

# 阳极氧化对超声波焊接 6063 铝合金与 PPS 的影响

俞伟元<sup>1</sup>, 张涛<sup>1</sup>, 王有良<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

(2. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 为实现铝合金与塑料的有效连接, 采用磷酸阳极氧化工艺对 6063 铝合金表面进行预处理, 使用超声波金属焊接机对 6063 铝合金与聚苯硫醚 (PPS) 进行焊接。结果表明: 未经处理的 6063 铝合金与 PPS 超声波焊接接头抗剪强度随着焊接时间、焊接压力的增加先增大后减小, 当焊接压力和焊接时间分别为 0.5 MPa 和 6 s 时, 可获得最大抗剪强度 1.41 MPa。经磷酸阳极氧化后的 6063 铝合金/PPS 接头抗剪强度达到 16.92 MPa, 约为未阳极氧化处理接头强度的 12.6 倍, 结构的失效形式为界面开裂和 PPS 部分内聚断裂。经扫描电镜观察分析, 超声波焊接的声流效应产生的声压梯度使 PPS 嵌入 6063 铝合金表面阳极氧化处理后形成的多孔结构, 形成齿状咬合的机械互锁结构, 同时多孔结构有利于增强界面处的分子间作用力, 进而实现 6063 铝合金/PPS 异种材料的良好结合。

**关键词:** 阳极氧化; 超声波焊接; 6063 铝合金; 聚苯硫醚; 力学性能

中图分类号: TG453<sup>+</sup>.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)01-0241-08

轻量化、高性能化是制造业不断发展的目标, 轻质材料、轻型结构和先进的加工工艺是满足这些需求的有效途径<sup>[1-3]</sup>。生产中在满足使用性能的前提下, 常采用铝合金或聚合物等轻质材料代替钢铁材料, 达到减轻产品质量的目的。在实现轻量化过程中, 聚合物和铝合金连接的可靠性是至关重要的, 而结构的接头质量直接影响到产品的使用性能, 因此异种材料的连接技术具有重要的研究价值。

目前实现聚合物和金属连接的方式主要有机械紧固<sup>[4]</sup>、胶接<sup>[5]</sup>、注塑连接<sup>[6]</sup>和焊接<sup>[7-9]</sup>等。其中机械紧固<sup>[4]</sup>和胶接<sup>[5]</sup>是实现聚合物和金属连接的 2 种传统方法。机械紧固是通过外加紧固件来实现聚合物和金属之间的连接, 包括螺钉、螺栓和铆钉等。但这种连接方式由于使用了外加紧固件不仅增加结构的质量, 同时还会在连接结构上留有通孔, 产生应力集中, 从而降低结构的连接强度。胶接<sup>[5]</sup>则使用胶黏剂, 经过一定的固化时间从而实现聚合物和金属之间的连接。连接过程中, 胶黏剂需要较长的固化时间, 胶接接头对恶劣环境具有较强的敏感性, 并且胶接界面的抗冲击和抗剥离强度相对较低。上述方法虽然都存在一定的缺陷, 但由于技术简单、成本较低, 现在仍然广泛应用。注塑连接技术<sup>[6]</sup>可以避免机械紧固和胶接方法的缺陷, 但其连接强度有限, 极大地限制了其广泛应用。此外, 研究人员通过使用激光焊接、搅拌摩擦焊和超声波焊接等方法将聚合物直接连接到常用的金属上, 如不锈钢、铝和镁<sup>[7-9]</sup>。Moshwan 等人<sup>[10]</sup>利用搅拌摩擦焊技术成功实现了 AA 7075

铝合金与聚碳酸酯(PC)的连接。Jung 等<sup>[11]</sup>采用高质量的连续波半导体激光器将 CFRP 与 5052 铝合金直接连接, 连接接头在 0.33 mm/s 的移动速度下进行拉伸搭接剪切试验, 最高抗拉力仅为 3000 N, 抗剪强度仅为 8 MPa 左右。研究结果表明, 由于金属与聚合物之间存在着明显的物理和化学不一致性, 导致其连接强度相对较低。Yeh 等人<sup>[12]</sup>则通过激光刻蚀在 5052 铝合金薄板表面构造具有微米级的栅格阵列, 使用超声波焊接将 ABS 和铝合金成功连接, 抗剪强度最高约为 9 MPa; 并得出其粘合机制主要是基于机械互锁, 所以任何热塑性基聚合物和金属材料都可以用作粘附体。虽然激光刻蚀处理后, 5052 铝合金/ABS 焊接接头强度得到提升, 证明金属表面预处理方法可增强异种材料连接的强度; 但是激光改性产生的热量会影响金属基体的原始组织, 使其力学性能恶化; 同时激光刻蚀成本相对较高。因此, 在金属与聚合物的连接中, 为提高接头强度, 对金属表面的预处理研究具有重要意义。

