LY12CZ 铝合金的己二酸硫酸阳极氧化

于 美 陈高红 刘建华 李松梅

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 通过向硫酸阳极氧化槽液中添加己二酸,研究了 LY12CZ 铝合金的己二酸硫酸阳极氧化,并与传统硫酸阳极氧化进行了对比. 采用场发射扫描电子显微镜(FE-SEM)对两种阳极氧化膜的微观形貌进行了观察,用电化学阻抗谱(EIS)对比研究了两种氧化膜的电化学特性参数及耐腐蚀性能,采用万能力学实验机对阳极氧化后 LY12CZ 板材试样进行疲劳寿命测试比较. 结果表明,与传统硫酸阳极氧化膜相比,己二酸硫酸阳极氧化膜具有更小的孔洞结构和更少的缺陷,在腐蚀环境中有更好的稳定性和耐腐蚀性能,对铝合金试样的疲劳损伤也大大减弱,并对机理进行了初步探讨.

关 键 词: 铝合金; 阳极氧化; 己二酸; 疲劳寿命

中图分类号: TG 174.42

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)03-0363-05

Adipic-sulfuric acid anodizing for LY12CZ aluminum alloy

Yu Mei Chen Gaohong Liu Jianhua Li Songmei

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Adipic-sulfuric acid anodic oxidation was improved by adding hexane diacid into sulfur acid anodic bath solutions for LY12CZ aluminum alloy, and compared to conventional sulfur acid anodic oxidation. The morphology of two kinds of oxide films was observed by using filed emission-scanning electron microscope (FE-SEM). The corrosion resistance and electrochemical character of oxide film were investigated with electrochemical impedance spectroscope (EIS). Tensile fatigue test of anodic LY12CZ plates was carried out. It is found that adipic-sulfuric acid oxide film has smaller pore structure and fewer defects, and it has better stability and corrosion resistance in corrosive environment. The influence of anodic oxidation on the fatigue properties decreases. The mechanism of adipic-sulfuric acid anodic oxidation was also discussed.

Key words: aluminum alloy; anodic oxidation; hexane diacid; fatigue life-cycle

铝及铝合金由于其优异的综合性能而受到广泛使用,尤其在航空领域,一直作为最重要的结构材料之一[1]. 为提高其耐蚀性,通常将铝及铝合金进行阳极氧化及封闭处理[2]. 目前应用最广泛的阳极氧化主要有铬酸阳极化和硫酸阳极化. 铬酸阳极化中六价铬被列为对人体危害最大的化学物质之一,是国际公认的致癌金属物之一. 而传统硫酸阳极氧化采用高浓度硫酸电解液,对基材侵蚀严重,对铝合金的疲劳寿命有很大的影响[3].

近年来,很多研究者都致力于硫酸阳极氧化工艺的改进研究[4-10]. 20 世纪 90 年代波音公司开发的硼酸硫酸阳极氧化和空客公司开发的酒石酸硫酸阳极氧化,硫酸为主成膜剂,硼酸和酒石酸作为改性剂加入槽液后形成比较大的离子基团,能与氧化膜表面溶解的铝离子形成难溶沉淀物,从而减弱槽液对氧化膜的腐蚀. 文斯雄等[4]研究了在硫酸阳极化电解液中添加有机酸(如苹果酸、丙三醇),有效地减少了阳极化过程中反应热

收稿日期: 2010-11-25; **网络出版时间**: 2012-03-20 10:37

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120320.1037.003.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51001007)

作者简介: 于 美(1981-),女,山东潍坊人,副教授,yumei@buaa.edu.cn.

效应的不良影响,在不降低氧化膜厚度和硬度的条件下有效地拓宽硫酸阳极化的允许温度范围,减弱阳极氧化膜的再溶解能力,抑制在较高温度下氧化膜出现疏松、粉化的可能. 这些研究均是以硫酸为主成膜剂,向电解液中添加一种改性剂成分,减缓槽液对氧化膜的溶解,抑制局部缺陷的进一步扩大,使导致腐蚀破坏和疲劳破坏的缺陷明显减少,成膜更加致密均匀.

近几年本研究室针对铬酸阳极氧化替代技术和硫酸阳极氧化的改性做了大量的研究工作[11-12]. 在此基础上,本文以己二酸为改性剂添加到硫酸阳极氧化槽液中,同时降低硫酸浓度,开发一种己二酸硫酸阳极氧化新工艺,研究新工艺所得氧化膜的结构和性能,并与传统硫酸阳极氧化进行对比.

