

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.09.012

短切玻纤增强聚丙烯激光焊接性能的影响因素

谢正瑞^{1,2}, 陈延安^{1,3}

(1. 上海金发科技发展有限公司, 上海 201714; 2. 上海工程塑料功能化工程技术研究中心, 上海 201714;

3. 金发科技股份有限公司企业技术中心, 广州 510520)

摘要: 对短切玻纤 (GF) 增强聚丙烯 (PP) 激光焊接性能的影响因素进行了研究, 分别考察了焊接工艺、基体树脂、成核剂、短切 GF 及含量和色粉对 GF 增强 PP 透光率和焊接后的剪切应力的影响。结果表明, 质量分数 20% 的 GF 增强 PP 较优的焊接工艺为焊接功率 25 W、焊接速度 20 mm/s; 以均聚 PP 为基体时, GF 增强 PP 的透光率为 74.3%~75.5%, 焊接后的剪切应力为 770~915 N; 以共聚 PP 为基体时, 短切 GF 增强 PP 焊接后的透光率为 56.1%~56.2%, 剪切应力为 1 100~1 200 N; 随着短切 GF 含量的增加, 短切 GF 增强 PP 焊接后的剪切应力呈先增加后降低的趋势, 短切 GF 直径降低有利于短切 GF 增强 PP 焊接后的剪切应力和透光率的提升; 成核剂的添加对短切 GF 增强 PP 的透光率和焊接后的剪切应力无明显影响; 添加红色粉和黄色粉的短切 GF 增强 PP 均具有较高的透光率和焊接后的剪切应力, 添加酞菁蓝和酞菁绿的短切 GF 增强 PP 的透光率和焊接后的剪切应力较低。

关键词: 短切玻纤增强聚丙烯; 透光率; 剪切应力; 激光焊接

中图分类号: TQ31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)09-0070-05

Influence Factors of Laser Welding Performance of Short Glass Fiber Reinforced Polypropylene

Xie Zhengrui^{1,2}, Chen Yan'an^{1,3}

(1. Shanghai Kingfa Science & Technology Co., Ltd., Shanghai 201714, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Functionalizing Engineering Plastics, Shanghai 201714, China; 3. Technical Center of Kingfa Science & Technology Co., Ltd., Guangzhou 510520, China)

Abstract: The factors influence on the laser welding performance of short glass fiber (GF) reinforced polypropylene (PP) were studied. The effects of laser welding process, matrix resin, nucleating agent, short GF and its content and toner on the transmittance and post-welding shear stress of short GF reinforced PP were investigated. The results show that the best welding process of 20wt% short GF reinforced PP are welding power of 25 W and welding speed of 20 mm/s. Homo-PP as matrix resin, the transmittance of short GF reinforced PP is 74.3%~75.5%, and the shear stress after welding is 770~915 N. When co-PP is used as the matrix, the transmittance is 56.1%~56.2%, and the shear stress after welding is 1 100~1 200 N. With the increase of the content of short GF, the shear stress after welding of short GF reinforced PP increases first and then decreases, and the reduction of the diameter of short GF is conducive to the improvement of the shear stress after welding and transmittance. The addition of nucleating agent has no obvious effect on the transmittance and shear stress after welding of short GF reinforced PP. The transmittance and shear stress after welding of short GF reinforced PP with red and yellow toner are higher, and the transmittance and shear stress after welding of short GF reinforced PP with phthalocyanide blue and phthalocyanide green are lower.

Keywords: short glass fiber reinforced polypropylene; transmittance; shear stress; laser welding

在工业生产中, 将多个简单零件组合连接成复杂零件的情况非常常见^[1-3]。在传统塑料件的连接方法中, 通过机械紧固和胶粘剂连接后接头处的密封性和强度都较低。随着现代塑料工业的迅速发展, 激光焊接工艺以其经济、简单、快捷、可靠等特点实

现了整体和复杂结构的紧密连接。激光焊接工艺十分符合大批量生产方式, 已成为热塑性塑料件连接的主要选择。随着近些年激光焊接设备和焊接工艺的发展, 激光焊接在汽车零部件的连接中逐渐开始应用^[4]。

通信作者: 谢正瑞, 硕士, 主要研究方向为汽车用改性材料研究和产品开发

收稿日期: 2022-08-12

引用格式: 谢正瑞, 陈延安. 短切玻纤增强聚丙烯激光焊接性能的影响因素 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(9):70-74, 86.

