

超声辅助功率对注塑成型 20% GF/PET-A5052 界面结合强度的影响

刘焕伟, 刘增强

(泰山科技学院, 山东 泰安 271038)

摘要: 采用 FeCl_3 腐蚀和涂敷硅烷方法处理 A5052 表面, 重点对比研究注塑过程中施加不同功率的超声作用对制备的 20% GF/PET-A5052 单搭接接头拉伸剪切强度的影响。研究了腐蚀和涂敷硅烷对 A5052 表面结构、官能团以及润湿性的影响, 并对搭接接头进行力学性能、结合面和断面微观结构表征, 揭示了腐蚀和涂敷硅烷以及超声辅助注塑对增强界面力学性能的作用机理。结果表明: 腐蚀能在 A5052 表面产生微米级孔洞和尖端, 增加界面机械互锁作用。涂敷硅烷能在界面处通过 $\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$ 和 $-\text{NH}\cdots\text{O}=\text{C}$ 氢键作用实现界面化学键合。300 W 超声辅助注塑增加了聚合物的流动性, 能够进一步促进界面处产生氢键。在腐蚀、涂敷硅烷和超声辅助的协同作用下将界面结合强度提升至 34.1 MPa, 相较于腐蚀接头提高了 96.0%。然而能量过大的超声作用会在界面处产生预裂纹, 严重降低界面结合强度。该方法为大型复杂结构件的工业化注塑生产提供了技术可行性, 拓展了异质材料构件制造的应用边界。

关键词: 超声辅助; 注塑; 腐蚀; KH-550; 拉伸剪切强度

中图分类号: TG496

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)07-0133-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.07.024

Effect of Ultrasonic Assisted Power on Interfacial Bonding Strength of 20% GF/PET-A5052 by Injection Molding

LIU Huanwei, LIU Zengqiang

(Taishan College of Science and Technology, Taian 271038, China)

Abstract: The A5052 surface was treated by FeCl_3 etching and silane coating, with particular emphasis on the comparative investigation of the effects of ultrasound at different power levels applied during the injection molding process on the tensile shear strength of the prepared 20% GF/PET-A5052 single lap joints. The influences of etching and silane coating on the surface structure, functional groups, and wettability of A5052 were examined, and the lap joints were characterized in terms of mechanical properties, bonding interface, and fracture surface microstructure, thereby elucidating the mechanisms through which etching, silane coating, and ultrasound-assisted injection molding enhanced the interfacial mechanical properties. The results indicated that etching generated micron-scale pores and asperities on the A5052 surface, increasing the mechanical interlocking effect at the interface. Silane coating achieved interfacial chemical bonding through $\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$ and $-\text{NH}\cdots\text{O}=\text{C}$ hydrogen bonding at the interface. Ultrasound-assisted injection molding at 300 W enhanced polymer flowability and further promoted the formation of hydrogen bonds at the interface. Under the synergistic action of etching, silane coating, and ultrasound assistance, the interfacial bonding strength was improved to 34.1 MPa, representing a 96.0% increase compared with that of the etched-only joint. However, excessive ultrasonic energy generated pre-cracks at the interface, severely degrading the interfacial bonding strength. This method provided technical feasibility for the industrial injection molding production of large and complex structural components, expanding the application boundaries of heterogeneous material component manufacturing.

Keywords: Ultrasonic assistance; Injection molding; Etching; KH-550; Tensile shear strength

收稿日期 Submitted date 2025-09-22; 修回日期 Revised date 2025-10-25; 录用日期 Accepted date 2025-11-19

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, 1039563239@qq.com

引用本文: 刘焕伟, 刘增强. 超声辅助功率对注塑成型 20% GF/PET-A5052 界面结合强度的影响[J]. 塑料科技, 2026, 54(7): 133-138.

Citation: LIU H W, LIU Z Q. Effect of ultrasonic assisted power on interfacial bonding strength of 20% GF/PET-A5052 by injection molding [J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(7): 133-138.

