

试验研究

DOI: 10.11973/fsyfh-202407001

# 磁场对车轴钢在氯化钠溶液中腐蚀速率及阳极过程的影响

宋晓娟<sup>1,2</sup>, 李 鑫<sup>1,2</sup>, 王 娟<sup>1,2</sup>, 董海英<sup>1,2</sup>, 吕战鹏<sup>1,2</sup>

(1. 上海大学材料科学与工程学院材料研究所, 上海 200072;

2. 上海大学省部共建特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200072)

**摘要:** 在自然充气的氯化钠溶液中研究了磁场对车轴钢腐蚀速率和阳极溶解的影响。结果表明: 磁场对较短浸泡周期内的腐蚀有显著加速作用, 当浸泡时间较长时, 磁场的影响减弱。磁场倾向于使自腐蚀电位正移, 导致阳极极化曲线起始段的电流密度降低。在阳极极化曲线的电流密度-电位线性区间恒电位极化时, 当极化电位较低时, 极化一段时间后, 电流密度能够达到稳态, 而当极化电位较高时, 极化开始后电流密度先急增; 然后基本随时间延长线性下降。外加磁场后, 阳极电流密度出现一个小增幅, 表明在本试验的极化条件下, 试样的反应速率主要不是受带电离子离开电极表面的传质过程控制的。研究结果可以为磁场作用下金属材料的腐蚀行为评价和机理分析提供依据。

**关键词:** 磁场; 车轴钢; 氯离子; 腐蚀; 阳极溶解

中图分类号: TG174.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-748X(2024)07-0001-07

随着我国铁路事业的迅速发展与运行区域的不断扩大<sup>[1]</sup>, 列车部件在沿海环境中的腐蚀与防护引起越来越多的关注。我国大陆海岸线长 18 400 km, 岛屿岸线长 14 247 km, 海岸线总长度超过 32 600 km。沿海大气环境以及海水中以氯化钠(NaCl)为代表的盐含量都较高, 其中氯离子对材料的侵蚀作用强烈, 会使材料性能发生退化。作为列车重要的核心组件, 车轴在列车行驶过程中承载着弯曲载荷、冲击载荷、扭转载荷等一系列复杂的动载荷, 同时当保护层受损时还会遭受腐蚀影响<sup>[2]</sup>。列车上使用的发电机等大功率电气设备和供电回路中的谐波电流会产生感应磁场, 形成磁场下金属腐蚀的特种环境。目前已有相关研究证明了磁场能够通过磁流体动力学(MHD)<sup>[3-4]</sup>和磁场梯度力<sup>[5-6]</sup>等方式影响电化学反应, 磁场有可能通过影响金属在腐蚀性介质中的电极过程而影响其腐蚀行为。CHIBA 等<sup>[7]</sup>发现磁场对铁在 NaCl 溶液中的腐蚀有抑制作用。谢发勤等<sup>[8]</sup>发现磁场影响管线钢在石油污水中

的腐蚀质量增加率并出现极值现象, 磁场作用与水溶液中氧含量有关, 磁场的作用可能与磁场对氧气在水溶液中溶解度的影响和金属表面腐蚀产物保护性等有关。COSTA 等<sup>[9]</sup>发现 Nd-Fe-B 合金在磁化后的 3.5%(质量分数)NaCl 溶液中的腐蚀速率高于未磁化溶液中的。李晨等<sup>[10]</sup>研究了 0.4 T 磁场对纯铁在 NaCl 溶液中阳极过程的影响。笔者研究了磁场对列车车轴钢腐蚀速率以及阳极过程的影响, 以期为评价磁场作用下金属材料的腐蚀行为提供依据, 为分析磁场影响腐蚀的电化学机理提供参考, 并为相关环境中的腐蚀预测与防护提供依据。

## 1 试验

试验装置参照前文所述<sup>[10-16]</sup>。使用 GAMRY 电化学工作站进行电化学测试, 使用 160 mm × 20 mm × 100 mm 的长方形电解槽, 并采用三电极系统。工作电极为车轴钢, 直径为 5 mm, 工作面积约为 0.2 cm<sup>2</sup>, 辅助电极为铂电极, 参比电极为饱和甘汞电极(SCE), 如无特别说明, 文中电位均相对于 SCE。外加磁场为水平方向, 由配备直流恒电流源的 EM-3 型电磁铁产生, 磁感应强度为 0.1 T。电化学试验前, 将工作电极用水磨砂纸(200~1500 号)逐级打磨, 然后用 W5(06)号金相砂纸打磨。工作电极垂直放置,

收稿日期: 2023-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(52271060); 国家重点研发计划(2017YFB0703002)

