

交直流干扰下L355管线钢的电化学腐蚀行为研究

陈佳¹, 唐乐¹, 王珮璇¹, 冯睿宇¹, 汤伟杰², 靳军军³, 孙万³

¹成都工贸职业技术学院机械工程学院, 四川 成都

²深圳职业技术大学工程训练中心, 广东 深圳

³西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年6月19日; 录用日期: 2025年7月18日; 发布日期: 2025年7月25日

摘要

本研究通过电化学极化曲线和电化学阻抗谱(EIS)测试方法研究了L355管线钢母材及焊接接头在强酸性溶液(0.5 mol/L H₂SO₄ + 0.2 g/L CH₄N₂S)中的极化行为与阻抗特性, 重点探讨了交流(AC)和直流(DC)电流干扰对其电化学性能的影响。结果表明, L355管线钢母材的耐蚀性能优于焊接接头, 交流电流对极化机制的影响较小, 而直流充氢导致极化曲线显著负移并形成钝化区($\Delta E \approx 150$ mV), 自腐蚀电流密度显示母材(0.60×10^{-4} A/cm²)的耐蚀性优于焊接接头(5.46×10^{-5} A/cm²)。EIS分析显示, 焊接接头的容抗弧半径在充氢后减小(由126.8 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 到50.2 $\Omega \cdot \text{cm}^2$), 直流充氢条件下的电荷转移电阻明显低于交流充氢。焊接接头耐蚀性优于母材, 但对氢损伤更敏感。直流充氢通过阴极析氢促进氢损伤, 而交流电流主要通过双电层扰动影响腐蚀过程。

关键词

L355管线钢, 交直流, 电化学腐蚀, 焊接接头, 氢损伤

Study on Electrochemical Corrosion Behavior of L355 Pipeline Steel under AC and DC Current Interference

Jia Chen¹, Le Tang¹, Peixuan Wang¹, Ruiyu Feng¹, Weijie Tang², Junjun Jin³, Wan Sun³

¹School of Mechanical Engineering, Chengdu Industry and Trade College, Chengdu Sichuan

²Industrial Training Center, Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen Guangdong

³School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: Jun. 19th, 2025; accepted: Jul. 18th, 2025; published: Jul. 25th, 2025

文章引用: 陈佳, 唐乐, 王珮璇, 冯睿宇, 汤伟杰, 靳军军, 孙万. 交直流干扰下 L355 管线钢的电化学腐蚀行为研究[J]. 材料科学, 2025, 15(7): 1512-1521. DOI: 10.12677/ms.2025.157161

Abstract

This research investigated the corrosion behavior and impedance characteristics of L355 pipeline steel base metal and welded joints in a strong acidic environment ($0.5 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4 + 0.2 \text{ g/L CH}_4\text{N}_2\text{S}$) through electrochemical polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) test methods, focusing on the effects of alternating current (AC) and direct current (DC) current interference on their electrochemical properties. The results showed that the L355 pipeline steel base metal exhibited superior corrosion resistance compared to the welded joint, AC current had minimal influence on polarization mechanisms, while DC hydrogen charging significantly shifted the polarization curve negatively and formed a passivation zone ($\Delta E \approx 150 \text{ mV}$), and the self-corrosion current density showed that the corrosion resistance of the base metal ($0.60 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$) was better than that of the welded joint ($5.46 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$). EIS analysis revealed that the tolerable arc radius of the welded joint decreased after hydrogen charging (from $126.8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ to $50.2 \Omega \cdot \text{cm}^2$), and the charge transfer resistance (R_t) under DC hydrogen charging conditions was significantly lower than that under AC hydrogen charging. The corrosion resistance of the welded joint was better than that of the base metal, but they are more sensitive to hydrogen damage. DC hydrogen charging promoted hydrogen damage through cathodic hydrogen evolution, whereas AC current affected the corrosion process mainly through double-layer disturbance.

Keywords

L355 Pipeline Steel, AC and DC Current, Electrochemical Corrosion, Welded Joint, Hydrogen Damage

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

近年来,随着油气管道与高压输电线或铁路系统平行或交叉的情况不断增加,人们对交流电流引起的埋地管道的腐蚀问题日益关注[1]-[5]。初期研究发现,与等量直流电流相比,交流电流干扰对埋地管道腐蚀的影响相对较小,仅占1%左右,因此曾被认为腐蚀危害可以被忽略。然而,深入的调查显示,交流电流干扰导致的腐蚀问题逐渐显露出对埋地钢质管道安全的严重威胁[6]-[11]。在埋地管道腐蚀加速过程中,杂散电流干扰扮演了关键角色,促使对腐蚀机理的重新审视[11]-[13]。研究表明,与直流电流相比,交流电流引起的电化学变化可能导致埋地钢管表面产生更为复杂的腐蚀特征,包括局部腐蚀和微观缺陷,长期的交流干扰会导致管道局部腐蚀速率加快,甚至引发应力腐蚀开裂(SCC)和氢脆(HE),严重威胁管道的结构完整性和服役安全性[13]-[16]。

本研究以 L355 管线钢为对象,对比分析其在交流/直流充氢条件下的电化学响应,分析交流与直流电流对极化行为和阻抗谱的影响差异,分析焊接接头与母材在氢渗透条件下的腐蚀敏感性差异,探讨微观组织(如 M/A 组元、位错密度)对氢损伤的影响机制。

