

# 酸碱预处理对高压电子铝箔腐蚀扩面的影响

韩志高<sup>1</sup>, 许令峰<sup>1,2</sup>, 吴卫东<sup>3</sup>, 宋月鹏<sup>1</sup>, 郭晶<sup>1</sup>

(1. 山东农业大学 机械与电子工程学院, 山东 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 山东 泰安 271018; 3. 南通南辉电子材料股份有限公司, 江苏 南通 226000)

**摘要:** **目的** 研究高压电子铝箔在 NaOH 和 HCl 溶液中的电化学行为, 分析酸、碱预处理对铝箔电化学腐蚀扩面效果的影响。**方法** 比较铝箔在不同浓度 NaOH, HCl 溶液中的预处理效果。采用极化曲线获得铝箔在各预处理溶液中的电化学参数, 研究其腐蚀行为。利用扫描电子显微镜观察预处理后铝箔的表面形貌, 分析预处理对铝箔表面形貌的影响。观察铝箔腐蚀扩面后的蚀孔形貌及蚀孔分布, 分析预处理对蚀孔的影响。**结果** 预处理减弱了铝箔制造过程中形成的表面不均匀, 提高了表面活性, 使得铝箔在电化学腐蚀处理中蚀孔密度增加, 分布均匀。对未预处理铝箔及经 HCl 和 NaOH 预处理的铝箔进行电化学扩面处理, 发现相对于未预处理的铝箔 (比电容为  $0.56 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ ), 经 HCl 溶液预处理的铝箔比电容提高了 4% ~ 8%, NaOH 溶液预处理的铝箔比电容提高更为明显, 约为 13% ~ 16%。铝箔在 HCl 溶液中的自腐蚀电位约为 -820 mV, 在 NaOH 溶液中的自腐蚀电位约为 -1720 mV, 并且经计算得知, 铝箔在 NaOH 溶液中比在 HCl 溶液中自腐蚀速率快。**结论** 铝箔在 NaOH 溶液中腐蚀均匀, 用 NaOH 溶液对铝箔进行预处理, 可以消除铝箔轧制缺陷, 提高铝箔的比电容。

**关键词:** 预处理; 电子铝箔; 比电容; 腐蚀; 电化学; 扩面

**中图分类号:** TG171; TG146.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-3660(2015)09-0056-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.09.010

## Effect of Alkaline or Acidic Pretreatment on the Etching Area-enlarging Process of High-voltage Electron Aluminum Foil

HAN Zhi-gao<sup>1</sup>, XU Ling-feng<sup>1,2</sup>, WU Wei-dong<sup>3</sup>, SONG Yue-peng<sup>1</sup>, GUO Jing<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

2. Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment in Shandong Province, Tai'an 271018, China;

3. Nantong Nanhui Electronic Material Limited by Share Ltd, Nantong 226000, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To investigate the electrochemical behavior of high-voltage electron aluminum foil in HCl and NaOH solution, and the effect of alkaline or acidic pretreatment on the area-enlarging of electrochemical etching of the aluminum foil.

收稿日期: 2015-06-01; 修订日期: 2015-06-26

Received: 2015-06-01; Revised: 2015-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(51301098); 山东省教育厅资助项目(J09LD17)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51301098) and Shandong Provincial Education Department (J09LD17)

作者简介: 韩志高(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究高压阳极铝箔的制备。

**Biography:** HAN Zhi-gao(1990—), Male, Master graduate student, Research focus: preparation of high-voltage anode aluminum foil.

通讯作者: 许令峰(1970—), 男, 山东人, 博士, 副教授, 主要从事金属材料科学及应用研究。

**Corresponding author:** XU Ling-feng (1970—), Male, from Shandong, Ph. D., Associate professor, Research focus: application of metal materials science.

