

热轧螺纹钢化学剂冷却过程温度场的 数值模拟及实验研究 *

魏 洁 董俊华 柯 伟

(中国科学院金属研究所腐蚀与防护国家重点实验室, 沈阳 110016)

摘 要 本文对化学剂冷却热轧螺纹钢在两段式冷却(前段化学剂 FM 冷却 + 后段水冷)过程中的温度场进行了有限元模拟,并在实验室对前段化学剂 FM 冷却生成的氧化皮的耐蚀性能进行了评价. 采用工业现场一段式水冷的工艺参数,模拟了一段式水冷的温度场. 对比一段式水冷的温度场,分析了两段式冷却的工艺参数对冷却过程温度场的影响. 结果表明,在前段化学剂 FM 冷却时,采用较小的对流换热系数,有利于提高前段化学剂冷却时的氧化温度,从而改善氧化皮的质量;在后段水冷时,在保持原一段水冷的对流换热系数的情况下,两段式冷却水冷段的冷却曲线与一段式水冷非常接近,能够满足 III 级热轧螺纹钢的力学性能的要求. 采用有限元模拟优化的工艺参数,在实验室模拟了前段化学剂 FM 冷却过程,获得了致密的氧化皮,其耐蚀性能显著优于水冷钢筋,说明采用前段化学剂冷却来改善水冷钢筋的耐蚀性能是可行的.

关键词 螺纹钢, 化学剂冷却, 温度场, 有限元, 耐蚀性, 高强度

中图法分类号 TG178

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2012)01-0115-07

NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY ON TEMPERATURE FIELD DURING CHEMICAL REAGENT COOLING PROCESS OF HOT ROLLED REBAR

WEI Jie, DONG Junhua, KE Wei

State Key Laboratory for Corrosion and Protection, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

Correspondent: DONG Junhua, professor, Tel: (024)23915912, E-mail: jhdong@imr.ac.cn

Manuscript received 2011-07-22, in revised form 2011-12-25

ABSTRACT The corrosion resistance of water cooled rebar is improved by applying a chemical reagent cooling process on the basis of maintaining the high mechanical property. To provide the reference basis for the on-site application of chemical reagent cooling process, the temperature field of the two-stage cooling process (first stage of chemical reagent of FM cooling and second stage of water cooling) of rebar produced by chemical cooling is simulated using the finite element method. Furthermore, the corrosion resistance of scale formed during the first stage of chemical reagent cooling was evaluated in laboratory. Applying the processing parameters of water cooling in steel mill, the temperature field of one-stage cooling was simulated. Compared with the temperature field of the one-stage cooling, the influence of processing parameters on the temperature field during two-stage cooling is analyzed. The results showed that the smaller heat transfer coefficient is applied to increase the oxidation temperature and improve the quality of the oxide scale in the first stage of FM cooling. In the second stage of water cooling, the cooling curve is very approximate to that of one-stage cooling when the heat transfer coefficient of one-stage cooling is remained. Therefore, the mechanical property of hot-rolled rebar of grade III can be ensured. Furthermore, the first stage of FM cooling process was implemented in lab using the optimizing parameters obtained from finite

* 收到初稿日期: 2011-07-22, 收到修改稿日期: 2011-12-25

作者简介: 魏 洁, 女, 1980 年生, 助理研究员, 博士

DOI: 10.3724/SP.J.1037.2011.00474

element analysis. The oxide scale forming using FM cooling is compact. And its corrosion resistance is much better than water-cooled rebar, which proves that it is feasible to improve the corrosion resistance of water-cooled rebar using FM cooling before water cooling.

KEY WORDS rebar, chemical reagent cooling, temperature field, finite element, corrosion resistance, high strength

现代钢筋混凝土结构的安全性和耐久性要求建筑用螺纹钢不仅具有优良的力学性能, 还要具有良好的耐锈蚀性能^[1,2]。目前, 多数新建设施对钢筋强度的要求已从传统的 II 级 (335 MPa) 提高到 III 级 (400 MPa) 甚至更高, 相应地对螺纹钢的生产轧制工艺也提出了新的要求。相对于利用微合金强化和控轧控冷工艺生产 III 级螺纹钢, 采用轧后穿水冷却工艺提高热轧螺纹钢的力学性能是我国螺纹钢生产企业目前普遍采用的技术, 具有很大的成本优势^[3,4]。影响钢筋强度的主要因素是轧后的冷却速度。当冷却速度很高时, 钢筋组织中表面回火马氏体淬硬层的厚度增加, 同时芯部铁素体 + 珠光体的晶粒细小, 有利于提高钢筋的力学性能^[5-8]。然而, 轧后穿水冷却工艺会导致螺纹钢耐蚀性能的降低。一方面在储运过程中容易生锈, 严重影响产品的外观和表面质量, 给生产企业带来重大的经济损失^[9,10]; 另一方面, 钢筋表面的锈层能加快其在混凝土中的腐蚀速度, 缩短建筑物的寿命^[11-13]。如果在钢筋埋入混凝土之前进行除锈处理, 不仅增加成本和工序, 而且在混凝土中使用裸钢筋并不能显著提高其防锈性能。因此, 目前采用轧后穿水冷却工艺生产的螺纹钢的应用仍受到严重制约。本文作者前期研究^[9,14,15]发现, 轧后穿水冷却工艺生产的螺纹钢表面氧化皮的化学组分以 FeO 和 Fe₃O₄ 为主, 其微观组织疏松、多孔, 在户外曝露和室内干湿循环腐蚀实验中均表现出快速锈蚀^[16-18]。为了改善水冷螺纹钢的耐蚀性, 本课题组研发了一种水溶性的化学剂 FM^[9,14], 使用 FM 进行轧后冷却生产螺纹钢时, 表面氧化皮化学组分中的 Fe₃O₄ 含量明显增加, 其微观组织致密, 在户外曝露和室内干湿循环腐蚀实验中均表现出极高的耐锈蚀性能。可以满足大气及混凝土环境对螺纹钢耐蚀性能的要求。

