

# 超声辅助注塑结合恒温水浴腐蚀协同提高 A5052-PET 界面结合强度

苏燕,张涛然,卢雪

(泰山科技学院智能工程学院,山东泰安 271000)

**摘要:** 文章研究恒温水浴腐蚀和超声辅助注塑对铝合金 A5052 和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)异质接头界面结合强度的影响,对处理后 A5052 表面进行扫描电子显微镜(SEM)、共聚焦显微镜以及接触角测试,并对界面结合样件进行拉伸剪切测试和 SEM 表征,结合 X 射线光电子能谱(XPS)和傅里叶变换红外光谱(FTIR)等测试手段,系统证明恒温水浴腐蚀和超声辅助注塑手段的有效性。结果表明:恒温水浴腐蚀能在 A5052 表面产生镂空迷宫形貌,增加 A5052 表面粗糙度,有利于增强界面机械互锁;在 A5052 表面产生极性 AlOOH 官能团,促进界面处 OH—O 氢键生成,提高界面处的化学键合作用,将界面结合强度由未处理组的 6.33 MPa 提高至 21.51 MPa。超声辅助注塑可以增加聚合物的流动性,促进界面处的紧密机械互锁,将界面结合强度由未处理组的 6.33 MPa 提高至 15.12 MPa。超声辅助注塑还可通过降低界面处化学反应活化能来提高界面处的化学反应程度,促使界面处产生更多的 OH—O 氢键,腐蚀后超声辅助注塑能将界面结合强度进一步提高为 30.77 MPa。

**关键词:** 注塑成型;超声;拉伸剪切强度;界面;恒温腐蚀

中图分类号: TG496

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0139-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.025

## Synergistic Enhancement of A5052-PET Interfacial Bonding Strength via Ultrasonic-assisted Injection Molding and Isothermal Water Bath Corrosion Treatment

SU Yan, ZHANG Taoran, LU Xue

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

**Abstract:** The study investigated the effects of constant temperature water bath corrosion and ultrasonic-assisted injection molding on the interfacial bonding strength of aluminum alloy A5052 and polyethylene terephthalate (PET) hybrid joints. Scanning electron microscopy (SEM), confocal microscopy, and contact angle measurements were performed on the treated A5052 surfaces. Tensile shear tests and SEM characterization were conducted on the interfacial bonding specimens. Combined with testing methods such as X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), the effectiveness of constant temperature water bath corrosion and ultrasonic-assisted injection molding was systematically demonstrated. The results showed that constant temperature water bath corrosion produced a hollow labyrinth morphology on the A5052 surface, increased the surface roughness of A5052, and facilitated the enhancement of interfacial mechanical interlocking. Additionally, polar AlOOH functional groups were generated on the A5052 surface, promoting the formation of OH—O hydrogen bonds at the interface and improving the chemical bonding at the interface, which increased the interfacial bonding strength from 6.33 MPa for the untreated group to 21.51 MPa. Ultrasonic-assisted injection molding enhanced polymer flowability and promoted tight mechanical interlocking at the interface, increasing the interfacial bonding strength from 6.33 MPa for the untreated group to 15.12 MPa. Furthermore, ultrasonic-assisted injection molding improved the degree of chemical reactions at the interface by reducing the activation energy of interfacial chemical reactions, leading to the formation of more OH—O hydrogen

收稿日期 Submitted date 2025-03-17; 修回日期 Revised date 2025-04-25; 录用日期 Accepted date 2025-05-19

基金项目: 机械工业人才发展服务中心人才发展专项课题(Cmitc2025050); 泰山科技学院2025年度校级一流专业“机械电子工程”建设项目(Tk2025xjylzy001)

联系人, 133110347949@163.com

引用本文: 苏燕,张涛然,卢雪. 超声辅助注塑结合恒温水浴腐蚀协同提高 A5052-PET 界面结合强度[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 139-144.

Citation: SU Y, ZHANG T R, LU X. Synergistic enhancement of A5052-PET interfacial bonding strength via ultrasonic-assisted injection molding and isothermal water bath corrosion treatment[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 139-144.

bonds at the interface. The combination of corrosion treatment followed by ultrasonic-assisted injection molding further increased the interfacial bonding strength to 30.77 MPa.

