

不锈钢包钢焊缝区的腐蚀失效行为研究

裴锋^{1,*}, 贾璐路¹, 刘书君², 顾兴杭², 周良军³

1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096

2. 南昌航空大学, 江西 南昌 330063

3. 青岛雷克石电力科技有限公司, 山东 青岛 266000

摘要: [目的] 不锈钢包钢复合材料在接地工程中应用广泛, 但其焊缝区的腐蚀失效是影响构件寿命的主要隐患, 因此要通过可靠的方法对焊缝区的腐蚀失效行为进行研究。[方法] 采用扫描电镜、显微硬度计、电化学工作站等手段, 对比分析焊缝区与非焊缝区的微观组织、显微硬度及电化学腐蚀行为。[结果] 不锈钢包钢由母材区、热影响区(HAZ)和焊缝区3个典型区域构成。焊缝热影响区存在晶粒粗化及晶界铬元素贫化现象, 显微硬度显著高于母材。电化学测试表明, 去除腐蚀产物后焊缝区的本征电荷转移电阻比母材低5个数量级, 腐蚀电流密度较母材高2个数量级。点蚀试验与酸性氯化物加速腐蚀试验进一步证实, 腐蚀优先发生在焊缝区并快速发展为宏观裂纹。[结论] 本研究证明了焊缝区是不锈钢包钢构件的腐蚀薄弱部位, 对该类材料的耐久性评价与工程应用具有一定的指导意义。

关键词: 不锈钢包钢; 焊缝; 腐蚀; 性能评价; 电化学测试; 点蚀

中图分类号: TG172

文献标志码: A

文章编号: 1004-227X(2026)02-0043-09

Corrosion failure behavior in the weld zone of stainless steel-clad steel

PEI Feng^{1,*}, JIA Lulu¹, LIU Shujun², GU Xinghang², ZHOU Liangjun³

1. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330096, China

2. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

3. Qingdao Lakestone Electric Power Technology Co., Ltd., Qingdao 266000, China

Abstract: [Objective] Stainless steel-clad steel composite materials are widely used in grounding engineering, but the corrosion failure in its weld zone remains a critical threat to the service life of components. Therefore, it is necessary to study the corrosion failure behavior of the weld zone using reliable methods. [Method] The microstructure, hardness, and electrochemical corrosion behavior of the weld zone and non-weld zone were compared and analyzed using scanning electron microscope (SEM), microhardness tester, and electrochemical workstation. [Result] The stainless steel-clad steel consists of three typical regions such as the base metal zone, the heat-affected zone (HAZ), and the weld zone. Grain coarsening and chromium depletion at grain boundaries were observed in the HAZ, where the microhardness was significantly higher than that of the base metal. Electrochemical tests revealed that after corrosion product removal, the intrinsic charge transfer resistance of the weld zone was five orders of magnitude lower than that of the base metal, while the corrosion current density was two orders of magnitude higher. Pitting corrosion tests and accelerated corrosion experiments in acidic chloride solutions further confirmed that corrosion preferentially initiates in the weld zone and rapidly develops into macroscopic cracks. [Conclusion] This study demonstrates that the weld zone is the corrosion-vulnerable region in stainless steel-clad steel components, providing valuable insights for durability assessment and engineering applications of such materials.

Keywords: stainless steel-clad steel; weld; corrosion; performance evaluation; electrochemical testing; pitting

接地装置是电力系统、建筑设施及通信设备中不可或缺的重要组成部分, 其主要功能是为故障电流、雷电流等提供可靠的低阻抗泄流通路, 从而保障设备安全稳定运行和人身安全。接地装置的长期稳定性和服役寿命直接取决于接地材料的耐腐蚀性能。接地材料的腐蚀主要表现为电化学腐蚀, 而土壤中的腐蚀受土壤含水率、pH、可溶性盐含量等因素的影响^[1-2]。在复杂的土壤腐蚀环境中, 接地材料的腐蚀会导致

收稿日期: 2025-10-28 **修回日期:** 2025-12-17

基金项目: 国网江西省电力有限公司重点科技项目(521820250008)。

通信作者: 裴锋(1978-), 男, 正高级工程师, 研究方向为电力设备的腐蚀与防护研究。

引用格式: 裴锋, 贾璐路, 刘书君, 等. 不锈钢包钢焊缝区的腐蚀失效行为研究[J]. 电镀与涂饰, 2026, 45(2): 43-51.

PEI F, JIA L L, LIU S J, et al. Corrosion failure behavior in the weld zone of stainless steel-clad steel [J]. Electroplating & Finishing, 2026, 45(2): 43-51.

其有效截面积减小、接地电阻增大,甚至造成断裂,严重威胁整个系统的安全^[3-4]。故接地材料必须具有较高的机械强度和优良的耐蚀性。

目前,工程中常用的接地材料主要包括镀锌钢、碳钢、铜、不锈钢及其复合材料^[5-6]。铜材依据成分与组织不同可分为紫铜和黄铜。紫铜具有良好的导电性和耐蚀性,在碱性土壤中其表面可钝化形成均匀致密的棉絮状腐蚀产物,有效隔离腐蚀性离子及抑制氧扩散,从而对基体金属起到一定的保护作用^[7]。黄铜处于电阻率高、含硫化物或酸性物质的土壤环境中时易发生电化学腐蚀,其腐蚀产物可能会污染土壤及地下水^[8]。此外,我国铜材资源相对匮乏,大规模使用会增加成本和加剧资源依赖。传统的接地材料以碳钢和镀锌钢为主,但二者均存在一定的局限性。镀锌钢虽成本低,但与铜材相比导电性较差,且埋地后镀锌层容易发生腐蚀,腐蚀产物疏松、易剥落,使裸露钢材快速腐蚀,面临“短期失效”的问题,尤其是在高电压及强腐蚀性环境中使用时,存在局部锈蚀问题,严重威胁电网运行安全^[9-10]。碳钢具有优良的加工性能及高机械强度,但耐蚀性较差,在腐蚀性土壤中的服役寿命短,需频繁更换,长期维护成本高^[11-12]。304 不锈钢作为一种高铬镍合金,相比于其他接地材料具有较好的耐蚀性,因而应用较为广泛,但其在含氯离子土壤中易发生局部腐蚀,且成本高、导电性较差^[13]。

