

## GCr15 轴承钢棒材连轧过程的有限元模拟

洪慧平 冯富春 栾瑜 肖玉

(北京科技大学材料科学与工程学院,北京 100083)

**摘要** 通过 Gleeble-1500 热模拟试验机对 GCr15 轴承钢(成分:0.99C,0.31Mn,0.24Si,0.010P,0.003S,1.44Cr,0.01V)热轧材进行 800~1150℃,变形速率 0.1~3 s<sup>-1</sup>,变形量 0.7 的等温压缩变形试验。采用已建立的 Hensel/Spittel 变形抗力模型,运用 LARSTRAN/SHAPE 有限元模拟软件对 200 mm×200 mm 连铸方坯连轧 Φ70 mm GCr15 轴承钢棒材 10 道次热连轧过程进行三维热力耦合有限元模拟。通过分析各道次轧件温度场、应力应变场、宽展及轧制力参数的变化规律,预测了轧件在第 5 道次最有可能在角部出现裂纹,因此在轧制过程应减小第 5 道次变形量,防止产生裂纹;各道次出口处轧件横截面宽度、高度尺寸的模拟值与实测值的相对误差分别为 0.40%~5.90% 和 0.28%~6.11%。

**关键词** 有限元模拟 连轧 宽展 GCr15 钢 棒材

## Finite Element Simulation on Continuous Rolling Process of Bearing Steel GCr15

Hong Huiping, Feng Fuchun, Luan Yu and Xiao Yu

(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** The test of isothermal compressive deformation on hot-rolled product of bearing steel GCr15 (成分:0.99C,0.31Mn,0.24Si,0.010P,0.003S,1.44Cr,0.01V) with strain rate 0.1~3 s<sup>-1</sup>, strain 0.7 at 800~1150℃ is carried out by using Gleeble-1500 thermal simulation machine. And the 3-dimensional thermal-mechanical coupling finite element simulation on ten passes continuous hot-rolling process for Φ70 mm bar products of bearing steel GCr15 rolling from 200 mm×200 mm casting billet has been engaged based on established Hensel/Spittel deformation resistance model and by using LARSTRAN/SHAPE finite element simulation software. By analyzing the variation rule of stock temperature, strain-stress field, spread and rolling load parameters in each pass, it is obtained that the cracks maybe occur at the corner of stock in fifth pass therefore during rolling process should reduce the strain in fifth pass to prevent formation of cracks. Comparing the simulated value and the measured value, the relative errors of width and height size of stock section at layout of each pass are respectively 0.40%~5.90% and 0.28%~6.11%.

**Material Index** Finite Element Simulation, Continuous Rolling, Spread, Steel GCr15, Bar Product

通过轧制过程有限元模拟可以很方便的获得特殊钢棒材热连轧过程中温度场、应力应变场以及轧制力的变化规律,能够为轧制工艺的制定提供理论依据<sup>[1]</sup>。

### 1 实验材料与方法

热压缩试样取自 Φ70 mm GCr15 热轧棒材,其化学成分为(成分):0.99C,0.31Mn,0.24Si,0.010P,0.003S,1.44Cr,0.02Mo,0.05Ni,0.01V,0.12Cu。

将试样加工成 Φ10 mm×15 mm 的圆柱体,在 Gleeble-1500 热模拟试验机上进行等温压缩变形,试样以 10℃/s 的加热速率加热至 1250℃,保温 5 min,再以 5℃/s 的速度冷却到相应的变形温度,并保温 1 min 以消除试样的内部温度梯度,最后在变形温度下进行等温变形。变形温度为 800、900、1000、1150℃,变形速率为 0.1、3 s<sup>-1</sup>,变形量 0.7。试样在变形结束后迅速淬水冷却。

### 2 变形抗力模型的建立

在变形抗力模型<sup>[2]</sup>研究过程中针对实验钢种的变形特点,选用了两个变形抗力模型进行回归。

模型 1 采用 Hensel/Spittel I 模型:

$$\sigma = p_0 \exp(p_1 T) \dot{\epsilon}^{p_2} \epsilon^{p_3} \exp(p_4 \epsilon) \quad (1)$$

式中:  $T$ - 变形温度 /℃;  $\dot{\epsilon}$ - 变形速率 /s<sup>-1</sup>;  $\epsilon$ - 真应变;  $p_0 \sim p_4$ - 回归系数。

模型 2 采用 Hensel/Spittel II 模型:

$$\sigma = A \exp(aT) \dot{\epsilon}^{(b+cT)} \epsilon^d \exp(e\epsilon) \quad (2)$$