**Methods** This study compared the pretreatment effect of aluminum foil in different concentrations of HCl and NaOH solution. The electrochemical parameters of aluminum foil in different pretreatment solutions were obtained with polarization curves by which the etching behavior of aluminum foil was analyzed. The morphology observation of aluminum foil surface by means of scanning electron microscope (SEM) was used to analyze the influence of pretreatment on the surface morphology. The morphology and distribution of the pitting etching hole were observed to analyze the effect of pretreatment on the pitting. **Results** The pretreatment reduced the microstructure inhomogeneity on the foil surface formed during the manufacturing process and improved the surface activity, which increased the pit density and uniformity of pit distribution. The special capacitance of all experimental aluminum foils after electro etching process showed that compared with the primary aluminum foil (the specific capacitance was  $0.56\text{ }\mu\text{F}/\text{cm}^2$ ), the specific capacitance of foil with HCl solution pretreatment increased by 4% ~8%; whereas the specific capacitance of foil with NaOH solution pretreatment increased by about 13% ~16%. The self-corrosion potential of aluminum foil in HCl solution was about -820 mV, while the self-corrosion potential in NaOH solution was obviously lower, about -1720 mV. Compared with that in HCl solution, the self-corrosion rate of aluminum foil in NaOH solution was faster. **Conclusion** The more uniform corrosion in NaOH solution could eliminate the rolling defects of aluminum foil and improve the specific capacitance of aluminum foil.

**KEY WORDS:** pretreatment; electron aluminum foil; specific capacitance; etching; electrochemical; area-enlarging

铝箔是制造铝电解电容器的主要材料,其比表面积直接影响电容器比电容的大小。高压阳极铝箔通常在含  $\text{Cl}^-$  的  $\text{HCl}$ ,  $\text{HCl}+\text{H}_2\text{SO}_4$  等溶液中进行电化学反应,以增加其比表面积,提高铝电解电容器的电容<sup>[1-2]</sup>。研究发现,影响铝箔腐蚀扩面效果的主要因素有:光箔质量(包括光箔纯度、织构、表面质量、表面微量元素分布)、预处理、电化学腐蚀工艺参数(如腐蚀液配比、温度、电流密度、腐蚀时间)以及化成后氧化膜的厚度和质量等<sup>[3-4]</sup>。

光箔制造要经历轧制变形和高温退火等工艺,会造成表面组织结构不均匀,降低腐蚀扩面效果<sup>[5-6]</sup>。轧制使铝箔表面形成轧痕线,位错、杂质元素等容易在此富集,从而提高了此处的化学势<sup>[7]</sup>,可促进局部点蚀的发生。高温退火过程中,铝箔表面氧化膜增厚,轧制时,轧辊的挤压作用导致铝箔表面的氧化膜畸变且分布不均匀<sup>[5]</sup>。

预处理工艺可以改善铝箔表面状态,调整氧化膜的厚度及结构,减少铝箔在轧制、退火过程中形成的表面差异,增加铝箔表面活性,使铝箔腐蚀开始点的数量及分布在既定电蚀处理方式下达到最佳状态,从而提高电化学腐蚀发孔率及均匀性<sup>[8]</sup>。目前,预处理腐蚀液多以盐酸、硫酸、硝酸等酸性溶液为主。文中借助极化曲线获得不同预处理溶液中的腐蚀参数,通过铝箔腐蚀过程的系列方程式,研究预处理的腐蚀作用机理,并对比分析酸、碱预处理对铝箔腐蚀扩面效果的影响。

1 试验

采用纯度 99.99% 的高纯铝箔,立方织构在 95%

以上,厚度为  $120\text{ }\mu\text{m}$ 。将铝箔裁剪成  $5\text{ cm}\times 20\text{ cm}$  的试样,保证腐蚀面为  $4\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 。

预处理工艺见表 1。使用 TSM-6380 型扫描电镜对预处理试样进行表面形貌观察。采用 LK2010 电化学分析仪测试铝箔在预处理溶液中的极化曲线。以 Pt 电极作为辅助电极;以铝箔为工作电极,其表面尺寸为  $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ ;以饱和甘汞电极(SCE)为参比电极。采样周期为 500 ms,扫描速率为  $10\text{ mV}/\text{s}$ 。将预处理后的铝箔在  $n(\text{HCl}):n(\text{H}_2\text{SO}_4)=1:3$  的  $\text{HCl}+\text{H}_2\text{SO}_4$  体系中发孔,再在  $\text{HNO}_3$  中扩孔,经化成后,测试其比电容。

