

硅酸钠对模拟汽车冷却液中 AM60 镁合金的缓蚀作用研究

文家新^{1,2}, 何建新², 王莎², 许雯婷²

(1.重庆工业职业技术学院 化学与制药工程学院, 重庆 401120;

2.重庆大学 化学化工学院, 重庆 400044)

摘要:目的 了解在模拟汽车冷却液介质中, Na_2SiO_3 对 AM60 镁合金的缓蚀作用和缓蚀机理。方法 通过极化曲线、电化学阻抗谱方法等电化学方法研究了 Na_2SiO_3 对 AM60 镁合金在模拟汽车冷却液中的缓蚀性能, 考察了 Na_2SiO_3 浓度、模拟冷却液温度和浸泡时间对缓蚀效率的影响, 并对缓蚀机理进行了探讨。结果 Na_2SiO_3 浓度对其缓蚀效率影响较大, 其最佳浓度为 0.8 mmol/L, 此时缓蚀效率为 95.87%。冷却液在高温 (80 °C) 时, Na_2SiO_3 的缓蚀效率为 36.08%, 也能对 AM60 镁合金提供一定的缓蚀保护作用。浸泡初期, Na_2SiO_3 对 AM60 镁合金电极的缓蚀效率为 17.47%, 浸泡 10 h 后可达 72.38%。结论 在模拟汽车冷却液中, 当 Na_2SiO_3 的浓度为 0.8 mmol/L 时其缓蚀效率最高, 且其缓蚀效率随介质温度的升高而降低, 随浸泡时间的增加而增大。 Na_2SiO_3 表现为阳极型缓蚀剂的特征, 缓蚀机理可解释为 SiO_3^{2-} 能与腐蚀产生的 Mg^{2+} 生成难溶性的 MgSiO_3 化合物, 生成的 MgSiO_3 沉积于合金表面形成一层保护膜, 从而阻滞了金属的进一步离子化。

关键词: AM60 镁合金; 模拟汽车冷却液; 硅酸钠; 缓蚀作用; 极化曲线; 电化学阻抗谱

中图分类号: TG174 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)12-0062-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.12.010

Corrosion Inhibition Effect of Sodium Silicate on AM60 Magnesium Alloy in Simulated Vehicle Coolant

WEN Jia-xin^{1,2}, HE Jian-xin², WANG Sha², XU Wen-ting²

(1.School of Chemical & Pharmaceutical Engineering, Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China;

2.School of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: The work aims to study the corrosion inhibition effect and mechanism of sodium silicate on AM60 magnesium alloy in simulated vehicle coolant medium. The corrosion inhibition effect of sodium silicate on AM60 magnesium alloy in simulated vehicle coolant medium was studied by means of electrochemical methods including polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). Effects of sodium silicate concentration, simulated coolant temperature and im-

收稿日期: 2016-03-10; 修订日期: 2016-07-23

Received: 2016-03-10; Revised: 2016-07-23

基金项目: 重庆市教委资助项目 (KJ2217)

Fund: Supported by the Education Commission of Chongqing (KJ2217)

作者简介: 文家新 (1983—), 男, 在读博士, 讲师, 主要研究方向为材料腐蚀与防护。

Biography: WEN Jia-xin(1983—), Male, Doctor's degree, Lecturer, Research focus: material corrosion and protection.

mersion time on corrosion inhibition efficiency were inspected. The corrosion inhibition mechanism of sodium silicate was also discussed. Concentration of Na_2SiO_3 had great influence on corrosion inhibition efficiency, and its optimum concentration was 0.8 mmol/L and the corrosion inhibition efficiency of sodium silicate was 95.87%. Inhibition efficiency of the sodium silicate was up to 36.08% at high temperature (80 °C) in the simulated coolant. Hence the sodium silicate provided inhibition protection on AM60 magnesium alloy. At the early stage of immersion, corrosion inhibition efficiency of Na_2SiO_3 on AM60 magnesium alloy was 17.47% and then amounted to 72.38% after 10 hours. When concentration of the sodium silicate is 0.8 mmol/L, the corrosion inhibition efficiency is the highest. It decreases as the medium temperature increases and increases as the immersion time in the simulated coolant medium increases. The sodium silicate acts as an anodic type inhibitor, and the corrosion inhibition mechanism of sodium silicate can be interpreted as the fact that insoluble compound of MgSiO_3 can be generated by the reaction of SiO_3^{2-} with Mg^{2+} (produced by corrosion). MgSiO_3 deposits on the surface of alloy and forms a layer of protective film, thus inhibiting further metal ionization.

