

文章编号: 1004 - 0609(2005) 12 - 1938 - 07

AM60 镁合金与铜合金及 铝合金偶接后的大气腐蚀行为^①

董超芳¹, 肖 葵¹, 李久青¹, 李晓刚^{1, 2}, 魏 丹³

(1. 北京科技大学 材料学院, 北京 100083;

2. 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;

3. 中国腐蚀与防护学会, 北京 100083)

摘 要: 研究了 AM60 铸造镁合金与 H62 铜合金、LY12 铝合金组成的电偶对在北京地区室外曝晒 3 个月和 6 个月后的大气电偶腐蚀行为及规律。结果表明: 镁合金始终是电偶对中的阳极, 当其与 H62 铜合金和 LY12 铝合金偶接时, 其腐蚀速率增加 1~7 倍; 镁合金与 H62 铜合金偶合后, 其大气电偶腐蚀效应大于其与 LY12 铝合金组成的电偶对的大气电偶腐蚀效应; 在 6 个月的实验周期内, 随着曝晒时间的延长, 镁合金在北京地区大气环境中的电偶腐蚀效应呈上升趋势; 试样表面润湿时间短是造成 AM60 镁合金在北京曝晒第一个实验周期(2003. 12~2004. 2)的电偶腐蚀低于第二个由实验周期(2004. 3~2004. 5)的主要原因; 北京地区高自然降尘量对镁合金电偶腐蚀将起到加速的作用。

关键词: 镁合金; 铜合金; 铝合金; 电偶腐蚀; 大气腐蚀

中图分类号: TG 172

文献标识码: A

Atmospheric corrosion behavior of AM60 magnesium alloy coupled with Cu alloy and Al alloy

DONG Chao-fang¹, XIAO Kui¹, LI Jiur-qing¹, LI Xiao-gang^{1, 2}, WEI Dan³

(1. College of Materials Science and Engineering,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory for Corrosion and Protection,

Institute of Metal Research, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China;

3. Chinese Society of Corrosion and Protection, Beijing 100083, China)

Abstract: The galvanic corrosion behavior laws of AM60 magnesium alloy coupled with H62 brass and LY12 aluminium alloy in Beijing atmospheric environment by exposure for three and six months were investigated respectively. The results show that the magnesium alloys act as anode and their corrosion rates increase by one to seven times when they are coupled with H62 brass and LY12 aluminium alloy. The atmospheric galvanic effect of magnesium alloys coupled with H62 brass is larger than that of the magnesium alloy AM60/ LY12 aluminium alloy. The atmospheric galvanic effect becomes stronger in Beijing with increasing exposure time for the same galvanic couple. For the dry and cold weather of the first test term (Dec, 2003 - Feb, 2004), the galvanic corrosion is less than that of the second test term which is of wetness and warmth (March, 2004 - May, 2004). The galvanic corrosion of AM60 magnesium alloy is accelerated for the high dust precipitation in Beijing.

Key words: magnesium alloys; Cu alloy; Al alloy; galvanic corrosion; atmospheric corrosion

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50122118; 50499331-8)

收稿日期: 2004 - 12 - 02; 修订日期: 2005 - 08 - 03

作者简介: 董超芳(1976 -), 女, 讲师, 博士

通讯作者: 董超芳, 博士; 电话: 010 - 62333975; E-mail: dongchf@sina.com

镁合金因其高的比强度、比刚度, 优良的电磁屏蔽性、减震性、切削加工等性能, 在航空工业、汽车工业和电子通讯等领域都有着广阔的应用前景^[1, 2]。目前, 关于镁合金的研究主要集中在提高其强度^[3]和耐蚀性^[4~8]两个方面, 其中镁合金的腐蚀行为及机理也是近年来腐蚀领域研究的热点之一^[9~11]。由于镁合金化学活性高, 在潮湿空气(特别是含硫气氛或海洋大气)环境中^[12~14], 腐蚀现象严重, 并成为制约镁合金广泛应用的一个主要因素。虽然镁合金的腐蚀问题已经引起了广泛的重视, 但是关于镁合金在大气环境下的腐蚀行为与机理的研究却不多见^[12], 特别是镁及镁合金在大气环境下的电偶腐蚀研究更鲜见报道^[15]。

