

·试验研究·

Φ200 mm H11 芯棒钢热连轧过程张力影响因素的有限元分析

洪慧平¹ 程 满¹ 康永林¹ 冯长桃² 陈溪强²

(1 北京科技大学材料科学与工程学院,北京 100083; 2 宝山钢铁股份有限公司,上海 201900)

摘 要 应用 MSC.MARC 三维热力耦合弹塑性大变形有限元法及其接触分析技术,仿真研究了 Φ200 mm H11 芯棒钢热连轧过程。分析得出,降低末道次轧辊速度 V_r , 会增强道次间的堆钢程度;提高末道次轧辊转速 V_r , 会增强道次间的拉钢程度;可通过合理修正 V_r 值来改善堆、拉钢关系以及轧制负荷变化和轧材宽展量,以提高圆钢成品精度。提出大规格圆钢热连轧过程应采用微堆钢轧制技术,以保持轧制力、力矩稳定和满足轧材尺寸精度要求。

关键词 Φ200 mm 圆钢 热连轧 张力 有限元分析

Finite Element Analysis of Influence Parameters on Tension of Φ200 mm H11 Steel Round Bar for Mandrel during Hot Continuous Rolling

Hong Huiping¹, Cheng Man¹, Kang Yonglin¹, Feng Changtao² and Chen Xiqiang²

(1 School of materials Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Baoshan Iron and Steel Co Ltd, Shanghai 201900)

Abstract The hot continuous rolling process of Φ200 mm H11 steel round bar for mandrel has been simulated and studied by using MSC.MARC 3-dimensional thermo-mechanical coupled elasto-plastic finite element method (FEM) and contact analysis technique. It is obtained by analysis that with decreasing last pass roller speed V_r the compression extent between passes increased; with increasing last pass roller speed V_r the tensile extent between passes increased; therefore it is available to modify the relation between compression and tensile, the rolling load change and the widening extent of rolling products by change V_r value in order to increase the product dimension precision. It is concluded that the light compression technology between passes shall be adopted during heavy round steel continuous rolling to keep the stability of rolling load and torque and guarantee the requirement of product dimension precision.

Material Index Φ200 mm Round Steel, Hot Continuous Rolling, Tension, Finite Element Analysis

本实验应用 MSC. Marc 三维热力耦合弹塑性有限元法及接触体分析技术,首先在建立 Φ200 mm 大规格圆钢热连轧过程三维有限元模型和相关边界条件的基础上,计算机模拟仿真研究了 Φ200 mm H11 芯棒钢的热连轧过程,为进一步优化大规格合金钢圆钢热连轧过程工艺控制方案(特别是张力制度)提供了可靠的技术数据。

1 连轧过程有限元模型及边界条件

1.1 热力耦合有限元法基本方程

对于体积 V 、密度 ρ 、边界 S 的连续介质,热力耦合能量守恒方程及其等效弱形式分别为方程(1)和(2)^[1]:

$$\int_V \left\{ \rho \left(\bar{Q} - \frac{\partial U}{\partial t} \right) + \sigma_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right\} dV = \int_S H dS \quad (1)$$

$$\int_V g \rho \bar{Q} dV - \int_S g H dS = \int_V g \rho \frac{DcT}{Dt} dV + \int_V \frac{\partial g}{\partial X_i} k_{ij} \frac{\partial T}{\partial X_j} dV \quad (2)$$

$$\frac{DcT}{Dt} = c \frac{\partial T}{\partial t} + cv_i \frac{\partial T}{\partial X_i} \quad (3)$$

式中: v_i - 速度场; U - 给定内能; \bar{Q} - 给定体积热流; P_i - 单位面积上的边界力; H - 边界 S 上单位面积的热流强度; g - Galerkin 权函数。

