

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.01.012

黏结剂辅助微流控芯片异种键合及可行性探究

李疏桐¹, 刘坡², 黄继杰², 韩鹏彪¹

(1. 河北科技大学材料科学与工程学院, 河北省材料近净成形技术重点实验室, 石家庄 050018;

2. 桂林航天工业学院机电工程学院, 广西桂林 541004)

摘要: 以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚苯乙烯(PS)、铝合金 Al5052 为研究对象, 采用黏结剂与热压键合相结合的方法, 分别进行了 PMMA-PS、PMMA-Al5052 异种键合正交实验。旨在探讨键合层厚度及表观形貌的变化规律, 研究键合温度、压力和时间对异种键合强度的影响。结果表明: 键合层厚度随温度和压力的增大而减小, 而时间对键合层厚度无明显影响; 聚酰亚胺(PI)辅助 PMMA-PS 和 PMMA-Al5052 的键合强度受时间影响最大, 温度次之, 压力最小; 而溶解 PMMA 粉末的丙酮溶液[丙酮溶液(PMMA)]辅助 PMMA-Al5052 的键合强度受压力影响最大, 温度次之, 时间最小; 同参数下 PMMA-PS 的键合强度远高于 PMMA-Al5052。分别确立了异种键合的最优参数并得到了对应的键合强度: PI 辅助 PMMA-PS 键合的最优参数为 105 °C, 50 min, 2.5 MPa, 对应键合强度 0.87 MPa; PI 辅助 PMMA-Al5052 键合的最优参数为 110 °C, 50 min, 1.25 MPa, 对应键合强度 0.21 MPa; 丙酮溶液(PMMA)辅助 PMMA-Al5052 键合的最优参数为 110 °C, 2.5 MPa, 20 min, 对应键合强度 0.41 MPa, 均高于正交实验设计方案中的所有结果。参数一定时, PMMA-PS 的键合强度远高于 PMMA-Al5052 的键合强度。采用丙酮溶液(PMMA)辅助键合 PMMA-Al5052 时, 键合强度高于 PI 辅助的键合强度。

关键词: 异种键合; 黏结剂; 聚甲基丙烯酸甲酯; 聚苯乙烯; Al5052; 键合层形貌; 键合强度

中图分类号: TQ317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)01-0077-07

Investigation on dissimilar bonding and feasibility of binder-assisted microfluidic chip

LI Shutong¹, LIU Po², HUANG Jijie², HAN Pengbiao¹

(1. Hebei Key Laboratory of Near-Net Forming Technology of Materials, College of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. Guilin University of Aerospace Technology, School of Mechanical Engineering, Guilin 541004, China)

Abstract : Polymethyl methacrylate (PMMA), polystyrene (PS) and aluminum alloy Al5052 were used as the research objects. The orthogonal experiments of PMMA-PS and PMMA-Al5052 dissimilar bonding were carried out by combining binder and hot pressing bonding. The purpose of this study is to investigate the variation of the thickness and apparent morphology of the bonding layer, and to study the effects of bonding temperature, pressure and time on the strength of dissimilar bonding. The results show that the thickness of the bonding layer decreases with the increase of temperature and pressure, while the time has no obvious effect on the thickness of the bonding layer. The bonding strength of polyimide (PI) assisted PMMA-PS and PMMA-Al5052 is most affected by time, followed by temperature and pressure. The bonding strength of PMMA-Al5052 assisted by acetone solution (PMMA) is most affected by pressure, followed by temperature and time. The bonding strength of PMMA-PS is much higher than that of PMMA-Al5052 under the same parameters. The optimal parameters of dissimilar bonding were established and the corresponding bonding strength was obtained. The optimal parameters of PI assisted PMMA-PS bonding are 105 °C, 50 min, 2.5 MPa, and the corresponding bonding strength is 0.87 MPa. The optimal parameters of PI assisted PMMA-Al5052 bonding are 110 °C, 50 min, 1.25 MPa, and the corresponding bonding strength is 0.21 MPa. The optimal parameters of PMMA-Al5052 bonding assisted by acetone solution (PMMA) are 110 °C, 2.5 MPa, 20 min, and the corresponding bonding strength is 0.41 MPa, which are higher than all the results in the orthogonal experimental design scheme. When the parameters are constant, the bonding strength of PMMA-PS is much higher than that of PMMA-Al5052. The bonding strength of PMMA-Al5052 assisted by acetone solution (PMMA) is higher than that assisted by PI.

Keywords : heterogenic bonding ; binder ; polymethyl methacrylate ; polystyrene ; Al5052; bonding layer morphology ; bonding strength

通信作者: 韩鹏彪, 教授, 主要从事先进材料连接与聚合物成形研究

收稿日期: 2023-10-29

引用格式: 李疏桐, 刘坡, 黄继杰, 等. 黏结剂辅助微流控芯片异种键合及可行性探究[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(1): 77-83.

