

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170410003

低温空气等离子体处理对铝合金表面粘接性能的影响

李长青, 董怀斌, 邹育根, 邹霞辉

(装甲兵工程学院 装备维修与再制造工程系, 北京 100072)

摘要: 为了提高铝合金与高分子材料之间粘接强度, 采用低温空气等离子体预处理技术, 对 5083 型铝合金表面进行活化处理。对铝合金表面的显微形貌、接触角、表面能、化学元素的成分及价态等理化性能进行了分析, 对铝合金与环氧树脂的粘接性能进行了测试。结果表明: 低温等离子体处理后铝合金表面的活性显著增加, 水接触角由 88.7° 最低降至 10.1° , 表面能由 19.21 mJ/m^2 增加到 74.04 mJ/m^2 , 表面氧元素含量明显增加, 显微形貌及粗糙度未发生明显改变。铝合金板粘接后的拉剪强度随处理时间增加而增加, 最高值达到 12.4 MPa , 较处理前提高了约 4 倍, 表面氧元素的含量及活性增加是树脂与铝合金粘接性能提升的重要因素。

关键词: 铝合金; 低温等离子体; 环氧树脂; 表面接触角; 拉伸剪切强度

中图分类号: TG174.4; TG496

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)06-0034-09

Effects of Low Temperature Air Plasma Treatment on Adhesive Property of Aluminum Alloy

LI Chang-qing, DONG Huai-bin, ZOU Yu-gen, ZOU Xia-hui

(Department of Equipment Maintenance and Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: In order to improve the bonding strength between aluminum and polymer material, low temperature air plasma technology was used as a pre-treatment process on the surface of 5083 typed aluminum alloy for activation. The physical and chemical properties of the surface, such as micromorphology, contact angle, surface energy, element and their valence states were analyzed, and adhesive properties of bonded aluminum plates were detected. The results show that the surface activity increases significantly after low temperature plasma treated, the water contact angle on aluminum alloy decreases from 88.7° to a minimum of 10.1° , and the surface energy increases from 19.21 mJ/m^2 to 74.04 mJ/m^2 . The surface oxygen content increase obviously, without change of the surface micromorphology and roughness. The tensile-shear strength of the bonded plates increase with extending plasma treatment time, and the maximum value reaches 12.4 MPa , which is about 4 times of untreated specimen. The increase of surface oxygen content and the enhanced surface activity are important factors to improve the bonding property.

Keywords: aluminum alloy; low temperature air plasma; epoxy resin; surface contact angle; tensile-shear strength

0 引言

铝合金材料具有重量轻、强度高、导热好、耐腐蚀、易加工成形等优点^[1], 被广泛应用于交通运输、建筑装饰、机械制造、航空航天、武器装备等领域^[2], 成为实现装备轻量化的重要材料之一。受

环境、人为等因素影响, 一方面, 铝合金由于硬度低, 容易造成损伤, 特别是在野外现场遭受的损伤, 需要现场尽快修复, 而胶接修补是简单高效的方法之一; 另一方面, 铝合金装备及其零部件表面通常需要采用高分子涂料进行涂装。由于铝合金表面极易氧化, 亲水性较差, 暴露在空气

收稿日期: 2017-04-10; 修回日期: 2017-10-31

网络出版日期: 2017-11-10 13:56; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20171110.1356.006.html>

通讯作者: 李长青 (1970—), 男 (汉), 研究员, 博士; 研究方向: 表面工程、先进复合材料; E-mail: 13311327344@163.com

引文格式: 李长青, 董怀斌, 邹育根, 等. 低温空气等离子体处理对铝合金表面粘接性能的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(6): 34-42.

LI C Q, DONG H B, ZOU Y G, et al. Effects of low temperature air plasma treatment on adhesive property of aluminum alloy[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(6): 34-42.

中会在表面迅速形成一层氧化物薄膜,因此,涂料或胶黏剂与铝合金表面结合质量差是铝合金材料应用中非常突出的问题^[3]。当前提高铝合金表面胶接性能的常用方法有机械打磨或喷砂、化学处理法、阳极氧化等^[4-6],其中机械法处理可造成表面二次污染、铝合金基体损伤等问题,生产中常用的阳极氧化法则不仅工艺复杂,且受镀槽尺寸影响显著,难以在现场或野外应用。

等离子体被称为物质的“第四态”,含有大量正电荷、负电荷等活性粒子^[7]。低温等离子体处理是一种新型的表面预处理技术,国内外已经开展了相关的研究工作。例如:陈玉茹用 Ar 和 O₂ 分别对氟硅硫化航空橡胶表面进行等离子体处理^[8],处理后的基材表面 O 元素含量上升,水接触角明显降低;王云英在不同气氛下对 PE 薄膜进行等离子体处理^[9],表面接触角降低、表面能升高,粘结强度也较处理前明显增强;倪新亮用红外光谱分析等离子体处理后碳纤维/树脂复合材料的表面^[10],发现酯基数量减少,相应的形成酮基、羧基等含氧基团,表面极性增强,润湿性显著提升;Kotal 等^[11]分别采用 Ar、O₂ 等离子体对 PE 薄膜表面进行处理,结果表明,等离子体处理后的 PE 薄膜表面引入含氧官能团,粗糙度提高;Williams 等^[12]使用冷空气等离子体对 316 不锈钢表面进行改性处理,结果表明,等离子体短时间内可以对不锈钢表面进行有效处理,表面自由能增加,并在表面形成新的官能团。

当前的等离子体表面处理大多在真空炉内进行,且主要应用于有机材料,通过提高表面活性来提高其粘结性能。杨隽等^[13]在真空条件下对铝合金表面进行低温等离子体处理,沉积了一层类 PEG 结构的涂层,有效抵抗蛋白质的吸附。采用开放式低温空气等离子体对铝合金表面进行预处理的研究较少。文中以 5083 铝合金为研究对象,探索采用开放式低温等离子体预处理解决铝合金与高分子材料结合性能差这一固有难题的新途径。