KEY WORDS: AM60 magnesium alloy; simulated vehicle coolant; sodium silicate; inhibition effect; polarization curve; electrochemical impedance spectroscopy

镁合金被誉为最具开发价值和应用潜力的绿色工程材料,具有比强度和比刚度高、导电导热性能好、资源丰富、易于加工回收等优点^[1]。此外,它还是目前工业应用中最轻的金属结构材料,其密度仅为铁的 1/4,铝的 2/3^[2],正是这些优异特性使其成为了汽车工业中极好的铝合金及有色金属的替代品^[3],满足了汽车轻量化要求,提高了汽车的环保性及安全性^[4-6]。近年来,随着镁合金成型技术以及镁合金表面处理技术的不断发展和推广应用,镁合金已经越来越多地应用于汽车各个零部件^[7],但是镁合金的电极电位较低,在潮湿大气、酸性、中性或碱性的溶液中易被腐蚀^[8],因此如何有效抑制镁合金在汽车冷却液中的腐蚀已成为急需解决的问题。

缓蚀技术是镁合金防腐技术中应用最广泛的方法之一,有效抑制镁合金腐蚀的缓蚀剂技术已成为近年来国内外研究的热点^[9-13]。 Na_2SiO_3 作为一种环境友好型的碱性水溶性缓蚀剂^[14],已经得到了非常广泛的应用,特别是对于铝及其合金在碱性溶液中具有很显著的缓蚀效果,但其对镁合

金的腐蚀抑制性能还缺乏系统的研究。本文通过电化学极化曲线、交流阻抗谱等方法研究了 Na_2SiO_3 缓蚀剂对 AM60 镁合金在模拟汽车冷却溶液中的缓蚀作用,考察了不同浓度 Na_2SiO_3 的缓蚀效果及介质温度、浸泡时间对缓蚀效率的影响,并探讨了缓蚀机理。

1 实验

实验材料由重庆镁业有限公司提供的 AM60 镁合金,其主要成分见表 1,试样工作面积为 1 cm²,用环氧树脂封装非工作面,测试前依次用 200[#]、400[#]、600[#]和 800[#]砂纸逐级将试样工作面打磨至平整光亮,然后先用丙酮超声清洗工作面 3 min 除油,最后用纯水冲洗并冷风吹干备用。参照 ASTM 标准配制模拟冷却液,其成分为乙二醇和 ASTM D1384-96 腐蚀性水,两者的体积比为 1:1,而 ASTM D1384-96 腐蚀性水由 Na_2SO_4 (148 mg/L)、NaCl (165 mg/L)、 NaHCO_3 (138 mg/L) 溶于蒸馏水配制而成^[3],上述所用试剂均为分析纯。

表 1 AM60 镁合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of AM60 magnesium alloy

Mg	Al	Zn	Mn	Si	杂质总量
余量	5.60%~6.40%	0.20%	0.26%~0.5%	0.05%	0.50%

电化学测试使用传统的三电极体系,AM60 镁合金电极作为研究电极,饱和甘汞电极作为参比电极,大片铂电极被用作辅助电极,电化学工作站采

用上海辰华仪器公司生产的 CHI660C。实验之前,将镁合金电极于(25±1) °C 的电解液中稳定 1 h。先进行自腐蚀电位扫描,待体系稳定后,再分别测量

极化曲线（扫描范围为 $E_{\text{corr}} \pm 300 \text{ mV}$ ，扫描速率为 0.5 mV/s ）和电化学阻抗谱（开路电位下、扫描频率范围为 $10^{-2} \sim 10^5 \text{ Hz}$ ，交流信号幅值为 $\pm 5 \text{ mV}$ ），采用 Solartron 公司的 Zview 软件进行阻抗谱解析。

