

Φ16 mm GCr15 轴承钢棒材 KOCKS 轧机热连轧工艺数值模拟和分析

李小龙¹ 程卫国¹ 周立新² 周敦世¹ 邹晖¹

(大冶特殊钢股份有限公司 1 中棒厂; 2 高品质特殊钢湖北省重点实验室, 黄石 435001)

摘要 采用 DEFORM-3D 三维大变形热力耦合弹塑性有限元软件对 Φ21.5 mm GCr15 轴承钢坯料在四架 KOCKS 轧机连轧成 Φ16 mm 棒材工艺过程进行了数值模拟。分析了棒材在 KOCKS 轧机孔型中轧制时的等效应力、等效应变、温度场以及轧制力等轧制工艺参数。结果表明,棒材在 KOCKS 机组中的变形主要发生在延伸孔型,精轧孔型的变形量较小,尤其在最后一道次;棒材在 KOCKS 机组中的宽展是不均匀,在靠近轧辊的区域宽展较小,在辊缝处宽展较大并产生鼓形;棒材在 KOCKS 机组中等效应变已达到芯部渗透,这对保证组织致密度和成品内部质量是非常有利的,现场各道次轧制力的实测值与模拟值的相对误差 < 2%。

关键词 GCr15 轴承钢棒材 KOCKS 轧机 连轧工艺 数值模拟 现场测试

Numerical Simulation and Analysis on Hot Continuous Rolling Process of KOCKS Mill for Φ16 mm GCr15 Bearing Steel Bar

Li Xiaolong¹, Cheng Weiguo¹, Zhou Lixin², Zhou Dunshi¹ and Zou Hui¹

(1 Medium Size Rolled Bar Works; 2 Hubei Province Key Laboratory for High Quality Special Steel, Daye Special Steel Co Ltd, Huangshi 435001)

Abstract The numerical simulation of process of four stand tandem KOCKS mill continuous rolling Φ16 mm GCr15 bearing steel bar from Φ21.5 mm stock has been carried out by using DEFORM-3D three-dimensional heavy deformation thermal-mechanical coupled with elastic-plastic finite element software. And the rolling process parameters for stock rolling in KOCKS mill roll pass including equivalent stress, equivalent strain, temperature field and rolling force of steel are analyzed. Results show that the deformation of steel bar in KOCKS mill occurs mainly at rough rolling passes, and that at finish passes is small, especially at last pass; the spread of steel bar in KOCKS mill stands is uneven, that near the roller area is smaller and that near the roll gap is larger to form bulge; and in KOCKS mill stands the equivalent strain reaches the center of steel bar, it is available to ensure the compact density of structure and internal quality of finishing products. The relative error between simulated value and measured value of rolling force at each pass in situ is less than 2%.

Material Index GCr15 Bearing Steel Bar, KOCKS Mill, Continuous Rolling Process, Numerical Simulation, Measuring at Situ

高精度的 KOCKS 三辊减定径机组 (Reducing & Sizing Block) 与传统二辊轧机相比,具有变形效率高、宽展系数小、能耗低、轧件断面变形均匀、孔型磨损小等较多优势^[1],被广泛应用于棒线材生产上。减定径机组作为棒线材在线尺寸控制的精密轧制技术,已受到众多钢铁企业的关注。其主要特点是产品尺寸精度高、表面质量好;自由尺寸轧制;换辊时间短、容易操作;容易实现低温轧制和控制轧制^[1,4]。但目前 KOCKS 轧机的研究主要集中在三辊减定径机组技术介绍^[1]和文献综述^[3],关于 KOCKS 轧机棒材热连轧工艺的研究尚未见报道。

本文针对特钢企业的棒材生产线,采用 DEFORM-3D 三维大变形热力耦合弹塑性有限元软件对 Φ16 mm 的轴承钢棒材在 KOCKS 四机架连轧过程中进行了数值模拟与分析。

