

AA5052 薄板磁脉冲胶焊复合接头 动态力学性能研究

王绍螺, 彭定宸, 柳泉潇潇, 李光耀, 崔俊佳
(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘要: **目的** 研究 AA5052 铝合金薄板在高速冲击载荷下的磁脉冲胶焊复合接头的动态力学性能, 探究不同载荷速率对该胶焊复合接头力学和失效行为的影响规律。**方法** 利用磁脉冲焊接系统成功制备了胶焊复合连接试件。采用万能拉伸试验机、高速拉伸试验系统, 结合全场应变测量系统, 获得胶焊复合接头的力学性能规律, 以及渐进失效过程和搭接区应变变化。通过扫描电镜观察焊缝断口, 对其显微形貌进行表征。**结果** 当剪切速率从 2 mm/min 提升到 10 m/s 时, 接头的峰值载荷从 6086.5 N 增大到 6592.5 N, 吸收的能量从 41.1 J 增大到 96.4 J。相比于 2 mm/min 准静态剪切断口, 1 m/s 高速剪切断口中轴初窝和胶粘剂薄层的比例均提高。当剪切速率在 1 m/s 以下时, 接头发生胶层和焊缝断裂失效; 当剪切速率在 1 m/s 以上时, 胶层和焊缝得到的强化程度高于母材, 胶层开裂程度减小, 接头搭接区的刚度提高, 所以拉伸端母材发生严重的颈缩直至断裂失效。**结论** 随着剪切速率的增加, 接头的峰值载荷和吸收能量均增大, 胶层的开裂程度减小, 失效形式由焊缝和胶层断裂转变为母材断裂。

关键词: AA5052 铝合金薄板; 磁脉冲胶焊复合接头; 动态力学性能; 微观形貌

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.04.008

中图分类号: TG391; TG456 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2021)04-0052-09

Study on Dynamic Mechanical Properties of AA5052 Sheet Magnetic Pulse Hybrid Adhesive-Welded Joints

WANG Shao-luo, PENG Ding-chen, LIU Quan-xiao-xiao, LI Guang-yao, CUI Jun-jia

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

ABSTRACT: Dynamic mechanical properties of AA5052 aluminum alloy sheet magnetic pulse hybrid adhesive-welded joints under high-speed impact load were studied. The influence laws of different loading rates on the mechanical and failure behavior of the hybrid joints were explored. The adhesive-welded hybrid specimens were successfully prepared by the magnetic pulse welding system. Mechanical properties, progressive failure process and strain change in the lap zone of the hybrid joints were obtained by universal tensile testing machine, high-speed tensile testing system and full field strain measurement system. The weld fracture was observed by scanning electron microscopy, and its microscopic morphology was characterized. Results showed that when the loading rate was increased from 2 mm/min to 10 m/s, the peak shear load of the joint improved from 6086.5 N to 6592.5 N, and the absorbed energy increased from 41.1 J to 96.4 J. Compared with the 2 mm/min quasi-static shear fracture, the proportion of the equiaxed dimples and the thin adhesive layer of the 1 m/s high-speed shear fracture was increased. When the shearing rate was below 1 m/s, the failure mode of the joint was the fracture of the adhesive layer and the weld. How-

收稿日期: 2021-04-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51975202); 湖南省自然科学基金 (2019JJ30005)

作者简介: 王绍螺 (1990—), 男, 博士生, 主要研究方向为磁脉冲焊接与聚合物复合材料。

通讯作者: 崔俊佳 (1983—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为汽车车身轻量化设计与制造。

ever, when the shearing rate was above 1 m/s, the adhesive layer and weld were strengthened more than the base metal; the cracking degree of the adhesive layer was decreased, and the stiffness of the joint lap area was improved, resulting in severe necking until the fracture of the base metal aluminum sheet. As the shearing rate increased, the peak load and absorbed energy of the hybrid joint increased; the cracking degree of the adhesive layer was reduced, and the failure mode changed from the fracture of the weld and the adhesive layer to the fracture of the base material.

KEY WORDS: AA5052 aluminum sheet; magnetic pulse hybrid adhesive-welded joint; dynamic mechanical properties; microscopic morphology

采用高强度、铝合金、镁合金、碳纤维和玄武岩纤维复合材料等轻质高性能材料来取代运载装备上的传统钢材,为一种更直接有效实现轻量化的途径^[1-4]。在众多轻质高强度材料中,铝合金以其良好的加工成形性和耐腐蚀性,相对低廉的成本和较大的循环利用潜力等优势,在汽车发动机、变速箱、轮毂以及车身等零部件上的应用日益广泛^[5-7],但随之也带来了铝合金的连接难题^[8-10]。磁脉冲焊接是一种绿色高效的固相焊接技术,能够减少金属间脆硬性化合物和内应力的产生,从而提高铝合金接头的强度^[11-15]。

汽车行业中的电阻点焊和激光焊接等熔焊技术会在接触面及邻近区域产生高残余应力,使接头强度和吸能大幅下降。胶接接头在应力分布、母材保护、耐腐蚀疲劳、吸能、密封性等方面都有明显优势,但易受到温度等环境因素影响^[16-19]。胶焊复合连接技术可充分利用焊接和胶接互补的优势,提升接头的综合性能^[20]。焊接提供较大的抗剥离强度,性能稳定且不受温度影响,胶接则进一步增强了复合接头的抗剪切、耐腐蚀疲劳、密封减振等方面的性能。使用胶焊复合接头后,若接头的强度和刚度满足标准,可适当减少车身上焊点的数量或激光焊缝的长度,提高生产效率。此外,随着多材料混合车身的发展,胶粘剂在异种轻量化材料连接方面的优势会愈发明显。胶接与先进焊接技术组成的复合工艺,如激光胶焊、搅拌摩擦胶焊、磁脉冲胶焊等,对推动汽车轻量化发展有着重要的意义。

目前有学者研究了电阻胶焊,搅拌摩擦胶焊和激光胶焊等复合连接技术在增强接头抗疲劳腐蚀性能、提高接头强度、降低应力集中等方面的优势^[21-29]。在电阻点焊胶接的复合工艺方面,Khan 等^[21]采用先涂胶后焊接的工艺步骤制备了 AA6061 铝合金电阻胶焊接头,并研究了表面粗糙度、胶粘剂固化时间、焊接时间和电极压力等参数对峰值剪切载荷的影响。结果发现,最佳焊接参数分别为电流为 20 kA,焊接周期为 8,胶粘剂最佳固化的时间为 120 min,打磨 AA6061 铝合金薄板的最佳砂纸为 220 目。在相同焊接条件下,胶焊复合接头的峰值载荷始终高于单一电阻点焊和胶接接头。Xu 等^[22]研究发现对于 Mg/Fe 异种金属接头,电阻胶焊的峰值载荷、吸收能量和疲劳强度均大于电阻点焊,且复合接头中焊点周围的应力