2. 实验材料及方法

2.1. 实验材料

选用 L355 管线钢作为研究对象,表 1 展示了 L355 管线钢母材的主要化学成分。图 1 展示了 L355

管线钢母材的金相组织，母材金相呈现出细小均匀的晶粒结构，主要由针状铁素体(AF)和粒状贝氏体(GB)组成，在晶界处存在大量黑色岛状结构(马氏体 - 奥氏体(M/A))。

Table 1. Chemical composition of L355 pipeline steel (wt%)

表 1. L355 管线钢的化学成分(wt%)

元素	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cu
wt%	0.463	1.94	0.28	0.07	0.008	0.08	0.002
元素	Mo	Al	Ti	Nb	N	Cr	Fe
wt%	0.2	0.07	0.04	0.07	0.013	0.29	Balance

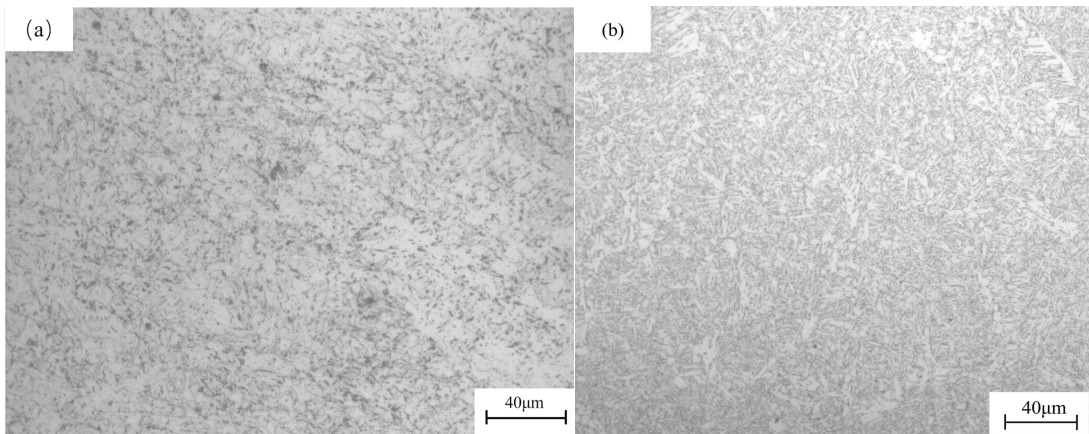


Figure 1. Metallographic structure photos of the L355 pipeline steel base metal and welded joints: (a) Base metal; (b) Welded joints

图 1. L355 管线钢母材和焊接接头的金相组织照片：(a) 母材；(b) 焊接接头

焊接实验采用管道的环焊缝，GTAW + FCAW-S 复合焊接方法，研究对象为 L355 管线钢管道，其尺寸为 $D1016\text{ mm} \times 15.3\text{ mm}$ 。管道采用 $47^\circ \pm 3^\circ$ 的 V 型坡口，保留 $1.0 \pm 0.5\text{ mm}$ 的钝边，且两根管道之间的组对间隙为 $3.5 \pm 1.0\text{ mm}$ ，具体结构如图 2 所示。

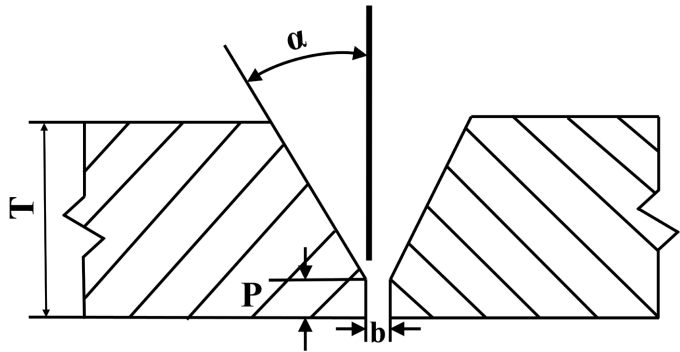


Figure 2. Schematic diagram of welding dimensions

图 2. 焊接尺寸示意图

在焊接过程中，焊接接头的微观组织和成分受到热输入的显著影响。如图 1(b)所示，L355 管线钢焊接接头主要由铁素体组成，其中以针状铁素体为主，同时含有少量的多边形铁素体。焊接接头中存在的高密度的位错和沉淀析出等因素会增加材料的强韧性，但少量多边形铁素体可能会降低焊接接头的整体韧性水平。

图 3 展示了 L355 管线钢母材和焊接接头 EBSD 的图像。

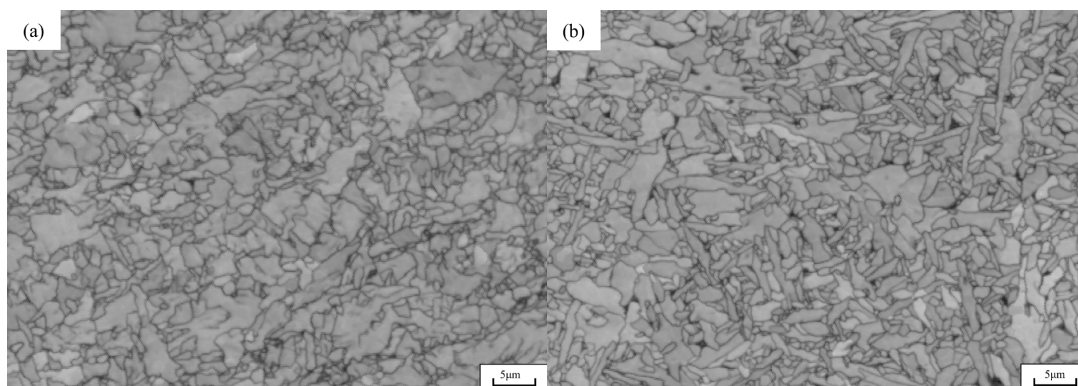


Figure 3. Image quality maps of L355 pipeline steel base metal and welded joint: (a) Base metal; (b) Welded joints
图 3. L355 管线钢母材和焊接接头的图像质量图: (a) 母材; (b) 焊接接头