1 KOCKS 孔型设计

特钢企业的减定径机组由 4 架 KOCKS 轧机组组成,其孔型设计采用“切线”孔型^[3,4]。轧槽槽底部分是一段圆弧,槽口部分是与圆弧相切的切线。对于延伸孔型,槽底圆弧的扩张角 PSI 一般为 10° ~ 20°,3 个轧槽围成的孔型接近于一个弧形三角形;对于精轧孔型(成品前孔及成品孔)槽底圆弧的扩张角 PSI 为 30°,3 个轧槽围成的孔型接近于圆。孔型设计如图 1 所示,其中 DSA 为基圆直径;PSI 为圆弧扩张角;W 为辊缝;R 为圆弧扩张半径。

2 流变应力模型

为了更准确反映轴承钢棒材高温塑性变形特性^[5],本文采用 Sellars 和 Tegart 提出的包含变形激活能(Q)和温度(T)的双曲正弦形式表示:

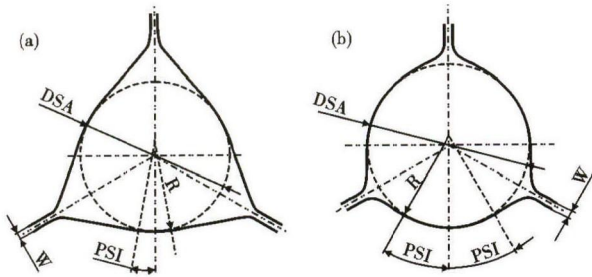


图 1 KOCKS 轧机孔型设计: (a) 延伸孔; (b) 精轧孔

Fig. 1 Design of roll passes for KOCKS mill: (a) rough rolling passes and (b) finish rolling passes

表 1 GCr15 轴承钢棒材轧制工艺参数

Table 1 Parameters of rolling process for GCr15 Bearing steel Bar

机架号	相对压下率/%	扩张角度/°	扩张圆弧半径/mm	基圆直径/mm	出口速度/(m·s ⁻¹)	延伸系数(μ)	轧件面积/mm ²
F1	14.7	10	10.75	17.35	9.24	1.172	303.7
F2	19.9	10	9.48	15.80	11.50	1.249	243.2
F3	12.4	30	8.89	15.98	13.20	1.141	213.1
F4	3.3	30	8.89	16.20	13.60	1.034	206.1

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(a\sigma)]^n \exp[-Q/(RT)] \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ - 应变速率; A, n, a - 均为常数; Q - 变形激活能; R - 摩尔气体常数; σ - 峰值应力; T - 热力学温度。

对 GCr15 轴承钢在 900 ~ 1150 °C 温度下以 0.1 ~ 10 s⁻¹ 的应变速率进行线性转换, 再利用热力学模拟实验数据用线性回归的方法得出方程中的系数^[5-6]:

$$\dot{\epsilon} = 7.12 \times 10^{12} [\sinh(1.2 \times 10^{-2} \sigma)]^{4.728} \cdot \exp[-3.5 \times 10^5 / (RT)] \quad (2)$$

3 轧制工艺参数与有限元模型建立

3.1 轧制工艺参数

根据轧钢厂的工艺规程设定, GCr15 轴承钢来料规格为 $\Phi 21.5$ mm 进入 KOCKS 轧机温度为 880 °C。在 KOCKS 三辊减定径机组要进行 4 道次的连轧, 轧成 $\Phi 16$ mm, 具体 KOCKS 轧制工艺参数如表 1 所示。

3.2 孔型设计方案的确定

根据 KOCKS 轧制工艺参数, $\Phi 16$ mm 轴承钢棒材的孔型设计方案是: 第 1 架次与第 2 架次采用延伸孔, 并且第 1 架次用来承接预精轧的棒材, 第 3 架次与第 4 架次采用精轧孔型, KOCKS 孔型方案如图 2 所示。