集中程度更低。

Braga 等^[23]提出了一种搅拌摩擦焊-胶接复合连接技术,并测试了复合接头的准静态力学性能和抗疲劳性。发现胶粘剂能降低复合接头的畸变,在相同的垂直力水平下,混合接头的变形水平低于搅拌摩擦焊接头。Fortunato 等^[24]制作了 2 mm 厚的 AA6082-T6 板和 0.2 mm 厚胶层的胶接-搅拌摩擦焊复合搭接接头,并采用相控阵超声检测出质量良好的胶接-搅拌摩擦焊复合接头,发现复合接头的剪切强度比单一搅拌摩擦焊接头高 50%。对于胶接和激光焊接的复合工艺,Ren 等^[25]提出了涂胶-固化-激光焊接的工艺步骤。研究结果表明在该复合接头中焊缝和胶粘剂起到了协同作用,焊缝阻碍胶粘剂开裂,而大面积的胶粘剂可以提高剪切力,优化平均应力分布,从而提升复合接头的峰值载荷。

在胶焊复合连接的数值模拟方面,有关学者也做了大量的研究。Al-Samhan 等^[26]通过有限元模拟发现,电阻点焊接头的应力主要集中在焊核中心,胶焊复合接头的应力集中程度近似于胶接接头,仅为点焊接头的 1/5。根据 Darwish 等^[27]的研究,对于非等厚度单搭接电阻点焊接头,其应力会集中在焊核靠近较薄母材一侧,而胶粘剂的加入能提高接头强度且改善不同厚度板件接头的应力分布。Marques 等^[28]结合试验和有限元仿真研究了胶焊复合工艺中使用的 3 种胶粘剂。结果表明,韧性胶粘剂比脆性胶粘剂有更好的强度提升效果。Campilho 等^[29]同时进行了仿真和试验,首先通过预试验找到了焊接和胶接的理想参数,然后在此条件下对比电阻点焊、胶接和电阻胶焊 3 种工艺。结果发现,过短的搭接长度会导致胶层过早失效,而当搭接长度为 30 mm 时,电阻胶焊复合接头的性能最佳。

当前,关于磁脉冲焊接与胶接技术结合的胶焊复合工艺的研究不多,主要还集中于准静态条件下接头力学性能的研究^[30]。准静态载荷是一种理想的模拟工况,不能完全反映汽车在服役过程中外界因素对胶焊复合接头的影响。汽车在发生碰撞时有高速动态冲击,会直接影响复合接头的可靠性。相反,连接质量的好坏是影响汽车碰撞安全性的重要因素。文中以 AA5052 铝合金为研究对象,成功制备磁脉冲胶焊复

合连接接头,探究3种高速冲击载荷(1,5,10 m/s)下,磁脉冲胶焊复合连接接头的动态力学性能,并与2 mm/min 准静态载荷下的试验结果进行对比分析。利用非接触式全场应变测量技术获得接头的失效过程和应变,并结合焊缝断口形貌,分析不同载荷速率对接头力学性能和失效机制的影响。

1 试验

1.1 材料

材料为 AA5052-O 薄板,弹性模量为 70.3 GPa,屈服强度为 90 MPa,其元素组成见表 1。薄板尺寸为 100 mm×35 mm×1 mm,单搭接长度为 35 mm。金属板件存在毛刺和油污会影响焊接间隙大小或胶粘剂质量,试验前用砂纸将板件边缘毛刺打磨后,用酒精清洗表面,再用无尘布擦拭干净。

1.2 胶焊工艺

所用胶焊复合连接工艺设备为 PS48-16 磁脉冲焊接系统^[1,13],其额定电压为 16 kV,额定电容为 408 μF,

极限放电能量为 48 kJ。文中在磁脉冲点焊连接结构的基础上,提出了一种磁脉冲胶焊复合接头结构和工艺步骤。磁脉冲点焊连接结构和焊接原理如图 1a 所示。基板的中心为预成形的圆台形凹槽,其上底圆形的直径为 12 mm,下底圆形的直径为 15 mm,凹槽的深度即为焊接间隙,无需额外用垫片控制。磁脉冲放电设备在平板线圈中产生电流 I_1 ,飞板上产生感应电流 I_2 。根据电磁感应原理和左手定则可知,固定的平板线圈的原磁场与飞板中的感应磁场相互排斥,产生的排斥力 F 会推动飞板,使之与固定的基板在预成形凹槽内发生高速碰撞,从而完成焊接^[6]。

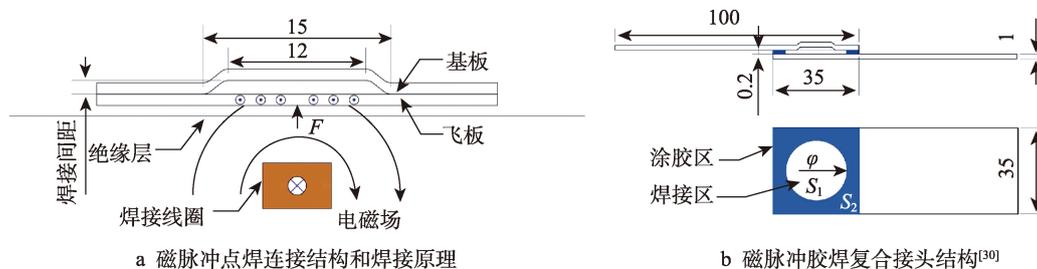
如图 1b 所示,飞板的表面可分为中心圆形焊接区域 S_1 及包围焊接区域的胶接区域 S_2 。这种复合结构可充分利用磁脉冲焊接和胶接两种连接工艺的优点,即焊缝可提供较高的抗剥离强度,而周围的胶层可起到密封减震、增强接头抗剪切和耐腐蚀性的作用。飞板在 S_1 区域与基板发生碰撞,与胶层所在的 S_2 区域不共面,因此可减小焊接冲击和金属射流对胶层的影响。胶焊复合接头的焊接间隙包括胶层厚度和预成形凹槽深度两个部分^[30]。

表 1 AA5052-O 的元素组成(质量分数)

