

## 镁合金微弧氧化膜层退除工艺

李锦妍, 郝建民, 陈永楠, 陈宏

(长安大学 材料表面强化研究所, 西安 710061)

**摘要:**目的 提出一种镁合金微弧氧化膜层的退除工艺,提高镁合金的二次利用率。方法 以硝酸、氟化钾、柠檬酸、十二烷基苯磺酸钠(SDBS)及缓蚀剂为组分配制退膜液,设计正交试验,以退除速率、表面粗糙度作为评判标准,优化退膜液配方。分析退膜液中各组分的作用,研究退膜过程中退膜量与时间的关系,讨论膜层厚度与腐蚀率、表面粗糙度的关系。采用优化的退膜液对镁合金微弧氧化膜层进行退除,观察表面宏观及微观形貌。结果 退膜液各组分针对退膜速率和退膜后镁合金基体表面粗糙度的极差由大到小均依次为: $R_{\text{硝酸}} > R_{\text{氟化钾}} > R_{\text{柠檬酸}} > R_{\text{SDBS}} > R_{\text{缓蚀剂}}$ 。对退膜速率和表面粗糙度影响最大的是硝酸浓度,其次是氟化钾浓度,柠檬酸、SDBS及缓蚀剂浓度的影响最小。在整个退膜过程中,膜层退除量与退膜时间并不呈线性关系。退膜开始阶段及完成阶段,膜层退除量大,退膜速率高;退膜中期,膜层退除量与退膜时间基本呈线性关系,且退膜速率小于初始退膜速率。XRD分析显示,退膜后的镁合金表面无残余腐蚀产物。二次微弧氧化膜层的SEM图像显示,微孔结构致密,分布均匀,与一次微弧氧化的膜层无明显差别。结论 镁合金微弧氧化膜层退除液的最佳配方为:硝酸90 mL/L,柠檬酸8 g/L,氟化钾35 g/L,十二烷基苯磺酸钠5 g/L,缓蚀剂6.5 g/L。该退膜液退膜效果良好,对镁合金基体损伤小,退膜速率快,成本低廉,可用于不合格镁合金零部件微弧氧化膜层的多次退除返修。

**关键词:** 镁合金;微弧氧化;退膜;缓蚀剂;硝酸;氟化钾

**中图分类号:** TG174.45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)10-0027-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.10.005

## Stripping Process of the Magnesium Alloy Micro-arc Oxidation Coating

LI Jin-yan, HAO Jian-min, CHEN Yong-nan, CHEN Hong

(Institute of Material Surface Strengthening, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To propose a stripping process of the magnesium alloy micro-arc oxidation coating, so as to improve the reutilization of the magnesium alloy. **Methods** The chemical solutions which contained nitrate acid, potassium fluoride, citric acid, SDBS and corrosion inhibitor was used to strip of the coating, and the orthogonal experiment was designed to optimize the formulation of the coating stripping solution, using the stripping rate and surface roughness and the judgment criteria. The role of each component in the coating stripping solution was analyzed. The relationship between the weight loss and time during the stripping process, and the relationship of coating thickness with corrosion rate and roughness were discussed. The optimized coating stripping

收稿日期: 2015-05-22; 修订日期: 2015-07-09

Received: 2015-05-22; Revised: 2015-07-09

作者简介: 李锦妍(1990—),女,陕西人,硕士研究生,主要研究材料表面加工。

**Biography:** LI Jin-yan(1990—), Female, from Shaanxi, Master graduate student, Research focus: material surface processing research.

通讯作者: 郝建民(1962—),男,山西人,教授,主要从事材料表面加工的研究。

**Corresponding author:** HAO Jian-min(1962—), Male, from Shanxi, Professor, Research focus: material surface processing research.

solution was then used to strip the magnesium alloy micro-arc oxidation coating, and the macro- and microstructure of the surface was observed. **Results** The extreme difference of the chemical reagents on the stripping rate and surface roughness of the magnesium alloy substrate after stripping was in the order of  $R_{\text{nitrate acid}} > R_{\text{KF}} > R_{\text{citric acid}} > R_{\text{SDBS}} > R_{\text{corrosion inhibitor}}$ , indicating that the concentration of nitrate acid had the biggest effect on the stripping rate and surface roughness, followed by the concentration of potassium fluoride, and the concentrations of citric acid, SDBS and corrosion inhibitor had the least effect. During the whole process, the weight loss and the time did not have a linear relationship. The weight loss and the stripping rate were high in the beginning and at the end of the process, while in the middle of the process the weight loss and the time had a linear relationship, with a stripping rate lower the initial stripping rate. There were no corrosion products on the surface of the magnesium alloy according to the XRD pattern. As shown by SEM, the pores in the layer after the second micro-arc oxidation treatment on magnesium alloy were compact and uniform, which had no obvious difference with the coating after the first treatment. **Conclusion** The best composition of the stripping solution for of the magnesium alloy micro-arc oxidation coating was nitric acid 90 mL/L, citric acid 8 g/L, potassium fluoride 35 g/L, dodecyl benzene sulfonic acid sodium 5 g/L, and corrosion inhibitor 6.5 g/L. This solution led to good stripping of the magnesium alloy arc oxidation coating, causing little damage to the magnesium alloy substrate, and with high stripping rate and low cost. It can therefore be use to repeatedly strip and repair the unqualified magnesium alloy parts covered with the micro-arc oxide coating.