阳极氧化是一种电化学反应, 在工业上常用在铝的防腐处理<sup>[13]</sup>, 具有效率高、成本低的优点。在异种材料的胶接研究中, 可通过对铝合金进行阳极氧化预处理来增强胶接效果<sup>[14]</sup>。在本研究中, 利用磷酸阳极氧化对铝合金表面进行预处理, 然后采用超声波焊接技术实现 6063 铝合金与 PPS 的直接连接。通过抗剪强度试验和对焊接接头界面处的观察, 评价铝合金表面阳极氧化处理的效果和异种材料连接的可行性。

收稿日期: 2021-01-15

基金项目: 国家自然科学基金 (52061023); 甘肃省高校创新基金 (2020A-025); 兰州理工大学红柳优青项目 (062004)

作者简介: 俞伟元, 男, 1973 年生, 博士, 教授, 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050, E-mail: yuwy@lut.cn

# 1 实验

实验选用上海陆禹金属制品有限公司生产的铝合金(牌号: 6063)作为上连接件, 试样尺寸为 40 mm×10 mm×3 mm。聚合物选用德国盖尔公司生产的聚苯硫醚 (PPS) (牌号: HS-G30, 填充 30% 玻璃纤维) 作为下连接件, 板材尺寸为 45 mm×20 mm×3 mm。

在对 6063 铝合金进行阳极氧化前, 对其表面进行预处理, 表面预处理过程如图 1 所示。使用 KXN-3010D 型稳压直流电源, 以 6063 铝合金板为阳极, 碳棒作为阴极, 15% (质量分数, 下同) 的  $H_3PO_4$  溶液作为电解液进行阳极氧化。在阳极氧化过程中, 电压保持 15 V 恒定, 温度保持 50 °C 不变, 改变阳极氧化时间。6063 铝合金在  $H_3PO_4$  溶液中阳极氧化后, 用去离子水在超声波清洗机中清洗并用冷风干燥。

铝合金与 PPS 焊接前, 使用乙醇将 PPS 板在超声波清洗机中清洗 60 s, 去除表面污染。将 PPS 板和 6063 铝合金板分别作为下连接件和上连接件放入夹具中, 使用超声波焊机调节超声波焊接参数进行焊接。图 2 为 6063 铝合金/PPS 接头试样焊接示意图。

使用万能试验机在加载速度为 1 mm/min 的情况下, 通过拉伸试验得到剪切力, 然后通过剪切力与 PPS

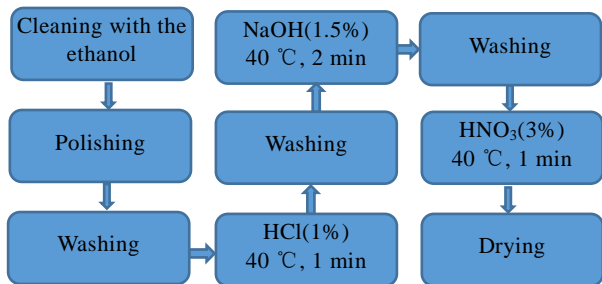


图 1 6063 铝合金表面预处理过程

Fig.1 Surface pretreatment process of 6063 Al alloy

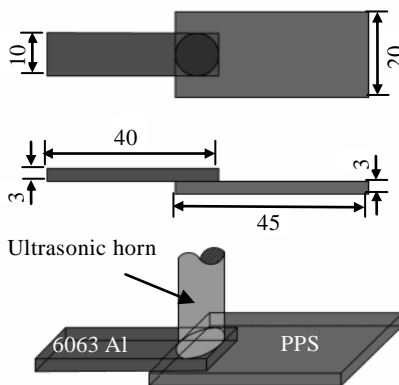


图 2 6063 铝合金/PPS 接头试样焊接示意图

Fig.2 Welding schematic diagram of 6063 Al alloy/PPS joint

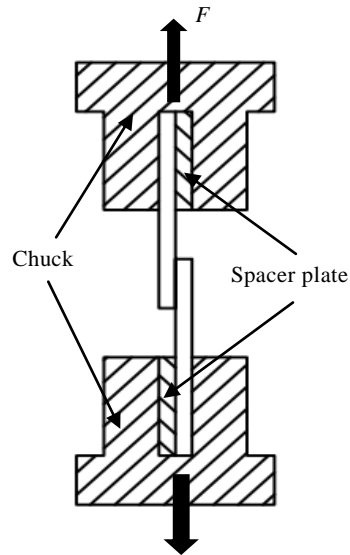


图 3 剪切试验示意图

Fig.3 Schematic diagram of shear test

熔融面积的比值计算接头的抗剪强度。图 3 为剪切试验示意图, 垂直于超声波焊接方向的剪切载荷 ( $F$ ) 分别作用在 6063 铝合金和 PPS 侧。在剪切试验中, 记录 6063 铝合金/PPS 接头的最大剪切载荷表征接头的性能。

焊接完成后, 使用不同等级的砂纸逐级打磨焊接接头的横截面, 最后使用 0.5  $\mu m$  金刚石抛光膏和 0.3  $\mu m$  氧化铝抛光剂抛光。使用场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察焊接接头的微观结构。采用 X 射线光电子能谱分析 (XPS) 分析焊接接头的断裂面。