**Keywords:** Injection molding; Ultrasound; Tensile shear strength; Interface; Isothermal corrosion

新能源汽车的快速发展使轻量化成为设计落地的关键环节,聚合物/金属杂化结构件因兼具金属高强度和聚合物质轻的特点,受到研究人员的广泛关注。采用注塑工艺制备杂化结构,生产效率高,成品率优异,在推崇批量化流水线作业的新能源汽车领域具有无可比拟的优势<sup>[1]</sup>。然而,聚合物与金属在物理化学性质上存在显著差异,注塑成型所得聚合物/金属杂化结构的界面结合强度较低,因此提高异质结构的界面结合强度成为该领域设计的关键<sup>[2-4]</sup>。研究人员利用喷砂<sup>[5-6]</sup>、腐蚀<sup>[7-8]</sup>、阳极氧化<sup>[9-10]</sup>等方法增加界面处的机械互锁以增强界面结合强度,另有研究通过涂覆硅烷<sup>[11]</sup>、席夫碱<sup>[12]</sup>、稀土金属阳离子<sup>[13]</sup>等方法使异质界面产生化学键合来提高杂化结构的界面结合强度。然而,现有前处理方法大多仅侧重于增强机械互锁或化学键合,能够同时增强界面机械互锁和化学键合的前处理方法极为匮乏,寻求简便高效且具有协同作用的界面处理方法迫在眉睫。

超声振动因具有极高能量输入、高频振动及能突破界面屏障效应等优点<sup>[14-15]</sup>受到研究人员的关注。超声辅助振动焊接可在异质结构界面处直接产生C—O—M或C—M型化学键合<sup>[16-18]</sup>,大幅提高界面结合强度。该工艺省略前处理工序,为提高生产效率提供了重要途径。超声辅助在注塑方面的应用主要集中在显著改善聚物流动性、调控热塑性聚合物结晶度等方面<sup>[19]</sup>,虽具有诸多优点,但在注塑界面结合领域仍缺乏相关研究。

为此,本文采用恒温水浴腐蚀法处理铝合金A5052,并在注塑过程中引入超声辅助作用,制备A5052-30%玻璃纤维增强聚对苯二甲酸乙二醇酯(A5052-30% GF/PET)异质接头,系统研究恒温水浴腐蚀对A5052表面结构、粗糙度、化学官能团及润湿性的影响,并在此基础上对接头进行表征,揭示恒温水浴腐蚀和超声辅助作用对界面机械互锁和化学键合的影响机理,实现A5052-30% GF/PET异质界面的超强结合。

## 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;30% GF/PET,  $w_{GF}=30\%$ ,德国巴斯夫股份公司;氯化铁( $FeCl_3$ )、无水乙醇,分析纯,西陇科学股份有限公司;去离子水。

### 1.2 仪器与设备

微型注塑机, HAAKE MiniJet Pro, 美国 ThermoFisher 公司; 万能试验机, MTS-SANS CMT5000, 上海力试科学仪器有限公司; 能量色散光谱仪(EDS), X-stream-2, 英国 Oxford 仪器; 场发射扫描电子显微镜(FE-SEM), Sigma 300, 德国 ZEISS 公司; 共聚焦显微镜, DCM3D, 德国 Leica

公司; 接触角测试仪(CA), 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(XPS), K-Alpha, 美国 Thermo Scientific 公司; 傅里叶变换红外光谱(ATR-FTIR), Nicolet iS20, 美国 Thermo Scientific 公司。

### 1.3 样品制备

#### 1.3.1 A5052表面处理

利用600#砂纸打磨A5052表面2 min,随后在40 °C恒温水浴条件下使用10%  $FeCl_3$ 溶液腐蚀A5052表面5 min,将A5052板材取出后超声振动清洗10 min,之后放入干燥箱中80 °C干燥15 min。表1为表面处理分组。