Tab.1 Elemental compositions of AA5052-O (mass fraction)

%

Zn	Si	Fe	Mn	Mg	Cr	Ti	Cu	Al
0.10	0.25	0.40	0.10	2.2~2.8	0.15~0.35	0.15	0.10	余量



a 磁脉冲点焊连接结构和焊接原理

b 磁脉冲胶焊复合接头结构^[30]

图 1 磁脉冲胶焊复合连接接头结构示意图

Fig.1 Structural schematic of magnetic pulse adhesive-welded hybrid joints

磁脉冲胶焊复合工艺步骤为: 预成形,基板的中心区域在凹凸模压力的作用下成形,直到凸模的轴肩压紧压边圈; 涂胶,先用 360 目的砂纸均匀打磨飞板和基板的胶接区域,然后用酒精清洗板件表面并用无尘布擦拭干净,以防止油污灰尘等因素影响试验效果,最后在飞板与基板的搭接面上均匀涂上回天 7130 单组分环氧树脂高温结构胶粘剂,胶层厚度为 0.2 mm 由垫片控制,待胶粘剂充分粘接基板和飞板后刮去溢出的胶瘤; 磁脉冲焊接,将涂胶完成后的试件放置在绝缘层上,使其中心与线圈轴线重合,在基板上表面用压块固定,以 30 kJ 的放电能量使飞板与基板在预成形凹槽(预成形凹槽的深度为 1 mm)内完成焊接; 固化,设置恒温鼓风干燥箱

的温度为 180 °C,恒温时间为 30 min,放入焊接后的试件进行固化,并随炉冷却,得到磁脉冲胶焊复合接头。其中平板线圈的横截面尺寸为 10 mm×4 mm,综合考虑复合接头强度和胶粘剂成本,中心未涂胶直径 $\varphi=25$ mm 之外区域可确定为合适的涂胶面积。由先前的相关研究结果^[30]以及结合文中的预试验,确定了搭接长度(35 mm)、焊接间隙(1.2 mm)和涂胶面积(S_2)等工艺参数。

1.3 测试方法

准静态测试设备为 INSTRON 5985 万能拉伸试验机,设置拉伸速率为 2 mm/min。通过 ARAMIS 非接触全场三维光学应变测量系统(德国 GOM 公司),

记录了复合接头搭接区的应变情况。动态冲击测试设备为 Zwick/Roell HTM 5020 型高速拉伸测试系统，德国 Zwick/Roell 集团，如图 2 所示。结合非接触式全场应变测量系统（Digital image correlation, DIC）得到胶焊复合接头的渐进失效过程和搭接区应变变化。动态拉伸载荷速率分别设置为 1, 5, 10 m/s 这 3 种，其对应的采集频率分别设置为 20 000, 50 000, 100 000 帧/s。此外，利用扫描电子显微镜（Scanning electron microscopy, SEM）观察了不同剪切载荷速率下磁脉冲胶焊复合接头的焊缝断口，对其微观形貌进行了表征。

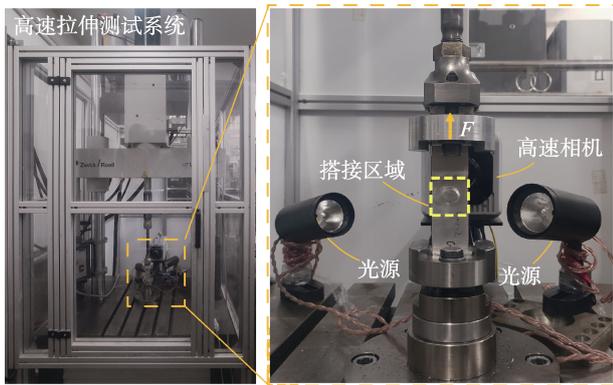


图 2 高速拉伸测试系统
Fig.2 High-speed tensile equipment

2 结果与分析

2.1 胶焊复合接头动态剪切性能

不同剪切载荷速率胶焊复合接头的失效模式如图 3 所示，力学性能如表 2 所示。当剪切速率从 2 mm/min 提升到 10 m/s 时，胶焊复合接头的峰值载荷从 6086.5 N 增大到 6592.5 N，吸收的能量从 41.1 J 提升到 96.4 J，同时胶层的开裂程度减小，说明胶层在高应变率下得到的强化程度高于母材，导致接头

的失效模式从焊缝和胶层失效转变为母材失效。需要注意在剪切载荷为 1 m/s 时出现了两种不同的失效模式，这是由胶层和焊缝应变率敏感性的累积引起的^[19,31-32]。

表 2 不同载荷速率下胶焊复合接头的力学性能
Tab.2 Mechanical properties of hybrid adhesive-welded joints under different loading rates

载荷速率	峰值载荷/N	吸收能量/J	胶层开裂程度/%	失效模式
2 mm/min ^[30]	6086.5	41.1	100	胶层/焊缝
1 m/s	6010.8	58.8	100	胶层/焊缝
1 m/s	6035.3	81.5	42.9	母材
5 m/s	6151.2	90.5	25.7	母材
10 m/s	6592.5	96.4	11.4	母材

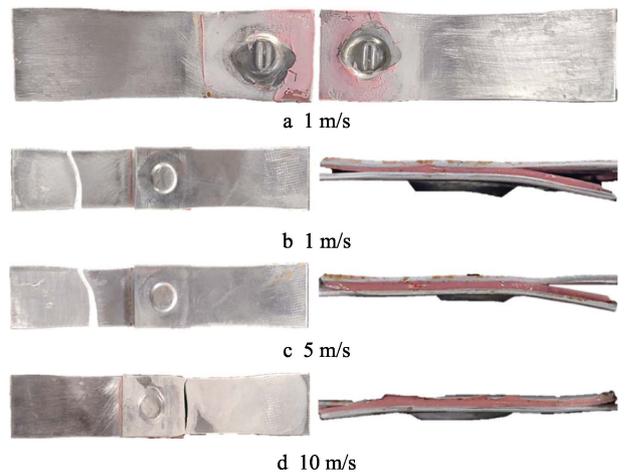


图 3 不同载荷速率下胶焊复合接头的失效模式
Fig.3 Failure modes of hybrid adhesive-welded joints under different loading rates

