限元模型相结合,模拟了不同工艺参数下奥氏体晶粒尺寸的演变 过程.模拟结果表明,粗轧过程中轧件中心奥氏体的晶粒尺寸随着轧制温度的升高而增大;轧 制速度对晶粒尺寸的演变基本没有影响;初始晶粒尺寸和轧辊辊缝的大小对奥氏体晶粒尺寸 的演变过程有一定影响,但对六道次粗轧后的晶粒尺寸影响不大.实际工艺参数下模拟得到 的轧件内部晶粒尺寸与实测值吻合较好.

关键词:棒材;晶粒尺寸;工艺参数;粗轧 中图分类号:TG335.6;O242.21 文献标志码:A

# 0 引 言

钢材轧制过程各生产环节中的工艺参数不是 稳定不变的,而是在一定范围内波动,因此要精确 控制生产过程中钢材内部微观组织的演变过程, 必须首先了解钢材轧制过程中各工艺参数对其内 部微观组织演变的影响.自 20 世纪 70 年代英国 学者 Sellars 等[1] 提出利用数学模型预测钢材在 热轧过程中的微观组织演变和各项力学性能以 来,世界各国的冶金工作者在这方面开展了大量 的研究工作,通过单道次和双道次压缩实验,一些 研究人员对不同钢种在热变形中的微观组织演变 进行了研究,并建立了相应的数学模型<sup>[2,3]</sup>.借助 这些模型,一些学者用数值模拟方法研究了不同 钢种在轧制过程中的微观组织演变情况.目前,对 板材<sup>[4,5]</sup>、带材<sup>[6]</sup>及H型钢<sup>[7,8]</sup>轧制过程的研究已 经取得了许多成果,但对棒材轧制过程的研究较 少.

本文针对东北特钢集团棒材生产线的实际情况,建立轴承钢 GCr15 棒材六道次粗轧过程耦合 微观组织分析的三维弹塑性有限元模型,并运用 该模型,对不同工艺参数下轴承钢 GCr15 棒材的 粗轧过程进行模拟计算,得到开坯温度、轧制速 度、初始奥氏体晶粒尺寸和轧辊辊缝大小对轧件 中心奥氏体晶粒尺寸的影响规律,并通过与实测 值对比,验证模型的准确性.

# 1 有限元模型的建立

东北特钢集团轴承钢 GCr15 棒材六道次粗 轧过程的孔型为"平箱-立箱-椭-圆-椭-圆". 轧件 的初始截面尺寸为 150 mm×150 mm,考虑到对 称性,取 1/4 轧件进行分析,图 1 为粗轧过程的有 限元模型. 轧件定义为弹塑性变形体,其长度满足 3 倍接触弧长,采用八节点六面体单元进行网格 划分. 轧辊定义为刚性体,按照轧机的实际分布情 况进行排列. 轧件尾部设置一刚性推动体,在道次 间隙时以上道次出口速度推动轧件向前运行. 模 型中采用更新 Lagrange 算法、von Mises 屈服准 则及 Prandtl-Reuss 流动方程等理论处理轧件的 热力耦合大变形问题. 模型在进行轧制过程热力 耦合分析的同时,通过有限元软件 MSC. Marc 的

**收稿日期**: 2009-11-15; 修回日期: 2011-07-04.

基金项目: 大连市优秀青年科技人才基金资助项目(2001-122).

作者简介: 岳重祥(1982-),男,博士生;张立文\*(1962-),男,教授,博士生导师,E-mail:commat@mail.dlut.edu.cn.

二次开发功能,耦合轴承钢 GCr15 的微观组织演 变模型,模拟轧件内部奥氏体晶粒尺寸在六道次 粗轧过程中的演变情况.



图1 六道次粗轧过程有限元模型

Fig. 1 Finite element model of 6-passes of roughing rolling

# 2 微观组织演变模型

热轧过程中轧件内部奥氏体组织将发生动态 再结晶、亚动态再结晶或静态再结晶及晶粒长大 等一系列演变,并直接影响轧件内部的最终组织 及性能,轧制过程中,当轧件内部应变大于动态再 结晶临界应变时,动态再结晶发生,如果在轧制过 程中发生动态再结晶但没有完成,在随后的间隙 时间将发生亚动态再结晶:反之,当应变小于临界 应变时,轧制过程将不发生动态再结晶,在随后的 间隙时间将发生静态再结晶.再结晶完成后的晶 粒是亚稳态的,在高温下会不断长大,称为晶粒长 大.由于未见关于轴承钢 GCr15 奥氏体组织演变 研究的系统报道,作者借助 Gleeble-3800 热/力模 拟实验机对轴承钢 GCr15 进行单道次压缩实验、 双道次压缩实验和奥氏体晶粒长大实验,分析实 验结果后得到了轴承钢 GCr15 的奥氏体组织演 变模型[9、10].