表1 表面处理分组

Tab.1 Surface treatment grouping

试验编号	试验组简称	前处理	注塑过程
1	未处理	砂纸打磨	无超声辅助
2	腐蚀	$FeCl_3$ 腐蚀处理	无超声辅助
3	未处理+超声	砂纸打磨	超声辅助
4	腐蚀+超声	$FeCl_3$ 腐蚀处理	超声辅助

#### 1.3.2 注塑成型工艺

利用微型注塑机进行注塑,具体步骤为:先将PET颗粒放入烘箱中,120 °C预热3 h。然后将预热完毕的PET填入料筒中,等待5 min至PET颗粒完全熔化。最后把处理好的A5052放入模具内预热30 s,保证铝合金板温度与模具温度一致,随后进行注塑结合。表2为注塑工艺参数。

表2 注塑工艺参数

Tab.2 Injection molding process parameters

项目	数值
熔体温度/°C	270
模具温度/°C	180
注塑压力/MPa	70
注塑时间/s	15
保压时间/s	5

### 1.4 性能测试与表征

力学性能测试:采用万能试验机根据标准 ASTM D5868—01(2023)完成单搭接接头的拉伸剪切性能测试,十字头速度设定为1 mm/min。界面拉伸剪切强度( $Q$ )的计算公式为:

$$Q = \frac{F}{S} \quad (1)$$

式(1)中: $F$ 为复合接头断裂失效时的拉力,N; $S$ 为PET与A5052板材的界面结合面积, $S=50 \text{ mm}^2$ 。

为尽量减少测量误差,每组至少测试5个样本。

**FE-SEM测试:**使用配备有能量色散光谱仪的场发射扫描电子显微镜表征金属表面微观结构和接头的失效模式。

**表面粗糙度测试:**使用共聚焦显微镜测量A5052表面的算术平均粗糙度( $S_a$ )和最大高度粗糙度( $S_z$ ),参考标准为ISO 25178—2:2021。

**水接触角测试:**利用接触角测试仪进行去离子水接触角试验,测试超声振动和恒温水浴腐蚀对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(X射线光斑尺寸为50  $\mu\text{m}$ )测定表面处理后铝合金板材表面吸附官能团的成分。

**FTIR测试:**利用傅里叶变换红外光谱仪检测注塑结合后界面处官能团反应。波数范围为4 000~400  $\text{cm}^{-1}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 A5052的表征分析

图1为不同工艺处理后A5052表面形貌的SEM照片。从图1a可以看出,未处理表面采用600#砂纸沿固定方向进行打磨,表面存在明显的砂纸打磨痕迹。放大观察发现,打磨痕迹中存在少量凹坑,这可能是沙粒磨损产生的压印。从图1b可以看出,恒温水浴腐蚀处理后的A5052板材表面呈现镂空迷宫形貌,该形貌有利于注塑过程PET流入迷宫孔洞中,从而与A5052产生牢固机械互锁,从而提高界面结合强度。

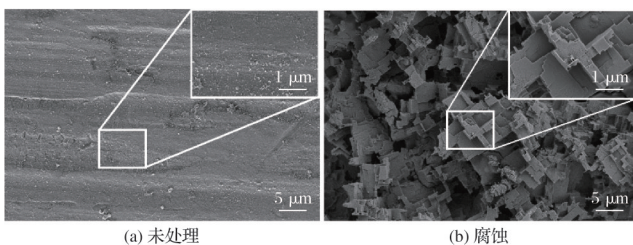


图1 不同工艺处理后A5052表面形貌的SEM照片

Fig.1 SEM images of surface morphology of A5052 treated by different techniques

图2为不同工艺处理后A5052的粗糙度。从图2a可以看出,砂纸打磨后的A5052表面 $S_a$ 为0.67  $\mu\text{m}$ , $S_z$ 为16.44  $\mu\text{m}$ ,表面存在明显的沿Y轴方向的砂纸打磨痕迹。从图2b可以看出,恒温水浴腐蚀后的A5052表面 $S_a$ 增加至1.03  $\mu\text{m}$ , $S_z$ 增加至30.12  $\mu\text{m}$ ,表面除砂纸打磨痕迹外还存在腐蚀产生的凹坑,这正是粗糙度增加的原因。恒温水浴腐蚀产生的镂空迷宫形貌增加铝合金表面微米级粗糙度,有利于实现界面处的产生更强的机械互锁<sup>[20-21]</sup>。