2.2 胶焊复合接头全场应变分析

图 4 为不同高速载荷速率下胶焊复合接头搭接区的应变云图。可知，搭接区的应变呈现出梯度分布，在靠近拉伸上端部分的应变明显增大。随着载

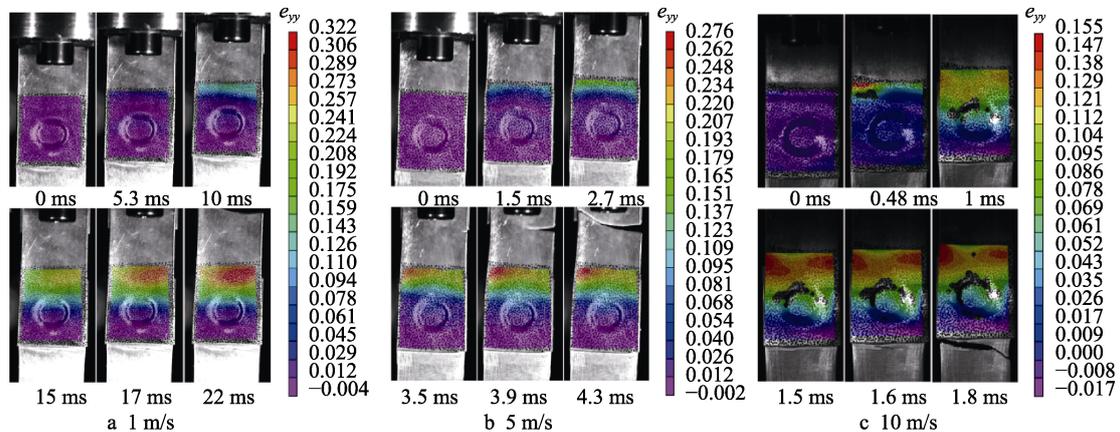


图 4 不同载荷速率下磁脉冲胶焊复合接头搭接区的应变
Fig.4 Strain contours in lap area of magnetic pulse hybrid adhesive-welded joints under different loading rates

荷速率从 1 m/s 增加到 5 m/s 和 10 m/s 时, 搭接区的最大应变是逐渐减小的。

3 种胶焊复合接头的应变云图呈左右对称。为了进一步分析 3 种接头的失效过程, 分别在飞板搭接区内选取观测点, 如图 5 所示。其中 $P_1—P_3$ 分别表示焊接区边缘的点, $P_4—P_6$ 分别表示上、中、下部胶层上的点; $P_1—P_3$ 的距离为 11 mm, $P_4—P_6$ 的距离为 30 mm。

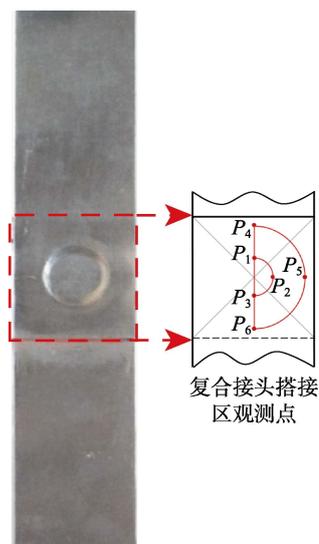


图 5 胶焊复合接头搭接区中所选的观测点
Fig.5 Selected observation point in lap area of adhesive-welded hybrid joint

磁脉冲胶焊复合接头上所选观测点 $P_1—P_6$ 的应变随时间变化曲线如图 6 所示。通过分析曲线中的重要拐点, 可以将剪切速率为 1 m/s 的接头失效过程分为 A-B-C 这 3 段, 其中 A 阶段又可以分为 A_1 和 A_2 两个阶段。

对于胶层上的点 $P_4—P_6$: 在 A_1 阶段内, P_4 和 P_5 的应变缓慢增加, 而 P_6 应变基本为 0, 这说明该阶段内胶层保持完整, 接头搭接区的上部随母板的拉伸产生了位移和应变, 而 P_6 所在的下部胶层几乎没有发生位移; 在 A_2 阶段中, 从 7.8 ms 时起 P_4 应变的上升速率增大, 这说明胶层裂纹在靠近拉伸端的搭接区上边缘产生并逐渐向搭接区下部胶层扩展, P_4 处的胶层逐渐开裂失效, 该处母材随着上夹头继续拉伸。在 B 阶段中, 11 ms 时上部胶层完全失效, P_4 的应变值从 0.054 增加到 0.276, 增长率为 411.1%。裂纹扩展至中部胶层的 P_5 处, 随着胶层的失效, 焊缝承受的载荷逐渐增大, 在焊缝失效前 P_5 的应变值从 0.025 增加到 0.051, 增长率为 104.0%, 低于 P_4 的应变增长率。

对于焊缝周围的点 $P_1—P_3$: 在整个 A 阶段内, 由于胶层保持较完整, 且 $P_1—P_3$ 处于搭接区的上中部, 所以各点的应变随剪切过程逐渐线性增加, 且靠近搭接区上边缘 P_1 的应变增长最快。到 B 阶段, 胶层中的裂纹扩展至搭接区中部, 焊缝受力增大。从

11 ms 时起, P_1 的应变从 0.039 增大至 17 ms 时的 0.152, 增长率为 289.7%。 P_2 由于受到焊缝和部分未失效胶层的约束, 其应变从 0.024 增加至 0.045, 其增长率为 87.5%, 低于 P_1 的应变增长率。对于 P_3 , 该处附近的胶层没有发生失效, 因此其应变始终处于缓慢增大的趋势。进入 C 阶段, 17 ms 时焊缝周围的 $P_1—P_3$ 以及胶层上的 $P_4—P_6$ 的应变均稍有下降或保持不变。这是因为在该阶段, 拉伸端母材发生了严重的颈缩或颈缩直至断裂, 试件发生了塑性回弹。