## 2 结果与讨论

### 2.1 铝合金表面分析

不同阳极氧化时间参数下 6063 铝合金表面形貌如图 4 所示。通过对未阳极氧化的铝合金表面 SEM 图 (图 4a) 进行观察, 发现由于预处理过程中在 NaOH 溶液中的刻蚀, 铝合金表面出现不均匀的凹坑, 但与阳极氧化的铝合金相比, 其表面相对光滑。铝合金阳极氧化后, 表面形成了微米级多孔结构。当阳极氧化时间为 5 min 时, 铝合金表面被不规则的多孔结构覆盖 (图 4b)。随着氧化时间的延长, 铝合金表面的孔洞结构变大 (图 4c~4e)。对不同阳极氧化时间下 6063 铝合金表面粗糙度测量结果如表 1 所示, 阳极氧化时间为零时, 铝合金表面粗糙度值相对低, 经阳极氧化后, 粗糙度快速变大。表 2 显示了不同阳极氧化时间下 6063 铝合金表面的铝和氧元素含量。可见, 在阳极氧化 20 min 之前, 由于  $Al_2O_3$  的生成, 氧含量迅速增加。但是, 当阳极氧化时间持续延长至 30 min 时, Al、O 含量变化不大。这种现象是由于  $H_3PO_4$  溶液溶解  $Al_2O_3$  导致的。

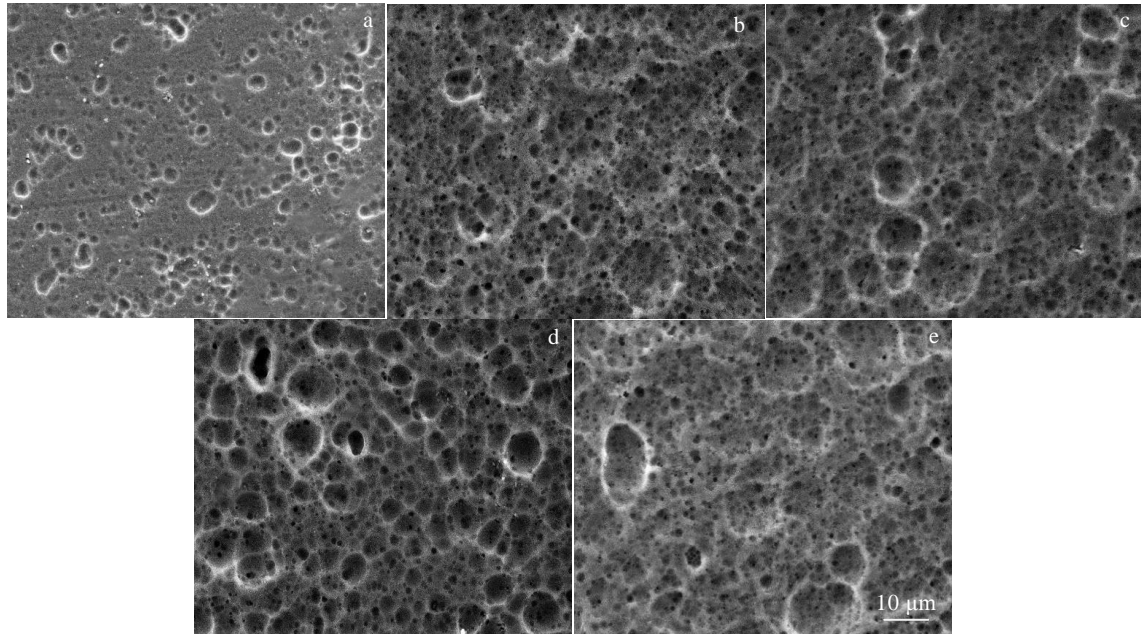


图 4 不同阳极氧化时间下 6063 铝合金的表面形貌

Fig.4 Surface morphologies of 6063 Al alloy with different anodizing time: (a) 0 min, (b) 5 min, (c) 10 min, (d) 20 min, and (e) 30 min

表 1 不同阳极氧化时间下 6063 铝合金的表面粗糙度

Table 1 Surface roughness of 6063 Al alloy with different anodizing time

Anodizing time/min	0	5	10	20	30
Surface roughness/nm	68	249	313	346	349

表 2 不同阳极氧化时间下 6063 铝合金表面的 Al、O 元素含量

Table 2 Content of Al and O elements on the 6063 Al alloy surface with different anodizing time ( $\omega/\%$ )

Anodizing time/min	Al	O
0	98.3	0.4
5	91.4	8.2
10	86.6	11.7
20	83.2	14.2
30	85.7	13.1

