

轧制成形与挤压成形 2A12 铝合金 硬质阳极氧化膜性能对比研究

时春燕, 王春霞, 吴光辉, 谭小生, 黄章崎, 张玉清

(南昌航空大学 材料科学与工程学院, 南昌 330063)

摘要: **目的** 通过对轧制成形与挤压成形 2A12 铝合金金相组织结构与成分的对比研究, 获得两种成形方式下的铝合金经过硬质阳极氧化后膜层性能产生差异的原因。**方法** 利用 Keller 试剂腐蚀基材试样, 通过金相显微镜观察腐蚀形貌并分析结构差异。利用场发射电子显微镜、能谱仪、显微硬度计、Tafel 极化曲线和摩擦磨损试验机, 对轧制成形与挤压成形 2A12 铝合金基材组织结构及氧化膜的微观形貌、成分、硬度、耐腐蚀性和耐磨性进行分析。**结果** 挤压成形 2A12 铝合金内部组织析出相破碎程度较大, 存在大量微孔以及由于析出相脱落而残留的坑洞, 而轧制成形 2A12 铝合金组织结构较为致密平整, 其制备的硬质阳极氧化膜厚度为 66.03 μm , 硬度为 457.26 HV, 粗糙度为 0.98 μm , 磨损量为 0.0149 mg, 比挤压成形 2A12 铝合金制备的氧化膜厚度高出 4.11 μm , 硬度高出 221.10HV, 粗糙度降低了 0.94 μm , 磨损量低 0.7208 mg。**结论** 2A12 铝合金经过轧制成形后, 其内部组织更均匀致密, 析出相破碎率低, 在相同工艺条件下, 制备的硬质阳极氧化膜综合性能更优异。

关键词: 轧制成形; 挤压成形; 金相分析; 硬质阳极氧化膜; 硬度; 耐腐蚀性; 耐磨性

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)03-0178-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.03.025

Comparative Study on Properties of 2A12 Aluminum Alloy Hard Anodized Film by Roll Forming and Extrusion

SHI Chun-yan, WANG Chun-xia, WU Guang-hui, TAN Xiao-sheng, HUANG Zhang-qi, ZHANG Yu-qing

(School of Materials Science and Engineering, Nanchang Aeronautical University, Nanchang 330063, China)

ABSTRACT: The work aims to find out the reasons for the difference of film properties after hard anodic oxidation of aluminum alloy under the two forming ways by comparing the metallographic structure and composition of 2A12 aluminum alloy formed by rolling and extrusion. Keller reagent was used to corrode the substrate specimen, the corrosion morphology was observed by metallographic microscope and the structural differences were analyzed. Field emission electron microscope, energy spectrometer, microhardness tester, Tafel polarization curve and friction and wear tester were applied to analyze the organization structure, microstructure, composition, hardness, corrosion resistance and wear resistance of 2A12 aluminum alloy substrate formed by rolling and extrusion. The precipitated phase inside the extruded 2A12 aluminum alloy metallographic structure was

收稿日期: 2018-07-25; 修订日期: 2018-09-28

Received: 2018-07-25; Revised: 2018-09-28

基金项目: 南昌航空大学研究生创新专项资金 (YC2017007)

Fund: Nanchang Aeronautical University Graduate Innovation Special Fund (YC2017007)

作者简介: 时春燕 (1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为金属材料腐蚀与防护。

Biography: SHI Chun-yan(1993—), Female, Master student, Research focus: corrosion and protection of metal materials.

通讯作者: 王春霞 (1976—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为金属电沉积、阳极氧化、电化学加工。邮箱: wx95@163.com

Corresponding author: WANG Chun-xia(1976—), Female, Senior engineer, Research focus: metal deposition, anodic oxidation and electrochemical machining. E-mail: wx95@163.com

broken to a large extent, and had a large number of micropores and residual pits due to the precipitated phase falling off. However, the rolled 2A12 aluminum alloy had a compact and flat structure, and the thickness of hard anodic oxide film was 66.03 μm , hardness was 457.26HV, roughness was 0.98 μm and abrasion loss was 0.0149 mg, which were respectively 4.11 μm higher than the thickness of the oxide film prepared by extrusion 2A12 aluminum alloy, 221.10 HV higher for the hardness, 0.94 μm lower for the roughness, and 0.7208 lower for the abrasion loss. 2A12 aluminum alloy formed by rolling has more uniform and compact internal structure, and low broken rate of precipitated phase. Under the same process conditions, the prepared hard anodic oxide film has better comprehensive performance.

