

文章编号: 1004-0609(2006)01-0176-07

几种盐沉积和微量 SO₂ 对 AZ91D 镁合金 大气腐蚀的协同作用^①

万 晔^{1, 2}, 严川伟¹

(1. 中国科学院金属研究所 金属腐蚀与防护国家重点实验室, 沈阳 110016;

2. 沈阳建筑大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110168)

摘 要: 在实验室模拟条件下(25 ℃, 85% ±5% RH), 通过失重法、扫描电镜、傅立叶红外光谱和 X 射线衍射研究了可溶盐和 SO₂ 对 AZ91D 镁合金大气腐蚀行为的影响。结果表明: 可溶盐和 SO₂ 气体均能明显地加速 AZ91D 镁合金的腐蚀, 而且两者之间对其腐蚀具有协同作用。对其腐蚀机理和协同作用进行了讨论。

关键词: 大气腐蚀; 镁合金; 可溶盐; SO₂

中图分类号: TG 172.3

文献标识码: A

Synergetic effect of soluble salts and SO₂ on atmospheric corrosion of diecast AZ91D magnesium alloy

WAN Ye^{1, 2}, YAN Chuanwei¹

(1. State Key Laboratory for Corrosion and Protection, Institute of Metal Research,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University,
Shenyang 110168, China)

Abstract: The atmospheric corrosion behavior of diecast AZ91D magnesium alloy deposited with different salts and in the presence of SO₂ (25 ℃ and 85% ±5% RH) was studied by gravimetry, Fourier transform infrared spectroscopy, scanning electron microscopy and X-ray diffraction. The result shows that there is synergetic effect of the soluble salts and SO₂. Both the soluble salts and SO₂ can accelerate the atmospheric corrosion of AZ91D magnesium alloy. The synergetic effect of the soluble salts and SO₂ may enable the atmospheric corrosion of metallic materials greater than that caused by single component of the two respectively.

Key words: atmospheric corrosion; magnesium alloy; soluble salts; SO₂

镁是最轻的结构金属之一, 具有许多优异性能, 如高比强度、散热性佳、吸震性好、电磁屏蔽性好, 并对晶间腐蚀和应力腐蚀破裂(SCC)的敏感度低, 以及对环境的污染小等特点^[1-4], 因此成为工程塑料、铝合金和钢材富有生命力的竞争者或替代品^[5, 6], 在汽车、通讯设备、电子行业、航空航天、军事以及核能等工业部门中正逐渐得到日益广

泛的应用^[7-11], 并被誉为 21 世纪最有前途的绿色结构材料^[12, 13]。其中, AZ91D 镁合金的铸造性能、力学性能较好, 在镁合金铸件中应用最为广泛。

然而, 由于镁在潮湿环境中的热力学不稳定性, 化学活性高, 在空气中很容易氧化。污染大气特别是工业污染大气能大大加速镁合金的腐蚀破坏, 同时也降低其作为结构材料的使用可靠性。

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50499336)

收稿日期: 2005-04-08; 修订日期: 2005-11-16

作者简介: 万 晔(1972-), 副教授, 博士

通讯作者: 万 晔, 副教授; 电话: 024-23921875; E-mail: ywan@imr.ac.cn

SO₂ 是工业大气环境中的主要气体污染物之一, 它对金属的大气腐蚀有着不可忽视的影响。自 1935 年 Vernon^[14] 首先证明了它对一些金属的大气腐蚀具有加速作用以来, 许多学者就对此进行了广泛的研究, 探讨了它对各种金属大气腐蚀的具体影响。Haynie 和 Upham^[15] 以及其他学者认为 Zn 在不同大气环境中腐蚀的明显差别主要是因为大气中 SO₂ 的含量不同。

一些研究者^[16] 已经报道了二氧化碳和氯化钠的沉积对几种镁合金的大气腐蚀的影响, 他们认为在 NaCl 沉积作用下, CO₂ 的存在将会有减缓镁合金大气腐蚀的趋势。但还没有见到多种可溶盐和二氧化硫对镁合金的腐蚀进行研究的报道。

本文作者通过模拟大气环境, 研究不同可溶盐和 SO₂ 对 AZ91D 镁合金初期大气腐蚀的影响。同时借助于 Fourier 变换红外光谱(FTIR)、扫描电镜/X 射线能谱分析(SEM/EDAX)及 X 射线衍射分析(XRD)等手段对腐蚀表面及腐蚀产物进行分析, 研究其腐蚀机理, 探讨不同可溶盐和 SO₂ 之间的协同效应对 AZ91D 镁合金腐蚀的影响。

