

GCr15 轴承钢棒材连轧过程的二维和三维模拟

廖舒纶¹ 张立文¹ 岳重祥¹ 高惠菊² 郭书奇²

(1 大连理工大学材料科学与工程学院, 大连 116023; 2 东北特钢集团棒线材连轧厂, 大连 116031)

摘要 借助商业有限元软件 MSC. Marc 建立了 GCr15 轴承钢 150 mm × 150 mm 坯至 Φ32 mm 棒材的 12 道次连轧过程的二维和三维模型, 并对比了二维和三维模型对轧制过程轧件截面形状、温度的模拟结果。结果表明, 与三维模型相比, 二维模型模拟得到的轧件截面宽展偏大, 但计算效率较高, 得出的温度曲线接近三维模型的模拟结果; 给定工艺参数的三维模拟较二维模拟准确; 模型模拟得到的出口轧制速度和温度与实测值吻合。

关键词 GCr15 钢棒材 连轧 二维和三维数值模拟

Two- and Three- Dimensional Simulation of Continuous Rolling Process for Rod of Bearing Steel GCr15

Liao Shulun¹, Zhang Liwen¹, Yue Chongxiang¹, Gao Huiju² and Guo Shuqi²

(1 School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023;

2 Rod and Wire Continuous Rolling Mill, Northeast Special Steel Group, Dalian 116031)

Abstract The two- and three-dimensional models of 12 pass continuous rolling process for 150 mm × 150 mm billet to Φ32 mm rod have been established by commercial finite element software MSC. Marc, and the simulation results of cross section shape, temperature of rolling stock during rolling process by two- and three-dimensional models were compared. Results showed that as compared with that calculated by three dimensional model, the width spread of cross section calculated by two-dimensional model is larger but by which the computational efficiency is high and the temperature curves were close to that calculated by three dimensional model; the three dimensional simulation on given process parameter was more accurate than two dimensional simulation; the simulated value of exit rolling speed and temperature obtained by simulation agreed with experimental value.

Material Index Rod of Bearing Steel GCr15, Continuous Rolling, Two- and Three-Dimensional Numeric Simulation

在考虑到经济及效率等因素时, 利用生产设备来研究轧钢过程及其参数的变化是不可行的。而计算机模拟技术的发展使得对轧制过程进行研究变得经济、方便。在用有限元法模拟板带轧制时, 一些学者常采用简化的二维模型^[1-3]。而在模拟棒线材连轧过程时, 一般研究者为了较真实的反映轧制过程, 常致力于棒线材轧制过程的三维模拟。到目前为止, 已经提出了一些以 Marc 为平台的三维模型^[4,5], 但模拟所需时间较长。二维模型具有计算时间短的特点, 但是棒线材轧制过程接触和变形过程都较复杂, 简化为二维模型时, 存在一定难度。因此, 采用仿真软件建立二维模型分析棒线材轧制过程的研究还比较少^[6]。

二维和三维模型各有其特点, 但很少有人结合两者进行研究。因此, 本实验结合东北特钢集团棒线材连轧厂的实际情况, 借助软件 MSC. Marc 分别建立了二维和三维模型, 对 GCr15 棒线材 12 道次轧制过程进行了模拟分析, 并对两者进行了对比研究。

1 模型建立

东北特钢集团棒线材连轧厂主轧线上粗轧过程孔型为箱-方-椭圆-椭圆, 中轧机组前 6 道次孔型为椭圆交替。粗轧 6 道次机组与中轧前 6 道次机组在平面布置上拉开了一定距离, 使轧制中的轧件尾部脱离粗轧后, 先运行一段时间, 然后其头部才能进入中轧机组。在工艺上, 这种布置形式有利于机组间的轧件速度和温度的调节。粗轧道次间距为 2 600 mm, 中轧道次间距为 2 500 mm。实验坯料截面尺寸为 150 mm × 150 mm, 轧件出炉温度为 1 045 ℃, 12 道次后坯料轧为 Φ32 mm 的棒。实验用钢为 GCr15, 化学成分 (%) 为: 0.95 ~ 1.05C, 0.15 ~ 0.35Si, 0.25 ~ 0.45Mn, 1.40 ~ 1.65Cr, <0.10Mo。

1.1 三维模型

借助大型商业有限元软件 MSC. Marc, 将 GCr15 棒线材 12 道次连轧过程分段建立模型。材料的热物性参数通过外部输入。图 1 为粗轧 1 ~ 6 道次过程的模型, 由于对称性, 取 1/4 轧件进行分析。模拟

时为了使轧件在孔型中有一段稳态轧制过程便于分析,轧件长度取 400 mm。单元划为 1 800 个,节点为 2 378 个。该模型中,轧辊定义为刚性接触体,轧件定义为变形体,轧件尾部设置一刚性体面。在道次间歇期,该刚性体面以前一道次出辊速度推动轧件运行,其速度靠 Marc 子程序控制。轧辊等效换热系数取 $9.5 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,轧件辐射和对流换热系数等效为 $0.07 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,功热转换系数取 0.9,中轧前 6 道次的三维模型与图 1 模型相似,主要不同之处是各部分尺寸、轧制速度、辊型及辊距等略有变化。模型之间的数据靠编制的子程序插值传递。