2 结果与讨论

2.1 极化曲线

图 1 为 25°C 下 AM60 镁合金在添加不同浓度的 Na_2SiO_3 的模拟冷却液中的 Tafel 极化曲线。可知添加缓蚀剂后，AM60 的自腐蚀电位值均比未添加缓蚀剂时的更正，且随着 Na_2SiO_3 浓度的增加，阴极过程和阳极过程的腐蚀都得到了不同程度的抑制，Tafel 曲线阴极支通过 CHI 软件拟合结果见表 2。其中阴极分支和阳极分支的斜率分别用 b_c 、

b_a 表示， E_{corr} 为腐蚀电位， J_c 为腐蚀电流密度。

从拟合数据可以看到，随着 Na_2SiO_3 浓度的增加，腐蚀电位正移，腐蚀电流密度减小，当浓度为

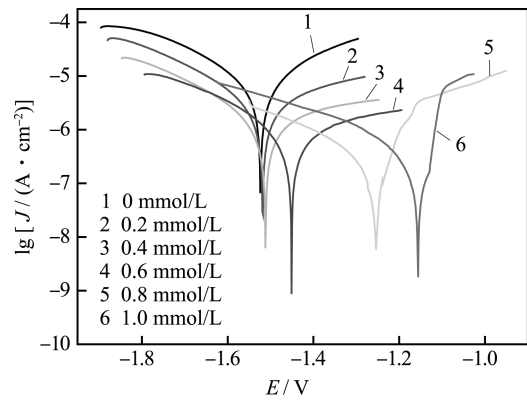


图 1 AM60 在含不同浓度 Na_2SiO_3 模拟冷却液中 Tafel 极化曲线

Fig.1 Tafel polarizations of AM60 in simulated coolant with different Na_2SiO_3 concentrations

表 2 极化曲线拟合结果
Tab.2 Fitting results of polarization curves

Concentration/(mmol·L ⁻¹)	E_{corr} (vs.SCE)/V	b_c/V^{-1}	b_a/V^{-1}	$\lg J_c$	$J_c/(10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\eta/\%$
0	-1.524	5.857	5.886	-5.375	4.22	—
0.2	-1.518	5.983	4.125	-5.754	1.76	58.23
0.4	-1.512	6.081	3.759	-6.071	0.849	79.86
0.6	-1.451	6.258	4.047	-6.336	0.461	89.07
0.8	-1.255	5.513	8.767	-6.757	0.174	95.87
1.0	-1.156	5.649	5.192	-6.701	0.199	95.28
2.0	-1.242	1.785	8.326	-5.773	1.69	59.91

0.8 mmol/L 时，腐蚀电流密度最小，此时按式（1）计算得到缓蚀剂的缓蚀效率最高，达到 95.87% ，说明此时 Na_2SiO_3 的缓蚀效果最好。

$$\eta = \frac{J_{\text{corr}} - J'_{\text{corr}}}{J_{\text{corr}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中： J_{corr} 和 J'_{corr} 分别为 AM60 镁合金在不含和含 Na_2SiO_3 的模拟冷却液中的腐蚀电流密度。

其次，图 2 为 AM60 镁合金在含与不含 0.8 mmol/L Na_2SiO_3 的 80°C 模拟冷却液中的 Tafel 极化曲线。可知添加 0.8 mmol/L Na_2SiO_3 后，极化曲线右移，腐蚀电位更正，拟合后得到高温下不含缓蚀剂的模拟冷却液中 AM60 的腐蚀电流密度为 $5.82 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ，而添加 0.8 mmol/L Na_2SiO_3 后，AM60 的腐蚀电流密度为 $3.72 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ，缓蚀效率为 36.08% ，由此说明即使在高温下（ 80°C ） Na_2SiO_3 缓蚀剂也能对 AM60 镁合金提供一定的缓蚀保护作用。

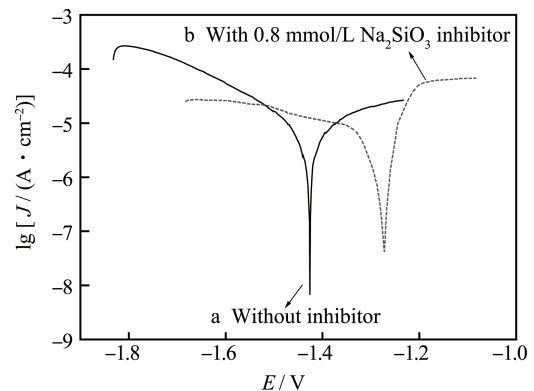


图 2 AM60 镁合金在 80°C 模拟冷却液中的 Tafel 极化曲线

Fig.2 Tafel plots of AM60 in simulated coolant at 80°C

2.2 电化学阻抗谱

图 3 为 25°C 下 AM60 镁合金在添加不同浓度的 Na_2SiO_3 模拟冷却液中的电化学阻抗谱。可知添加不同浓度缓蚀剂的阻抗谱均由高、中、低频区的容抗弧组成，随着浓度的增加，高频容抗弧趋于消