1 试 验

1.1 试验材料

试验所用材料为 LY12CZ 铝合金轧制板材,化学成分如表 1 所示. 试样尺寸为 100 mm × 50 mm × 2 mm. 将试样用砂纸打磨至 800 号后进行碱洗和出光,以除去材料表面的油污和自然氧化膜,之后立即进行阳极氧化处理.

表 1 LY12CZ 铝合金成分表 %

元素	质量分数
Cu	3.8 ~ 4.9
Mg	1.2 ~ 1.8
Fe	0.50
Mn	0.30 ~ 0.90
Si	0.50
Zn	0.25
Ti	0.15
Cr	0.10
其它	0.15
Al	余量

1.2 铝合金的阳极氧化

阳极氧化的工艺过程为氧化前准备→装挂→化学除油→碱洗→水冲洗→出光→水冲洗→去离子水冲洗→阳极化→水冲洗→封闭→干燥→拆卸→检验.

传统硫酸阳极氧化溶液:180 g/L 硫酸;阳极化温度:24 ~ 26 ℃;阳极化时间:28 ~ 32 min;阴极材料:纯铅板;电流:采用 1 A/dm^2 恒流阳极化;封闭:稀铬酸封闭.

己二酸硫酸阳极氧化溶液(添加己二酸的硫酸阳极氧化溶液)组成为:50 g/L 硫酸 + 10 g/L 己二酸;阳极氧化温度:24 ~ 26 ℃;阳极化时间:18 ~ 22 min;电压:15 ± 1 V;阴极材料:纯铅板;电流:不超过 1 A/dm^2;封闭:稀铬酸封闭.

1.3 表面形貌观察

将获得的氧化膜试样进行喷金处理,用场发射扫描电子显微镜(S-4800 FE-SEM, Hitachi, Japan)观察阳极氧化膜层表面形貌及结构.

1.4 电化学阻抗谱测试

采用三电极体系于电化学工作站(Princeton 2273, Princeton Application Research)进行电化学测试. 铝合金试样为工作电极,试样的测试面积约为 7 cm^2,饱和甘汞电极为参比电极,铂电极为辅助电极. 交流阻抗谱测试的外加激励信号幅值为 ±10 mV,频率范围为 100 kHz ~ 10 mHz. 为研究不同浸泡时间对阳极氧化膜性能的影响,进行全浸泡腐蚀试验,浸泡试验所采用的溶液为 5% NaCl,置于 40 ℃的恒温水浴中,分别选取不同浸泡时间(1,3,12,30,54,80 d)进行交流阻抗谱测试.

1.5 疲劳寿命测试

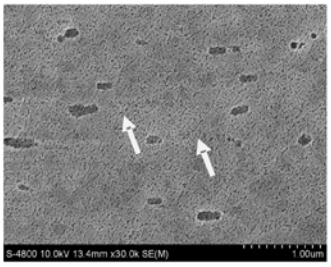
为了对比研究己二酸硫酸阳极氧化和传统硫酸阳极氧化对铝合金试样疲劳性能的影响,对同批 LY12CZ 板材试样分别进行己二酸硫酸阳极氧化和传统硫酸阳极氧化,之后进行拉-拉疲劳试验,试验标准为 HB 5287-96[13]. 所用试验机型号为万能力学实验机(INSTRON 8801)应力比 R = 0.1,频率为 30 Hz,加载应力为 12.5 kN. 疲劳试样为 205 mm × 40 mm × 3 mm 哑铃型光滑标准试样,最小截面面积为 45 mm^2,加载方向为板材 T 方向.

2 结果与讨论

2.1 阳极氧化膜微观形貌分析

图 1 分别为传统硫酸阳极氧化膜和己二酸硫酸阳极氧化膜的微观结构照片. 图 1 可见,传统硫酸阳极氧化膜缺陷明显大于、多于含有己二酸添加剂的阳极氧化膜,即己二酸硫酸阳极氧化膜具有更小、更少的缺陷. 分析原因为:阳极氧化过程中,电流容易在铝合金第二相颗粒处集中,这些第二相颗粒优先溶解,形成孔洞缺陷,造成氧化膜结构的不均匀,而且由于电流集中,局部热量积累,造成周围氧化膜过度溶解,因此这些缺陷的尺寸一般比引起它们的合金相颗粒大[14]. 阳极氧化膜中的这些缺陷是氧化膜中最薄弱的位置,是最先发生点腐蚀或引起疲劳裂纹的敏感区域[15-17]. 己二酸的加入能与溶解的铝离子结合形成难溶沉淀物,能够减缓氧化膜的溶解,从而对这些薄弱的位置进行抑制,减少了缺陷的产生.

