

埋地双金属复合管焊缝区域腐蚀风险及阴保效果评价

任 阳¹, 刘永良¹, 汪 洋¹, 曾云帆¹, 刘 建¹, 张少刚², 王修云², 王毛毛²

(1. 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司川东北气矿, 达州 635000;

2. 安科工程技术研究院(北京)有限公司, 北京 102209)

摘 要: 在模拟现场土壤溶液中, 对 L360QS/N08825 双金属复合管基管(L360QS 钢)与焊缝(625 合金)的电化学行为进行了研究, 探讨了阴保条件对焊缝区域电偶腐蚀风险的影响, 并在过保护阴保条件下分析了焊缝区域电偶腐蚀致氢致开裂的风险。利用全尺寸管段探析了基管与焊缝暴露面积比对阴保效果的影响。结果表明: 在无阴保条件下, 基管在模拟土壤溶液中存在较高电偶腐蚀风险; 强制电流阴极保护可以有效减缓管道腐蚀, 且过保护阴保条件下焊缝无氢致开裂风险; 在阴极保护下, 随着基管暴露面积逐渐减小, 基管的自腐蚀电位及断电电位受焊缝影响发生正移, 阴保效果降低。

关键词: 双金属复合管; 土壤溶液; 电偶腐蚀; 氢致开裂; 阴极保护

中图分类号: TG174

文献标志码: A

文章编号: 1005-748X(2024)08-0042-08

油气管道通常埋地敷设, 其外腐蚀防护系统广泛采用外防腐层与阴极保护相结合的方式。防腐层作为管道的第一道屏障, 物理隔离了管道与土壤, 避免其直接接触, 但在制造、运输、施工及服役过程中, 防腐层难免会产生缺陷, 性能也会逐渐下降; 而阴极保护则对这些缺陷位置进行了补充保护, 确保缺陷处管体裸露部分免受外腐蚀^[1-6]。

西南油气田某高含硫气田采用 L360QS/N08825 双金属复合管(以下称双金属复合管)解决特高含硫气田地面集输管道内腐蚀问题, 并利用 3PE 防腐层与外加电流阴极保护方式控制管道外腐蚀。该双金属复合管以 L360QS 碳钢为外层基管、N08825(Incoloy 825)镍基合金(以下称 825 合金)为内层衬管, 并使用 N06625(Inconel625)镍基合金(以下称 625 合金)焊丝进行焊接。625 合金与 L360QS 钢存在一定电位差, 一旦局部防腐层出现破损, 两种金属会发生电偶腐蚀, 双金属复合管存在电偶腐蚀风险^[7-9]。在未施加阴保或强制电流阴极保护作用下, 基管母材、焊缝区域的腐蚀风险如何发展尚未明确^[10-11]。目前, 对于双金属复合管焊缝区腐蚀的研究主要集中在内部腐蚀介质对焊缝区域腐蚀行为的影响^[12-13], 优化焊接工艺、提高焊缝质

量或采用热处理手段提高焊缝组织均匀性等方面^[14-16], 而对于外加电流阴极保护对双金属复合管焊缝区域腐蚀行为影响的研究较少。因此, 作者模拟了焊缝局部区域防腐层破损、未施加阴保等特殊条件, 评估了在未施加阴保、正常阴保以及过保护条件下基体与焊缝在土壤模拟溶液中的电偶腐蚀风险, 并进一步利用全尺寸管段评价了暴露面积对阴极保护效果的影响, 为双金属复合管阴极保护推广和应用提供理论基础和实践经验。

1 试 验

1.1 试验材料

试验材料为双金属复合管基管 L360QS 钢、焊缝材料 625 合金, 具体化学成分见表 1。参考文献[17]以模拟土壤溶液为试验溶液, 其离子质量分数为 0.012 1 mg/g Ca^{2+} 、0.012 1 mg/g Cl^- 、0.009 5 mg/g K^+ 、0.004 9 mg/g Mg^{2+} 、0.008 3 mg/g Na^+ 、0.016 1 mg/g NO_3^- 、0.009 2 mg/g SO_4^{2-} 、0.190 mg/g HCO_3^- , pH 为 7.09。

1.2 电化学测试

参考 GB/T 40299—2021《金属和合金的腐蚀 腐蚀试验电化学测量方法适用惯例》, 在土壤模拟溶液中对基管与焊缝开展电化学测试。测试仪器为 CS 电化学工作站, 电极系统为标准三电极体系: 工作电极为 L360QS 钢与 625 合金, 辅助电极为铂片, 参比电极为饱和甘汞电极(SCE)^[18]。

收稿日期: 2024-02-28

通信作者: 张少刚(1998—), 工程师, 硕士, 从事材料腐蚀与防护工作, 15191970570, 1279855469@qq.com

表 1 双金属复合管的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of bimetallic composite pipe

材料	质量分数/%													
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	Fe	V	Nb
L360QS	0.14	0.45	1.65	0.018	0.003	0.3	0.003	0.15	0.35	0.006	0.025	余量	0.05	0.025
625	0.043	0.42	0.06	0.008	0.002	22.03	余量	8.62	—	0.32	0.37	4.04	0.001	3.53