通信作者: 吕战鹏(1967—), 研究员, 博士, 从事金属腐蚀与防护研究, 021-56336107, zplu@t.shu.edu.cn

且电极表面与磁场方向平行,保持电极最终打磨方向与磁场方向平行。试验介质为3.5% (质量分数,下同)NaCl溶液,用分析纯级试剂和去离子水配制。试验在室温(约25℃)下进行,采用扫描电镜观察阳极极化后的电极表面形貌。

浸泡试样尺寸为60 mm×20 mm×2 mm,采用自制浸泡装置进行腐蚀试验。如图1所示,试验分别在有、无磁场下进行,磁场由永磁体产生,磁感应强度为0.1 T。试验时,分别用400号和600号耐水砂纸打磨试样至表面光亮、无孔,去离子水冲洗,无水乙醇或丙酮擦拭,冷风吹干,并浸入自然暴露的3.5% NaCl溶液中进行12, 24, 48, 72, 120, 168 h 腐蚀试验,溶液体积为300 mL。若无特别说明,试验溶液均为3.5% NaCl溶液。每组试验用4个平行试样,试样表面与磁场平行放置。试验结束后,取出试样,用去离子水冲洗表面浮锈,再用除锈液(0.05 mol/L 六次甲基四胺和0.96 mol/L HCl)浸泡10 s,去除试样表面难以用擦拭方法去除的腐蚀产物,用大量去离子水冲洗后干燥。腐蚀速率采用公式(1)计算,若无特别说明,均代表从试验开始到试验结束的平均腐蚀速率。

$$V_{\text{corr}} = \frac{m_0 - m_t}{S \cdot t} \quad (1)$$

式中: $V_{\text{corr}}$  为(平均)腐蚀速率; $m_0$  为试样原始质量; $m_t$  为试验后试样的质量; $S$  为试样原始表面积; $t$  为腐蚀时间。

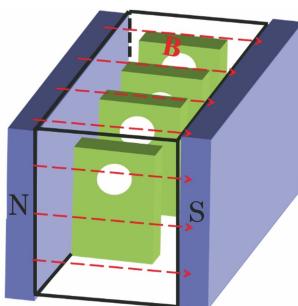


图1 可外加磁场的腐蚀试验用容器及磁场示意图

Fig. 1 Container and magnetic field schematic diagram for corrosion testing with external magnetic field

## 2 结果与讨论

### 2.1 浸泡试验

由图2可见:无磁场条件下,除24 h 浸泡后试样的腐蚀速率出现最低点外,其腐蚀速率总体表现为在最初的12 h 浸泡后达到最大值,之后随浸泡时间延长逐渐变小,且在72 h 浸泡后基本恒定。

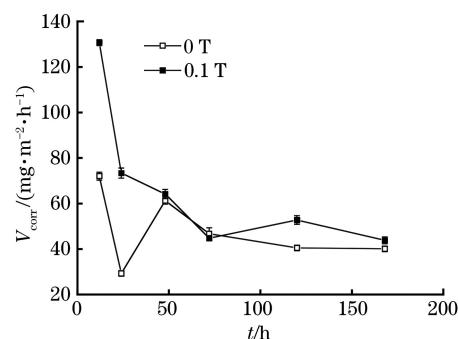


图2 有无磁场条件下,试样在3.5%NaCl溶液中的腐蚀速率

Fig. 2 Corrosion rate of samples in 3.5% NaCl solution without and with magnetic field

0.1 T 磁场条件下,试样浸泡12 h 或者24 h,腐蚀速率增加,浸泡时间超过48 h 后,0.1 T 磁场对腐蚀速率的影响较小,表现为  $V_{\text{corr}}(0.1 \text{ T})/V_{\text{corr}}(0 \text{ T})$  为0.96~1.30。随着浸泡时间延长,试样表面腐蚀产物逐步累积。浸泡试验结果表明:在较短浸泡周期内,当试样表面腐蚀产物膜相对较少时,磁场对腐蚀的加速作用较强;而当浸泡时间较长时,试样表面会附着较多腐蚀产物,磁场对腐蚀速率的影响变小。在特定浸泡周期下,腐蚀速率偏离一般趋势可能与试样表面腐蚀产物的附着以及磁场的影响有关。

### 2.2 电化学测试

#### 2.2.1 自腐蚀电位与阳极极化曲线

由图3可见:在有、无磁场条件下,试样的自腐蚀电位( $E_{\text{corr}}$ )均随浸泡时间延长出现负移,当浸泡时间为0.5 h 时趋于稳定;0.1 T 磁场条件下试样的稳定自腐蚀电位略高于0 T 条件下的。

