

表面处理对 TC4 钛合金-GF/PEI 复合材料 电阻焊接强度的影响

崔旭, 赵普, 熊需海, 张忠宝, 王道晟

(沈阳航空航天大学 先进聚合物基复合材料辽宁省重点实验室, 沈阳 110136)

摘要: **目的** 提高钛合金-复合材料电阻焊接界面强度。**方法** 以不锈钢网、预浸料和树脂薄膜的组合结构作为界面试植入体, 利用脉冲电阻焊接技术连接钛合金和玻璃纤维增强聚醚酰亚胺 (GF/PEI) 层合板。对表面光滑的钛合金分别进行砂纸机械打磨以及 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{NaOH}$ 碱性混合溶液刻蚀处理, 并通过能谱分析仪、扫描电子显微镜和静态接触角测试仪, 分别对钛合金表面成分、形貌和粗糙程度进行分析。对表面处理后的钛合金和 GF/PEI 层合板进行电阻焊接, 并对焊件进行单搭接拉伸剪切试验, 以评估焊接头的强度。利用超声波扫描显微镜检测层合板内部损伤验证接头失效模式。**结果** 通过机械打磨后的钛合金, 表面粗糙程度增加, 接触角从 56.8° 上升到 84.8° 。钛合金与 PEI 树脂的界面结合性能上升, 使最大焊接强度提升 187.0%。碱性混合溶液刻蚀后的钛合金, 表面形貌随刻蚀时间 (t_c) 的增长呈现出不同的结构, 并在刻蚀后期出现亚微米级的网络结构, 同时伴随着表面接触角从 56.8° 上升到 136.3° 。钛合金表面的亚微米级网络结构与 PEI 树脂形成机械互锁结构来共同承担焊接头的力学性能, 使最大焊接强度提升 198.4%。接头失效分析显示, 焊接初期接头的主要失效模式为钛合金板从界面处直接剥离; 焊件强度达到最佳时, 失效模式转变为植入体断裂。**结论** 对钛合金进行机械打磨和刻蚀处理可以有效改善表面粗糙程度, 从而提高钛合金-GF/PEI 层合板的焊接头强度。

关键词: 钛合金; 聚醚酰亚胺; 电阻焊接; 机械打磨; 刻蚀; 失效模式

中图分类号: TQ586.5; TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2019)11-0244-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.11.026

Influence of Surface Pre-treatment on Resistance Welding Strength of Titanium Alloy-GF/PEI Composites

CUI Xu, ZHAO Pu, XIONG Xu-hai, ZHANG Zhong-bao, WANG Dao-sheng

(Liaoning Key Laboratory of Advanced Polymer Matrix Composites, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the resistance welding interface strength of titanium alloy-composite. A combination of stainless-steel mesh, prepreg and resin film was used as the interface implant, and the titanium alloy and the glass fiber reinforced polyetherimide (GF/PEI) laminate were connected by pulse resistance welding technology. The smooth surface of the titanium alloy was ground mechanically by abrasive sand and etched by $\text{H}_2\text{O}_2/\text{NaOH}$ alkaline mixed solution. The chemical components, surface morphology and roughness of the titanium alloy were analyzed by energy dispersive spectrometer (EDS),

收稿日期: 2019-04-01; 修订日期: 2019-05-06

Received: 2019-04-01; Revised: 2019-05-06

基金项目: 辽宁省高等学校国(境)外培养项目(2018LNGXGJWPY-YB008)

Fund: National (outside) Training Project of Liaoning Higher Education Institutions (2018LNGXGJWPY-YB008)

作者简介: 崔旭(1971—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为复合材料连接。邮箱: cuixug@163.com

Biography: CUI Xu (1971—), Male, Doctor, Professor, Research focus: composite connection. Email: cuixug@163.com

scanning electron microscope (SEM) and static contact angle tester. Resistance welding was carried out to the titanium alloy with surface treated and the GF/PEI laminate, and the weldment was subjected to a single lap tensile shear test to evaluate the strength of the welded joint. The failure mode of the joint was verified by ultrasonic scanning microscopy to detect the internal damage of the laminate. After the titanium alloy was ground mechanically, the surface roughness increased and the contact angle increased from 56.8° to 84.8° . The interfacial bonding properties of titanium alloy and PEI resin increased, and the maximum welding strength was increased by 187.0%. The surface morphology of the titanium alloy after etched by alkaline mixed solution etching showed different structures with the increase of etching time (t_e), and a submicron network structure appeared in the later stage of etching. At the same time, the surface contact angle increased from 56.8° to 136.3° . The submicron network structure of the titanium alloy surface formed a mechanical interlocking structure with the PEI resin to jointly bear the mechanical properties of the welded joint, and the maximum welding strength was increased by 198.4%. The joint failure analysis showed that the main failure mode of the joint at the initial stage of welding was that the titanium alloy was directly peeled off from the interface. When the strength of the weldment achieved optimal, the failure mode was changed into the fracture of the implant. Mechanical grinding and etching of the titanium alloy can effectively improve the surface roughness, thereby improving the strength of welding joint of the titanium alloy-GF/PEI laminate.

