

表面微结构对铝合金与 PA66 激光焊性能影响

张功达, 朱琦, 刘亚运, 王传洋

(苏州大学, 苏州, 215137)

摘要: 为提高金属与塑料的激光焊接头强度, 提出了异种材料的微结构激光焊的方法. 为探究表面微结构参数对金属与塑料激光焊头强度的影响, 焊接前采用飞秒激光在金属表面制备了不同参数的微结构; 采用拉伸剪切试验、连接界面以及断面微观观测等方式探究了微结构参数对焊接接头强度的影响机制. 结果表明, 金属与塑料的焊接接头强度与微结构的填充效果以及连接面积有关, 随着微结构尺寸的增加, 金属与塑料焊接接头强度增加, 但过大的微结构尺寸会使得熔融塑料无法对微结构进行充分填充, 未填充缺陷的出现会使焊接接头的强度减小; 随着间隔距离的增加, 微结构覆盖率下降, 金属与塑料有效连接面积减少, 焊接接头强度持续减小.

创新点: (1) 采用飞秒激光器对铝合金表面进行微结构加工, 实现了铝合金与 PA66 激光焊性能的提升.

(2) 选用交错排列的微结构阵列, 探究了不同微结构参数对铝合金与 PA66 接头性能的影响.

(3) 基于不同接头的微观形貌, 分析了不同微结构参数对接头性能的影响机理.

关键词: 异种材料; 激光焊; 飞秒激光加工; 微结构参数; 焊接接头强度

中图分类号: TG 444

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20221002002

0 序言

金属与高分子材料的结合使用可以实现结构件的轻量化. 轻量化设计是目前研究的热点, 涉及交通运输、民用基础设施、工业制造以及清洁能源技术方向^[1-5], 例如在汽车生产中, 随着现代社会汽车保有量的快速增长, 汽车使用带来的环境污染和能源消耗问题日益严重^[6-8]; 金属与高分子材料的结合使用对汽车的轻量化设计具有重要意义, 轻量化设计可以有效减轻车身重量, 提高汽车的动力性能, 降低能源消耗以及 CO₂ 排放^[9-10].

金属与塑料的连接方法有机械连接、粘接、超声波焊接、激光焊等. 机械连接加工时间长、加工成本高、易受形状和尺寸的限制, 机械连接大多需要借助外部紧固件, 外部紧固件的加入使得构件整体重量增加, 同时机械连接过程易出现应力集中现象^[11]; 粘接剂连接对环境要求较高、抗冲击抗疲劳性能较差、长期稳定性差, 同时在粘接过程中会产生有害物质, 对环境造成污染^[12-14]; 超声波焊接噪

声过大, 对人体产生严重危害^[15-16]; 激光焊作为一种无接触、高效、环保的焊接技术, 被广泛应用于工业生产中^[17-19], 激光焊技术可以实现两种材料的直接连接, 无需添加额外的材料和连接配件.

国内外针对金属与塑料激光焊接头强度的提升开展了大量的研究. Amend 等人^[20]研究了热输入量对 PA6 和不锈钢激光焊接头中气孔的影响, 发现热输入较低时, 金属与塑料接触界面无法形成有效接头, 热输入较高时塑料产生分解、烧蚀, 导致连接强度下降; Jung 等人^[21]采用连续波二极管激光器对碳纤维增强塑料 (CFRP) 和铝合金进行焊接, 研究了激光工艺参数对接头强度的影响, 发现了材料间产生了分子间的紧密结合; Liu 等人^[22]为提高 316L 不锈钢与 PET 材料的激光焊接头强度, 在焊接前对 316L 不锈钢表面进行微结构加工, 同时焊接过程加入超声波装置, 试验结果表明机械结合以及化学结合是连接强度提高的主要原因.

金属与塑料的物理、化学差异导致焊接接头强度较低是目前金属与塑料激光焊的主要问题. 目前提高金属与塑料激光焊接头强度的方法大多是针对激光焊工艺对金属与塑料焊接接头强度的影响进行研究, 同时一些学者在焊接前对金属表面进行微结构加工, 以实现接头强度的提升, 结果表明金

收稿日期: 2022-10-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52075354); 江苏省基础研究计划青年基金 (BK20210718); 中国博士后基金 (2020M681699).

