

Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金腐蚀临界相对湿度研究及腐蚀动力学分析

张 超¹ 陈俊航² 张 欢¹ 李翌亮¹ 张新兰¹

(1 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

(2 北京科技大学新材料技术研究院, 北京 100083)

文 摘 通过扫描电镜观察、元素分析和腐蚀增重测量等方法,研究了 Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金在潮湿环境下腐蚀临界相对湿度及腐蚀动力学性能。结果表明:(1)Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金腐蚀临界相对湿度为 40%~45%,当环境湿度 $\geq 40\%$ 时,镁合金开始发生腐蚀反应;(2)Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金腐蚀反应活化能 $E_a=0.382\text{ eV}$,不同相对湿度对镁合金腐蚀的加速常数 $m=3.54702$ 。

关键词 锻造镁合金,临界腐蚀湿度,腐蚀速率,腐蚀行为

中图分类号:TB30

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.04.016

Study on Relative Humidity for Corrosion and Analysis of Corrosion Kinetics of Mg-GD-Y-Zn Forged Magnesium Alloys

ZHANG Chao¹ CHEN Junhang² ZHANG Huan¹ LI Zhaoliang¹ ZHANG Xinlan¹

(1 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(2 Institute of Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract The corrosion critical relative humidity and corrosion kinetic properties of Mg-Gd-Y-Zn forged magnesium alloy in humid environment were investigated by scanning electron microscope observation, elemental analysis and corrosion weight gain measurement. The results show that (1) the critical relative humidity for corrosion of Mg-Gd-Y-Zn forged magnesium alloy is 40% to 45%, and the corrosion reaction of magnesium alloy starts to occur when the ambient humidity is $\geq 40\%$; (2) the activation energy of corrosion reaction of Mg-Gd-Y-Zn forged magnesium alloy is $E_a=0.382\text{ eV}$, and the accelerating constants of the corrosion of magnesium alloy with different relative humidity are $m=3.54702$.

Key words Forged magnesium alloy, Critical corrosion humidity, Corrosion rate, Corrosion behavior

0 引言

在轻量化设计需求日益增加的背景下,镁合金以其低密度、高强度和良好的加工性能,成为汽车、航空航天、电子产品等领域的重要工程材料^[1-5]。然而,镁合金在实际使用过程中,尤其是在潮湿环境中,面临着严重的腐蚀问题。镁合金的腐蚀不仅限制了其在汽车和航空等领域的广泛应用,也影响了其长期使用的可靠性和安全性^[6-7]。同时,镁合金较为活泼的化学性质,使其在较低相对湿度的大气环境中也极易发生腐蚀,导致镁合金在生产、加工、转运和存储过程中表面状态的改变,进而影响镁合金产品的质量。因此,研究镁合金在不同相对湿度下

的腐蚀行为,对于产品的质量控制具有重要的指导意义。

目前,关于镁合金在潮湿环境中腐蚀行为的研究较多。孙硕等^[8]研究了 EW75 镁合金在工业大气环境中的腐蚀行为,表明 EW75 镁合金在夏季高温高湿环境条件下的腐蚀速率约为冬季的 2 倍。郭初蕾等^[9]研究了 AZ31 镁合金在青岛和万宁海洋大气环境中暴露 5 年的腐蚀行为,结果表明试样在万宁环境中的腐蚀失重为青岛的 2~3 倍,相对湿度对镁合金的长周期腐蚀具有重要作用。林齐叠等^[10]通过数值模拟研究了相对湿度 70%~95% 范围内,AE44/MS 镁合金板件钢制螺栓结构件的电偶腐蚀行为,结果表明在

收稿日期:2025-04-24

第一作者简介:张超,1993 年出生,工程师,主要从事材料贮存及环境适应性研究工作。E-mail: zh62749079@126.com

相对湿度为90%时,连接件的腐蚀电流密度最大为16.7 A/m²。R ARRABAL等^[11]使用重量法评估了相对湿度和温度对AZ80镁合金的腐蚀影响,表明AZ80镁合金的腐蚀速率随着温度和相对湿度的增大而升高。大量研究表明,相对湿度对镁合金腐蚀的影响显著^[12-13]。然而,关于在低湿度下镁合金的腐蚀报道很少,对于镁合金的腐蚀临界相对湿度也尚无定论。

腐蚀临界湿度是指当环境湿度达到某一阈值时,材料开始发生腐蚀的湿度值,不同材料的腐蚀临界湿度存在差异。一般而言,钢、铜和锌的腐蚀临界湿度为60%~70%^[14-15]。ZENG等^[16]报道了在9.5%的相对湿度下,镁合金不发生腐蚀,在30%的相对湿度下,镁合金可能有轻微腐蚀,而在80%相对湿度以上,镁合金的腐蚀较为严重。然而,缺乏镁合金在不同温湿度环境条件下腐蚀的量化关系研究。

本文以Mg-Gd-Y-Zn锻造镁合金作为试验对象,研究其在潮湿环境下腐蚀临界相对湿度及腐蚀动力学性能,获取锻造镁合金的腐蚀临界相对湿度和腐蚀反应活化能,研究成果对Mg-Gd-Y-Zn锻造镁合金的生产、转运、存储条件提供数据支撑,对其腐蚀反应动力学参数进行解析。