### 2.2 未阳极氧化处理的 6063 铝合金与 PPS 超声波焊接

在超声波振幅 (50  $\mu\text{m}$ ) 恒定的条件下, 焊接时间和焊接压力对未阳极氧化处理的 6063 铝合金/PPS 焊接接头抗剪强度的影响如图 5 所示。从图中可以看出, 在不同的焊接压力下, 6063 铝合金/PPS 接头的抗剪强度随着焊接时间的增加先增大后减小。当焊接时间达到 6 s 时, 6063 铝合金/PPS 接头的抗剪强度达到最大值。当焊接时间不大于 5 s 时, 6063 铝合金/PPS 接头的抗剪强度随着焊接压力的增加而增大; 当焊接时间

超过 5 s 后, 焊接压力为 0.5 MPa 的焊接接头抗剪强度最大。当焊接压力和焊接时间分别为 0.5 MPa 和 6 s 时, 可获得最大抗剪强度 1.41 MPa。结果表明, 未经阳极氧化处理的 6063 铝合金与 PPS 焊接的接头在实验条件下的抗剪强度较低。从未经阳极氧化处理的 6063 铝合金/PPS 接头断裂后的形貌 (如图 6 所示) 可以看出, 接头在连接界面处开裂, 且接头两侧材料表面光滑, 无 PPS 残留, 说明 6063 铝合金和 PPS 之间的粘合力较弱。

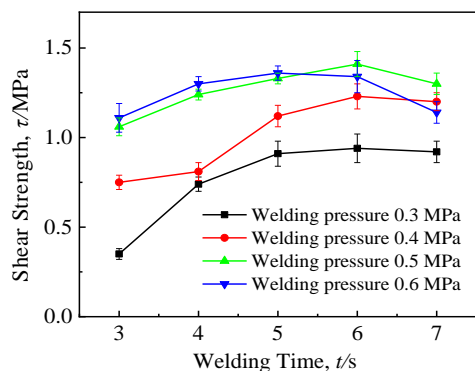


图 5 焊接时间和焊接压力对未阳极氧化的 6063 铝合金/PPS 接头抗剪强度的影响

Fig.5 Effect of welding time and welding pressure on shear strength of non-anodized 6063 Al alloy/PPS joint



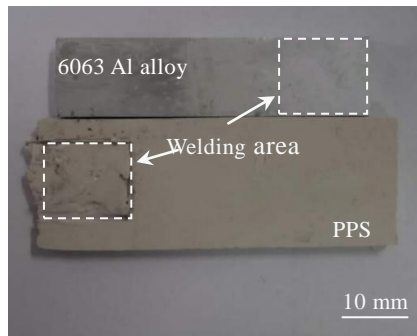


图 6 未阳极氧化的 6063 铝合金/PPS 接头断裂形态 (焊接压力 0.5 MPa, 焊接时间 6 s)

Fig.6 Fracture morphology of non-anodized 6063 Al alloy/PPS joint (welding pressure: 0.5 MPa, welding time: 6 s)

为了进一步探究接头抗剪强度较低的原因,对焊接接头的截面进行观察。图 7 所示为抗剪强度为 1.41 MPa 时焊接接头界面处的 SEM 图。从图 7a 可以看出,结合界面光滑,无裂纹和气孔等缺陷。但是图 7a 中的区域 A 在高倍下的检测结果(图 7b)表明,焊接接头界面处的连接质量不均匀,存在结合区和未结合区,有明显的缝隙,最大宽度可达 0.53 μm。结合图 4a 中未处理 6063 铝合金表面的形貌,说明超声波的声流效应在 PPS 内形成的声压梯度,难以使 6063 铝合金与 PPS

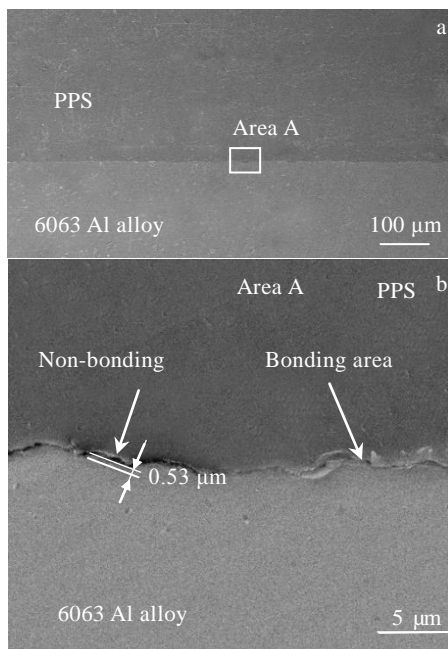


图 7 未阳极氧化的 6063 铝合金/PPS 接头截面(焊接压力 0.5 MPa, 焊接时间 6 s)和图 7a 中所选区域 A 对应的 SEM 图

Fig.7 SEM image of cross section of non-anodized 6063 Al alloy/PPS joint (welding pressure: 0.5 MPa, welding time: 6 s) (a) and SEM image of area A marked in Fig.7a (b)

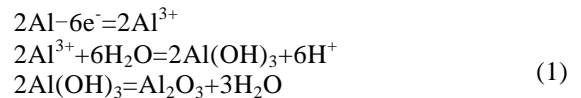
形成有效的机械互锁。结果表明,未经阳极氧化处理的 6063 铝合金/PPS 接头抗剪强度较低,因此需要对 6063 铝合金进行必要的阳极氧化处理。

