

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.11.012

GF/PPS 复合材料激光透射焊接性能

聂浩,岳贵成,薛长鸣,高健峰

(上海亚大汽车塑料制品有限公司,上海 201708)

摘要: 玻璃纤维增强聚苯硫醚(GF/PPS)复合材料因其优异性能广泛应用于航空航天、电子电气等领域。针对 GF/PPS 焊接过程中存在的温度控制难、黏接不均匀等问题,采用 980 nm 波长半导体激光振镜温控焊接系统进行焊接性能研究。首先对母材进行差示扫描量热分析以确定焊接温度,随后对不同厚度(1, 1.5 及 2 mm)的 GF/PPS 透光试样进行透光率检测,并改变振镜扫描次数进行焊接实验,研究透光层厚度对透光率及焊缝质量的影响规律。结果表明,当透光层厚度为 1 mm 时,透光率最高达 59.4%;厚度增至 1.5 mm 和 2 mm 时,透光率分别降至 42.1% 和 28.6%。在焊接性能方面,焊接温度为 285 °C、扫描速度 1 000 mm/s、扫描次数为 45 次、透光层厚度为 1 mm 时,焊接接头剪切强度最高,达到 33 MPa;相同扫描次数下,随着材料厚度增加、透光率降低,焊缝剪切强度相应下降至 29 MPa (1.5 mm) 和 22.9 MPa (2 mm)。对剪切断面进行扫描电子显微镜测试,结果表明,焊缝区域存在气孔集中现象,断面形貌呈现典型“河流”花样特征,断裂模式以脆性断裂为主。

关键词: 聚苯硫醚;激光透射焊接;剪切强度;断面形貌;透光率

中图分类号: TG456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)11-0086-06

Laser transmission welding performance of GF/PPS composites

NIE Hao, YUE Guicheng, XUE Changming, GAO Jianfeng

(Shanghai Chinaust Automotive Plastics Corp., Ltd., Shanghai 201708, China)

Abstract : Glass fiber reinforced polyphenylene sulfide (GF/PPS) composites are widely used in aerospace, electronics, and electrical applications due to their excellent performance. However, to solve challenges such as difficult temperature control and inconsistent bonding during welding remain, a 980 nm wavelength semiconductor laser scanning galvanometer temperature-controlled welding system was employed to investigate the welding performance of GF/PPS. Differential scanning calorimetry was first used to analyze the base material for determining the appropriate welding temperature. The transmittance of GF/PPS specimens with different thicknesses (1, 1.5 mm and 2 mm) was measured, and welding was performed by varying the number of scanning passes. The influence of transmissive layer thickness on transmittance and weld quality was systematically examined. The results show that the maximum transmittance of 59.4% is achieved at a thickness of 1 mm. As the thickness increases to 1.5 mm and 2 mm, the transmittance decreases to 42.1% and 28.6%, respectively. In terms of welding performance, the highest shear strength of 33 MPa is obtained under the following conditions: welding temperature of 285 °C, scanning speed of 1 000 mm/s, 45 scanning times, and a transmissive layer thickness of 1 mm. Under the same number of scanning passes, as the material thickness increases and transmittance decreases, the shear strength of the weld decreases accordingly to 29 MPa of 1.5 mm thickness and 22.9 MPa of 2 mm thickness. Scanning electron microscopy observation of the shear fracture surfaces reveals concentrated porosity in the weld zone. The fracture morphology exhibits typical characteristics the river pattern, indicating a predominantly brittle fracture mode.

Keywords : polyphenylene sulfide ; laser transmission welding ; shear strength ; fracture morphology ; transmittance

玻璃纤维(GF)增强聚苯硫醚(PPS)复合材料凭借其由苯环和硫原子交替构成的刚性分子主链,具

备优异的耐热性、耐化学性、阻燃性以及尺寸稳定性,因而被广泛应用于汽车发动机部件、传感器外

通信作者: 高健峰,工程师,主要从事聚合物材料的应用及工艺研究

收稿日期: 2025-08-26

引用格式: 聂浩,岳贵成,薛长鸣,等.GF/PPS 复合材料激光透射焊接性能[J].工程塑料应用,2025,53(11):86-91.