KEY WORDS: rolling and extrusion molding; metallographic analysis; hard anodic oxide film; hardness; corrosion resistance; wear resistance

铝合金具有密度小、比强度高、成形性好、成本低等一系列优点，在交通运输、航空航天、电子电器、建筑包装等方面应用广泛^[1-3]。但由于其质软、耐磨性差，因此需要采用表面改性技术增强表面耐磨性和耐蚀性，常用的处理方法为阳极氧化法^[4-5]。在实际生产应用中，铝合金需要根据生产需求被加工成具有一定形状、尺寸的零部件，主要加工技术为挤压、拉拔、轧制、锻造与冲压等^[6-7]。目前航空工业主要采用轧制成形与挤压成形方式制备 2A12 铝合金，挤压成形 2A12 铝合金应用更为广泛。其中，对于轧制成形 2A12 铝合金，采用混合酸电解液，可制备出厚度 35 μm 、硬度 386~407HV 的硬质阳极氧化膜^[8]；在硫酸、乳酸与磺基水杨酸体系中研制出的阳极氧化工艺，可以制备出硬度 372.3HV、厚度 6.8 μm 的氧化膜^[9]。在现有的工艺基础上，轧制成形 2A12 铝合金能够获得性能优异的阳极氧化膜，并在众多领域得到广泛应用，而挤压成形 2A12 铝合金获得的氧化膜硬度低、耐磨性差，并在氧化过程中极易出现烧蚀现象。

根据刘建华等^[10]对挤压成形 LC4CS 铝合金阳极氧化的研究可得，基材中的合金相种类与分布直接影响氧化膜结构与性能。

为解决挤压成形 2A12 铝合金难以满足某航发公司实际生产应用等问题，本文重点研究了轧制成形与挤压成形 2A12 铝合金基材的金相组织结构，通过对比分析两种材料的结构与成分差异和氧化膜性能区别，确定挤压态铝合金难氧化、易烧蚀的主要原因，为提高该合金氧化膜性能提供新思路、新方法。

1 实验

1.1 实验材料及方法

实验采用的材料是轧制成形与挤压成形 2A12 铝合金，2A12 铝合金的化学成分如表 1 所示。轧制成形 2A12 铝合金试样尺寸为 50 mm×20 mm×4 mm，挤压成形 2A12 铝合金试样的直径为 50 mm，厚度为 5 mm。

表 1 2A12 铝合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of 2A12 aluminum alloy

								wt%
Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Ni	Al
3.8~4.9	1.2~1.8	0.3~0.9	≤0.50	≤0.50	≤0.30	≤0.15	≤0.10	Bal.

金相试样制备方法：预先将试样切割成 10 mm×10 mm，厚度不改变，使用 280[#]、400[#]、600[#]、1200[#] 砂纸分别对试样进行逐级打磨，选择 W1 金刚石抛光膏进行抛光，直至呈镜面，无明显划痕。利用 Keller 试剂对抛光好的试样进行腐蚀，在常温下侵蚀 20~40 s。Keller 试剂的配方为：2 mL HF，3 mL HCl，5 mL HNO₃，190 mL H₂O。

氧化膜制备工艺：140 g/L 硫酸（H₂SO₄），20 g/L 草酸，30 g/L 酒石酸，缓起 15 min，氧化 45 min，温度-10 ℃，电流密度 3.0 A/dm²，采用频率为 500 Hz、占空比为 50%的单脉冲波形。

1.2 性能检测方法

采用 BM-53XB 形金相显微镜观察基材金相组

织。采用 QUANTA200 扫描电子显微镜测量氧化膜厚度。采用 HVR-3000 显微维氏硬度计测量氧化膜截面硬度，载荷 50 g，保压时间 10 s。采用 SDR990 表面粗糙度仪测量氧化膜粗糙度。采用 Nova Nano SEM450 形场发射扫描电子显微镜对喷金处理的硬质阳极氧化膜表面进行微观形貌观察。采用 D8ADVANCE 形 EDS 能谱仪测试试样表面相成分。

采用 HT-1000 高温摩擦磨损试验机测试氧化膜的耐磨性，对磨材料为 GCr15（球状），载荷为 265 g，转速为 196 r/min，磨损半径为 1 cm，对磨时间为 10 min。进行试验前，需用无水乙醇将膜层表面擦拭干净。