1 实验

实验用材为压铸 AZ91D 镁合金, 其化学成分如表 1 所示。试样尺寸为 10 mm × 10 mm × 1.5 mm, 一端钻有挂样孔。用 800# ~ 1 000# 砂纸逐级打磨, 再用粒度为 1.5 μm 的金刚石研磨膏抛光, 用三次蒸馏水充分冲洗, 然后用乙醇和丙酮超声波除油清洗干净, 干燥后称取质量。所用仪器为瑞士 Mettler-Toledo 天平(感量为 10⁻⁷ g)。

表 1 AZ91D 镁合金的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of AZ91D magnesium alloy (mass fraction, %)			
Al	Zn	Mn	Cu
8.3 ~ 9.7	0.35 ~ 1.0	0.15 ~ 0.5	0.03
Ni	Si	Fe	Mg
0.002	0.1	0.005	Bal.

本实验所用的(NH₄)₂SO₄、Na₂SO₄、NaCl 和 NH₄Cl 溶液是按一定体积比由三次蒸馏水和无水乙醇配制而成的, 两种硫酸盐的浓度均为 3.03 × 10⁻² mol/L, 两种氯盐的浓度均为 6.06 × 10⁻² mol/L。用微量进样器将试样表面分别喷涂(NH₄)₂SO₄、Na₂SO₄、NaCl 和 NH₄Cl 各 15 μL,

并使其均匀铺展在试样表面。空白试样为表面未进行盐沉积但在腐蚀箱中进行不同暴露时间的试样。不同盐溶液的具体配制和沉积方法见文献[20]。

腐蚀气氛来自混合箱, 调整微量腐蚀气体发生器, 产生 SO₂ 腐蚀气体。由无油空压机产生的压缩空气经除湿、除尘净化后, 分成两个支路, 一路为干空气将 SO₂ 气体载入混合箱, 另一路为经 60 ℃ 三次蒸馏水饱和的湿空气, 干湿两路气体在混合箱混合。调节两种气体流量, 控制混合箱内气体的相对湿度(RH)在 85% ± 5% 之间, 使腐蚀气氛中 SO₂ 含量约为 10⁻⁶, 通入腐蚀箱。用恒温水浴和空调控制系统的温度在(25 ± 1) ℃ 范围内。整个系统主要装置及部件采用聚四氟乙烯或玻璃材料制成。大气腐蚀模拟系统装置参见文献[18]。用细尼龙绳将试样悬挂在腐蚀箱中, 本实验持续时间为 28 d, 对试样每隔 7 d 取样 1 次, 并对每种条件下的试样进行质量分析。首先将样品浸在三次蒸馏水中去除可溶性的盐, 接着采用化学方法清除腐蚀产物, 在室温下将试样浸入除锈液(200 g CrO₃ + 10 g AgNO₃ + 20 g Ba(NO₃)₂ + 蒸馏水配成 1 000 mL 溶液)中去除腐蚀产物, 然后用三次蒸馏水冲洗干净, 吹干, 称量质量。每隔 7 d 准备 3 个完全没有腐蚀的空白试样进行质量损失校正。

对腐蚀产物的分析主要包括: 采用美国 Nicolet 公司的 Magna-IR560 红外光谱仪(VeeMax 反射附件)进行红外光谱测试, 扫描次数为 64, 分辨率为 8 cm⁻¹。表面形貌采用荷兰 Philips 公司生产的 XL-30 FEG 型(暴露在 SO₂ 的气氛中的试样)场发射扫描电子显微镜进行扫描电镜测试; 采用日本理学(Rigaku) D/max-2500pc 型 X 射线衍射仪进行 XRD 测试。

2 结果与讨论

图 1 所示为经可溶盐沉积的试样在净化空气中暴露不同时间后单位面积的腐蚀质量损失 Δm/A (mg · cm⁻²), (以下单位面积的腐蚀质量损失均简称为腐蚀质量损失)。通过比较图 1 中各种条件下的腐蚀质量损失可知, 在实验初期, 经可溶盐沉积的试样腐蚀质量损失远远大于空白试样的腐蚀质量损失, 可溶盐沉积对试样初期腐蚀质量损失的影响顺序为 NH₄Cl > NaCl > (NH₄)₂SO₄ > Na₂SO₄。这说明几种可溶盐对于 AZ91D 镁合金的初期大气腐蚀起到了明显的诱发作用。氯盐的诱发作用更加明显, 这是由于氯离子半径比硫酸根离子小, 比较容

