

· XXXX ·



海上光伏支架用 26Cr1Mo 超耐蚀铁素体不锈钢开发

邹 勇^{1,2}, 张寿禄^{1,2}, 郝文慧^{1,2}, 刘 磊^{1,2}, 王 斌^{1,2}, 裴明德^{1,2}

(1 太原钢铁(集团)有限公司先进不锈钢全国重点实验室, 太原 030003;

2 山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心, 太原 030003)

摘 要:针对海上光伏支架高盐腐蚀工况下镀锌钢材耐蚀不足、含镍不锈钢成本偏高的行业难题,设计了无镍高铬钼超低碳氮铁素体不锈钢 26Cr1Mo。通过 Cr、Mo 主耐蚀合金搭配少量 Cu 提升钝化膜稳定性,添加 Ti、Nb 稳定化元素固定钢中 C、N,有效抑制贫铬区的形成,降低不锈钢晶间腐蚀敏感性;通过“转炉、VOD 真空脱碳、LF 精炼、控温热轧与连续退火工艺”,规避 σ 、Laves、 α' 等析出相。试验确定最优退火制度为 980~1 000 °C、保温 8 min、水冷,力学性能满足抗拉强度 ≥ 550 MPa、屈服强度 ≥ 350 MPa、伸长率 $\geq 25\%$ 的设计要求。腐蚀性能测试表明,26Cr1Mo 晶间腐蚀速率仅 0.12 mm/a、模拟海水临界点蚀温度 72.4 °C、应力腐蚀试验 120 h 无裂纹。该不锈钢不含贵金属镍,在保障优异耐海水腐蚀的同时有效控制生产成本,对推进海上光伏产业发展、落实“双碳”目标具备工程价值。

关键词:海上光伏; 支架系统; 铁素体不锈钢; 耐蚀性; 清洁能源

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N260122 **中图分类号:**TG142. 7

Development of 26Cr1Mo Ultra-Corrosion-Resistant Ferritic Stainless Steel for Offshore PV Support Structures

Zou Yong^{1,2}, Zhang Shoulu^{1,2}, Hao Wenhui^{1,2}, Liu Lei^{1,2}, Wang Bin^{1,2}, Pei Mingde^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Advanced Stainless Steel, Taiyuan Iron & Steel (Group) Co., Ltd., Taiyuan 030003, China;

2 Technology Center of Shanxi Taigang Stainless Steel Co., Ltd., Taiyuan 030003, China)

Abstract: To address the industrial challenges of insufficient corrosion resistance of galvanized steel and the high cost of nickel-containing stainless steel under high-salinity corrosive conditions for offshore photovoltaic brackets, a nickel-free ferritic stainless steel, 26Cr1Mo, with ultra-low carbon and nitrogen and high chromium and molybdenum contents, is developed in this work. Cr and Mo are adopted as primary corrosion-resistant alloying elements with a small amount of Cu added to enhance the stability of passive film. The composite addition of Ti and Nb stabilizes carbon and nitrogen atoms in the steel, inhibits the formation of chromium-depleted zones along grain boundaries and reduces the intergranular corrosion susceptibility. An integrated manufacturing route including BOF, VOD, LF, temperature-controlled hot rolling and continuous annealing is applied to prevent the precipitation of brittle phases such as σ phase, Laves phase and α' phase. Heat treatment tests identify the optimal annealing schedule: water cooling after holding at 980 °C–1 000 °C for 8 min. The mechanical properties meet design targets: tensile strength ≥ 550 MPa, yield strength ≥ 350 MPa and elongation $\geq 25\%$. Corrosion tests reveal that the intergranular corrosion rate of 26Cr1Mo is only 0.12 mm/a, its critical pitting temperature in simulated seawater reaches 72.4 °C, and no cracks are observed after a 120 h stress corrosion test. Free of precious metal nickel, this steel achieves superior seawater corrosion resistance with controlled production cost. It possesses prominent engineering application value for promoting the large-scale development of offshore photovoltaic industry and achieving the goals of carbon peaking and carbon neutrality.

Key Words : Offshore PV; Support Structures; Ferritic Stainless Steel; Corrosion Resistance; Clean Energy

随着我国“碳达峰、碳中和”目标的提出,低碳新能源日益受到关注。光伏发电作为重要的可再生能源,已得到市场普遍认可。“十五五”时期是实现碳达峰目标的攻坚阶段,将会进一步推动清洁能源的高速发展。光伏发电具有绿色、低碳、安全可靠等显著优势,其全生命周期碳排放不足燃煤发

电的 10%,大力发展光伏发电意义重大^[1-2]。陆上光伏发电需要占用大量土地资源,海上光伏发电具有发电效率高、不占用土地资源等突出特点,已成为全球公认的重要应用形式。我国海岸线长,海上光伏尤其是漂浮式海上光伏具备广阔的发展前景^[3-5]。当前,海上光伏规模化发展仍面临诸多技术挑战,