NIE Hao, YUE Guicheng, XUE Changming, et al. Laser transmission welding performance of GF/PPS composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(11): 86-91.

壳、电子连接器和水泵等^[1-4]。然而,随着汽车工业对轻量化与高性能需求的不断提升,结构复杂的塑料零部件往往需要通过分体注塑再连接组装的方式实现功能集成,这对连接技术的效率、精度与可靠性提出了更高要求^[5]。

在各类塑料连接技术中,电阻焊接、感应焊接、超声波焊接和激光透射焊接是常见方法。褚俊同^[6]研究了GF/PPS复合材料的超声波焊接工艺参数与接头性能关系,当焊接能量为50 J时,接头的剪切强度达到20 MPa。韩志勇等^[7]研究了碳纤维(CF)增强PPS复合材料的感应焊接工艺,发现焊接功率2 kW、焊接时间3 min时,接头剪切强度会随着压力增加呈先升高后降低的趋势。Barbosa等^[8]采用电阻焊接GF/PPS复合层压板,研究表明,将焊接温度增加到材料熔融温度以上时,焊缝主要存在层内失效和焊接界面失效两种模式。

然而,上述方法均存在一定局限:电阻与感应焊接热影响区大、能量效率低;超声波焊接则因振动剧烈,不适用于高精度或内部敏感结构。相较而言,激光透射焊接作为一种非接触、高精度的连接方式,具有能量集中、热输入可控、无振动、焊缝一致性好等优势,尤其适用于复杂结构的高质量焊接和产品的自动化生产^[9-10]。

近年来,随着材料技术的进步,国内外供应商开发了多种适用于激光焊接的专用PPS材料,通过优化树脂结构和填料体系,显著提高了材料的透光率,为PPS的激光透射焊接应用创造了条件^[11-13]。在此背景下,激光透射焊接技术逐渐应用于PPS复合材料中。Jaeschke等^[14]将GF/PPS作为吸光材料、CF/PPS作为透光材料进行激光透射焊接。研究表明,当透光层材料的透光率低时,焊接时间需增加,且采用激光振镜焊接效果更好,焊缝力学性能更高。Wippo等^[15]比较了940 nm和1 530 nm波长的激光器在焊接GF/PPS复合材料时的表现,研究结果表明,1 mm厚的透光层对1 530 nm透过率更高,焊接所用时间更短。

现有研究对GF/PPS复合材料在激光透射焊接过程中,工艺参数与材料特性之间的协同作用机制仍不明确,在产品结构设计中透光层厚度和激光工艺参数对焊接性能的影响规律尚需深入研究。因此,笔者研究透光层厚度和激光扫描次数对GF/PPS激光透射焊接性能的影响,旨在为实际生产提供理

论指导和工艺依据,推动GF/PPS复合材料在高端装备制造领域的应用。

1 实验部分

1.1 主要原材料

透光层料片:本色PPS-GF20,扬州磐晟纳米新材料科技股份有限公司,厚度分别为1.0,1.5 mm和2.0 mm,长、宽为100 mm×20 mm。透光层母材注塑成型。

吸光层料片:黑色PPS-GF20,扬州磐晟纳米新材料科技股份有限公司,厚度均为2.0 mm,长、宽为100 mm×20 mm。吸光层母材加入质量分数0.5%炭黑母粒注塑成型。

1.2 主要仪器与设备

注塑机:HTF86/TJ,宁波海天塑机集团有限公司;

激光振镜焊接设备、全画面透光率检测仪:上海亚大汽车塑料制品有限公司;

拉伸试验机:BT2-FR020TEW-A50,德国ZWICK公司;

离子溅射仪:GVC-1000,北京格微仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):SEM-3200,国仪量子技术(合肥)股份有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC-5,梅特勒托利多国际有限公司。

