

光伏用高强钢高温氧化行为研究

刘昱佳¹, 冉长荣^{2,3}, 郭太雄³, 金永清⁴, 李庆龙¹, 于恒祥¹, 曹光明^{1*}

(1. 东北大学数字钢铁全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 安徽工业大学分子工程与应用化学研究所, 安徽 马鞍山 243002; 3. 攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 4. 攀钢集团攀枝花钢铁有限公司, 四川 攀枝花 617000)

摘要:采用高温同步热分析仪(TGA)对光伏用高强钢 S350GD 和 S420GD 在干燥和潮湿气氛下的高温氧化行为进行了系统研究, 并采用 X 射线衍射(XRD)和场发射电子探针(EPMA)分析氧化铁皮的物相组成、截面形貌及元素分布。结果表明, S350GD 和 S420GD 氧化增重曲线均符合抛物线规律, S420GD 的氧化铁皮对比 S350GD, 厚度更小且高价铁氧化物占比更高; S420GD 在氧化铁皮和基体界面处存在 Si 元素富集层, 其中 SiO₂ 和 Fe₂SiO₄ 协同降低 Fe²⁺扩散系数; 对比干燥和潮湿气氛, S350GD 和 S420GD 的氧化铁皮生长规律相同, 潮湿气氛下氧化铁皮厚度更大且低价铁氧化物占比更高; 潮湿气氛下氧化铁皮中产生大量孔洞和微裂纹等缺陷, 这些缺陷成为粒子的扩散通道, 从而加快了氧化反应。

关键词:光伏用高强钢; 高温氧化; 氧化铁皮; Si 元素; 潮湿气氛

中图分类号: TF76, TG174

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)01-0171-09

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.01.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on the high-temperature oxidation behavior of high strength steels for photovoltaic applications

LIU Yujia¹, RAN Changrong^{2,3}, GUO Taixiong³, JIN Yongqing⁴, LI Qinglong¹,
YU Hengxiang¹, CAO Guangming^{1*}

(1. State Key Laboratory of Digital Steel, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. Institute of Molecular Engineering and Applied Chemistry, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, Anhui, China; 3. Pangang Group Panzhihua Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 4. Pangang Group Panzhihua Iron & Steel Vanadium Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: The high temperature oxidation behavior of high-strength steels S350GD and S420GD for photovoltaic applications was systematically studied by a high-temperature thermal gravimetric analyzer (TGA) under dry and humid atmospheres. X-ray diffraction (XRD) and electron probe microanalysis (EPMA) were used to characterize the phase composition, cross-sectional morphologies and element distribution of the oxide scales. The results show that the oxidation weight gain curves of both S350GD and S420GD follow a parabolic law. Compared to S350GD, the oxide scale formed on S420GD is thinner and exhibits a higher fraction of high-valence iron oxides. A silicon-enriched interfacial layer was detected at the oxide/metal substrate interface in S420GD, where SiO₂ and Fe₂SiO₄ phases synergistic-

收稿日期: 2025-08-22; 修回日期: 2025-09-10; 接受日期: 2025-09-15

基金项目: 十四五国家重点研发计划资助项目(2022YFB3304800); 兴辽英才计划(XLYC2203186)。

作者简介: 刘昱佳, 1999 年出生, 男, 山东烟台人, 博士研究生, 研究方向: 热轧钢材的高温氧化, E-mail: 1718874570@qq.com; *通信作者: 曹光明, 1982 年出生, 男, 四川绵阳人, 博士, 教授, 研究方向: 热轧钢材高温氧化行为控制技术, E-mail: caogm@ral.neu.edu.cn。

ally reduce the diffusion coefficient of Fe^{2+} ions. When comparing oxidation under dry and humid atmospheres, both steels show similar oxides growth mechanisms; however, the oxide scales are thicker and the content of low-valence iron oxides is increased in humid environments. Moreover, the oxide scales formed under humid conditions contain a significant density of pores and microcracks, which act as fast diffusion pathways for ionic species, thereby accelerating the oxidation process.

Key words: high strength steels for photovoltaic applications; oxide scale; high temperature oxidation; silicon; humid atmosphere

0 引言

国家将“碳达峰、碳中和”纳入生态文明建设整体布局要求,促进了国内的光伏新能源等行业领域迅猛发展,对光伏支架需求量正逐年增加^[1]。光伏支架是太阳能光伏电站的重要基础结构,由于所处沙漠、滩涂、戈壁等地区环境恶劣,具有优良耐蚀性的镀锌高强度钢被大量应用到光伏支架的制作中^[2-3]。镀锌板在镀锌前会经过热轧-酸洗-冷轧-连退等工序,对热轧过程中氧化铁皮的厚度及组织结构进行系统研究,有助于优化后续酸洗工艺,提高整体工艺的稳定性 and 产品表面质量^[4];如果热轧过程氧化行为控制不当,镀锌后钢板表面可能会出现脱锌、漏镀及锌点凸起等缺陷,导致表面质量下降,甚至对材料的服役性能产生不利影响^[5-7]。

钢材的热轧生产过程中影响氧化铁皮的因素较多且复杂,包括元素含量、氧化气氛和氧化温度等,其中元素含量和氧化气氛对氧化铁皮的影响最为显著^[8-14]。光伏支架钢常见有 S350GD 和 S420GD,二者元素含量差别主要为 Mn 和 Si 元素。YUAN 等^[15]研究了 Fe-25Mn-3Cr-3Al-0.3C-0.01N 高锰奥氏体钢的高温氧化行为,发现氧化层主要由 Mn 氧化物、Fe 氧化物和 Mn-Cr 尖晶石组成,且 Mn 和 Fe 的氧化物间可以相互溶解形成固溶体。KUSABIRAKI^[16]等研究了不同 Si 含量硅钢在 1 100 °C 和 1 200 °C 的氧化过程,发现硅元素的添加可以在氧化铁皮界面处生成 Si 元素富集层,从而显著降低氧化速率,增强抗氧化性。在热轧生产过程中,带钢不仅暴露于干燥空气中,且由于除磷工艺及冷却水的大量应用,生产线环境呈现出较高的湿度特征,从而形成潮湿气氛环境^[17-19]。HAO 等^[20]对 850 MPa 级高强度钢在潮湿气氛中的高温氧化行为进行了系统研究,结果表明,相较于干燥空气环境,水蒸气的存在对其氧化机制产生了显著影响。RAHMEL 等^[21]在研究潮湿空气条件与干燥空气对金属氧化的影响时发现,在较低温度条件下,气氛差异带来的影响可以忽略不计,但是当温度超过 950 °C 时,水蒸气条件下氧化速率明显加快。YUAN 等^[10]研究了铁在 650 ~

