

空间用超轻 LA141 镁锂合金 表面腐蚀产物及腐蚀机理研究

孙理理¹, 王在铎², 刘凤娟¹, 宋轶军¹, 王萌¹, 雷辉¹,
姜舟¹, 李俊峰¹, 贺晨¹, 孟凡辉¹, 曾一兵¹

(1. 航天材料及工艺研究所, 北京 100076, 2. 海装驻北京地区第一军事代表室, 北京 100076)

摘要: **目的** 明确空间用超轻 LA141 镁锂合金的腐蚀机理, 为进一步设计防护涂层体系提供理论依据。**方法** 将未腐蚀和已在空气中放置一段时间表面形成灰黑色腐蚀膜的超轻 LA141 镁锂合金的一部分放置于水溶液中, 一部分暴露在空气中, 研究其随时间延长的腐蚀产物生成规律, 并用 SEM、偏光显微镜对其腐蚀产物的微观形貌进行观察, 用 EDS 能谱分析、XRD、红外光谱手段对其成分进行鉴定。**结果** 超轻 LA141 镁锂合金放置于水溶液后, 有细密的气泡 (H_2) 逸出, 并在表面迅速生成一层灰黑色腐蚀膜层。已生成腐蚀膜层的镁锂合金放入水中后, 没有明显气泡逸出的现象, 且腐蚀膜层厚度增加速度低于未生成腐蚀膜层的镁锂合金。通过在 SEM、偏光显微镜下对腐蚀产物进行观察, 并结合 EDS、XRD 和红外的分析结果, 发现 LA141 镁锂合金放入水中后, 锂金属优先腐蚀, 生成大量氢气, 同时也伴随着镁金属的腐蚀, 生成氢氧化锂和氢氧化镁, 氢氧化锂在空气中不稳定, 接触空气后生成碳酸锂。**结论** 腐蚀产物主要为氢氧化镁及碳酸锂。另外, 腐蚀膜层能在一定程度上减缓底部镁锂合金的进一步腐蚀。该研究结果对设计选用抑制镁锂合金腐蚀的材料具有一定的参考价值。

关键词: 空间用超轻镁锂合金; 腐蚀规律; 腐蚀产物; 腐蚀机理; 腐蚀抑制

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)12-0044-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.12.007

Research on Surface Corrosion Products and Corrosion Mechanism of Ultralight LA141 Magnesium-Lithium Alloy for Space Use

SUN Li-li¹, WANG Zai-duo², LIU Feng-juan¹, SONG Yi-jun¹, WANG Meng¹, LEI Hui¹, JIANG Zhou¹,
LI Jun-feng¹, HE Chen¹, MENG Fan-hui¹, ZENG Yi-bing¹

(1. Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, China; 2. The First Military
Representative Office of the Naval Equipment Department in Beijing Area, Beijing 100076, China)

收稿日期: 2020-10-30; 修订日期: 2020-12-09

Received: 2020-10-30; Revised: 2020-12-09

基金项目: 中央军委装备发展部预先研究项目 (41423050307)

Fund: Supported by Pre-research Project of the Equipment Development Department of People's Republic of China Central Military Commission (41423050307)

作者简介: 孙理理 (1990—), 女, 硕士, 主要研究方向为特种功能涂层。

Biography: SUN Li-li (1990—), Female, Master, Research focus: specialty functional coating.

通讯作者: 曾一兵 (1964—), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为特种功能涂层。邮箱: 13801281272@163.com

Corresponding author: ZENG Yi-bing (1964—), Male, Master, Professor, Research focus: specialty functional coating. E-mail: 13801281272@163.com

引文格式: 孙理理, 王在铎, 刘凤娟, 等. 空间用超轻 LA141 镁锂合金表面腐蚀产物及腐蚀机理研究[J]. 表面技术, 2020, 49(12): 44-49.

SUN Li-li, WANG Zai-duo, LIU Feng-juan, et al. Research on surface corrosion products and corrosion mechanism of ultralight LA141 magnesium-lithium alloy for space use[J]. Surface technology, 2020, 49(12): 44-49.