**KEY WORDS:** magnesium alloy; micro-arc oxidation; stripping of the coating; corrosion inhibitor; nitrate; potassium fluoride

镁合金密度小,比强度高,物理性能优越,广泛应用于机械、电子及航空航天等工业领域。为了改善镁合金的表面性能,化学转化、化学氧化、阳极氧化、等离子喷涂、表面渗层、金属涂层、激光表面处理、有机涂层、微弧氧化等表面处理技术陆续出现。其中,微弧氧化技术以工艺过程绿色环保,膜层性能优异,处理性价比高等优势,得到了快速发展<sup>[1]</sup>。微弧氧化是镁合金表面处理中的一种重要方法,微弧氧化后,膜层与基体结合紧密,尺寸变化小,镁合金的耐蚀性及耐磨性都能得到很大程度的提高。但是,在微弧氧化的过程中常出现膜层不符合要求的情况,为了提高镁合金的二次利用率,退除不合格微弧氧化膜层的研究显得十分必要。

目前关于镁合金表面处理前酸洗工艺的研究较为成熟<sup>[2-9]</sup>,酸洗液的主要成分有铬酸酐<sup>[2-3]</sup>、磷酸<sup>[4-7]</sup>、硝酸<sup>[8-9]</sup>等,对镁合金的腐蚀及缓蚀剂研究也较为普遍<sup>[10-13]</sup>。借鉴镁合金酸洗工艺及缓蚀剂的研究成果,文中通过实验探索,提出了一种退除镁合金微弧氧化膜层的工艺。

## 1 实验

所用试剂包括 65% ~ 68% (质量分数) 硝酸、氟化钾、柠檬酸、十二烷基苯磺酸钠 (SDBS) 及缓蚀剂等,均为分析纯。试样采用 AZ91D 镁合金,尺寸为 20 mm × 20 mm × 2 mm。微弧氧化时间为 15 ~ 28 min,膜层厚度为 15 ~ 36 μm,膜厚用 DT-156 型磁力测厚仪测定。

按配方配制一定量的退膜液,恒温至固定温度。取试样置于退膜液中,用秒表开始计时,微弧氧化膜

层退除后,停止计时,取出试样并水洗、烘干。

根据公式(1)和(2)计算退膜速率、膜层退除量:

$$v = \frac{\delta}{t} \quad (1)$$

$$M = \frac{m_1 - m_0}{A} \quad (2)$$

(1)式中: $v$  为退膜速率,单位 μm/h; $\delta$  为膜层厚度,单位 μm; $t$  为退膜时间,单位 h。(2)式中: $M$  为膜层退除量,单位 g/m<sup>2</sup>; $m_1$  为微弧氧化试样的质量,单位 g; $m_0$  为退膜一段时间后的试样质量,单位 g; $A$  为试样总表面积,单位 m<sup>2</sup>。

退膜液配方优化采用五因素四水平正交实验,以退除速率、表面粗糙度作为评判标准,因素与水平表见表 1。

表 1 正交实验因素水平表

Tab.1 Factors and levels in the orthogonal experiment

水平	因素 A 硝酸/ (mL·L <sup>-1</sup> )	因素 B 柠檬酸/ (g·L <sup>-1</sup> )	因素 C 氟化钾/ (g·L <sup>-1</sup> )	因素 D SDBS/ (g·L <sup>-1</sup> )	因素 E 缓蚀剂/ (g·L <sup>-1</sup> )
1	30	4	15	1	3.5
2	60	8	25	3	5.0
3	90	12	35	5	6.5
4	120	16	45	7	8.0

## 2 结果与讨论

### 2.1 极差分析与最优配方确定

配方中,硝酸为主退膜剂,柠檬酸为辅助酸性退

膜剂,氟化钾提供阴离子保护镁基体,SDBS 和缓蚀剂协同作用保护基体。在正交实验中,膜层退除速率和退膜后镁合金基体表面粗糙度的极差分析如图 1 和图 2 所示。可以看出,对于退膜速率和表面粗糙度,均有  $R_A > R_C > R_B > R_E > R_D$ ,即对退膜速率和表面粗糙度影响最大的是硝酸的浓度,其次是氟化钾的浓度,柠檬酸、SDBS 及缓蚀剂的影响再次之。