1 试验

1.1 材料及试剂

试验材料选用 5083 型铝合金,胶粘剂采用 Epolam5015 型环氧树脂与 Epolam5015 型固化剂混合而成,化学试剂包括甘油、丙酮等。

1.2 表面预处理工艺

所有试样在预处理前先在丙酮中超声波清洗 20 min,去除吸附在铝合金表面的杂质和油污。

采用 TFR02-PL-3700 型等离子体表面处理仪对铝合金表面进行处理,示意图见图 1。该设备由等离子发生器、气体输送系统及等离子喷枪等部分组成,基本工作原理是:利用高频放电,将等离子体喷枪内的压缩空气击穿电离,产生等离子体射流,喷向被处理工件,在其表面产生化学作用和物理变化。工艺参数:功率 800 W,处理气氛为空气,喷枪口距试样表面距离分别为 10、15、20、25、30 和 35 mm,处理时间分别为 0、10、20、30、40、50、60、70 和 80 s。等离子束为外径 30 mm,内径 20 mm 的环形,采用往复运动扫描的方式进行预处理。

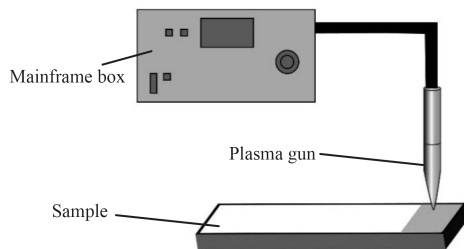


图 1 等离子体表面预处理工艺示意图

Fig.1 Schematic diagram of plasma surface pretreatment

磷酸阳极化是目前研究和开发最深入、使用效果最好的铝合金表面处理技术。作为对比,参考周科可等人试验得出的最佳工艺^[14],对铝合金表面进行磷酸阳极化处理。

采用吸入式喷砂机对铝合金试样表面喷砂处理,喷砂磨料为 380 μm (40 目)的刚玉砂,喷管直径 10 mm,空气压力 0.3 MPa,角度 60°,距离 100 mm,时间 25 s。

1.3 分析测试方法

将 5015 环氧树脂和 5015 固化剂按照质量比 10:3 混合均匀制成粘接剂。使用 CMR-02 型复合材料热补仪进行胶接固化,时间为 120 min,真空度为 20 KPa,固化温度为 70 $^{\circ}\text{C}$,升温速度为 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,固化后在室温下自然冷却。

参照 GB/T9979—2005,采用 MTS-E45 型电子万能材料试验机测试铝合金与环氧树脂粘接后的拉伸剪切强度,拉伸速率为 2 mm/min,试样尺

寸为 100 mm×25 mm×2 mm, 搭接区域尺寸为 25 mm×12.5 mm。拉剪强度取 5 组有效数据的平均值。

采用 Quanta 200 型场发射扫描电子显微镜观察试样的显微形貌。采用 OLS4000 型三维形貌测量仪观察表面三维形貌并对粗糙度进行测试。

采用 ESCALAB 250Xi 型 X 射线光电子能谱仪对铝合金表面的元素变化进行测试分析。

采用碘化钠测试法测试过氧基团的浓度, 向苯和异丙醇 (体积比为 1:6) 的混合溶液中加入碘化钠, 配制成饱和溶液, 将等离子体处理后的铝合金试样浸入该溶液中, 在 60 ℃ 的条件下反应 20 min, 加蒸馏水中止反应。利用 721 型分光光度计在 352 nm 的最大吸收波长处测定 I^- 的吸光度, 采用未处理铝合金试样作为对照。

采用 JGW-360A 型接触角测量仪, 分别以去离子水和甘油作为检测液体, 对铝合金表面的接触角进行测试, 再根据 Owens-Wendt 公式计算出表面能、色散分量和极性分量。

$$\gamma_L (1 + \cos \theta) = 2 \sqrt{\gamma_S^p \gamma_L^p} + 2 \sqrt{\gamma_S^d \gamma_L^d} \quad (1)$$

$$\gamma_S = \gamma_S^p + \gamma_S^d \quad (2)$$

其中: γ_L 为检测液体的表面能 (J); θ 为接触角 (°); γ_S^d 为样品的色散分量; γ_S^p 为样品的极性分量; γ_L^d 为检测液体的色散分量; γ_L^p 为检测液体的极性分量; γ_S 为样品的总表面能 (mJ/m²)。

2 结果与讨论

2.1 表面接触角

图 2 给出了当喷嘴和表面距离保持 35 mm 时铝合金表面水和甘油接触角随等离子体处理时间的变化曲线。可见, 接触角随处理时间的增加呈现先快速后缓慢的降低趋势。仅处理 10 s 后, 水接触角就由 88.7° 降为 43.1°, 当处理时间为 80 s 时, 水接触角降低到仅有 10.1°。

图 3 给出了铝合金表面水和甘油接触角随等离子体处理距离的变化曲线。等离子体处理时间均为 10 s 的情况下, 当喷嘴和试样表面的距离从 35 mm 开始减小时, 铝合金表面的接触角快速降低。当距离小于 20 mm 后, 接触角变化较小, 基本达到稳定饱和状态。当处理距离为 10 mm 时,

