

超音速电弧喷涂 Al 涂层在污水储罐中的腐蚀行为

周攀虎, 周勇, 董会, 孙良, 边颖帅

(西安石油大学 材料科学与工程学院, 西安 710065)

摘要: **目的** 研究 Al 涂层在污水储罐不同位置的腐蚀行为, 为热喷涂 Al 涂层服役提供理论基础。**方法** 采用超音速电弧喷涂在 Q235B 钢表面喷涂 Al 涂层, 采用扫描电子显微镜 (SEM) 分析 Al 涂层腐蚀前后的组织形貌, 采用能谱仪 (EDS) 对涂层元素组成进行表征。通过涂层减薄速率、腐蚀形貌特征等, 表征涂层在储罐不同位置 (水/气界面、水层、水/泥界面和泥层) 的腐蚀行为。**结果** 喷涂态 Al 涂层为典型的层状结构, 未发生明显氧化, 孔隙率为 5.4%, 厚度为 60 μm 。涂层浸泡 60 d 后, 水/气界面和水层环境中涂层表面仍保持喷涂态的典型特征, 即液滴铺展形成的光滑区域和液滴飞溅形成的粗糙区域。由于初始产物的堵塞隔离作用在涂层表面生成氧化膜, 涂层发生的腐蚀形式为均匀腐蚀。水/泥界面和泥层环境中, 由于氧浓差腐蚀等因素, 使得涂层氧化膜的腐蚀速率大于其钝化速率, 涂层腐蚀严重, 出现局部腐蚀坑、裂纹和脱落现象, 主要发生一层或几层扁平粒子整体剥落造成的局部腐蚀。另外, 泥层腐蚀环境中, 整个涂层内部的扁平粒子界面已完全腐蚀, 涂层为松散状态。**结论** 与海洋中相比, 铝涂层在污水储罐中的腐蚀机理有所差别。与普通储罐相比, 阳极铝涂层保护储罐的腐蚀形式不同, 但是超音速电弧喷涂 Al 涂层, 在此实验环境中保护前后, 污水储罐最易失效的位置相同, 都为泥层环境。

关键词: 污水储罐; 超音速电弧喷涂; 铝涂层; 腐蚀区域; 耐蚀性; 腐蚀机理

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)08-0073-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.08.009

Corrosion Behavior of Supersonic Arc Spraying Al Coating in Sewage Storage Tanks

ZHOU Pan-hu, ZHOU Yong, DONG Hui, SUN Liang, BIAN Ying-shuai

(School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: The work aims to provide the theoretical basis for the service of Al coating by studying the corrosion behavior of

收稿日期: 2019-11-22; 修订日期: 2020-04-16

Received: 2019-11-22; **Revised:** 2020-04-16

基金项目: 陕西省自然科学基金 (2020JM-540); 西安石油大学“材料科学与工程”省级优势学科资助项目 (YS37020203); 西安石油大学研究生创新与实践能力的培养计划资助项目 (YCS19212056)

Fund: Supported by the Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2020JM-540), Foundation of Materials Science and Engineering of Provincial Advantage Disciplines in Xi'an Shiyou University (YS37020203) and Xi'an Shiyou University Graduate Innovation and Practice Ability Training Project (YCS19212056)

作者简介: 周攀虎 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为金属材料的腐蚀与防护。

Biography: ZHOU Pan-hu (1995—), Male, Master, Research focus: corrosion and protection of metal materials.

通讯作者: 董会 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为材料表面涂层 (隔热、耐蚀、耐磨涂层) 技术。邮箱: donghuihy@163.com

Corresponding author: DONG Hui (1981—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: coating (thermal barrier, anti-corrosion and anti-wear) technology on material surface. E-mail: donghuihy@163.com

引文格式: 周攀虎, 周勇, 董会, 等. 超音速电弧喷涂 Al 涂层在污水储罐中的腐蚀行为[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 73-80.

ZHOU Pan-hu, ZHOU Yong, DONG Hui, et al. Corrosion behavior of supersonic arc spraying Al coating in sewage storage tanks[J]. Surface technology, 2020, 49(8): 73-80.

thermal-sprayed Al coating in different positions of the sewage storage tank. Al coating was deposited on the surface of Q235B steel via supersonic arc spraying. Scanning electron microscopy (SEM) was employed to analyze the microstructure and morphology of the Al coating before and after corrosion and the energy dispersive spectrometer (EDS) was used to characterize the elemental compositions in the coating. The corrosion behavior of coating at different positions of the tank (water/air interface, water phase, water/mud interface and mud phase) was characterized via the thickness reduction rate and corrosion microstructure. The Al coating presented a typical lamellar structure with the porosity of 5.4% and the thickness of 60 μm . Additionally, the coating had no evidently oxidation. After immersion for 60 days, the surface of the coating in the water/air interface and the water phase environment still maintained typical characteristics of the as-sprayed coating, i.e. the smooth area formed by droplet spreading and the rough area formed by droplet splashing. The corrosion form of the coating was uniform corrosion because the clogging isolation of the initial products formed oxide film on the coating surface. Due to the factors, such as oxygen concentration corrosion, the corrosion rate of coating oxide film in the water/mud interface and the mud phase environment was higher than passivation rate. The coating had serious localized corrosion, and showed some cracks and spallation during immersion in the water/mud interface and the mud phase. The local corrosion caused by integral peeling of one or several layers of flat particles mainly occurred. In addition, the splat particle interfaces inside the entire coating in the mud phase corrosion environment were all completely corroded, which induced the generation of loose coating. The corrosion mechanism of Al coating in the sewage storage tank is different from that in the ocean. The corrosion mode of anodized Al coating protecting the storage tank is different from that of ordinary tanks. However, the failure positions of supersonic arc spraying coating in sewage storage tanks of the experimental environment are all the mud phase.