1.2 摩擦边界条件

接触问题中常采用滑动库仑摩擦模型、剪切摩擦模型和粘-滑摩擦模型。剪切摩擦模型为:

$$\sigma_t = -m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{v_r}{r_{\text{venst}}} \right) t \quad (4)$$

式中: σ_t - 切向(摩擦)应力; $\bar{\sigma}$ - 等效剪应力; m - 剪切摩擦因子; t - 相对滑动速度方向的切向单位矢

量, 即 $t = \frac{v_r}{|v_p|}$; v_r - 相对滑动速度; r_{crit} - 发生滑动时接触体之间的临界相对速度。

1.3 有限元模型及边界条件建立

以 $\Phi 200$ mm 圆钢热连轧最后两道次精轧为例, 其孔型系统为“椭圆(V1)、圆孔型(H2)”。两道次连轧之前中间坯断面尺寸为 $222 \text{ mm} \times 222 \text{ mm}$ 、圆角半径为 30 mm 。两个道次轧辊直径均为 800 mm 。钢种为 H11, 初始温度为 $990 \text{ }^\circ\text{C}$ 。末道次轧辊转速 V_r 分别为: $V_r = V_0$; $V_r = 1.05V_0$; $V_r = 1.1V_0$; $V_r = 1.2V_0$, 轧辊基准转速 $V_0 = 13.486 \text{ r/min}$ 。根据热力耦合弹塑性有限元方法建造各接触体模型, 如图 1 所示。

采用更新的 Lagrange 法描述热力耦合弹塑性有限元法和 8 节点六面体等参单元, 屈服准则采用 Von Mises 准则, 金属流动依据 Prandtl-Reuss 流动法则。因对称性, 取 1/4 轧件作为模拟对象。考虑到能够形成稳定连续轧制过程同时兼顾计算时间, 机架间距取 250 mm , 轧件初始长度取 552

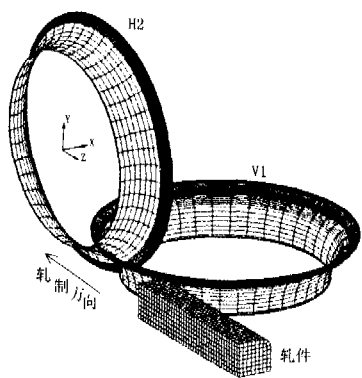
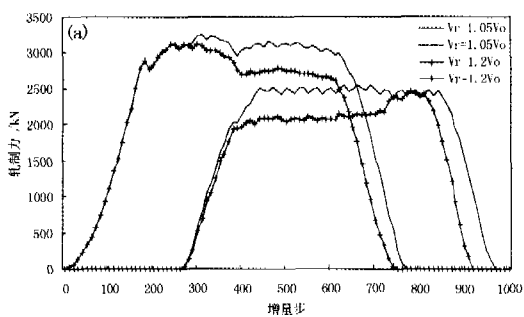


图 1 $\Phi 200$ mm 规格圆钢热连轧过程有限元模型
Fig.1 FEM model for hot continuous rolling of $\Phi 200$ mm round bar



mm, 沿轧件长度方向取 40 等份, 轧件横断面取 63 个单元, 共用 2 520 单元和 3 239 个节点。轧件为弹塑性变形体, 轧辊为刚性接触体。因实际轧制过程在 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温及较高轧制力和接触力下进行, 摩擦边界条件可采用剪切摩擦模型, 取摩擦因子 0.7, 轧材泊松比 0.3, 密度 $7.75 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ 。

在传热边界条件方面可将轧件与周围环境的对流和辐射换热的边界条件统一写为: $q = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) = \alpha(t - t_\infty)$ 。式中 t 为轧件表面温度; t_∞ 为环境温度; α 为换热系数。换热系数 α 可写成对流换热系数 h 与等效辐射换热系数 h_r 之和。在此 α 取为 $0.17 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ 。接触传热边界条件可表示为: $q = h_c(t - t_d)$ 。式中 h_c 为接触热传导系数; t_d 和 t 为接触体表面温度。轧件与轧辊的接触传热系数在此取为 $20 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ [2,3]。热功转换系数取为 0.9。轧辊和轧件接触表面的摩擦生热, 可均分至轧件和轧辊等接触体上。

