

中厚板辊式淬火机淬火过程的温度场分析

袁 国¹, 王国栋¹, 王黎筠², 王昭东¹

(1. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110004; 2. 鞍钢集团设计研究院, 辽宁 鞍山 114021)

摘 要: 通过建立中厚板辊式淬火机淬火过程的热传导控制方程, 分析了热交换系数、淬火方式对中厚钢板淬火过程中温度场的影响。分析表明, 淬火过程中, 一定厚度的钢板, 换热系数在一定范围内增大时, 对流换热边界条件对钢板表面及内部温度变化影响效果显著; 中厚板辊式淬火机淬火过程的特点在于, 钢板首先通过冷却强度很大的高压淬火区冷却, 使板材内部保持很大的温度梯度, 从而保证板材获得较大的冷却速度; 在较低冷却强度的低压淬火区完成淬火过程, 板材内部温度梯度减小, 可降低板材内部热应力。

关 键 词: 中厚板; 辊式淬火机; 淬火; 温度场

中图分类号: TG 335

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2010)04-0527-04

Temperature Field of Steel Plate on Roller Quenching Machine

YUAN Guo¹, WANG Guo-dong¹, WANG Li-jun², WANG Zhao-dong¹

(1. The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. The Design Institute of Ansteel Group, Anshan 114021, China. Correspondent: YUAN Guo, E-mail: yuanguosy@sina.com)

Abstract: The effects of heat transfer coefficient and quenching modes on the temperature field of a steel plate during quenching on a roller quenching machine were analyzed by a heat transfer control equation derived. The results showed that if the heat transfer coefficient increases within a certain range, the boundary conditions of convective heat transfer affect the surface and internal temperature of a plate of certain thickness significantly in its quenching process. It was found that the roller quenching machine has such characteristics that the steel plate is cooled in a high-pressure quenching zone where the cooling intensity is so high that the temperature gradient can be kept great inside the plate to ensure its high cooling rate, then the plate is fully quenched in the low-pressure quenching zone with lower cooling rate, thus decreasing the temperature gradient in the plate with its internal thermal stress reduced.

Key words: steel plate; roller quenching machine; quenching; temperature field

近年来随着中厚板产品市场竞争加剧, 中厚板轧后热处理设备及工艺技术已成为企业关注的热点^[1-3]。辊式淬火机作为中厚板现代化热处理线淬火生产的关键设备^[4-5], 在淬火生产过程中, 根据设定的淬火工艺参数, 钢板连续通过辊式淬火机冷却强度不同的高、低压淬火区完成淬火过程, 以得到所需的淬火组织。板材淬火过程的温度场是淬火工艺参数选择和淬火后板材性能的重要影响因素, 是淬火工艺合理与否的重要判断依据。由于我国中厚板辊式淬火机设备长期以来依

赖进口, 在此方面研究较少; 因此, 有必要对中厚板辊式淬火机淬火过程的温度场进行分析。

本文结合国产自主知识产权的辊式淬火机设备开发需要, 通过建立中厚板淬火过程的热传导控制方程, 对钢板温度场进行了模拟计算, 系统分析了中厚板材淬火过程中对流换热边界条件、淬火方式对板材温度场的影响, 同时分析了中厚板辊式淬火机淬火过程的温度场特点, 为中厚板辊式淬火机淬火工艺开发及工艺参数选择提供了理论参考。

收稿日期: 2009-04-15

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAE03A08)。

作者简介: 袁 国(1979-), 男, 山东泰安人, 东北大学讲师, 博士; 王国栋(1942-), 男, 辽宁大连人, 东北大学教授, 博士生导师, 中国工程院院士。

1 板材淬火过程的热传导控制方程

中厚板淬火生产过程中,加热后的板材出炉后进入辊式淬火机淬火冷却区完成淬火过程.为此可作如下假定:钢板淬火开始时内部温度场均匀;以对流换热系数来表征钢板淬火过程的冷却强度^[6];淬火过程中的相变潜热与钢种成分、冷却速度等因素密切相关,为使计算分析既能起到说明问题的目的,又能降低计算过程的复杂程度,计算过程中忽略相变潜热影响.