用线切割方式从双金属复合管基管和焊缝处切取尺寸为 10 mm×10 mm×5 mm 的试片;用丙酮、无水乙醇对试片进行除油,再用砂纸(至 1200 号)打磨试片,去离子水冲洗后作为工作电极。将 1 L 模拟土壤溶液倒入五口瓶中,五口瓶置于水浴锅内,温度达到试验温度(25 ℃)后连接三电极体系。待开路电位稳定后进行极化曲线测试,极化曲线测试的扫描区间为-0.5~0.5 V(相对于开路电位),扫描速率为 1 mV/s,采用 Cview 软件对极化曲线进行 Tafel 拟合,拟合所选电位范围为-200~200 mV^[18]。

1.3 电偶腐蚀试验

参考标准 GB/T 15748—2013《船用金属材料电偶腐蚀试验方法》,在不同阴保条件(无阴保、正常阴保以及过保护)下对基管与焊缝开展电偶腐蚀试验。工作电极为 L360QS/625 电偶试样,辅助阳极 为混合金属氧化物(MMO)阳极,参比电极为饱和甘汞电极(SCE)。

从基管与焊缝处切取尺寸为 100 mm×8 mm×3 mm 的试片。用丙酮、无水乙醇对试片进行除油,用砂纸(至 1000 号)打磨,去离子水冲洗;然后,利用电偶腐蚀夹具偶接 L360QS 钢与 625 合金试样(如图 1 所示),用铜线缠绕密封导出,利用万用表测量电偶试样与导线之间的导通性。

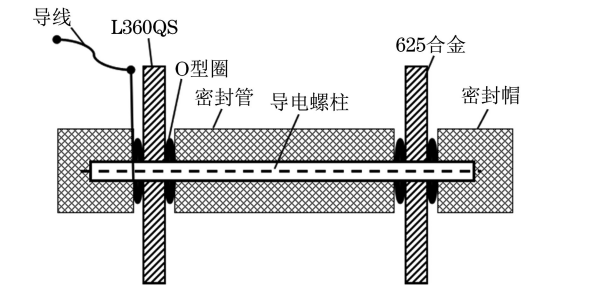


图 1 电偶腐蚀装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of galvanic corrosion device

将偶接后试样置于模拟土壤溶液中,采用恒温水浴锅控制试验温度为 25 ℃。利用恒电位仪对电偶试样施加阴保,正常阴保电位为-1.2 V,过保护电位为-1.6 V。电偶腐蚀时间为 120 h。试验结束后去除腐蚀产物,称量。参考 JB/T 7901—2023《金

属材料试验室均匀腐蚀全浸试验方法》计算试样的腐蚀速率,如式(1)所示。参照标准 NACE SP 0775—2023《油田作业中腐蚀试样的制备、安装、分析和解释》,根据计算得到的腐蚀速率评价材料的腐蚀等级。

$$v_{\text{corr}} = \frac{36\,500 \cdot \Delta m}{\rho \cdot t \cdot S} \tag{1}$$

式中: v_{corr} 为腐蚀速率,mm/a; Δm 为试样腐蚀前后质量差, ρ 为材料密度,g/cm³(碳钢密度为 7.8 g/cm³,镍基合金密度为 8.4 g/cm³); t 为试验时间,d; S 为试样表面积,mm²。

1.4 氢致开裂试验

参考 GB/T 8680—2015《管线钢和压力容器钢抗氢致开裂评定方法》,在过保护阴保条件下对基管与焊缝电偶开展氢致开裂试验。工作电极为 L360QS/625 电偶试样,辅助阳极为 MMO 阳极,参比电极为饱和甘汞电极(SCE)。

从基管与焊缝处切取尺寸为 100 mm×8 mm×3 mm 的试片,使用导线连接处理好的试片,并引出导线,使用密封胶密封导线连接位置,测试导线连接的导通性。将偶接后试样置于模拟土壤溶液中,控制温度为 25 ℃,利用恒电位仪施加外加电流,阴保电位为-1.6 V,试验时间为 168 h,试验结束后取出试样。

参照 NACE TM 0284—2016《管道和压力容器用钢抗氢致开裂性能评价的试验方法》,观察 625 合金试样表面裂纹,并计算裂纹敏感率、裂纹长度率及裂纹厚度率,确定阴极材料的电偶氢致开裂敏感性。

1.5 阴保效果评价

参考 GB/T 21246—2020《埋地钢制管道阴极保护参数测量方法》,评价了不同阴保条件下,不同基管与焊缝的暴露面积比的双金属复合管段的阴极保护效果。

工作电极为 L360QS/625 合金试验管段,辅助阳极为 MMO 阳极,参比电极为饱和甘汞电极(SCE)。从现场截取全尺寸管段,管段截面尺寸为 $\phi 159\text{ mm} \times 7\text{ mm}$,长度为 400 mm。通过机器打磨去除表面锈层,保持焊缝暴露面积不变,用环氧树脂密封管段两端,通过密封材料控制基管外表面暴露