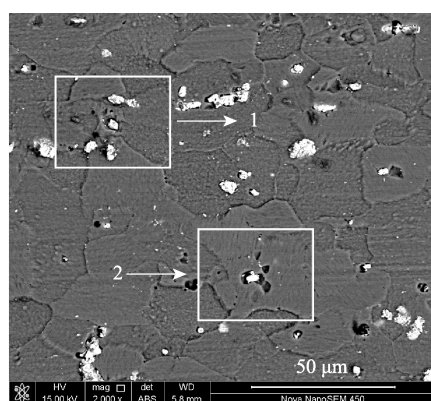
采用 CHI660 电化学工作站测试膜层的塔菲尔曲线。试验采用三电极体系，工作电极为氧化膜试样，参比电极为饱和甘汞电极，辅助电极为铂电极。扫描

速率为 5 mV/s。测试前,先将工作电极用无水乙醇擦拭,去离子水洗净后吹干,放入 3.5%的氯化钠溶液浸泡 30 min。

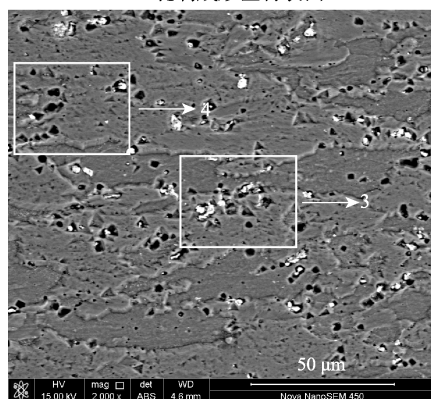
2 结果及分析

2.1 基材腐蚀形貌及成分分析

图 1 为轧制成形与挤压成形 2A12 铝合金基材表面经过 Keller 试剂腐蚀后的微观形貌。观察图 1 可得,经过 Keller 试剂腐蚀后,轧制成形 2A12 铝合金基材的金相组织晶界清晰连续,有部分白色物质沿晶界析出,存在少量孔洞,腐蚀形貌较为平整。挤压成形 2A12 铝合金基材的金相组织晶界呈锯齿形,表面分布着大量的坑洞及细小的微孔,晶胞之间也存在断层的现象,腐蚀形貌粗糙不平整。产生这种现象的主要原因是,轧制成形的试样在长度方向上与横截面上组织均匀,而挤压成形的试样由于挤压过程中金属外层主要承受剪切变形^[11-12],致使晶粒遭受很大的压力作用,产生破碎,沿晶界析出的白色物质也在力的作用下分解成更小的颗粒。图 1 中材料表面的坑洞一方面是由于金相打磨抛光过程中组织脱落留下的,另一方面是由于材料内部缺陷导致的。



a 轧制成形基材表面



b 挤压成形基材表面

图 1 基材表面腐蚀后的微观形貌

Fig.1 Microscopic morphology of the substrate surface after corrosion: a) substrate surface formed by rolling, b) substrate surface formed by extrusion

利用 EDS 对图 1 中在晶界上析出的白色物质进行成分检测,结果如图 2、图 3 所示,具体元素含量见表 2 和表 3。白色物质主要含有 Al、Cu、Mn 元素,Al-Cu 合金易于形成 CuAl_2 第二相,并分布在基体上。根据研究者^[13]关于 2A12 铝合金中沿晶界析出的 CuAl_2 第二相的研究结果,存在第二相的晶界处会形成贫铜区,从而产生晶界腐蚀。观察图 1 可得,沿晶界的析出相周围确实存在较多腐蚀坑。

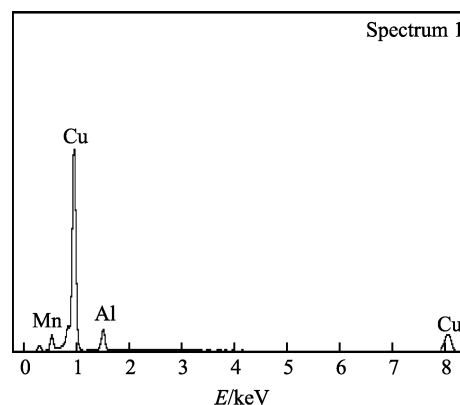


图 2 区域 1 处白色物质的能谱分析图

Fig.2 Energy spectrum analysis of white matter in region 1

表 2 区域 1 处白色物质的成分

Tab.2 Composition of white matter in region 1

Element	wt%	at%
Al K	8.28	17.51
Mn K	1.12	1.16
Cu L	90.60	881.33
Totals	100.00	100.00

