

供水管道中球墨铸铁和 304 不锈钢的电偶腐蚀特性

张海亚¹, 刘迪波¹, 李舒阳¹, 赵律童¹, 张晓健^{1,2}, 汪隽^{1,2}, 陈超^{1,2}

(1. 清华大学环境学院 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 2. 清华苏州环境
创新研究院, 江苏 苏州 215163)

摘要: 以常用的供水管材球墨铸铁和 304 不锈钢为试验材料, 采用电化学自腐蚀试验和电偶腐蚀试验研究了这两种金属偶接的电偶腐蚀行为, 并探讨了阴离子浓度、阴阳极面积比对电偶腐蚀效应的影响。结果表明, 球墨铸铁和 304 不锈钢偶接过程中, 球墨铸铁的自腐蚀电位比 304 不锈钢的要低, 当两者偶合后, 球墨铸铁作为阳极腐蚀被加剧, 而 304 不锈钢作为阴极受到保护而腐蚀减缓。电偶电位随 Cl^- 浓度的增大而显著降低, 但 SO_4^{2-} 浓度的增大对其影响不大; 电偶电流密度与 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度均呈线性正相关关系。随着阴阳极面积比的增大, 电偶电位呈对数增长趋势, 而电偶电流密度呈线性增长趋势。

关键词: 供水管道; 电偶腐蚀; 球墨铸铁; 304 不锈钢

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)17-0037-06

Galvanic Corrosion Behavior between Ductile Iron and 304 Stainless Steel in Water Distribution System

ZHANG Hai-ya¹, LIU Di-bo¹, LI Shu-yang¹, ZHAO Lü-tong¹,
ZHANG Xiao-jian^{1,2}, Wang Jun^{1,2}, CHEN Chao^{1,2}

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Research Institute for Environmental Innovation < Suzhou > Tsinghua, Suzhou 215163, China)

Abstract: Ductile iron and 304 stainless steel were coupled and their galvanic corrosion behaviors were investigated by electrochemical self-corrosion test and galvanic corrosion test, and the effects of anion concentration and cathode/anode area ratio on the galvanic corrosion behaviors were explored. The results showed that ductile iron with relatively lower self-corrosion potential was used as anode and the corrosion was accelerated during the coupling process of ductile iron and 304 stainless steel, while 304 stainless steel was served as cathode and the corrosion process was alleviated. The galvanic corrosion potential decreased with the increase of Cl^- concentration, while it didn't change significantly with the increase of SO_4^{2-} concentration. The galvanic corrosion density was positively correlated with Cl^- and SO_4^{2-} concentration. As the increase of cathode/anode area ratio, the galvanic corrosion potential increased logarithmically, while the galvanic corrosion density increased linearly.

Key words: water distribution system; galvanic corrosion; ductile iron; 304 stainless steel

城市供水管网是城市基础设施的重要组成部分,管网的稳定运行是保障用户端水质达标的关键环节。我国疾病预防控制中心对全国35个城市的调查显示,自来水出厂经管网输送到消费者水龙头后不合格率增加20%左右,主要是因为供水系统大量使用防腐效果较差的金属管道,导致管道腐蚀进而污染水体。因此,供水管材的选择必须满足高水质、低维护、长寿命的要求。目前我国供水管道约有90%以上是金属管材,其中球墨铸铁管道由于具有良好的机械性能、优异的防腐蚀性能以及可承受供水压力高等特点而被广泛采用,尤其是在大的输配水管道中^[1]。而在分支管道中,管材的使用情况则不尽相同,其中不锈钢管由于具备良好的物理化学性能而被广泛采用。在此背景下,许多城市在推广不锈钢管应用方面进行了许多尝试。例如,深圳逐步将生活饮用水地下管道更换为不锈钢管,广州在旧城区水管改造中推广采用不锈钢管,长沙规定自来水管首选不锈钢管,武汉在安置小区建设中普遍采用不锈钢管,昆明在“一户一表”改造中大规模使用304不锈钢管道,珠海逐步将露天水管改为不锈钢管,北京某区域自来水管网改造、红塔集团生活区供水系统改造、广州大学城供水系统改造等项目都大量使用了不锈钢管,特别是北京城市副中心行政办公区综合管廊中的给水管全部为不锈钢管。