面积,得到基管与焊缝暴露面积比分别为 5.0:1.0、1.0:1.0、0.2:1.0 的 3 种管段。用铜线焊锡导出,再用树脂胶密封焊接位置,测试示意如图 2 所示。

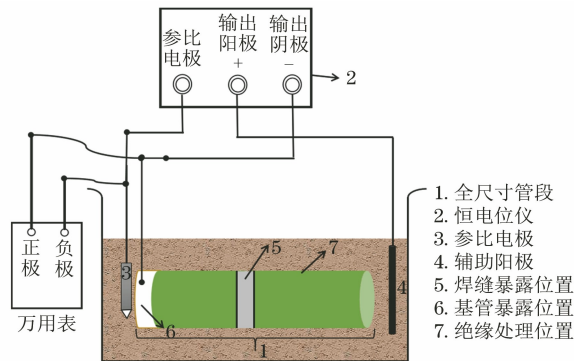


图 2 阴保效果测试示意

Fig. 2 Schematic diagram of cathodic protection effect test

将试验管段浸泡在土壤模拟溶液中,浸泡 3 h 后测量管段暴露位置处基管与焊缝的自腐蚀电位,然后利用恒电位对管段施加外加电流,给定电位分别为 -0.9 、 -1.0 、 -1.2 V,通电 1 h 后分别测量基管与焊缝的断电电位,以断电电位是否达到最小保护电位 (-0.85 V) 为判据,评价 3 种管段的阴保效果^[19-21]。

2 结果与讨论

2.1 电化学性能

由图 3 可见,在土壤模拟溶液中 L360QS 钢与 625 合金自腐蚀电位为 -0.714 V 和 -0.411 V,电位差 303 mV,参考标准 T/CSTM 0046.12—2018 判定两种材料存在潜在电偶腐蚀风险;L360QS 钢的自腐蚀电流密度为 5.88×10^{-6} A/cm²,625 合金的自腐蚀电流密度较 L360QS 钢小 1 个数量级,仅为 2.77×10^{-7} A/cm²,腐蚀风险较低。

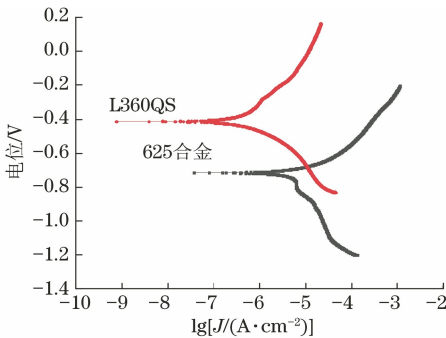


图 3 L360QS 钢与 625 合金在土壤模拟溶液中的极化曲线

Fig. 3 Polarization curves of L360QS steel and 625 alloy in soil simulated solution

2.2 电偶腐蚀风险评价

2.2.1 腐蚀速率

由图 4 可见:当施加阴保 ($-1.6 \sim -1.2$ V) 后,

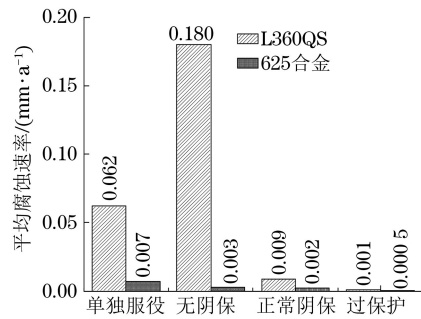


图 4 不同阴保条件下 L360QS/625 偶接前后在土壤模拟溶液中的腐蚀速率

Fig. 4 Corrosion rates of L360QS/625 before and after coupling in soil simulation solution under different cathodic protection conditions

L360QS 钢的腐蚀速率均小于 0.01 mm/a,特别是在过保护条件下,腐蚀速率为 0.001 mm/a,根据 GB/T 21448—2017《埋地钢制管道阴极保护技术规范》可以判定,L360QS 钢均达到阴极保护效果,基本无电偶腐蚀风险;无阴保条件下,单独服役时,L360QS 钢的腐蚀速率达到 0.062 mm/a,依据 NACE SP 0775—2023 可以判定,此时 L360QS 钢的腐蚀等级为中等腐蚀,与 625 合金偶接后 L360QS 钢的腐蚀速率增大至 0.180 mm/a,腐蚀风险显著升高。

2.2.2 腐蚀形貌与腐蚀产物成分

(1) 无阴保条件下

由图 5 可见:无阴保条件下腐蚀后,未偶接 L360QS 钢表面均匀附着一层疏松的黑色产物、夹杂少许黄色产物;去除腐蚀产物后,L360QS 钢表面未发现点蚀坑,腐蚀均匀。由图 6 和图 7 可见,无阴保条件下腐蚀后,偶接 625 合金无明显变化,去除腐蚀产物后具有良好的金属光泽,偶接 L360QS 钢表面腐蚀产物更多,但去除腐蚀产物后表面无点蚀坑,仍具有较好的金属光泽。

