

文章编号: 1004 - 0609(2004)04 - 0554 - 08

镁合金大气电偶腐蚀初期规律^①

童震松, 张 巍, 李久青, 程 菲

(北京科技大学 材料科学与工程学院腐蚀与防护中心, 北京 100083)

摘 要: 研究了 AZ91D、AM50、AM60 铸造镁合金与 A3 钢、316L 不锈钢、H62 黄铜、LY12 铝合金组成的电偶对分别在青岛和武汉现场暴晒 3 个月和 6 个月后的大气电偶腐蚀行为及规律。结果显示, 镁合金始终是电偶对的阳极; 当与其它 4 种材料偶接时, 其腐蚀速率增加。镁合金与 A3 钢偶合后, 其大气电偶腐蚀效应最大, 而与 LY12 铝合金组成的电偶对的大气电偶腐蚀效应最小。不同镁合金的大气电偶腐蚀效应存在如下关系: $v_{AZ91D} > v_{AM50} > v_{AM60}$ 。暴晒 3 个月后, 青岛的大气电偶腐蚀效应明显高于武汉的大气电偶腐蚀效应。随着暴晒时间的延长, 青岛和武汉的大气电偶腐蚀效应分别呈降低和升高的趋势。

关键词: 镁合金; 电偶腐蚀; 大气

中图分类号: TG 172

文献标识码: A

Initial laws of atmospheric galvanic corrosion for magnesium alloys

TONG Zhen-song, ZHANG Wei, LI Jiu-qing, CHENG Fei

(Corrosion and Protection Center, School of Materials Science and Engineering,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The galvanic corrosion behaviour and laws of AZ91D, AM50 and AM60 cast magnesium alloys coupled with A3 steel, 316L stainless steel, H62 brass, LY12 aluminum alloy undergone atmospheric exposure in Qingdao and Wuhan for three and six months were investigated, respectively. The results show that the magnesium alloys act as anode and their corrosion rates increase when they are coupled with mentioned four metals. The atmospheric galvanic effect of magnesium alloys coupled with A3 steel is the largest, while that of the magnesium alloys/LY12 aluminum alloy couple is the smallest. And there is a relationship between the atmospheric galvanic effects of different magnesium alloys: $v_{AZ91D} > v_{AM50} > v_{AM60}$. The results also show that, for the same galvanic couple which is exposed for three months, the atmospheric galvanic effect in Qingdao is obviously higher than that in Wuhan. But the atmospheric galvanic effect reduces in Qingdao and increases in Wuhan with increasing exposure time.

Key words: magnesium alloy; galvanic corrosion; atmosphere

镁合金是最轻的实用金属结构材料, 它具有高的比强度、比刚度, 好的电磁屏蔽性、减震性, 优良的切削加工性能和抛光性能^[1-5]。因此, 镁合金在航空工业、汽车工业和电子通讯工业中得到了广泛的应用。然而, 由于镁合金的化学活性高、标准电极电位低, 在潮湿空气、含硫气氛和海洋大气中

均会遭受严重腐蚀^[6], 因而, 镁合金耐蚀性差成为制约其应用的一个主要因素^[7-14]。镁合金的腐蚀类型有: 均匀腐蚀、电偶腐蚀、高温氧化、点蚀、缝隙腐蚀和晶间腐蚀、应力腐蚀和腐蚀疲劳等^[10]。在实际应用中, 镁及镁合金不可避免地会与其它金属部件配套使用, 因此, 也会不同程度地出现电偶腐

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50122118)

收稿日期: 2003 - 07 - 11; 修订日期: 2003 - 10 - 2

作者简介: 童震松(1975 -), 男, 博士研究生。

通讯作者: 童震松, 博士研究生; 电话: 010 - 62333649; E-mail: qiu feng7512@sina.com

蚀^[15-17]。但是, 有关镁合金与其它金属偶接时出现电偶腐蚀的规律和机理研究却鲜见报导。大气作为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, 促进镁合金的更广泛应用。国内外关于镁合金在不同大气下电偶腐蚀的研究很少。作者研究了 AZ91D、AM50、AM60 三种铸造镁合金分别与 A3 钢、316L 不锈钢、H62 黄铜、LY12 铝合金偶接后在青岛和武汉的大气中的电偶腐蚀行为及规律, 其暴晒周期为 3 个月、6 个月、1 年、2 年和 3 年。本文仅报导不同电偶对暴晒 3 个月、6 个月的初期电偶腐蚀行为及其规律。