式中:  $A, a, b, c, d, e$  均为材料常数。

根据单道次压缩热模拟实验得出的应力-应变数据,对模型中的各参数进行非线性拟合,回归系数见表 1。

采用模型 1 拟合得到的变形抗力模型为:

表 1 GCr15 轴承钢变形抗力模型回归系数  
Table 1 Regression coefficient of deformation resistance model of bearing steel GCr15

模型 1					相关系数	模型 2					相关系数	
$P_0$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$		$A$	$a$	$b$	$c$	$d$		$e$
5 578.6	-0.003 51	0.138 9	0.216	-0.443 5	0.989	6 512.6	-0.003 5	0.023 2	$1.187 \times 10^{-4}$	0.277 2	-0.707 8	0.932

$$\sigma = 5\,578.6 \exp(-0.003\,51\,T) \varepsilon^{0.138\,9} \varepsilon^{0.216} \exp(-0.443\,5\,\varepsilon) \quad (3)$$

采用模型 2 拟合得到的变形抗力模型为:

$$\sigma = 6\,512.6 \exp(-0.003\,5\,T) \dot{\varepsilon}^{(0.023\,2 + 1.187 \times 10^{-4}T)} \varepsilon^{0.277\,2} \exp(-0.707\,8\,\varepsilon) \quad (4)$$

由图 1 可以看出,所用模型的计算结果与实验结果均吻合较好,只有在应变量较大时,两者差别稍大,这主要是由于试样在热压缩后期温度降低而导致变形抗力增大导致的。综合考虑后选择模型 1 作为本次模拟的变形抗力模型。

### 3 有限元模型的建立

#### 3.1 有限元模型

根据 200 mm × 200 mm GCr15 钢连铸坯的对称性,只建立轧件、轧辊的 1/4 模型。采用箱-箱-箱-方箱-椭圆-椭圆-圆-椭圆-圆孔型系统,机架间距取相邻机架轧辊直径和的一半,轧件采用 8 节点 6 面体等参单元划分。

为了提高计算精度,本文将 10 道次连轧过程分为两部分建模,模型 1 模拟前 6 道次连轧过程,模型 2 模拟后 4 道次连轧过程。在模型 1 计算完成之后,将轧件上网格畸变的头尾部删除,并对轧件进行网格重划分,形成新的网格和节点。通过数值传递技术将模型 1 中的模拟结果传递到模型 2 中,并作为模型 2 模拟时的初始条件。模型参数如表 2 所示,连轧模型如图 2 所示。

#### 3.2 材料物性参数和边界条件

采用 LARSTRAN/SHAPE 软件的热-力耦合粘塑性有限元法,材料的密度、比热容、热膨胀系数和导热系数均是温度的函数。开轧温度为 1 050 °C,轧辊和刚性推板取 300 °C,环境温度 30 °C,轧辊、推板和轧件的摩擦系数取 0.3,泊松比取 0.3。

在轧制过程中,轧件和轧辊接触面之间发生接触传热,可表达为:  $q = h_c(t - t_r)$  (5)

表 2 GCr15 轴承钢轧制过程各模型参数

Table 2 Parameters of each model of bearing steel GCr15 during rolling process

模拟道次	模型尺寸/mm	单元数	节点数
1~6	935	1 980	2 744
7~10	660	4 488	5 963

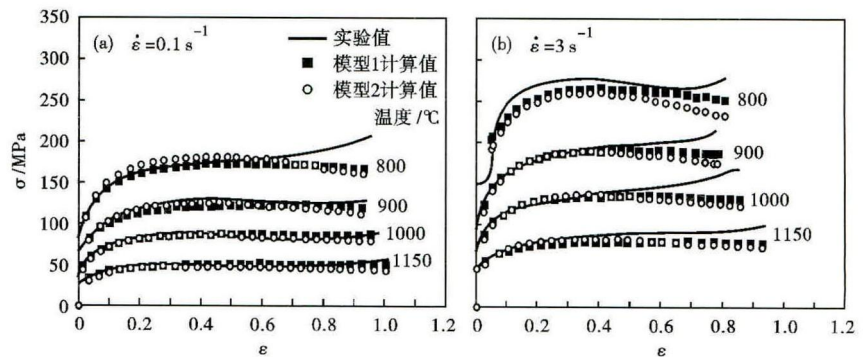


图 1 GCr15 轴承钢变形抗力实验值和计算值的比较

Fig. 1 Comparison between measured value and calculated value of deformation resistance of bearing steel GCr15