从图 1 中还可以看出,己二酸硫酸阳极氧化膜的微观结构比传统硫酸阳极化膜具有更高的致密度,固有的孔洞结构更加细小. 这与己二酸硫酸阳极氧化工艺采用了较低的硫酸浓度,阳极化过程中电流密度更小,槽液对氧化膜的溶解性下降有关.



a　传统硫酸阳极氧化



b　硫酸-己二酸阳极氧化

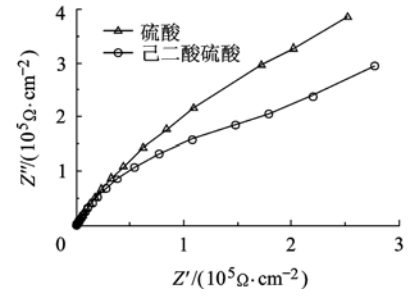
箭头所示为硫酸阳极氧化膜缺陷.

图 1　阳极氧化膜的 FE-SEM 照片

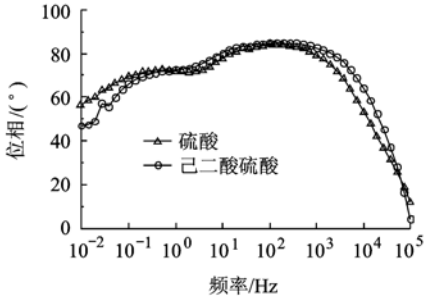
2.2　全浸腐蚀中电化学阻抗特性分析

将同批 LY12CZ 铝合金分别进行己二酸硫酸阳极氧化和传统硫酸阳极氧化,采用相同的稀铬酸封闭,进行全浸泡腐蚀试验和电化学阻抗谱测试,获得浸泡过程中交流阻抗谱图的变化,以及对应的氧化膜结构性能变化. 图 2 和图 3 分别为浸泡的第 1 d 和第 80 d 结束后对氧化膜进行电化学阻抗谱测试结果. 所有试样的 Bode 图中都可以明显观察到高频和低频两个时间常数,其中高频时间常数对应氧化膜的多孔层,低频时间常数对应氧化膜的壁垒层. Nyquist 谱图中由于高频容抗弧相对较小,主要反映了对应壁垒层的低频容抗弧.

浸泡 80 d 后谱图的形状没有发生明显变化,没有新的时间常数出现,说明试样未发生明显的腐蚀,因此可以利用 Zsimpwin 3.2 按照图 4 所示的同一等效电路进行模拟. 由于浸泡 1 d 对氧化膜的微观结构几乎没有影响,因此氧化膜孔隙及孔洞缺陷内溶液电阻 R'_s 可在一定程度上反映不同类型氧化膜的孔隙率和致密程度. 在氧化膜厚度和微观结构相似的情况下,R'_s 值越大,说明氧化膜中孔隙越细小,氧化膜致密性越高;R_p 值的差异主要体现在氧化膜中粗大孔洞缺陷上,多孔层电阻越小粗大孔洞缺陷越多;R_b 值表征了阳极氧化膜壁垒层在腐蚀性介质中的防护性能,壁垒层的厚度、组成和致密程度决定了壁垒层氧化膜的阻抗值.