易渗透到基体里面。而且经 NH_4Cl 沉积的试样腐蚀发展趋势较大。

图2所示为经4种可溶盐沉积的试样在 SO_2 气氛中腐蚀不同时间后的腐蚀质量损失 $\Delta m/A$ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)，可以看出经可溶盐沉积的试样腐蚀质量损失远远大于空白试样的腐蚀质量损失，不同可溶盐沉积对试样初期腐蚀质量损失的影响顺序为 $\text{NaCl} > \text{NH}_4\text{Cl} > (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{blank}$ 。比较图1和图2可知，在 SO_2 气氛中的试样腐蚀质量损失大于在净化空气中的腐蚀质量损失，因此 SO_2 和可溶盐沉积两者可能对 AZ91D 镁合金的大气腐蚀存在协同作用，导致在 SO_2 气氛中的腐蚀质量损失大于在净化空气中的腐蚀质量损失。

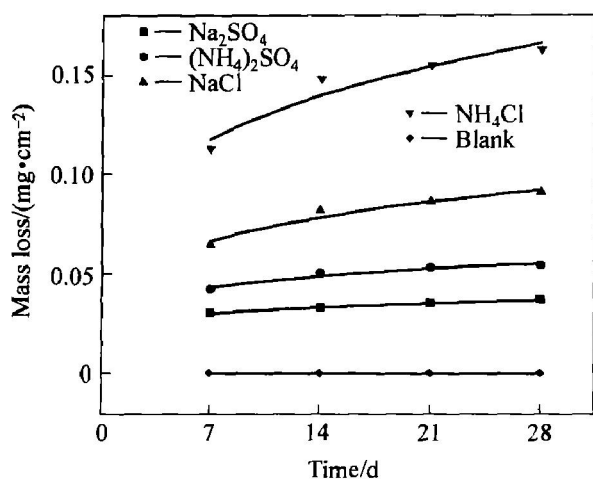


图1 经不同盐沉积的试样在净化空气中的腐蚀质量损失

Fig. 1 Mass loss of AZ91D magnesium alloy deposited with salts vs exposure time in clean atmosphere

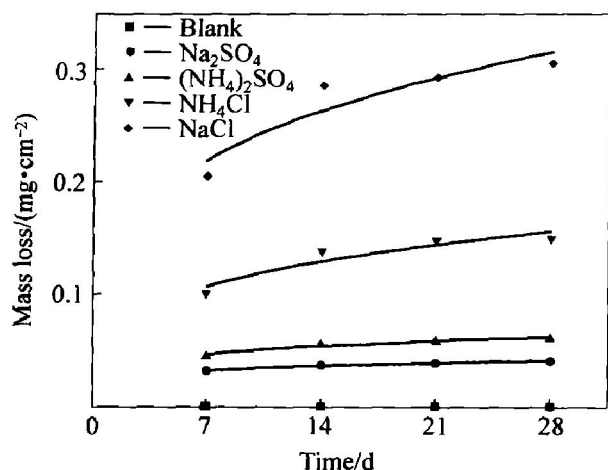


图2 经不同盐沉积的试样在含 SO_2 气氛中的腐蚀质量损失

Fig. 2 Mass loss of AZ91D deposited with salts vs exposure time in SO_2 -containing atmosphere

图3所示为沉积4种可溶盐的试样在含 SO_2 气氛中腐蚀28 d后的SEM形貌。从扫描电镜图片可以看出，4种可溶盐沉积后的腐蚀试样的表面形貌有较大不同，腐蚀产物分布并不均匀。经氯化钠沉积试样的腐蚀最为严重，表面出现较大的片状腐蚀产物的外皮，并且有较大的裂纹。这种大裂纹对腐蚀介质(水份、氧气等)的传输阻力较小，因此在该条件下的腐蚀质量损失较大。试样表面呈现比较均匀的腐蚀形貌，导致后期的腐蚀发展趋势较经氯化铵缓慢。经氯盐沉积的试样表面腐蚀较硫酸盐沉积试样的腐蚀程度严重，这是由于氯离子半径较小，渗透性较强，对镁合金的腐蚀侵蚀性较大的缘故。

