

DOI: 10.3901/JME.2023.12.236

精密仪表用铝合金瓷质阳极氧化表面粘接性能研究*

郭磊¹ 刘检华^{1,2} 夏焕雄^{1,2} 敖晓辉^{1,2}

(1. 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081;

2. 北京理工大学唐山研究院 唐山 063015)

摘要: 铝合金瓷质阳极氧化工艺是精密仪表制造中的一种特殊且关键的技术应用, 但该氧化表面的胶粘连接常常出现脱粘、泄漏等失效问题。为此, 通过探究瓷质阳极氧化表面的微纳形貌与润湿性特征以及高低温下的胶接强度与失效模式, 并与自然氧化表面及磷酸阳极氧化表面进行对比分析, 阐明瓷质阳极氧化表面胶接失效的影响机理。结果表明, 磷酸阳极氧化虽未在微米尺度上显著改变表面粗糙度, 但其纳米级多孔氧化膜结构, 可显著提高表面润湿性与界面粘接作用力; 而瓷质阳极氧化膜在 50 000× 的 SEM 形貌下较为致密、平滑, 显示出不利于胶粘剂润湿与吸附的物理特征; 在 -30~80 °C 下, 温度与氧化方法均对胶接强度影响显著, 胶接强度随着温度的升高而降低; 磷酸阳极氧化表面的强度最高(36.75~20.54 MPa), 其次为自然氧化, 最差为瓷质阳极氧化(24.79~17.10 MPa)。热红外与能谱分析表明, 瓷质阳极氧化表面的粘附强度低于胶粘剂的内聚强度, 失效模式为粘附失效, 而磷酸阳极氧化表面的失效模式为胶粘剂的内聚失效。因此, 瓷质阳极氧化表面由于氧化膜的致密性, 缺少类似磷酸阳极氧化膜的纳米级多孔结构, 不利于表面润湿吸附, 降低了胶粘剂与基底表面的机械嵌合作用, 从而易产生粘接失效。

关键词: 精密仪表; 瓷质阳极氧化; 磷酸阳极氧化; 胶接强度; 失效分析

中图分类号: TH16

Analysis of Adhesion Performance of Porcelain-like Anodized Aluminum-alloy Surface for Precision Instruments

GUO Lei¹ LIU Jianhua^{1,2} XIA Huanxiong^{1,2} AO Xiaohui^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;

2. Tangshan Research Institute, Beijing Institute of Technology, Tangshan 063015)

Abstract: The porcelain-like anodizing (PLA) process for aluminum alloys is a special and key technology in the manufacture of precision instruments, but the bonding structure with the anodized surfaces often suffers from connection failures such as debonding and leakage. To study this issue, the micro-nano morphology and wettability of the porcelain-like anodized surface and the bonding strength and failure mode at high and low temperatures were examined, comparisons with the naturally oxidized (NO) surface and the phosphoric acid anodized (PAA) surface were carried out, and the influence mechanism of adhesive failure on the precision anodized surface was understood. The results show that although PAA does not significantly change the surface roughness on the micron scale, its anodized film with nano-scale porous structure can improve the surface wettability and the interfacial bonding force; the SEM morphology at 50k times shows that the PLA surface is relatively dense and smooth, which is not conducive to wetting and adsorption of the adhesive; both the temperature (from -30 °C to 80 °C) and the surface factors have significant effects on the bonding strength, and the strength decreases with the increase of the temperature; the bonding strength of the PAA surface is the highest

* 国家自然科学基金(51935003, 52105504)、国防基础科研(JCKY2019203B031)和装备重大基础研究(514010208-301)资助项目。
20220619 收到初稿, 20230319 收到修改稿

(36.75-20.54 MPa), then the NO surface followed by the PLA surface (24.79-17.10 MPa). The thermal infrared and energy spectrum analyses show that the adhesive strength of the PLA surface is lower than the cohesive strength of the adhesive, and the failure mode is adhesion failure, while the failure mode of the PAA surface is the cohesive failure of the adhesive. Therefore, the adhesion failure of the PLA surface mainly results from the compact anodized film, which is not conducive to adhesive wetting and adsorption and then weakens the mechanical interlocking effect between the adhesive and the substrate surface compared with the PAA film with nano-scale porous structures.

Key words: precision instrument; porcelain-like anodizing; phosphoric acid anodizing; bonding strength; failure analysis

0 前言

瓷质阳极氧化工艺类似于一般的阳极氧化,是在铝合金氧化的电解液中加入钛、锆等金属盐类或使用铬酸和草酸,将产生的一些灰色物质沉淀于氧化膜的膜孔中,从而形成一层非常致密的氧化膜,该氧化膜附着力强、有着搪瓷的质地光泽,可大幅提高零件表面的硬度、抗腐蚀性、绝热性与绝缘性等性能,同时还可以保持零件原有的表面粗糙度与加工尺寸精度^[1-4]。但由于瓷质阳极氧化方法的工艺复杂、成本较高,应用较少,主要应用于高精密的仪器仪表等产品中,例如惯性仪表内部结构件的绝缘处理、接线端子与壳体间的绝缘连接等关键位置^[5]。