采用化学剂 FM 对螺纹钢进行轧后冷却, 需要通过控制冷却工艺, 同时提高螺纹钢的力学性能和改善其表面的氧化皮质量。由于采用化学剂 FM 冷却时, 钢筋表面的氧化皮质量主要取决于氧化皮的形成温度和时间, 高温、慢冷有利于提高氧化皮的质量, 这与采用快速冷却来提高力学性能是互相矛盾的。因此, 采用单一冷却速度不可能同时满足螺纹钢对力学性能和耐蚀性能的要求。采用两段式冷却, 即前段使用化学剂 FM 进行高温慢冷, 后段采用快速水冷工艺方案是解决这一矛盾的有效途径。

若采用两段式的轧后冷却工艺进行提高螺纹钢力学性能和耐锈蚀性能的工业实验, 需要调整目前的轧后穿水冷却生产线, 并系统地测试和确定冷却工艺参数, 这会造

成较大的成本投入和经济浪费。有限元模拟是一种经济而高效的方法, 通过对冷却过程进行温度场数值模拟, 可以获得冷却过程中螺纹钢由边缘到芯部的温度分布^[19-21], 结合工业现场的工艺参数和钢筋性能参数, 分析各工艺参数对钢筋性能的影响, 从而为工业应用的可行性提供借鉴。本文采用 ANSYS 有限元方法模拟了热轧螺纹钢在轧后两段式冷却过程中的温度场, 对比工业现场一段式水冷的工艺参数和钢筋性能, 综合考虑了两段式冷却过程中冷却条件对钢筋力学性能和耐蚀性能的影响。还在实验室模拟了前段化学剂冷却过程, 对比水冷钢筋的氧化皮, 评价了化学剂冷却获得的氧化皮的质量和耐蚀性能, 为化学剂 FM 冷工艺的在线应用提供参考依据。

1 实验方法

1.1 温度场模拟的模型建立

1.1.1 冷却过程的数学模型 在钢筋冷却的热交换过程中, 由于钢筋的长度远大于直径, 故可忽略长度方向的热量流动, 而仅考虑径向方向的热量流动。因此, 钢筋的温度分布是对二维温度场的求解, 热交换方程为

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

式中, T 为温度, °C; t 为时间, s; λ 为钢的导热系数, W/(m·°C); ρ 为钢的密度, kg/m³; c_p 为钢的比热容, J/(kg·°C)。初始条件为: 假定终轧出口处的钢筋截面上的温度为均匀分布, 即

$$T|_{t=0} = T_0 \quad (2)$$

式中, T_0 为钢筋终轧出口温度, °C。

螺纹钢生产现场采用一段式穿水冷却工艺时, 钢筋终轧后的冷却过程包含三个冷却阶段。第一阶段为高温空冷段, 即钢筋自终轧出口至进入穿水冷却装置入口之间的空冷段。该阶段钢筋的温度高达 1000 °C 左右, 轧件与周围空气的对流换热很少, 以辐射换热为主, 遵循 Stefan-Boltzman 定律。边界条件为

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \varepsilon \sigma (T_b^4 - T_a^4) \quad (3)$$

式中, ε 为钢筋的黑度; σ 为 Stefan-Boltzman 常数; T_b 为钢筋的表面温度, °C; T_a 为钢筋周围空气温度, °C。

第二阶段为穿水快冷段, 即钢筋自穿水冷却装置入口至出口。该阶段钢筋与水为强制对流换热和辐射换热。边

界条件为

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \varepsilon \sigma (T_b^4 - T_w^4) + h_w (T_b - T_w) \quad (4)$$

式中, T_w 为钢筋周围冷却水温度, $^{\circ}\text{C}$; h_w 为钢筋与水之间的强制对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

第三阶段为低温空冷段, 即钢筋自穿水冷却装置出口至在冷床上冷却完成. 该阶段钢筋表面温度已经降低, 需要考虑钢筋与空气之间的辐射换热及自然对流换热. 边界条件为

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \varepsilon \sigma (T_b^4 - T_a^4) + h_a (T_b - T_a) \quad (5)$$

式中, h_a 为钢筋与空气之间的自然对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

采用化学剂 FM 两段式冷却时, 其冷却过程包括四个冷却段, 分别为高温空冷段、化学剂冷却段、水冷段和低温空冷段. 即将终轧出口到水冷入口的高温空冷段中的一部分距离用于化学剂冷却. 其中, 高温空冷段、水冷段和低温空冷段的温度场模型与一段式水冷一致. 在化学剂冷却段, 由于化学剂 FM 为多组元试剂的水溶液, 其与钢筋的热交换仍为对流换热和辐射换热, 边界条件为