ABSTRACT: The purpose of this research is to clarify the corrosion mechanism of the ultralight LA141 magnesium-lithium alloy for space use, and to provide a theoretical basis for the further design of the protective coating system. Put one part of the ultralight LA141 magnesium-lithium alloy that had not been corroded and had been left in the air for a period of time with a gray-black corrosion film formed on the surface into the water, and the other part was exposed to the air, then studied its formation law of corrosion products over time, and used scanning electron microscope (SEM), polarizing microscope to observe the microscopic morphology of the corrosion products, and used energy dispersive spectroscopy (EDS), X-ray diffraction (XRD), infrared spectroscopy to identify its composition. After the ultralight LA141 magnesium-lithium alloys were placed in water, fine bubbles of H_2 escaped, and a gray-black corrosion film quickly formed on the surface. After the magnesium-lithium alloy with a corrosion film layer was placed in water, there was no obvious bubbles escape phenomenon, and the thickness of the corrosion film layer increased at a slower rate than the magnesium-lithium alloy without a corrosion film layer. The corrosion products were observed under SEM and polarizing microscope, and combined with the analysis results of EDS, XRD and infrared. The corrosion products are mainly magnesium hydroxide and lithium carbonate. Therefore, come to the following conclusions, when the LA141 magnesium-lithium alloy is placed in water, lithium metal is corroded preferentially and a large amount of hydrogen is generated. At the same time, along with the corrosion of magnesium metal, lithium hydroxide and magnesium hydroxide are generated. Lithium hydroxide is unstable in the air and will generate lithium carbonate when exposed to air. The final detected surface corrosion products are mainly lithium carbonate and magnesium hydroxide. In addition, the corrosion film can slow down the further corrosion of the magnesium-lithium alloy at the bottom to a certain extent. The results of this study have certain implications for the design and selection of materials that inhibit the corrosion of magnesium-lithium alloys.

KEY WORDS: ultralight magnesium-lithium alloy for space use; corrosion law; corrosion products; corrosion mechanism; corrosion inhibition

目前,新一代遥感卫星已开展整体布局和结构设计。为了满足小卫星轻量化、使用效用高、快速响应等要求,迫切需要采用更为轻质、低成本和制造周期短的新型结构材料。新一代镁锂合金具有优良的比刚度、比强度和电磁屏蔽性能,能够在满足技术指标的同时,相对于传统铝合金大大降低整星的质量,具有广阔的遥感领域应用前景^[1]。镁锂合金的密度为 $1.25\sim 1.65\text{ g/cm}^3$,具有良好的综合性能,是最轻的结构材料^[2],因此是部件轻量化的理想材料,在航空、航天等领域颇受重视。国外针对镁锂合金的研究较早,国内经过追赶已有不小成就,但在力学性能、成型制造等方面都有所欠缺。特别是由于镁锂合金特殊的结构特性,使其表面较易与环境介质作用形成表面膜层,但该膜层并不像铝合金表面膜那样致密,因此在各种环境中都易发生腐蚀,严重限制了其工程应用推广^[3]。

新建海南发射场的气候条件类似于法国库鲁航天发射中心,相对于原酒泉发射场而言,温湿度和日照强度均较高^[4],航天器在发射前需停放在海南发射场,期间将面临较严酷的考验,因此对用轻质镁锂合金为基材制备的结构件提出了更高的耐环境要求^[5],进而对镁锂合金表面的防护层体系的防腐性能有了更高的要求。目前有多种针对镁锂合金的防护手段,如阳极氧化^[6-11]、电镀与化学镀^[12-15]、化学转化^[16]、涂层涂覆等^[17-20],但可达到的防腐性能仍不够理想,已工程应用的某镁锂合金防护技术仅能通过 96 h 盐雾

性能考核^[21]。

超轻 LA141 (Mg85-Li14-Al1) 镁锂合金是空间飞行器部件轻量化理想材料之一,其 Li 含量超过 11%,合金内由体心立方 (BCC) 结构的 $\beta(\text{Li})$ 相组成^[22]。因为 Li 元素要比 Mg 元素更为活泼,所以镁锂合金的抗腐蚀能力会随着 Li 元素含量的增加而逐渐降低,因此 LA141 很容易被腐蚀。目前已有一些针对镁锂合金腐蚀机理及腐蚀产物进行的研究^[23-28]。Hou 等^[29]曾用 ICPMS(电感耦合等离子体质谱)在线测试技术,定量测出 Mg-33%Li(原子数分数)合金在 0.01 mol/L NaCl 溶液中溶解的 Mg^{2+} 和 Li^+ 之间的比例约为 3.4,明显高于合金基体中 Mg/Li 的原子比 2,所以 BCC 结构的镁锂合金表面易形成难溶解且富含锂元素的保护膜,并且该保护膜可以承受 +500 mV 的过电位。王保杰等^[30]在其综述中也指出,迄今关于具有高耐蚀性的镁锂合金表面膜的组分和各组元的分布情况需要深入表征,且保护膜的微观结构、截面形貌和详细的成分分析也亟待澄清。目前,也尚未有明确阐述 LA141 镁锂合金在水中腐蚀过程的研究,因此有必要明确 LA141 镁锂合金在水中的腐蚀过程及腐蚀产物,从而为进一步改善现有针对 LA141 镁锂合金的防护技术提供理论支持。