KEY WORDS: sewage storage tank; supersonic arc spraying; aluminum coating; corroded area; corrosion resistance; corrosion mechanism

储罐作为污水储运的重要设施,应用广泛。但由于污水成分复杂,且储罐的用途决定了其不同位置的腐蚀程度不同,因而腐蚀诱发的安全问题屡见不鲜^[1-4]。调研发现,储罐目前 50%的泄漏事故都是由腐蚀诱发的穿孔所致。其中储罐底部的腐蚀最严重,约占 80%,主要为溃疡状坑点腐蚀。因此,如何有效防腐已成为亟待解决的问题。

目前,国内外专家主要通过喷涂、刷涂、阴极保护等措施对储罐进行防护,但各有优点与不足。刷涂能起到良好的保护效果,但孔隙等缺陷较多^[2,5]。阴极保护技术能有效保护储罐,但受工况条件等影响,有些区域不能受到很好的保护^[6-7]。采用刷涂+阴极保护能有效延长储罐服役寿命,但工艺复杂且保护效果受环境温度的影响较大^[8-9]。研究指出,采用热喷涂技术制备涂层,具有保护性能优异、效率高、可大面积施工等优点。目前,欧美等国家已广泛使用热喷涂铝及其合金,对桥梁、海上设备等大型钢铁构件进行长效保护,并取得较好的效果^[10-12]。铝合金涂层能有效减缓材料发生腐蚀,但在特殊复杂工况下,由于材料的局部溶解会使其发生不同程度的局部腐蚀^[13-14]。纯铝材料在电化学腐蚀过程中,因其表面会形成附着较强的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 Al_2O_3 膜而被广泛应用^[15-17]。目前关于热喷涂铝涂层腐蚀性能的研究主要集中在氯离子等腐蚀性离子浓度的影响,即海洋环境中的腐蚀行为^[18-19]。氯离子、盐雾、冲蚀等因素的联合作用破坏涂层表面的氧化膜,阻碍膜的修复,这造成铝涂层在

海洋环境中易发生的破坏形式主要为冲蚀、缝隙腐蚀和应力破坏^[20-22]。而在污水储罐中除含有离子腐蚀外,还存在硫酸盐还原菌(SRB)腐蚀^[23]、氧浓差腐蚀^[24]等,但不含海水中的盐雾及冲蚀损伤因素。另外,服役场合决定了污水储罐不同区域的腐蚀环境不同,譬如底部的罐壁与泥接触、上部的罐壁与水与空气接触^[25]。因此,铝涂层在海水与污水储罐这两种环境中的腐蚀行为及机理完全不同。

本文通过模拟实际工况条件下超音速电弧喷涂铝涂层在污水储罐不同位置中的腐蚀行为及耐蚀性能研究,表征涂层在储罐不同位置的腐蚀规律特征,建立不同位置处储罐涂层的腐蚀机理模型,并明确铝涂层保护前后储罐腐蚀失效位置是否发生变化以及变化的机理,从而对储罐不同部位进行针对性的防护,将储罐各位置的腐蚀程度降至最低,为延长储罐服役寿命提供一定的指导意义。

1 试验

1.1 试验材料及涂层制备

试样基体选用 Q235B 挂片,尺寸为 50 mm×25 mm×2 mm。喷涂材料为 $\phi 2$ mm 的铝丝。采用超音速电弧喷涂在 Q235B 钢表面沉积 Al 涂层。喷涂前,先对基体除油、除锈,确保基体表面无污染,然后再用棕刚玉颗粒对基体进行喷砂处理,增加基体表面粗糙度。喷砂完毕后,采用 TRS300H 型超音速电弧喷

涂设备进行喷涂，喷涂工艺参数见表 1。浸泡前，对试样未喷涂处用环氧树脂进行胶封。

表 1 超音速电弧喷涂工艺参数
Tab.1 Technological parameters used in
supersonic arc spraying

Air pressure /MPa	Gas pressure /MPa	Working voltage /V	Working current /A	Lance walking velocity /(cm·s ⁻¹)
0.58	0.53	27.8	183	11

1.2 微观形貌分析

采用 JSM-6390A 型扫描电镜（SEM）及能谱分析仪（EDS）观察涂层的形貌及所含元素。采用图片法（涂层断面图片）并利用 Image J 软件统计涂层孔隙率，为提高统计准确性，选用的图片放大倍数为 800 倍，随机选取 10 个不重复区域进行孔隙率统计后，取其平均值。涂层厚度也采用图片法（涂层断面图片），测量方法为统计涂层面积与涂层宽度，计算二者的比值，最后取所有结果的平均值。由于涂层界面及表面起伏较大难以测量，为尽可能减小测量误差，在测量涂层厚度时，各位置均测量了 5 张以上不同部位的图片。

1.3 常温常压浸泡实验

实验模拟储罐实际工况，为便于观察，浸泡装置采用透明密闭容器，容器含有泥、水两种腐蚀性介质。将涂层挂片浸泡于水/气界面、水层、水/泥界面和泥层 4 个不同位置，浸泡实验示意图如图 1 所示。试验介质取自某油气田常压储罐中的污水，水质分析结果如表 2 所示，其中泥中的 Cl⁻ 含量为 17 894.45 mg/L，水中的 Cl⁻ 含量为 16 854.77 mg/L。水样为白色，不透明，无沉淀，有油气味，常温常压下溶液 pH 值为 6.46，表现为酸性，密度为 1.19 g/mL。泥样为黑色，不透明，有沉淀，有油气味，常温常压下溶液 pH 值

为 6.43，宏观表现为酸性，滤除淤泥后，水样的密度为 1.25 g/mL。试样密封浸泡 60 d，在浸泡实验过程中，由于水/气界面波动、蒸发等造成液面不稳，为尽可能减少无关因素的影响，需要定期对容器补充污水。试样浸泡 60 d 后，将试样取出并用酒精清洗吹干备用。

表 2 水质分析结果
Tab.2 Water quality analysis results

Type	Water sample	Mud sample
Bacterial content/(ind·mL ⁻¹)	SRB	2.5×10 ³
	FB	6×10 ²
	TGB	2.5×10 ⁵
Ion content/(mg·L ⁻¹)	Fe ²⁺	46.33
	Fe ³⁺	21.58
	Ca ²⁺	1993.98
	Mg ²⁺	238.24
	Cl ⁻	16 854.77
	HCO ₃ ⁻	447.99
	SO ₄ ²⁻	78.20
	S ²⁻	5.91
Oil content/(mg·L ⁻¹)	33.53	81.96
Impurity content/(mg·L ⁻¹)	15 035.00	16 865.00
Salinity/(mg·L ⁻¹)	28 108.96	29 735.28