根据上述假定,钢板淬火过程可概括为无内热源的三维非稳态导热问题,即

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (1)$$

式中: ρ 为钢板密度; c_p 为钢板定压比热容; λ 为钢板的热传导率; T 为钢板温度; t 为时间; x, y, z 为笛卡尔坐标系的3个方向,分别代表钢板长度、宽度和厚度方向.

淬火过程中厚度方向的强制对流换热显著增强,与厚度方向相比,钢板长度方向及宽度方向的热交换相对较小,可以忽略^[7].因此方程(1)可简化为一维非稳态导热微分方程:

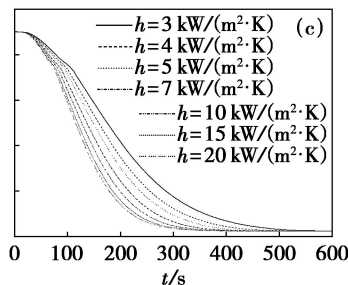
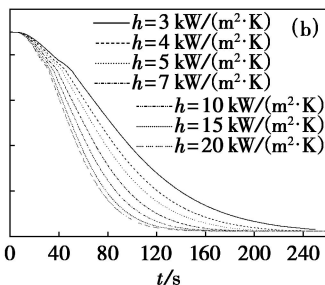
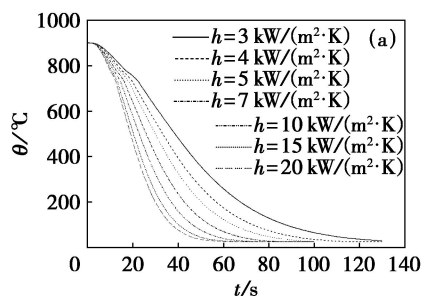


图 1 不同换热系数下钢板心部的温降曲线

Fig. 1 Temperature drop at plate core with different heat transfer coefficients

(a) —30 mm; (b) —50 mm; (c) —80 mm.

从图 1 中可知,一定厚度的钢板,换热系数在一定范围内增大时,对心部冷却速度影响明显.换热系数值在 $3 \sim 10 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 范围内增大时,心部冷速提高显著.随着表面换热系数进一步增大,钢板心部的温降曲线逐渐接近,说明钢板心部温度变化路径逐渐趋近.表面换热系数值分别为 15 和 $20 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时,心部温降曲线更趋接近,钢板厚度越大,趋近表现愈明显.

对于碳素钢淬火过程,关键的淬火温度区间一般为 $800 \sim 500$.图 2 为不同厚度钢板心部和表层节点在不同的换热系数下从 800 冷却到

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (2)$$

淬火过程导热问题的定解边界条件,采用第三类边界条件,即设定钢板与冷却介质的表面换热系数 h 、冷却介质的温度 T_w 为已知.则边界条件为

$$z = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0; \quad (3)$$

$$z = \frac{H}{2}, -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_w). \quad (4)$$

基于淬火过程的热传导微分方程,采用导热问题第三类边界条件(即钢板表面换热系数已知),通过有限差分方法对不同对流换热边界条件下钢板的温度场进行了计算分析.

2 板材淬火过程的温度场分析

2.1 换热系数对中厚钢板温度场的影响

换热系数是表征淬火设备冷却能力的重要参数.为分析对流换热边界条件对中厚钢板温度场的影响,这里将换热系数分别取为 3, 4, 5, 7, 10, 15, $20 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,以 16Mn 钢种为例,淬火温度设定为 900 ,水温为 15 ,计算得到了厚度为 30, 50, 80 mm 钢板的温度场.图 1 为不同换热系数下钢板心部温度的变化曲线.

500 时所需的时间.