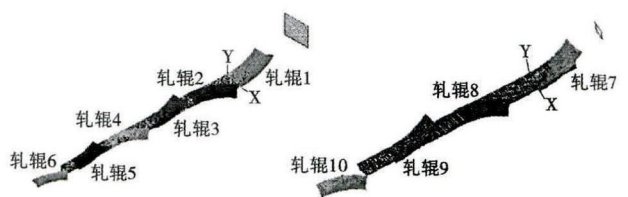


图 2 连轧轴承钢 GCr15 有限元模型

Fig. 2 Finite element model for continuous rolling process of bearing steel GCr15

式中:  $q$ - 接触热传导系数;  $t$ - 轧件温度;  $t_r$ - 轧辊温度,接触换热系数取 20 kW/(m² · °C)。

依据文献[3]取轧件的热辐射系数为 0.86。在轧制过程中,绝大部分塑性变形功都会转换成热量使轧件温度升高,功热转换系数取 0.9,轧辊和轧件产生的摩擦热,平均分至轧件和轧辊接触体上处理<sup>[3-4]</sup>。

### 4 模拟结果分析

#### 4.1 塑性变形结果分析

图 3(a)可见,GCr15 轴承钢第 6 道次出口处轧件头部畸变较大,边缘突出,中间形成内凹,模拟的轧件截面形状与现场观察到的形状十分吻合。由于

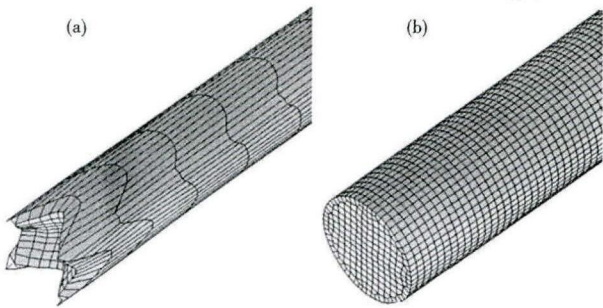


图 3 第 6 道次轧件网格畸变 (a); 网格重划分后轧件模型 (b)

Fig. 3 Mesh distortion of stock in six pass rolling process (a); model of stock after re-meshing (b)

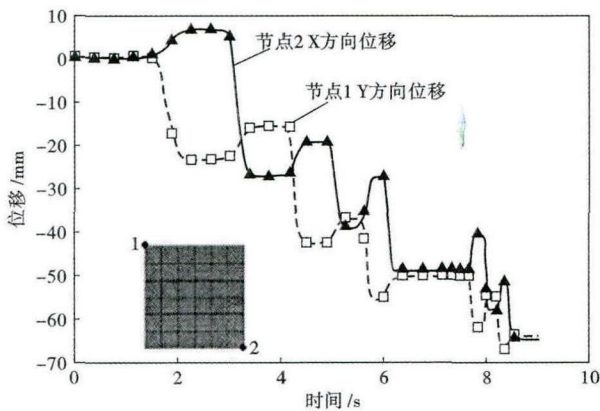


图 4 轧制过程不同节点位移曲线

Fig. 4 Displacement curves of different nodes during rolling process

严重网格畸变会导致模拟精度下降,因此删除轧件头部并进行网格重划分,划分后轧件见图 3(b)。

10 道次连轧各道次轧件尺寸宽度方向和高度方向模拟值与实测值相对误差分别在 0.40% ~ 5.90% 和 0.28% ~ 6.11%。考虑到实际轧制过程中氧化铁皮和轧辊磨损等因素会对轧件尺寸产生一定的影响,模拟值和实测值是吻合的。