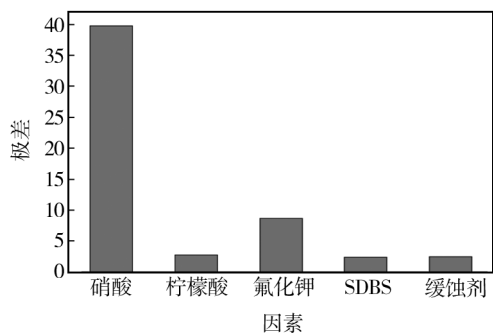


图1 因素对退膜速率影响的极差分析

Fig. 1 Extreme difference analysis of factors on the stripping rate

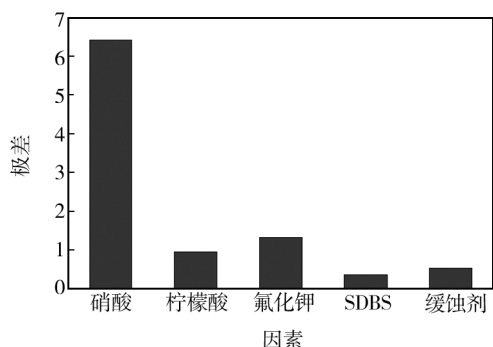
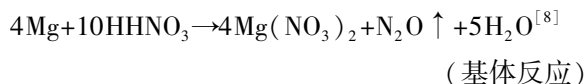


图2 因素对表面粗糙度影响的极差分析

Fig. 2 Extreme difference analysis of factors on the surface roughness

镁合金微弧氧化膜层由疏松层和致密层两部分组成。将镁合金微弧氧化样品放入退膜液中后,部分酸试剂会由疏松层的孔洞快速反应,如果酸试剂对膜层的退除能力较差,则容易引起镁合金点蚀,退除能力越差,基体的点蚀情况越严重,使得基体表面越不平整。经过大量实验探索,确定硝酸为主退膜剂,在退膜过程中发生如下反应:



使用硝酸退膜过程中,由于硝酸浓度低,不会产生黄烟及污染气体,并且硝酸侵蚀是一种均匀的无选择性腐蚀,相比于其他酸性试剂,对微弧氧化膜的退

除能力强,速率快。根据正交实验可知,随着硝酸浓度的增加,膜层的退除速率增大。当硝酸浓度过低时,退膜液无法快速退除微弧氧化膜层,长时间的浸泡使退膜液选择性地通过孔洞反应与基体接触,导致膜层退除不均匀,基体受到严重侵蚀;当硝酸浓度过高时,退膜液会破坏缓蚀剂对镁基体形成的保护层,从而腐蚀基体,使退膜效果变差。硝酸的最佳用量为 90 mL/L,在缓蚀剂的共同作用下,退膜后的镁合金基体平整光滑。

柠檬酸是有机三元羧酸,对环境的污染小,在退膜液中配合硝酸清理膜层中的金属氧化物。柠檬酸分子中含有 3 个可离解的羧基与 1 个羟基,属于多配位体<sup>[14]</sup>。在酸性溶液中,柠檬酸和柠檬酸根与  $\text{Mg}^{2+}$  形成稳定的螯合物,吸附在镁合金基体表面,同时达到缓蚀效果。经过多次实验,确定柠檬酸最佳用量为 8 g/L。

氟化钾在退膜液中电离出  $\text{F}^-$ ,当退膜液接触到基体时,游离的  $\text{F}^-$  与镁合金表面被酸浸蚀产生的  $\text{Mg}^{2+}$  发生如下反应:  $2\text{F}^- + \text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{MgF}_2 \downarrow$ 。 $\text{MgF}_2$  为极难溶的物质,通过原位生成作用沉积于基体表面<sup>[15]</sup>,可以减缓退膜液对基体的侵蚀,起到良好的保护作用。在退膜过程中,当溶液电离出的  $\text{F}^-$  较少时,与  $\text{Mg}^{2+}$  结合的数量不足,暴露在退膜液中的镁基体不能充分覆盖  $\text{MgF}_2$  保护膜,易遭受腐蚀;当游离  $\text{F}^-$  过多时,生成的过量  $\text{MgF}_2$  难溶物会沉积在膜层之中,使退膜进行困难。本实验中氟化钾最佳用量为 35 g/L。

SDBS 是一种常见的阴离子型表面活性剂,易接受外界提供的电子形成吸附键,从而阻滞金属的反应,在硝酸溶液中可以抑制镁合金的腐蚀过程。特殊缓蚀剂的作用是协同 SDBS,与其复配,提高整体缓蚀效果,最佳用量为 6.5 g/L。