1.3 焊接方法及设备原理

焊接设备采用半导体激光器作为焊接热源,激光最大功率200 W,波长为980 nm。设备搭载了温控系统,通过设置焊接温度参数,温控系统自动采集激光光斑区域温度,在功率设置范围内温控系统实时调整出光功率,使得焊接区域温度到达预设温度,实现对焊缝温度的精准控制。采用正离焦后将光斑直径控制在2 mm左右后进行焊接。高速振镜可快速重复扫描焊缝,实现“准同步”加热,使焊缝受热快速、均匀,增加焊接一致性^[16]。激光透射焊接示意图如图1所示,其原理为上层材料透光,下层材

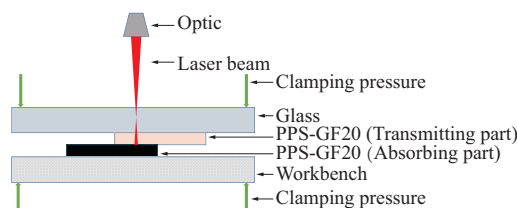


图1 激光透射焊接工表示意图

Fig. 1 Schematic of laser transmission welding fixture

料吸光,在激光的作用下,吸光层吸收能量并将其传递到透光层,在压力的作用下,在两母材界面形成焊缝^[17-18]。顶层固定盖板为透光玻璃,可升降工装底座在气缸的作用下将料片顶到透光玻璃上,为焊接提供压力。

为探究吸光料和透光料母材的熔点差异,对母材取样后采用DSC仪进行二次升温扫描处理,分析结果如图2所示。由图2a可知,透光母材一次升温时,熔融峰为281.04℃,结晶峰温度为230.20℃,二次升温后,熔融峰为279.28℃。由图2b可知,吸光母材一次升温熔融峰为283.07℃,结晶峰温度为230.57℃,二次升温时熔融峰为279.99℃。焊接母材熔点差异很小,均在280℃左右。

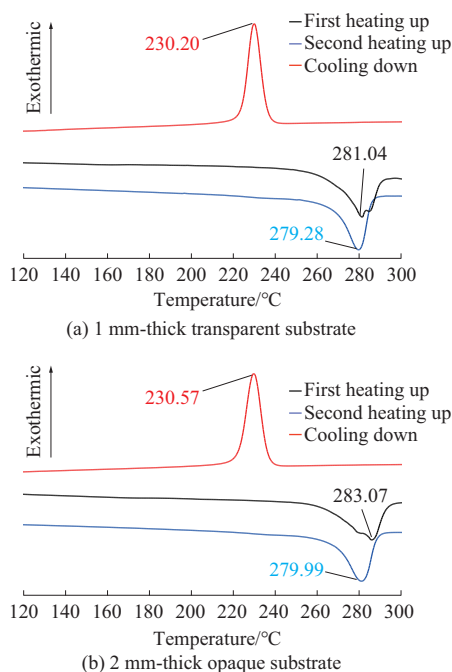


图2 PPS-GF20母材DSC测试结果

Fig. 2 DSC results of the PPS-GF20 substrate

根据母材的DSC试验结果,将焊接温度设置为285℃,此温度下PPS-GF20可发生熔化,激光扫描速度设置为1 000 mm/s,焊接压力为800 N,温控系统的激光功率控制范围设为20~150 W。保证基本参数不变,只改变激光扫描次数,对不同厚度的透光层进行激光透射焊接。将1, 1.5, 2 mm厚的透光层分别与2 mm厚吸光层焊接,并记为试样T1, T2和T3。激光透射焊接对母材的间隙要求较高,为保证母材焊接接触面平整,焊接前采用乙醇清洁焊接表面,去除杂质。

1.4 测试与表征

采用全画面透光率检测仪对不同厚度透光层进行检测,同厚度料片检测5组,每组取5个点,检测结果取平均值作为该厚度透光层材料的透光率。

对不同的厚度以及焊接扫描次数的焊接试样根据ASTM D5868-2014,采用万能拉伸机进行测试,记录最大拉力,拉伸速度为5 mm/min,测试温度为25℃。每组试样数量为3,取平均剪切强度。单个试样剪切强度计算见式(1)。