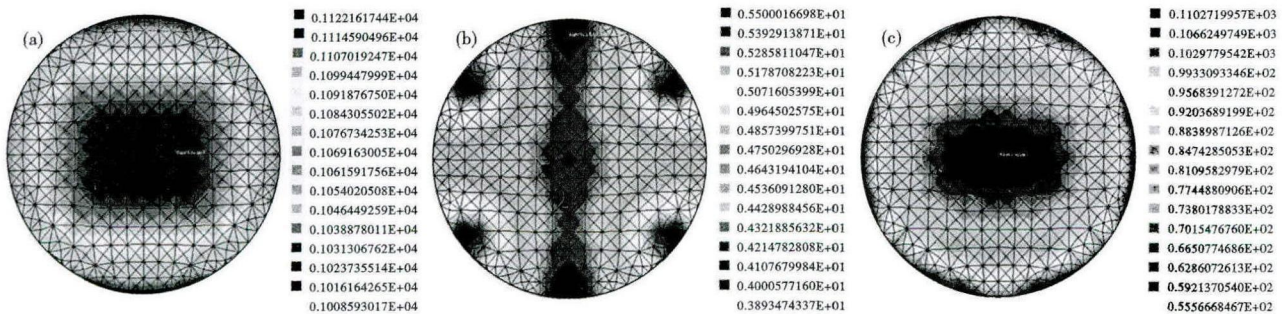


图 5 第 10 道次出口横截面温度 (a), 等效应变 (b) 和等效应力 (c) 分布

Fig. 5 Distribution of temperature (a), equivalent strain (b) and equivalent stress (c) on cross section of stock at layout of tenth pass

表 3 GCr15 轴承钢各道次的宽展量和压下量  
Table 3 Values of spread and reduction of bearing steel GCr15 during each pass of rolling process

道次	宽展	压下量	宽展系数
1H	6.34	23.64	0.268
2V	7.80	33.88	0.230
3H	7.56	26.74	0.283
4V	5.36	19.28	0.278
5H	11.48	18.55	0.619
6V	5.37	20.01	0.269
7H	8.07	11.56	0.698
8V	6.89	17.27	0.398
9H	6.53	12.14	0.538
10V	3.26	12.89	0.253

#### 4.2 连轧过程宽展分析

图 4 为轧制过程中节点 1Y 方向位移, 节点 2X 方向的位移变化图。10 道次轧制后节点 1 和节点 2 总的位移分别为 64.1 mm 和 64.7 mm, 二者接近相等, 即轧件在 X、Y 两个方向的变形量接近相等。在奇数道次轧制时, 节点在 X 方向相对位移为宽展量, Y 方向相对位移为压下量, 在偶数道次轧制时情况正好相反。通过图 4 可以计算出所取节点在不同道次的宽展量和压下量。例如第 2 道次宽展量为节点 1 第 2 道次相对于第 1 道次在 Y 方向的位移; 压下量为节点 2 在第 2 道次相对于第 1 道次在 X 方向相对位移。所计算的宽展和压下量均为轧制过程的一半, 各道次的宽展量和压下量见表 3。

经计算所得的宽展系数均在相应孔型选用的范围之内, 其中在椭圆孔型中轧制时宽展系数最大。影响宽展的因素主要有压下量、轧辊直径、摩擦系数、孔型形状<sup>[5]</sup>。从表 3 中可以看出, 宽展量随压下量的增加而增大, 这主要是因为随高向移动体积加大, 宽展方向和延伸方向位移都会增大。由于圆孔型侧壁对轧件的夹持作用比椭圆孔型要大, 因此轧件在椭圆孔型的宽展大于在圆孔型的。

### 4.3 连轧过程场量分析

从图 5 可见, 轧件不同部位的温度、应力和应变的分布都很不均匀, 轧件心部温度较高表面温度较低; 应力、应变则是表层高于心部。经过 10 道次轧制后, 轧件心部等效应变已达到 4.4, 较大的塑性变形有利于将棒材心部疏松、缩孔压实, 对棒材心部缺陷的控制具有重要作用。

图 6(a, b) 分别为各道次轧件角部等效应力、等效应变值和角部温度最低值的分布图。由图 6 可以看出, 第 5 道次轧件角部等效应力及等效应变增量较大, 而温度较低, 最容易在角部出现裂纹, 特别是裂纹敏感钢种。因此在轧制过程中应尽量减小第 5 道次的变形量, 以防止裂纹的产生。

### 4.4 连轧过程轧制力能参数变化

图 7 为 GCr15 轴承钢连轧过程中轧制力随时间的变化曲线。各道次轧制力都经历由 0 增加到最大值又变为 0 的过程。随着轧制道次的增加。轧件与轧辊的接触面积及压下量在逐渐减小, 因此轧制力大致呈现逐渐减小的趋势。第 5 道次轧制力较大主要是由于轧件由方孔进入椭圆孔中产生较大的不均匀变形导致的。由于轧件在成品圆孔型和成品前椭圆孔型中的变形量均较小, 因此轧件在该椭圆孔和圆孔型中轧制力相对较低。

## 5 结论

(1) 适合 GCr15 轴承钢的变形抗力模型为:

$$\sigma = 5578.6 \exp(-0.00351T)^{0.1389} \varepsilon^{0.216} \exp(-0.4435\varepsilon)$$