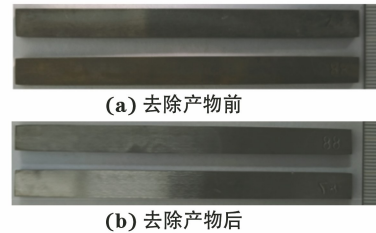


图 5 无阴保条件下未偶接 L360QS 钢腐蚀后表面宏观形貌

Fig. 5 Macrographs of uncoupled L360QS steel surfaces after corrosion without cathodic protection before (a) and after removing corrosion products (b)

由图 8 可见,未偶接 L360QS 钢表面腐蚀产物膜层较薄,呈层状分布在试样表面。偶接 L360QS 钢表面腐蚀产物快速沉积,腐蚀产物膜厚度增加,分布均匀,局部区域产物膜层脱水导致龟裂,膜层无保

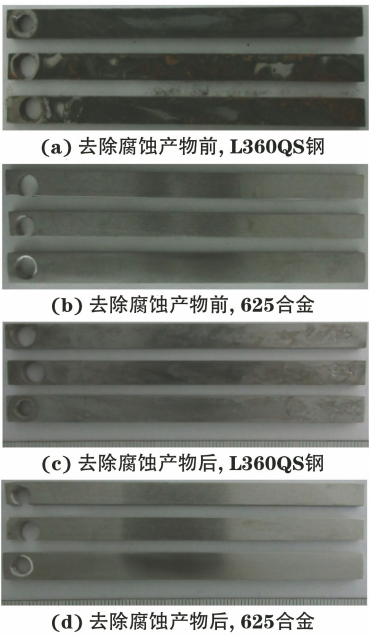
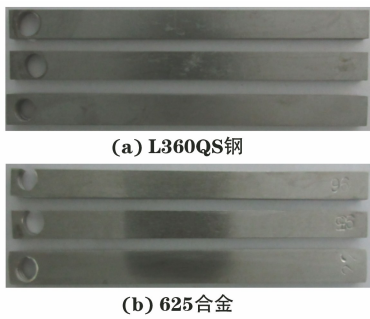


图 6 腐蚀前 L360QS 钢和 625 合金表面的宏观形貌
Fig.6 Macrographs of surfaces of L360QS steel (a) and 625 alloy (b) before corrosion

图 7 无阴保条件下偶接试样腐蚀后表面宏观形貌
Fig.7 Macrographs of coupled L360QS steel and 625 alloy surfaces without cathodic protection before (a, b) and (c, d) after removing corrosion products

护作用,腐蚀迅速发生。由表 2 可见,腐蚀产物主要是由 Fe 与 O 组成的化合物。由于腐蚀产物较多,导电性差,为提高试样的导电性,EDS 分析时采用喷碳处理,因此 EDS 分析结果中 C 含量较高。XRD 检测结果表明,无阴保条件下,未偶接 L360QS 钢表面腐蚀产物的物相为 FeOOH、FeO,如图 9 所示,与 EDS 检测结果一致。

(2) 阴保条件下

由图 10 和图 11 可见,在正常阴保条件及过保护阴保条件下,偶接 L360QS 钢和 625 合金腐蚀后表面颜色基本没变,仍呈金属光泽,表面均无明显产

物沉积,且未发现明显的局部腐蚀迹象;去除腐蚀产物后,偶接 L360QS 钢和 625 合金表面平整光滑,仍清晰可见金属打磨痕迹,腐蚀轻微。

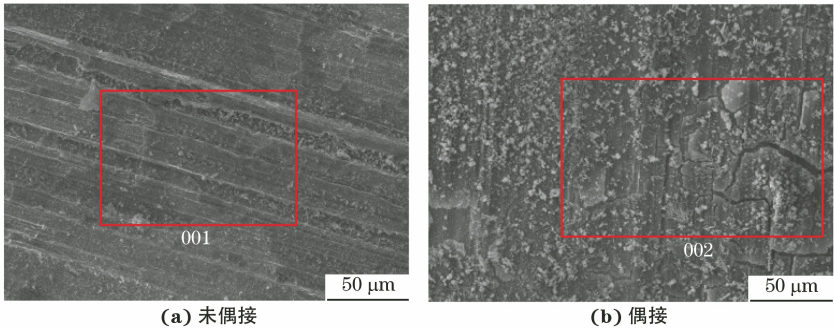


图 8 无阴保条件下 L360QS 钢腐蚀后表面微观形貌
Fig.8 Micro morphology of uncoupled (a) and coupled (b) L360QS steel surfaces after corrosion without cathodic protection
表 2 无阴保条件下 L360QS 钢表面腐蚀产物的化学成分

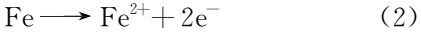
Tab.2 Chemical composition of corrosion products on L360QS steel surface without cathodic protection

条件	原子分数/%						
	C	O	Al	Si	S	Cl	Ca
未偶接	4.71±0.14	50.36±0.46	—	0.15±0.06	0.00±0.04	0.08±0.04	—
偶接	6.07±0.16	52.66±0.47	0.19±0.06	0.24±0.06	0.14±0.04	0.14±0.04	0.16±0.05