1 试验

1.1 试验件制备

试验件的材质为锻造镁合金,经测试,其化学成分见表1。参试的试验件尺寸为100 mm×70 mm×2 mm。试验前,将按规格切割好的金属试样依次用150#、240#、400#、800#、2000#砂纸抛光后,先用丙酮超声机械清洗除油,再用酒精脱水吹干后放入干燥器内待用。

表1 Mg-Gd-Y-Zn锻造镁合金主要化学元素组成
Tab. 1 The main chemical elements composition of Mg-Gd-Y-Zn forged magnesium alloys %

Gd	Y	Zn	Mg
9	3	0.8	余量

1.2 性能表征

(1)宏观形貌:湿热试验前后,采用Nikon D7000相机对样品进行宏观形貌拍照。

(2)重量变化及腐蚀增重速率:试验前,采用游标卡尺测量试样的尺寸,采用精度为0.01 mg的电子天平记录试样的原始重量,并在湿热试验不同时长后,分别记录试样的重量变化。通过增重法计算金属的腐蚀速率。腐蚀速率的计算需要取三个平行试样,分别测定增重量,然后计算平均值。

腐蚀增重率计算公式如下:

$$v_1 = \frac{W_1 - W_0}{S \cdot t} \tag{1}$$

式中, v_1 为腐蚀增重速率, W_0 为试样的原始质量, W_1 为试样试验后的质量, S 为试样的表面积, t 为试验时长。

(3)激光共聚焦显微形貌:采用基恩士VK 250型激光共聚焦显微镜,对湿热试验后的试样进行微观形貌表征,观察试样表面腐蚀产物形态。

(4)扫描电子显微镜形貌:采用FEI Quanta 250型扫描电子显微镜,对试样表面进行微观形貌和腐蚀产物元素组成测试。

1.3 试验条件设计

(1)腐蚀临界湿度研究试验

对锻造镁合金基材开展了腐蚀临界湿度研究,开展了80℃/30% RH、80℃/35% RH、80℃/40% RH、80℃/45% RH、80℃/50% RH、80℃/60% RH条件下,为期60 d的湿热试验及性能表征。其中在第15、30和45 d时对所有试样进行外观及腐蚀称重表征,在第60 d时除开展外观及腐蚀称重外,还进行微观形貌和能谱分析,从而获取镁合金在不同相对湿度条件下的腐蚀性能,每组试验的平行样为3片。

(2)腐蚀增重动力学研究试验

对Mg-Gd-Y-Zn锻造镁合金在 $t=25、30、35、40℃$ 、RH=60%、70%、80%、90%的条件下,组成16种正交湿热试验,试验时间为48 h,通过测量腐蚀试验前后镁合金试片的重量,进而得到腐蚀增重试验数据,每组试验的平行样为3片。

2 结果

2.1 腐蚀临界湿度研究试验

(1)宏观形貌变化

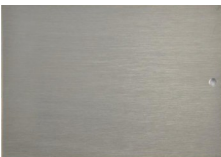
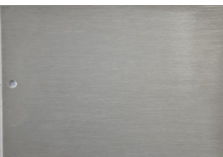
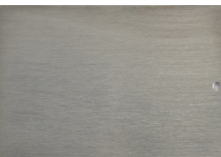
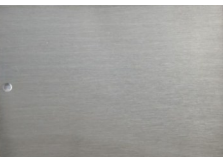
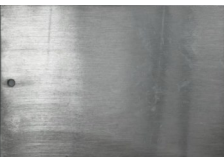
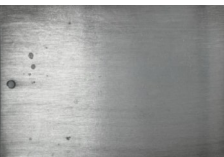
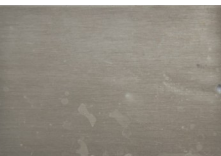
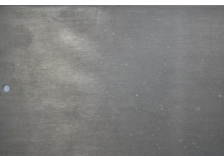
表2为不同湿度湿热试验后Mg-Gd-Y-Zn锻造镁合金基材的宏观形貌,可以看出,在80℃/30% RH、80℃/35% RH两种条件下进行60 d试验后,试样的表面未发生明显变化,仍保持金属光泽,未见腐蚀斑点。在80℃/40% RH条件下,逐渐观测到腐蚀现象。而在80℃/45% RH、80℃/50% RH和80℃/60% RH三种条件下,试样表面出现了明显的腐蚀痕迹,其中在80℃/45% RH环境下,试样表面可见明显黑色斑点,在80℃/50% RH和80℃/60% RH条件下的基材明显不再保持金属光泽,试样表面覆盖一层灰黑色腐蚀产物层,并且在灰黑色产物层上方可见白色腐蚀斑点。整体来看,当相对湿度≥40%时,Mg-Gd-Y-Zn锻造镁合金基材将发生腐蚀,随着湿度的提高,腐蚀逐渐加重。

(2)腐蚀增重性能

试验前后利用精度为0.01 mg的电子天平记录

表2 Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金不同湿度湿热试验后的宏观形貌

Tab. 2 Macroscopic morphology of Mg-Gd-Y-Zn forged magnesium alloys after wet heat tests at different humidity conditions