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

式(1)中: σ 表示剪切强度,单位MPa; A 表示焊缝面积,单位mm²; F 表示拉力,单位N。

剪切测试失效的接头断口先进行喷金处理,电流设定10 mA,处理时间60 s后,使用SEM对焊缝进行观察、拍照。

2 结果与讨论

2.1 不同透光层厚度对透光率的影响

不同厚度的料片透光率检测结果如图3所示,随着厚度的增加,材料对光的透过率呈下降趋势。其中试样T1透光率最高达59.4%, T2透光率为49.6%,而T3透光率最低,为43%。玻璃纤维对激光有散射作用,透光层厚度增加后,玻纤的含量也增加,散射作用影响增强,透光率下降,进而使到达焊缝界面的能量降低。

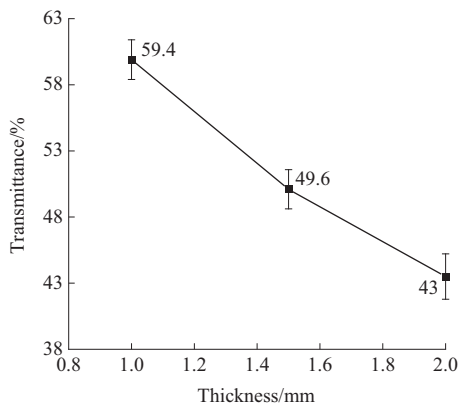


图3 不同厚度GF/PPS复合材料的透光率

Fig. 3 Light transmittance of GF/PPS composites with different thicknesses

2.2 扫描次数对焊接性能的影响

图4为焊接温度285℃、扫描速度1 000 mm/s、温控系统激光功率控制范围20~150 W、焊接压力800 N,不同厚度透光层焊缝的焊接强度随焊接扫描次数的变化曲线。由图可知,随着扫描次数的增

加,焊接强度呈先增加后降低的趋势。试样T1的整体强度最大,当扫描次数为45次时,焊缝剪切强度最高,为33 MPa;当激光扫描次数为60次时,试样组T2的剪切强度最大为30 MPa;当激光扫描次数为75次时,试样T3组中剪切强度最大为27 MPa。当扫描次数相同时,由于厚度越小透光率越高,到达吸光层的能量越多,因此焊缝强度相对更高。

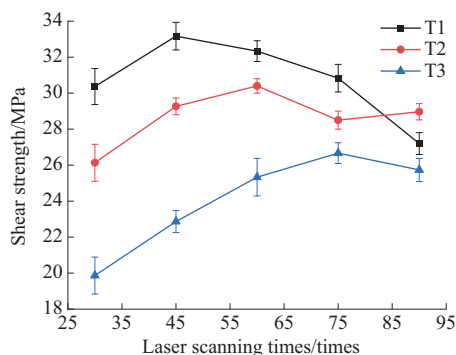


图4 不同厚度透光层扫描次数与剪切强度关系

Fig 4 Relationship between laser scanning times and shear strength across different layer thicknesses

图5为扫描次数为60次时不同厚度透光层试样宏观形貌。由图5a、图5b可知,试样T1的焊缝成型良好,透光层侧可见大量黑色吸光层母材残留,焊接效果良好,剪切强度最高。试样T2的焊缝形貌如图5c、图5d所示,透光层侧存在少量吸光层母材,焊缝均匀,未见明显气孔。试样T3的形貌如图5e、f所示,由图可知,焊缝边缘不平滑,熔接不完全。

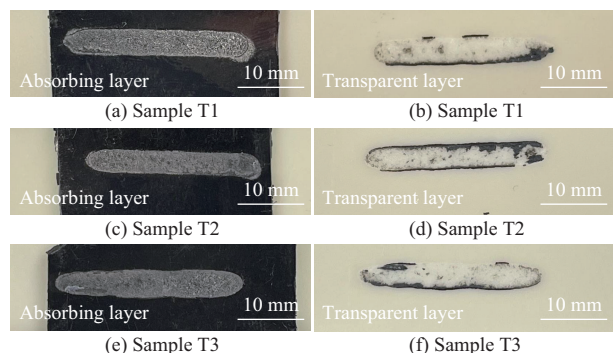


图5 不同透光层试样焊缝宏观形貌

Fig. 5 Macroscopic morphology of weld samples with different transparent layers

试样T3不同扫描次数焊缝断裂失效后的焊缝形貌如图6所示。由图可知,扫描次数为30次时,焊缝呈不均匀的小圆点,扫描次数增加到60次后,焊缝逐渐变宽,但此时焊缝并不均匀,黏接效果不佳。当扫描次数增加到75次时,整体焊缝形貌会呈规则的椭圆状,焊缝边缘清晰、连续。焊缝宽度会