属表面微结构对金属与塑料焊接接头强度的提升具有重要作用,但针对金属表面微结构的金属与塑料激光焊接接头强度的影响研究较少,没有形成较为完整的研究体系。

1 试验方法

1.1 表面微结构制备

采用 5182 铝合金、30% 玻纤增强 PA66 作为激光焊试验材料。铝合金板尺寸为 $80\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, PA66 板尺寸为 $80\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 采用飞秒激光器在铝合金板指定区域进行表面微结构加工,加工区域如图 1 所示。微结构具有一定的深度,激光需要在微结构加工位置累计加工一定时间才能使得加工深度达到要求,单次扫描停留时间过长,易导致微结构孔洞入口处热量集聚使得微孔闭合;微结构加工采用多次重复扫描的方式,减少微结构入口处热量集聚。随着烧蚀深度的增加,飞秒激光受材料表面等离子体屏蔽以及材料喷蚀不完全导致的能量耦合影响,烧蚀率会逐渐下降,这使得微结构的横截面形貌趋近于梯形。

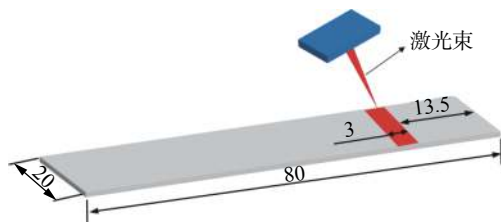


图 1 微结构加工区域 (mm)

Fig. 1 Area of microtexture processing

飞秒激光加工后金属表面与微结构内部存在残渣,将加工后的金属板置于丙酮溶液中,采用超声波清洗设备将金属样品清洗 20 min,去除表面残渣和油污,玻纤增强 PA66 板采用酒精清洗。PA66 材料吸水性强,为避免塑料板内部水分对焊接效果产生不影响,焊接前对 PA66 板进行干燥处理。

1.2 焊接方法

使用光纤激光器 (WFSC-2000C) 进行焊接,激光器型号 WFSC-2000C,输出功率 $200 \sim 2\,000\text{ W}$,中心波长 $1\,070 \sim 1\,090\text{ nm}$,调制频率 20 kHz ,将激光表面处理后的铝合金样板与 30% 玻纤增强 PA66 采用夹具以搭接的方式固定在焊接工作台上,采用激光热传导焊接的方式进行铝合金与 PA66 的激光连接。激光作用于铝合金板上表面,由

于铝合金板对激光的反射率高,为防止激光反射损坏设备,将激光头进行一定角度偏转,使得激光束与竖直方向夹角为 15° ,如图 2 所示。

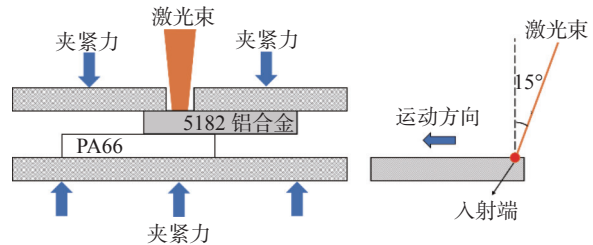


图 2 激光焊接方式

Fig. 2 Mode of laser welding

1.3 拉伸剪切试验方法

采用拉伸试验设备对焊接件的连接强度进行测试。拉伸剪切试验参数设定为:拉伸力 5 kN ,拉伸速度 2 mm/min ;为减少剥离应力的影响,在拉伸剪切试样两端添加等厚的垫片,焊接件拉伸剪切测试过程如图 3 所示。

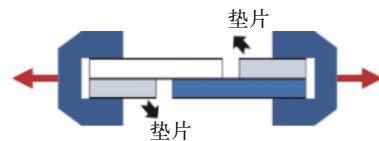


图 3 焊接件拉伸剪切测试方式

Fig. 3 Test method for tensile shear of welding parts

2 试验设计

为探究微结构参数对 5182 铝合金和 PA66 激光焊接接头强度的影响,根据前期探索发现交错排列的微结构阵列能够承受更大的拉伸剪切载荷,同时根据试验确定微结构参数的选取范围。激光焊参数采用激光功率 $1\,200\text{ W}$,焊接速度为 2 mm/s ,离焦量为 $+20\text{ mm}$,单因素试验设计如表 1 所示,不同微结构大小及间隔距离的阵列微结构激光共聚焦观测结果如图 4 所示。