LI Shutong, LIU Po, HUANG Jijie, et al. Investigation on dissimilar bonding and feasibility of binder-assisted microfluidic chip[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(1): 77-83.

微流控芯片技术是将微流控技术集成在一个整体可控的微小芯片上,自20世纪90年代微流控芯片的概念提出后,其微型化带来了良好的应用前景,广泛应用于化学、生物和医学等领域,逐渐成为科研前沿最受关注的方向之一^[1]。得益于聚合物材料的低成本、良好的光学特性和优良的生物相容性,微流控芯片通常采用其进行制备,其中较为成熟的包括聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚苯乙烯(PS)及聚二甲基硅氧烷(PDMS)等^[2]。

目前,微流控芯片大多使用同种聚合物材料制备,其功能较为单一,应用范围往往受到限制。采用异种材料制备微流控芯片,可以实现不同材料的优异性能组合,提高设计和生产的灵活性,有很高的技术和经济价值,成为当前的一个研究热点^[3]。Fan等^[4]进行了PMMA-PS异种键合,结果表明键合强度随温度和压力的升高而增大。Song等^[5]采用质量分数为2.5%的PMMA溶液作为黏结剂,在室温下将PMMA键合到聚碳酸酯薄膜上,测试发现其键合强度高,尺寸损失小。王澄瑶等^[6]将环烯烃与聚二甲基硅氧烷进行键合,为太赫兹细胞水平的生物效应研究提供了高效便捷的实验环境。王良^[7]将紫外线进行表面处理后的金属薄膜与PMMA键合,发现获得的金属薄膜与PMMA基底的结合强度较高,且金属薄膜的一致性较好。Momber等^[8]进行了聚氨酯、聚硅氧烷和环氧树脂与船舶不锈钢支架的接缝连接,发现即使在加速老化环境下,其拉伸强度和剪切强度也能达到设计载荷的标准。此外,根据文献报道,轻质金属与聚合物在黏结剂辅助下可实现异种键合,有望用于汽车及航空宇航领域,实现结构减重,具有替代部分金属构件的良好前景^[9-10]。

目前来看,对异种键合影响较大的参数仍是温度、压力和时间。为获得较好的键合效果,往往需要采用黏结剂的辅助,而且键合层形貌特征决定了键合质量与键合强度。然而,据现有文献显示,对键合层表观形貌的研究仍相对较少。鉴于此,笔者以PMMA、PS和铝合金Al5052为研究对象,采用多组参数进行异种键合实验,分析键合层表观形貌特征,探讨其与键合强度的内在关联,评估异种聚合物键合以及铝基金属与聚合物键合的可行性,为异种材料键合提供一定的理论支撑和参考。

1 实验部分

1.1 原材料

PMMA: 50 mm×25 mm×2 mm 试片,深圳市新

涛亚克力有限公司;

PMMA 粉: 颗粒度为 14~15 μm, 东莞市鸿泰塑胶制品有限公司;

PS: 50 mm×25 mm×2 mm 试片, 启东市新联塑料制品有限公司;

Al5052: 50 mm×25 mm×2 mm 试片, 河南明泰铝业股份有限公司;

聚酰亚胺(PI)热塑液: 东莞市展阳高分子材料有限公司;

丙酮、HCl、NH₃·H₂O: 分析纯, 四川西陇科学有限公司;

NaOH: 粉末, 四川西陇科学有限公司。

1.2 仪器及设备

超声波清洗机: JP-100S, 深圳市洁盟清洗设备有限公司;

热键合机: MT TWB-100, 苏州美图半导体技术有限公司;

电磨机: 413-10 F, 德国科麦斯有限公司;

研磨抛光机: MP-2B, 莱州市蔚仪试验器械制造有限公司;

电子分析天平: FA2004, 上海舜宇恒平科学仪器有限公司;

光学显微镜(OM): SOPTOP-ICX41M, 宁波舜宇仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM): VEGA3SBH, 泰思肯(中国)有限公司;

万能拉伸试验机: SUNS-UTM5105, 深圳三思纵横科技股份有限公司。

1.3 试样制备

(1) 溶液刻蚀 Al5052 的制备。

分别制备质量分数均为8%的NaOH溶液、盐酸和氨水,均加热溶液至50℃。将用去离子水清洗并干燥后的Al5052试片依次置于分别盛放有3种溶液的烧杯中,按图1所示依次进行刻蚀。