不锈钢包钢复合材料是一种新型的接地材料,这类复合材料通常采用焊接的方式制备而成,将高导电的碳钢芯与高耐蚀的不锈钢外层相结合,理论上兼具碳钢的优良导电性、低成本及不锈钢的优良耐腐蚀性能^[14-15]。不锈钢包钢的弹性模量、屈服强度和极限强度介于碳钢和不锈钢之间,延伸率则显著高于碳钢,断裂界面无分层^[16]。然而,焊接过程引入的剧烈热循环极易改变材料原始的微观组织与化学成分,导致其耐腐蚀性能显著降低。大量工程实践表明,腐蚀失效往往始于焊缝、热影响区(heat-affected zone,简称 HAZ)等位置,但其背后的微观机理与性能退化程度有待进一步研究。

目前,尽管已有研究关注焊接接头的腐蚀行为,但多数工作仅停留在宏观现象观察或单一性能测试,缺乏从微观组织到宏观性能,再与模拟服役环境相关联的完整证据链。特别是对于包钢这种异材复合结构,焊缝区的性能突变及其对整体构件安全性的影响尚未得到充分阐释。因此,本研究以典型不锈钢包钢焊缝为研究对象,通过一套系统的实验方案,论证焊缝是整个构件的性能短板。先对焊缝区域的微观组织不均匀性及成分变化进行表征,再通过对比母材、热影响区与焊缝金属的硬度及电化学响应,对比其性能差异。最后,结合点蚀情况与模拟工况试验,评估其实际失效风险。本研究可为优化焊接工艺、提升包钢构件服役可靠性提供理论与实验依据。

1 实验

1.1 材料

碳钢棒直径为 10 mm,不锈钢包覆层厚度为 0.5 mm,将不锈钢紧密包覆在碳钢表面,而后通过激光焊接进行封闭,接着对不锈钢包覆层表面进行抛光处理,处理后的焊缝肉眼不可见。截取若干 3 cm 长的小段上述棒材,用于点蚀试验、电化学测试及微观形貌表征。

1.2 样品表面形貌和硬度分析

先对不锈钢包钢试样进行电解抛光,接着用 33 g/L FeCl_3 + 300 mL/L 盐酸的金相腐蚀液处理 10 s,然后洗净并吹干,备用。

采用 MIT 系列金相显微镜(重庆奥特光学仪器有限公司)观察包钢表面焊缝及基材的组织结构,采用美国 FEI Nova Nano SEM450 扫描电镜(SEM)分析包钢试样焊缝及基体的微观形貌,并用 SEM 搭载的能量谱仪(EDS)分析试样表面的元素组成。

采用 MHVS-1000M 显微硬度计(莱州莱洛特试验仪器有限公司)检测试样焊缝、热影响区和母材区的显微硬度,载荷为 500 g,加载时间为 10 s,每个区域测 6 个点,取平均值。

1.3 电化学测试

电化学测试在 RST5000 电化学工作站(郑州市世睿思仪器科技有限公司)上进行,电解液为 3.5%的 NaCl 溶液。采用标准三电极体系,辅助电极为铂(Pt)电极,参比电极为饱和甘汞电极(SCE),工作电极为

未腐蚀或经腐蚀处理的包钢试样,通过微区腐蚀笔来辅助测试,测试区域为焊缝区和非焊缝区,测试面积均为 1.5 mm^2 。

动电位极化曲线测试的扫描范围为 $-0.3 \sim 1.5 \text{ V}$ (相对于开路电位),扫描速率为 10 mV/s ,取样间隔为 10 mV 。分别对 3 组不同状态的工作电极进行测试: 1) 表面抛光处理的包钢电极; 2) 在 $1 \text{ mol/L NaCl} + 0.1 \text{ mol/L HCl}$ 溶液中浸泡 24 h 后清洁表面的包钢电极; 3) 按照方法 2) 进行处理,再参照 GB/T 16545-1996《金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除》去除表面腐蚀产物后的包钢样品。

电化学阻抗谱测试的频率为 100 kHz 至 0.01 Hz ,交流激励信号幅值为 5 mV 。分别对两组不同状态的工作电极进行测试: 1) 在 $1 \text{ mol/L NaCl} + 0.1 \text{ mol/L HCl}$ 溶液中浸泡 24 h 后清洁表面的包钢电极; 2) 在按照方法 1) 进行腐蚀处理,并参照 GB/T 16545-1996 去除包钢样品表面腐蚀产物的包钢样品。

1.4 点蚀敏感性评价

点蚀是不锈钢在含氯离子环境中最常见的局部腐蚀形式,也是评估其服役可靠性的关键。点蚀试验参照 ASTM G48-11 (R2020) 标准进行,主要操作步骤如下: 先对试样进行电解抛光处理,然后用丙酮超声清洗、无水乙醇脱水、冷风吹干; 将试样放入 $6\% \text{ FeCl}_3$ 溶液中,确保液面至少高于试样上端面 10 mm ,在 22°C 恒温条件下浸泡 24 h。试验结束后,取出试样,用去离子水轻轻冲洗。用 SN-60FCL 光学显微镜(深圳市深视智能科技有限公司)观察试样的形貌,并记录腐蚀产物的分布及点蚀情况,对比母材、热影响区和焊缝金属 3 个区域腐蚀形貌的差异,初步判断腐蚀优先发生的位置。采用金相显微镜放大 50 倍对整个试样表面进行扫描,拍摄全景照片,用于后续的点蚀密度统计。由于本研究所选材料的焊缝宽度非常小,热影响区宽度约为 2 mm ,因此将焊缝和热影响区的点蚀坑合并讨论。