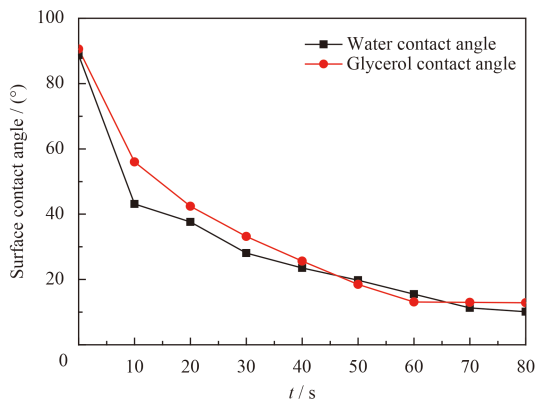


图 2 铝合金表面接触角随处理时间的变化

Fig.2 Contact angle of aluminum alloy varied with time

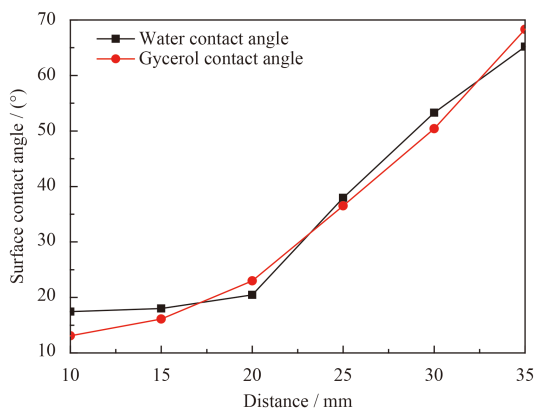


图 3 铝合金表面接触角随处理距离的变化

Fig.3 Contact angle of aluminum alloy varied with distance

表面水接触角由处理前的 88.7° 大幅降低至 17.45°。可见, 较小的处理距离可以对提升表面活性起到较好的效果。

2.2 表面能

利用 Owens 二液法, 通过接触角测量得到铝合金表面的蒸馏水和甘油的接触角, 进而通过计算得到表面能及其极性分量和色散分量。

图 4 给出了铝合金表面能及其分量随等离子体处理时间的变化曲线。可以看出, 当处理时间为 10 s 时, 表面能由未处理的 19.21 mJ/m² 快速增加到 54.32 mJ/m², 增幅达 2.8 倍。随着处理时间的增加, 表面能的增幅逐渐放缓, 当处理时间为 80 s 时, 表面能为 74.04 mJ/m², 较处理前增加了 3.9 倍。

当处理时间 10 s 时, 极性分量由处理前的 16.9 mJ/m² 增加到 51.46 mJ/m², 同时色散分量由处理前的 2.3 mJ/m² 增加到 2.85 mJ/m², 增幅较

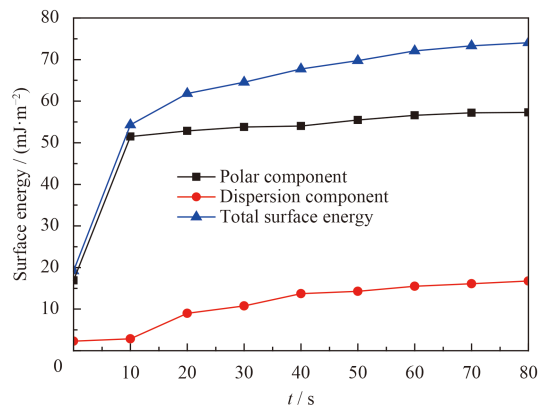


图4 铝合金表面能及其分量随处理时间的变化

Fig.4 Surface energy and it's components of aluminum alloy varied with time

小。随后, 虽然两个分量均呈现增加趋势, 但是色散分量增加的幅度明显小于极性分量, 并且在总表面能中所占的比例随时间增加显著下降。说明处理后铝合金表面能的增加主要是由极性分量的增加引起的。

图5给出了铝合金表面能及其分量随等离子体处理距离的变化曲线。可以看出, 随着处理距离的逐渐减小, 表面能呈现先快速增加然后相对平稳的变化规律。当处理距离为35 mm时, 表面能由处理前的19.21 mJ/m²增加到38.2 mJ/m², 增加近2倍; 当处理距离降低至10 mm时, 表面能为70.6 mJ/m², 增加了3.7倍。这说明, 当处理时间一定时, 在一定范围内缩短等离子体处理距离会提高铝合金表面能。

随处理距离的减小, 表面能的极性分量和色散分量都呈现增加趋势, 与固定距离改变处理时

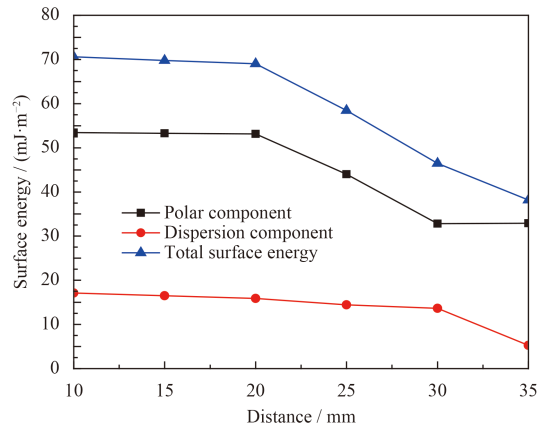


图5 铝合金表面能及其分量随等离子体处理距离的变化

Fig.5 Surface energy and it's components of aluminum alloy varied with distance

间得出的结果相似的是, 极性分量所占比例远大于色散分量。

等离子体表面改性是等离子体中的高能活性粒子对材料表层物质的作用过程。在一定范围内增加等离子体处理时间, 或减小处理的距离, 都会导致等离子体中的活性粒子到达铝合金表面的数量会增加。此外, 处理距离增加到一定程度后会导致铝合金表面活性粒子的活性逐渐衰弱, 等离子体的总能量也相应减小^[15], 影响处理效果。处理时间延长, 铝合金表面接触角明显降低、表面能明显提高, 这是因为铝合金表面的等离子体中活性粒子增加。铝当等离子体处理时间足够长时, 表面氧元素达到动态饱和状态, 因此, 当处理时间达到一定值时, 铝合金表面接触角和表面能随处理时间的延长而趋于稳定。