表 1 铝箔预处理工艺  
Tab.1 Aluminum foil pretreatment processes

编号	成分	浓度/ $(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	时间/s	温度/ $^{\circ}\text{C}$
a	HCl	1.5	120	73
b	HCl	2	120	73
c	HCl	2.5	120	73
e	NaOH	1	60	50
f	NaOH	2	60	50
g	NaOH	3	60	50

2 结果及分析

2.1 铝箔性能

将未预处理及经过 a—g 工艺预处理的铝箔进行相同工艺的腐蚀发孔、扩孔及化成,在 520 V 的条件下测得比电容依次为 0.56,0.59,0.61,0.60,0.62,0.64,0.65  $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 。可以看出,NaOH 溶液预处理效

果优于 HCl 溶液。另外,溶液浓度、处理温度等因素也会对预处理效果产生影响。

与未预处理的铝箔相比,经过 HCl 溶液预处理的铝箔比电容提高了 4% ~ 8%。采用 HCl 溶液进行预处理,相比之下,浓度为 2.5 mol/L、温度为 73 ℃ 时的预处理效果最好,铝箔比电容为  $0.61 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ 。

与未预处理的铝箔相比,经过 NaOH 溶液预处理的铝箔比电容提高了 13% ~ 16%。采用 NaOH 溶液进行预处理,相比之下,浓度为 2 ~ 3 mol/L、温度为 50 ℃ 时的预处理效果最好。进一步提高 NaOH 溶液浓度,铝箔腐蚀量过大,会导致强度及比电容下降。

## 2.2 表面形貌

轧制变形过程中,在轧辊的挤压作用下,铝箔表面会沿轧制方向形成轧痕。经酸、碱预处理后,铝箔表面的轧痕效应得到不同程度的消除,表面质量提高。如图 1 所示,经 HCl 溶液预处理后,铝箔表面轧痕仍然较明显;经 NaOH 溶液预处理后,铝箔表面均匀化效果明显,轧痕大幅度消除。采用浓度为 2 ~ 3 mol/L 的 NaOH 溶液预处理时,铝箔表面形貌最好。