作者简介: 邹 勇(1975—),男,本科,正高级工程师; **E-mail :** zouyong@baowugroup.com; **收稿日期:** 2026-08-02

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

海洋环境具有高温、高湿、高盐雾特征,叠加强紫外线、强风等严酷工况,传统镀层钢材支架耐腐蚀性不足,常规奥氏体不锈钢支架成本偏高。因此,研发超耐蚀光伏组件及支撑结构材料,保障系统长期稳定可靠运行、降低全生命周期运维成本,已成为亟待解决的关键问题。根据海上光伏支架系统服役条件和成本需求,设计了高Cr含Mo超低碳氮铁素体不锈钢,满足耐海水腐蚀性能,同时,添加适量Nb、Ti等合金元素,改善焊接性能。此外,该不锈钢不添加贵金属Ni,可降低成本。

1 材料设计与制备

针对海上光伏支架腐蚀、成形和焊接加工及经济性要求,选择了铁素体不锈钢作为研究对象。铁素体不锈钢具有优良的耐局部腐蚀性能,特别是耐氯化物应力腐蚀性能优异,并且不含或含少量镍,比含镍奥氏体不锈钢或双相不锈钢有一定的成本优势。根据海上光伏服役环境设计了26Cr1Mo铁素体不锈钢成分,并制备出4.0 mm热卷,具体工艺流程为:三脱铁水→90 t BOF顶底复吹转炉→90 t VOD真空吹氧脱碳炉→90 t LF精炼炉→1 250 mm板坯连铸→2 250 mm热连轧→连续退火酸洗线。

1.1 成分设计

海水对不锈钢主要是点蚀或缝隙腐蚀,Cr、Mo是决定耐点蚀和耐缝隙腐蚀性能的关键因素。研究表明,在海水中,提高Cr含量有助于增强不锈钢在海水环境中的耐点蚀和耐缝隙腐蚀性能。Mo元素有利于铬在钝化膜中的富集,并提高钝化膜的稳定性,从而提高不锈钢的耐蚀性能,通常Cr、Mo含量配合即可获得显著效果,过高的Mo降低材料加工性且成本高。

相关研究表明,Cu能够提高铁素体不锈钢钝化阶段的开路电位,并促进钝化膜中Cr元素富集,从而改善材料的耐蚀性能。Cr、Mo和Cu之间还可能产生协同作用,降低临界电流密度,延缓点蚀的发展。但Cu含量过高会对材料加工性能产生不利影响,同时增加合金成本,因此,需要合理控制其添加量^[6-8]。

C、N在铁素体中的固溶度较低,材料在高温加热及随后冷却过程中容易形成碳化物或氮化物,从而影响塑韧性、脆性转变温度、晶间腐蚀性能。为降低C、N的不利影响,采用Ti、Nb进行稳定化处理,使C、N优先与Ti、Nb结合形成稳定的碳氮化物,减少富Cr碳氮化物在晶界析出。Ti、Nb的复合添加能

够兼顾材料的力学性能、耐蚀性和焊接性能。根据相关研究,高铬铁素体不锈钢中(Ti+Nb)/(C+N)达到一定水平后,有利于改善材料的焊接性能^[9-10]。

在中试车间制备了不同Cr、Mo含量铁素体不锈钢热板样品,并测量其点蚀电位和大气暴晒后表面锈蚀情况,为确定海上光伏支架用铁素体不锈钢化学成分提供参考。图1为不同Cr、Mo含量的钢种(17Cr1Mo、18Cr2Mo、22Cr2Mo、26Cr1Mo)与点蚀电位的关系(GB 4334.9—84 不锈钢点蚀电位测量方法)。图2为文昌大气暴晒4年后不同Cr、Mo含量钢种表面锈蚀覆盖率。随着铬和钼含量的增加,材料点蚀电位明显提高,尤其是高铬条件下添加钼的效果更加明显,暴晒试验样品锈蚀面积大幅下降。Michio Nakata等^[11]开展的沿海暴晒结果显示,不锈钢点蚀电位800 mV以上时可阻止点蚀发生。