航空航天与新能源汽车领域对轻量化材料的迫切需求,推动了纤维增强热塑性聚合物的广泛应用^[1-3]。这类材料虽具备优异的比强度与耐腐蚀性,但关键承重结构仍依赖超高强度金属基体。为实现系统级减重目标,由金属承载件与热塑性聚合物功能件构成的杂化结构已成为研究热点^[4]。然而,聚合物与金属物理/化学性质失配导致直接结合的界面强度显著劣化,严重制约结构界面的可靠性。突破该技术瓶颈亟须开发界面调控策略,通过协同优化界面处机械互锁与化学键合,实现界面强度的跨越式提升^[5]。在界面强化策略中,机械互锁机制主要通过表面形貌调控实现。早期技术如喷砂^[6]、化学腐蚀^[7]及阳极氧化^[8]通过构建微米级粗糙结构增强锚定效应。近年来发展的微弧氧化^[9]、激光织构^[10]及增材制造界面^[11]虽能实现亚微米级三维互锁,但其高昂的制造成本严重制约工业规模化应用。因此,成本效益比更优的腐蚀与涂覆中间试剂仍是当前量产优选方案。由于上述工艺均通过改变表面形貌增强界面机械互锁,无法适配对电力电子器件界面平整度要求极高的应用场景,因而通过提高界面化学键合作用的方法逐渐受到研究人员的关注。化学键合路径则依赖界面分子设计,典型如席夫碱^[12-13]、硅烷偶联剂^[14]等活性涂层可建立共价键桥接。然而,在最新的界面结合工艺中(例如焊接、注塑成型等),毫秒级熔体填充-固化周期(通常小于30 s)导致分子扩散能垒陡增,致使界面反应位点活化不足,化学键合密度显著低于理论值。现有化学改性技术的反应时间与高速成型工艺周期不匹配。因此,开发提高快速界面结合工艺中原位化学键合作用的方法,已成为突破界面化学键合瓶颈的关键研究方向。

为此,本文提出采用超声辅助方法促进注塑过程中的原位化学键合,利用超声辅助注塑工艺制备短切玻璃纤维增强聚对苯二甲酸乙二醇酯(20% GF/PET)-A5052杂化接头。采用腐蚀和涂敷硅烷的方式预处理A5052表面,系统研究超声辅助、腐蚀及涂敷硅烷等组合处理工艺对A5052表面润湿性及界面结合强度的影响,揭示超声辅助功率促进界面原位化学键合的作用机理。

1 实验部分

1.1 主要原料

铝合金,A5052,山东南山铝业股份有限公司;20% GF/PET,美国杜邦公司;硝酸(HNO_3)、氢氧化钠(NaOH)、氯化铁(FeCl_3),分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司;3-氨丙基三乙氧基硅烷(KH-550),质量分数99%,上海麦克林生化科技股份有限公司;无水乙醇,质量分数 $\geq 99.5\%$,上海麦克林生化科技股份有限公司;去离子水,实验室自制。

1.2 仪器与设备

桌面级注塑机,CREE-1775D,东莞市科锐仪器科技有限公司;万能试验机,MTS-SANS CMT5000,力试(上海)科学仪器有限公司;场发射扫描电子显微镜(SEM),Sigma 300,德国卡尔蔡司股份公司;能量色散光谱仪(EDS),

X-stream-2,英国牛津仪器有限公司;共焦显微镜,DCM3D,德国莱卡仪器有限公司;接触角测试仪,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,美国赛默飞世尔科技公司;傅里叶变换红外光谱(FTIR),Nicolet iS20,美国赛默飞世尔科技公司。

1.3 样品制备

1.3.1 A5052表面预处理

配制质量分数5%的 HNO_3 溶液,将A5052板材浸入 HNO_3 溶液中进行5 min酸洗处理。将酸洗后的A5052板材浸入质量分数5% NaOH 溶液中进行5 min碱洗处理,以充分去除A5052表层氧化膜,随后将A5052板材浸入无水乙醇中进行15 min超声清洗。将超声清洗后的A5052板材浸入质量分数10% FeCl_3 溶液中恒温水浴(30 $^{\circ}\text{C}$)腐蚀15 min,随后再次超声清洗,烘干备用。配制质量分数80%的无水乙醇、质量分数15%的去离子水以及质量分数5% KH-550的混合溶液,并对其进行40 min磁力搅拌(200 r/min),完成硅烷水解。将 FeCl_3 腐蚀后的A5052浸入水解后的硅醇溶液中10 min,随后90 $^{\circ}\text{C}$ 烘干15 min,完成硅烷涂敷。