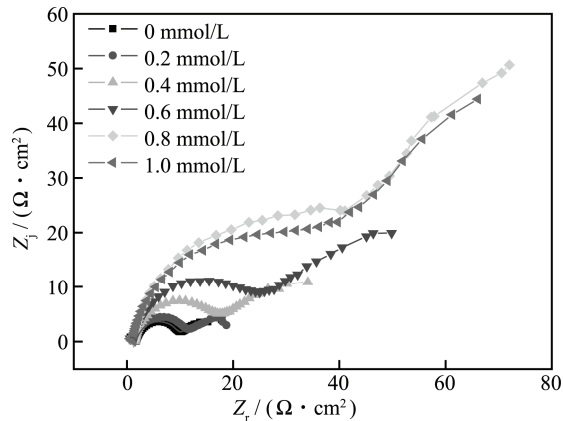


图3 AM60在含不同浓度 Na_2SiO_3 的模拟液中的电化学阻抗谱

Fig.3 EIS of AM60 in simulated coolant with different Na_2SiO_3 concentrations

失,说明 Cl^- 等离子吸附减弱,缓蚀组分的吸附占据主导地位;中、低频区的容抗弧逐渐变大,表现出较大的电荷传递电阻和较明显的传质弛豫,这是由于缓蚀防护膜比腐蚀产物膜更厚或致密所致。

表 3 拟合所得各参数值
Tab.3 Parameters obtained from fitting

$C/(\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1})$	$R_{ad}/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$C_{ad}/(\times 10^{-9}\text{F}\cdot\text{cm}^{-2})$	$R_t/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$\text{CPE}_{dl}\text{-}T/(\times 10^{-6}\text{F}\cdot\text{cm}^{-2})$	$\text{CPE}_{dl}\text{-}P$	$\eta/\%$
0	1388.0	1.970	8884	9.4478	0.864 18	0
0.2	1114.0	1.997	10 476	9.8805	0.866 64	15.20
0.4	1093.0	1.849	18 060	9.0332	0.876 95	50.81
0.6	1032.0	2.055	28 361	8.7340	0.871 03	68.67
0.8	985.2	1.922	57 150	6.8512	0.872 58	84.45
1.0	873.9	2.313	47 236	6.5250	0.881 43	81.19

而增大。当浓度为 0.8 mmol/L 时, R_t 值最大, 达到 57 150 $\Omega\cdot\text{cm}^2$, 计算所得的缓蚀效率也最高, 达到 84.45%, 说明此时 AM60 镁合金在该体系中的腐蚀阻力最大。当浓度继续增大至 1 mmol/L 时, R_t 和 η 开始减小, 腐蚀阻力随之减小, 说明当 Na_2SiO_3 浓度值超过 0.8 mmol/L 后, 其缓蚀效率反而下降。

综上所述, 电化学阻抗谱分析结论与 Tafel 极化曲线一致, 即刚开始 Na_2SiO_3 的缓蚀效率随其浓度的增加而增加, 但当 Na_2SiO_3 浓度超过 0.8 mmol/L 后, 其缓蚀效率反而随其浓度的增加而降低。

图 5 为 AM60 镁合金在含有 0.8 mmol/L Na_2SiO_3 的模拟冷却液中浸泡不同时间的电化学阻抗谱。可知初始时的阻抗弧半径最小, 1、2、4 h 时的相差不大, 7、10 h 时的最大。由表 4 可知, 浸泡 1 h 后, R_t 明显增大, 中期 (1~4 h) R_t 值差别不大,

为拟合高频区和中频区的容抗弧, 依据阻抗谱特征设计了如图 4 所示的等效电路, 其中 R_t 为电荷传递电阻, 考虑“弥散效应”^[15], 双电层电容采用常相位角元件 CPE_{dl} 表示, 拟合结果列于表 3 中。另外, 根据有无缓蚀剂时的电荷传递电阻 R_t 值, 利用式 (2) 可以计算缓蚀效率^[16]:

$$\eta = \frac{R_t - R_t^0}{R_t} \times 100\%$$

(2)

