

T91 钢热连轧管过程力学参数的有限元分析

洪慧平¹ 赵志毅¹ 康永林¹ 余勇² 周晓岚² 潘峰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钢管分公司, 上海 201900)

摘要 应用三维有限元模拟仿真技术, 对 $\Phi 169 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ T91 无缝钢管 8 机架浮动芯棒连轧管过程, 进行有限元模拟与仿真分析, 获得各机架横断面等效应力分布以及轧制力、芯棒力和力矩的变化特点。提出增加前 3 机架轧制力, 降低第 4 机架轧制负荷, 使连轧管过程轧制力参数合理分布。

关键词 T91 钢 无缝钢管 浮动芯棒 连轧过程 轧制力 有限元模拟

Finite Element Analysis on Rolling Load Parameters of Hot Continuous Mandrel Rolling of T91 Steel Seamless Tube

Hong Huiping¹, Zhao Zhiyi¹, Kang Yonglin¹, Yu Yong², Zhou Xiaolan² and Pan Feng²

(1 School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;
2 Steel Tube Subcompany, Baoshan Iron and Steel, Shanghai 201900)

Abstract The 8-stand floating mandrel continuous rolling process of $\Phi 169 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ T91 steel seamless tube has been simulated and analyzed by 3-dimensional thermo-mechanical coupled FEM to get distribution of equivalent stress of across section at exit of each pass, as well as change characteristics of rolling force, mandrel force and torque. It is proposed that increasing rolling force at first 3 stands and decreasing rolling load of 4th stand lead to reasonable distribution of rolling force parameters of continuous rolling process.

Material Index T91 Steel, Seamless Steel Tube, Floating Mandrel, Continuous Mandrel Rolling, Rolling Force, FEM Simulation

应用 MSC. Marc 有限元模拟仿真软件, 以 $\Phi 169 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 为典型轧制规格, 针对宝钢 8 机架浮动芯棒连轧管过程, 进行三维热力耦合弹塑性有限元建模与仿真分析。

1 T91 钢连轧管过程有限元模型及边界条件

1.1 初始轧制条件

T91 钢毛管初始尺寸为 $\Phi 192 \text{ mm} \times 14.5 \text{ mm}$, 初始温度为 $1050 \text{ }^\circ\text{C}$, 芯棒直径为 153.5 mm , 芯棒温度为 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 。各机架轧辊直径均为 600 mm ; 第 1 至 4 机架辊缝值为 10 mm , 第 5 至 7 机架辊缝值为 8 mm , 第 8 机架辊缝值为 5 mm ; 第 1 至第 8 机架轧辊转速 (r/min) 分别为: $n_1 = 112.84$, $n_2 = 166.56$, $n_3 = 193.95$, $n_4 = 214.88$, $n_5 = 233.44$, $n_6 = 265.59$, $n_7 = 267.15$, $n_8 = 259.47$ 。宝钢 T91 钢主要化学成分 (%) 为: 0.11C , 0.40Si , 0.40Mn , 0.008S , 0.008P , 8.26Cr , 0.89Mo , 0.20V , 0.06Ni , 0.007Al , 0.08Nb , 0.045N ^[1]。

1.2 有限元模型和边界条件的建立

根据连轧管工艺特点, 建立 1/4 对称性有限元模型, 将荒管定义为弹塑性变形体, 第 1 至第 8 机架轧辊和芯棒均定义为刚性接触体。选择修正滑动库仑摩擦模型, 荒管和轧辊之间摩擦系数为 $\mu_{i,r} = 0.3$; 根据连轧管工艺特点取芯棒表面摩擦系数 $\mu_{i,m} = 0.07$ 。荒管的泊松比为 0.3 , 密度为 $7.83 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ 。选择 8 节点 6 面体等参单元, 共用 2880 个单元, 6119 个节点。采用更新的 Lagrange 算法、Prandtl-Reuss 流动方程及 Von Mises 屈服准则^[2]。连轧管与周围环境对流和辐射换热边界条件可写为:

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) = \alpha (t - t_\infty)$$

式中: t - 荒管表面温度; t_∞ - 环境温度; α - 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, α 取值为 $0.17 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ 。荒管与轧辊之间接触传热边界条件为:

$$q = h_c (t - t_d)$$

式中： h_c - 接触热传导系数； t_d 和 t - 接触体表面温度。接触传热系数 h_c 取值为 $20 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ ，功热转换系数取 0.9。图 1 为连轧管过程热力耦合三维弹塑性有限元模型。

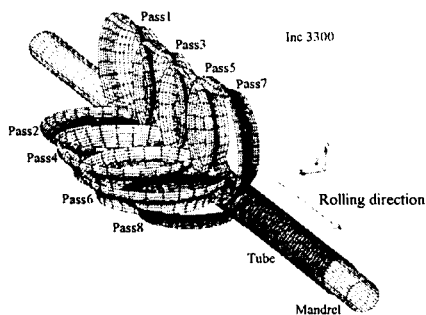


图 1 T91 钢 Φ169 mm × 6 mm 8 机架芯棒连轧管过程的有限元模型

Fig.1 Finite element model of 8- stand mandrel continuous rolling process of Φ169 mm × 6 mm T91 steel seamless tube

