# 铝镁双金属反向等温包覆挤压棒材耐腐蚀性能

乔及森1.2 夏宗辉1 刘立博1 许佳敏1 刘旭东1

1 兰州理工大学材料科学与工程学院 兰州 730050 2 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室 兰州 730050

**摘要**利用反向等温包覆挤压技术制备了直径38 mm的铝包覆镁合金复合挤压棒材,采用浸泡实验和电化学 工作站进行腐蚀分析,对比研究铝镁双金属反向等温挤压棒材表层、芯部及铝镁包覆结合界面层在3.5%NaCl 溶液中腐蚀前后的微观组织形貌、腐蚀失重率、极化曲线、阻抗谱等。结果表明:铝镁合金在挤压过程中发生 再结晶,包覆结合界面层析出β(Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>)相和γ(Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>)相,而未包覆挤压镁合金,在晶界处析出γ(Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>) 相。相比于未包覆状态而言,反向等温包覆挤压棒材在腐蚀过程中,包覆铝表面层更容易富集腐蚀产物形成 钝化膜抑制腐蚀进行。因此这一双金属包覆反向等温复合挤压技术有利于提高AZ31镁合金型材的耐腐蚀 性能。

关键词 2A12铝合金 AZ31镁合金 失重分析 电化学分析 腐蚀性能
 中图分类号 TG172
 文章编号 1005-4537(2021)02-0255-08

# Corrosion Resistance of Aluminum–magnesium Bimetal Composite Material Prepared by Isothermal Indirect Extrusion

QIAO Jisen<sup>1,2</sup>, XIA Zonghui<sup>1</sup>, LIU Libo<sup>1</sup>, XU Jiamin<sup>1</sup>, LIU Xudong<sup>1</sup>

 Academy of Material Science and Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China
 State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

Correspondent: QIAO Jisen, E-mail: qiaojisen@lut.cn

Supported by Joint Fund of State Key Laboratory of Nonferrous Metal Processing and Recycling (18LHPY007) Manuscript received 2020-01-22, in revised form 2020-03-01

**ABSTRACT** Extruded bi-metal rods composed of AZ31 Mg-alloy core of 30 mm in diameter and 2A12 Al-alloy cladding of 4 mm in thickness were made by isothermal indirect extrusion process. The microstructure and corrosion behavior in 3.5%NaCl solution of the cladding surface, the core AZ31 Mg-alloy and the intermediate layer of AZ31/2A12 were comparatively examined by means of optical microscopy and scanning electron microscopy, as well as mass loss method in accordance with GB10124-88, polarization curve measurement and electrochemical impedance spectroscopy. The results showed that recrystallization was happened during the indirect extrusion process for the profiles with precipitated phases of  $\beta$  (Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>) and  $\gamma$  (Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>) at the interface area of cladding 2A12/core AZ31, while only  $\gamma$  (Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>) phases were precipitated along the grain boundaries for the core AZ31 Mg-alloy without cladding. It follows that a passivation film was formed on the surface of the extruded profile with the 2A12 Al-alloy cladding during corrosion process, so that the extruded profiles could be prevented from further corrosion by the passivation film. Therefore, the research shows that the indirect co-extrusion technology is beneficial to improve the corrosion resistance of the AZ31 Mg-alloy clad with 2A12 Al-alloy.

资助项目 有色金属加工与再利用国家重点实验室联合基金 (18LHPY007)

收稿日期 2020-01-22 定稿日期 2020-03-01

作者简介 乔及森,男,1973年生,教授

**DOI** 10.11902/1005.4537.2020.018

通讯作者 乔及森, E-mail: qiaojisen@lut.cn, 研究方向为轻合金挤压及先进连接技术

21世纪是海洋世界的时代,海洋中蕴藏着丰富 的资源财富,因此海洋开发有着极其广阔的前景。 但是海洋开发面临着恶劣的海洋环境<sup>[1]</sup>。海水是一 种含盐量很高的强腐蚀性电解质溶液,海水中总盐 度约为3.2%~3.7%<sup>[2]</sup>,因此金属材料在海洋中会遭受 严重的腐蚀。目前,镁合金还难以像铝合金一样得 到广泛的应用,主要原因则是镁合金的抗腐蚀能力 达不到人们所需要的标准,尤其是变形铝镁合金较 容易发生腐蚀行为,其腐蚀形式主要有剥蚀、孔蚀、 间隙腐蚀、晶间腐蚀 (IGC) 等方式<sup>[3,4]</sup>,因此,提高镁 合金的耐腐蚀性能是目前镁合金研究领域的热点和 难点<sup>[5]</sup>。

