

## GCr15 轴承钢棒材连轧过程温度场数值模拟

姚俊<sup>1</sup> 唐广波<sup>1</sup> 刘正东<sup>1</sup> 马宝国<sup>2</sup>

(1 钢铁研究总院结构材料研究所,北京 100081; 2 宝山钢铁股份有限公司特殊钢分公司,上海 200940)

**摘要** 建立了 GCr15 轴承钢(0.99% C, 1.47% Cr) 160 mm × 160 mm 方坯经粗轧、一中轧、二中轧、KOCKS 轧机轧成 Φ25.0 mm 和 Φ35.0 mm 的轧件温度场预测模拟系统;研究了轧件轧制过程中温度的变化,一中轧入口轧制速度(0.55 m/s 和 1.1 m/s)对轧制过程轧件温度的影响,以及轧后冷却工艺(2 段式和 3 段式快冷)对轧件温度的影响。结果表明,轧件温度的计算值和实测值的相对误差 ≤ 3%。

**关键词** GCr15 轴承钢 棒材 温度场 数值模拟

## Numerical Simulation of Temperature Field for GCr15 Bearing Steel Bar during Continuous Rolling Process

Yao Jun<sup>1</sup>, Tang Guangbo<sup>1</sup>, Liu Zhengdong<sup>1</sup> and Ma Baoguo<sup>2</sup>

(1 Institute for Structural Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081;  
2 Special Steel Branch, Baoshan Iron & Steel Co Ltd, Shanghai 200940)

**Abstract** A system of numerical simulation to predict temperature field of rolling stock of bearing steel GCr15 (0.99% C, 1.47% Cr) from 160 mm × 160 mm billet rolling to Φ25.0 mm and Φ35.0 mm bar by rough rolling, No1 and No2 intermediate passes rolling and KOCKS mill rolling has been established to study the change of temperature of stock during rolling, the effect of inlet rolling speed at No1 intermediate passes (0.55 m/s and 1.1 m/s) on temperature of stock during rolling process and the effect cooling process after rolling (2 segment quick cooling and 3 segment quick cooling) on temperature of stock. Results show that the relative errors between calculated values and measured values are ≤ 3%.

**Material Index** GCr15 Bearing Steel, Bar Product, Temperature Field, Numerical Simulation

在 GCr15 棒材的生产过程中,温度控制是影响最终组织和质量的关键因素之一,而利用数值模拟的方法可以方便的得到轧件在整个热连轧生产流程中的温度场分布,从而考察在不同工艺条件下轧件的温度演变情况<sup>[1]</sup>。本文以宝钢股份特殊钢分公司(宝特)条钢厂为依托,运用有限差分的方法,建立了相关数学模型,对 GCr15 棒材轧制时的温度场进行了模拟计算和分析,利用现场采集到的温度数据对计算结果进行了验证,并考察了轧制速度和轧后水冷工艺对轧件温度的影响。

### 1 生产线简介

宝特条钢厂棒材生产线流程示意图见图 1。使用 160 mm × 160 mm 的方坯经粗轧、一中轧、二中轧、KOCKS 轧机轧成成品尺寸。粗中轧机组中前两个道次为箱型孔,其余道次均为平立交替布置的圆-椭圆孔型。粗中轧机组使用 1 套固定的孔型系统,轧件的减定径由 KOCKS 轧机完成,实现自由尺寸轧制。KOCKS 轧机为三辊切线孔型,3 个轧辊互成 120° 布置。轧件在每个水箱中的最大温降可达 80 ~ 120 °C,通过调节各个水箱的水流量来控制轧件进

入 KOCKS 轧机和终轧的温度以及轧后的冷却速率,进而实现对轧件微观组织的控制。

### 2 模型建立

#### 2.1 化学成分与物性参数

模拟的 GCr15 轴承钢(表 1)密度 7 810 kg/m<sup>3</sup>,导热系数 33.6 W/(m · K),比热容 729 J/(kg · K),计算中的空气温度取值 25 °C,冷却水温度 20 °C。

#### 2.2 主要假设

为提高计算速度、简化模型,主要假设有:(1)方坯出加热炉时温度均一;(2)由于轧件长度远大于断面尺寸,忽略轧件长度方向上的热传导;(3)在接触变形区,认为摩擦热和润滑剂对轧件温度场的影响相互抵消;(4)轧件在箱形孔轧制时采用方形断面的二维数学模型,之后将轧件断面根据面积相等的原则等效为圆形,并忽略周向传热。