2.3 拉伸剪切强度

基于上述分析结果, 设定处理距离为10 mm, 改变处理时间考察等离子体处理对铝合金粘接后拉剪强度的影响。图6给出了铝合金拉剪强度随等离子体处理时间的变化曲线。可以看出, 拉剪强度随处理时间的增加明显增加。未处理试样的拉剪强度仅为3.17 MPa, 当处理时间达到80 s时, 拉剪强度提高到12.4 MPa, 提高了近4倍。

图7为不同表面预处理工艺下铝合金试样粘接后的拉伸剪切强度。可见, 等离子体表面处理后, 铝合金与胶粘剂拉伸剪切强度较传统的喷砂工艺提升约50%, 甚至与当前工业化生产中常用的磷酸-硫酸阳极氧化处理工艺相比, 等离子体表面处理后的剪切强度达到了该工艺的95%。

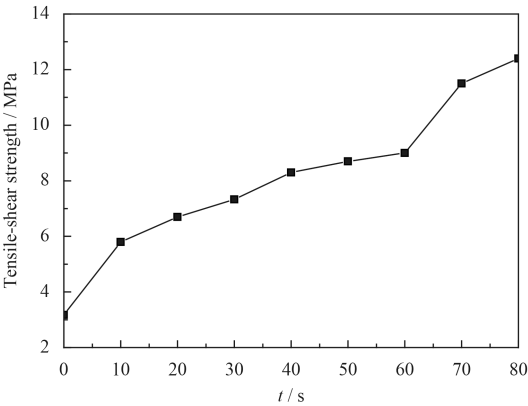


图6 铝合金试样拉剪强度随处理时间的变化

Fig.6 Tensile-shear strength of aluminum alloy varied with time

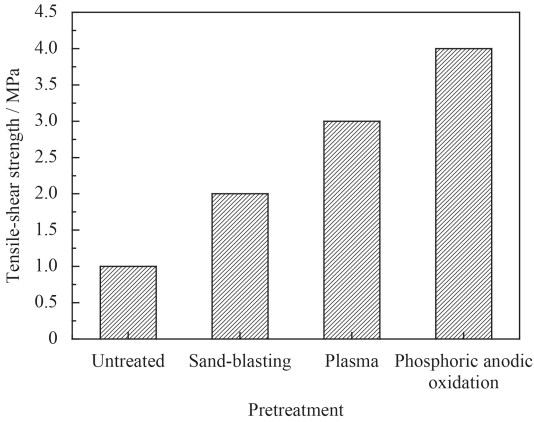


图 7 不同预处理工艺的拉剪强度

Fig.7 Tensile-shear strength under different pretreatment process

2.4 表面显微形貌及成分分析

图 8 为铝合金表面的 SEM 显微形貌。等离子体处理前后试样表面均为典型的机械加工纹理状态。随处理时间增加，未发现形貌有明显变化。

图 9 和图 10 分别为试样表面的三维轮廓及表面粗糙度。由图 9 和图 10 可知，即使进一步增加表面处理时间分别至 5 min 和 10 min，铝合金表

面的粗糙度也没有明显增加。

图 11 为拉剪强度测试后铝合金表面断口的显微形貌。未经等离子体处理的铝合金试样断面平整光滑，胶层几乎完全粘附在一侧的铝合金表面(图 11(a))，为胶粘剂和铝合金之间的完全界面脱粘，说明二者的界面粘接强度远低于胶粘剂的内聚强度。随着处理时间的增加，胶粘剂开始在铝合金表面残留，其残留量也逐渐增加(图 11(b)~(d))，即出现越来越多的胶粘剂内部断裂，断口的表面粗糙度也显著增加，此时的断口为界面破坏和胶粘剂内聚破坏的混合形式。当等离子体处理 80 s 时(图 11(e))，剪切断口呈现较为完全的胶粘剂内聚破坏形态，表明胶粘剂与铝合金界面的粘接强度已经超过其自身的内聚强度。断口表面粗糙程度进一步加大，并呈现了断裂的银纹形态，实际表面面积大幅度增加。

对铝合金表面进行光电子能谱的全谱分析，如图 12 所示，检测到 Cr 3s、Al 2s、C 1s、O 1s、Ti 2s、Cu 2p、Zn 2p、Mg 1s 等信号。5083 铝合金主要元素为 Al、Mg、Cu、Cr、Zn 等元素，其中