胶接装配是精密仪表等产品制造中的常用关键连接技术之一。由于铝合金材料非常活泼,在空气中极易发生自然氧化,从而生成一层疏松不均匀的膜层。为改善铝合金材料的表面质量,工程应用中,可采用物理、化学/电化学、激光、等离子等不同方式对其进行表面预处理,而表面处理方法又会对铝合金材料的粘接性能产生重要影响^[6-8]。电化学处理是其中一种有效的表面改性方法,而根据电解溶液的不同,包括铬酸、磷酸、硫酸、硼酸、瓷质等多种阳极氧化方法。CORREIA 等^[9]分别采用磷酸、铬酸、硫酸等阳极氧化方法处理航空用铝合金表面,进行了新接头粘接与损坏接头修复后的剪切试验,结果表明硫酸阳极氧化后的粘接效果要优于前两种氧化工艺,粘接强度提高了 8%。KINLOCH 等^[10]研究表明,在提高铝合金胶接耐久性能的表面处理方法中,磷酸阳极氧化方法优于铬酸阳极化方法,更优于铬酸浸蚀处理方法。LEFEBVRE 等^[11]则对比了磷酸与硫酸阳极氧化方法对铝合金胶接接头的疲劳寿命的影响,结果表明前者可以提供更好的粘接表面。GUO 等^[12]通过对比电化学与喷砂表面处理方法,指

出磷酸阳极氧化表面具有更好的润湿特性,氧化膜的纳米级多孔结构更有利于提高粘接相互作用。

BRISKHAM 等^[13]分析了磷酸阳极氧化、打磨和脱脂处理等不同表面处理对胶接结构静态与疲劳性能的影响,在静态条件下,不同表面处理方法对单搭接剪切强度影响差异不明显,而在疲劳试验中表现出显著性差异,在 55 °C 水中,交变载荷为 0.15~1.2 MPa、2 Hz 时,打磨和脱脂处理的胶接试样疲劳寿命小于 100 h,而磷酸阳极氧化处理的胶接结构寿命可高达 1 100 h。BLAND 等^[14]的研究表明,磷酸阳极氧化胶接接头在液态水及水蒸气环境下均具有较好的疲劳寿命。因此,磷酸阳极氧化处理通常是提高铝合金表面粘接性能的最佳方法。

在精密仪表中,受几何结构与功能性能的限制,壳体组成零件、壳体零件与引出端子之间均大量采用胶粘连接^[15],为保证壳体的尺寸精度与良好绝缘性,瓷质阳极氧化工艺相较于其他阳极氧化方法,可较好地适用于精密仪表关键零件的制造。然而,在工程实践中,瓷质阳极氧化表面的胶粘连接位置常常因固化、二次加工、振动、温循等过程应力,出现脱粘、漏粘等连接失效现象。目前,瓷质阳极氧化的相关研究主要为该工艺方法技术参数的优化研究^[16-17],例如,应燕翔等^[18]采用温度梯度方法提高了瓷质氧化膜的均匀性、膜厚和硬度等性能;伍宇昊等^[19-20]则改进了电解溶液配方对瓷质阳极氧化工艺进行了优化。由于瓷质阳极氧化的成本高、应用领域窄,所以目前针对瓷质阳极氧化方法对胶接性能影响的研究较少,从而缺少相关的技术与理论支撑。

为此,本文针对瓷质阳极氧化工艺在精密仪表胶接装配中的应用及其在外载荷影响下的失效现象,开展表面特性、胶接强度等分析研究,并与未处理(自然氧化)表面及磷酸阳极氧化处理表面的胶接性能进行对比,探究瓷质阳极氧化工艺对胶接性能的影响机理,为瓷质阳极氧化铝合金零件的胶接设计及其性能改进提供理论依据。

1 材料、方法与设备

1.1 基底与胶粘剂材料

粘接基底材料选用航空航天轻质硬铝合金材料 2A12-T4(GB/T 3191—1998)。胶粘剂材料为一种航天精密仪表专用的环氧树脂基结构胶粘剂,由双酚 A 型环氧树脂、2-乙基-4-甲基咪唑和丁腈橡胶按照一定配比与标准工艺方法进行混合配制而成,固化温度为 $80\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,固化时间为 4 h,玻璃化转变温度 T_g 为 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

1.2 表面处理方法

铝合金基底样件首先通过精密铣削加工方式获得,再分别采用磷酸阳极氧化与瓷质阳极氧化方法对铝合金样片进行表面处理,未做阳极氧化处理的零件则为自然氧化样品,从而可获得三种不同氧化表面特征的对照样品,即自然氧化(NO)、瓷质阳极氧化(PLA)、磷酸阳极氧化(PAA)。

铝合金基底的瓷质与磷酸阳极氧化原理较为相似,氧化过程发生在电解液中,铝合金样件在电极的阳极,阴极则发生导电与析氢反应。铝合金样片先与水中电解出的氧原子反应生成氧化铝薄膜,该氧化膜同时与电解液中的酸反应溶解,当铝合金表面氧化膜的生成速率大于其溶解速率时,氧化膜厚度则会不断增加^[21-22]。阳极氧化的主要工艺参数如下。