750 °C 的温度下于氧气和水蒸气环境中的氧化行为,发现同一温度下水蒸气的存在促使氧化过程中 H_2 的生成, H_2 的逸出导致了大量孔隙的形成,从而显著加快了金属的氧化速率。

综上所述, S350GD 与 S420GD 等系列高强度钢在热轧生产过程中,其元素含量及氧化气氛对氧化铁皮形成机理的影响仍需进一步研究。为此,笔者以光伏支架用高强度钢 S350GD 和 S420GD 为研究对象,系统分析其在不同氧化气氛下的高温氧化行为,为热轧生产过程中氧化铁皮的厚度及组织结构控制提供了理论支撑,并为后续酸洗工艺的研究奠定了基础。

1 试验材料与试验方法

S350GD 和 S420GD 高强度钢化学成分见表 1。将钢材加工成 10 mm×8 mm×2 mm 的矩形试样,沿试样中线方向靠短边处钻出 $\varnothing 2$ mm 的圆孔,用无水乙醇进行超声波清洗,去除表面油污及乳化液,使用 600# ~ 1 500# 砂纸打磨至试样表面光洁度一致,最后清洗并烘干备用。

表 1 S350GD 和 S420GD 的化学成分
Table 1 Chemical compositions of S350GD and S420GD%

	C	Mn	Si	P	S	Ti	N	Fe
S350GD	0.20	0.4	0.06	0.02	0.045	0.040	0.050	Bal.
S420GD	0.20	1.2	0.20	0.02	0.045	0.040	0.050	Bal.

试验钢在干燥和相对湿度(RH)为 30% 的潮湿气氛下使用 SETARAM 公司 Setsys Evolution 型热重分析仪(TGA)进行高温氧化试验,并在热重分析仪上增加水蒸气发生器模拟生产现场的潮湿气氛,水蒸气发生器自带有湿度和气流量的设定功能,设定好后即可按照要求向炉腔内通入设定湿度的氩气。具体试验方法为:首先将试样悬挂于加热炉内,炉内抽真空后,再以 200 mL/min 速率向炉内充入高纯氩气直至达到标准大气压,然后在氩气保护下以 90 °C/min 速率加热,直到达到预设温度(800、900、1 000 °C)。当温度达到预设值时关闭氩气,模拟干燥气氛的试样开始以 50 mL/min 的速率通入空气等温氧化 60 min,模拟潮湿气氛的试样则利用水蒸气发生器设定好 30% 的 RH 参数,以 50 mL/min 的速

率输入稳定均匀的潮湿气氛并等温氧化 60 min, 氧化结束后均在氩气保护下以 60 °C/min 的速率降至室温。氧化后的宏观表面形貌如图 1 所示。氧化试验结束后采用 X 射线衍射仪(XRD)对氧化层表面进行相结构分析, 同时使用场发射电子探针(EPMA)对氧化层厚度、断面形貌及元素进行观察和分析。

2 试验结果与讨论

2.1 氧化动力学

S350GD 和 S420GD 在 800、900、1 000 °C 的空气及水蒸气下氧化 60 min 后, 得到的氧化增重曲线如图 2(a) 所示。由图 2(a) 可知, S350GD 和 S420GD 氧化增重量与时间呈抛物线规律。对比

S350GD 和 S420GD 氧化增重曲线可知: 相同温度和气氛条件下 S350GD 增重均高于 S420GD, 相同温度条件下 S350GD 和 S420GD 在潮湿气氛下的增重均高于干燥气氛下的增重。

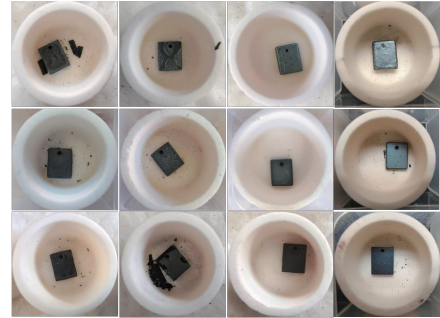
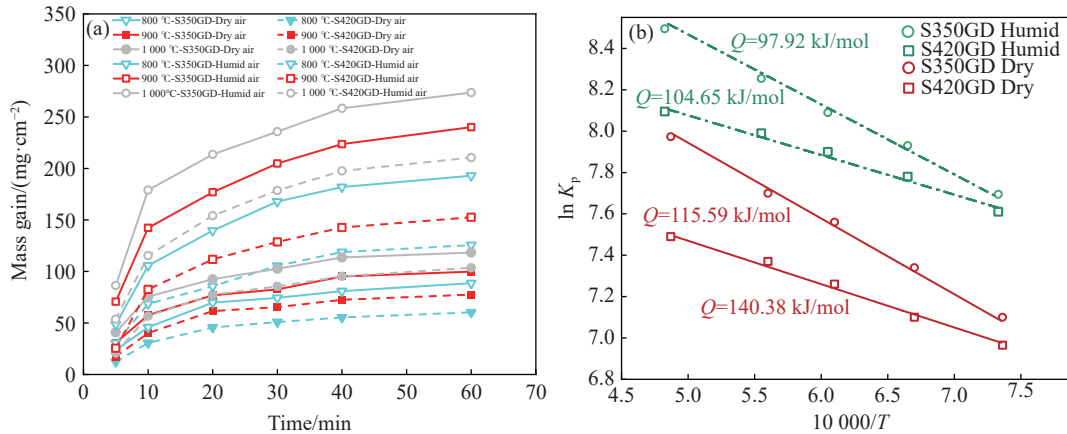


图 1 氧化后的宏观表面形貌

Fig. 1 Macroscopic surface morphology after oxidation



(a) 氧化增重曲线; (b) 高温氧化 Arrhenius 曲线

图 2 S350GD 和 S420GD 的氧化增重曲线和高温氧化 Arrhenius 曲线

Fig. 2 Oxidation weight curves and high-temperature oxidation Arrhenius plots of S350GD and S420GD