试验参数	试验周期			
	15 d	30 d	45 d	60 d
80 ℃/30% RH				
80 ℃/35% RH				
80 ℃/40% RH				
80 ℃/45% RH				
80 ℃/50% RH				
80 ℃/60% RH				

了Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金基材的重量变化,并对其平均值变化趋势进行对比,结果如图1所示。可以看出,整体的增重变化随着相对湿度的增加而呈现上升的趋势,不同湿度试验后的 Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金均发生了重量变化,当相对湿度>40%时, Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金所有平行样的增重量均大于天平误差的上限(0.01 mg),并且在60 d 试验后,增重量明显,这表明试样发生了腐蚀。此外,可以看出,当相对湿度达到45%时,随着湿度的增加,腐蚀增重量明显变大。

(3) 微观形貌表征与腐蚀分析

采用3D 激光共聚焦显微镜对不同湿度湿热试验60 d后的试样进行表征,结果如表3所示。可以看出
 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025年 第4期

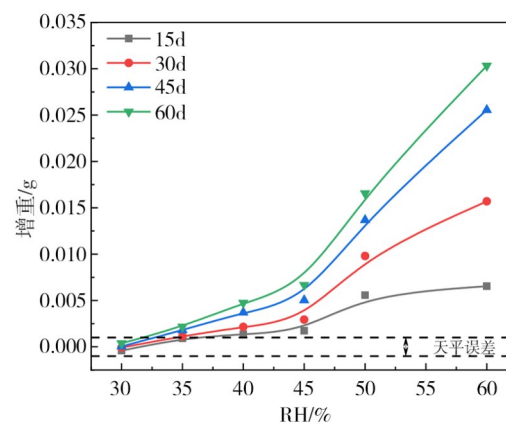


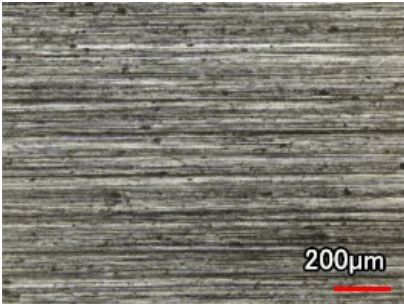
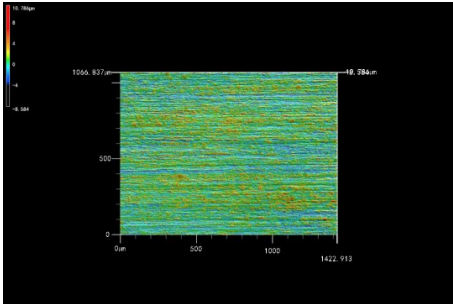
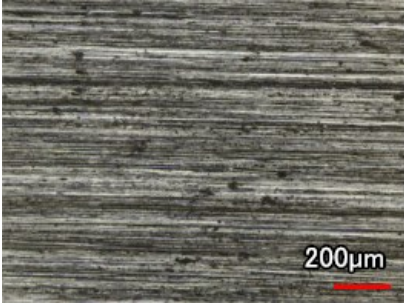
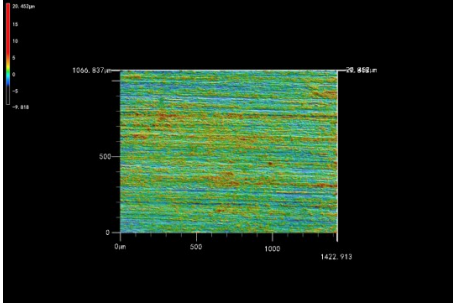
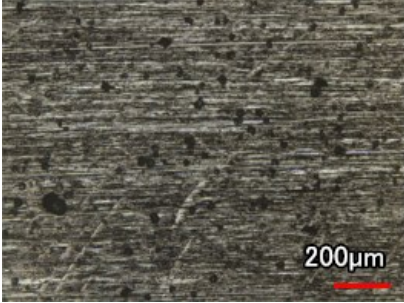
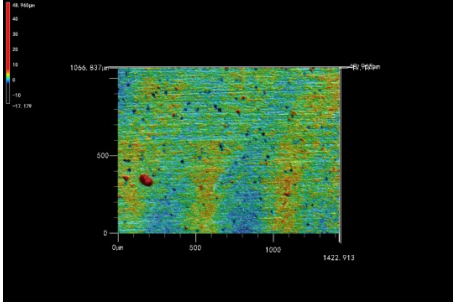
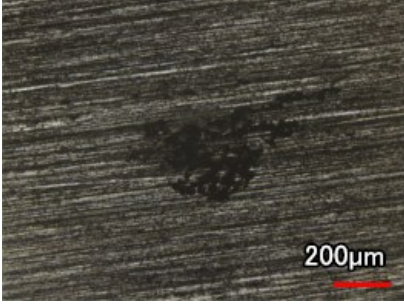
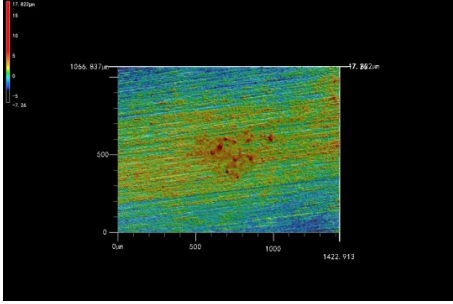
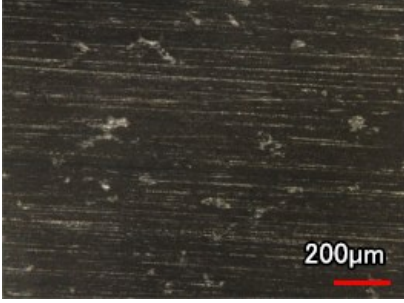
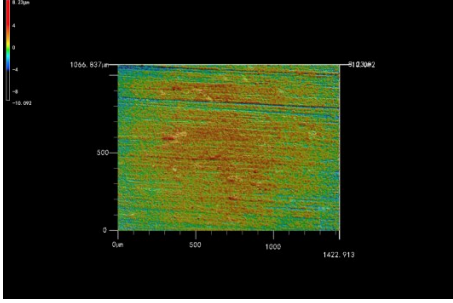
图1 Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金不同湿度湿热试验后的质量变化图