式中: R_t^0 、 R_t 分别为未添加及添加缓蚀剂后体系的电荷传递电阻。

从表 3 可以明显看出, R_t 值随着浓度值的增加

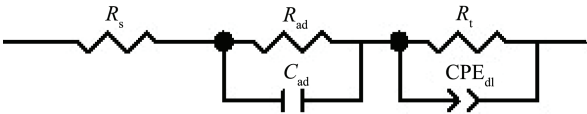


图 4 AM60 镁合金在添加缓蚀剂的模拟液中的等效电路
Fig.4 Equivalent circuit of AM60 magnesium alloy in simulated coolant with the addition of inhibitors

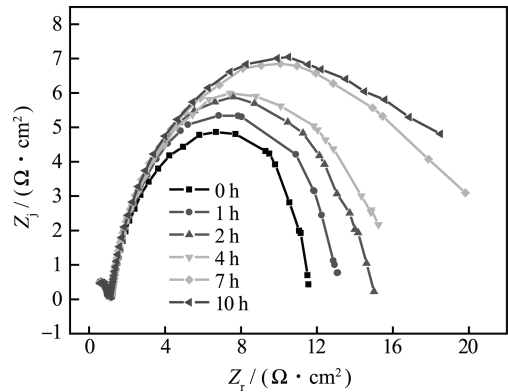


图 5 AM60 在含 0.8 mmol/L Na_2SiO_3 模拟液中的电化学阻抗谱
Fig.5 EIS of AM60 in simulated coolant with 0.8 mmol/L Na_2SiO_3

随着腐蚀时间的增长, R_t 值增大, 其所对应的缓蚀效率也升高。这可能是因为初始时的电极表面完全裸露于溶液中, 合金表面的自然氧化层因无法抵御溶液中的腐蚀性离子而开始发生腐蚀, 但由于溶液

中缓蚀剂 Na_2SiO_3 与溶液中镁离子形成不溶性产物 MgSiO_3 , 它与腐蚀产物 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 一同沉积于电极表面, 有效抑制了 AM60 镁合金电极的进一步腐蚀, 且膜层的致密度及厚度随着浸泡时间的增长而

增加, 表现为阻抗弧直径增加。因此, Na_2SiO_3 缓蚀剂的缓蚀性能在浸泡初期不明显, 随着浸泡时间的增长缓蚀效率增加。

表 4 拟合所得各参数
Tab.4 Fitting results of EIS

Time/h	$R_{ad}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$C_{ad}/(\times 10^{-9} \text{ F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$R_t/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$\text{CPE}_{dl-T}/(\times 10^{-6} \text{ F} \cdot \text{cm}^{-2})$	CPE_{dl-P}	$\eta/\%$
0	856.2	2.6230	10 764	7.4395	0.902 30	17.47
1	680.7	2.4800	13 154	8.2132	0.876 85	18.17
2	833.9	2.7446	15 184	7.7162	0.891 54	29.11
4	825.5	2.7044	15 872	8.6980	0.872 75	32.18
7	816.2	2.7028	28 266	10.702	0.838 00	61.92
10	797.6	2.7921	38 974	12.230	0.823 70	72.38

2.3 腐蚀动力学计算

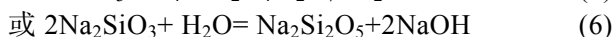
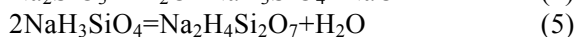
由图 1 和图 2 拟合所得的电化学参数值, 并根据式 (3) 所示的 Arrhenius 公式计算, 可以得到 AM60 镁合金在含 0.8 mmol/L Na_2SiO_3 缓蚀剂的模拟冷却液中的实验活化能 $E_a=21.22 \text{ kJ/mol}$, 与空白模拟冷却液中的实验活化能 $E_a=2.24 \text{ kJ/mol}$ 相比, 添加 0.8 mmol/L Na_2SiO_3 缓蚀剂后, 实验活化能 (E_a) 较未添加时的活化能明显增大, 腐蚀反应能垒增加, 从而使腐蚀反应得到明显抑制。

$$\ln \frac{J_2}{J_1} = -\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (3)$$