在当前研究中,对镁合金的腐蚀防护大多采取 表面防护技术<sup>[6,7]</sup>,Liu等<sup>[8]</sup>通过研发无机类及其聚合 物等研究镁合金的表面修复技术,从而提高镁合金 的耐腐蚀性能。AramendíA等<sup>[9]</sup>通过大量的研究分 析时间对LDHs 膜层生长的规律以提高其耐腐蚀 性。Song等<sup>[10]</sup>利用化学镀Ni-Cu-P/Ni-P复合镀层提 高镁合金的耐腐蚀性能。这些对镁合金的处理都是 在生产后期进行耐腐蚀处理,增加了生产成本。本 文通过采取双金属包覆反向挤压技术获得一种新型 铝镁复合材料,并采用浸泡实验,详细研究了铝镁合 金原始铸态组织、包覆挤压型材变形组织及复合界 面层的耐腐蚀性能,通过极化曲线、电化学阻抗谱分 析,揭示铝镁复合挤压型材的腐蚀机制并提出耐腐 蚀措施。

## 1 实验方法

实验所用材料为2A12铝合金和AZ31镁合金, 化学成分如表1所示。

采用 XJ-800SF 卧式反向挤压机,挤压筒直径 Φ 125 mm,挤压坯料尺寸 Φ120 mm×300 mm,2A12 铝 合金包覆 Φ95 mm×300 mm AZ31 镁合金,挤压得 到 Φ38 mm×2690 mm 的棒材,其中 2A12 铝合金包 覆层平均厚度为4 mm,AZ31 镁合金芯材直径为 Φ 30 mm,结构如图 1c 所示。挤压速率为5.199 mm/s, 模具温度及其挤压筒温度 400 ℃,铸锭温度为

表12A12铝合金和AZ31镁合金成分 Table 1 Compositions of 2A12 Al-alloy abd AZ31 Mg-alloy

Alloy	Si	Fe	Zn	Cu	Mn	Ni	Al	Mg
2A12	0.25	0.25	0.28	4.29	0.5	0.04	Bal.	1.67
AZ31	0.05	≤0.01	0.63	≤0.02	0.7	0.05	3.247	Bal.

380 ℃,挤压比为6.25,对模具内腔及坯料表面采取 少量石墨润滑<sup>[11,12]</sup>,挤压原理及其型材见图1。对挤 压棒材成品截取中段复合材料取样,试样尺寸为 10 mm×5 mm×1 mm 薄片,对试样表面用砂纸打磨 至2000目抛光,用 Viella试剂进行晶界显示处理,同 时选取同规格对比试样、AZ31 镁合金和2A12 铝合 金进行腐蚀实验取样。

将测试样待测面在不同目数的水砂纸上细磨至 2000目至表面光滑。用异丙醇和乙醇清洗试样表 面并烘干称重,将2A12铝合金、AZ31(BS)镁合金、 AZ31(ES)镁合金、2A12/AZ31复合棒材、及其中间 界面层通过环氧树脂分别密封五个面,裸露一个面, 在室温状态下浸入到3.5%(质量分数)NaCl溶液 中,腐蚀时间分别为12,24,36,60,84,120和168h, 每一时间段结束后,将试样取出,分别用去离子水、 异丙醇、乙醇在超声中清洗,并用热风吹干,通过腐 蚀速率评价耐腐蚀性。腐蚀速率计算方法如下式<sup>[13]</sup> 所示:

$$V = \frac{(W_1 - W_2)}{s \times t} \tag{1}$$

其中,V为样品的腐蚀速率, $g/(m\cdoth)$ ; $w_1$ 和 $w_2$ 分别为 试样浸泡腐蚀前后的质量变化,g;s为待测式样的比 表面积, $mm^2$ ;t为相对浸泡时间,h。