KEY WORDS: titanium alloy; polyetherimide; resistance welding; mechanical polishing; etching; failure mode

钛合金和聚合物基复合材料作为具有多种物理、化学和机械性能的先进材料,已经在航空航天等体积密集型行业中得到了广泛的应用。与此同时,各种用于金属-聚合物基复合材料的连接技术也应用而生^[1]。虽然传统的机械紧固连接和粘接技术可以提供足够的连接强度,但仍存在较大缺陷,如机械紧固连接中的螺栓或铆钉使结构件整体的质量增加。另外,螺栓孔的存在使结构件的横截面积减小,连接处的应力增加。在复合材料表面钻孔将导致复合材料结构中产生裂缝和分层,对整体的连接强度造成极大的损伤。而粘接技术则需要对连接部位进行大面积预处理,并且粘接周期较长,接头易受温度和湿度的影响发生老化^[2]。

电阻熔融粘接技术,也称为电阻焊接技术,作为金属-复合材料传统连接的可替代连接技术,已经展现出诸多优势,如工艺流程简单、设备灵活简便、效率高、费用低廉、能连续焊接大面积区域,并且在焊接过程中不需要移动焊件等^[3]。金属-复合材料电阻焊接从复合材料电阻焊接发展而来, J. M. MARINELLI^[4]于 1994 年首先提出将电阻焊接技术应用于金属和复合材料连接。之后, Ye^[5]将其应用于碳纤维增强聚醚酰亚胺 (CF/PEI) 复合材料与铝合金板之间的连接,并利用三维瞬态有限元模型 (FEM) 来模拟该过程,进而确定最佳焊接工艺窗口。Nagatsuka^[6]则通过硅烷偶联剂处理不锈钢表面,实现了不锈钢-热塑性复合材料点焊的界面强化。

在钛合金-复合材料连接过程中,通过对钛合金进行表面处理实现接头强化的方法也引起国内外学者的关注。表面处理通过以多种方式改变基材表面状态来增加粘合强度,包括增加表面张力、增加表面粗糙度或改变表面化学性质。通过增加表面粗糙度,实现表面积的增加,允许粘合剂与金属表面上的不规则凹坑形成机械互锁,从而实现接头的强化。而常见的

处理技术主要针对于金属表面,如磨损和喷砂处理^[7]、机械打磨处理^[8]、酸碱蚀刻处理^[9]、电化学刻蚀处理^[10]、等离子处理^[11]和激光处理^[12]等方法。表面处理绝大部分应用于粘接过程,针对焊接的应用仍有较大潜力。

虽然已经有学者从表面刻蚀处理的角度探究更具可靠性的粘接接头^[13-14],但目前并没有研究者尝试通过对钛合金表面进行损伤处理,来增强钛合金-GF/PEI 复合材料电阻焊接头的力学性能。在这项工作中,通过利用砂纸机械打磨以及碱性溶液刻蚀两种手段,创建更加粗糙的焊接表面,由此达到通过表面改造实现增强焊接头力学性能的目的。此外,通过断面微观分析,可以得到接头详细的失效模式,以证明表面处理对钛合金-GF/PEI 复合材料电阻焊接过程中的增强机理。

1 实验材料与方法

1.1 材料

玻璃纤维平纹织布(牌号 EW160,密度 143 g/m^2 ,厚度 0.16 mm),上海耀虹玻璃纤维有限公司;聚醚酰亚胺 (PEI, 牌号 1010, 相对分子质量 48 000),上海众司实业有限公司;钛合金板(牌号 TC4, 组分 Ti-6Al-4V, 密度 4.51 g/cm^3),天津百恩威新材料科技有限公司;不锈钢网(牌号 304, 密度 7.93 g/cm^3 , 丝径 0.1 mm , 孔径 0.16 mm),广州景峰不锈钢有限公司;干磨砂纸(P400、P240、P60),上海鼎曦磨料磨具有限公司;氢氧化钠 (NaOH), 沧州璀璨化工产品有限公司;过氧化氢溶液 (H_2O_2 , 质量分数 30%),杭州精欣化工有限公司。

1.2 过程

实验过程如图 1 所示。

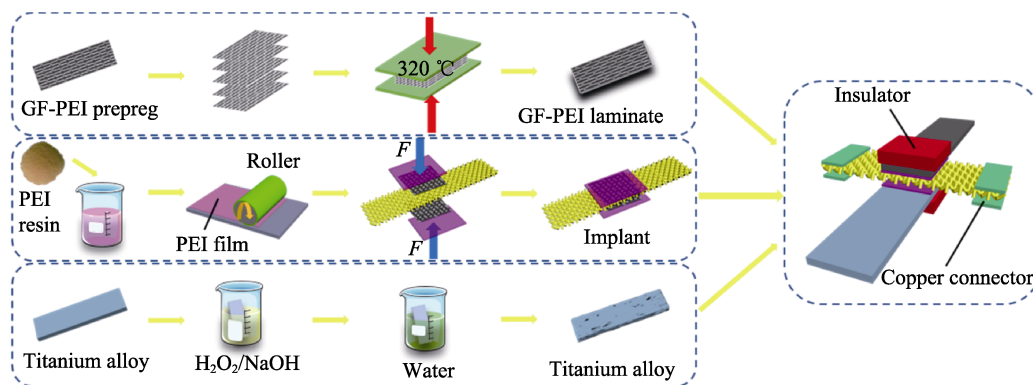


图1 材料制备及焊接示意图

Fig.1 Schematic diagram of material preparation and welding

GF/PEI复合材料板制备:首先将PEI溶解于N,N-二甲基乙酰胺中配制树脂溶液,之后采用湿法预浸工艺制备预浸料,进而采用热压工艺制备2 mm厚的层合板。

PEI薄膜的制备:将上述配制的树脂溶液采用溶液流延法制备成PEI薄膜,厚度为0.2 mm。

植入体的制备:不锈钢网作为加热体置于中心位置,两层GF/PEI预浸料作为绝缘层分别置于不锈钢网两侧,两层纯PEI薄膜分别置于最外侧,用于形成富含树脂的胶层(图2a)。将该复合结构采用热压工艺制备成植入体组件。

钛合金板的表面处理:将试样在垂直于焊接方向上使用三种不同目数的砂纸(P400、P240、P60)分别进行手机机械打磨(图2b),打磨后,通过去离子水超声清洗样件,之后在室温下鼓风干燥。随后,将钛合金板浸入到9 mol/L H₂O₂和0.5 mol/L NaOH混合溶液中,刻蚀时间(t_c)分别为20、30、40、50 min。取出后在去离子水中进行超声清洗30 min,之后在室温下鼓风干燥。