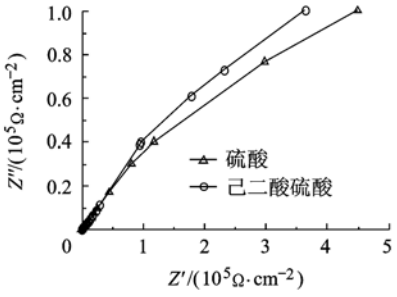


a　Nyquist 图

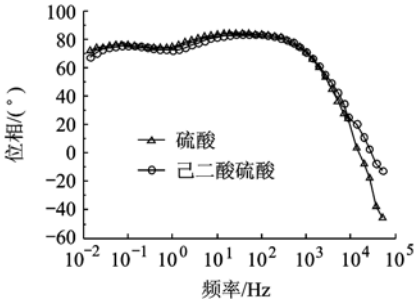


b　Bode 图

图 2　浸泡 1 d 后铝合金阳极氧化膜在氯化钠水溶液(质量分数 5%)的电化学阻抗谱图



a　Nyquist 图

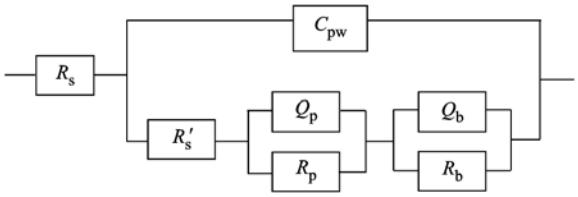


b　Nyquist 图

图 3　浸泡 80 d 后铝合金阳极氧化膜在氯化钠水溶液(质量分数 5%)的电化学阻抗谱图

表 2 为两种阳极氧化膜模拟出的对应电化学参数. 可见,传统硫酸阳极氧化膜的 R'_s 值和 R_p 值均最小,与其膜层孔洞结构较大和粗大孔洞缺陷

较多有关,而己二酸硫酸阳极氧化膜由于己二酸的加入使孔洞结构和缺陷都变得细小,与前述微观结构分析的结果一致. 而传统硫酸阳极氧化膜的 R_b 值明显高于添加己二酸的硫酸阳极氧化膜,这主要与两种阳极氧化膜的膜厚不一样有关,通过涡流螺旋测厚仪对氧化膜厚度进行测量,传统硫酸阳极氧化膜膜厚大致为 5 ~ 7 μm,而己二酸硫酸阳极氧化膜为 3 ~ 4 μm,造成这种差异的主要原因是传统硫酸阳极氧化采用的槽液硫酸浓度和电流密度高,成膜速度快,阳极氧化的时间也更长.



R_s—测试体系的溶液电阻;R'_s—多孔层未封闭小孔及氧化膜孔洞缺陷内的溶液电阻;C_{pw}—多孔层孔壁电容;R_p 和 Q_p—多孔层及氧化膜孔洞缺陷内封闭填充物的电阻和电容;R_b 和 Q_b—壁垒层的电阻和电容.

图 4 阳极氧化膜的等效电路图

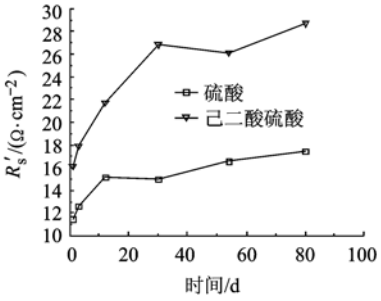
表 2 电化学阻抗谱图拟合参数

阳极氧化	R_s/Ω	R_p/Ω	R_b/Ω	拟合误差
传统硫酸阳极化	11.49	2056	2.01×10^{6}	1.63×10^{-3}
硫酸己二酸阳极化	16.13	2909	7.51×10^{5}	1.41×10^{-3}

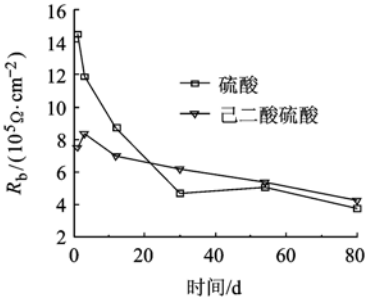
对浸泡 1,3,12,30,54,80 d 分别进行测试后的结果用图 4 所示的等效电路进行拟合,对拟合出的 R'_s 和 R_b 值进行统计得到如图 5 所示在浸泡过程中的变化. 对于图 5a 中 R'_s 的变化随着浸泡时间的延长而增大,主要有两方面的原因:①氧化膜多孔层在浸泡过程中吸收水分,存在自封闭作用[18],使得孔隙更加狭窄;②随着封闭物质和氧化膜壁垒层受到侵蚀,腐蚀性溶液逐步渗入,使得 R'_s 代表的溶液部分更加深入氧化膜内部,溶液电阻更大. 图 5b 中 R_b 值的变化主要为随着浸泡时间的延长,阻抗值减小,氧化膜的耐腐蚀能力下降,而从图中可以看出添加己二酸的硫酸阳极氧化膜由于膜重较小在浸泡初期的阻抗值低于传统硫酸阳极氧化膜,但在浸泡过程中更加稳定,阻抗值的变化小,主要由于添加己二酸后的阳极氧化膜更加致密,导致腐蚀或腐蚀溶液能够渗入的缺陷更小更少,在腐蚀环境中有更好的耐腐蚀稳定性.

