基于加压腐蚀与APS自组装薄层的TC4/PET异质界面增强方法的研究

卢 雪,刘焕伟

(泰山科技学院,山东 泰安 271000)

摘 要:新能源汽车与航空航天等领域对轻量化与高可靠性结构需求迫切,推动了钛合金/热塑性聚合物异质结构的发展。然而,钛合金TC4/聚对苯二甲酸乙二醇酯(TC4/PET)体系在化学结构、极性及热膨胀系数方面存在显著失配,导致常规注塑所得界面结合强度极低,严重制约其工程应用。文章提出"加压腐蚀协同自组装薄层氨丙基硅杂环烷(APS)"的界面调控策略,系统考察加压腐蚀及涂覆薄层APS对TC4/PET异质界面结合强度的影响。研究通过在TC4表面加压腐蚀构筑微米级粗糙结构,提高表面能并增强界面机械互锁。涂覆APS,从而在TC4氧化膜与PET之间构建薄层硅烷桥接网络。采用注塑工艺制备TC4/PET接头,利用扫描电子显微镜(SEM)、接触角测试(CA)、X射线光电子能谱仪(XPS)和傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)表征界面形貌与化学结构,采用拉伸剪切试验评估界面力学性能。结果表明:加压腐蚀使接头强度提高至约8.32 MPa;在此基础上引入3-氨基丙基三乙氧基硅烷(KH550),凭借Si—O—Ti键及氢键等化学桥接作用,接头强度提升至17.43 MPa;APS自组装薄层策略可在界面形成更薄、更均匀的膜层结构,显著增强界面化学键合,使接头强度进一步提高至29.74 MPa。加压腐蚀与薄层APS协同可有效实现TC4/PET界面的高强度稳定结合。研究为钛合金/工程塑料轻量化杂化结构的界面设计与快速成型工艺优化提供参考。

关键词:异质界面;注塑;KH550;拉伸剪切强度

中图分类号:TQ317 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)08-0144-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.025

Study on Interfacial Enhancement Method for TC4/PET Heterogeneous Interface Based on Pressure-assisted Corrosion and APS Self-assembled Thin Layer

LU Xue, LIU Huanwei

(Taishan College of Science and Technology, Taian 271000, China)

Abstract: The urgent need for lightweight and high reliability structures in the fields of new energy vehicles and aerospace has promoted the development of titanium alloy/thermoplastic polymer heterostructures. However, the titanium alloy TC4/polyethylene terephthalate (TC4/PET) system has a significant mismatch in chemical structure, polarity and thermal expansion coefficient, which leads to the extremely low bonding strength of the interface obtained by conventional injection molding, which seriously restricts its engineering application. Accordingly, this article proposed the interface control strategy of "pressure corrosion and self-assembled thin layer γ-Aminopropylsilatrane (APS)", and systematically investigated the effect of pressure corrosion and thin layer APS on the bonding strength of TC4/PET heterogeneous interface. In this study, micron-scale rough structure was constructed on TC4 surface by pressure-assisted corrosion to increase the surface energy and enhance interfacial mechanical interlocking. Then APS was applied to construct thin silane bridging network between TC4 oxide film and PET. The TC4/PET joint was prepared by injection molding process. The interface morphology and chemical structure were characterized by scanning electron microscopy (SEM), contact angle test (CA), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and mechanical

收稿日期Submitted date 2025-12-22;修回日期Revised date 2026-01-19;录用日期Accepted date 2026-02-12

基金项目:泰山科技学院2025年度校级一流本科专业"机械电子工程"建设项目(Tk2025xjylzy001)

联系人,luxue1101@163.com

引用本文:卢雪,刘焕伟.基于加压腐蚀与APS自组装薄层的TC4/PET异质界面增强方法的研究[J].塑料科技,2026,54(8):144-149.

Citation: LU X, LIU H W. Study on interfacial enhancement method for TC4/PET heterogeneous interface based on pressure-assisted corrosion and APS self-assembled thin layer[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 144-149.

properties of the interface were evaluated by tensile shear test. The results showed that the strength of the joint increased to about 8.32 MPa by pressure corrosion. On this basis, after the introduction of 3-aminopropyltriethoxysilane (KH550), the strength of the joint increased to 17.43 MPa by virtue of chemical bridging effects such as Si—O—Ti bond and hydrogen bond. The APS self-assembled thin layer strategy could form a thinner and more uniform film structure at the interface, significantly enhance the chemical bonding at the interface, and further improve the joint strength to 29.74 MPa. The combination of pressure corrosion and thin layer APS can effectively realize the high strength and stable combination of TC4/PET interface. The study provides a reference for the interface design and rapid prototyping process optimization of lightweight hybrid structure of titanium alloy/engineering plastics.