1.3.2 注塑成型工艺

利用桌面级注塑机制备注塑试样,设置20% GF/PET熔体温度270 $^{\circ}\text{C}$,模具温度180 $^{\circ}\text{C}$,注射压力10 MPa,注射时间15 s,保压时间10 s。具体注塑步骤为:将20% GF/PET颗粒放入烘箱中100 $^{\circ}\text{C}$,3 h。随即将颗粒填入注塑机料筒中,等待10 min,直至PET颗粒完全熔化。将处理好的A5052铝合金板放入模具内预热60 s,保证铝合金板温度与模具温度一致,随后注塑结合20% GF/PET和A5052,得到搭接接头。

在注塑过程中施加超声辅助,其中超声辅助设备功率设置300 W和600 W两个梯度。为了研究A5052表面预处理和超声辅助注塑功率对单搭接接头拉伸剪切强度的影响,设计试验组,如表1所示。

表1 试验组

Tab.1 Experiment group

组别	试验组简称	处理方式
A	腐蚀	FeCl_3 腐蚀
B	腐蚀+硅烷	FeCl_3 腐蚀后涂敷KH-550
C	腐蚀+硅烷+300 W超声	FeCl_3 腐蚀后涂敷KH-550, 300 W超声辅助注塑
D	腐蚀+硅烷+600 W超声	FeCl_3 腐蚀后涂敷KH-550, 600 W超声辅助注塑

1.4 性能测试与表征

力学性能测试:根据ASTM D5868—01(2023)进行单搭接接头拉伸剪切性能测试,万能试验机十字头速度设定为0.5 mm/min,以保证试样破坏过程为准静态破坏。为减少测量误差,每个试验组至少测试5个样本。

SEM测试:使用场发射扫描电子显微镜表征腐蚀和涂

敷硅烷后 A5052 的表面形貌、结合面及断面,该显微镜配备有能量色散光谱仪。

表面粗糙度测试:使用共焦显微镜测量 A5052 的表面粗糙度(S_a 和 S_z),参考标准为 ISO 25178。

接触角测试:利用接触角测试仪测试超声、腐蚀和硅烷处理对 A5052 表面润湿性的影响。

XPS 测试:采用 X 射线光电子能谱分析系统测定腐蚀和涂敷硅烷后的 A5052 表面官能团的成分(X 射线光斑尺寸为 $50\text{ }\mu\text{m}$)。

FTIR 测试:利用傅里叶变换红外光谱检测硅烷与 PET 发生的官能团反应。

2 结果与讨论

2.1 A5052 表面分析

图 1 为腐蚀和腐蚀+硅烷处理后 A5052 表面的 SEM 照片。从图 1a 可以看出,腐蚀后的 A5052 表面产生了微米级的孔洞和腐蚀尖端,两者的存在增加了 A5052 的表面粗糙度,增强了 PET-A5052 界面处的机械互锁作用^[15-16]。从图 1b 可以看出,涂敷硅烷在腐蚀后的 A5052 表面附着了一层球状的硅烷网络,其能在界面处产生化学键合作用^[17-18],但由于高密度的硅烷网络遮蔽了腐蚀产生的空洞和尖端, PET-A5052 界面处的机械互锁作用会有所下降。