### 2.3 阳极氧化处理的 6063 铝合金与 PPS 超声波焊接

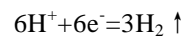
为了改善 6063 铝合金与 PPS 接头质量,对 6063 铝合金连接部分进行了 10 min 阳极氧化处理。采用未处理 6063 铝合金与 PPS 连接获得的最优焊接压力 0.5 MPa。图 8 显示了超声波焊接时间对阳极氧化的 6063 铝合金/PPS 接头剪切强度的影响。从图 8 中可以看出,阳极氧化的 6063 铝合金/PPS 接头抗剪强度随焊接时间增长先增大后减小。在焊接时间为 5 s 时,最大抗剪强度可达 16.55 MPa,说明铝合金阳极氧化处理可有效提高 6063 铝合金/PPS 接头抗剪强度。

根据 Belwalkar 等<sup>[15]</sup>的研究,阳极氧化时间是阳极氧化过程中重要的参数之一,对铝合金表面形貌有着显著的影响。6063 铝合金阳极氧化时间对 6063 铝合金/PPS 焊接接头强度的影响如图 9 所示。随着阳极氧化时间的增加,阳极氧化处理的 6063 铝合金/PPS 焊接接头的抗剪强度呈现先上升后下降的总体趋势。当阳极氧化处理时间为 20 min 时,抗剪强度达到最大值 16.92 MPa,其抗剪强度值是未经阳极氧化处理的 6063 铝合金/PPS 接头抗剪强度的 12.6 倍。将图 9 的结果与表 2 对比研究发现,铝合金表面氧含量和接头抗剪强度随阳极氧化时间的变化趋势相似,说明氧元素的增加有助于提高接头抗剪强度。根据阳极氧化原理:

Anode



Cathode



由式(1)可知,氧元素的增加实际上是由于铝合金表面阳极氧化生成了氧化铝的多孔结构(如图 4 所示),阳极氧化过程中,当反应进行到一定程度时,多孔结构的生成速率与其溶解速率达到平衡,铝合金表面形貌和成分将基本维持稳定。而反应生成的这种结构能够提高分子间作用力<sup>[16]</sup>。因此,与未经阳极氧化预处理的 6063 铝合金相比,PPS 更容易与阳极氧化的 6063 铝合金接合。

图 10 为 6063 铝合金经阳极氧化后接头抗剪强度为 16.92 MPa 时的接头横截面图。与未阳极氧化的接头(图 7)相比,接头界面未发现间隙或其他缺陷,6063 铝合金与 PPS 之间形成了紧密的结合界面。从图 10b 中可以发现,在 6063 铝合金和 PPS 连接处存在咬合结构。表明超声波的声流效应在 PPS 内形成的声压梯度,使 PPS 顺利嵌入 6063 铝合金表面形成的多孔结构,并在内部形成齿状咬合结构,增强连接强度。

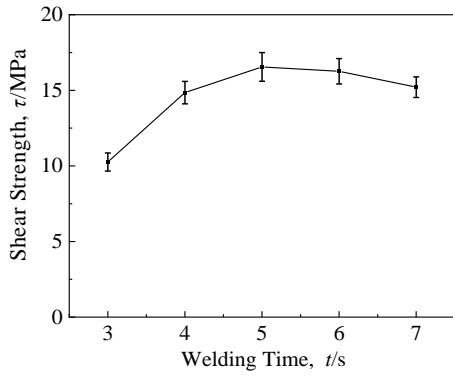


图 8 超声波焊接时间对阳极氧化的 6063 铝合金/PPS 接头抗剪强度的影响 (焊接压力 0.5 MPa, 阳极氧化时间 10 min)

Fig.8 Effect of ultrasonic welding time on shear strength of anodized 6063 Al alloy/PPS joint (welding pressure: 0.5 MPa, anodizing time: 10 min)

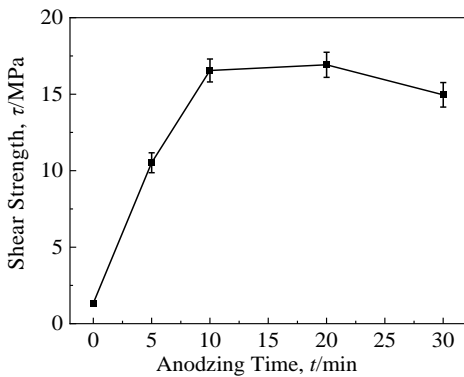


图 9 阳极氧化时间对 6063 铝合金/PPS 接头抗剪强度的影响 (焊接压力 0.5 MPa, 焊接时间 5 s)

Fig.9 Effect of anodizing time on shear strength of 6063 Al alloy/PPS joint (welding pressure: 0.5 MPa, welding time: 5 s)