2 结果及分析

2.1 喷涂态涂层特征

涂层喷涂态形貌如图 2 所示。涂层有两种典型形貌，液滴铺展形成的光滑区域（图 2a 中 1 区域）及液滴飞溅形成的粗糙区域（图 2a 中 2 区域）。涂层表面存在少量尺寸低于 10 μm 的孔隙。涂层为典型的层状结构（图 2b），涂层与基体互相嵌合，锚固良好，孔隙率为 5.4%，内部存在少量的横向裂纹、纵向裂纹及其他缺陷，如图 2b 所示。这些缺陷可能为腐蚀性介质提供通道，使其能够接触到基体。但由于 Al 涂层为阳极性涂层，即使腐蚀性介质渗入涂层内部，涂层仍可作为阳极继续保护基体不受腐蚀。对涂层进行 EDS 分析（图 2c），结果表明，喷涂过程中材料没有发生氧化，涂层近似完全继承了粉末的原始成分。

2.2 涂层耐蚀性能

图 3、图 4 为污水储罐典型位置浸泡后涂层表面不同放大倍数的微观腐蚀形貌。与喷涂态形貌相比，水/气界面和水层中涂层表面未发生明显变化，仍然保持喷涂态的典型特征，如图 3a、b 及图 4a、b 所示。前期研究结果表明^[25]，采用牺牲阳极保护后储罐在水/气界面由于其处于干湿交替环境导致液膜不连续造

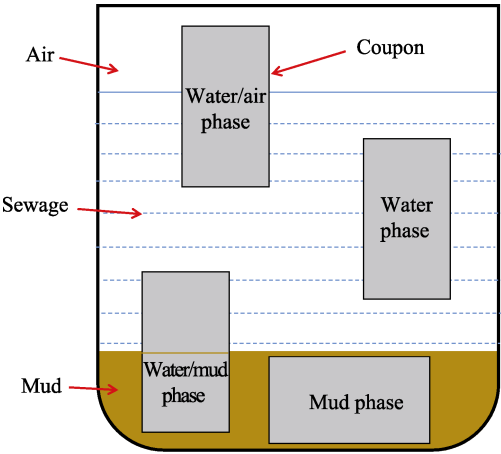


图 1 室内挂片浸泡实验示意图
Fig.1 Schematic diagram of weight-loss test in laboratory

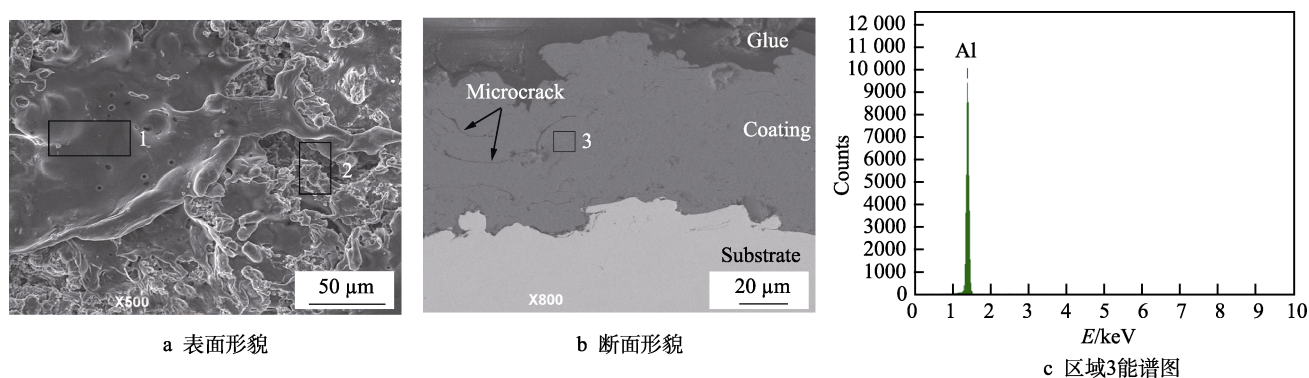


图2 涂层喷涂态形貌与成分

Fig.2 Microstructure and chemical composition of the coating: a) surface; b) cross section; c) energy spectrum diagram in area 3

成保护电流达不到大气区仍会发生局部腐蚀。而 Al 涂层保护后储罐基体在水/气界面处未发生明显腐蚀。因此,与常用牺牲阳极相比,热喷涂 Al 涂层可以显著提升基体在水/气界面处的耐蚀性能。水/泥界面和泥层中涂层表面腐蚀较为严重,出现不同程度的局部腐蚀坑、裂纹和脱落现象,如图 3c、d 及图 4c、d 中箭头和圆圈所指。另外,污水储罐全部位置均出现了不同程度的颗粒状、分布不均匀的白色附着物。选取水层和泥层两个区域的白色附着物进行 EDS 分析,结果如图 3e、f 所示,附着物主要含有 Al、O、Cl 等元素。

图 5 为 Al 涂层试样浸泡后不同腐蚀环境中的局部断面形貌。水/气界面和水层涂层内部未发生明显的腐蚀,水/泥界面与泥层环境中涂层发生严重的腐蚀,如图 5c、d 圆圈所指。腐蚀性介质沿着涂层扁平

粒子界面缝隙,由涂层表面渗入内部,导致涂层内部扁平粒子界面发生严重腐蚀,界面虽然不断有新的氧化膜生成,但氧化膜形成速率小于其溶解速率,氧化膜不断溶解,形成黑色腐蚀产物。对水/泥界面和泥层涂层内部扁平粒子间黑色衬度腐蚀产物进行能谱分析,如图 5e、f 所示。腐蚀产物主要含有 O、Al 等元素。界面被完全溶解后,一层或者几层扁平粒子整体脱落,形成如图 4c、d 所示腐蚀坑形貌。此外,从图 5c、d 箭头所指区域可明显观察到涂层部分区域出现裂纹,进一步说明由于内部腐蚀产生裂纹导致涂层的扁平粒子整体脱落。与水/泥界面环境相比,Al 涂层在泥层中的腐蚀更严重,腐蚀已经贯穿整个涂层厚度。由于 Al 涂层为阳极性涂层,即使腐蚀性离子已经深入涂层/基体界面,基体仍未发生明显的腐蚀。