焊接工艺:将制备好的植入体夹在待焊件的接头处,利用液压机压头对接头处施加均匀的0.1 MPa初

始压力。设定脉冲电源初始输入电压为50 V,电流为20 A。通电后开始焊接,焊接时间(t_w)分别为60、120、180 s。焊接时,对焊接区域边缘进行主动冷却降温,以降低边缘热效应,同时利用2组k型热电偶,对焊接区域的温度数据进行实时采集(图2a)。

1.3 表征与测试

使用静态接触角测试仪(JC2000D, China)表征钛合金板表面的浸润状态。由扫描电子显微镜(SEM, Hitachi SU3500, Japan)提供钛合金表面形貌及焊接断面的详细微观形态。通过超声波扫描显微镜(AM300, Germany)检测GF/PEI层合板焊接区域内部损伤。

使用万能试验机对焊接试样进行单搭接剪切强度(LSS)测试,测试参照ASTM D1002标准,拉伸速率为10 mm/min,计算公式为:

$$\tau = \frac{F_{\max}}{L \cdot b} \quad (1)$$

式中: τ 为单搭接剪切强度(N/mm²); L 为搭接长度(mm); b 为搭接宽度(mm); F_{\max} 为最大拉伸力(N)。

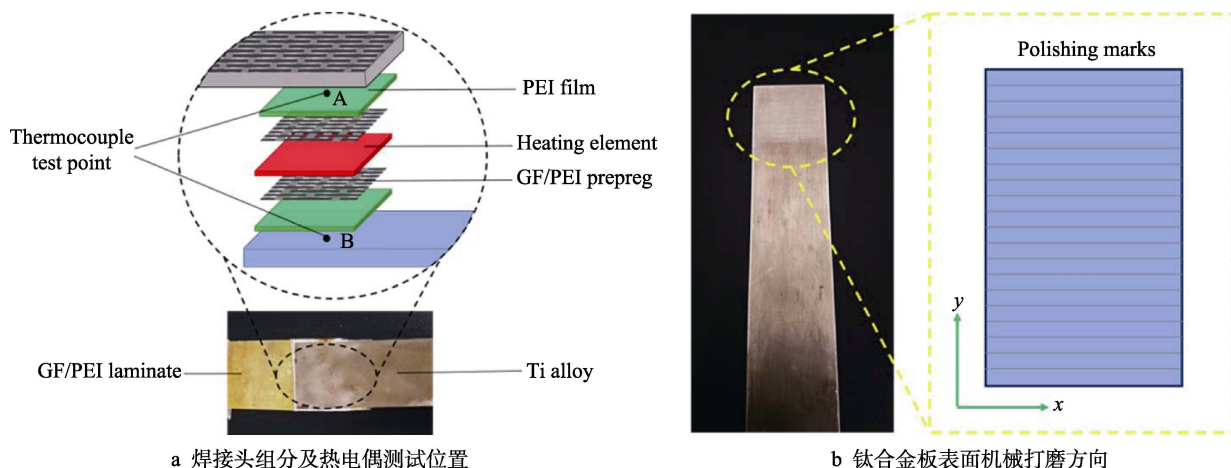


图2 焊接头设计

Fig.2 Design of welding joint: (a) welding joint components and thermocouple test points; (b) mechanical grinding direction on the surface of titanium alloy plate

2 结果与讨论

2.1 焊接工艺及接头强度分析

PEI 树脂的熔融温度约为 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[15], 结合焊接过程中两侧焊接界面升温曲线 (图 3), 可以得到 A 测试点温度升到 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 需要 40 s。由于钛合金是电和热的良导体, 在电阻焊接过程中会引起严重的热损失, 因此焊接温度不能在短时间内达到热塑性树脂的熔点, 造成 B 测试点温度升到 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 需要 100 s。因此当 t_w 为 60 s 时, 由于与钛合金接触的树脂未能完全熔融, 此时焊接头拉伸剪切强度 (LSS) 最低 (图 4); t_w 为 120 s 时, 得到性能最佳的接头, LSS 为 6.98 MPa; t_w 达到 180 s 时, 接头强度下降可归因于热量过度累积造成层合板损伤, 进而导致强度弱化。