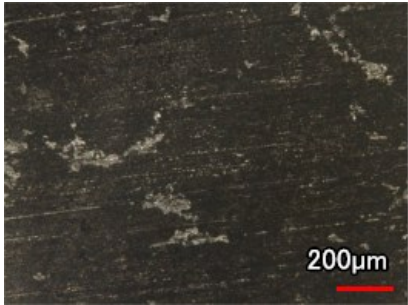
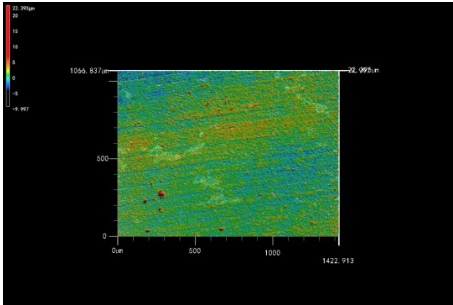
Fig. 1 Graph of weight changes of forged magnesium alloys after wet heat tests at different humidity conditions

出,当相对湿度 $\leq 35\%$ 时,试样表面无明显腐蚀迹象;当相对湿度在 $45\% \sim 50\%$ 时,试样表面生成圆斑状腐蚀产物;当相对湿度在 60% 时,试样表面可见絮状腐蚀产物。通过激光共聚焦形貌表明,当相对湿度 $\geq 40\%$ 时,Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金会发生腐蚀。

表 3 Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金不同湿度试验 60 d 后的 3D 激光共聚焦形貌

Tab. 3 3D laser confocal morphology of Mg-Gd-Y-Zn forged magnesium alloy after a 60-day of testing under different humidity conditions

试验条件	微观形貌	高度形貌
80 °C/30% RH		
80 °C/35% RH		
80 °C/40% RH		
80 °C/45% RH		
80 °C/50% RH		

试验条件	微观形貌	高度形貌
80 °C/60% RH		

为了进一步明确试样表面附着物是否为腐蚀产物,采用扫描电子显微镜进行了观察,结果如图2~图7所示,可以看出,与激光共聚焦结果一致,在80 °C/30% RH和80 °C/35% RH试验条件下未发现明显腐

蚀迹象;在80 °C/40% RH环境下,经历60 d湿热试验后,可见有微量腐蚀产物;随着相对湿度增大至45%,试样表面的腐蚀产物明显增多,并在80 °C/60% RH环境下产生大量的腐蚀产物。

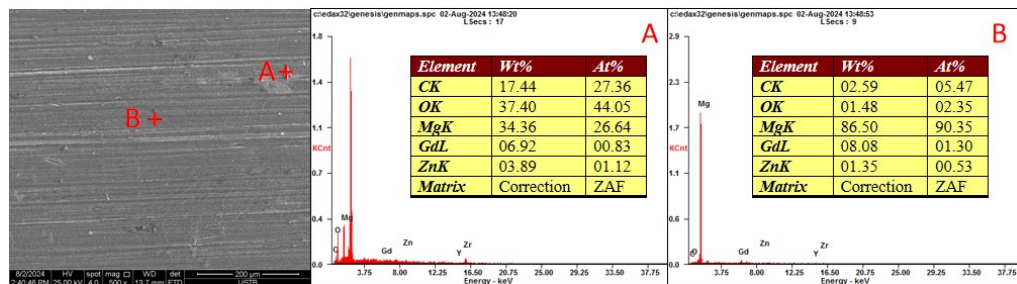


图2 80 °C/30% RH试验60 d后Mg-Gd-Y-Zn锻造镁合金试样表面的SEM形貌及元素分析

Fig. 2 SEM morphology and elemental analysis of the surface of Mg-Gd-Y-Zn forged magnesium alloy specimens after a 60-day test under 80 °C/30% RH conditions