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \varepsilon \sigma (T_b^4 - T_{\text{FM}}^4) + h_{\text{FM}} (T_b - T_{\text{FM}}) \quad (6)$$

式中, T_{FM} 为钢筋周围化学剂温度, $^{\circ}\text{C}$; h_{FM} 为钢筋与化学剂之间的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

1.1.2 有限元模型建立 钢筋的横截面圆为中心对称图形, 因此, 将圆截面简化为一个扇形面来计算, 这样可以减少节点数, 缩短计算时间. 扇形内部单元采用平面四角八节点单元 PLANE55, 扇形表面单元采用二维表面单元 SURF151, 扇形网格划分如图 1 所示, $n1-n5$ 分别对应钢筋横截面从边缘至芯部不同半径处 ($r, \frac{15}{16}r, \frac{3}{4}r, \frac{1}{2}r, 0$) 的节点.

1.1.3 参数输入 采用某钢厂轧后穿水冷却生产 20MnSi III 级螺纹钢生产线上的工艺参数来模拟一段式水冷过程的温度场. 主要输入参数为: 高温空冷段距离为 8 m, 穿水快冷段距离为 16.8 m, 低温空冷段距离为 30 m,

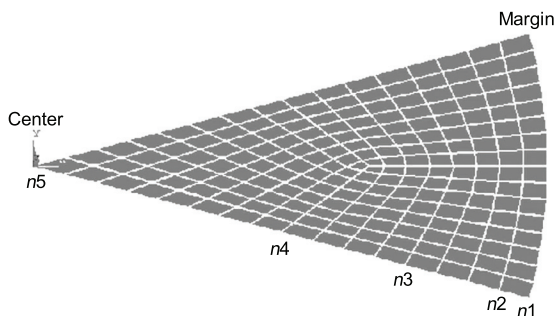


图 1 有限元模型的网格划分

Fig.1 Grid division of the finite element model

钢筋直径为 25 mm, 冷却水温度为 30 $^{\circ}\text{C}$, 空气温度为 30 $^{\circ}\text{C}$, 终轧出口温度为 980 $^{\circ}\text{C}$, 终轧速度为 9.5 m/s, 导热系数为 30 $\text{W}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$, 钢的密度为 7400 kg/m^3 , 钢的比热容为 870 $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$, 钢的黑度为 0.85. 另外, 需要输入的 2 个参数 h_w 和 h_a 都受现场实际条件的影响, h_a 主要与钢筋温度和空气温度有关, 而影响 h_w 的因素较多, 包括水量、水压、水温、钢筋温度、冷却器的型式等. 目前已建立了一些模型用于计算 h_w , 主要是考虑水量、水温及钢筋温度对 h_w 的影响 [22-25]. 然而, 不同的模型不仅回归系数不同, 模型的形式也存在很大差别, 计算得出的 h_w 差别很大. 因此, h_w 的选取应针对不同钢厂的实际情况来确定. 本文中 h_w 和 h_a 的选取是通过选取数值进行反复计算, 并将计算得到的特征温度值与现场实测的特征温度值比较, 当对比结果趋于一致时, 说明选取的换热系数可用于估算实际的温度场.

采用两段式冷却时, 不改变原水冷段, 而是利用水冷之前的高温空冷段, 将其改造为化学剂 FM 冷却段. 由于实际生产线水冷设备距离末端轧机出口有 8 m 的距离, 从这 8 m 中留出 1 m 的高温空冷段, 其余 7 m 建成化学剂冷却段, 则不需要改变原水冷装置和工艺, 就可以实现两段式冷却. 两段式化学剂冷却的输入参数中, 除了将高温空冷段距离改为 1 m, 化学剂冷却段距离为 7 m, 并且增加了化学剂与钢筋的对流换热系数 h_{FM} 以外, 其它参数与一段式水冷的输入参数一致. 在两段式化学剂冷却的温度场模拟时, 选取了 600, 900, 1200 和 1500 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 4 个不同的 h_{FM} , 分析了 h_{FM} 对钢筋表面氧化皮质量和力学性能的影响. 并且分析了终轧速度和终轧出口温度对钢筋综合性能的影响.

1.2 前段化学剂 FM 冷却氧化皮评价

在实验室模拟工业现场前段化学剂 FM 冷却过程, 制备出 FM 冷却氧化皮. 实验用 20SiMn 热轧螺纹钢的化学成分 (质量分数, %) 为: C 0.17—0.25, Si 0.40—0.80, Mn 1.20—1.60, P 0.050, S 0.050, Fe 余量. 化学剂 FM 是由 10% H_2O_2 (体积分数), 5 g/L NaBO_3 , 0.45 g/L Na_2SiO_3 和 0.45 g/L MgSO_4 为主要成分的水溶液. 化学剂 FM 冷却工艺为: 将钢厂空冷的螺纹钢用线切割加工成 15 mm 长试样, 将试样用丙酮去油之后, 用浓度为 10% 的 HCl 酸洗去除表面氧化皮; 在高温管式炉中, 将试样在保护性气氛下加热到 980 $^{\circ}\text{C}$, 保温 10 min 使之均热; 之后通过电机控制器启动悬挂有试样的传动装置, 将试样迅速下降到喷淋装置中, 设定试剂 FM 喷淋时间为 0.8 s, 之后空冷; 通过调整喷淋强度, 使得喷淋后由红外测温仪测得的钢筋试样表面温度为 890 $^{\circ}\text{C}$.