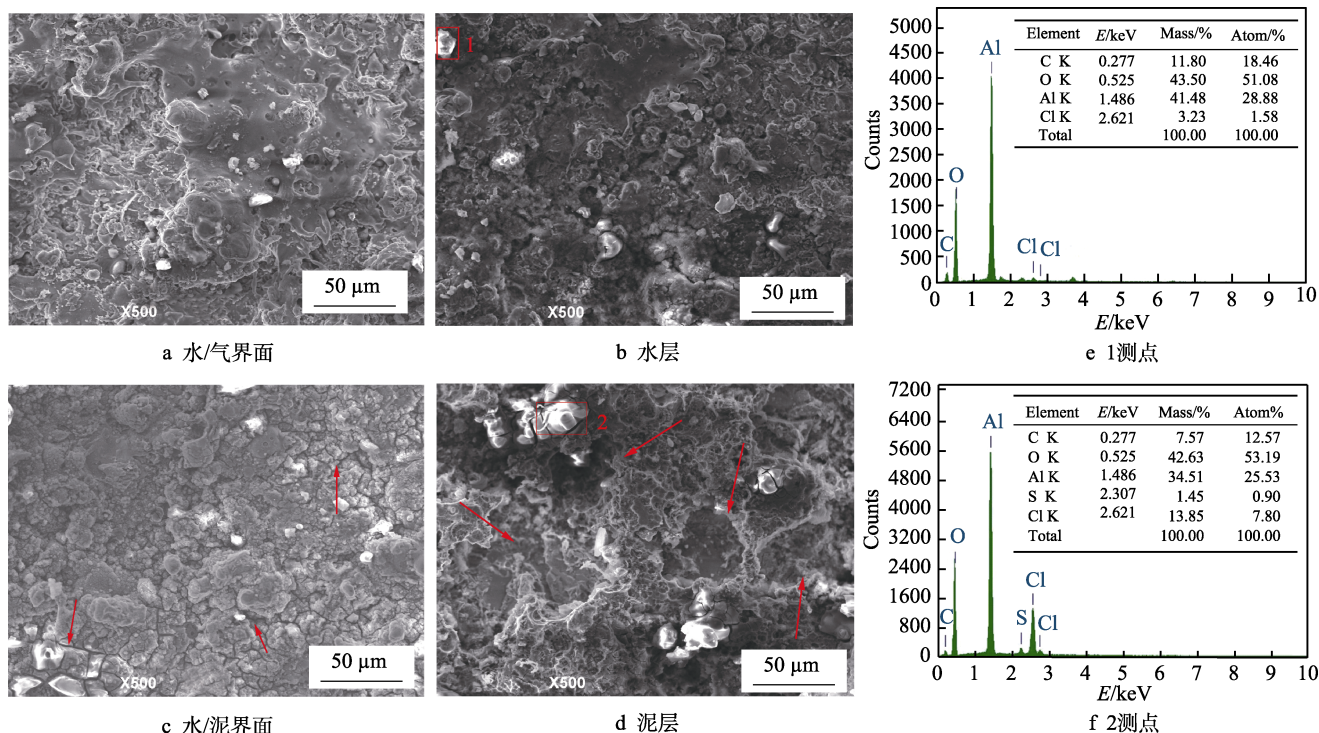


图3 储罐不同位置试样的低倍微观腐蚀形貌及 EDS 分析

Fig.3 Low-magnification micro-corrosion morphology and EDS of samples at different positions of storage tanks: a) water/air interface; b) water phase; c) water/mud interface; d) mud phase; e) point 1; f) point 2