实际上,当球墨铸铁管和不锈钢管共同存在于供水管网时,存在着电偶腐蚀的风险。电偶腐蚀是由于电化学性质有差异的金属在电解质溶液中接触造成的,影响电偶腐蚀的因素很多,包括偶接电极的性质(偶合电位差、极化率)、电解液导电性等^[2-3]。除此之外,电偶腐蚀还与所输送介质的性质(pH值、电导率、阴离子等)有关^[4]。电偶腐蚀会导致两种管道相接处产生严重的缝隙腐蚀、点蚀、蚀孔穿透等现象,其后果要比单种金属的自腐蚀严重得多。鉴于此,笔者通过电化学试验和电偶腐蚀试验研究了供水管道中球墨铸铁和304不锈钢的自腐蚀和电偶腐蚀特性,并分析了不同浓度的阴离子和阴阳极面积比对电偶腐蚀行为的影响,以为供水管道电偶腐蚀研究提供参考。

1 试验材料和方法

试验装置如图1所示,采用250 mL的三口烧瓶。球墨铸铁电极由满足《水及燃气管道用球墨铸铁管、管件和附件》(GB/T 13295—2013)要求的球

墨铸铁棒切割打磨而成;304不锈钢电极由可用于供水管道的不锈钢棒打磨而成。试验开始前,将球墨铸铁和304不锈钢管材切割成直径为8 mm、厚度为6 mm的圆柱体,用水砂纸打磨至镜面般光滑,然后用聚四氟乙烯材料进行涂封,并通过内部铜导线连接测试导线;而后对电极使用丙酮除油、无水乙醇(99.75%)脱水,放在干燥器中备用。

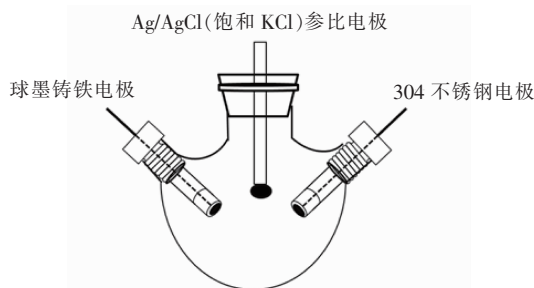


图1 电偶腐蚀试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of galvanic corrosion test device

试验中,为了研究不同阴离子浓度下球墨铸铁和304不锈钢的电偶腐蚀行为,阴离子浓度设置如下:40 mg/L Cl^- + 80 mg/L SO_4^{2-} (低浓度)、120 mg/L Cl^- + 80 mg/L SO_4^{2-} (中浓度)、120 mg/L Cl^- + 240 mg/L SO_4^{2-} (高浓度)。阴离子溶液采用分析纯的NaCl、 Na_2SO_4 与去离子水配制而成,控制pH值为7.0。另外,为了研究不同阴阳极面积比对电偶腐蚀行为的影响,采用防水胶覆盖金属试样表面,以控制阴阳极面积比分别为1:10、1:4、1:1、4:1、10:1。试验温度为常温,试验周期为288 h,与此同时进行裸金属的自腐蚀浸泡试验。

电化学测量包括动电位极化曲线测试和电偶腐蚀测试,均在依托武汉科斯特仪器有限公司的CS350电化学工作站进行。在动电位极化曲线测试中,裸金属为工作电极,Ag/AgCl(饱和KCl)作为参比电极,高纯度铂片为辅助电极。动电位极化曲线的扫描频率为20 mV/s,极化范围设定为-1.0 ~ 1.0 V(相对于自腐蚀电位);电偶腐蚀测试采用的也是三电极体系,但是其中的工作电极分别为球墨铸铁和304不锈钢,Ag/AgCl(饱和KCl)作为参比电极,测试中记录电偶电位和电偶电流。