采用 HITACHI S3400N 扫描电镜 (SEM) 观察了实验室制备的化学剂 FM 冷却钢筋的氧化皮的表面形貌. 采用干湿交替循环加速腐蚀实验法对比化学剂 FM 冷却

钢筋和水冷钢筋的耐腐蚀性. 实验设备为日本生产的 PR-2KP 恒温恒湿试验箱. 干湿交替循环实验的参数为: 在温度 30 ℃和湿度 60% 的干燥条件下保持 8 h, 然后在温度为 40 ℃和湿度 95% 的潮湿条件下保持 16 h, 以上 24 h 为一个循环周期. 初始时将整个试样在 0.3% 的 NaCl 溶液中蘸一下, 用以诱发腐蚀.

2 实验结果与讨论

2.1 一段式水冷温度场模拟

一段式水冷得到的钢筋横截面从边缘部分至芯部不同半径处的冷却曲线如图 2 所示. 钢筋边缘部分 $n1$ 处在冷却过程中的特征温度计算值与实测值的比较见表 1. 其中, T_i 为螺纹钢水冷入口温度, T_f 为螺纹钢水冷出口温度, T_s 为螺纹钢自回火温度. 当选取 $h_w=6500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$, $h_a=200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 时, 可以得出 3 个特征温度的计算值与实测值差别都很小, 偏差均小于 1%, 说明选取的换热系数可用于模拟工业现场一段式水冷过程的温度场.

由图 2 的冷却曲线可以得出, 在三个冷却阶段, 钢筋不同半径处的温度变化表现出不同的特征. 钢筋在水冷之前的高温空冷段的温度下降很小, 因此, 钢筋边缘和芯部的温度差别很小. 而在水冷段和水冷之后的低温空冷段, 钢筋横截面不同半径处在冷却过程中的温度变化明显, 钢

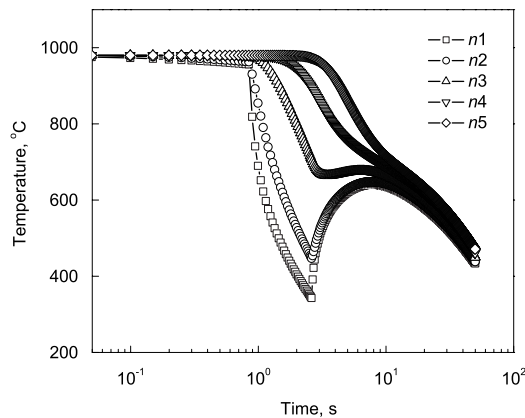


图 2 一段式水冷时钢筋横截面不同半径处的冷却曲线

Fig.2 Cooling curves of different radius at cross section of rebar when using one-stage water cooling

表 1 钢筋外表面的特征温度的计算值与实测值的比较

Table 1 Comparison of calculated and measured characteristic temperatures of the rebar surface

Parameter	Measured value, °C	Calculated value, °C	Deviation %
T_i	950	956	0.63
T_f	340	343	0.88
T_s	640	641	0.16

Note: T_i —inlet temperature of water cooling, T_f —outlet temperature of water cooling, T_s —self-tempering temperature

筋边缘 $n1$ 节点处在水冷过程中快速冷却到 340 ℃, 发生马氏体转变, 在之后的低温回火过程中转变为回火马氏体; 随着节点位置由边缘沿径向向芯部移动, 水冷段温度下降逐渐发生延迟, 且快冷冷却最低点的温度逐渐升高, 则在钢筋径向的某一位置处将不会发生马氏体转变, 而是由奥氏体转变为铁素体和珠光体. 这与水冷钢筋的实际室温组织一致, 如图 3 所示. 钢筋的边缘由回火马氏体组成, 钢筋 1/2 半径处和芯部均由细小的铁素体 + 珠光体组成. 对应的力学性能为: 屈服强度 550 MPa, 抗拉强度 670 MPa, 延伸率 17.5%, 说明采用一段快冷可以获得强度远高于 400 MPa 的高强度螺纹钢.

2.2 两段式 FM 冷却温度场模拟

2.2.1 前段 FM 冷却的换热系数对温度场的影响
采用两段式 FM 冷却, 不改变原水冷工艺, 只需考虑前段 FM 冷却时的换热系数对钢筋性能的影响, 在 FM 冷却时选取 4 个不同的换热系数, 分别为 600, 900, 1200 和 1500 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$. 对比一段式水冷, 采用 4 个 FM 冷却换热系数得到的钢筋边缘 $n1$ 节点的冷却曲线如图 4 所