表 1 微结构参数单因素试验设计表

Table 1 Single factor experimental design of microtexture

试验参数	水平				
	1	2	3	4	5
微结构宽度 $D/\mu\text{m}$	200	300	400	500	600
微结构深度 $H/\mu\text{m}$	100	200	300	400	500
微结构间隔距离 $L/\mu\text{m}$	150	250	350	450	550

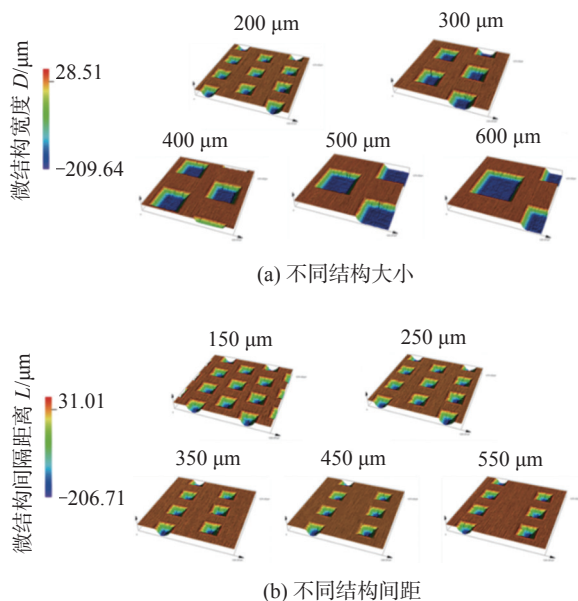


图 4 不同微结构 3D 形貌

Fig. 4 3D morphology of different microtextures. (a) different texture size; (b) different texture spacing

3 结果与分析

3.1 不同微结构参数焊接件拉伸剪切测试

3.1.1 微结构深度对焊接接头强度的影响

微结构宽度为 $200\ \mu\text{m}$, 间隔距离为 $250\ \mu\text{m}$, 具有不同深度微结构的焊接件抗拉载荷变化曲线如图 5 所示, 随着微结构深度的增加, 焊接件的抗拉载荷呈先增加后减小的趋势; 当微结构深度为 $100\sim 300\ \mu\text{m}$ 时, 随着微结构深度的增加金属与塑料焊接件的抗拉载荷持续增加; 当微结构深度为 $300\ \mu\text{m}$ 时, 金属与塑料焊接件的抗拉载荷达到峰值, 继续增加微结构深度, 金属与塑料焊接件的抗拉载荷持续减小。

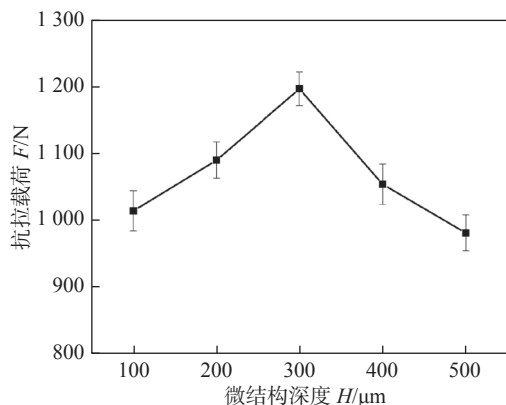


图 5 微结构深度对焊接件抗拉载荷的影响

Fig. 5 Effect of microstructure depth on tensile load of weld parts

3.1.2 微结构宽度对焊接接头强度的影响

微结构深度为 $200\ \mu\text{m}$, 间隔距离为 $250\ \mu\text{m}$, 具有不同微结构宽度的焊接件抗拉载荷变化曲线如图 6 所示。随着微结构宽度增加, 焊接件的抗拉载荷呈先增加后减小的趋势。微结构宽度为 $200\sim 300\ \mu\text{m}$ 时, 随着微结构宽度增加, 金属与塑料焊接件的抗拉载荷增加; 当微结构宽度为 $300\ \mu\text{m}$, 焊接件抗拉载荷达到峰值, 继续增加微结构宽度, 金属与塑料焊接件的抗拉载荷持续减小。