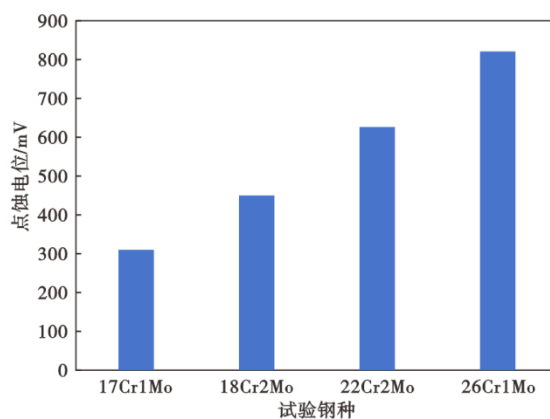


图1 铬钼含量对点蚀电位的影响

Fig. 1 Effect of Cr and Mo content on pitting potential

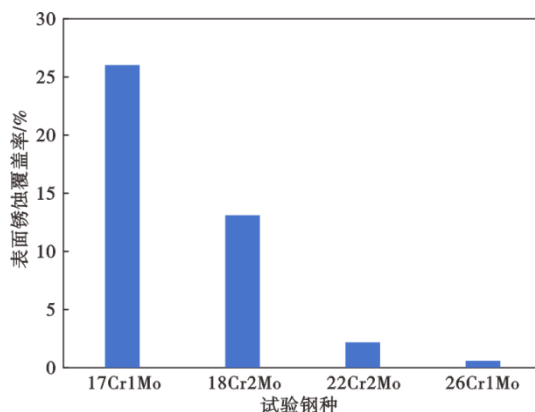


图2 不同钢种大气暴晒后表面锈蚀覆盖率

Fig. 2 Rust coverage ratio after atmospheric exposure

根据上述研究设计了试验钢种26Cr1Mo, 26Cr1Mo与对比钢S32205、445 J2成分见表1。铬、

钼元素显著降低碳氮活度系数,需采用特殊冶炼工艺才能获得极低碳氮含量,试验钢种采用了高效冶炼工艺制备出所需钢水^[12],然后通过连续浇铸获得200 mm厚连铸板坯。

1.2 热轧工艺

高铬含钼铁素体不锈钢在制造或使用过程中会析出金属间化合物,如图3所示,比如在600~900℃形成富铬钼的 σ 和 χ 相、在475℃温度附近形成富铬的 α' 、在650~750℃形成富钼或富铌Laves相(η)等。这些金属间化合物的硬度极高,导致材料硬度和强度显著升高、塑性急剧下降,同时还可能削弱耐蚀性能,影响规模化生产和使用。此外,高铬含钼铁素体不锈钢的抗氧化性极好,在铸坯加热和轧制过程中性能的氧化层薄,钢板基体与轧辊易发生黏结,且铁素体不锈钢高温强度低,导致热轧表面缺陷。研究表明^[13-15],热轧加热温度、轧辊材质、轧制温度及卷取温度对铁素体不锈钢尤其是高铬含钼铁素体不锈钢至关重要,需严格控制热轧参数避免金属间化合物析出、不锈钢基体与轧辊粘结,从而保证高铬含钼铁素体不锈钢的热卷性能和表面质量。针对高铬含钼铁素体在热轧过程中金属间化合物控制的难点,通过铸坯加热温度、粗轧温度、终轧温度及卷取温度设计^[16],在2 250 mm热连轧机上生产出4 mm厚热卷,具体热轧工艺见表2。

1.3 退火工艺

退火温度是影响铁素体不锈钢再结晶行为、晶粒尺寸和力学性能的重要工艺参数。对于26Cr1Mo钢,Ti、Nb主要通过形成碳氮化物影响再结晶过程和晶界迁移。尺寸较大的析出物能够在变形组织中促进再结晶形核,而细小弥散的析出物则会对晶界和亚晶界产生钉扎作用,延缓晶粒长大。固溶状态的Nb、Ti还会抑制晶界迁移,其中,Nb的作用通

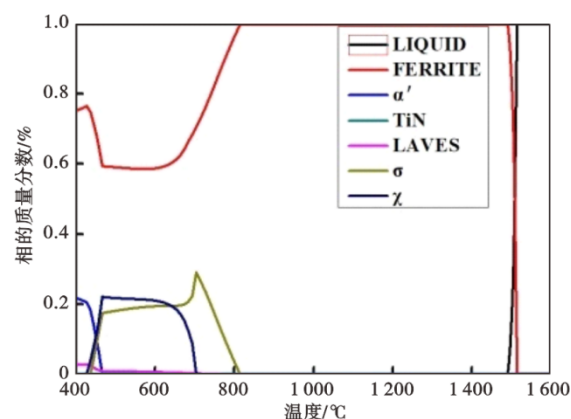


图3 26Cr1Mo不锈钢Thermo-calc计算相图

Fig. 3 Thermo-calc phase diagram of 26Cr1Mo stainless steel

常强于Ti。TiN颗粒尺寸相对较大,对再结晶的阻碍作用较弱。因此,退火制度需要在促进组织充分再结晶和避免晶粒过度长大之间取得平衡。

在箱式电阻炉内对26Cr1Mo不锈钢4.0 mm热轧态样品进行了900~1 060℃温度、相同时间(2 min/mm)的热处理,出炉后水冷,模拟大生产连续退火工艺。拉伸试验在ZWICK 10吨拉伸机上按照GB/T 228.1—2021标准进行,结果见表3。根据实验室热处理样品力学性能结果,确定了大生产连续退火工艺,板温980~1 020℃、保温8 min,并获得4.0 mm退火态热卷。