2 模拟仿真结果分析和讨论

2.1 T91 钢连轧管过程等效应力和壁厚变化

从图 2 可见,T91 钢 Φ169 mm × 6 mm 规格连轧管各机架出口荒管横断面等效 Mises 应力值分布不均匀,其中 X、Y 和 Z 轴方向分别对应于奇数机架轧辊轴向、偶数机架轧辊轴向以及轧制方向。

从第 1 至第 8 机架,因道次变形量逐渐减小, X 和 Y 方向钢管外直径变化幅度均逐渐减小,在第 5 机架以后,X 和 Y 方向外直径变化趋于一致。在第 1 至第 2 机架沿 X、Y 方向壁厚显著减小,第 1 至第 2 机架完成的减壁量占总减壁量约为 80%,而在第 2 至第 5 机架沿 X、Y 方向壁厚呈少量减小趋势,在第 5 至第 8 机架 X 和 Y 方向钢管壁厚趋于一致。

2.2 T91 钢连轧管过程轧制力和力矩变化

在稳定连轧阶段(在 1 200 ~ 1 800 增量步之间),各机架轧制力和力矩变化处于相对稳定状

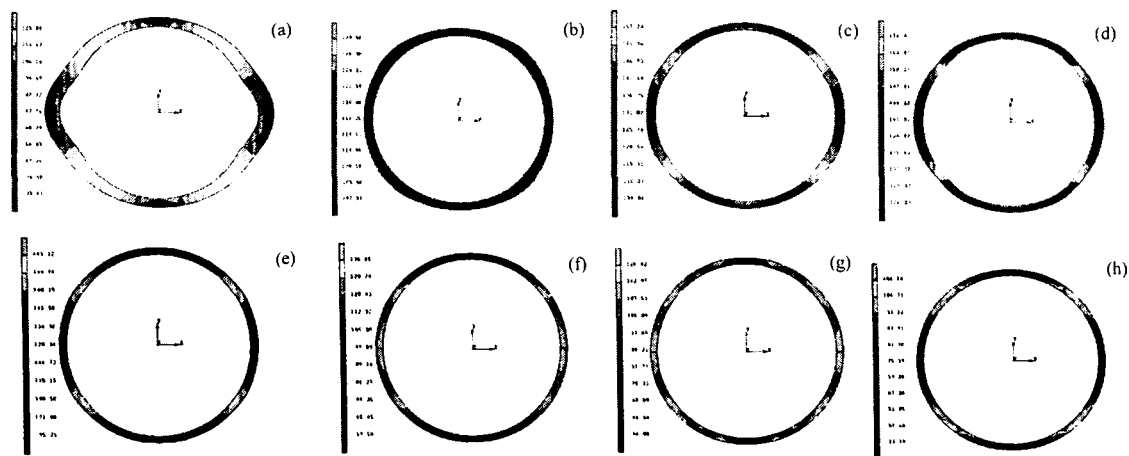


图 2 T91 钢 Φ169 mm × 6 mm 8 机架浮动芯棒连轧管各机架出口荒管横断面等效 Mises 应力值/MPa;机架 1(a),2(b),3(c),4(d),5(e),6(f),7(g),8(h)

Fig.2 Equivalent Mises stress /MPa of cross section at exit of each pass of 8- stand floating mandrel continuous rolling process of Φ169 mm × 6 mm T91 steel seamless tube; stand 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e), 6 (f), 7 (g), 8 (h)

态[图 3(a)]。轧制力总体上顺轧制道次而递减,并且在第 7、8 机架趋于零。这说明连轧管过程道次变形量主要集中于第 1 至第 6 机架上,而第 7、8 机架基本不起减壁作用。

但是,在稳定连轧阶段第 4 机架轧制力高出第 3 机架轧制力约 26%,这即是实际生产中出现第 4 机架轧制负荷过大甚至影响正常生产的原因。可适当增加前 3 机架轧制力,而降低第 4 机架轧制负荷,以使连轧过程轧制力参数分布更为

合理。

从图 3(b)可分析在稳定连轧阶段机架间堆拉钢情况。从第 1 至第 8 机架总体上拉钢情况逐渐减小,其中第 1 和第 2 机架之间存在相对较强的拉钢轧制,这对于在初始高温道次施加较大减壁量是有利的。