经不同可溶盐沉积的试样在含 SO_2 气氛中暴露28 d后表面腐蚀产物结构各不相同。对其进行红外光谱分析可知，尽管沉积的可溶盐并不相同，但4种可溶盐沉积试样的腐蚀产物中均出现了羟基和硫酸根离子的特征吸收峰。经 NH_4Cl 沉积和经 NaCl 沉积的试样在含 SO_2 气氛中腐蚀28 d后的红外光谱如图4(a)和图5(a)所示。波数位于 1640 cm^{-1} 和 1790 cm^{-1} 附近的吸收峰为 OH^- 特征吸收峰^[19, 20]，波数位于 1106 cm^{-1} 、 1023 cm^{-1} 和 691 cm^{-1} 附近的吸收峰为 SO_4^{2-} 特征吸收峰^[19, 21]。对该试样表面的腐蚀产物进行了X射线衍射分析，得到如图4(b)和5(b)所示的结果。经 NH_4Cl 沉积试样的腐蚀产物主要由 $\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 组成，经 NaCl 沉积的试样腐蚀产物主要是由 $\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_{21}\text{Mg}(\text{SO}_4)_{10}\text{Cl}_3$ 组成。说明 SO_2 气体参与了腐蚀的过程。

镁是一种非常活泼的金属，其标准电极电势为 -2.37 V ，是所有结构金属中最低的。如图6所示，镁的整个热力学稳定区都大大低于水的稳定区。当暴露于空气中时，金属镁表面能自氧化形成一层以 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 MgO 及其次级产物(如各种水合 MgCO_3 、 MgSO_3 等)为主的灰色薄膜^[7, 22-25]。由于自身的热力学稳定性不高，这层氧化薄膜只能对基体金属提供有限的暂时性保护。另外镁是一种强还原剂，在所有pH值下，都很容易与水反应，使水还原析出 H_2 ，本身则形成 Mg^+ 和 Mg^{2+} 离子溶解。在pH为8.5至11.5时，镁本身可或多或少地被保护性氧化物或氢氧化物所覆盖，对溶解反应起阻碍作用，在强碱性介质中(pH值11~12以上)，由于生成稳定的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 膜而钝化^[26]。在酸性、中性和弱碱性溶液中，镁一般会发生腐蚀，其腐蚀速率随pH的降低而升高，镁合金的腐蚀是以电化学机