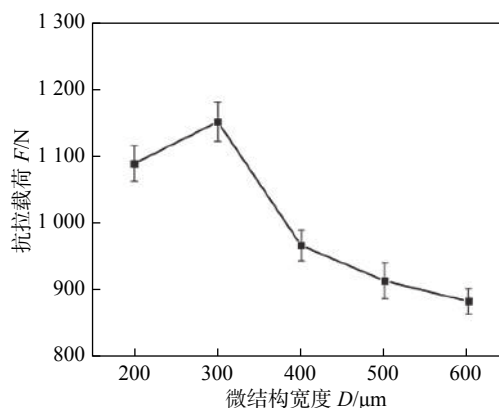


图 6 微结构宽度对焊接件抗拉载荷的影响

Fig. 6 Effect of microstructure width on tensile load of weld parts

3.1.3 微结构间隔距离对焊接接头强度的影响

微结构深度为 $200\ \mu\text{m}$, 宽度为 $200\ \mu\text{m}$, 具有不同微结构的间隔距离焊接件抗拉载荷变化曲线如图 7 所示。随着微结构间隔距离的增加, 5182 铝合金与 PA66 焊接件的抗拉载荷持续减小。

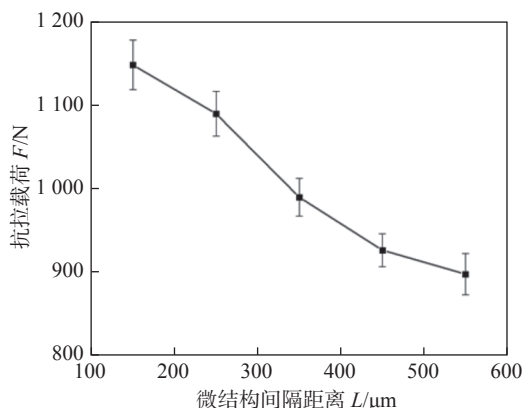


图 7 微结构间隔距离对焊接件抗拉载荷的影响

Fig. 7 Effect of microstructure spacing on tensile load of weld parts

3.2 焊接件微观形貌观测与机理分析

3.2.1 不同深度微结构

对具有不同深度微结构的焊接件拉伸剪切过

程中受力方式进行分析, 如图 8 所示. 由于飞秒激光的加工机制, 微结构内壁具有一定倾斜度, 当焊接件受到拉伸载荷时产生弯矩; 当微结构深度较小时, 微结构内部金属与塑料的连接区域面积较小, 拉伸剪切过程中微结构内部填充塑料易被拉出, 焊接接头强度较低; 随着微结构深度的增加, 金属与塑料的连接区域面积增加, 填充塑料不易从微结构内部被拉出, 焊接接头强度提高, 同时焊接件在拉伸剪切载荷下, 应力集中在填充塑料根部, 填充塑料根部易发生断裂.

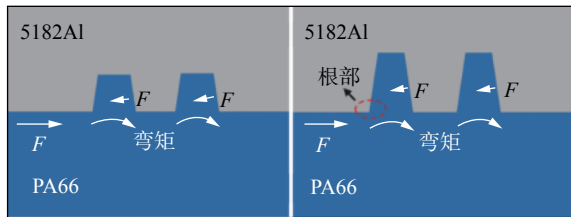


图 8 不同深度微结构焊接件微观受力分析

Fig. 8 Microscopic stress analysis of welded parts with different depth microstructure

具有不同深度微结构的焊接件连接界面微观观测结果如图 9 所示. 显微观测结果表明, 当微结构深度小于等于 300 μm 时, 微结构内部体积较小, 熔融塑料能够将微结构充分填充, 如图 9a, 9b 所示. 在此深度区间内, 随着微结构深度的增加, 金属与塑料连接区域面积增加, 焊接接头强度随之增加; 当微结构深度为 400 μm 时, 熔融塑料体积有限, 无法完全填充微结构, 产生孔洞等未填充缺陷, 金属与塑料的有效连接面积减少, 如图 9c 所示, 在

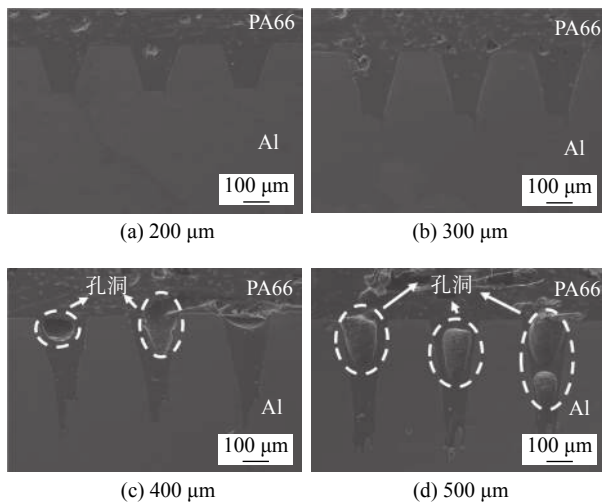


图 9 不同深度微结构焊接件连接界面 SEM

Fig. 9 SEM images of the interface of welded microtextures with different depths. (a) 200 μm ; (b) 300 μm ; (c) 400 μm ; (d) 500 μm