2 试验结果与分析

2.1 退火温度对组织的影响

图4为热轧态和退火态金相组织。热轧态除了最表层有极少量动态再结晶小晶粒外,整个组织呈现变形纤维状,900℃退火表层已经再结晶,1/4处有少量再结晶晶粒,板厚中心依然处于变形纤维状态。940℃退火再结晶已经很明显,980℃退火整个试样基本完全再结晶,此后随着温度提升,再结晶晶粒尺寸逐渐增大,如图5所示。板厚方向观察,表

表1 试验用不锈钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of the test stainless steels											%
钢种	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Ti+Nb	Cu	N
26Cr1Mo	0.011	0.20	0.30	0.025	0.001	26.5	1.2	—	0.40~0.50	0.45~0.55	0.012
S32205	0.015	0.50	1.50	0.026	0.001	22.4	3.1	5.1	—	—	0.18
445 J2	0.010	0.15	0.12	0.023	0.001	22.1	1.8	—	0.50	0.12	0.013

表2 26Cr1Mo不锈钢热轧工艺

Table 2 Hot rolling process of 26Cr1Mo stainless steel							℃
入炉温度	预热段	加热1段	加热2段	均热段	粗轧温度	精轧温度	卷取温度
≥150	≤700	1 000~1 050	1 160~1 200	1 240~1 260	1 160~1 200	920~1 060	≤450

表3 26Cr1Mo不锈钢4 mm热板热处理试验

Table 3 Hot treatment test of 26Cr1Mo stainless steel 4 mm hot-rolled plate

序号	热处理温度/℃	保温时间/min	冷却方式	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
1	900	8		650	480	16
2	940	8		620	440	25
3	980	8	水冷	590	390	31
4	1020	8		580	370	30
5	1060	8		550	360	28

层晶粒尺寸明显小于中心晶粒。图6为EBSD测试晶粒统计结果,随着退火温度的升高,平均晶粒尺寸在增加,板厚中心从900℃的17 μm升高到1060℃的52 μm。经SEM分析,样品中有较多的凝固过程中形成的尺寸较大的TiN及热轧过程中形成的尺寸较小的(Nb,Ti)C析出相,退火后TiN无变化、(Nb,Ti)C直到1060℃依然存在,未观察到 σ 、 α' 、Laves(η)等脆性相析出,如图7所示。

2.2 耐蚀性能研究

海上光伏支架系统主要关注不锈钢材料的耐

点蚀性能、晶间腐蚀性能及应力腐蚀性能是否满足服役条件。参照ASTM A763 Y法,在沸腾的Cu-CuSO₄-50%H₂SO₄溶液中煮沸120 h,然后分析失重并进行显微观察;在特定阳极电位下,将试样置于模拟海水溶液中,测定临界点蚀温度(CPT);在25%NaCl-0.38%Na₂SO₄-0.15%CaCl₂-0.03%MgCl₂模拟海水溶液中沸腾72 h后,分析其失重率;参照ASTM G36标准,将预U弯试样浸入沸腾的42%MgCl₂溶液中120 h,然后观察表面是否出现裂纹以及裂纹形貌。

26Cr1Mo钢表现出优异的抗晶间腐蚀性能,腐蚀速率仅为0.12 mm/a左右,腐蚀形态为均匀的浅表腐蚀,晶界未呈现沟状腐蚀特征,26Cr1Mo、S32205、445 J2钢晶间腐蚀形貌分别如图8(a)(b)(c)所示,腐蚀率如图8(d)所示。与之形成鲜明对比的是,S32205双相不锈钢的腐蚀速率高达0.45 mm/a,约为26Cr1Mo钢的4倍,显示出典型的晶间腐蚀特征,26Cr1Mo不锈钢所表现出的优异抗晶间腐蚀性能,主要归因于其独特的成分设计与微观结构:超低碳