大气环境是镁合金在实际使用中的主要环境, 对其在大气下的电偶腐蚀行为进行深入研究, 将进一步丰富镁合金电偶腐蚀理论, 促进镁合金的广泛应用。童震松等^[15]研究了镁合金在青岛、武汉大气环境中的电偶腐蚀规律, 结果表明, 镁合金与不同阴极材料偶合后, 其在青岛的初期大气电偶腐蚀效应明显高于其在武汉的初期大气电偶腐蚀效应, 说明镁合金在海洋大气环境中的初期电偶腐蚀速度要高于其在城市工业大气中的初期电偶腐蚀速度。但对于镁合金电偶对在污染相对较弱的半乡村大气环境中的电偶腐蚀行为目前尚无报道。本文作者选择北京地区作为我国温带亚湿润半乡村大气的代表, 研究了 AM60 铸造镁合金分别与 H62 铜合金、LY12 铝合金偶接后在北京地区大气中的初期腐蚀行为及规律。

1 实验

1.1 样品制备

采用室外曝晒实验, 实验所用电偶对的阳极材料为 AM60 镁合金, 阴极材料分别为 H62 铜合金、LY12 铝合金和 AM60 镁合金, 其化学成分见表 1。

表 1 实验用材料的化学成分

Table 1 Compositions of test materials	
Material	Mass fraction/ %
AM60	Al: 5.5, Mn: 0.24, Zn: 0.22, Si: 0.1, Cu: 0.1, Ni: 0.002, Fe: 0.005, Mg: Bal.
H62	Cu: 60.5, Pb: 0.08, Fe: 0.15, Sb: 0.005, Bi: 0.002, P: 0.01, Zn: Bal.
LY12	Cu: 3.8, Mg: 1.2, Mn: 0.3, Fe: 0.5, Si: 0.5, Al: Bal.

电偶对试样的尺寸及安装按照 ASTM 标准 G149—97 进行(见图 1), 所有试样按照标准中规定的尺寸加工、除油后, 用水砂纸打磨至 800#, 酒精清洗后吹干, 并准确称量镁合金试样的初始质量(精确至 0.1 mg)。

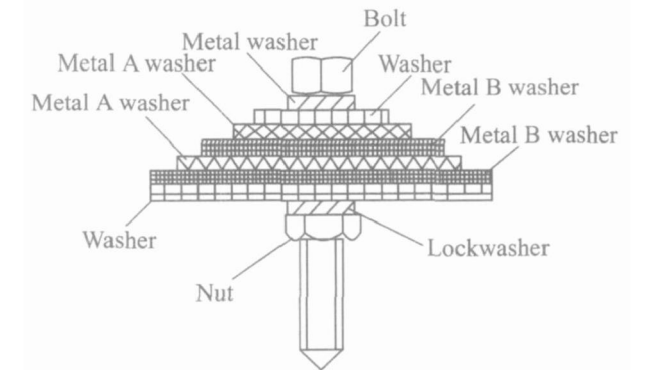


图 1 大气环境下镁合金电偶对试样装配图
Fig. 1 Assembled sample for atmosphere galvanic corrosion

1.2 室外曝晒实验

室外曝晒实验选择北京地区进行, 大气环境属于温带亚湿润半乡村大气。将试样装配好后, 固定于朝阳放置且与地面成 45°角的室外曝晒架上。为了减少实验误差, 每个实验周期的各类电偶对的平行试样数目为 3 个。另外, 为了考察镁合金的电偶腐蚀效应, 每个实验周期设计考察 3 组空白试样, 即该试样中阳极和阴极金属均为 AM60 镁合金。