1 实验方法

1.1 实验材料

实验所用镁合金为 AZ91D、AM50、AM60 三种铸造镁合金, 与镁合金偶接的材料为 A3 钢、316L 不锈钢、H62 黄铜、LY12 铝合金, 其成分如表 1 所示。

表 1 实验用材料的化学成分

Table 1 Compositions of test materials

Material	Composition(mass fraction, %)
AZ91D	Al 8.5~ 9.5, Mn 0.17~ 0.4, Zn 0.45~ 0.9, Si< 0.05, Cu< 0.25, Ni< 0.001, Fe< 0.004, Mg Bal.
AM50	Al 4.4~ 5.4, Mn 0.26~ 0.6, Zn < 0.22, Si 0.10, Cu 0.10, Ni 0.002, Fe 0.004, Mg Bal.
AM60	Al 5.5~ 6.5, Mn 0.24~ 0.6, Zn < 0.22, Si 0.10, Cu 0.10, 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.
316L. S. S	Ni 12.45, Cr 17.61, Mo 2.29, C 0.021, Mn 1.05, Si 0.69, P 0.031, S 0.002, Fe Bal.
A3	C 0.1, Si 0.2, Mn 0.37, P 0.019, S 0.012, Fe Bal.
LY12	Cu 3.8~ 4.9, Mg 1.2~ 1.8, Mn 0.3~ 0.9, Fe 0.5, Si 0.5, Impurities< 1.5, Al Bal.

将所有试样按规定尺寸加工, 然后除油, 并用水磨砂纸打磨至 800#, 用酒精棉擦净后, 吹干, 并准确称量镁合金试样的质量。

1.2 试样的尺寸及安装

试样的尺寸及安装按照 ASTM 标准 G149—97 “Standard Practice for Conducting the Washer Test

for Atmospheric Galvanic Corrosion”进行。试样安装如图 1 所示。

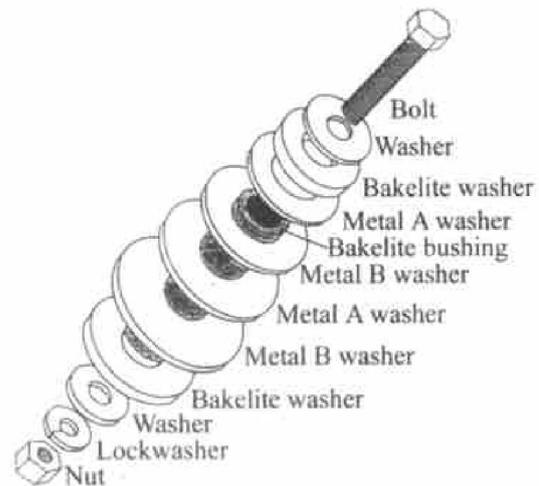


图 1 镁合金大气电偶腐蚀试样安装顺序图

Fig. 1 Fixing order of atmosphere galvanic corrosion samples

图中所用螺栓为 10~ 32 型, 长为 40 mm; 螺母为 10~ 32 型配套螺母。所用垫圈内径为 4.9 mm, 外径为 15.9 mm; 弹簧垫圈内径为 4.9 mm; 所用上端塑料垫圈内径为 8.3 mm, 外径为 19 mm, 厚度为 3.2 mm; 下端塑料垫圈内径亦为 8.3 mm, 外径为 35.6 mm, 厚度为 3.2 mm。所用塑料套管内径为 5.2 mm, 外径为 7.9 mm, 长 11.1 mm。上端镁合金片(Metal A, 小样)内径为 8.3 mm, 外径为 25.4 mm; 下端镁合金片(大样)内径亦为 8.3 mm, 外径为 33.5 mm, 两者厚度均为 1.6 mm。上端阴极材料片(Metal B)内径为 8.3 mm, 外径为 30.0 mm; 下端阴极材料片内径亦为 8.3 mm, 外径为 36.6 mm, 两者厚度均为 1.6 mm。

1.3 试样的装配

装配时, 应充分紧固所有部件以避免试样之间存在缝隙, 以避免和尽量减少缝隙腐蚀对实验结果的影响。同时, 应尽量保证试片之间的良好电导通, 试片之间的电阻应低于 1 Ω , 同时应保证试片与螺栓之间的良好绝缘, 使试片与螺栓之间的电阻不小于 1 000 Ω 。组装好的试样如图 2 所示。