综合实验结果得出退除镁合金微弧氧化膜层最佳配方:硝酸 90 mL/L,柠檬酸 8 g/L,氟化钾 35 g/L,十二烷基苯磺酸钠 5 g/L,特殊缓蚀剂 6.5 g/L。

## 2.2 退膜过程分析

取膜厚 27  $\mu\text{m}$  的微弧氧化镁合金试样,在最佳配方的退膜液中退除微弧氧化膜层,每隔一定时间将试样取出,在去离子水中超声波清洗 3 次,烘干并冷却至室温,使用 BP221S 精密电子分析天平称量,通过公式(2)计算膜层退除量。膜层退除量随退除时间的变化见图 3,退除过程中试样表面的宏观形貌见图 4。

由图 3 可以看出,在整个退膜过程中,膜层退除



量与退膜时间并不呈线性关系,这是由镁合金微弧氧化膜层结构的不均匀性决定的。在退膜开始的 a 阶段(0 ~ 8 min),膜层退除量与退膜时间呈线性关系,

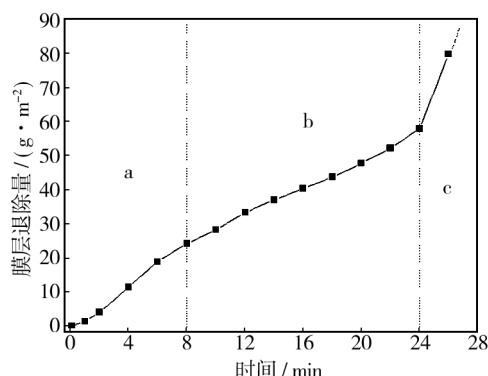


图3 膜层退除量与退除时间的关系

Fig. 3 The relationship between weight loss of the layer and the stripping time

且退膜速率(退除量与时间的比值)较大。这是因为镁合金微弧氧化膜的外层为多孔的疏松层,退膜液易于侵蚀,因而单位时间内膜层退除量较多,退膜速率较快,退膜3 min的宏观图像如图4b所示。在退膜的b阶段(8 ~ 24 min),膜层退除量与退膜时间基本呈线性关系,且退膜速率小于初始退膜速率,这表明致密层对退膜液的阻力大于疏松层。此外,在该阶段内,膜层上开始出现气泡,且随着退膜时间的延长,膜层气泡密度增加,同时气泡体积变大,如图4c, d所示。在c阶段(24 ~ 27 min),退膜速率急剧上升,这是因为镁基体在保护膜的作用下钝化,变薄的致密层呈块状脱落,图4e所示为膜层气泡开始胀破。膜层自发脱落一部分后,未剥落的膜层可以通过机械外力轻易去除,最后得到表面平整的镁合金基体,如图4f所示。采用万用电表测试,结果表明基体表面导电,说明退膜液已将微弧氧化膜层退除干净。