本文通过对超轻 LA141 镁合金放置于空气和水中加速腐蚀的腐蚀产物进行分析,进一步明确了 LA141 镁锂合金的腐蚀机理。这对后续针对 LA141 镁锂合金的表面预处理及防护涂层的优化设计提供了可靠

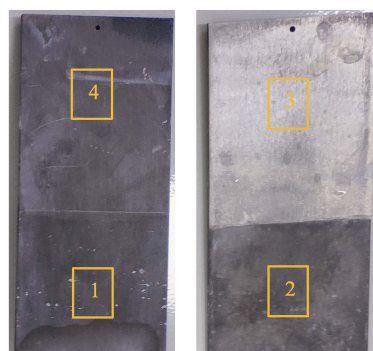
的理论依据。

1 实验

将未腐蚀的 LA141 镁锂合金以及已在空气中放置一段时间且表面形成灰黑色腐蚀膜的 LA141 镁锂合金放置于去离子水中 16 h, 让其一部分接触水, 另一部分接触空气。通过涡流测厚仪 (Qnix4500, 德国) 对腐蚀膜层厚度进行检测, 通过 SEM (Hitachi S-480 场发射扫描电子显微镜, 日本)、偏光显微镜 (DM2500P, Leica, 德国) 对不同腐蚀程度的 LA141 镁锂合金表面进行观测, 利用 Hitachi S-480 场发射扫描电子显微镜的配套 EDS 能谱分析仪、XRD (布鲁克 D8 tools X 射线衍射仪, 德国)、傅立叶变换红外光谱仪 (布鲁克 VERTEX 80/80 V, 德国) 对不同腐蚀程度的 LA141 镁锂合金的腐蚀产物进行成分分析。

2 结果及分析

未腐蚀的镁锂合金、已在空气中放置一段时间表面形成灰黑色腐蚀膜的镁锂合金 (膜层厚度约 $8.2\ \mu\text{m}$) 经 16 h 实验后, 如图 1 所示。由图可看出, 未腐蚀的镁锂合金在空气中放置 16 h 后 (区域 3), 表面已由金属亮白色变为浅灰白色, 用涡流测厚仪测试腐蚀膜层厚度, 约为 $0.76\ \mu\text{m}$; 而在水中放置 16 h 后的镁锂合金 (区域 2) 的腐蚀程度明显高于空气中的部分。在实验过程中, 当将未腐蚀的镁锂合金放入水中后, 很快可以看到有许多细密的气泡从镁锂合金表面逸出。分析认为, 这是由于镁锂合金均属于活泼的金属, 放入水中后迅速与水反应, 生成氢气的缘故。随即放置于水下的未腐蚀镁锂合金表面逐渐由亮白色变为明显的灰黑色, 细密气泡的逸出现象也逐渐减弱。分析原因, 这一方面是由于镁锂合金表面形成的腐蚀膜



a 已腐蚀的镁锂合金 b 未腐蚀的镁锂合金

图 1 两种不同状态的镁锂合金 (100 mm×50 mm 板材) 下半部分放置于水中 16 h 后的表面状态

Fig.1 The surface state of the lower half of the magnesium-lithium alloy (100 mm×50 mm sheet) in two different states after being placed in water for 16 hours: a) magnesium-lithium alloy with corrosion; b) magnesium-lithium alloy without corrosion

层在一定程度上阻碍了镁锂合金基体与水的接触, 致使接触面积减小, 反应速度减弱; 另一方面, 伴随合金表面反应, 活性高的 Li 金属元素的含量越来越低, 反应速率也会进一步减弱。16 h 后, 测得区域 2 的灰黑色膜层厚度约为 $5.6\ \mu\text{m}$ 。