Xie Zhengrui, Chen Yan'an. Influence factors of laser welding performance of short glass fiber reinforced polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(9):70-74, 86.

Ghorbe 等^[5]对聚丙烯(PP)的激光焊接进行了研究,讨论了工艺参数对焊缝几何形状、缺陷和材料结晶度分布的影响。结果表明,增加激光功率和减小扫描速度后形成的焊接区域体积更大,焊缝熔池深度也更深。张振珠^[6]研究了汽车用PP的激光焊接工艺,其最优焊接工艺焊缝满足密封性要求。刘保光等^[7]研究了激光焊接车用聚甲基丙烯酸甲酯的工艺优化。秦玉洁等^[8-9]在聚合物树脂中加入萘系黑色颜料,开发出一种激光透过率高、高耐候和外观良好的改性塑料,同时研究了PP、弹性体和填料等组分对材料激光焊接性能的影响。工程塑料尼龙以及其它聚合物的激光焊接性能已经得到广泛的研究^[10-15]。

随着汽车轻量化发展,短切玻纤(GF)增强聚丙烯(PP)得到广泛应用,目前对短GF增强PP激光焊接的研究较少。为进一步了解短GF增强PP的激光焊接性能及激光透光性,笔者对短GF增强PP焊接后的剪切应力和透光率的影响因素(基体树脂种类、成核剂和透明剂种类、短切GF种类及含量以及有机色粉种类)进行了分析,同时考察了焊接工艺(焊接功率和焊接速度)对短GF增强PP焊接后的剪切应力的影响。

1 实验部分

1.1 主要原料

均聚PP:homo-PP1[熔体流动速率(MFR)=3.0 g/(10 min)],homo-PP2[MFR=10 g/(10 min)],homo-PP3[MFR=30 g/(10 min)],中海壳牌石油化工有限公司;

共聚PP:co-PP1[MFR=10 g/(10 min)],co-PP2[MFR=30 g/(10 min)],埃克森美孚化工有限公司;

增容剂:CA100,上海壮景化工有限公司;

黑色母粒:2772KF,卡博特(中国)投资有限公司;

短切GF:248A-13C-4MM(直径13 μm,长度4.5 mm),249A-10C-4MM(直径10 μm,长度4.5 mm),欧文斯科宁复合材料(中国)有限公司;

抗氧剂:225G,临沂三丰化工有限公司;

羧酸金属盐类成核剂(HPN-68L, HPN-20E)、山梨醇类透明成核剂(NX8000K):美利肯商贸(上海)有限公司;

红色粉:R203,浙江永泉化学有限公司;

红色粉:R252,上海田锐贸易有限公司;

红色粉:3840SQ,巴斯夫化工有限公司;

黄色粉:Y016, Y106, Y107,卡博特(中国)投资有限公司;

酞菁蓝:BF1535, L302,深圳市鼎泰化工有限公司;

酞菁绿:706K,深圳市鼎泰化工有限公司;

抗氧剂(1010,168)、润滑剂(2818):市售。

1.2 主要设备与仪器

双螺杆挤出机:SHJ-30型,南京瑞亚高聚物装备有限公司;

注塑机:HTB80型,宁波海天机械有限公司;

激光焊接仪:WFD120 W-PCTS333 SP型,深圳市大族激光科技股份有限公司;

透光率测试仪:LPKF-TMG3型,天津赛力斯自动化科技有限公司;

万能试验机:Z-010型,德国Zwick Roell集团。

1.3 试样制备

按实验配方比例分别称取一定量的PP树脂和助剂,先预混,再用搅拌机在500 r/min下高速混合5 min,由双螺杆挤出机挤出、造粒、干燥,制备料粒,挤出工艺为:主机一区温度为100℃,二区至十区温度均为200℃,主机转速为450 r/min。然后在注塑温度为220℃条件下,注塑成50 mm×70 mm×1 mm试样用于透光率测试;注塑成10 mm×10 mm×1.6 mm试样作为激光焊接实验上层透光试样。在上述实验配方中添加1份黑色母粒2772KF作为焊接下层材料配方,用同样的方式注塑成10 mm×10 mm×1.6 mm试样作为下层焊接试样,在不同焊接工艺下,使用激光焊接仪将上层透光试样与下层焊接试样焊接在一起,用于焊接强度测试,激光波长为915 nm;注塑拉伸试样用于拉伸性能测试。

