



## 填表说明

一、本报告中相关的技术或数据如涉及知识产权保护、军工项目保密等内容，请作脱密处理。

二、请用宋体小四字号撰写本报告，可另行附页或增加页数，A4纸双面打印。

三、表中所涉及的签名都必须用蓝、黑色墨水笔，亲笔签名或签字章，不可以打印代替。

四、同行专家业内评价意见书编号由工程师学院填写，编号规则为：年份4位+申报工程师职称专业类别(领域)4位+流水号3位，共11位。

## 一、个人申报

(一) 基本情况【围绕《浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》，结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准，举例说明】

### 1. 对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握情况(不少于200字)

熟悉复合材料表面处理在工程领域的需求，了解表面处理对于复合材料性能提升的重要性，以及其在工程构思（如设计复合材料结构件时考虑表面处理对整体性能的影响）、设计（选择合适的表面处理工艺以满足设计要求）、实现（实施具体的表面处理工艺）、运作（在生产流程中合理安排表面处理环节）等方面的作用；系统掌握复合材料专业理论知识，包括复合材料的结构、性能特点等；熟悉可剥布处理、激光处理、等离子体处理等专业技术知识，以及这些处理工艺的研究方法（如通过实验对比不同处理工艺对复合材料表面性能的影响）。

### 2. 工程实践的经历(不少于200字)

(1) 探究不同表面处理工艺对复合材料层板表面性能的影响。对复合材料层板进行可剥布处理、等离子体处理以及协同处理，分析比较不同处理工艺下复合材料层板的粗糙度、润湿性与化学活性，探究复合材料层板的最佳表面处理工艺。

(2) 探究不同表面处理工艺对钛合金表面性能的影响。探究机械处理、化学处理、阳极氧化处理与表面预处理剂处理四种处理方式对钛合金表面性能的影响，对钛合金表面形貌、粗糙度、表面润湿性与化学活性加以分析，探究最佳的表面处理工艺。

(3) 针对上述不同表面处理工艺，采用单搭接工艺详细评价了各类处理技术对复合材料层板与钛合金胶接性能影响。通过进行单搭接强度测试，并结合对不同胶接接头的失效界面进行深入分析，探究不同的表面处理工艺对胶接接头的单搭接性能的影响，进而为提升复合材料层板与钛合金之间的胶接性能提供重要的参考依据。

### 3. 在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例（不少于1000字）

杭州卡涑复合材料科技有限公司主要面向汽车零部件系统、储能系统（电池箱、碳纤维高压气瓶）、轨道交通、消费电子、大型无人机以及航空等市场，通过运用源于德国的高性能复合材料规模化设计和工艺制造技术、碳纤维回收再利用技术以及国内领先的汽车复合材料部件规模化量产经验，针对客户的不同需求，提供高效、高性价比、定制化的轻量化解决方案，包括材料结构设计、小批量制造和量产，引领中国复合材料应用进入智能制造时代。本次实践负责钛合金与复合材料的单搭接性能强度提升研究，实践内容包括研究钛合金表面处理、复合材料表面处理与钛合金/复合材料的单搭接强度。主要研究目标是完成钛合金/复合材料表面处理工艺与胶接工艺制度优化，满足力学性能要求的钛合金/复合材料胶接界面胶接样件。

研究内容包括对钛合金表面、复合材料表面进行表面处理，以及钛合金与复合材料的固化处理工艺。研究方案及技术路线：一是对钛合金表面处理采取不同表面处理工艺，包括：酸洗、打磨、阳极氧化以及表面预处理剂，通过对不同表面处理工艺的参数研究，确定钛合金表面处理的最佳优化工艺；二是对复合材料表面采取等离子体处理、可剥布处理、以及打磨处理；三是对固化工艺进行优化，通过调节热压罐参数等方式，确保胶接区域胶膜厚度。团队分为两个主要部分研究，一部分是复合材料的表面处理，另一部分是钛合金表面工艺以及钛合金/复合材料单搭接性能测试。其中，我主要负责钛合金表面的处理工艺，以及钛合金/复合材料的单搭接性能研究。目前，项目已基本完成，胶膜基本无大面积溢出情况，胶接件粘接良好，各项研究工作取得显著进展：

对于复合材料层板，采用干可剥布、湿可剥布、等离子体与协同处理方式进行表面处理。与

原始复合材料相比，可剥布处理能够改变复合材料表面纹理，增加复合材料表面的粗糙度，从无处理的 $0.30\ \mu\text{m}$ 提高至 $9.92\ \mu\text{m}$ 与 $24.24\ \mu\text{m}$ ，且湿可剥布比干可剥布处理后，表面的凹凸程度更为显著，网格更加紧密；等离子体处理后其表面形貌虽未发生显著改变，但在微观结构下生成孔隙，增大胶接面积有助于粘接剂渗入，同时在复合材料表面引入羟基、羰基和羧基等极性基团，进而与胶膜形成更为牢固的化学键合，由此提高表面胶接性能。同时，可剥布、等离子体表面处理均有利于增强复合材料与胶膜界面的粘接力。其中，干可剥布处理与湿可剥布处理后单搭接强度分别达到 $22.5\text{MPa}$ 与 $24.8\text{MPa}$ ，湿可剥布处理后提升了 $21.6\%$ ；等离子体处理后，单搭接强度增加到 $26.2\text{MPa}$ ，提升了近 $27.5\%$ ，且失效模式从复合材料与胶膜界面失效转变为金属与胶膜界面破坏。表明等离子体处理作为一种更加有效的表面处理方式，可以极大地提升复合材料层板与胶膜的粘接力。

对于钛合金表面处理，探究了打磨、酸洗、阳极氧化以及表面预处理剂四种处理工艺及其协同处理工艺对钛合金表面性能的影响。钛合金经过表面处理后能够提升表面粗糙度与表面活性，增强表面性能。当钛合金酸洗与阳极氧化处理时，钛合金表面形成致密氧化膜，粗糙度从 $0.61\ \mu\text{m}$ 增加至 $0.82\ \mu\text{m}$ ，且表面自由能增大至 $61.683\text{mN/m}$ ，有助于胶膜与钛合金表面粘接。同时，使用AC-

130表面预处理剂能够显著提高钛合金表面活性，通过引入活性官能团实现化学接枝，与粘接剂形成强有力的化学键，由此提高表面胶接性能。并且，打磨处理、酸洗与打磨混合处理、喷砂与酸洗处理、酸洗与阳极氧化处理与表面预处理剂均能提升钛合金/复合材料层板单搭接性能。其中，钛合金经表面预处理剂处理后，胶接接头的单搭接性能最佳，达到 $41.4\text{MPa}$ ，提升了 $25\%$ ；当钛合金酸洗与阳极氧化处理时，单搭接强度提升至 $40.9\text{MPa}$ ；打磨处理后，胶接接头的单搭接强度提升到 $37.6\text{MPa}$ ，同样有效地增强了胶接接头的单搭接性能。对比分析失效模式发现内聚破坏占比与单搭接强度变化趋势呈现出高度的一致性。同时，钛合金在不同表面处理工艺下，使用AC-

130表面预处理剂均不同程度地提高钛合金的单搭接强度，其中钛合金采用阳极氧化处理工艺后使用 AC-130

表面预处理剂，复合材料层板采用等离子体处理工艺，能够协同提升单搭接强度达到 $41.8\text{MPa}$ ，极大地增强了胶接接头的单搭接性能。

(二) 取得的业绩(代表作)【限填3项, 须提交证明原件(包括发表的论文、出版的著作、专利证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等)供核实, 并提供复印件一份】