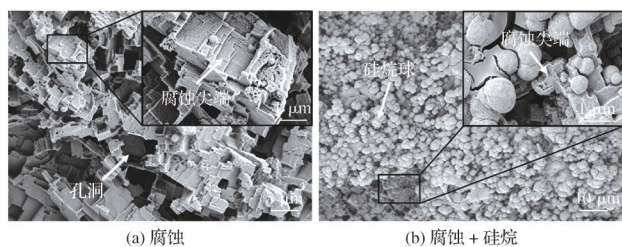


图 1 腐蚀和腐蚀+硅烷处理后 A5052 表面的 SEM 照片

Fig.1 SEM images of surface of A5052 after etching and etching+silane treatment

图 2 为腐蚀和腐蚀+硅烷处理后 A5052 的表面粗糙度。从图 2 可以看出,腐蚀表面存在明显的孔洞和腐蚀尖端, S_a 和 S_z 分别为 $1.76\text{ }\mu\text{m}$ 和 $47.92\text{ }\mu\text{m}$ 。腐蚀+硅烷处理的表面粗糙度有所下降, S_a 和 S_z 分别为 $1.25\text{ }\mu\text{m}$ 和 $34.34\text{ }\mu\text{m}$ 。对比两组试验,涂敷硅烷降低了 A5052 表面粗糙度,原因在于微米级的球状硅烷网络填充了腐蚀产生的孔洞,包裹住腐蚀尖端,使 A5052 表面的形貌趋于平滑。腐蚀+硅烷组的粗糙度较小,这也说明该组的机械互锁作用更弱,但由于涂覆硅烷减少了界面处的尖端结构,拉伸剪切过程中该组的应力分散作用更强,而且硅烷还能在界面处产生极强的化学键合作用,因此仅凭表面粗糙度无法判断各试验组的界面结合强度。

图 3 为 4 种处理方式下 A5052 表面的静态接触角。从图 3 可以看出,腐蚀处理后的表面由于存在孔洞和腐蚀尖端,尖端能刺破液滴的流动前沿从而降低接触角,该组的静态接触角为 68.1° 。由于 KH-550 中—NH 极性基团的亲水作用^[19],使 B 组 A5052 表面的静态接触角降低至 58.7° ,

也能证明 B 组硅烷层的极性作用对表面润湿性的影响强于腐蚀尖端的刺破作用。C 组为腐蚀+硅烷+300 W 超声辅助组,超声辅助作用进一步使静态接触角降低为 34.6° ,表面润湿性进一步提高,超声空化作用使液滴前沿流动更为迅速^[20-21],是 A5052 静态接触角降低的原因。D 组将超声辅助功率提高至 600 W,更强的超声空化作用使静态接触角进一步降低至 27.3° ,该组的表面润湿性最佳。

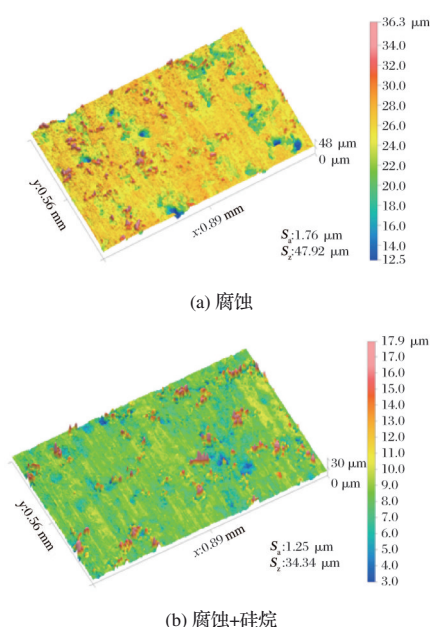


图 2 腐蚀和腐蚀+硅烷处理后 A5052 的表面粗糙度
Fig.2 Surface roughness of A5052 after etching and etching+silane treatment

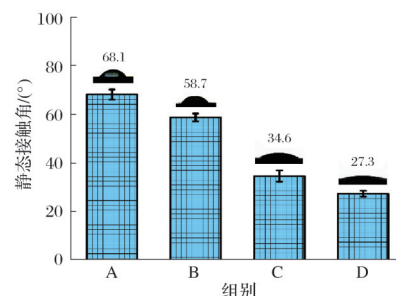


图 3 4 种处理方式下 A5052 表面的静态接触角
Fig.3 Static contact angle of A5052 surface under four treatment methods

利用 XPS 揭示预处理对 A5052 表面官能团的影响,按照 C—C 结合能为 284.8 eV ^[22]校准能谱。图 4 为腐蚀和腐蚀+硅烷处理后 A5052 表面官能团的 XPS 谱图。从图 4a 可以看出,腐蚀后 A5052 表面 O 1s 谱检测到的成分为表层致密的 Al_2O_3 、吸收的空气中的 H_2O 及 AlOOH ,结合能分别为 531.1 、 533.0 、 530.4 eV 。从图 4b 可以看出,涂敷硅烷后 A5052 表面 O 1s 谱由 O^{2-} 、 Si—O—Al 和 Si—O—Si 3 个拟合峰组成,结合能分别为 530.1 、 531.0 和 532.2 eV ,检测到的 Si—O—Si 键证明硅烷已成功水解为硅醇,并且硅醇分子之间发生交联作用,产生了硅烷膜, Si—O—Al 键证明 KH-550 与 A5052 表面吸附的—OH 发生反应,硅烷膜成功键合到 A5052 表面^[23-24]。