1.4 性能测试和表征

透光率测试:使用透光率测试仪测试50 mm×70 mm×1 mm试样在915 nm下的透光率;

焊接强度测试:使用焊接后的剪切应力表征焊接强度,按照ISO 4587-2003测试,测试速度为50 mm/min,测试温度为23℃;

密度按照ISO 1183-2016测试;

MFR按照ISO 1133-2011测试,测试条件为230℃,2.16 kg;

拉伸性能按照ISO 527-2016测试,拉伸速率为10 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 焊接工艺对短切 GF 增强 PP 焊接后的剪切应力的影响

不同焊接工艺的短切 GF 增强 PP 配方见表 1,焊接工艺见表 2,制备测试试样,分析焊接工艺对试样焊接后的剪切应力的影响,结果分别如图 1、图 2 所示。

表 1 不同焊接工艺时短切 GF 增强 PP 配方

原材料	质量分数 /%
homo-PP2	76
CA100	3
248A-13C-4MM	20
其它	1

注: 其它为抗氧剂和润滑剂,抗氧剂 1010、抗氧剂 168、润滑剂 2818 的质量比为 0.3 : 0.2 : 0.5。

表 2 短切 GF 增强 PP 焊接工艺

序号	焊接功率 /W	焊接速度 /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	10	20
2	20	20
3	25	20
4	30	20
5	20	10
6	20	30
7	20	40

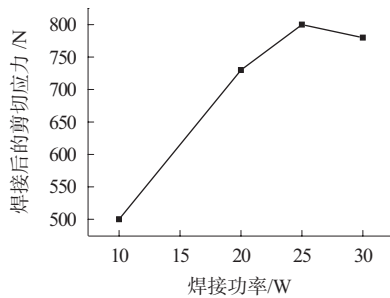


图 1 不同焊接功率下焊接后的剪切应力

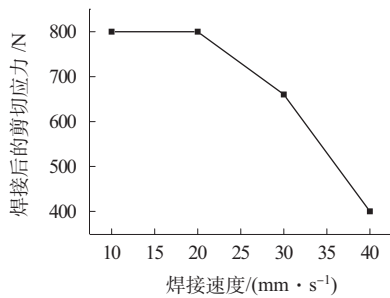


图 2 不同焊接速度下焊接后的剪切应力

由图 1 可以看出,随着焊接功率的提高,短切 GF 增强 PP 焊接后的剪切应力呈现先增加后减小的趋势,在焊接功率为 25 W 时,焊接后的剪切应力达到最高值(800 N)。焊接功率提高意味着单位时间透过能量的增加,提高了焊接质量,但是焊接功率过高反而会造成本体破坏,影响焊接质量。由图

2 可以看出,随着焊接速度的增加,短切 GF 增强 PP 焊接后的剪切应力降低。综合考虑,最优的焊接工艺为:焊接功率 25 W,焊接速度 20 mm/s。后续实验选择的焊接工艺均为:焊接功率 25 W,焊接速度 20 mm/s。

2.2 基体树脂种类对短切 GF 增强 PP 焊接后的剪切应力及透光率的影响

采用不同基体树脂时,短切 GF 增强 PP 配方见表 3,制备测试试样,相应的密度、MFR 和拉伸性能测试结果见表 4,采用不同流动性基体树脂对短切 GF 增强 PP 焊接后的剪切应力的影响如图 3 所示。

表 3 采用不同基体树脂时短切 GF 增强 PP 配方

原材料	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
homo-PP1	76	/	/	/	/
homo-PP2	/	76	/	/	/
homo-PP3	/	/	76	/	/
co-PP1	/	/	/	76	/
co-PP2	/	/	/	/	76
CA100	3	3	3	3	3
248A-13C-4MM	20	20	20	20	20
其它	1	1	1	1	1

注: 其它为抗氧剂和润滑剂,抗氧剂 1010、抗氧剂 168、润滑剂 2818 的质量比为 0.3 : 0.2 : 0.5。

表 4 采用不同基体树脂时短切 GF 增强 PP 的

密度、MFR 和拉伸性能测试结果

项目	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.033	1.032	1.029	1.027	1.026
MFR/[$\text{g} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$]	2.1	5.6	11	5.9	9.5
拉伸强度 /MPa	72.3	79.4	78.8	68.1	69.0
断裂伸长率 /%	7.3	6.2	6.4	5.5	5.2
透光率 /%	75.3	74.3	75.5	56.2	56.1