图3为不同工艺处理后A5052的表面官能团。从图3a可以看出,未处理表面O 1s谱检测到的成分为表层自然氧化的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和空气中残留的 $\text{H}_2\text{O}$ 及 $\text{O}^{2-}$ 。从图3b可以看出,恒温水浴腐蚀表面O 1s谱检测到表面

含有 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 基团,空气中残留的 $\text{H}_2\text{O}$ 以及恒温水浴过程在A5052表面产生的 $\text{AlOOH}$ 。WANG等<sup>[22]</sup>发现,铝合金表面热水浴过程中能产生 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,从而增加铝合金表面极性,有利于产生界面处 $\text{OH}-\text{O}$ 类型氢键。与该研究相似,恒温水浴腐蚀条件下A5052表面也能产生类似的 $\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{AlOOH}$ , $-\text{OH}$ 基团的存在大幅增加了A5052表面极性,能够提高铝合金表面的润湿性和化学成键的可能性。

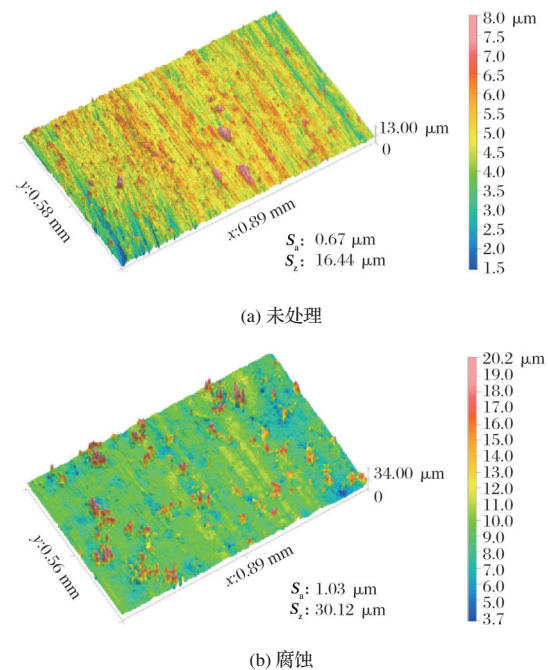
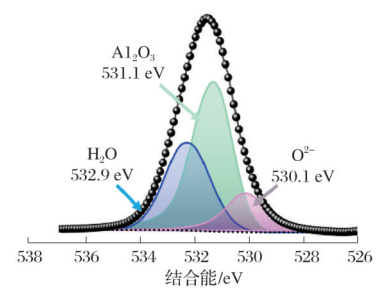
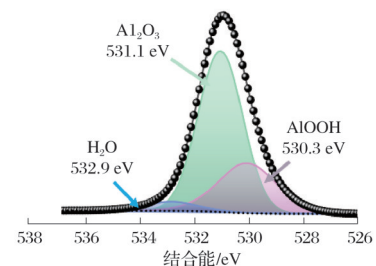


图2 不同工艺处理后A5052的粗糙度

Fig.2 Roughness of A5052 treated by different techniques



(a) 未处理



(b) 腐蚀

图3 不同工艺处理后A5052的表面官能团

Fig.3 Surface functional groups of A5052 treated by different techniques

图4为不同工艺处理后A5052的表面润湿性。从图4可以看出,未处理表面的静态接触角为113.53°,腐蚀后的镂空迷宫结构有利于突破水滴界面张力,从而将接触角降低至72.11°。另一方面恒温水浴腐蚀在铝合金表面产生的AlOOH等极性基团能够与H<sub>2</sub>O极性基团相互吸引,进一步增加处理后铝合金表面润湿性。超声作用将水滴接触角由未处理的113.53°降低至85.52°,可能是高频的超声空化作用降低水滴的表面张力,从而增加铝合金表面润湿性<sup>[23]</sup>。腐蚀+超声处理后的接触角进一步降低为28.38°,这说明超声空化和极性基团以及表面镂空迷宫结构的亲水作用相互促进,进一步增加铝合金表面润湿性。