2.3 疲劳寿命分析

对同批 LY12CZ 板材分别进行己二酸硫酸阳极氧化和传统硫酸阳极氧化后,按照金属材料轴向加载疲劳试验方法进行疲劳试验,试验结果如表 3 所示. 添加己二酸后的硫酸阳极氧化试样的疲劳寿命明显高于传统硫酸阳极氧化试样,己二酸的加入显著减弱了对基材疲劳寿命的损伤. 与前述微观结构分析相对照,传统硫酸阳极氧化使用高浓度硫酸槽液,对基材表面侵蚀严重,合金相会大量溶解,产生较多较大的孔洞缺陷,并由于膜厚产生较大应力,容易产生大量导致疲劳断裂的裂纹源,致使材料表面完整性受到破坏,疲劳寿命显著降低. 而己二酸硫酸阳极氧化工艺,降低了槽液中硫酸的浓度,同时己二酸的加入能有效抑制合金相的快速溶解,导致疲劳断裂的缺陷明显减少,因而提高了材料的耐疲劳性能.



a R'_s值随时间的变化



b R_b值随时间的变化

图 5 浸泡过程中 R'_s 和 R_b 值随时间的变化

表 3 不同阳极氧化疲劳测试结果

阳极氧化	i	N_i	lg N_i	lg N_{50}	疲劳寿命/周次
硫酸	1	84255	4.9256	4.8789	75666
	2	49603	4.6955		
	3	79742	4.9017		
	4	98358	4.9928		
己二酸硫酸	1	105911	5.0249	4.9599	91180
	2	150834	5.1785		
	3	74674	4.8732		
	4	57227	4.7576		
	5	92273	4.9651		

2.4 己二酸硫酸阳极氧化机理分析

己二酸硫酸阳极氧化获得的氧化膜比传统硫酸阳极氧化膜有更好的耐腐蚀性能,对疲劳损伤更小,除了与该工艺采用低浓度硫酸有关外,己二

酸的加入能有效减缓槽液对氧化膜的溶解,抑制局部缺陷的进一步扩大,使导致腐蚀破坏和疲劳破坏的缺陷明显减少,己二酸对较小浓度的硫酸阳极氧化槽液起到了明显的改性作用.

具体来说,在己二酸硫酸阳极氧化槽液中,己二酸作为一种有机弱酸(电离常数为 3.7×10^{-5}),自身存在电离平衡:

$$C_6H_{10}O_4 \leftrightarrow C_6H_{10}O_4^- + H^+ \quad (1)$$

$$C_6H_{10}O_4^- \leftrightarrow C_6H_{10}O_4^{2-} + H^+ \quad (2)$$

在 H^+ 浓度高的多孔层底部,平衡反应会向左侧移动,吸收 H^+,使局部环境的 pH 值提高,起到缓冲溶液的作用,减小了孔内溶液对阳极氧化膜的溶解. 有机羧酸可以与 Al 的氢氧化物反应生成 Al-OOC-R 型化合物,该类物质在近中性溶液中溶解度非常小,而在酸性溶液中是可溶的[20]. 对于己二酸而言,反应方程式为

$$C_6H_{10}O_4^{2-} + Al^{3+} \rightarrow Al_2(C_6H_8O_4)_3 \quad (3)$$

在紧贴壁垒层氧化膜表面的微小区域,即阳极氧化膜发生溶解的主要区域,由于电场对 H^+ 的排斥作用,以及高浓度的 Al^{3+} 和 $C_6H_{10}O_4^{2-}$ 的存在,使得该区域的反应除了氧化膜的溶解反应外,还存在式(3)所示的 $Al_2(C_6H_8O_4)_3$ 的生成反应,使得不溶性的 $Al_2(C_6H_8O_4)_3$ 在氧化膜表面生成,由于己二酸为链状有机羧酸,$Al_2(C_6H_8O_4)_3$ 化合物空间结构比 $Al_2(SO_4)_3$ 纳米胶束复杂,能更好的抑制阳极氧化槽液对氧化膜的溶解,所以己二酸硫酸阳极氧化生成的膜层具有更少、更小的缺陷和更小的孔洞结构.