(1) 瓷质阳极氧化。瓷质阳极氧化按电解液配方的不同,主要有草酸钛钾法、硫酸铝法、混合酸法等^[5, 19, 23]。本研究中采用的为航天工业中的铝及铝合金材料的精密零件瓷质阳极氧化方法(QJ/Z 69-85),溶液配方为:草酸钛钾($\text{K}_2\text{TiO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) $35\sim 45\text{ g/L}$,草酸($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) $2\sim 7\text{ g/L}$,硼酸(H_3BO_3) $8\sim 10\text{ g/L}$,柠檬酸($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\cdot \text{H}_2\text{O}$) $1\sim 1.5\text{ g/L}$ 。电压为 $110\sim 130\text{ V}$,时间为 $30\sim 50\text{ min}$,温度为 $25\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 磷酸阳极氧化。磷酸阳极氧化方法采用的为航天工业中胶接前零件表面处理方法(QJ 2908-97),溶液配方为磷酸溶液 $120\sim 160\text{ g/L}$,电压为 $10\text{ V}\pm 0.5\text{ V(DC)}$,时间为 $20\text{ min}\pm 1\text{ min}$,温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.3 测试设备与方法

1.3.1 表面性能分析测试

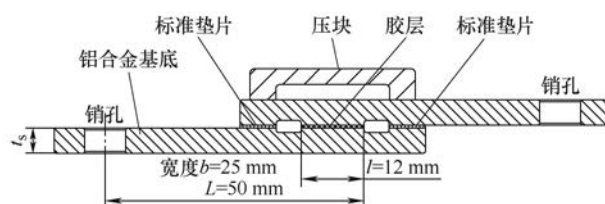
针对氧化的基底表面,利用高精度涂层厚度测试仪(JITAI 660, N1 电涡流探头)测试氧化层厚度;利用粗糙度分析仪(JITAI-TR200)测定二维粗糙度,

取样长度为 0.8 mm ;利用白光干涉仪(镜头 $10\times$, $\text{WD}=7.4\text{ mm}$, Talysurf CCI)分析三维形貌,采样面积为 $0.41\times 0.41\text{ mm}^2$;利用接触角分析仪测试不同氧化表面的润湿特性。针对胶接失效后的基底表面,利用热红外成像方法(iRay AT615X)及扫描电镜(SEM)分析微观形貌;利用配有 EDS 的扫描电镜(ZEISS Gemini Sigma 300 SEM)分析失效表面的形貌与能谱特征,从而获得基底胶层残留情况。

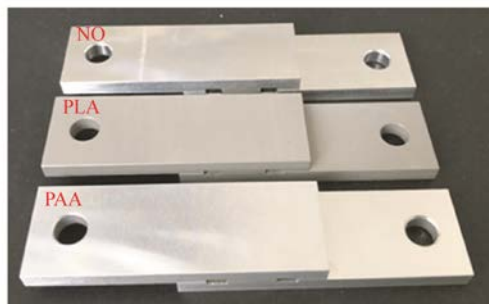
1.3.2 单搭接胶接接头制备

为了提高胶接接头刚度,避免基底变形对试验结果的影响,本试验中的铝合金基底样片在 ASTM D1002^[24]方法的基础上进行了改进:① 通过将胶接基底厚度增加,长度减小,提高了拉伸过程的刚度,保证剪切应力的理论计算结果更符合真实值;② 通过采用标准垫片方式,准确控制微米级的胶层厚度,避免了胶层厚度误差对试验结果的影响;③ 通过采用“销轴+销孔”的方式将试样装卡在试验机的专用夹具上,提高了接头在单向拉伸剪切过程的对中性。如图 1 所示,胶接基底的外形尺寸为 $70\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 5\text{ mm}$,其中,粘接尺寸为 $12\text{ mm}\times 25\text{ mm}$,销孔中心至胶层区域边缘的长度为 50 mm ,胶层厚度(标准垫片厚度)为 0.05 mm 。

铝合金基底在制备单搭接胶接接头试样前均需使用丙酮溶剂进行脱脂处理,胶接试样制备原理示意图及三种氧化表面的单搭接胶接接头实物样件如图 1 所示,详细制备方法可参见以往研究^[12, 25]。



(a) 制备原理示意图



(b) 实物样件

图 1 单搭接试样制备原理示意图及实物样件

1.3.3 剪切性能测试

根据精密仪表在贮存与工作等复杂环境下的温度变化情况,分别在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、室温($23\text{ }^{\circ}\text{C}$)及 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$