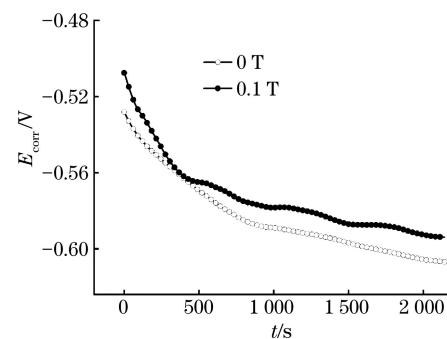


图3 有、无磁场条件下,试样在3.5%NaCl溶液中的自腐蚀电位-时间曲线

Fig. 3 The self corrosion potential-time curves of samples in 3.5% NaCl solution without and with magnetic field

由图4(a)可见:在有、无磁场条件下,试样的阳极极化曲线都表现为活性溶解状态。整条曲线总体可分为AB、BC、CD 和DE 4个区:AB 区为低电流密度区;BD 区内电流密度随电位升高基本呈现线

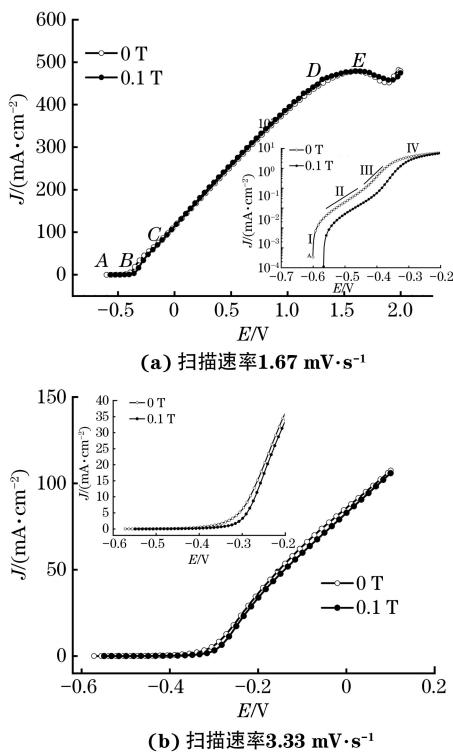


图 4 有无磁场条件下,试样在 3.5% NaCl 溶液中的阳极极化曲线

Fig.4 Anodic polarization curves of samples in 3.5% NaCl solution without and with magnetic field: (a) scanning rate of  $1.67 \text{ mV/s}$ ; (b) scanning rate of  $3.33 \text{ mV/s}$

性增加;在 AC 阶段,0 T 下的电流密度大于 0.1 T 下的,电位高于 C 点电位后,有、无磁场下的阳极电流密度差别不大;CD 阶段,0 T 下电流密度-电位线性区的斜率约为  $255 \text{ m}\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,与 0.1 T 下的( $257 \text{ m}\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ )接近。由图 4(b)可见:当扫描速率为  $3.33 \text{ mV/s}$  时,在特定的电位区域内,0.1 T 磁场下试样的电流密度稍低于无磁场时的;较高电位时,有、无磁场条件下,试样的电流密度差异不明显。这与之前报道的纯铁在 NaCl 溶液中的结果有所不同<sup>[10]</sup>,这一差别可能来源于车轴钢的电化学特性与纯铁不同,也可能来源于磁场作用大小与磁场强度之间的非线性关系,0.4 T 磁场的影响显著高于 0.1 T 磁场的。

由图 5 可见:0 T 时,经过阳极极化测试后,试样表面覆盖了一层薄的腐蚀产物,电极边缘处腐蚀减薄较严重并且出现点蚀坑,电极中间区域的溶解速率小于水平方向两侧的;在 0.1 T 磁场条件下,试样表面覆盖有大量的腐蚀产物,电极整体腐蚀凹陷较深,中心与边缘之间的差别不显著。

## 2.2.2 恒电位极化

根据试样阳极极化曲线的特征电位区域,选择

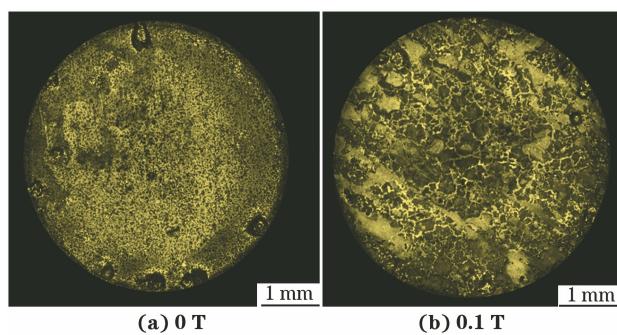


图 5 有、无磁场条件下,试样在 3.5% NaCl 溶液中经阳极极化测试后的表面形貌(扫描速率为  $1.67 \text{ mV/s}$ )

Fig.5 Surface morphology of samples after anodic polarization testing in 3.5% NaCl solution without (a) and with (b) magnetic field (scanning rate of  $1.67 \text{ mV/s}$ )