2.2.3 不同阴保条件对电偶腐蚀影响机理

无阴保条件下,L360QS 钢的电极电位比溶液中氧的电极电位低。因此,L360QS 钢作为阳极,表面容易失去电子生成 Fe^{2+} ,如式(2)所示,溶液中溶解氧得到电子生成 OH^- ,如式(3)所示, OH^- 与 Fe^{2+} 反应生成不稳定产物 $\text{Fe}(\text{OH})_2$,如式(4)所

示。 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 不稳定,一部分氧化生成 FeOOH ,其余水解生成 FeO ,反应如式(5)~(6)所示。图 12 为 L360QS 钢和 625 合金电偶腐蚀机理图。



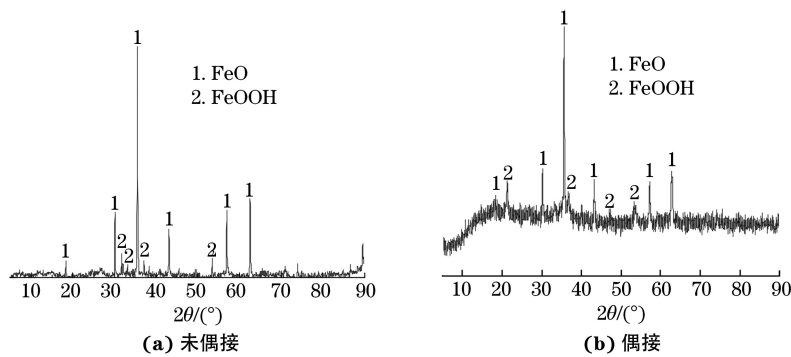


图 9 无阴保条件下 L360QS 钢表面腐蚀产物的 XRD 谱

Fig.9 XRD patterns of corrosion products on uncoupled (a) and coupled (b) L360QS steel without cathodic protection

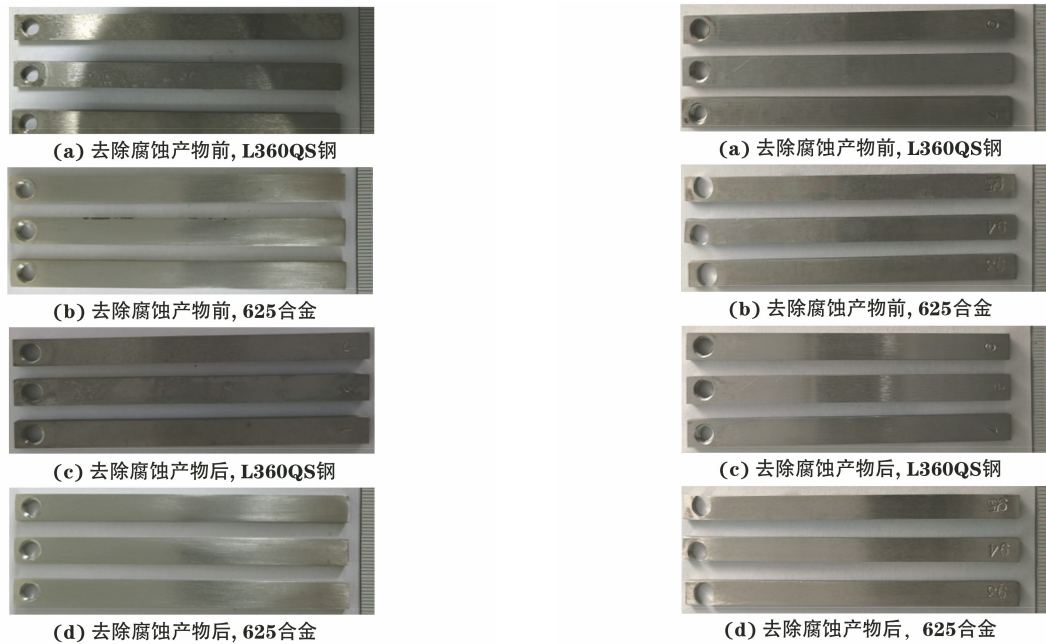
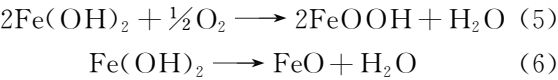


图 10 正常阴保条件下偶接 L360QS 钢与 625 合金腐蚀后表面宏观形貌

图 11 过保护阴保条件下偶接 L360QS 钢与 625 合金腐蚀后表面宏观形貌

Fig.10 Macrographs of coupled L360QS steel and 625 alloy surfaces under normal cathodic protection before (a, b) and after (c, d) removing corrosion products

Fig.11 Macrographs of coupled L360QS steel and 625 alloy surfaces under excessive cathodic protection before (a, b) and after (c, d) removing corrosion products



当 L360QS 钢和 625 合金偶接时, L360QS 钢腐蚀电位较低, 成为电偶电池的阳极, 溶解速率加快, 而 625 合金的腐蚀电位较高, 成为电偶电池的阴极得到保护, 溶解速率降低。两种材料之间的电位差为电子流通提供动力来源, L360QS 钢表面源源不断失去电子, 电子沿电偶腐蚀夹具导电螺柱传递到 625 合金表面, 促使 625 合金发生去极化反应, 抑制腐蚀发生。此时 625 合金腐蚀速率下降, L360QS 钢腐蚀速率快速升高, 腐蚀产物层厚度增加, 但变得疏松, 不具有保护作用, 无法阻碍离子传递, 腐蚀性