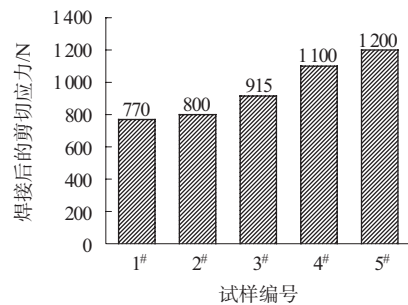


图 3 采用不同基体树脂时短切 GF 增强 PP 焊接后的剪切应力

由表 4 可以看出,随着均聚 PP 或共聚 PP 基体树脂流动性的增加,短切 GF 增强 PP 的密度稍有减小, MFR 增大,拉伸强度总体有所增大,断裂伸长率减小,在 915 nm 波长处的透光率没有明显变化,使用均聚 PP 制备的短切 GF 增强 PP 的透光率为 74.3%~ 75.5%,使用共聚 PP 制备的短切 GF 增强 PP 的透光率为 56.1%~ 56.2%,前者的透光率明显高于后者,这主要是由于共聚 PP 中乙丙无规共聚

物相的存在降低了其结晶度,造成光散射引起透光率下降。由图3可以看出,随着均聚PP或共聚PP基体树脂流动性的增加,短切GF增强PP焊接后的剪切应力均增大,相比使用均聚PP制备的短切GF增强PP,使用共聚PP制备的短切GF增强PP焊接后的剪切应力较高。材料的焊接强度与使用树脂的类型有关,主要由树脂在焊接后形成的焊接熔池深度决定^[16]。共聚PP在焊接过程中形成的熔池深度较深,所以焊接后的剪切应力较大。

2.3 成核剂种类对短切GF增强PP焊接后的剪切应力及透光率的影响

综合考虑短切GF增强PP的加工以及力学性能,选择2[#]配方作为基础配方,添加不同成核剂的短切GF增强PP的配方见表5,制备测试试样,相应的密度、MFR、拉伸性能和透光率测试结果见表6,添加不同成核剂对短切GF增强PP焊接后的剪切应力的影响如图4所示。

表5 添加不同成核剂时短切GF增强PP配方 %

原材料	2 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]
homo-PP2	76	75.9	75.9	75.9
HPN-68L	/	0.1	/	/
HPN-20E	/	/	0.1	/
NX8000K	/	/	/	0.1
CA100	3	3	3	3
248A-13C-4MM	20	20	20	20
其它	1	1	1	1

注:其它为抗氧剂和润滑剂,抗氧剂1010、抗氧剂168、润滑剂2818的质量比为0.3:0.2:0.5。

表6 添加不同成核剂时短切GF增强PP的密度、MFR、拉伸性能和透光率测试结果

测试项目	2 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]
密度/(g·cm ⁻³)	1.032	1.031	1.030	1.030
MFR/[g·(10 min) ⁻¹]	5.6	5.7	5.5	5.5
拉伸强度/MPa	79.4	79.5	79.4	79.4
断裂伸长率/%	6.2	6.1	6.1	6.2
透光率/%	74.3	74.5	74.4	74.3

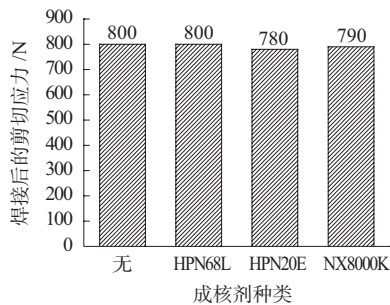


图4 添加不同成核剂时短切GF增强PP焊接后的剪切应力

由表5、表6可以看出,添加成核剂质量分数为0.1%时,短切GF增强PP的密度、拉伸性能和MFR均没有明显变化,在915 nm处的透光率均在

74%左右,无明显差异;由图4可以看出,添加不同成核剂对短切GF增强PP焊接后的剪切应力没有明显影响。

2.4 短切GF种类及含量对短切GF增强PP焊接后的剪切应力及透光率的影响

以2[#]配方为基础配方,添加不同短切GF及含量的短切GF增强PP的配方见表7,制备测试试样,相应的密度、MFR和拉伸性能测试结果见表8,添加不同短切GF及含量对短切GF增强PP焊接后的剪切应力和透光率的影响如图5所示。