高温氧化初期阶段呈现氧化增重与时间的线性关系, 表明该过程由界面反应主导; 而后期阶段则遵循抛物线规律, 对应内扩散反应控制机制。因此, 两种试验钢的氧化动力学可通过“线性+抛物线”组合模型完整描述^[22]。其中线性阶段和抛物线阶段的数学表达式分别如式 (1)(2) 所示。

$$\Delta W = K_L t \quad (1)$$

$$(\Delta W)^2 = K_P t \quad (2)$$

式中, ΔW 为单位面积氧化增重量, mg; t 为氧化时间, min; K_L 为线性氧化速率常数, $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$; K_P 为抛物线速率常数, $\text{mg}^2/(\text{cm}^4 \cdot \text{min})$ 。

依据第二阶段氧化抛物线动力学规律, 拟合单位面积增重平方与时间的线性斜率, 获得不同温度下抛物线速率常数 K_P 如表 2 所示。结果表明: K_P 随温度升高而增大, 加速氧化层生长; 相同温度下, S420GD 钢的 K_P 值较 S350GD 钢降低。将两个钢

种潮湿气氛和干燥气氛下的氧化速率常数 K_P 进行对比, 可知在水蒸气的作用下, 两个钢种的氧化速率均明显增大。

表 2 不同温度下 S350GD、S420GD 的氧化速率常数 K_P
Table 2 Parabolic rate constant K_P of S350GD and S420GD at different temperatures

Temperature/°C	Atmosphere	$K_P/(\text{mg}^2 \cdot \text{cm}^{-4} \cdot \text{min}^{-1})$	
		S350GD	S420GD
800	Dry	13.56	9.47
900	Dry	25.66	15.46
1 000	Dry	30.51	27.59
800	Humid	64.59	43.91
900	Humid	82.55	52.67
1 000	Humid	109.66	89.77

根据 Arrhenius 公式, 氧化平衡常数 K_P 可用式 (3) 表示。

$$K_P = A \cdot \exp(-Q/RT) \quad (3)$$

式中, A 为模型常数; Q 为氧化激活能, kJ/mol; R 为

气体常数, 8.314 J/(mol·K); T 为热力学温度, K。

对式 (3) 两边取自然对数, 得到其线性化形式, 用式 (4) 表示。

$$\ln K_p = \ln A - Q/RT \quad (4)$$

由式 (4) 的 $\ln K_p$ 和 T^{-1} 的线性关系, 结合表 2 数据绘制 $\ln K_p - 1000/T$ 拟合曲线, 如图 2(b) 所示, 其斜率计算得到 S350GD 和 S420GD 钢在干燥/潮湿气氛下的氧化激活能 Q 。氧化激活能 Q 作为氧化反应能垒, 其大小直接反映了钢种发生氧化反应的难易程度, 氧化激活能越小, 氧化反应越容易发生。通过对比不同气氛下的氧化激活能, 发现潮湿气氛的氧化激活能小于干燥气氛的氧化激活能。通过对比相同气氛条件下 S350GD 和 S420GD 的氧化激活能, 发现 S350GD 的氧化激活能均低于 S420GD, 说明 S350GD 的氧化反应更易发生。

2.2 氧化铁皮物相组成和断面形貌

采用 X 射线衍射 (XRD) 测定试验用钢在干燥空气条件下 1 000 °C 氧化 60 min 后所生成氧化产物粉末的物相组成, 结果如图 3 所示。由图 3 可知, S350GD 和 S420GD 生成氧化产物的物相均由 FeO、

Fe₂O₃、Fe₃O₄、MnO、Mn₂O₃、Mn₃O₄、SiO₂ 和 FeSi₂O₄ 组成, Si、Mn 含量的增加并没有改变物相的结构。

图 4 为 S350GD 和 S420GD 在干燥和潮湿气氛条件下 800 ~ 1 000 °C 氧化 60 min 后的氧化铁皮断面微观形貌。

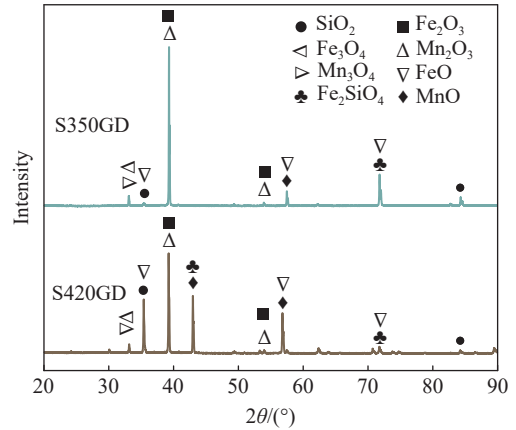
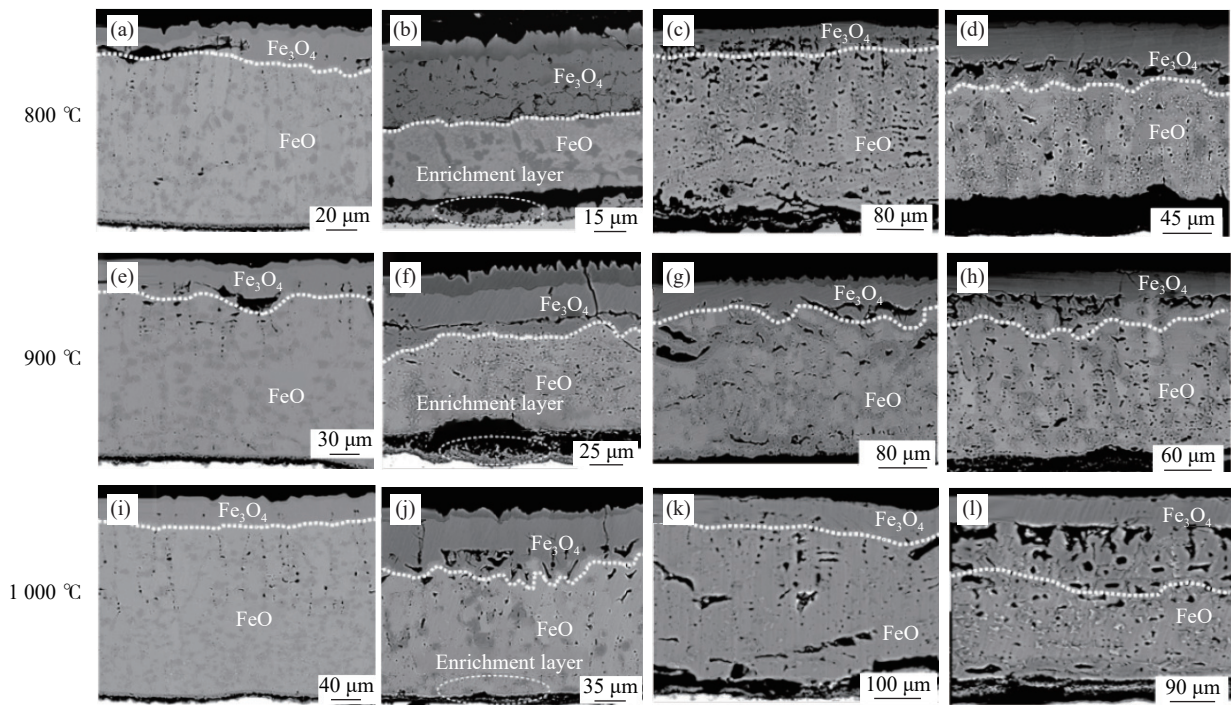


