

GCr15 棒线材连轧过程有限元模拟

廖舒纶^{1,2}, 张立文^{*1,2}, 原思宇^{1,2}, 岳重祥^{1,2}, 高惠菊³

(1. 大连理工大学 三束材料改性国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024;
3. 东北特钢集团, 辽宁 大连 116031)

摘要: 借助商业有限元软件 MSC. Marc, 建立了棒线材连轧过程的三维弹塑性模型, 将 $\phi 8$ mm GCr15 棒线材从出炉到精轧结束共 26 道次的轧制过程分为 6 段进行了模拟. 前 3 个模型采用了静态分析, 模型道次间刚性体以实际速度推动轧件进入下一道次. 由于中轧道次后的轧制过程速度较高, 后 3 个模型的模拟使用动态有限元法, 在方程中引入了惯性力. 用该组模型分析了连轧过程中轧件的变形以及温度演化规律, 计算结果与测量结果吻合较好, 证明了该模型模拟棒线材轧制过程的有效性.

关键词: 温度演化; 数值模拟; 轧制

中图分类号: TG335.6 **文献标识码:** A

0 引言

在钢材轧制过程中, 坯料的温度变化是影响产品质量的一个重要参数. 因此, 研究者们对于如何建立精确的模型和控制坯料温度一直都比较感兴趣. 在过去, 有限元数值模拟技术已经开始广泛地应用于钢材轧制过程分析^[1~6]. 为了研究问题方便, 在模拟板带轧制时, 一些人常采用简化的二维模型^[7,8]. 而在模拟棒线材连轧过程时, 由于该过程本质是三维问题, 再加上轧辊和坯料表面之间存在复杂的接触问题, 使用二维模型很难对其进行描述, 因此, 许多研究者将注意力集中在棒线材轧制过程的三维模拟上. 文献^[9,10]提出了一些以有限元法为基础的模拟单道次或多道次轧制过程的简单三维模型. 连轧过程中存在较大的辊距, 需要建立复杂的三维模型, 综合考虑计算效率和模拟的可靠性, 只有建立合适的有限元模型才能揭示多道次热连轧过程的各项参数与变形规律^[11,12].

因此, 为了真实模拟棒线材轧制过程, 本文以 MSC. Marc 为平台, 按照真实辊距建立棒线材连轧过程的三维模型, 采用动态有限元法和静态有限元法相结合的方式模拟 $\phi 8$ mm GCr15 棒线材

26 道次轧制过程, 并对模拟结果进行验证.

1 有限元方程

静力学有限元的基本方程为

$$K\Delta u_i = \Delta P \quad (1)$$

式中: K 和 ΔP 分别为系统的刚度矩阵和载荷增量向量; Δu_i 为位移增量.

有限应变弹塑性有限元需要按增量方法求解, 在每个增量步进行迭代计算, 其中牛顿-拉夫森算法是一种比较经典的算法, 可按下式求解式(1):

$$u(t + \Delta t_i) = u(t) + \Delta u(t_i) \quad (2)$$

式中: $u(t + \Delta t_i)$ 和 $u(t)$ 分别为增量步 $t + \Delta t_i$ 和 t 时系统节点位移向量.

动力学有限元分析的矩阵方程为

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = Q(t) \quad (3)$$

式中: M 、 C 、 K 和 $Q(t)$ 分别是系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和节点载荷向量; $\ddot{u}(t)$ 、 $\dot{u}(t)$ 分别是系统的节点加速度向量和节点速度向量.

在动力分析中, 引入了惯性力和阻尼力, 最后得到的求解方程是常微分方程组. 在 MSC. Marc 的热-力耦合分析中, 采用 Marc 默认的直接

收稿日期: 2005-11-01; 修回日期: 2007-09-25.

基金项目: 大连市优秀青年科技人才基金资助项目(2001-122).

作者简介: 廖舒纶(1980-), 男, 博士生, E-mail: commat@student.dlut.edu.cn; 张立文*(1962-), 男, 教授, 博士生导师.