从图 3 可以看出,母材的微观组织是由针状铁素体和粒状贝氏体组成,晶界处存在大量黑色岛状结构,这些结构是 M/A 组元组成。焊接接头的微观组织由针状铁素体和多边形铁素体组成,这与之前的金相结构是一致的。

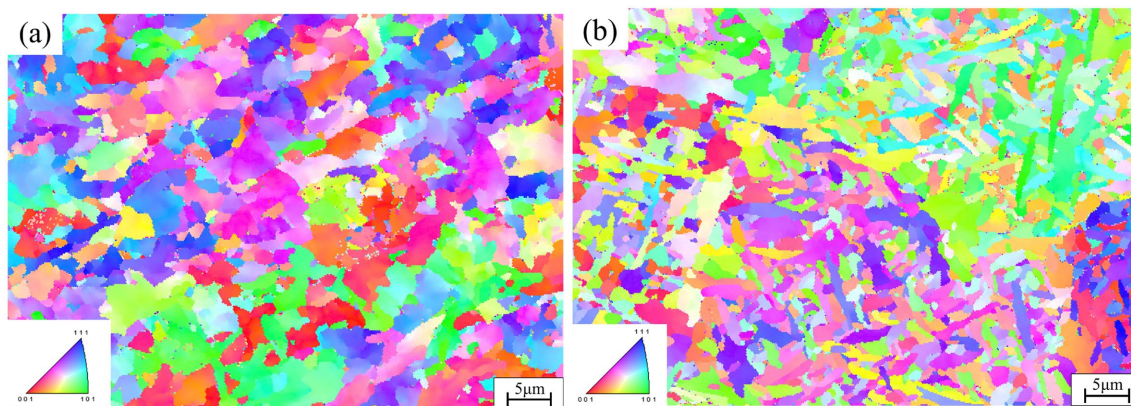


Figure 4. Grain orientation diagrams of L355 pipeline steel base metal and welded joints: (a) Base metal; (b) Welded joints
图 4. L355 管线钢母材和焊接接头的晶粒取向图: (a) 母材; (b) 焊接接头

图 4 展示了 L355 管线钢母材和焊接接头的晶粒取向图。母材和焊接接头的晶粒取向有所差异,母材内晶粒趋向于(001)取向和(111)取向,晶粒表现出各向异性;而焊接接头的针状铁素体的晶粒趋向于(101)取向,多边形铁素体的晶粒更加趋近于(001)取向和(111)取向,晶粒表现出各向异性。可以看出,焊接接头的晶粒取向受到了较大的变化。

2.2. 实验方法

使用 CS310M 电化学测试系统,电化学测试采用三电极体系。工作电极为 L355 管线钢试样,其暴露面积为 1 cm^2 ;辅助电极选用铂片,而参比电极则为饱和甘汞电极。电化学充氢过程中,试样作为阴极,而铂片则作为阳极。研究重点在于电流密度对 L355 管线钢电化学行为的影响。实验装置的示意图如图 5 所示。通过变阻器控制电流密度,同时采用电容($500 \mu\text{F}$)和电感(15 H)以防止电化学测试系统和电化学充氢系统之间的电流相互干扰,保证两系统独立运行。实验研究了不同电流密度($0, 5, 10, 20, 30, 50 \text{ mA/cm}^2$)

的交流电流对 L355 管线钢电化学行为的影响, 和不同电流密度(0, 5, 10, 20, 30, 50 mA/cm²)的直流电流对 L355 管线钢电化学行为的影响。

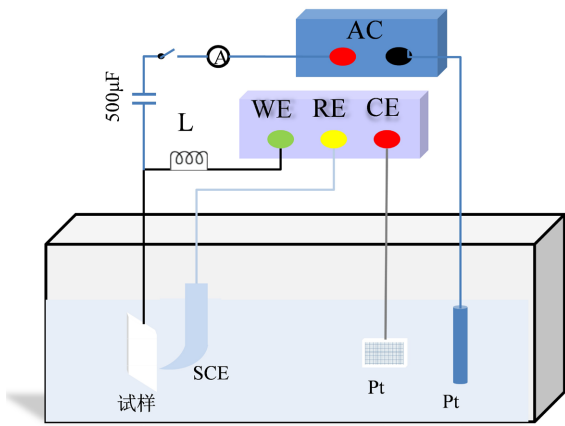


Figure 5. Schematic diagram of the electrochemical corrosion experiment
图 5. 电化学腐蚀实验示意图