随着扫描次数的增加而变宽,激光扫描次数越多,吸收的热量越多,热量累积会导致焊缝热影响区增加,从而使得焊宽越宽,从而熔融效果更好。

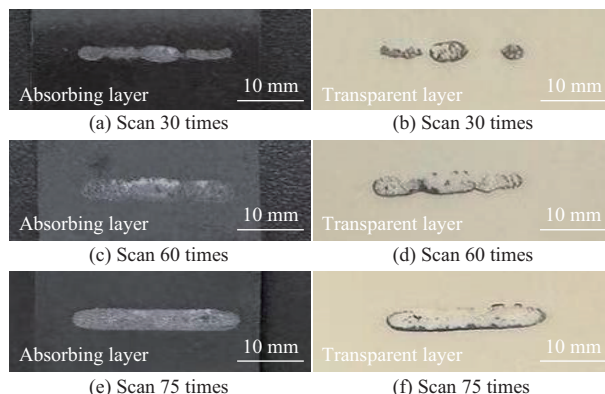


图6 试样T3不同扫描次数的焊缝宏观形貌

Fig 6 Macroscopic morphology of weld seams with different scanning times for sample T3

图7为试样T1扫描次数为90次拉伸失效后的焊缝中部宏观形貌。由图可知,焊缝中段存在气泡聚集区,焊缝边缘存在熔融后的本色透光层母材。由于高斯光源中心温度较高,焊接时焊缝吸收热量过多,当温度达到裂解温度时,裂解产生的气体无法及时从焊缝中溢出从而形成气泡。气泡的形成会降低母材间的有效熔融区域,降低焊缝强度。

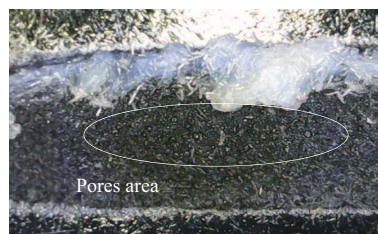


图7 试样T1焊缝中部宏观形貌

Fig 7 Macrostructural morphology at mid-weld region of specimen T1

2.3 焊缝断口微观形貌

在焊接温度285 °C、扫描速度1 000 mm/s、焊接压力800 N、温控的功率范围20~150 W、扫描次数为90次时,不同透光层厚度试样的SEM照片如图8所示。由图8a中可见大量气孔分布,气孔周围主要由玻纤交联而成的骨架组成。当焊接扫描次数多,热输入量增加,容易导致玻纤交联区域树脂发生分解,由于熔融的树脂不足或未及时填充,从而出现较多气孔,加之树脂基体与纤维之间热膨胀系数差异显著,会引发较大的残余应力,该区域成为焊缝黏接薄弱区域,较扫描次数为45次时(33 MPa)更低,为27 MPa。