3　结　论

1) LY12CZ 铝合金的己二酸硫酸阳极氧化膜比传统阳极氧化膜更加致密均匀,孔洞结构更加细小,导致腐蚀破坏和疲劳破坏的缺陷明显减少;

2) 全浸泡腐蚀过程中电化学阻抗谱测试结果表明,己二酸硫酸阳极氧化膜比传统硫酸阳极氧化膜有更好的稳定性和耐腐蚀性能;

3) 疲劳性能对比研究显示,己二酸硫酸阳极氧化比传统硫酸阳极氧化对 LY12CZ 基材的疲劳损伤更小,能够获得更好的疲劳性能.

参考文献(References)

[1] 王祝堂,田荣璋. 铝合金及其加工手册[M]. 长沙:中南大学出版社,2000
Wang Zhutang, Tian Rongzhang. Manual process of aluminum alloys[M]. Changsha: Central South University Press, 2000 (in Chinese)

[2] 周育红,韩喜江,周德瑞,等. 铝及铝合金阳极氧化膜的封闭技术[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(11):1325 - 1327
Zhou Yuhong, Han Xijiang, Zhou Derui, et al. Techniques used for sealing of anodized aluminum and aluminum alloys[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(11): 1325 - 1327(in Chinese)

[3] 蔡健平,李斌,刘明辉,等. 阳极化对航空铝合金疲劳性能的影响[J]. 航空材料学报,2007,27(2):25
Cai Jianping, Li Bin, Liu Minghui, et al. Effect of anodizing on fatigue performance of aeronautic aluminum alloys[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2007, 27(2): 25(in Chinese)

[4] 文斯雄. 铝和铝合金宽温快速阳极氧化[J]. 航空制造技术,2005,1:108
Wen Sixiong. Wide temperature range and rapid anodic oxidation of Al and Al alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005, 1: 108(in Chinese)

[5] Dattilo A. Anodizing process with low environmental impact for a workpiece of aluminum or aluminum alloy: Italy, EP1233084 A2[P]. 2002-08-21

[6] Kubota, Shizuoka, Inukai, et al. Method for anodizing aluminum materials: United States, 5851373 A1[P]. 1998-12-22

[7] Domingues L, Fernandes J C S, Ferreira M G S, et al. Anodising of Al 2024-T3 in a modified sulphuric acid/boric acid bath for aeronautical applications[J]. Corrosion Science, 2003, 45(3): 149 - 160

[8] Thomspon G E, Zhang L, Smith C J E, et al. Boricy sulfuric acid anodizing of aluminum alloys 2024 and 7075: film growth and corrosion resistance[J]. Corrosion Science Section, 1999, 55(3): 11 - 20

[9] Curioni M, Skeldon P, Koroleva E. Role of tartaric acid on the anodizing and corrosion behavior of AA2024 T3 aluminum alloy[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2009, 156(4): 147 - 153

[10] Gregory B, Nadine P, Catherine D. FESEM and EIS study of sealed AA2024 T3 anodized in sulfuric acid electrolytes: influence of tartaric acid[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2008, 155(11): 521 - 529

[11] 刘建华,李明,李松梅,等. 挤压成型对 LC4CS 铝合金棒材阳极氧化膜结构的影响[J]. 航空材料学报,2009,30(2):368 - 373
Liu Jianhua, Li Ming, Li Songmei, et al. Effect of extrusion on microstructure of anodic oxide films formed on LC4CS aluminium alloy bars[J]. Acta Aeronautical Materials, 2009, 30(2): 368 - 373(in Chinese)

[12] Liu Jianhua, Li Ming, Li Songmei, et al. Effect of microstructure of anodic oxide formation in sulfuricacid[J]. International Journal of Mineals, Metallurgy and Materials, 2009, 16(4): 432 - 438

[13] HB5287-96 金属材料轴向加载疲劳试验方法[S]
HB5287-96 Axial load fatigue testing of metal materials[S] (in Chinese)

[14] Habazaki H, Zhou X, Shimizu K, et al. Mobility of copper ions in anodic alumina films[J]. Electrochimica Acta, 1997, 42: 2627 - 2635

(下转第 379 页)

粗糙度进行归一化的基础上采用遗传算法分别对粗磨和精磨中的修整参数进行优化,且磨削实验验证优化结果误差在 10% 以内.