可以看出,换热系数值在 $3 \sim 10 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 范围内时,随着换热系数值的增大,冷却时间大幅度减小,说明冷却速度明显提高.但随着换热系数进一步增大,钢板心部和表层节点在该温度区间的冷却时间虽呈逐渐缩短的趋势,但幅度明显减小.可见,在一定范围内时,对流换热边界条件对钢板表面及内部节点的温度变化影响效果显著.但由于淬火板材内部的热传导能力有限,过大的表面换热系数并不能进一步提高钢板的冷却速度,尤其是钢板心部的冷却速度.

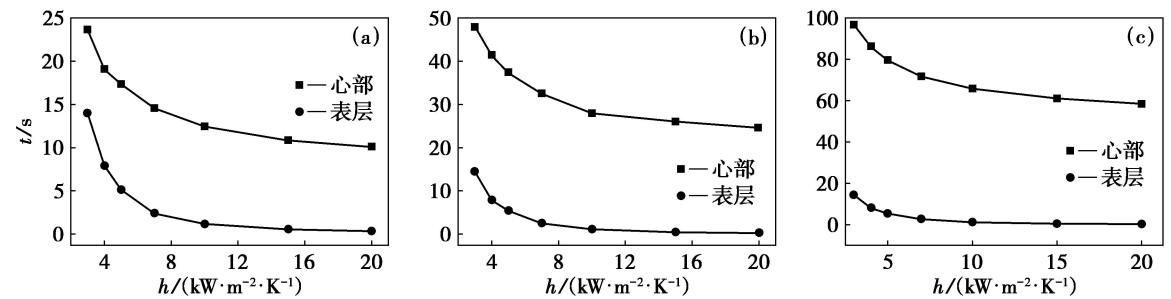


图 2 钢板心部及表层节点在不同换热条件下的冷却时间
Fig. 2 Cooling time at plate core and surface with different heat transfer coefficients
(a) —30 mm; (b) —50 mm; (c) —80 mm .

2.2 不同淬火方式下中厚钢板的冷却行为

为分析说明淬火方式对中厚钢板淬火过程中冷却行为的影响,在这里设定两种淬火方式:在辊式淬火机冷却强度很高的高压淬火区将钢板淬火冷却至室温;钢板在高冷却强度的高压淬火区将钢板温度冷却至 500 以下,随后采用冷却强度较低的低压淬火区继续将钢板冷却至室温,也就是模拟中厚板辊式淬火机连续淬火过程.设定高、低压淬

火区淬火过程中的平均换热系数值分别为 15 和 3.5 kW/(m²·K),分析对比了两种不同淬火方式下钢板厚度方向不同截面的温降曲线变化规律.

图 3 为厚度 20 mm 的钢板在两种淬火方式下,钢板厚度方向同一位置处的温度变化情况.图中淬火方式 1 表示钢板在高压淬火区淬火冷却至室温;淬火方式 2 表示采用高、低压连续淬火方式完成板材淬火冷却过程.

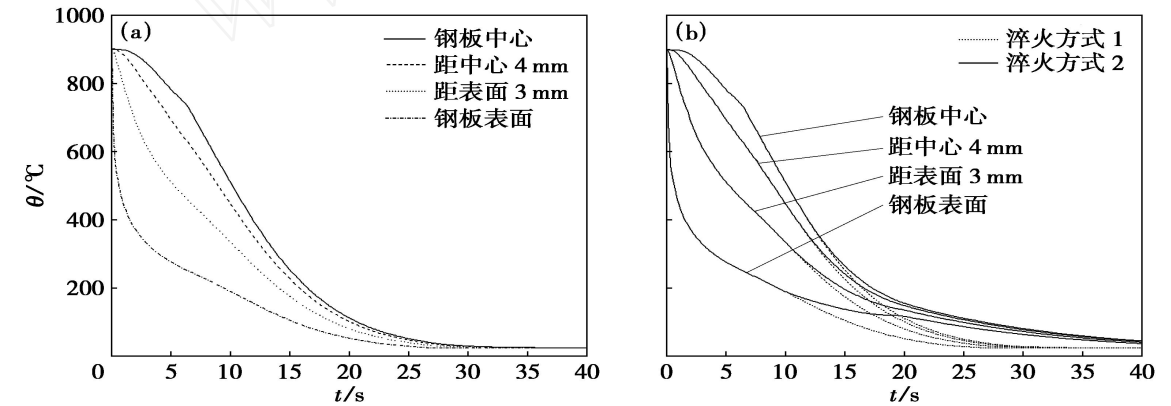


图 3 不同淬火方式下厚度各点的温降曲线
Fig. 3 Temperature drop at different thicknesses with different quenching modes
(a) —高压淬火方式; (b) —两种不同淬火方式 .