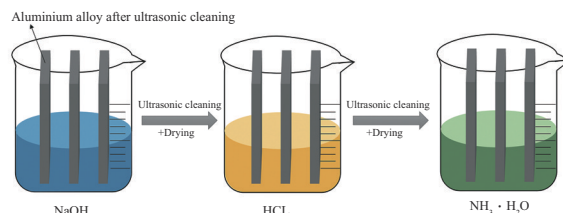


图1 刻蚀流程示意图

Fig. 1 Diagram of etching process

(2) 黏结剂的制备。

为提高键合质量,采用两种黏结剂辅助键合,分别是PI热塑液和溶解PMMA粉末的丙酮溶液[简称丙酮溶液(PMMA)]。用电子分析天平称量10 g PMMA粉末与150 g丙酮,使两者质量比为1:15,将PMMA粉末倒入丙酮溶液,使其预膨胀并不断搅拌,直到没有固体悬浮即可。

(3) 键合试样的制备。

键合时每组试片采用图2方式进行搭接,然后置于热键合机真空室下压头端面的中心区域,如图3所示。实验前,将黏结剂均匀涂覆于相应组次试片搭接区域。实验完成后,待试样在反应室降至室温后取出。

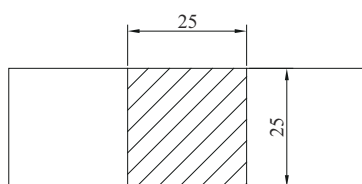


图2 键合搭接区域示意图

Fig. 2 Diagram of bonding lap area

1.4 测试与表征

OM测试:用电磨机从键合区域切取小块试样,依次经过打磨、抛光、清洗和干燥,观察并测量键合层厚度。

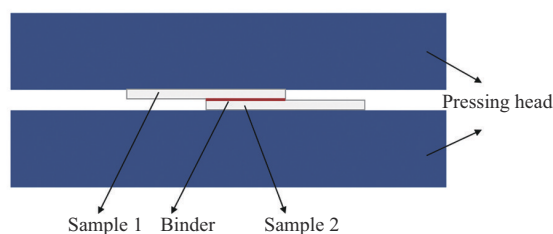


图3 键合示意图

Fig. 3 Diagram of bonding

SEM测试:将经过OM测试后的试样进行喷金处理,对键合层微观形貌进行观察。

剪切强度测试:用拉伸法根据GB/T 1040.1-2018测量键合试样的剪切强度,拉伸速率1 mm/min。每个用于键合的试片尺寸均为50 mm×25 mm×2 mm,键合区域为25 mm×25 mm。

2 结果与讨论

2.1 键合参数对异种材料键合层形貌的影响

图4和图5分别为PMMA-PS键合层的OM和部分试样的SEM形貌。在图4中,分别经过横向和纵向对比,发现各组试样键合层厚度变化趋势一致。横向对比1[#]~3[#],4[#]~6[#],7[#]~9[#]的键合层发现,温度不变时,键合压力越大,键合层越薄,而键合时间对键合层厚度变化无明显影响。纵向对比1[#],4[#],7[#]组,2[#],5[#],8[#]组,3[#],6[#],9[#]组的键合层发现,压力不变