三种温度条件下进行单向拉伸剪切试验。力学性能测试过程采用带有环境控制箱的万能材料试验机(MTI)。其中,在进行高低温条件的拉伸测试时,为了保证环境温度与胶接接头内部温度达到平衡,需将单搭接试件在环境控制箱中的温度稳定 20 min 后再开始测试。三种温度条件下的剪切拉伸速率均为 1 mm/min,每组试验重复 5 次,计算最大静态剪切强度的平均值,其中,最大静态剪切强度计算如下

$$\tau = F/S \quad (1)$$

式中, τ 为最大切应力, MPa; F 为最大剪切载荷, N; S 为胶接面积, mm²。

2 结果与分析

2.1 微纳观表面分析

在粘接前,对三种氧化表面的基本参数进行测定,如表 1 所示。瓷质阳极氧化与磷酸阳极氧化的氧化层厚度较薄,为 5~8 μm。瓷质阳极氧化与磷酸阳极氧化表面比自然氧化表面的粗糙度 Ra 值略有减小,但差别不大,表面两种阳极氧化处理方法均未对表面粗糙度(Ra)产生显著影响。同时,从接触角测试结果可知, $0^\circ < \theta_{PAA} < \theta_{PLA} < \theta_{NO} < 90^\circ$, 根据热力学润湿方程

$$W_a = \gamma_{LG}(\cos\theta + 1) \quad (2)$$

式中, W_a 、 γ_{LG} 、 θ 分别为粘附功、液体表面张力和接触角,当 $0 < \theta < 90^\circ$ 时,固体表面为亲水表面,且粘附功 W_a 越大,液固界面的结合越好。因此,三种氧化表面均为亲水表面,磷酸阳极氧化表面的润湿性最好,而瓷质氧化表面与自然氧化表面的接触角相近,表明瓷质氧化过程形成的氧化膜并未显著提高铝合金表面的润湿特性。

表 1 三种氧化处理表面的基本性能参数

氧化方法	氧化层厚度/μm	粗糙度/μm	接触角/(°)
自然氧化(NO)	<0.1*	0.40±0.06	83.40±1.02
瓷质阳极氧化(PLA)	8.3±0.4	0.28±0.07	81.07±1.18
磷酸阳极氧化(PAA)	5.3±0.2	0.32±0.06	61.50±0.87

注: *低于测试仪器分辨率。

图 2 从二维与三维微观尺度对三种氧化表面的形貌进行了表征。其中,三种氧化表面的三维纹理特征较为相似,均呈现“波纹状”特征,表明阳极氧化处理均未明显改变基底表面的原有微观形貌。但从二维形貌上看,瓷质阳极氧化与磷酸阳极氧化方法对更小尺度下的纹理特征有显著影响,在原有波纹的基础上出现了更多的“锯齿”或“尖峰”,而且后者比前者更为明显,该特征的显现可能与电化学氧化过程中的腐蚀程度有关。

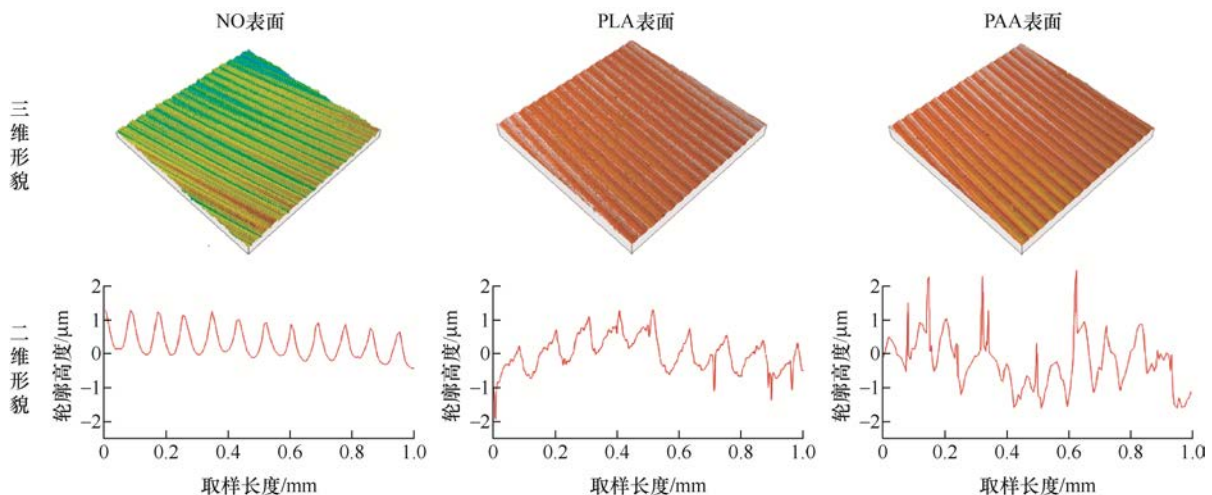


图 2 氧化表面微观形貌

如图 3 所示,采用扫描电子显微镜(SEM)分别在低倍(2 000×)和高倍(50 000×)下分析三种氧化表面的微纳观尺度形貌。可以看出,三种氧化表面的微纳观形貌特征有着明显不同。自然氧化表面(图 3a)保留有原始的机械加工痕迹与微观损伤,但未呈现明显的氧化膜特征;

