

Q215 钢棒材热轧后湍流冷却过程温度场数值模拟

晋艳娟¹ 张柱¹ 崔小朝¹ 刘勇² 孙宏晓²

(1 太原科技大学应用科学学院,太原 030024; 2 太原天松工程技术有限公司,太原 030024)

摘要 利用湍流管式冷却系统可以提高棒材热轧后冷却效率,使棒材表面形成回火马氏体,提高其力学性能。运用有限元分析软件 MSC. Marc 分析了 $\Phi 25$ mm Q215 钢棒材热轧后湍流冷却过程的温度场。结果表明,棒材离开湍流式冷却系统 1 s 时,棒材表面由 950.0 °C (终轧温度)降至 768.0 °C,芯部温度降至 861.2 °C;棒材离开湍流式冷却系统后,空冷 3 s 时表面温度升至 792.6 °C。生产应用结果表明,棒材进行普通冷却后的强度极限为 310 MPa,用湍流式 3 段冷却后棒材的强度极限达 410 MPa。

关键词 控制轧制 湍流冷却 温度场 数值模拟

Numerical Simulation on Temperature Field of Hot Rolled Q215 Steel Bar Cooling by Turbulent Flow Process

Jin YanJuan¹, Zhang Zhu¹, Cui Xiaochao¹, Liu Yong² and Sun Hongxiao²

(1 School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024;
2 Taiyuan Tiansong Engineering and Technology, Taiyuan 030024)

Abstract Tempered martensite can be formed at surface of bar to increased its mechanical properties by higher efficient tube type turbulent flow cooling system after hot rolling of bar products. The temperature field of $\Phi 25$ mm Q215 steel bar after hot rolling in turbulent flow process has been analyzed by the finite element analysis software MSC. Marc. Results showed that left turbulent flow system cooling for 1 s the surface temperature of bar decreased from 950.0 °C (finishing rolling temperature) to 768.0 °C and the centre temperature of bar decreased to 861.2 °C; and as bar was out of turbulent flow cooling system for 3 s the surface temperature increased to 792.6 °C. Production application results indicated that the ultimate strength of hot rolled bar cooling by 3 zone turbulent flow cooling was up to 410 MPa while that by normal process cooling was only 310 MPa.

Material Index Control Rolling, Turbulent Flow Cooling, Temperature Field, Numerical Simulation

控制轧制和控制冷却是高速棒材轧机的两大工艺^[1]。棒材轧后控制冷却就是利用轧制变形后的余热进行热处理,使得棒材获得预期的晶粒组织和综合机械性能。棒材的综合性能决定于化学成分、变形条件、终轧温度以及冷却条件。其中,合理的选择轧后控制冷却工艺是获得棒材所要求性能的关键^[2,3]。

利用湍流管式冷却系统(图 1),可以改善其冷却效果以及提高冷却效率和棒材的力学性能。因

此,对棒材湍流冷却过程的温度场进行计算,制定合理的冷却工艺,具有重要的理论和实际意义。本实验运用有限元分析软件 MSC. Marc 对 $\Phi 25$ mm 棒材轧后余热湍流冷却过程的温度场进行数值模拟,得到了棒材内部的温度变化。

1 控冷过程的数学模型

棒材的长度远大于其直径,可将其控冷过程简化为无限长圆柱体传热过程^[4]。热传导方程为:

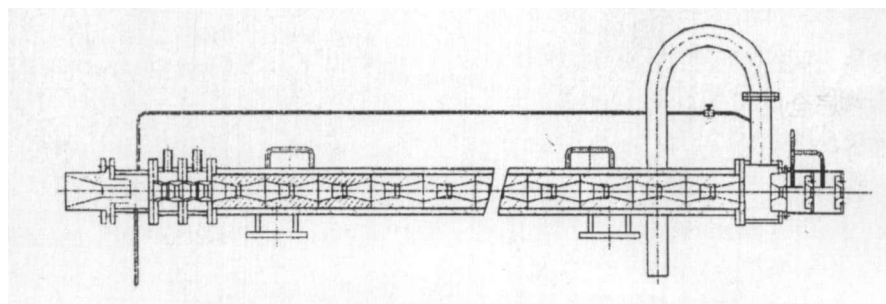


图 1 湍流管式冷却系统图

Fig. 1 Diagram of tube type turbulent flow cooling system

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

式中: k - 热传导系数; ρ - 材料密度; c - 热容; t - 时间; T - 轧件温度。

2 初始和边界条件

棒材离开精轧机后整个断面的温度是一致的, 并且是对称分布的^[5]。温度等于终轧温度, 所以初始温度为 950.0 °C。其边界条件为:

(1) 进入湍流式冷却系统, 棒材和冷却水之间发生强制对流换热, 棒材和冷却水之间的强制换热系数为 5 000 W/°C。

(2) 棒材出湍流式冷却系统后进入空冷阶段, 棒材和空气之间的自然对流换热系数为 200 W/°C。

3 棒材控冷过程温度场模拟

3.1 控冷过程温度场的模拟

针对 Q215 钢进行分析, 棒材的横截面尺寸远

小于其纵向长度, 因此可将三维问题简化为二维问题。棒材控制冷却过程分为水冷和空冷两部分。根据湍流冷却系统的总长度和轧制速度, 可以得到水冷时间为 1 s, 因此分析棒材在 3 s 内的温降过程。通过这一分析结果, 可以得到棒材每一断面的温度