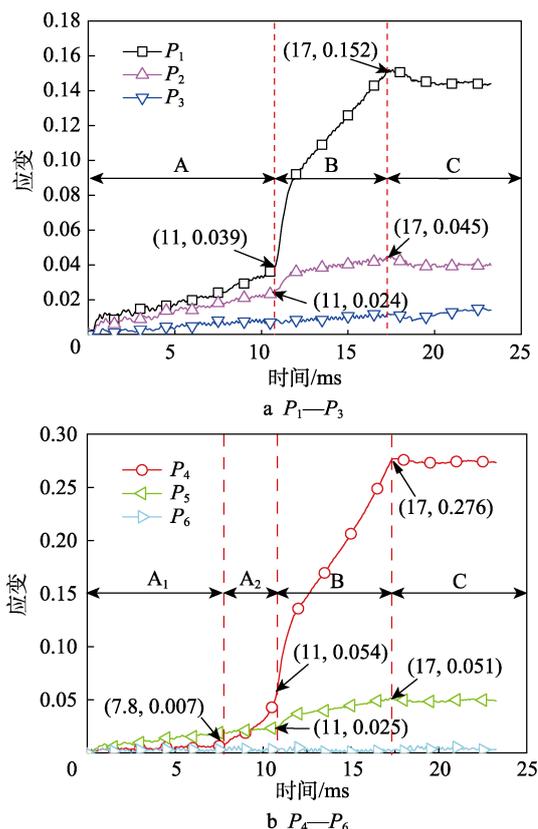


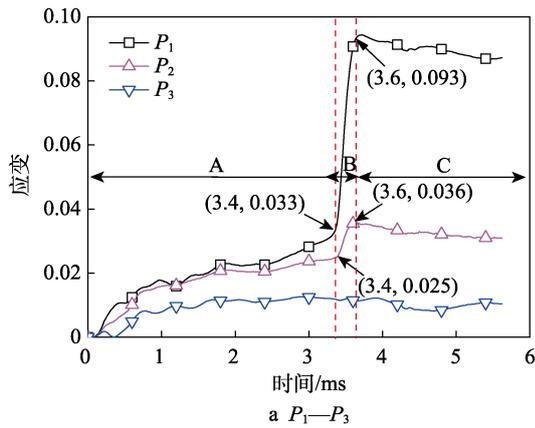
图 6 1 m/s 剪切速率下胶焊复合接头搭接区观测点的应变-时间曲线

Fig.6 Strain-time curves of observation point in lap area of hybrid adhesive-welded joint under loading rate of 1 m/s

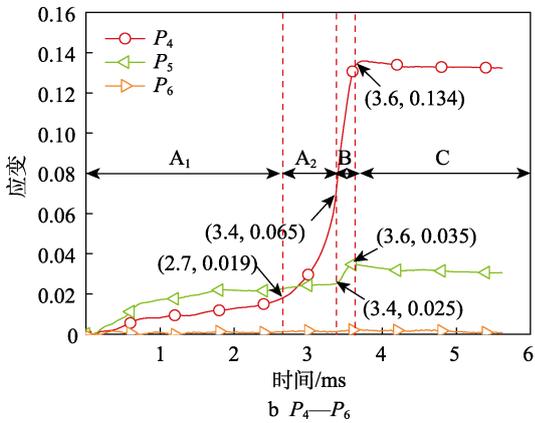
图 7 为 5 m/s 剪切速率下观测点 $P_1—P_6$ 的应变随时间的变化曲线, 与 1 m/s 剪切速率下接头的失效规律类似。对于胶层上的点 $P_4—P_6$, 在 A_1 阶段内胶层保持完整, P_4 和 P_5 的应变缓慢增加, 而 P_6 应变基本为 0; 在 A_2 阶段中, 从 2.7 ms 时起裂纹在搭接区上边缘产生并逐渐向下部胶层扩展, P_4 处随着母材的拉伸变形导致该点的应变迅速增大。在 B 阶段中, 从 3.4 ms 时起上部胶层迅速失效, P_4 处应变持续高速率增大, 从 0.065 增加至 0.134, 增长率为 106.2%。同时, 裂纹扩展至 P_5 处的中部胶层, P_5 的应变从 0.025 增加至 0.035, 增长率为 40.0%, 低于 P_4 的应变增长率。

在整个 A 阶段中, 由于胶层保持得较为完整, 焊缝周围 $P_1—P_3$ 的应变随剪切过程逐渐增加。在 B

阶段中, 裂纹扩展至搭接区中部胶层, 焊缝受力增大, P_1 的应变从 3.4 ms 时的 0.033 增大至 3.6 ms 时的 0.093, 增长率为 181.8%。由于受到焊缝和部分未失效胶层的约束, P_2 的应变从 0.025 增加至 0.036, 其增长率为 44.0%, 低于 P_1 的应变增长率。对于 P_3 , 该处附近的胶层没有发生失效, 因此其应变始终处于缓慢增大的趋势。在 C 阶段中, 拉伸端母材发生严重的颈缩直至断裂, 试件发生塑性回弹, 因此, 3.6 ms 时焊缝周围的 P_1-P_3 点以及胶层上的 P_4-P_6 点的应变均稍有下降或保持不变。



a P_1-P_3



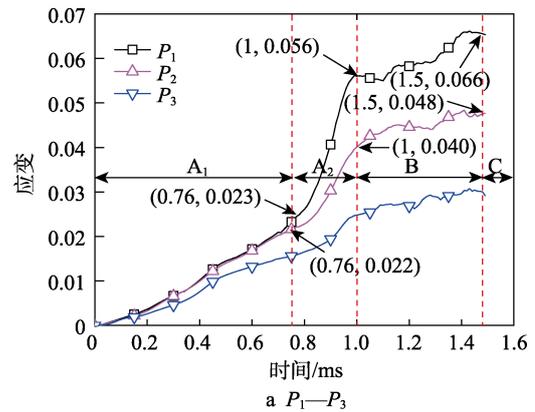
b P_4-P_6

图 7 5 m/s 剪切速率下胶焊复合接头搭接区观测点的应变-时间曲线

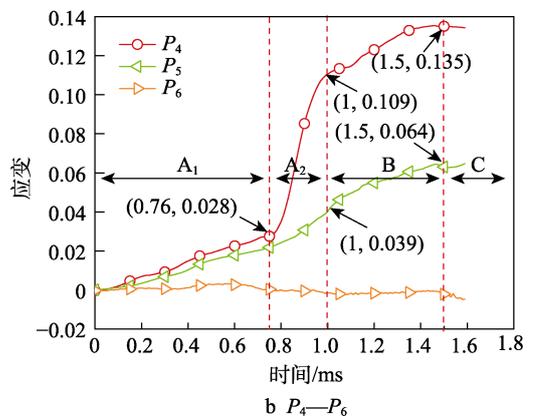
Fig.7 Strain-time curves of observation point in lap area of hybrid adhesive-welded joint under loading rate of 5 m/s