3.3 有限元模型建立

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 KOCKS 各机架间轧辊的有限元模型, 因为 KOCKS 三辊轧机在结构形式上是对称的, 所以建模时采取单个轧辊的 1/2 进行有限元模型建立, 如图 3 所示(部分有限元模型)。

3.4 材料参数及边界条件设定

轧辊均选择刚性体, 轧成的 $\Phi 16$ mm 轴承钢棒材材料为 GCr15 钢 (/%: 0.98C, 0.54Si, 0.34Mn, 0.014P, 0.002S, 1.49Cr, 0.06Ni, 0.10Cu, 0.01Mo, 0.004 Ti, 0.021Al), 热物性参数如表 2 所示。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 20 ~ 50 W/(m²·°C)。

4 模拟结果分析

4.1 等效应力场分析

表 2 GCr15 轴承钢棒材的热物性参数

Table 2 Thermal physical parameters of GCr15 bearing steel bar

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

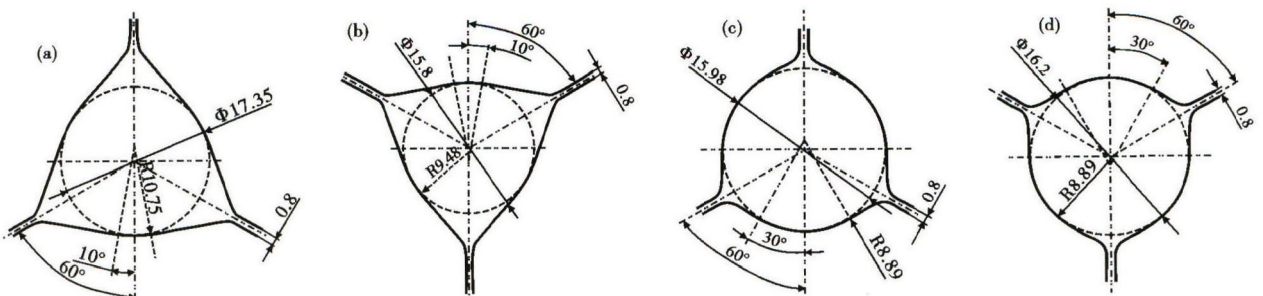


图 2 轧制 $\Phi 16$ mm GCr15 轴承钢的孔型尺寸: (a) 第 1; (b) 第 2; (c) 第 3 和 (d) 第 4 架次

Fig. 2 Size of roll passes for rolling $\Phi 16$ mm GCr15 bearing steel bar: stand No1 (a), No2 (b), No3 (c) and No4 (d)

图 4 所示为 Φ21.5 mm 轴承钢 GCr15 棒材在 KOCKS 三辊轧机连轧时的等效应力分布图。从图 4 中可知,轧件在 KOCKS 轧机中进行正 Y 型和倒 Y 型的交替变形,最终轧制成 Φ16 mm 轴承钢棒材。从图 4 中各道次的应力分布情况可明显发现,轧制 Φ16 mm 棒材时,轧件在 KOCKS 机组中的变形主要发



图 3 棒材与三辊的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of steel bar and three rollers