瓷质阳极氧化表面在 2 000 倍(图 3c)下较为光滑平整,在 50 000 倍(图 3d)下仍然呈现出较为明显的平整致密特征;磷酸阳极氧化表面在高倍(50 000, 图 3f)下呈现出典型的纳米级“晶须状”或“多孔状”氧化膜结构,这是其具有良好亲水特性的原因。

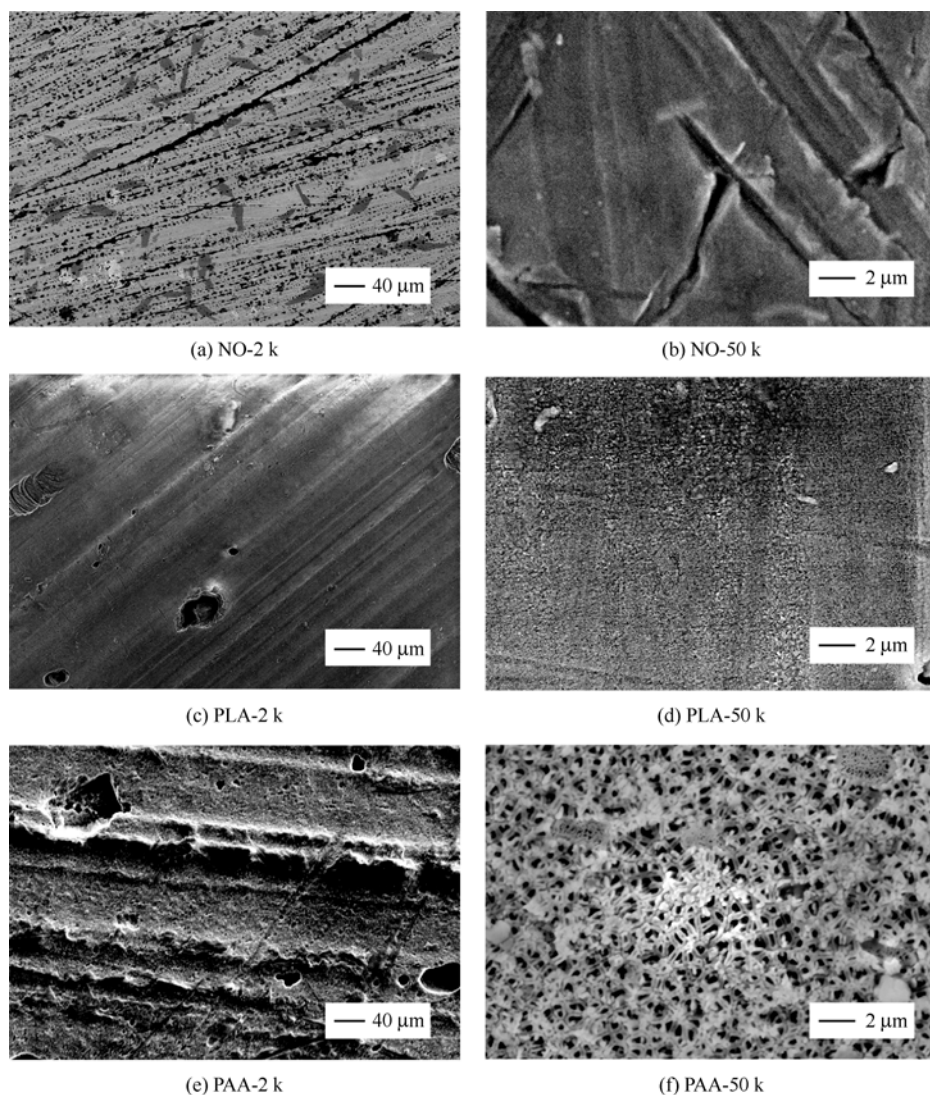


图 3 氧化表面 SEM 形貌

2.2 胶接强度分析

利用万能材料试验机, 分别在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、室温、 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 三种温度条件下进行单搭接拉伸剪切试验, 测试结果如图 4 所示。可以看出, 在三种温度下, PAA

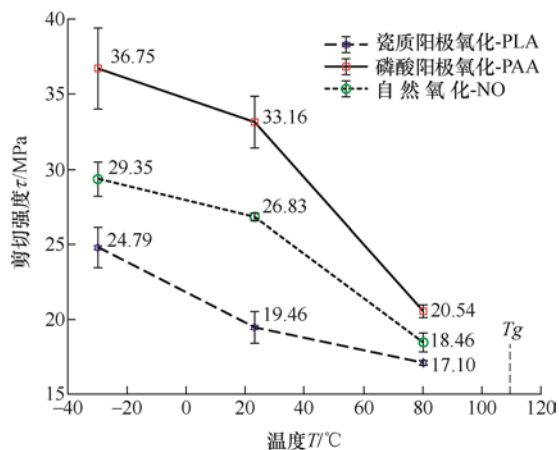


图 4 温度对不同氧化表面粘接强度的影响

接头均比其他两种氧化接头的剪切强度高, 其次为 NO 接头, 再次为 PLA 接头; 而且随着温度的升高, 三种氧化接头的剪切强度均大幅下降。其中, PAA 接头在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下获得最大剪切强度, 达 36.75 MPa ; PLA 接头在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时获得最小剪切强度, 为 17.10 MPa 。