电化学实验在 CHI760E 电化学工作站上完成, 应用三电极体系,参比电极为甘汞电极,辅助电极为 铂电极,待测试件为工作电极。测试样品工作面为 10 mm×5 mm,电位扫描范围为-2~0 V,试样浸泡在 室温 (25 °C) 状态下的腐蚀介质为 3.5% NaCl 溶液 中,电极试样的极化曲线数据采用 Origin 软件作图。 将待测试件 2A12 铝合金、AZ31(BS) 镁合金、AZ31 (ES) 镁合金、ZA12/AZ31 合金、及其中间界面层的 六个面在砂纸上进行细磨至表面光滑平整,然后用 无水乙醇清洗试样表面,然后烘干,并用环氧树脂包 覆五个面,剩余一个面裸露在空气中。在 3.5% NaCl 溶液中,对5组试样进行电化学测试,分析 TAFEL 曲 线及其电化学阻抗谱 (EIS),频率测试范围为 10<sup>5</sup>~

# 2 结果与讨论

#### 2.1 挤压制品宏观形貌及其实验材料取样

图 1a 为挤压棒材原理宏观示意图;铸态 AZ31 (BS) 镁合金在偏离中心处取样,如图 1b 所示;包覆 样品 2A12/AZ31 取样如图 1c 所示;中间界面层及其



图1挤压模型示意图及其挤压棒料宏观图

Fig.1 Schematic diagram of extrusion model and macro view of extruded bar (a), AZ31(BS) Mg-alloy experimental material (b), 2A12 Al-alloy coated with AZ31 Mg-alloy, AZ31(ES) Mg-alloy and interface layer (d)

挤压后取样 (AZ31(ES) 镁合金) 如图1d所示。

#### 2.2 腐蚀前后微观形貌

图2和3为腐蚀前后的微观形貌。AZ31镁合金 微观组织主要由 $\alpha$  (Mg) 基体和 $\gamma$  (Mg, Al, ) 析出相组 成。在2A12铝合金中基体 $\alpha$ (Al)相和析出相CuAl, 占据在晶界处,对于铝镁复合棒材而言,在偏镁侧大量 富集 $\gamma$  (Mg<sub>17</sub>Al<sub>1</sub>)相,而在偏铝侧大量富集 $\beta$  (Al<sub>4</sub>Mg<sub>2</sub>) 相14. 腐蚀前后材料微观形貌变化较为明显,基态 镁合金的腐蚀最为严重,晶界处被大片腐蚀产物 (Mg(OH),) 覆盖,挤压态相比于基态而言腐蚀较为 缓慢,究其原因可能是挤压造成晶粒细化,且大量中 间相y(Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>)、MnAl相汇集在晶界处,抑制了腐 蚀的进程。而包覆 AZ31 镁合金表面的 2A12 铝合金 由于表面氧化膜的存在,对2A12铝合金的晶界起到 保护作用,腐蚀产物(Al(OH),)汇集在铝合金表面, 其内部未造成严重的腐蚀。研究挤压复合界面层处 腐蚀变化,发现靠近富镁相一侧腐蚀较为严重,一方 面可能是由于挤压过程界面结合层处缺陷存在,另 一原因可能是由于AZ31镁合金耐腐蚀性能较低; 界面层腐蚀进展缓慢,检测到 $\beta$  (Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>) 相和 $\gamma$ (Mg17Al12) 相大量存在<sup>[15]</sup>,说明β相和γ相的存在对腐 蚀进程有明显抑制效果。

#### 2.3 失重率及其腐蚀动力学规律研究

在浸泡腐蚀过程中,对各试样的腐蚀速率测量 并绘制腐蚀速率曲线(如图4所示)及其腐蚀动力学 规律(见表2)。以铸态AZ31镁合金和2A12铝合金 作为对比研究材料,研究AZ31(ES) 镁合金挤压态、 2A12铝合金包覆 AZ31 镁合金、及其界面处的耐腐 蚀速率,研究发现,相较于基态而言,AZ31(ES) 镁合 金腐蚀失重率减缓,究其原因是由于在挤压过程中, AZ31 镁合金中的β相 (Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>) 弥散颗粒分布在晶 界116,在热挤压制备铝镁包覆棒材过程中,这些颗粒 能够阻止晶界的迁移造成晶粒再结晶,并产生细小 的微观结构,导致晶粒细化,而且在镁合金腐蚀进程 中,β相属于阴极相,在腐蚀环境下表现出很好的钝 化行为,当拥有阳极性质的α相 (Mg的固溶体) 在腐 蚀溶解时, $\beta$ 相的存在很好地抑制腐蚀的进行。然 而当2A12铝合金包覆AZ31镁合金时,2A12铝合金 表面形成的氧化膜发挥明显保护作用,隔离了AZ31 镁合金与3.5%NaCl溶液的接触。包覆材料腐蚀速 率与2A12铝合金的差异性不是非常明显,但由动力 学规律发现线性拟合差异性较大,分析其原因可能 是因为包覆挤压导致外包铝合金表面流动性较大导 致平整度低,在腐蚀过程中Cl优先腐蚀表面凹面,