已经在空气中腐蚀的镁锂合金再在空气中放置 16 h 后 (区域 4), 表面肉眼未见明显变化, 测量厚度也无明显变化, 仍约为 $8.2\ \mu\text{m}$, 这是由于已生成的较厚的腐蚀膜层有效减缓了腐蚀的进程。已经在空气中腐蚀的镁锂合金放入水中后 (区域 1), 肉眼未见明显气泡从表面逸出的现象, 推断其与区域 2 中细密气泡逸出现象逐渐减缓的原因一致。区域 1 表面腐蚀膜在水中放置 16 h 后, 颜色略有加深, 腐蚀膜层厚度变为约 $9.9\ \mu\text{m}$ 。区域 1 的腐蚀物增加量明显低于区域 2, 进一步说明已经在空气中形成的腐蚀膜层能在一定程度上抑制腐蚀的进一步发生。

为分析 LA141 镁锂合金腐蚀后的产物, 对腐蚀产物进行成分分析。首先用 SEM 对区域 1 中腐蚀程度较严重的部分进行观测, 形貌如图 2 所示, 并用 EDS 能谱对该部分进行元素分析, 如图 3 所示。

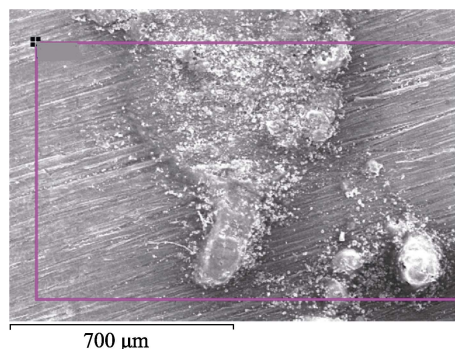


图 2 区域 1 中表面腐蚀产物 SEM 图

Fig.2 SEM image of surface corrosion products in zone 1

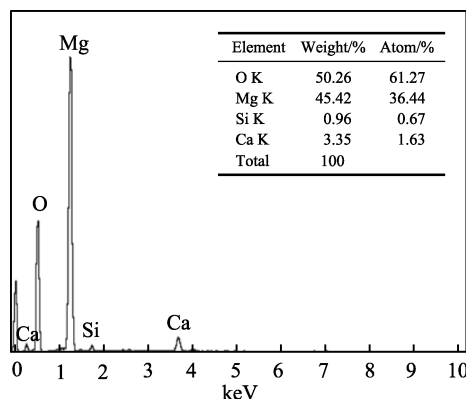


图 3 区域 1 中表面腐蚀产物 EDS 能谱

Fig.3 EDS energy spectrum of surface corrosion products in zone 1

由图 2、图 3 可知, 镁锂合金表面腐蚀产物并非均匀的膜层, 局部有凸起物, 腐蚀产物中含有大量的镁元素和氧元素, 但未检测出锂元素。这是由于锂的原子序数较低, 难以用 EDS 能谱手段将其表征出来。

因此采用 XRD 对不同腐蚀程度的镁锂合金进行分析测试。对图 1 中镁锂合金不同腐蚀程度的 1、2、3、4 区域进行 XRD 测试, 检测腐蚀产物, 测试结果如图 4 所示。

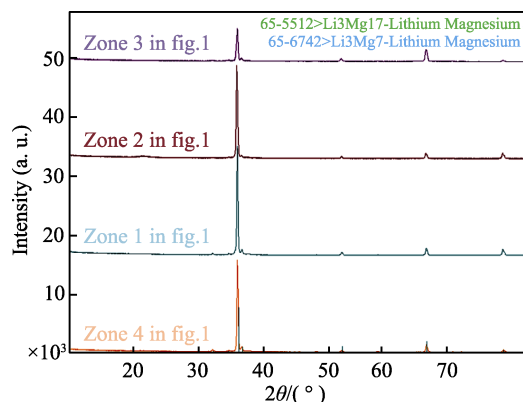


图 4 不同腐蚀程度镁锂合金 XRD 图

Fig.4 XRD patterns of magnesium-lithium alloys with different corrosion levels

测试结果显示, 不同腐蚀程度的 LA141 镁锂合金的 XRD 曲线与 LA141 镁锂合金本身的 XRD 曲线重合度较高, 未探测出明显的其他腐蚀产物的衍射峰, 这可能是由于 XRD 探测的部分腐蚀产物未能形成可探测的结晶状态。但通过肉眼可明显观测到腐蚀产物的存在, 且 SEM 和 EDS 的测试结果也表明有 O 元素的存在, 因此进一步通过偏光显微镜对图 1 中镁锂合金不同腐蚀程度的 1、2、4 区域的表面形貌进行观察, 与未明显腐蚀的亮白色镁锂合金表面的形貌 (图 5) 进行对比, 并结合红外光谱对腐蚀产物进行成分分析。