(2) 在第 5 道次椭圆孔轧制时, 轧件角部等效应力及等效应变增量较大, 而温度较低, 最容易出现裂纹, 特别是裂纹敏感钢种。因此在轧制过程中应尽量减小第 5 道次的变形量, 以防止裂纹的产生。

(3) 计算所得的宽展系数均在所用孔型选用范围之内, 轧件在椭圆孔型中轧制时宽展最大; 各道次

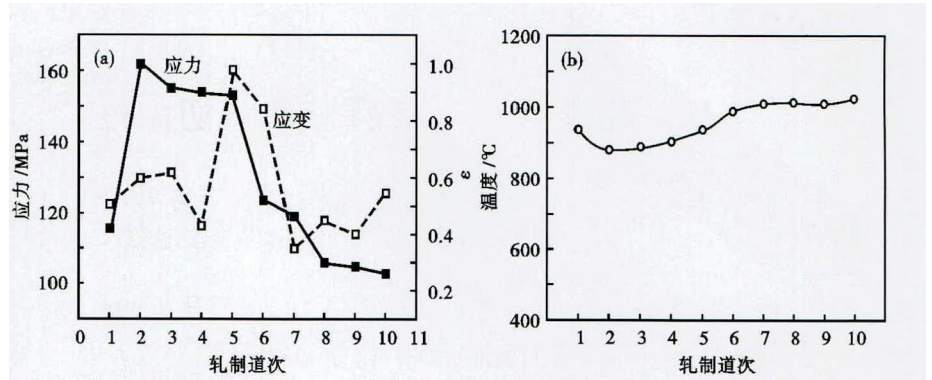


图 6 10 道次角部等效应力与等效应变量(a)和角部最低温度(b)分布曲线图  
Fig. 6 Distribution curves of corner equivalent stress and equivalent strain (a) and corner minimum temperature (b) in ten pass

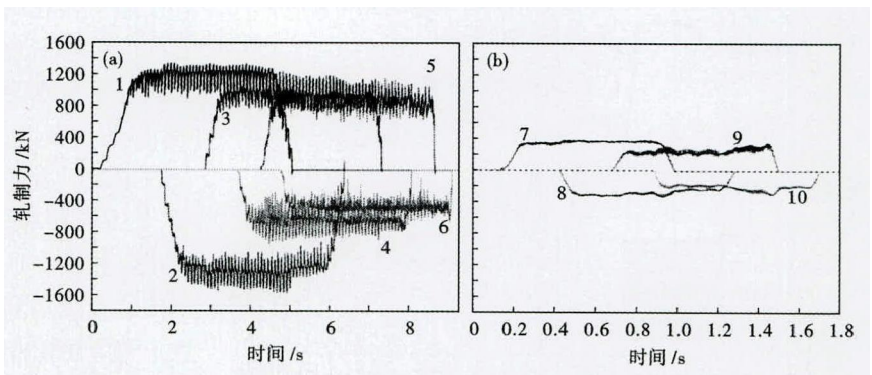


图 7 连轧过程模拟轧制力变化曲线(1/4 断面): (a) 1~6 道次; (b) 7~10 道次  
Fig. 7 Variation curves of simulated rolling load during continuous rolling, 1/4 section: (a) pass 1~6; (b) pass 7~10

出口处轧件横截面宽度、高度尺寸的模拟值与实测值吻合较好, 证明模型及模拟方法的正确性。

### 参考文献

- [1] 康永林, 洪慧平. 材料成型过程模拟仿真[M]. 北京: 北京科技大学, 2002: 94-99.
- [2] 洪慧平, 康永林. 开轧温度对 42CrMo4 钢轧制动态组织变化影响的有限元模拟[J]. 特殊钢, 2011, 32(2): 15-17.
- [3] 洪慧平, 冯富春, 肖玉. 42CrMo4 棒材热连轧过程有限元模拟研究[C]. 第九届中国钢铁年会论文集. 北京: 中国金属学会, 2013.
- [4] Kopp R, Wiegels H. 金属塑性成形导论[M]. 康永林, 洪慧平, 译. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [5] 康永林. 轧制工程学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004: 60-81.

洪慧平(1963-), 男, 博士后, 副教授, 金属塑性成形数值模拟及工艺优化技术的教学与科研。

E-mail: hhp@mater.ustb.edu.cn

收稿日期: 2014-10-27