不同电位进行恒电位极化,并在外加磁场或者撤去磁场条件下原位观察磁场的作用,得到的电流密度-时间曲线见图 6。需要注意,恒电位极化得到的电流密度与极化曲线所得电流密度有可能不一致,这是因为恒电位极化的时间相对充足,电极在极化电位下可以达到稳态或准稳态,而极化曲线测试时,在较大扫描速率条件下,可能未能达到目标电位下的稳态,电极表面状态(或者电极附近介质状态)已经发生了显著变化。无磁场时,图 6 大致分为以下几类:T1 类型的典型为图 6(a),即开始极化后电流密度需要一段时间达到稳态之后一直保持相对稳定(放大可见缓慢增大);T2 类型的典型为图 6(d)和 6(e),即开始极化后电流密度迅速达到稳态,之后一直保持基本恒定(放大后仍未见其随时间有显著变化);T3 类型的典型为图 6(g),即开始极化后电流密度迅速到达峰值之后一直持续下降。

由图 6 还可见:当极化电位为  $-0.4 \sim 0 \text{ V}$  时,磁场对电流密度的影响显著小于极化电位为  $0.5 \sim 1.0 \text{ V}$  时。 $0 \text{ T}$  条件下,在  $-0.4 \text{ V}$  极化约 300 s 后,外加  $0.1 \text{ T}$  磁场会导致电流密度出现小幅增加(增幅约为  $0.2 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ )然后下降, $0.1 \text{ T}$  下极化 300 s 后撤去磁场,稳定的电流密度比撤去磁场前略高  $0.03 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,此条件下继续极化 300 s,即总极化时间约为 900 s 时,外加磁场会导致电流密度下降约  $0.03 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。 $0 \text{ T}$  条件下,在  $-0.3 \text{ V}$  极化 300 s 后,电流密度相对稳定,但仍然会随极化时间延长缓慢增加,外加或者撤去磁场对电流密度的影响均很小。 $0 \text{ T}$  条件下,在  $-0.2 \text{ V}$  极化 300 s 后,电流密度仍然随着极化时间延长而缓慢增加,外加磁场后电流密度在短时间内出现小幅度增加然后随极化时间延长而缓慢增加,撤去磁场后,电流密度出现小幅降低,