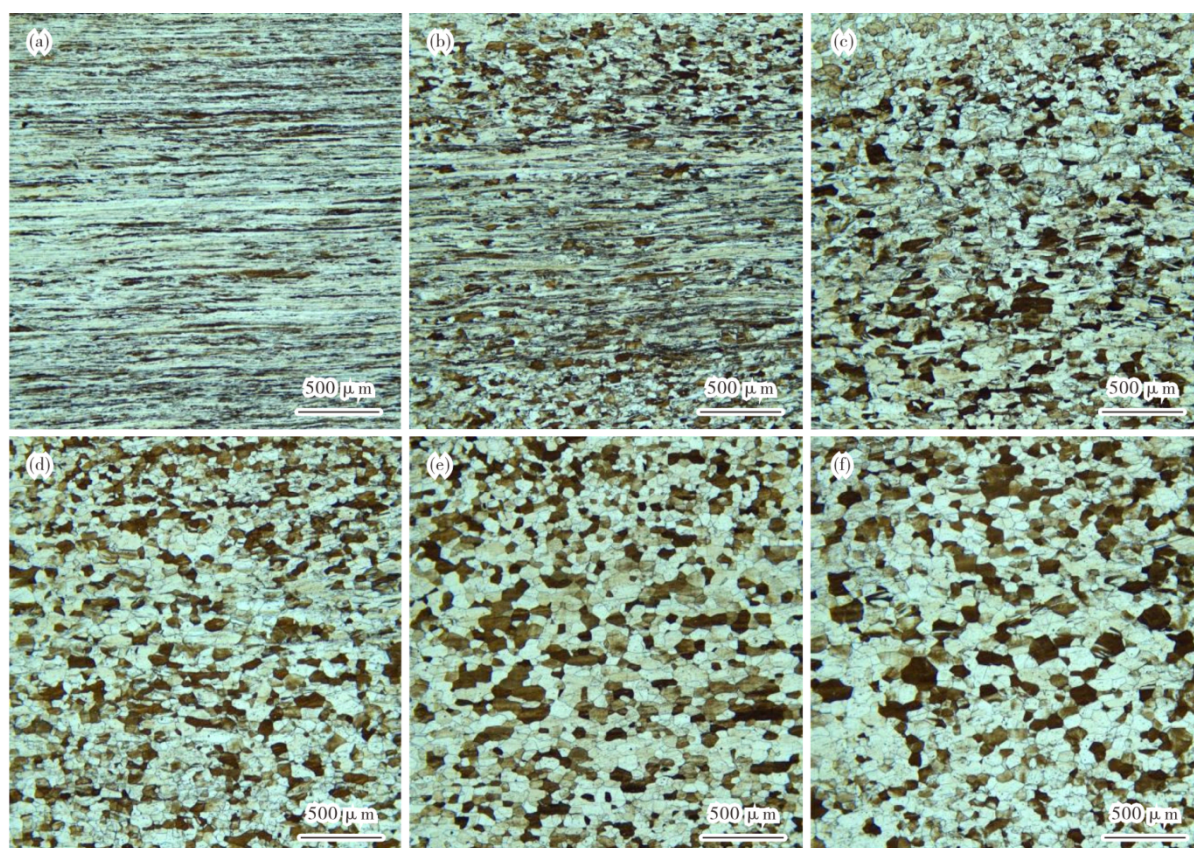


图4 26Cr1Mo不锈钢4 mm热轧态及不同退火温度下的金相显微组织图:(a) 热轧态,(b) 900℃,(c) 940℃,(d) 980℃,(e) 1020℃,(f) 1060℃

Fig. 4 Metallographic microstructures of 4 mm hot-rolled 26Cr1Mo stainless steel annealed at different temperatures:(a) as-rolled, (b) 900℃, (c) 940℃, (d) 980℃, (e) 1020℃, (f) 1060℃

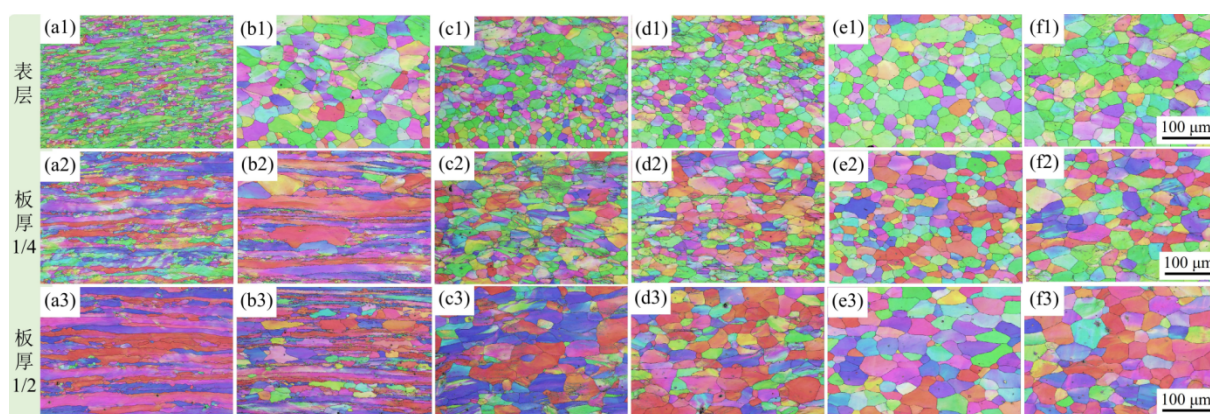


图5 26Cr1Mo 不锈钢 4 mm 热轧态及退火态样品 EBSD 分析: (a1-a3) 热轧态, (b1-b3) 900 °C, (c1-c3) 940 °C, (d1-d3) 980 °C, (e1-e3) 1020 °C, (f1-f3) 1060 °C