接积分法中的单步 Houbolt 方法对式(3)进行求解,其形式为

$$\alpha_m M \ddot{u}^{n+1} + \alpha_c C \dot{u}^{n+1} + \alpha_{k1} K u^{n+1} + \alpha_m M \ddot{u}^n + \alpha_c C \dot{u}^n + \alpha_k K u^n = \alpha_{p1} P^{n+1} + \alpha_p P^n \quad (4)$$

$$u^{n+1} = u^n + \Delta t \dot{u}^n + \beta \Delta t^2 \ddot{u}^n + \beta_1 \Delta t^2 \ddot{u}^{n+1} \quad (5)$$

$$\dot{u}^{n+1} = \dot{u}^n + \gamma \Delta t \ddot{u}^n + \gamma_1 \Delta t \ddot{u}^{n+1} \quad (6)$$

将式(4)、(5)和(6)代入式(3),即得到各增量步的递推公式:

$$\left\{ \frac{1}{\beta_1 \Delta t^2 \alpha_{k1}} M + \frac{\alpha_c \gamma_1}{\beta_1 \Delta t \alpha_{k1}} C + K \right\} \Delta u = F^{n+1} - K u^n + \frac{1}{\beta_1 \Delta t^2 \alpha_{k1}} M (\Delta t \dot{u}^n + \beta \Delta t^2 \ddot{u}^n) - \frac{\alpha_m}{\alpha_{k1}} M \ddot{u}^n - \frac{\alpha_{c1}}{\alpha_{k1}} C \left\{ \dot{u}^n + \gamma \Delta t \ddot{u}^n - \frac{\gamma_1}{\beta_1 \Delta t} (\Delta t \dot{u}^n + \beta \Delta t^2 \ddot{u}^n) \right\} - \frac{\alpha_c}{\alpha_{k1}} C \dot{u}^n \quad (7)$$

式中 α 、 β 和 γ 皆为积分常数。

Houbolt 法选择时间步长时要依据相关的最高频率,临界步长可由下式确定:

$$\Delta t = \frac{0.5}{\omega_{\max}} = 0.07 T_{\min} \quad (8)$$

式中: ω_{\max} 为系统最大的固有频率; T_{\min} 为有限元系统的最小振动周期。

2 模型建立

通过对东北特钢集团轴承钢棒线材实际生产过程进行调研,借助大型商业有限元软件 MSC.Marc 建立了 $\phi 8$ mm GCr15 棒线材轧制过程的三维模型。轧件按照时间顺序依次经过高压水除鳞,粗轧 1~6 道次、传送轨道、中轧 7~12 道次、中轧 13~16 道次、水冷段、预精轧 17~18 道次、2 个水箱、8 道次精轧。由于棒线材轧制过程存在较大的辊距,并且整条线相对于轧件大小显得很长,在当前计算速度下,一次性对整个轧制过程模拟计算是不可能的,因此将整个过程分为 6 段,分别进行建模:第 1 个模型从出炉到第 6 道次出口;第 2 个模型从第 6 道次出口到第 12 道次出口;第 3 个模型从第 12 道次出口到第 16 道次出口;第 4 个模型从第 16 道次出口到第 18 道次出口;第 5 个模型从第 18 道次出口到线材精轧第 22 道次出口;第 6 个模型从第 22 道次出口到第 26 道次出口。模型中考虑了轧件与空气的对流与换热,与轧辊和冷却水、除鳞水的热交换。图 1 为第 1 个模型,取 1/4 轧件进行网格划分,长度取 400 mm,单元划分为 1 800 个,节点 2 378 个。模型采用静态

算法,软件尾部施加一个刚性体,在道次间歇期以实际速度推动轧件运行;图 2 为最后一个模型,即线材精轧过程的后四道次,模型采用动态算法。

模拟中采用更新的 Lagrange 算法、Prandtl-Ruess 流动方程以及 von Mises 准则。接触计算采用剪切摩擦模型。材料的变形抗力模型采用文献[13]中的模型。热物性参数通过外部输入。所有模型中轧件采用弹塑性变形体,轧辊定义为刚性体。轧辊间距按照实际工作间距分布。

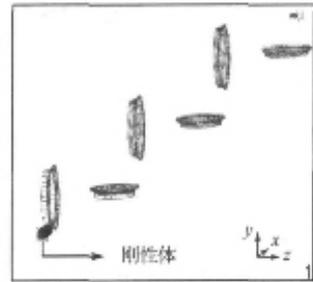


图 1 粗轧过程的有限元模型

Fig. 1 FE model of rough rolling process

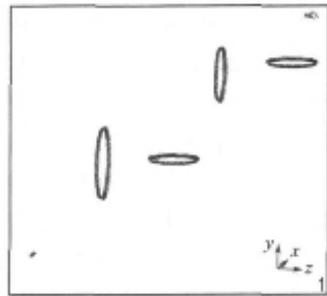


图 2 最后四道次的有限元模型

Fig. 2 FE model of the last 4 stands

3 模拟结果

图 3 为第一个模型在轧制过程中的网格畸变情况,其中图 3(a)~(h)分别为轧前、第 1、第 2、第 3、第 4、第 5、第 6 道次孔型中轧制、轧后的网格变形情况。从网格上可以判断金属的流动情况,明显可以看出轧件棱边圆角处的表面金属流动最大。由于该处与各个轧辊均接触,由接触面拉动未接触面流动,可以看到如图 3(h)中所示的情况,表面的截面网格中部向前突出。图 3(h)中得到的轧件头部畸变较大,形成内凹。模拟得到的出口轧件截面形状为圆形,截面特征量为 78.56