图 3 1 000 °C 下 S350GD 和 S420GD 在干燥气氛下氧化 60 min 后 XRD 衍射峰
Fig. 3 XRD diffraction peaks of S350GD and S420GD after oxidation at 1 000 °C for 60 min in dry atmosphere



(a)(e)(i) 干燥下 S350GD; (b)(f)(j) 干燥下 S420GD; (c)(g)(k) 潮湿下 S350GD; (d)(h)(l) 潮湿下 S420GD

图 4 S350GD 和 S420GD 氧化 60 min 后氧化铁皮断面形貌

Fig. 4 Cross-sectional morphology of oxide scales on S350GD and S420GD after 60 min of oxidation

由图 4 可以观察到两个试验钢种的氧化铁皮由外至基体依次呈现三层结构: 外层为极薄的 Fe₂O₃、中间层是较厚的 Fe₃O₄、内层为最厚的 FeO, Si、Mn

含量较高的 S420GD 在氧化铁皮和基体界面处存在明显的合金元素富集区。不同温度下 S350GD 和 S420GD 在干燥和潮湿气氛条件时的氧化铁皮厚

度和相组成比例如图 5 所示。对比可知: 相同条件下 S350GD 的氧化铁皮厚度大于 S420GD, 且 S420GD 的氧化层高价铁氧化物占比高于 S350GD (即 S420GD 的氧化层中 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 相层所占比例更高, FeO 相层所占比例更低); 相同温度和钢种条件下, 潮湿气氛的氧化铁皮存在大量孔洞和微裂纹, 且厚度大于干燥气氛, 同时潮湿气氛下氧化铁皮低价铁氧化物占比高于干燥气氛。

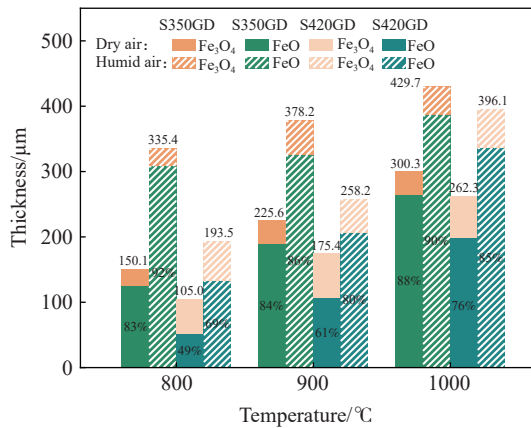


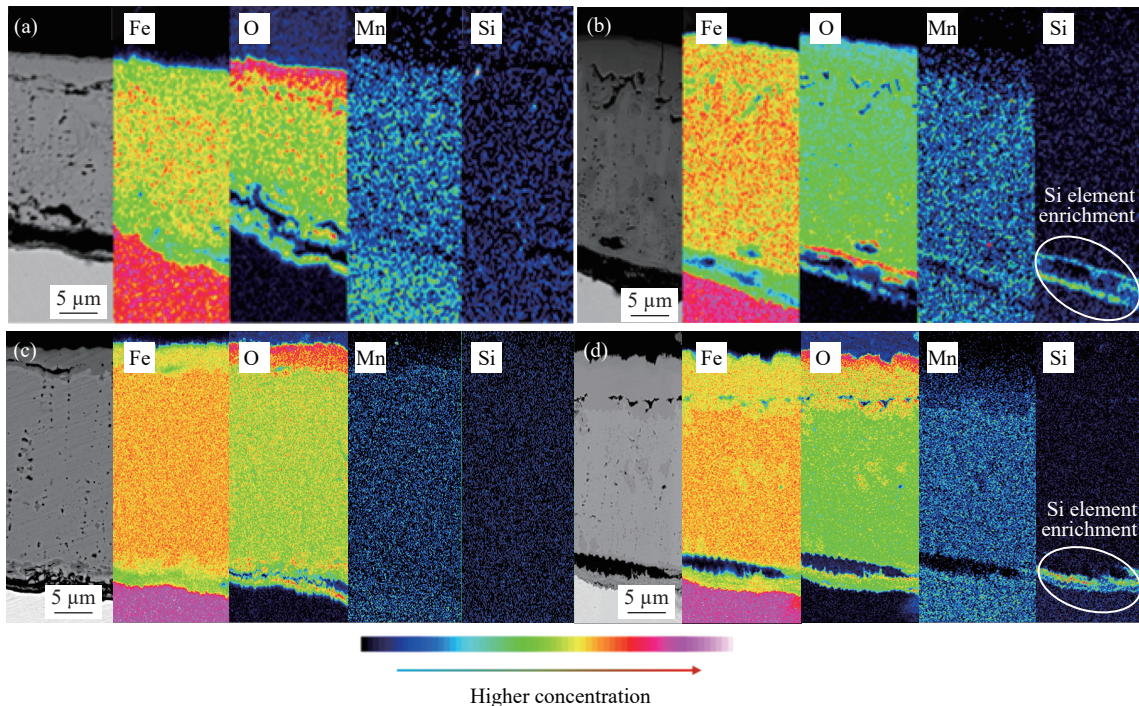
图 5 S350GD 和 S420GD 氧化 60 min 后氧化铁皮厚度及相组成