1.5 加速腐蚀试验

在 $2\% \text{ FeCl}_3 + 0.5 \text{ mol/L HCl}$ 溶液中进行不锈钢焊缝的加速腐蚀试验,每隔 2 h 取出试样,观察焊缝表面的腐蚀程度,记录焊缝区出现宏观可见的裂纹或严重开裂的时间。

2 结果与讨论

2.1 不同区域的微观组织与成分分析

图 1 所示为样品焊缝横截面的金相照片,从中明显可见 3 个典型区域: 母材区、热影响区和焊缝区。如图 1a 和图 1c 所示,母材为均匀的等轴奥氏体晶粒。从图 1b 和图 1d 可见,热影响区存在明显的晶粒粗化现象,形成了宽度为 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 的粗晶区; 焊缝区则呈现典型的定向凝固柱状晶组织,且有明显缺陷。

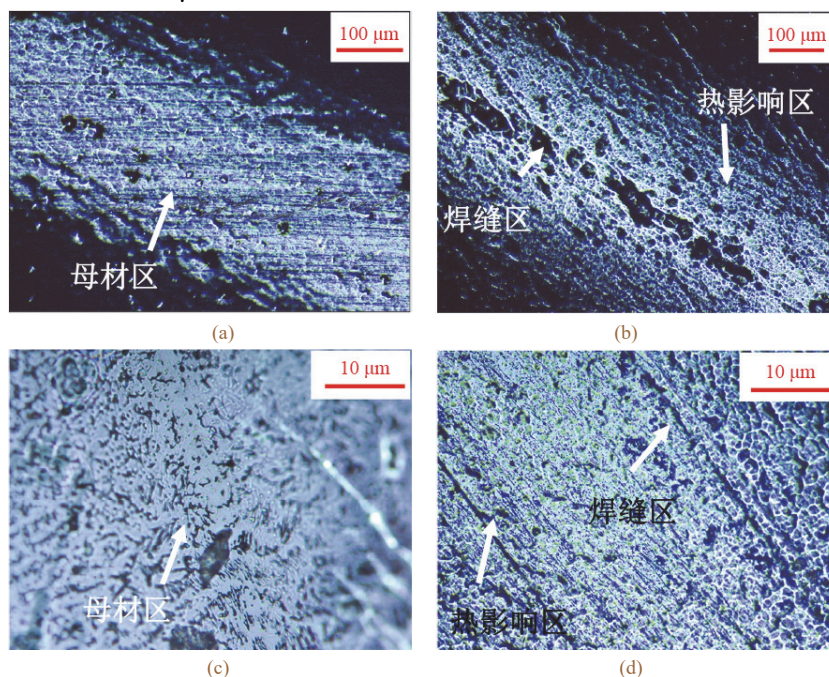


图 1 不锈钢包钢表面非焊缝区(a、c)和焊缝区(b、d)的金相组织

Figure 1 Metallographic structure of non-weld zone (a, c) and weld zone (b, d) on surface of stainless steel-clad steel

采用扫描电镜和能谱仪对包钢的表面形貌和元素组成进行分析,结果如图2和表1所示。从EDS结果可知,焊缝和热影响区的Cr质量分数约为14%,低于母材的Cr质量分数(约18%),形成了显著的“铬贫化区”。这可能是因为在焊接过程中,铬碳化物在晶界优先析出,消耗了基体中的Cr元素。

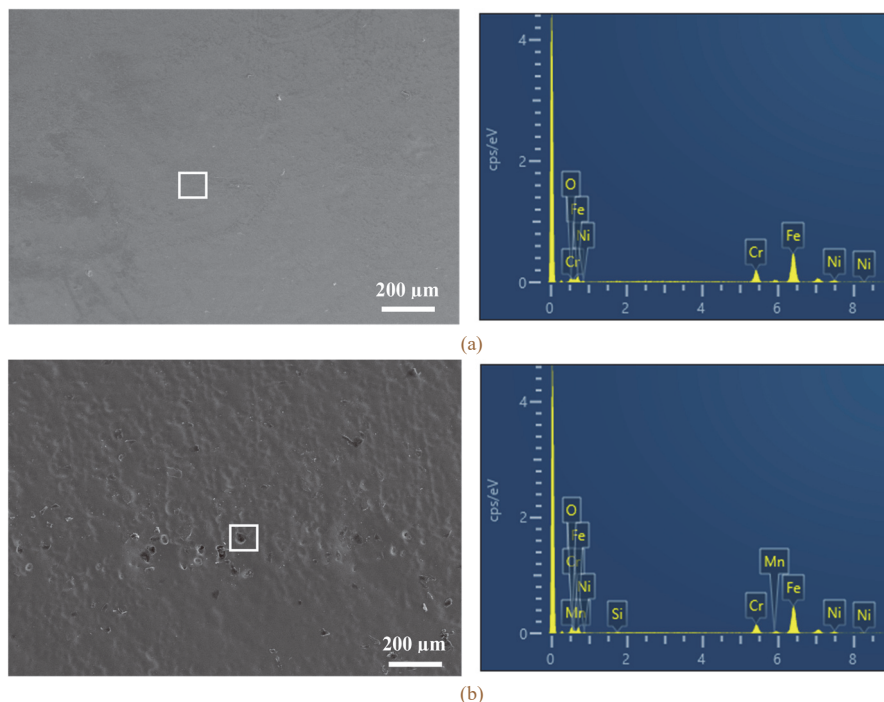


图2 不锈钢包钢样品非焊缝区(a)和焊缝区(b)的SEM图像及EDS谱图

Figure 2 SEM images and EDS spectra of non-weld zone (a) and weld zone (b) on stainless steel-clad steel