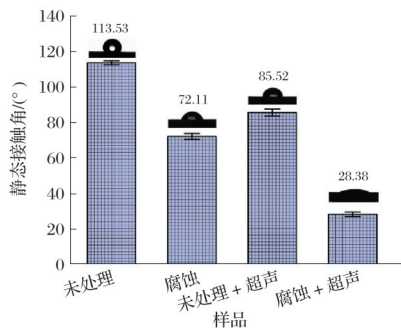
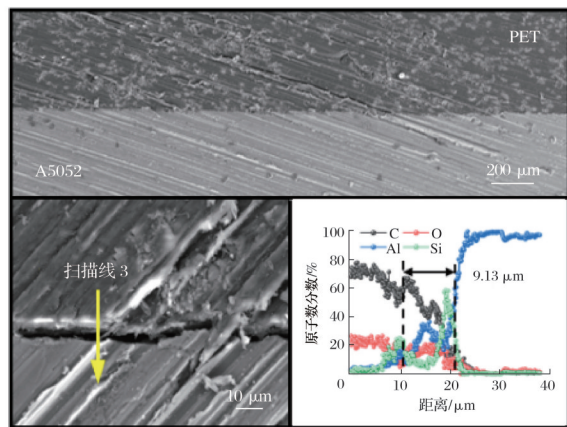


图4 不同工艺处理后A5052的表面润湿性

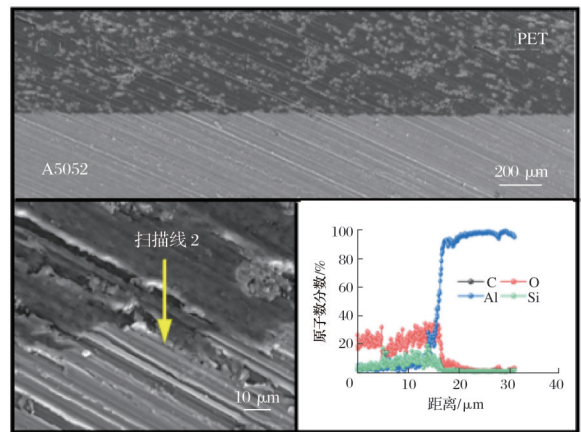
Fig.4 Surface wettability of A5052 treated by different techniques

## 2.2 接头的性能及表征分析

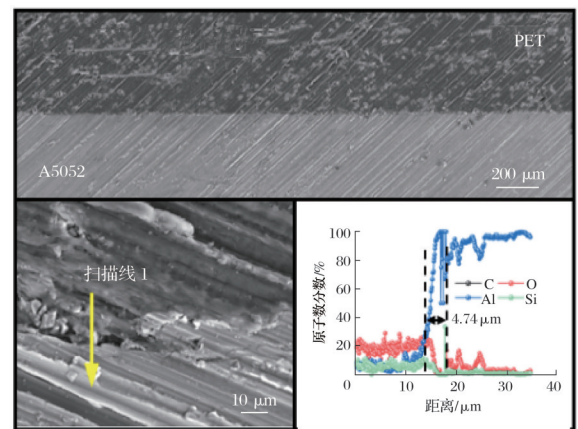
图5为不同工艺处理后接头截面形貌的SEM照片。从图5a可以看出,未处理界面存在宽度达9.13 μm的缝隙,原因在于制样过程中的机械振动使A5052与PET发生分离,这也说明未处理界面的机械互锁作用较差。从图5b可以看出,腐蚀界面产生了紧密的机械互锁,界面处无缝隙产生,这说明腐蚀产生的镂空迷宫形貌能大幅提高界面结合强度。从图5c可以看出,未处理+超声得到的界面缝隙降低为4.74 μm,且大部分的界面产生紧密机械互锁,相比于未处理界面有较大改善。结合图4中超声增加A5052表面润湿性的特性可知,超声能够增加PET在A5052表面的流动速率,增加界面的机械互锁。从图5d可以看出,腐蚀+超声组界面结合也十分紧密,实现了完全的机械互锁。