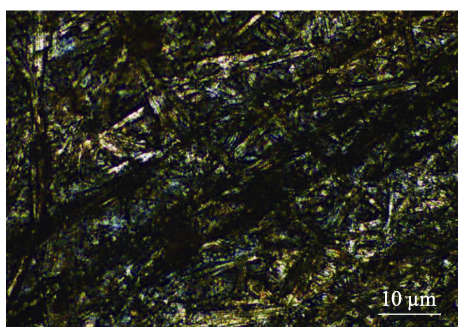


图 5 未明显腐蚀的镁锂合金表面形貌

Fig.5 Surface morphology of magnesium-lithium alloy without obvious corrosion

在偏光显微镜下对区域 4 中黑灰色腐蚀膜的表面进行观察, 可以看出相对于露出新鲜表面尚未明显腐蚀的 LA141 镁锂合金 (图 5), 其表面明显形成一层连续膜层 (图 6), 对膜层的成分进行红外分析 (图 7), 并将其与可能产生的腐蚀产物氢氧化镁、碳酸镁、氢氧化锂、碳酸锂 (图 8) 的红外谱图进行对比分析, 发现其 3695 cm^{-1} 处的峰与氢氧化镁中 3696 cm^{-1} 处

的峰吻合度较高, 867 cm^{-1} 处的峰与碳酸锂的红外光谱指纹区中 866 cm^{-1} 处的红外特征吸收峰吻合度较高, 因此推断空气中放置一段时间后的镁锂合金的黑灰色腐蚀产物为氢氧化镁和碳酸锂。

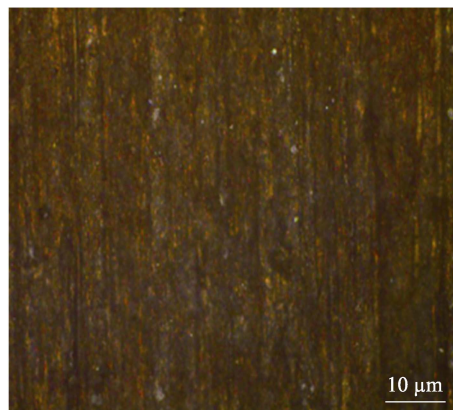


图 6 区域 4 的黑灰色腐蚀膜的表面形貌

Fig.6 Surface morphology of the black-gray corrosion film in zone 4

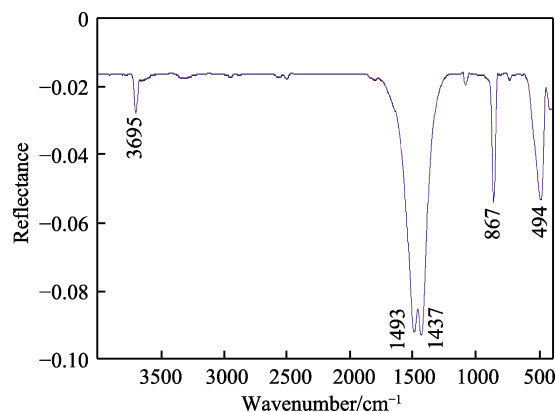


图 7 区域 4 的黑灰色腐蚀膜红外光谱图

Fig.7 Infrared spectrum of black-gray corrosion film in zone 4

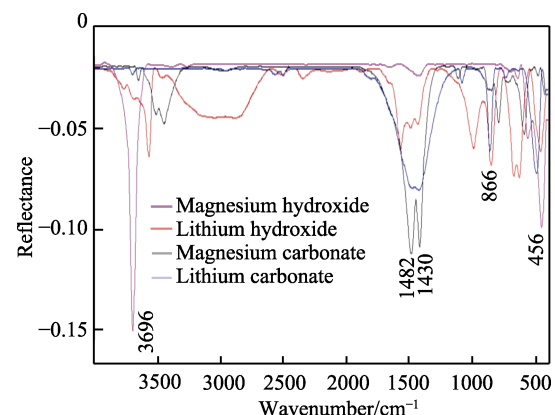


图 8 氢氧化镁、碳酸镁、氢氧化锂、碳酸锂的红外光谱图
Fig.8 Infrared spectrum of magnesium hydroxide, magnesium carbonate, lithium hydroxide and lithium carbonate