Fig. 5 EBSD analysis of 4 mm 26Cr1Mo stainless steel in hot-rolled and annealed conditions: (a1 - a3) as-rolled, (b1 - b3) 900 °C, (c1 - c3) 940 °C, (d1 - d3) 980 °C, (e1 - e3) 1020 °C, (f1 - f3) 1060 °C

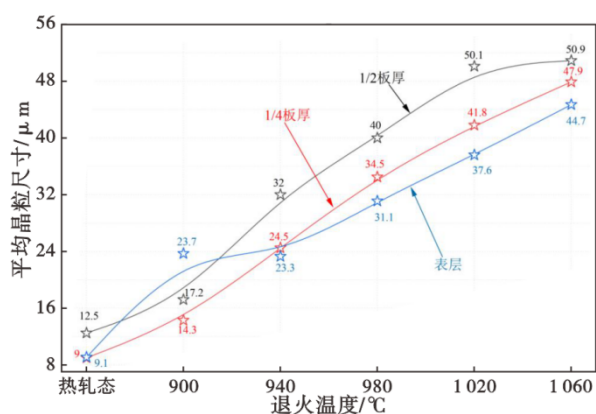


图6 退火温度对 26Cr1Mo 不锈钢 4 mm 热板晶粒尺寸的影响

Fig. 6 Effect of annealing temperature on grain size of 4 mm hot-rolled 26Cr1Mo stainless steel plate

含量与稳定化元素,极低的碳含量限制了碳铬化物在晶界析出的驱动力;稳定化元素 Nb 和 Ti 优先与 C 或 N 结合,从而“固定”住碳氮原子,避免了铬的碳氮

化物在晶界形成,有效消除了导致晶间腐蚀敏感性的贫铬区^[17];26Cr1Mo 不锈钢的铬含量高,并添加钼元素,同时采用快速冷却工艺,进一步增强了材料的耐晶间腐蚀性能。

临界点蚀温度是评价材料抗点蚀能力的重要参数^[18-19],模拟海水测试结果表明,S32205 双相的 CPT 值始终稳定地比 26Cr1Mo 不锈钢高约 5 °C,如图 9(a)所示,这与二者的 PREN 差值相符。从工程应用的角度考虑,CPT 的绝对值与实际环境温度的差值(安全裕度)更为关键。在模拟海水、300mV(vs.OCP)这一更接近真实海水成分和使用电位的测试条件下,26Cr1Mo 不锈钢的 CPT 高达 72.4 °C。鉴于实际海域水温远低于此温度值,26Cr1Mo 不锈钢在实际环境中对抗点蚀能力具有超过 30 °C 的安全裕度,对于海上光伏支架的应用环境而言是完全充足的。虽然 S32205 双相不锈钢的 CPT 更高(77 °C),但两者所提供的巨大安全

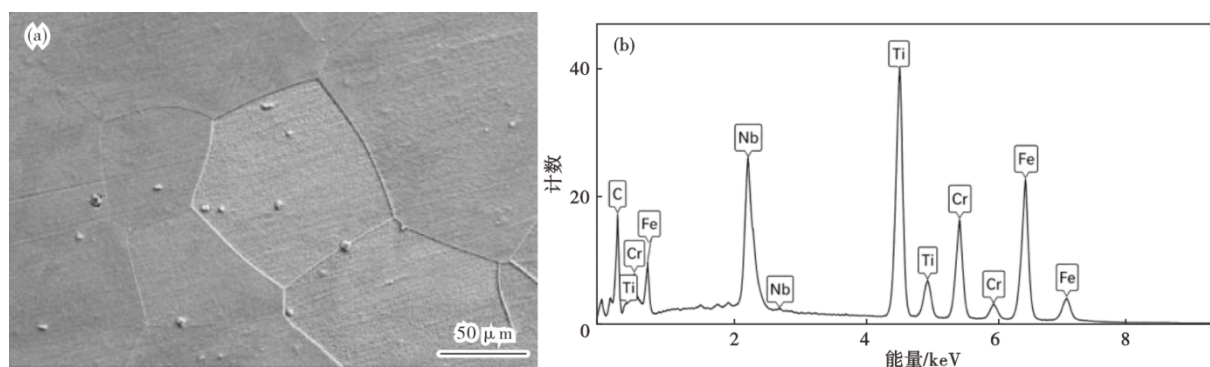


图7 26Cr1Mo 不锈钢 4 mm 热板析出相的扫描电镜图片及能谱分析: (a) 1060 °C 退火态, (b) 能谱分析

Fig. 7 SEM images and EDS analysis of precipitated phases in 4 mm hot-rolled 26Cr1Mo stainless steel plate: (a) annealed, at 1060 °C, (b) EDS analysis