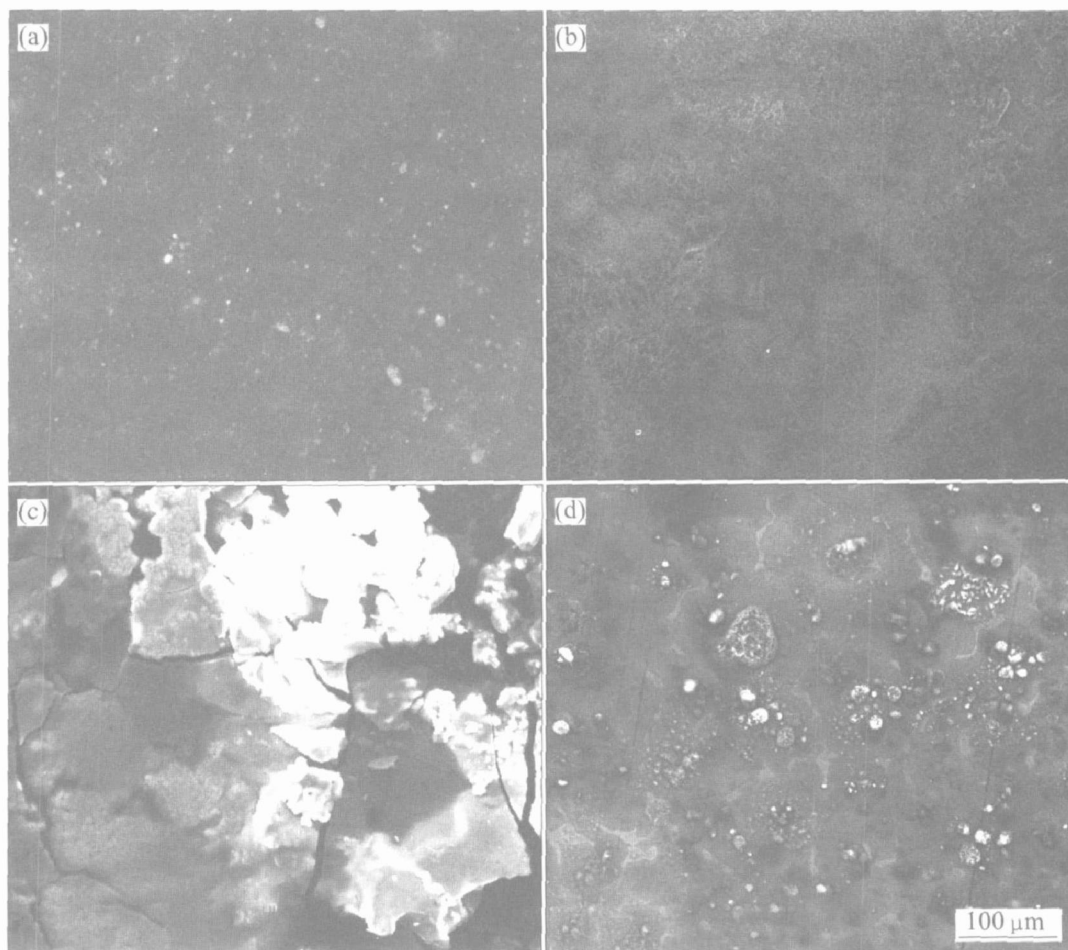


图 3 沉积可溶盐的试样在含 SO_2 气氛中腐蚀 28 d 后表面的 SEM 形貌

Fig. 3 SEM micrographs of AZ91D deposited with Na_2SO_4 (a), $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (b), NaCl (c) and NH_4Cl (d) after exposed for 28 d in SO_2 -containing atmosphere

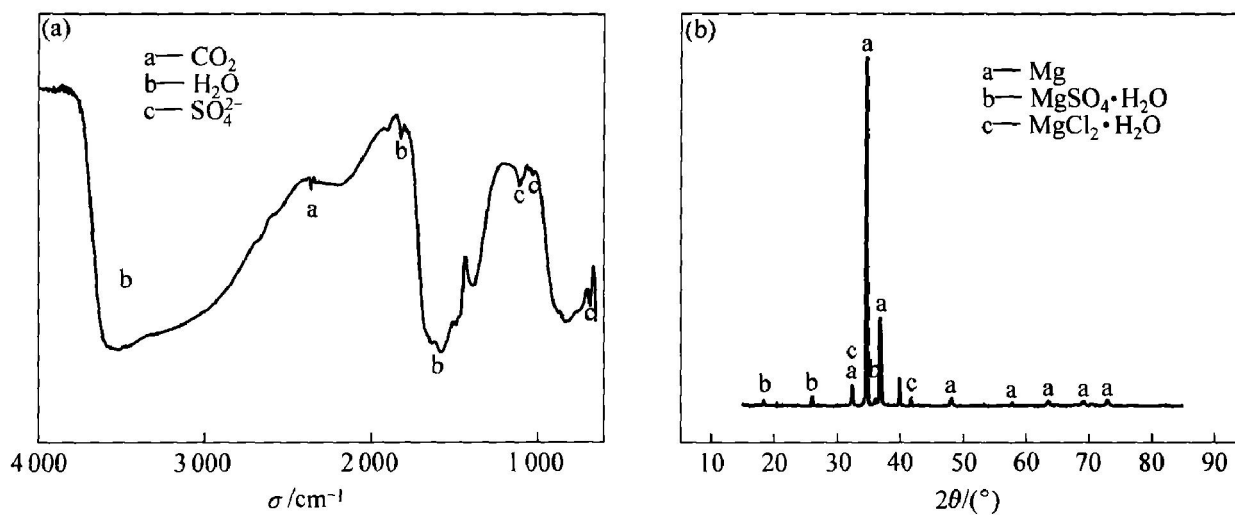


图 4 经 NH_4Cl 沉积的试样在含 SO_2 气氛中腐蚀 28 d 后的红外光谱 (a) 和 X 射线衍射谱 (b)

Fig. 4 FTIR spectrum (a) and XRD pattern (b) of samples deposited with NH_4Cl after exposed for 28 d in SO_2 -containing atmosphere