在偏光显微镜下, 区域 2 表面覆盖一层有很多凹坑的膜层 (如图 9), 同时膜层局部有明显的结晶状物质生成, 结晶状物质宏观状态下为白色颗粒。之所

以形成白色颗粒,推断是由于镁锂合金是 $\alpha(\text{Mg})$ 、 $\beta(\text{Li})$ 两相共存的合金,在两相交界处形成电偶腐蚀,两相交界处在水中形成剧烈的电化学反应,腐蚀产物大量析出,形成白色晶体颗粒。进一步对腐蚀产物进行红外分析(如图10),其结果与图8的红外谱图进行对比,推测其腐蚀产物主要也为氢氧化镁和碳酸锂。

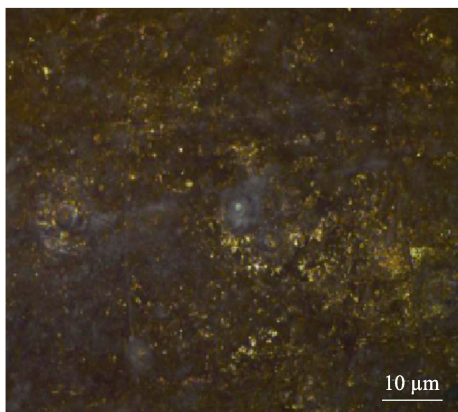


图9 区域2表面腐蚀产物外观状态

Fig.9 Appearance state of surface corrosion products in zone 2

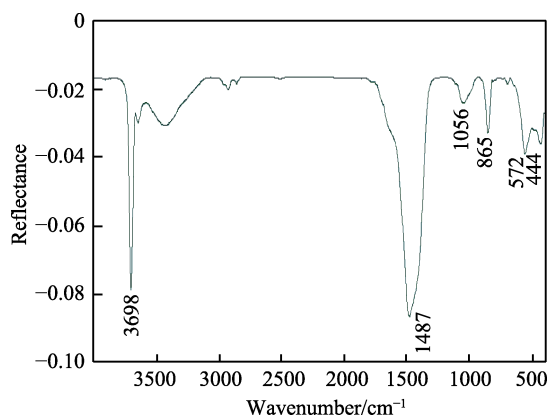


图10 区域2表面腐蚀产物红外光谱图

Fig.10 Infrared spectrum of surface corrosion products in zone 2

在偏光显微镜下,区域1表面(如图11)同样覆盖一层带凹坑的膜层,同时膜层局部有结晶状物质生成,结晶状物质相对于区域2也更多、更大。对腐蚀产物进行红外分析(如图12),通过与图8的红外谱图进行对比,推测其腐蚀产物主要也为氢氧化镁和碳酸锂。

综合以上分析的结果,推断LA141镁锂合金表面腐蚀产物主要为氢氧化镁和碳酸锂。分析腐蚀产物生成的机理为:LA141镁锂合金中的镁、锂金属均活泼性较高,且为两相结构,在水溶液中,极易在界面处发生腐蚀,产生原电池,使更活泼的金属在阳极发生失电子反应,阴极的水得到电子发生分解,不断析出氢气,加快LA141镁锂合金的腐蚀,水分解出的氢氧根与锂离子反应生成氢氧化锂,氢氧化锂又极不稳定,在与空气接触后迅速转化为碳酸锂。同时,镁金属也比较活泼,也会与氢氧根形成氢氧化镁。