拉伸剪切过程中缺陷区域易在拉伸剪切应力下发生断裂, 导致金属与塑料的焊接接头强度减小; 继续增加微结构深度, 熔融塑料对微结构的填充效果继续下降, 微结构内部缺陷扩大, 如图 9d 所示, 铝合金与 PA66 的焊接接头强度继续减小.

为进一步分析微结构深度对焊接接头强度的影响机制, 对焊接件拉伸剪切断面进行分析, 具有不同深度微结构的焊接件拉伸剪切断面微观观测结果如图 10 所示. 无微结构区域塑料残留较少, 拉伸剪切过程中塑料易从金属表面剥落, 微结构内部区域残留塑料较多, 填充塑料内部产生断裂即内聚断裂, 内聚断裂大多发生在微结构内部区域, 内聚断裂比例越高, 金属与塑料的焊接接头强度越高.

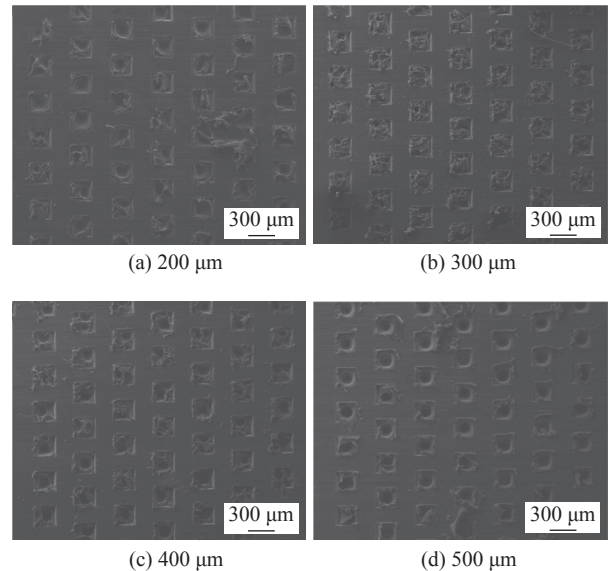


图 10 不同深度微结构焊接件拉伸断面 SEM

Fig. 10 SEM images of tensile fracture section of welded parts with microstructure at different depths. (a) 200 μm ; (b) 300 μm ; (c) 400 μm ; (d) 500 μm

当微结构深度为 200 μm 时, 微结构深度较小, 金属与塑料连接面积较小, 微结构内部填充塑料易被拉出; 当微结构深度为 300 μm 时, 金属与塑料的连接面积增加, 填充塑料不易从微结构内部被拉出, 断面观测结果显示填充塑料断裂部位主要位于根部区域, 内聚断裂比例增加, 焊接接头强度增加; 当微结构深度增加到 400 μm 时, 熔融塑料无法对微结构进行充分填充, 从而会产生未填充缺陷, 缺陷处在拉伸剪切过程中易发生断裂, 导致焊接接头强度减小, 断面结果显示填充塑料根部出现大量孔洞, 内聚断裂比例下降; 随着微结构深度继续增加, 熔融塑料对微结构的填充效果继续下降, 未填充缺

陷扩大,金属与塑料的焊接接头强度继续减小,断面处孔洞大小和深度明显增加,内聚断裂比例继续下降。

3.2.2 不同宽度微结构

具有不同宽度微结构的焊接件连接界面微观观测结果如图 11 所示。微观观测结果表明,当微结构宽度小于等于 300 μm 时,塑料熔融后能够对微结构进行充分填充,在此区间内,随着微结构宽度的增加,填充塑料能够承受更大的拉伸剪切应力,焊接件的焊接接头强度随微结构宽度的增加而增加;当微结构宽度为 400 μm 时,熔融塑料体积有限无法完全填充微结构,微结构内部出现孔洞等未填充缺陷,金属与塑料的有效连接面积减少,焊接件在拉伸剪切过程中缺陷处易产生断裂,金属与塑料的焊接接头强度减小;继续增加微结构宽度,熔融塑料对微结构的填充效果继续下降,缺陷尺寸继续增加,金属与塑料的焊接接头强度继续减小。