1. 公开成果代表作【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】

成果名称	成果类别 [含论文、授权专利(含发明专利申请)、软件著作权、标准、工法、著作、获奖、学位论文等]	发表时间/授权或申请时间等	刊物名称/专利授权或申请号等	本人排名/总人数	备注
不同表面处理工艺对TC4钛合金/复合材料胶接性能的研究	核心期刊	2024年10月24日	材料科学与工程学报	1/6	

2. 其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、企业技术难题解决方案、自主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效益等】

<b>(三) 在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况</b>	
课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩： 87 分
专业实践训练时间及考核情况(具有三年及以上工作经历的不作要求)	累计时间： 1 年(要求1年及以上) 考核成绩： 83 分
<b>本人承诺</b>	
<p>个人声明：本人上述所填资料均为真实有效，如有虚假，愿承担一切责任，特此声明！</p> <p style="text-align: right;">申报人签名：科凡珂</p>	

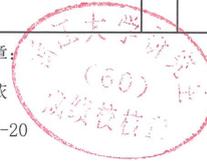


浙江大学研究生院  
攻读硕士学位研究生成绩表

学号: 22260260	姓名: 钭凡珂	性别: 女	学院: 工程师学院	专业: 材料与化工	学制: 2.5年						
毕业时最低应获: 24.0学分	已获得: 26.0学分			入学年月: 2022-09	毕业年月:						
学位证书号:			毕业证书号:			授予学位:					
学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质	学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质
2022-2023学年秋季学期	高性能复合材料制造技术及装备		2.0	89	专业学位课	2022-2023学年春季学期	自然辩证法概论		1.0	89	专业学位课
2022-2023学年秋季学期	工程技术创新前沿		1.5	81	专业学位课	2022-2023学年春季学期	飞机数字化装配技术与系统		2.0	62	专业学位课
2022-2023学年秋季学期	新时代中国特色社会主义思想理论与实践		2.0	87	专业学位课	2022-2023学年夏季学期	“四史”专题		1.0	95	公共选修课
2022-2023学年冬季学期	工程中的有限元方法		2.0	97	专业选修课	2022-2023学年春季学期	工程伦理		2.0	89	专业学位课
2022-2023学年秋冬学期	高阶工程认知实践		3.0	89	专业学位课	2023-2024学年夏季学期	研究生英语应用能力提升		2.0	83	公共学位课
2022-2023学年冬季学期	产业技术发展前沿		1.5	94	专业学位课	2024-2025学年春季学期	跨文化沟通 I		1.0	85	公共学位课
2022-2023学年秋冬学期	研究生论文写作指导		1.0	90	专业选修课		硕士生读书报告		2.0	通过	
2022-2023学年春季学期	复合材料成型工艺		2.0	84	专业选修课						

说明: 1. 研究生课程按三种方法计分: 百分制, 两级制 (通过、不通过), 五级制 (优、良、中、及格、不及格)。  
2. 备注中 “\*” 表示重修课程。

学院成绩校核章:  
成绩校核人: 张梦依  
打印日期: 2025-03-20



## 稿件录用通知书

金凡河, 王博文, 王峰峰, 王冰 等作者的论文“不同表面处理对TC4钛合金复合材料粘接性能研究”被我刊录用, 初步拟定在本刊 2025 年第 2 期— 2025 年第 3 期上发表 (本刊双月刊)。

需要提醒您的是, 论文的录用仅是论文得以顺利发表的第一步。之后我刊将按以下顺序对论文进行一系列处理: 初排版→提请作者校对(通过电子邮件联络)→正式排版→校对(一校、二校、三校)→校对中发现的问题要求作者澄清或确认→三次修改→正式定稿→印刷→出版。因此, 其中必须取得作者的密切配合才能保证论文按时出版。希望作者必须保持可靠的电子邮箱的畅通, 以便我们随时联系你, 并请你务必认真校对, 确保论文质量, 否则将贻误你的论文出版时机。

特此通知



《材料科学与工程学报》编辑部

2024 年 10 月 24 日

文章编号: 1673-2812 (20xx) 00-0000-00

## 不同表面处理工艺对 TC4 钛合金/复合材料胶接性能的研究

刁凡珂<sup>1, 2</sup>, 王博文<sup>2</sup>, 王婷婷<sup>2</sup>, 王欢<sup>2</sup>, 贡博文<sup>2</sup>, 彭华新<sup>2</sup>

(1.浙江大学工程师学院, 浙江省杭州市 310015;

2.浙江大学材料科学与工程学院, 浙江省杭州市 310058)

**【摘 要】**钛合金的表面处理工艺是影响钛合金/复合材料单搭接强度至关重要的因素, 本文在等离子体处理复合材料表面的基础上, 采用 SEM、粗糙度测试、接触角测试等手段对不同表面处理工艺下的钛合金进行表征分析, 对比钛合金/复合材料的单搭接强度与失效模式, 进而确定钛合金表面的最佳处理工艺。结果表明, 机械处理与阳极氧化均能增强钛合金表面粗糙度, 有助于钛合金进行胶接, 其中, 打磨和酸洗后阳极氧化两种处理工艺下, 钛合金的单搭接强度分别提高至 37.6 MPa 和 40.9 MPa, 分别提升了 14%、23%。同时, 使用 AC-130 表面预处理剂能够显著增强钛合金表面活性, 提高钛合金的单搭接强度, 钛合金经表面预处理剂处理后, 单搭接强度从 33.1 MPa 提升至 41.4 MPa, 较大程度地增强钛合金性能, 并且在不同表面处理工艺下, 使用 AC-130 表面预处理剂均不同程度地提高钛合金的单搭接强度。此外, 温度是影响 AC-130 表面处理剂的重要因素, 当温度为 25°C 时, 表面处理剂能够最大程度地发挥作用, 提高钛合金表面性能。

**【关键词】**钛合金; 单搭接强度; 表面处理; 表面预处理剂

中图分类号: 文献标识码: A

## Study on the bonding properties of TC4 titanium alloy/composite materials with different surface treatment processes

Fanke Tou<sup>1, 2</sup>, Bowen Wang<sup>2</sup>, Tingting Wang<sup>2</sup>, Huan Wang<sup>2</sup>, Bowen Gong<sup>2</sup>, Huaxin Peng<sup>2</sup>

(1.Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, 310015;

2.School Of Materials Science And Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, 310058)

**【Abstract】**The surface treatment process of titanium alloy is a crucial factor affecting the single-lap strength of titanium alloy/composite materials. In this paper, on the basis of plasma treatment of composite surfaces, SEM, roughness test, contact angle test and other means are used to characterize and analyze the titanium plates under

收稿日期: ; 修订日期:

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFB3703900)

作者简介: 刁凡珂 (2000-), 硕士研究生, 主要从事金属表面处理工艺与性能评价。E-mail: toufanke@163.com。

通讯作者: 彭华新, 教授, 87953621, hxpengwork@zju.edu.cn。

different surface treatment processes, to compare the single-lap strength of titanium alloy/composite materials and failure mode analysis, and then to determine the optimal surface of titanium plates. The results show that both mechanical treatment and anodizing can enhance the surface roughness of titanium plates and help titanium alloy gluing. Among them, the single-lap strength of titanium plates was increased to 37.6 MPa and 40.9 MPa under the two treatment processes of grinding and anodizing after pickling, which were 14% and 23% higher, respectively. At the same time, the surface treatment agent AC-130 can significantly enhance the surface activity of titanium alloy, improve the single-lap strength of titanium alloy. The single-lap strength of titanium alloy is increased from 33.1 MPa to 41.4 MPa after treatment with surface treatment agent, which enhances the performance of titanium alloy to a greater extent. Moreover, under different surface treatment processes, the use of surface treatment agent AC-130 improves the bonding strength of titanium alloys to different degrees. In addition, the temperature is the most important factor affecting the performance of AC-130, when the temperature is 25 °C, the surface treatment agent can maximize the role of improving the surface properties of titanium alloy.