2 结果和讨论

2.1 自腐蚀和电偶腐蚀的对比

2.1.1 自腐蚀电位和极化曲线

球墨铸铁和304不锈钢分别浸泡在含有40

mg/L $\text{Cl}^- + 80 \text{ mg/L SO}_4^{2-}$ 的水溶液中进行自腐蚀试验。对浸泡 1 h 的两种金属进行动电位扫描,得到各自的极化曲线,如图 2 所示(E 为自腐蚀电位, V; I_{corr} 为自腐蚀电流密度, A/cm^2)。可知,球墨铸铁的自腐蚀电位 (-0.867 V) 低于 304 不锈钢的自腐蚀电位 (-0.371 V)。根据电偶腐蚀理论,当存在电位差的两种金属材料偶接时,自腐蚀电位较低的金属会作为阳极,而自腐蚀电位较高的金属将作为阴极^[5]。因此,在自来水环境中,当 304 不锈钢与球墨铸铁初始偶合时,球墨铸铁会作为阳极被加速腐蚀,304 不锈钢作为阴极受到保护而腐蚀减缓。

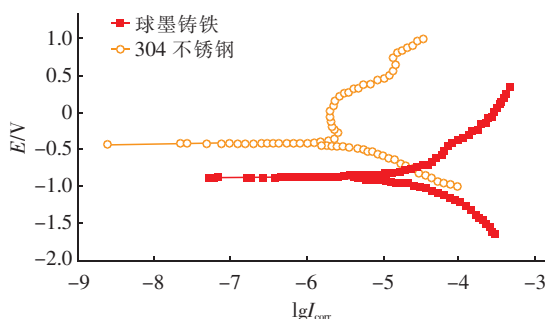


图2 球墨铸铁和304不锈钢在自腐蚀初始阶段的极化曲线

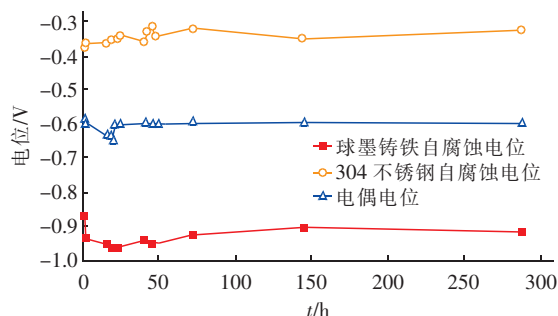
Fig. 2 Polarization curves of ductile iron and 304 stainless steel at early electrochemical corrosion period

由图 2 可知,球墨铸铁在自来水环境中处于活化阶段,测试期间阳极极化反应一直在进行(随着施加电压的增大,腐蚀电流密度一直增大),为铁的失电子过程;同理,阴极极化反应也一直在进行,为溶解氧在中性水环境中的去极化过程。304 不锈钢在自来水环境中的阳极反应过程经历了活化、钝化(电流密度不随施加电压的增大而增大)和过钝化(钝化阶段之后,电流密度随施加电压的增大而轻微增大)3 个阶段,这可能与 304 不锈钢材质有关,其含有的 Cr 和 Ni 元素可以在含有溶解氧的水环境中形成一层钝化膜,但在初始阶段形成的钝化膜较薄,随着施加电压的增大,钝化膜被破坏,所以会产生过钝化现象。

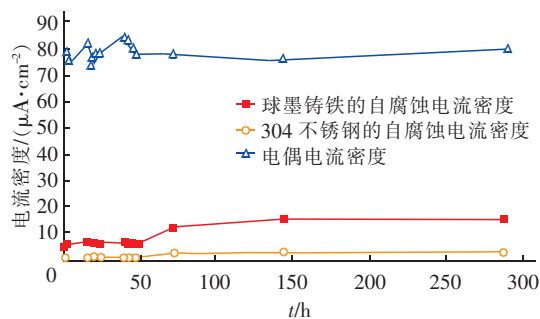
2.1.2 自腐蚀和电偶腐蚀的对比

在初始自腐蚀试验的基础上,试验还连续监测了球墨铸铁和 304 不锈钢在含有 $40 \text{ mg/L Cl}^- + 80 \text{ mg/L SO}_4^{2-}$ 水溶液中的极化曲线,并根据 R_p 拟合得到相应的自腐蚀电位和腐蚀电流密度,同时通过电偶腐蚀测试得到电偶电位和电偶电流密度,如图 3 所示。可知,球墨铸铁的自腐蚀电位在前 48 h 随着