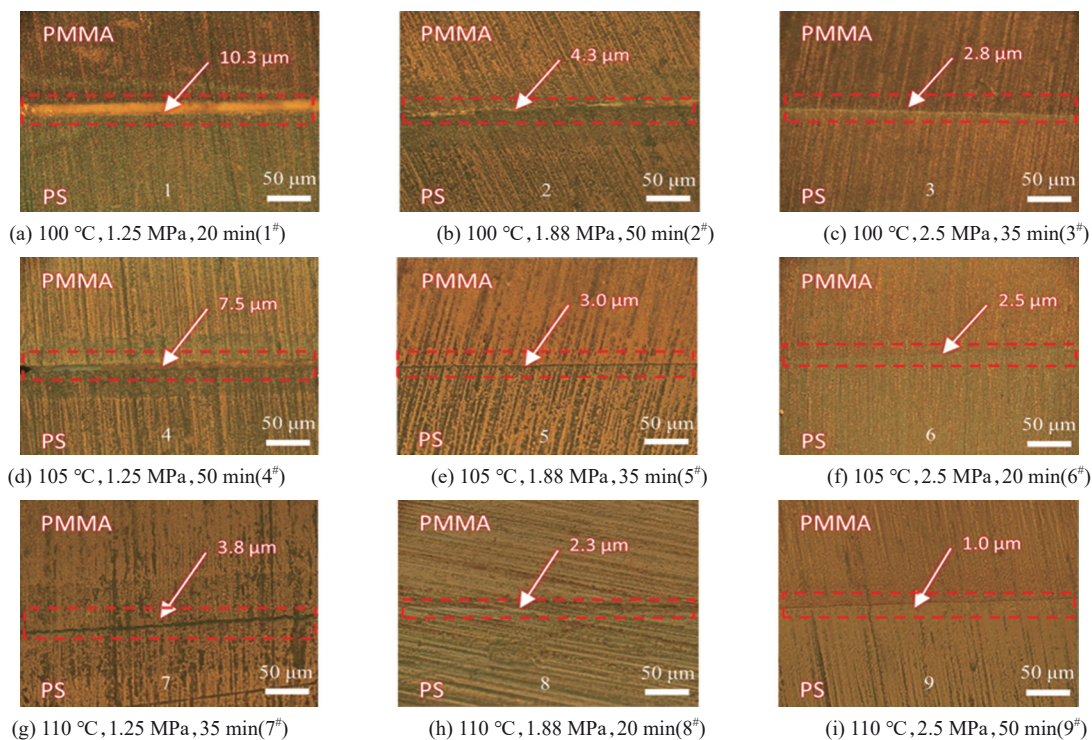


图4 PMMA-PS(PI)键合层OM形貌

Fig. 4 OM morphology of PMMA-PS (PI) bonding layer

时,温度越高,键合层越薄,时间参数对键合层厚度也无明显影响。

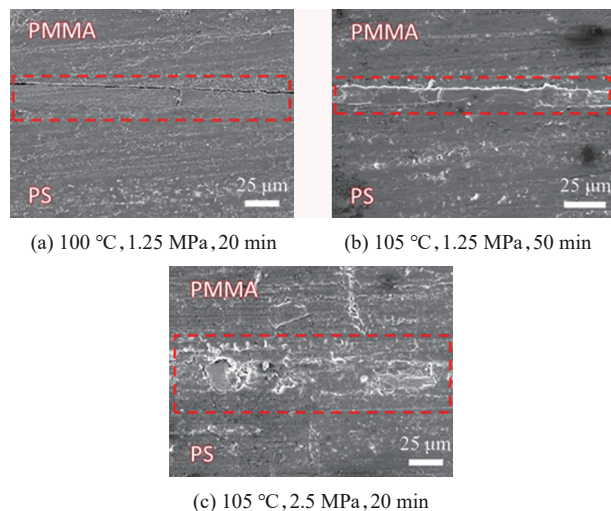


图5 PMMA-PS(PI)部分键合层SEM形貌

Fig. 5 Partial SEM morphology of PMMA-PS (PI) bonding layer

根据图5a可以看到,1#实验对应的键合层较为平直,但在PMMA侧以及键合层内均有明显裂纹,导致键合不牢固,键合强度低。通过差示扫描量热法测得PMMA和PS的玻璃化转变温度(T_g)分别为105 °C和102 °C,键合温度100 °C更接近PS的 T_g ,而PMMA不能很好地和PI发生反应,导致键合不牢

固,键合强度低。升高温度至105 °C,如图5b所示,键合层与母材上下界面呈现不规则锯齿状,说明连接良好。当温度保持不变,压力增加到2.5 MPa时,键合层与母材逐渐融为一体,界面难以辨别,如图5c所示。PI,PMMA和PS均为高分子聚合物材料,在较高的温度和压力下,部分表面发生热降解,分子链裂解后重新相互缠结,发生交联反应,使PI分子分别与上下两试片生成了PI/PMMA共聚物和PI-g-PS接枝共聚物,附着在两试片上,所以键合强度也比较高^[11-12]。

图6~图7分别为PMMA-Al5052采用PI和丙酮溶液(PMMA)辅助键合的键合层OM形貌,图8为部分试样SEM形貌。通过横向和纵向对比图6~图7的键合层厚度,发现其变化规律与PI辅助键合PMMA-PS一致,即键合层的厚度随温度和压力的增大而逐渐变薄,键合时间对键合层厚度影响不明显。在同一参数下,丙酮溶液(PMMA)辅助键合的键合层厚度远大于PI辅助的键合层,且相较之下厚度分布不均匀,部分界面平整度差,呈波浪特征。