上述第 4 条假设的主要依据是轧件在轧制过程中,横截面形状不断变化,即使在圆孔型中变形后,其断面也不是标准的圆形,这使得利用有限差分建立精确的传热模型非常困难,而且 Lee 等人<sup>[2]</sup>在棒材热轧模拟的系列研究中将轧件断面等效为圆形获

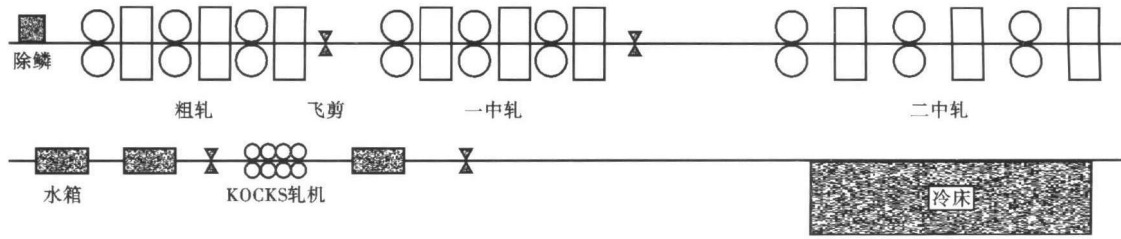


图1 宝特棒材轧制生产线的流程示意图  
Fig. 1 Layout of continuous bar rolling line of Baosteel Special Steel

表1 GCr15 轴承钢的化学成分/%  
Table 1 Chemical composition of GCr15 bearing steel /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
0.99	0.23	0.31	0.007	0.004	1.47	0.04	0.02	0.07	0.022

得了比较满意的结果。同时考虑到整个轧制过程中机架平立交替布置,所以忽略轧件的周向传热,将模型简化为一维。

### 2.3 变形热的处理

轧件在轧制时由于塑性变形产生热量,其大小可由下式计算:  $\dot{q}_p = \int_V \eta_p \sigma \dot{\epsilon} dV$  (1)

式中:  $\sigma$ 、 $\dot{\epsilon}$  分别为计算单元的流变应力和应变速率;  $\eta_p$  塑性变形功转化为热能的比例,取值一般为  $\eta_p = 0.9 \sim 0.95$ 。

### 2.4 空冷换热系数

轧件在辊道上运行时,自由表面处于空冷状态,主要以热辐射和对流两种形式和外界进行热交换,其换热系数  $h_a$  为:

$$h_a = 2.25(T_s - T_a)^{0.25} + \frac{\sigma \epsilon (T_s^4 - T_a^4)}{T_s - T_a} \quad (2)$$

式中:  $T_s$ 、 $T_a$  分别为轧件表面温度和空气温度/K;  $\sigma$  斯蒂芬-玻尔兹曼常数/[W · (m<sup>-2</sup> · K<sup>-4</sup>)];  $\epsilon$  材料的辐射系数,本文取值 0.7。

### 2.5 除鳞换热系数

轧件在除鳞传热过程的界面换热系数为<sup>[3]</sup>:

$$h_{des} = 1.0 \times 10^3 (920.4 \dot{W}^{0.75} T_s^{-1.2} + 0.151) \quad (3)$$

式中:  $\dot{W}$  轧件表面除鳞水的流率/[L · (m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)];  $T_s$  轧件表面温度/K。

### 2.6 辊缝变形区中的换热系数

一般多将孔型轧制时轧件在辊缝变形区中的换热系数取为定值<sup>[4,5]</sup>,范围为 4 000 ~ 18 000 W/(m<sup>2</sup> · K)。唐广波等人<sup>[6]</sup>认为板带轧制时轧件在变形区中的换热系数与轧制速度和平均单位轧制压力成正比关系,参考这一结论,结合棒材轧制的特

点,在本研究中,粗轧、一中轧、二中轧和 KOCKS 轧机中换热系数分别取值为 5 000、6 000、8 000、12 000 W/(m<sup>2</sup> · K)。

### 2.7 水冷换热系数

圆棒水冷时的对流换热系数模型<sup>[7]</sup>:

$$h_c = 0.581 \dot{W}^{0.451} [1 - 0.0075(T_w - 273)] \quad (4)$$

式中:  $\dot{W}$  水流率/[L · (m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)];  $T_w$  工业水温/K。

## 3 计算结果及分析

### 3.1 全流程温度场

从宝特条钢厂取得实际生产时的相关参数,主要包括生产线布置、孔型流程和孔型参数、除鳞水量、水箱阀门开度和喷水量、轧件在各段运行的速度和时间等,将这些参数输入所开发的软件系统中,通过计算可得到轧件在轧制全流程中的温度演变,包括轧件的表面、中心、平均温度。生产  $\Phi 25.0$  mm 和  $\Phi 35.0$  mm GCr15 轴承钢棒材时,主要工艺参数如表 2 所示。通过计算得到轧件的温度演变分别如图 2(a,b) 所示。