随着温度从 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, PAA、NO 与 PLA 三种胶接接头的剪切强度分别下降了 16.21 MPa , 10.89 MPa , 7.69 MPa , 下降幅度则分别为 44.11% , 37.10% , 31.02% 。PAA 接头的剪切强度下降量最大, PLA 接头的最小。随着温度的升高, PAA 接头比 PLA 接头的剪切强度分别高出约 11.96 MPa , 13.70 MPa , 3.44 MPa , 表明在中低温 ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与室温) 时, 不同表面间的剪切强度差异较大, 但在高温 ($80\text{ }^{\circ}\text{C}$) 时, 此差异明显缩小, 这可能与高温时 (接近 T_g) 胶体的脆性减弱、韧性增强有关。利用 SPSS Statistics 25 软件对试验结果进行拉伸温

度与表面氧化方法的双因素有重复方差分析, 分析结果如表 2 所示, P 值均小于 0.05(置信区间 95.0%), 表明三种表面氧化方法及所选温度区间($-30\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$)均对单搭接胶接接头的剪切强度有着显著性影响。

表 2 温度与氧化方法对胶接强度影响的显著性分析结果

源	自由度	均方	F	显著性
温度	2	320.220	146.141	0.000
氧化方法	2	258.063	117.775	0.000
温度 \times 氧化方法	4	28.977	13.224	0.000

注: 调整后 $R^2=0.950$ 。

综上可知, 铝合金表面氧化方法对其粘接效果的改变有着重要影响, 磷酸阳极氧化表面可获得最佳的粘接强度, 其次为自然氧化(或未阳极氧化)表面, 而瓷质阳极氧化表面粘接强度最差。但当温度较高($80\text{ }^{\circ}\text{C}$), 接近玻璃化转变温度时, 不同氧化表面胶接接头的剪切强度差距明显减小, 表面氧化方法可能对胶接强度的影响效果减弱。

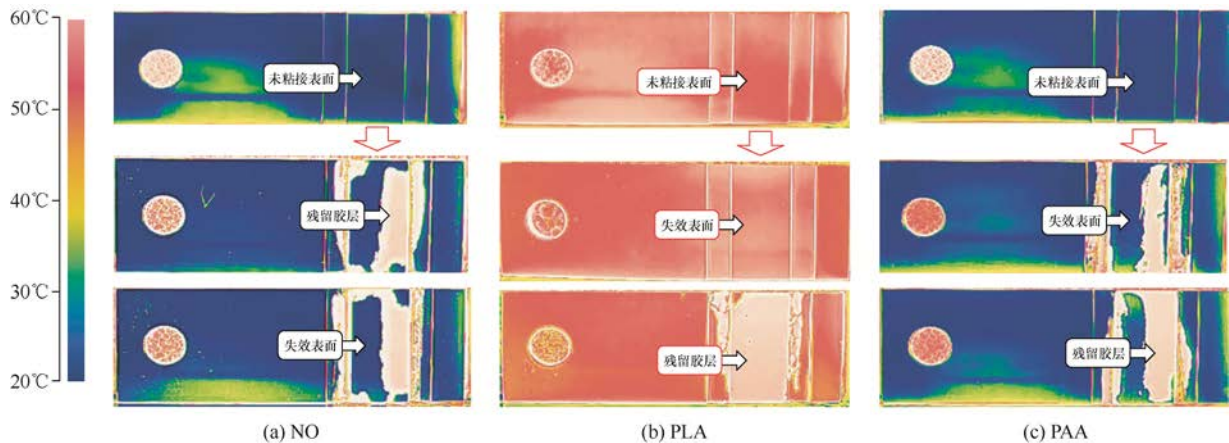


图 5 三种氧化表面样品失效前后的热红外图像

从图 5 的热红外图像可看出, 三种氧化表面的失效均为表观破坏, 即胶粘剂粘附失效或内聚失效。为进一步探究粘接失效模式, 采用 SEM+EDS 方法分析失效表面形貌与表面元素, 结果如图 6 所示。在 2000 倍下, 与图 3 中的原始未粘接表面特征进行对比可知, 磷酸阳极氧化失效表面(图 6f)残留有一层胶粘剂, 覆盖了其未粘接表面的多孔氧化膜(图 6e), 而自然氧化失效表面(图 6b)与瓷质阳极氧化失效表面(图 6d)分别与其未粘接表面(图 6a、图 6c)的微观形貌差异较小。由于环氧树脂胶粘剂为有机高分子材料, 通过 EDS 能谱分析对比基底表面失效前后的 C、O、Al 元素质量分数(%)可判断其在基底表面的残留量。图 6g 为基底表面完整胶层的能谱分析结果, 胶粘剂高分子材料的 C 含量高, 约为 82.5%, O 含量约为 14.0%。