实验中对工作电极进行了预极化处理, 施加了-1.0 V 的电位, 并持续 3 分钟, 以消除试样表面可能形成的氧化膜。随后, 试样在溶液中静置了 1 小时, 然后开始施加交流电流或直流电流, 并进行开路电位的测量。只有在开路电位达到稳定状态后, 才能进行后续的交流阻抗和极化曲线测试。在测试过程中, 采用了 1 mV/s 的扫描速率, 扫描方向由负向正, 扫描电位范围为-1~1.1 V。

3. 实验结果及分析

3.1. 强酸性溶液中的极化曲线

图 6 展示了 L355 管线钢在强酸性溶液(0.5 mol/L H₂SO₄ + 0.2 g/L CH₄N₂S)中, 在未进行充氢的条件下, 母材的自腐蚀电位($E_{\text{corr}} = -0.45$ V)高于焊接接头($E_{\text{corr}} = -0.52$ V), 且腐蚀电流密度更低, 表明其耐蚀性更优, 极化曲线未出现钝化区, 说明强酸性环境下腐蚀以析氢主导。

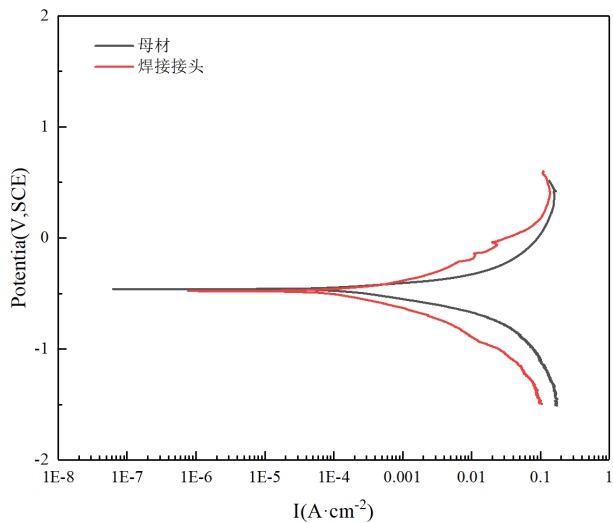


Figure 6. Polarization curves of the base metal and welded joints of L355 pipeline steel in a strongly acidic solution
图 6. 在强酸性溶液中 L355 管线钢的母材和焊接接头的极化曲线

图7呈现了 L355 管线钢母材在不同交流和直流电流密度下,在强酸性环境($0.5 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4 + 0.2 \text{ g/L CH}_4\text{N}_2\text{S}$)中的极化曲线。观察到交流电流对 L355 管线钢在强酸性溶液中的电化学行为没有明显影响,试样在施加或未施加交流电流时均表现为活性溶解。曲线变化不显著。仅在高电流密度(50 mA/cm^2)下出现轻微振荡,反映双电层动态扰动。而在直流充氢条件下,随着电流密度的升高,极化曲线负移($\Delta E \approx 150 \text{ mV}$),腐蚀电位持续下降,阴极析氢反应加剧,并在 $-0.3 \sim 0 \text{ V}$ 出现钝化区,这可能与表面氢化物膜形成有关。

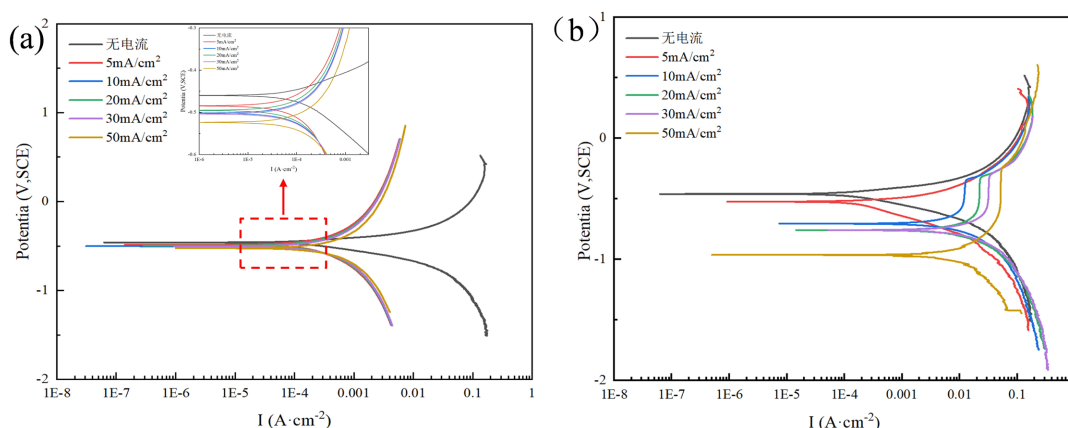


Figure 7. Polarization curves of L355 pipeline steel base metal under different hydrogen charging conditions in a strongly acidic environment: (a) Different AC current densities; (b) Different DC current densities

图7. 在强酸性环境中不同充氢条件下 L355 管线钢母材的极化曲线: (a) 不同交流电流密度; (b) 不同直流电流密度

图8呈现了 L355 管线钢焊接接头在不同交流和直流电流密度下,在强酸性环境($0.5 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4 + 0.2 \text{ g/L CH}_4\text{N}_2\text{S}$)中的极化曲线。交流电流对 L355 管线钢在强酸性溶液中的腐蚀机制影响不明显。施加和未施加交流电流下的试样均表现为活性溶解,阳极区未出现钝化现象,而阴极区也未发生氧扩散控制区。焊接接头在交流电流充氢的条件下呈现出与母材相似的变化趋势。随着交流电流密度的增加,极化曲线的自腐蚀电位略微负移,同时极化曲线也略有右移。焊接接头在直流电流充氢条件下呈现与母材相似的变化趋势。随着直流电流密度的增加,极化曲线向右下方移动,腐蚀电位逐渐负移,腐蚀电流密度逐渐增大,并且出现明显的钝化区域。在钝化过程中,形成了保护性的钝化膜,该膜被认为具有层状结构。