采用PI辅助键合时,PMMA与其生成了PI/PMMA共聚物,实现了二者的良好连接,共聚物界面呈波浪形,但PI与Al5052的界面较为平直,且裂

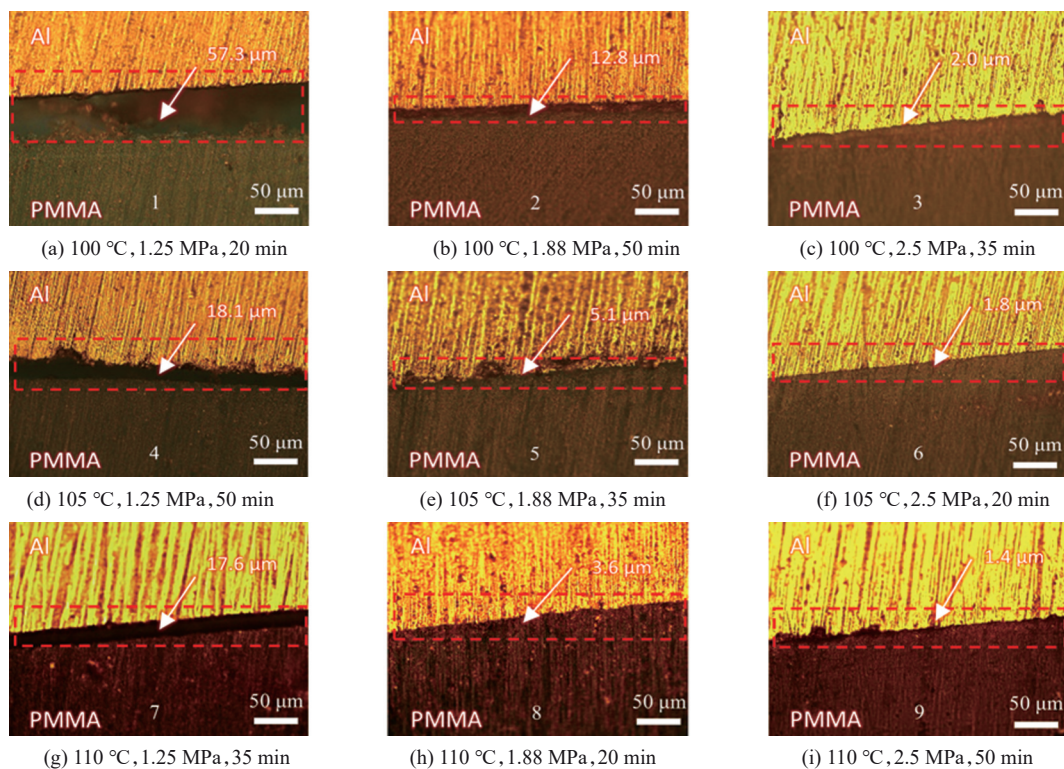


图6 PMMA-Al5052(PI)键合层OM形貌

Fig. 6 OM morphology of PMMA-Al5052(PI) bonding layer

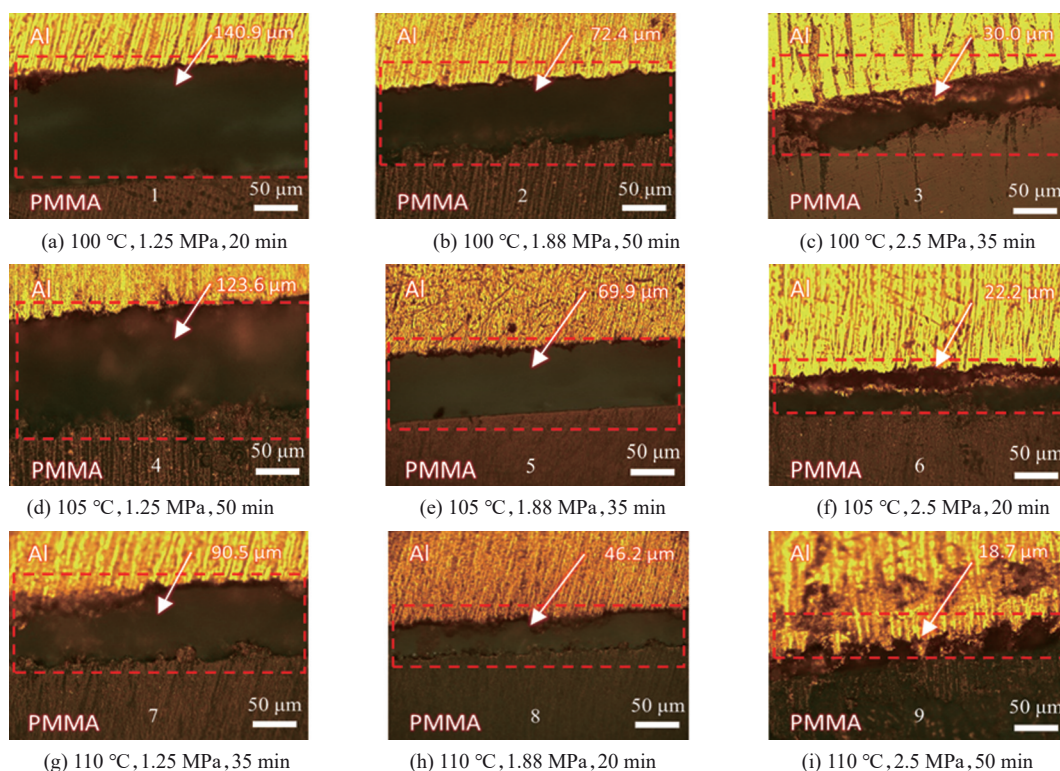


图7 PMMA-Al5052[丙酮溶液(PMMA)]键合层OM形貌

Fig. 7 OM morphology of PMMA-Al5052[acetone solution (PMMA)] bonding layer

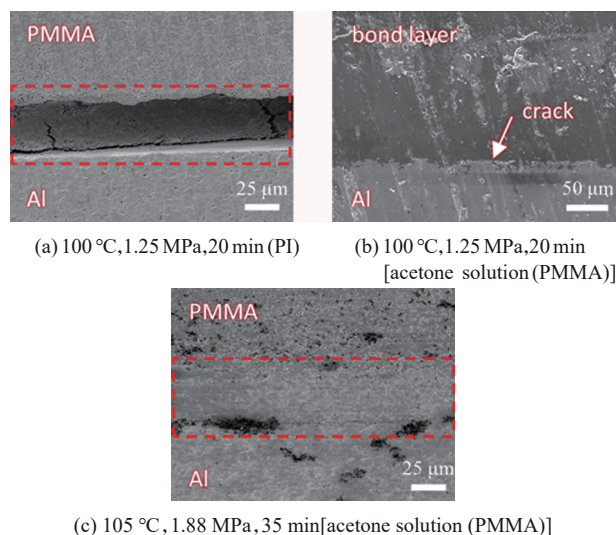


图8 PMMA-Al5052部分键合试样SEM形貌

纹较为明显。这是因为刻蚀后的Al5052表面大部分出现了大量微米级孔隙,表面粗糙度增加,但孔隙分布不均匀,部分区域并没有被刻蚀,呈现出母材的原始特征,如图9b中白色框选区域所示^[13]。PI黏结剂为通透均相黏稠液体,分子量大,难以与未被刻蚀的Al5052母材相结合,在该侧形成了裂纹,降低了键合质量^[14]。图8b为同参数下丙酮溶液(PMMA)辅助键合层,由于其键合层厚度较大,在高

倍下无法观测到全貌,采用600倍进行观察,同样在键合层与Al5052的界面发现少量裂纹。在相同黏结剂辅助下,升高温度和压力后发现裂纹宽度大大减小,如图8c所示。由此可见升温加压有利于PMMA粉末进入Al5052刻蚀形成的孔隙,与之形成机械互锁,提高键合强度。

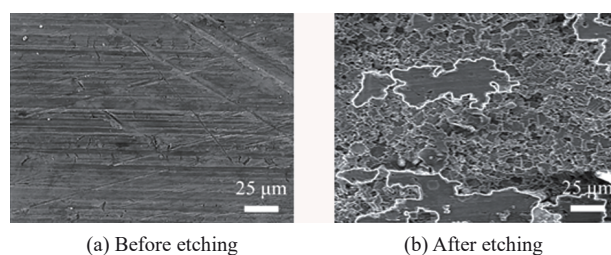


图9 Al5052 SEM形貌

Fig. 9 SEM morphology of Al5052

2.2 不同键合参数对异种材料键合强度的影响

根据各组实验中各因素(因素A、B、C分别为温度、压力、时间)对应的键合强度值,计算得到每组异种键合方案中三个因素对应的均值 K_i 和各参数条件对应的极差 R ,见表1~表3。绘制了强度均值随参数变化趋势图,如图10所示。PMMA-PS键合强度随温度升高略微增加后快速降低,在105 °C时达到了最大值,为0.65 MPa。该温度达到了PMMA和