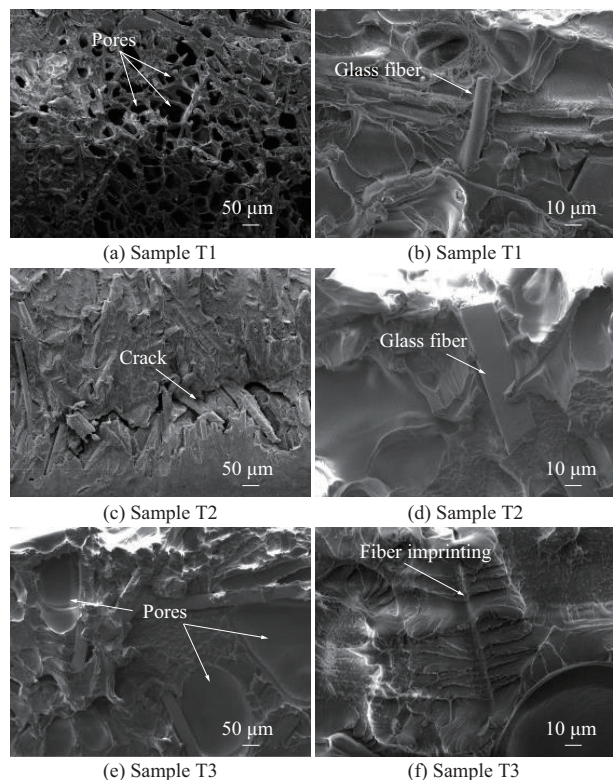


图8 不同试样的焊缝SEM照片

Fig 8 SEM photos of weld seam of different samples

由图8c可知,试样T2焊缝边缘处存在裂纹。当材料受到外界拉力破坏时,树脂基体首先承受载荷,并通过界面将应力传递到玻纤上,当拉伸载荷超过基体的强度时,基体中开始产生裂纹,并扩展到界面处,随后在纤维处发生应力集中,到达一定程度之后纤维被拉完或拉断。由图8d可知,GF/PPS材料中GF种类包含了较大的扁平状玻纤和较细小的圆柱形玻纤,从填充角度看,扁纤比圆纤与树脂间的结合面积更大,更有利于提升材料的力学性能^[19]。

试样T3焊缝断裂失效的SEM形貌如图8e、图8f所示。焊缝中玻纤处存在大量“河流”花样和内壁光滑的气泡,该形貌表明焊缝在拉伸过程中,玻纤处易形成应力集中,从而焊缝断裂失效,主要为脆性断裂。

3 结论

采用980 nm波长对PPS-GF20复合材料进行激光透射焊接试验,研究了不同扫描速度对不同厚度透光层的焊接性能影响。主要结论如下:

(1)PPS-GF20透光率会随着厚度的增加而下降,其中1 mm厚的透光层透过率最高达到59.4%。适当增加扫描次数,可使PPS树脂熔融充分且提高

流动性,使得焊接接头紧密结合,GF能更好地起到增强的作用,提高焊接强度。扫描次数太多,焊缝处热量过多会使部分树脂降解,形成孔洞。

(2)随着激光扫描次数的增加,焊缝的剪切强度会先增大后减小,透光层厚度越小,透光率越好,焊缝剪切强度越高,当扫描次数为45次时,试样T1的剪切强度最大可达33 MPa。

(3)焊缝形貌与扫描次数有关,扫描次数越多,焊缝边缘越规则、均匀。SEM形貌表明,焊缝边缘易出现裂纹,玻纤区域出现“河流”花样,断裂模式主要为脆性断裂。

参考文献

- [1] 李沃源.高性能聚苯硫醚树脂在工程塑料项目中的应用[J].当代化工研究,2022(18):135-137.
LI Woyuan. Application of high performance polyphenylene sulfide resins in engineering plastics projects[J]. Modern Chemical Research, 2022(18):135-137.
- [2] RICOTTA M, SORGATO M, ZAPPALORTO M. Tensile and compressive quasi-static behaviour of 40% short glass fibre -PPS reinforced composites with and without geometrical variations[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2021, 114. DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.102990.
- [3] 周贵阳,吕林君,胡建香,等.聚苯硫醚的改性方法及其在高性能材料中的应用[J].化工管理,2024(31):140-143.
ZHOU Guiyang, LYU Linjun, HU Jianxiang, et al. Modification methods of polyphenylene sulfide and its application in high-performance materials[J]. Chemical Enterprise Management, 2024 (31):140-143.
- [4] CHEN M L, ZAK G, BATES P J. Effect of carbon black on light transmission in laser welding of thermoplastics[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(1):43-47.
- [5] 王永科,张银娟. PBT塑料注塑及激光焊接工艺优化[J].塑料, 2020, 49(5):85-87, 128.
WANG Yongke, ZHANG Yinjuan. Optimization of injection and welding technology for PBT plastic[J]. Plastics, 2020, 49(5): 85-87, 128.
- [6] 褚俊同. GF/PPS复合材料无导能筋超声波焊接工艺及接头性能研究[D].长春:吉林大学,2024.
CHU Juntong. Study on process and properties of GF/PPS joints without energy director by ultrasonic welding[D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [7] 韩志勇,陈栋,路鹏程.碳纤维增强聚苯硫醚复合材料感应焊接研究[J].塑料工业,2019, 47(11):134-140.
HAN Zhiyong, CHEN Dong, LU Pengcheng. Study on induction welding of carbon fiber reinforced polyphenylenesulfide composites[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(11):134-140.
- [8] BARBOSA L C M, DE SOUZA S D B, BOTELHO E C, et al. Fractographic evaluation of welded joints of PPS/glass fiber thermoplas-