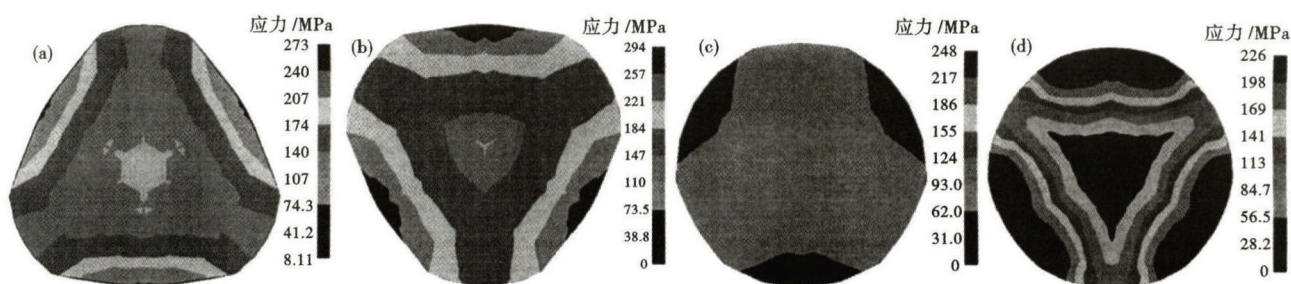


图 4 第 1(a)、第 2(b)、第 3(c)和第 4(d)道次 GCr15 轴承钢棒材断面等效应力图

Fig. 4 Contour plots of equivalent stress at section of GCr15 bearing steel bar at No1 (a), No2 (b), No3 (c) and No4 (d) pass

生在延伸孔型,精轧孔型的变形量较小。如在延伸孔型第 1 道次与第 2 道次轧制过程中其轧件最大等效应力分别为 273 MPa 和 294 MPa,而且芯部等效应力也达到了 100 MPa 以上。然而在精轧孔型第 3 道次与第 4 道次两个精轧道次中其最大等效应力仅分别为 248 MPa 和 226 MPa,精轧孔型的主要作用是获得良好的表面质量与尺寸精度,尤其是在第 4 道精轧孔型。

4.2 等效应变场分析

图 5 所示为轧件在 KOCKS 机组中轧制第 1 道次前后的变形图。由图 5 可以看出,轧件在 KOCKS 辊环的辊缝处发生宽展,并且宽展是不均匀的,在靠近 KOCKS 辊环的区域宽展较小,在辊缝处宽展较大并产生鼓形。这主要是由于靠近 KOCKS 辊环,受辊环的约束作用较大所致。

图 6 为稳态轧制过程,轧件在 KOCKS 机组中各道次出口处的横截面应变分布情况。从图 6 中可知,轴承钢棒材最大等效应变发生的部位在于轧件

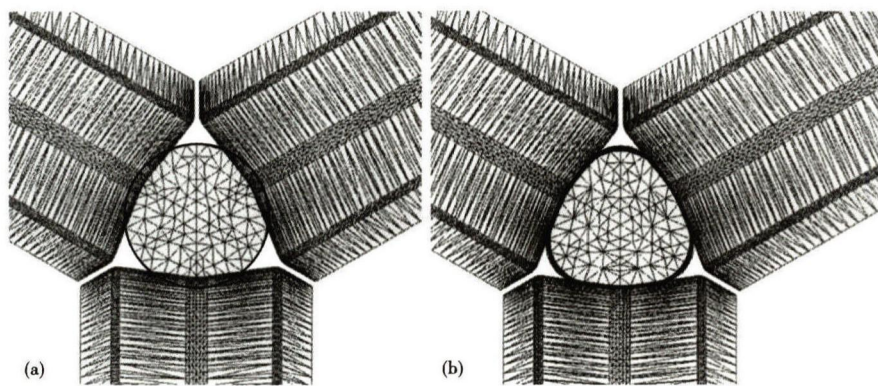


图 5 第 1 道次前 (a) 和后 (b) GCr15 轴承钢棒材截面宽展变形图

Fig. 5 Deformation plots of spread at section of GCr15 bearing steel bar before (a) and after (b) No 1 pass

与辊环相接触的区域,并逐渐向棒材芯部渗透。从图 6 中还可发现,在 KOCKS 机组中,各道次轧件表面等效应变均比芯部等效应变要大,在延伸孔型时,其表面等效应变均比芯部等效应变相差分别 0.596 和 1.3697;在精轧孔型时,虽然两者相差比延伸孔型时大,但是其棒材芯部已经发生塑性变形,尤其是在第 4 道次其芯部等效应变为 0.324,表明棒材的等效应变已达到芯部渗透,这也可能正是 KOCKS 轧机的优势,使轧件在连轧过程中交替受到三向压应