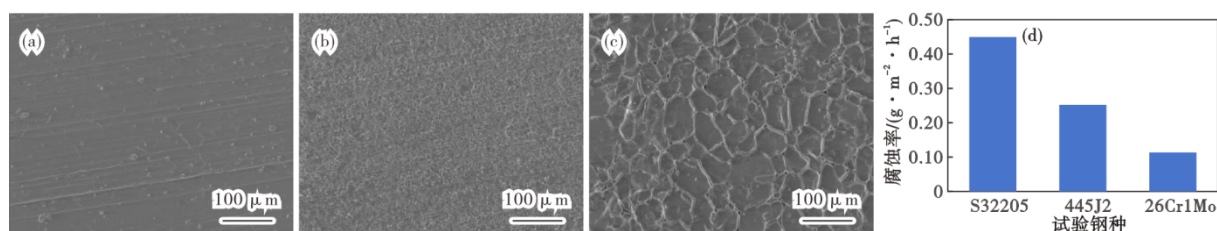


图8 晶间腐蚀形貌及腐蚀率: (a) 26Cr1Mo, (b) S32205, (c) 445 J2, (d) 腐蚀率

Fig. 8 Intergranular corrosion morphologies and corrosion rate: (a) 26Cr1Mo, (b) S32202, (c) 445 J2, (d) corrosion rate

裕度均能满足工程需求。另外,通过模拟海水加速试验,溶液为 25%NaCl-0.38%Na₂SO₄-0.15%CaCl₂-0.03%MgCl₂,沸腾 72 h 后, S32205 和 26Cr1Mo 不锈钢表面均无明显腐蚀坑, 腐蚀率极低, 如图 9(b) 所示。

应力腐蚀开裂(SCC)是金属在应力和特定腐蚀环境协同作用下发生的脆性断裂,因其突发性与灾难性,成为海洋工程结构最致命的失效形式之一^[20]。海水光伏支架系统面临高盐、高湿环境及结构自重、安装预应力、风浪等应力,需要材料具有极高的抗应力腐蚀能力。本研究对 26Cr1Mo 和 S32205 在极端氯化物环境中的抗 SCC 性能进行了对比评价。试验结果如图 10 所示,两种材料在高浓

度氯化物环境下截然不同的 SCC 敏感性。26Cr1Mo 不锈钢试样在经历 120 h 的持续试验后,其 U 弯表面保持完好,如图 10(a) 所示,未观察到任何裂纹,表现出卓越的抗应力腐蚀开裂能力。S32205 双相不锈钢发生了明显的应力腐蚀,如图 10(b) 和图 10(c) 所示,试样表面可观察到多条清晰的裂纹,呈现出典型的应力腐蚀特征。

3 结论

1) 针对海上光伏支架高盐腐蚀工况下镀锌钢材耐蚀不足、含镍不锈钢成本高的痛点,设计并成功试制 26Cr1Mo 铁素体不锈钢,采用“转炉-VOD-LF-热连轧-连续退火”全流程工业化工艺,制备出 4 mm 热卷。

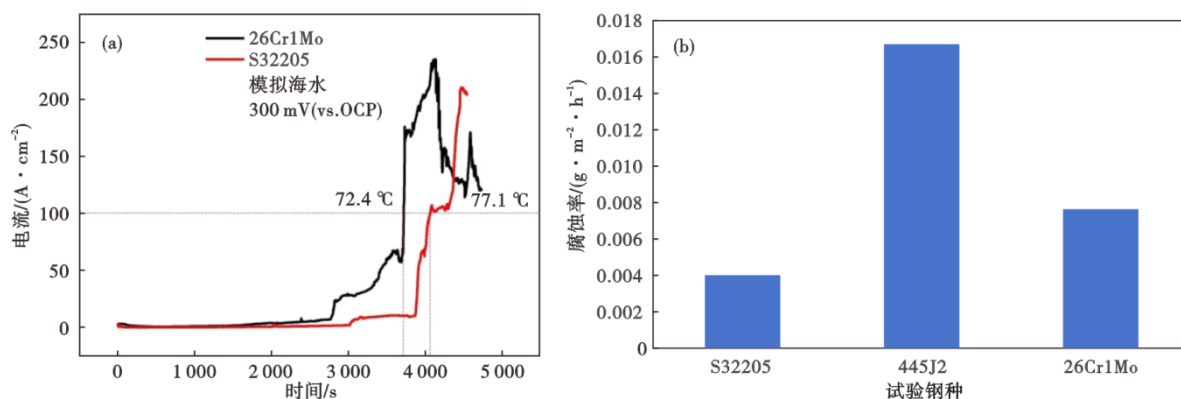


图9 26Cr1Mo 不锈钢耐点蚀性能: (a) 模拟海水, 300 mV (vs. OCP); (b) 点蚀腐蚀率

Fig. 9 Pitting corrosion resistance of 26Cr1Mo stainless steel: (a) simulated seawater, 300 mV (vs. OCP); (b) pitting corrosion rate