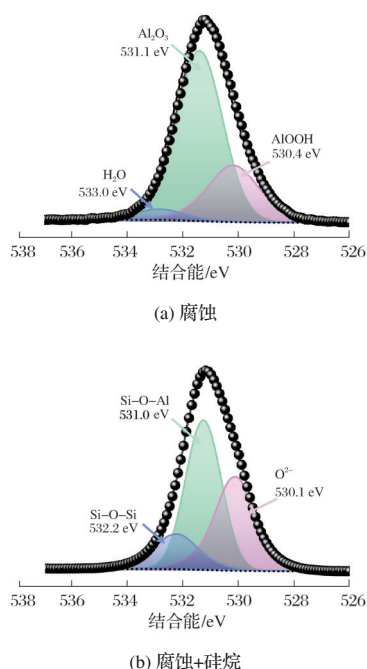


图4 腐蚀和腐蚀+硅烷处理后A5052表面官能团的XPS谱图
Fig.4 XPS spectra of functional groups on surface of A5052
after etching and etching+silane treatment

2.2 PET-A5052 界面结合

图5和图6分别为4种处理方式下PET-A5052界面的SEM照片和EDS谱图。从图5a可以看出,经腐蚀预处理的结合界面处存在大量的未被PET填充的孔洞,PET-A5052未能实现紧密的机械互锁。腐蚀表面润湿能力较差,15 s的注射时间无法保证PET浸入孔洞,界面处产生直径为8.94 μm 的孔洞(见图6a)。从图5b可以看出,腐蚀+硅烷处理的结合界面,由于硅烷中极性基团—NH的润湿作用较强,得到的界面能够产生紧密的机械互锁(见图6b)。从图5c可以看出,腐蚀+硅烷+300 W超声辅助注塑得到PET-A5052结合界面,该界面也实现了紧密的机械互锁(见图6c)。从图5d可以看出,腐蚀+硅烷+600 W超声辅助注塑得到的PET-A5052结合界面,值得注意的是,该界面产生了宽度为9.76 μm 的裂纹(见图6d),可能是注塑后期熔体温度降低后快速凝固,但过高超声能量的持续输入破坏了结合界面。

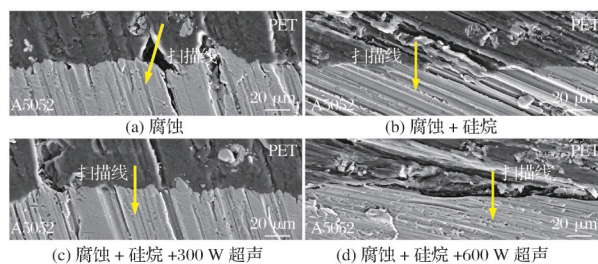


图5 4种处理方式下PET-A5052界面的SEM照片
Fig.5 SEM images of PET-A5052 interface
under four treatment methods

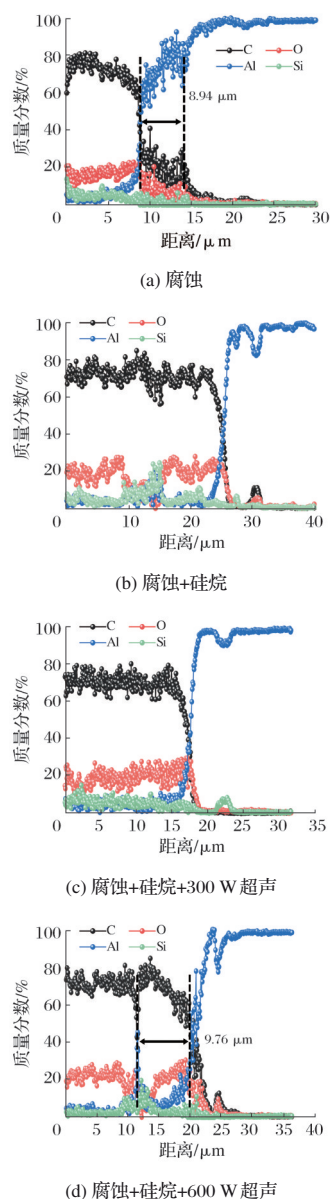


图6 4种处理方式下PET-A5052界面的EDS谱图
Fig.6 EDS spectra of PET-A5052 interface
under four treatment methods