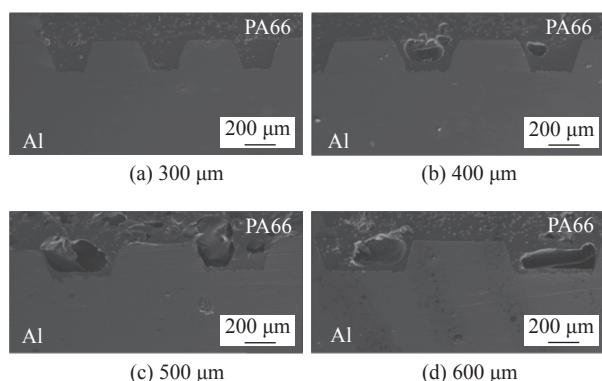


图 11 不同宽度微结构焊接件连接界面 SEM

Fig. 11 SEM images of the interface of welded microtextures with different widths. (a) 300 μm ; (b) 400 μm ; (c) 500 μm ; (d) 600 μm

为进一步分析微结构宽度对焊接接头强度的影响机制,对焊接件拉伸剪切断面进行分析,具有不同宽度微结构的焊接件拉伸剪切断面微观观测结果如图 12 所示。当微结构宽度从 200 μm 增加到 300 μm 时,微结构内部填充塑料的抗剪强度增加,同时断面微观观测结果显示,断面微结构内部残留塑料增多,内聚断裂比例上升,金属与塑料的焊接接头强度增加;当微结构宽度为 400 μm 时,熔融塑料无法对微结构进行充分填充,出现未填充缺陷,缺陷处易发生断裂,内聚断裂比例下降,焊接接头强度减小;随着微结构宽度继续增加,未填充缺陷扩大,内聚断裂比例继续下降,金属与塑料的焊接接头强度继续减小。

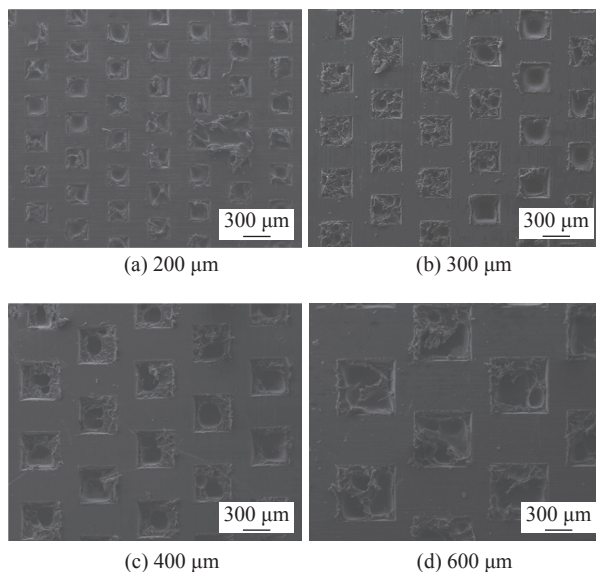


图 12 不同宽度微结构焊接件拉伸断面 SEM

Fig. 12 SEM images of tensile fracture section of welded parts with microstructure at different widths. (a) 200 μm ; (b) 300 μm ; (c) 400 μm ; (d) 600 μm

3.2.3 不同间隔距离微结构

由图 7 可以看到随着微结构间隔距离的增加,5182 铝合金与 PA66 焊接件的抗拉载荷持续减小。为进一步探究微结构间隔距离对 5182 铝合金与 PA66 焊接接头强度的影响机制,引入微结构加工区域覆盖率计算,结合覆盖率对金属与塑料的焊接接头强度进行分析,覆盖率计算式为

$$\theta = \frac{D^2 N}{S} \quad (1)$$

式中: θ 为加工区域微结构的覆盖率; D 为单个微结构的宽度 (μm); N 为加工区域微结构的数量; S 为微结构加工区域面积 (μm^2),经计算不同间隔距离微结构焊接件的微结构覆盖率如表 2 所示。

表 2 焊件上不同微结构间隔对应的微结构覆盖率
Table 2 Microstructure coverage corresponding to different spacing on the weldment