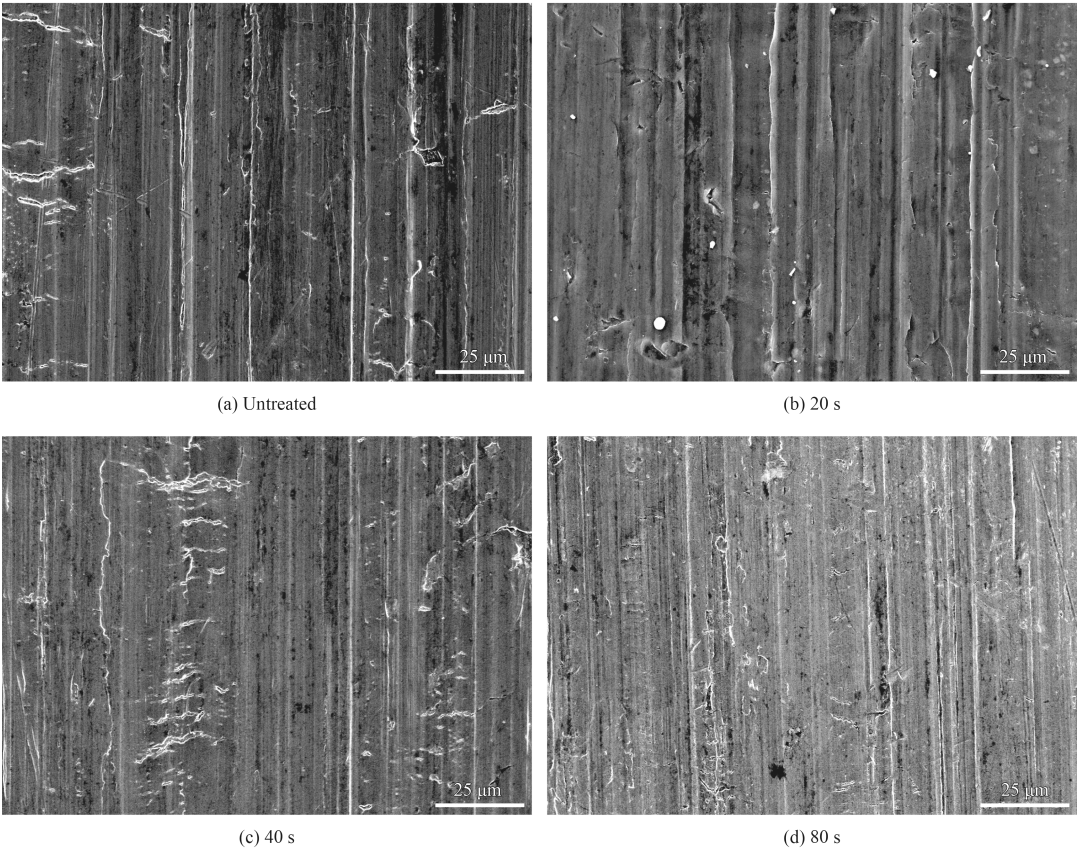


图 8 等离子处理前后铝合金表面的显微形貌

Fig.8 Surface morphologies of aluminum alloy before and after plasma treatment

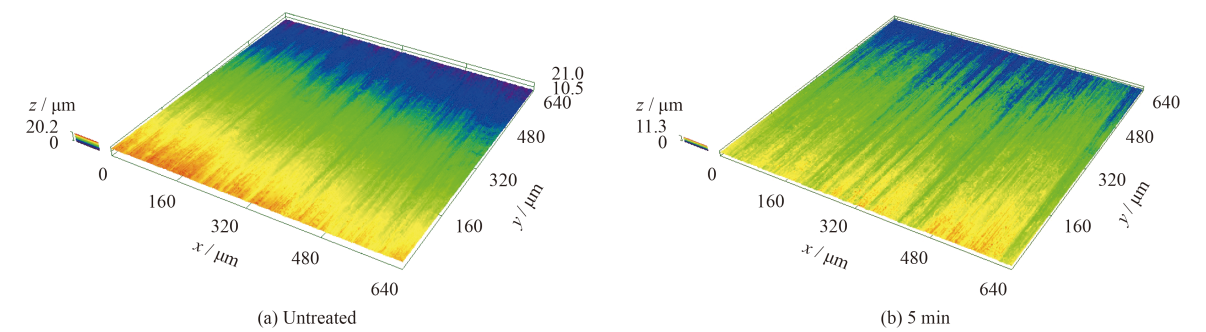


图 9 铝合金表面三维轮廓

Fig.9 Surface 3D profiles of aluminum alloy

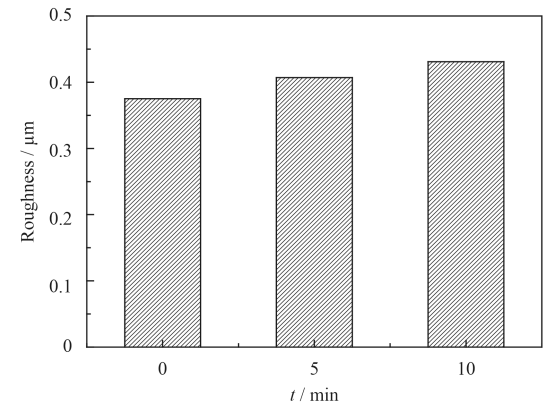


图 10 铝合金表面粗糙度

Fig.10 Surface roughness of aluminum alloy

C 元素一方面为试样表面吸附空气中 C 原子形成污染元素, 一方面为 C 经电离通过空气等离子体高速轰击附着在铝合金表面。

图 13 为铝合金表面的 O 1s 谱。O 1s 峰结合能为 533.08 eV, 对应于 C-O、O-H 键, 以及 Al_2O_3 中以 O^{2-} 形式存在。由图可看出, 随着等离子体处理时间的延长, 铝合金表面氧含量明显增加。

将等离子体处理后的铝合金浸入碘化钠饱和溶液, 铝合金表面形成的不稳定过氧化铝可与碘化钠饱和溶液中的 I^- 发生反应, 被氧化成 I^{3-} 。根据比尔定律, I^{3-} 的吸光度与其浓度成正比, 因此

