

250 ~ 320 mm 连铸板坯堆垛缓冷过程仿真计算

王卫华 王文军 刘洋 陈霞

(首钢技术研究院, 北京 100043)

摘要 L245、D36、X70 等钢种连铸板坯生产流程为铁水预处理-100 t 转炉-LF-RH-250 ~ 320 mm × 2 000 mm 板坯连铸。当铸坯入炉温度为 650 ~ 700 °C, 因 AlN 在晶界析出, 在轧制过程钢板易出现爪裂, 当铸坯入炉温度控制在 500 ~ 550 °C 则可避免钢板爪裂。通过 ANSYS 有限元软件, 对板坯堆垛温度场和降温速率进行数值模拟。模型计算结果表明, 250 mm 和 320 mm 厚铸坯分别堆垛 12 h 和 24 h 后, 可使堆垛中心铸坯表面温度达到 600 °C 以下, 现场实测值与模拟结果相同。

关键词 连铸坯 堆垛缓冷 热送 有限元 数值模拟

Simulation Calculation on 250 ~ 320 mm Casting Slab during Stacking Slow Cooling Process

Wang Weihua, Wang Wenjun, Liu Yang and Chen Xia
(Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100043)

Abstract The casting flow sheet for slab of L245, D36 and X70 etc steel grades is metal pretreatment-100 t converter-LF-RH-250 ~ 320 × 2 000 mm slab casting. As temperature of charging casting slab is 650 ~ 700 °C, because of AlN precipitates at grain boundary the claw-cracks of steel plate easily occur, and as the temperature of charging slab is controlled at 500 ~ 550 °C the claw-cracks of steel plate are avoided. The numerical simulation on temperature field and temperature dropping rate of staking slab has been carried out by ANSYS finite element method software. The model calculation results show that as 250 mm slab and 320 mm slab are respectively stacked for 12 h and 24 h, the surface temperature of slab at centre of stacking is less than 600 °C, and the measured value at production situation conforms to the simulation result.

Material Index Casting Slab, Stacking for Slow Cooling, Hot Charging, Finite Element Method, Numerical Simulation

相对于连铸坯冷送冷装而言, 板坯热装温度每提高 100 °C, 铸坯加热炉燃料消耗可减少 5% ~ 6%; 连铸坯热装温度每提高 100 °C, 铸坯加热炉的产量可增加约 10%; 热装热送可减少烧损提高成材率 1% ~ 1.5%^[1-2]。

钢厂连铸坯热送生产流程: 铁水预处理(100 t) → 转炉炼钢(100 t) → LF 处理(100 t) → RH 炉处理(100 t) → 板坯浇铸(320 mm × 2 000 mm) → 入库堆垛 → 测温 → 加热 → 轧制 → 表检 → 性能检验。

目前进行热送的钢种有 L245、D36、X70 等, 轧制包括 20 ~ 120 mm 厚度的各成品规格, 覆盖了该厂 85% 的品种钢。通过连铸坯热送的现场经验发现, 直送连铸坯入炉温度超过 650 °C 时, 轧后钢板易出现爪裂缺陷(图 1)。为避免其爪裂纹的产生, 迫切需要制定合理的热送板坯工艺。

1 爪裂原因分析及热送工艺制定

在板坯直送条件下, 钢厂连铸坯表面装炉温度在 650 ~ 700 °C, 这个温度位于所试验钢种的奥氏体 + 铁素体两相区, 这样在连铸坯表面从奥氏体到

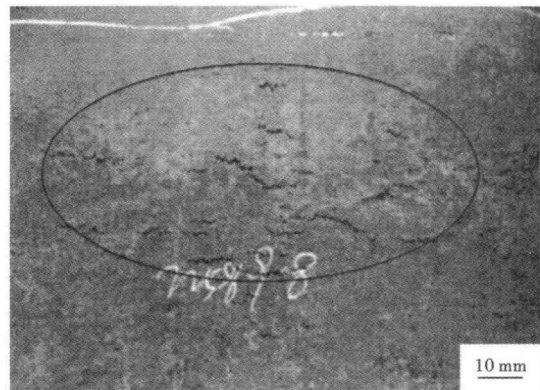


图 1 直送连铸坯轧后钢板表面出现的爪裂形貌
Fig. 1 Morphology of claw-cracks on surface of steel plate rolled by direct charging casting slab