Keywords: Heterogeneous interface; Injection molding; KH550; Tensile shear strength

随着新能源汽车与航空航天等领域对轻量化及高可靠性结构需求的持续提升，金属/热塑性聚合物异质结构得到快速发展[1-5]。相较于单一材料，钛合金/工程塑料杂化结构既能提供高比强度和刚度，又兼具减重、耐腐蚀与集成化设计优势。其中，兼具良好比强度和耐蚀性的Ti-6Al-4V(TC4)与具有韧性、耐热性及注塑成型性的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)被认为是具有潜力的材料组合[6-7]。然而，钛合金TC4表面为无机弱极性的TiO_2，PET为含极性酰胺基团的有机高分子，两者在化学结构、极性与热膨胀系数等方面存在明显失配，注塑所得TC4/PET异质结构往往结合强度低，服役性能差。因此，如何改善界面结合成为实现异质结构工程应用的关键问题[8-9]。

针对金属与聚合物界面结合能力不足的问题，现有界面强化策略可以归为表面粗化增强的界面机械互锁与化学改性驱动的界面键合两类。前者通常利用喷砂、腐蚀、微弧氧化和激光刻蚀等手段在金属表面构建微米/纳米级凹坑、孔洞和沟槽结构，用以增强界面机械互锁，从而有效提高搭接强度[10-12]。后者则依托等离子体活化、底涂剂和硅烷偶联剂等化学处理工艺，在金属氧化膜表面引入极性或反应性官能团，为聚合物链段提供化学锚定位点，实现氢键、配位键和极性相互作用主导的界面结合[13-15]。然而，单一处理工艺难以满足特殊工程应用对异质结构界面较高强度的要求，因此研究人员往往将增强机械互锁与化学键合的多种方法协同使用，用以构造高强度的金属/聚合物异质界面。

传统腐蚀工艺具有工艺成熟、成本低廉、适于大面积处理等优点，能够在多种金属异质界面有效增强机械互锁。但对于氧化膜致密且稳定的TC4，常规腐蚀难以实现形貌的精细可控，亟须发展适用于TC4的新型腐蚀方法。硅烷偶联剂处理简便，适用性强，能够在金属氧化膜与聚合物之间形成稳定化学桥接，是提升界面强度和耐久性的有效途径。然而现有工艺易形成厚度不均，交联程度不可控，界面化学键合作用较弱的多层膜，因此亟须探索精确调控硅烷层厚度和结构的新方法以提高工艺水平。

因此，本文提出“加压腐蚀联合高效自组装薄层氨丙基硅杂环烷(APS)硅烷网络插入”的协同界面调控策略，用以增强TC4/PET异质界面结合。利用加压腐蚀对TC4表面进行定向粗化，在预处理后的TC4表面涂敷APS，构筑薄层自组装硅烷网络。采用注塑工艺制备TC4/PET异质接头，系统考察加压腐蚀与薄层APS自组装等组合处理工艺对TC4表面粗糙度、润湿性、界面结合强度及断裂行为的影响。研究通过微观形貌和界面结合手段阐明加压腐蚀诱导机械互锁与APS插入层化学键合协同增强界面的作用机理，为高性能钛合金/工程塑料杂化结构的界面设计及快速成型工艺优化提供新思路。

1 实验部分

1.1 主要原料

钛合金，TC4，宝钛集团有限公司；玻璃纤维增强聚对苯二甲酸乙二醇酯(GF-PET)，玻璃纤维含量为30%，杜邦德美公司；硝酸、氢氧化钠、三乙醇胺、甲苯、甲醇、无水乙醇，分析纯，西陇化工；3-氨基丙基三乙氧基硅烷(KH550)，质量分数99%，上海麦克林生化科技股份有限公司。

1.2 仪器与设备

注塑机，CREE-1775D，东莞科锐仪器有限公司；高压反应罐，TGYF-B，郑州铭汭仪器；万能试验机(UTM)，MTS-SANS CMT5000，上海力试科学仪器有限公司；扫描电子显微镜(SEM)，Sigma 300，德国蔡司公司；能量色散光谱仪(EDS)，X-stream-2，牛津仪器公司；共焦显微镜(CLSM)，DCM3D，徕卡显微系统有限公司；接触角测试仪(CAT)，JY-82C，承德鼎盛试验机检测设备有限公司；X射线光电子能谱分析系统，K-Alpha，赛默飞世尔科技公司；傅里叶变换红外光谱(FTIR)，Nicolet iS20，赛默飞世尔科技公司。