阴离子穿过腐蚀产物层使 L360QS 钢继续发生均匀腐蚀, 因此在防腐层破损位置 L360QS 钢的腐蚀风险较高。

施加阴保时, 恒电位仪通过直流电源以及辅助阳极施加外加电流, 电流从辅助阳极流入土壤溶液, 然后从溶液流入 L360QS 钢与 625 合金试样表面, 为 L360QS 钢及 625 合金提供大量电子, 使其整体处于电子过剩的状态, 金属表面各点达到同一负电位, 且两个试样电位均低于周围环境, 从而抑制金属发生腐蚀, 如图 13 所示。

2.3 氢致开裂风险评价

在过保护阴保条件下, 偶接 625 合金在模拟土

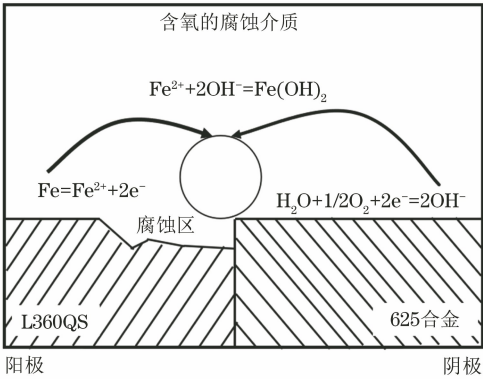


图 12 L360QS 钢和 625 合金电偶腐蚀机理图
Fig. 12 Mechanism diagram of galvanic corrosion of L360QS steel and 625 alloy

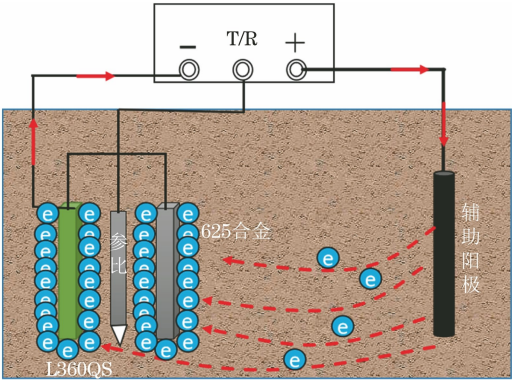


图 13 阴保作用原理图
Fig. 13 Schematic diagram of cathodic protection

壤溶液中浸泡 168 h 后,表面平整,仍呈金属光泽。由图 14 可见,氢致开裂试验后在 625 合金截面上仍可清晰观察到打磨痕迹,无裂纹生成,参考标准 NACE TM 0284—2016 判定基管与焊缝在土壤环境中无电偶氢致开裂风险。

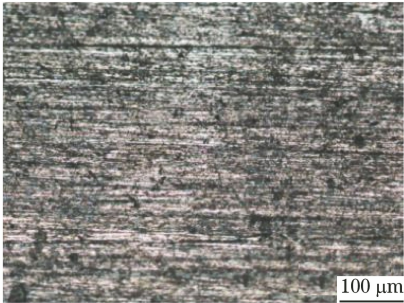


图 14 过保护阴保条件下氢致开裂试验后偶接 625 合金截面微观形貌
Fig. 14 Micro morphology of cross-section of coupled 625 alloy after hydrogen induced cracking test under excessive cathodic protection

2.4 暴露面积比对阴保效果的影响

由表 3 可见,在模拟土壤溶液中,随着基管暴露面积逐渐减小,基管的自腐蚀电位正向偏移,焊缝的

自腐蚀电位逐渐负向偏移。对比不同暴露面积比管段的断电电位,结果如表 4 所示。由表 4 可见,当恒电位仪给定电位为-1.2~-1.0 V 时,焊缝的断电电位均能达到阴极保护电位,当给定电位为-0.9 V 且基管裸露面积足够小时,基管与焊缝断电电位均正移至-0.85 V 以上,参考标准 GB/T 21448—2017 判定阴保不达标,此时焊缝对于基管的影响加剧,阴保效果下降。

表 3 不同暴露面积比管段在模拟土壤溶液中的自腐蚀电位
Tab. 3 Free corrosion potentials of pipe sections with different ratios of exposed area in simulated soil solution

基管与焊缝的 暴露面积比	自腐蚀电位/V	
	基管	焊缝
5.0:1	-0.712 8	-0.276 9
1.0:1	-0.641 7	-0.521 6
0.2:1	-0.567 5	-0.567 3

表 4 不同暴露面积比管段的断电电位
Tab. 4 Off-potentials of pipe sections with different ratios of exposed area

给定电位/ V	基管与焊缝的 暴露面积比	断电电位/V	
		基管	焊缝
-0.9	5.0:1	-0.89	-0.89
	1.0:1	-0.89	-0.88
	0.2:1	-0.84	-0.80
-1.0	5.0:1	-0.97	-0.97
	1.0:1	-0.97	-0.94
	0.2:1	-0.93	-0.86
-1.2	5.0:1	-1.10	-1.10
	1.0:1	-1.10	-1.10
	0.2:1	-1.10	-0.95