铁素体发生相变的程度很小, 于是, 连铸坯在 750 ~ 900 °C 区间内奥氏体晶界析出 AlN 以及其它的碳氮化合物就会一直保留在奥氏体晶界, 导致奥氏体晶粒间的结合力降低, 在加热后的轧制过程中就会出现爪裂缺陷。

如果连铸坯在 400 ~ 500 °C 温送或者冷送时, 连

铸坯表面会发生奥氏体到铁素体以及到铁素体和珠光体的相变,这个相变会导致钢的再结晶,再结晶的发生会将原奥氏体晶界上析出的 AlN 和其它碳氮化物包裹在新生成的珠光体晶粒内部,从而消除了晶界上 AlN 和其它碳氮化物对晶间的弱化作用,使晶间的结合力重新得到了加强,这时的连铸坯在加热和轧制后就不容易在表面产生爪裂缺陷。

所以热送工艺保证铸坯 ≤ 550 °C 入炉,这样才能从根本上消除热送板坯轧制钢板的表面爪裂,充分发挥热装热送工艺的节能优势。

2 板坯堆垛温度场数学模型

本试验利用数学模型手段,结合现场实测数据,对断面为 320 mm × 2 000 mm 的连铸坯进行堆垛缓冷数值模拟计算。重点分析在堆垛条件下板坯宽面和芯部温度达到一致时所需要的时间和该时刻的温度,以及板坯宽面表面温度降到 600 °C 以下所需的时间。

为了提高数学模型计算精度,板坯初始温度条件采用建立连铸板坯在结晶器、二冷段、空冷段的温降过程模型计算来获得。在堆垛缓冷模型中,最上面板坯的宽面和所有板坯的窄面采用辐射散热边界,板坯间采用接触热传导,利用 ANSYS 有限元软件建立堆冷温度场模型,通过非稳态计算获得板坯堆冷温降曲线。

2.1 初始条件及边界条件

设定钢水浇注温度为 1 545 °C,过热度 30 °C,环境温度为 20 °C,拉坯速度 0.65 m/min。

模型边界条件^[3-5]:

(1) 结晶器换热采用平均热流密度,见式(1):

$$q = \frac{C_{pw} \rho_w Q_w \Delta T_w}{F_m} \quad (1)$$

式中: q - 平均热流密度/[W · (m² · K)⁻¹]; C_{pw} - 水的比热容, 4 182 J/kg; ρ_w - 水的密度, 1 000 kg/m³; Q_w - 宽面或窄面冷却水的流量/(m³ · s⁻¹); ΔT_w - 宽面或窄面进出口水温差/°C; F_m - 铜板冷却面积/m²。

(2) 二冷区宽面采用对流换热边界,见式(2):

$$h = A \cdot W^n \quad (2)$$

式中: h - 对流传热系数/[W ·

(m² · °C)⁻¹]; W - 水流密度/[L · (m² · s)⁻¹]; n - 常数,取 0.5 ~ 1.0; A - 常数,取 120 ~ 420。

(3) 二冷区窄面采用辐射换热,见式(3):

$$q = \varepsilon \sigma [(T_b + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (3)$$

式中: ε - 辐射系数,取 0.8; σ - 波尔兹曼常数,取 5.67 × 10⁻⁸ W/(m² · K⁴); T_a - 环境温度; T_b - 板坯表面温度。

(4) 空冷区宽面和窄面采用辐射换热,公式同式(3)。

(5) 堆冷过程采用辐射(板坯窄面、横截面、最上面板坯宽面) + 接触热传导(板坯与板坯之间)。

2.2 材料热物性参数

计算用钢种的密度为 7 800 kg/m³; 计算用钢种的导热系数见图 2(a) (在液相区时,由于考虑到钢水流动传热效果,采用了等效导热系数); 计算用钢种的比热容见图 2(b) (在两个相变区温度下采用等效比热容)^[6-7]。