表1 PMMA-PS(PI)键合强度正交实验结果

Tab. 1 PMMA-PS(PI) bonding strength based on orthogonal experimental results

parameter	A	B	C
K_1	0.61	0.55	0.64
K_2	0.65	0.55	0.40
K_3	0.43	0.58	0.65
R	0.22	0.03	0.25

表2 PMMA-AI5052(PI)键合强度正交实验结果

Tab. 2 PMMA-AI5052(PI) bonding strength based on orthogonal experimental results

parameter	A	B	C
K_1	0.05	0.10	0
K_2	0.10	0.09	0.09
K_3	0.11	0.07	0.17
R	0.06	0.03	0.17

表3 PMMA-AI5052[丙酮溶液(PMMA)]键合强度正交实验结果

Tab. 3 PMMA-AI5052 [acetone solution(PMMA)] bonding strength based on orthogonal experimental results

parameter	A	B	C
K_1	0.13	0.05	0.21
K_2	0.20	0.22	0.20
K_3	0.27	0.33	0.18
R	0.14	0.28	0.03

PS的 T_g ,使得PMMA和PS在分子布朗运动和链段的蠕动作用下,大分子穿越两种物质之间的界面相互扩散,分子链交织在一起,实现了更好的键合^[15]。PMMA-PS键合强度随压力的升高而平缓增加,随时间呈现先降低后增加趋势。极差 $C>$ 极差 $A>$ 极差 B ,即时间对键合强度的波动影响最大,压力的影响最小。由表1可知,正交实验结果显示 $K_{A2}>K_{A1}>K_{A3}$, $K_{B3}>K_{B2}=K_{B1}$, $K_{C3}>K_{C1}>K_{C2}$,即 $A_2B_3C_3$ (105 °C, 2.5 MPa, 50 min)是PMMA-PS键合的最佳实验方案。该参数下键合试样的剪切强度为0.87 MPa,高于正交实验设计方案中的所有结果。