#### 2.1 动态再结晶临界应变

动态再结晶临界应变

 $\epsilon_{c} = 3.55 \times 10^{-3} d_{0}^{0.22} \epsilon^{0.19} \exp(4\ 461.0/T)$ (1) 式中: $d_{0}$ 为初始晶粒尺寸, $\epsilon$ 和T分别为应变速率 和热力学温度.

#### 2.2 再结晶动力学方程

一般按照 Avrami 方程对再结晶动力学方程进行描述:

 $X = 1 - \exp(-0.693(t/t_{0.5})^2)$  (2) 式中:t 为再结晶持续时间, $t_{0.5}$  为再结晶率达到 50%的时间.

#### 2.3 动态再结晶模型

再结晶率达到 50%的时间

 $t_{0.5} = 3.49 \times 10^{-2} \epsilon^{-0.95} \exp(2\ 486.0/T)$  (3) 动态再结晶平均晶粒尺寸由下式决定:

$$d = 3.4 \times 10^4 \varepsilon^{f(T)} \exp(g(T)) \tag{4}$$

式中

 $f(T) = -1.095\ 05 + 0.086\ 02 \times 10^{-4}\ T +$ 

$$1\ 283.\ 26/T$$
 (5)

$$g(T) = -1.82459 \times 10^{-5}T - 9189/T$$
 (6)

#### 2.4 亚动态再结晶模型

亚动态再结晶 to.5 的计算模型为

$$t_{0.5} = 0.042 \epsilon^{-0.045} \epsilon^{-0.644} d_0^{0.207} \exp(3.089/T)$$
(7)  
亚动态再结晶平均晶粒尺寸为

 $d = 393.3 \epsilon^{-0.76} \epsilon^{-0.016} d_0^{0.129} \exp(-4.757.4/T)$  (8)

### 2.5 静态再结晶模型

静态再结晶模型与亚动态再结晶模型相似, 再结晶率达到 50%的时间和再结晶后的晶粒尺 寸可以由下列关系式描述:

 $t_{0.5} = 5.396 \times 10^{-10} \epsilon^{-1.5} \epsilon^{-0.373} d_0^{1.47} \exp(16\ 203.6/T)$ (9)

$$d = 430.7 \epsilon^{-0.428} \epsilon^{-0.093} d_0^{0.146} \exp(-4.461/T)$$
 (10)

#### 2.6 晶粒长大

晶粒长大后尺寸为

 $d^{2.77} = d_0^{2.77} + 3.12 \times 10^{19} t \exp(-4.58 \times 10^5 / RT)$ (11)

# 3 模拟结果分析

东北特钢集团轴承钢 GCr15 棒材轧制过程的开坯温度为 1 045 C,初始速度为 266 mm・s<sup>-1</sup>.为了系统研究轧制工艺参数对轴承钢 GCr15 棒材粗轧过程奥氏体微观组织演变的影响,本文利用建立的有限元模型模拟不同开坯温度(995、1 045和 1 095 C)、不同初始速度(216、266 和 316 mm・s<sup>-1</sup>)及不同初始奥氏体晶粒尺寸(100、200 和 300  $\mu$ m)条件下轴承钢 GCr15 棒材的六道次粗轧过程,得到了轧件中心奥氏体晶粒尺寸的演变规律.同时本文还探讨了轧辊辊缝的调节对轴承钢 GCr15 棒材粗轧过程中奥氏体晶粒尺寸演变的影响.

# 3.1 开坯温度对晶粒尺寸演变的影响

图 2 给出了初始速度为 266 mm • s<sup>-1</sup>,初始 晶粒尺寸为 200 μm 时,不同开坯温度对粗轧过 程中轧件中心奥氏体晶粒尺寸演变的影响.从图 中可以看出,不同开坯温度条件下前三道次轧制 均能明显细化轧件中心的奥氏体晶粒;后三道次 轧制过程中,轧件中心的晶粒尺寸总体上逐渐减 小,但减小的程度不大.从图中还可以看出,第一 道次轧制后,晶粒尺寸减小的速度随着开坯温度的 升高而加快,这是由于较高温度下再结晶的速度较 快.随后在后五道次粗轧过程中,轧件中心的奥氏 体晶粒尺寸随开坯温度的升高而增大.这是因为温 度是影响再结晶晶粒尺寸的重要因素,温度越高, 各道次变形条件下的再结晶晶粒尺寸越大.



图 2 开坯温度对晶粒尺寸演变的影响 Fig. 2 Influence of cogging temperature on the grain size

#### 3.2 轧制速度对晶粒尺寸演变的影响

轧制速度是轧制过程中的重要基础工艺参数,了解轧制速度对轧件内部微观组织演变的影响能够帮助钢铁企业在保证产品质量的前提下提高生产效率.图3显示了开坯温度1045℃,初始奥氏体晶粒尺寸200μm条件下,不同初始速度对粗轧过程中轧件中心奥氏体晶粒尺寸的影响. 从图中可以看出,在其他条件一定的情况下,轧制速度对轧件中心奥氏体晶粒尺寸的影响.