经不同工艺预处理的铝箔发孔、扩孔后的表面形貌如图 2 所示。酸碱预处理可以改善铝箔表面组织,

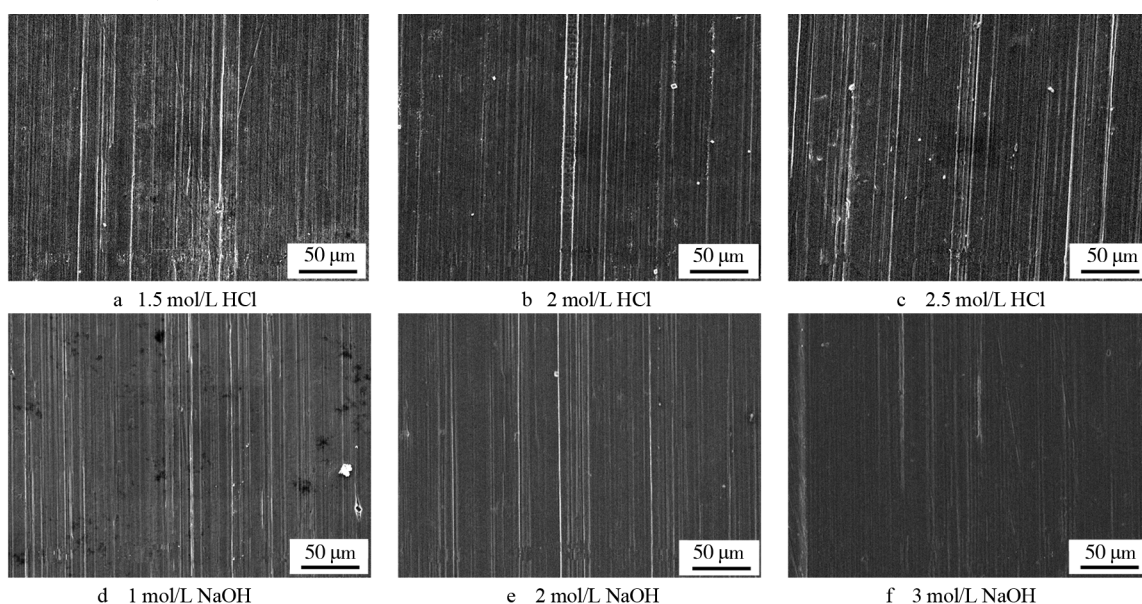


图 1 铝箔经不同工艺预处理后的表面形貌

Fig. 1 Surface morphology of aluminum foil after different pretreatment process

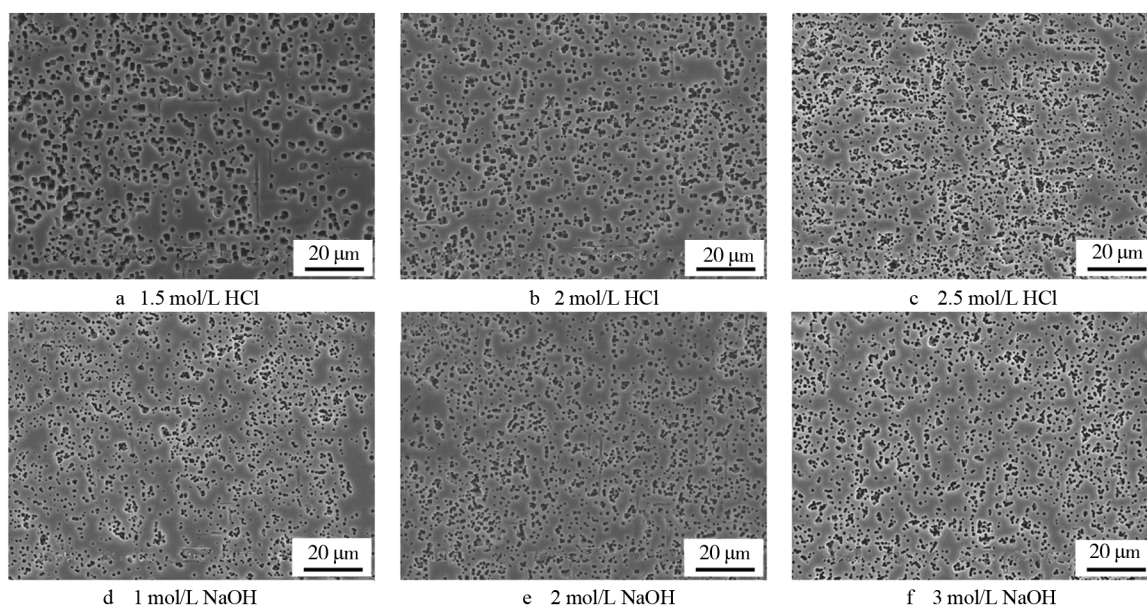


图 2 不同工艺下预处理的铝箔预电化学腐蚀扩面形貌

Fig. 2 Electrochemical etching area-enlarging morphology of aluminum foil after different pretreatment process

促进电化学腐蚀初期蚀孔的萌生,提高蚀孔密度及均匀性。采用 HCl 溶液预处理,浓度较高时,铝箔发孔密度得到改善,但是蚀孔均匀性较差,局部发孔密集,后期扩孔时的并孔现象较为严重,影响比电容的进一步提高;浓度较低时,未发孔区域较多,降低了比电容。采用 NaOH 溶液预处理的铝箔在电化学腐蚀过程中,表面蚀孔的分布更加均匀,并孔以及未发孔的区域较少。