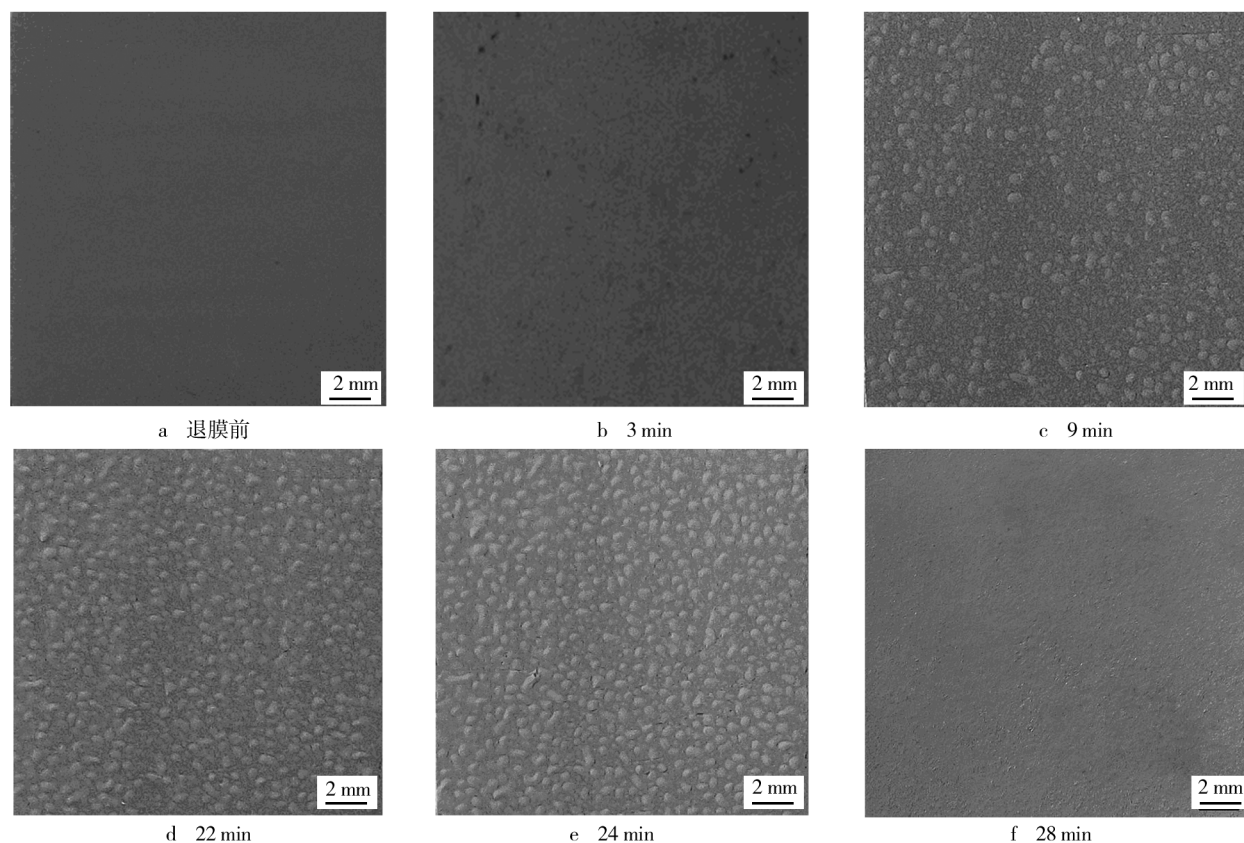


图4 退膜过程中试样表面的宏观形貌

Fig. 4 The macro-morphology of the layer during the stripping process

### 2.3 膜层厚度与腐蚀的关系

取 AZ91D 镁合金试样编号 1#—8#, 分别进行 10 ~ 45 min 微弧氧化加工, 用 DT-156 型测厚仪测得膜层

厚度为 15 ~ 36  $\mu\text{m}$ 。使用 TR240 型粗糙度测试仪分别对微弧氧化加工前后以及退膜液退膜后的试样进行粗糙度测试, 使用 BP221S 精密电子分析天平对镁合金微弧氧化前及退膜后的试样进行称量, 得到膜层

厚度与腐蚀率、退膜后基体表面粗糙度的关系,如图5所示。

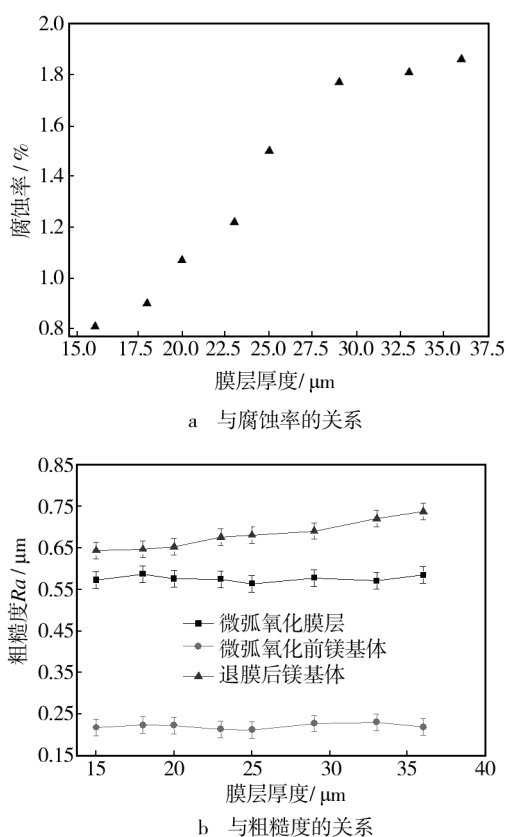


图5 膜层厚度与腐蚀率、粗糙度的关系

Fig. 5 The relationship between layer thickness and corrosion rate, roughness

由图5a可以看出,随着膜层厚度的增加,镁合金基体的腐蚀程度也随之增加。由于膜层厚度的增加使退膜时间延长,退膜液中的腐蚀介质对基体的侵蚀时间增加,因此腐蚀率呈上升趋势。这与图5b中镁基体表面粗糙度的变化规律是一致的。在本实验条件下,试样腐蚀率在2%以内。由此可以看出,镁合金化学性质十分活泼,在最佳配方的退膜液中处理时,即使加入缓蚀剂进行调节,退膜完成后的镁基体仍有一定程度的损伤。这种损伤在酸性退膜液中无法避免,只能尽量减轻,因此控制退膜时间至关重要。