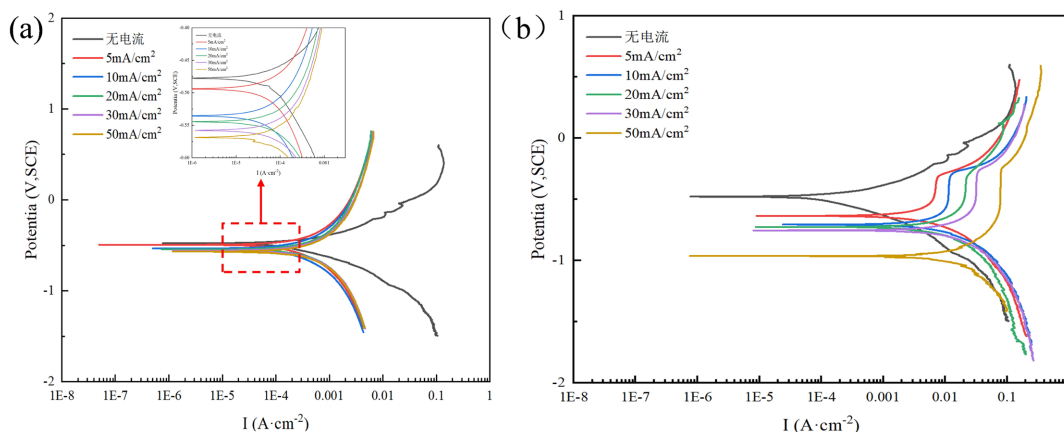
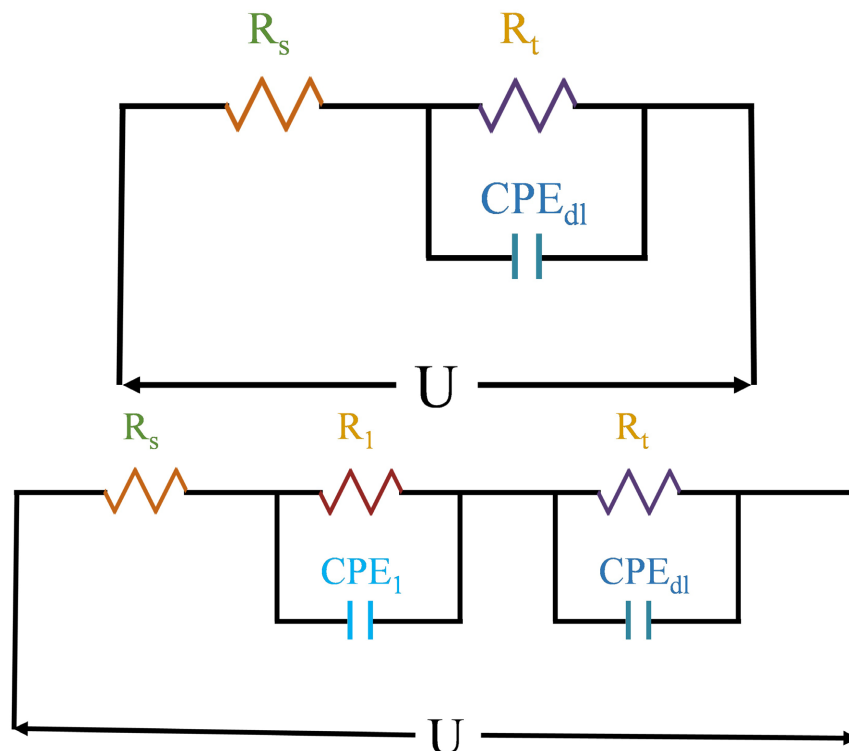


Figure 8. Polarization curves of L355 pipeline steel welded joints under different hydrogen charging conditions in a strongly acidic environment: (a) Different AC current densities; (b) Different DC current densities

图8. 在强酸性环境中不同充氢条件下 L355 管线钢焊接接头的极化曲线: (a) 不同交流电流密度; (b) 不同直流电流密度

3.2. 强酸性溶液中的 EIS 分析



注： R_s 代表溶液电阻， R_1 和 CPE_1 分别表示钝化膜的电阻和电容。

Figure 9. Equivalent circuit of the impedance spectrum

图 9. 阻抗谱的等效电路

图 9 是阻抗谱的等效电路结构。CPE 的阻抗(Z^Q)可通过方程式(1)表示：

$$Z^Q = (j\omega)^{-n} / Y_0 \quad (1)$$

其中， Y_0 和 n 为 CPE 常数， n 的范围为 $0 < n < 1$ ，代表弥散效应的程度。

图 10 为强酸性环境(0.5 mol/L H_2SO_4 + 0.2 g/L CH_4N_2S)下 L355 管线钢母材和焊接接头的阻抗奈奎斯特(Nyquist)图。在强酸性环境中，L355 管线钢焊接接头在不同充氢条件下表现出相同的氢损伤机制。然而，焊接接头的容抗弧半径明显大于母材，同时其电荷转移电阻值也显著高于母材。因此，焊接接头的耐蚀性较母材更为优越。在未充氢状态下，焊接接头容抗弧半径更大($R_t = 126.8 \Omega \cdot cm^2$ ，母材 $236.4 \Omega \cdot cm^2$)，但 CPE_{dl} 更低($5.46 \times 10^{-5} F/cm^2$)，说明其表面钝化膜更致密。在直流充氢条件下，接头 R_t 降至 $50.2 \Omega \cdot cm^2$ ，容抗弧收缩，表明氢渗透破坏钝化膜完整性。在交流充氢条件下， R_t 降幅较小(~15%)，但 CPE_{dl} 增大，提示界面电容效应增强。