序号	微结构宽度 $D/\mu\text{m}$	间隔距离 $L/\mu\text{m}$	微结构深度 $H/\mu\text{m}$	加工区域微结构 覆盖率 θ (%)
1	200	150	200	30.03
2	200	250	200	23.37
3	200	350	200	20.12
4	200	450	200	16.67
5	200	550	200	13.33

加工区域微结构覆盖率随微结构间隔距离变化曲线如图 13 所示。随着微结构间隔距离的增加,

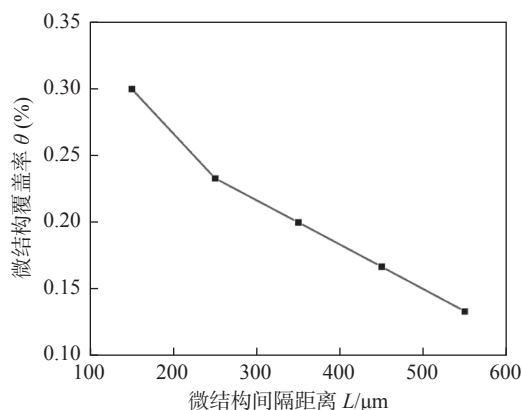


图 13 加工区域微结构覆盖率随微结构间隔距离变化曲线
Fig. 13 Microstructure coverage of machining area varies with the microstructure spacing

加工区域内覆盖率逐渐降低,微结构覆盖率的下降导致金属与塑料连接区域面积减少,金属与塑料的焊接接头强度随间隔距离的增加持续减小。

4 结论

(1) 金属与塑料的焊接接头强度随微结构深度和宽度的增加呈先增加后下降的趋势,焊接接头强度随微结构间隔距离的增加持续减小。

(2) 金属与塑料的焊接接头强度与微结构的填充效果有关,当微结构尺寸较小时,熔融塑料能够对微结构进行充分填充;随着微结构尺寸的增加,金属与塑料的焊接接头强度增加。当熔融塑料无法对微结构进行充分填充时,产生未填充缺陷,缺陷处易发生断裂,导致焊接接头强度减小。

(3) 金属与塑料的连接强度与连接面积有关,随着微结构间隔距离的增加,微结构覆盖率下降,金属与塑料的连接面积减少,金属与塑料的焊接接头强度随间隔距离的增加持续减小。

参考文献

[1] Xu X, Chen X B, Liu Z, *et al.* Reliability-based design for lightweight vehicle structures with uncertain manufacturing accuracy[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2021, 95: 22 – 37.

[2] Tan D, Wu Y S, Feng J, *et al.* Lightweight design of the in-wheel motor considering the coupled electromagnetic-thermal effect[J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2022, 50(3): 935 – 953.

[3] Park J H, Kim S K, Choi B I, *et al.* Optimal design of rear chassis

components for lightweight automobile using design of experiment[J]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2010, 41(5): 391 – 397.

- [4] Luo Y T, Tan D. Lightweight design of an in-wheel motor using the hybrid optimization method[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering*, 2013, 227(11): 1590 – 1602.
- [5] Braga D F O, Tavares S M O, Da Silva L F M, *et al.* Advanced design for lightweight structures: Review and prospects[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2014, 69: 29 – 39.
- [6] Duan L B, Xiao N C, Hu Z H, *et al.* An efficient lightweight design strategy for body-in-white based on implicit parameterization technique[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2017, 55(5): 1927 – 1943.
- [7] He K B, Huo H, Zhang Q. Urban air pollution in China: Current status, characteristics, and progress[J]. *Annual Review of Energy and the Environment*, 2002, 27: 397 – 431.
- [8] Feng Y Y, Chen S Q, Zhang L X. System dynamics modeling for urban energy consumption and CO₂ emissions: A case study of Beijing, China[J]. *Ecological Modelling*, 2013, 252: 44 – 52.
- [9] Taub A I, Luo A A. Advanced lightweight materials and manufacturing processes for automotive applications[J]. *MRS Bulletin*, 2015, 40(12): 1045 – 1053.
- [10] Delogu M, Del Pero F, Pierini M. Lightweight design solutions in the automotive field: Environmental modelling based on fuel reduction value applied to diesel turbocharged vehicles[J]. *Sustainability*, 2016, 8(11): 1167.
- [11] Lambiasi F, Genna S. Laser-assisted direct joining of AISI304 stainless steel with polycarbonate sheets: Thermal analysis, mechanical characterization, and bonds morphology[J]. *Optics and Laser Technology*, 2017, 88: 205 – 214.
- [12] Li Y, Zhan X H, Gao C Y, *et al.* Comparative study of infrared laser surface treatment and ultraviolet laser surface treatment of CFRP laminates[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 102(9-12): 4059 – 4071.
- [13] Zhan X H, Li Y, Gao C Y, *et al.* Effect of infrared laser surface treatment on the microstructure and properties of adhesively CFRP bonded joints[J]. *Optics and Laser Technology*, 2018, 106: 398 – 409.
- [14] Gao Q Y, Li Y, Wang H E, *et al.* Effect of scanning speed with UV laser cleaning on adhesive bonding tensile properties of CFRP[J]. *Applied Composite Materials*, 2019, 26(4): 1087 – 1099.