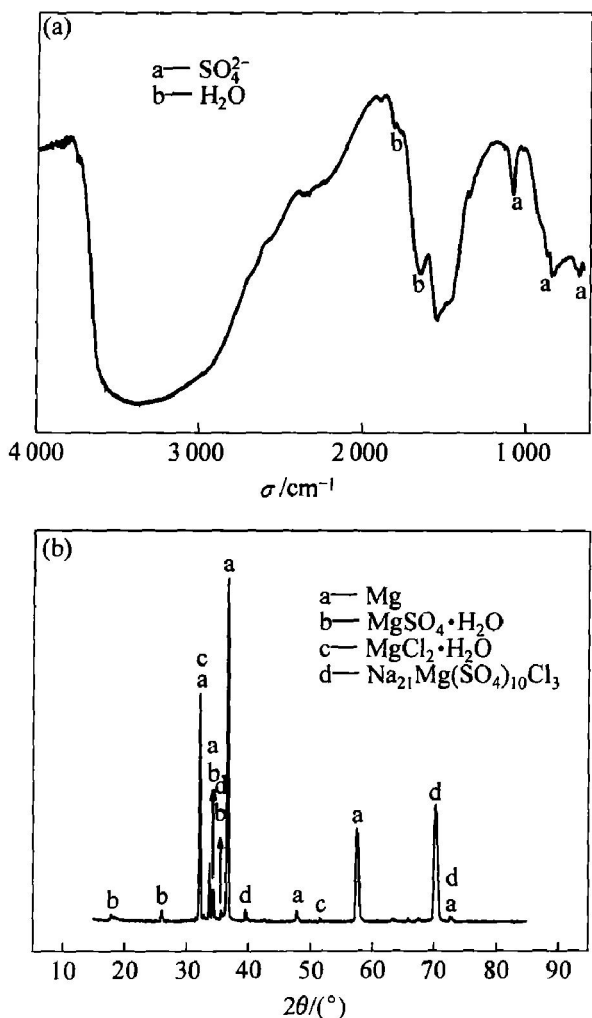


图 5 经 NaCl 沉积的试样在含 SO₂ 气氛中腐蚀 28 d 后的红外光谱(a)和 X 射线衍射谱(b)

Fig. 5 FTIR spectrum(a) and XRD pattern(b) of samples with NaCl after exposed for 28 d in SO₂-containing atmosphere

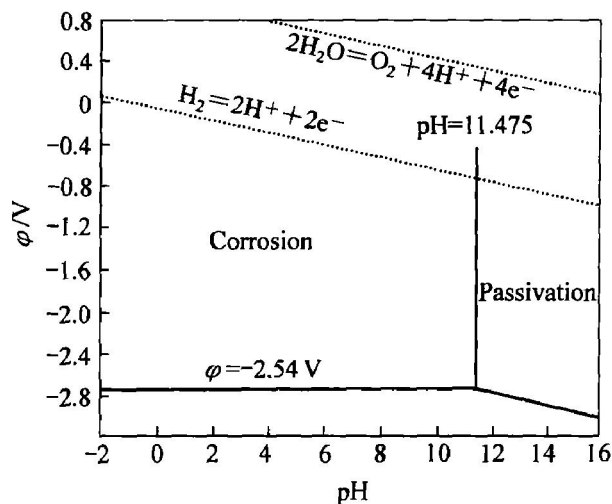
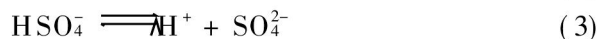
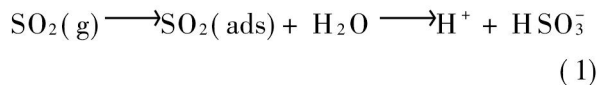


图 6 Mg-H₂O 系电位—pH 平衡图

Fig. 6 Potential—pH diagram of Mg-H₂O at 25 °C

制进行的^[27]。

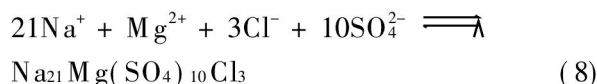
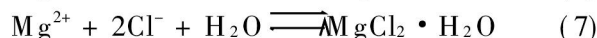
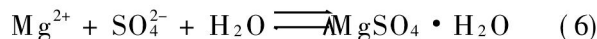
由于 NaCl 和 Na₂SO₄ 具有很强的吸潮性，一旦沉积在试样表面就能从周围环境中吸附水分，形成 NaCl(ads) 和 Na₂SO₄(ads) 的水溶液液膜。在含 SO₂ 的气氛中，SO₂ 容易吸附在样品表面的这层水膜中，从而发生水解和电离，使样品表面呈弱酸性，加速其腐蚀速率，如图 1 和图 2 所示。根据异种电荷相吸原理，大量的 Cl⁻(ads) 或 SO₄²⁻(ads) 通过迁移聚集在阳极区，形成 MgCl₂(ads) 或 MgSO₄(ads)，导致阳极区的 pH 值降低，反过来又增加了阳极区镁的溶解；阴极区存在大量的 OH⁻，从而导致 Na⁺ 向该区域迁移而聚集。由红外光谱和 X 射线衍射结果可知，经 NaCl 沉积的试样腐蚀产物为 MgSO₄·H₂O、MgCl₂·H₂O 和以及大分子的 Na₂₁Mg(SO₄)₁₀Cl₃，成为固体的腐蚀产物壳，如图 3 中的腐蚀形貌。腐蚀机理如下所示：