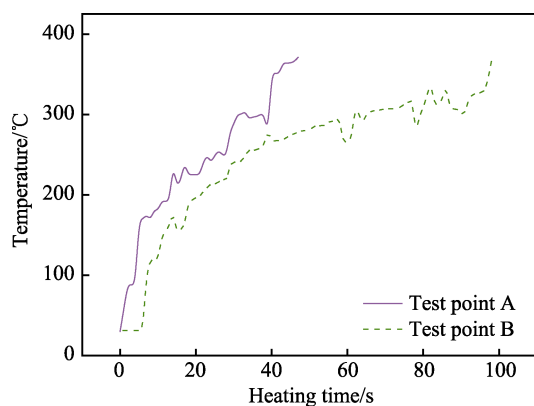


图 3 焊接界面升温曲线

Fig.3 Temperature rise curve of welding interface

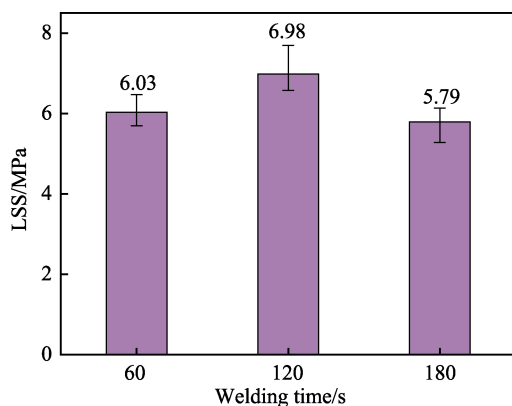


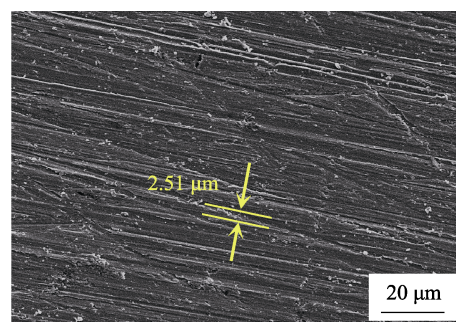
图 4 不同 t_w 接头的 LSS

Fig.4 LSS of welded joints at different t_w

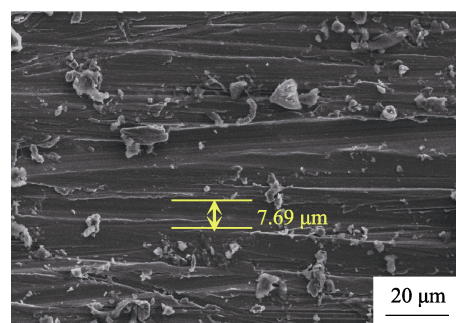
2.2 钛合金表面机械打磨对焊接头的增强作用及机理

相对于表面光滑的未处理钛合金, 机械打磨后的钛合金表面有序分布着垂直于焊接方向的宽度和深度均不同的凹槽 (图 5), 并且 60 目砂纸打磨的凹槽最显著, 宽度达到 $19.32\text{ }\mu\text{m}$ (图 5c)。将表面覆盖不

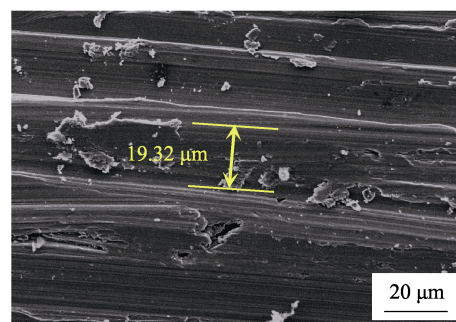
同凹槽的钛合金分别与 GF/PEI 层合板焊接, 界面强化效果表现出极大的差异。焊接界面的 LSS 值均显示出随 t_w 先增后减的趋势, 并均在 120 s 时达到最大。在 t_w 相同的情况下, 相比于未进行处理的焊接头强度 (图 4), 机械打磨后的焊接头强度明显上升 (图 6), 并随凹槽参数的增大而增加。凹槽宽度为 $2.51\text{ }\mu\text{m}$ 的接头 LSS 值均最小。凹槽宽度上升为 $19.32\text{ }\mu\text{m}$ 时, LSS 值在 $t_w=120\text{ s}$ 时达到最大, 相比于未处理焊接头的 LSS 值提升了 187.0%。该结果表明, 机械打磨对焊接头力学性能有明显的强化作用, 并且强化程度与凹槽参数相关。



a P400



b P240



c P60

图 5 不同目数砂纸打磨后的钛合金表面凹痕
Fig.5 Surface dents of titanium alloy after ground by abrasive paper with different meshes

由于不同参数的凹槽存在, 钛合金表面粗糙度发生改变, 即接触角发生明显变化 (图 7), 与树脂结合能力得到改善。由于 400 目砂纸打磨的凹槽较浅, 宽度仅为 $2.51\text{ }\mu\text{m}$, 因此失效接头中与表面凹槽结合的树脂较少 (图 8a), 焊接头强度最低。随着凹槽宽度依次增大到 $7.69\text{ }\mu\text{m}$ 和 $19.32\text{ }\mu\text{m}$, 钛合金表面接触

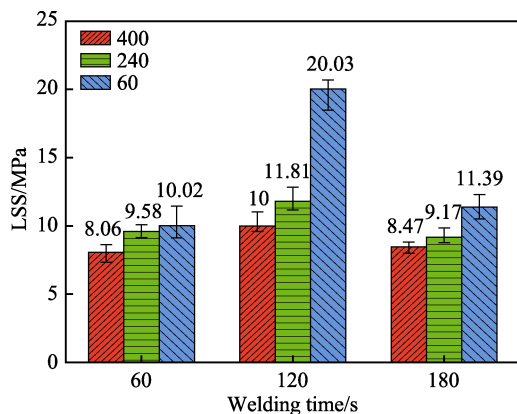


图6 不同目数砂纸打磨后的钛合金-GF/PEI 复合材料焊接头 LSS 值

Fig.6 LSS of titanium alloy-GF/PEI composite welding joint after ground by abrasive paper with different meshes

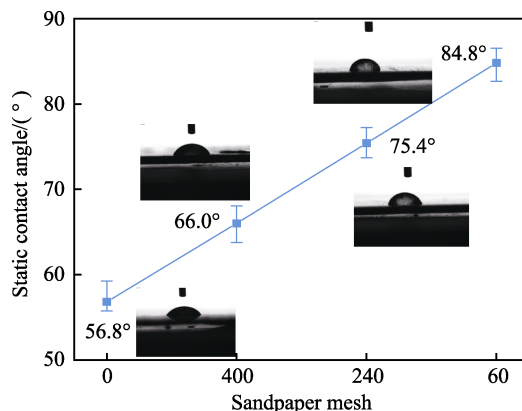


图7 不同砂纸打磨后的钛合金表面接触角

Fig.7 Contact angle on titanium alloy surface after grinding by different abrasive paper