1.3 样品制备

将TC4板材浸入质量分数为5%的氢氧化钠溶液中碱洗5 min，去除表层氧化膜，再浸入无水乙醇中进行超声清洗15 min。将超声后的TC4板材浸入质量分数为15%的HNO_3溶液中腐蚀30 min，整个过程在恒压罐中进行，压力设置为2 MPa。腐蚀后再次超声清洗，烘干备用。

配制由质量分数80%的无水乙醇、15%的去离子水与5%的KH550组成的混合溶液，搅拌速度为200 r/min，磁力搅拌40 min，使硅烷充分水解。将恒压腐蚀后的TC4浸入

水解后的硅醇溶液中 10 min，90 ℃烘干 15 min，完成KH550硅烷涂敷。

配制由质量分数为7.7%的KH550、2.7%的三乙醇胺、24.6%的甲醇、13%的氢氧化钠及52%的甲苯组成的混合溶液，在85 ℃条件下使用磁力搅拌机搅拌27 h，直至完全水解，减压，用旋转蒸发仪浓缩，得到黏稠浆状物。转移至装有正戊烷的烧杯中沉淀。将沉淀后的物质溶解于去离子水中得到APS溶液，将恒压腐蚀后的TC4浸入APS溶液中10 min，90 ℃烘干15 min，完成APS涂敷。

利用注塑机制备注塑试样，注塑参数设置为：质量分数为20%GF/PET，熔体温度290 ℃，模具温度180 ℃，注塑压力 15 MPa，注塑时间 20 s，保压时间 20 s。注塑后将20%的GF-PET与TC4结合，制得单搭接接头。考察TC4表面不同预处理对单搭接接头拉伸剪切强度的影响，表1为试验方案。

表1 试验方案

Tab.1 Test scheme

试验编号	处理条件	处理方式
1	未处理	无水乙醇清洗
2	加压腐蚀	恒压罐HNO_3腐蚀
3	加压腐蚀+KH550	恒压罐HNO_3腐蚀后涂敷KH550
4	加压腐蚀+APS	恒压罐HNO_3腐蚀后涂敷APS

1.4 性能测试与表征

SEM测试：采用SEM观察不同处理条件下的TC4表面形貌(200×和2 000×)以及单搭接接头拉伸断裂后的断面和界面形貌(200×)。测试前对试样进行喷金处理。由于未处理界面无法形成有效结合，因此未进行界面SEM表征。

CLSM测试：按照ISO 25178—2:2021进行测试TC4表面的三维粗糙度参数，包括算术平均高度(S_a)和最大高度(S_z)。

接触角(CA)测试：采用接触角测试仪测试各处理组TC4表面的润湿性。

XPS测试：测定不同处理条件下的TC4表面的官能团成分。XPS谱图以C 1s谱图中C—C对应的特征峰为284.8 eV进行荷电校正[16-17]，光斑尺寸为50 μm。

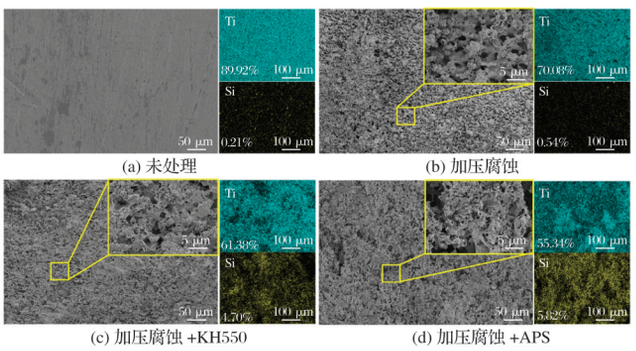
FTIR测试：采用傅里叶变换红外光谱仪检测各处理组TC4与PET之间的官能团反应。波数范围4 000~400 cm^{-1}。

UTM测试：按照ASTM D5868—01 (2023)测试单搭接接头的拉伸剪切性能，UTM十字头速度设定为0.5 mm/min，以保证试样破坏过程为准静态破坏。为减少测试误差，每组试验至少5个样本。