表1 不锈钢包钢不同区域的元素组成

Table 1 Elemental composition in different regions of stainless steel-clad steel

区域	$w(\text{Fe})/\%$	$w(\text{Cr})/\%$
非焊缝区	72.35	18.01
焊缝区	71.02	14.01

显微硬度测试结果显示,HAZ区和母材的显微硬度分别约为220HV和180HV,前者的显微硬度较高,这进一步印证了热影响区组织的不均匀性。这种硬化现象与晶界碳化物的析出和晶粒粗化密切相关,不仅导致力学性能突变,还会增大材料的应力腐蚀开裂敏感性。

2.2 不同区域的电化学腐蚀行为对比

2.2.1 动电位极化曲线分析

图3示出了未腐蚀和浸泡腐蚀24h试样不同区域在3.5%NaCl溶液中的动电位极化曲线,相关拟合参数列于表2。未腐蚀试样焊缝区与非焊缝区的电化学行为呈现出明显差异。焊缝区的腐蚀电位(-0.074V)比非焊缝区的腐蚀电位(-0.17V)更正,但其腐蚀电流密度($2.60 \times 10^{-5}\text{A/cm}^2$)约为非焊缝区($9.27 \times 10^{-6}\text{A/cm}^2$)的2.8倍。在热影响区,有活性的“铬贫化”晶界(阳极)与保持钝态的晶粒内部(阴极)在微观上构成了数个微电偶对,由于阴极的面积在测试区域内占比大,因此测得的电位偏正。同时,阴极产生的电流较大,孤立的阳极晶界发生溶解的电流密度也就更高,因此腐蚀电流密度更高,这意味着不锈钢焊缝区域可能会发生晶间腐蚀或点蚀^[17]。此结果初步证明,焊接工艺可能会对构件的长期耐腐蚀性能产生不利影响。

经24h浸泡后,非焊缝区的腐蚀电位负移至 -0.29V ,腐蚀电流密度小幅上升至 $3.75 \times 10^{-5}\text{A/cm}^2$ 。表明非焊缝区表面可能形成了导电性较差的致密腐蚀产物膜。该膜层能够在一定程度上抑制阴极反应物(如氧气)的传输,因此样品的腐蚀电流密度未明显增大,但因其保护作用有限,导致金属基体处于活化状态,腐蚀电位负移。焊缝区的腐蚀电流密度则上升了一个数量级($1.22 \times 10^{-4}\text{A/cm}^2$),腐蚀电位仍正于腐蚀后的非焊缝区,可能是因为焊缝区以局部腐蚀(如点蚀)为主。点蚀坑作为稳定的阳极区,坑外相对完整的表面则作为阴极,构成了“小阳极-大阴极”的宏观电池,这种电偶效应使测得的腐蚀电位较正,并加速了金属的局部溶解。

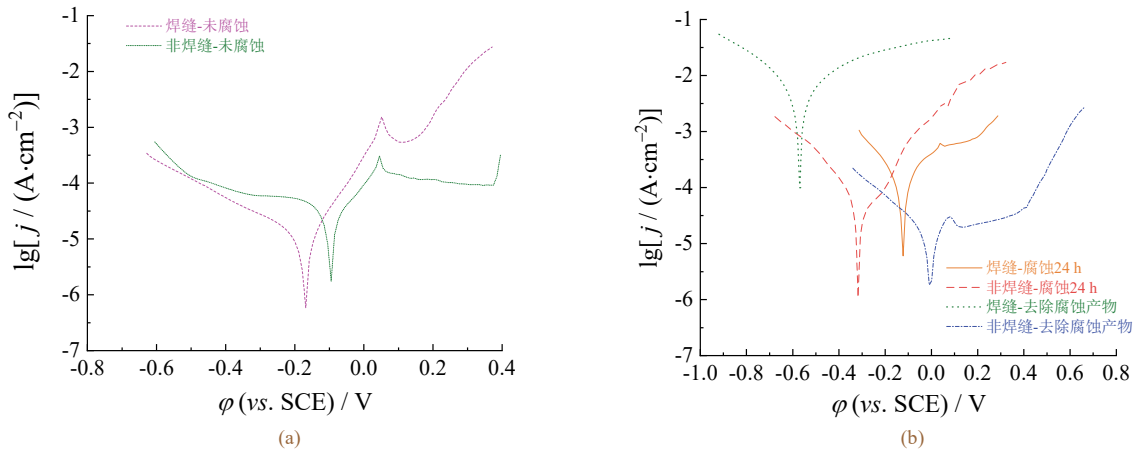


图3 不锈钢包钢经6% FeCl₃溶液浸泡腐蚀24 h前(a)后(b)非焊缝区、焊缝区在3.5% NaCl溶液中的动电位极化曲线
Figure 3 Potentiodynamic polarization curves of non-weld zone and weld zone of stainless steel-clad steel in 3.5% NaCl solution before (a) and after (b) 24-hour immersion in 6% FeCl₃ solution

表2 动电位极化曲线的拟合参数

Table 2 Parameters fitted from potentiodynamic polarization curves

试样	考察区域	ϕ (vs. SCE) / V	j_{corr} / (A·cm ⁻²)
未腐蚀	非焊缝区	-0.170	9.27×10^{-6}
	焊缝区	-0.074	2.60×10^{-5}
腐蚀 24 h	非焊缝区	-0.290	3.75×10^{-5}
	焊缝区	-0.140	1.22×10^{-4}
腐蚀 24 h 并去除腐蚀产物	非焊缝区	-0.015	1.19×10^{-5}
	焊缝区	-0.570	2.87×10^{-3}