依据实验结果构建铝合金与 PPS 的连接示意图如图 11 所示。

步骤一：如图 11a 所示，采用阳极氧化处理 6063 铝合金表面，在其表面生成多孔结构。

步骤二：如图 11b 所示，将具有多孔结构表面的 6063 铝合金侧与 PPS 搭接，超声波焊压头以一定的焊接压力施加于铝合金上部，超声波振动在铝合金与 PPS 接触面产生的热量将接触面上的 PPS 熔化 (图 11b)，熔融的 PPS 在压力和超声波声流效应产生的声压梯度共同作用下进入 6063 铝合金阳极氧化处理

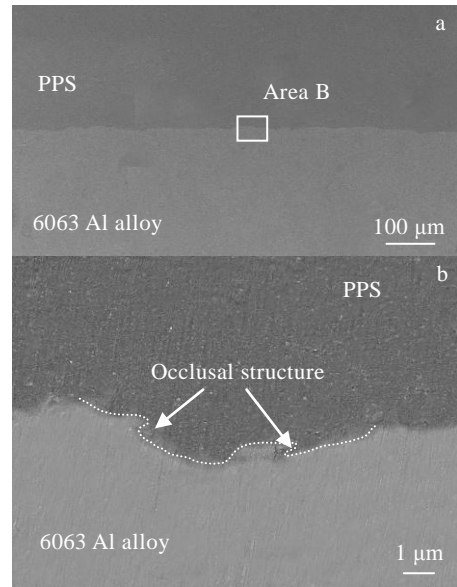


图 10 阳极氧化的 6063 铝合金/PPS 接头横截面(焊接时间 5 s, 焊接压力 0.5 MPa, 阳极氧化时间 20 min) 和图 10a 中所选区域 B 对应的 SEM 图

Fig.10 SEM image of cross section of anodized 6063 Al alloy/PPS joint (welding time: 5 s, welding pressure: 0.5 MPa, and anodizing time: 20 min) (a) and SEM image of area B marked in Fig.10a (b)

后形成的多孔结构中。

步骤三：焊接界面冷却后，PPS 在铝合金孔洞内部形成齿状咬合结构，二者形成有效的连接接头 (图 11c)。

图 12 为接头抗剪切强度为 16.92 MPa 时拉伸断裂后的 6063 铝合金一侧的断口形貌。从图 12a 和 12b 可以看出，在 6063 铝合金面上存在铝合金与 PPS 的结合区和未结合区。在结合区能够看出经过拉伸剪切过程后，PPS 发生了明显的塑性流动，而未结合区表面说明该区域为简单的界面开裂。在图 12b 中能够明显看到 PPS 沿拉伸剪切方向呈“带状”的破坏形貌。PPS 在低于玻璃化转变温度而处于玻璃态时，链段运动处于被冻结的状态，断裂伸长率较低，只有键长、键角等小尺寸运动单元能够运动。在受到拉伸剪切载荷时，前期接头的载荷抗力较大，界面失效进程较慢，在聚合物的银纹增韧机制下分子链段撕扯拉长，拉伸剪切过程中的 PPS 链段在应力作用下，沿受力方向出现细颈，相对无序的玻璃态的 PPS 链段出现一定方向的取向，随着增长的细颈的断裂发展成裂纹，该破坏界面属于内聚断裂<sup>[17]</sup>。在图 12b 和 12c 中可以看到，

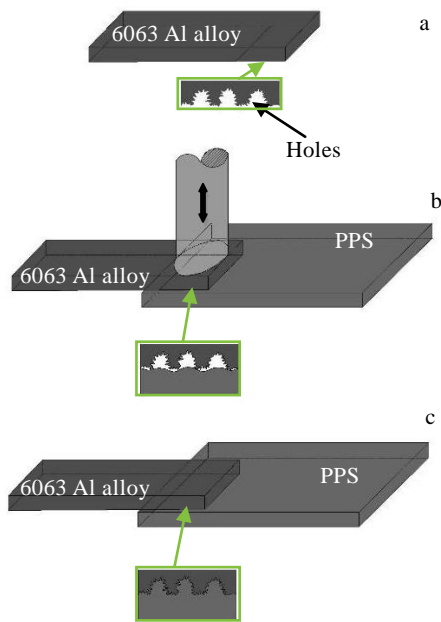


图 11 超声波焊接 6063 铝合金和 PPS 过程示意图

Fig.11 Schematic diagram of ultrasonic welding of 6063 Al alloy and PPS

在内聚断裂部分存在少量球状 PPS 颗粒附着，推测这些球状颗粒物可能是 PPS 中填充的玻璃纤维在超声波

的作用下融化并在铝合金孔洞结构附近重新凝固形成的产物。这些结果清楚地揭示了阳极氧化处理后界面处存在较强的结合力。

### 2.4 界面的 XPS 分析

图 13 是未经阳极氧化处理的 6063 铝合金与 PPS 接头的界面得到的 Al 2p 和 O 1s 的 XPS 光谱。从界面检测到的 Al 2p 谱图可以分解为 2 个峰：Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>（结合能 74.8 eV）和 Al（结合能 72.9 eV）。从界面检测到的 O 1s 谱图可以分解为 1 个峰：Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>（结合能 532.4 eV）。Al 2p 和 O 1s 谱中的所有组分峰的结果都是可以在 6063 铝合金表面检测出来的。因此，未经阳极氧化的铝合金与 PPS 的接头界面没有新的化学键形成。