3 结 论

(1) 典型土壤环境中,防腐蚀层破损区域未偶接基管(L360QS 钢)的腐蚀为中度腐蚀,与焊缝(625 合金)偶接后 L360QS 钢腐蚀为严重腐蚀,因此在防腐蚀层破损位置基管腐蚀风险较高,焊缝无腐蚀风险。

(2) 625 合金与 L360QS 钢偶接后的电偶效应对 L360QS 钢在腐蚀环境中的腐蚀进程有显著影响,对腐蚀产物和腐蚀机理没有明显影响,腐蚀产物均为铁氧化物。

(3) 阴保作用主要是通过补充 L360QS 钢与 625 合金表面电子,从而阻止金属失去电子,抑制腐蚀发生。在 3 种阴保条件下,随着恒电位仪设定电位增大,基管腐蚀速率减小,腐蚀风险降低,且过保

护阴极保护条件下焊缝无氢致开裂风险。

(4) 随着基管暴露面积逐渐减小,基管的自腐蚀电位发生正向偏移,当基管暴露面积足够小时,阴极保护效果会降低,最终可能导致保护不达标。

参考文献:

- [1] 刘书文,张森峰,田晓宇,等. L360QS/N08825 复合管母材及焊缝腐蚀性能研究[J]. 全面腐蚀控制,2016,30(12):61-67.
LIU S W, ZHANG S F, TIAN X Y, et al. Corrosion properties researching of base metals and welding metals of L360QS/N08825 composite pipes[J]. Total Corrosion Control,2016,30(12):61-67.
- [2] 孙吉星,王庆璋,金曦,等. 海底管道外防腐层破损阴极保护数值模拟[J]. 全面腐蚀控制,2016,30(11):7-9,85.
SUN J X, WANG Q Z, JIN X, et al. Numerical simulation of cathodic protection for submarine pipeline on external anti-corrosion coating breakdown condition[J]. Total Corrosion Control,2016,30(11):7-9,85.
- [3] 李飞飞. 天然气管道防腐层及阴极保护[J]. 清洗世界,2022,38(8):106-108.
LI F F. Anticorrosion coating and cathodic protection of natural gas pipeline[J]. Cleaning World,2022,38(8):106-108.
- [4] 兰才富,鲁青龙,申耀东,等. 广西区内天然气管道阴极保护有效性研究[J]. 石化技术,2022,29(4):62-63.
LAN C F, LU Q L, SHEN Y D, et al. Study on effectiveness of cathodic protection of natural gas pipeline in Guangxi [J]. Petrochemical Industry Technology,2022,29(4):62-63.
- [5] 齐大谦,张前. 天然气长输管道阴极保护的有效性影响因素[J]. 石化技术,2021,28(8):182-183.
QI D Q, ZHANG Q. Factors influencing the effectiveness of cathodic protection for long-distance natural gas pipeline [J]. Petrochemical Industry Technology,2021,28(8):182-183.
- [6] 单庆伟. 长输天然气管道防腐层及阴极保护技术分析[J]. 全面腐蚀控制,2021,35(8):128-129.
SHAN Q W. Analysis of anticorrosive coating and cathodic protection technology for long distance natural gas pipeline[J]. Total Corrosion Control,2021,35(8):128-129.
- [7] 张诗雨. Q235 钢在酸性红壤中的电偶腐蚀机理研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2016.
ZHANG S Y. Research on galvanic corrosion mechanism of Q235 steel in acid red soils [D]. Nanchang:Nanchang Hangkong University,2016.
- [8] 陈云翔,林德源,范晓磊,等. 铜/锌在不同 pH 土壤模拟液中的电偶腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护,2022,43(2):28-33,61.
CHEN Y X, LIN D Y, FAN X L, et al. Galvanic corrosion behavior of copper/zinc in simulated soil solution with different pH values [J]. Corrosion & Protection,2022,43(2):28-33,61.
- [9] 蔡勇. P110S、13Cr 典型油管材料腐蚀损伤行为研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2022.
CAI Y. Study on corrosion damage behavior of P110S and 13Cr typical tubing materials[D]. Harbin: Harbin Engineering University,2022.
- [10] 王晓欢,张胜寒,狄杰. 金属电偶腐蚀影响因素研究综述[J]. 广东化工,2022,49(19):142-143,147.
WANG X H, ZHANG S H, DI J. Review of research on influencing factors of galvanic corrosion of metals [J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(19):142-143,147.
- [11] 赵国仙,胡晓彤. 925 镍基合金和 110SS 钢在高温高酸性环境中的电偶腐蚀行为[J]. 装备环境工程,2020,17(10):32-39.
ZHAO G X, HU X T. Galvanic corrosion behavior of nickel-based alloy 925 for downhole tools coupled with 110SS steel [J]. Equipment Environmental Engineering,2020,17(10):32-39.
- [12] 赵翠华,王金生,黄江中,等. 双金属复合管环焊缝 H₂S 腐蚀疲劳性能试验研究[J]. 焊接技术,2020,49(2):27-30,5.
ZHAO C H, WANG J S, HUANG J Z, et al. Study on corrosion fatigue performance of circumferential weld of bimetallic composite pipe in H₂S environment[J]. Welding Technology,2020,49(2):27-30,5.
- [13] 刘海璋,毕宗岳,杨军,等. N08825/L450MS 复合管焊缝组织性能及抗腐蚀特性研究[J]. 焊管,2017,40(8):1-7.
LIU H Z, BI Z Y, YANG J, et al. Research on weld microstructure and corrosion resistance property of N08825/L450MS composite pipe[J]. Welded Pipe and Tube,2017,40(8):1-7.
- [14] 米振莉,杨林,李志超,等. 不同焊接方法对 TWIP 钢焊后热影响区组织和性能的影响[J]. 焊接学报,2013,34(5):9-12,113.
MI Z L, YANG L, LI Z C, et al. Study on heat-affected zone of TWIP steel after welding [J]. Transactions of the China Welding Institution,2013,34(5):9-12,113.