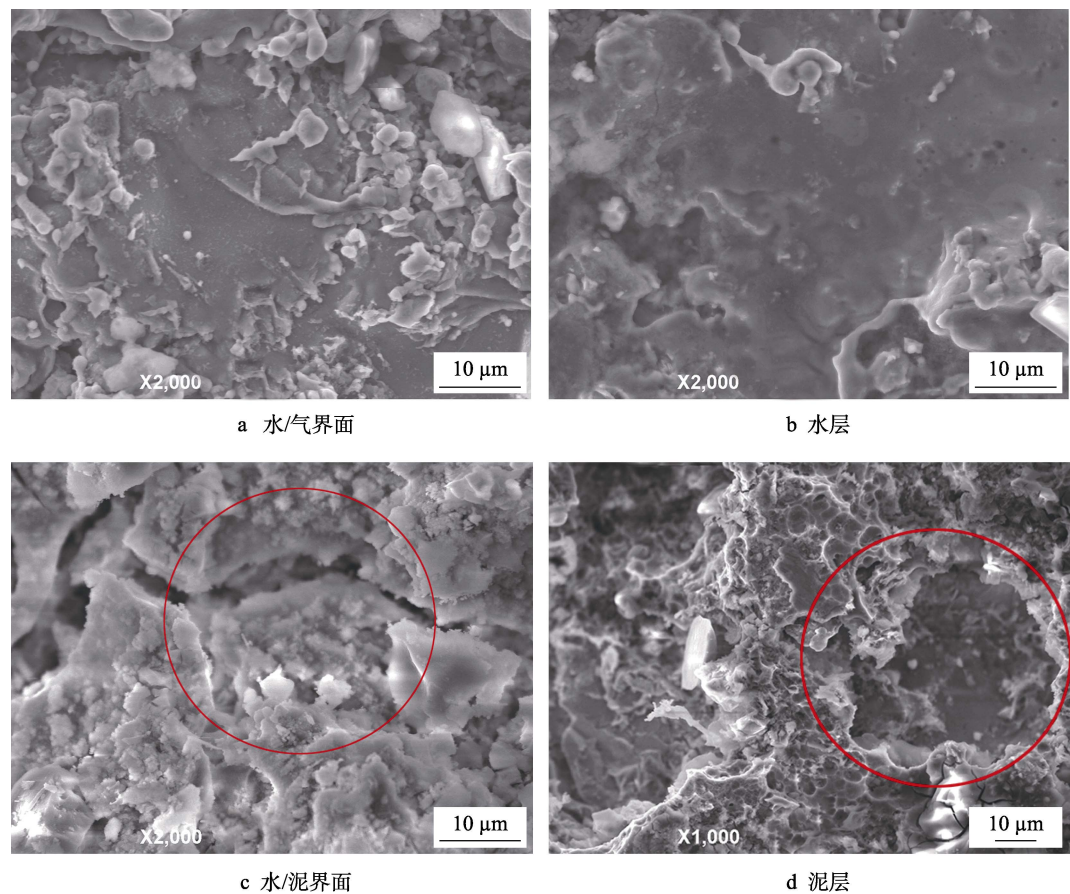


图 4 储罐不同位置试样的高倍微观腐蚀形貌

Fig.4 High-magnification micro-corrosion morphology of samples at different positions of storage tanks: a) water/air interface; b) water phase; c) water/mud interface; d) mud phase

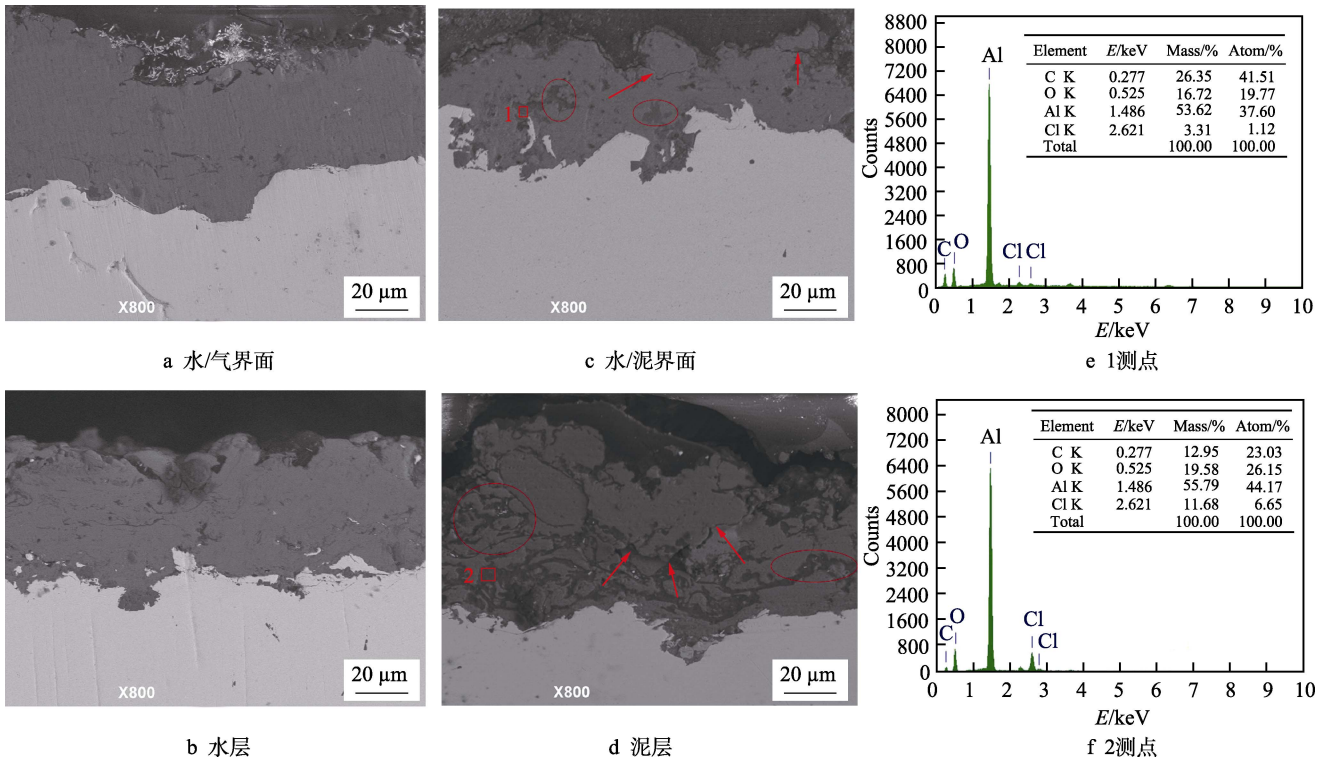


图 5 Al 涂层不同位置的断面腐蚀形貌及 EDS 分析

Fig.5 Corrosion morphologies and EDS results of Al coating cross section in different positions: a) water/air interface; b) water phase; c) water/mud interface; d) mud phase; e) point 1; f) point 2

但是, 由于涂层内部扁平粒子界面已经被完全溶解, 涂层内聚强度几乎为零, 即涂层随时有剥落的可能。因此, 在污水储罐泥层环境中, 阳极性铝涂层能起到保护作用, 但是寿命不高。

对4个位置涂层进行厚度测量, 得出水/气界面、水层、水/泥界面、泥层中涂层断面的平均厚度分别为 (57.8 ± 5) 、 (58.1 ± 3) 、 (55.0 ± 7) 、 (52.9 ± 5) μm , 因此60 d后平均分别减薄2.2、1.9、5.0、7.2 μm 。图6为涂层减薄量与位置的关系, 可知越靠近泥层, 减薄量越大。结合图3、图4和图5可知, 越靠近泥层, 涂层腐蚀越严重。基于横截面涂层减薄量计算不同位置铝涂层的减薄速率, 结果表明, 水/气界面为13.6 $\mu\text{m/a}$, 水层为11.7 $\mu\text{m/a}$, 水/泥界面为30.4 $\mu\text{m/a}$, 泥层为43.5 $\mu\text{m/a}$ 。涂层保护后, 储罐各位置Al涂层的腐蚀速率不同, 泥层中涂层腐蚀最严重。因此, 储罐在运行过程中, 泥层优先腐蚀穿孔, 与无保护措施的储罐在实际运行中最易发生失效的位置基本相同^[25], 且经铝涂层保护后涂层各位置的减薄速率比无保护措施的储罐腐蚀速率有显著降低。无保护措施时, 储罐水/泥界面与靠近泥层区域优先穿孔的主要原因是水/泥界面与泥层发生了氧浓度差腐蚀。前期研究牺牲阳极保护在水/气界面的腐蚀原因分析结果表明, 水/气界面主要发生电化学腐蚀。实际生产中, 在喷涂前应使实验条件下一致, 需对罐体表面进行严格清洁处理, 对一些特殊部位需要结合其他方法联合保护。