式中: J_1 、 J_2 分别对应于 AM60 镁合金在乙二醇/水基础液中温度为 T_1 、 T_2 时的电流密度 ($\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$); T_1 为 298 K; T_2 为 353 K; R 为气体常数, $R=8.314 \text{ J/(K} \cdot \text{mol)}$; E_a 为实验活化能 (J/mol)。

2.4 缓蚀机理讨论

关于 Na_2SiO_3 的缓蚀机理有多种理论^[17], 一种是形成胶体的化合物理论, 该理论认为 Na_2SiO_3 在溶液中水解后形成带负电的胶体粒子, 这些粒子聚集在阳极区域, 阻止阳极过程的进行, 从而实现缓蚀作用。在溶液中, Na_2SiO_3 的水解产物为二硅酸盐或多硅酸盐, 水解过程如式 (4) — (6) 所示^[18], 水解后溶液呈强碱性, 因而此种情况下带负电的胶体粒子稳定存在并聚集于合金表面的可能性不大。



第二种理论认为硅酸根离子能与腐蚀产生的 Mg^{2+} 生成难溶性的 MgSiO_3 化合物, 生成的 MgSiO_3 沉积于合金表面形成一层保护层, 从而阻滞金属的进一步离子化, 此种类型的缓蚀剂即为阳极型缓蚀剂。由图 2 可知, 加入 Na_2SiO_3 后曲线的阴极支变化不大, 而阳极支电流密度降低明显, 说明其阳极反应得到了一定的抑制, 表现出阳极型缓蚀剂的特征。此外, 从 Na_2SiO_3 的水解过程可知, Na_2SiO_3 的水解产物为二硅酸盐或多硅酸盐, 可与 Mg^{2+} 反应生成难溶性的化合物, 沉积在金属表面, 有效地阻止了腐蚀反应的进一步发生。

由此可见, 第二种理论很好地解释了 Na_2SiO_3 的缓蚀机理, 且与一般阳极型缓蚀剂相比, 硅酸盐在合金表面形成的膜层结构更复杂、更致密, 加之镁合金与 Na_2SiO_3 水解溶液中存在的 OH^- 发生反应生成 $\text{Mg}(\text{OH})_2$, 共同沉积在合金表面, 使得膜层的保护效果更佳, 腐蚀反应得到了明显地抑制。

3 结论

Na_2SiO_3 对 AM60 镁合金在模拟冷却液中的腐蚀抑制作用明显, 且缓蚀效率受 Na_2SiO_3 浓度、冷却液温度和浸泡时间的影响。研究表明, 25 ℃ 下, Na_2SiO_3 的最佳浓度为 0.8 mmol/L, 此时缓蚀效率可达到 95.87%; 高温 (80 ℃) 时, Na_2SiO_3 也能对 AM60 镁合金提供一定的缓蚀保护作用, Na_2SiO_3 的缓蚀效率随浸泡时间的增加而增大。 Na_2SiO_3 的缓蚀机理是其水解产物与 Mg^{2+} 在合金表面形成一层稳定、致密的保护膜, 该膜层能够对合金表面进