可以看出高、低压连续淬火方式下,在 500 ~ 50 的温度范围内,采用冷却能力较低的低压淬火系统冷却时,钢板温降曲线延长,说明随着钢板表面换热系数的减小,钢板内部冷却速度随之减小,但减幅不大.

为进一步分析探讨淬火方式对钢板内部冷却速度的影响,分析对比了厚度分别为 30, 50, 80 mm 的钢板在不同淬火方式下厚度方向特定截面的温度变化情况,如图 4 所示.

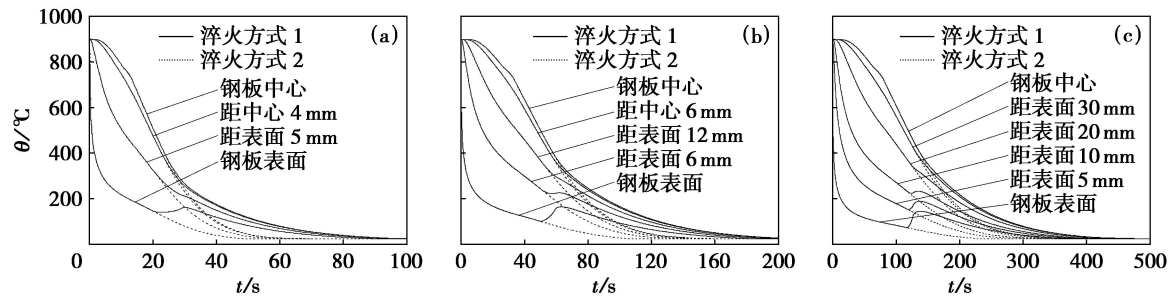


图 4 不同淬火方式下钢板厚度各点的温降曲线
Fig. 4 Temperature drop at different thicknesses with different quenching modes
(a) —30 mm; (b) —50 mm; (c) —80 mm .

可以看出,随着板材厚度增大,在 500 ~ 50 的温度范围内采用较低冷却能力的低压淬火区冷却时,冷却时间稍有延长,同时板材内部存在一定的返温现象,但钢板心部与表面之间的温差明显减小,即厚度方向的温度梯度得到较为明显的减小。考虑到钢板实际淬火工艺组织演变过程,在 500 ~ 50 的温度范围内,采用冷却强度较低的低压冷却区完成板材淬火过程,相对于高压淬火区高强度冷却,有利于减小淬火马氏体转变过程

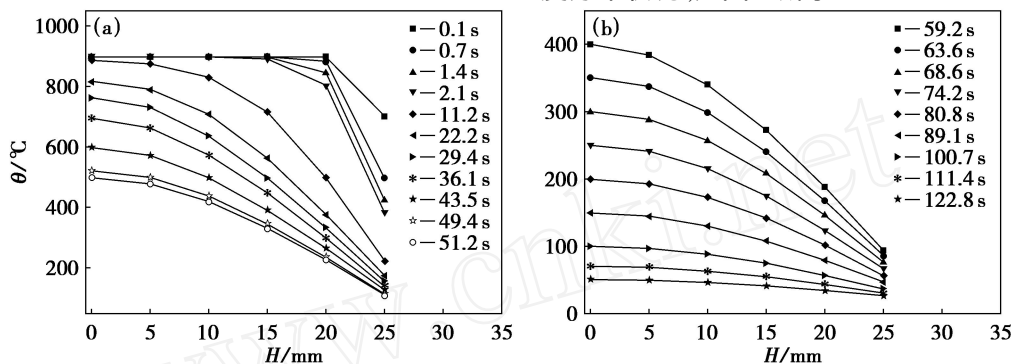


图 5 厚度 50 mm 钢板淬火过程中厚度方向的温度分布
Fig. 5 Temperature distribution along thickness of 50 mm plate during quenching
(a) —800 ~ 500 ; (b) —400 ~ 50 .