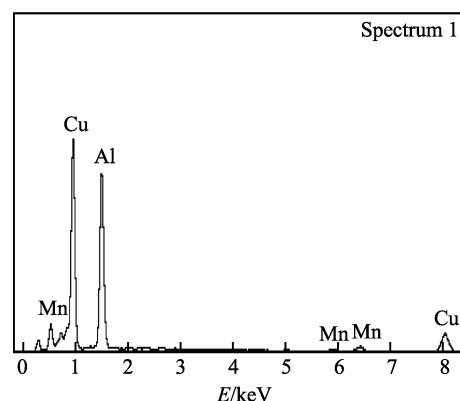


图 3 区域 3 处白色物质的能谱分析图

Fig.3 Energy spectrum analysis of white matter in region 3

表 3 区域 3 处白色物质的成分

Tab.3 Composition of white matter in region 3

Element	wt%	at%
Al K	37.5	58.46
Mn K	1.7	1.3
Cu L	60.80	840.24
Totals	100.00	100.00

为了进一步分析轧制与挤压两种成形工艺对 2A12 铝合金组织结构造成的差异, 本实验对基材截面组织结构也进行了深入研究。观察图 4 与图 1 可得, 轧制成形 2A12 铝合金基材表面与截面的金相组织均呈清晰的块状结构, 而挤压成形 2A12 铝合金基材表面与截面组织分布却截然不同, 主要由于在挤压成形

过程中, 粗大的析出相颗粒破碎, 并沿长度方向被拉长, 呈纤维状结构。通过对 2A12 铝合金基材表面与截面金相组织结构的对比可以得到, 轧制成形制品在长度方向上与横断面方向上组织分布均匀, 析出相主要沿晶界析出; 而挤压成形的制品横断面上析出相破碎情况严重, 存在大量孔洞, 在长度方向上, 颗粒较大, 主要沿直线排列。

2.2 氧化膜微观形貌分析

图 5 与图 6 分别为轧制成形与挤压成形 2A12 铝合金在相同工艺条件下制备的硬质阳极氧化膜表面微观形貌图。由图 5 可以看出, 轧制成形 2A12 铝合金氧化膜表面除了本身存在的坑洞外, 无明显氧化过程中烧蚀留下的坑洞, 而挤压成形 2A12 铝合金氧化膜表面出现较多腐蚀坑。结合图 1 与图 3 分析可得, 挤压成形 2A12 铝合金本身存在较多细碎的微孔以及粗大的析出相 (主要是第二相), 在阳极氧化过程中, 析出相会造成局部表面在反应活性上的差异, 如果析出相对于铝基体是阳极, 通常会优先溶解或氧化, 如果是阴极, 则不发生反应, 直接被包覆在氧化膜中, 形成异相杂质。 CuAl_2 第二相在转化初期属于阳极相, 后期由于 Al 元素的脱合金化使得富 Cu 的多孔残留物电位正移, 成为阴极相。

王曼等^[14]对 CuAl_2 第二相在 2A12 铝合金阳极氧化过程中的影响做出了以下研究。 CuAl_2 相的溶解速度高于 Al, 使得氧化膜产生坑腐蚀, 在铝合金硬质阳极氧化过程中, 电流密度会在第二相处集中, 致使此处溶解速度加快, 出现烧蚀现象, 形成比析出相颗粒更大的腐蚀坑, 如图 6 所示。由王曼等人所述, 解决由于第二相的存在而导致膜层过热出现烧蚀现象的办法是, 采用固溶时效及其他热处理工艺, 使 CuAl_2 相溶于 $\alpha(\text{Al})$ 相中, 减少烧蚀情况的发生, 从而获得均匀致密的氧化膜层, 膜层结构如图 5 所示。