[15] 赵磊,王靖,鲁欣豫,等.铜钎焊工艺在海底管道阴极保护中的应用研究[J].焊接技术,2015,44(4):43-45.
ZHAO L, WANG J, LU X Y, et al. Study on application of copper brazing technology in cathodic protection of submarine pipeline [J]. Welding Technology,2015,44(4):43-45.

[16] 毕宗岳,刘道新,李轩,等.热处理对 ERW 焊缝沟槽腐蚀敏感行为的影响[J].材料热处理学报,2011,32(2):48-53,60.
BI Z Y, LIU D X, LI X, et al. Effect of heat treatment on grooving corrosion behavior of electric resistance welded seam[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2011,32(2):48-53,60.

[17] 唐荣茂,朱亦晨,刘光明,等. Q235 钢/导电混凝土在 3 种典型土壤环境中腐蚀的灰色关联度分析[J].中国腐蚀与防护学报,2021,41(1):110-116.
TANG R M, ZHU Y C, LIU G M, et al. Gray correlative degree analysis of Q235 steel/conductive concrete corrosion in three typical soil environments [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection,2021,41(1):110-116.

[18] 刘欣,裴锋,朱亦晨,等. Q235 钢和纯铜在不同 pH 红壤模拟溶液中的腐蚀电化学特征[J].腐蚀与防护,2020,41(3):22-25,31.
LIU X, PEI F, ZHU Y C, et al. Electrochemical corrosion characteristics of Q235 steel and copper in simulated red soil solutions with different pH values [J]. Corrosion & Protection,2020,41(3):22-25,31.

[19] 刘国.阴极保护机理的介绍与浅议[J].腐蚀与防护,2021,42(8):76-80.
LIU G. Introduction and discussion of cathodic protection mechanisms[J]. Corrosion & Protection,2021,42(8):76-80.

[20] 徐佩君,李洪福,廖臻,等.新疆油田长输管道阴极保护效果评价[J].材料保护,2023,56(2):147-156.
XU P J, LI H F, LIAO Z, et al. Evaluation on cathodic protection effect of long-distance pipeline in Xinjiang oil field[J]. Materials Protection,2023,56(2):147-156.

[21] 阮雨风.阴极保护效果评价技术[J].全面腐蚀控制,2022,36(10):53-56.
RUAN Y F. Evaluation technology of cathodic protection effects[J]. Total Corrosion Control,2022,36(10):53-56.

Evaluation of Corrosion Risk and Cathodic Protection Effect for Weld of Buried Bimetal Composite Pipe

REN Yang¹, LIU Yongliang¹, WANG Yang¹, ZENG Yunfan¹, LIU Jian¹,
ZHANG Shaogang², WANG Xiuyun², WANG Maomao²

(1. Chuanbei Gas Mine, Southwest Oil & Gas Field Branch of Petrochina, Dazhou 635000, China;
2. Safetech Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: The electrochemical behavior of the base pipe (L360QS steel) and the weld (625 alloy) of L360QS/N08825 bimetallic composite pipe was studied in simulated soil solution in field. The effect of cathodic protection on the risk of galvanic corrosion in weld area was discussed. The risk of hydrogen induced cracking caused by galvanic corrosion in the weld area was further analyzed under excessive cathodic protection. The effect of exposed area ratios of base pipe to weld on the effectiveness of cathodic protection was analyzed using full-size pipe sections. The results show that in the absence of cathodic protection, the base pipe had a high risk of galvanic corrosion in simulated soil solution. Forced current cathodic protection could effectively slow down the corrosion of base pipe, and there was no risk of hydrogen induced cracking in weld area under excessive cathodic protection condition. Under cathodic protection, as the exposed area of base pipe gradually decreased, the free corrosion potential and off-potential of base pipe shifted positively under the influence of weld, and the cathodic protection effect decreased.

Key words: bimetallic composite pipe; soil solution; galvanic corrosion; hydrogen induced cracking; cathodic protection