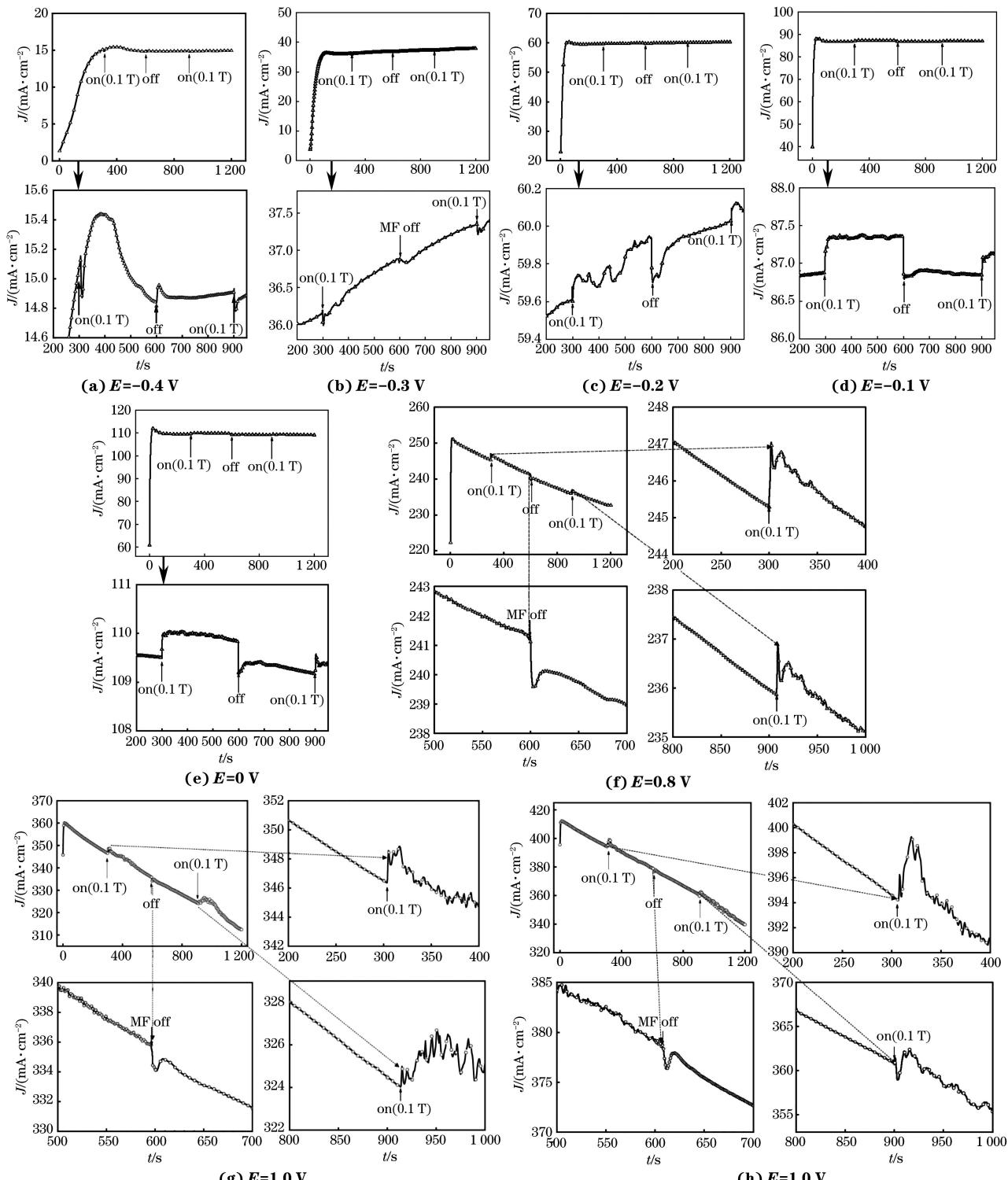


图 6 外加和撤去磁场条件下, 在 3.5% NaCl 溶液中, 极化电位对车轴钢电流密度的影响

Fig. 6 The effect of polarization potential on the current density of axle steel in 3.5% NaCl solution under external and removed magnetic field conditions

其稳定值低于撤去磁场时的值, 即总极化时间约为 900 s 时, 外加 0.1 T 磁场后电流密度略增。

0 T 条件下, 在 -0.1 V 极化 70 s 达到稳态后, 电流密度几乎不随极化时间而变化, 极化 300 s 时

外加 0.1 T 磁场, 电流密度迅速增大 0.5 mA·cm<sup>-2</sup> 后又迅速达到稳态, 在总极化时间 600 s 时撤去磁场, 电流密度基本恢复到无外加磁场时的状态, 在总极化时间 900 s 时再次外加 0.1 T 磁场后, 电流密度

再次略有上升但幅度低于第一次外加磁场时的。0 T 条件下,在 0 V 极化时,电流密度在初始阶段出现陡增后进入一个缓慢降低阶段,极化 300 s 后外加 0.1 T 磁场,电流密度迅速增加  $0.5 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$  然后随时间延长缓慢降低,总极化时间为 600 s 时撤去磁场,电流密度迅速降低约  $0.6 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、略有回升后随极化时间延长缓慢降低,总极化时间为 900 s 时,外加 0.1 T 磁场后电流密度再次上升,但增加幅度小于第一次外加 0.1 T 磁场时的。

由图 6(d)~(h) 可见:0 T 条件下,极化时电流密度在短时间迅速增大后随极化时间延长基本呈线性下降。极化 300 s 时外加 0.1 T 磁场后,电流密度快速增加  $1.8 \sim 4.8 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 增加幅度随着极化电位增大而变大; 总极化时间为 600 s 时, 撤去磁场后, 电流密度快速下降约  $2 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ; 总极化时间为 900 s 时, 再次外加 0.1 T 磁场, 电流密度除了在个别条件下出现如图 6(h) 中所示先下降后上升的暂态, 其他条件下, 基本增加。

由图 7 可见:当极化电位为 -0.3 V 时,有、无磁场条件下,试样表面均未出现明显的宏观不均匀现象,无磁场下极化后,试样表面出现微观片状腐蚀形貌,0.1 T 磁场下极化后,试样表面片状腐蚀现象不明显。当极化电位为 -0.1 V 时,无磁场下试样表面没有表现出明显的宏观不均匀现象,0.1 T 磁场下试样周边出现局部凹陷。当极化电位为 0.5 V 时,有、无磁场下试样周边都出现局部凹陷,无磁场下试样的局部凹陷区域比 0.1 T 下的大但相对较浅; 试样表面凹陷区之外的区域出现微观片状腐蚀特征,0.1 T 磁场下试样的片状腐蚀分布更均匀。结合恒电位极化下电流密度-时间曲线分析,磁场对车轴钢电流密度的影响相对其他体系如磁场对纯铁在硫酸溶液中体系、纯铁在含氯离子硫酸溶液中体系以及纯铁在硫酸钠溶液中体系活性溶解状态下电流密度的影响要小很多,相应地对电极表面形貌的影响程度也比这些体系的小,不过需要注意本研究采用 0.1 T 磁场,而以往研究采用 0.4 T 磁场,这也可能是导致磁场影响差别的原因之一,同时不同的阴离子类型会导致电极-溶液界面传质层的差异,最终也会导致磁场影响的差异。