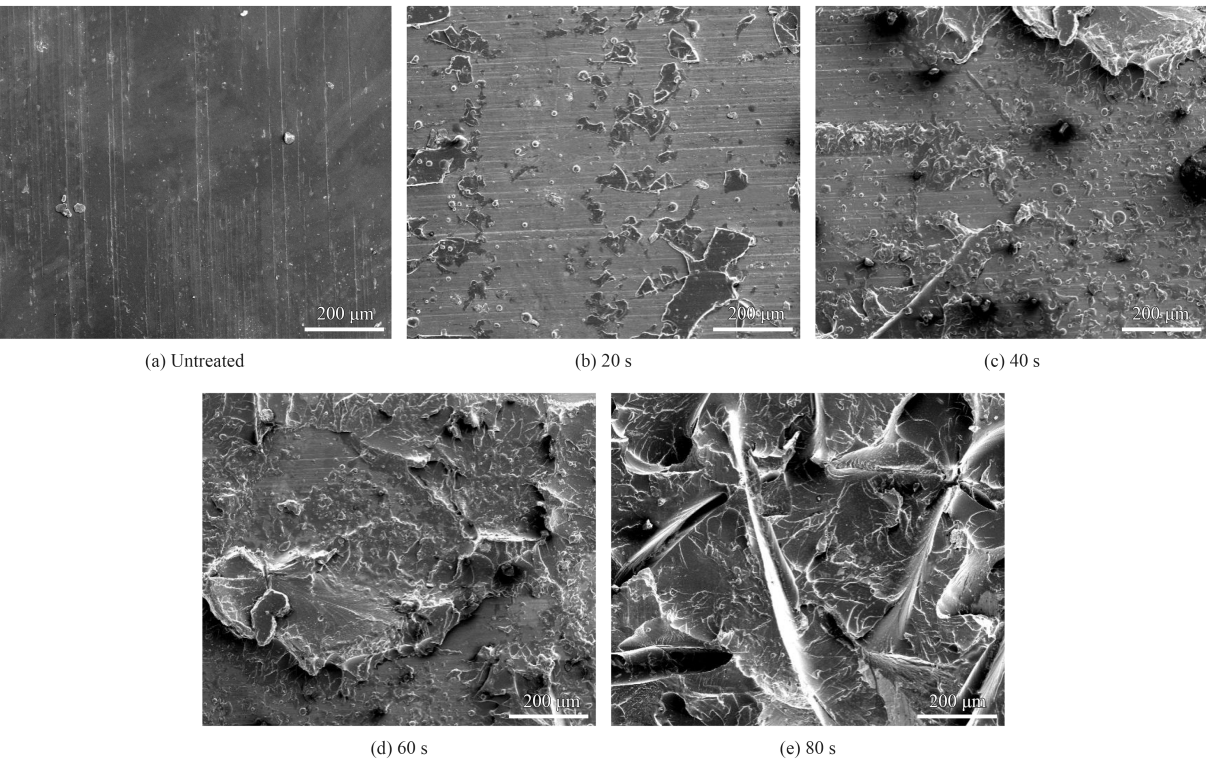
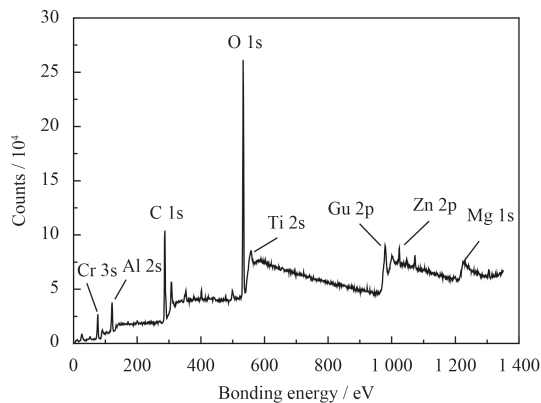
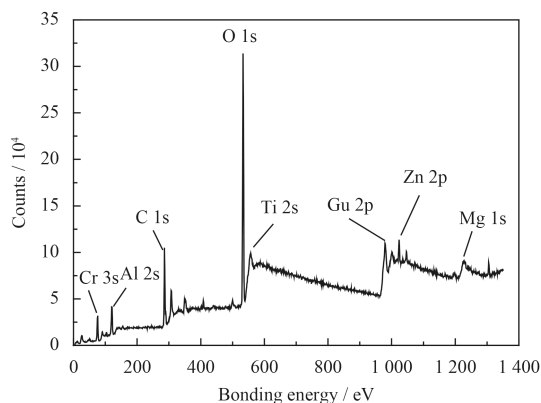


图 11 铝合金拉剪断口的 SEM 形貌

Fig.11 SEM images of aluminum alloy fracture



(a) Untreated



(b) 40 s

图 12 铝合金表面等离子体处理后的 XPS 全谱

Fig.12 XPS full spectra of aluminum alloy surface after plasma treatment

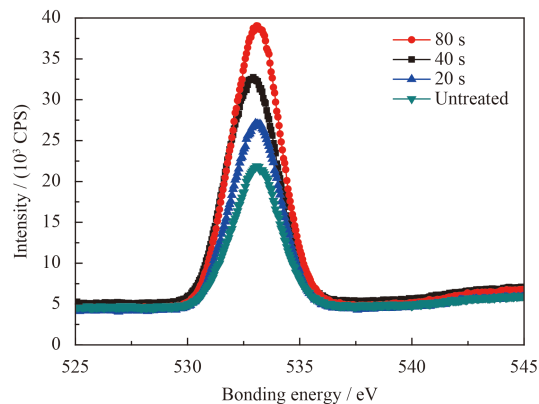


图 13 铝合金表面 XPS 谱的 O 1s 拟合图

Fig.13 O 1s fitting figures of the XPS spectra of the aluminum alloy surface

通过对 I^3 的吸光度进行分析,可以表征铝合金表面过氧基团的数量^[16]。图 14 给出了 I^3 的吸光度随等离子体处理时间的变化曲线。

可以看出,随着等离子体处理时间的增加,溶液中 I^3 的吸光度呈现先增加后减小的趋势,在

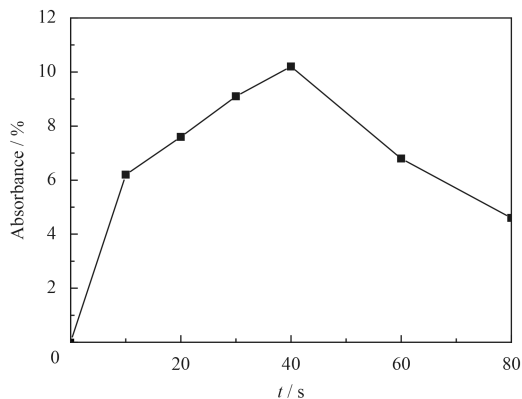


图 14 铝合金表面过氧化物含量随时间的变化

Fig.14 Peroxide content of aluminum alloy varied with time

40 s 时达到最高值。表明铝合金表面经过等离子体处理后产生大量的过氧基团,且在一定范围内,随着处理时间增加,过氧基团的含量不断增加。当处理时间超过 40 s 后,过氧基团的数量开始下降,造成这种现象的主要原因是随着处理时间增加,铝合金表面温度过快上升,造成不稳定的过氧基团分解,从而含量降低。