图2实验材料微观形貌观察

**Fig.2** Microstructure morphologies of experimental materials: (a) AZ31(BS) Mg-alloy micro-region morphology, (b) AZ31(ES) Mg-alloy micro-region morphology, (c) 2A12/AZ31-coated 2A12 Alalloy side micro-region morphology, (d) micro-morphology of the interface layer



图3在3.5%NaCl溶液中材料腐蚀后的微观形貌观察

**Fig.3** Microstructure observation of the material after corrosion in 3.5%NaCl solution: (a) corrosion morphology of AZ31(BS) Mg-alloy micro area, (b) corrosion morphology of AZ31(ES) Mg-alloy micro area, (c) corrosion morphology of 2A12/AZ31 coated microarea on 2A12 Al-alloy side, (d) micro-area corrosion morphology at the interface layer

加速腐蚀的进行,但在后期由于铝合金氧化膜的存 在抑制了腐蚀的进行,导致腐蚀缓慢,与2A12铝合 金铸态相同。对包覆界面层进行腐蚀研究,发现界 面层 (Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>)的腐蚀速率介于 AZ31(ES) 镁合金 和2A12/AZ31包覆棒材之间,而且腐蚀速率线性拟 合度较高,说明界面层的腐蚀速率稳定且相较于 AZ31(ES) 镁合金而言较耐腐蚀,这与 Mathieu 等<sup>171</sup> 研究的结果相符合。由失重率曲线及其腐蚀动力学 规律可以发现,镁合金受到铝合金的保护,从而使得 镁合金的合金性能得以完美的保护,表明 2A12/ AZ31包覆挤压对于提高镁合金的耐腐蚀性能作用 明显。

#### 2.4 电化学腐蚀研究结果

2.4.1 开路电位扫描及其极化曲线 如表3所示,除了AZ31(BS) 镁合金材料外,其余材料在腐蚀后的开路电位比没有腐蚀(初始状态)要正得多,在未腐蚀前,铝合金包覆镁合金与铝合金的开路电位相差不大,说明包覆对保护镁合金有很好的防护作用。而界面层的开路电位与挤压态的镁合金相比,差距不大,可能是由于复合过程中界面层富集中间相,而挤压态的镁合金由于产生晶粒细化,造成晶间处富集铝镁中间相,具有比较好的耐腐蚀性能,而原



图4材料在3.5%NaCl溶液中的质量损失与时间的关系 Fig.4 Mass loss vs time for the materials immersed in 3.5%NaCl solution

表23.5%NaCl溶液中材料的动力学规律				
Table 2 Kinetic laws of the materials immersed in	3.5%			
NaCl solution				

Material	Kinetic law: $y=b\times t$	$y / \text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$	<i>t /</i> h
2A12	y=2×10 <sup>-5</sup> x+0.0003	0≤ <i>t</i> ≤168	r <sup>2</sup> =0.9479
AZ31(BS)	y=8×10 <sup>-5</sup> x+0.0033	0≤ <i>t</i> ≤168	$r^2 = 0.4562$
AZ31(ES)	$y=5\times10^{-5}x+0.0074$	0≤ <i>t</i> ≤168	$r^2 = 0.7104$
2A12/AZ31	y=2×10 <sup>-5</sup> x+0.0001	0≤ <i>t</i> ≤168	$r^2 = 0.8751$
Interface layer	$y=3\times10^{-5}x+0.0023$	0≤ <i>t</i> ≤168	r <sup>2</sup> =0.97