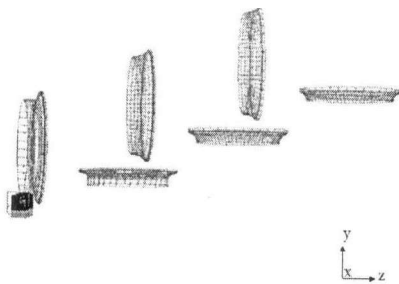


图 1 粗轧过程的三维有限元模型
Fig. 1 Three-dimensional finite element model for rough rolling

1.2 二维模型

二维模型也采用分段的方式建立。图 2 为粗轧过程 1~6 道次二维模型图。由于对称性,取 1/4 轧件进行分析,单元划为 148 个,节点为 171 个。轧件定义为弹塑性变形体,轧辊定义为刚性体。模拟中采用的换热系数都与三维模型中相同,接触计算采用剪切摩擦模型。与图 2 相比,后面 6 道次的二维模型主要是孔型尺寸、轧辊下压速度、轧件形状及轧

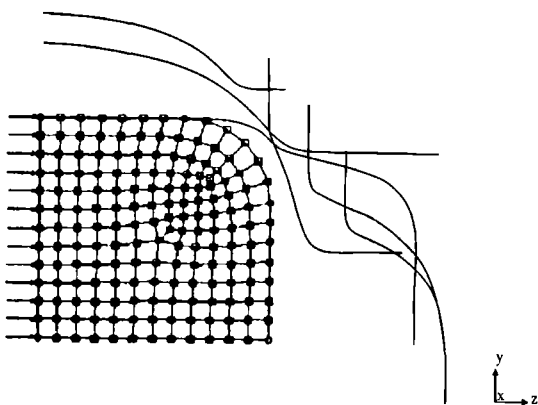


图 2 粗轧过程的二维有限元模型
Fig. 2 Two-dimensional finite element model for rough rolling

制速度等发生变化。与三维模型一样,模型之间的数据也是靠编制的子程序插值传递。

2 结果分析与比较

2.1 形状比较

图 3 显示了二维模型和三维模型模拟粗轧 1~6 道次轧件出辊后的截面形状,孔型为 1 箱-2 方-3 方椭-4 圆-5 椭-6 圆。可以看出二维模型模拟得到的宽展要比三维模型模拟的大出一些,尤其是前 3 道次轧制出口时较为明显。但自第 4 道次后,孔型变为椭圆交替型,这种差距逐渐缩小。而且随着轧件尺寸变小,这种差距变得更不明显。两者模拟轧件截面形状时产生的差别,主要是由于二维模型本质上忽略了轧制方向与拉拔相似的作用,而这种效果必然会导致轧件直径方向的收缩。

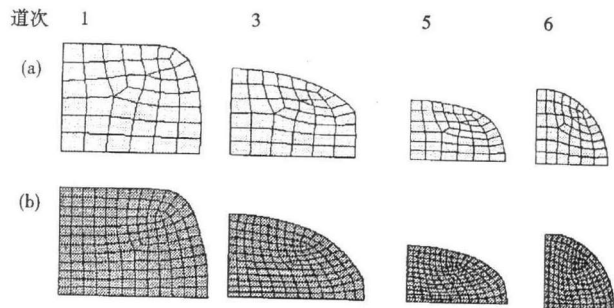


图 3 三维(a)和二维(b)模型模拟的截面形状的比较
Fig. 3 Comparison between rolled cross section shapes simulated by three- (a) and two- (b) dimensional model

2.2 温度曲线对比

图 4 将二维模型和三维模型模拟所得到的轧件中心、1/4 厚度处及表面的温度曲线进行了对比,可以看出两者模拟温度结果较为接近。只是二维模型计算的温升段幅度较三维模型略高。这种现象的产生可能与轧制期间二维模型模拟时的变形比三维模型大有关,所以生成的塑性功要大一些。

2.3 计算效率比较

在 Marc 平台上,两种模型模拟棒线材 12 道次轧制过程所需要的运算时间相差很大,三维模型约需 60 h,而二维模型需 20 min 左右。可见从计算效率上讲,二维模型比三维模型高得多。因此,如果要对各种工艺下棒线材轧制过程的温度演化进行大量的计算,采用二维模型比较快捷。而如果要对某个具体工艺下棒线材轧制过程进行精细的全面模拟,采用三维模型比较合适。