在实验现场将所有试样装配好, 并将试样牢牢固定于暴晒架上。暴晒架朝阳放置, 与地面成 45°角。为了减少偶然因素对实验结果的影响, 对每个实验周期的每种电偶对均设计了 3 组平行试样。另外, 为了考察镁合金的电偶腐蚀效应, 同时对每个实验周期设计 3 组空白试样。所谓空白试样, 即在

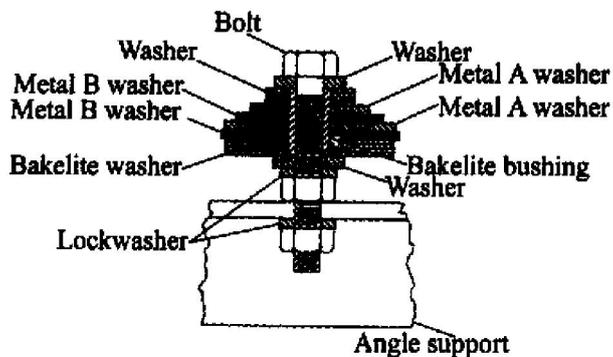


图2 镁合金大气电偶腐蚀试样装配图

Fig. 2 Assembled sample for atmosphere galvanic corrosion

该试样中 Metal A 及 Metal B 为同一种镁合金。

1.4 实验环境

表2和表3所列分别为实验期间青岛市的气象和现场环境数据,表4和表5分别为实验期间武汉

市的气象和现场环境数据。

1.5 腐蚀试样的处理

从现场取回试样后,首先观察试样的腐蚀形貌,然后收集腐蚀产物并对其进行分析,再去除腐蚀产物。去除时,先用软毛刷刷洗试样,尽量刷除腐蚀产物。然后按照 ASTM 标准 G1-90 清洗试样。清洗液的组成为: 200 g/L CrO₃ + 10 g/L AgNO₃ + 20 g/L Ba(NO₃)₂。将待处理试样浸入该溶液中,在 20~25 °C 下浸泡 1 min。取出后再用软毛刷刷洗试样,并用急水冲洗,然后用去离子水冲洗,并用酒精棉擦净试样表面,吹干后准确称量其质量。通过挂片前后的质量变化计算其腐蚀速率。

1.6 大气电偶腐蚀效应

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它材料偶接前后腐蚀速率的变化,

表2 实验期间青岛市气象数据

Table 2 Weather data during testing period in Qingdao

Month	t/ °C	H/ %	PA/ cm	PT/ h	WV/ (m·s ⁻¹)	ST/ h	Rain/ d	Fog/ d	Snow/ d	Wind/ d
June	20.7	81	58	45.3	4.5	172.7	17	9	-	3
July	25.3	82	115.5	78.3	3.7	164.8	18	8	-	1
Aug.	25.2	80	29.2	25.4	3.8	177.3	9	1	-	-
Sep.	22.5	66	35.5	39.2	3.7	234.3	6	-	-	-
Oct.	15	64	18.1	33	4.7	192.4	5	-	-	3
Nov.	7.5	59	6.8	16.3	4.6	193.6	5	-	1	5
Dec.	1.9	67	10.9	23.4	5.0	122.2	8	2	5	4
Average	16.9	71	39.1	37.3	4.3	179.6	-	-	-	-

H—Humidity; PA—Precipitation amount; PT—Precipitation time; WV—Wind velocity; ST—Sunshine time

表3 实验期间青岛市现场环境数据

Table 3 Environment data during testing period in Qingdao

Month	IM/ (10 ⁴ mg·m ⁻³)			CM/ (10 ² mg·cm ⁻² ·d ⁻¹)			RA/ (mg·m ⁻³)			
	SO ₂	HCl	NO ₂	H ₂ S	SO ₃	NH ₃	Seasalt particle	pH	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
June	-	3 338	527	629	1 369	280	4 485	6.28	12 000	25 225
July	-	307	330	267	2 114	177	6 303	5.32	18 000	9 800
Aug.	-	230	645	398	801	578	7 503	4.55	8 500	7 350
Sep.	-	1 241	882	655	2 309	531	6 540	4.67	2 433	35 400
Oct.	-	36	701	319	2 096	409	7 793	5.18	75 000	5 600
Nov.	-	0	1 349	867	5 066	216	3 420	-	-	-
Dec.	-	-	1 537	1 935	11 499	178	8 031	5.17	73 000	27 700
Average	-	859	853	724	3 608	338	6 293	5.20	31 489	11 450