始状态的镁合金其开路电位处于最负状态,说明其 表面的氧化膜的保护性能非常差。在腐蚀7d后,整 体开路电位正移,其热力学状态与原始状态相比稳 定性都有所提升。但是原始状态AZ31镁合金的开 路电位正移不明显,这是由于镁合金是一种活泼的 金属,在空气中易形成保护性氧化膜,但是此时的氧 化膜在晶间或者孔隙处并不是完整、均匀的,具有较 高的吉布斯自由能,造成热力学行为稳定性较差;而 挤压态和界面层的热力学稳定性有很大的提升是由 于腐蚀产物大量堆积在晶间或者晶体缺陷处,抑制 了材料的腐蚀进度,从而提高热力学稳定性,这与文 献<sup>1181</sup>结论一致。2A12铝合金及2A12/AZ31是由于 铝合金表面致密的氧化膜阻碍了腐蚀进程。

图5和6为5组材料在3.5%NaCl介质中腐蚀前后的动电位极化曲线。图中的参数分别为Tafel斜率、腐蚀电位、腐蚀电流等化学参数。由图5可见,在腐蚀电流不变的情况下,相比于其他材料而言,2A12铝合金试样的自腐蚀电位(*E*<sub>cor</sub>)处于最大状态,包覆状态下的自腐蚀电位次之,中间相的自腐蚀电位居中,而AZ31镁合金的自腐蚀电位在基态和挤压态下变化趋势差异不明显,表明2A12铝合金在热力学行为呈现出更加稳定的状态,而铝镁包覆状

表3 材料在3.5%NaCl溶液中腐蚀前后的开路电位 Table 3 Open circuit potential of materials before and after corrosion in 3.5%NaCl solution

<b>X</b> 7	Л
v	,

Material	Before corrosion	After corrosion
2A12	-0.9731	-0.1742
2A12/AZ31	-1.039	-0.2789
Intreface layer	-1.570	-0.5639
AZ31(ES)	-1.591	-0.7169
AZ31(BS)	-1.600	-1.498









态与其偏差较小,说明铝合金包覆镁合金的效果相 比于不包覆而言抗腐蚀性能提高较明显。而挤压态 和基态在刚开始腐蚀时几乎是一致的,这是由挤压 状态和基态在初始状态下的热力学性能稳定所导 致<sup>119]</sup>。同时发现,腐蚀前电极腐蚀电流密度处于同 一数量级上,因此,此图表明了2A12铝合金包覆 AZ31镁合金对NaCl溶液具有很好的抗腐蚀作用, AZ31镁合金在裸露状态下耐腐蚀能力最差。

由图6所示,在腐蚀7d后,对材料再次进行电 化学测量,发现各种状态的材料变化趋势与腐蚀前 的测量状态是一致的,但是在腐蚀后与腐蚀前相比 较,除了AZ31(BS) 镁合金外,腐蚀电位整体正向移 动,表明在热力学状态下材料耐腐蚀性能明显提高, 同时发现,电极腐蚀电流密度相比于刚开始腐蚀降 低了几个数量级,尤其是2A12铝合金及2A12/AZ31 包覆状态降低更为明显,这是因为2A12铝合金表面 形成的氧化膜对合金在烟雾状态下有更为明显的隔 离作用,使得腐蚀速率变慢更为明显,但AZ31(BS) 镁合金的腐蚀速率也有所降低,这可能是因为AZ31 (BS) 镁合金耐腐蚀性能较差,导致腐蚀产物大量堆 积在界面修复了破裂的氧化膜,使得保护膜的保护 能力有所增强,腐蚀速率变小。这种结果与失重法 得到的结果一致。

2.4.2 电化学阻抗谱分析 图7和8是材料在 3.5%NaCl介质溶液中腐蚀前后的Nyquist图可以看 出,在刚开始腐蚀的时候,2A12铝合金和2A12/ AZ31包覆合金棒材的Nyquist图表现为一个容抗 弧,随着腐蚀的开始,表现出半无限扩散状态,呈现 出典型的Warburg阻抗直线,而中间界面层、AZ31 (BS)和AZ31(ES)镁合金呈现阻挡扩散层,在经过7 d的腐蚀后,2A12/AZ31包覆合金棒材和2A12铝合 金呈现出半无限扩散状态,中间界面层呈现出有限