由图10可知,两组PMMA-AI5052的键合强度均随温度升高而升高。温度超过105 °C后,采用PI辅助键合的剪切强度涨幅较小。对于压力和时间,键合强度变化趋势呈完全相反的变化趋势。根据极差大小确定两组实验的最佳参数,分别为 $A_3B_1C_3$ (110 °C, 1.25 MPa, 50 min)(PI)和 $A_3B_3C_1$ (110 °C, 2.5 MPa, 20 min)[丙酮溶液(PMMA)],进行键合实验测得强度分别为0.21 MPa(PI)和0.41 MPa[丙酮溶液(PMMA)],高于正交实验设计方案中的所有结果。当键合参数一定时,PMMA-PS的键合强度远高于PMMA-AI5052的键合强度。正如前文中提到,

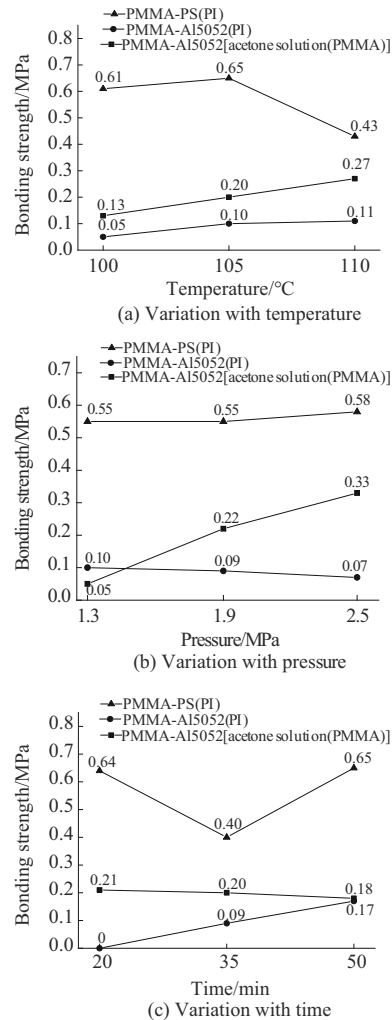


图10 键合强度均值变化曲线图

Fig. 10 Variation curve of bonding strength mean value

PMMA与PS在加热加压下与键合层中的聚酰亚胺发生反应,形成了PI/PMMA共聚物和PI-g-PS接枝共聚物,一定程度上提高了键合强度。

如前所述,在进行PMMA-AI5052键合时,PI、丙酮溶液和PMMA粉末均不与AI5052发生共聚反应,而是PI热塑液渗入到AI5052表面刻蚀后形成的很多微米级孔洞,形成黏着磨损^[16],键合过程中PI与PMMA试片生成了PI/PMMA共聚物,使PMMA-AI5052键合得以完成。另外,丙酮溶剂沸点较低,在加热加压环境下大部分发生汽化,使PMMA粉末扩散到AI5052孔隙中形成联锁,并与PMMA基片形成良好贴合和机械互锁,因此形成的结合强度高于采用PI辅助键合强度^[13]。

3 结论

研究了在不同键合参数下,键合层厚度、表面形貌及键合强度的变化规律。通过实验分析,得出

了以下结论:

(1) 键合层厚度随温度和压力的增大逐渐变薄,时间参数对键合层厚度无明显影响。

(2) PI辅助键合 PMMA-PS 和 PMMA-AI5052 的键合强度受时间影响最大,温度次之,压力最小;丙酮溶液(PMMA)辅助键合 PMMA-AI5052 的键合强度受压力影响最大,温度次之,时间最小。

(3) 当键合参数一定时,PMMA-PS 的键合强度明显高于 PMMA-AI5052 的键合强度。对于 PMMA-AI5052 异种键合,采用丙酮溶液(PMMA)形成的键合强度高于 PI 辅助键合强度。采用 PI 和丙酮溶液(PMMA)辅助键合 PMMA-AI5052 可行性较好,且在较高的温度和压力下可以获得质量较好的键合层,键合后的试样有一定强度。键合质量取决于 AI5052 刻蚀效果及键合温度和压力。

(4) 针对三组异种键合,PI 辅助 PMMA-PS 键合的最佳参数为 105 °C, 2.5 MPa, 50 min; PI 辅助 PMMA-AI5052 键合的最佳参数为 110 °C, 1.25 MPa, 50 min; 丙酮溶液(PMMA)辅助键合 PMMA-AI5052 键合的最佳参数为 110 °C, 2.5 MPa, 20 min。相较于 PMMA-PS 键合,PMMA-AI5052 键合所需的温度更高,压力更大。