由图5b可以看出,膜层厚度不同,退膜后镁合金基体表面粗糙度基本相同, $Ra$  值在  $0.6 \sim 0.75 \mu\text{m}$  之间,略高于镁合金微弧氧化膜层的粗糙度,且随着膜层厚度的增加,退膜后镁合金基体表面的粗糙度略微增大,这是由于镁合金在退膜液中腐蚀程度增加的缘故。对照表面光洁度分级表可知,退膜后镁合金基体表面光洁度等级为 $\Delta 8$ ,表面光滑。

## 2.4 退膜前后表面形貌及物相分析

采用最佳配方的退膜液去除镁合金微弧氧化膜层,退膜前与退膜后的宏观照片见图6,微弧氧化前及退膜后的镁合金基体表面形貌见图7,其物相分析结果见图8。由图6及图7b可知,使用优化的退膜液可以将镁合金微弧氧化膜层去除干净,退膜后的镁合金基体表面平整光滑,无残余块状膜层。微弧氧化前的镁合金基体在1000倍扫描电镜下可以清晰地看到

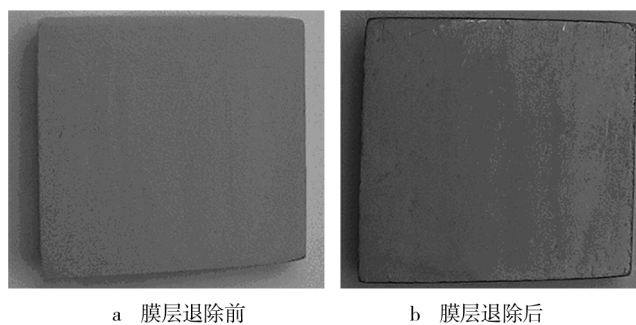


图6 镁合金微弧氧化膜层去除前后的宏观形貌

Fig. 6 The macro-morphology of the layer before (a) and after (b) the stripping process

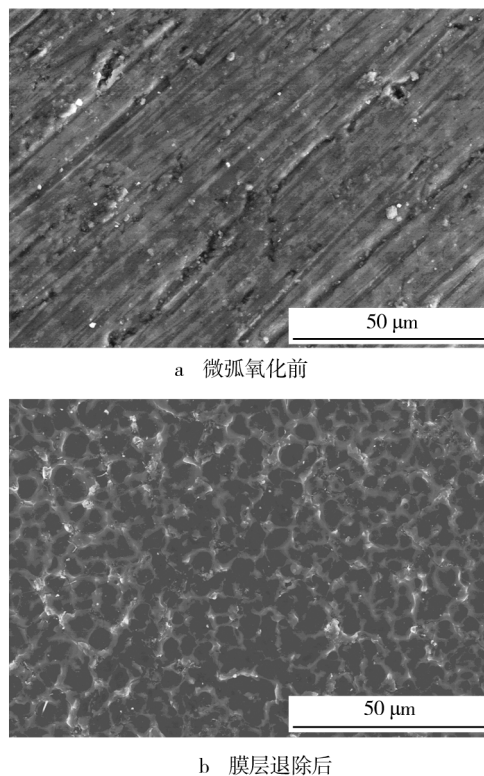


图7 镁合金微弧氧化加工前及退膜后基体表面 SEM 形貌  
Fig. 7 The SEM of the magnesium alloy before micro-arc oxidation treatment (a) and after the stripping process (b)



砂纸打磨后留下的划痕,如图7a所示。由图8可知,退膜后的基体表面与加工前的镁合金表面结构相同,主要成分为Mg,说明退膜后的基体表面无残余腐蚀产物。

图9为镁合金一次微弧氧化加工及退膜后二次微弧氧化加工的表面SEM形貌。可以看出,退膜后的镁合金基体直接进行二次微弧氧化加工所得膜层微孔结构致密,孔周围呈火山喷发状,分布均匀,与一

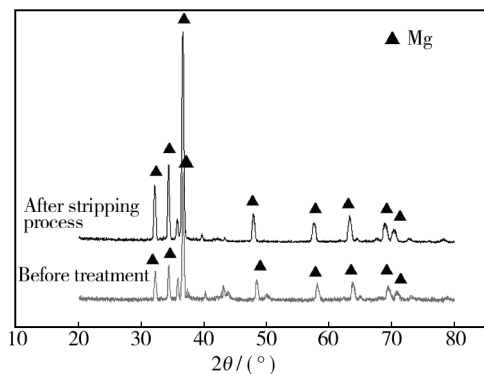
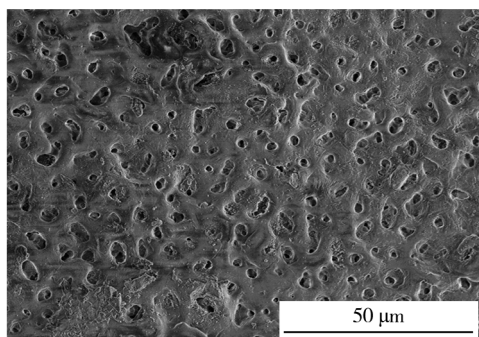
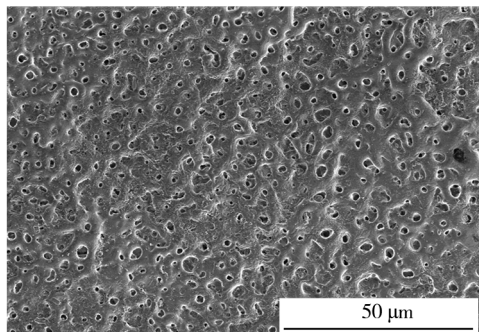