- 爆炸与冲击, 2020, 40(5): 87 – 95.
- Tang Kui, Wang Jinxiang, Chen Xingwang, *et al.* Penetration characteristics of jacketed rods into semi-infinite steel targets[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(5): 87 – 95.
- [10] 辛春亮, 朱星宇, 薛再清, 等. 有限元分析常用材料参数手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- Xin Chunliang, Zhu Xingyu, Xu Zaiqing, *et al.* Handbook of material parameters commonly used in finite element analysis [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2022.
- [11] 缪广红, 艾九英, 马雷鸣, 等. 不锈钢/普碳钢双面爆炸复合的数值模拟 [J]. *焊接学报*, 2020, 41(8): 55 – 62.
- Miao Guanghong, Ai Jiuying, Ma Leiming *et al.* Numerical simulation of double-sided explosive welding of stainless steel/ordinary carbon steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(8): 55 – 62.
- [12] 郑远谋. 爆炸焊接和爆炸复合材料 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- Zheng Yuanmou. Explosive welding and explosive composite material[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2017.
- [13] 刘开源. 难熔金属预热爆炸焊接数值模拟及实验研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2021.
- Liu Kaiyuan. Numerical simulation and experimental investigation on hot explosive welding of refractory metals[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2021.
- [14] 毕志雄, 李雪交, 吴勇, 等. 钛箔/钢爆炸焊接的界面结合性能 [J]. *焊接学报*, 2022, 43(4): 81 – 85.
- Bi Zhixiong, Li Xuejiao, Wu Yong, *et al.* Interfacial bonding properties of titanium foil/steel explosive welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(4): 81 – 85.
-
- 第一作者: 周壮壮, 硕士; 主要研究方向为弹药工程与毁伤技术; Email: 1269339034@qq.com.
- 通信作者: 陈放, 博士, 副教授; Email: chenfang@bit.edu.cn.

(编辑: 郑红)

[上接第 33 页]

- [15] Kawahito Y, Niwa Y, Katayama S. Laser direct joining between stainless steel and polyethylene terephthalate plastic and reliability evaluation of joints[J]. *Welding International*, 2014, 28(2): 107 – 113.
- [16] Chen Z, Huang Y, Han F L, *et al.* Numerical and experimental investigation on laser transmission welding of fiberglass-doped PP and ABS[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 31: 1 – 8.
- [17] Katayama S, Kawahito Y. Laser direct joining of metal and plastic[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 59(12): 1247 – 1250.
- [18] Chludzinski M, Dos Santos R E, Churiaque C, *et al.* Pulsed laser welding applied to metallic materials-A material approach[J]. *Metals*, 2021, 11(4): 640.
- [19] Goncalves L, Duarte F M, Martins C I, *et al.* Laser welding of thermoplastics: An overview on lasers, materials, processes and quality[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 119: 103931.
- [20] Amend P, Mallmann G, Roth S, *et al.* Process-structure-property relationship of laser-joined thermoplastic metal hybrids[J]. *Journal of Laser Applications*, 2016, 28(2): 022403.
- [21] Jung K W, Kawahito Y, Takahashi M, *et al.* Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to aluminum alloy[J]. *Journal of Laser Applications*, 2013, 25(3): 032003.
- [22] Liu J, Cui W, Shi Y, *et al.* Effect of surface texture and ultrasonic on tensile property of 316L/PET dissimilar joints[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 50: 430 – 439.
-
- 第一作者: 张功达, 硕士; 主要从事塑料与金属焊接方向的研究; Email: zgd18896584236@163.com.
- 通信作者: 刘亚运, 博士; Email: yyliu6688@suda.edu.cn.

(编辑: 郑红)