2 模拟仿真结果与分析

2.1 连轧过程轧制力、力矩及堆拉钢变化分析

为避免轧制力和力矩曲线过多而重叠, 后处理结果中仅取 $V_r = 1.05V_0$ 和 $V_r = 1.2V_0$ 来观察末道次轧辊转速变化对 $\Phi 200$ mm 圆钢连轧过程轧制力和力矩的影响规律(图 2)。随着 V_r 的升高, 稳定连轧阶段各道次轧制力及第 1 道次轧制力矩均降低, 而第 2 道次轧制力矩升高, 这是由于机架间存在堆钢和拉钢的矛盾统一体中拉钢情况逐渐占据主导地位。当末道次轧辊转速为 $V_r = 1.05V_0$ 时, 连轧阶段已存在轻微的堆钢现象; 当 $V_r = 1.1V_0$, 连轧阶段存在拉钢现象; 当 $V_r = 1.2V_0$, 连轧阶段存在非常强烈的拉钢现象。相比之下, 当

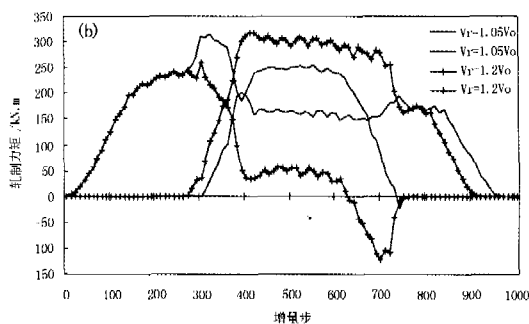


图 2 不同末道次轧辊转速下连轧 $\Phi 200$ mm 圆钢的轧制力(a)和力矩(b)变化(1/4 轧件)

Fig.2 Variation of rolling force (a) and torque (b) vs increment for continuous rolling of $\Phi 200$ mm round bar (1/4 stock) in last pass with different roller speed

$V_r = 1.05V_0$ 时,机架间存在轻微堆钢情况,此时连轧过程的轧制力和力矩参数变化更为稳定,即连轧大规格圆钢宜采用微堆钢轧制。

2.2 轧件位移量及应力、应变和温度分布变化

在不同末道次轧辊转速 V_r ($V_r = V_0 \sim 1.2V_0$) 条件下,连轧后 $\Phi 200$ mm 圆钢中部圆周相关节点

位移量、应力、应变和温度变化如图3所示。从图可见,随着 V_r 的增大,连轧过程拉钢现象愈加严重,轧后圆钢中部最高节点(1号节点)高度方向的位移量变化很小,最宽节点(15号节点)沿宽度方向的位移量有明显增加即轧件宽展减小,所以可通过调整轧辊转速及相应形成的连轧堆钢和拉