Fig. 3 Influence of mill speed on the grain size

#### 3.3 初始晶粒尺寸对晶粒尺寸演变的影响

在对轧制过程中奥氏体晶粒尺寸的演变进行 数值模拟时,多数学者都要对初始晶粒尺寸进行 适当假设.如Li等<sup>[4,5]</sup>在模拟低合金钢 16Mn 与 低碳钢 SS400 板材的轧制过程时,分别假设初始 晶粒尺寸为 200 μm 和 300 μm. 本文认为为了验 证对初始晶粒尺寸进行适当假设的可行性,更为 了指导钢铁企业合理确定坯料加热制度,有必要 探讨初始晶粒尺寸对轧制过程中轧件内部奥氏体 晶粒尺寸演变的影响.图4为开坯温度为1045 ℃,初始速度为266 mm • s<sup>-1</sup>时,不同初始晶粒尺 寸对轴承钢 GCr15 粗轧过程中轧件中心奥氏体 晶粒尺寸演变的影响.从图中可以看出,尽管初始 晶粒尺寸相差数倍,其对粗轧过程轧件中心奥氏 体晶粒尺寸演变的影响也仅能够维持两个道次; 在粗轧的后四道次,不同初始奥氏体晶粒尺寸下 轧件中心奥氏体晶粒尺寸的演变过程几乎完全相 同.这说明初始晶粒尺寸的大小对多道次轧制过 程的最终晶粒尺寸基本没有影响,在进行多道次 轧制过程的组织模拟时,可以对初始晶粒尺寸进 行适当假设;实际轧制前的坏料加热过程可以适 当提高加热温度或适当延长保温时间.



图 4 初始晶粒尺寸对晶粒尺寸演变的影响 Fig. 4 Influence of initial grain size on the grain size

#### 3.4 轧辊辊缝对晶粒尺寸演变的影响

东北特钢集团轴承钢 GCr15 棒材六道次粗 轧过程中各道次辊缝的实际值分别为 31.5、 27.0、16.7、12.0、13.5 和 12.0 mm.本文为了研 究轧辊辊缝对轧件内奥氏体晶粒尺寸演变的影 响,将各道次的辊缝分别调整为 25.5、22.0、 13.7、9.5、11.0 和 9.5 mm 后,模拟了轴承钢 GCr15 棒材的六道次粗轧过程,得到了轧件中心 奥氏体晶粒尺寸的演变情况.轧件的初始速度为 266 mm•s<sup>-1</sup>,开坯温度为1045 ℃,初始奥氏体 晶粒尺寸假设为200 μm.

图 5 对比了辊缝调整前后轧件中心奥氏体晶 粒尺寸的演变情况.从图中可以看出,轧辊辊缝的 适当调整能够影响粗轧过程轧件内部奥氏体晶粒 尺寸的演变过程,但对六道次粗轧后的晶粒尺寸 影响不大.这表明,实际轧制过程中为保证产品尺 寸精度对辊缝所做的适当调整,不会对产品的性 能产生较大影响.



图 5 轧辊辊缝对晶粒尺寸演变的影响

Fig. 5 Influence of cleaning between rolls on the grain size

# 4 模拟结果的验证

采用本文所建立的有限元模型,对东北特钢 集团轴承钢 GCr15 棒材六道次粗轧的实际过程 进行了三维数值模拟,由于初始晶粒尺寸对六道 次粗轧后的晶粒尺寸基本没有影响,模拟时假设 初始晶粒尺寸为 200 µm. 图 6 是实际粗轧后保温 44.8 s 时轧件内部不同位置晶粒尺寸模拟结果云 图.从图中可以看出,晶粒尺寸从中心到表面呈递 减规律.晶粒尺寸的这种分布主要是由轧件内部 温度的分布决定的. 轴承钢 GCr15 棒材的六道次 粗轧过程中轧件表面与除磷水、空气及轧辊进行 热交换,温度较低,而轧件中心受变形热的影响, 温度较高.温度从中心到表面逐渐减小的分布在 很大程度上决定了晶粒尺寸的分布.从图中还可 以看出,轧件斜向表面附近的晶粒最为细小.这是 由于六道次粗轧过程中轧件斜向表面与每个轧辊 均能接触,轧件与轧辊间的热交换使轧件斜向表 面附近的温度最低.