### 2.3 磁场对腐蚀速率及电极过程的影响规律

磁场对金属腐蚀的影响与腐蚀电化学过程及相关表面状态密切相关。由图 2 可见:在浸泡初期(48 h 内),试样的腐蚀速率随浸泡时间的延长显著降低,这表明试样表面不断生成的腐蚀产物具有一定

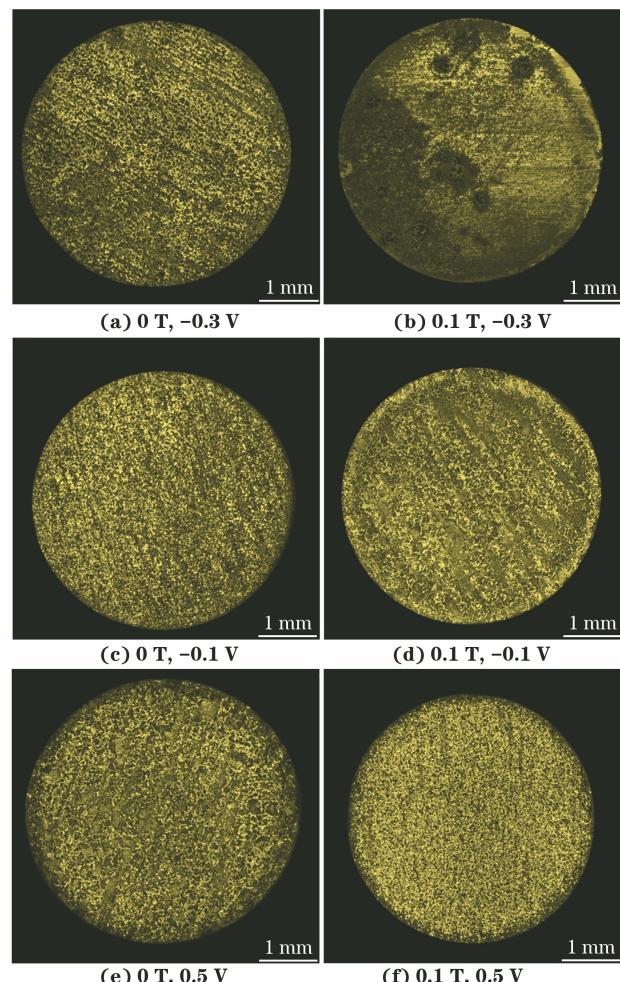


图 7 外加和撤去磁场条件下,在 3.5% NaCl 溶液中,车轴钢在不同电位下极化 300 s 后的表面形貌

Fig. 7 Surface morphology of axle steel after polarization at different potentials for 300 s in 3.5% NaCl solution under external and removed magnetic field conditions

的保护性; 但当浸泡时间为 48~168 h 时, 腐蚀速率随浸泡时间的变化较小, 这说明初始阶段生成的腐蚀产物膜的保护性不随浸泡时间延长明显变化, 即腐蚀产物膜对腐蚀的抑制作用有限。当浸泡时间为 12 h 和 24 h 时, 磁场会显著增大腐蚀速率, 说明当金属表面反应活性较强或者表面腐蚀产物膜保护性不够好时, 磁场对腐蚀的加速作用比较明显; 当金属表面已经形成具有一定保护性的表面腐蚀产物膜时, 磁场对腐蚀速率的影响不明显。图 3 表明, 试样达到相对稳定的自腐蚀状态后, 其在 0.1 T 磁场下的自腐蚀电位略正于 0 T 磁场下的。图 4 表明, 0.1 T 下的阳极电流密度小于 0 T 时的。腐蚀浸泡试验所得腐蚀速率表示自腐蚀电位下的反应速率, 此时真实阳极反应速率与真实阴极反应速率相等。阳极极化时, 电位偏离自腐蚀电位, 同时阳极反应加速, 阴极反应受到抑制从而得到外测阳极电流。均匀腐蚀条件下, 根据腐蚀

金属电极过程动力学理论<sup>[17]</sup>, 测得的电流密度  $J$  是实际阳极电流密度  $J_a$  与实际阴极电流密度  $J_c$  的差值(这里假设阳极电流密度为正), 见式(2)。