时间迅速负移,之后随着时间正移并逐渐趋于稳定。在整个试验过程中球墨铸铁的自腐蚀电位变化较大,在 $-0.87 \sim -0.96 \text{ V}$ 之间,但均低于 304 不锈钢的自腐蚀电位 ($-0.31 \sim -0.37 \text{ V}$)。稳定后球墨铸铁和 304 不锈钢的自腐蚀电位分别为 -0.90 、 -0.33 V ,二者相差 0.57 V 。已有研究表明,当偶接金属的自腐蚀电位差 $> 0.25 \text{ V}$ 时会产生严重的电偶腐蚀^[6],因此当球墨铸铁和 304 不锈钢共存时电偶腐蚀较严重。



a. 自腐蚀电位和电偶电位



b. 自腐蚀电流密度和电偶电流密度

图3 球墨铸铁和304不锈钢的自腐蚀电位、电流密度和电偶电位、电流密度随时间的变化

Fig. 3 Variation of self-corrosion potential, current density, galvanic corrosion potential and current density of ductile iron and 304 stainless steel with time

从图 3 可以看出,球墨铸铁的自腐蚀电流密度比 304 不锈钢的自腐蚀电流密度要大,说明球墨铸铁在自来水环境中的腐蚀更为严重;另外,304 不锈钢与球墨铸铁偶合的电偶电位处于两种金属的自腐蚀电位之间,但是电偶电流密度比两种金属的自腐蚀电流密度都大,说明电偶反应加快了金属的腐蚀过程,这与 Sánchez-Tovar 等人的研究结果一致^[7]。

2.1.3 自腐蚀和电偶腐蚀的腐蚀产物对比

试验结束时,对球墨铸铁的自腐蚀和电偶腐蚀产物(低浓度阴离子条件下)进行扫描电镜分析,结果见图 4。球墨铸铁的自腐蚀反应过程较弱,形成

的腐蚀产物较疏松,呈现絮状结构,通过EDS分析发现,腐蚀产物中除了Fe和O外,还有少量的Cl和S,推测是铁的氯化物或者硫化物;而在电偶腐蚀反应过程中,由于阳极金属的腐蚀被加剧,间接促进了腐蚀产物的形成,因此球墨铸铁电极表面的腐蚀产物相对紧密,主要呈现针状结构,推测是针铁矿,通过EDS分析发现,腐蚀产物的主要成分是O和Fe,其中O元素主要来自水环境中的溶解氧。

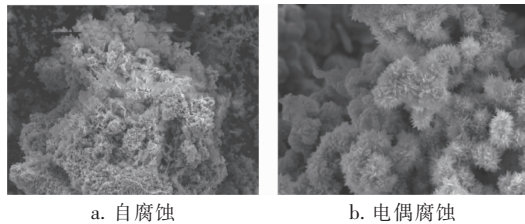


图4 球墨铸铁自腐蚀和电偶腐蚀产物的电镜扫描照片
Fig. 4 SEM pictures of self-corrosion and galvanic corrosion products of ductile iron

2.2 阴离子浓度对电偶腐蚀的影响

球墨铸铁和304不锈钢偶接后在不同浓度阴离子条件下电偶电位和电流密度的变化见图5。

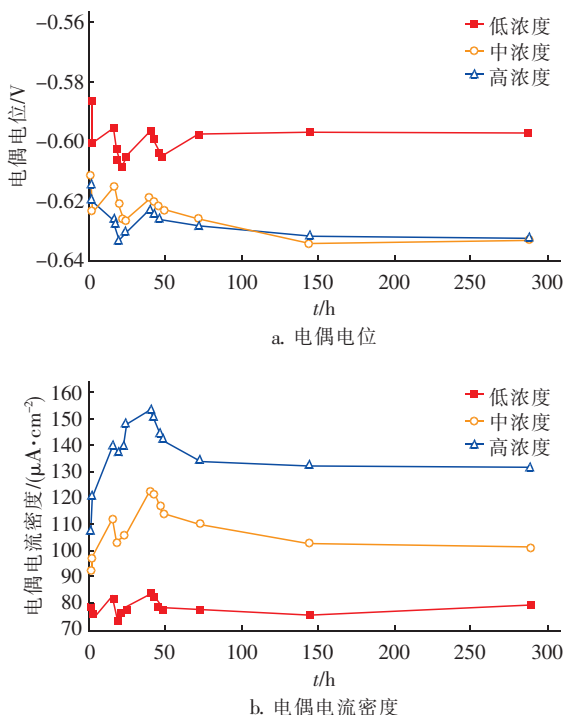
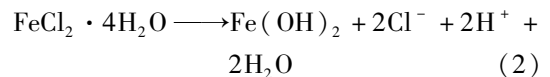
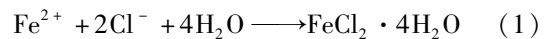