2 结果与讨论

2.1 不同处理条件下TC4的微观形貌分析

图1为不同处理条件下TC4的SEM照片和EDS谱图。从图1可以看出，经加压腐蚀处理后，TC4表面成功形成微米级凹坑与凸起结构。该表面形貌能够有效锚定PET，增加界面机械互锁效应，从而提高接头的拉伸剪切强度。涂敷KH550后，TC4表面Si元素占比显著提高。其中，涂敷APS表面的Si含量高于涂敷KH550，Si质量分数为5.82%，Si元素分布更为均匀。各处理组TC4表面形貌变化微弱，表明硅烷膜对表面形貌的影响受限，未能改善界面处机械互锁效应，仅提供化学键合作用。

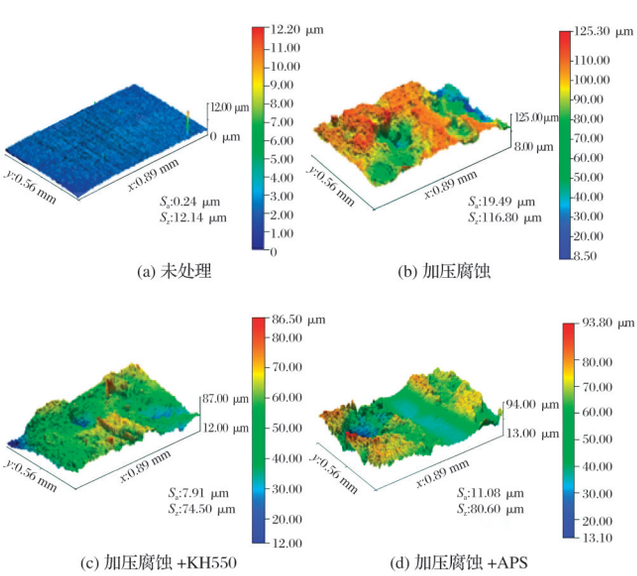


(a) 未处理 (b) 加压腐蚀 (c) 加压腐蚀+KH550 (d) 加压腐蚀+APS

图1 不同处理条件下TC4的SEM照片和EDS谱图

Fig.1 SEM images and EDS spectra of TC4 under different treatment conditions

图2为不同处理条件下TC4的表面粗糙度。从图2可以看出，未处理的TC4表面较为平整，S_a和S_z分别为0.24 μm和12.14 μm。加压腐蚀处理后表面存在明显孔洞，表面粗糙度急剧升高，S_a和S_z分别为19.49 μm和116.80 μm。在加压腐蚀+KH550处理条件下，TC4的表面粗糙度降低，S_a和S_z分别为7.91 μm和74.50 μm。在加压腐蚀+APS处理条件下，S_a和S_z分别为11.08 μm和80.60 μm。APS对粗糙度的降低效果弱于KH550。



(a) 未处理 (b) 加压腐蚀 (c) 加压腐蚀+KH550 (d) 加压腐蚀+APS

图2 不同处理条件下TC4的表面粗糙度

Fig.2 Surface roughness of TC4 under different treatment conditions

对比4组实验，发现涂敷KH550可以降低TC4表面粗糙度。原因在于硅烷膜填充腐蚀产生的微米孔洞，包裹住腐蚀尖端，从而使TC4表面的形貌趋于平滑。在加压腐

蚀+APS处理条件下，TC4的粗糙度高于KH550处理条件下的粗糙度，说明在加压腐蚀+APS处理条件下的TC4机械互锁作用增强，APS涂敷更均匀，形成的表面覆盖层更薄。

图3为不同处理条件下TC4的CA。从图3可以看出，未处理的TC4表面较为平整，CA为70.2°。经加压腐蚀处理后，TC4表面形成微米级凹坑和凸起，该微观结构能够刺破液滴的流动前沿，增加流动阻力，降低CA至14.9°。由于KH550中—NH极性基团的亲水作用[18-19]，涂敷KH550的TC4表面CA降至14.3°。采用APS对TC4表面进行预处理后，表面化学极性进一步增强，亲水性显著提升[20-21]，CA降低至10.6°，此时表面润湿性能最佳。