表 2 和表 3 所列分别为实验期间北京市的气象和现场环境数据。

实验周期结束, 从现场取回试样, 首先观察试样表面腐蚀形貌, 收集腐蚀产物并对其进行分析, 再按照 ASTM 标准 G1—90 清洗试样。清洗液组成: 200 g/L CrO₃ + 10 g/L AgNO₃ + 20 g/L Ba(NO₃)₂, 清洗条件为 20~25 °C 下浸泡 1 min。试样清洗后取出, 用急水冲洗, 并分别用去离子水、酒精清洁试样表面, 吹干后称量。作为研究电偶腐蚀的重要参数, 电偶腐蚀效应表征了材料与其他材料偶接前后腐蚀速率的变化。根据 ASTM 标准 G149—97, 材料的大气电偶腐蚀效应为

$$\gamma = \left(\frac{\Delta m}{\Delta m_0} - 1 \right) \times 100\% \tag{1}$$

式中 γ 为大气电偶腐蚀效应; Δm 为试片质量损失; Δm_0 为空白试片质量损失。

表 2 实验期间北京市气象数据

Table 2 Weather data during testing period in Beijing

Date	Mean temperature/℃	Humidity/%	Precipitation amount/mm	Precipitation time/h	Wind velocity/(m·s ⁻¹)	Sunshine time/h	Rain time/d	Fog time/d	Dew time/d
Dec, 2003	- 2.4	58	0	0	2.4	155.7	0	2	0
Jan, 2004	- 5.3	58	0.7	1.0	2.3	147.1	1	0	0
Feb, 2004	0.7	53	10.0	6.0	3.4	158.4	1	0	0
Mar, 2004	4.6	52	0	0	2.9	191.0	0	0	0
Apr, 2004	13.8	60	22.2	13.5	2.8	232.3	5	0	0
May, 2004	17.2	61	35.4	14.0	2.6	221.1	5	0	1
Average	4.8	58	11.4	5.8	2.7	184.3	2.0	0.33	0.17

表 3 实验期间北京市现场环境数据

Table 3 Environment data during testing period in Beijing

Date	Concentration by instantaneous method/(mg·m ⁻³)		Concentration by continual method/(mg·100 cm ⁻² ·d ⁻¹)					Concentration by rainwater analysis/(mg·m ⁻³)			Concentration by dust precipitation/(g·cm ⁻² ·m ⁻¹)	
	SO ₂	HCl	NO ₂	H ₂ S	M ₂ (SO ₄) _n	NH ₃	NaCl	pH	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Soluble	Dissoluble
Dec, 2003	0.054 7	0.032 4	0.058 2	0.086 4	0.732 6	0.011 3	0.001 1				2.020 5	4.367 4
Jan, 2004	0.078 9	0.146 1	0.124 6	0.056 1	0.865 5	0.008 2	0.002 5				1.913 7	1.262 6
Feb, 2004	0.041 7	0.490 1	0.066 8	0.058 1	0.774 0	0.034 0	0.002 1				0.317 1	8.135 9
Mar, 2004	0.037 2	0.103 2	0.100 5	0.021 1	0.603 0	0.042 4	0.001 9				0.532 2	3.793 3
Apr, 2004	0.003 3	0.188 5	0.140 5	0.037 9	0.425 3	0.058 6	0.001 6	6.18	16 200	1 440	0.702 1	9.019 1
May, 2004	0.011 3	0.426 1	0.087 9	0.017 4	0.380 5	0.059 0	0.001 7	6.24	30 000	2 600	2.853 5	10.927 1
Average	0.037 9	0.231 1	0.096 4	0.046 2	0.630 2	0.035 6	0.001 8	6.2	23 100	2 020	1.389 9	6.250 9