2.3 失效表面分析

由于铝合金具有良好的散热性, 而环氧树脂胶粘剂的散热性较差, 因此, 本研究利用两者导热速率的不同, 将失效前后的样件先升温至 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 再进行自然散热, 采用热红外成像仪对“未粘接表面、失效表面、残留胶层”进行胶层特征分析, 如图 5 所示。可以明显看出, 残留胶层的温度约为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 呈现“粉色”; NO 与 PAA 表面具有较好的散热性, 基底约为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, 呈现“蓝色”; 而 PLA 表面的散热较慢, 温度约为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 与胶层温度差较小, 呈现出“红色”。从胶层失效分布特征可知, NO 与 PAA 样品的胶层基本对称分布在单搭接件的两个基底上, 胶层从粘接区域边缘开始剥离, 最终从中间线附近断裂, 而 PLA 样品的胶层几乎完全粘附在其中一个基底表面, 从另一个基底完全剥离。此现象表明, 瓷质阳极氧化表面的粘接强度低于胶层的内聚强度, 且比另外两种氧化表面的粘接强度低。

自然氧化(图 6a)与磷酸阳极氧化(图 6e)未粘接表面的 C 含量均相对较低, 但后者的 O 元素含量显著高于前者, 这是由于阳极氧化表面的氧化物含量远高于自然氧化; 瓷质阳极氧化未粘接表面(图 6c)的 C、O 元素含量均比前两者高。对比失效前后表面的 C、O 含量可知, NO 与 PAA 失效表面的 C、O 含量均明显增高, 表明两者的失效表面均残留有一定量的胶粘剂; 而 PLA 表面的 C 略有减少, O 略有增加, 综合占比变化不明显, 表明该表面几乎没有残留胶粘剂。而且, PAA 失效表面的 C、O 元素均远高于另外两种失效表面, 表明胶粘剂残留量最多。因此, 磷酸阳极氧化表面的失效模式为胶粘剂的内聚失效, 自然氧化表面的失效模式为混合失效, 而瓷质阳极氧化的失效模式为粘附失效。



图 6 失效表面形貌与元素分析

3 结论

本文通过对瓷质阳极氧化、自然氧化、磷酸阳极氧化三种表面开展胶接性能对比研究与失效机理分析研究,获得了以下结论。

(1) 瓷质阳极氧化与自然氧化方法未对表面粗糙度 Ra 及润湿性产生显著影响,磷酸阳极氧化可以提高铝合金表面的亲水特性。

(2) 瓷质阳极氧化会使铝合金表面在纳观尺度

上变得致密、平滑,不利于胶粘剂的粘附作用;而磷酸阳极氧化可在铝合金表面生成纳米级的多孔氧化膜结构,从而提高机械嵌合等相互作用力,有利于粘接强度的提高。

(3) 在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,温度与三种表面氧化方法均对胶接强度有着显著性影响,磷酸阳极氧化胶接接头的剪切强度最高,其次为自然氧化接头,最差为瓷质阳极氧化接头。