为揭示去除腐蚀产物后基体表面的本征耐蚀性,对去除腐蚀产物的试样进行了动电位极化曲线测试(见图3b)。从拟合结果可知,非焊缝区具有优异的本征性能:腐蚀电位较正(-0.015 V),表明其热力学稳定性较好;腐蚀电流密度低至 1.19×10^{-5} A/cm²,说明其表面可形成较为致密、稳定的钝化膜。焊缝区在去除腐蚀产物后的腐蚀电位急剧负移至-0.57 V,表明其在热力学上处于高度活化状态;腐蚀电流密度升至 2.87×10^{-3} A/cm²,比非焊缝区高2个数量级。由此可见,焊接过程对不锈钢的组织造成了严重损伤。结合微观组织分析可知,焊缝区的失效可能是因为焊接过程中热影响区晶界处有铬碳化物析出,导致形成“铬贫化区”^[18],而铬是不锈钢钝化成膜的核心元素,其贫化直接导致该区域无法生成保护性膜层,从而在电化学测试中表现出与活泼金属类似的活化溶解行为。

2.2.2 电化学阻抗谱

为进一步探究包钢构件中焊缝区的腐蚀失效机制,通过电化学阻抗谱对比分析了非焊缝区与焊缝区在两种状态下的界面特性,腐蚀24 h后的表现状态与去除腐蚀产物后的本征状态结果如图4、图5所示。拟合的等效电路模型和相关数据见表3。其中, R_s 为溶液电阻; R_1 为金属表面腐蚀产物层的电阻;基底电阻 R_2 可能为拟合过程中引入的一个次要路径的电阻,其物理意义在电路中不如其他参数明确和显著;电荷转移电阻 R_3 能够反映金属/溶液界面发生电化学反应的难易程度, R_3 越大说明电荷转移过程越困难,腐蚀速率越小; C 为金属基底与溶液(或内层腐蚀产物)之间的双电层电容,反映了电极/溶液界面的结构; CPE_1 和 CPE_2 分别为电极表面膜层和金属/溶液界面的常相位角元件,分别用导纳 Q_1 和 Q_2 表示, n_1 、 n_2 为各自对应的弥散系数,用于描述电极表面的“非理想程度”或“弥散效应”,当 $0.5 < n < 1$ 时,表示电极表面为粗糙或不均匀的状态。

浸泡腐蚀24 h后,包钢焊缝区的极化电阻($R_p = R_1 + R_2$)约为 $14.84 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$,显著高于非焊缝区的 R_p (约为 $10.14 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$)。主要原因是非焊缝区表面可能形成了致密的钝化膜或腐蚀产物层(其导纳 Q_1 更低,且 n_1 较高),但其下方的基底电阻 R_2 极低,表明该致密层可能较薄或局部存在缺陷,导致电解液渗透至基体而轻微活化;焊缝区则形成了一层厚而多孔、具有一定阻挡作用的腐蚀产物层(其导纳 Q_1 较高,表明覆盖层电容更大,可能与厚而多孔的结构有关),因而具有更高的总阻抗,但其下层的基底电阻 R_2 较小,表明腐蚀反应在覆盖层下持续进行。

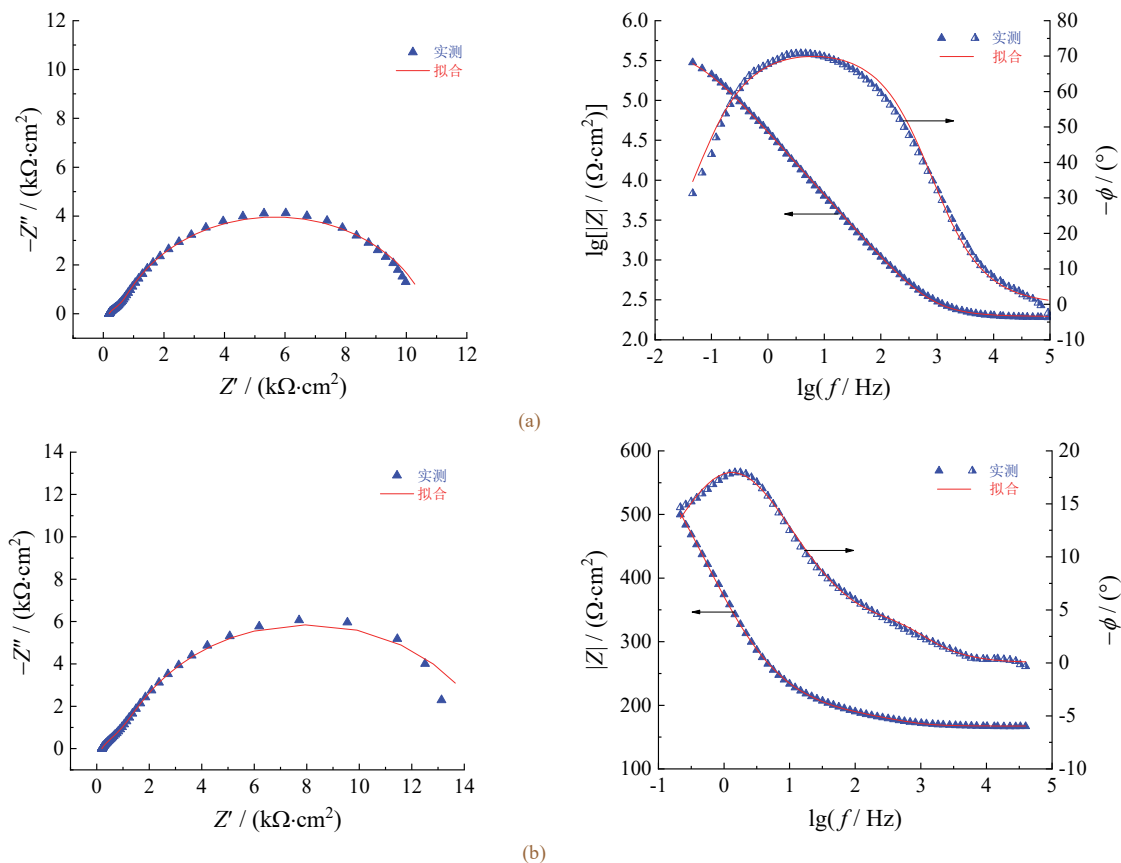


图4 不锈钢包钢经 6% FeCl_3 溶液浸泡腐蚀 24 h 后非焊缝区(a)和焊缝区(b)在 3.5% NaCl 溶液中的 Nyquist 图(左)和 Bode 图(右)