参考文献(References)

[1] Hosokawa A, Ueda T, Yunoki T. Laser dressing of metal bonded diamond wheel [J]. CIRP Annals, 2006, 55(1): 329 – 332

[2] Kim H Y, Ahn J H, Seo Y H. Study on the estimation of wheel state in electrolytic in-process dressing (ELID) grinding [J]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2001, 3: 1615 – 1618

[3] Sanchez J A, Ortega N, Lopez de Lacalle L N, et al. Analysis of the electro discharge dressing (EDD) process of large-grit size CBN grinding wheels [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 29(7/8): 688 – 694

[4] Meyer H R, Wiemann H J. Diamond roller dresser: their design and application considerations in Europe [J]. Ind Dia Rev, 1975: 89 – 95

[5] 邓鹏辉,吴耀宇,崔仲鸣,等. 旋转金刚石修整工具修整超硬磨料砂轮的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2009, 172(4): 68 – 70
Deng Penghui, Wu Yaoyu, Cui Zhongming, et al. Dressing of diamond grinding wheels using rotary diamond dresser [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2009, 172(4): 68 – 70 (in Chinese)

[6] 庄司克雄. 磨削加工技术[M]. 郭隐彪,王振忠译. 北京:机械工业出版社, 2007: 123 – 128
Katsuo S. Grinding technology [M]. Translated by Guo Yinbiao, Wang Zhenzhong. Beijing: China Machine Press, 2007: 123 – 128 (in Chinese)

[7] Sunho K, Jung H A. Decision of dressing interval and depth by the direct measurement of the grinding wheel surface [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 88: 190 – 194

[8] Albert J S. An experimental investigation of rotary diamond truing and dressing of vitreous bond wheels for ceramic grinding [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40: 1755 – 1774

[9] Torrance A A, Badger J A. The relation between the traverse dressing of vitrified grinding wheels and their performance [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40: 1787 – 1811

[10] 张红霞,陈志同,陈五一. 金刚石滚轮修整效果与修整机理[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(7): 816 – 820
Zhang Hongxia, Chen Zhitong, Chen Wuyi. Dressing performance and dressing mechanism of diamond roller [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(7): 816 – 820 (in Chinese)

[11] 李伟华,赵金伟. 凸轮加工中陶瓷 CBN 砂轮修整参数优化研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 30(3): 73 – 75
Li Weihua, Zhao Jinwei. Research on optimum dressing parameters of vitrified cBN wheel in cam shaft grinding [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2010, 30(3): 73 – 75 (in Chinese)

[12] 方伟,鲁涛. 修整参数对陶瓷 CBN 砂轮磨削效果的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 30(2): 25 – 28
Fang Wei, Lu Tao. Research on grinding performances of vitrified cBN wheel under different dressing parameter [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2010, 30(2): 25 – 28 (in Chinese)

[13] 任敬心,康仁科,史兴宽. 难加工材料的磨削[M]. 北京:国防工业出版社, 1999: 87 – 88
Ren Jingxin, Kang Renke, Shi Xingkuan. Grinding of difficult-to-cut materials [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 87 – 88 (in Chinese)

(编　辑:文丽芳)

(上接第 367 页)

[15] Moutarlier V, Gigandet M P, Pagetti J. Charactetisation of pitting corrosion in sealed anodic films formed in sulphuric, sulphuric/molybdate and chromic media [J]. Applied Surface Science, 2003, 206(6): 237 – 249

[16] Fanny S, Christine B, Georges M, et al. Characterisation of sealed anodic films on 7050 T74 and 2214 T6 aluminium alloys [J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 154(2): 94

[17] Ali M, Graeme E. Determination of fatigue related discontinuity state of 7000 series of aeroapace aluminum alloys [J]. Engineering Fatigue Analysis, 2007, 14(8): 673 – 685

[18] Suay J J, Gimenez E, Rodriguez T, et al. Characterization of anodized and sealed aluminium by EIS [J]. Corrosion Science, 2003, 45(21): 611 – 624

[19] 赵军,朱建龙,薛花娟,等. 阳极氧化对 7075 铝合金疲劳性能的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(3): 412
Zhao Jun, Zhu Jianlong, Xue Huajuan, et al. Effects of anodizing methods on behavior of 7075 aluminum alloy [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 40(3): 412 (in Chinese)

[20] Al-Rubaie K S, Del Grande M A, Travessa D N, et al. Effects of pre-strain on the fatigue life of 7050-T7451 aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 464(3): 141 – 150

(编　辑:文丽芳)