- tic composites[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 102:60–68.
- [9] 李继涛,王森,邵宝刚,等.聚苯硫醚改性复合材料发展现状及其在汽车行业领域的应用[J]. *塑料工业*, 2021, 49(2):16–18, 45.
LI Jitao, WANG Miao, SHAO Baogang, et al. The development status of modified polyphenylene sulfide composites and its application in the automotive industry[J]. *China Plastics Industry*, 2021, 49(2):16–18, 45.
- [10] CHEN Y N, QIAO H Y, LI Q, et al. Influences of laser profiles on the weld quality of glass fiber reinforced PBT using laser transmission welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 174. DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.110672.
- [11] 李晨阳,罗达,赵典浩.一种红外激光焊接用聚苯硫醚基复合材料及其制备方法:CN119639232A[P]. 2025-03-18.
LI Chenyang, LUO Da, ZHAO Dianhao. A polyphenylene sulfide-based composite material for infrared laser welding and its preparation method:CN119639232A[P]. 2025-03-18.
- [12] 苏荣锦,郑竣峰,沈银元,等.一种可激光焊接的聚苯硫醚复合材料及其制备方法:CN118772637A[P]. 2024-10-15.
SU Rongjin, ZHENG Junfeng, SHEN Yinyuan, et al. A laser-weldable polyphenylene sulfide composite material and its preparation method:CN118772637A[P]. 2024-10-15.
- [13] 华广洲,刘曙阳,晁芬,等.一种可激光焊接 PPS 材料及其制备方法:CN119192841A[P]. 2024-12-27.
HUA Guangzhou, LIU Shuyang, CHAO Fen, et al. A laser-weldable PPS material and its preparation method:CN119192841A[P]. 2024-12-27.
- [14] JAESCHKE P, WIPPO V, SUTTMANN O, et al. Advanced laser welding of high-performance thermoplastic composites[J]. *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(S2). DOI:10.2351/1.4906379.
- [15] WIPPO V, KUKLIK J, JAESCHKE P, et al. Comparison between wavelengths of 940 nm and 1530 nm for laser transmission welding of glass fiber reinforced PPS[C]//*High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems XI*. San Francisco:SPIE, 2022. DOI:10.1117/12.2609332.
- [16] 题园园.高速重复扫描激光塑料焊接工艺研究[J]. *精密成形工程*, 2022, 14(3):102–106.
TI Yuanyuan. High speed repeated scanning laser welding process for plastics[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2022, 14(3):102–106.
- [17] MATUS-AGUIRRE M, COSSON B, GARNIER C, et al. Characterization and modeling of laser transmission welded polyetherketoneketone (PEKK) joints: Influence of process parameters and annealing on weld properties[J]. *Journal of Advanced Joining Processes*, 2024, 10. DOI:10.1016/j.jajp.2024.100252.
- [18] KORYCKI A, GARNIER C, BONMATIN M, et al. Assembling of carbon fibre/PEEK composites: Comparison of ultrasonic, induction, and transmission laser welding[J]. *Materials*, 2022, 15(18). DOI:10.3390/ma15186365.
- [19] 何勇,彭珂,曾庆文.扁平玻纤对 PA66 复合材料性能的影响[J]. *玻璃纤维*, 2017(1):17–19, 35.
HE Yong, PENG Ke, ZENG Qingwen. The influence of flat glass fiber on PA66 composite[J]. *Fiber Glass*, 2017(1):17–19, 35.