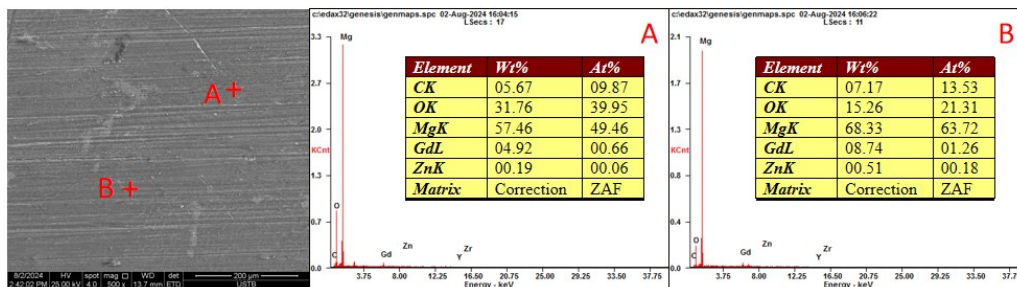


图3 80 °C/35% RH试验60 d后Mg-Gd-Y-Zn锻造镁合金试样表面的SEM形貌及元素分析

Fig. 3 SEM morphology and elemental analysis of the surface of Mg-Gd-Y-Zn forged magnesium alloy specimens after a 60-day test under 80 °C/35% RH conditions

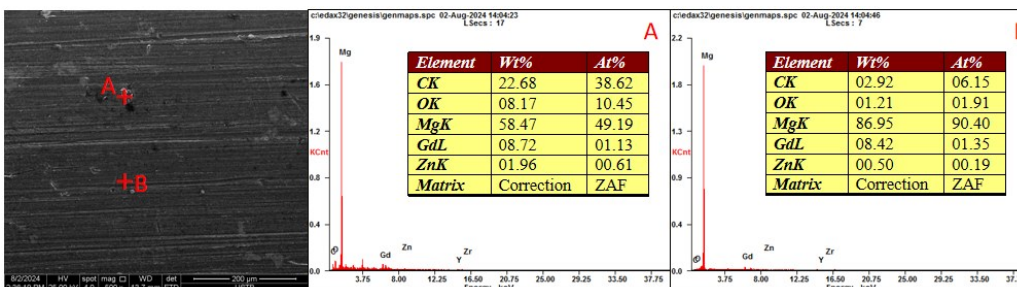


图4 80 °C/40% RH试验60 d后Mg-Gd-Y-Zn锻造镁合金试样表面的SEM形貌及元素分析

Fig. 4 SEM morphology and elemental analysis of the surface of Mg-Gd-Y-Zn forged magnesium alloy specimens after a 60-day test under 80 °C/40% RH conditions

综上,Mg-Gd-Y-Zn锻造镁合金腐蚀临界相对湿度为40%~45%,当环境湿度 $\geq 40\%$ 时,镁合金开始

发生腐蚀反应,该信息为Mg-Gd-Y-Zn锻造镁合金产品的生产、转运和使用提供数据支撑。

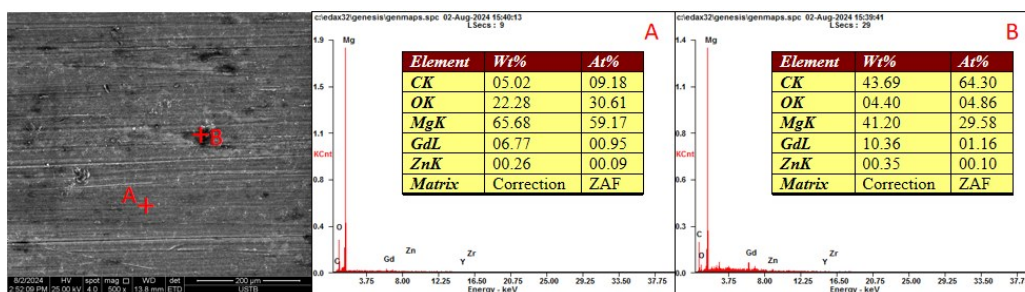


图5 80 °C/45% RH 试验 60 d 后 Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金试样表面的 SEM 形貌及元素分析

Fig. 5 SEM morphology and elemental analysis of the surface of Mg-Gd-Y-Zn forged magnesium alloy specimens after a 60-day test under 80 °C/45% RH conditions

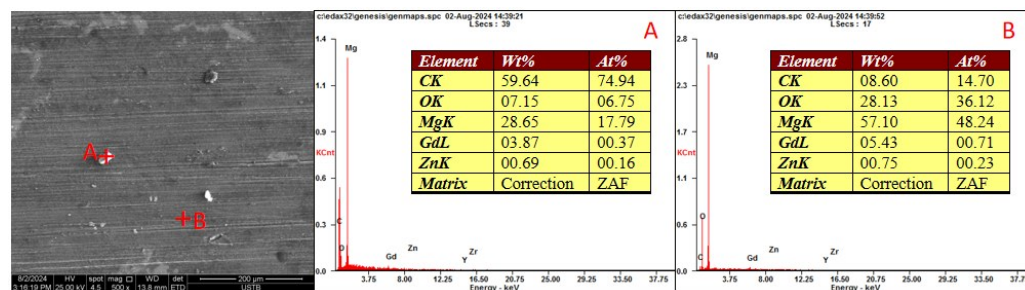


图6 80 °C/50% RH 试验 60 d 后 Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金试样表面的 SEM 形貌及元素分析