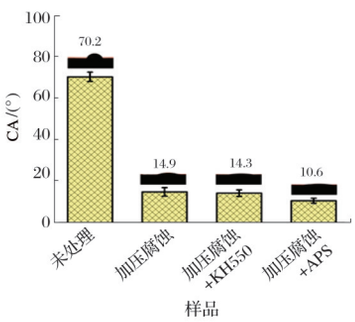


图3 不同处理条件下TC4的CA

Fig.3 CA of TC4 surface under different treatment conditions

图4为不同处理条件下TC4的表面官能团。从图4a可以看出，TC4的表面官能团由TiO_2(529.79 eV，53.19%)和表面Ti—OH(531.98 eV，46.81%)两部分组成，表明未处理的TC4表层为致密氧化膜，含有一定量羟基与吸附水。从图4b可以看出，Ti—OH峰面积增至61.20%，TiO_2降至38.80%，说明加压腐蚀能够提高TC4表面羟基含量，为后续硅烷缩合提供更多反应位点[22]。从图4c可以看出，TC4的表面官能团由Si—O—Si(532.68 eV，62.90%)、Si—O—Ti(531.75 eV，33.90%)和Ti—O—Ti(529.71 eV，3.21%)构成。其中，高结合能处Si—O—Si峰占主导，表明KH550在加压腐蚀后的氧化膜表面发生水解并充分缩聚，形成以Si—O—Si为主链的交联硅烷网络。中间结合能的Si—O—Ti峰表明部分硅醇与表面Ti—OH/Ti—O基团发生缩合反应，在KH550层与TC4基体间形成稳定的化学键合。低结合能处Ti—O—Ti峰面积较小，仅保留少量基体氧化物信号，说明原有TiO_2表面已基本被KH550覆盖。从图4d可以看出，TC4的表面官能团由Si—O—Ti(531.58 eV，61.39%)和Si—O—Si(532.60 eV，38.61%)构成，几乎无法分辨出Ti—O—Ti成分。与KH550样品相比，APS处理后Si—O—Ti峰的相对面积明显增大，且拟合峰几乎完全由Si—O—Si与Si—O—Ti分峰组成。APS在粗糙化的TC4氧化膜上发生更充分的水解缩合，与表面Ti—OH/Ti—O基团形成更高密度的Si—O—Ti桥联键[23-24]。结果表明，APS在TC4表面形成的硅烷膜不仅更均匀，且与基体间的化学结合更强，有利于显著提升TC4/PET异质界面的结合强度。

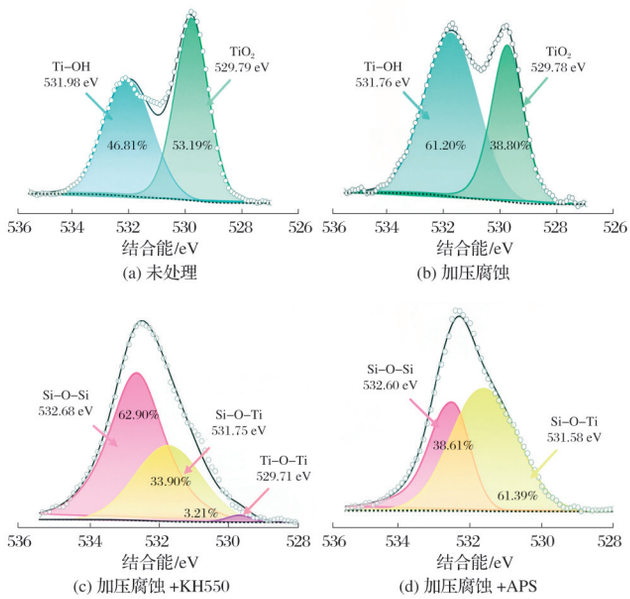


图4 不同处理条件下TC4的表面官能团

Fig.4 Surface functional groups of TC4 under different treatment conditions

2.2 不同表面处理条件下PET-TC4界面结合分析

图5为不同处理条件下TC4/PET界面的SEM照片和EDS元素含量分布。从图5可以看出，3种工艺处理后的界面处，腐蚀凹坑均被PET熔体充分填充，未观察到明显孔洞或未浸润区域。比较界面处线扫结果可知，加压腐蚀处理后，界面过渡较为锐利，几乎未见明显中间层。在加压腐蚀+KH550条件下，TC4与PET之间可以观察到一条宽度为6.6 μm的中间带。而在加压腐蚀+APS条件下，界面过渡带仅为1.9 μm。KH550形成的硅烷网络较厚，而APS自组装膜层更薄且分布更均匀。