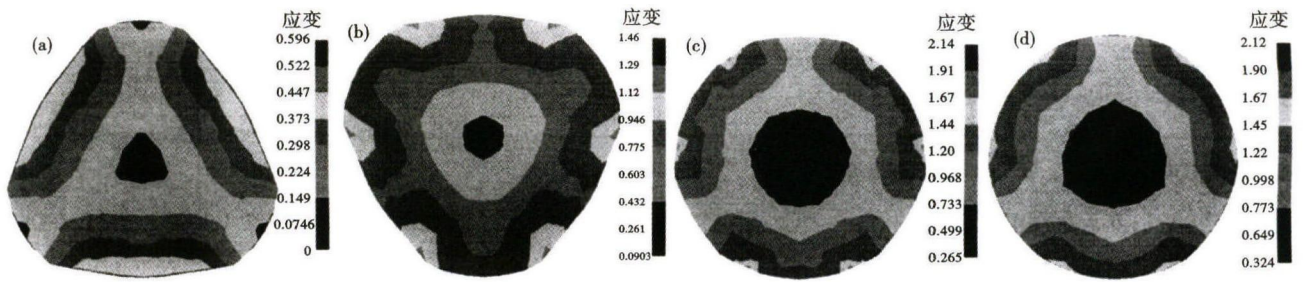


图 6 第 1(a)、第 2(b)、第 3(c)和第 4(d)道次 GCr15 轴承钢棒材断面等效应变图

Fig. 6 Contour plots of equivalent strain at section of GCr15 bearing steel bar at No1 (a), No2 (b), No3 (c) and No4 (d) pass

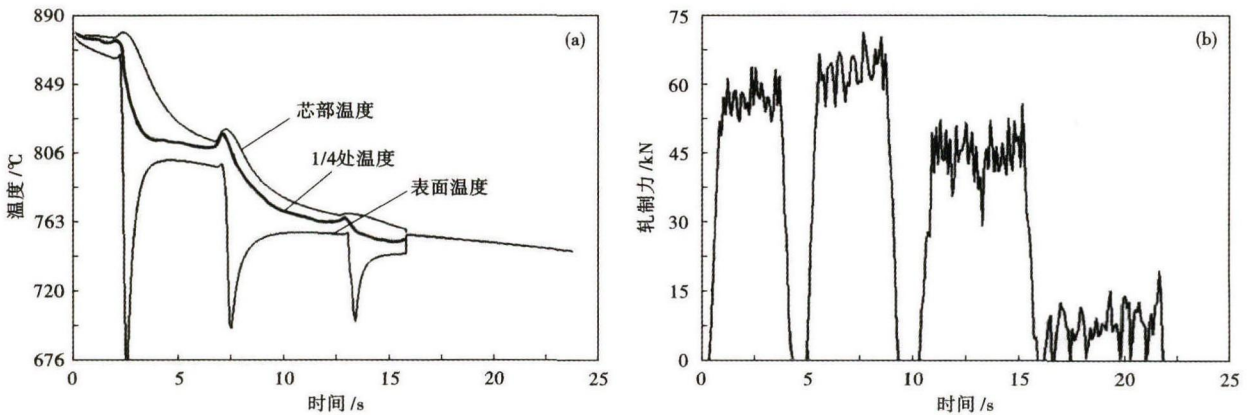


图 7 GCr15 轴承钢棒材 4 道次热连轧温度曲线(a)和轧制力曲线(b)

Fig. 7 Temperature curves (a) and rolling force curves (b) of GCr15 bearing steel bar continuous rolling in 4 passes

力,这对保证组织致密度和成品质量是非常有利的。

4.3 温度场分析

Φ16 mm 轴承钢棒材在 KOCKS 机组中轧制后各道次的温度场分布如图 7(a)所示。

从图 7(a)可知,由于轧件规格较小,轧件在轧制过程中因变形而产生大量热量,使得距表面 1/4 处和芯部的温度越来越高,累积变形量越大,温度越高,图示轧件在 KOCKS 机组中从第 1 道次到第 3 道次,使距表面 1/4 处和芯部的温度高并呈上升趋势。