图8 微弧氧化前及退膜后镁合金基体表面XRD图谱

Fig. 8 XRD of the magnesium alloy before micro-arc oxidation treatment and after the stripping process



a 一次微弧氧化



b 二次微弧氧化

图9 镁合金一次微弧氧化及退膜后二次微弧氧化表面SEM形貌

Fig. 9 The SEM of the layer after the first (a) and the second (b) micro-arc oxidation treatment on magnesium alloy

次微弧氧化加工后的膜层无明显差别。这说明使用该退膜液退膜后的镁合金可直接用于二次微弧氧化加工。

### 3 结论

1) 退除镁合金微弧氧化膜层的最佳退膜液配方为:硝酸90 mL/L,柠檬酸8 g/L,氟化钾35 g/L,十二烷基苯磺酸钠5 g/L,特殊缓蚀剂6.5 g/L。

2) 在最佳退膜液中处理后,镁合金基体有轻微腐蚀,但其腐蚀量在标准允许的范围之内。

3) 镁合金微弧氧化膜层的退除量与时间并非严格的线性关系,这是由镁合金微弧氧化膜层的不均匀性造成的。在退膜后期,膜层成块状脱落,退膜完成后,基体平整光滑。

### 参考文献

- [1] 潘明强,迟关心,韦东波,等.我国铝/镁合金微弧氧化技术的研究及应用现状[J].材料保护,2010(4):10—11.  
PAN Ming-qiang, CHI Guan-xin, WEI Dong-bo, et al. Current Status of Research and Application of Micro-arc Oxidation of Aluminum Alloys and Magnesium Alloys in China [J]. Materials Protection, 2010(4):10—11.
- [2] 王步美,薛烽,孙扬善,等. AZ31 镁合金电镀前处理工艺研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 29(1): 24—27.  
WANG Bu-mei, XUE Feng, SUN Yang-shan, et al. Pretreatment for Electroplating of Magnesium Alloy [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2002, 29(1): 24—27.
- [3] 陈扣杰,李建三,郭艳婷. 镁合金光亮酸洗工艺的研究[J]. 电镀与涂饰, 2006, 12(4): 35—37.  
CHEN Kou-jie, LI Jian-san, GUO Yan-ting. Study on Process of Bright Pickling for Magnesium Alloys [J]. Electroplating & Finishing, 2006, 12(4): 35—37.
- [4] 秦铁男,马立群,贺忠臣,等. AZ31 变形镁合金化学镀前无铬酸洗工艺研究[J]. 电镀与环保, 2011, 31(6): 20—22.  
QIN Tie-nan, MA Li-qun, HE Zhong-chen, et al. An Investigation of Chromium-free Pickling Process for Electroless Nickel Plating on AZ31 Wrought Magnesium Alloy [J]. Electroplating Pollution Control, 2011, 31(6): 20—22.
- [5] 胡建文,马静,刘明,等. AZ91HP 镁合金化学镀镍-磷前预处理工艺的研究[J]. 热处理, 2013, 28(3): 24—27.

(下转第45页)