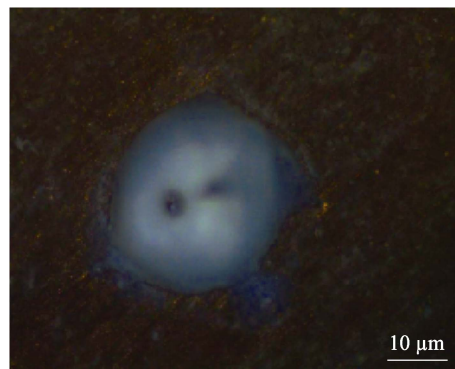


图11 区域1表面腐蚀产物外观状态

Fig.11 Appearance state of surface corrosion products in zone 1

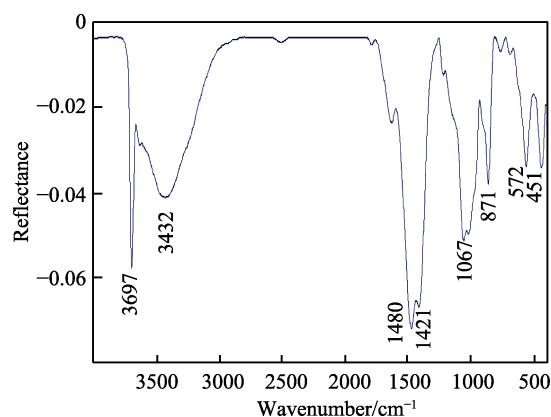


图12 区域1表面腐蚀产物红外光谱图

Fig.12 Infrared spectrum of surface corrosion products in zone 1

3 结论

1) LA141镁锂合金在空气及水中均会迅速腐蚀,锂金属优先腐蚀,同时也伴随着镁金属的腐蚀,最终生成稳定的腐蚀产物(氢氧化镁和碳酸锂)。

2) 已生成腐蚀膜层的LA141镁锂合金再放入水中,腐蚀速度会有所减缓,说明腐蚀膜层能在一定程度上减缓底部LA141镁锂合金的进一步腐蚀。

参考文献:

- [1] 冯凯,李丹明,何成旦,等. 航天用超轻镁锂合金研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(2): 140-144.
FENG Kai, LI Dan-ming, HE Cheng-dan, et al. Research progress of ultralight magnesium-lithium alloys for aerospace[J]. Special casting and nonferrous alloys, 2017, 37(2): 140-144.
- [2] 曲智坤. 镁锂合金腐蚀特性及其表面涂层制备研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
QU Zhi-kun. Research on the corrosion behaviors and the surface coating preparation for Mg-Li base alloys[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [3] YUAN X, YU D J, GAO L L, et al. Effect of phosphate-buffered solution corrosion on the ratcheting fatigue behavior of a duplex Mg-Li-Al alloy[J]. Journal of materials