从图 7(a)中还可发现,各道次轧件截面上的温度分布是不均匀的,芯部温度较高而表面温度较低,这主要是由于轧件表层向空气中辐射热量并与 KOCKS 辊环接触发生热交换所致,从而使得轧件在各道次变形中表面温度下降急剧。但是轧件在 KOCKS 轧机中第 4 道次开始,随着轧制速度的加快,轧件表面与辊环接触时间短,热量损失小,而塑性变形功产生的热量越来越多,导致第 4 道次轧件表层温度又逐渐回升,最终使轧件表面和内部温度又趋于一致。

4.4 轧制力分析

图 7(b)所示为轧件在 KOCKS 机组中 4 道次连

轧的轧制力曲线图。

从图 7(b)中可知,轧件被 KOCKS 轧机咬入和抛出时为非稳态轧制,此时轧件力曲线急剧变化。当轧件完全进入 KOCKS 轧辊孔型后,棒材的变形量不再继续增加,此时热轧使得轧件产生加工硬化与动态软化并存过程,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。

从轧制力曲线图 7(b)中可明显发现,轧件在 KOCKS 机组中第 1 道次与第 2 道次的延伸孔型中其轧制力明显大于精轧孔型(第 3 道次和第 4 道次)的轧制力,这主要是由于在 KOCKS 机组中,延伸孔型是用来做减径作用的,其第 1 道次与第 2 道次延伸孔型的相对压下率分别为 14.7% 和 19.9%。但是在 KOCKS 精轧孔型中,随着轧件变形量的减少(第 3 道次和第 4 道次分别为 12.4% 和 3.3%),其轧制力也随着减少,尤其第 4 道次更加显著。

5 现场验证

为验证数值模拟结果,在 KOCKS 三辊轧机现场进行试验。采用 KOCKS 四机架连轧,轧件 GCr15 轴承钢来料尺寸为 Φ21.5 mm,成品尺寸为 Φ16 mm。轧件进入 KOCKS 第 1 道次入口温度为 880 ℃,

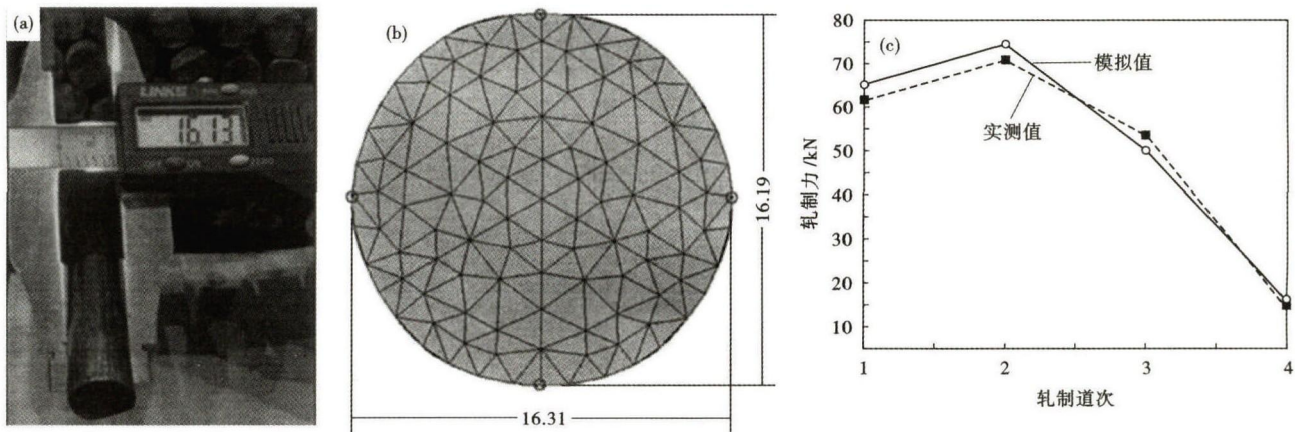


图8 GCr15 轴承钢棒材尺寸的实测值(a)和模拟值(b);各道次轧制力的模拟值与实测值比较(c)