IM—Instantaneous method; CM—Continual method; RA—Rainwater analysis

表 4 实验期间武汉市气象数据

Table 4 Weather data during testing period in Wuhan

Month	$t/^\circ\text{C}$	H/%	PA/cm	PT/h	AP/kPa	WV/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	ST/h
June	27.9	73	155.3	26.3	101.32	1.7	105.6
July	29.2	71	133.8	62.2	102.12	1.5	144.2
Aug.	27.8	72	147.3	66.5	102.39	1.7	169.6
Sep.	23.9	66	33.7	19.5	103.19	1.5	175.1
Oct.	19.8	62	58.6	23.5	103.59	1.5	161.7
Nov.	12.6	66	66.8	50.5	104.12	1.2	108.2
Dec.	5.4	73	94.2	64.2	104.52	1.2	67.5
Average	20.9	69	98.5	44.7	103.06	1.5	133.1

H—Humidity; PA—Precipitation amount; PT—Precipitation time; AP—Atmospheric pressure; WV—Wind velocity; ST—sunshine time

表 5 实验期间武汉市现场环境数据

Table 5 Environment data during testing period in Wuhan

Month	IM/($10^4\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)			CM/($10^2\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)				RA/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)		
	SO ₂	HCl	NO ₂	H ₂ S	SO ₃	NH ₃	Seasalt particle	pH	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
June	147	112	4027	2424	1574	1597	250	6.53	26500	600
July	406	324	182	917	8222	1376	298	6.68	19600	1300
Aug.	242	49	483	3211	5937	957	186	6.54	40300	250
Sep.	330	209	616	917	6997	837	306	7.21	13400	700
Oct.	240	110	542	2490	2949	881	186	6.72	30400	0
Nov.	518	313	458	2228	6091	837	154	6.90	18100	2300
Dec.	631	183	227	2293	8338	544	129	7.04	29000	1886
Average	359	186	934	2069	5729	1004	216	6.80	25329	1005

IM—Instantaneous method; CM—Continual method; RA—Rainwater analysis

对于研究材料的电偶腐蚀倾向、阴极材料、材料面积、实验环境等对电偶腐蚀的影响具有重要作用。

根据 ASTM 标准 G149—97 的规定, 材料的大气电偶腐蚀效应为

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

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

2 结果与讨论

2.1 腐蚀形貌观察

图 3 所示分别为在青岛市和武汉市于不同实验周期内有代表性的电偶腐蚀试样的整体腐蚀形貌图。

可以看出: 试样发生了较明显的腐蚀, 且在青岛市所挂 2 个周期试样明显比在武汉市所挂同周期试样腐蚀严重。无论是在青岛市还是在武汉市, 挂样 6 个月取回的试样明显比 3 个月的腐蚀严重。另

外, 青岛市试样腐蚀后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黑色腐蚀产物薄层所覆盖。这可能是由于雨水或露水不可能长时间在试样上部停留, 在重力的作用下, 水滴将在试样下侧聚积停留, 从而在该位置镁合金试片发生严重的腐蚀; 而武汉市试样腐蚀后在镁合金试片下侧边缘仅出现少量灰白色腐蚀产物, 镁合金试样大部分被灰黑色腐蚀产物薄层所覆盖。

此外, 还对电偶对中的镁合金试片进行了局部观察。通过观察可以发现, 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, 而与其它试片接触部分仍基本保持金属光泽, 未发现明显的缝隙腐蚀现象。另外, 还发现试样中的镁合金试片在边缘附近腐蚀严重, 呈现出轻微锯齿状腐蚀形貌, 而其它部位腐蚀较轻微。这说明在大气环境下, 电偶电流作用距离是有限的。