图 8 材料在 3.5% NaCl 溶液腐蚀 7 d 后中的 Nyquist 图 Fig.8 Nyquist plot of materials after corrosion in 3.5% NaCl solution for 7 d

层扩散,而AZ31(ES)和AZ31(BS)镁合金继续呈现 出阻挡扩散层,出现这些现象的原因可能是,呈现半 无限扩散状态是由于扩散通道完全被打通;呈现有 限层扩散,可能是由于CI不断溶解表面氧化膜,不 断打通氧化膜的扩散通道,从而引起有限层的扩散; 当呈现阻挡层扩散时,是因为腐蚀产物大量堆积<sup>[20]</sup>, 填满通道阻碍粒子传输<sup>[21]</sup>,表现出晶间腐蚀状态 特征。

图9和10分别为腐蚀前后材料在3.5%NaCl介 质中的电化学阻抗谱Bode图。可以看出,中高频容 抗弧对应于原始氧化膜界面,而中低频容抗弧则对 应点蚀过程,其过程可能与腐蚀反应相关<sup>[22]</sup>,低频区 出现感抗弧可能是因为在点腐蚀开始时膜表面出现 自我修复状态,而在高频区出现感抗弧是由于腐蚀 产物累积有关<sup>[22]</sup>。在刚开始腐蚀时模值较高,而腐 蚀7d后,模值有所延缓,分析原因可能是腐蚀后期 腐蚀产物大量累积修补了Cl破坏的保护膜,反而使







**图 10** 材料在 3.5%NaCl溶液腐蚀 7 d 后的 Bode 图 Fig.10 θ~lgf (a) and lg|Z|~lgf (b) diagram of materials after corrosion in 3.5%NaCl solution for 7 d

得耐腐蚀性能有所增强,但相对于整体而言,包覆后的棒材相对于未做任何保护的镁合金而言耐腐蚀性能明显提高。

## 3 结论

(1) 基于失重实验及其微观组织分析,发现 AZ31(BS) 镁合金的腐蚀速率较快,腐蚀一个周期时 表面被大块状的腐蚀产物覆盖,AZ31(ES) 镁合金因 为析出相的存在,抑制腐蚀进程,腐蚀产物分布较为 均匀。

(2)相比于未包覆状态,反向等温挤压后的铝镁 复合棒材耐腐蚀性能得到明显提高,耐腐蚀性能分 别为2A12铝合金>2A12/AZ31>界面层>AZ31 (ES)镁合金>AZ31(BS)镁合金。

#### 参考文献

- Natesan M, Selvaraj S, Manickam T, et al. Corrosion behavior of metals and alloys in marine-industrial environment [J]. Sci. Technol. Adv. Mater., 2008, 9: 045002
- [2] Chen J, Li Q A, Zhang Q, et al. Effect of corrosion on wear resistance of several metals in seawater [J]. Trans. Mater. Heat Treat., 2014, 35: 1661

(陈君,李全安,张清等.海水腐蚀对几种金属材料耐磨性能的影响[J].材料热处理学报,2014,35:166)

- [3] Chen W K, Bai C Y, Liu C M, et al. The effect of chromic sulfate concentration and immersion time on the structures and anticorrosive performance of the Cr(III) conversion coatings on aluminum alloys [J]. Appl. Surf. Sci., 2010, 256: 4924
- [4] Su J X, Zhang Z, Cao F H, et al. Review on the intergranular corrosion and exfoliation corrosion of aluminum alloys [J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2005, 25: 187

(苏景新,张昭,曹发和等. 铝合金的晶间腐蚀与剥蚀 [J]. 中国腐 蚀与防护学报, 2005, 25: 187)