图7为4种处理方式下PET-A5052接头的拉伸剪切强度。从图7可以看出,腐蚀接头的拉伸剪切强度为17.4 MPa,腐蚀+硅烷接头的拉伸剪切强度达到了25.8 MPa,相较于腐蚀接头强度提升了48.3%,虽然硅烷层削弱了界面的机械互锁作用,但由于硅烷提供的化学键合作用更强,所以接头强度进一步提高。腐蚀+硅烷+300 W超声接头的强度进一步提高至34.1 MPa,相较于A组提高96.0%,较B组提高32.2%。对比B组和C组,超声作用的施加使界面强度进一步提高,图5b~图5c均实现了界面紧密的机械互锁,因此C组强度提高的原因可能是在界面处产生了更强的化学键合。对于腐蚀+硅烷+600 W超声接头,过大能量的超声输入使界面处产生了裂缝(见图5d),从而削弱界面处的机械互锁作用,使界面结合强度下降为19.2 MPa。

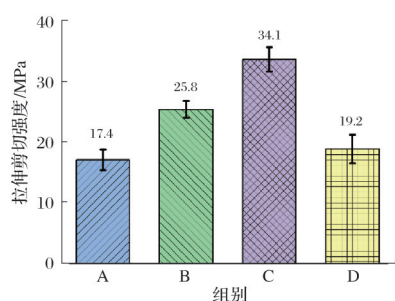
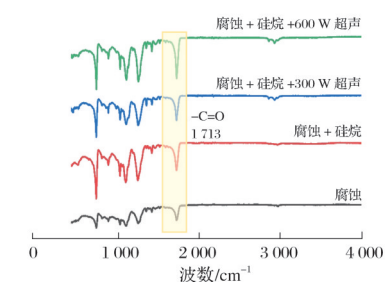


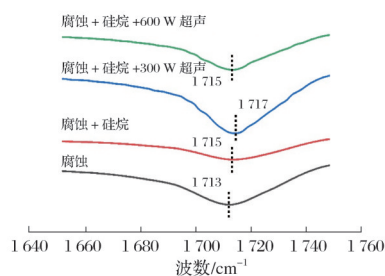
图7 4种处理方式下PET-A5052接头的拉伸剪切强度

Fig.7 Tensile and shear strength of PET-A5052 joints under four treatment methods

图8为4种处理方式下PET-A5052界面的FTIR谱图。结合后PET的特征官能团C=O已在图8a中标注,图8b为—C=O精细谱分析,以研究腐蚀、涂敷硅烷和超声对界面化学作用的影响。从图8可以看出,对比腐蚀和腐蚀+涂敷硅烷组,腐蚀组C=O峰位于 1713 cm^{-1} ,涂敷硅烷后PET的C=O蓝移至 1715 cm^{-1} ,这说明硅烷与PET发生了一 $\text{NH}\cdots\text{O}=\text{C}$ 类型的氢键键合^[25]。对比腐蚀、腐蚀+硅烷和腐蚀+硅烷+300 W超声组,三组的C=O官能团峰分别位于 1713 、 1715 、 1717 cm^{-1} ,C=O发生了持续蓝移,这表明超声作用进一步促进了界面处氢键的生成。对比腐蚀+硅烷、腐蚀+硅烷+300 W超声和腐蚀+硅烷+600 W超声组,发现过量超声能量的输入反而抑制了界面处氢键的生成,这是因为过高的超声振动使界面产生预裂纹,硅烷与PET无法充分结合,从而阻碍了氢键的产生。