表7 添加不同短切GF及含量时短切GF增强PP配方 %

原材料	9 [#]	2 [#]	10 [#]	11 [#]
homo-PP2	87	76	66	66
CA100	2	3	3	3
248A-13C-4MM	10	20	30	/
249A-10C-4MM	/	/	/	30
其它	1	1	1	1

注:其它为抗氧剂和润滑剂,抗氧剂1010、抗氧剂168、润滑剂2818的质量比为0.3:0.2:0.5。

表8 添加不同短切GF及含量时短切GF增强PP的密度、MFR和拉伸性能测试结果

项目	9 [#]	2 [#]	10 [#]	11 [#]
密度/(g·cm ⁻³)	0.972	1.032	1.131	1.130
MFR/[g·(10 min) ⁻¹]	7.6	5.6	4.5	4.2
拉伸强度/MPa	50.6	79.4	97.1	106.0
断裂伸长率/%	7.6	6.2	5.1	5.0

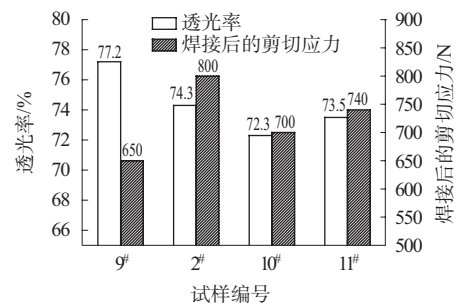


图5 添加不同短切GF及含量时短切GF增强PP的

透光率和焊接后的剪切应力

由表8可以看出,短切GF增强PP的密度、MFR和拉伸性能均随着短切GF及含量的不同而发生变化。由图5可以看出,当短切GF(248A-13C-4MM)质量分数从10%到30%时,试样的透光率明显下降,在915 nm处的透光率由9[#]试样的77.2%下降到10[#]试样的72.3%,这是由于短切GF含量的增加影响其在基体中对光的散射作用,从而降低了透光率。当短切GF直径由248A-13C-4MM的13 μm降低到249A-10C-4MM的10 μm时,试样的透光率由10[#]试样的72.3%提高至11[#]试样的73.5%。当短切GF(248A-13C-4MM)质量分数由10%提升到20%时,由于短切GF含量的增加,

使得焊接处的短切 GF 增多,从而提升了 2[#] 试样焊接后的剪切应力,但是当短切 GF 质量分数提高到 30% 时,由于透光率下降,10[#] 试样焊接后的剪切应力降低。

2.5 色粉对短切 GF 增强 PP 焊接后的剪切应力及透光率的影响

在实际应用中,汽车用材料大部分需要进行配色,一般的碳黑对光线有强吸收,不能作为激光焊接材料的色粉,所以常使用进口花系色粉。但是不同色粉对材料透光率的影响研究较少,以 2[#] 配方为基础配方,添加不同色粉时短切 GF 增强 PP 的配方见表 9,制备测试试样,添加不同色粉对短切 GF 增强 PP 焊接后的剪切应力和透光率的影响如图 6 所示。

表 9 添加不同色粉时短切 GF 增强 PP 配方

原材料	质量分数/%
homo-PP2	76
CA100	3
248A-13C-4MM	20
其它	1
色粉	0.1

注:其它为抗氧剂和润滑剂,抗氧剂 1010、抗氧剂 168、润滑剂 2818 的质量比为 0.3:0.2:0.5,色粉分别为 R203, R252, 3840SQ, Y016, Y106, Y107, BF1535, L302 和 706K。

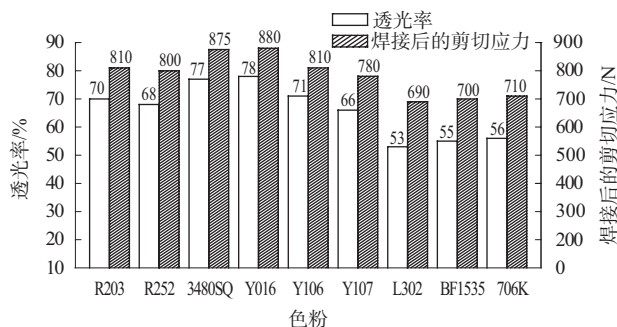


图 6 添加不同色粉时短切 GF 增强 PP 的透光率和焊接后的剪切应力

由图 6 可以看出,添加红色粉和黄色粉的短切 GF 增强 PP 焊接后的剪切应力和透光率较高,添加 R203, R252, 3840SQ, Y016, Y106, Y107 的试样焊接后的剪切应力分别为 810, 800, 875, 880, 810, 780 N, 透光率分别为 70%, 68%, 77%, 78%, 71%, 66%; 而添加酞菁蓝和酞菁绿的较低,添加 L302, BF1535, 706K 的试样焊接后的剪切应力分别为 690, 700, 710 N, 透光率分别为 53%, 55%, 56%。