同时，在 AZ91D 镁合金样品表面的局部发生镁的阳极溶解，电极反应为

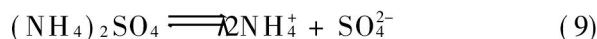


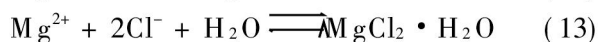
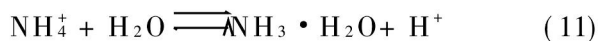
一般认为阴极为氢的还原：



经 Na₂SO₄ 沉积的试样有类似的结果。大量的 SO₄²⁻(ads) 通过迁移聚集在阳极区，从而在阳极区形成 MgSO₄(ads) 溶液，导致阳极区的 pH 值降低，增加了阳极区镁的溶解；阴极区存在大量的 OH⁻，从而导致 Na⁺ 向该区域迁移而聚集。

经 NH₄Cl 和 (NH₄)₂SO₄ 沉积的试样由于铵根离子发生水解，产生 H⁺，加速 AZ91D 镁合金的大气腐蚀。同样根据异种电荷相吸原理，大量的 Cl⁻(ads) 或 SO₄²⁻(ads) 通过迁移聚集在阳极区，从而在阳极区形成 MgCl₂(ads) 或 MgSO₄(ads)。由红外光谱结果可知，腐蚀产物为含结晶水的 MgCl₂ 或 MgSO₄，这些腐蚀产物以固体形式聚集在阳极区，如图 3 中的腐蚀形貌所示。腐蚀过程如式 (1) ~ (5) 以及如下的方程式所示：





沉积硫酸盐的 AZ91D 镁合金在 SO₂ 气氛中的腐蚀行为除了 SO₂ 的吸附和水解外, 另外还存在 SO₄²⁻ 的循环机制不断的起作用^[28-30], 导致腐蚀过程的不断进行。

3 结论

AZ91D 镁合金试样在净化空气和 SO₂ 气氛中的腐蚀质量损失规律有所差异。试样腐蚀质量损失的发展随着时间的延长有较大的变化: 在最初 7 d 里腐蚀质量损失较大, 第 14 d 后腐蚀质量损失较为缓慢。对试样腐蚀产物进行结构分析, 得知在 SO₂ 气氛中的腐蚀产物中均有含结晶水存在, 而且试样在 SO₂ 气氛中的腐蚀质量损失大于在净化空气中的腐蚀质量损失, 证实了 SO₂ 增加了腐蚀的进程, 并且和可溶盐之间对 AZ91D 镁合金的大气腐蚀具有协同作用。

由于氯离子对 AZ91D 镁合金的侵蚀较为严重, 因此经 NaCl 和 NH₄Cl 沉积的试样的腐蚀较经 Na₂SO₄ 和 (NH₄)₂SO₄ 沉积的严重; 由于 SO₂ 和 NaCl 的协同作用所生成的试样腐蚀产物比较粗大、疏松, 存在较大的裂纹, 其腐蚀现象较经其它可溶盐沉积试样严重。