行腐蚀防护,表现为阳极型缓蚀剂的特征。

参考文献

- [1] 赵阳,梁平,史艳华,等.苯甲酸钠对AM60镁合金在氯化钠溶液中的缓蚀作用[J].化工学报,2013,64(10):3714—3724.
ZHAO Yang, LIANG Ping, SHI Yan-hua, et al. Corrosion Inhibition of Sodium Benzoate for AM60 Magnesium Alloys in 3.5% NaCl Solution[J]. CIESC Journal, 2013, 64(10): 3714—3724.
- [2] SEIFZADEH D, BEZAATPOUR A, ASADPOUR J. Corrosion Inhibition Effect of N,N'-bis(2-pyridylmethylidene)-1,2-diiminoethane on AZ91D Magnesium Alloy in Acidic Media[J]. Trans Nonferrous Met Soc, 2014, 24: 3441—3451.
- [3] 雷惊雷,李凌杰,于生海,等.乌洛托品对模拟汽车冷却液中镁合金的缓蚀作用[J].化学研究与应用,2008,20(4):462—464.
LEI Jing-lei, LI Ling-jie, YU Sheng-hai, et al. Inhibition of Hexam Ethylenetetramine on Corrosion of Magnesium Alloy in Simulated Coolant[J]. Chemical Research and Application, 2008, 20(4): 462—464.
- [4] SONG Guang-ling. Recent Progress in Corrosion and Protection of Magnesium Alloys[J]. Advanced Engineering Materials, 2005, 7(7): 563—586.
- [5] 宋珂.镁合金在汽车轻量化中的应用发展[J].机械研究与应用,2007,20(1):14—16.
SONG Ke. The Development and Application of Magnesium Alloys in Automotive Industry[J]. Mechanical Research & Application, 2007, 20(1): 14—16.
- [6] 张春香,陈培磊,陈海军,等.镁合金在汽车工业中的应用及其研究进展[J].铸造技术,2008,29(4):531—535.
ZHANG Chun-xiang, CHEN Pei-lei, CHEN Hai-jun, et al. Application and Research Progress of Magnesium Alloys in Automobile Industry[J]. Foundry Technology, 2008, 29(4): 531—535.
- [7] 李宜达,梁敏洁,廖海洪,等.高性能镁合金及其在汽车行业应用的研究进展[J].热加工工艺,2013,42(10):12—19.
LI Yi-da, LIANG Min-jie, LIAO Hai-hong, et al. Research Progress of Advanced Magnesium Alloys and Its Application in Auto Industry[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(10): 12—19.
- [8] 周必芳,周勇,方坤,等.AZ91D镁合金用复合缓蚀剂缓蚀行为的研究[J].电镀与精饰,2012,34(12):1—5.
ZHOU Bi-fang, ZHOU Yong, FANG Kun, et al. Corrosion Behavior of Inhibitors Used for AZ91D Magnesium Alloy[J]. Plating and Finishing, 2012, 34(12): 1—5.
- [9] 李凌杰,雷惊雷,于生海,等.钼酸盐对镁合金在模拟冷却水中腐蚀的抑制作用[J].化工学报,2008,59(5):1223—1227.
LI Ling-jie, LEI Jing-lei, YU Sheng-hai, et al. Inhibition of Corrosion of Magnesium Alloy by Molybdate in Simulated Cooling Water[J]. CIESC Journal, 2008, 59(5): 1223—1227.
- [10] 赵阳,梁平,史艳华,等.苯甲酸钠对AM60镁合金在氯化钠溶液中的缓蚀作用[J].化工学报,2013,64(10):3714—3724.
ZHAO Yang, LIANG Ping, SHI Yan-hua, et al. Corrosion Inhibition of Sodium Benzoate for AM60 Magnesium Alloys in 3.5%NaCl Solution[J]. CIESC Journal, 2013, 64(10): 3714—3724.
- [11] ZUCCHI F, GRASSI V, ZANOTTO F. Sodium Monocarboxylates as Inhibitors of AZ31 Alloy Corrosion in a Synthetic Colling Water[J]. Materials and Corrosion, 2009, 60(3): 199—205.
- [12] NANDINI D, NITYANANDA S. Alkyl Carboxylates as Efficient and Green Inhibitors of Magnesium Alloy ZE41 Corrosion in Aqueous Salt Solution[J]. Corrosion Science, 2014, 85: 411—427.
- [13] GAO H, LI Q, CHEN F N, et al. Study of the Corrosion Inhibition Effect of Sodium Silicate on AZ91D Magnesium Alloy[J]. Corrosion Science, 2011, 53(4): 1401—1407.
- [14] SALASI M, SHAHRABI T, ROAYAEI M. The Electrochemical Behaviour of Environment-friendly Inhibitors of Silicate and Phosphonate in Corrosion Control of Carbon Steel in Soft Water Media[J]. Materials Chemistry and Physics, 2007, 104: 183—190.
- [15] 曹楚南,张鉴清.电化学阻抗谱导论[M].北京:科学出版社,2002.
CAO Chu-nan, ZHANG Jian-qing. An Introduction to Electrochemical Impedance Spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [16] MISHRA A K, BALASUBRAMANIAM R. Corrosion Inhibition of Aluminum Alloy AA2014 by Rare Earth Chlorides[J]. Corrosion Science, 2007, 49(3): 1027—1044.
- [17] 肖纪美,曹楚南.材料腐蚀学原理[M].北京:化学工业出版社,2002.
XIAO Ji-mei, CAO Chu-nan. Principles of Material Corrosion[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [18] 北京师范大学无机化学教研室等.无机化学[M].北京:高等教育出版社,2003.
Inorganic Chemistry Teaching and Research Section, Beijing Normal University. Inorganic Chemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.