表2 轧制 GCr15 轴承钢  $\Phi 25.0$  mm 和  $\Phi 35.0$  mm 棒材时的主要工艺参数

Table 2 Main processing parameters for rolling  $\Phi 25.0$  mm and  $\Phi 35.0$  mm bars of GCr15 bearing steel

成品规格/mm	方坯尺寸/mm	粗轧出口尺寸/mm	二中轧道次数	KOCKS 入口尺寸/mm	KOCKS 轧机道次数	轧后水箱水量/(m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )
$\Phi 25.0$	160 × 160	$\Phi 84.0$	2	$\Phi 30.5$	3	234
$\Phi 35.0$	160 × 160	$\Phi 84.0$	0	$\Phi 43.4$	4	106

轧件在高压水除鳞、水箱中冷却,辊缝变形区中时因为与外界的强制对流换热,表面温度急剧下降,而在道次间隔的空冷状态下,由于轧件的中心温度高于表面温度,内部热传导的影响大于轧件表面以对流和辐射形式和外界发生热交换的影响,使轧件表面温度升高,所以造成表面温度呈“锯齿状”变化。

在粗轧阶段,由于轧制速度慢,轧件与轧辊接触

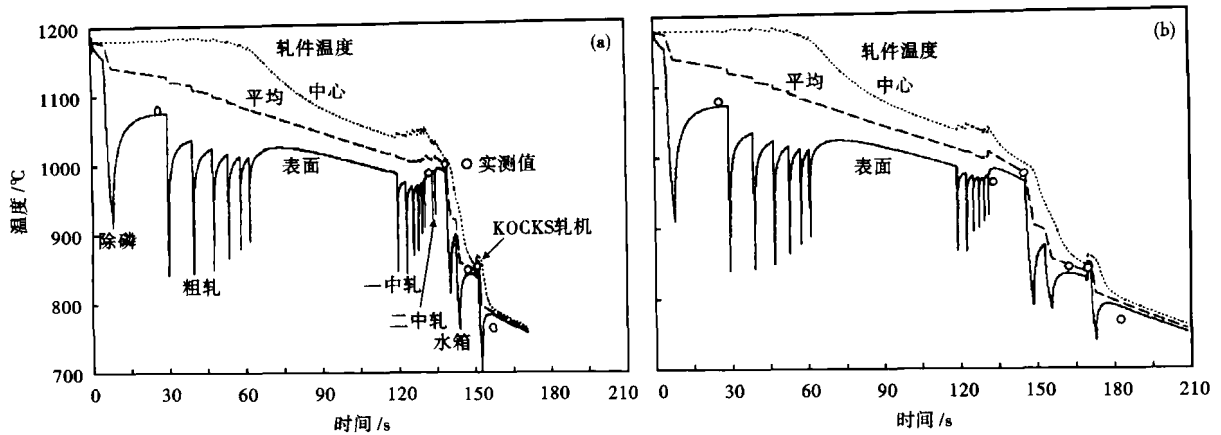


图 2 计算的轧件温度曲线与测量点轧件温度实测值: 轧材规格 (a) Φ25.0 mm; (b) Φ35.0 mm

Fig. 2 Calculated temperature curves of stock and measured temperature values of stock at measuring location, size of rolled products: (a) Φ25.0 mm; (b) Φ35.0 mm

的时间长,使轧件表面温度大幅下降;由于轧件表面和轧辊接触换热及轧件和环境对流辐射换热还没“渗透”到心部,同时由于变形热的存在,使轧件的中心温度略有升高;而此时应变速率低,变形热对轧件总体温度的影响有限,使平均温度呈下降趋势。在一中轧阶段,因为轧制速度增大,轧件与轧辊的接触时间变短,轧件表面温度下降幅度比粗轧时小,而且由于变形速率增大,变形热的贡献也更大,使平均温度下降相对粗轧阶段更加平缓。在二中轧和 KOCKS 轧机轧制阶段,平均温度呈上升趋势,这是因为轧件的运行速度快,变形速率大,轧件与轧辊的接触时间短,变形热的作用大于轧件与轧辊强制热交换的影响。

在二中轧后轧件进入水箱中冷却降温,从而控制轧件进入 KOCKS 轧机的温度,现场实测值为 846 °C。对于 GCr15 轴承钢,当温度降低时,从 900 °C 碳化物即开始优先沿  $\gamma$  晶界析出,由于 KOCKS 机组延伸道次的总压下量能达到 60%,使析出的碳化物破碎,从而降低成品网状碳化物级别。

