

GCr15 轴承钢 Φ130 mm 棒材热连轧过程轧制力的数值模拟和分析

李小龙 周敦世 冯亮

(湖北新冶钢有限公司中棒线项目部,黄石 435001)

摘要 通过建立棒材与轧辊的有限元模型,采用大型非线性有限元软件 DEFORM-3D 对 GCr15 轴承钢 (/% : 0.98C, 0.54Si, 0.34Mn, 0.014P, 0.002S, 1.49Cr) 300 mm × 400 mm 坯至 Φ130 mm 棒材 12 道热连轧过程进行数值模拟,并与理论轧制力的计算值进行分析和对比。结果表明,数值模拟计算的轧制力接近生产实际测量的轧制力数据,两者相差不超过 5%,尤其在粗轧阶段,两者相差不超过 3%。

关键词 GCr15 轴承钢 Φ130 mm 棒材 热连轧 轧制力 数值模拟 现场测试

Numerical Simulation and Analysis on Rolling Force for Φ130 mm Bar of Bearing Steel GCr15 during Hot Continuous Rolling Process

Li Xiaolong, Zhou Dunshi and Feng Liang

(Department of Medium Steel Bar Project, Hubei Xinyegang Co Ltd, Huangshi 435001)

Abstract The numerical simulation on 12 passes hot continuous rolling process from 300 mm × 400 mm bloom to Φ130 mm bar products of bearing steel GCr15 (/% : 0.98C, 0.54Si, 0.34Mn, 0.014P, 0.002S, 1.49Cr) has been carried out by established finite element model for bar and roller and using large nonlinear finite element software DEFORM-3D, and is analyzed and compared to calculated values of theoretical rolling force model. Results show that numerical-simulation-calculated rolling force values is close to actual-measured ones in situ, the both difference is no more than 5%, especially in rough-rolling pass, that is no more than 3%.

Material Index Bearing Steel GCr15, Φ130 mm Bar Product, Hot Continuous Rolling, Rolling Force, Numerical Simulation, Measurement in Situ

在轧制过程中,轧制力的设定是一项非常重要的轧制环节^[1-2],它不仅影响轧件的表面状态、尺寸精度,而且还会影响到轧件的微观组织、力学性能和产品质量^[3]。与此同时,轧制力的设定还会影响到轧制工艺设备的能力。因此,研究合金钢棒材热连轧过程中轧制力的工艺参数是非常必要的,它对于改善和优化轧制工艺规程有着重要的作用。

合金钢棒材的热连轧过程是一个复杂的弹塑性大变形过程,变形过程中伴随着材料非线性、几何非线性和接触非线性,金属变形规律异常复杂,难以用数学和实验的方法来解决^[4-5],随着计算机数值模拟技术的快速发展,特别是大型非线性 CAE(Computer Aided Engineering)的发展,有限元法逐渐应用到轧制领域,它不仅有成本低、效率高等优点,而且解决了传统难以计算的复杂问题。因此,本文基于传统理论轧制力模型为基础,采用大型非线性有限元软件对钢厂的 Φ130 mm 轴承钢棒材进行了数值模拟,并与理论轧制力模型的计算值进行了分析和对比。

1 棒材轧制力模型

轴承钢棒材的轧制力数学模型^[6]为:

$$P = \bar{p}F \quad (1)$$

式中: P - 轧制力/kN; \bar{p} - 平均单位压力/($N \cdot mm^{-2}$); F - 轧件与轧辊接触面水平投影面积/ mm^2 。

其用于热轧时计算平均单位压力公式是爱克伦德(Ekelund)公式,其公式为:

$$\bar{p} = (1 + m)(K + \eta \bar{\epsilon}) \quad (2)$$

式中: m - 外摩擦对单位压力影响的系数; K - 沿接触弧上金属表面变形抗力/($N \cdot mm^{-2}$); η - 黏性系数/($N \cdot s/mm^2$); $\bar{\epsilon}$ - 平均变形速度。

为计算 m ,其公式为:

$$m = \frac{1.6 f \sqrt{R \Delta h} - 1.2 \Delta h}{H + h} \quad (3)$$

式中: f - 摩擦系数; R - 轧辊工作半径/mm; Δh - 轧件压下量/mm; H - 轧件入口厚度/mm; h - 轧件出口厚度/mm。

爱克伦德(Ekelund)公式中, $\eta \bar{\epsilon}$ 是考虑变形速度、变形温度对变形抗力的影响,其中平均变形速度 $\bar{\epsilon}$ 可用式(4)计算。