图 11 展示了在强酸性环境(0.5 mol/L H_2SO_4 + 0.2 g/L CH_4N_2S)中不同充氢条件下 L355 管线钢母材的阻抗奈奎斯特(Nyquist)图。在不同交流电流密度的作用下，试样的容抗弧半径显著减小，其中 5 mA/cm^2 和 10 mA/cm^2 作用的试样的容抗弧半径稍大，当电流密度超过 10 mA/cm^2 时，容抗弧半径急剧减小。这表明低交流电流密度对试样表面钝化膜的破坏作用较小，但随着电流密度的增加，钝化膜的破坏变得更加显著。在直流充氢条件下，随着电流密度的增加，容抗弧收缩极为显著，表明阴极充氢严重破坏了钝化膜的完整性，电荷转移的阻力显著减小，试样的耐蚀性降低，相同电流密度下试样的容抗弧明显低于

交流充氢状态。因此, 交流电流充氢下试样的损伤状态相比直流电流充氢更为微弱。

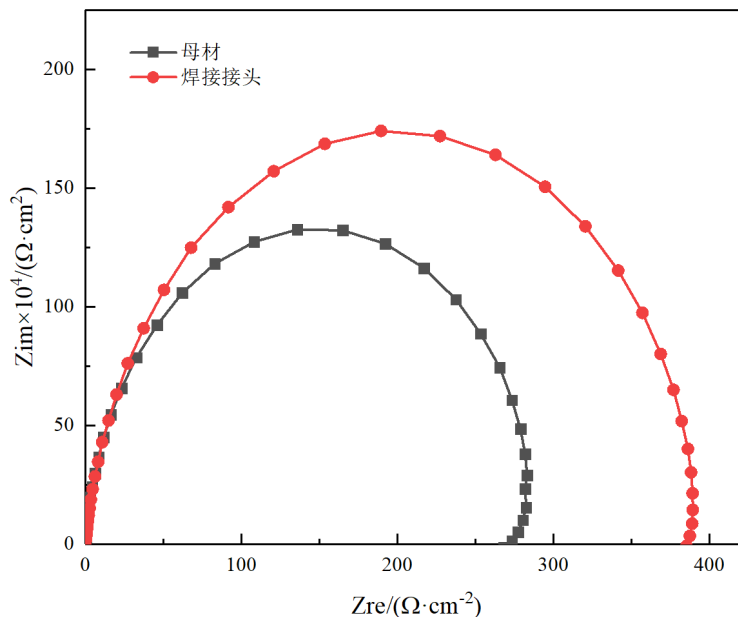


Figure 10. Nyquist curves of the base metal and welded joints of L355 pipeline steel in a strongly acidic environment
图 10. 在强酸性环境中 L355 管线钢的母材和焊接接头的 Nyquist 曲线

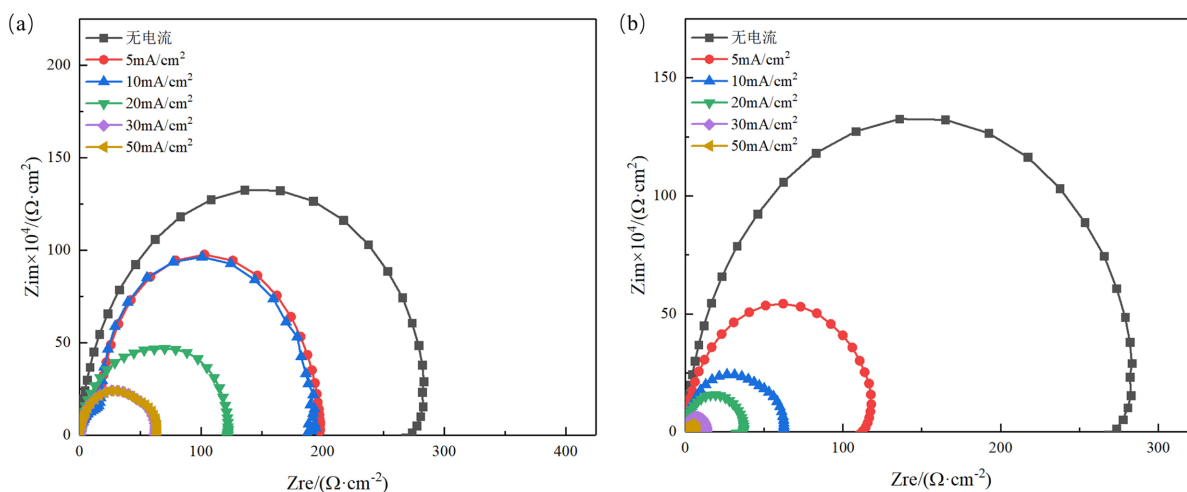


Figure 11. Nyquist diagrams of L355 pipeline steel base metal under different hydrogen charging conditions in a strongly acidic environment: (a) Under hydrogen charging with alternating current; (b) Under hydrogen charging with direct current