Fig. 5 Thickness and phase compositions of oxide scales on S350GD and S420GD after 60 min of oxidation

2.3 Si 元素对高温氧化的影响

800 °C 和 1000 °C 下干燥气氛 S350GD 和

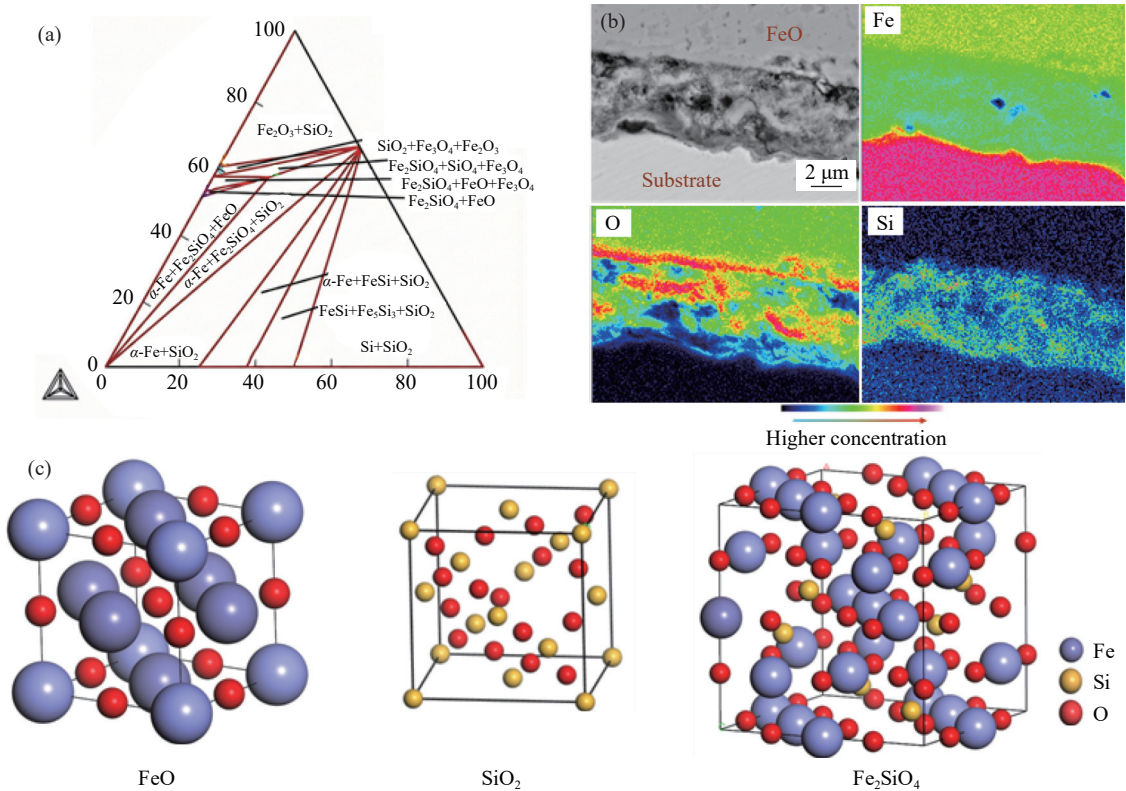
S420GD 氧化铁皮截面形貌和元素分析如图 6 所示。对比 S350GD 和 S420GD 氧化铁皮截面形貌和元素分析发现, 二者物相结构无差异, 说明 S350GD 和 S420GD 钢种中的 Mn 和 Si 元素含量的差异不会引起物相改变, 该结果与图 3 中 1000 °C 下 S350GD 和 S420GD 在干燥气氛下氧化 60 min 后 XRD 衍射分析结果相同。800 °C 和 1000 °C 条件下 S350GD 和 S420GD 的 Mn 元素均匀扩散至氧化铁皮中, 这是因为 Mn 原子可以取代铁原子在 FeO 和 Fe_3O_4 晶格中的点阵位置, Mn 与 Fe 的氧化特性相似, 并且与 Fe 相应的氧化物有很高的互溶度, 所以 Mn 元素能分布在基体以及氧化铁皮中^[23-24]。同时发现 800 °C 和 1000 °C 条件下, 在 S420GD 基体和氧化铁皮界面处均存在 Si 氧化物富集层, 而 Si 含量较少的 S350GD 则没有。利用 Thermo-Calc 绘制 1000 °C Fe-Si-O 三元相图等温截面, 如图 7(a) 所示。由图 7(a) 可知, Fe-Si-O 体系中可能存在的氧化物按照 O 含量由低到高依次为 SiO_2 、 Fe_2SiO_4 、 FeO 、 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 , 与 Fe-Si 合金中氧化铁皮由内到外的顺序一致。由 FeO 、 SiO_2 和 Fe_2SiO_4 组成的 Si 元素富集层形貌和元素分析如图 7(b) 所示。 Fe_2SiO_4 是由 FeO 与 SiO_2 通过固相反应所生成的尖晶石型氧化物, 能够阻碍 Fe^{2+} 由基体向氧化铁皮扩散, 从而提高抗氧化能力。



(a) 800 °C, S350GD; (b) 800 °C, S420GD; (c) 1000 °C, S350GD; (d) 1000 °C, S420GD

图 6 S350GD 和 S420GD 干燥气氛下氧化元素分析

Fig. 6 Oxidation elemental analysis of S350GD and S420GD in dry atmosphere



(a) 1 000 °C 时 Fe-Si-O 三元相图等温截面; (b) Si 富集层元素分析; (c) FeO、SiO₂ 和 Fe₂SiO₄ 的晶体结构

图 7 S420GD 的 Si 元素富集层组成

Fig. 7 Composition of the Si-enriched layer in S420GD

因 Si 的氧亲和力强于 Fe, Si 优先发生选择性氧化, 在基体表面生成 SiO₂ 与 Fe₂SiO₄。其中 SiO₂ 对 Fe²⁺ 的扩散阻滞效应显著 (扩散系数 $1.3 \times 10^{-18} \text{ cm}^2/\text{s}$, 远低于铁氧化物中值, 见表 3), 且 Fe₂SiO₄ 尖晶石结构中 Si 占据八面体位点, 进一步阻碍离子迁移, 二者协同降低了 Fe²⁺ 扩散系数, 从而影响氧化层结构与厚度。当 Si 含量提高时, Fe²⁺ 外迁受阻加剧, 致使 S420GD 氧化层以高价铁氧化物为主, 即 S420GD 的氧化层中 Fe₂O₃ 和 Fe₃O₄ 相层所占比例更高, FeO 相层所占比例更低, 且氧化铁皮厚度较 S350GD 更薄。