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2\nu \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}}{H+h} \quad (4)$$

爱克伦德(Ekelund)还给出了计算 K 和 η 值的公式,其公式为:

$$K = 9.8(14 - 0.01 t)(1.4 + [C] + [Mn] + 0.3[Cr]) \quad (5)$$

$$\eta = 0.1(14 - 0.01 t)C' \quad (6)$$

式中: t - 轧制温度/°C; $[C]$ 、 $[Mn]$ 、 $[Cr]$ - 以质量分数表示的碳、锰、铬含量; C' - 决定于轧制速度的系数。

2 棒材有限元模型的建立

根据轧钢厂提供的轧制工艺规程建立有限元模型,由工艺规程可知,Φ130 mm 轴承钢棒材的钢坯尺寸(mm)为 300 × 400 × 8 000,并且轧制 12 道次,轴承钢棒材具体轧制工艺参数如表 1 所示。为保证数值模拟结果的准确性,数值模拟的轧制环境与现场轧制环境相符。

2.1 孔型方案确定

根据轧钢厂的孔型工艺参数的设计和生产实际经验,对 Φ130 mm 轴承钢棒材进行孔型设计,在热连轧最终成品两道次过程中的孔型设计采用椭圆(V1)和圆(H2)形式,孔型方案图如图 1 所示。

2.2 建立几何模型

在有限元软件的前处理模块中,根据金属塑性变形的弹塑性有限元法构建轧件和各机架间轧辊的有限元模型,由于轧件和轧辊间具有对称性,采用 1/4 的建模技术,如图 2 所示,图 2 所示为部分有限元模型。

2.3 材料参数及边界条件

轧辊均选择刚性体,Φ130 mm 轴承钢棒材为 GCr15 钢,其化学成分与热物性参数如表 2 和表 3 所示。轴承钢出炉温度为 1 220 °C。

有限元模型中的边界条件主要包括速度边界条件、摩擦边界条件和热边界条件。第 1 道次轧件出口速度为 220 mm/s。摩擦模型采用剪切摩擦模型,摩擦因子取 0.3。对于热边界条件,取环境温度为 20 °C,轴承钢的辐射率为 0.7,轧件与轧辊的热交换

系数为 15 ~ 20 kW/(m² · °C),轧件与空气的热交换系数为 0.2 ~ 0.5 kW/(m² · °C)。采用更新的 Lagrange 算法、Prandtl-Reuss 流动方程及 Von Mises 屈服准则等弹塑性理论进行热连轧过程的数值模拟。

表 1 GCr15 轴承钢 Φ130 mm 棒材轧制工艺参数
Table 1 Parameters of rolling process for Φ130 mm bar of bearing steel GCr15

机架号	辊缝/mm	相对压下率/%	轧件温度/°C	咬入角/°	出口速度/(mm · s ⁻¹)	轧件面积/mm ²
F1	35	8.4	1 150	20.9	220	113 579
F2	35	5.2	1 132	12.8	230	107 687
F3	40	23.9	1 113	26.8	310	81 944
F4	30	13.2	1 100	21.2	350	71 148
F5	30	25.3	1 087	24.8	470	53 176
F6	30	20.4	1 078	25.4	590	42 353
F7	20	24.4	987	21.4	460	32 021
F8	20	20.1	979	22.5	580	25 587
F9	10	17.5	973	19.6	700	21 102
F10	10	14.8	967	20.0	830	17 982
F11	12	13.8	962	16.3	960	15 508
F12	5	12.8	957	16.8	1 100	13 521

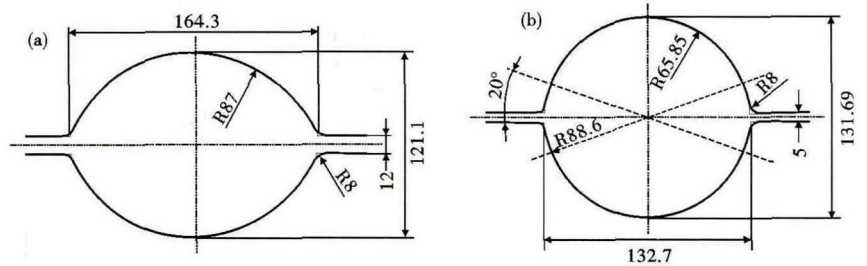


图 1 轴承钢 GCr15 Φ130 mm 轧材的孔型设计:(a)成品前孔;(b)成品孔
Fig.1 Pass design for Φ130 mm bar of bearing steel GCr15: (a) before finishing pass; (b) finishing pass