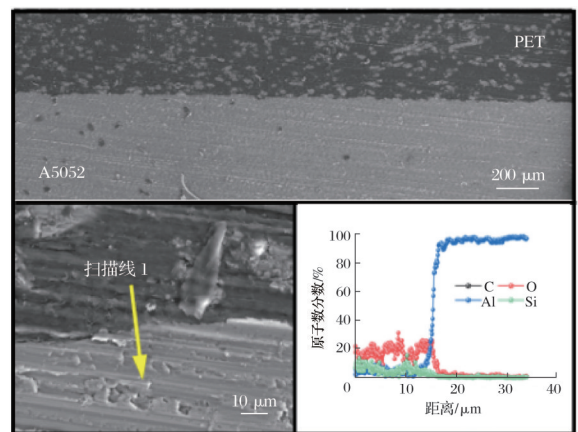
(a) 未处理



(b) 腐蚀



(c) 未处理+超声



(d) 腐蚀+超声

图5 不同工艺处理后接头截面形貌的SEM照片

Fig.5 SEM images of cross-sectional morphology of joint treated by different techniques

图6为不同工艺处理后接头的拉伸剪切强度。从图6可以看出,未处理接头的拉伸剪切强度仅为6.33 MPa,恒温水浴腐蚀将接头的界面结合强度提升为21.51 MPa,相比于未处理接头提高239.81%。未处理+超声接头的拉伸剪切强度增加至15.12 MPa,相较于未处理接头强度增加138.86%。腐蚀+超声接头的界面结合强度为30.77 MPa,相较于未处理接头强度增加386.10%。值得注意的是,图5b和图5d中腐蚀和腐蚀+超声两组试样均实现紧密的机械互锁,腐蚀+超声相比腐蚀接头界面结合强度却提高了

43.05%,原因可能是腐蚀+超声界面产生了更强的化学键合作用。为了验证此结论,对不同工艺处理界面进行FTIR官能团检测。

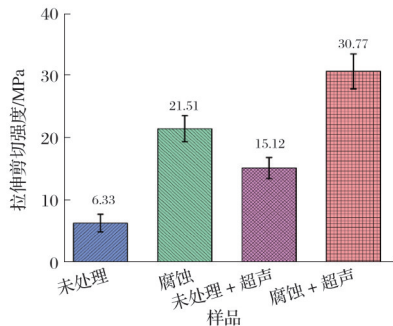
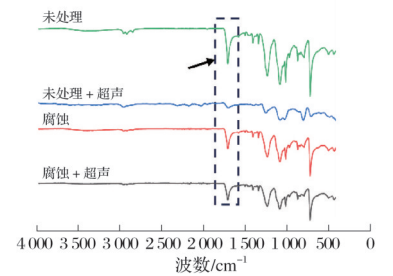


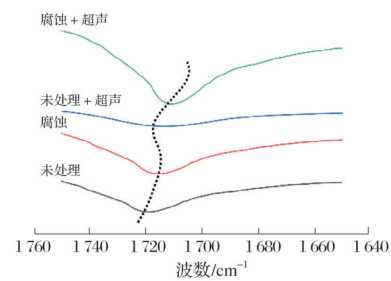
图6 不同工艺处理后接头的拉伸剪切强度  
Fig.6 Tensile and shear strength of joints treated by different techniques