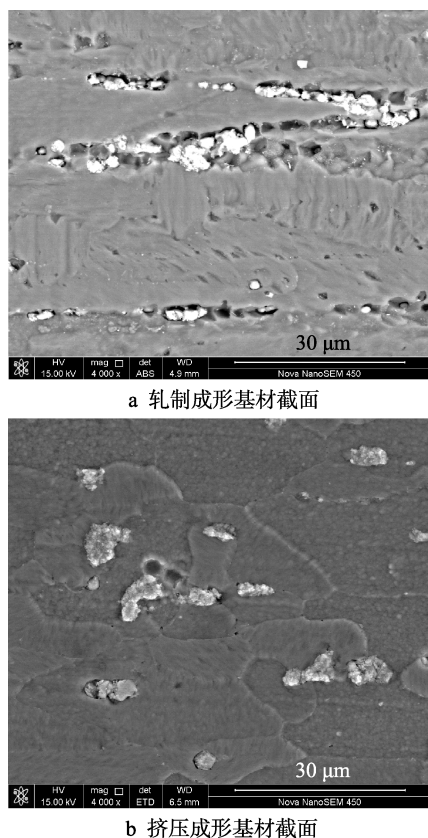


图 4 基材截面腐蚀后的微观形貌
Fig.4 Microscopic morphology of the cross section of the substrate after corrosion: a) cross section of the substrate formed by rolling, b) cross section of the substrate formed by extrusion

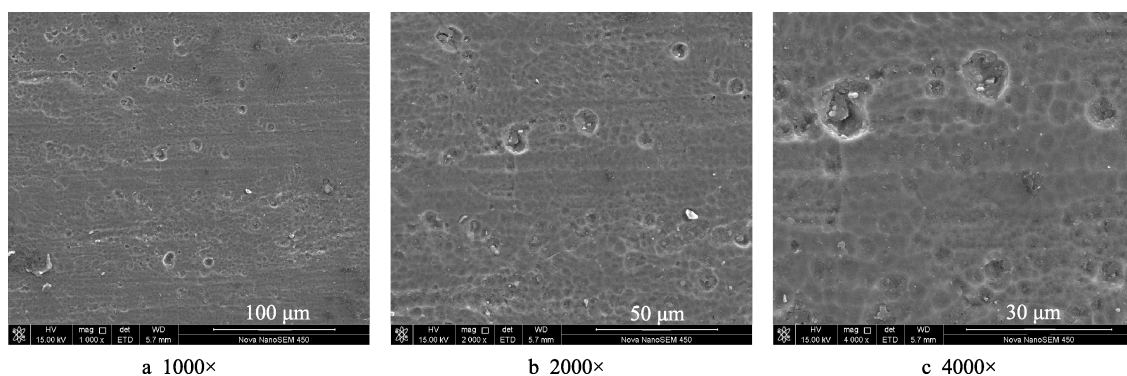


图 5 轧制成形 2A12 铝合金氧化膜表面微观形貌
Fig.5 Microscopic morphology of the surface of 2A12 aluminum alloy oxide film formed by rolling

由图 5 可得, 轧制成形 2A12 铝合金在实验所述工艺条件下制备的氧化膜均匀致密, 表面没有烧蚀孔洞, 因此其硬度较高, 可达到 450HV 以上。国内外

关于此类合金, 其阳极氧化工艺较为成熟, 氧化膜性能优异。但挤压成形 2A12 铝合金采用相同工艺制备的氧化膜疏松多孔, 性能偏差, 难以满足某航发公司

的实际生产应用。结合图1、图4对基材结构的分析,为提高挤压成形2A12铝合金的氧化膜性能,可以从

消除组织中 CuAl_2 第二相着手,开发新形硬质阳极氧化工艺,以满足工业应用。

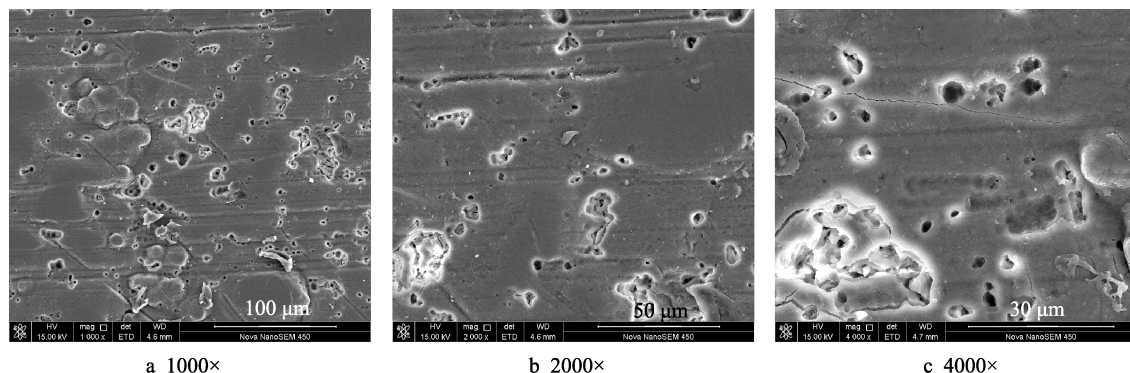


图6 挤压成形2A12铝合金氧化膜表面微观形貌

Fig.6 Microscopic morphology of the surface of 2A12 aluminum alloy oxide film formed by extrusion