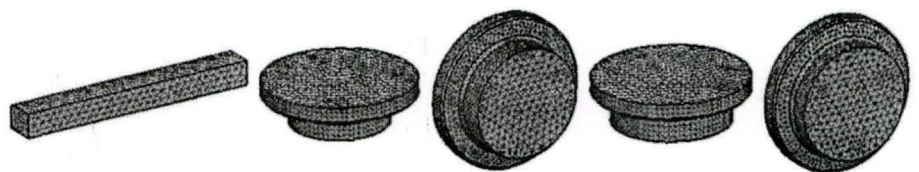


图 2 棒材与轧辊的有限元模型
Fig.2 Finite element model of bar and roller

表 2 GCr15 轴承钢 Φ130 mm 棒材的成分分析结果 / %
Table 2 Analysis results of Φ130 mm bar of bearing steel GCr15 / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	Al
0.98	0.54	0.34	0.014	0.002	1.49	0.06	0.10	0.01	0.004	0.021

表 3 GCr15 轴承钢的热物性参数
Table 3 Thermal parameters of bearing steel GCr15

温度/°C	密度/(kg · m ⁻³)	比热容/[J · (kg · K) ⁻¹]
45	7 810	553
525	7 810	787
981	7 810	729

3 模拟结果分析

数值模拟结果可以分析计算出热连轧过程中各道次的轧制力数值。数值模拟方式采用时间增量步进行,由轧制力图形(图 3)可知,当轴承钢棒材开始咬入时,轧件在摩擦力作用下进入轧辊孔型中产生塑性变形,棒材在孔型中轧制完成后轧件从轧机中脱离,完成整个轴承钢棒材的热连轧过程。图 3(a, b)所示分别为轧件在第 4 道次和第 8 道次中的轴承钢棒材的轧制状态。

图 4 所示的是 $\Phi 130$ mm 轴承钢棒材在道次轧制过程中变形时的横断面轧件形状等效应变图。从图 4 中可知,经过 12 道次的轧制过程,其棒材断面尺寸形状完全符合孔型设计尺寸。

由轧制力曲线图(图 5)可知,当轴承钢棒材在变形的开始阶段,轧制力随着压下量的不断增加,其轴承钢棒材内部的位错密度不断聚集和缠结,从而使得金属变形抗力逐渐增大,因此最终使得轧制力随着时间步的增加而急剧增大,在这过程中,轴承钢棒材处于非稳态轧制过程。当轴承钢棒材完全进入轧辊孔型后,轧制力不再继续增加,此时热轧使得轴承钢棒材产生加工硬化与动态软化并存过程,使棒

材的加工硬化速率减慢,从而使轧制力只在很小的范围内变化,这表明轧件已进入稳态轧制中。当轴承钢棒材脱离轧辊时,因轧件的压下量突然减小几乎为 0,故轧制力又急剧下降。轧制力在其它道次中的变化规律基本相同,不同之处主要在于轧制力会因棒材压下量的不同而有所区别。

从图 6 可知,数值模拟计算的轧制力与理论计算的轧制力基本吻合,两者相对误差较小,基本控制

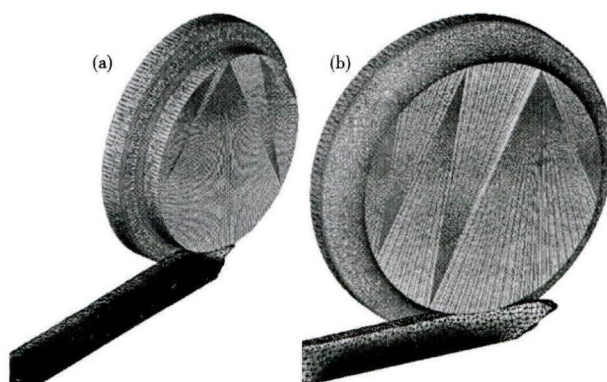


图 3 (a)第 4 道次咬入过程;(b)第 8 道次稳态轧制过程
Fig. 3 (a) bite process in 4th pass; (b) steady state rolling process in 8th pass