2.3 极化曲线

通过极化曲线,可以获得铝箔在不同预处理溶液中的电化学腐蚀参数,以表征腐蚀的趋势。铝箔在 HCl 及 NaOH 溶液中的极化曲线如图 3 所示,具体电化学参数见表 2。由法拉第第一定律( $M=KQ=KIt$ )可以推算铝箔的自腐蚀速率<sup>[9]</sup>:

$$v=\frac{M}{nF}\cdot J_{\text{corr}} \tag{1}$$

式中: $v$  为自腐蚀速率( $\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ ); $J_{\text{corr}}$  为腐蚀电流密度( $\text{A}/\text{cm}^2$ ); $M$  为金属的摩尔质量( $\text{g}/\text{mol}$ ); $n$  为金属的化合价; $F$  为法拉第常数( $\text{C}/\text{mol}$ )。自腐蚀速率计算结果一并列于表 2。

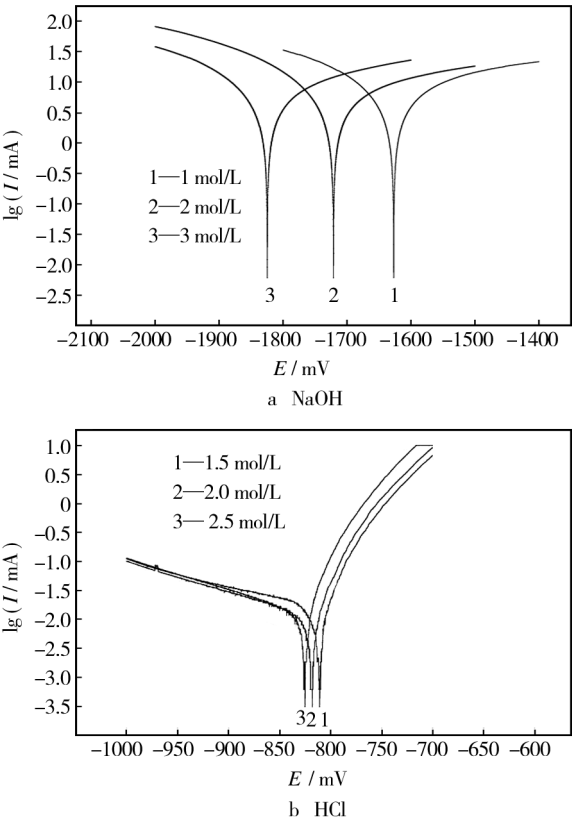


图 3 铝箔在不同浓度酸、碱溶液中的极化曲线  
Fig. 3 Polarization curves of aluminum foil in different concentrations of alkaline and acidic solutions

表 2 铝箔在酸碱溶液中的电化学数据  
Tab. 2 The electrochemical data of aluminum foil in alkaline and acidic solutions

溶液	$E_{\text{corr}}$ /mV	$I_{\text{corr}}$ /mA	$J_{\text{corr}}$ /(mA·cm <sup>2</sup> )	自腐蚀速率 $v$ /(g·cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
1.5 mol/L HCl	-810	0.28	0.33	$3.1\times10^{-5}$
2 mol/L HCl	-820	0.26	0.31	$2.9\times10^{-5}$
2.5 mol/L HCl	-825	0.34	0.41	$3.8\times10^{-5}$
1 mol/L NaOH	-1620	2.56	3.07	$25.7\times10^{-5}$
2 mol/L NaOH	-1721	2.30	2.76	$28.6\times10^{-5}$
3 mol/L NaOH	-1842	2.55	3.06	$28.5\times10^{-5}$

铝箔在 NaOH 和 HCl 溶液中的自腐蚀电位随着溶液浓度的增加而降低,说明腐蚀液浓度越高,铝箔越容易被腐蚀。相对于 HCl 溶液,铝箔在 NaOH 溶液中的自腐蚀电势更低。通过计算得出,在 NaOH 溶液中,铝箔的平均自腐蚀电流密度为 2.96 mA/cm<sup>2</sup>,明显高于在 HCl 溶液中的平均自腐蚀电流密度(0.35 mA/cm<sup>2</sup>)。