$$J = J_a - J_c \quad (2)$$

外加磁场下真实阳极电流密度  $J_a$  的变化, 或真实阴极电流密度的变化, 均会导致实测电流密度的变化。实测电流密度的降低可能来源于真实阳极电流密度的减小, 真实阴极电流密度的增大, 或者是二者协同作用。根据已有磁场对纯铁腐蚀电化学过程的作用结果, 推断磁场导致真实阴极反应速率增大, 因此自腐蚀电位变正。在 NaCl 溶液中, 阴极反应有氧去极化反应、氢离子去极化反应以及水的析氢反应, 见式(3)。一般情况下, 中性 NaCl 溶液中的阴极反应以氧去极化反应为主, 通常认为析氢反应的作用显著小于氧去极化反应。但由于车轴钢属于高强钢, 在水溶液中的电化学活性可能高于纯铁。已发现在碳酸氢钠溶液中, 当纯铁表现为钝化态时, 车轴钢还处于活性溶解态<sup>[18]</sup>, 因此析氢反应可能也会对车轴钢的腐蚀起作用。已有结果表明, 磁场会加速纯铁表面的析氢反应而导致电位变正<sup>[15]</sup>。试验初期, 磁场会加速阴极反应, 同时对阳极反应没有影响或者小于对其阴极过程的影响, 此时外加磁场会出现自腐蚀电位正移以及阳极电流密度减小的情况<sup>[13-15]</sup>。随着浸泡时间延长, 在试样表面膜的作用下, 氢去极化反应会减弱, 此时磁场对腐蚀速率的影响也变弱, 这也间接说明了图 2 中 0.1 T 磁场有可能加速车轴钢电极表面的阴极过程而使得自腐蚀电位变正、引起较短浸泡周期内表面活性金属的腐蚀速率增加, 而对长周期浸泡下的腐蚀速率影响较小。

$$J_c = J_{c,O_2} + J_{c,H^+} + J_{c,H_2O} \quad (3)$$

式中:  $J_{c,O_2}$ ,  $J_{c,H^+}$ ,  $J_{c,H_2O}$  分别代表氧去极化、氢去极化以及水还原反应的电流密度。

图 4 及图 6 表明, 同样属于极化曲线中电流密度-电位基本呈现线性关系的 BD 区, 在不同电位下, 阳极溶解的机理会有明显不同。当极化电位为  $-0.4\sim0$  V 时, 阳极电流密度在经过一段时间暂态后都能达到稳态或者相对稳定态。当极化电位为  $0.5\sim1.0$  V 时, 阳极电流密度在短暂的迅速上升之后呈现准线性下降的趋势而不能达到稳态, 表明这种条件下金属-溶液界面层状态在不断发生变化而导致阳极反应受阻, 而这种反应阻力部分来自于带电离子的扩散阻力, 但这不是主要的速率控制过程。这是因为参照之前纯铁的研究结果, 若带电活性物质

的扩散电流密度为数十甚至数百  $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 0.1 T 磁场对电流密度的增大作用会比预期更显著。NaCl 溶液中氯离子的强侵蚀性导致电极表面呈高活性溶解状态, 因此 0.1 T 磁场增大了阳极电流密度但作用系数较小, 对极化后电极表面形貌的影响也低于已报道的含硫酸根溶液。

### 3 结 论

通过失重法和电化学测试研究了 0.1 T 磁场对车轴钢在自然充气的 3.5% NaCl 溶液中腐蚀速率和阳极过程的影响。较短浸泡周期内, 磁场显著增大腐蚀速率; 而在较长时间浸泡后磁场的影响减弱。磁场导致自腐蚀电位正移, 动电位扫描得到的阳极极化曲线起始段的电流密度降低。在阳极极化曲线的电流密度-电位线性区间, 阳极溶解机理随电位不同而改变: 较低电位下极化后, 电流密度能达到稳态, 而在较高的电位下极化后, 电流密度先急增然后随时间延长线性下降。外加磁场后, 阳极电流密度出现一个小增幅, 提示这些电位下阳极溶解反应速率控制步骤并非由带电离子的传质过程主导。通过观察磁场的影响, 可以为确定腐蚀金属电极反应机理以及选择有效的防护技术提供支撑依据。

### 参考文献:

- [1] 干佳薇. 中国高速铁路的发展历程与展望[J]. 经济研究导刊, 2014(17):31-32.  
GAN J W. Development and prospect of china high-speed railway [J]. Economic Research Guide, 2014(17):31-32.
- [2] 汪开忠,胡芳忠,陈世杰,等.高速列车车轴用 DZ2 钢的腐蚀疲劳性能[J].金属热处理,2019,44(4):81-85.  
WANG K Z, HU F Z, CHEN S J, et al. Corrosion fatigue property of DZ2 steel for high speed train axle [J]. Heat Treatment of Metals, 2019,44(4):81-85.
- [3] FAHIDY T Z. Magnetoelectrolysis [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1983,13(5):553-563.
- [4] TACKEN R A, JANSSEN L J J. Applications of magnetoelectrolysis [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1995,25(1):1-5.
- [5] MONZON L M A, COEY J M D. Magnetic fields in electrochemistry: the Lorentz force. A mini-review[J]. Electrochemistry Communications, 2014,42:38-41.
- [6] MONZON L M A, COEY J M D. Magnetic fields in electrochemistry: the Kelvin force. A mini-review[J]. Electrochemistry Communications, 2014,42:42-45.
- [7] CHIBA A, TANAKA N, UENO S, et al. Inhibition by