2.3 T91 钢连轧管过程芯棒力和扭矩变化

在稳定连轧阶段,X 轴方向芯棒力大于 Y 轴方向芯棒力,Z 轴方向芯棒力相比之下较小。稳

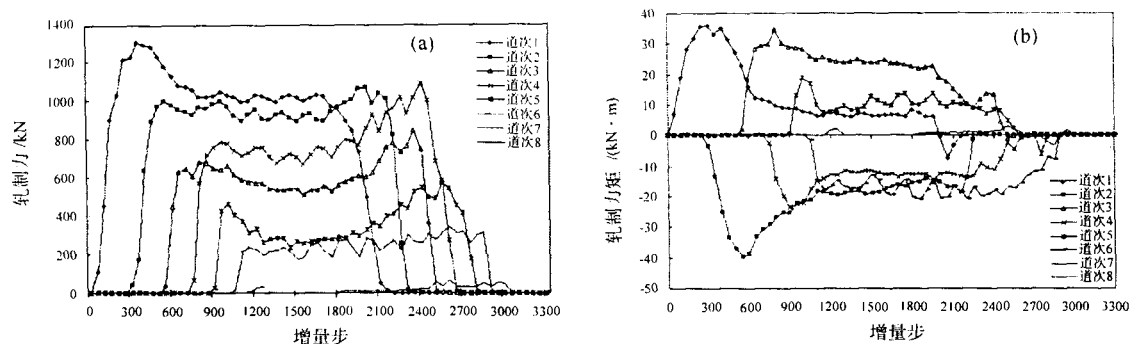


图3 T91 钢 $\Phi 169 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 8-架浮动芯棒连轧管过程轧制力(a)和轧制力矩(b)变化(1/4 连轧管)

Fig.3 Change of rolling force (a) and torque (b) of 8-stand floating mandrel continuous rolling process of $\Phi 169 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ T91 steel seamless tube (1/4 hollow shell)

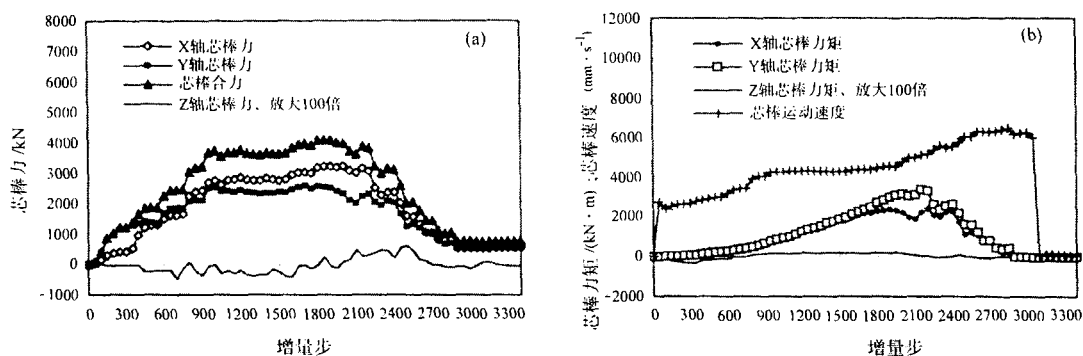


图4 T91 钢 $\Phi 169 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 8-架浮动芯棒连轧管芯棒力(a)、力矩和芯棒速度(b)变化(1/4 连轧管)

Fig.4 Change of mandrel force (a) mandrel torque and mandrel velocity (b) of 8-stand floating mandrel continuous rolling process of $\Phi 169 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ T91 steel seamless tube (1/4 hollow shell)

定连轧阶段芯棒力变化较平稳,这与此阶段轧制力变化的平稳性相一致,如图4(a)所示。

但是稳定连轧阶段 X 和 Y 轴方向芯棒的扭矩呈显著增大趋势,此阶段芯棒扭矩变化不具有平稳性,见图4(b)。在稳定连轧阶段 X、Y 轴方向芯棒力显著大于各个机架的轧制力,这是由于稳定连轧阶段,各个机架轧辊作用力经毛管传递到芯棒,因此连轧管内壁要承受较大的作用力和塑性变形,可见对芯棒表面进行润滑的必要性。

图4(b)为连轧管过程浮动芯棒速度的变化规律。开轧时因毛管与芯棒之间的原始间隙,浮动芯棒速度开始大于零时刻与第1机架轧制力开始大于零时刻是非同步的。在非稳定轧制阶段,芯棒速度呈加速上升趋势,在稳定连轧阶段,芯棒速度变化平稳,在荒管尾部脱离各机架的非稳定连轧阶段,芯棒速度又呈加速上升趋势。

3 结论

(1) 第4机架轧制力高出第3机架轧制力约

1/4。应适当增加前3机架轧制力,而降低第4机架轧制负荷,以使连轧管过程轧制力参数分布合理。

(2) 在第1和第2机架之间存在较强的拉钢轧制,以后各机架拉钢总体上由强渐弱,这有利于在初始高温机架实施较大减量量。

(3) 在稳定连轧阶段芯棒力变化较平稳,但芯棒扭矩呈增大趋势,同时沿各机架轧辊轴向的芯棒力显著大于各机架的轧制力。

参考文献

- 1 王起江,邹凤鸣,张 瑞. 宝钢 T91 高压锅炉管性能试验与研究. 宝钢技术, 2003(4): 46
- 2 Hong Huiping, Kang Yonglin, Feng Changtao. 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,从事材料成形过程模拟仿真与计算机辅助工程的教学与科研工作。

收稿日期:2006-03-20