Fig. 6 SEM morphology and elemental analysis of the surface of Mg-Gd-Y-Zn forged magnesium alloy specimens after a 60-day test under 80 °C/50% RH conditions

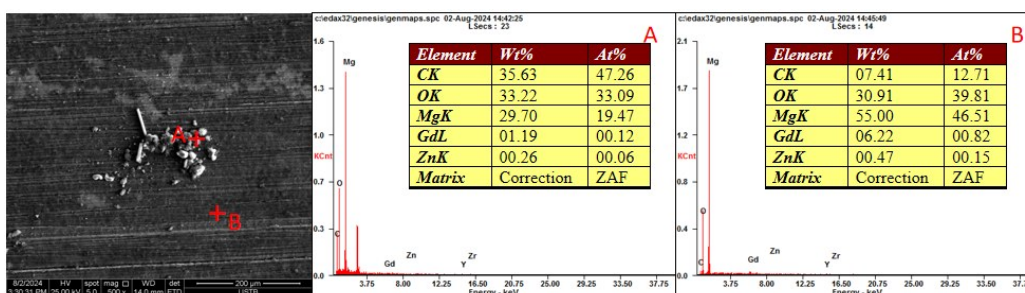


图7 80 °C/60% RH 试验 60 d 后 Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金试样表面的 SEM 形貌及元素分析

Fig. 7 SEM morphology and elemental analysis of the surface of Mg-Gd-Y-Zn forged magnesium alloy specimens after a 60-day test under 80 °C/60% RH conditions

2.2 腐蚀增重动力学研究试验

在完成镁合金临界腐蚀湿度定性表征的基础上, 本文进一步对镁合金的腐蚀动力学进行了研究与定量分析。基于前述 1.3 节中, 腐蚀增重动力学研究试验条件, 对 Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金在 $t=25, 30, 35, 40$ °C, RH=60%、70%、80%、90% 的条件下, 组成 16 种不同温湿度条件下 48 h 湿热试验, 进而得到腐蚀增重试验数据。腐蚀增重试验数据详见下表 4。

基于获取 Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金腐蚀增重速率的基础上, 根据如下计算公式, 以镁合金基材在温度 40 °C、相对湿度 90% 环境中的腐蚀速率作为折算系数基准, 计算不同温湿度溶液与其之间的腐蚀折算系数, 计算公式为^[17-19]。

$$\alpha_{\text{温湿}} = \frac{v_{\text{温湿}}}{v_{t=40^{\circ}\text{C}, \text{RH}=90\%}} \quad (2)$$

表 4 Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金在不同温湿度下湿热试验 48 h 后的腐蚀增重速率 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

Tab. 4 The corrosion weight gain rate of Mg-Gd-Y-Zn forged magnesium alloy after a 48-hour wet heat test under different temperature and humidity conditions $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

RH/%	$t/^{\circ}\text{C}$			
	25	30	35	40
60	0.003 98	0.005 11	0.006 94	0.008 76
70	0.005 78	0.007 02	0.008 16	0.011 00
80	0.010 31	0.013 60	0.018 88	0.019 28
90	0.017 71	0.020 06	0.024 66	0.025 84

则根据不同温湿度湿热试验结果, 获得 Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金不同温湿度相对于标准潮湿空气的当量折算系数见图 8。

当量折算系数可量化镁合金在动态环境中的腐蚀

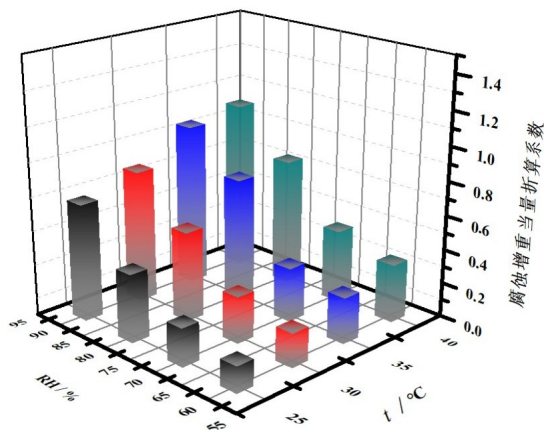


图8 Mg-Gd-Y-Zn锻造镁合金不同温湿度相对于标准潮湿空气的当量折算系数

Fig. 8 Equivalent conversion coefficients of Mg-Gd-Y-Zn forged magnesium alloy at different temperatures and humidity levels relative to standard humid air

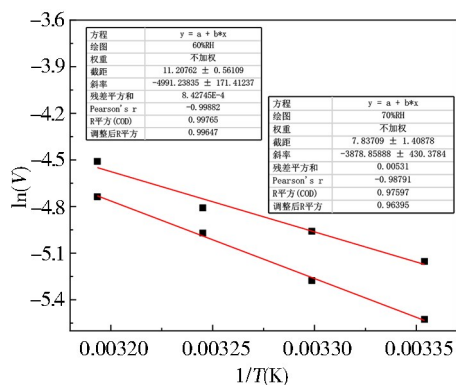
程度,根据 Hallberg-Peck 模型,不同温湿度因子具有下列关系 $F(t, RH) = f(t) \cdot f(RH)$,其中温度因子符合阿伦尼乌斯公式,湿度因子符合逆幂律公式^[20-21]。温度