参考文献

- [1] 范一强,高克鑫,张亚军.一种用于微流控芯片键合强度测试的固定装置:CN107941602A[P]. 2018-04-20.
FAN Yiqiang, GAO Kexin, ZHANG Yajun. A fixing device for bonding strength test of microfluidic chip: CN107941602A[P]. 2018-04-20.
- [2] JIMÉNEZ-DÍAZ E, CANO-JORGE M, ZAMARRÓN-HERNÁNDEZ D, et al. Micro - Macro: Selective integration of microfeatures inside low-cost macromolds for PDMS microfluidics fabrication[J]. *Micromachines*, 2019, 10(9). DOI:10.3390/mi10090576.
- [3] LIU Jia, DAI Yuchi, SHI Yan, et al. Effect of surface texture on tensile shear strength of 1060Al-PET welding joints[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 34(1). DOI: 10.1186/S10033-021-00645-5.
- [4] FAN Yiqiang, LI Huawei, YI Ying, et al. PMMA to polystyrene bonding for polymer based microfluidic systems[J]. *Microsystem Technologies*, 2014, 20(1):59-64.
- [5] SONG I H, PARK T. PMMA solution assisted room temperature bonding for PMMA - PC hybrid devices[J]. *Micromachines*, 2017, 8(9). DOI:10.3390/mi8090284.
- [6] 王澄瑶,李旭,卢晓云. COP-PDMS 微流控芯片的制备及在太赫兹对肠道上皮细胞生物效应中的应用[J]. *物理学报*, 2021, 70(24): 367-377.
WANG Chengyao, LI Xu, LU Xiaoyun. Fabrication of cyclic olefin polymer and polydimethylsiloxane co-bonded microfluidic device and its applications in terahertz biological effects on intestinal cells [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(24):367-377.
- [7] 王良.紫外表面处理提高金属薄膜与 PMMA 结合结度研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.
WANG Liang. Study on the adhesion strength of metal films on PMMA substrates by UV surface treatment[D]. Dalian : Dalian University of Technology, 2016.
- [8] MOMBER A, Fröck L, MARQUARDT T. Effects of accelerated ageing on the mechanical properties of adhesive joints between stainless steel and polymeric top coat materials for marine applications[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2020, 103. DOI:10.1016/j.ijadhadh.2020.102699.
- [9] 张攀,李义兵,杨朝龙,等.塑料-金属一体化成型技术研究进展[J]. *塑料科技*, 2016, 44(7):100-105.
ZHANG Pan, LI Youbing, YANG Chaolong, et al. Research development of plastic-metal integration molding technology[J]. *Plastics Science and Technology*, 2016, 44(7):100-105.
- [10] 黄进.聚丙烯/AI5052 模压复合材料的界面结构与性能研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2022.
HUANG Jin. Study on the interfacial structure and properties of press-molded polypropylene/aluminum alloy hybrids[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2022.
- [11] FILIPPOV P A, BELYAEVA V E, MELESHKO K T, et al. Solution behavior of polyimide-graft-polystyrene copolymers in selective solvents[J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2014, 52(23):1 539-1 546.
- [12] 嵇跃云,闫晓娜,齐胜利,等.静电纺丝法制备孔结构可调的交联聚酰亚胺/聚甲基丙烯酸甲酯复合纤维膜[J]. *化工新型材料*, 2015, 43(12):95-97, 103.
JI Yueyun, YAN Xiaona, QI Shengli, et al. Preparation of polyimide/polymethyl methacrylate fibrous with adjustable cross-link pore structure by electrospinning[J]. *New Chemical Materials*, 2015, 43(12):95-97, 103.
- [13] LI Jiajin, LIU Zhiqiang, ZHANG Ruizhi, et al. Surface treatment and solvent co-assisted easy direct bonding of polymer/metal [J]. *Materials & Design*, 2021, 204. DOI: 10.1016/J. MATDES. 2021.109641.
- [14] 华幼卿,金日光.高分子物理[M]. 4 版.北京:化学工业出版社, 2013.
HUA Youqing, JIN Riguang. *Polymer physics*[M]. 4th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [15] 徐征,王继章,杨铎,等.辅助溶剂对 PMMA 微流控芯片模内键合的影响[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2):321-328.
XU Zheng, WANG Jizhang, Yang Duo, et al. Effect of assistant solvent on in-mold bonding of PMMA microfluidic chips[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(2):321-328.
- [16] 黄丽坚,杨长城,王晓东,等.聚酰亚胺复合材料与不同金属间干滑动时的摩擦学性能[J]. *机械工程材料*, 2009, 33(10):57-59, 82.
HUANG Lijian, YANG Changcheng, WANG Xiaodong, et al. Tribological properties of polyimide composites against different metal under dry sliding friction condition[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2009, 33(10):57-59, 82.