2.3 膜厚、硬度及粗糙度分析

表4为轧制成形与挤压成形2A12铝合金经过硬质阳极氧化后氧化膜的硬度、厚度及粗糙度。可以得出,轧制成形2A12铝合金氧化膜硬度比挤压成形2A12铝合金氧化膜硬度值高出221.10 HV,膜厚高出4.11 μm ,粗糙度高出0.94 μm 。轧制成形2A12铝合金氧化膜与挤压成形2A12铝合金氧化膜硬度、粗糙度相差较大。主要由于挤压成形2A12铝合金内部存在大量孔洞且分布较多颗粒粗大的析出相,导致阳极氧化成膜过程中膜层被击穿腐蚀,疏松多孔,致密度降低,从而硬度偏低。此外,挤压成形2A12铝合金氧化膜表面由于孔洞偏多,凹凸不平,故其粗糙度偏大。

表4 氧化膜硬度、膜厚及粗糙度

Tab.4 Hardness, thickness and roughness of the oxide film

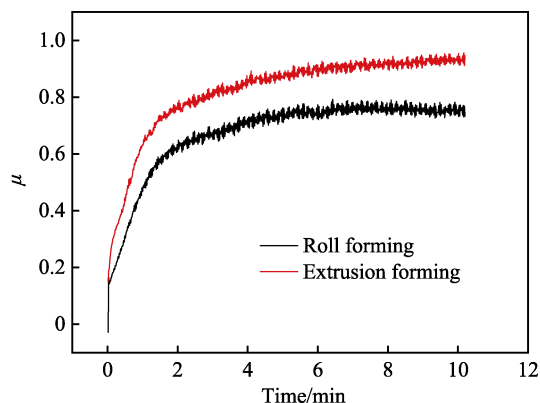
Samples	Hardness (HV)	Thickness / μm	Roughness / μm
Roll forming	457.26	66.03	0.98
Extrusion forming	236.16	61.92	1.92

2.4 摩擦磨损分析

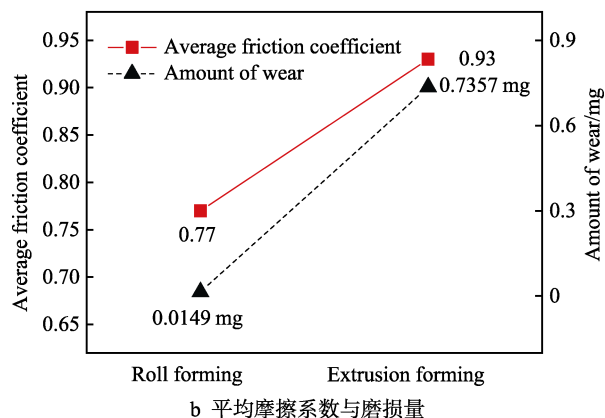
图7为轧制成形与挤压成形2A12铝合金制备的硬质阳极氧化膜摩擦系数曲线与磨损量变化。如图7a,前2 min内,由于对磨材料表面吸附物与氧化膜表面凸体的影响,氧化膜摩擦系数增长速度较快,此过程为磨合阶段^[15]。随着摩擦磨损试验的进行,进入稳定磨损阶段,摩擦系数曲线逐渐趋于平稳。

由图7b可知,轧制成形2A12铝合金的平均摩擦系数与磨损量比挤压成形2A12铝合金的分别小0.16和0.7208 mg,通过评价氧化膜的平均摩擦系数与磨损量,得出轧制成形2A12铝合金氧化膜的耐磨性优于挤压成形2A12铝合金。在外界因素(环境温度、测试条件等)一定的情况下,影响阳极氧化膜的摩擦学行为的主要因素为氧化膜的致密度、硬度与粗