**【Key words】** Titanium alloy, single-lap strength, surface treatment, the surface treatment agent

## 1 引言

风扇叶片是航空发动机的核心部件之一,航空发动机的性能与其发展密切相关<sup>[1]</sup>。随着航空领域对发动机的性能要求越来越高,研究发现,若要提高叶片的抗冲击性能,需要在复合材料叶片的前缘增加钛合金加强边<sup>[2]</sup>。相比于机械连接方法,胶接结构可以使得连接处应力分布更均匀,同时减轻重量使零部件更为灵活,但最为重要的一个问题是连接处的胶接强度。因此,钛合金与复合材料的胶接技术是航空发动机复合材料风扇叶片成功研制的一个尤为关键的因素<sup>[3]</sup>。

其中,胶接接头的性能取决于多种参数,如胶接方法、表面性能、材料性能等。其中材料表面的粗糙度、表面能以及化学活性都直接影响材料的胶接质量,对材料表面做不同的处理工艺,能够改变材料的表面性能,进而提高材料的单搭接强度,因此,表面处理工艺是提升钛合金单搭接强度至为重要的技术<sup>[4]</sup>。妥善的表面处理对于实现坚固持久的胶接至关重要。目前,国内外很多学者对钛合金表面处理工艺进行研究,苏震宇<sup>[5]</sup>等人探究了酸洗、喷砂和打磨对钛合金胶接强度的影响,同时,测试发现使用表面预处理剂能够显著提高钛合金的单搭接强度;李文<sup>[6]</sup>等人研究了酸洗、阳极氧化和微弧氧化3种表面处理工艺对钛合金胶接性能的影响;Tomo Takeda<sup>[7]</sup>等人探究砂纸打磨、常压等离子体处理以及硫酸阳极氧化等不同表面处理的钛合金基材的粘合接头强度和粘合特性。

传统的表面处理方法通常是对钛合金表面进行机械处理、化学处理、电化学处理等,以此提高钛合金的表面性能,例如阳极氧化能够在基体表面生成粗糙的微观结构,增加表面的粗糙程度,有利于增强单搭接强度<sup>[8]</sup>。同时,还可以采取溶剂擦拭,硅烷偶联剂等表面预处理剂能够在基体形成类硅烷膜,与环氧树脂形成更强的化学键,进而增强钛合金的胶接性能<sup>[9,10]</sup>。但国内对于钛合金表面工艺对钛合金/复合材料胶接强度的影响的研究较少。因此,本文采用SEM、粗糙度测试、接触角测试等手段对不同表面处理工艺下的钛合金进行表征分析,通过对比分析不同表面处理工艺对钛合金/复合材料的胶接强度的影响,进而确定钛合金的最佳表面处理工艺。

## 2 单搭接接头的失效模式

当胶接区域遭受外力达到一定程度时, 胶层可能会发生损伤, 严重时会导致整个胶接接头丧失功能。依据损伤发生的位置, 胶接接头的失效模式可分为四种: 基材破坏、内聚破坏、界面破坏以及混合破坏<sup>[1]</sup>, 如图 1 所示。

(1) 基材破坏。当外界加载作用于胶接接头时, 由于不同材料之间的刚度和强度差异, 可能导致基材发生破裂, 其中, 由于钛合金刚度与强度远大于复合材料, 主要表现为复合材料基体损坏。

(2) 内聚破坏, 主要表现为胶层破坏, 在胶接接头中, 胶膜本身发生断裂或脱离的失效模式, 这主要是由于胶膜与基体之间的强度差异或其他因素, 导致胶膜内部发生破坏。

(3) 界面破坏。在胶接接头中, 由于基体与胶膜界面的粘接力不足, 导致其界面发生失效或破裂的现象。

(4) 混合破坏。由多种失效模式同时或交替发生的破坏形式。一般情况下, 胶接接头的破坏形式较为复杂, 不只局限于其中一种破坏模式, 通常在多种因素下产生不同的破坏形式。

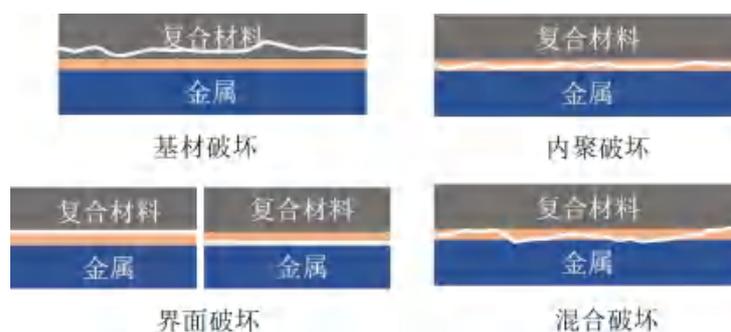


图 1 破坏形式

Fig.1 Failure forms

## 3 材料与试验

### 3.1 试验原材料

本文参考标准 ASTM D 3165-07 的要求, 选用 2 mm 厚的金属 TC4 钛合金与复合材料, 加工好为尺寸为 100 mm×25.4 mm×2 mm, 用于表面粘接性能的力学性能。碳纤维复合材料采用预浸料成型工艺, 预浸料、粘接所用胶膜以及钛合金表面处理所用试剂均如表 1 所示。

表 1 实验材料一览表

Table 1 List of experimental materials

材料名称	规格	厂家
钛合金	TC4	宝鸡镨合钛金属材料有限公司
碳纤维预浸料	BA3603	中航复合材料有限责任公司

胶膜	Scotch-Weld AF191K	3M
氢氟酸	AR	国药集团化学试剂有限公司
硝酸	GR	国药集团化学试剂有限公司
氢氧化钠	AR	国药集团化学试剂有限公司
硅酸钠	AR	南通飞宇生物科技有限公司
酒石酸钠	AR	南通飞宇生物科技有限公司
EDTA	99.5%	Genthold
砂纸	180目	耐力威

### 3.2 钛合金的表面处理工艺

钛合金表面处理主要分为机械处理、化学处理与电化学处理三种，机械打磨，包括：打磨、喷砂与喷丸，能够增加钛合金表面的粗糙度，从而增加钛合金基体与胶膜的接触面积；化学处理，例如酸洗，能够去除钛合金表面疏松的氧化膜，使得钛合金基体更好地与胶膜结合；阳极氧化产生的多孔性氧化层能够改变钛合金基体的表面成分，从而增加基体与胶膜之间的机械互锁，进而显著提高了钛合金的表面性能。同时，AC-130表面处理剂的主要成分是2,3-环氧丙基三甲氧基硅烷，能够与钛合金表面形成羟基的低聚硅氧烷，促使钛合金基体与环氧树脂之间生成强有力的化学键——氢键，进而增加钛合金与胶膜的结合力。因此，本文以无处理作为对照组，将钛合金的表面处理工艺分为13组，如下表2所示，每组样品取五个试验件。

表2 钛合金不同表面处理工艺分组

Table 2 Grouping of different surface treatment processes for titanium alloys

样品	钛合金	复合材料
1	无处理	等离子体处理
2	打磨	等离子体处理
3	酸洗	等离子体处理
4	打磨+酸洗	等离子体处理
5	酸洗+打磨	等离子体处理
6	喷砂+酸洗	等离子体处理
7	酸洗+阳极氧化	等离子体处理
8	无处理+AC-130/25℃	等离子体处理
9	打磨+酸洗+AC-130/25℃	等离子体处理
10	打磨+酸洗+AC-130/60℃	等离子体处理
11	打磨+酸洗+AC-130/150℃	等离子体处理
12	打磨+AC-130/60℃	等离子体处理
13	酸洗+阳极氧化+AC-130/60℃	等离子体处理