- magnetic fields of the corrosion of iron in sodium chloride solution[J]. Zairyō-to-Kankyo, 1992, 41(5): 287-292.
- [8] 谢发勤,吴向清,白真权,等.磁场对石油污水管线钢的腐蚀行为研究[J].石油机械,2006,34(12):1-3,77.  
XIE F Q, WU X Q, BAI Z Q, et al. Study of corrosion behavior of magnetic field on the steel of oil sewage pipeline [J]. China Petroleum Machinery, 2006, 34 (12):1-3,77.
- [9] COSTA I, OLIVEIRA M C L, DE MELO H G, et al. The effect of the magnetic field on the corrosion behavior of Nd - Fe - B permanent magnets[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 278(3):348-358.
- [10] 李晨,许鑫和,宋晓娟,等.磁场对铁在氯化钠溶液中阳极溶解速率的影响[J].腐蚀与防护,2022,43(6): 58-61,96.  
LI C, XU X H, SONG X J, et al. Effect of magnetic field on anodic dissolution rate of iron in sodium chloride solution[J]. Corrosion & Protection, 2022, 43 (6):58-61,96.
- [11] LI H J, XIONG Q, LU Z P, et al. A magnetic field induced undulated surface and the shift of the active/ passivation transition threshold of iron in a sulfuric acid solution[J]. Corrosion Science, 2017, 129:179-191.
- [12] DONG H Y, XU X H, CAI S W, et al. Contribution of modulated mass transport by magnetic field to the anodic behavior of iron with various electrode configuration[J]. Corrosion, 2021, 77(4):413-426.
- [13] LYU Z P, HUANG D L, YANG W. Probing into the effects of a magnetic field on the electrode processes of iron in sulphuric acid solutions with dichromate based on the fundamental electrochemistry kinetics [J]. Corrosion Science, 2005, 47(6):1471-1492.
- [14] LYU Z P, HUANG C B, HUANG D L, et al. Effects of a magnetic field on the anodic dissolution, passivation and transpassivation behaviour of iron in weakly alkaline solutions with or without halides[J]. Corrosion Science, 2006, 48(10):3049-3077.
- [15] LYU Z P, YANG W. In situ monitoring the effects of a magnetic field on the open-circuit corrosion states of iron in acidic and neutral solutions [J]. Corrosion Science, 2008, 50(2):510-522.
- [16] LYU Z P, SHOJI T, YANG W. Anomalous surface morphology of iron generated after anodic dissolution under magnetic fields[J]. Corrosion Science, 2010, 52 (8):2680-2686.
- [17] 曹楚南.腐蚀电化学原理[M].2版.北京:化学工业出版社,2004.  
CAO C N. Principle of corrosion electrochemistry [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [18] 宁飞,张锟,蔡爽巍,等.磁场对车轴钢在含氯离子碳酸氢钠溶液中阳极过程的影响[J].腐蚀与防护,2020,41(7):49-54.  
NING F, ZHANG K, CAI S W, et al. Effect of magnetic field on anodic process of axle steel in sodium bicarbonate solution with chlorides [J]. Corrosion & Protection, 2020, 41(7):49-54.

## The Effects of Magnetic Field on Corrosion Rate and Anodic Processes of Axel Steel in Sodium Chloride Solution

SONG Xiaojuan<sup>1,2</sup>, LI Xing<sup>1,2</sup>, WANG Juan<sup>1,2</sup>, DONG Haiying<sup>1,2</sup>, LYU Zhanpeng<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Materials, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;  
2. State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** The effect of magnetic field on the corrosion rate and anodic dissolution of axle steel in a naturally inflated sodium chloride solution was studied. The results indicate that the magnetic field had a significant accelerating effect on corrosion within a shorter soaking period, and the influence of the magnetic field weakened when the soaking time prolonged. The magnetic field tended to cause a positive shift in the self corrosion potential, resulting in a decrease in the current density at the beginning of the anodic polarization curve. When performing constant potential polarization in the linear range of current density-potential in the anodic polarization curve, when the polarization potential was low, the current density could reach a steady state after polarization for a period of time. However, when the polarization potential was high, the current density first increased sharply after polarization began and then decreased linearly with time. After applying a magnetic field, there was a small increase in the anode current density, indicating that under the polarization conditions of this experiment, the reaction rate of the sample was mainly not controlled by the mass transfer process of charged ions leaving the electrode surface. The research results could provide a basis for the evaluation and mechanism analysis of the corrosion behavior of metal materials under magnetic field action.

**Key words:** magnetic field; axel steel; chloride ion; corrosion; anodic dissolution