REFERENCES

- [1] Froes F H, Eliezer D, Aghion E. The science, technology and application of magnesium[J]. J Mine Metals and Material Society, 1998, 5(9): 30 - 34.
- [2] Decker R F. The Renaissance in magnesium[J]. Advanced Material Process, 1998, 154(3): 31 - 33.
- [3] Nakatsugawa I, Martin R, Knystautas E J. Improving corrosion resistance of AZ91D magnesium alloy by nitrogen ion implantation[J]. Corrosion, 1996, 52(12): 921 - 926.
- [4] Froats A, Aune T K, Hawke D, et al. Corrosion of magnesium and magnesium alloys[A]. ASTM International. Metal Handbook, 9th Edition[C]. USA: ASM International, 1987. 740 - 754.
- [5] Zozulin A J, Bartak D E. Anodized coatings for magnesium alloys[J]. Metal Finishing, 1994, 92(3): 39 - 44.
- [6] Makar G L, Kruger J. Corrosion of magnesium[J]. International Materials Reviews, 1993, 38(3): 138 - 153.
- [7] Mordike B L, Ebert T. Magnesium: properties applications potential[J]. Mater Sci Eng A, 2001, A302: 37 - 45.
- [8] American Society for Metals on Cleaning and Finishing of Magnesium Alloys. Cleaning and finishing of magnesium alloys[A]. ASM. Metal Handbook, 9th Edition Vol. 5 Surface Cleaning, Finishing and Coating[M]. USA: ASM International, 1982. 628 - 649.
- [9] Polmear I J. Recent developments in light alloy[J]. Trans JIM, 1996, 37(1): 12 - 15.
- [10] Idris M H. Precision casting of a magnesium-base alloy[J]. Br Foundryman, 1997, 90(4): 140.
- [11] Idris M H. Processing and evaluation of investment cast magnesium-base alloy[J]. AFS Trans, 1996, 104: 237.
- [12] Groshart E. Preparation of nonferrous metals for plating[J]. Metal Finishing, 2002, 98(A): 82 - 86.
- [13] Voytko J E. Organic finishing & plating & surface finishing[J]. Plating & Surface Finishing, 2000(8): 54 - 56.
- [14] Vernon W H J. Effects of SO₂ on corrosion of zinc[J]. Trans Faraday Soc, 1935(31): 1668 - 1670.
- [15] Haynie F H, Upham J B. Effects of atmospheric sulfur dioxide on the corrosion of zinc[J]. Material Performance, 1970, 9(8): 35 - 40.
- [16] Lindström R, Svensson J E, Johansson L G. The influence of carbon dioxide on the atmospheric corrosion of some magnesium alloys in the presence of NaCl[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2002, 149(4): B103 - B107.
- [17] 万 晔, 严川伟, 曹楚南. 可溶盐沉积对碳钢大气腐蚀的影响[J]. 物理化学学报, 2004, 2(6): 659 - 663.
- [18] WAN Ye, YAN Chuwei, CAO Chunan. Atmospheric corrosion of A3 steel deposited with different salts[J]. Acta Physchim Sin, 2004, 2(6): 659 - 663.
- [19] WAN Ye, YAN Chuwei, CAO Chunan. Atmospheric corrosion of steel A3 deposited with ammonium sulfate and in the present of sulfur dioxide[J]. J Mater Sci Technol, 2003, 19(5): 453 - 455.
- [20] 吴瑾光. 近代傅立叶变换红外光谱技术及应用(下卷)[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994. 269 - 271.
- [21] WU Jirguang. Technique and Application of Infrared Fourier Transform Spectroscopy (Vol. 2)[M]. Beijing: Science and Technology Information Press,

- 1994, 269 - 271.
- [20] Yamashita M, Miyuki H, Matsuda Y, et al. The long term growth of the protective rust layer formed on weathering steel by atmospheric corrosion during a quarter of a century[J]. Corrosion Science, 1994, 36 (2): 291.
- [21] Nyquist R A, Kagel R O. Infrared Spectra of Inorganic Compounds[M]. New York and London: Academic Press, 1971. 12.
- [22] McIntyre N S, Chen C. Role of impurities on Mg surfaces under ambient exposure conditions[J]. Corrosion Science, 1998, 40(10): 1697 - 1709.
- [23] Nordlien J H, Ono S, et al. A TEM investigation of naturally formed oxide films on pure magnesium[J]. Corrosion Science, 1997, 39(8): 1397 - 1414.
- [24] Nordlien J H, Nisancioglu K, et al. Morphology and structure of water-formed oxides on ternary MgAl alloys[J]. Journal of Electrochemical Society, 1997, 144(2): 461 - 466.
- [25] Pebere N, Riera C, et al. Investigation of magnesium corrosion in aerated sodium sulfate solution by electrochemical impedance spectroscopy[J]. Electrochimica Acta, 1990, 35(2): 555 - 561.
- [26] Reichert K N, Clak K J, Hillis J E. Sea Technical Paper series[M]. 1985. 1.
- [27] Godard H P, Jepson W B, Bothwell M R, et al. The Corrosion of Light Metals[M]. New York: John Wiley & Sons, 1967. 81.
- [28] Skerry B S, Johnsson J B, Wood G C. Corrosion in smoke, hydrocarbon and SO₂ polluted atmospheres — I. General behaviour of iron[J]. Corrosion Science, 1988, 28(7): 657 - 667.
- [29] Skerry B S, Johnsson J B, Wood G C. Corrosion in smoke, hydrocarbon and SO₂ polluted atmospheres — II. Mechanistic implications for iron from surface analytical and allied techniques[J]. Corrosion Science, 1988, 28(7): 697 - 719.
- [30] Skerry B S, Johnsson J B, Wood G C. Corrosion in smoke, hydrocarbon and SO₂ polluted atmospheres — III. The general behaviour of zinc[J]. Corrosion Science, 1988, 28(7): 721 - 727.

(编辑 何学锋)