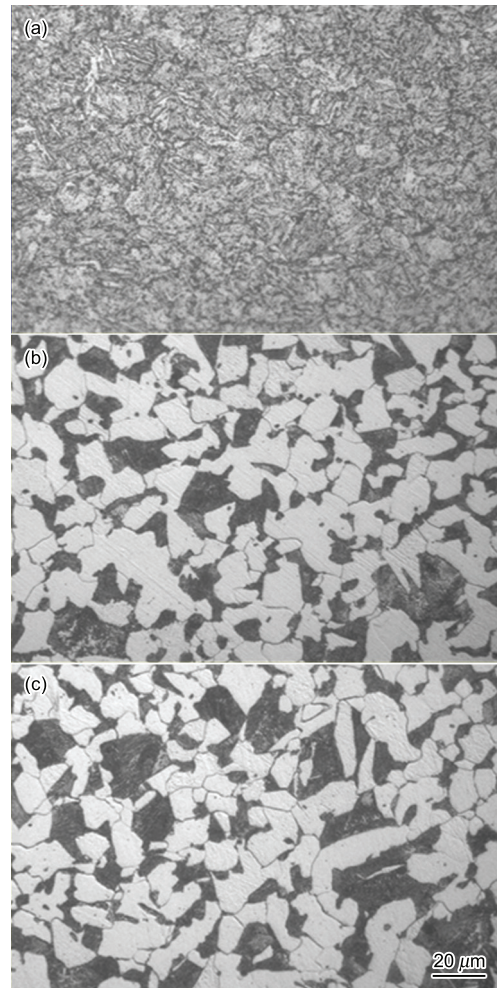


图 3 一段水冷时钢筋不同半径处的显微组织

Fig.3 Microstructures of rebar using one-stage water cooling at marginal region (a), 1/2 radius region (b) and central region (c)

示. 可以看出, 采用两段式冷却时, 由于 h_{FM} 高于 h_a , 其冷却速度快于一段式的高温空冷段. 且随着 h_{FM} 的增加, 前段冷速加快, 而对随后的水冷段及低温空冷段的冷却曲线影响很小. 由于前段 FM 冷速慢时, 生成氧化皮的温度提高, 因此, 在 FM 冷却时选取较小的换热系数, 有利于提高氧化皮的质量, 且对钢筋力学性能影响很小.

2.2.2 两段式冷却温度场的模拟结果 两段式冷却时, 在前段 FM 冷却时选取较小的换热系数 ($h_{FM}=600 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$), 则一段式冷却与两段式冷却的温度场比较如图 5 所示. 可以看出, 采用两段式冷却, 其后段水冷段和低温空冷段钢筋由边缘至芯部不同半径处的冷却曲线与一段水冷的冷却曲线非常接近, 且 T_f (337 C) 和 T_s (634 C) 也都略低于一段式冷却的 T_f (343 C) 和 T_s (641 C), 说明采用两段式冷却得到的钢筋室温组织与一段水冷的室温组织会相似, 因此, 钢筋的力学性能能够达到一段水冷的高强度水平. 并且两段式冷却的前段试剂冷却有利于提高氧化皮质量, 因此, 采用两段式冷却有利

于提高钢筋的综合性能.

2.2.3 其它工艺参数对两段式冷却温度场的影响 在螺纹钢冷却过程中, 除了冷却速度和冷却时间的影响之外, 终轧速度及终轧温度也会影响钢筋成品的性能. 图 6 为终轧速度为 9.5 和 8.5 m/s 时, 采用两段式冷却的温度场. 其中 h_{FM} 和 h_w 分别取 600 和 6500 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$. 终轧速度为 9.5 m/s 时, 前段 FM 冷却时间和后段水冷时间分别为 0.74 和 1.77 s, 前段 FM 冷却出口温度为 891 C , T_f 为 337 C , T_s 为 634 C . 终轧速度为 8.5 m/s 时, 前段 FM 冷却时间和后段水冷时间分别为 0.82 和 1.98 s, 前段 FM 冷却出口温度为 888 C , T_f 为 321 C , T_s 为 614 C . 在冷却线长度一定的条件下, 采用较小的终轧速度 8.5 m/s 时, 前段 FM 冷却时间和后段水冷时间都有所增加. 前段 FM 冷却时间增加 (由 0.74 s 增加到 0.82 s), 且前段 FM 冷却出口温度下降很小 (由 891 C 下降到 888 C), 这有利于提高氧化皮的质量. 同时, 后段水冷时间增加, T_f 和 T_s 都降低, 有利于钢筋力学性能的提高. 因此, 降低终轧速度有利于提高钢筋的综合性能.

图 7 为终轧温度分别为 980 和 1050 C 时, 采用两段式冷却的温度场. 其中 h_{FM} 和 h_w 分别取 600 和 6500 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$. 当终轧温度为 980 C 时, 前段 FM 冷却出口温度为 891 C , T_f 为 337 C , T_s 为 634 C . 当终轧温度为 1050 C 时, 前段 FM 冷却出口温度为 954 C , T_f 为 359 C , T_s 为 677 C . 可以看出, 当终轧温度提高时, 前段 FM 冷时氧化温度提高, 有利于改善氧化皮的质量, 然而, T_f 和 T_s 均高于终轧温度时, 力学性能会降低. 在这种情况下, 可以通过增加后段水冷的冷速来提高力学性能. 同理, 当降低终轧温度, 前段 FM 冷却氧化温度也随之降低, 太低的氧化温度会影响氧化皮的质量; 而同时 T_f 和 T_s 都会降低, 则有利于提高钢筋的力学性能. 说明终轧温度对钢筋综合性能的影响存在一个临界值. 因此, 在选取终轧温度时, 需要综合考虑钢筋的力学性能和耐蚀