糙度等^[16]。轧制成形2A12铝合金制备的硬质阳极氧化膜更加致密均匀,更加光滑,从而使其摩擦系数较低;另一方面,其硬度值较高,对偶材料对膜层的磨损作用弱,因此其耐磨性能更好。



a 氧化膜摩擦系数曲线



b 平均摩擦系数与磨损量

图7 氧化膜的摩擦系数与磨损量

Fig.7 Friction coefficient and wear amount of oxide film:

a) friction coefficient curve of oxide film, b) average friction coefficient and wear amount

2.5 Tafel 曲线分析

轧制成形与挤压成形2A12铝合金经过硬质阳极

氧化制备的氧化膜 Tafel 极化曲线如图 8 所示，对应的自腐蚀电位与自腐蚀电流密度如表 5 所示。对于电化学腐蚀，自腐蚀电位越正，自腐蚀电流密度越小，膜层的耐蚀性越好^[17]。由表 5 可知，轧制成形 2A12 铝合金氧化膜的自腐蚀电位更正，自腐蚀电流密度更小，因此其耐蚀性较优异。

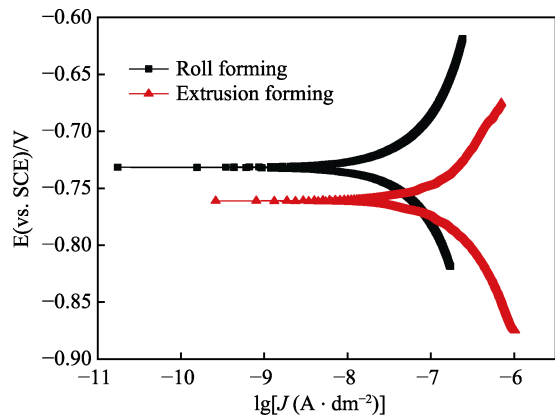


图 8 氧化膜的 Tafel 极化曲线
Fig.8 Tafel polarization curve of oxide film

表 5 氧化膜的自腐蚀电位与自腐蚀电流密度
Tab.5 Self-corrosion potential and self-corrosion current density of oxide film

Samples	Corrosion current density/(A·cm ⁻²)	Corrosion potential/V
Roll forming	2.914×10 ⁻⁸	-0.7316
Extrusion forming	9.842×10 ⁻⁸	-0.7611

挤压成形 2A12 铝合金氧化膜耐蚀性较低的主要原因是，该合金内部存在大量粗大的析出相与杂质，氧化膜极易被烧蚀，破坏了膜层的完整性，获得的氧化膜疏松多孔，多孔层最外侧抵御 Cl⁻ 的腐蚀能力下降，使其耐蚀性偏低。

3 结论

- 1) 通过轧制成形获得的 2A12 铝合金内部组织结构均匀致密，存在少量孔洞与析出相。挤压成形 2A12 铝合金表面分布着大量的坑洞及细小的微孔，腐蚀形貌粗糙不平整，大幅度增加了阳极氧化反应过程中膜层被烧蚀的情况，从而其制备的氧化膜硬度、耐蚀性与耐磨性等性能偏差。
- 2) 轧制成形 2A12 铝合金氧化膜的厚度、硬度比挤压成形 2A12 铝合金氧化膜分别高出 4.11 μm、221.10 HV，粗糙度降低了 0.94 μm，平均摩擦系数减小了 0.16，磨损量低 0.7208 mg。
- 3) 轧制成形 2A12 铝合金氧化膜的自腐蚀电位比挤压成形 2A12 铝合金氧化膜的正移了 0.0295 V，自腐蚀电流密度小 6.928×10⁻⁸ A/cm²，抗腐蚀能力更强。