### 3.3 单搭接试样的制备与性能测试

分别切割尺寸为  $100\text{ mm} \times 25.4\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  与  $85\text{ mm} \times 25.4\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  的钛合金和复合材料。经表面处理  
后, 使用环氧胶膜, 样品按照图所示搭接, 搭接区域尺寸为  $12.7\text{ mm} \times 25.4\text{ mm}$ , 试样两端用尺寸为  $85\text{ mm} \times 25.4\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  的复合材料与钛合金作为加强片进行粘接, 使得试样两端夹持区域的两侧均在同一水平面上, 样品进热压罐  $177^\circ\text{C}$  下固化 90 分钟完成制备。

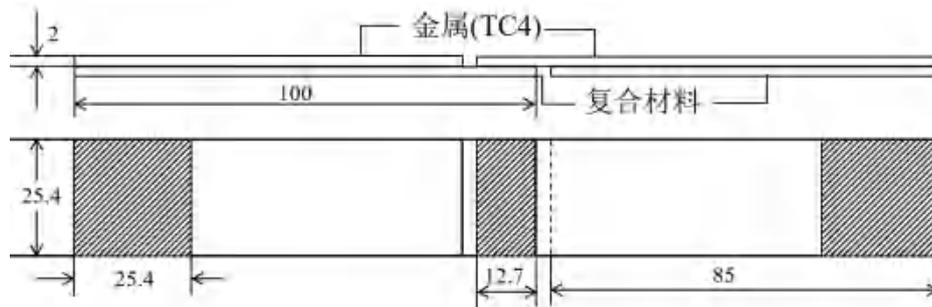


图 2 单搭接试样尺寸 (mm)

Fig.2 Size and specification of single-lap samples

钛合金/复合材料单搭接强度测试在力学试验机上完成, 如图 3 所示, 参照标准 ASTM D 3165-07, 将试件放入试验机上, 上、下两头夹紧, 夹紧过程保证加强片两端夹紧面积为  $25.4\text{ mm} \times 25.4\text{ mm}$ , 以  $1.27\text{ mm/min}$  的加载速率对试验件施加拉伸载荷, 加载至极限载荷, 直到出现交界面破坏为止。与此同时, 保证单搭接试件与夹头对中, 确保测试过程中拉力沿着试件中心线加载。



图 3 胶接强度测试示意图

Fig.3 Schematic diagram of adhesive strength test

### 3.4 表征方法

(1) 三维干涉显微镜

采用 NT9100 三维干涉显微镜能够测量不同处理方法后钛合金的表面三维形貌、粗糙度等表面轮廓信息，能够得到钛合金表面的伪彩色三维形貌图。

(2) 扫描电子显微镜 (SEM)

采用 SU-8010 场发射扫描电子显微镜观察不同表面处理工艺下钛合金的形貌状态,分析不同表面处理工艺对钛合金表面形貌的影响。

(3) 接触角测量

钛合金与环氧树脂之间的润湿性能够通过测量接触角来衡量,使用接触角测量仪能够测量钛合金与水、二碘甲烷之间的接触角大小,进而分析表面处理工艺对钛合金的表面能的影响。

### 4 材料与试验

#### 4.1 不同表面处理工艺对钛合金单搭接强度的影响

复合材料统一进行等离子体处理,通过单搭接测试研究不同表面处理工艺对钛合金表面性能的影响。依据 ASTM D3165-07 标准进行单搭接测试的结果如图 4 所示。

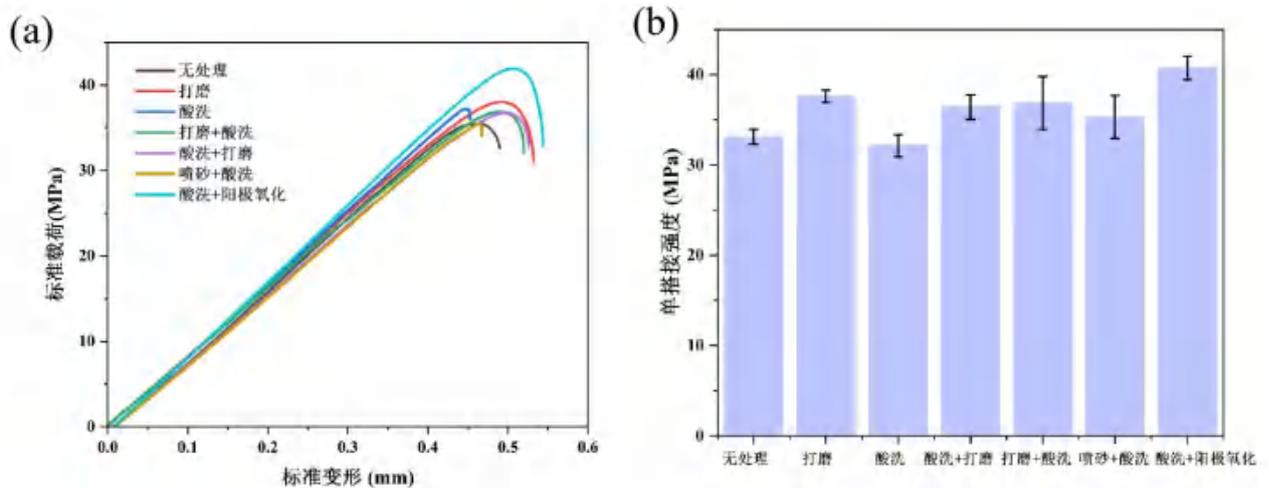


图 4 (a)单搭接测试载荷-位移曲线; (b)不同表面处理钛合金单搭接剪切强度

Fig.4 (a) Force-displacement curve of single-lap test; (b) single-lap shear strength of titanium plates with different surface treatments

未经处理的钛合金单搭接强度为 33.1 MPa, 除仅酸洗处理的钛合金单搭接强度略有下降, 其余不同工艺处理过后的钛合金单搭接强度均有不同程度的提升, 酸洗与 NaTESi 电解液阳极氧化处理的试样具有最大强度, 均值达到 40.9 MPa, 提升了近 23%; 同时, 机械打磨处理的样品相较未处理样品提升了 14%。该结果证明, 阳极氧化与机械处理工艺均能有效提升金属与胶膜界面的粘接强度。

#### 4.2 AC-130 表面预处理剂对单搭接强度的影响

表面预处理剂的影响因素有很多, 如溶剂浓度、pH 值与温度等。其中, 温度是表面预处理剂的一个重要因素, 表面预处理剂的作用受到温度变化而产生不同程度影响, 因此对比不同温度下钛合金/复合材料的胶接强度, 进而选取表面处理剂的最佳处理温度。

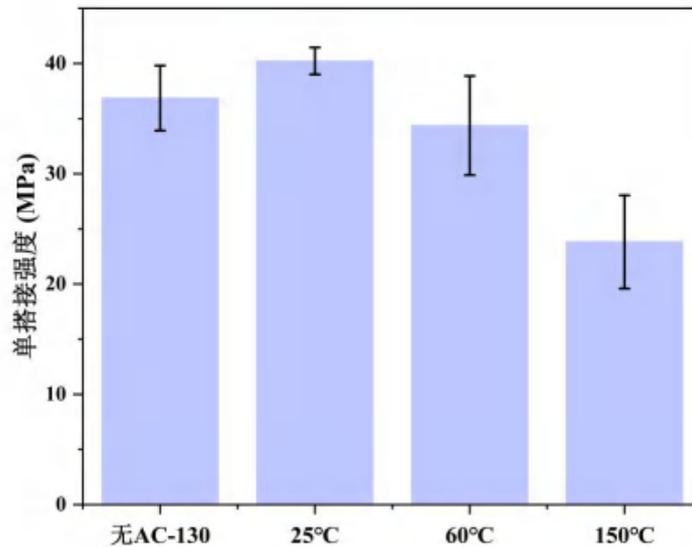


图 5 不同温度下表面处理剂对钛合金/复合材料单搭接强度的影响

Fig.5 Effect of surface treatment agents on the strength of titanium alloy/composite single-lap strength at different temperatures