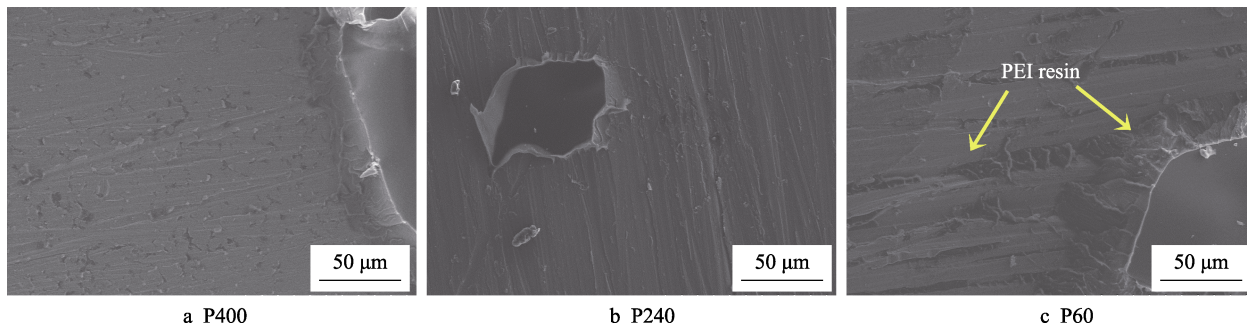


图8 不同目数砂纸打磨后的钛合金表面凹痕与树脂的结合

Fig.8 Bonding of surface dents and resin of titanium alloy after grinding by abrasive paper with different meshes

角增加,失效接头中与钛合金表面结合的树脂含量增加,界面连接强度得到提升(图8b、8c)。

2.3 钛合金表面刻蚀对焊接头的增强作用及机理

不同于机械打磨的竖直凹槽,碱性溶液通过在钛合金表面刻蚀出密集分布的凹坑,从而强化其与树脂的连接强度。图9为浸入 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{NaOH}$ 混合溶液中 20~50 min 的钛合金表面元素含量 EDS 测试结果及 SEM 图像。随着 t_e 的增加,钛合金表面氧元素含量从 53.571% 下降到 9.996%,表明氧化膜在刻蚀作用下逐渐脱落(图9a—c)。之后,随着碱性溶液进一步刻蚀,氧元素含量下降到 0,氧化膜完全脱落,钛合金表面出现亚微米级的网络结构(图9d、e),有效地增大了钛合金的比表面积。同时钛合金表面接触角上升(图10),粗糙度增加,有利于提升钛合金与树脂的结合强度。 t_e 不同的钛合金与 GF/PEI 层合板的焊接结果表明, LSS 随 t_e 的增加呈现上升趋势,并在 50 min 时获得焊接效果最佳的接头(图11),相比于未刻蚀处理的接头, LSS 提升了 198.4%。焊接强度的增强得益于钛合金表面在处理过程中氧化膜被完全刻蚀,同时粗糙的亚微米级网络结构与 PEI 树脂构成机械互锁(图12),在拉伸过程中共同承担接头的

力学性能。

2.4 t_w 和 t_e 对界面失效模式的影响

焊接界面的失效通常涉及到植入体与层合板本体的破坏,并随 t_w 和 t_e 的不同表现出不同的模式。对于 P60 砂纸机械打磨后的焊接接头,当 t_w 为 60 s 时,由于热量散失而引起与钛合金接触的 PEI 树脂薄膜在短时间内无法充分熔融,因而焊接头断面通常表现为植入体与钛合金板间的层间失效,即钛合金板从界面处直接剥离(图13b),不会对焊件造成明显的损伤(图13a),此时接头强度较低;当 t_w 为 120 s 时,树脂充分熔融使得钛合金与树脂结合强度增加,界面强度提升,并伴随着失效模式从层间失效转变为层内失效,即植入体断裂(图13d),此时由于热量累积使接头处树脂开始出现细微损伤(图13c); t_w 达到 180 s 时,由于焊接部位热量过度积累,造成层合板表面烧伤(图13e),接头强度发生恶化,此时失效模式表现为层合板表面纤维断裂(图13f)。此外,对于 Ti 合金表面刻蚀处理后且 t_w 为 120 s 的焊接接头,当 t_e 小于 30 min 时, Ti 合金表面氧化膜未被完全刻蚀,因而 PEI 树脂与 Ti 合金表面连接强度较弱,失效模式表现为层间失效(图13b); t_e 超过 30 min 时, Ti 合金表面氧化膜被充分刻蚀,亚微米级网络结构与