2.3 模型计算结果分析

板坯堆冷 36 h 后,由板坯表面实测值与计算值的对比结果得出,宽面中心(B 点)计算值与实测值比,平均相差 ± 8 °C,误差为平均实测温度的 ± 1.9%; 窄面中心(C 点)温度计算值与实测值比,平均相差 ± 5 °C,误差为平均实测温度的 ± 1.6%; 计算误差均小于 ± 2%。

图 3 为 8 块板坯在堆垛开始时和堆垛 48 h 的温度场云图。图 4(a) 为 8 块板坯堆垛,从上往下数第 5 块板坯在 3 个位置处的温降曲线。从图 3 和图 4(a) 可知,随着时间的推移,板坯芯部与表面温度逐渐接近,在 52'50" 时,芯部与宽面表面温度差 15 °C。堆垛缓冷 2h 后,钢坯表面温度与钢坯中心温度基

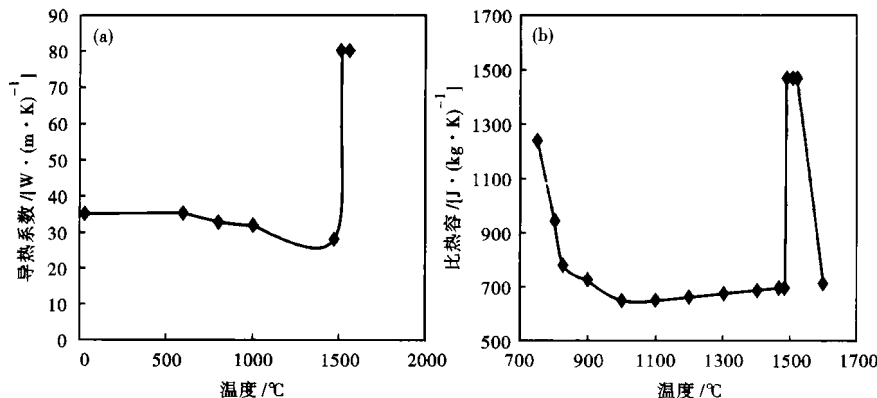


图 2 温度对钢的导热系数(a)和比热容(b)的影响

Fig. 2 Effect of temperature on thermal conductivity coefficient (a) and specific heat (b) of steel

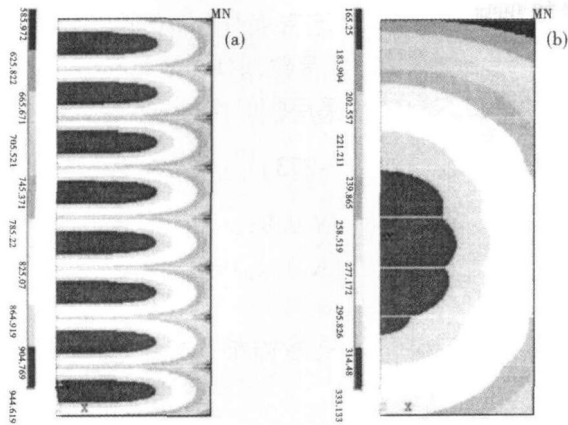


图 3 堆垛开始 (a) 和 48 h (b) 时 8 块板坯堆垛温度场云图
Fig. 3 Cloud chart of temperature field of 8 slab blocks stacking starting (a) and stacking for 48 h (b)

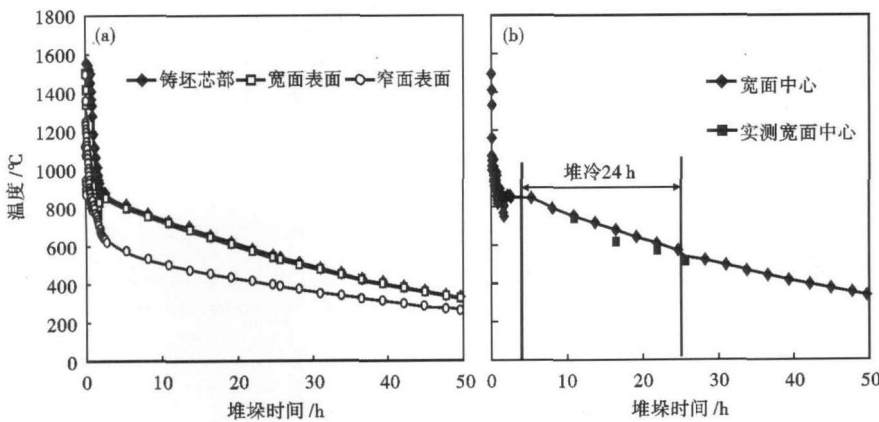


图 4 第 5 块板坯 3 个位置处的温度随时间的变化 (a) 和宽面中心温度计算值与实测值的比较 (b)