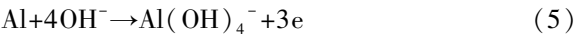
由公式(1)可知,铝箔腐蚀速率正比于腐蚀电流密度。由表 2 数据可知,在 NaOH 溶液中的平均自腐蚀速率为  $27.6\times10^{-5}\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ ,在 HCl 溶液中的平均自腐蚀速率为  $3.3\times10^{-5}\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ ,可见铝箔在 NaOH 溶液中更容易溶解。

3 腐蚀机制

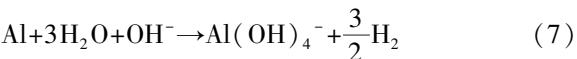
铝箔在强酸、强碱溶液中的腐蚀反应包括阳极反应和阴极反应。在酸性溶液中,阴极反应为质子放电,如(2)式所示;在碱性溶液中,阴极反应为水还原制氢<sup>[10]</sup>,如(3)式所示。



铝箔在酸性和碱性溶液中的阳极反应为:

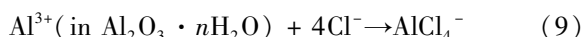
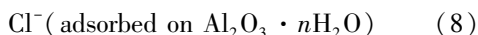
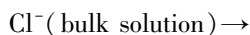


总反应可以写为:

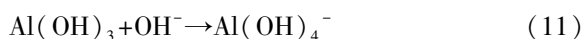
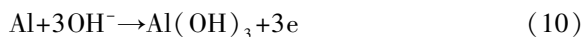


铝箔在制造过程中需经历高温均质和以提高

(100)晶面占有率为目的的高温退火过程,表面不可避免地会形成氧化膜<sup>[11]</sup>,所以腐蚀液并非直接与铝基体反应,而是先与氧化膜反应。有研究表明,铝箔在盐酸溶液中的溶解过程包括:氯离子在氧化物表面的吸附,氯离子渗透氧化膜,氯离子在金属/氧化物界面的辅助溶解<sup>[12]</sup>。该过程使得氧化膜逐渐变薄,其反应可表示为:



在碱性溶液中,铝箔氧化膜的溶解涉及表面氧化物和氢氧化物膜的转换, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 表面反应受到 $\text{OH}^-$ 通过 $\text{Al}/\text{Al}(\text{OH})_3$ 膜表面的限制<sup>[14]</sup>。其反应为电化学和化学反应两步<sup>[14]</sup>:



铝箔在 $\text{NaOH}$ 溶液中腐蚀的影响参数较少, $\text{OH}^-$ 破坏铝的氧化膜,与基体铝发生反应,表面析氢更容易<sup>[15]</sup>。极化曲线(图3)表明,铝氧化膜在 $\text{NaOH}$ 溶液中的溶解速率更快,更容易被去除,从而铝箔表面活性提高,发孔率增加,发孔均匀性得到改善。在 $\text{HCl}$ 溶液中,铝的溶解除了受 $\text{H}^+$ 浓度的影响外,还受到 $\text{Cl}^-$ 浓度等条件的限制,自腐蚀速率低,因此铝箔表面氧化膜溶解速度慢,去除不彻底。

此外,铝箔在 $\text{NaOH}$ 溶液中平均腐蚀电流为2.37 mA,以均匀腐蚀为主;在 $\text{HCl}$ 溶液中多以点蚀为主,其平均腐蚀电流较小,约为0.30 mA。氯离子容易造成铝箔的局部腐蚀,加剧铝箔表面的不均匀。

## 4 结论

1) 预处理降低了铝箔表面氧化膜厚度,增加了表面活性,减弱了轧痕效应,提高了铝箔蚀孔的发孔率和分布均匀性。

2) 铝箔在 $\text{HCl}$ 溶液中预处理时,腐蚀速度较慢,且易造成局部腐蚀。扩面时,局部发孔密集,扩孔时并孔现象仍然存在,腐蚀扩面效果降低。

3) 铝箔在 $\text{NaOH}$ 溶液中预处理时,自腐蚀速率快,腐蚀均匀,表面均匀化效果显著,扩孔、化成后的比电容明显提高。

## 参考文献

[1] 阎康平,罗泸蓉,涂铭旌. 中高压阳极铝箔直流电扩面侵蚀研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2000,32(4):

32—35.