Figure 4 Nyquist plots (left) and Bode plots (right) for non-weld zone (a) and weld zone (b) of stainless steel-clad steel in 3.5% NaCl solution after 24-hour immersion in 6% FeCl_3 solution

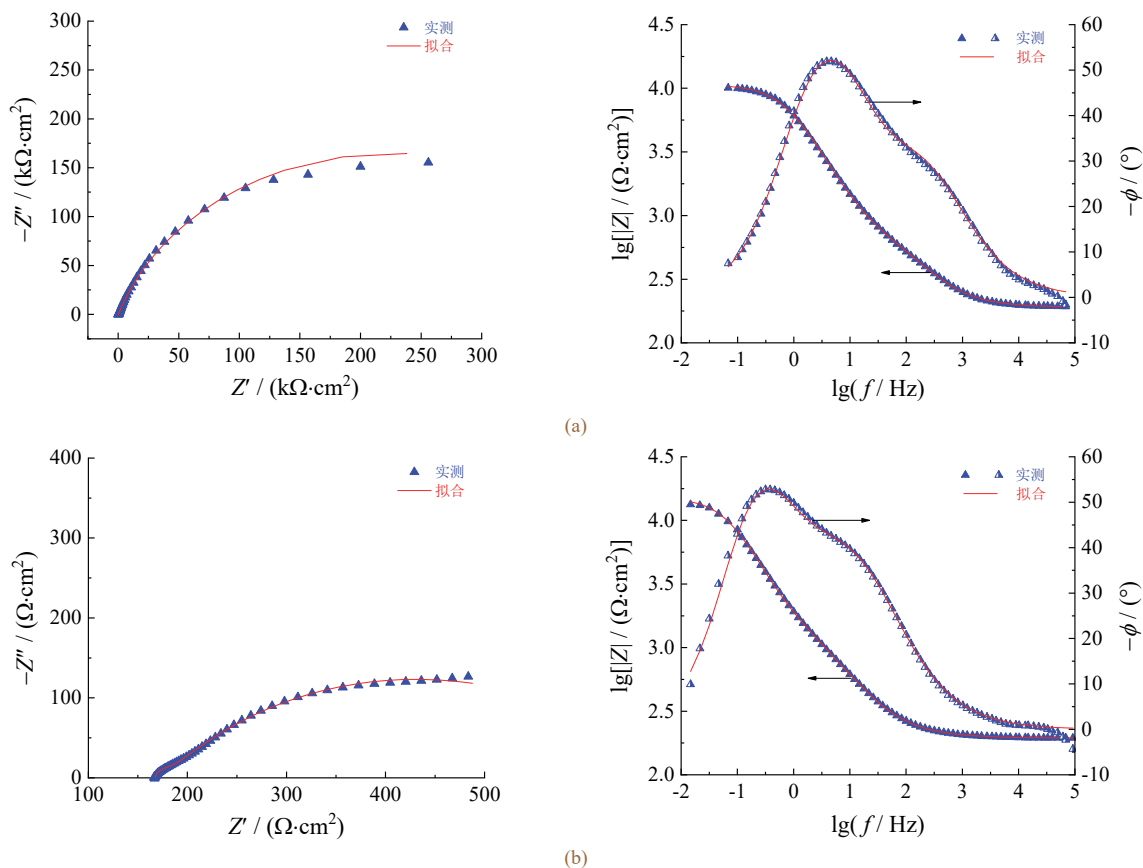


图5 去除腐蚀产物后不锈钢包钢非焊缝区(a)和焊缝区(b)在 3.5% NaCl 溶液中的 Nyquist 图(左)和 Bode 图(右)

Figure 5 Nyquist plots (left) and Bode plots (right) for non-weld zone (a) and weld zone (b) of stainless steel-clad steel in 3.5% NaCl solution after removal of corrosion products

表 3 电化学阻抗谱的拟合结果
Table 3 Fitting results of electrochemical impedance spectra

参数	去除腐蚀产物前		去除腐蚀产物后	
	非焊缝区	焊缝区	非焊缝区	焊缝区
R_s	$1.91 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}^2$	$1.95 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}^2$	$1.96 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}^2$	$1.68 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}^2$
R_1	$1.01 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$	$1.38 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$		
R_2				$1.70 \Omega \cdot \text{cm}^2$
R_3	$4.26 \Omega \cdot \text{cm}^2$	$1.05 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$	$4.52 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$	$5.00 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}^2$
CPE ₁	Q_1	$2.68 \times 10^{-5} \text{ S} \cdot \text{s}^{n_1}/\text{cm}^2$		
	n_1	0.843		
CPE ₂	Q_2	$2.63 \times 10^{-5} \text{ S} \cdot \text{s}^{n_2}/\text{cm}^2$	$5.54 \times 10^{-6} \text{ S} \cdot \text{s}^{n_2}/\text{cm}^2$	$1.17 \times 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{s}^{n_2}/\text{cm}^2$
	n_2	0.707	0.802	0.575
C				$1.49 \times 10^{-5} \text{ F}/\text{cm}^2$
等效电路	$R_s(Q_1R_1)(Q_2R_2)$	$R_s(Q_1R_1)(Q_2R_2)$	$R_s(Q_2R_2)$	$R_s(C(R_3(Q_2R_2)))$