由于碳化物在 750 ~ 700 °C 析出最为强烈,终轧后轧件进入水箱快速冷却,之后缓冷以防止生成白点。

由表 3 可以看出,模型计算结果和测量值基本

一致,绝对误差在 20 °C 以内,相对误差不超过 3%。

### 3.2 轧制速度的影响

对于 Φ25.0 mm 棒材,将一中轧入口速度从 0.55 m/s 增加到 1.1 m/s 后,其他工艺参数不变,轧件的温度演变如图 3 所示。增加轧制速度,使轧件与轧辊的接触时间变短,同时使轧件的应变速率增加,产生的塑性变形热增多,因此轧件在轧制过程中的温升明显增加。轧件在水箱中的运行时间变短,使轧件进入 KOCKS 轧机的温度升高,约为 925 °C,轧后终冷温度约为 815 °C,返红温度约为 875 °C,处于碳化物强烈析出的温度范围,必将导致严重的网状碳化物,需要增大水箱水量来控制轧件温度。

### 3.3 轧后水冷工艺研究

从图 2 可以看出,在实际生产条件下,测量值和模拟值都表明轧件的终冷温度约为 700 °C,返红温度约为 760 °C,处于碳化物强烈析出的温度范围,之所以获得合格的成品是因为在 KOCKS 轧机中先析出的碳化物被破碎。如果要进一步降低网状碳化物级别,可以让轧件轧后快冷至更低温度;研究表明,当返红温度小于 650 °C,可以基本消除了原始组织中的网状碳化物<sup>[8]</sup>。当棒材尺寸较大时,冷却时内外温差大,使用一次快冷要获得较低的返红温度,易造成表面形成马氏体,而中心为粗大的珠光体和较严重的网状碳化物,因此宜采用间断式快冷工艺<sup>[9]</sup>。在本研究中,考察了在该生产线上再增加一个和两个水箱的情况,通过调节水箱水量,控制返红温度在 600 ~ 650 °C,获得如图 4 所示的温度演变曲线。

在 2 段式快冷工艺中两个水箱的水量调至最大,返红温度约 656 °C,而通过 3 段式快冷工艺使

表 3 测温点处温度计算值与实测值的比较

Table 3 Comparison between calculated values and measured values of temperature at measuring location

规格 $\Phi$ / mm	测温点	温度/°C					
		粗轧 入口	出口		KOCKS 轧机		3# 水箱 出口
			一中轧	二中轧	入口	出口	
25.0	计算值	1 075	987	987	840	853	781
	实测值	1 080	986	998	846	851	765
35.0	计算值	1 075	983	965	834	842	788
	实测值	1 082	964	976	843	841	769

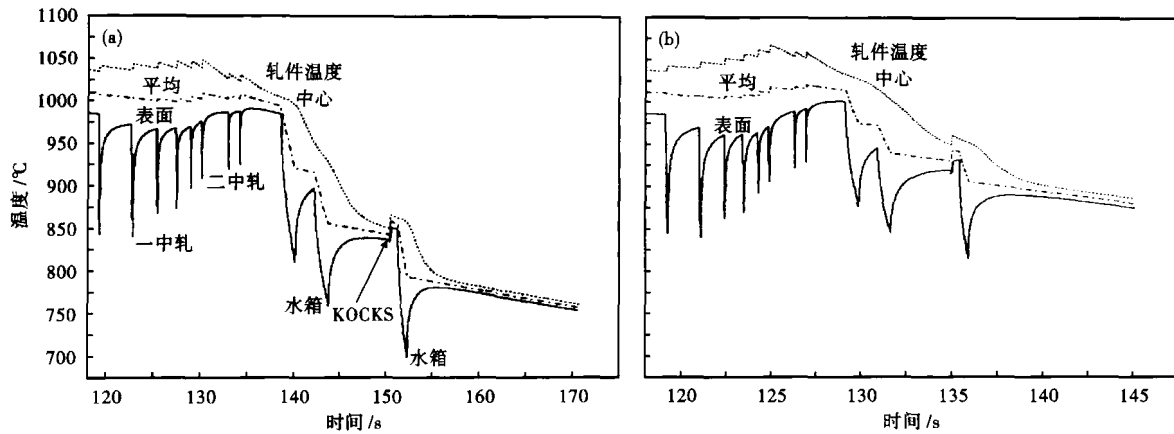


图3 计算的轧件温度曲线与测量点轧件温度的实测值,轧件一中轧入口速度:(a)0.55 m/s;(b)1.1 m/s

Fig. 3 Calculated temperature curves of stock and measured temperature values of stock at measuring location, inlet rolling speed at No1 intermediate rolling passes: (a) 0.55 m/s; (b) 1.1 m/s