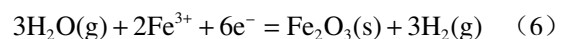
表 3 不同温度下 Fe²⁺ 在不同氧化产物中的扩散系数
Table 3 Diffusion coefficients of Fe²⁺ in different oxidation products at various temperatures

Oxides	Diffusion coefficient/(cm ² ·s ⁻¹)		Temperature/°C
	D _{Fe}	D _O	
Wustite(FeO)	9×10 ⁻⁸		1 000
Magnetite(Fe ₃ O ₄)	2×10 ⁻⁹		1 000
Hematite(Fe ₂ O ₃)	2×10 ⁻¹⁵	8×10 ⁻¹⁴	1 000
	4.1×10 ⁻¹⁵		1 200
Silica(SiO ₂)	1.0×10 ⁻²⁰	1.3×10 ⁻¹⁸	1 000
Fayalite(Fe ₂ SiO ₄)	8×10 ⁻¹⁶		1 000

2.4 潮湿气氛对高温氧化的影响

S350GD 和 S420GD 在 1 000 °C 干燥和潮湿气氛中氧化 60 min 后的截面形貌和元素分析如图 8 所示。根据 EDS 结果可知, 氧化铁皮主要由 Fe₃O₄ 和 FeO 组成。对比图 8(a) 及图 8(b) 中不同气氛条件下截面形貌发现, S350GD 和 S420GD 在潮湿气氛条件下氧化铁皮均分布有裂纹和孔洞, 并延伸穿过 Fe₃O₄ 和 FeO 层。a2 区域和 b2 区域进行元素分析发现, S350GD 和 S420GD 的裂纹和孔洞缺陷附近 O 元素浓度更高。

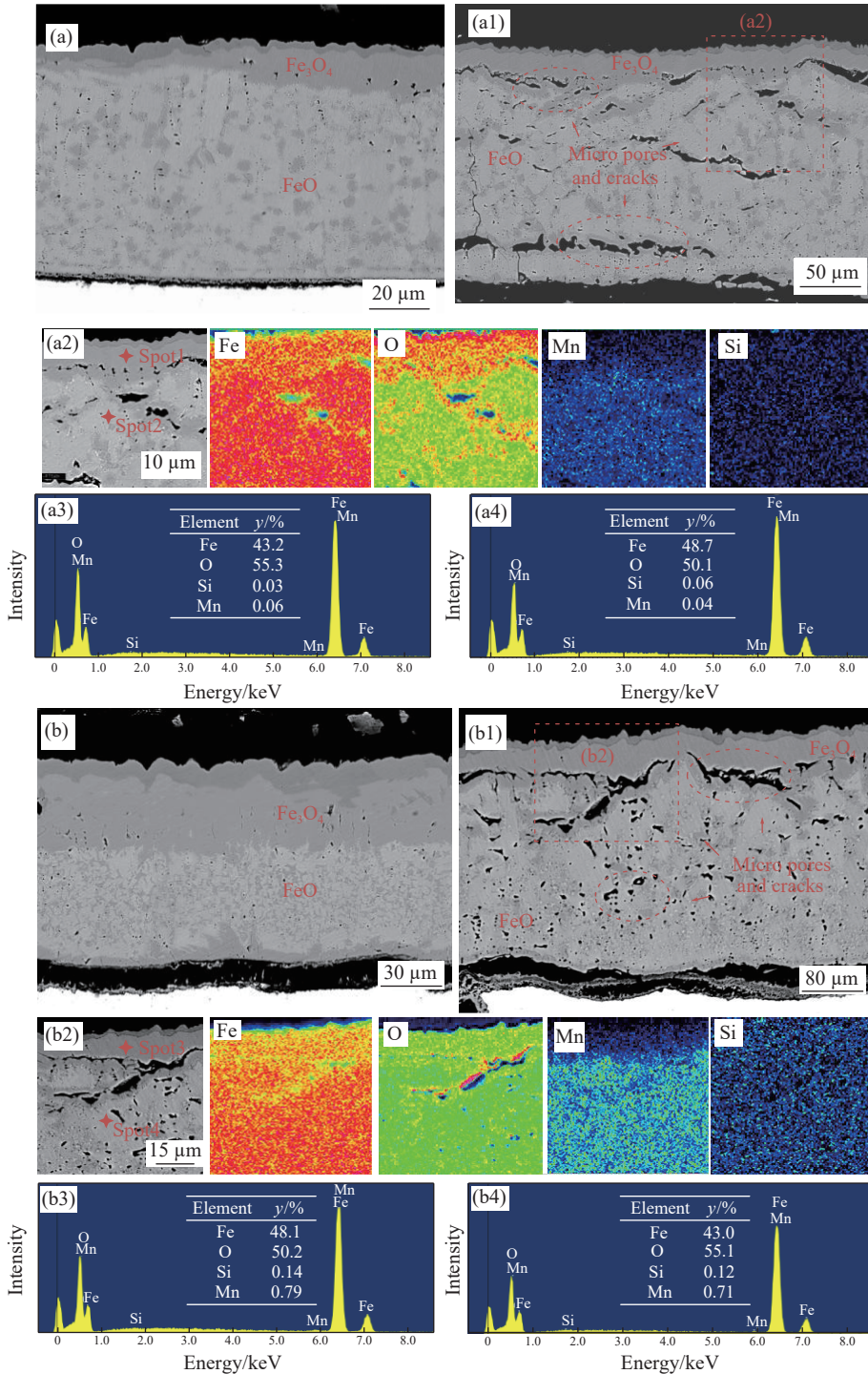
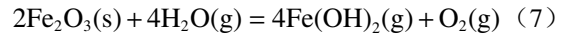
图 9 为氧化层在干燥气氛和潮湿气氛下的形成机理。在潮湿环境下, 氧化层中形成了许多裂纹和孔洞等缺陷, 这些缺陷的存在为气相物质渗透到氧化铁皮内部提供了通道, 因此水蒸气以分子形式扩散通过缺陷达到合金氧化层与 FeO 界面, 在此界面处与 Fe²⁺ 发生反应生成 FeO、Fe₂O₃ 和 H₂^[25], 反应方程式如式 (5)(6) 所示。