参考文献

- [1] 丁科. 7A04 铝合金热挤压工艺的基础研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
DING Ke. Basic study on the hot extrusion process of 7A04 Al-alloy[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2008.
- [2] 刘静安, 谢水生. 铝合金材料应用与开发[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
LIU Jing-an, XIE Shui-sheng. Aluminum alloy material application and development[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.
- [3] BAI Yue-long, XU-jun, LI Da-pu, et al. Automatic feeding mechanism for circular sawing machine: CN, 203019124U[P]. 2012-12-27.
- [4] 黄有国, 李庆余, 王红强. 铸造铝合金表面改性研究进展[J]. 电镀与精饰, 2011, 33(9): 13-16.
HUANG You-guo, LI Qing-yu, WANG Hong-qiang. Advances in surface modification of cast aluminum alloy[J]. Plating & finishing, 2011, 33(9): 13-16.
- [5] 马胜利, 井晓天. 铝及铝合金阳极氧化膜结构及其应用[J]. 兵器材料科学与工程, 1998(4): 54-57.
MA Sheng-li, JING Xiao-tian. Structure of anodic oxide films of Al and its alloys and its application[J]. Ordnance material science and engineering, 1998(4): 54-57.
- [6] 胡新, 宋群玲, 张文莉, 等. 金属塑性加工生产技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
HU Xin, SONG Qun-ling, ZHANG Wen-li, et al. Metal plastic processing production technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.
- [7] 王仲仁. 塑性加工力学基础(一)[J]. 锻压技术, 1980(1): 41-46.
WANG Zhong-ren. Plastic machining mechanics(一)[J]. Forging & stamping technology, 1980(1): 41-46.
- [8] 钱建才, 邹洪庆, 许斌, 等. 电解液对 2A12 铝合金硬质阳极氧化膜层性能的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(11): 40-45.
QIAN Jian-cai, ZOU Hong-qing, XU Bin, et al. Influence of electrolyte on the properties of hard anodic oxide coating on 2A12 aluminium alloy[J]. Surface technology, 2015, 44(11): 40-45.
- [9] 戴一帆, 沈士泰, 卢洁琴, 等. 2024 铝合金混合酸阳极氧化[J]. 表面技术, 2018(1): 198-202.
DAI Yi-fan, SHEN Shi-tai, LU Jie-qin, et al. 2024 aluminum alloy mixed acid anodizing[J]. Surface technology, 2018(1): 198-202.
- [10] 刘建华, 李明, 李松梅, 等. 挤压成形对 LC4CS 铝合金棒材阳极氧化膜结构的影响[J]. 航空学报, 2009, 30(2): 368-373.
LIU Jian-hua, LI Ming, LI Song-mei, et al. Effect of extrusion on microstructure of anodic oxide films formed on LC4CS aluminium alloy bars[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2009, 30(2): 368-373.
- [11] 武红林, 宋微, 张燕飞. 铝合金形棒材挤压生产[M].

- 长沙: 中南大学出版社, 2011.
- WU Hong-lin, SONG Wei, ZHANG Yan-fei. Aluminum alloy bar extrusion production[M]. Changsha: Central South University Press, 2011.
- [12] 王大伟, 张艳飞, 林森, 等. 2A50 铝合金挤压棒材尾端粗晶的产生原因及改善措施[J]. 轻合金加工技术, 2016, 44(9): 41-46.
- WANG Da-wei, ZHANG Yan-fei, LIN Sen, et al. Causes of coarse grains at the end of extruded bars of 2A50 Al alloy and corresponding improvement measures[J]. Light alloy fabrication technology, 2016, 44(9): 41-46.
- [13] 邓丽虹, 魏晓伟, 杜全强, 等. 热处理对铝合金 2A12 硬质阳极氧化膜粗糙度的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(6): 146-149.
- DENG Li-hong, WEI Xiao-wei, DU Quan-qiang, et al. Effects of heat treatment on roughness of hard anodic oxide film on 2A12 alloy[J]. Hot working technology, 2011, 40(6): 146-149.
- [14] 王曼, 纪嘉明, 程飘, 等. 固溶处理对 2A12 铝合金硬质阳极氧化的影响[J]. 材料保护, 2016, 49(10): 56-58.
- WANG Man, JI Jia-ming, CHENG Piao, et al. Effects of solution treatment on hard anodizing of 2A12 aluminum alloy[J]. Materials protection, 2016, 49(10): 56-58.
- [15] 张晔, 李长生, 李学超. 磁控溅射 $Ti_{1-x}Al_xN$ 薄膜的结构与摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2009(6): 518-525.
- ZHANG Ye, LI Chang-sheng, LI Xue-chao. Microstructure and tribological properties of $Ti_{1-x}Al_xN$ films fabricated by double-targeted co-sputtering[J]. Tribology, 2009(6): 518-525.
- [16] 张鹏, 陈朝轶, 刘静, 等. 2024 铝合金阳极氧化膜腐蚀性能研究[J]. 铸造技术, 2012, 33(9): 51-53.
- ZHANG Peng, CHEN Zhao-yi, LIU Jing, et al. Investigation on corrosion behavior of anodic oxide film on 2024 aluminum alloy[J]. Foundry technology, 2012, 33(9): 51-53.
- [17] 刘道新. 材料的腐蚀与防护[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- LIU Dao-xin. Corrosion and protection of materials[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006.