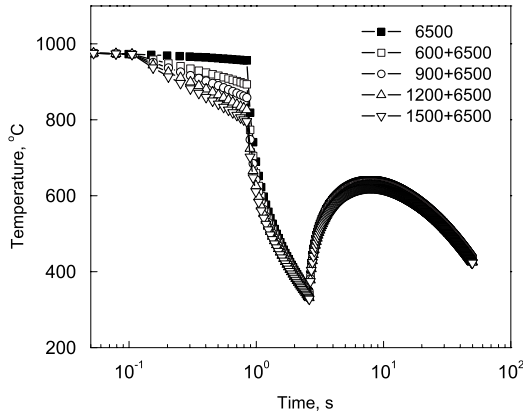


图 4 一段式水冷和前段 FM 冷却时的换热系数对温度场的影响
Fig.4 Influence of heat-transfer coefficient of the one-stage water cooling (solid) and first stage cooled by FM (hollow) on the temperature field

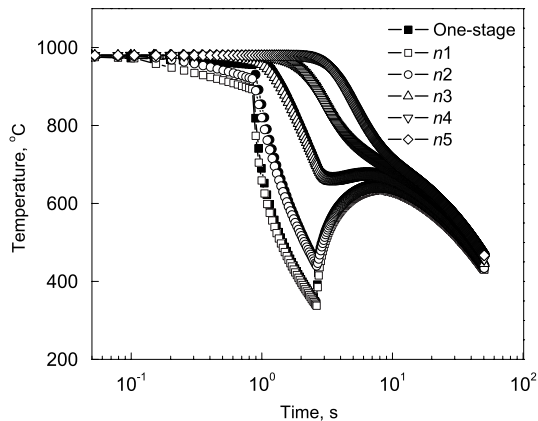


图 5 一段式冷却与两段式冷却的温度场
Fig.5 Temperature fields of one-stage cooling (solid) and two-stage cooling (hollow)

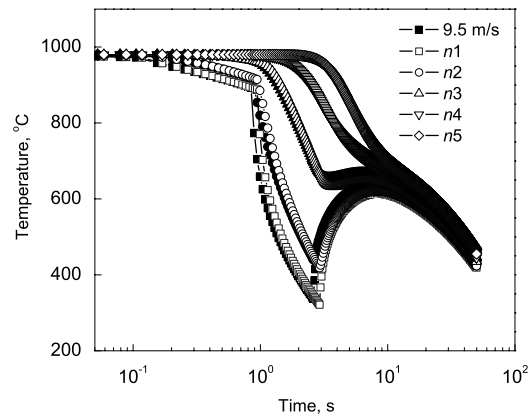


图 6 终轧速度对温度场的影响
Fig.6 Influence of finishing rolling rate (9.5 m/s: solid, 8.5 m/s: hollow) on temperature field

性能, 选取一个适中的值.

2.3 化学剂冷却氧化皮性能评价

2.3.1 氧化皮表面形貌 在实验室模拟前段化学剂冷却过程中, 加热温度为 980 °C, 化学剂冷却时间为 0.8 s, 且通过调整喷淋强度来实现化学剂冷却出口温度为 890 °C, 满足 h_{FM} 为 $600 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$. 获得的氧化皮表面形貌与水冷钢筋的对比结果如图 8 所示. 可以看出, 水冷得到的氧化皮很疏松, 并且含有较多孔洞, 侵蚀性物质容易通过氧化皮到达基体表面, 导致钢筋腐蚀. 而采用 FM 冷却得到的氧化皮的外表面平整致密, 有利于阻止侵蚀性物质向钢筋基体表面的侵入, 推迟钢筋发生腐蚀的时间, 可以有效提高钢筋的耐蚀性能.

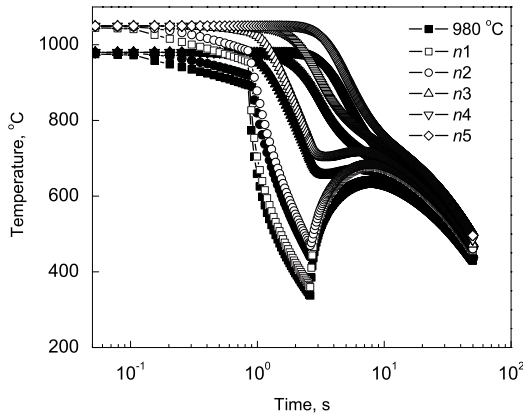


图 7 终轧温度对温度场的影响

Fig.7 Influence of finishing temperature (980 °C: solid, 1050 °C: hollow) on temperature field

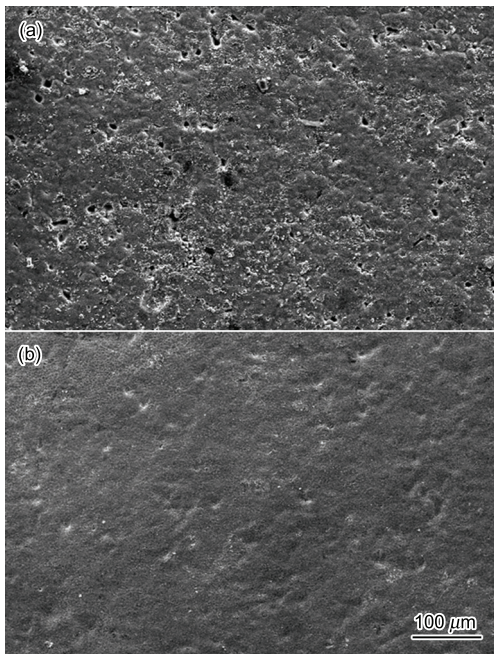


图 8 水冷钢筋和化学剂冷却钢筋的表面氧化皮形貌

Fig.8 Microstructures of outer surface of oxide scale under water cooling (a) and FM cooling (b)