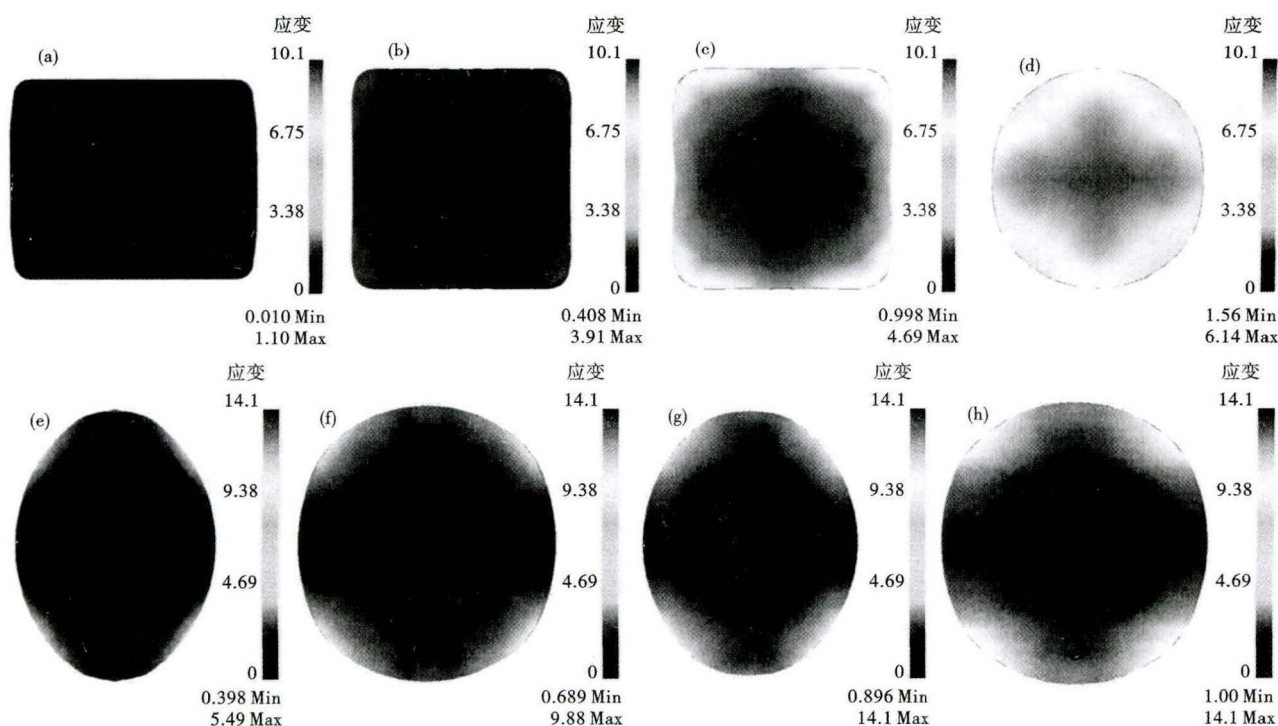


图 4 $\Phi 130$ mm GCr15 轴承钢棒材的第 2(a),第 4(b),第 6(c),第 8(d),第 9(e),第 10(f),第 11(g),第 12(h)道次轧件断面等效应变图

Fig. 4 Equivalent strain plot at cross section of $\Phi 130$ mm bar of bearing steel GCr15 during 2nd (a), 4th (b), 6th (c), 8th (d), 9th (e), 10th (f), 11th (g) and 12th (h) pass