Fig. 4 (a) Temperature change with time at three position of 5-th plate and (b) Comparison of temperature at center of wide face of 5-th plate between calculated value and measured value

本一致。

堆垛 12 h 后,第 5 块板坯宽面表面温度降低到 727 °C,过程温降速率为 17.2 °C/h。在堆垛缓冷 24 h 后,连铸板坯温度下降到 600 °C 以下。由于拆垛时间与入炉时间相差 20 min 左右,根据入炉前过程温降统计,期间铸坯能降温 50 °C 左右,因此入炉温度能保证在 550 °C 以下。

图 4(b) 为从上向下第 5 块板坯,宽面中心温度计算值与实测值的比较。从图 4(b) 可以看出,现场实测温度与模型计算温度非常接近,误差均小于 $\pm 2\%$,可见模型计算精度较高,其温度计算结果完全可以代替实测值进行热送工艺的制定。

3 模型应用结果

计算结果表明,250 mm 厚板坯在堆冷 12 h 后

表面温度达到 600 °C 以下。板坯热送(入炉板坯表面温度 ≤ 550 °C)轧制钢板表面没有出现爪裂及边部横裂等缺陷。

在钢厂直送(入炉温度 650 ~ 700 °C)试验中,轧制钢板 463 块,其中出现爪裂的钢板 138 块,钢板爪裂发生率为 29.8%,而钢厂采用温送(≤ 550 °C)连铸坯轧后钢板基本没有再出现过爪裂缺陷。

4 结论

(1) 入炉温度在 650 ~ 700 °C, AlN 在奥氏体晶界上析出导致晶间脆化是产生钢板表面爪裂的原因,铸坯在 550 °C 以下入炉,能消除热送板坯轧制钢板的表面爪裂。

(2) 320 mm 厚板坯在堆垛缓冷 2 h 后,板坯表

面温度与板坯中心温度基本一致;堆垛 12 h 后,第 5 块板坯宽面表面温度降低到 727 °C,过程温降速率为 17.2 °C/h。250 mm 厚板坯在堆垛 12 h 后表面温度达到 600 °C 以下;320 mm 厚板坯在堆垛 24 h 后表面温度达到 600 °C 以下。

(3) 堆垛缓冷模型计算的误差不超过 $\pm 2\%$ 。250 mm 和 320 mm 铸坯分别堆垛 12 h 和 24 h 后,铸坯温度 ≤ 600 °C,消除了爪裂缺陷。

参考文献

- [1] 卢凤喜,王德城. 国内外连铸板坯热送热装发展态势及对策[J]. 武钢技术, 1998, 36(5): 21-26.
- [2] 孟宪石. 连铸坯热送热装中 MES 技术应用的要点分析[J]. 本钢技术, 2010(1): 14-18.
- [3] 张玲,高仲龙,蒋扬虎. 连铸板坯堆垛车送的冷却和保温过程[J]. 工业炉, 2007, 29(2): 39-41.
- [4] 蒋扬虎. 武钢连铸坯热送系统传热数学模型的研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2000: 65-84.
- [5] 高仲龙. 连铸坯输送辊道加罩的保温效果分析[J]. 工业加热, 1998, 27(6): 1-3.
- [6] 张乃凤,武文斐,张欣欣. CSP 工艺中连铸热过程的数值模拟[J]. 内蒙古科技大学学报, 2008, 27(1): 46-49.
- [7] 张强. 板坯连铸结晶器锥度优化设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2009: 17-19.

王卫华(1976-),女,硕士,工程师,河北理工学院毕业,连铸工艺研究。

收稿日期:2012-08-25