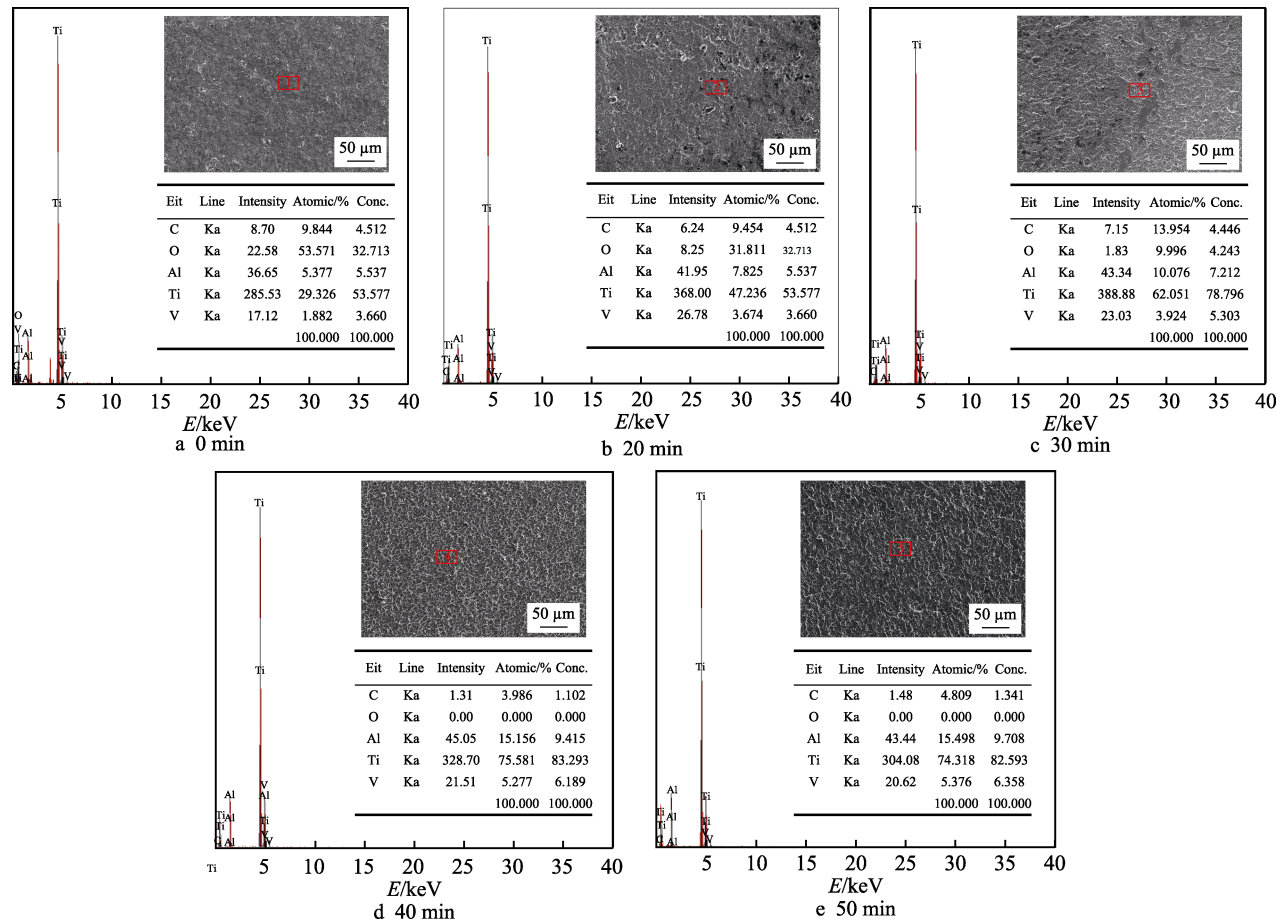


图 9 不同 t_e 的钛合金表面形貌及元素含量

Fig.9 Surface morphology and element content of titanium alloy with different t_e

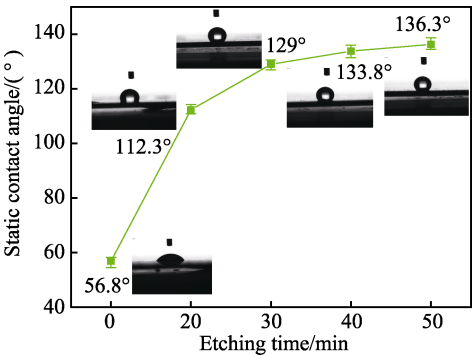


图 10 不同 t_e 的钛合金表面接触角
Fig.10 Contact angle on titanium alloy surface at different t_e

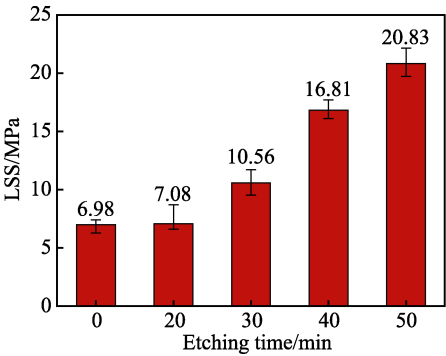


图 11 不同 t_e 钛合金-GF/PEI 复合材料焊接头的 LSS
Fig.11 LSS of titanium alloy-GF/PEI composite welding joint at different t_e

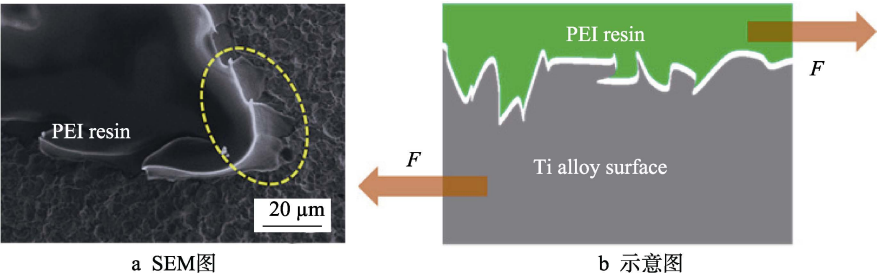


图 12 $t_e=50$ min 时钛合金表面亚微米级网络结构与 PEI 树脂的结合
Fig.12 Bonding of submicron network structure from titanium alloy surface and PEI resin when t_e was 50 min:(a) SEM image; (b) schematic diagram