生成的 H₂ 大部分向外扩散, 在氧化铁皮中留下

孔洞, 增加了氧化铁皮中缺陷处的 O 浓度, 促进了氧化。氧化层中的 H₂O 还会促进挥发性 Fe(OH)₂

的形成^[26], 反应方程式如式 (7) 所示。



S350GD:(a) 干燥气氛, (a1) 潮湿气氛, (a2) 潮湿气氛下的元素分析, (a3)(a4) 点 1、点 2 的 EDS 图;S420GD:(b) 干燥气氛, (b1) 潮湿气氛, (b2) 潮湿气氛下的元素分析, (b3)(b4) 点 3、点 4 的 EDS 图

图 8 1 000 °C 条件下氧化铁皮断面形貌和元素分析

Fig. 8 Cross-sectional morphology and elemental analysis of oxide scales at 1 000 °C

综上所述, 水蒸气通过化学反应影响裂纹形成的原因可分为两种, 一种是 H₂ 逸出时形成的孔隙和

裂纹; 另一种是挥发性 Fe(OH)₂ 沿着微裂纹向外扩散, 使裂纹的尺寸增大。此外, S350GD 和 S420GD

的氧化动力学分析表明,相较于干燥空气环境,水蒸气条件下钢材的氧化速率显著提升,导致氧化层快速增厚并引发内部应力累积。当应力水平超过氧化层的塑性变形临界值时,将诱发氧化层结构失稳,表现为形变或开裂,进而促进微裂纹的萌生与扩展。这种周期性损伤过程形成的裂纹网络和孔隙结构具

有双重作用:一方面作为气相传输的快速扩散通道,另一方面显著缩短了 Fe^{2+} 离子的外迁路径。上述协同机制不仅加速了钢材的整体氧化进程,同时导致氧化铁皮形貌发生改变,使 FeO 成为氧化铁皮的主要成分。因此潮湿气氛下的氧化铁皮厚度更大,且低价铁氧化物占比更高。

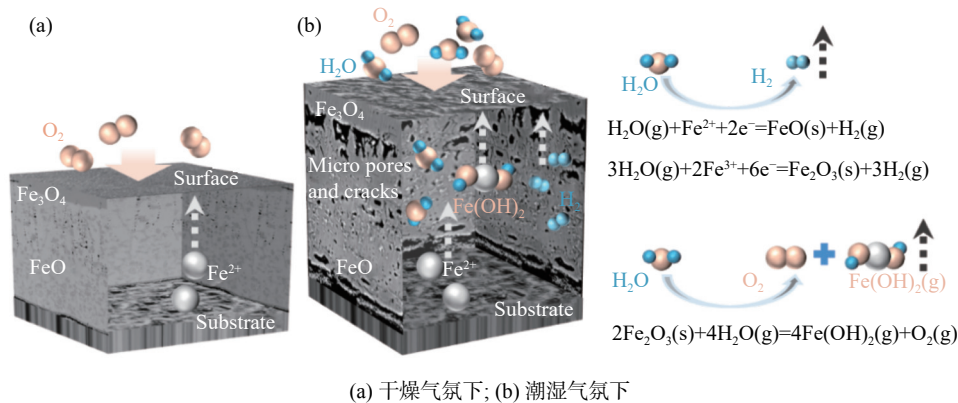


图9 不同气氛下的氧化机理

Fig. 9 Schematic diagram of oxidation mechanisms under different atmospheres

3 结论

1)通过研究 S350GD 和 S420GD 在干燥和潮湿气氛条件下的高温氧化行为,发现氧化增重均符合抛物线规律, S350GD 的氧化铁皮厚度大于 S420GD,且 S420GD 的氧化层高价铁氧化物占比高于 S350GD;潮湿气氛下二者的氧化铁皮厚度大于干燥气氛,且潮湿气氛下氧化铁皮低价铁氧化物占比高于干燥气氛。

2)Si 含量较高的 S420GD 在氧化铁皮和基体

界面处存在由 FeO 、 SiO_2 和 Fe_2SiO_4 组成的 Si 元素富集层, SiO_2 和 Fe_2SiO_4 二者协同降低了 Fe^{2+} 扩散系数,从而影响氧化层结构与厚度,致使 S420GD 氧化层以高价铁氧化物为主,且氧化层厚度较 S350GD 更薄。

3)潮湿气氛具有促进高温氧化的作用,潮湿气氛下生成的氧化铁皮中存在大量的孔洞及微裂纹等缺陷,这些缺陷的存在促进了气相物质及离子的扩散,加快了氧化反应和 Fe^{2+} 的扩散,使氧化铁皮更厚且 FeO 成为氧化铁皮中的主要成分。

参考文献

- [1] WANG K, WANG J. A brief analysis on the current status and development trend of steel for photovoltaic brackets in China[J]. China Steel, 2022(2): 23-25, 34.
(王可,王晶.我国光伏支架用钢现状及发展趋势浅析[J].中国钢铁业,2022(2):23-25,34.)
- [2] ZHANG S L. Application of thermal-based zinc-aluminum-magnesium coating materials in photovoltaic scaffolds[J]. Metal World, 2021(6): 32-34.
(张树亮.热基锌铝镁镀层材料在光伏支架领域的应用[J].金属世界,2021(6):32-34.)
- [3] FAN C L, LIU W D. Development of hot-dip galvanized S390GD(S450GD)+Z products for photovoltaic brackets of Handan Steel[J]. Steel Rolling, 2021, 38(3): 93-97, 103.
(范春磊,刘文栋.邯钢光伏支架用热镀锌 S390GD(S450GD)+Z 产品的开发[J].轧钢,2021,38(3):93-97,103.)
- [4] ZHANG M Y, SHAO G J. Effect of microstructure of oxide scales on pickling of hot rolled strips[J]. Shanghai Metals, 2007(3): 41-44.
(张孟仪,邵光杰.热轧板的氧化皮结构对酸洗效果的影响[J].上海金属,2007(3):41-44.)
- [5] CAO G M, SHI F C, SUN B, et al. Oxide scales control and spallation behavior of hot-rolled automotive frame steels[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(11): 161-167.
(曹光明,石发才,孙彬,等.汽车大梁钢的氧化铁皮结构控制与剥落行为[J].材料热处理学报,2014,35(11):161-167.)