可以看出,在淬火过程开始的一段时间内,由于高压淬火区冷却强度很大,钢板厚度方向温度梯度很大,如图 5a 所示。从传热学的角度,说明在淬火过程开始的一段时间内,钢板表面的对流换热边界条件对钢板内部的温度场分布起到主导作用,但随着冷却时间的延长,钢板内部的热传导逐步取代表面对流换热边界条件,逐渐对淬火过程中钢板内部温度场分布起到主导作用,表现为温度梯度逐渐减小。从整体上看,在 800 ~ 500 的温度区间内钢板厚度方向保持着较大的温度梯度。对于淬火工艺,较大的温度梯度有利于钢板内部及至心部得到较大的冷却速度,是获得一定的淬硬层深度所必须的。钢板心部温度降至 400 以下时,钢板内部导热热量减少,使温度梯度进一步减小,心部与表面温度逐渐趋近,如图 5b 所示。

4 结 论

1) 对于板材淬火过程,一定厚度的钢板,在一定范围内时,对流换热边界条件对钢板表面及内部温度变化影响效果显著。随着表面换热系数进一步增大,钢板心部温度变化路径逐渐趋近,钢板厚度越大,趋近表现愈明显。

2) 随着换热系数增加,由于淬火板材内部的热传导能力有限,表面换热系数对钢板心部冷却

中产生的热应力和组织应力^[8],从而减小钢板在淬火过程中的变形倾向。

3 辊式淬火机淬火过程的钢板温度场分布特点

基于实测温度反算得到的辊式淬火机淬火过程的换热系数^[9],计算得到了厚度 50 mm 钢板在 800 ~ 500 和 400 ~ 50 两个温度区间内的温度分布状况,如图 5 所示。

速度的影响逐渐减小。过大的表面换热系数并不能进一步提高钢板的冷却速度,尤其是钢板心部的冷却速度。随着冷却时间的延长,钢板内部的热传导逐步取代钢板表面的对流换热,对钢板内部的温度场分布起到主导作用。

3) 中厚板辊式淬火机淬火过程中的特点为,在淬火钢板 800 ~ 500 的温度区间内,钢板首先通过冷却强度很大的高压淬火区冷却,使板材内部保持很大的温度梯度,从而保证板材获得较大的冷却速度;在 400 ~ 50 温度区间内,采用冷却强度较低的低压淬火区缓慢冷却完成淬火过程,使板材内部温度梯度减小,以降低板材内部的热应力。

参考文献:

- [1] 邹红,韩学好.对济钢建设中厚板热处理生产线的分析[J].中国冶金,2006,16(4):40-42.
(Zou Hong, Han Xue-hao. On constructing heat treatment assembly of medium and heavy plate in Jigang [J]. China Metallurgy, 2006, 16(4): 40-42.)
- [2] Akio F, Kazuo O. JEF steel's advanced manufacturing technologies for high performance steel plates [J]. JFE Technical Report, 2005(5):10-15.
- [3] Chiaki O. Development of steel plates by intensive use of TMCP and direct quenching process[J]. ISIJ International, 2001, 41(6):542-553.

(下转第 538 页)

3 结 论

1) 连续流变挤压技术制备 AZ31 镁合金型材时,浇注温度高于 750 ,工作辊对半固态区枝晶的剪切时间变短,枝晶破碎不充分,得不到理想的半固态组织。

2) 浇注温度低于 730 时,固相区增加,合金变形比较困难,表面形貌难以控制,同时半固态区的大部分枝晶尚未得到充分剪切,就进入固相区,从而保留下来。

3) 连续流变挤压技术制备 AZ31 镁合金型材的最佳浇注温度为 730 ~ 750 。

参考文献:

- [1] Yamashita A, Horita Z. Improving the mechanical properties of magnesium and a magnesium alloy through severe plastic deformation[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001,300(1/2):142 - 147.
- [2] Bussiba A, Berr-Artzy A, Shtechman A, et al. Grain refinement of AZ31 and ZK60 Mg alloys towards superplasticity studies [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001,302(1):56 - 62.
- [3] Bettles C J, Gibson M A. Current wrought magnesium alloys: strengths and weaknesses[J]. *Journal of Metals*, 2005,57(5):46 - 49.
- [4] Mwembela A, Konopleva E B, McQueen H J. Microstructure development in Mg alloy AZ31 during hot working [J]. *Scripta Mater*, 1997,37(11):1789 - 1795.
- [5] Watanabe H, Mukai T, Ishikawa T, et al. Realization of high-strain-rate superplasticity at low temperatures in an Mg-Zr-Zr alloy[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2001,307(1/2):119 - 128.
- [6] Decker R F. The renaissance in magnesium[J]. *Advanced Materials & Process*, 1998,98(3):31 - 35.
- [7] 李永林,李铮,邸洪双,等. AZ31 镁合金薄带直接铸轧新工艺[J]. *轻合金加工技术*, 2004,32(7):15 - 17.
(Li Yong-lin, Li Zheng, Di Hong-shuang, et al. The study on new technology of AZ31 magnesium alloy by strip casting [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2004,32(7):15 - 17.)
- [8] Green D. Continuous extrusion forming of wire[J]. *Journal of the Institute of Metal*, 1972,10(10):295 - 299.
- [9] 王付兴. AZ31 镁合金连续流变挤压成形的模拟与实验研究[D]. 沈阳:东北大学, 2009.
(Wang Fu-xing. Simulation and experimental study on continuous rheo-extrusion process of AZ31 magnesium alloy [D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.)
- [10] Monitoring and Control for Manufacturing Processes, 1990, 44(6):465 - 473.
- [11] Rai J K, Mishra A, Rao U R K. Residual stresses due to quenching process[J]. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 1980,20(1):1 - 8.
- [12] 袁国. 宽厚板辊式淬火机冷却技术的研究与应用[D]. 沈阳:东北大学, 2007.
(Yuan Guo. Study and application on quenching technology of plate roller quenching machine [D]. Shenyang: Northeastern University, 2007.)
- [13] Frolov A E, Strashko A F, Pyatalov V I, et al. Perfecting a roll quenching machine for the heat treatment of plate steel [J]. *Metallurgist*, 2005,19(9):666 - 668.
- [14] Holman J P. Heat transfer [M]. 8th ed. New York: McGraw-Hill Companies, Inc, 1997:140 - 216.
- [15] Chen S J, Biswas S K, Han L F, et al. Modeling and analysis of controlled cooling for hot moving metal plates [J].

(上接第 530 页)

- [16] 韩立新. 宽厚板热处理生产线[J]. *热处理*, 2003,18(4):22 - 24.
(Han Li-xin. Heat treatment production line for wide-heavy plate[J]. *Heat Treatment*, 2003,18(4):22 - 24.)
- [17] Frolov A E, Strashko A F, Pyatalov V I, et al. Perfecting a roll quenching machine for the heat treatment of plate steel [J]. *Metallurgist*, 2005,19(9):666 - 668.
- [18] Holman J P. Heat transfer [M]. 8th ed. New York: McGraw-Hill Companies, Inc, 1997:140 - 216.
- [19] Chen S J, Biswas S K, Han L F, et al. Modeling and analysis of controlled cooling for hot moving metal plates [J].

- [20] Monitoring and Control for Manufacturing Processes, 1990, 44(6):465 - 473.
- [21] Rai J K, Mishra A, Rao U R K. Residual stresses due to quenching process[J]. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 1980,20(1):1 - 8.
- [22] 袁国. 宽厚板辊式淬火机冷却技术的研究与应用[D]. 沈阳:东北大学, 2007.
(Yuan Guo. Study and application on quenching technology of plate roller quenching machine [D]. Shenyang: Northeastern University, 2007.)