2.2 腐蚀产物分析

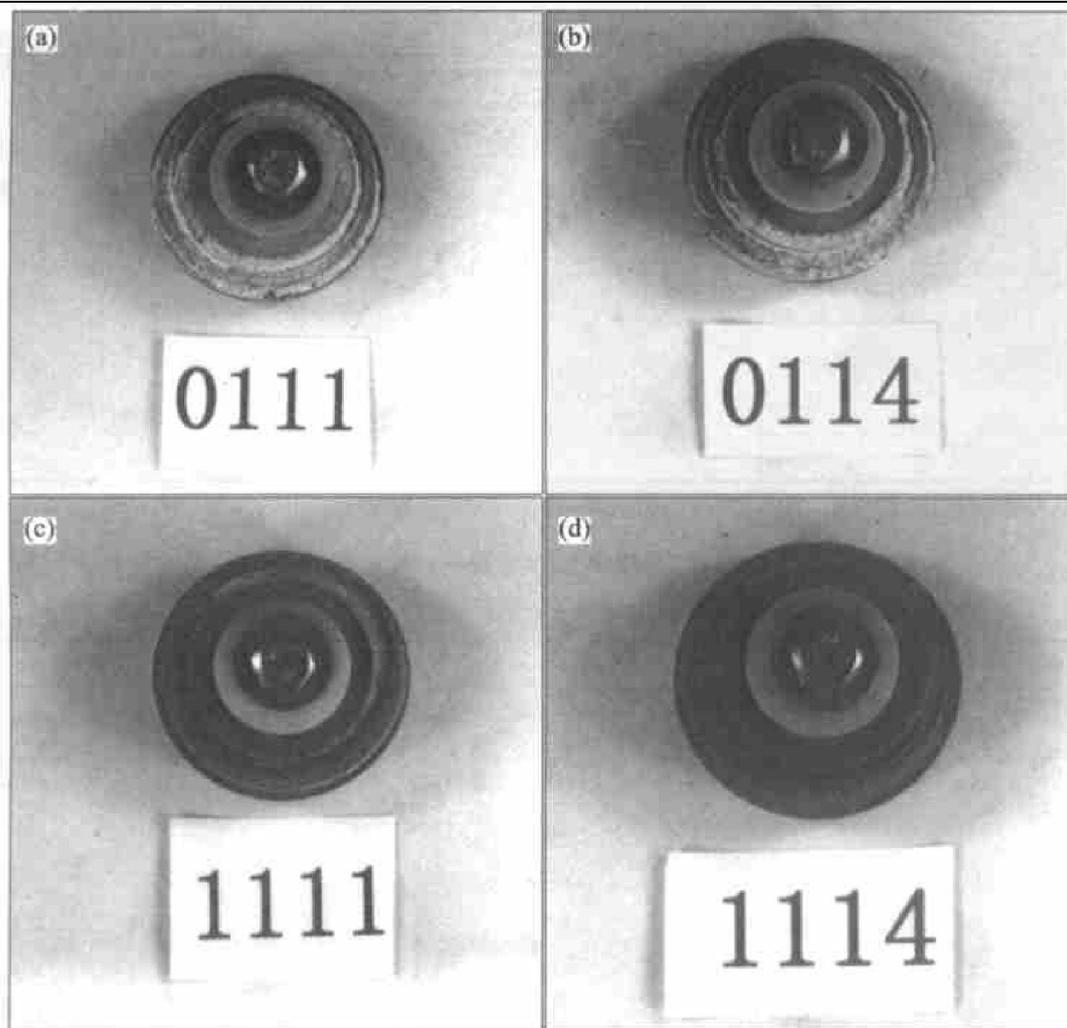


图 3 电偶对试样腐蚀形貌图

Fig. 3 Corrosion morphologies of galvanic couples

- (a) -AZ91D/A3 steel couple exposed in Qingdao for 3 months;
- (b) -AZ91D/A3 steel couple exposed in Qingdao for 6 months;
- (c) -AZ91D/A3 steel couple exposed in Wuhan for 3 months;
- (d) -AZ91D/A3 steel couple exposed in Wuhan for 6 months

将挂在青岛和武汉的试样取回后，发现青岛所挂电偶试样周围有大量腐蚀产物，易于收集；而武汉所挂试样周围腐蚀产物的量极少，较难收集。本实验仅对青岛所挂试样的腐蚀产物进行了分析。分析发现，对于青岛试样，其腐蚀产物成分与阴、阳极材料及实验周期无关。图 4 所示为典型的镁合金试片腐蚀产物的 X 射线衍射图。

经过分析后发现，该腐蚀产物的主要成分为 $Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 8H_2O$ 及 $MgAl_2O_4 \cdot 9H_2O$ 。该腐蚀产物对于基体金属可能有一定的保护作用。