(a) 特征官能团全谱



(b) —C=O精细谱

图8 4种处理方式下PET-A5052界面的FTIR谱图

Fig.8 FTIR spectra of PET-A5052 interface under four treatment methods

图9为4种处理方式下PET-A5052接头断面的SEM照片。从图9可以看出,腐蚀处理A5052表面附着的PET

面积最小为11%,且多为聚合物碎屑,界面发生11%的黏附破坏和89%的脱黏破坏。腐蚀+硅烷处理的A5052表面附着了25%面积的薄层PET,拉伸剪切过程中界面发生25%的黏附破坏和75%的脱黏破坏。腐蚀+硅烷+300 W超声处理的A5052表面附着了最大面积的PET薄层,面积达到了43%,接头发生43%的薄层PET黏附破坏和57%的脱黏破坏。腐蚀+硅烷+600 W超声处理的A5052表面附着了27%面积的PET薄层,接头发生27%的薄层PET黏附破坏和73%的脱黏破坏。图9b和图9d中A5052表面附着的PET面积相近,界面结合强度却相差较大(6.6 MPa)。原因在于过量超声输入使PET-A5052接头预先产生了破坏,SEM观察到A5052表面附着的PET是预先破坏产生的,对比观察图9也可以发现,只有图9d中PET侧破坏形貌为碎块状破坏模式,而其余三组均为剪切破坏模式。

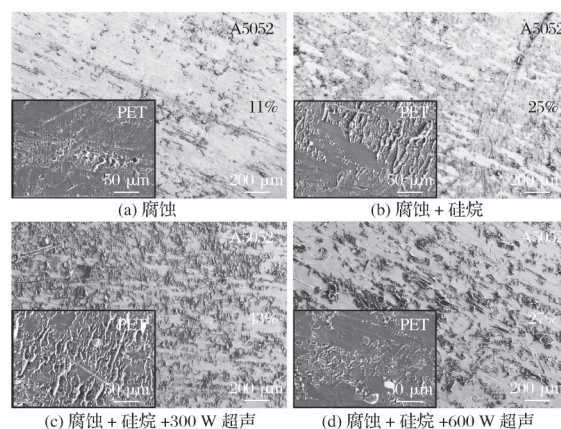


图9 4种处理方式下PET-A5052接头断面的SEM照片

Fig.9 SEM images of PET-A5052 joints cross-section under four treatment methods

3 结论

系统研究了腐蚀、涂敷硅烷和超声辅助注塑对20% GF/PET-A5052界面结合强度的影响,并通过SEM、接触角、XPS、共聚焦显微镜和FTIR揭示了各处理方法对界面强度影响的作用机理。结果表明:FeCl₃腐蚀能在A5052表面产生微米级孔洞和尖端,有效增加界面机械互锁,得到的PET-A5052界面结合强度为17.4 MPa。涂敷硅烷能在界面处通过Si—O—Al和一 $\text{NH}\cdots\text{O}=\text{C}$ 氢键作用实现界面化学键合,进一步将界面结合强度提升至25.8 MPa。超声辅助作用能进一步增加A5052表面的润湿性,实现界面完全机械互锁。更重要的是,超声辅助有利于进一步发挥硅烷的氢键作用,产生更多的一 $\text{NH}\cdots\text{O}=\text{C}$ 类型氢键,成功将界面结合强度提升至34.1 MPa,相较于腐蚀接头提高了96.0%。然而,输入过大的超声能量会使界面在注塑过程中产生预破坏,严重降低界面结合强度。更重要的是,超声辅助作用不仅显著增强了注塑过程中的原位化学键合效应,使界面结合强度进一步提升,同时通过改善聚合物熔体流动性,为大型复杂结构件的工业化注塑生产提