2.4 实验验证

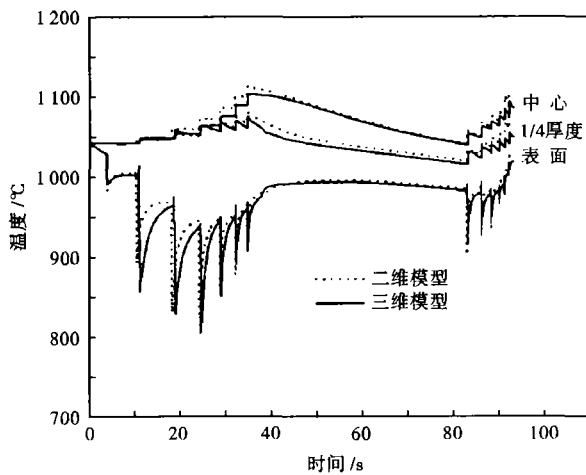


图 4 轧件三维和二维模型模拟温度的比较

Fig.4 Comparison between rolling stock temperature simulated by three- and two- dimensional models

表 1 对三维模型模拟所得到的轧件出辊速度与在东北特钢集团的观测值进行了对比,可以看出本实验所用的三维模型能够比较好的模拟轧件出辊速度。误差主要是由于轧辊长期使用造成的磨损引起。表 1 中 7 道次出辊速度比 6 道次出辊速度更慢,是由于在粗轧与中轧之间设了一段调节速度的传输装置的缘故。

表 1 轧件出口速度模拟值与观测值的比较

Table 1 Comparison between simulated value and measured value of exit rolling speed of rolling stock

道次数	观测值/(m·s ⁻¹)	模拟值/(m·s ⁻¹)
1	0.32	0.332 4
2	0.40	0.446 6
3	0.57	0.618 2
4	0.74	0.781 6
5	0.98	0.990 4
6	1.30	1.306 7
7	0.76	0.847 5
8	1.05	1.137 2
9	1.42	1.388 0
10	1.87	1.942 7
11	2.44	2.591 0
12	3.41	3.375 5

图 5 显示了二维和三维模型温度模拟结果与测量值的对比。采用红外测温仪在轧件侧面接近中线的地方测量,因此取轧件侧表面中线上节点 a 的计算结果与测量值进行对比,可以看到模拟值和测量值基本吻合,误差主要是因仪器不是完全对准中线所致。

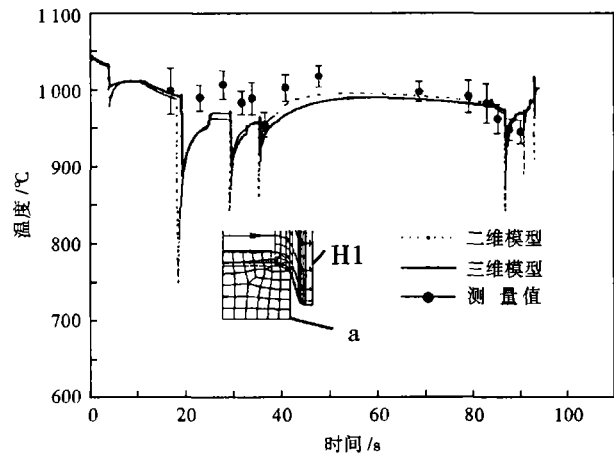


图 5 1~12 道次温度模拟曲线与测量值的比较

Fig.5 comparison between simulated and measured temperature curves during 1~12 pass rolling

3 结论

(1) GCr15 棒线材 12 道次轧制过程模型均能模拟轧件截面形状与温度的变化。与三维模型相比,二维模型模拟得到的截面宽展偏大,而两者得出的温度曲线比较接近。

(2) 三维模型模拟所得轧制出辊速度值与观测值基本吻合,两者温度模拟值与测量值吻合较好。

(3) 在大量的运算时,如计算各工艺下温度演化时,采用二维模型比较快捷。在精细模拟某个具体工艺时,采用三维模型更为准确。实际模拟时,可以将两者结合,取长补短。

大连市优秀青年科技人才基金项目(2001-122)

参考文献

- 1 Duan X, Sheppard T. Computation of Substructural Strengthening by the Integration of Metallurgical Models Into the Finite Element Code. Computational Materials Science, 2003, 27: 250
- 2 Zhou S X. An Integrated Model for Hot Rolling of Steel Strips. J Mater Proc Tech, 2003, 134: 338
- 3 Galantucci L M, Tricarico L. Thermo-mechanical Simulation of a Rolling Process with a FEM Approach, J Mater Proc Tech, 1999, 92-93: 494
- 4 原思宇, 张立文, 廖舒纶, 等. 棒线材多道次轧制过程的静力隐式有限元模拟及模型优化. 塑性工程学报, 2005, 12(4): 54
- 5 原思宇, 张立文, 齐 民, 等. 刚性体推动模型在棒线材多道次轧制过程数值模拟中的应用. 钢铁, 2005, 40(12): 50
- 6 李长生, 刘相华, 王国栋, 等. 棒线材连轧过程轧件温度场的有限元解析. 塑性工程学报, 1998, 5(2): 79

廖舒纶(1980-),男,博士研究生,从事棒线材轧制过程的数值模拟和工艺优化。

收稿日期:2007-04-18