- [5] Zhang Y J, Yan C W, Wang F H, et al. Study on the environmentally friendly anodizing of AZ91D magnesium alloy [J]. Surf. Coat. Technol., 2002, 161: 36
- [6] Lin R, Liu Z H, Wang F, et al. Development of corrosion surface modification technology for magnesium alloys [J]. Surf. Technol., 2016, 45(4): 124
  (林锐, 刘朝辉, 王飞等. 镁合金表面改性技术现状研究 [J]. 表面 技术, 2016, 45(4): 124)
- [7] Wang J F. Preface to the topic "Corrosion and Protection of Magnesium Alloys" [J]. Surf. Technol., 2019, 48(3): 14
  (王敬丰."镁合金腐蚀与防护"专题前言 [J]. 表面技术, 2019, 48 (3): 13)
- [8] Liu L J, Li P P, Zou Y H, et al. In vitro corrosion and antibacterial

performance of polysiloxane and poly (acrylic acid) /gentamicin sulfate composite coatings on AZ31 alloy [J]. Surf. Coat. Technol., 2016, 291: 7

- [9] AramendíA M A, Borau V, Jiménez C, et al. Catalytic transfer hydrogenation of citral on calcined layered double hydroxides [J]. Appl. Catal., 2001, 206A: 95
- [10] Song Y W, Shan D Y, Chen R S, et al. Study on electroless Ni-P-ZrO<sub>2</sub> composite coatings on AZ91D magnesium alloys [J]. Surf. Eng., 2007, 23(5): 334
- [11] Zhang Y Y, Qiao J S. Study on isothermal extrusion process and material flow characteristics of Al/Mg bimetal [J]. Hot Work. Technol., 2018, 47(21): 154

(张阳羊,乔及森.Al/Mg双金属等温挤压过程与材料流动特性研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(21): 154)

 [12] Qiao J S, Nie S C, Zhang H, et al. Microstructure and mechanical properties of interfaces of extruded cladding Mg-Al rods [J]. Chin.
 J. Rare Met., 2015, 39: 481

(乔及森,聂书才,张涵等.铝镁包覆挤压材料界面微观组织与力 学性能研究[J].稀有金属,2015,39:481)

- [13] Frasch-Melnik S, Spyropoulos F, Norton I T. W<sub>1</sub>/O/W<sub>2</sub> double emulsions stabilised by fat crystals-Formulation, stability and salt release [J]. J. Colloid Interface Sci., 2010, 350: 178
- [14] Qiao J S, Su Y Q, Zhang Y Y, et al. Microstructures evolution of Mg-Al composite bar made by indirect isothermal co-extrusion process [J]. J. Plast. Eng., 2019, 26(1): 188
  (乔及森, 苏泳全, 张羊阳等. 铝镁双金属复合棒材反向等温挤压 微观组织演化机理 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26(1): 188)

- [15] Qiao J S, Xiang Y Z, Nie S C, et al. Compound extrusion forming and interface microstructure of Al/Mg dissimilar metal [J]. J. Mater. Eng., 2017, 45(11): 78
  (乔及森,向阳芷,聂书才等. 铝镁异种金属复合挤压成形及界面 微观组织 [J]. 材料工程, 2017, 45(11): 78)
- [16] Xu Y, Fu S P, Ding F Z. A study on corrosion inhibitor for magnesium alloy [J]. Mater. Sci. Forum, 2009, 610-613: 920
- [17] Mathieu S, Rapin C, Steinmetz J, et al. A corrosion study of the main constituent phases of AZ91 magnesium alloys [J]. Corros. Sci., 2003, 45: 2741
- [18] Scharifker B, Hills G. Theoretical and experimental studies of multiple nucleation [J]. Electrochim. Acta, 1983, 28: 879
- [19] Wu L, Pan F S, Liu Y H, et al. Influence of pH on the growth behaviour of Mg-Al LDH films [J]. Surf. Eng., 2018, 34: 674
- [20] Breslin C B, Rudd A L. Activation of pure Al in an indium-containing electrolyte-an electrochemical noise and impedance study [J]. Corros. Sci., 2000, 42: 1023
- [21] Hu J M, Zhang J Q, Xie D M, et al. Water transport in organic coatings I: fickian diffusion [J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2002, 22: 311
  (胡吉明,张鉴清,谢德明等.水在有机涂层中的传输: I Fick扩散

过程 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 22: 311)

- [22] Zhang J Q, Cao C N. Study and evaluation on organic coatings by electrochemical impedance spectroscopy [J]. Corros. Prot., 1998, 19(3): 99
  - (张鉴清, 曹楚南. 电化学阻抗谱方法研究评价有机涂层 [J]. 腐 蚀与防护, 1998, 19(3): 99)

(责任编辑:王革)