图6为不同处理条件下TC4/PET接头的拉伸剪切强度。从图6可以看出，未处理接头无承载能力，拉伸剪切强度为0 MPa。经加压腐蚀处理后，接头拉伸剪切强度提升至8.32 MPa，说明在TC4表面构建三维粗糙结构能够显著改善界面结合性能。在加压腐蚀基础上涂覆KH550后，接头强度增至17.43 MPa，较加压腐蚀组提高约109.4%。尽管KH550涂覆削弱界面机械互锁效应，但其在界面结合处形成较强的化学键合，从而显著提升结合强度。采用加压腐蚀+APS处理后，接头强度进一步提升至29.74 MPa，相比加压腐蚀组和加压腐蚀+KH550组分别提高约257.5%和70.6%。结合XPS分析和界面形貌观察，APS处理形成的表面覆盖层更薄且更均匀，该结构能够在较小程度削弱机械互锁效应下提供更有效的界面结合能力，因此在三者中的拉伸剪切强度最高。

图7为不同处理条件下TC4/PET界面的FTIR谱图，图中对C═O吸收峰进行精细谱峰拟合。从图7可以看

出，经加压腐蚀处理后，1 708 cm^{-1}处出现C═O峰；经加压腐蚀+KH550处理后，1 710 cm^{-1}处出现C═O峰，峰位置发生偏移，且峰形出现一定程度的展宽。结果表明KH550分子中的—NH等极性基团能够与PET分子中的酰胺基团在界面处形成C═O与H—N类型的氢键[25-26]。比较加压腐蚀组、加压腐蚀+KH550组和加压腐蚀+APS组可以看出，C═O峰持续蓝移，其中加压腐蚀+APS组的C═O峰位置最高，峰强度也相对增强，表明薄层APS介入后界面氢键作用进一步增强。结合XPS分析与界面强度测试结果可知，C═O峰的逐步蓝移反映界面氢键化学键合作用的增强，证实了加压腐蚀+APS组拉伸剪切强度达29.74 MPa的实验结果。

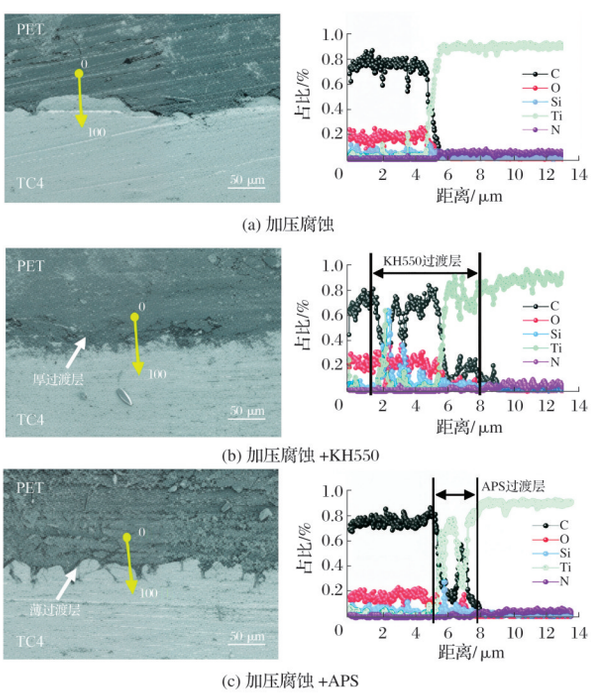


图5 不同处理条件下TC4/PET界面的SEM照片和EDS元素含量分布

Fig.5 SEM images and EDS elemental content distribution of TC4/PET interface under different treatment conditions

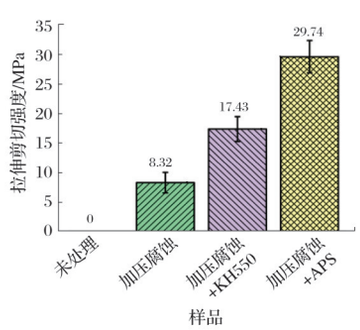


图6 不同处理条件下TC4/PET接头的拉伸剪切强度

Fig.6 Tensile shear strength of TC4/PET joints under different treatment conditions

图8为不同处理条件下接头拉伸剪切失效后断面的SEM照片。从图8可以看出，加压腐蚀处理的TC4/PET接头TC4侧表面仅附着少量分散的PET碎屑，大面积金属裸露，表明失效以界面脱黏为主，界面结合较弱。经加压腐蚀+KH550处理后，TC4表面可以看到连续分布的PET薄层，失效模式由单纯的界面脱黏转变为“界面脱黏+薄层聚合物内聚破坏”，界面结合强度明显提高。经加压腐蚀+APS处理后，TC4表面附着的PET层更为致密、连续，局部可以看到明显的PET整体撕裂痕迹，PET侧断口呈典型的剪切带与塑性拉伸条纹特征。结果表明：在失效过程中，聚合物层承担更大比例的载荷，界面由脱黏破坏向聚合物侧内聚破坏转移，界面拉伸剪切强度最高。