(4) 瓷质氧化表面的粘附强度低于胶粘剂的内聚强度,失效模式主要表现为粘附失效。磷酸阳极

氧化表面的失效模式为胶粘剂的内聚失效, 自然氧化表面的失效模式为混合失效。

参 考 文 献

- [1] JOTHI V, ADESINA A Y, KUMAR A M, et al. Influence of an anodized layer on the adhesion and surface protective performance of organic coatings on AA2024 aerospace Al alloy[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 138: 105396.
- [2] KHAN M F, KUMAR A M, UL-HAMID A, et al. Achieving non-adsorptive anodized film on Al-2024 alloy : Surface and electrochemical corrosion investigation[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2019, 15: 78-88.
- [3] 王献昉, 朱立群. 铝合金彩色瓷质阳极氧化新工艺[J]. *表面技术*, 2004, 33(6): 50-52.
- WANG Xianfang, ZHU Liqun. Study on a new technique for color porcelain anodic oxidation of aluminium alloy[J]. *Surface Technology*, 2004, 33(6): 50-52.
- [4] MOHITFAR S H, MAHDAVI S, ETMINANFAR M, et al. Characteristics and tribological behavior of the hard anodized 6061-T6 Al alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 842: 155988.
- [5] 何潘亮. 四酸体系铝合金瓷质氧化工艺研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2016.
- HE Panliang. Ceramic oxidation of aluminum alloy from 4-acid system[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2016.
- [6] ACCIARI H A, PALMA D P S, CODARO E N, et al. Surface modifications by both anodic oxidation and ion beam implantation on electropolished titanium substrates[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 487: 1111-1120.
- [7] BECHIKH A, KLINKOVA O, MAALEJ Y, et al. Sandblasting parameter variation effect on galvanized steel surface chemical composition, roughness and free energy[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2020, 102: 102653.
- [8] ZHU Chuanmin, WAN Hailang, MIN Junying, et al. Application of pulsed Yb: Fiber laser to surface treatment of Al alloys for improved adhesive bonded performance[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 119: 65-76.
- [9] CORREIA S, ANES V, REIS L. Effect of surface treatment on adhesively bonded aluminium-aluminium joints regarding aeronautical structures[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2018, 84: 34-45.
- [10] KINLOCH A J, WELCH L S, BISHOP H E. Locus of environmental crack growth in bonded aluminium alloy joints[J]. *Journal of Adhesion*, 1984, 16(3): 165-177.
- [11] LEFEBVRE D R, AHN B K, DILLARD D A, et al. The effect of surface treatments on interfacial fatigue crack initiation in aluminum/epoxy bonds[J]. *International Journal of Fracture*, 2002, 114(2): 191-202.
- [12] GUO Lei, LIU Jianhua, XIA Huanxiong, et al. Effects of surface treatment and adhesive thickness on the shear strength of precision bonded joints[J]. *Polymer Testing*, 2021, 94: 107063.
- [13] BRISKHAM P, SMITH G. Cyclic stress durability testing of lap shear joints exposed to hot-wet conditions[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2000, 20(1): 33-38.
- [14] BLAND D J, KINLOCH A J, WATTS J F. The role of the surface pretreatment in the durability of aluminium-alloy structural adhesive joints: Mechanisms of failure[J]. *Journal of Adhesion*, 2013, 89(5): 369-397.
- [15] LIU Jianhua, LI Xiayu, XIA Huanxiong, et al. Effects of assembly errors and bonding defects on the centroid drift of a precision sleeve structure[J]. *Advances in Manufacturing*, 2021, 9(4): 509-519.
- [16] 郑楠. 铝硅合金金黄色膜层及瓷质膜层研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2012.
- ZHENG Nan. Research on golden film and porcelain film of Al-Si alloy[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2012.
- [17] 王桂香, 杨瑞芳, 郭旖旎, 等. 电流密度对铝合金瓷质阳极氧化膜性能的影响[J]. *电镀与环保*, 2012, 32(4): 40-43.
- WANG Guixiang, YANG Ruifang, GUO Yini, et al. Effects of current density on the properties of porcelain anodic films of aluminum alloy[J]. *Electroplating & Pollution Control*, 2012, 32(4): 40-43.
- [18] 应燕翔, 卫国英, 何潘亮, 等. 温度梯度对铝合金 A2024 瓷质阳极氧化膜表面性能的影响[J]. *电镀与精饰*, 2020, 42(5): 25-31.
- YING Yanxiang, WEI Guoying, HE Panliang, et al. Effect of temperature gradient on the surface properties of ceramic anodic oxide film on A2024[J]. *Plating and Finishing*, 2020, 42(5): 25-31.
- [19] 伍宇昊. 瓷质氧化预处理对弱酸铝合金微弧氧化的影响研究[D]. 成都: 西华大学, 2020.
- WU Yuhao. Study on effect of ceramic anodizing pretreatment on MAO of aluminum alloy in weak acid

- electrolyte[D]. Chengdu: Xihua University, 2020.
- [20] 韩夏云, 薛方勤, 郭忠诚, 等. 混酸法瓷质阳极氧化工艺的改进[J]. 电镀与涂饰, 2001(6): 22-23.
- HAN Xiayun, XUE Fangqin, GUO Zhongcheng, et al. Improvement of ceramic anodizing process in mixed acidic solution[J]. Electroplating & Finishing, 2001(6): 22-23.
- [21] LI Yingdong, ZHAO Pizhi, FENG Yingjuan, et al. Influence of anodic oxide film structure on adhesive bonding performance of 5754 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(9): 1836-1841.
- [22] 张艳斌, 张立民, 张继旺, 等. 阳极氧化处理对 2014-T6 铝合金弯曲疲劳性能的影响[J]. 金属学报, 2014, 50(6): 715-721.
- ZHANG Yanbin, ZHANG Limin, ZHANG Jiwang, et al. Effect of anodizing treatment on bending fatigue properties of 2014-T6 aluminium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(6): 715-721.
- [23] 薛方勤, 韩夏云, 郭忠诚, 等. 铝合金瓷质阳极氧化的工艺探讨[J]. 电镀与环保, 2002, 22(2): 25-26.
- XUE Fangqin, HAN Xiayun, GUO Zhongcheng, et al. A discussion on the anodization process for porcelain-like film on Al alloy[J]. Electroplating & Pollution Control, 2002, 22(2): 25-26.
- [24] American Society of Testing Materials. ASTM D 1002-10. Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal to metal)[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2010.
- [25] GUO Lei, LIU Jianhua, XIA Huanxiong, et al. Effect of surface morphology characteristic parameters on the shear strength of aluminum bonded joints[J]. International Journal of Solids and Structures, 2022, 238: 111420.
-
- 作者简介: 郭磊, 男, 1985 年出生, 博士。主要研究方向为精密胶接装配技术。
E-mail: guolei828@163.com
- 夏焕雄(通信作者), 男, 1987 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为多相流-多场耦合建模仿真、胶粘连接、精密装配。
E-mail: hxia@bit.edu.cn