图 11. 在强酸性环境中不同充氢条件下 L355 管线钢母材的 Nyquist 图: (a) 交流电流充氢下; (b) 直流电流充氢下

图 12 展示了在强酸性环境(0.5 mol/L H_2SO_4 + 0.2 g/L $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$)中不同充氢条件下 L355 管线钢焊接接头的阻抗奈奎斯特(Nyquist)图。在施加和不施加交流电流的情况下, 母材和焊接接头的试样呈现相似的氢损伤机制。在未进行充氢的状态下, 试样表面的钝化膜完整且致密, 其容抗弧半径达到最大值。然而, 在充氢后, 试样的容抗弧半径显著减小, 随着电流密度的增加, 容抗弧半径也相应减小。同时, 在相同电流密度下, 直流充氢状态下试样的容抗弧较交流充氢状态下更小, 这与母材试样表现出的趋势相一致。

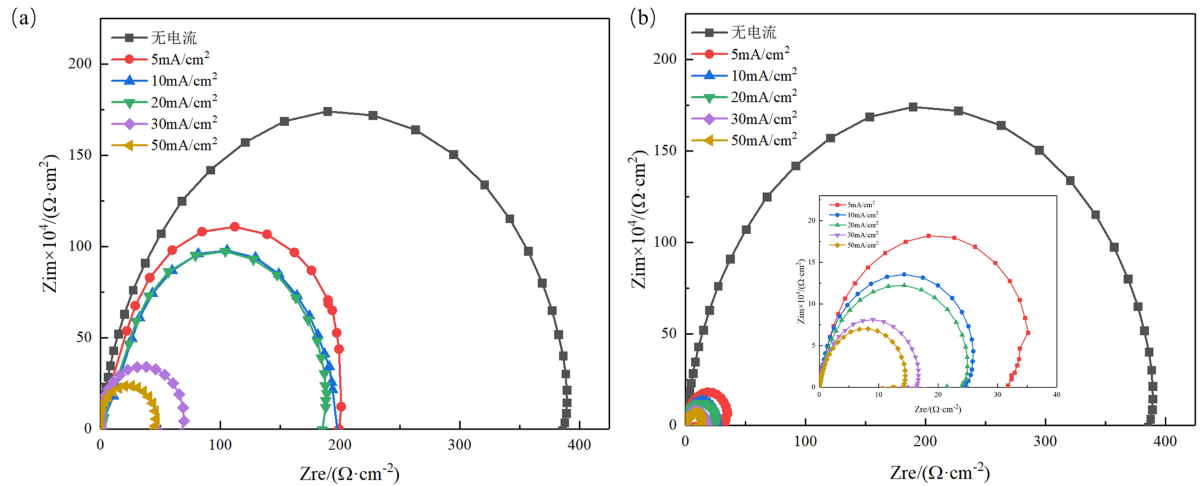


Figure 12. Nyquist diagrams of L355 pipeline steel welded joints under different hydrogen charging conditions in a strongly acidic environment: (a) Under hydrogen charging with alternating current; (b) Under hydrogen charging with direct current

图 12. 在强酸性环境中不同充氢条件下 L355 管线钢焊接接头的 Nyquist 图: (a) 交流电流充氢下; (b) 直流电流充氢下

Table 2. Nyquist curve fitting of base metal and welded joints of L355 pipeline steel in a strongly acidic environment

表 2. 强酸性环境中 L355 管线钢的母材和焊接接头的 Nyquist 曲线拟合

试样	$R_s/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$\text{CPE}_1\ 10^{-4}/(\text{F}\cdot\text{cm}^{-2})$	n_1	$R_1/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$\text{CPE}_{dl}\ 10^{-4}/(\text{F}\cdot\text{cm}^{-2})$	n_2	$R_2/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$
母材	7.35	1.62	1	23.67	0.60	1	236.4
焊接接头	0.03	0.38	1	273.3	5.46E-5	1	126.8

表 2 呈现了在强酸性环境(0.5 mol/L H_2SO_4 + 0.2 g/L $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$)中 L355 管线钢的母材和焊接接头的 Nyquist 曲线的拟合结果。母材和焊接接头的阻抗谱均采用 R (QR)进行拟合, 这表明强酸性溶液对钝化膜的破坏较小, 试样表面的钝化膜相对较完整致密, 试样耐蚀性高。

3.3. 讨论分析

母材和焊接接头存在不同的组织差异, 母材晶界处马氏体 - 奥氏体(M/A)岛的存在是耐蚀性降低的主要原因, M/A 组元中奥氏体富碳, 马氏体高硬且易形成微电池, 两者在腐蚀环境中可能优先溶解, 引发局部电偶腐蚀或点蚀。焊接接头的高位错密度和 M/A 组元提供了更多的氢陷阱, 但其多边形铁素体组织降低了局部耐蚀性, 从而导致氢损伤敏感性升高。在不同的电流影响下, 直流充氢通过持续阴极极化促进氢原子渗透, 引发氢致开裂(HIC), 而交流电流因周期性反转, 氢渗透效率降低, 但高频扰动可能加速了点蚀的萌生。

