

碳纤维复合材料与镁合金激光焊工艺优化设计

王毅 张晓庆 杨峰骅 苏昱鸣 陆宜灵

长春工程学院机电学院 长春市朝阳区 130012

摘要: 随着工业应用领域的迅速发展,轻量化需求越来越突出,轻质材料的可靠连接成为关键问题。本文采用激光焊方法,连接碳纤维复合材料与镁合金。实验结果表明:当激光功率为 580–600W 之间,焊接速度为 3mm/s,离焦量为 15mm 时,碳纤维复合材料与镁合金之间的界面抗剪强度可以达到 35.74 MPa,热影响区大小得以有效限制,接头微观结构呈现一种均匀且没有缺陷的良好状态。

关键词: 碳纤维复合材料; 镁合金; 激光焊; 优化

随着现代生活对高速、高效、高精需求的日益增加,轻量化制造对工业生产的要求越来越突出^[1–4]。碳纤维复合材料(CFRTP)具有密度低、高强度、耐高温、抗腐蚀等显著特点;镁合金具有密度低、比强度高、阻尼减震性好、导热性佳等特点^[5–8]。两种轻质高性能材料广泛应用于航空航天、汽车制造、电子产品、医疗器械及运动器材等领域,二者的可靠连接成为现代工业制造急需解决的关键技术^[9, 10]。

本文采用激光焊方法连接碳纤维复合材料与镁合金,并对激光功率、焊接速度、离焦量等关键工艺参数进行优化设计,通过宏观形貌、微观结构特征及力学性能研究,探讨 CFRTP/Mg 异质接头的综合性能。

1 实验材料与方法

实验选用 50mm × 20mm × 2mm 以聚醚醚酮(PEEK)树脂为基体,碳纤维为增强材料,呈单向排列的高性能复合材料和 50mm × 20mm × 1mm 的 AZ31 镁合金。采用 RC-YLS-2000 型光纤激光器进行激光焊接,其工艺参数如表 1 所示。

表 1 激光焊接工艺参数

试样编号	焊接功率 (W)	焊接速度 (mm/s)	离焦量 (mm)
1#	530	3	10
2#	580	3	10
3#	630	3	10
4#	600	2	10
5#	600	3	10
6#	600	4	10
7#	600	3	5
8#	600	3	15
9#	600	3	20

2 实验结果与分析

2.1 激光功率的影响

当激光功率为 530W 时,由于热输入有限,形成的金属熔池尺寸较小,熔深较浅,并有气孔缺陷,焊接质量差,热输入不足导致熔池温度未达 CFRTP 树脂熔融阈值,镁合金与树脂基体浸润不充分。当激光功率为 580W 时,金属熔池的体积(深度与宽度)均显著增大,从而有更多的热量能够有效地传导至界面,使得界面温度相应升高,从而实现可靠结合。当激光功率为 630W 时,功率过高导致热输入过大,材料烧穿(CFRTP 与 AZ31B 均被烧蚀),表明已超出合理工艺范围。

2.2 焊接速度的影响

当焊接速度为 2mm/s 时,激光作用时间长,热输入过量,超出材料熔点,引发剧烈蒸发和烧蚀。出现熔池过深与烧穿现象。当焊接速度为 3mm/s 时,熔深适中,焊核区边界清晰(红色划线区域),连接界面处形成连续过渡层。当焊接速度为 4mm/s 时,存在熔合不充分与气孔缺陷。焊核区边界断续分布,熔深不足,界面处存在未熔合间隙。熔池底部出现气孔,因焊接速度过快导致熔池流动性不足,气体无法逸出。

2.3 离焦量的影响

当离焦量为 5mm 时,激光能量密度过高,焦点过近导致局部过热,AZ31B 与 CFRTP 剧烈蒸发。离焦量为 10mm 时,能量密度适中,热量分布均匀,熔深与熔宽匹配材料特性,熔合区边界清晰,熔合较充分。离焦量为 15mm 时,界面处出现明显黑块,有新化合物生成,界面结合致密。离焦量为 20mm 时,镁合金仅表层轻微熔化,能量密度较低。

2.4 力学性能分析

经剪切测试表明,当激光功率增大时,接头的剪切力先大再小,当激光功率为 580W 时,接头抗剪强度为 19.12MPa。综合工艺参数优化后发现,当激光功率 600W,焊接速度为 3mm/s 时,离焦量为 15mm 时,接头最大剪切强度为 35.74MPa。

3 结论

(1) 激光功率、焊接速度及离焦量工艺参数对激光焊 AZ31B/CFRTP 异质接头的微观结构与性能有重要影响。工艺参数的优化设计对于提高接头质量有关键作用。

(2) 当激光功率为 580–600W,焊接速度为 3mm/s,离焦量为 15mm 时,碳纤维复合材料与镁合金异质接头的抗剪强度达到 35.74MPa,热影响区大小得以有效控制,界面微观结构均匀,无缺陷,结合效果良好。

参考文献:

[1] 赵德望,任大鑫,赵坤民,等.工艺参数对镁钛异质金属超声波点焊接头拉伸性能及疲劳性能的影响[J].机械工程学报,2017,53(24):118–125.

[2] Keiichiro Iwata, Asuka Suzuki, Seung-Gwang Kim, et al. Enhancing the solid-state joinability of A5052 and CFRTP via an additively

manufactured micro-structure [J]. Journal of Materials Processing Tech, 2022(306):117629.

[3] 王杰. 镁合金-碳纤维异种材料连续-脉冲双激光热源钎焊模拟[D]. 辽宁科技大学,2023.

[4] 李锦竹. AZ31B 镁合金与 CFRP 激光焊钎复合连接工艺与焊缝成形调控研究[D]. 大连理工大学,2022.

[5] Yifan L, Jianhui S, Guolong M, et al. Effect of the laser texturing width on hot-pressing joining of AZ31B and CFRTP[J]. Optics and Laser Technology, 2021, 143

[6] Liu Z, Lu G, Yang Y, et al. Process Characterizations of Ultrasonic Extruded Weld-Riveting of AZ31B Magnesium Alloy to Carbon Fiber-Reinforced PA66[J]. Polymers, 2024, 16(12):1749.

[7] Jing C, Sheng L, Xu J, et al. Improved CFRTP/AZ31B alloy hybrid joint by surface micro-texture and laser rotational welding technique[J]. Materials & Design, 2025, 255, 114155.

[8] Junke JIAO, Jihao XU, Chenghu JING, et al. Laser welding process and strength enhancement of carbon fiber reinforced thermoplastic composites and metals dissimilar joint: A review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, (2023), 36(12): 13–31

[9] 刘一凡. 镁合金/碳纤维增强热塑复材激光连接界面双向调控研究[D]. 哈尔滨工业大学,2022.

[10] 金启豪,陈娟,彭立明,等.碳纤维增强树脂基复合材料与铝/镁合金连接研究进展[J].材料工程,2022,50(1):15–24.

基金项目: 吉林省教育厅项目(批准号: JJKH-20220631KJ)。

作者简介: 王毅,女,(1980–),吉林长春,长春工程学院,高级实验师,博士,主要从事先进材料连接方面的研究。