图5 不同浓度阴离子条件下偶接金属的电偶电位和电流密度的变化

Fig. 5 Variation of galvanic corrosion potential and current density of the coupled metals under different anion concentrations

由图5(a)可知,前48 h电偶电位在不同浓度阴离子环境条件下都出现了波动,但整体呈下降趋势,说明此时阳极电偶发生着较大的溶解反应;48 h后,低浓度阴离子环境中偶接金属的电偶电位正移,并逐渐趋于稳定,分析认为,随着阳极腐蚀产物的堆积,使得其与阴极304不锈钢之间的电位差异减小^[8]。维持 SO_4^{2-} 浓度不变,将 Cl^- 浓度由40 mg/L提升至120 mg/L,电偶电位负移,说明随着氯离子浓度的增大,电偶电位显著降低,原因可能是氯离子可以富集于水-金属界面处,穿透破坏金属表面膜层,降低金属表面的自修复能力^[8]。维持 Cl^- 浓度不变,将 SO_4^{2-} 浓度由80 mg/L提升至240 mg/L,电偶电位变化不大,说明硫酸根离子对电偶电位的影响不大,原因可能是硫酸根离子的穿透作用比氯离子要弱。另外,低浓度阴离子条件下电偶电位在72 h左右达到稳定,而中、高浓度阴离子条件下电偶电位均在144 h左右才趋于稳定,说明随着阴离子浓度的增大,电偶电位的稳定时间延长。

由图5(b)可知,前48 h电偶电流密度在低浓度离子环境下波动较大,之后逐渐减小并趋于稳定;随着 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度的增大,电偶电流密度逐渐增大,说明氯离子和硫酸根离子都会加速电偶腐蚀。有研究表明, Cl^- 可与阳极反应产物 Fe^{2+} 结合生成 FeCl_2 ,将阳极产物及时转移出去,使得阳极腐蚀过程继续进行[见式(1)和(2)],并且 Cl^- 只是参与反应,但其本身并不被消耗,所以 Cl^- 周而复始地对腐蚀起到破坏作用^[4]。同理, SO_4^{2-} 也对管道腐蚀起持续的破坏作用。因此,对于电偶腐蚀,腐蚀产物的排出对电化学反应速率起着重要作用。



另外,随着氯离子和硫酸根离子浓度的增大,电偶电流密度的稳定时间亦出现延长现象,这可能是阴离子与管道腐蚀产物的反应所致。同时,在整个试验过程中电偶电流方向始终没有改变,说明电偶对的极性没有逆转,球墨铸铁始终是电偶对的阳极。

球墨铸铁阳极在中、高浓度阴离子环境下的腐蚀产物如图6所示。可知,随着阴离子浓度的增大,腐蚀产物变得疏松,主要呈松散的片状结构,推测为纤铁矿,此类松散管垢的存在可延长管垢达到稳定的时间,这与上述电偶电流密度的分析结果一致。

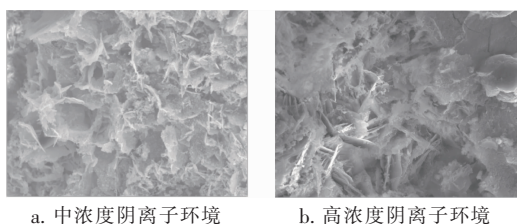


图6 球墨铸铁阳极在中、高阴离子浓度条件下的腐蚀产物电镜扫描照片

Fig.6 SEM pictures of galvanic corrosion products of ductile iron under medium and high concentration of anions

对稳定后的电偶电位、电流密度与阴离子物质的量浓度(mmol/L)的相关性进行拟合分析,结果表明,电偶电位与阴离子物质的量浓度之间的相关性不明显,而电偶电流密度与阴离子物质的量浓度之间呈线性正相关关系,拟合方程为: $y = 16.081x + 46.636$, $R^2 = 0.9985$ 。