图 8 是在 10 m/s 剪切速率下, 观测点 P_1-P_6 的应变随时间的变化曲线。对于胶层上的 P_4-P_6 , 在 A_1 阶段内 P_4 和 P_5 的应变缓慢增加 P_6 应变基本为 0; 在 A_2 阶段中, 从 0.76 ms 时起裂纹在搭接区上边缘产生并逐渐向下部胶层扩展, P_4 随着母材被拉伸, 其应变迅速从 0.028 增大至 1.0 ms 时的 0.109, 增长率为 289.3%; 但从 1.0 ms 时起, P_4 应变曲线的斜率明显减小并与 P_5 曲线平行。在 B 阶段中 P_4 的应变从 0.109 增加至 0.135, 增长率仅为 23.9%, 远小于 A_2 阶段的应变增长率; 而 P_5 的应变从 0.039 增加至 0.064, 增长率为 64.1%。

因为胶层在 A_1 阶段内保持完整, 焊缝周围 P_1-P_3 的应变线性增大; 到 A_2 阶段, 从 0.76 ms 时起, 由于裂纹在上搭接边缘的胶层内产生并扩展, 胶层受载荷的能力降低, 而焊缝在高应变率下得到强化, 受力逐渐增大, 故 P_1-P_3 应变增长的速率提高。在 B 阶段中, 胶层阻碍了开裂趋势, 整个接头的胶层和焊缝会共同受力, 因此从 1.0 ms 时起 P_1-P_3 应变的增加速率相对放缓 P_1 和 P_2 的应变增长率分别为 17.9% 和 20.0%。从应变云图可看出, C 阶段中下夹持端的母材发生严重颈缩断裂, 试件发生塑性回弹, 故从 1.5 ms 时起, P_1-P_6 的应变均稍有下降或保持不变。



a P_1-P_3



b P_4-P_6

图 8 10 m/s 剪切速率下胶焊复合接头搭接区观测点的应变-时间曲线

Fig.8 Strain-time curves of observation point in lap area of hybrid adhesive-welded joint under loading rate of 10 m/s

图 9 整理了不同高速载荷速率下观测点在 B 阶段的应变增长率。总体上看, 随着剪切速率的增加, 由于胶层和焊缝均得到强化, 且胶层的开裂程度下降, 增加了胶焊复合接头的刚度, 因此焊缝周围的 P_1 和 P_2 , 以及搭接区上部胶层 P_4 的应变增长率都有明显下降。在 1 m/s 和 5 m/s 的剪切速率下, 搭接区上部胶层失效后会使得 P_4 和 P_1 的应变值迅速增大, 而搭接区中部的 P_5 和 P_2 受到未失效胶层和焊缝的约束, 导致各点的应变增长率符合 $P_1 > P_2 > P_3$ 且 $P_4 > P_5 > P_6$ 的规律。但在 10 m/s 的剪切速率下, P_1 和 P_2 应变的增长率基本相等, P_4 应变曲线的斜率在进入

B 阶段时迅速下降到与 P_5 应变曲线的斜率一致。这是因为在 10 m/s 的高应变率条件下, 胶层得到的强化程度更高, 其失效程度大幅度降低, P_4 和 P_5 处的胶层基本未发生开裂, 因此接头搭接区的刚度增大, 剪切过程中各点的应变增长率均处于很低的水平。需要注意由于胶层和焊缝的强载荷率效应(即强应变率敏感性)^[19,31-32], P_1-P_6 之间的应变变化会产生相互作用和影响, 该过程较为复杂, 仍需进一步研究。虽然 P_1-P_6 之间存在一定的耦合作用, 但是整体趋势, 即 B 阶段的应变增长率符合 $1 \text{ m/s} > 5 \text{ m/s} > 10 \text{ m/s}$ 的规律。

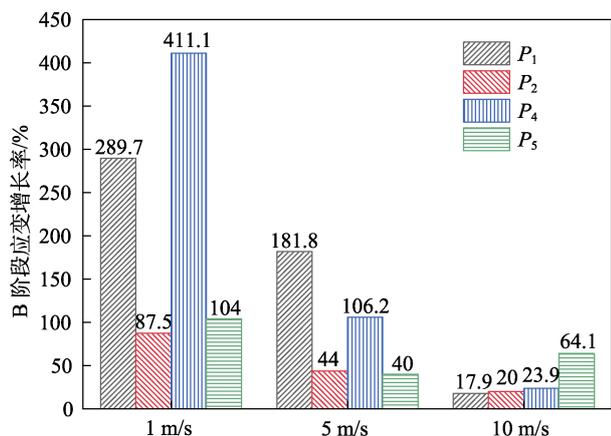


图9 不同载荷速率下观测点在 B 阶段的应变增长率

Fig.9 Strain growth rate of observation point in stage B under different loading rates

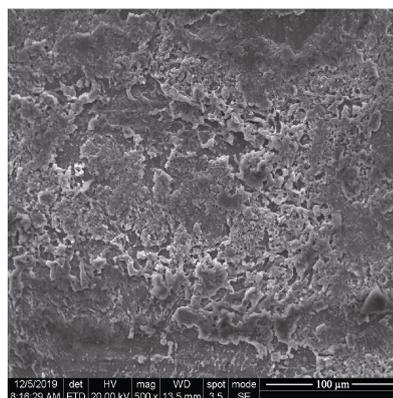
2.3 胶焊复合接头微观形貌表征

图 10 为 1 m/s 剪切速率下磁脉冲胶焊复合接头的 SEM 焊缝断口。断口为混合断裂模式, 同时存在脆性和韧性断裂。左侧焊缝中可看到许多河流状花纹, 且韧窝数量很少, 表明左侧焊缝主要发生了脆性断裂, 其焊接质量较差, 而中部和右侧焊缝以韧性断裂为主, 可明显观察到韧窝。其中, 中部焊缝有大量圆形或椭圆形的等轴韧窝, 说明该处在剪切过程中主要受到正应力; 而右侧焊缝含有等轴韧窝和抛物线形的剪切韧窝, 说明该处在剪切过程中同时受到剪切应力和正应力。与 2 mm/min 准静态剪切速率下复合接头的 SEM 焊缝形貌^[30]相比, 等轴韧窝的比例有所增大。这是因为在高应变率下, 接头发生了更剧烈的抖动, 从而增大了偏转角和正应力分量。