Fig. 8 Comparison between measured (a) and simulated values (b) of GCr15 bearing steel bar sizes; and comparison between measured and simulated values of rolling forces at each pass (c)

3 辊孔型参数、轧制速度以及轧件变形量等工艺参数均与模拟值相一致。

图8(a)所示为现场轧制时的冷轴承钢棒材尺寸;图8(b)所示为数值模拟计算时的热棒材尺寸,说明现场轧制的棒材尺寸与数值模拟值十分相符。

在轧制过程中,轧制力是一个比较重要的轧制工艺参数^[7-8],因为它较全面地反映了轧制过程中轧件在 KOCKS 轧机中每道孔型的变形及温度变化情况,因此取现场轧制力实测值与数值模拟值进行分析。现场实测 KOCKS 第1道次孔型轧制时的最大轧制力为 6.49×10^4 N,而模拟计算轧制力为 6.52×10^4 N,两者相对误差为 0.46%。

图8(c)所示为现场实测值与模拟值的轧制力数据比较,从图8(c)中可知,各道次轧制力的模拟值与现场实测值基本一致,两者相对误差较小,一般控制在2%以内。

6 结论

(1) GCr15 轴承钢棒材在金属塑性变形中,棒材在 KOCKS 机组中的变形主要发生在延伸孔型,精轧孔型的变形量较小。

(2) 棒材在轧制过程中,其轧件的宽展是不均匀的,在靠近辊环的区域宽展较小,在辊缝处宽展较大并产生鼓形。

(3) 在精轧孔型变形中,棒材的等效应变已达到芯部渗透,棒材芯部已经发生塑性变形,这对保证

组织致密度和成品内部质量是十分有利的。

(4) 通过数值模拟结果与现场实测结果比较发现,数值模拟计算的棒材形状尺寸、轧制力工艺参数与现场实测数据十分吻合,表明用弹塑性有限元法对 KOCKS 轧机棒材工艺的数值模拟是可行的,分析结果是准确的。

参考文献

- [1] Ammerling W J, Alzetta F. 3 辊减径定径机组 (RSB) 技术的最新应用[J]. 钢铁, 2005, 40(12): 84-86.
- [2] 帅美荣, 秦建平. 平三角-圆孔型连轧钛合金棒材的有限元分析与试验研究[J]. 现代制造工程, 2008(3): 102-122.
- [3] 李 民, 张安平. 三辊棒材减径机组孔型设计及力能参数计算[J]. 轧钢, 2007, 24(5): 23-27.
- [4] 姚 俊, 唐广波, 刘正东, 等. KOCKS 轧机轧件横截面积与力能参数模型[J]. 塑性工程学报, 2010, 17(2): 90-94.
- [5] 廖舒纶, 张立文, 岳重祥, 等. GCr15 钢单道次压缩实验分析及三维模拟[J]. 材料工程, 2008(8): 31-34.
- [6] 廖舒纶, 张立文, 岳重祥, 等. GCr15 热变形行为与流变应力模型的研究[J]. 材料工程, 2008(4): 8-14.
- [7] 肖 玉, 洪慧平, 冯富春. 20CrMnTi 齿轮钢棒材热连轧有限元模拟[J]. 特殊钢, 2014, 35(2): 16-19.
- [8] 李小龙, 周敦世, 冯 亮. 大规格轴承钢棒材连轧工艺有限元模拟与分析[J]. 武汉科技大学学报, 2014, 37(6): 420-439.

李小龙(1983-),男,硕士(2012年南昌大学),工程师,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: 2016-04-07