供了技术可行性,从而拓展了异质材料构件的应用边界。

参考文献

- [1] HEYDARI P, MOSTOFINEJAD D, SALJOUGHIAN A. Seismic retrofitting of shear-deficient RC coupling beams with FRP composites through EBROG technique[J]. *Engineering Structures*, 2025, 341: 120861.
- [2] 罗银胜,林家辉,范方强,等. 碳纤维增强聚合物基复合材料的海洋应用[J]. *现代塑料加工应用*, 2025, 37(2): 5-8.
- [3] ALJIDDA O, ALNAHHAL W, REFAI AEL. Influence of cut-out openings on the flexural behavior of one-way concrete slabs strengthened with NSM-FRP bars and EB-CFRP strips[J]. *Structures*, 2025, 79: 109547.
- [4] LI C, VISWANATHAN-CHETTIAR S, SUN F Z, et al. Effect of CFRP surface topography on the adhesion and strength of composite-composite and composite-metal joints[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 164: 107275.
- [5] QIAO Y, SHIN Y, RAMOS J L, et al. Plasma treatment on both adhesive tape and adherends for significantly enhanced CFRTP-related adhesive joints[J]. *Applied Surface Science*, 2024, 649: 159092.
- [6] 睢利铭,王耀耀,刘刚. 喷砂与空气等离子复合表面处理对Ni/CFRP黏接强度的影响及机理研究[J]. *河南工学院学报*, 2025, 33(1): 23-30.
- [7] ZHU J Y, DUAN Y Z. Facile etching of superhydrophobic surface with regular multiple hierarchical micro-nano structures for crowning wettability[J]. *Applied Surface Science*, 2024, 648: 159009.
- [8] CHENG F, YANG G M, ZUO S H, et al. Constructing quasi-vertical carbon nanotubes fiber bridging on aluminum alloy with micro-channels to improve adhesive bonding with carbon fiber reinforced polymer composites[J]. *Polymer Testing*, 2024, 131: 108343.
- [9] ZHANG Y P, LUO S S, WANG Q, et al. Effect of hydrothermal treatment on the surface characteristics and bioactivity of HAP based MAO coating on Ti-6Al-4V alloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 464: 129566.
- [10] LAMBIASE F, YANALA P B, LEONE C, et al. Repairing aluminum-PEEK hybrid metal-polymer joints made by thermo-mechanical joining [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 93: 1-14.
- [11] BAGNATO T, RAVINDRAN A R, MIRABEDINI A, et al. Superior interfacial toughening of hybrid metal-composite structural joints using 3D printed pins[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 168: 107479.
- [12] SU J H, WANG X B, TAN C W, et al. Directionally induced high-density secondary interaction for enhancing the bonding reliability of titanium alloy and CFRTP via functional Schiff base-contained polymer [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 275: 111316.
- [13] 江道勇,邓卫星,陈继红等. 基于双席夫碱配体的Salen-Ni(II)、Cu(II)、Zn(II)配合物的合成与性能研究[J]. *化工新型材料*, 2025, 53(9): 180-186.
- [14] 王涣翔,赵刚,徐剑. 硅烷偶联剂改性金属加热元件提高碳纤维/聚苯硫醚热塑性复合材料电阻焊接强度[J]. *复合材料科学与工程*, 2024 (5): 76-84.
- [15] JIANG S L, HU R Y, LIU X F, et al. Hierarchical microstructure design of CFRP/Al interface with ZnO-nanostructures and modified resin pre-coating: Nano-mechanical interlocking[J]. *Composite Structures*, 2023, 322: 117429.
- [16] ZHENG X K, HU N, SHU L S, et al. Study on shear resistance of aluminum alloy joints enhanced by surface geometry[J]. *Materials*, 2025, 18(9): 1954.
- [17] LIU Z G, LI Y, LIU W D, et al. Enhancing the ultrasonic plastic welding strength of Al/CFRTP joint via coated metal surface and structured composite surface[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 108: 227-237.
- [18] WU M, TONG X T, WANG H, et al. Effect of ultrasonic vibration on adhesive bonding of CFRP/Al alloy joints grafted with silane coupling agent[J]. *Polymers*, 2020, 12(4): 947.
- [19] XU D H, YANG W J, LI X P, et al. Surface nanostructure and wettability inducing high bonding strength of polyphenylene sulfide-aluminum composite structure[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 515: 145996.
- [20] PENG Y F, LI M J, YANG X J. Void formation and suppression in CFRP laminate using newly designed ultrasonic vibration assisted RTM technique[J]. *Composite Structures*, 2024, 329: 117796.
- [21] GUPTA R K, NAMPOOTHIRI J, DHAMODHARAN S, et al. Ultrasonic assisted synthesis of Al-Cu/2 vol% Grp composite and its characterization[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 845: 156087.
- [22] ASHONG A N, LEE M, HONG S T, et al. Refill friction stir spot welding of dissimilar AA6014 Al alloy and carbon-fiber-reinforced polymer composite[J]. *Metals and Materials International*, 2021, 27(4): 639-649.
- [23] WANG B W, LI X P, HU Z L, et al. Functionalization of aluminum alloy surface with reactive epoxide silane to induce ultra-high strength polyamide 6/aluminum alloy composite joint[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 626: 157231.
- [24] QIN Z L, ZENG Y W, HUA Q H, et al. Synergistic effect of hydroxylated boron nitride and silane on corrosion resistance of aluminum alloy 5052[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2019, 100: 285-294.
- [25] 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.