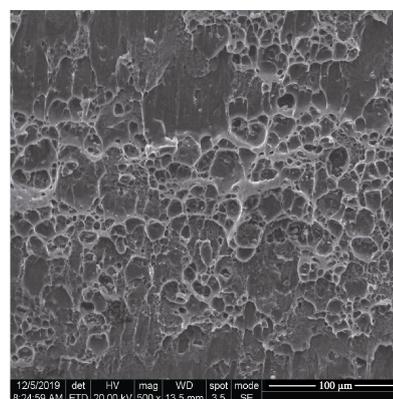
图 11 对比了磁脉冲胶焊复合接头在 2 mm/min 准静态剪切和 1 m/s 高速剪切后断口胶层的 SEM 微观形貌。图 11b 和 11c 分别为准静态剪切断口中母材和过渡区表面的微观形貌, 可以看出胶层主要发生界面失效, 母材表面很光滑, 且残胶和金属的交界处有明显的断层。图 11e 和 11f 分别为 1 m/s 高速剪切断口中母材和过渡区表面的微观形貌, 发现胶层主要发生内聚失效, 残胶与金属的交界处无明显断层, 而是



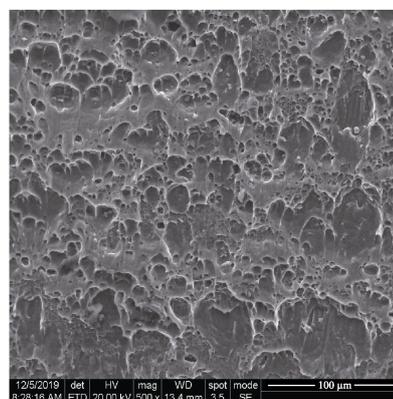
a 焊缝形貌



b (a) 脆性断裂



c (b) 等轴韧窝



d (c) 混合韧窝

图 10 1 m/s 剪切速率下胶焊复合接头断口的 SEM 焊缝形貌

Fig.10 SEM fractured weld morphology of hybrid adhesive-welded joint at 1 m/s loading rate

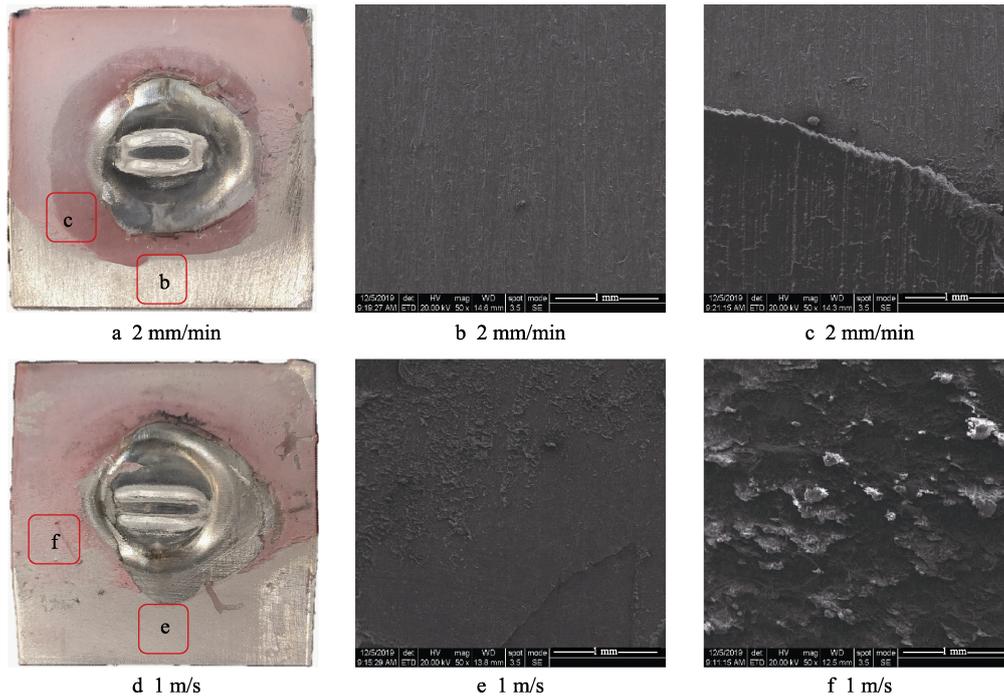


图 11 不同载荷速率下胶焊复合接头断口各处的 SEM 微观形貌

Fig.11 SEM micro morphology of hybrid adhesive-welded joints at different loading rates

由胶粘剂薄层逐渐过渡。在薄层中可观察到裂纹由上至下逐渐扩展的痕迹,表明在胶层裂纹扩展的过程中接头吸收了更多的能量。

3 结论

探究了高速冲击载荷下磁脉冲胶焊复合连接接头的动力学性能。利用 DIC 技术获得了接头的失效过程和应变,并结合焊缝断口 SEM 形貌,分析了不同载荷速率对接头力学行为的影响。

1) 当剪切速率从 2 mm/min 提升到 10 m/s 时,接头的峰值载荷从 6086.5 N 增大到 6592.5 N,吸收的能量从 41.1 J 增大到 96.4 J。

2) 胶层裂纹在靠近拉伸端的搭接区上边缘产生并逐渐向中部胶层扩展,同时焊缝承受的载荷逐渐增大。当剪切速率在 1 m/s 以下时,胶层和焊缝得到的强化程度低于母材,发生胶层和焊缝断裂失效;而当剪切速率在 1 m/s 以上时,胶层和焊缝得到的强化程度高于母材,胶层开裂程度减小,接头搭接区的刚度提高,所以拉伸端母材发生严重的颈缩直至断裂失效。

3) 相比于 2 mm/min 准静态剪切,1 m/s 高速剪切下胶焊复合接头发生了更剧烈的抖动,从而增大了偏转角和正应力分量,导致焊缝断口中轴韧窝的比例提高。而胶层的失效模式从界面失效转变为薄层内聚失效,该过程接头吸收了更多的能量。

参考文献:

[1] WANG S L, XU L W, SUN T, et al. Effects of Process

Parameters on Mechanical Performance and Interfacial Morphology of Electromagnetic Pulse Welded Joints between Aluminum and Galvanized Steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 10: 552—564.

[2] 王鑫, 潘希德, 黄贺贺, 等. AZ33M 变形镁合金激光焊接接头的组织和性能研究[J]. 精密成形工程, 2020, 12(1): 123—131.

WANG Xin, PAN Xi-de, HUANG He-he, et al. Microstructure and Properties of Wrought Magnesium Alloy AZ33M Laser Beam Welds[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(1): 123—131.

[3] JIANG H, ZENG C C, LI G Y, et al. Effect of Locking Mode on Mechanical Properties and Failure Behavior of CFRP/Al Electromagnetic Riveted Joint[J]. Composite Structures, 2021, 257: 113162.

[4] WANG S L, ZHONG J B, GU Y Q, et al. Mechanical Properties, Flame Retardancy, and Thermal Stability of Basalt Fiber Reinforced Polypropylene Composites[J]. Polymer Composites, 2020, 41(10): 4181—4191.