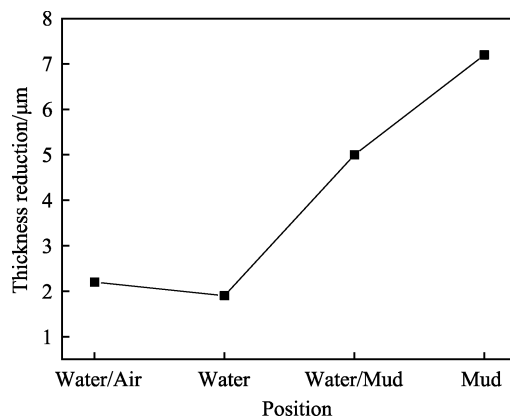


图6 浸泡两个月涂层的减薄量与位置的关系

Fig.6 Thickness reduction of coating as a function of position after two months of immersion

2.3 腐蚀机理分析

污水储罐环境中, 水/气界面和水层中涂层腐蚀较均匀, 水/泥界面和泥层中涂层出现局部腐蚀坑、裂纹和脱落。研究表明, 海洋环境中也出现类似的腐蚀形式, 涂层腐蚀机理为高盐雾、高冲蚀环境造成的冲蚀、缝隙腐蚀和应力破坏^[19,22,26]。尽管污水和海洋两种环境均含有高浓度腐蚀性氯离子, 且在不同位置腐蚀程度不同, 但由于污水储罐不存在高盐雾、高冲蚀环境, 因此尽管两种环境中材料的腐蚀形式相同, 但腐蚀机理完全不同。基于涂层腐蚀形貌特征, 建立了储罐不同位置处涂层的腐蚀机理模型, 如图7所示。

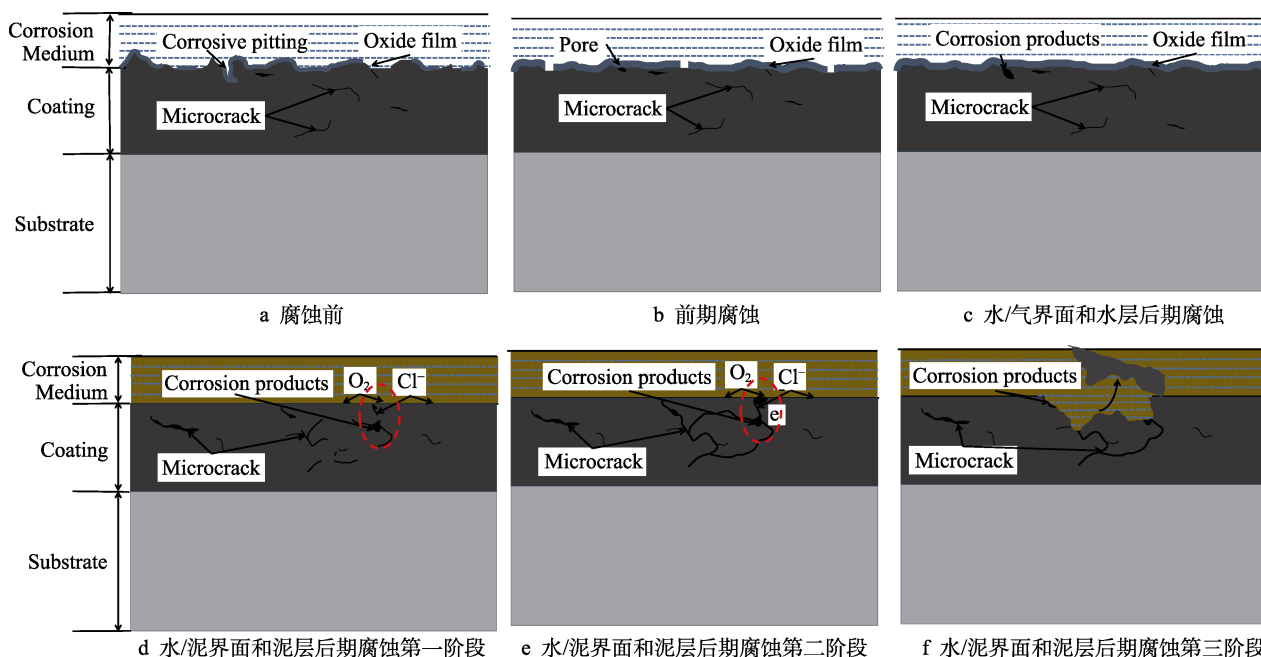


图7 不同位置腐蚀机理

Fig.7 Corrosion mechanism in different positions: a) before the corrosion; b) early stage of the corrosion; c) later stage of the corrosion of water/air interface and water phase; d) first stage of post-corrosion of water/mud interface and mud phase; e) second stage of post-corrosion of water/mud interface and mud phase; f) third stage of post-corrosion of water/mud interface and mud phase