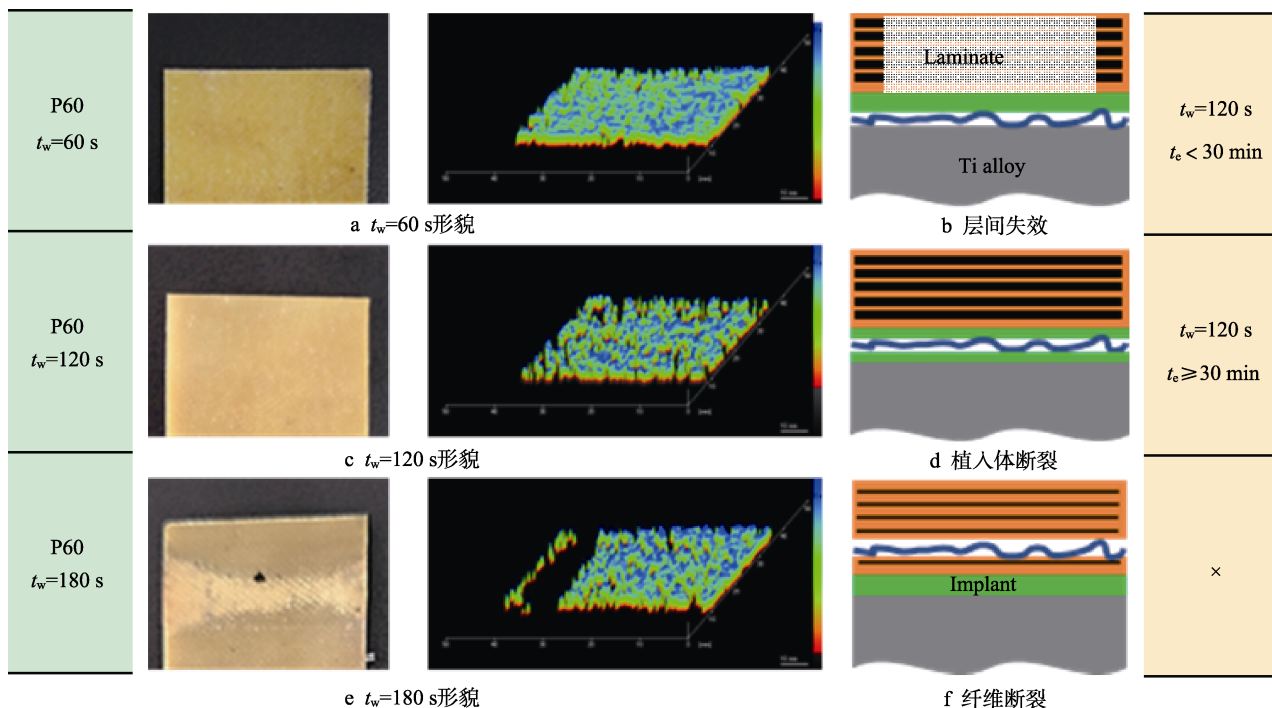


图 13 t_w 和 t_e 对界面失效的影响及 GF/PEI 层合板超声波 C 扫描成像图
Fig.13 Effect of t_w and t_e on interface failure; ultrasonic C-scan image of GF/PEI laminate:
(a) surface morphology at $t_w=60$ s; (b) interlayer failure; (c) surface morphology at $t_w=120$ s;
(d) Implant fracture; (e) surface morphology at $t_w=180$ s; (f) fiber break

PEI 树脂的结合强度增大, 接头强度得到改善, 失效模式转变为层内失效 (图 13d)。

3 结论

1) 在电阻焊接钛合金-热塑性复合材料过程中, 利用钛合金表面机械打磨制造的有序凹槽, 改变了钛合金表面的粗糙度, 强化钛合金与树脂的结合强度, 从而使焊接头的力学性能得到显著提高, 最大 LSS 达到 20.03 MPa, 相比于未打磨的焊接头提升了 187.0%。

2) 利用钛合金表面碱性溶液刻蚀制造的亚微米级网络结构, 使钛合金表面粗糙度更加优异, 亚微米级网络结构与树脂形成机械互锁, 从而使焊接头的力学性能得到显著提高, LSS 随刻蚀时间的增加呈现上升趋势, 并在 t_e 为 50 min 时得到拉伸强度最佳的接头, 相比于未刻蚀的焊接头强度提升了 198.4%。

3) 焊接界面的失效随 t_w 和 t_e 的不同, 表现出不同的模式。 t_w 不充分时, 焊接头断面通常表现为钛合金板从界面处直接剥离; t_w 最佳时, 失效模式转变为植入体断裂; 超出最佳 t_w 后, 焊接处热量的过度积累造成接头强度恶化, 失效模式表现为层合板表面纤维断裂。当 t_w 为最佳且 t_e 不充分时, 失效模式为层间失效, 之后随 t_e 的增加转变为层内失效。

参考文献:

- [1] JAHN J, WEEBER M, BOEHNER J, et al. Assessment strategies for composite-metal joining technologies—A review[J]. Procedia CIRP, 2016, 50: 689-694.
- [2] KOUTRAS N, VILLEGAS I F, BENEDICTUS R. Influence of temperature on the strength of resistance welded glass fibre reinforced PPS joints[J]. Composites part A: Applied science and manufacturing, 2018, 105: 57-67.
- [3] YOUSEFPOUR A, HOJJATI M, IMMARIGEON J P. Fusion bonding/welding of thermoplastic composites[J]. Journal of Thermoplastic composite materials, 2004, 17(4): 303-341.
- [4] MARINELLI J M. Advancements in welding technology for composite-to-metallic joints[J]. J advanced materials, 1994, 4: 20-27.
- [5] AGEORGES C, YE L. Resistance welding of metal/thermoplastic composite joints[J]. Journal of thermoplastic composite materials, 2001, 14(6): 449-475.
- [6] NAGATSUKA K, XIAO B, WU L, et al. Resistance spot welding of metal/carbon-fibre-reinforced plastics and applying silane coupling treatment[J]. Science and technology of welding and joining, 2018, 23(3): 181-186.
- [7] LIM B S, HEO S M, LEE Y K, et al. Shear bond strength between titanium alloys and composite resin: Sandblasting versus fluoride-gel treatment[J]. Journal of biomedical materials research part B, 2003, 64(1): 38-43.
- [8] CRITCHLOW G W, BREWIS D M. Review of surface pretreatments for titanium alloys[J]. International journal of adhesion and adhesives, 1995, 15(3): 161-172.
- [9] MOLITOR P, BARRON V, YOUNG T. Surface treatment