图7为不同工艺处理后接头的界面官能团。PET的特征官能团C=O已在图7a中标注,为了研究腐蚀和超声辅助注塑对PET的官能团的影响,进行精细谱分析,如图7b所示。从图7可以看出,未处理组C=O峰位于 $1720\text{ cm}^{-1}$ 处,未处理+超声组C=O位于 $1719\text{ cm}^{-1}$ 处,两者没有明显区别,这说明未处理组和未处理+超声组界面处均未发生化学键合。对比未处理组、腐蚀组和腐蚀+超声组,三组的C=O官能团峰分别位于 $1720$ 、 $1715$ 、 $1711\text{ cm}^{-1}$ 处,C=O发生持续蓝移。这说明AlOOH能在界面处与PET中的C=O产生OH—O类型的氢键,实现界面处的氢键键合<sup>[24]</sup>。超声辅助注塑降低了界面处化学反应活化能,促进了界面处氢键的反应,促进了界面的进一步化学键合<sup>[25]</sup>,这正是腐蚀+超声组界面结合强度高于腐蚀组的原因。

为了对比验证图6界面结合强度的正确性,对拉伸剪切破坏后试样的断面形貌进行表征。图8为不同工艺处理后接头断面的SEM照片。从图8a可以看出,未处理组铝合金表面附有少量的碎屑状PET,黏附面积为10%,这说明界面发生了90%的脱黏破坏和10%的薄层黏附破坏。从图8b可以看出,恒温水浴腐蚀组铝合金表面大约有50%面积附有厚层PET,且PET中存在大量断裂的纤维。界面发生50%的脱黏破坏和50%的厚层黏附破坏以及少量纤维剪切破坏。从图8c可以看出,相比未处理组,未处理+超声组铝合金表面黏附的PET碎块体积有所增加,且黏附面积增加至15%,界面发生85%的脱黏破坏和15%的薄层黏附破坏。从图8d可以看出,腐蚀+超声组表面大约有90%的面积附有厚层PET,PET中存在大量剪切破坏的纤维。界面发生了10%的脱黏破坏和90%的厚层黏附破坏以及大量纤维剪切破坏。铝合金表面附着的PET形貌与界面结合强度相关,附着PET的厚度和面积越大,界面拉伸剪切强度越高。



(a) 全谱分析



(b) 精细谱分析

图7 不同工艺处理后接头的界面官能团  
Fig.7 Interface functional group of joints treated by different techniques

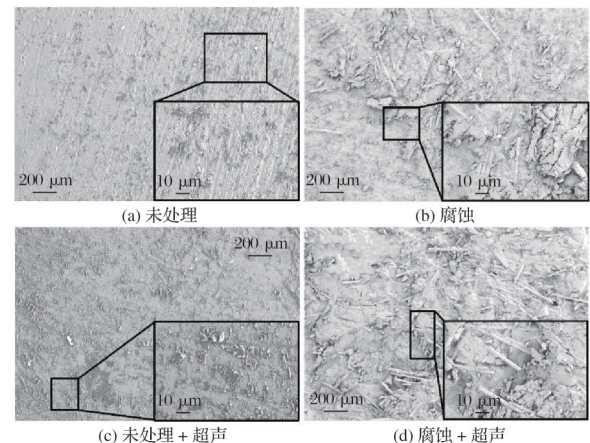


图8 不同工艺处理后接头断面的SEM照片  
Fig.8 SEM images of joint cross-sections treated by different techniques

### 3 结论

恒温水浴腐蚀能在A5052表面产生镂空迷宫形貌,增加A5052表面粗糙度,有利于增强界面机械互锁;在A5052表面产生了极性AlOOH,促进了界面处OH—O氢键生成,提高了界面处的化学键合作用,从而大幅提高A5052与PET的界面结合强度,将界面结合强度由未处理组的6.33 MPa提高至21.51 MPa。超声辅助注塑可以增加聚合物的流动性,促进界面处的紧密机械互锁,将界面结合强度由未处理组的6.33 MPa提高至15.12 MPa。值得注意的是,超声辅助注塑还可通过降低界面处化学反应活化能来提高界面处的化学反应程度,促使界面处产生更多的OH—O氢键,腐蚀后超声辅助注塑能够将界面结合强度