均匀腐蚀机理模型, 即水/气界面和水层腐蚀。腐蚀前, 由于涂层表面一定的粗糙度和孔隙率, 使得涂层表面钝化膜凹凸不平 (图 7a)。涂层表面凸出位置因表面能大, 更易吸附外来介质而遭受腐蚀, 且由于一定的孔隙率使溶液中腐蚀性离子易浸入涂层内部造成腐蚀。因此, 涂层在开始时对钝化膜的溶解速率要快于其钝化膜的生成速率, 生成的膜薄而不连续, 保护效果差 (图 7b)。当腐蚀一段时间后, 涂层表面凸出位置腐蚀加快, 腐蚀产物暂时堵住孔隙, 将腐蚀性介质隔离, 腐蚀得到抑制, 即钝化膜生成速率大于其溶解速率, 为钝化膜的生成提供了一定时间。一般 Al 与水接触后便会生成 Al_2O_3 薄膜, 且涂层表面一定的孔隙率恰好使水容易进入, 从而在表面较易形成隔离效果良好的钝化膜 (图 7c)。随着时间的推移, 钝化膜的生成速率与其溶解速率基本一致, Al 涂层缓慢均匀腐蚀。研究表明^[15,21-22], 在含有大量氯离子的常温常压静态水环境中, 随着浸泡时间的延长, 涂层表面生成 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的速率先增加后趋于平稳, 主要发生均匀腐蚀, 这与本研究水层中的涂层腐蚀形式相同。

局部脱落腐蚀机理模型, 即水/泥界面和泥层腐蚀。基于涂层表面 (图 4c、d) 与断面形貌 (图 5c、d), 本文分析了水/泥界面与泥层中涂层的腐蚀过程与机理。涂层初期的腐蚀与均匀腐蚀机理相同 (图 7b)。但随着时间的增加, 由于涂层本身不均匀性引起的腐蚀逐渐增加, 罐底部水/泥界面和泥层中沉积较多的腐蚀性离子, Cl^- 含量高, 泥层涂层腐蚀初期涂层表面产物的覆盖等原因, 使得腐蚀介质在涂层内部的扩散受到限制, 进而形成闭塞电池作用, 导致孔隙内部的 O_2 含量低于外部, 造成氧浓差腐蚀 (图 7d)。氧化膜一旦被破坏, 介质从裂纹处浸入, 使涂层表面难于钝化而易于溶解, 导致氧化膜的生成速率小于其溶解速率。腐蚀沿着微裂纹向深处发展, 将分散的裂纹连接在一起, 形成了大量连续且易被腐蚀的通道 (图 7e)。由于扁平粒子界面之间的结合主要为机械结合^[21,26], 此时涂层层状组织受到腐蚀产物及腐蚀介质的双重“分离作用”, 使粒子间的嵌合力慢慢减弱, 一些片层逐渐出现脱落, 最终形成腐蚀坑 (图 7f)。

3 结论

1) 喷涂态 Al 涂层为典型的层状结构, 未发生明显氧化, 孔隙率为 5.4%, 厚度为 60 μm 。

2) 浸泡实验后, 水/气界面和水层的涂层表面未发生明显的腐蚀痕迹, 平均减薄量为 2.2、1.9 μm , 腐蚀较均匀; 水/泥界面和泥层的涂层试样表面出现局部腐蚀坑、裂纹和脱落现象, 平均减薄量分别为 5.0、7.2 μm , 腐蚀严重。

3) 污水储罐不同位置涂层的腐蚀特征与机理会有差别, 在水/气界面和水层中, Al 涂层由于产物堵塞隔离作用, 主要发生全面腐蚀; 水/泥界面和泥层环境中, Al 涂层由于氧浓差腐蚀等因素, 主要发生扁平粒子间界面腐蚀造成的局部腐蚀。

4) 在本文实验环境中, 尽管腐蚀形式不同, 但是超音速电弧喷涂 Al 涂层保护前后污水储罐最易失效的位置相同, 均为泥层环境。

参考文献:

- [1] 朱吉新. 污水罐的腐蚀原因及其防护措施[J]. 材料保护, 2009, 42(7): 64-65.
ZHU Ji-xin. Causes leading to corrosion of wastewater tank and protection measure[J]. Materials protection, 2009, 42(7): 64-65.
- [2] 刘栓, 王娟, 程红红, 等. 大型原油储罐内壁底板腐蚀机理及防护措施[J]. 表面技术, 2017, 46(11): 47-54.
LIU Shuan, WANG Juan, CHENG Hong-hong, et al. Corrosion mechanism and protective measures of inner wall baseplate of large crude oil storage tank[J]. Surface technology, 2017, 46(11): 47-54.
- [3] 张耀, 郑峥. 储油罐腐蚀特征及失效分析[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2004, 21(2): 40-42.
ZHANG Yao, ZHENG Zheng. Corrosion features of oil storage tanks and failure analysis[J]. Corrosion & protection in petrochemical industry, 2004, 21(2): 40-42.
- [4] 朱志英, 杨刚. 雅克拉污水处理站污水储罐腐蚀及腐蚀治理措施[J]. 石油化工应用, 2011, 30(3): 108-111.
ZHU Zhi-ying, YANG Gang. Sewage tank corrosion and corrosion control measures in Yakela sewage treatment station[J]. Petrochemical industry application, 2011, 30(3): 108-111.
- [5] FRIDRIHSONE-GIRONE A, STIRNA U, MISANE M, et al. Spray-applied 100% volatile organic compounds free two component polyurethane coatings based on rapeseed oil polyols[J]. Progress in organic coatings, 2016, 94: 90-97.
- [6] 穆鑫, 魏洁, 董俊华, 等. 牺牲阳极保护对 Q235B 钢在模拟海洋潮差区间腐蚀行为的影响[J]. 金属学报, 2014, 50(11): 1294-1304.
MU Xin, WEI Jie, DONG Jun-hua, et al. The effect of sacrificial anode on corrosion protection of Q235B steel in simulated tidal zone[J]. Acta metallurgica sinica, 2014, 50(11): 1294-1304.
- [7] LIU W M, ZHOU Q J, LI L S, et al. Effect of alloy element on corrosion behavior of the huge crude oil storage tank steel in seawater[J]. Journal of alloys and compounds, 2014, 598: 198-204.
- [8] FENG Y C, CHENG Y F. An intelligent coating doped with inhibitor-encapsulated nanocontainers for corrosion protection of pipeline steel[J]. Chemical engineering journal, 2017, 315: 537-551.