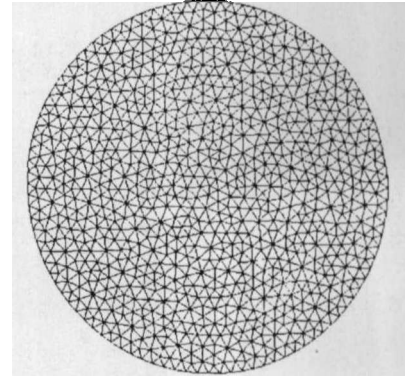


图 2 温度场模拟的模型及网格图

Fig. 2 Diagram of model and grid for simulation of temperature field

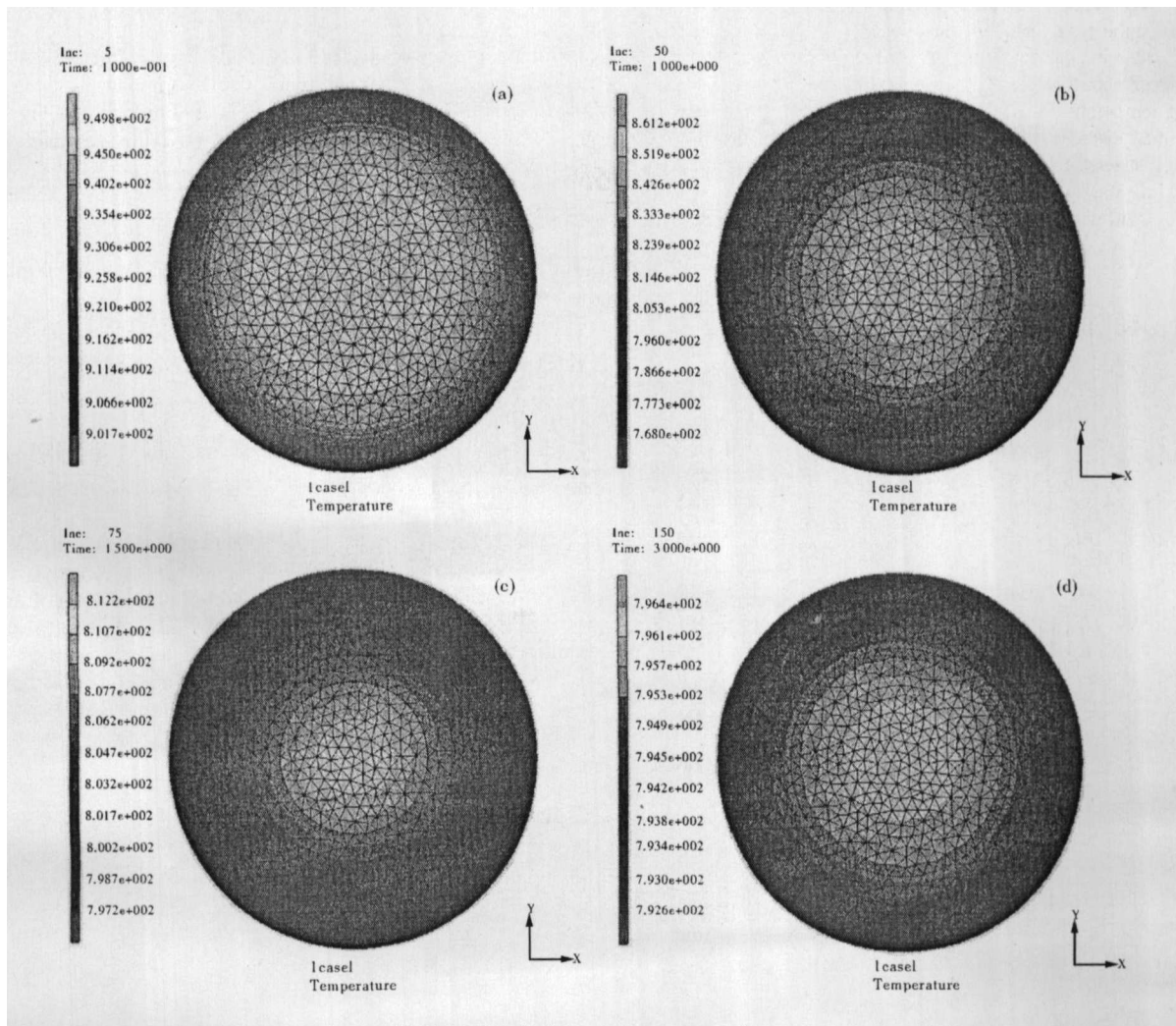


图 3 Φ25 mm 棒材断面温度分布: (a) 0.1 s; (b) 1 s; (c) 1.5 s; (d) 3 s

Fig. 3 Temperature distribution of cross section of Φ25 mm bar at 0.1 s(a); 1 s(b); 1.5 s(c) and 3 s(d)

分布。实验对 $\Phi 25$ mm 的棒材进行有限元分析,模型及网格如图 2 所示。根据现场实测,终轧温度为 $950.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,环境温度为 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$,湍流冷却系统共有 3 段,每段长 2.8 m ,轧制速度为 8 m/s ,棒材的导热系数为 $26.9\text{ W/(m}\cdot^{\circ}\text{C)}$,质量热容为 $732\text{ J/(kg}\cdot^{\circ}\text{C)}$,密度为 6900 kg/m^3 。

3.2 模拟结果及分析

棒材精轧后进入湍流式冷却系统进行冷却,水冷过程中棒材横断面的温度分布如图 3(a,b) 所示。从图 3(a,b) 中可以看到随着时间的变化,棒材的温度逐渐降低。由于棒材表层与冷却水直接接触,所以棒材表层的温度降低要比棒材芯部的温度降低快。在 $t=1\text{ s}$,棒材离开湍流式冷却系统时,棒材表面温度由终轧温度 $T_{\text{终}}=950.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $768.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,而棒材芯部温度降至 $861.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

棒材离开湍流式冷却系统后,直接与空气接触,在空气中冷却,冷却过程横断面不同时刻的温度分布如图 3(c,d) 所示。从图 3(c,d) 可看出,棒材的内部热量在向外扩散,最终表面温度变为 $792.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。空冷的主要目的是为了减小水冷后表面和芯部的温差。