2.3.2 化学剂冷却氧化皮的耐蚀性 采用干湿交替实验, 比较了水冷钢筋和化学剂冷却钢筋的耐蚀性能, 分别如图 9 和 10 所示. 水冷钢筋经过 10 个周期表面已经出现较多锈斑 (图 9b), 经过 60 个周期几乎完全锈蚀 (图 9c); 而化学剂冷却钢筋经历了 60 个周期的腐蚀, 仅在肋部及边部出现很少的锈斑 (图 10c). 可见, 采用前段化学剂冷却生成的氧化皮的耐蚀性能显著优于水冷钢筋.

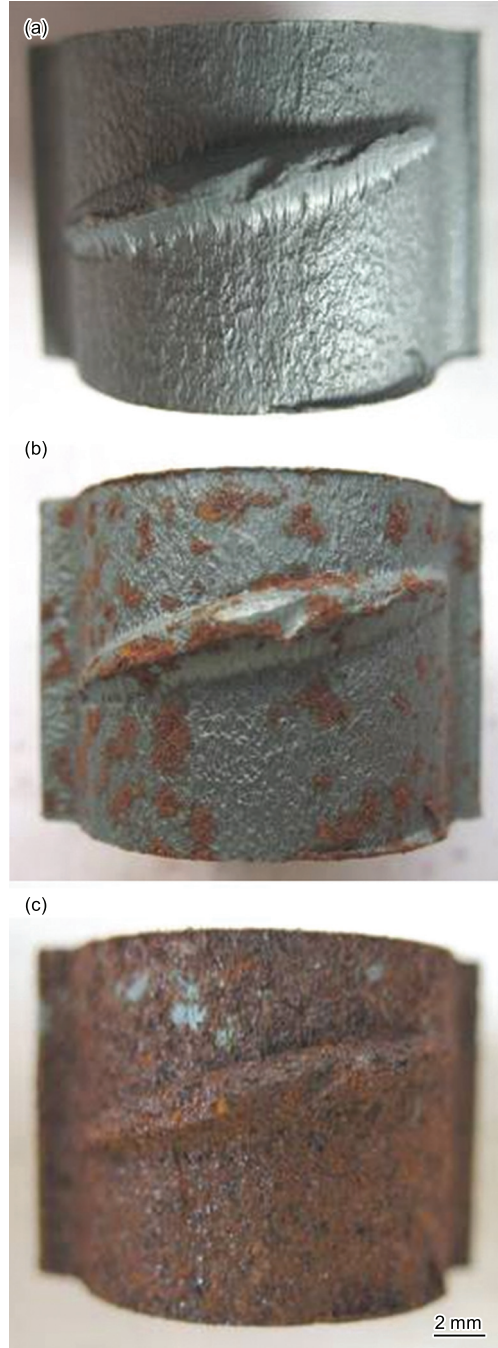


图 9 水冷钢筋干湿交替加速腐蚀实验后的表面形貌

Fig.9 Corrosion appearances of water-cooled rebar after dry-wet cyclic accelerated corrosion test for 0 d (a), 10 d (b) and 60 d (c)

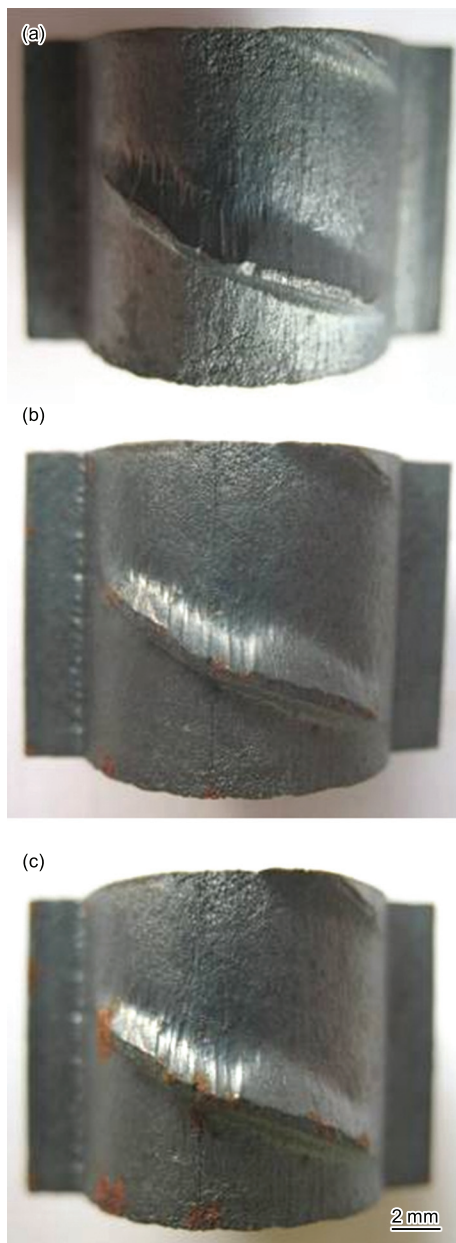


图 10 化学剂冷却钢筋干湿交替加速腐蚀实验后的表面形貌
 Fig.10 Corrosion appearances of FM-cooled rebar after dry-wet cyclic accelerated corrosion test for 0 d (a), 10 d (b) and 60 d (c)