2 实验结果

2.1 腐蚀形貌观察

对电偶对试样的宏观形貌观察表明, AM60 镁合金/H62 铜合金电偶对试样发生了明显的腐蚀, 而 AM60 镁合金/LY12 铝合金电偶对试样腐蚀程度较轻。曝晒 6 个月取回的试样明显比 3 个月的腐蚀严重。经 3 个月曝晒的试样, 镁合金试片裸露于大气中部分被灰白色腐蚀产物薄层所覆盖, 而试样的偶接区域仍可见金属光泽, 未发现明显的缝隙腐蚀现象, 镁合金试片外侧端面的腐蚀严重, 呈现出轻微锯齿状腐蚀形貌。从图 1 可以看到镁合金的外侧端面与阴极材料距离较近, 这说明在大气环境下, 电偶电流作用距离是有限的。经 6 个月曝晒的试样, 镁合金试片裸露于大气中部分被灰黑色腐蚀产物薄层所覆盖, 在镁合金试片下侧边缘出现大量灰白色腐蚀产物, 镁合金试片其余部分被灰白色腐蚀产物薄层所覆盖。3 个月和 6 个月的曝晒后, 作为阴极金属的 H62 铜合金和 LY12 铝合金均未发生明显变化。

图 2 所示为 AM60 镁合金与 H62 铜合金电偶对在北京大气环境下, 电偶腐蚀试样表面大气暴露区和偶接区域在 3 个月和 6 个月实验周期后的扫描电镜照片, 可以看出, 3 个月和 6 个月实验后, 镁合金试片表面大气暴露区的腐蚀发生比较均匀, 腐蚀产物明显较偶接区域少。6 个月曝晒实验后, 大气暴露区的腐蚀产物增多, 偶接区域的腐蚀产物增厚。

图 3 所示为 AM60 镁合金与 LY12 铝合金电偶对在北京大气环境下, 3 个月和 6 个月的电偶腐蚀试样表面扫描电镜照片, 可以看出: 镁合金试片表面腐蚀发生比较轻微, 大气暴露区和偶接区的腐蚀产物细小, 镁合金与 LY12 铝合金偶接后的腐蚀产物明显小于其与 H62 铜合金偶接后的腐蚀产物。3 个月曝晒实验后, 偶接区域的腐蚀产物仅在镁合金的局部表面出现, 这与图 2(b) 所示镁合金与 H62 铜合金偶接后的表面形貌完全不同。6 个月曝晒实验后, 镁合金表面大气暴露区被细小均匀的腐蚀产物覆盖, 偶接区域的腐蚀产物比 3 个月时略有增大, 但大部分表面仍然比较平整。从形貌照片可见, 镁合金与 LY12 铝合金偶接后, 表面腐蚀产物

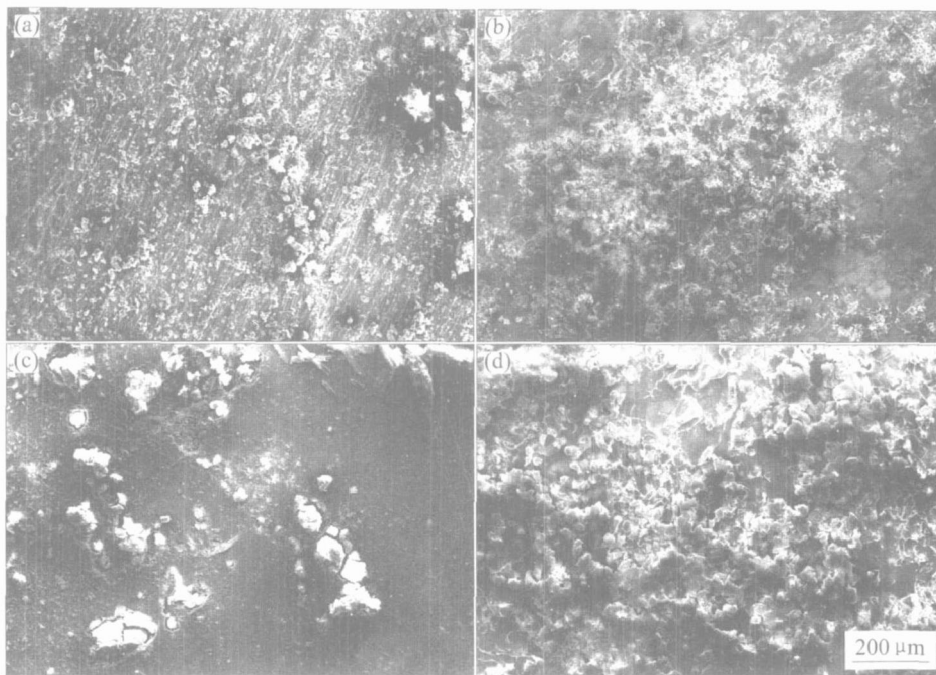


图 2 AM60 镁合金与 H62 铜合金电偶对不同实验周期下镁合金试片的表面形貌

Fig. 2 Surface morphologies of AM60 magnesium alloy coupled with H62 brass after different exposure time