去除腐蚀产物后焊缝区的界面结构较复杂，其等效电路模型为 $R_s(C(R_3(Q_2R_2)))$ ，属于典型的多孔电极模型。理想电容 C 代表均匀、光滑但电化学活性较高的基底界面。此时焊缝区的基底电阻 R_2 为 $1.70 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，表明电子在活化金属基体上的传输几乎不受阻，进一步证实基体处于活化状态。焊缝表面覆盖着一层多孔且无保护性的表面层(对应 Q_2R_2 单元)，其弥散指数 n_2 低至 0.575，表明该层结构高度多孔和不均匀。同时，较低的电荷转移电阻 R_3 表明腐蚀介质可以轻易穿透这层多孔膜，与活化的基体发生剧烈反应。从 Bode 图可知，非焊缝区的低频阻抗模值比焊缝区更高，因此非焊缝区的本征耐蚀性优于焊缝区。

综上所述，焊缝区的腐蚀机制可能如下：1) 焊接过程中的热影响导致铬碳化物在晶界析出，形成“铬贫化区”，使焊缝区形成保护性钝化膜的能力变差；2) 在腐蚀环境中，腐蚀介质优先攻击活化的焊缝区，导致金属溶解腐蚀；3) 腐蚀产物在焊缝区不断堆积，形成厚而多孔的覆盖层，暂时提高了表观阻抗，掩盖了其下方基体的高活性；4) 一旦覆盖层因机械或化学作用被破坏，高活性的焊缝基体便直接暴露，导致其腐蚀速率显著增大。

总体而言，本研究证实了包钢的母材具有优异的本征耐蚀性，而焊接工艺对材料组织的损伤较为严重，导致焊缝成为构件在长期服役过程中耐蚀性最薄弱的部位。

2.3 点蚀敏感性及其实际失效风险

依据 ASTM G48 标准进行三氯化铁点蚀试验，可更直观地证明焊缝区优先发生腐蚀失效。如图 6 所示，在 6% FeCl_3 溶液中浸泡腐蚀 24 h 后，点蚀坑密集地分布在 HAZ 区和焊缝金属上，而非焊缝区仅出现零星蚀点。

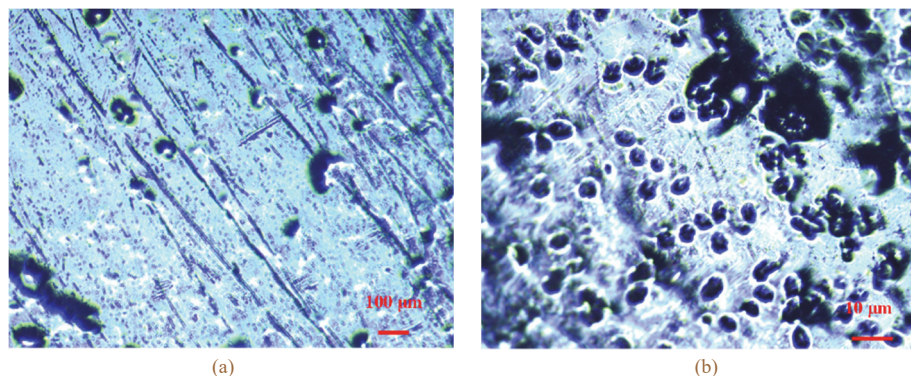


图 6 在 6% FeCl_3 溶液中浸泡腐蚀 24 h 后非焊缝区(a)和焊缝区(b)的金相照片
Figure 6 Metallographic images of non-weld zone (a) and weld zone (b) after 24-hour immersion in 6% FeCl_3 solution for 24 hours

如图 7 所示，经 2% $\text{FeCl}_3 + 0.5 \text{ mol/L HCl}$ 溶液加速浸泡腐蚀 18 h 后，焊缝区域发生了严重的局部腐蚀并出现裂纹，而母材仅发生轻微的均匀腐蚀。说明在含氯离子的酸性服役环境中，焊接接头存在极高的应力腐蚀开裂风险，其服役寿命远低于设计预期。

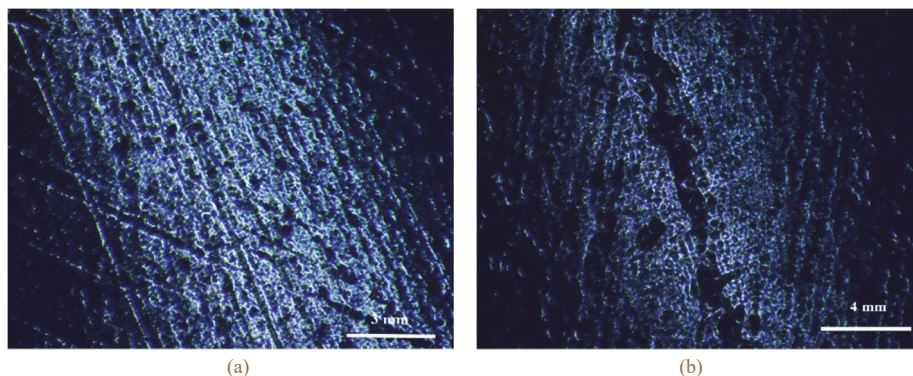


图7 在2% FeCl₃ + 0.5 mol/L HCl 溶液中浸泡腐蚀18 h 后非焊缝区(a)和焊缝区(b)的金相照片
Figure 7 Microscopic images of non-weld zone (a) and weld zone (b) after 18-hour immersion in 2% FeCl₃ + 0.5 mol/L HCl solution

3 结论

本研究通过微观组织表征、硬度测试、电化学测量及加速腐蚀试验,对不锈钢包钢焊缝区的腐蚀行为进行了系统评价,并与非焊缝区(母材)进行对比,得出以下主要结论:

- 1) 焊缝热影响区呈现晶粒粗化及晶界铬元素贫化现象(Cr 的质量分数从约 18%降至 14%左右),该区域的显微硬度较母材有所升高,表明微观组织的不均匀性可能是导致其耐腐蚀性能下降的主要原因。
- 2) 在剥离腐蚀产物层后,焊缝区的本征耐腐蚀性能急剧下降。其电荷转移电阻较母材低 5 个数量级,腐蚀电流密度高 2 个数量级,证明该区域处于电化学活化状态,无法形成有效的保护性钝化膜。
- 3) 腐蚀优先在焊缝及热影响区萌生,并迅速发展为点蚀坑及宏观裂纹。

综上可知,不锈钢包钢焊缝区是构件的腐蚀薄弱环节,其较差的本征耐蚀性与较高的局部腐蚀风险将对构件长期安全服役造成严重威胁。该研究结果对此类复合材料焊缝的耐久性评估及工程应用具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] ZHAO J, MENG X, REN X, et al. Review on soil corrosion and protection of grounding grids [J]. Materials, 2024, 17 (2): 507.
- [2] 李俊松, 周梦鑫, 王震宇. 新型接地材料在汕头土壤浸出液中的腐蚀电化学行为[J]. 电镀与涂饰, 2024, 43 (6): 134-139.
LI J S, ZHOU M X, WANG Z Y. Corrosion electrochemical behavior of novel grounding material in soil leaching liquor in Shantou [J]. Electroplating & Finishing, 2024, 43 (6): 134-139.
- [3] ZHANG X H, LIAO Q Q, NIE K B, et al. Self-assembled monolayers formed by ammonium pyrrolidine dithiocarbamate on copper surfaces in sodium chloride solution [J]. Corrosion science, 2015, 93: 201-210.
- [4] 郑敏聪. 杂散电流对变电站接地网材料耐腐蚀性的影响[J]. 腐蚀与防护, 2010, 31 (4): 294-296.
ZHENG M C. Effect of stray current on corrosion resistance of grounding grid materials at substation [J]. Corrosion and Protection, 2010, 31 (4): 294-296.
- [5] 陈科峰, 张兆德, 胡家元, 等. 4 种接地金属材料在土壤浸出液中的腐蚀行为研究[J]. 材料保护, 2018, 51 (12): 12-17, 22.
CHEN K F, ZHANG Z D, HU J Y, et al. Research on corrosion behavior of four kinds of metal grounding materials in soil leaching solution [J]. Materials Protection, 51 (12): 12-17, 22.
- [6] 高智悦, 姜波, 樊志彬, 等. 典型接地材料在碱性土壤模拟液中的腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43 (1): 192-196.
GAO Z Y, JIANG B, FAN Z B, et al. Corrosion behavior of typical grounding materials in artificial alkaline soil solution [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43 (1): 191-196.
- [7] 闫风洁, 李辛庚, 姜波, 等. 纯铜在碱性土壤中的腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31 (2): 155-158.
YAN F J, LI X G, JIANG B, et al. Corrosion behavior of pure copper in alkaline soil [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2019, 31 (2): 155-158.
- [8] 陈欣欣, 李越颖, 王震宇. 五种接地材料在中性盐雾环境中的长期腐蚀行为研究[J]. 电镀与涂饰, 2025, 44 (3): 46-54.
CHEN X X, LI Y Y, WANG Z Y. Long-term corrosion behaviors of five grounding materials in neutral salt spray environment [J]. Electroplating & Finishing, 2025, 44 (3): 46-54.
- [9] 郭安祥, 胡尾娟, 闫爱军, 等. 不锈钢、镀锌钢接地材料在土壤中的腐蚀规律研究[J]. 材料导报, 2015, 29 (增刊 2): 498-501.
GUO A X, HU W J, YAN A J, et al. Research of corrosion rule on grounding materials of stainless steel and galvanized steel in soil [J]. Materials Report, 2015, 29 (Suppl.2): 498-501.
- [10] 耿焱炜, 斯琴高娃. 变电站铜材接地装置的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2008 (24): 22-23.
GENG Y W, SI Q G W. Application of copper grounding unit in transformer substation [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008 (24): 22-23.
- [11] 余建飞, 陈心河, 李善风, 等. Q235 钢在湖北变电站土壤中的腐蚀行为研究[J]. 全面腐蚀控制, 2011, 25 (10): 39-45.
YU J F, CHEN X H, LI S F, et al. Study on corrosion behavior of Q235 steel in soil of Hubei substations [J]. Total Corrosion control, 2011, 25 (10): 39-45.
- [12] SONG Y R, JIANG G M, CHEN Y, et al. Effects of chloride ions on corrosion of ductile iron and carbon steel in soil environments [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 6865.
- [13] 王铁铮, 刘晓琳, 关潇卓, 等. 氯离子对吉林地区镀锌钢和不锈钢土壤腐蚀行为的影响[J]. 热加工工艺, 2025, 54 (18): 92-105.
WANG T Z, LIU X L, GUAN X Z, et al. Effect of chloride ion on soil

- corrosion behavior of galvanized steel and stainless steel in Jilin region [J]. Hot Working Technology, 2025, 54 (18): 92-105.
- [14] 曹英. 不锈钢包钢在接地网中的应用性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2015.
- CAO Y. Research on the application of stainless steel clad steel in grounding grids [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2015.
- [15] 刘会云, 何毅, 何冰冷, 等. 热处理对热轧不锈钢复合板组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2016, 37 (7): 107-110.
- LIU H Y, HE Y, HE B L, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and properties of stainless steel clad plate prepared by hot rolling [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37 (7): 107-110.
- [16] WU Y W, DONG D Y, FAN S G, et al. Mechanical properties and stress-strain response of stainless clad steel materials [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2025, 226: 109261.
- [17] XU J J, CHEN C M, LEI T, et al. Inhomogeneous Thermal-mechanical analysis of 316L butt joint in laser welding [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 115: 71-80.
- [18] ZHAO Y B, ZHANG D M, WU Y F, et al. Supervised descent method for weld pool boundary extraction during fiber laser welding process [J]. China Welding, 2019, 28 (1): 6-10.

【 编辑: 周新莉 】