- Ti(CN)涂层的研究[J]. 材料导报, 2006, 20(S2): 468—470.
- ZHU Lin, HE Ji-ning, YAN Dian-ran, et al. The Study on Ti(CN) Coating Prepared by Reactive Plasma Spraying[J]. Materials Review, 2006, 20(S2): 468—470.
- [12] 赵建国, 李建昌, 郝建军, 等. 氮弧熔覆 TiCN/Fe 金属陶瓷涂层对农业刀具耐磨性的影响[J]. 农业工程学报, 2013(3): 84—89.
- ZHAO Jian-guo, LI Jian-chang, HAO Jian-jun, et al. Influence of TiCN/Fe Metal Ceramic Coating by Reaction Nitrogen Arc Cladding on Wear Resistance of Agricultural Tools[J]. Transactions of the CSAE, 2013(3): 84—89.
- [13] 苏彬彬, 徐杨, 简建明. 农业机械耐磨件发展及研究现状[J]. 热处理技术与装备, 2013, 34(5): 53—58.
- SU Bin-bin, XU Yang, JIAN Jian-ming. The Actuality of Development and Research of Wear Resistant Part for Agricultural Machinery[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2013, 34(5): 53—58.
- [14] 乔新义, 吕玉芬, 汪瑞军. 热喷涂技术在农机工程材料延寿中的应用现状[J]. 热喷涂技术, 2013, 5(4): 1—5.
- QIAO Xin-yi, LYU Yu-fen, WANG Rui-jun. Application Status of Thermal Spray Technology in Extending Service Lifetime of Materials for Agricultural Machines[J]. Thermal Spray Technology, 2013, 5(4): 1—5.
- [15] GU Y F, HARADA H, RO Y. Chromium and Chromium-based Alloys: Problems and Possibilities for High-temperature Service[J]. JOM, 2004, 56(9): 28—33.
- [16] 凡艳丽, 吕亚非. 摩擦过程中磨屑运动的分析[J]. 润滑与密封, 2010, 35(12): 17—21.
- FAN Yan-li, LYU Ya-fei. Analysis of Wear Debris during Friction[J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(12): 17—21.
- ~~~~~
- (上接第 32 页)
- HU Jian-wen, MA Jing, LIU Ming, et al. Study on Pretreatment Process of AZ91HP Magnesium Alloy before Electroless Ni-P Plating[J]. Heat Treatment, 2013, 28(3): 24—27.
- [6] 薛方勤, 韩夏云, 郭忠诚. 镁及镁合金表面化学镀 Ni-P 合金新工艺[J]. 材料保护, 2002(9): 33—34.
- XUE Fang-qin, HAN Xia-yun, GUO Zhong-cheng. Electroless Ni-P Plating Technology for Magnesium and Its Alloy[J]. Materials Protection, 2002(9): 33—34.
- [7] LEI Xi-ping, YU Gang, GAO Xiao-lian, et al. A Study of Chromium-free Pickling Process before Electroless Ni-P Plating on Magnesium Alloys[J]. Surface & Coatings Technology, 2011(205): 4058—4063.
- [8] 卢神保, 曾冬铭, 张其林. AZ91D 镁合金电镀前酸洗工艺的研究[J]. 电镀与环保, 2009, 29(4): 10—11.
- LU Shen-bao, ZENG Dong-ming, ZHANG Qi-lin. Investigation of the Acid-etching Pretreatment Process for Plating on AZ91D Magnesium Alloy[J]. Electroplating Pollution Control, 2009, 29(4): 10—11.
- [9] NWAOGU U C, BLAWERT C, SCHARNAGL N, et al. Influence of Inorganic Acid Pickling on the Corrosion Resistance of Magnesium Alloy AZ31 Sheet[J]. Corrosion Science, 2009(51): 2544—2555.
- [10] 许越, 陈湘, 吕祖舜, 等. 镁合金表面的腐蚀特性及其防护技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(6): 753—756.
- XU Yue, CHEN Xiang, LV Zu-shun, et al. Corrosion Characteristic and Protection Technique for Mg Alloy[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2001, 33(6): 753—756.
- [11] 吴振宁, 李培杰, 刘树勋, 等. 镁合金腐蚀问题研究现状[J]. 铸造, 2001, 50(10): 583—586.
- WU Zhen-ning, LI Pei-jie, LIU Shu-xun, et al. Present State of Research on Corrosion of Magnesium Alloys[J]. Foundry, 2001, 50(10): 583—586.
- [12] 焦树强, 旷亚非, 陈金华, 等. 镁及其合金的腐蚀与阳极化处理[J]. 电镀与环保, 2002, 22(3): 1—3.
- JIAO Shu-qiang, KUANG Ya-fei, CHEN Jin-hua, et al. Corrosion Behavior and Anodization of Magnesium and Its Alloys[J]. Electroplating Pollution Control, 2002, 22(3): 1—3.
- [13] 高慧. 适用于镁合金的高效缓蚀剂的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- GAO Hui. Study of the High Efficiency Corrosion Inhibitor on Magnesium Alloy[D]. Chongqing: Southwest University, 2014.
- [14] 孔纲, 吴双, 卢锦堂, 等. 柠檬酸及其盐在金属防护中的应用研究现状[J]. 电镀与涂饰, 2011, 30(11): 53—55.
- KONG Gang, WU Shuang, LU Jin-tang, et al. Status of Research and Application of Citric Acid and Citrate in Metal Protection[J]. Electroplating & Finishing, 2011, 30(11): 53—55.
- [15] 国栋, 樊占国, 杨中东, 等. 镁合金化学镀中预处理氟化镁膜的特征与作用[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(5): 790—791.
- GUO Dong, FAN Zhan-guo, YANG Zhong-dong, et al. Effects and Characteristics of  $MgF_2$  during Electroless Nickel Plating of Magnesium Alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(5): 790—791.