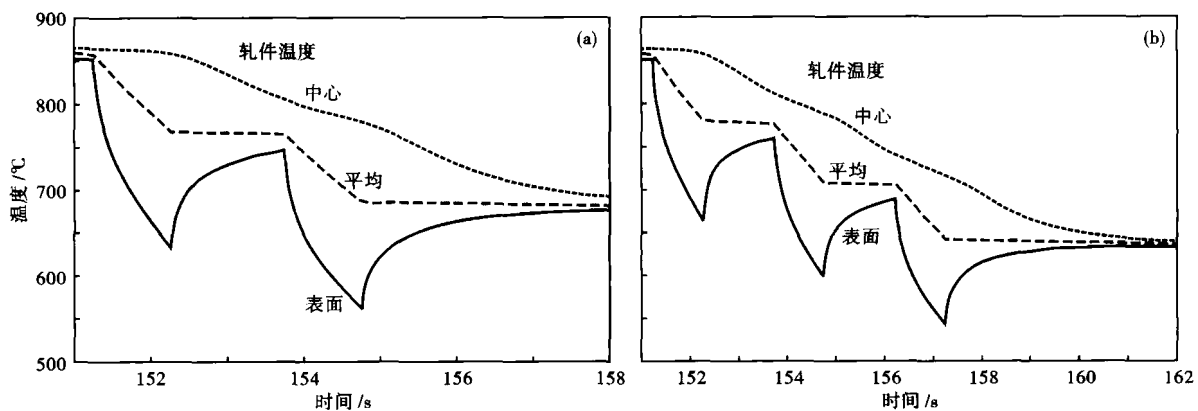


图4 计算的 $\Phi 25.0$  mm圆棒轧后温度曲线,间断式快冷工艺:(a)2段式;(b)3段式

Fig. 4 Calculated temperature curves of  $\Phi 25.0$  mm bar product after rolling by interrupted quick cooling process: (a) 2 segment mode; (b) 3 segment mode

$\Phi 25.0$  mm圆棒的最终返红温度在 $620^{\circ}\text{C}$ 左右,达到了所需的温度目标。

#### 4 结论

开发了GCr15棒材热连轧过程温度场预测系统,并根据宝特条钢厂的实际生产参数,对不同工艺条件下、轧制不同规格棒材时轧件的温度场进行了模拟计算,计算值与现场实测值的绝对误差在 $20^{\circ}\text{C}$ 以内,相对误差不超过3%,具有较高的精度,有利于制定和优化轧制工艺。

“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAE03A08)

#### 参考文献

- 1 唐广波. 热轧带钢热轧区物理冶金过程数值模拟及应用研究: [博士论文]. 北京:北京科技大学,2005
- 2 Lee Y, Choi S, Hodgson P D. Integrated Model for Thermo-mechanical Controlled Process in Rod (or Bar) Rolling. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125: 678

- 3 Zufia A, Llanos J M. Mathematical Simulation and Controlled Cooling in an EDC Conveyor of a Wire Rod Rolling Mill. ISIJ International, 2001, 41(10): 1282
- 4 廖舒纶, 张立文, 岳重祥, 等. GCr15 轴承钢棒材连轧过程的二维和三维模拟. 特殊钢, 2007, 28(5): 31
- 5 Kwon H C, Lee Y, Im Y T. Experimental and Numerical Prediction of Austenite Grain Size Distribution in Round-oval Shape Rolling. ISIJ International, 2003, 43(12): 1967
- 6 唐广波, 刘正东, 康永林, 等. 热轧带钢传热模拟及变形区换热系数的确定. 钢铁, 2006, 41(5): 36
- 7 Morales R D, Lopez G, Olivares I M. Heat Transfer Analysis during Water Spray Cooling of Steel Rods. ISIJ International, 1990, 30(1): 48
- 8 庄振东, 王敏华. 高碳铬轴承钢棒材轧后控制冷却与快速球化工艺. 特殊钢, 2000, 21(1): 53
- 9 李胜利, 徐建忠, 王国栋, 等. 大断面轴承钢控制轧控冷工艺的模拟与分析. 东北大学学报, 2006, 27(6): 658

姚俊(1983-),男,博士生,材料加工过程组织、性能模拟及数据库开发等研究。

收稿日期:2009-11-16