- engineering and performance, 2016, 25: 1802-1810.
- [4] 孙理理, 曾一兵, 刘剑锋, 等. 欧洲运载火箭新型白色防静电涂料的发展现状[J]. 导弹与航天运载技术, 2016(2): 108-114.
SUN Li-li, ZENG Yi-bing, LIU Jian-feng, et al. Development situation of the new white antistatic coatings for European launchers[J]. Missiles and space vehicles, 2016(2): 108-114.
- [5] 袁勇, 陈辉, 胡震宇, 等. 海南发射场盐雾环境对航天器结构材料的影响[J]. 航天器环境工程, 2019(1): 65-72.
YUAN Yong, CHEN Hui, HU Zhen-yu, et al. Effects of salt fog environment in Hainan launch site on spacecraft structural materials[J]. Spacecraft environment engineering, 2019(1): 65-72.
- [6] SHARMA A K, RANI R, AFZAR M, et al. Black anodizing of a magnesium-lithium alloy[J]. Metal finishing, 1996, 94(4): 16-27.
- [7] LI J F, ZHEN Z Q, LI S C, et al. Preparation and galvanic anodizing of a Mg-Li alloy[J]. Materials science and engineering A, 2006, 433(1/2): 233-240.
- [8] LI Z J, YUAN Y, JING X Y. Effect of current density on the structure, composition and corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation coatings on Mg-Li alloy[J]. Journal of alloys and compounds, 2012, 541: 380-391.
- [9] 杨潇薇, 王桂香, 董国君, 等. 植酸对镁-锂合金阳极氧化膜的影响[J]. 电镀与环保, 2010, 30(2): 33-36.
YANG Xiao-wei, WANG Gui-xiang, DONG Guo-jun, et al. Effects of phytic acid on anodic film for Mg-Li alloy[J]. Electroplating & pollution control, 2010, 30(2): 33-36.
- [10] CHANG L M, WANG P, LIU W. Effect of amino acids on the structure and corrosion resistance of Mg-Li alloy anodic oxide film[J]. Advanced materials research, 2011, 146-147: 785-789.
- [11] 钱建才, 邹洪庆, 方敏, 等. 铝合金阳极氧化膜防护性能及失效规律研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 58-62.
QIAN Jian-cai, ZOU Hong-qing, FANG Min, et al. Protective performance and failure behavior on anodized aluminum alloy[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(3): 58-62.
- [12] ZHANG C H, HUANG X M, SHENG N, et al. A zinc dipping technique for Mg-16Li-5Al-0.5RE alloy at room temperature[J]. Materials and corrosion, 2013, 64(6): 509-515.
- [13] YIN T T, WU R Z, LENG Z, et al. The process of electroplating with Cu on the surface of Mg-Li alloy[J]. Surface & coatings technology, 2013, 225: 119-125.
- [14] CHEN D H, JIN N, CHEN W W, et al. Corrosion resistance of Ni/Cu/Ni-P triple-layered coating on Mg-Li alloy[J]. Surface & coatings technology, 2014, 254(15): 440-446.
- [15] LUO H J, SONG B N, LIU Y H, et al. Electroless Ni-P plating on Mg-Li alloy by two-step method[J]. Transactions of the Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(10): 2225-2229.
- [16] 王桂香, 王洋洋, 吴舜. 镁锂合金表面锌锰磷化膜的制备与性能表征[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(7): 1764-1768.
WANG Gui-xiang, WANG Yang-yang, WU Shun. Preparation and characterization of Zn-Mn phosphate conversion coatings on Mg-Li alloy[J]. Rare metal materials and engineering, 2014, 43(7): 1764-1768.
- [17] CHEN X J, LUO C, ZHANG Z H, et al. Preparation and anticorrosion properties of polyaniline-containing coating on Mg-Li alloy[J]. Anti-corrosion methods and materials, 2012, 59(6): 291-298.
- [18] WANG Y L, ZHUA Y H, LI C, et al. Smart epoxy coating containing Ce-MCM-22 zeolites for corrosion protection of Mg-Li alloy[J]. Applied surface science, 2016, 369: 384-389.
- [19] YU X, WANG J, ZHANG M L, et al. Synthesis characterization and anticorrosion performance of molybdate pillared hydrotalcite/in situ created ZnO composite as pigment for Mg-Li alloy protection[J]. Surface & coatings technology, 2008, 203: 250-255.
- [20] MA Y B, LI N, LI D Y, et al. A two-step surface treatment, combining fluoride pretreatment and anodic electrophoresis deposition of waterborne acrylic resin, for Mg-Li-Al-Ce alloy[J]. Materials letters, 2013, 90: 11-13.
- [21] 刘云彦, 李家峰, 张立功, 等. 镁锂合金表面阳极氧化热控膜层制备及性能[J]. 航空材料学报, 2018, 38(6): 36-42.
LIU Yun-yan, LI Jia-feng, ZHANG Li-gong, et al. Preparation and properties of anodized thermal control film on magnesium-lithium alloy surface[J]. Journal of aeronautical materials, 2018, 38(6): 36-42.
- [22] ZOU Y L, ZHANG H, WANG H T, et al. Texture evolution and their effects on the mechanical properties of duplex Mg-Li alloy[J]. Journal of alloys and compounds, 2016, 669: 72-78.
- [23] YUAN X, YU D J, GAO L L, et al. Effect of phosphate-buffered solution corrosion on the ratcheting fatigue behavior of a duplex Mg-Li-Al alloy[J]. Journal of materials engineering and performance, 2016, 25: 1802-1810.
- [24] SOMG Y W, SHAN D Y, CHEN R S, et al. Investigation of surface oxide film on magnesium lithium alloy[J]. Journal of alloys and compounds, 2009, 484: 585-590.
- [25] LV Y Z, XU Y, CAO D X. The electrochemical behaviors of Mg, Mg-Li-Al-Ce and Mg-Li-Al-Ce-Y in sodium chloride solution[J]. Journal of power sources, 2011, 196: 8809-8814.
- [26] SONG Y W, SHAN D Y, CHEN R S, et al. Corrosion characterization of Mg-8Li alloy in NaCl solution[J]. Corrosion science, 2009, 51: 1087-1094.
- [27] ZHANG C H, HUANG X M, ZHANG M L, et al. Electrochemical characterization of the corrosion of a Mg-Li alloy[J]. Materials letters, 2008, 62: 2177-2180.
- [28] ZENG R C, SUN L, ZHENG Y F, et al. Corrosion and characterisation of dual phase Mg-Li-Ca alloy in Hank's solution: The influence of microstructural features[J]. Corrosion science, 2014, 79: 69-82.
- [29] HOU L F, RAVEGGI M, CHEN X B, et al. Investigating the passivity and dissolution of a corrosion resistant Mg-33at.%Li alloy in aqueous chloride using online ICPMS[J]. Journal of the electrochemical society, 2016, 163: 324-329.
- [30] 王保杰, 姜春龙, 李传强, 等. 镁锂合金腐蚀行为研究进展[J]. 航空材料学报, 2019(1): 1-8.
WANG Bao-jie, JIANG Chun-long, LI Chuan-qiang, et al. Research progress on corrosion behavior of magnesium-lithium alloys[J]. Journal of aeronautical materials, 2019(1): 1-8.