2.3 大气电偶腐蚀效应

图 5 所示为不同电偶对在不同条件下的大气电偶腐蚀效应。

影响材料电偶腐蚀效应的因素有很多，本文主

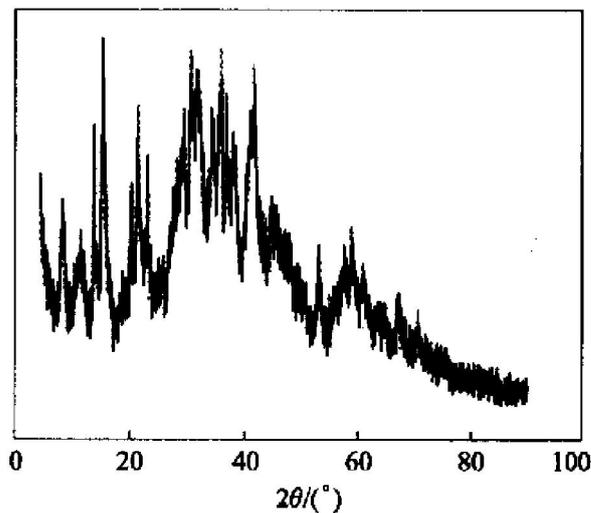


图 4 青岛试样中镁合金试片腐蚀产物 X 射线衍射图

Fig. 4 XRD spectrum of corrosion product of magnesium alloys exposed in Qingdao

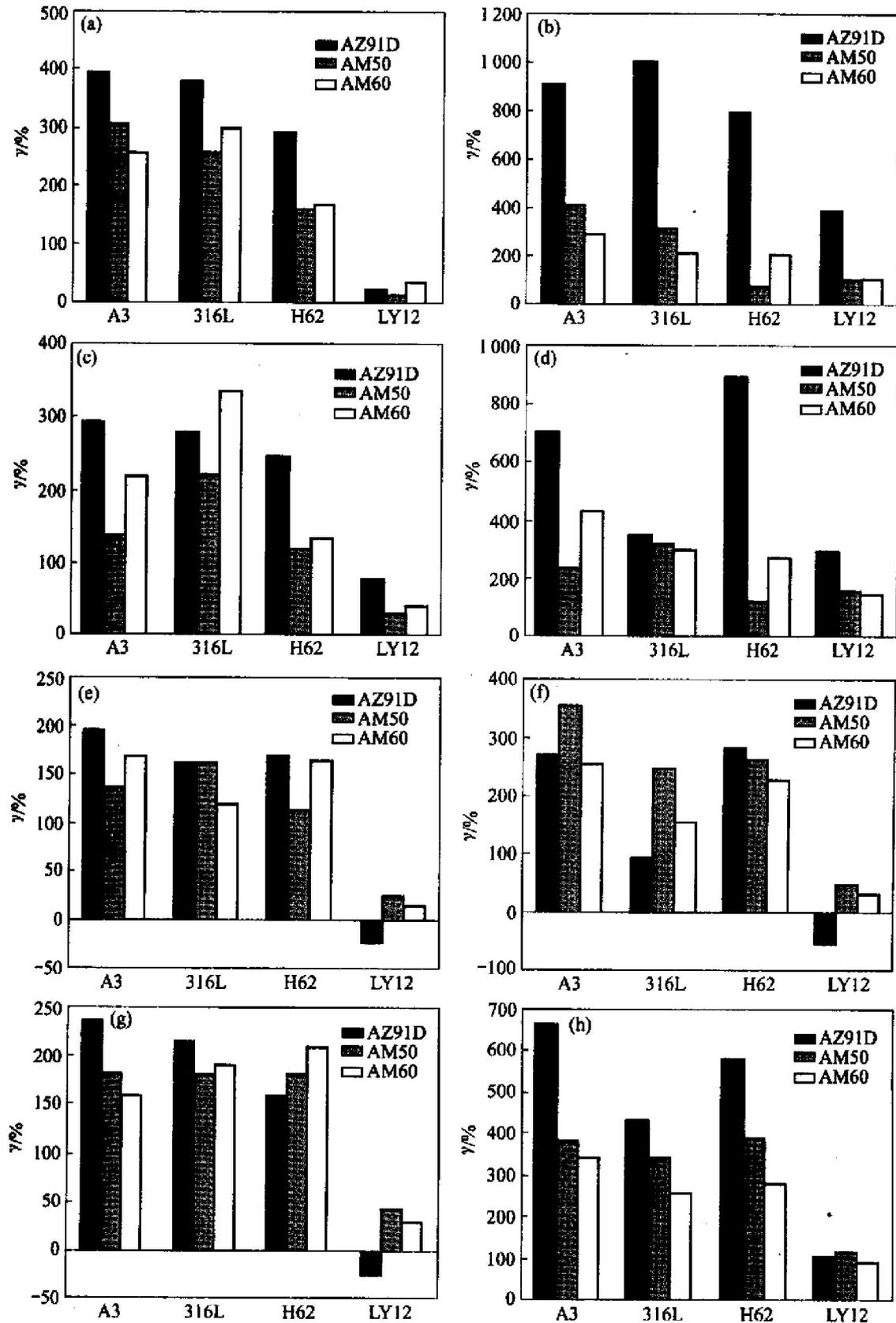


图 5 镁合金与不同材料耦合后的电偶腐蚀效应

Fig. 5 Galvanic corrosion effect of magnesium alloys coupled with other materials