钛合金表面做砂纸打磨与酸洗处理, 复合材料表面做等离子体处理, 图 5 显示了不同温度下, AC-130 表面处理剂对单搭接测试强度的影响, 能够看出, 未使用表面剂处理时, 钛合金/复合材料单搭接强度平均值为 36.9 MPa, 在常温 (25°C) 下, 单搭接强度增加到 40.2 MPa, 提升了近 10%, 且一致性较好。但当处理温度为 60°C 时, 单搭接强度并未显著提升, 反而有所下降 (34.4 MPa), 而当温度增加至 150°C 时, 钛合金/复合材料的单搭接强度大幅度降低, 只有 23.8 MPa。

进而对不同表面处理工艺进行 AC-130 表面处理剂处理, 测试结果如图 6 所示。未处理的钛合金经 AC-130 表面处理剂处理后单搭接强度提升最高, 提升了 25%, 强度高达 41.4 MPa; 当打磨处理工艺使用 AC-130 表面处理剂时, 其单搭接强度并未有显著变化, 其样品一致性变差; 当阳极氧化处理工艺使用 AC-130 表面处理剂时, 单搭接强度从 40.9 MPa 提升至 41.8 MPa, 近 1 MPa 的提升, 且一致性较好, 离散系数仅为 2.7。

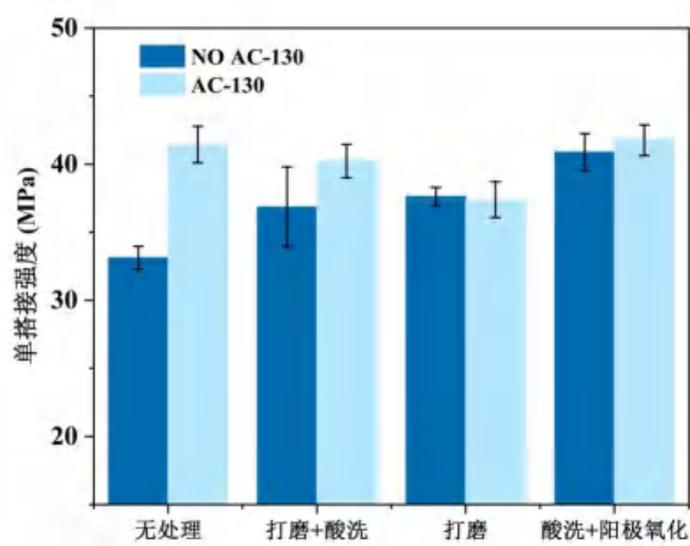


图 6 表面处理剂对钛合金/复合材料单搭接强度的影响

Fig.6 Effect of surface treatment agents on the strength of titanium alloy/composite single-lap strength

## 5 数据分析

### 5.1 不同表面处理方法对单搭接性能的影响

本文采用的金属材料为 TC4 钛合金，其表面三维形貌如图所示，表面较为平整，表面粗糙度为 0.61 $\mu\text{m}$ ，钛合金切割后经超声清洗后作为无处理样品。

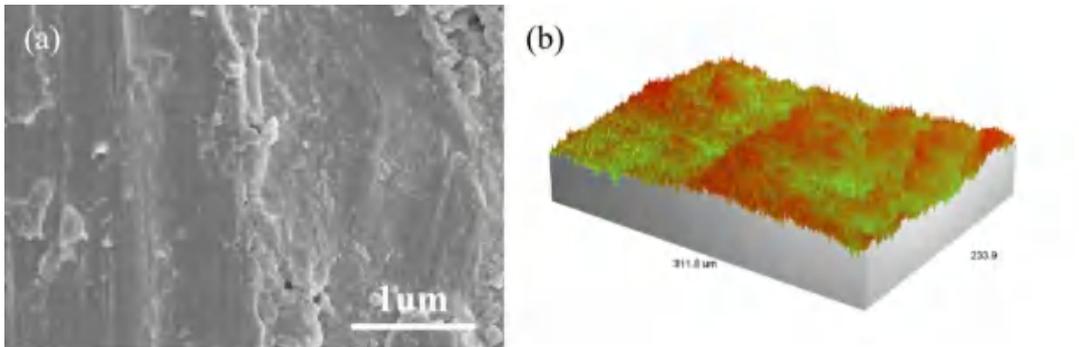


图 7 无处理钛合金形貌图：(a)表面 SEM 形貌图与(b)三维形干涉形貌图

Fig.7 Topography of untreated titanium alloy : (a) surface SEM topography and (b) 3D shape interference topography

机械处理与化学处理是最为常见的表面处理方法。机械处理通过物理打磨增大钛合金表面粗糙度，进而增加钛合金与胶膜的接触面积；而酸洗能够通过酸蚀去除钛合金在空气中形成的疏松氧化层，使钛合金基体裸露，使得钛合金能够更好与胶膜结合。相比于传统的机械处理、化学处理方法，阳极氧化的工艺参数更容易调控，通过电解液氧化处理能够在基体表面生成微观结构，增加表面的粗糙程度，进而增强样品与胶膜的结合力。通

过扫描电子显微镜观察样品的形貌, 得到图 8。

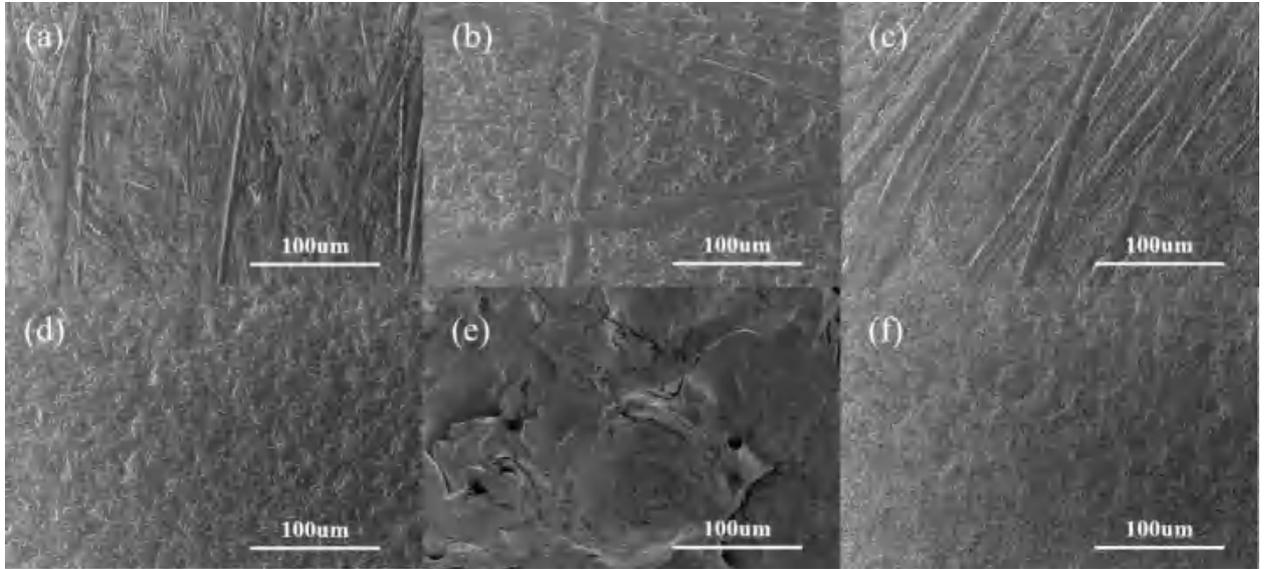


图 8 不同表面处理工艺下钛合金的表面 SEM 形貌图: (a)打磨处理; (b)打磨与酸洗处理; (c)酸洗与打磨处理; (d)酸洗处理; (e)喷砂与酸洗处理; (f)酸洗与阳极氧化处理