2.3 阴阳极面积比对电偶腐蚀的影响

在 $120 \text{ mg/L Cl}^- + 80 \text{ mg/L SO}_4^{2-}$ 的水环境下,对304不锈钢和球墨铸铁偶接时不同阴阳极面积比条件下的电偶腐蚀特性进行了研究。当阴阳极面积比分别为 $1:10$ 、 $1:4$ 、 $1:1$ 、 $4:1$ 、 $10:1$ 时,电偶电位分别为 -0.670 、 -0.639 、 -0.612 、 -0.576 、 -0.562 V ,电偶电流密度分别为 13.73 、 20.06 、 113.00 、 178.02 、 $259.00 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。可知,阴阳极面积比越小,电偶电位越接近阳极球墨铸铁的自腐蚀电位(-0.771 V),反之,电偶电位越接近阴极304不锈钢的自腐蚀电位(-0.452 V)。当阴阳极面积比为 $1:10$ 和 $1:4$ 时电偶电流密度较小,且小于自腐蚀电流密度,说明当阴阳极面积比低于 $1:4$ 时电偶腐蚀并不严重;提高阴阳极面积比至 $1:1$ 、 $4:1$ 和 $10:1$ 时,电偶电流密度显著升高,说明在阳极面积固定的情况下,增大阴极面积对电偶腐蚀有明显的促进作用。

对电偶电位、电偶电流密度与阴阳极面积比进行相关性拟合,发现随着阴阳极面积比的增大,电偶电位呈现对数增长趋势($y = 0.0685 \ln x - 0.6774$, $R^2 = 0.9617$),而电偶电流密度呈线性增长趋势($y = 64.048x - 73.786$, $R^2 = 0.966$),这与 Sánchez-Tovar 等人的研究结果一致^[7,9]。

2.4 电偶腐蚀效应的计算

通常用电偶腐蚀效应 γ 来表征两种金属材料偶合对电偶腐蚀行为的影响, γ 值越大说明电偶腐蚀

程度越大。根据 Mansfeld 的研究^[10],当电偶对的阳极上仅发生金属的溶解反应时,阳极金属的电偶腐蚀效应可通过下式计算:

$$\gamma = \frac{I_g}{I_{\text{corr}}} \quad (3)$$

式中: I_{corr} 和 I_g 分别为阳极金属的自腐蚀电流密度和电偶电流密度。其中, I_{corr} 通过对极化曲线进行 R_p 拟合得到; I_g 为整个试验周期内的平均电偶电流密度,可按式(4)进行计算^[9]。

$$I_g = \frac{1}{T} \int_0^T I_g(t) dt \quad (4)$$

试验中,低、中、高3种阴离子浓度条件下的 I_{corr} 值分别为 14.10 、 20.10 、 $24.63 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, I_g 值分别为 78.75 、 113.00 、 $142.00 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, γ 值分别为 5.58 、 5.65 、 5.76 ; $1:10$ 、 $1:4$ 、 $1:1$ 、 $4:1$ 、 $10:1$ 阴阳极面积比条件下的 γ 值分别为 0.68 、 1.39 、 5.65 、 8.85 、 13.03 。可知,随着阴离子浓度的增大,电偶电流密度的增长趋势比自腐蚀电流密度的增长趋势更加明显,因此导致电偶腐蚀效应也逐渐增大。另外,增大阴阳极面积比,电偶腐蚀效应亦逐渐增大,分析原因为,当阴阳极面积比较大时,逐步形成大阴极和小阳极现象,使得电偶电流集中在较小的阳极面积上,并逐步向纵深方向扩展,产生严重的局部腐蚀现象^[11]。例如,在实际管道中当304不锈钢周围连接有小部分裸露的球墨铸铁(局部水泥砂浆内衬脱落)时,就是大阴极、小阳极的实例,因此在实际管道应用中要尽量避免这种现象。

3 结论和建议

① 在球墨铸铁和304不锈钢组成的电偶对中,球墨铸铁由于电位较低而作为阳极,导致其腐蚀被加剧;而304不锈钢作为阴极,其腐蚀过程被减缓;球墨铸铁阳极的电偶电流密度最大可达到自腐蚀电流密度的8倍左右。