(a) —Zone exposed in air, three month; (b) —Zone coupled with H62 brass, three month;
(c) —Zone exposed in air, six month; (d) —Zone coupled with H62 brass, six month

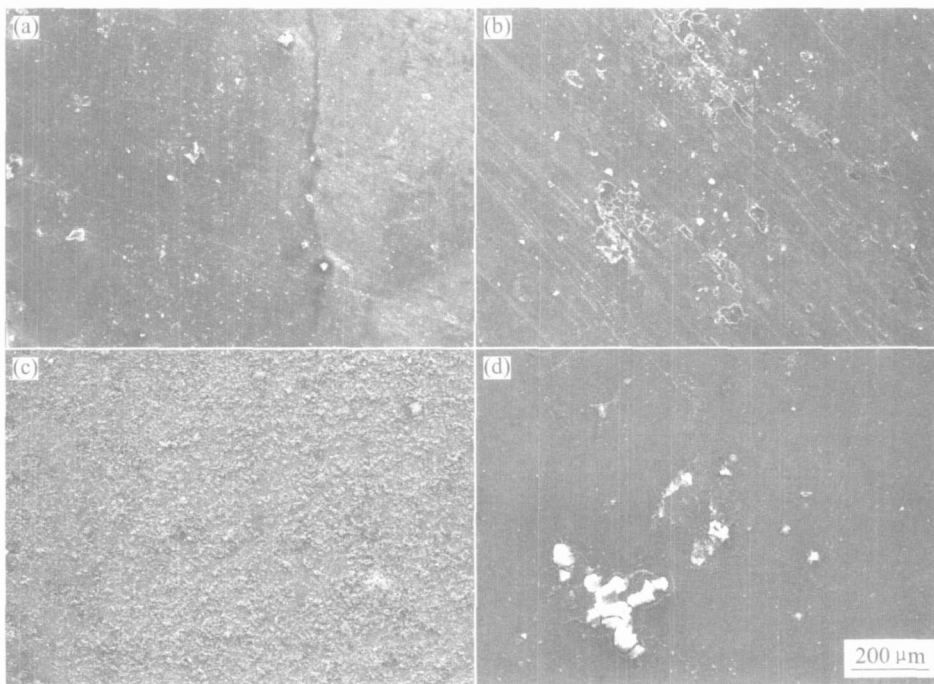


图 3 AM60 镁合金与 LY12 铝合金电偶对不同实验周期下镁合金试片的表面形貌

Fig. 3 Surface morphologies of AM60 magnesium alloy coupled with LY12 aluminium alloy after different exposure time

(a) —Zone exposed in air, three month; (b) —Zone coupled with LY12 aluminium alloy, three month;
(c) —Zone exposed in air, six month; (d) —Zone coupled with LY12 aluminium alloy, six month

明显少于较其与 H62 铜合金偶接后的结果。

2.2 腐蚀产物分析

取回试样后, 收集试样表面腐蚀产物, 并进行 X 射线衍射实验来分析腐蚀产物成分。图 4 所示为 AM60 镁合金试片腐蚀产物的 X 射线衍射图。结果表明, 其腐蚀产物成分与阴极材料及实验周期无关, 腐蚀产物的主要成分为 $\text{MgSO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 MgO 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 。