通过有限元分析可以得到棒材穿水冷却和空冷过程的温度变化,并且可以输出相应节点温度随时间的变化曲线,得知表层和棒材内部不同半径处的温度变化,图 4 为棒材表层、中部和芯部 3 点处的温度曲线。

从图 4 可看出,由于棒材表层受水冷和空冷的交替作用,温度先降低后回升,而芯部温度变化是棒材内部热传导的结果,变化相对平缓。水冷结束后,棒材的芯部温度远高于表层温度,热量向外扩散,棒材芯部温度继续下降,空冷结束后棒材表面和芯部的温度基本趋于一致。从图 4 棒材表层的温度曲线可以看出:棒材表层的温度先降低,后又升高,这一分析结果正好验证了淬火、回火的过程。

湍流式冷却系统已在鄂钢投入使用,并且达到了预期的效果。棒材进行普通冷却后的强度极限为 310 MPa ,运用湍流式 3 段冷却后棒材的强度极限达到 410 MPa 。

4 结论

(1) 采用有限元软件计算棒材的温度变化十分方便快捷。不但可以输出数据,而且可以输出温度

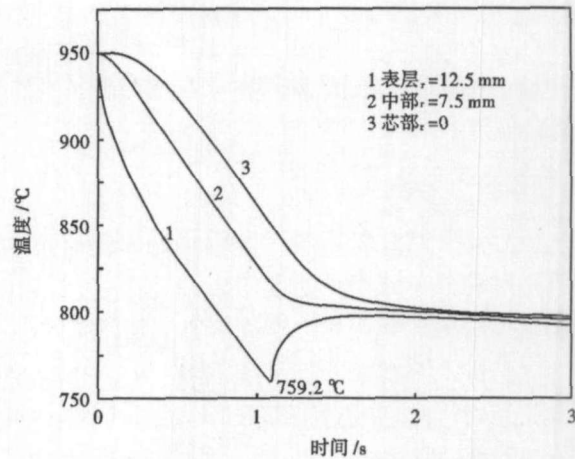


图 4 $\Phi 25$ mm 棒材的控冷温度曲线

Fig. 4 Temperature curves of $\Phi 25$ mm bar during control cooling

随时间变化的曲线,可以用于湍流式穿水冷却的离线预报。

(2) 棒材穿水冷却过程中,表面冷却速率大,温降快,芯部冷却速率小,温降慢;水冷结束后,棒材芯部热量向外扩散,最终棒材表面和芯部的温度基本趋于一致。

(3) 增加冷却系统的长度能够加强冷却效果,增加空冷时间能够使内外温度差更加趋于平衡。因此可以结合这两方面的冷却特征,合理调整冷却系统的长度和空冷时间,使之能够满足不同产品的控冷工艺要求,提高产品的综合机械性能。

太原科技大学青年基金资助项目(2006133)

参考文献

- 1 李曼云. 钢的控制轧制和控制冷却技术手册. 北京: 冶金工业出版社, 1990
- 2 赵宪明, 吴迪, 闻雷. 大规格钢筋余热处理过程有限元分析与计算. 材料科学与工艺, 2002, 10(1): 86
- 3 于伟, 陈银莉, 蔡庆伍. 余热处理 20MnSi 带肋钢筋力学性能的模拟研究. 特殊钢, 2002, 23(3): 13
- 4 孔祥谦. 有限元法在传热学中的应用. 北京: 科学出版社, 1998
- 5 Morales R D, Lopez A G, Olivares L M. Heat Transfer Analysis during Water Spray Cooling of Steel Rods. ISIJ International, 1990, 30(1): 48

晋艳娟(1979-), 女, 助教, 从事液态金属流动多场耦合数值模拟及棒线材轧后穿水冷却过程研究。

收稿日期: 2007-01-22