阳极氧化时间为 20 min 的接头，界面处的 Al 2p 和 O 1s 的 XPS 谱图如图 14 所示。与未经阳极氧化的接头相比，分峰的结果是相同的，没有出现新的谱峰。但是在 Al 2p 谱图中可以看到，代表 Al 的峰相对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的峰面积减小，说明铝合金表面的部分 Al 通过阳极氧化生成了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。结果表明，阳极氧化处理增加了铝合金表面的 O 的含量，即增加了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量，这也可以与表 2 的数据相互验证，同时证明适当的阳极氧化时间可以提高 6063 铝合金/PPS 接头的抗剪强度。

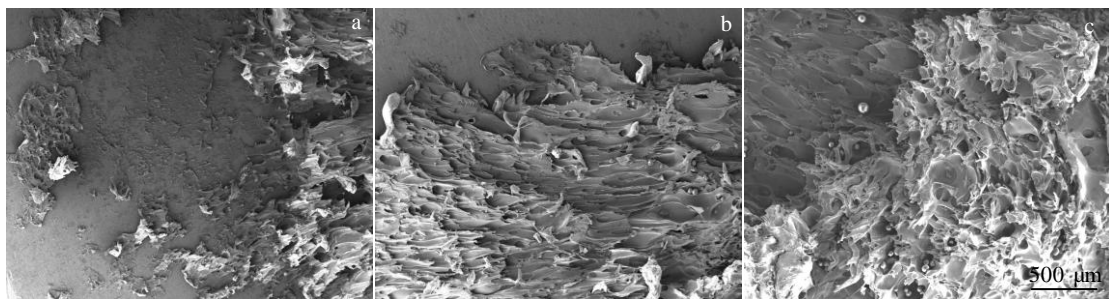


图 12 阳极氧化处理的 6063 铝合金/PPS 接头 6063 铝合金一侧断口的 SEM 形貌

Fig.12 SEM morphologies of 6063 Al alloy side fracture of anodized 6063 Al alloy/PPS joint

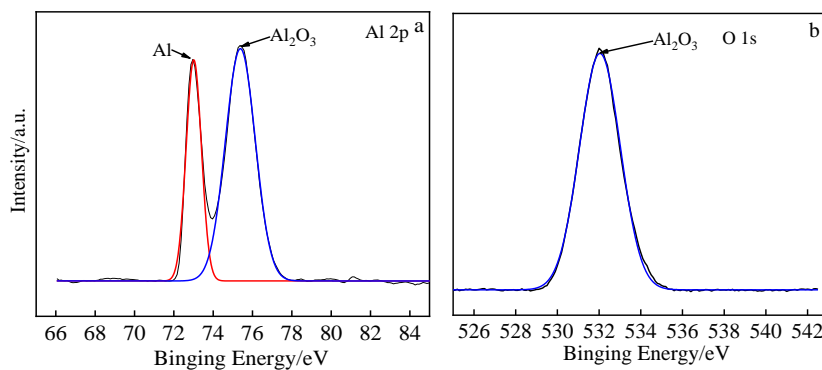


图 13 未经阳极氧化的 6063 铝合金/PPS 接头的 Al 2p 和 O 1s 的 XPS 峰拟合曲线

Fig.13 Fitting curves of Al 2p (a) and O 1s (b) XPS peaks of non-anodized 6063 Al alloy/PPS joint

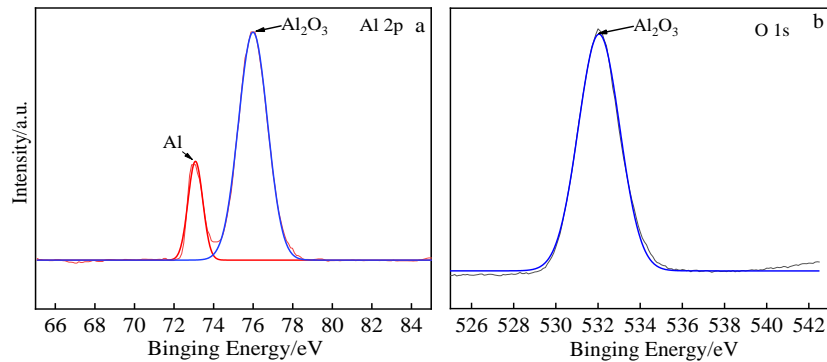


图 14 阳极氧化的 6063 铝合金/PPS 接头的 Al 2p 和 O 1s 的 XPS 峰拟合曲线(焊接时间 5 s, 焊接压力 0.5 MPa, 阳极氧化时间 20 min)  
 Fig.14 Fitting curves of Al 2p (a) and O 1s (b) XPS peaks of anodized 6063 Al alloy/PPS joint (welding time: 5 s, welding pressure: 0.5 MPa, anodizing time: 20 min)