- of titanium for adhesive bonding to polymer composites: A review[J]. International journal of adhesion and adhesives, 2001, 21(2): 129-136.
- [10] MARÍN-SÁNCHEZ M, CONDE A, GARCÍA-RUBIO M, et al. Durability of titanium adhesive bonds with surface pretreatments based on alkaline anodisation[J]. International journal of adhesion and adhesives, 2016, 70: 225-233.
- [11] WEN H B, DEWIJN J R, CUI F Z, et al. Preparation of bioactive Ti6Al4V surfaces by a simple method[J]. Biomaterials, 1998, 19(1-3): 215-221.
- [12] MERTENS T, GAMMEL F J, KOLB M, et al. Investigation of surface pre-treatments for the structural bonding of titanium[J]. International journal of adhesion and adhesives, 2012, 34: 46-54.
- [13] 王春艳, 周希文, 黄珺, 等. 表面处理工艺对 TB8 钛合金与复合材料胶接性能的影响[J]. 航空材料学报, 2015, 35(6): 53-59.
- WANG Chun-yan, ZHOU Xi-wen, HUANG Jun, et al. Effect of surface treatment on bond joint strength of TB8 titanium alloy and composite material[J]. Journal of aeronautical materials, 2015, 35(6): 53-59.
- [14] MOLITOR P, YOUNG T. Adhesives bonding of a titanium alloy to a glass fibre reinforced composite material[J]. International journal of adhesion and adhesives, 2002, 22(2): 101-107.
- [15] 王凯, 詹茂盛, 高生强, 等. 可熔体加工热塑性聚酰亚胺研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2004, 34(3): 5-11.
- WANG Kai, ZHAN Mao-sheng, GAO Sheng-qiang, et al. Development of melt-processable thermoplastic polyimides[J]. Aerospace materials and technology, 2004, 34(3): 5-11.
-
- (上接第 243 页)
- [7] 李闯, 刘洪喜, 张晓伟, 等. 40Cr 刀具钢表面激光熔覆钴基碳化物复合涂层的组织与性能[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1103002.
- LI Chuang, LIU Hong-xi, ZHANG Xiao-wei, et al. Microstructure and property of Co-based carbide composite coating fabricated by laser cladding on 40Cr tool steel surface[J]. Chinese J lasers, 2015, 42(11): 1103002.
- [8] YASAVOL N, ABDOLLAH-ZADEH A, GANJALI M, et al. Microstructure and mechanical behavior of pulsed laser surface melted AISID2 cold work tool steel[J]. Applied surface science, 2013, 265(1): 653-662.
- [9] 刘洪喜, 董涛, 张晓伟, 等. 激光熔覆制备 WC/Co50/Al 硬质合金涂层刀具的微观结构及切削性能[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0802002.
- LIU Hong-xi, DONG Tao, ZHANG Xiao-wei, et al. Microstructure and cutting performance of WC/Co50/Al cemented carbide coated tools fabricated by laser cladding process[J]. Chinese J lasers, 2017, 44(8): 0802002.
- [10] ZAFAR S, SHARMA A K. Development and characterizations of WC-12Co microwave clad[J]. Materials characterization, 2014(96): 241-248.
- [11] OBADELE B A, OLUBAMBI P A, JOHNSON O T. Effects of TiC addition on properties of laser particle deposited WC-Co-Cr and WC-Ni coatings[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2013, 23(12): 3634-3642.
- [12] 刘洪喜, 冷凝, 张晓伟, 等. 40Cr 刀具表面激光熔覆 WC/Co50 复合涂层的微观组织及其磨损性能[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0120001.
- LIU Hong-xi, LENG Ning, ZHANG Xiao-wei, et al. Microstructure and wear behavior of WC/Co50 composite coatings on 40Cr cutting tool surface prepared by laser cladding[J]. Infrared and laser engineering, 2016, 45(1): 0120001.
- [13] 张佳琪, 董梁, 鞠恒, 等. 高速钢表面激光熔覆高硬涂层的组织性能[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(9): 196-200.
- ZHANG Jia-qi, DONG Liang, JU Heng, et al. Microstructure and properties of surface coating on a high speed steel by laser cladding[J]. transactions of materials and heat treatment, 2016, 37(9): 196-200.
- [14] 王燕琳, 何源, 洪鑫, 等. 高速钢材料表面激光熔覆 Ni 基 WC 条纹的减摩机理. 激光与光电子学进展[J]. 2018, 55(2): 021403.
- WANG Yan-lin, HE Yuan, HONG Xing, et al. Friction reducing mechanism of high speed steel textured surface with Ni-based WC laser cladding stripes[J]. Laser & optoelectronics progress, 2018, 55(2): 021403.
- [15] 赵树国, 李成龙. 激光熔覆工艺参数对 CBN 膜层裂纹率的影响[J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 119-126.
- ZHAO Shu-guo, LI Cheng-long. Relationship between crack rate of CBN coating and parameters of laser cladding[J]. China surface engineering, 2015, 28(6): 119-126.
- [16] 李福泉, 冯鑫友, 陈彦宾. WC 含量对 WC/Ni60A 激光熔覆层微观组织的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0403009.
- LI Fu-quan, FENG Xin-you, CHEN Yan-bin. Influence of WC content on microstructure of WC/Ni60A laser cladding layer[J]. Chinese J lasers, 2016, 43(4): 0403009.
- [17] 吴剑钊, 于爱兵, 牛威杨, 等. W6Mo5Cr4V2 高速钢 WC/Co 激光熔覆表面的摩擦磨损性能[J]. 材料保护, 2017, 50(3): 19-22.
- WU Jian-zhao, YU Ai-bing, NIU Wei-yang, et al. Tribological properties of high speed steel surface with WC/Co laser cladding layer[J]. Materials protection, 2017, 50(3): 19-22.