图10 应力腐蚀宏观与微观形貌: (a) 26Cr1Mo, (b) S32205, (c) S32205 微观形貌

Fig. 10 Macroscopic and microscopic morphology of SCC: (a) 26Cr1Mo, (b) S32205, (c) microscopic morphology of S32205

2)26Cr1Mo铁素体不锈钢最优连续退火工艺为980 ~ 1 000 °C、保温8 min、水冷,材料抗拉强度 ≥ 550 MPa、屈服强度 ≥ 350 MPa、断后伸长率 $\geq 25\%$,组织中仅存在TiN、(Nb,Ti)C稳定析出相,无 σ 、Laves、 α' 等有害脆性相。

3)腐蚀性能测试表明,26Cr1Mo铁素体不锈

钢晶间腐蚀速率仅0.12 mm/a,模拟海水临界点蚀温度达72.4 °C,120 h应力腐蚀试验无裂纹。26Cr1Mo抗海上腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀开裂性能突出,不含贵金属镍,满足海洋光伏支架系统的服役要求,对推进海上光伏产业发展、落实“双碳”战略具备工程价值。

参考文献

- [1] 彭孝仁. 中国光伏行业发展前景及用钢需求分析[J]. 冶金信息导刊, 2025, 62(4): 1-4.
- [2] 姜冠男. 我国海上光伏产业现状及发展趋势分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(1): 77-79.
- [3] 王天宇. 海上光伏发展现状及开发前景展望[J]. 船舶标准化与质量, 2024(5): 24-33.
- [4] 刘 骁, 贾志军. 海上光伏的腐蚀破坏与防护措施[J]. 环境技术, 2024, 42(3): 38-41.
- [5] 李东侠, 罗梦妍, 徐卫兵, 等. 海上光伏与海洋牧场融合发展路径策略研究[J]. 西北水电, 2025(4): 14-17+62.
- [6] Oguzie E E, Li J B, Liu Y Q, et al. The effect of Cu addition on the electrochemical corrosion and passivation behavior of stainless steels[J]. Electrochimica Acta, 2010, 55(17): 5028-5035.
- [7] 李 阳, 陈常勇, 方 勇, 等. Cu对含Sn铁素体不锈钢的力学及耐腐蚀性能的影响[J]. 特殊钢, 2024, 45(3): 49-55.
- [8] 邹 勇. TTS443高铬铁素体不锈钢的开发[J]. 特殊钢, 2012, 33(1): 51-53.
- [9] 张晶晶, 段秀峰, 李国平. 热输入对S43932超纯铁素体不锈钢焊接接头组织性能的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(6): 72-76.
- [10] 张 伟, 郭爱民, 付俊岩. 现代含铌不锈钢——如何用铌改善不锈钢的性能[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2025.
- [11] Michio Nakata, Toshiro Nishimura, Kazuhiro Yanai et al. Development of Ferritic Stainless Steel YUS220M with High Corrosion Resistance for Architectural Use[J]. Nippon Steel Technical Report, 1996, 10(71): 31 ~ 34.
- [12] 邹 勇, 孙铭山. 85 t VOD精炼超纯铁素体不锈钢的脱氮工艺及效果[J]. 特殊钢, 2009, 30(6): 39-41.
- [13] Zhang C, Liu Z Y, Xu Y, et al. The sticking behavior of an ultra purified ferritic stainless steel during hot strip rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(11): 2183-2192.
- [14] Jin W, Choi J Y, Lee Y Y. Nucleation and growth process of sticking particles in ferritic stainless steel[J]. ISIJ International, 2000, 40(8): 789-793.
- [15] Ha D J, Son C Y, Park J W, et al. Effects of high-temperature hardness and oxidation on sticking phenomena occurring during hot rolling of two 430 J1L ferritic stainless steels [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 492(1-2): 49-59.
- [16] 邹 勇, 武 敏, 张晶晶, 等. 一种高铬含钼铁素体不锈钢的热连轧方法: CN114749485B[P]. 2024-05-03.
- [17] 李伟峰, 张天理, 徐连勇, 等. 合金元素对汽车排气系统用铁素体不锈钢抗高温氧化和耐腐蚀影响的研究进展[J]. 材料导报, 2025, 39(16): 188-197.
- [18] 廖柯熹, 曹增辉, 贺站锋. 氯离子对316L不锈钢临界点蚀温度的影响[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(6): 446-448+455.
- [19] 刘 骛, 程从前, 李会芳, 等. 2205双相钢临界点蚀温度测量方法的比较[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(5): 419-423.
- [20] 陈晓华, 满 成, 甄永泰, 等. 海上光伏关键结构的腐蚀与防护综述[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2026, 46(2): 315-326.