### 3 结 论

1) 6063 铝合金表面未经阳极氧化处理时, 6063 铝合金/PPS 焊接接头抗剪强度最高仅为 1.41 MPa; 6063 铝合金经阳极氧化处理后, 6063 铝合金/PPS 焊接接头抗剪强度最大可达 16.92 MPa, 是未经阳极氧化处理的 12.6 倍。

2) 6063 铝合金表面经阳极氧化处理后生成微米级多孔结构, 超声波的声流效应产生的声压梯度使 PPS 进入 6063 铝合金表面的孔洞, 形成齿状咬合的机械互锁结构而实现有效连接。

3) 焊接接头的失效形式主要是 6063 铝合金与 PPS 的界面开裂和接头上 PPS 的内聚断裂。

#### 参考文献 References

- [1] Xing Denghai, Chen Wuyi, Xing Dengjiang *et al.* *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*[J], 2013, 227(8): 1338
- [2] Altenbach H. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*[J], 2011, 225(11): 2481
- [3] Zhang Dawei, Zhang Qi, Fan Xiaoguang *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2019, 48(1): 44
- [4] Lambiase F. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2015, 80(9): 1995
- [5] Huang Zhequn, Sugiyama Sumio, Yanagimoto Jun. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2014, 214(10): 2018
- [6] Kadoya Shotaro, Kimura Fuminobu, Kajihara Yusuke. *Polymer Testing*[J], 2019, 75: 127
- [7] Lambiase F, Genna S, Leone C *et al.* *Optics & Laser Technology*[J], 2017, 94: 45
- [8] Cheon J, Na S J. *Science and Technology of Welding & Joining*[J], 2014, 19(8): 631
- [9] Tan Xianghu, Zhang Jing, Shan Jiguo *et al.* *Composites Part B: Engineering*[J], 2015, 70: 35
- [10] Moshwan Raza, Rahmat Sahifulddin M, Yusof Farazila *et al.* *International Journal of Materials Research*[J], 2015, 106(3): 258
- [11] Jung Kwang-Woon, Kawahito Yosuke, Takahashi Makoto *et al.* *Journal of Laser Applications*[J], 2013, 25(3): 32 003
- [12] Yeh Ren-Yu, Hsu Ray-Quen. *International Journal of Adhesion and Adhesives*[J], 2016, 65: 28
- [13] Chiu Liu-Ho, Chen Chun-Chin, Yang Chih-Fu. *Surface and Coatings Technology*[J], 2005, 191(2-3): 181
- [14] Huang Yanbin(黄燕滨), Zhong Liushi(仲流石), Song Gaowei(宋高伟) *et al.* *Equipment Environmental Engineering (装备环境工程)*[J], 2012, 9(3): 71
- [15] Belwalkar A, Grasing E, Van Geertruyden W *et al.* *Journal of Membrane Science*[J], 2008, 319(1-2): 192
- [16] Tang Dongyan, Guo Yudi, Zhang Xiaohong *et al.* *Surface and Interface Analysis*[J], 2009, 41(12-13): 974
- [17] Wang Tiejun(王铁军), Yin Zhengnan(尹征南), Wang Jianguo(王建国). *Advances in Mechanics(力学进展)*[J], 2007, 37(1): 48

## Effect of Anodizing Treatment on Ultrasonic Welding 6063 Aluminum Alloy and PPS

Yu Weiyuan<sup>1</sup>, Zhang Tao<sup>1</sup>, Wang Youliang<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals,  
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** 6063 aluminum alloy (6063 Al alloy) which was anodized using phosphoric acid and polyphenylene sulfide (PPS) were connected by ultrasonic welding method. The results show that the shear strength of untreated 6063 Al alloy/PPS ultrasonic welded joint increases at first and then decreases with the increase of welding time and welding pressure. The maximum shear strength of joint is 1.41 MPa, when the welding pressure and welding time are 0.5 MPa and 6 s, respectively. Once the surface of 6063 Al alloy was anodized with phosphoric acid, the shear strength of joint can reach 16.92 MPa, which is about 12.6 times of that without anodizing. The primary failure modes of the structure are interface cracking and cohesive fracture of PPS. By observing and analyzing the structures of joint using SEM, a good mechanical interlocking between the 6063 Al alloy and PPS forms and the intermolecular force at the interface increases due to the forming porous structure on the 6063 Al alloy surface after anodizing treatment. The sound pressure gradient generated by the sound flow effect of ultrasonic welding makes PPS embedded into the porous structure, so as to achieve a good combination of 6063 Al alloy/PPS.

**Key words:** anodizing; ultrasonic welding; 6063 Al alloy; polyphenylene sulfide (PPS); mechanical properties

---

Corresponding author: Wang Youliang, Ph. D., Associate Professor, School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, E-mail: wangyouliang20@163.com