Fig.8 Surface SEM morphology of titanium alloy under different surface treatment processes: (a) grinding treatment; (b) grinding and pickling treatment; (c) pickling and grinding treatment; (d) pickling treatment; (e) sandblasting and pickling treatment; (f) pickling and anodizing treatment

图 a-c 能够看到样品表面出现打磨的痕迹, 且由于人工打磨, 划痕深浅、大小、方向不一; 图 b 中打磨痕迹较轻微, 部分痕迹被酸蚀盖住, 而图 c 样品先经酸洗处理, 再打磨, 其划痕更为明显; 样品经酸洗处理如图 d 所示, 表面更为平整; 图 e 为喷砂处理, 相较其他样品表面呈现出明显的峰谷; 图 f 为阳极氧化处理, 钛合金表面形成致密的氧化膜, 生成粗糙的微观结构, 增加了表面粗糙度。

同时利用三维干涉显微镜分析对比不同处理工艺对钛合金表面粗糙度的影响, 其三维形貌图如图 9 所示。能够看到经过酸洗处理过后, 钛合金的粗糙度均有减小, 尤其仅为酸洗处理时, 钛合金表面的氧化层被除去, 接近于平滑状态。经打磨处理后钛合金表面出现不同粗细的“划痕”, 且由于人工打磨, 划痕方向、深浅不一。对比先打磨后酸洗与先酸洗后打磨的样品, 能够看出, 当样品先进行酸洗再打磨处理, 其划痕深度跟明显, 粗糙度更大; 相比而言, 先进行打磨处理的样品划痕并不明显, 但却存在酸洗侵蚀的痕迹, 即其三维形貌图上有两处“凹坑”的存在, 因此, 表 3 中, 打磨后酸洗的样品 Rz 值, 即最高峰与最低谷的差值, 相对于酸洗后打磨的样品更大。同时, 喷砂处理大幅度地增加了样品表面的粗糙度。阳极氧化在样品表面形成氧化膜, 三维形貌图中可以看到明显的凹坑与凸起, 有效地增加了表面的粗糙度。由此, 可以得出喷砂处理过后, 样品的表面粗糙度最大, 为 7.02  $\mu\text{m}$ ; 而酸洗样处理后的样品粗糙度最小, 仅为 0.38  $\mu\text{m}$ 。

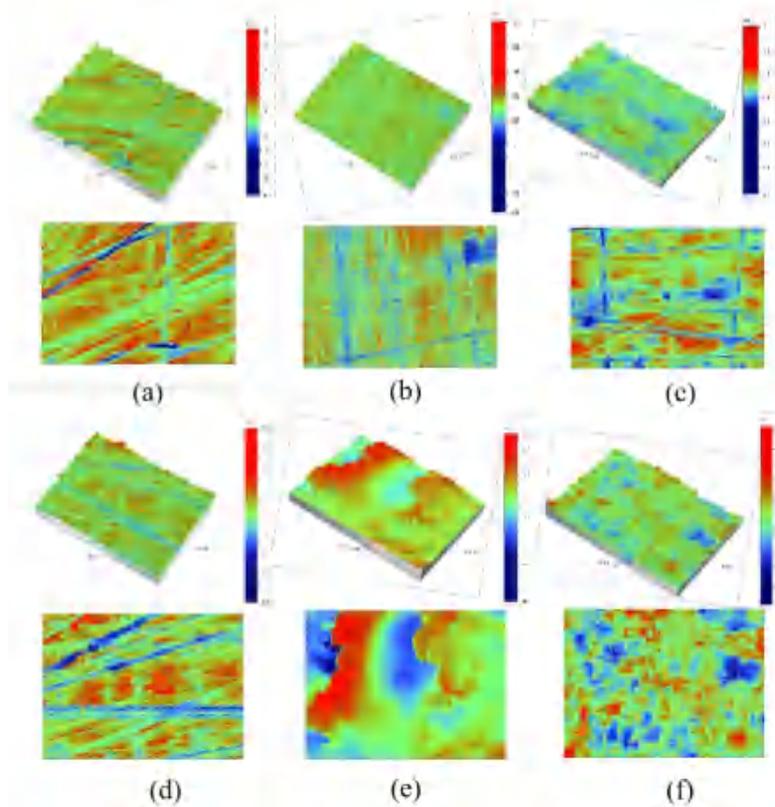


图 9 不同表面处理工艺下钛合金的三维形貌图：(a)打磨处理；(b)酸洗处理；(c)打磨与酸洗处理；(d)酸洗与打磨处理；(e)喷砂与酸洗处理；(f)酸洗与阳极氧化处理

Fig.9 3D morphology of titanium alloy under different surface treatment processes: (a) grinding treatment; (b) pickling treatment; (c) grinding and pickling treatment; (d) pickling and grinding treatment; (e) sandblasting and pickling treatment; (f) pickling and anodizing treatment

表 3 不同表面处理工艺下钛合金的表面粗糙度 (Ra) 与表面峰谷差值 (Rz)

Table 3 Surface roughness (Ra) and surface peak-to-valley difference (Rz) of titanium alloys under different surface treatment processes

	无处理	打磨	酸洗	打磨+酸洗	酸洗+打磨	喷砂+酸洗	酸洗+阳极氧化
Ra/um	0.61	0.65	0.38	0.57	0.63	7.02	0.82
Rz/um	8.52	9.10	6.34	9.02	7.21	61.73	8.34

其次，润湿性能也是金属粘接强度提升至为关键的因素。基体材料润湿性能好，使得胶膜与金属表面的接触面积增加，还能让金属与胶膜表面形成微结构机械嵌合，增加粘接强度。通过仪器测得接触角大小有利于判定金属材料表面的润湿性，接触角与液-固、气-固和气-液三相直接的表面能相关。如图 10 所示，其中， $\gamma_{LV}$ 、 $\gamma_{SV}$  和  $\gamma_{LS}$  分别为气-液、气-固和液-固两相的表面张力，当各项界面的表面张力达到平衡状态时，此时气-液

和液-固两相界面的夹角  $\theta$  为润湿平衡后的接触角, 接触角越小, 表示基体材料的润湿性能越好。

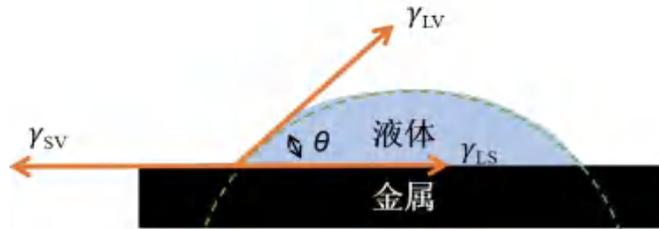


图 10 固液接触角示意图

Fig.10 Schematic diagram of solid-liquid contact angle

不同表面处理工艺后的钛合金与水、二碘甲烷的接触角如图 11 所示, 当测试液为水时, 打磨处理后的样品接触角最小, 为  $75.9^\circ$ , 同时, 分析不同溶液下所测得的接触角, 能够发现其变化趋势基本一致, 由于二碘甲烷的表面能小于水, 因此同一样品在二碘甲烷液滴下的接触角均小于去离子水测试下的接触角。