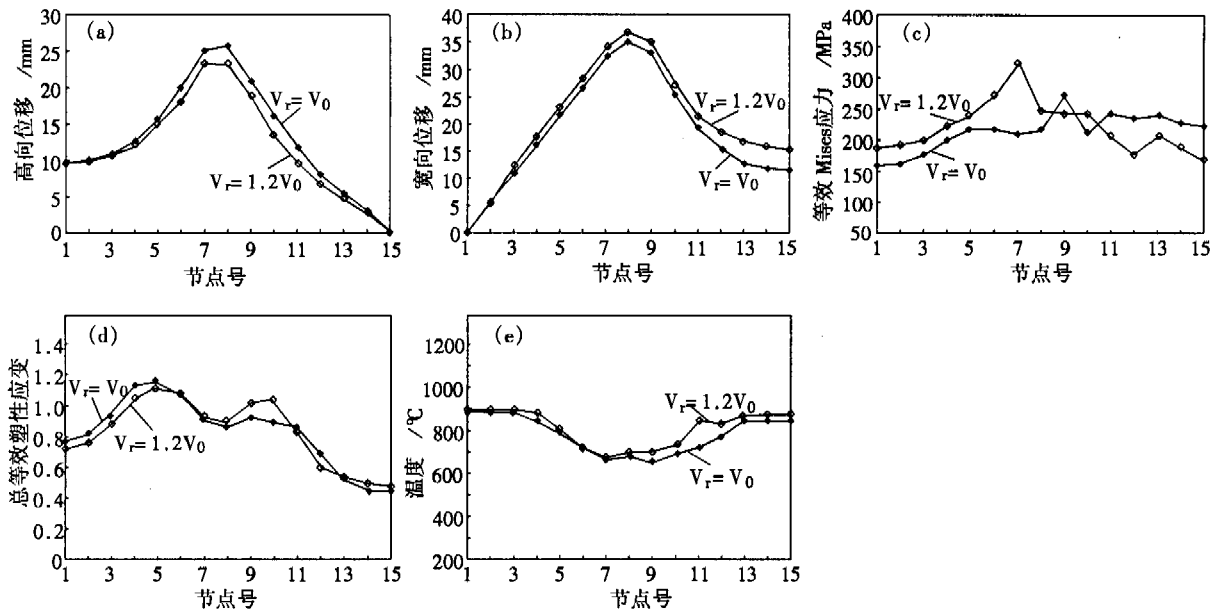


图3 当 $V_r = V_0 \sim 1.2V_0$ 时 $\Phi 200$ mm 圆钢末道次连轧的高向(a)和宽向(b)位移量、应力(c)、应变(d)和温度(e)变化
Fig.3 Displacement at height direction (a) and wide direction (b), stress (c), strain (d) and temperature (e) for continuous rolling of $\Phi 200$ mm round bar in last pass with $V_r = V_0$ and $V_r = 1.2V_0$

钢关系来调整轧件宽展量及圆钢成品的尺寸精度。

另外,随着 V_r 增大,温度虽有所升高但变化不大,这主要是由于 V_r 增大,轧制速度提高,轧制过程温降减少而变形功增加,又 V_r 及其变化值不是太大,所以总体温度升高不大。当 $V_r = 1.2V_0$ 时,轧件最高点(1号节点)和最宽点(15号节点)处的等效 Mises 应力分别有明显的升高和降低,而总等效塑性应变分别有较小的降低和增加。

3 结论

(1) 降低末道次轧辊转速 V_r , 会增强道次间的堆钢程度; 提高末道次轧辊转速 V_r , 会增强其道次间拉钢程度。可以通过轧辊转速合理修正来改善大规格圆钢热连轧过程堆拉钢关系和轧制负荷变化以及轧材宽展量和圆钢成品尺寸精度。

(2) 与拉钢轧制相比,采用微堆钢时,连轧大规格圆钢的轧制力和力矩等力学参数变化较为平稳,同时轧材尺寸精度更能满足要求。因此,连轧大规格圆钢应采用微堆钢轧制。

参考文献

- 1 MSC.MARC 2005, User Manual 2005, MSC. Software Corporation.
- 2 洪慧平, 康永林. 椭圆孔型轧制合金钢方坯三维弹塑性有限元模拟. 北京科技大学学报, 2003, 25(2): 171
- 3 Huiping Hong, Yonglin Kang, Changtao Feng. Three-Dimensional Thermo-Mechanical Coupled FEM Simulation for Hot Continuous Rolling of Large-Diameter Mandrel Bar. Journal of Materials Science and Technology, 2003, 19(Suppl.): 228

洪慧平(1963-), 男, 博士, 副教授, 从事材料加工计算机辅助工程与模拟仿真优化教学与科研。