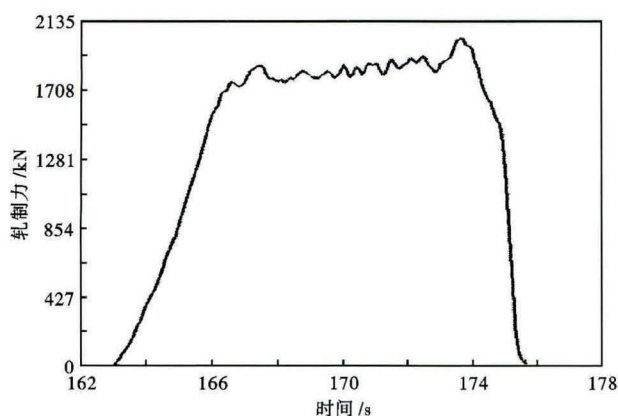


图 5 第 7 道次中的轧制力曲线
Fig. 5 Rolling force curve in 7th pass

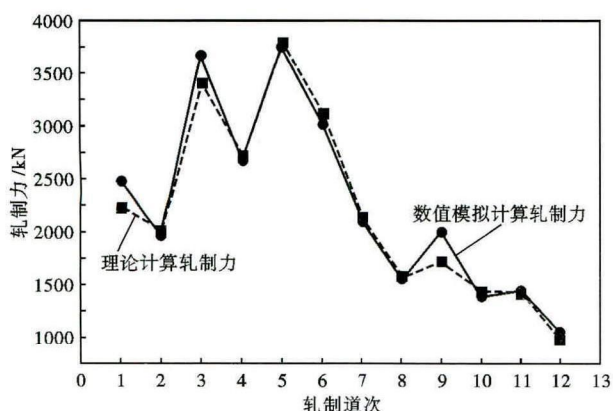


图 6 轧制力数值模拟值与理论计算值比较

Fig. 6 Comparison between numerical-simulated value and theoretical-calculated value of rolling force

表 4 GCr15 轴承钢轧制力实际测量值与模拟计算值对比
Table 4 Comparison between actual-measured value and simulation-calculated value of rolling force for bearing steel GCr15

机架号	实际测量值/kN	理论计算值/kN	相对偏差/%	模拟计算值/kN	相对偏差/%
F1	2 412	2 232	7.46	2 472	2.49
F2	1 915	2 019	5.43	1 970	2.87
F3	3 564	3 411	4.29	3 670	2.97
F4	2 601	2 695	3.61	2 678	2.96
F5	3 702	3 810	2.91	3 745	1.16
F6	2 986	3 118	4.42	3 010	0.80
F7	2 064	2 132	3.29	2 098	1.65
F8	1 492	1 587	6.36	1 550	3.89
F9	1 897	1 717	9.48	1 990	4.90
F10	1 325	1 429	7.84	1 380	4.15
F11	1 370	1 410	2.91	1 430	4.38
F12	992	962	3.02	1 032	4.03

在 10% 以内波动。在轴承钢棒材的 12 道轧制过程中,只有第 6 道次的数值模拟计算比理论计算的轧制力稍微小,其余数值模拟计算比理论计算的轧制力基本接近或稍大,这充分反映数值模拟计算的轧制力具有较好的合理性与科学性。

表 4 为理论轧制力数学模型计算的结果与数值模拟计算结果的分析比较,从表 4 中的分析对比中可知,有限元模型的计算值与实际测量值比较相近,两者相差不超过 5%,尤其在粗轧阶段,两者相差不超过 3%。

4 结论

(1) 在轴承钢棒材的热连轧过程中,有限元法计算的轧制力与现场实际测量的轧制力比较接近,两者相差不超过 5%,尤其在粗轧阶段,两者相差不超过 3%。

(2) 数值模拟计算的轧制力比理论计算的轧制力精度高得多,这主要是由于传统的理论计算大多假设轧件在孔型中均匀变形,并且温度是常量,而有限元模型充分考虑轧件变形过程中的热力耦合过程,既有轧件在孔型中变形的不均匀性,又有轧件温度梯度变化。该模拟结果对于现场轧制工艺参数的改善与优化有重要参考价值,同时对实际生产也有一定的指导作用。

参考文献

- [1] 喻海良,赵宪明,刘相华. 板带精轧过程轧制力的三维弹塑性有限元分析[J]. 钢铁研究,2005(1):14-16.
- [2] 刘洋,周旭东,孟惠霞. 带钢热连轧过程轧制力三维有限元模拟[J]. 锻压技术,2007,32(5):142-144.
- [3] 李传瑞,王宝峰,麻永林. CSP 连轧过程金属变形的热力耦合模拟分析[J]. 特殊钢,2005,26(6):29-31.
- [4] 徐树成,张金玲,李秀敏. 板带钢轧制的有限元模拟分析[J]. 湖南冶金,2005,33(5):6-9.
- [5] 徐新平,王均安. 硅钢片轧制过程的有限元数值模拟[J]. 上海金属,2005,27(4):30-33.
- [6] 魏立群. 金属压力加工原理[M]. 北京:冶金工业出版社,2008.

李小龙(1983-),男,硕士(南昌大学),工程师,2008 年江西农业大学(本科)毕业,轧钢工艺技术和材料加工计算机数值模拟。E-mail:lixiaolong0520@163.com

收稿日期:2014-08-17