和湿度因子依据 Hallberg-Peck 模型结合起来后可得到不同温湿度的潮湿空气折算系数拟合公式如下。

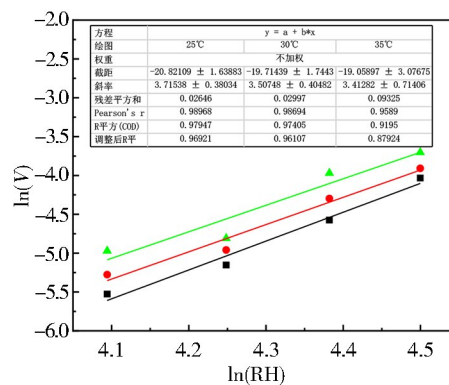
$$\alpha = \frac{v_1}{v_2} = \exp \left[-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \right] \cdot \left(\frac{RH_1}{RH_2} \right)^n \quad (3)$$

式中, α 为温度为 t_1 , 相对湿度为 RH_1 时的折算系数; v_1 为温度为 t_1 、相对湿度为 RH_1 时的腐蚀速率; v_2 为标准潮湿空气下的腐蚀速率; t_1 为试验的温度; RH_1 为试验的相对湿度; t_2 为标准潮湿空气的温度, 40 °C; RH_2 为标准潮湿空气的相对湿度, 90%; E_a 为镁合金腐蚀反应的活化能; R 为理想气体常数; n 为逆幂指数。

任意选取 ($t=25、30、35、40\text{ }^{\circ}\text{C}$)—($RH=60\%、70\%$)进行反应活化能求解;湿度加速度常数选用 ($t=25、30、35\text{ }^{\circ}\text{C}$)—($RH=60\%、70\%、80\%、90\%$ RH)进行求解,拟合结果如下图9所示。分别取平均值可得, Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金腐蚀的反应活化能 $E_a=0.382\text{ eV}$,湿度加速度常数 $m=3.54702$ 。一般而言,对于氧化膜破裂、金属腐蚀和金属间化合物增长,其激活能 E_a 介于 $0.3\sim 1.2\text{ eV}$ 之间^[22],因此本实验的结果较为可靠。



(a) 反应活化能求解



(b) 湿度加速度常数求解

图9 腐蚀增重 Hallberg-Peck 模型参数求解

Fig. 9 Parameter determination of the corrosion-weighted Hallberg-Peck model

3 结论

以 Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金作为对象,研究了其在潮湿环境下腐蚀临界相对湿度及腐蚀动力学性能,获取了锻造镁合金的腐蚀临界相对湿度和腐蚀反应活化能,研究成果对 Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金的生产、转运、存储条件提供了数据支撑。

(1) Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金腐蚀临界相对湿度为 40%~45%。

(2) 当环境湿度 $\geq 40\%$ 时,镁合金开始发生腐蚀反应,其生产、转运和存储应避免环境湿度长时间超过 40%。

(3) Mg-Gd-Y-Zn 锻造镁合金腐蚀反应活化能 $E_a=0.382\text{ eV}$,不同相对湿度对镁合金腐蚀的加速常数 $m=3.54702$ 。

参考文献

- [1] 丁文江,吴国华,李中权,等. 轻质高性能镁合金开发及其在航天航空领域的应用[J]. 上海航天,2019,36(02):1-8.
- DING Wenjiang, WU Guohua, LI Zhongquan, et al. Development of high-performance light-mass magnesium alloys and applications in aerospace and aviation fields [J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(02):1-8.
- [2] 李坤,吉辰,白生文,等. 高性能镁合金电弧增材制造技术研究现状与展望[J]. 机械工程学报,2024,60(07):289-311.
- LI Kun, JI Chen, BAI Shengwen, et al. Research status and prospects of wire-arc additive manufacturing technology for high-performance magnesium alloys [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(07):289-311.
- [3] 张卫红,唐长红. 航空航天装备的轻量化:挑战与未来[J]. 航空学报,2024,45(05):4,9-15.

ZHANG Weihong, TANG Changhong. Lightweighting of aerospace and aeronautical equipment: Challenges and perspectives [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(05): 4, 9-15.

[4] 王筱月, 王璐瑶, 马晓慧, 等. 镁合金表面金属有机框架材料的制备及防腐应用研究综述[J]. *表面技术*, 2025, 54(05): 61-71.

WANG Xiaoyue, WANG Luyao, MA Xiaohui, et al. Review on the preparation and corrosion-resistant application of metal-organic frameworks for magnesium alloy surface[J]. *Surface Technology*, 2025, 54(05): 61-71.

[5] 周苗, 刘楚明, 高永浩, 等. 含铜AZ31镁合金的腐蚀行为[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(01): 18-26.

ZHOU Miao, LIU Chuming, GAO Yonghao, et al. Corrosion behavior of Cu-containing AZ31 magnesium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(01): 18-26.

[6] 邱六, 朱胜, 王小明, 等. 镁合金腐蚀与防护的研究现状[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(16): 31-36.