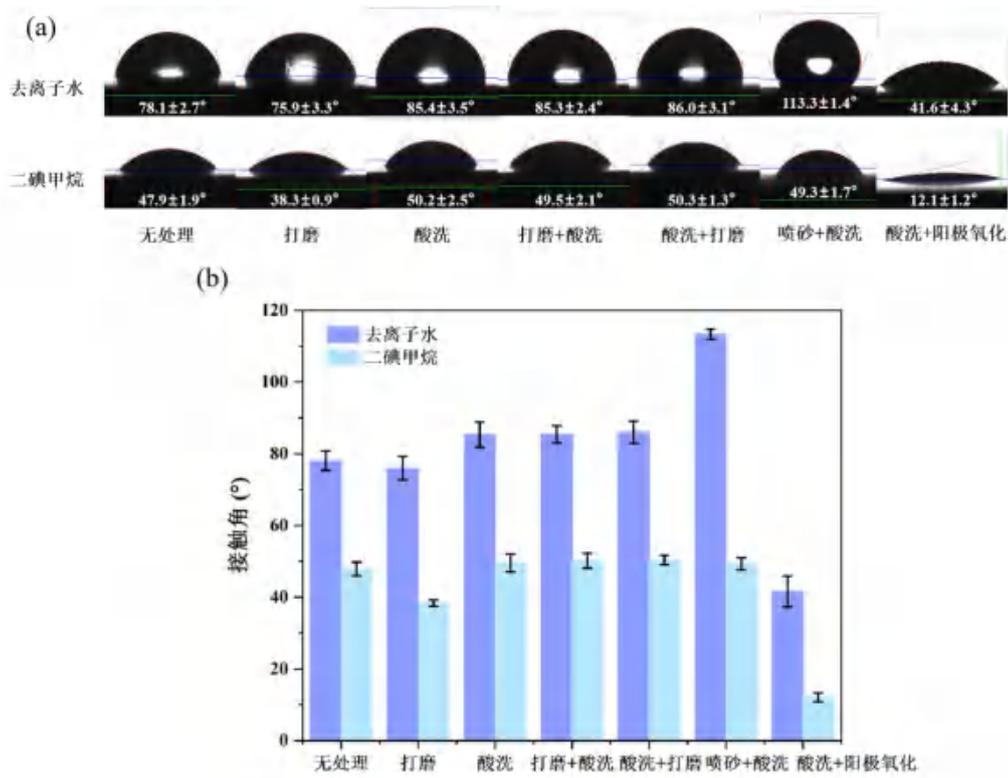


图 11 不同表面处理工艺下钛合金与水、二碘甲烷的接触角

Fig.11 Contact angle of titanium alloy with water and diiodomethane under different surface treatment processes

Owens-Wendt 方程法是测量材料表面能的经典方法之一, 该方法利用不同在材料表面的附着和展开特性来评估表面的亲疏程度, 根据 Owens-Wendt 方程, 即公式 (1) 与 (2) 计算不同表面处理工艺后金属材料的表

面能。其中  $W_a$  为固体表面自由能，而式子中的  $d$ 、 $p$  分别代表表面张力中的色散分量与极性分量。滴定溶液需要两种具有已知色散和极性成分的液体。其中去离子水可以作为极性溶液，二碘甲烷可用作色散溶液。

$$W_a = \gamma_{LV} (1 + \cos \theta) = 2\sqrt{\gamma_{SV}^d \gamma_{SV}^d} + 2\sqrt{\gamma_{SV}^p \gamma_{LV}^p} \quad (1)$$

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SV}^d + \gamma_{SV}^p \quad (2)$$

表 4 测试液表面张力参数

Table 4 Parameters of surface tension of test solution

测试液	$\gamma_{LV}$ (mN/m)	$\gamma_{LV}^d$ (mN/m)	$\gamma_{LV}^p$ (mN/m)
去离子水	72.8	21.8	51.0
二碘甲烷	50.8	48.5	2.3

通过公式与表 4 中的去离子水与二碘甲烷的各项参数可以求出不同表面处理工艺后样品的表面能以及对应的极性分量和色散分量。其结果如表所示，能够看出，色散分量占表面能的比重远大于极性分量，综合表面能大小比较，阳极氧化处理的表面能最大，为 61.683mN/m，其次为打磨处理与喷砂与酸洗，表面能分别为 41.639mN/m 和 39.219mN/m，而其他经酸洗处理后的样品，表面能均低于无处理样品。

表 5 不同表面处理工艺下钛合金的表观表面能

Table 5 Apparent surface energy of titanium alloys under different surface treatment processes

	表面能 (mN/m)	色散分量 (mN/m)	极性分量 (mN/m)
无处理	37.114	30.728	6.386
打磨	41.639	35.764	5.875
酸洗	34.924	31.515	3.409
打磨+酸洗	34.568	31.114	3.454
酸洗+打磨	34.408	31.154	3.254
喷砂+酸洗	39.219	38.530	0.689
酸洗+阳极氧化	61.683	37.811	23.871

将表面能与单搭接强度结合分析由上述分析能够得出，单搭接强度变化趋势与表面能变化基本一致。阳极氧化处理后的样品表面性能最好，单搭接强度最高，由此分析对比不同样品的单搭接强度与失效模式，当钛合金阳极氧化处理时，其单搭接强度最高，为 40.9 MPa，失效模式主要为界面破坏。其次为打磨处理的样品，主要失效模式为混合界面破坏，如图 13 所示，此时钛合金表面与复合材料表面都发挥优异的性能。而经酸洗处理后，其胶接强度下降，推测酸洗使得表面粗糙度下降，表面能降低，基体与胶膜粘接力不强，导致金属-胶膜界面破坏，因此，失效模式主要为界面破坏。而先打磨后酸洗处理时，虽然酸洗降低了表面粗糙度，但由

于酸洗刻蚀在部分样品表面形成“凹坑”，在胶接接头受到外界加载力时，“凹坑”在一定程度上增加了接触面积，进而使得金属-胶膜界面粘接力大于复合材料-胶膜粘接力，所以部分样品出现复合材料-胶膜界面破坏。同时，喷砂与酸洗处理的单搭接强度不如打磨处理，推测是由于喷砂处理后表面粗糙度过大，导致胶膜无法有效地与基体结合。

表 6 不同表面处理工艺后钛合金/等离子体处理复合材料的失效模式

Table 6 Failure modes of titanium alloy/plasma treated composites after different surface treatment processes

钛合金	复合材料	胶接强度/MPa	失效模式
无处理		33.1	金属-胶膜界面破坏
打磨		37.6	混合界面破坏
酸洗		32.1	金属-胶膜界面破坏
打磨+酸洗	等离子体	36.9	混合界面破坏
酸洗+打磨		36.4	混合界面破坏
喷砂+酸洗		35.3	混合界面破坏
酸洗+阳极氧化		40.9	金属-胶膜界面破坏



图 13 打磨处理的钛合金单搭接试验件拉剪破坏后胶接界面形貌

Fig.13 Morphology of cemented interface after tensile shear damage of sanded titanium alloy single-lap test specimen

## 5.2 AC-130 表面预处理剂对单搭接性能的影响

分析温度对表面预处理剂作用的影响。分析表 7 中的失效模式，在常温下使用表面预处理剂，胶膜的主要失效模式从混合界面破坏转变为复材-胶膜界面破坏，说明金属与胶膜之间的粘接力变强，使得单搭接强度从 36.9MPa 提高到 40.2MPa，AC-130 表面预处理剂发挥出优良的性能。但当处理温度升高至 60℃时，胶膜失效转变为金属-胶膜界面破坏，说明此时表面处理剂未发挥出作用，反而使得钛合金与胶膜的结合力减弱，推测温度升高使得钛合金与表面处理剂之间结合不好，未形成有效的化学键。当温度继续上升为 150℃时，水解温度过高，导致表面处理剂浓度增加出现大量团聚而失效，使得表面处理剂与基体之间界面结合力很弱，在胶接接头拉伸过程中更容易失效，因此主要界面破坏为金属-胶层界面破坏。