进一步提高至30.77 MPa。这对于提高界面结合强度、减少前处理工步、提高注塑异质结构生产效率均具有重要意义。

### 参考文献

- [1] 任艳梅. 基于CAE技术的油箱保护罩注塑成型优化研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(4): 171-176.
- [2] 陈俊祥, 傅南红, 王瑞雪, 等. 表面结构对金属/塑料复合注射成型界面结合强度的影响[J]. 中国塑料, 2020, 34(4): 49-53.
- [3] 刘傅文, 李焘平, 官宁宁, 等. 界面微构对注射成型铝塑复合件性能的影响研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(12): 148-155.
- [4] PAN W F, SUN L Y, MU A L, et al. Interface constitutive modeling and failure propagation mechanisms of integrated polymer-metal hybrid (PMH) structures[J]. Composite Structures, 2023, 306: 116593.
- [5] WEI J L, SUN L Y, PAN W F. Study on the interfacial properties of bi-material structures manufactured by injection molding after compression[J]. Composite Structures, 2023, 309: 116740.
- [6] SU X, GU J Y, DIAO Y, et al. Improvement of surface properties of fiber-reinforced polymer composites by metallization strategies: Technologies, challenges and prospects[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 36: 6555-6577.
- [7] AKÇIL M, AKÇA Y. The effect of Sc element Modification on the corrosion patterns and wear properties of AA5754 aluminium alloy[J]. Materials Letters, 2025, 394: 138472.
- [8] LAYEC J, ANSART F, DULUARD S, et al. Development of new surface treatments for the adhesive bonding of aluminum surfaces[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2022, 117: 103006.
- [9] CHEN J, DU K P, CHEN X M, et al. Influence of surface microstructure on bonding strength of modified polypropylene/aluminum alloy direct adhesion[J]. Applied Surface Science, 2019, 489: 392-402.
- [10] DE S ARAUJO J V, CHEN J H, COSTA I, et al. Localized corrosion in anodized aluminium alloys: The role of constituent particle-induced defects in anodic films[J]. Corrosion Science, 2025, 252: 112961.
- [11] 卢文玉, 蔡红珍, 于文凡, 等. 硅烷偶联剂对高密度聚乙烯/甜高粱渣复合材料性能的增强机制[J]. 塑料科技, 2021, 49(7): 61-65.
- [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] JIANG N Y, LYU H X, LI Y Z, et al. Enhanced interfacial adhesion of CF/PEEK-titanium hybrid laminates via rare-earth coordination interaction[J]. Composites Science and Technology, 2023, 239: 110070.
- [14] MA Z W, BOURQUARD C, GAO Q M, et al. Controlled tough bioadhesion mediated by ultrasound[J]. Science, 2022, 377: 751-755.
- [15] 张金, 邓辰杰, 雒泰民, 等. CFRP超声振动铣削辅助装备及智能加工研究进展[J]. 机械工程学报, 2025, 61(7): 24-48.
- [16] CALABRESE L, CICALA G, DI BELLA G, et al. Optimisation of ultrasonic welding process of carbon/epoxy composites using nylon-based or PES thermoplastic interlayers[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 275: 111318.
- [17] KHAN A S, LIU F, DONG P. Joining of metal and non-polar polypropylene composite through a simple functional group seeding layer[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 85: 90-100.
- [18] 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.
- [19] ZOU D J, YU T M, DUAN C Z. Effect of ultrasonic vibration time on the molecular stacking structure and mechanical properties of the injection molding workpiece[J]. Polymer Engineering & Science, 2022, 62(8): 2498-2510.
- [20] 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.
- [21] 姬妍, 郭林伟, 艾朝霞. 金属材料与环氧树脂基复合材料黏接界面预处理分析[J]. 粘接, 2022, 49(10): 40-44.
- [22] WANG S Y, WANG W Q, XU Y X, et al. Enhancing bonding synergy and mechanical response of metal/composite hybrid joints through physicochemical surface pretreatment[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 315: 117923.
- [23] 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.
- [24] ZHAO S J, KIMURA F, WANG S H, et al. Chemical interaction at the interface of metal-plastic direct joints fabricated via injection molded direct joining[J]. Applied Surface Science, 2021, 540: 148339.
- [25] POKHREL N, VABBINA P K, PALA N. Sonochemistry: Science and engineering[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 29: 104-128.