4. 结论

- 1) 交流电流对极化行为的影响较小, 仅在高电流密度下引起双电层扰动; 而直流充氢导致极化曲线显著负移, 并在-0.3~0 V 范围内形成钝化区, 与氢化物膜的形成密切相关。
- 2) 母材的耐蚀性优于焊接接头, 其自腐蚀电流密度更低, 但焊接接头因高位错密度和 M/A 组元的存在, 表现出更高的氢损伤敏感性。
- 3) 直流充氢通过阴极析氢反应加速氢渗透, 引发氢致开裂(HIC); 而交流电流通过动态扰动双电层结构, 促进局部点蚀的萌生。
- 4) 微观组织差异(如晶粒取向、位错密度)是导致母材与焊接接头腐蚀行为差异的关键因素。

参考文献

- [1] Zhang, Y., Chen, L., Qin, H., Jiang, Z., Du, Y. and Lu, M. (2024) Research on Fluctuation Characteristics of AC Interference Parameters and Corrosion Behavior of Buried Gas Pipelines. *International Journal of Electrochemical Science*, **19**, Article ID: 100396. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100396>
- [2] Wang, B., Ma, R., Chang, Y. and Wang, W. (2024) Experimental Study on Pipeline Corrosion Behavior Coupled with Microorganisms and Dynamic Alternating Current Interference. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **209**, Article ID: 105179. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105179>
- [3] Liu, B., Du, C., Li, X., Wang, D., Xu, J., Sun, C., *et al.* (2022) Effect of Alternating Current and Cathodic Protection on Corrosion of X80 Steel in Alkaline Soil. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **31**, 1769-1780. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06309-8>
- [4] Brenna, A., Beretta, S. and Ormellese, M. (2020) AC Corrosion of Carbon Steel under Cathodic Protection Condition: Assessment, Criteria and Mechanism. A Review. *Materials*, **13**, Article 2158. <https://doi.org/10.3390/ma13092158>
- [5] 王博, 张骁勇, 马晶, 等. 一种 X80 管线钢焊接接头疲劳裂纹扩展门槛值的研究[J]. 焊管, 2014, 37(3): 9-13.
- [6] Wang, D., Li, T., Xie, F., Wang, Y. and Wang, H. (2022) Effect of Magnetic Field on the Electrochemical Corrosion Behavior of X80 Pipeline Steel. *Construction and Building Materials*, **350**, Article ID: 128897. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128897>
- [7] Sharma, L. and Chhibber, R. (2019) Microstructure Evolution and Electrochemical Corrosion Behaviour of API X70 Linepipe Steel in Different Environments. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **171**, 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.01.013>
- [8] Bai, Y., Xu, J., Wei, B. and Sun, C. (2022) Effects of the IR Drop on the Electrochemical Corrosion of X80 Pipeline Steel in Different Solutions. *Coatings*, **12**, Article 1314. <https://doi.org/10.3390/coatings12091314>
- [9] Chen, L., Du, Y., Guo, L., Zhu, Z., Liang, Y. and Zhang, L. (2024) Corrosion Behavior and Evaluation Method of Pipeline Steel under Dynamic AC Interference: A Study. *Materials and Corrosion*, **76**, 305-315. <https://doi.org/10.1002/maco.202414607>
- [10] Wu, B., Yan, T., Chen, L., Wang, H., Fang, Y. and Bao, Z. (2024) Electrochemical Corrosion Behavior of X80 Pipeline Steel Welded Joints Fabricated by Ultrasound-Assisted Submerged Arc Welding in CO₂-Saturated Solution. *International Journal of Electrochemical Science*, **19**, Article ID: 100475. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100475>
- [11] Ohaeri, E., Omale, J., Eduok, U., Szpunar, J., Arafin, M. and Fazeli, F. (2020) Effect of Microstructure and Texture Evolution on the Electrochemical Corrosion Behavior of Warm-Rolled API 5L X70 Pipeline Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **51**, 2255-2275. <https://doi.org/10.1007/s11661-020-05659-7>
- [12] Wang, X., Wang, Z., Chen, Y., Song, X. and Xu, C. (2019) Research on the Corrosion Behavior of X70 Pipeline Steel under Coupling Effect of AC + DC and Stress. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **28**, 1958-1968. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-03959-7>
- [13] Sun, F., Han, P. and He, B. (2023) An Analysis of Electrochemical Corrosion on Pipeline Steel in Silty Soil under Salt-Temperature Coupling Environments. *Chemical Engineering Science*, **274**, Article 118704. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118704>
- [14] Liu, L., Shan, X., Bi, F., Sun, C., Wang, M., Tan, X., *et al.* (2025) Effect of Temperature on the Electrochemical Corrosion Behavior of X52 Pipeline Steel in NS4 Simulated Solution. *International Journal of Electrochemical Science*, **20**, Article ID: 100883. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100883>
- [15] Feng, J., Chen, Z., Wu, C., Qin, C. and Wei, X. (2022) Corrosion Mechanism and Damage Characteristic of Q235B Steel under the Effect of Stray Current in NS4 Simulated Soil Solution. *Process Safety and Environmental Protection*, **164**, 38-49. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.06.004>
- [16] Qian, S. and Frank Cheng, Y. (2020) Corrosion of Pipelines under Dynamic Direct Current Interference. *Construction and Building Materials*, **261**, Article 120550. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120550>