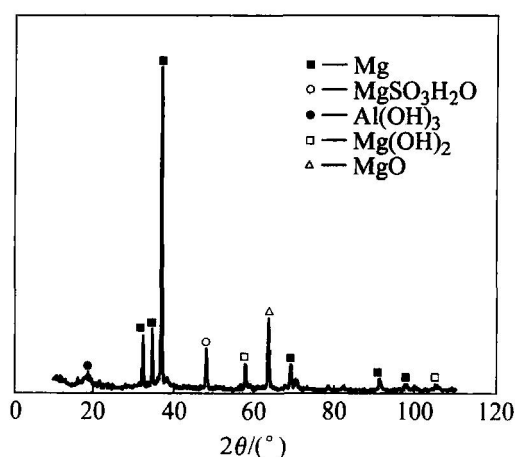


图 4 镁合金试片腐蚀产物的 X 射线衍射谱

Fig. 4 XRD pattern of corrosion product of magnesium alloys exposed in Beijing

2.3 大气电偶腐蚀效应

图 5 所示为不同电偶对在不同实验周期的大气电偶腐蚀效应。可以看出, AM60 镁合金与 H62 铜合金偶接后的电偶腐蚀效应大于其与 LY12 铝合金

偶接后的电偶腐蚀效应。且在本文的 2 个实验周期内, 电偶腐蚀效应明显增大, 说明镁合金表面尚未生成完整的腐蚀产物层来阻止腐蚀的进一步发生。

3 分析与讨论

影响材料电偶腐蚀行为的因素很多, 本研究主要就阴极材料、实验时间、污染物组成对材料电偶腐蚀效应的影响进行分析和讨论, 从而进一步研究 AM60 镁合金在北京大气环境下初期电偶腐蚀行为与规律。

将本实验结果与童震松等在青岛和武汉地区所进行的室外曝晒实验结果相比较, 以大尺寸试片的大气电偶腐蚀效应作为对比参数, 可以看出:

1) AM60 镁合金与 H62 铜合金电偶对大尺寸试片在北京、青岛、武汉 3 个月室外曝晒后的大气电偶腐蚀效应分别为 484%、200%、220%; 6 个月室外曝晒后的大气电偶腐蚀效应分别为 733%、300% 和 290%, 三者数值差别较大。

2) AM60 镁合金与 LY12 铝合金电偶对大尺寸试片在北京、青岛、武汉 3 个月室外曝晒后的大气电偶腐蚀效应分别为 141%、100% 和 30%, 6 个月室外曝晒后的大气电偶腐蚀效应分别为 201%、150% 和 100%, 三者数值差别较大。

3) AM60 镁合金与 H62 铜合金/LY12 铝合金所组成的电偶对在北京、青岛、武汉室外曝晒 6 个月后的电偶腐蚀效应均大于其 3 个月的数值。

3.1 阴极材料

阴极材料对镁合金电偶腐蚀的影响主要体现为腐蚀加速作用。从镁合金与 H62 铜合金和 LY12 铝合金组成的电偶对在北京大气环境下的曝晒结果可知, AM60 镁合金与 H62 铜合金组成的电偶对的大气电偶腐蚀效应明显大于其与 LY12 铝合金组成的电偶对的大气电偶腐蚀。这一结果与镁合金电偶对在青岛、武汉两地得到的规律是一致的。

根据电动序排列次序, Cu 在热力学上属于中等稳定的金属, Al 和 Mg 在热力学上属于很不稳定的金属, 金属镁的电位低于金属铝的电位, 并明显低于金属铜的电位。因此, H62 铜合金对 AM60 镁合金的电偶加速效果显著高于电位差别较小的 LY12 铝合金的加速作用。由图 2 和 3 中所示的试样表面形貌也说明 H62 铜合金对 AM60 镁合金的电偶加速作用明显大于 LY12 铝合金的作用。

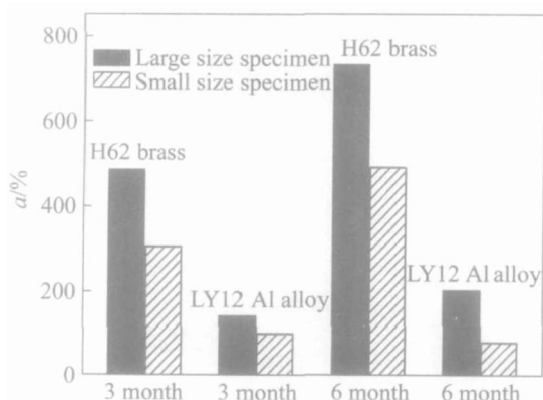


图 5 镁合金与 H62 铜合金及 LY12 铝合金偶合后的电偶腐蚀效应

Fig. 5 Galvanic effect of magnesium alloys coupled with H62 brass and LY12 aluminium alloy