对比图 14 与图 6 可知,尽管等离子体处理 40 s 后表面过氧化物含量降低,但拉剪强度仍然上升。主要原因是处理时间长,导致表面温度增加,随后的粘接过程树脂粘度低,与铝合金表面的浸润性增加,从而提高了界面结合性能。

2.5 铝合金表面等离子体预处理的增强机理

空气经过电离产生具有较高活性的等离子体,包括:离子、电子、亚稳态分子、原子、自由基以及光子等各种粒子^[17]。等离子体高速撞击材料表面时,除了将自身的能量传递到材料表层之外,还会引起表面刻蚀,使表面吸附的气体或其他物质的分子离开表层^[18]。部分粒子还可能发生自溅射,一些粒子特别是电子、亚稳态粒子有可能贯穿材料表层,贯穿深度可达 5~50 nm^[19]。

一般认为,胶粘剂和被粘表面之间的粘接力主要分为机械粘接力 and 化学键合力^[20-21]。而表面粗糙化是产生机械粘接力的源泉,通过对等离子体处理后的铝合金表面进行 SEM 和三维形貌分析得出,其表面粗糙度在处理前后没有明显变化,由此表明,等离子体处理后的铝合金表面与环氧树脂之间粘接强度的提高不是主要由表面粗糙化所贡献的,而是由化学键合力所贡献的。

通过铝合金表面 O1 s 谱和对碘化钠饱和溶液中 I^3 的吸光度检测分析得出, 铝合金表面经过等离子体处理后, 表面氧元素含量明显增加。铝合金表面形成的大量极性氧与胶粘剂中的氢原子之间形成牢固的 Al-H $\cdots$ O 键, 称为氢键, 如图 15 所示。在等离子体处理前, 其连接形式主要为范德华力, 其作用力 < 20 kJ/mol; 而经过等离子体处理后, 表面连接主要为氢键结合, 其作用力 > 50 kJ/mol, 更多氢键的形成使得分子间作用力更大, 从而获得良好的界面粘接。

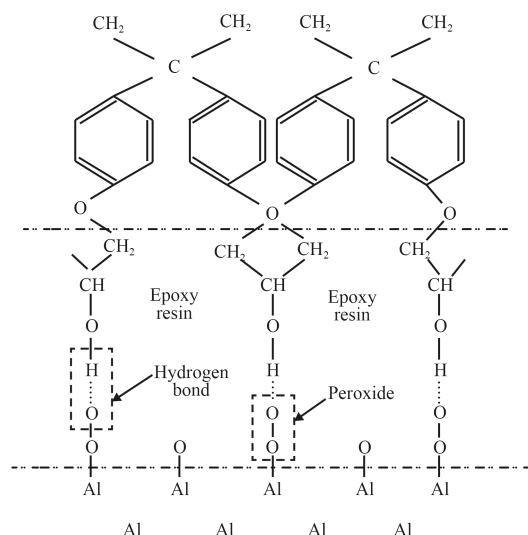


图 15 铝合金和环氧树脂之间的氢键链接示意图

Fig.15 Schematic diagram of hydrogen bonding between aluminum alloy and epoxy resin

由 O1 s 图谱分析可知, 表面氧含量随着处理时间的延长而增加。参考 Williams 等人的研究结果^[12], 在高能量密度等离子体的作用下, 首先, 铝合金表面 Al_2O_3 氧化膜被部分刻蚀; 其次, 空气电离的活性氧离子以过氧化物的形式附着在铝合金表面。等离子体处理后, 胶粘剂和铝合金之间的氢键数量急剧增加, 分子间作用力更大, 最终使胶粘剂和铝合金表面结合强度增加。

3 结 论

(1) 经等离子体处理后的铝合金表面接触角下降、表面能上升, 且受距离和时间的影。处理时间为 80 s 时, 水接触角由 88.7°降低到 10.1°, 表面能由 19.21 mJ/m² 增加到 74.04 mJ/m²; 当处理距离为 10 mm 时, 表面水接触角降低至 17.45°, 表面能由 19.21 mJ/m² 增加到 70.6 mJ/m²。

(2) 经等离子体处理后, 铝合金粘接后的拉剪强度明显提高。当处理距离为 10 mm, 时间为 80 s 时, 强度提高到 12.4 MPa, 相对于未处理时提高了近 4 倍。