- (a) —Qingdao, 3 months, small samples; (b) —Qingdao, 3 months, big samples;
- (c) —Qingdao, 6 months, small samples; (d) —Qingdao, 6 months, big samples;
- (e) —Wuhan, 3 months, small samples; (f) —Wuhan, 3 months, big samples;
- (g) —Wuhan, 6 months, small samples; (h) —Wuhan, 6 months, big samples

要研究实验环境、实验材料、实验周期与材料电偶腐蚀效应之间的关系。

2.3.1 实验环境对镁合金大气电偶腐蚀效应的影响

从图5可以看出:镁合金与阴极材料偶合后,其在青岛的大气电偶腐蚀效应明显高于其在武汉的大气电偶腐蚀效应,但是,随着实验时间的延长,两者的差距大幅度缩小而趋于相近。由于青岛属于典型的海洋性大气环境,武汉属于典型的城市工业大气环境,看来,海洋环境对镁合金的早期电偶腐蚀似乎有更强的加速作用;随着时间的延长,在青岛镁合金腐蚀后生成的大量腐蚀产物可能具有一定的保护作用,从而在一定程度上减少了镁合金的腐蚀,而在武汉工业大气环境下经6个月暴露后可能尚未能够形成具有足够保护作用的腐蚀产物层,从而使得青岛镁合金试样在暴晒6个月后其电偶腐蚀效应逐渐降低,而武汉镁合金试样在暴晒6个月后其大气电偶腐蚀效仍基本未变,两者差距逐渐缩小,并基本趋于一致。

2.3.2 实验材料对镁合金大气电偶腐蚀效应的影响

1) 不同镁合金阳极材料对大气电偶腐蚀效应的影响程度存在较大差异,基本存在如下关系:

$$V_{AZ91D} > V_{AM50} > V_{AM60};$$

2) 对于同种阳极材料,一般镁合金与A3钢组成的电偶对的大气电偶腐蚀效应最大;而其与LY12组成的电偶对的大气电偶腐蚀效应最小,明显小于其它3种电偶对的大气电偶腐蚀效应,有时甚至出现负值;316L不锈钢、H62黄铜与镁合金组成的电偶对的大气电偶腐蚀效应居于前两者之间,且相差不大。

2.3.3 实验周期对镁合金大气电偶腐蚀效应的影响

1) 在青岛市,A3钢、316L不锈钢、H62黄铜与镁合金偶合6个月后的大气电偶腐蚀效应明显低于其偶合3个月后的大气电偶腐蚀效应;而LY12铝合金与镁合金偶合6个月后的大气电偶腐蚀效应却高于其偶合3个月后的大气电偶腐蚀效应。综合前文的分析可知,A3钢、316L不锈钢、H62黄铜与镁合金偶合后,发生较严重的电偶腐蚀,并生成大量的腐蚀产物。腐蚀产物对于镁合金基体有一定的保护作用,因而随着实验时间的延长其大气电偶腐蚀效应会随之下降。而LY12铝合金与镁合金偶合后,电偶腐蚀现象较轻微,仅生成少量的腐蚀产物,未能对镁合金基体进行有效保护,因而随着时

间的延长,其大气电偶腐蚀效应逐渐增加。

2) 在武汉市,A3钢、316L不锈钢、H62黄铜以及LY12铝合金与镁合金偶合6个月后的大气电偶腐蚀效应均大于其偶合3个月后的电偶腐蚀效应。究其原因,可能是在工业环境中6个月内尚不足以形成具有足够保护作用的腐蚀产物层,因而其大气电偶腐蚀效应随着时间的延长而增长。

3 结论

1) 3种镁合金与A3钢、316L不锈钢、H62偶接后,镁合金总是作为阳极,在青岛和武汉两地均发生显著的电偶腐蚀;而镁合金与LY12铝合金偶合后,其电偶腐蚀现象不明显。

2) 对于电偶试样中的镁合金试片,其腐蚀主要发生在边缘附近,说明在大气环境下,镁合金的电偶电流作用距离是有限的。

3) 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。

4) 由于镁合金在海洋大气中生成的腐蚀产物对基体具有一定的保护作用,因此,随着时间的延长,其大气电偶腐蚀效应逐渐降低;而镁合金在城市工业大气中经6个月尚未生成具有足够保护作用的腐蚀产物膜,从而使得镁合金的大气电偶腐蚀效应在本实验所考察的时间范围内随着时间的延长而逐渐增大。