QIU Liu, ZHU Sheng, WANG Xiaoming, et al. Research status of corrosion and protection of magnesium alloys[J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(16): 31-36.

[7] 邓迎诚, 秦卫华, 王飞, 等. 镁合金在大气环境中腐蚀行为及表面处理技术的研究进展[J]. *机械工程材料*, 2023, 47(03): 1-6, 54.

DENG Yingcheng, QIN Weihua, WANG Fei, et al. Research progress on corrosion behavior in atmospheric environment and surface treatment technique of magnesium alloy[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2023, 47(03): 1-6, 54.

[8] 孙硕, 代珈铭, 宋影伟, 等. 挤压态EW75稀土镁合金在沈阳工业大气环境中的腐蚀行为研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2024, 44(01): 141-150.

SUN Shuo, DAI Jiaming, SONG Yingwei, et al. Corrosion behavior of extruded EW75 Mg-alloy in Shenyang industrial atmosphere[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2024, 44(01): 141-150.

[9] 郭初蕾, 郑弃非, 赵月红, 等. AZ31镁合金在海洋大气环境中的腐蚀行为[J]. *稀有金属*, 2013, 37(01): 21-26.

GUO Chulei, ZHENG Qifei, ZHAO Yuehong, et al. Marine atmospheric corrosion behavior of AZ31 magnesium alloy[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2013, 37(01): 21-26.

[10] 林齐叠. 不同湿度海洋大气环境中AE44/MS螺栓结构的初期腐蚀特性研究[J]. *材料保护*, 2023, 56(08): 91-96.

LIN Qidie. Preliminary corrosion behavior of AE44/MS bolt structure in marine atmosphere with different humidity[J]. *Materials Protection*, 2023, 56(08): 91-96.

[11] ARRABAL R, PARDO A, MERINO M C, et al. Corrosion behaviour of Mg/Al alloys in high humidity atmospheres[J]. *Materials and Corrosion*, 2011, 62(04): 326-334.

[12] LEBOZEC N, JÖNSSON M, THIERRY D. Atmospheric corrosion of magnesium alloys: Influence of temperature, relative humidity, and chloride deposition[J].

Corrosion, 2004, 60(04): 356-361.

[13] LINDSTRÖM R, JOHANSSON L G, THOMPSON G E, et al. Corrosion of magnesium in humid air[J]. *Corrosion Science*, 2004, 46(05): 1141-1158.

[14] WANG X, LI X, TIAN X. Influence of temperature and relative humidity on the atmospheric corrosion of zinc in field exposures and laboratory environments by atmospheric corrosion monitor[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2015, 10(10): 8361-8373.

[15] CAI Y, ZHAO Y, MA X, et al. Influence of environmental factors on atmospheric corrosion in dynamic environment[J]. *Corrosion Science*, 2018, 137: 163-175.

[16] ZENG R C, ZHANG J, HUANG W J, et al. Review of studies on corrosion of magnesium alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, 16: 763-771.

[17] 卞贵学, 陈跃良, 张勇, 等. 基于电偶腐蚀仿真的铝/钛合金在不同浓度酸性NaCl溶液中与水介质中的当量折算系数[J]. *材料导报*, 2019, 33(16): 2746-2752.

BIAN Guixue, CHEN Yueliang, ZHANG Yong, et al. Equivalent conversion coefficient of aluminum/titanium alloy between acidic NaCl solution with different concentration and water based on galvanic corrosion simulation[J]. *Materials Report*, 2019, 33(16): 2746-2752.

[18] 江雪龙, 杨晓华. 加速腐蚀当量加速关系研究方法综述[J]. *装备环境工程*, 2014, 11(06): 50-58, 83.

JIANG Xuelong, YANG Xiaohua. Review on the research methods of equivalent accelerated relationship in accelerated corrosion[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2014, 11(06): 50-58, 83.

[19] 陈跃良, 赵红君, 卞贵学, 等. 电偶效应对与30CrMnSiA钢耦合的7B04铝合金当量折算系数的影响[J]. *航空学报*, 2017, 38(12): 319-328.

CHEN Yueliang, ZHAO Hongjun, BIAN Guixue, et al. Influence of galvanic action on equivalent conversion coefficient of 7B04 aluminum alloy coupled with 30CrMnSiA steel[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(12): 319-328.

[20] LI C, CHENG Y, HOU X. Humidity diffusion process analysis and life prediction of a VSC-HVDC control protection device based on a finite element simulation method[J]. *Electronics*, 2024, 13(15): 2888.

[21] 朱艺伟, 钟昕辉, 杨晨, 等. 基于Peck温-湿模型的智能电能表可靠性与寿命测评[J]. *粘接*, 2024, 51(12): 183-185.

ZHU Yiwei, ZHONG Xinhui, YANG Chen, et al. Reliability and life evaluation of smart watt-hour meter based on Peck temperature-humidity model[J]. *Adhesion*, 2024, 51(12): 183-185.

[22] 余建宏. 环境试验加速因子模型及其计算示例[J]. *环境技术*, 2019, 37(06): 174-177.

YU Jianhong. Acceleration factor model of environmental test and calculation example[J]. *Environmental Technology*, 2019, 37(06): 174-177.