② 电偶腐蚀过程中,阴离子浓度和阴阳极面积比均会对电偶腐蚀产生明显影响。随着阴离子浓度的增大,电偶腐蚀效应增大,电偶腐蚀过程加重,电偶电流密度与阴离子浓度之间呈现线性正相关关系;随着阴阳极面积比的增大,电偶电位呈对数增长趋势,电偶电流密度呈线性增长趋势。

③ 在实际管道应用中,要尽量避免大面积304不锈钢与小面积裸露球墨铸铁的连接,尽量降低电偶腐蚀发生的风险。

参考文献:

- [1] 郭浩,李雪,刘星飞,等. 流速对球墨铸铁供水管道腐蚀行为的影响机理[J]. 材料保护,2018,51(9):40-44,93.
Guo Hao, Li Xue, Liu Xingfei, *et al.* Effect of water flow velocity on the corrosion mechanism of ductile iron pipes in water distribution system[J]. Materials Protection, 2018, 51(9):40-44, 93 (in Chinese).
- [2] 林德源. 大气环境条件下电力金属材料的电偶腐蚀研究[J]. 腐蚀科学与防护技术,2018,30(2):113-118.
Lin Deyuan. Galvanic corrosion of electric metal materials in atmospheric environment [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2018, 30(2):113-118 (in Chinese).
- [3] 张艳成,吴荫顺,张健. 带锈铸铁与304不锈钢的电偶腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术,2001,13(2):66-70.
Zhang Yancheng, Wu Yinshun, Zhang Jian. Galvanic corrosion of rusty cast iron and 304 stainless steel[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2001, 13(2):66-70 (in Chinese).
- [4] 王明星. 混凝土结构中箍筋的电偶腐蚀机理研究[D]. 南宁:广西大学,2008.
Wang Mingxing. Research on Galvanic Corrosion Mechanics of Stirrups in Concrete Structure [D]. Nanning:Guangxi University, 2008 (in Chinese).
- [5] 陈兴伟,武建华,王佳,等. 电偶腐蚀影响因素研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术,2010,22(4):363-366.
Chen Xingwei, Wu Jianhua, Wang Jia, *et al.* Progress in research factors influencing galvanic corrosion behavior [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22(4):363-366 (in Chinese).
- [6] 杨飞. 碳钢与不锈钢在海洋环境中的电偶腐蚀问题研究[D]. 大连:大连理工大学,2017.
Yang Fei. The Study of the Galvanic Corrosion Behavior between the Carbon Steel and Stainless Steel in Marine Environment [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017 (in Chinese).
- [7] Sánchez-Tovar R, Montañés M T, García-Antón J. The effect of temperature on the galvanic corrosion of the copper/AISI 304 pair in LiBr solutions under hydrodynamic conditions[J]. Corrosion Science, 2010, 52(3):722-733.
- [8] 苗伟行. 典型不锈钢在海洋环境混凝土内的腐蚀行为[D]. 天津:天津大学,2018.
Miao Weixing. Corrosion Behavior of Typical Stainless Steels in the Concrete under Marine Environment [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018 (in Chinese).
- [9] 赵华莱. 油套管及封隔器用钢在封隔液环境下的电偶腐蚀行为研究[D]. 成都:四川大学,2007.
Zhao Hualai. Galvanic Corrosion Research of Production Tubing, Production Casing and Packer Materials in Packer Fluid [D]. Chengdu: Sichuan University, 2007 (in Chinese).
- [10] Mansfeld F. Galvanic interaction between active and passive titanium[J]. Corrosion, 1973, 29(2):56-58.
- [11] Feng X G, Liu J Q, Hang C, *et al.* Galvanic corrosion between AISI304 stainless steel and carbon steel in chloride contaminated mortars[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2016, 11(6):5226-5233.



作者简介:张海亚(1985-),女,河北邢台人,博士,讲师,研究方向为饮用水安全保障关键技术、供水管道管垢形成和破裂电化学模拟、供水管道爆管预测、再生水管道微生物腐蚀。

E-mail: flying850612@126.com

收稿日期:2019-05-05