5) 不同电偶对的大气电偶腐蚀效应均在10以内。不同镁合金阳极材料对大气电偶腐蚀效应的影响程度存在差异,基本存在如下关系: $V_{AZ91D} > V_{AM50} > V_{AM60}$ 。说明在实验进行的两种大气环境下,AZ91D的电偶腐蚀敏感性最强,AM50次之,AM60最弱。

6) 对于同种阳极材料,一般镁合金与A3钢组成的电偶对的大气电偶腐蚀效应最大,而其与LY12组成的电偶对的大气电偶腐蚀效应最小。

REFERENCES

- [1] 刘祚时,谢旭英,朱云. 镁合金在汽车工业中的应用[J]. 江西冶金, 1998, 18(5): 23-25.
LIU Zuoshi, XIE Xuying, ZHU Yun. The application of magnesium alloys in automobile industry[J]. Jiangxi

- Metallurgy, 1998, 18(5): 23 - 25.
- [2] Luo A, Renaud J, Nakatsugawa I, et al. Magnesium coatings for automotive applications[J]. JOM, 1995, 47(7): 28 - 31.
- [3] Vanfleterials R. Magnesium for automotive applications [J]. Advanced Materials and Process, 1996(5): 33 - 34.
- [4] 汪之清. 国外镁合金压铸技术的发展[J]. 铸造, 1997(8): 48 - 50.
WANG Zhi-qing. Development of die-casting technology for magnesium alloys in foreign countries[J]. Foundry, 1997(8): 48 - 50.
- [5] 刘新宽, 向阳辉, 王渠东, 等. Mg 合金的防蚀处理 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13(4): 211 - 213.
LIU Xin-kuan, XIANG Yang-hui, WANG Qu-dong, et al. Corrosion control technologies for magnesium alloys [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2001, 13(4): 211 - 213.
- [6] SONG Guang-ling, Atrons A J. Corrosion mechanism of magnesium alloys[J]. Advanced Engineering Materials, 1999(1): 11 - 33.
- [7] Decker R F. The renaissance in magnesium [J]. Adv Mate Pro, 1998, 154(3): 31 - 33.
- [8] Froce F H, Eliezer D. The science technology and application of magnesium[J]. J Mine Metals and Mater Soc, 1998, 5(9): 30 - 34.
- [9] Alex J Z, Duane E B. Anodized coatings for magnesium alloys[J]. Metal Finishing, 1994, 92(3): 39 - 44.
- [10] Makar G L, Kruger J. Corrosion of magnesium[J]. International Materials Reviews, 1993, 38(3): 138 - 153.
- [11] Rudd A L, Breslin C B, Mansfeld F. The corrosion protection afforded by rare earth conversion coatings applied to magnesium [J]. Corrosion Science, 2000, 42(2): 275 - 288.
- [12] Takaya M, Narashino. Anodizing of magnesium alloys in KOH-Al(OH)₃ solutions[J]. Aluminium, 1989, 65(12): 1244 - 1248.
- [13] 张永君, 严川伟, 王福会, 等. 镁及镁合金环保型阳极氧化电解液及其工艺[J]. 材料保护, 2002, 35(3): 39 - 40.
ZHANG Yong-jun, YAN Chuan-wei, WANG Fu-hui, et al. Environmental-friendly bath solution and process for anodization of magnesium and its alloys[J]. Materials Protection, 2002, 35(3): 39 - 40.
- [14] 张永君, 严川伟, 楼翰一, 等. 镁及镁合金阳极氧化工艺综述[J]. 材料保护, 2001, 34(9): 24 - 26.
ZHANG Yong-jun, YAN Chuan-wei, LOU Han-yi, et al. A comprehensive survey on the anodizing process of magnesium and its alloy [J]. Materials Protection, 2001, 34(9): 24 - 26.
- [15] Busk R. Magnesium Product Design [M]. New York: Marcel Dekker INC, 1985. 517 - 534.
- [16] Hawke D, Ruden T. Magnesium in Vehicle Design [M]. Warrendale PA: Society of Automotive Engineers, 1995. 63.
- [17] Isacson M, Storm M, et al. Characteristics and Applications of Magnesium in Automotive Design[M]. Warrendale PA: Society of Automotive Engineers, 1997. 43.

(编辑 袁赛前)