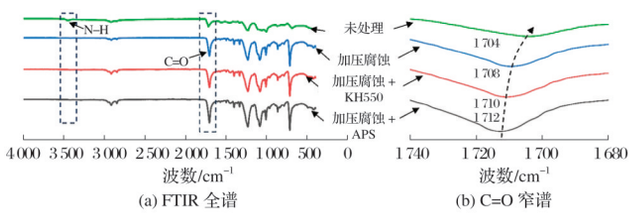


图7 不同处理条件下TC4/PET界面的FTIR谱图

Fig.7 FTIR spectra of TC4/PET interface under different treatment conditions

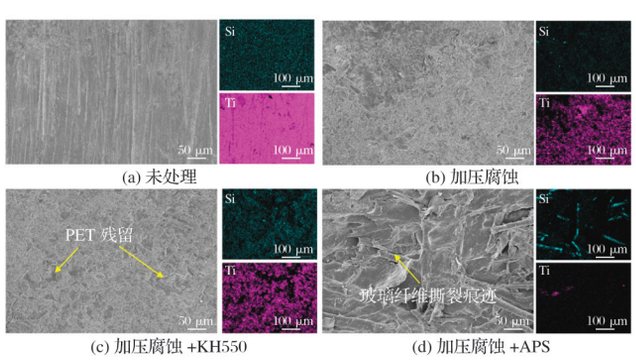


图8 不同处理条件下接头拉伸剪切失效后断面的SEM照片

Fig.8 SEM images of fracture surface after tensile shear failure of joints under different treatment conditions

3 结论

本研究系统考察加压腐蚀、加压腐蚀+KH550和加压腐蚀+APS对TC4/PET异质界面结合强度的影响。结果表明，加压腐蚀可以在TC4表面构建微米级粗糙结构。该结构能够显著提高表面能，增加界面机械互锁效应，TC4/PET接头拉伸剪切强度达到8.32 MPa。在加压腐蚀基础上涂敷KH550，可以在TC4与PET之间形成以Si—O—Ti键和氢键为主的化学桥接层，机械互锁与化学键合的协同效应将接头强度提升至17.43 MPa。进一步在加压腐蚀基础上自组装薄层APS，界面强度提升至29.74 MPa。APS形成的更薄、更均匀的单层膜结构有助于实现更高效的化学键合。加压腐蚀+APS的界面调控策略兼具膜层厚度可控和工艺特性稳定性好等优点，能够实现TC4/PET界面的高强度稳定结合。研究为钛合金、工程塑料轻量化杂化结构的界面设计及工程化提供参考。

参考文献

[1] BOROUMAND F, SEYEDKASHI S M H, POL M H. Experimental analysis of the warm stamping of metal/thermoplastic polymer nanocomposite laminates[J]. Polymer Composites, 2022, 43(2): 1090-1106.

[2] KAFKOPOULOS G, DUVIGNEAU J, VANCSO G J. Polydopamine as a materials platform to promote strong and durable interfaces in thermoplastic polymer-titanium joints[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2024, 309(6): 2300396.

[3] LEE A A, QIAO Y, SHIN Y, et al. Multiple-repeated plasma surface treatments for significantly improving bonding performance of metal-carbon-fiber-reinforced thermoplastic polymer dissimilar adhesive joints [J]. Advanced Engineering Materials, 2025, 27(9): 2402693.

[4] ZHUANG Y J, SHAO C, LIN J, et al. Low-frequency vibration-assisted riveting for dissimilar CFRP/Al structures[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2026, 157: 484-495.

[5] KO M S, SHIM D S. Overcuring-assisted mechanical interlocking of metal-polymer composites fabricated by vat photopolymerization[J]. Defence Technology, 2026, DOI:10.1016/j.dt.2026.01.010.

[6] MARK L H, ZHAO C X, CHU R K M, et al. Mechanical properties of injection molded PP/PET-nanofibril composites and foams[J]. Polymers, 2022, 14(14): 2958.

[7] HEYDARI K, ZADHOUSH A, YOUSEFI A A. Enhanced spinning properties of chain-extended flame-retarded multiple-recycled PET/cloisite 30B nanocomposite[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2025, 142(47): e57820.