表 7 不同温度下, 表面预处理剂处理打磨酸洗处理工艺下钛合金的失效模式

Table 7 Failure modes of titanium alloys at different temperatures with surface pretreatment agent treatment and polishing pickling treatment process

钛合金	表面处理剂	胶接强度/MPa	失效模式
打磨+酸洗	无	36.9	混合界面破坏
	25°C	40.2	复材-胶膜界面破坏
	60°C	34.4	金属-胶膜界面破坏
	150°C	23.8	金属-胶膜界面破坏

同时, 测试 AC-130 表面预处理剂对不同表面处理工艺后的钛合金胶接性能的影响, 对无处理、打磨、酸洗与阳极氧化的样品, 分别进行 AC-130 表面预处理剂处理, 与未添加表面预处理剂的样品对比, 结果如表 8 所示, 发现样品的失效模式发生了很大的改变, 如图 14 所示, 打磨处理的样品失效模式从使用前的金属-胶膜界面和复材-胶膜界面混合界面破坏转变成主要为复材-胶膜界面破坏, 无处理、酸洗与阳极氧化处理的样品从金属-胶膜界面破坏转变为复材-胶膜破坏, 说明表面处理剂与钛合金表面进行化学接枝, 生成更为牢固的化学键相连接, 增强了金属与胶膜的粘接力, 进而提高金属的胶接强度。

表 8 表面处理剂对不同处理工艺下钛合金的失效模式的影响

Table 8 Effect of surface treatment agents on the failure mode of titanium alloys under different treatment processes

钛合金	AC-130	胶接强度/MPa	失效模式
无处理	否	33.1	金属-胶膜界面破坏
无处理	是	41.4	复材-胶膜界面破坏
打磨+酸洗	否	36.9	混合界面破坏
打磨+酸洗	是	40.2	复材-胶膜界面破坏
打磨	否	37.6	混合界面破坏
打磨	是	37.4	复材-胶膜界面破坏
酸洗+阳极氧化	否	40.9	金属-胶膜界面破坏
酸洗+阳极氧化	是	41.8	复材-胶膜界面破坏

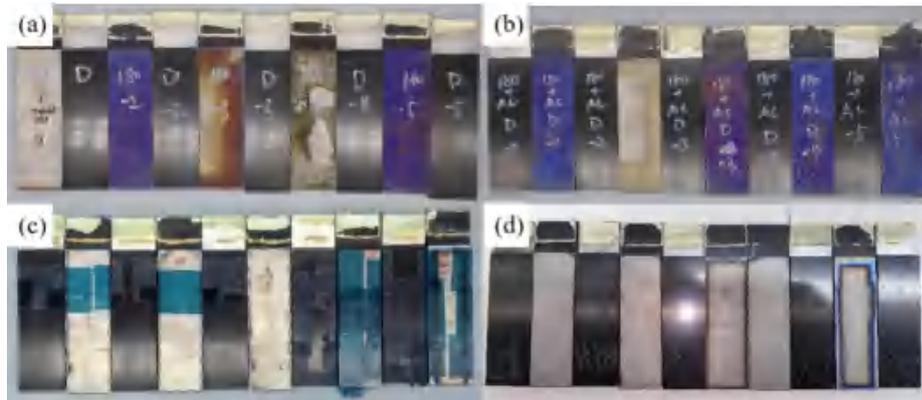


图 14 单搭接试验件拉剪破坏后胶接界面形貌: (a)打磨处理; (b)打磨+AC-130 表面预处理剂处理; (c)打磨+酸洗处理; (d)打磨+酸洗+AC-130 表面预处理剂处理

Fig.14 Morphology of the glued interface after tensile shear damage of the single lap test piece: (a) sanding treatment; (b) sanding + AC-130 surface pretreatment agent treatment; (c) sanding + pickling treatment; (d) sanding + pickling + AC-130 surface pretreatment agent treatment.

## 6 结论

本文讨论不同处理工艺下对钛合金与复合材料的胶接强度的影响,通过分析对比样品表面形貌图、粗糙度与表面能,与单搭接强度测试实验结果一致,得到如下结论:

1. 打磨处理、酸洗与打磨混合处理、喷砂与酸洗处理和酸洗与阳极氧化处理均能提高钛合金表面粗糙度,进而增强钛合金/复合材料单搭接强度,且当钛合金酸洗与阳极氧化处理时,钛合金表面粗糙度从 0.61  $\mu\text{m}$  增加至 0.82  $\mu\text{m}$ ,表面性能提升效果最佳,单搭接强度最高,为 40.9 MPa,提升了 23%;其次为机械打磨处理后的钛合金,其单搭接强度为 37.6 MPa,提升了 14%;

2. 使用 AC-130 表面预处理剂能够显著提高钛合金表面活性,加强钛合金与胶膜之间的粘接力,使得钛合金/复合材料单搭接强度大幅度提高,钛合金经表面预处理剂处理后,单搭接强度从 33.1 MPa 提升至 41.4 MPa,较大程度地增强钛合金性能,并且在不同表面处理工艺下,使用 AC-130 表面预处理剂均不同程度地提高钛合金的单搭接强度。

3. 温度是影响 AC-130 表面预处理剂的重要因素,实验测得,AC-130 表面预处理剂的最佳处理温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 。当温度增加至 60 $^{\circ}\text{C}$ 与 150 $^{\circ}\text{C}$ 温度时,AC-130 表面处理剂均有一定程度的失效。

实验测得,阳极氧化、打磨与表面预处理剂均能有效提高钛合金单搭接强度,但对于飞机叶片来说,除了考虑胶接强度,还需要考虑胶接接头的振动疲劳特性等其他要求。因此,若要处理飞机叶片钛合金包边材料,需要进一步地深入研究。

## 参考文献

- [1] 陈巍.先进航空发动机树脂基复合材料技术现状与发展趋势[J].航空制造技术, 2016,59(5):68-72,92.
- [2] 王晓亮,刘志真,纪双英,等.商用航空发动机先进复合材料风扇叶片研究进展[J].新材料产业, 2010, 12(11): 36-41.
- [3] 孙煜,刘强,黄峰,等.复合材料风扇叶片钛合金加强边胶接技术研究[J].复合材料科学与工程,2021,(03):78-81+98.
- [4] 陈俊林,董柳杉,余永波,等.等离子体处理对航空复合材料胶接性能的影响研究[J].纤维复合材料,2022,39(03):48-53.
- [5] 苏震宇,孙煜.复合材料/钛合金胶接强度影响因素研究[J].航空制造技术,2023,66(22):87-91+105.
- [6] 李文,朱彦海,孙刚,等.TC4 钛合金桨叶包铁胶接表面处理工艺研究[J].航空制造技术,2019,62(21):47-51.
- [7] Takeda, T., Yasuoka, T., Hoshi, H., Sugimoto, S., & Iwahori, Y. (2017). Strength and bonding characteristics of adhesive joints with surface-treated titanium-alloy substrates. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 32(5), 553-571.
- [8] 曲春艳,李琳,王德志.钛合金胶接表面处理研究[J].材料工程, 2010(12):82-85.
- [9] Y. Tsuchimoto, Y. Yoshida, M. Takeuchi, et al. Effect of surface pre-treatment on durability of resin-based cements bonded to titanium[J]. *Dental Materials*, 2006, 22(6): 545-552.
- [10] Y. Mertens, F. J. Gammel, M. Kolb, et al. Investigation of surface pre-treatments for the structural bonding of titanium[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2012, 34(4): 46-54.
- [11] 丁睿智. 轿车豪华内饰件包覆成型胶接性能研究[D].吉林大学,2023.