3.2 实验时间

H62 铜合金、LY12 铝合金与 AM60 镁合金偶合 6 个月后的大气电偶腐蚀效应明显高于其偶合 3 个月后的大气电偶腐蚀效应, 究其原因, 降水量和试样表面润湿时间是影响金属大气腐蚀的重要因素。因此, 造成本文实验中大气电偶腐蚀效应升高的原因是实验周期所处的季节, 实验开始于 12 月份, 由表 2 可知, 北京地区进入冬季之后, 降水量非常少, 3 个月的降水时间为 0.5 h。而第二个实验周期的 3 个月内, 降水时间为 29 h, 降水量达到 93.1 mm, 远高于第一个实验周期的 0.1 mm。试样表面润湿时间短是造成第一个实验周期(2003 年 12 月~2004 年 2 月)的腐蚀低于第二个由实验周期(2004 年 3 月~2004 年 5 月)的主要原因。与本文实验相比, 青岛、武汉的曝晒实验开始于 6 月, 第一个实验周期处于夏季, 降水量及降水时间较多, 而第二个实验周期处于秋季, 降水明显减少。与之相对应的是, 青岛、武汉两地第二个实验周期的大气电偶腐蚀效应小于第一个实验周期。因此, 对于室外曝晒实验而言, 实验开始时间是对实验结果进行分析的一个重要参数。

3.3 污染物组成

大气环境中的污染物是影响大气腐蚀过程的重要因素之一, 将表 3 所示的实验期间北京市现场环境数据与青岛、武汉两地的环境数据进行比较, 可以看出: SO_2 浓度的大小次序为: 青岛 < 北京 < 武汉; HCl 浓度的大小次序为: 武汉 < 北京 < 青岛; 雨水 pH 值的大小次序为: 青岛 < 北京 < 武汉; 海盐颗粒的大小次序为: 北京 < 武汉 < 青岛。从不同污染物浓度排序可知, 显著影响镁合金大气腐蚀行为的 SO_2 、海盐颗粒等在北京地区的浓度均低于在青岛或武汉地区的。

然而, AM60 镁合金与 H62 铜合金、LY12 铝合金所组成的电偶对北京地区的大气电偶腐蚀效应均高于其在青岛、武汉两地。综合分析北京、青岛、武汉三个地区的污染物组成的主要差异, 造成北京地区镁合金大气电偶腐蚀效应大的原因可能与自然降尘量有关。与青岛和武汉地区相比, 北京地区的自然降尘量很高, 灰尘在镁合金试样表面沉积后, 能吸附腐蚀性物质, 如吸收 SO_2 及水汽, 冷凝后生成腐蚀性的酸性溶液。另一方面, 灰尘落在金属表面后能形成缝隙而凝聚水分, 形成氧浓差的局部腐蚀条件, 加速腐蚀发生。因此, 北京地区高自然降尘量对镁合金电偶腐蚀可以起到加速的作用。

4 结论

1) 北京大气环境下 AM60 镁合金与 H62 铜合金、LY12 铝合金偶接后, 镁合金总是作为阳极; 同时镁合金的电偶电流作用距离有限, 镁合金试片边缘区域腐蚀明显。

2) AM60 镁合金与 H62 铜合金偶接后的电偶腐蚀效应大于其与 LY12 铝合金偶接后的电偶腐蚀效应。在本文实验条件下, 由于镁合金表面尚未生成完整的腐蚀产物层来阻止腐蚀的进一步发生, 在 6 个月内电偶腐蚀效应随暴露时间增长而增大。

3) 试样表面润湿时间短是造成 AM60 镁合金与 H62 铜合金、LY12 铝合金所组成电偶对在北京曝晒第一个实验周期(2003 年 12 月~2004 年 2 月)的腐蚀低于第二个由实验周期(2004 年 3 月~2004 年 5 月)的主要原因。

4) 北京地区高自然降尘量对镁合金电偶腐蚀将起到加速的作用。

致谢

本工作得到北京市腐蚀、磨蚀与表面技术重点实验室的支持, 特此致谢!