× 77.16, 现场轧制得到截面测量值为78.15 × 79.02, 两者基本吻合. 而且经过各模型模拟后最

后得到的轧件截面尺寸也与实际相符.

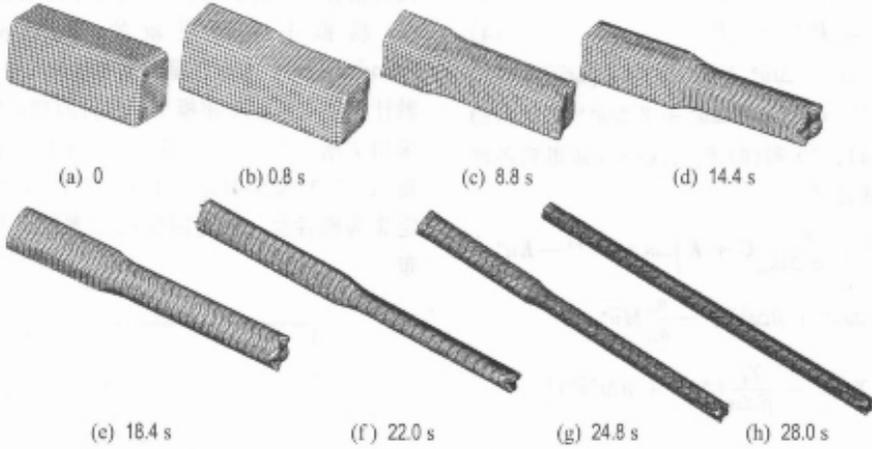


图3 6道次粗轧不同阶段坯料变形情况

Fig. 3 Deformation status of billets during various stage of 6 passes rough rolling

图4为轧件中心、1/4厚度处、与所有轧辊均接触的表面(即原方坯料棱边上)处3个特征点的温度变化曲线. 从图中可以看到, 轧件经过高压水除鳞, 产生一个波动; 表面温度瞬间下降然后缓慢回升. 每道次与一个轧辊接触后, 产生一个齿形波动; 温度瞬间下降, 之后又快速回升. 由于塑性功转变成热, 心部与1/4厚度的温度均呈台阶式上升的趋势, 每经一道次, 温度陡然上升, 然后受表面降温的影响下降, 形成一个向上的齿形波动. 随着轧制过程的进行, 轧制速度越来越快, 轧件与轧辊接触的时间越来越短, 塑性变形生成热的影响成为主导因素, 因此12道次以后每经过一个道次轧辊时, 轧件表面、1/4厚度处及心部的温度均形成一个上升的台阶. 而当经过水冷段及水箱时, 轧件的温度变化规律与除鳞阶段相似.

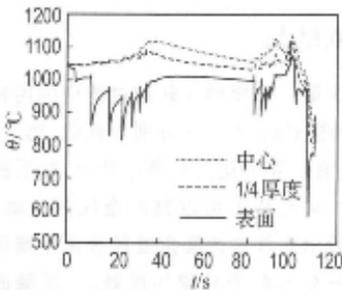


图4 轧制过程不同点时间-温度曲线

Fig. 4 Time-temperature profile of different nodes in billet during rolling process

点不同, 仅与排序为偶数道次的轧辊接触) 模拟结果与测温结果的对比图. 可以看到与奇数道次轧辊接触时, 受内部塑性功的生成影响, 温度形成较小的台阶形上升段; 与偶数道次接触, 才产生向下的波动. 因此曲线上齿形下降段数目明显比图4中表面温度曲线上升的少. 测温采用便携式测温仪对准轧件侧面对称中线测量, 测量位置可取一个范围. 如图5所示, 取了a、b、c三点的模拟曲线, 模拟值和测量值吻合较好, 模拟值与测温平均值的最大误差为19.8℃.