(3) 铝合金表面低温等离子体处理后, 含氧量显著增加, 并且主要以过氧化物的形态存在, 由此导致的表面活性升高及氢键含量增加是拉伸剪切强度提升的主要原因。

参考文献

- [1] 黄燕滨, 仲流石. 磷酸-硫酸阳极氧化对铝合金表面粘接性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2013, 32(1): 32-36.
HUANG Y B, ZHONG L S. Effect of phosphoric-sulfuric acid anodic oxidation on adhesive property of aluminum alloy surface[J]. Electroplating & Finishing, 2013, 32(1): 32-36 (in Chinese).
- [2] 张晓丰. 铝、镁合金表面氧化与粘接性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2008.
ZHANG X F. Study on surface oxidation treatment of aluminum and magnesium alloys its adhesive performance[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2008 (in Chinese).
- [3] 夏成宝, 王东风, 葛文军. 铝合金硫酸阳极氧化对胶接性能的影响[J]. 表面技术, 2009, 38(3): 8-9.
XIA C B, WANG D F, GE W J. Effect of the sulfuric acid anodizing of aluminum alloys on its adhesive properties[J]. Surface Technology, 2009, 38(3): 8-9 (in Chinese).
- [4] WESTERMANN I, HOPPERSTAD O S, MARTHINSEN, et al. Ageing and work-hardening behavior of a commercial AA7108 aluminium alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 524(1-2): 151-157.
- [5] KAMIKAWA N, HUANG X X, TSUJI N, et al. Strengthening mechanisms in nanostructured high-purity aluminium deformed to high strain and annealed[J]. Acta Materialia, 2009, 57(14): 4198-4208.
- [6] 胡伟, 蔡如琳, 谭利敏, 等. 几种机械表面处理方法对 6013 铝合金接头粘接胶接性能的影响[J]. 粘接, 2014, 35(1): 45-49.
HU W, CAI R L, TAN L M, et al. Effect of mechanical surface treatment on bonding property to 6013 aluminum alloy[J]. Adhesion, 2014, 35(1): 45-49 (in Chinese).
- [7] 马小青, 张怀勤, 陈莹莹, 等. 氧气与氩气等离子体对树脂基托表面改性的对比研究[J]. 口腔生物医学, 2014, 5(3): 140-142.
MA X Q, ZHANG H Q, CHEN Y Y, et al. Comparison between O₂-plasma and Ar-plasma treatment effects on PMMA[J]. Oral Biomedicine, 2014, 5(3): 140-142 (in Chinese).

- Chinese).
- [8] 陈玉如, 王云英, 孟江燕, 等. 低温等离子体处理对航空氟硅橡胶表面性能的影响[J]. 材料工程, 2015, 43(2): 73-78.
CHEN Y R, WANG Y Y, MENG J Y, et al. Effect of low temperature plasma treatment on surface properties of aviation fluorosilicone rubber[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(2): 73-78 (in Chinese).
- [9] 王云英, 陈玉如, 孟江燕, 等. 低温等离子体处理对低密度聚乙烯薄膜表面性能的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(6): 55-58.
WANG Y Y, CHEN Y R, MENG J Y, et al. Effect of low temperature plasma treatment on the surface properties of LDPE film[J]. Surface Technology, 2013, 42(6): 55-58 (in Chinese).
- [10] 倪新亮, 金亚凡, 沈丽如, 等. 等离子体处理碳纤维/树脂复合材料[J]. 复合材料学报, 2015, 32(3): 721-727.
NI X L, JIN Y F, SHEN L R, et al. Carbon fiber/resin composites treated by plasma[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(3): 721-727 (in Chinese).
- [11] KOTAL V, STOPKA P, SAJDL P, et al. Thin surface layer of plasma treated polyethylene[J]. Strength of Materials, 2008, 40(1): 86-89.
- [12] WILLIAMS D F, KELLAR E J, JESSON D A, et al. Surface analysis of 316 stainless steel treated with cold atmospheric plasma[J]. Applied Surface Science, 2017, 403: 240-247.
- [13] 杨隽, 汪建华. 低温等离子体改性铝合金及其表面性质的研究[J]. 材料科学与工艺, 2006, 14(2): 113-115.
YANG J, WANG J H. Study on surface properties of cold-plasma-modified aluminum alloys[J]. Materials Science & Technology, 2006, 14(2): 113-115 (in Chinese).
- [14] 周科可, 黄燕滨, 桑浩然, 等. 铝合金阳极氧化膜层结构对粘结性能的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(9): 188-193.
ZHOU K K, HUANG Y B, SANG H R, et al. Effect of aluminum alloy anodic oxidation film structure on the adhesive property[J]. Surface Technology, 2016, 45(9): 188-193 (in Chinese).
- [15] 龚克成. 高聚物胶粘基础[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983.
GONG K C. Polymer adhesive base[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1983 (in Chinese).
- [16] 廖重重, 陈岁元. 铝阳极氧化膜及生长机理的研究进展[J]. 辽宁化工, 2012, 41(7): 699-701.
LIAO C C, CHEN S Y. Research progress in anodic aluminum oxide film and its growth mechanism[J]. Liaoning Chemical Industry, 2012, 41(7): 699-701 (in Chinese).
- [17] 朱家嵘, 顾振亚. 利用低温空气等离子体改善聚酯和聚乙烯薄膜表面亲水性的研究[J]. 天津工业大学学报, 2004, 23(4): 41-43.
ZHU J R, GU Z Y. Research on surface hydrophilic modification of PET and PE films by low temperature air plasma[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2004, 23(4): 41-43 (in Chinese).
- [18] 刘杨. 聚乙烯木塑复合材料的等离子体表面处理及其表面特性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
LIU Y. Study of plasma surface treatment of polyethylene wood/plastic composites and its surface properties[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011 (in Chinese).
- [19] 刘哲. 等离子体处理对 PBO 纤维、碳纤维表面性能及其复合材料界面性能的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
LIU Z. Influence of plasma treatment on surface property of PBO fiber, carbon fiber and interfacial property of their composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014 (in Chinese).
- [20] CRUZ G J, OLAYO M G, COLIN E, et al. Metallic layers added by plasma on polyethylene[J]. Progress in Organic Coatings, 2009, 64(2/3): 225-229.
- [21] 陈明安, 张新明, 蒋志军, 等. 铝合金表面处理后的表面特征特性[J]. 化学与粘合, 2001(6): 262-264, 267.
CHEN M A, ZHANG X M, JIANG Z J, et al. Surface features and adhesion properties of surface pretreated aluminum and its alloys[J]. Chemistry & Adhesion, 2001(6): 262-264, 267 (in Chinese).

(责任编辑: 王文宇)