- [6] HUANG B, MA X J, ZHENG Y K, *et al.* Adhesion factors of hot-dip galvanized zinc layer in industrial production[J]. *Metallic Functional Materials*, 2022, 29(6): 67-73.
(黄宾, 马幸江, 郑艳坤, 等. 工业化生产中热镀锌层附着力的影响因素[J]. *金属功能材料*, 2022, 29(6): 67-73.)
- [7] ZHANG H J, CHEN L S. Analysis of surface sliver defect on cold rolled and cold rolled galvanizing sheet[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2011, 32(3): 76-81.
(张贺佳, 陈连生. 冷轧镀锌板表面线状缺陷分析[J]. *钢铁钒钛*, 2011, 32(3): 76-81.)
- [8] CHEN X, JIANG Z, MONAGHAN B J, *et al.* Breakaway oxidation behaviour of ferritic stainless steels at 1150 C in humid air[J]. *Corrosion Science*, 2016, 108: 11-22.
- [9] MARTINELLI L, DESGRANGES C, ROUILLARD F, *et al.* Comparative oxidation behaviour of Fe-9Cr steel in CO₂ and H₂O at 550 °C: Detailed analysis of the inner oxide layer[J]. *Corrosion Science*, 2015, 100: 253-266.
- [10] YUAN J, WANG W, ZHU S, *et al.* Comparison between the oxidation of iron in oxygen and in steam at 650-750 °C[J]. *Corrosion Science*, 2013, 75: 309-317.
- [11] ABULUWEFA H, GUTHRIE R I L, AJERSCH F. The effect of oxygen concentration on the oxidation of low-carbon steel in the temperature range 1000 to 1250 °C[J]. *Oxidation of Metals*, 1996, 46(5): 423-440.
- [12] LEE V H J, GLEESON B, YOUNG D J. Scaling of carbon steel in simulated reheat furnace atmospheres[J]. *Oxidation of metals*, 2005, 63(1): 15-31.
- [13] XIE F H, YANG H P, CAO X E, *et al.* Study on high temperature oxidation behavior of typical steel during 2 250 mm hot continuous rolling[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2019, 40(4): 164-168.
(谢凤虎, 杨会平, 曹晓恩, 等. 2 250 mm 热连轧典型钢种高温氧化行为研究[J]. *钢铁钒钛*, 2019, 40(4): 164-168.)
- [14] MEI P, BAO S Q, GONG L, *et al.* Effect of oxidizing atmosphere on scale formation of weathering steel containing Si[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(5): 180-185.
(梅鹏, 鲍思前, 龚黎, 等. 氧化气氛对含硅耐候钢氧化铁皮形成的影响[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(5): 180-185.)
- [15] YUAN X, YAO Y, CHEN L. High-temperature oxidation behavior of a high manganese austenitic steel Fe-25Mn-3Cr-3Al-0.3C-0.01N[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2014, 27(3): 401-406.
- [16] KUSABIRAKI K, WATANABE R, IKEHATA T, *et al.* High-temperature oxidation behavior and scale morphology of Si-containing steels[J]. *ISIJ international*, 2007, 47(9): 1329-1334.
- [17] WANG W, ZHAO W, MU W, *et al.* Effect of hot-rolling process on the microstructure, mechanical and corrosion behaviors of dual-phase Co-based entropic alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 918: 147433.
- [18] ZHANG R, LI Z, ZHANG Y, *et al.* Numerical simulation of multi-array spray cooling for hot rolled seamless steel pipes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 221: 125017.
- [19] ISSAARD W, NILSONTHI T. Adhesion of thermal oxide scales on hot-rolled steels with 0.026 and 0.193 wt.% Si in Ar-20% H₂O at 900 °C[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023, 77: 1149-1153.
- [20] HAO L, JIANG Z, CHEN Z, *et al.* High temperature oxidation of indefinite chill roll material under dry and humid atmospheres[J]. *steel research international*, 2016, 87(3): 349-358.
- [21] RAHMEL A, TOBOLSKI J. Einfluss von wasserdampf und kohlendioxid auf die oxydation von eisen in sauerstoff bei hohen temperaturen[J]. *Corrosion science*, 1965, 5(5): 333-346.
- [22] GONG L, BAO S Q, ZHAO G, *et al.* Study on high temperature oxidation behavior of weathering steel Q235NH[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(4): 169-174.
(龚黎, 鲍思前, 赵刚, 等. 耐候钢 Q235NH 的高温氧化行为研究[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(4): 169-174.)
- [23] HAYASHI S, SEKIMOTO T, HONDA K, *et al.* The effect of S and Mn on the high-temperature oxidation and scale spallation behavior of low-carbon steels[J]. *ISIJ international*, 2009, 49(12): 1938-1944.
- [24] AGHAEIAN S, SLOOF W G, MOL J M C, *et al.* Initial high-temperature oxidation behavior of Fe-Mn binaries in air: the kinetics and mechanism of oxidation[J]. *Oxidation of Metals*, 2022, 98(1): 217-237.
- [25] CAO G M, SHAN W C, LIU X J, *et al.* High temperature oxidation behavior of Fe-2.2%Si steel in different atmosphere[J]. *Iron and Steel*, 2022, 57(8): 132-142.
(曹光明, 单文超, 刘小江, 等. Fe-2.2%Si 钢在不同气氛下的高温氧化行为[J]. *钢铁*, 2022, 57(8): 132-142.)
- [26] SONG W, RAN C, LI Q, *et al.* Influence of humid air on the formation of pores and cracks in the scale on high-strength steel: Experimental and first-principle study[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 36: 974-983.