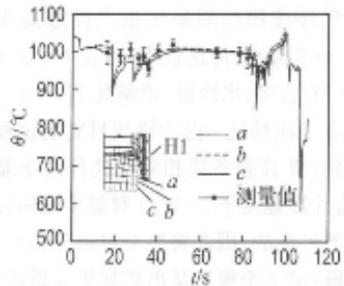


图5 轧件的温度模拟值与测量值的比较

Fig. 5 The comparison between the simulation and measured temperatures of billet

4 结 论

应用大型非线性有限元软件 MSC. Marc 建立了 GCr15 棒线材热连轧过程三维有限元数学模型. 模拟了 φ8 mm GCr15 棒线材从出炉到出第26架轧机的轧制过程. 分析了粗轧1~6道次轧

制过程轧件的变形规律。模型最后模拟得到的轧件的截面尺寸与实际生产得到的尺寸相符。得到了轧件在轧制过程的温度演变规律。将连轧过程温度场模拟结果与实测结果进行了比较,结果表明模拟值与实测值吻合较好,说明该组模型对于生产过程具有一定指导意义。

参考文献:

- [1] KOMORI K. Simulation of deformation and temperature in caliber rolling: effect of finite-element mesh in cross-section [J]. *J Mater Proces Tech*, 2003, **143-144**: 367-372
- [2] KIM S Y, IM Y T. Three-dimensional finite element analysis of non-isothermal shape rolling [J]. *J Mater Proces Tech*, 2002, **127**: 57-63
- [3] 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
- [4] 韩星会, 华林, 兰箭, 等. 内台阶锥形环件轧制三维有限元模拟和工艺优化设计[J]. *中国机械工程*, 2007, **18**(16): 1979-1983
- [5] 陈庆军, 康永林, 洪慧平, 等. 低合金宽薄板轧制过程温度场的有限元模拟[J]. *塑性工程学报*, 2006, **13**(6): 79-82
- [6] 杨启荣, 陈林, 李革, 等. 万能孔型轧制重轨连轧变形的模拟研究[J]. *内蒙古科技大学学报*, 2007, **26**(1): 50-54
- [7] 兰勇军, 陈祥永, 黄成江, 等. 带钢热轧过程中温度演变的数值模拟和实验研究[J]. *金属学报*, 2001, **37**(1): 99-103
- [8] DUAN X, SHEPPARD T. Computation of substructural strengthening by the integration of metallurgical models into the finite element code [J]. *Comput Mater Sci*, 2003, **27**: 250-258
- [9] LEE Y, KIM H J, HWANG S M. Analytic model for the prediction of mean effective strain in rod rolling process [J]. *J Mater Proces Tech*, 2001, **114**: 129-138
- [10] 李建超, 崔建忠, 吴迪, 等. 椭圆孔轧制方坯的显式动力学模拟[J]. *塑性工程学报*, 2003, **10**(1): 57-59
- [11] 原思宇, 张立文, 廖舒纶, 等. 棒线材多次道轧制过程的静力隐式有限元模拟及模型优化[J]. *塑性工程学报*, 2005, **12**(4): 54-57
- [12] 廖舒纶, 张立文, 原思宇, 等. 棒线材粗轧过程的模拟及辊径大小对轧制参数的影响分析[J]. *机械科学与技术* 2006, **25**(12): 1411-1413
- [13] 张强, 姜正义, 熊尚武. 钢的化学成分对变形抗力基值和数学模型系数的影响[J]. *特殊钢*, 1994, **15**(6): 79-84

FE simulation of continuous rolling process of GCr15 steel rod and wire

LIAO Shu-lun^{1,2}, ZHANG Li-wen^{*1,2}, YUAN Si-yu^{1,2}, YUE Chong-xiang^{1,2}, GAO Hui-ju³

(1. State Key Lab. for Mater. Modif., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;

2. School of Mater. Sci. and Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;

3. Dongbei Special Steel Group, Dalian 116031, China)

Abstract: Three-dimensional elastic-plastic models of steel rod and wire continuous rolling process were developed with the aid of the commercial FE (finite element) software MSC. Marc. The 26-pass continuous rolling process of $\phi 8$ mm GCr15 steel rod and wire from outlet of heat furnace to the end of finishing rolling was divided into six continuous sections and modeled separately. The static analysis was employed to simulate the first three models, and a rigid body was adopted in these models with an actual speed to push the billet to the entry of the next stand. However, the simulation of the latter three models was performed using the dynamic FE method, which includes the inertia force in the equilibrium equation due to the higher rolling speed after intermediate stands. The proposed models were employed to predict deformation and thermal behavior of billet in the continuous rolling process. The simulated results coincide with the measured one, which confirms the validity and feasibility of the proposed models.

Key words: temperature evolution; numerical simulation; rolling