REFERENCES

- [1] 张永君, 严川伟, 王福会, 等. 镁的应用及其腐蚀与防护[J]. 材料保护, 2002, 35(4): 4-6.
ZHANG Yong-jun, YAN Chuan-wei, WANG Fu-hui, et al. Application, corrosion and protection of magnesium and its alloys[J]. Materials Protection, 2002, 35(4): 4-6.
- [2] Gray J E, Luan B. Protective coatings on magnesium and its alloys—a critical review[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2002, 336: 88-113.
- [3] 樊 昱, 吴国华, 高洪涛, 等. Ca 对镁合金组织、力学性能以及组织性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(2): 210-216.
FAN Yu, WU Guo-hua, GAO Hong-tao, et al. Effect of calcium on microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(2): 210-216.
- [4] Dube D, Fiset M A, Couture I Nakatsugawa. Characterization and performance of laser melted AZ91D and AM60B[J]. Mater Sci Eng A, 2001, A299: 38-45.
- [5] 胡波年, 陈钰玲, 余 刚, 等. 镁合金在镀液中的腐

- 蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(3): 463 - 470.
- HU Bo-nian, CHEN Yu-ling, YU Gang, et al. Corrosion behavior of magnesium alloy in electroless nickel plating bath[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(3): 463 - 470.
- [6] 霍红伟, 李 瑛, 王福会. 化学转化膜上沉积镍对镁合金耐腐蚀性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(2): 267 - 272.
- HUO Hong-wei, LI Ying, WANG Fu-hui. Effect of chemical conversion film plus electroless nickel plating on corrosion resistance of magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(2): 267 - 272.
- [7] Mathieu S, Rapin C, Steinmetz J, et al. A corrosion study of the main constituent phases of AZ91 magnesium alloys[J]. Corrosion Science, 2004, 45: 2741 - 2755.
- [8] Inoue H, Sugahara K, Yamamoto A, et al. Corrosion rate of magnesium and its alloys in buffered chloride solutions[J]. Corrosion Science, 2002, 44: 603 - 610.
- [9] Song G L, Bowles A L, StJohn D H. Corrosion resistance of aged die cast magnesium alloy AZ91D[J]. Mat Sci Eng A, 2004, A366: 74 - 86.
- [10] Song G L, Arens A, Wu X L, et al. Corrosion behaviour of AZ10/AZ490 and AZ80 in sodium chloride [J]. Corrosion Science, 1998, 40(10): 1769 - 1791.
- [11] Baril G, Pebere N. The corrosion of pure magnesium in aerated and deaerated sodium sulphate solutions [J]. Corrosion Science, 2001, 43: 471 - 484.
- [12] Lindstrom R, Johansson L G, Thompson G E, et al. Corrosion of magnesium in humid air[J]. Corrosion Science, 2004, 46: 1141 - 1158.
- [13] 林 翠, 李晓刚. AZ91D 镁合金在含 SO₂ 大气环境中的初期腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(10): 1658 - 1665.
- LIN Cui, LI Xiao-gang. Initial corrosion of AZ91D magnesium alloys in atmosphere containing SO₂[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(10): 1658 - 1665.
- [14] McIntyre N S, Chen C. Role of impurities on Mg surface under ambient exposure conditions[J]. Corrosion Science, 1998, 40(10): 1697 - 1709.
- [15] 童震松, 张 巍, 李久青, 等. 镁合金大气电偶腐蚀初期规律[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(4): 554 - 561.
- TONG Zhen-song, ZHANG Wei, LI Jiu-qing, et al. Initial laws of atmospheric galvanic corrosion for magnesium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(4): 554 - 561.

(编辑 陈爱华)