YAN Kang-ping, LUO Lu-rong, TU Ming-jing. On Etching Aluminum Foil for Capacitors Using DC[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2000, 32(4):32—35.

[2] 王跃,翁德明,黄新民. 电解电容器用铝箔腐蚀工艺研究[J]. 电子元件与材料,2008,27(8):39—42.

WANG Yue, WENG De-ming, HUANG Xin-min. Study on the Etching Process of Aluminum Foil for Electrolytic Capacitor[J]. Electronic Components and Materials, 2008, 27(8):39—42.

[3] BAN Chao-lei, HE Ye-dong. Controlling Limiting Length of Tunnels on Al Foil Electroetched in  $\text{HCl-H}_2\text{SO}_4$  Solution[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(3):601—605.

[4] 班朝磊. 酸碱预处理对阳极铝箔电蚀特征的影响[J]. 轻合金加工技术,2010,38(5):39—41.

BAN Chao-lei. Influence of Caustic and Acidic Pretreatments for Aluminum Foil on Its Electro-etching[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2010, 38(5):39—41.

[5] 毛卫民,蒋恒,杨平,等. 微观结构和微量元素对铝箔腐蚀结构的影响[J]. 中国有色金属学报,2004,14(10):1627—1631.

MAO Wei-min, JIANG Heng, YANG Ping, et al. Influence of Microstructure and Microelements on Corrosion Structure of Aluminum Foil[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(10):1627—1631.

[6] 王银华,杜国栋,许金强,等. 中高压铝电解电容器阳极箔研究进展[J]. 电子元件与材料,2006,26(6):1—5.

WANG Yin-hua, DU Guo-dong, XU Jin-qiang, et al. Progress in the Studies of Anode Foils for High Voltage Electrolytic Capacitor[J]. Electronic Components & Materials, 2006, 26(6):1—5.

[7] 徐友龙,曹婉真,孟中岩. 高纯铝箔在混合酸溶液中蚀孔的引发和生长机理[J]. 西安交通大学学报,1997,31(1):1—6.

XU You-long, CAO Wan-zhen, MENG Zhong-yan. The Initiation and Growth Mechanism of Etchpit for High Purity Aluminum Foil in Mixed Acid Solutions[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1997, 31(1):1—6.

[8] 刘建才,张新明,陈明安,等. 最终退火工艺和腐蚀预处理对铝箔发孔性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2011,20(11):2199—2205.

LIU Jian-cai, ZHANG Xin-ming, CHEN Ming-an, et al. Influence of Final-annealing and Pretreatment before Etching on Pitting Ability of Aluminum Foils[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 20(11):2199—2205.

(下转第77页)