[5] 肖旋, 秦鼎强, 倪昱, 等. 铝合金薄板搭接高速 FSW 缺陷及断裂行为[J]. 精密成形工程, 2019, 11(6): 135—140.

XIAO Xuan, QIN Ding-qiang, NI Yu, et al. Defects of High Speed Friction Stir Welding and Fracture Behavior of Aluminum Alloy Thin Plate Lap Joints[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(6): 135—140.

[6] 彭定宸. 5052 铝合金薄板胶接-磁脉冲焊接复合工艺与性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020: 40—46.

PENG Ding-chen. Research on Process and Property of Magnetic Pulse Weld Bonding of 5052 Aluminum Alloy Sheet[D]. Changsha: Hunan University, 2020: 40—46.

[7] 谭飞, 黄慧玲, 牛文涛, 等. 6061 铝合金搅拌摩擦焊

- 工艺窗口的研究[J]. 精密成形工程, 2020, 12(3): 160—166.
- TAN Fei, HUANG Hui-ling, NIU Wen-tao, et al. Process Window of 6061 Aluminium Alloy Friction Stir Welding[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(3): 160—166.
- [8] HAHN M, WEDDELING C, LUEG-ALTHOFF J, et al. Analytical Approach for Magnetic Pulse Welding of Sheet Connections[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 230: 131—142.
- [9] ÇAM G, İPEKOGLU G. Recent Developments in Joining of Aluminum Alloys[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(5/6/7/8): 1851—1866.
- [10] KASHAEV N, VENTZKE V, ÇAM G. Prospects of Laser Beam Welding and Friction Stir Welding Processes for Aluminum Airframe Structural Applications[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 571—600.
- [11] GARG A, PANDA B, SHANKHWAR K. Investigation of the Joint Length of Weldment of Environmental-Friendly Magnetic Pulse Welding Process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(5/6/7/8): 2415—2426.
- [12] BEN-ARTZY A, STERN A, FRAGE N, et al. Interface Phenomena in Aluminium-Magnesium Magnetic Pulse Welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2008, 13(4): 402—408.
- [13] WANG S L, ZHOU B B, ZHANG X, et al. Mechanical Properties and Interfacial Microstructures of Magnetic Pulse Welding Joints with Aluminum to Zinc-Coated Steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 788: 139425.
- [14] 熊永锋, 廖祯松, 马天宇, 等. 铝-铜外导槽式磁脉冲焊接接头组织与性能[J]. 精密成形工程, 2019, 11(6): 170—177.
- XIONG Yong-feng, LIAO Zhen-song, MA Tian-yu, et al. Microstructure and Properties of Aluminum-Copper Joints Fabricated by Outer-Channel Magnetic Pulse Welding[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(6): 170—177.
- [15] CUI J J, WANG S L, YUAN W, et al. Effects of Stand-off Distance on Magnetic Pulse Welded Joints between Aluminum and Steel Elements in Automobile Body[J]. Automotive Innovation, 2020, 3(3): 231—241.
- [16] BARNES T A, PASHBY I R. Joining Techniques for Aluminium Spaceframes Used in Automobiles: Part -Adhesive Bonding and Mechanical Fasteners[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 99(1/2/3): 72—79.
- [17] LEENA K, ATHIRA K K, BHUVANESWARI S, et al. Effect of Surface Pre-Treatment on Surface Characteristics and Adhesive Bond Strength of Aluminium Alloy[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2016, 70: 265—270.
- [18] WANG S L, LIANG W, DUAN L M, et al. Effects of Loading Rates on Mechanical Property and Failure Behavior of Single-Lap Adhesive Joints with Carbon Fiber Reinforced Plastics and Aluminum Alloys[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106: 2569—2581.
- [19] CUI J J, WANG S L, WANG S H, et al. Strength and Failure Analysis of Adhesive Single-Lap Joints under Shear Loading: Effects of Surface Morphologies and Overlap Zone Parameters[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 238—247.
- [20] DARWISH S M H, GHANYA A. Critical Assessment of Weld-Bonded Technologies[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 105(3): 221—229.
- [21] KHAN M F, SHARMA G, DWIVEDI D K. Weld-Bonding of 6061 Aluminium Alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(5/6/7/8): 863—873.
- [22] XU W, CHEN D L, LIU L, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Weld-Bonded and Resistance Spot Welded Magnesium-to-Steel Dissimilar Joints[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 537(1): 11—24.
- [23] BRAGA D F O, SOUSA L M C, INFANTE V, et al. Aluminum Friction Stir Weldbonding[J]. Procedia Engineering, 2015, 114: 223—231.
- [24] FORTUNATO J, ANAND C, BRAGA D F O, et al. Friction Stir Weld-Bonding Defect Inspection Using Phased Array Ultrasonic Testing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93: 3125—3134.
- [25] REN D, LIU L, LI Y. Investigation on Overlap Joining of AZ61 Magnesium Alloy: Laser Welding, Adhesive Bonding, and Laser Weld Bonding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 61(1/2/3/4): 195—204.
- [26] AL-SAMHAN A, DARWISH S M H. Strength Prediction of Weld-Bonded Joints[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2003, 23(1): 23—28.
- [27] DARWISH S M. Weldbonding Strengthens and Balances the Stresses in Spot-Welded Dissimilar Thickness Joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 134(3): 352—362.
- [28] MARQUES G P, CAMPILHO R D S G, DA SILVA F J G, et al. Adhesive Selection for Hybrid Spot-Welded/Bonded Single-Lap Joints: Experimentation and Numerical Analysis[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 84: 248—257.
- [29] CAMPILHO R D S G, PINTO A M G, BANEJA M D, et al. Optimization Study of Hybrid Spot-Welded/Bonded Single-Lap Joints[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012, 37(9): 86—95.
- [30] PENG D C, LIU Q X X, LI G Y, et al. Investigation on Hybrid Joining of Aluminum Alloy Sheets: Magnetic Pulse Weld Bonding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104: 4255—4264.
- [31] WANG S L, WANG S H, LI G Y, et al. Dynamic Response and Fracture Analysis of Basalt Fiber Reinforced Plastics and Aluminum Alloys Adhesive Joints[J]. Composite Structures, 2021, 268: 114013.
- [32] GENG H H, MAO J Q, ZHANG X, et al. Strain Rate Sensitivity of Al-Fe Magnetic Pulse Welds[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 262: 1—10.