为验证模拟结果,从东北特钢集团棒材生产 线上剪取轧制样品,采用饱和苦味酸溶液加少许 洗涤剂进行腐蚀,得到轧件内部的金相图片,如图 7 为六道次粗轧完成后保温 44.8 s 时轧件中心的 金相照片.对粗轧完成后样品不同位置处的奥氏 体晶粒尺寸进行测量后,可知轧件中心、1/4 厚度 和表面处晶粒尺寸的实测值分别为 36.4、27.5 和 15.7 μm,而模拟值分别为 34.8、30.5 和 22.5 μm.可见,对轧件内部晶粒尺寸的模拟结果与实测 结果吻合较好,而表面的误差较大.由于在本文的 有限元模型中,节点的晶粒尺寸是通过计算单元内 部积分点的晶粒尺寸后插值而来,表面节点晶粒尺 寸的计算结果会受到内部结果的影响而偏高.



图 6 晶粒尺寸模拟结果云图

Simulation results cloud chart of grain size



图 7 粗轧完成后轧件中心的金相照片

Fig. 7 Metallurgical picture at the center of rolled piece after roughing rolling

# 5 结 论

Fig. 6

将轴承钢 GCr15 的微观组织演变模型与棒 材粗轧过程的有限元模型相耦合,模拟了轴承钢 GCr15 棒材在不同工艺条件下的六道次粗轧过 程.模拟结果表明,在轴承钢 GCr15 棒材粗轧过 程中,轧制速度的改变基本不影响轧件中心奥氏 体晶粒尺寸的演变;轧辊辊缝的适当调整和初始 晶粒尺寸大小能够影响奥氏体晶粒尺寸的演变情 况,但对六道次粗轧后的奥氏体晶粒尺寸的演变情 心,而轧制温度的降低能够显著减小粗轧后奥氏体 的晶粒尺寸.同时,实际工艺参数下模拟得到的轧 件内部晶粒尺寸的模拟结果与实测值吻合较好.

# 参考文献:

- SELLARS C M, WHITEMAN J A. Recrystallization and grain growth in hot rolling [J]. Metal Science, 1979, 13(3-4):187-194
- [2]陈学军,赵宪明,吴 迪,等.棒线材组织-性能预测的 进展及展望[J].钢铁研究学报,2002,14(6):72-76
- [3] 康永林,董洪波. 热轧过程组织性能数值模拟研究现 状[J]. 轧钢, 2004, **22**(1):42-44
- [4] LI Xue-tong, WANG Min-ting, DU Feng-shan. Coupling thermomechanical and microstructural FE analysis in plate rolling process [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2008, 15(4):42-50
- [5] 李学通,杜凤山,臧新良.板带粗轧过程热、力、组织 耦合三维有限元模拟[J].中国机械工程,2006, 17(1):92-95
- [6] XU Yun-bo, YU Yong-mei, LIU Xiang-hua, et al.

Prediction of rolling load, recrystallization kinetics, and microstructure during hot strip rolling [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2007, 14(6):42-46

- [7] 崔振山,刘 才. 热轧过程微观组织演变的数值预报 与试验研究[J]. 机械工程学报, 2000, **36**(7):92-95
- [8] 崔振山,刘 才,乔桂英. H 型钢热轧过程微观组织的数值预报[J]. 燕山大学学报,2000,24(2):123-126
- [9] YUE Chong-xiang, ZHANG Li-wen, LIAO Shu-lun, et al. Mathematical models for predicting the austenite grain size in hot working of GCr15 steel [J]. Computational Materials Science, 2009, 45:462-466
- [10] 岳重祥,张立文,廖舒纶,等. GCr15 钢奥氏体晶粒 长大规律研究[J]. 材料热处理学报,2008,29(1): 94-97

# Simulation for influence of technological parameters on grain size during roughing rolling of rod

YUE Chong-xiang<sup>1</sup>, ZHANG Li-wen<sup>\*1</sup>, RUAN Jin-hua<sup>1</sup>, GU Sen-dong<sup>1</sup>, LIAO Shu-lun<sup>2</sup>, GAO Hui-ju<sup>2</sup>

- (1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
  - 2. Northeast Special Steel Group, Dalian 116031, China )

**Abstract**: Based on commercial finite element analysis software MSC. Marc, a 3D finite element model for the 6-passes of roughing rolling process of GCr15 steel rod was developed. With the aid of user subroutine, the microstructure evolution model of GCr15 steel was coupled with the thermalmechanical coupling FE model of roughing rolling process of rod to simulate the evolution of austenite grain size under different technological parameters. Simulation results show that austenite grains in the center of rolled piece become bigger with the increase of rolling temperature during the roughing rolling process. Mill speed has no influence on the evolution of grain size. Initial grain size, but have no effect on the grain size after the 6-passes of roughing rolling. The simulation results of the grain size in the interior of rolled piece under practical technological parameters are in good agreement with measured ones.

Key words: rod; grain size; technological parameters; roughing rolling