- ization, and Applications[J]. Journal of the Iranian Chemical Society, 2010, 7(1): 1—37.
- [3] 李德才. 磁性液体理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- LI De-cai. Theory and Application of Ferrofluids[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [4] NOGUÉS J, SORT J, LANGLAIS V, et al. Exchange Bias in Nanostructures[J]. Physics Reports, 2005, 422(3): 65—117.
- [5] SINGAMANENI S, BLIZNYUK V N, BINEK C, et al. Magnetic Nanoparticles: Recent Advances in Synthesis, Self-assembly and Applications[J]. Journal of Materials Chemistry, 2011, 21(42): 16819—16845.
- [6] 刘祥萱, 陈鑫, 王煊军, 等. 磁性吸波材料的研究进展[J]. 表面技术, 2013, 42(4): 104—109.
- LIU Xiang-xuan, CHEN Xin, WANG Xuan-jun, et al. Corrosion Products of Magnesium Alloys in NaCl Solution and Application Analysis[J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 104—109.
- [7] GE F, LI M M, YE H, et al. Effective Removal of Heavy Metal Ions  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  from Aqueous Solution by Polymer-modified Magnetic Nanoparticles[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 211—212(2): 366—372.
- [8] SZABÓ D V, VOLLATH D. Nanocomposites from Coated Nanoparticles[J]. Advanced Materials, 1999, 11(15): 1313—1316.
- [9] LIU Q, XU Z, FINCH J A, et al. A Novel Two-step Silica-Coating Process For Engineering Magnetic Nanocomposites[J]. Chemistry of Materials, 1998, 10(12): 3936—3940.
- [10] MASSART R. Preparation of Aqueous Magnetic Liquids in Alkaline and Acidic Media[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 1981, 17(2): 1247—1248.
- [11] LIN Li-hua, LI Jian, FU Jun, et al. Preparation, Magnetization, and Microstructure of Ionic Ferrofluids Based on  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$  Composite Nanoparticles[J]. Materials Chemistry and Physics, 2012, 134(1): 407—411.
- [12] ARULMURUGAN R, VAIDYANATHAN G, SENDHILNATHAN S, et al. Co-Zn Ferrite Nanoparticles for Ferrofluid Preparation: Study on Magnetic Properties[J]. Physica B Condensed Matter, 2005, 363: 225—231.
- [13] GRANQVIST C G, BUHRMAN R A. Ultrafine Metal Particles[J]. Journal of Applied Physics, 1976, 47(5): 2200—2219.
- [14] CHEN Long-long, LI Jian, LIN Yue-qiang, et al. Surface Modification and Characterization of  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  Nanoparticles Synthesized by Chemically-induced transition[J]. Materials Chemistry & Physics, 2013, 141: 828—834.
- [15] ZHANG Qing-mei, LI Jian, LIN Yue-qiang, et al. The Preparation and Characterization of Ni-Fe Bixide Composite Nanoparticles[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2010, 508(2): 396—399.
- [16] ZHANG Qing-mei, LI Jian, MIAO Hua, et al. Preparation of  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3/\text{FeCl}_3(\text{FeCl}_2)$  Composite Nanoparticles by Hydrothermal Process Useful for Ferrofluids[J]. Smart Materials Research, 2011.

(上接第60页)

- [9] 夏春兰, 吴田, 刘海宁, 等. 铁极化曲线的测定及应用实验研究[J]. 大学化学, 2003, 18(6): 38—41.
- XIA Chun-lan, WU Tian, LIU Hai-ning, et al. Experimental Study on the Determination and Application of Iron Polarization Curve[J]. University Chemistry, 2003, 18(6): 38—41.
- [10] MOKADDEM M, VOLOVITCH P, RECHOU F, et al. The Anodic and Cathodic Dissolution of Al and Al-Cu-Mg Alloy[J]. Electrochim Acta, 2010, 55: 3779—3786.
- [11] 杨富国. 预处理工艺条件对铝电解电容器阳极箔比容的影响[J]. 表面技术, 2010, 29(3): 85—86.
- YANG Fu-guo. Effect of Pretreatment on Specific Capacitance of Aluminum Electrolytic Capacitor Anodic Foil[J]. Surface Technology, 2010, 29(3): 85—86.
- [12] AL-KHARAFI F M, BADAWEY W A. Corrosion and Passivation of Al and Al-Si Alloys in Nitric Acid Solution, II—Effect of Chloride Ions[J]. Electrochim Acta, 1995, 40(12): 1811—1817.
- [13] ZHUK A Z, SHEINDLIN A E, KLEYMENOV B V. Use of Low-cost Aluminum in Electric Energy Production[J]. J Power Sources, 2006, 157: 921—926.
- [14] MOON S M, PYUN S I. The Corrosion of Pure Aluminium during Cathodic Polarization in Aqueous Solutions[J]. Corros Sci, 1997, 37(2): 399—408.
- [15] BOUKERCHE I, DJERAD S, BENMANSOUR L, et al. Degradability of Aluminum in Acidic and Alkaline Solutions[J]. Corrosion Science, 2014, 78: 343—352.