3 结论

(1) 采用两段式冷却, 前段化学剂 FM 冷却时, 采用较小的对流换热系数, 有利于改善氧化皮的质量; 后段水冷时, 保持原一段水冷的对流换热系数, 两段冷却的冷却曲线与一段水冷的冷却曲线非常接近, 能够满足 III 级热轧螺纹钢的力学性能的要求, 可以提高钢筋的综合性能。

(2) 分析了终轧速度和终轧温度对两段式冷却时温度场的影响。终轧速度降低, 有利于钢筋综合性能的提高; 终轧温度对钢筋综合性能的影响存在一个临界值。

(3) 通过在实验室模拟前段化学剂冷却过程, 获得了致密的氧化皮, 其耐蚀性能显著优于水冷钢筋, 说明采用

前段化学剂冷却来改善水冷钢筋的耐蚀性能是可行的。

参考文献

- [1] Pradhan B, Bhattacharjee B. *Constr Build Mater*, 2011; 25: 2565
- [2] Shi X M, Ning X, Keith F, Jing G. *Constr Build Mater*, 2012; 30: 125
- [3] Zhao M Q, Zhang R Q, Yang Z, Li G J. *Anhui Metall*, 2003; 4: 23
(赵明琦, 张若蕾, 杨 峥, 李光俊. 安徽冶金, 2003; 4: 23)
- [4] Huang W, Zhang L, Wang P, Shu W. *Archit Technol*, 2010; 41: 242
(黄 伟, 张 丽, 王 平, 疏 伟. 建筑技术, 2010; 41: 242)
- [5] Nikolaou J, George D P. *Int J Impact Eng*, 2005; 31: 1065
- [6] Li G F, Dong H, Gao W, Zhao Y J. *J Iron Steel Res*, 1996; 8: 42
(李桂芬, 董 瀚, 高 伟, 赵玉君. 钢铁研究学报, 1996; 8: 42)
- [7] Sun X W, Huo X D, Liu D L, Kang Y L, Mao X P, Chen G J, Li L Y. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2004; 26: 268
(孙贤文, 霍向东, 柳得榕, 康永林, 毛新平, 陈贵江, 李烈军. 北京科技大学学报, 2004; 26: 268)
- [8] Zaky A I, El-Morsy A, El-Bitar T. *J Mater Process Technol*, 2009; 209: 1565
- [9] Wei J, Dong J H, Han E H, Ke W. *Corros Sci Prot Technol*, 2009; 21: 468
(魏 洁, 董俊华, 韩恩厚, 柯 伟. 腐蚀科学与防护技术, 2009; 21: 468)
- [10] Zitrou E, Nikolaou J, Tsakiridis P E, Papadimitriou G D. *Constr Build Mater*, 2007; 21: 1161
- [11] Castro P, Wéleva L, Balancán M. *Constr Build Mater*, 1997; 11: 75
- [12] Novak P, Mala R, Joska L. *Cem Concr Res*, 2001; 31: 589
- [13] Zou Y, Wang J, Zheng Y Y. *Corros Sci*, 2011; 53: 208
- [14] Wei J, Dong J H, Ke W. *Constr Build Mater*, 2010; 24: 275
- [15] Wei J, Dong J H, Ke W. *Constr Build Mater*, 2011; 25: 1243
- [16] Chen R Y, Yuen W Y D. *Oxid Met*, 2001; 56: 89
- [17] Almusallam A A. *Constr Build Mater*, 2001; 15: 361
- [18] Pérez F J, Martínez L, Hierro M P, Gómez C, Portela A L, Pucci G N, Duday D, Lecomte-Beckers J, Greday Y. *Corro Sci*, 2006; 48: 472
- [19] Saurabh K, Ananya M, Sudin C, Sanjay C. *ISIJ Int*, 2004; 44: 1217
- [20] Cheng M, Hong H P, Peng D, Kang Y L, Jin Y C. *J Iron Steel Res*, 2008; 20: 18
(程 满, 洪慧平, 彭 聘, 康永林, 金永春. 钢铁研究学报, 2008; 20: 18)
- [21] Lee Y Y, Choi S, Hodgson P D. *Mater Process Technol*, 2002; 125: 678
- [22] Morales R D, Lopez A G, Olivare M. *ISIJ Int*, 1990; 30: 48
- [23] Yao S C, Cox T L. *Exp Heat Transfer*, 2002; 15: 207
- [24] Zhang G B, Sheng Y, Wei M J, Wu X Z, Wang Y S, Liu Q L. *J Hebei Inst Technol*, 2002; 24: 32
(张国滨, 盛 艳, 魏明军, 武学泽, 王彦生, 刘庆禄. 河北理工学院学报, 2002; 24: 32)
- [25] Freund S, Pautsch A G, Shedd T A, Kabelac S. *Int J Heat Mass Transfer*, 2007; 50: 1953