[8] LIU F F, ABDIRYIM T, LIU X. Metallopolymers as functional materials for multiple applications[J]. Polymer, 2024, 305: 127170.

[9] WANG Y Y, WANG H, CHEN Y Z, et al. Parameter optimization and enhancement mechanisms of ultrasonic adhesive-impact bonding for CNT-reinforced epoxy adhesive joints: A combined experimental and molecular dynamics study[J]. Polymer Composites, 2026, 47(Suppl 1): S64-S81.

[10] ZHANG Z Q, ZHAO H Y, ZHAO Y X, et al. Effect of surface texture spacing on interface heat transfer and tensile property of laser-welded steel/CFRTP joint[J]. Polymer Composites, 2024, 45(2): 1551-1567.

[11] ADELINIA A, YEROKHIN A, MATTHEWS D T A, et al. Plasma electrolytic oxidation coating for aluminium and glass-fibre polyamide 6 bonding[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2026, 201: 109445.

[12] CHEN Y J, TANG J X, PANG Z, et al. Enhancement mechanism of ultrasonic vibration on interface bonding strength in laser joining of polymer to ceramic[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 112: 263-272.

[13] ZHAO D, GUO L, LI Q R, et al. Multi-functional lanthanide metallopolymer: Self-healing and photo-stimuli-responsive dual-emitting luminescence for diverse applications[J]. Advanced Materials, 2024, 36(36): 2405164.

[14] ZOU X, CHEN K, CHEN C, et al. Engineering a superamphiphilic surface for enhanced interfacial bonding in metal-polymer hybrid structure[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 494: 131404.

[15] 苏健晖. 钛合金/树脂基复合材料激光连接界面交互作用构筑及强化机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025.

[16] LU H F, TANG J P, ZHU Z H, et al. Engineering the surface electronic structure of Pd via Bi alloying and N-doped carbon support for enhanced ethanol oxidation[J]. Electrochimica Acta, 2026, 548: 147930.

[17] PALCHEVA R, KALUZA L, SHESTAKOVA P, et al. C-C coupling of 1-butanol over Mg- and Li-doped L-zeolite[J]. Catalysis Today, 2025, 459: 115436.

[18] ZHAO F, GUO Q C, LI W, et al. Asymmetric cooling dynamics in foamed PP: Role of metal/polymer films on formability[J]. Polymer Engineering & Science, 2025, 65(9): 4524-4534.

[19] CHOI Y, NAM C. Cu-amine coordinated PVDF membranes with superhydrophilic/underwater-superoleophobic surfaces for high-flux and durable antifouling in industrial wastewater treatment[J]. Chemical Engineering Journal, 2026, 530: 173536.

[20] GOLYKH R N, CARRAT J B, MANYAKHIN I A, et al. Influence of liquid viscosity on growth of the surface of an air bubble subjected to ultrasonic cavitation[J]. Physics of Fluids, 2025, 37(12): 122106.

[21] ZHANG D W, DUAN C A, GUAN J, et al. Molecular dynamics simulation of ultrasound cavitation occurring in copper-water nanofluid [J]. Physics of Fluids, 2023, 35(10): 102021.

[22] TAN C W, SU J H, LIU Y F, et al. Enhanced interfacial bonding strength of laser bonded titanium alloy/CFRTP joint via hydrogen bonds interaction[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 239: 109966.

[23] GUO Y T, CUI Y T, JIANG C R, et al. The biomedical application of a multifunctional silane coating with GO/Ti_3C_2 heterojunction in additive manufacturing of NiTi alloys[J]. Advanced Functional Materials, 2026, 36(24): e23794.

[24] MORRILL A R, DUONG D T, LEE S J, et al. Imaging 3-aminopropyltriethoxysilane self-assembled monolayers on nano-structured titania and tin (IV) oxide nanowires using colloidal silver nanoparticles[J]. Chemical Physics Letters, 2009, 473(1/2/3): 116-119.

[25] YAN H L, ZUO H Y, XIAO J Y, et al. Mechanism and galvanic coupling corrosion behavior of amino trimethylene phosphonic acid (ATMP) in the formation of high bond strength fluor-phosphorus conversion films on titanium alloys[J]. Materials Today Communications, 2025, 49: 114330.

[26] ZHANG C X, WANG R S, WANG L H, et al. Robust low friction mechanism of HNT-PVPA composite coating based on microviscosity regulation[J]. Friction, 2025, 13(11): 9441084.