- [9] TORO R G, CALANDRA P, CORTESE B, et al. Argon and hydrogen plasma influence on the protective properties of diamond-like carbon films as barrier coating[J]. *Surfaces and interfaces*, 2017, 6: 60-71.
- [10] 李长久. 热喷涂技术应用及研究进展与挑战[J]. *热喷涂技术*, 2018, 10(4): 1-22.
LI Chang-jiu. Applications, research progresses and future challenges of thermal spray technology[J]. *Thermal spray technology*, 2018, 10(4): 1-22.
- [11] VARDELLE A, MOREAU C, LI C J, et al. The 2016 thermal spray roadmap[J]. *Journal of thermal spray technology*, 2016, 25(8): 1376-1440.
- [12] WANG D K, SHEN C J, JIA Z Y. Corrosive behavior of thermal sprayed zinc coating under asphalt concrete coat on steel bridge deck[J]. *Corrosion and protection*, 2007, 28(9): 445-448.
- [13] 李晓娟, 刘栋, 刘哲, 等. 海洋环境中铝合金表面改性涂层的电化学性能[J]. *表面技术*, 2018, 47(1): 181-185.
LI Xiao-juan, LIU Dong, LIU Zhe, et al. Electrochemical performance of surface modification coatings on aluminum alloy in marine environment[J]. *Surface technology*, 2018, 47(1): 181-185.
- [14] KNIGHT S P, POHL K, HOLROYD N J, et al. Some effects of alloy composition on stress corrosion cracking in Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. *Corrosion science*, 2015, 98: 50-62.
- [15] 王丹, 周小平. AZ31B 镁合金表面喷熔 Al 涂层的组织和性能[J]. *表面技术*, 2016, 45(9): 51-55.
WANG Dan, ZHOU Xiao-ping. Microstructure and properties of Al coating sprayed on the surface of AZ31B magnesium alloy[J]. *Surface technology*, 2016, 45(9): 51-55.
- [16] 白小敏, 唐建群, 吕晓亮, 等. 带冷喷 Al/Al₂O₃ 涂层的 20 号碳钢管道在保温层下的腐蚀行为[J]. *腐蚀与防护*, 2017, 38(1): 11-16.
BAI Xiao-min, TANG Jian-qun, LYU Xiao-liang, et al. Corrosion behavior of 20# carbon steel with cold sprayed Al-Al₂O₃ coatings under insulation[J]. *Corrosion & protection*, 2017, 38(1): 11-16.
- [17] 直妍, 昌霞, 沟引宁. 钢铁表面电弧喷涂耐蚀铝涂层性能的研究[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(4): 147-149.
ZHI Yan, CHANG Xia, GOU Yin-ning. Research on properties of corrosion resistance aluminum coating on steel surface by arc spraying technology[J]. *Hot working technology*, 2018, 47(4): 147-149.
- [18] 李言涛, 刘建国, 侯保荣. 喷涂铝覆盖层在实海浪花飞溅区的腐蚀行为[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(5): 1243-1247.
LI Yan-tao, LIU Jian-guo, HOU Bao-rong. Corrosion behavior of sprayed aluminum coatings at splash zone[J]. *Journal of Central South University (science and technology)*, 2011, 42(5): 1243-1247.
- [19] 刘存, 赵卫民, 陈虹宇. 海洋工程热喷铝涂层的腐蚀电化学行为[J]. *材料保护*, 2016, 49(10): 5-8.
LIU Cun, ZHAO Wei-min, CHEN Hong-yu. Corrosion behaviours of thermal spraying aluminum coating for offshore engineering[J]. *Materials protection*, 2016, 49(10): 5-8.
- [20] 罗西希, 姚正军, 张平则. 45#钢表面 Al-Cr 复合强化层的耐腐蚀性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(10): 3127-3133.
LUO Xi-xi, YAO Zheng-jun, ZHANG Ping-ze. Corrosion resistance of Al-Cr composite strengthening layer on the surface of 45# steel[J]. *Rare metal materials and engineering*, 2018, 47(10): 3127-3133.
- [21] 杨峥山, 祝美丽, 宋刚, 等. 6061 铝合金表面电弧喷涂纯铝涂层的研究[J]. *轻合金加工技术*, 2008, 36(9): 31-35.
YANG Zheng-shan, ZHU Mei-li, SONG Gang, et al. Study on aluminum coat on the 6061 aluminum alloy surface formed by arc spraying[J]. *Light alloy fabrication technology*, 2008, 36(9): 31-35.
- [22] 沈雁, 王红星. 负向电压对海洋平台铝合金钻探管表面微弧氧化膜组织和耐蚀性影响[J]. *表面技术*, 2016, 45(4): 162-168.
SHEN Yan, WANG Hong-xing. Effect of negative voltage on properties of micro-arc oxidation coating prepared on the surface of aluminum alloy drill pipe in offshore platform[J]. *Surface technology*, 2016, 45(4): 162-168.
- [23] 汪卫东. 油田污水中硫酸盐还原菌的变化规律及其控制技术[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(6): 61-64.
WANG Wei-dong. Change rule and control method of sulfate-reducing bacteria in oilfield produced water[J]. *Petroleum geology and recovery efficiency*, 2013, 20(6): 61-64.
- [24] 孙月文. 滩海环境下钢质原油储罐腐蚀与防护[J]. *石油矿场机械*, 2010, 39(4): 28-32.
SUN Yue-wen. Corrosion and protection in coast of crude oil steel-tank[J]. *Oil field equipment*, 2010, 39(4): 28-32.
- [25] 周勇, 周攀虎, 任秋洁, 等. 牺牲阳极保护前后污水储罐腐蚀行为演变及机理研究[J]. *材料保护*, 2019, 52(11): 28-32, 43.
ZHOU Yong, ZHOU Pan-hu, PEN Qiu-jie, et al. Corrosion behavior evolution and its mechanism of sewage storage tank with/without sacrificial anode[J]. *Materials protection*, 2019, 52(11): 28-32, 43.
- [26] 孙建波, 王勇, 路民旭, 等. 电弧喷涂铝涂层在海洋环境中的腐蚀机理[J]. *北京科技大学学报*, 2006, 28(11): 1029-1033.
SUN Jian-bo, WANG Yong, LU Min-xu, et al. Corrosion mechanism of arc spraying aluminum coatings in marine environment[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2006, 28(11): 1029-1033.