3 结论

对短切 GF 增强 PP 焊接后的剪切应力和透光率进行实验,初步考察了影响短切 GF 增强 PP 焊接后的剪切应力和透光率的因素,得到以下结论:

(1) 焊接工艺实验结果表明,最优工艺为功率 25 W,速度 20 mm/s。

(2) 由共聚 PP 制备的短切 GF 增强 PP 焊接后的剪切应力大于均聚 PP,但均聚 PP 制备的短切 GF 增强 PP 的激光透过率高于共聚 PP,同时基体树脂流动性高有利于提升试样焊接后的剪切应力。

(3) 随着短切 GF 含量的增加,短切 GF 增强 PP 焊接后的剪切应力呈现先增加后降低的趋势,透光率降低;短切 GF 直径降低有利于提高短切 GF 增强 PP 焊接后的剪切应力和透光率。

(4) 添加红色粉和黄色粉的短切 GF 增强 PP 焊接后的剪切应力和透光率较高,而添加酞菁蓝和酞菁绿的较低。

参考文献

- [1] 范子杰,桂良进,苏瑞意.汽车轻量化技术的研究和进展[J].汽车安全与节能学报,2014,5(1):1-16.
Fan Zijie, Gui Liangjin, Su Ruiyi. Research and development of automotive lightweight technology[J]. Automotive Safety and Energy, 2014, 5(1):1-16.
- [2] Sibikin I, Karger-Kocsis J. Toward industrial use of anionically activated lactam polymers: Past, present and future[J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2018, 1(1):48-60.
- [3] 杨红伟,单盼盼,倪亚茹,等.激光在塑料加工中的应用[J].现代塑料加工与应用,2021,33(6):52-55.
Yang Hongwei, Shan Panpan, Ni Yaru, et al. The application of laser in plastic processing[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2021, 33(6):52-55.
- [4] 孔茗,傅戈雁.塑料激光焊接技术在汽车制造中的应用[J].塑料科技,2018,46(12):68-71.
Kong Ming, Fu Geyan. Application of plastic laser welding technology in automobile manufacturing[J]. Plastics Science and Technology, 2018, 46(12):68-71.
- [5] Ghorbel E, Casalino G, Abed S. Laser diode transmission welding of polypropylene: Geometrical and microstructure characterization of weld[J]. Materials & Design, 2009, 30:2745-2751.
- [6] 张振珠.汽车摄像头塑料的激光焊接工艺研究[J].塑料科技,2019,47(7),55-58.
Zhang Zhenzhu. Process research on plastic laser welding of automotive camera[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(7):55-58.
- [7] 刘保光,王霄,刘伟,等.激光透射点焊车用材料 PMMA 的工艺优化[J].中国激光,2016,43(5):53-62.
Liu Baoguang, Wang Xiao, Liu Wei, et al. Process optimization of laser transmission spot welding using material PMMA for automotive industry[J]. Chinese Journal of Laser, 2016, 43(5):53-62.

(下转第 86 页)

- based on taguchi method[J]. Al-Khawarizmi Engineering Journal, 2018, 14(2). DOI:10.22153/kej.2018.12.001.
- [12] 宗学文,刘亮晶,倪铭佑,等.响应曲面法碳化硅增强光敏树脂制件工艺[J].工程塑料应用,2021,49(10):61-67.
- Zong Xuewen, Liu Liangjing, Ni Mingyou, et al. Fabrication process of silicon carbide reinforced photosensitive resin by response surface method[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(10):61-67.
- [13] Boca M-A, Sover A, Slătineanu L. The printing parameters effects on the dimensional accuracy of the parts made of photosensitive resin[J]. Macromolecular Symposia, 2021, 396(1). DOI:10.1002/masy.202000287.
- [14] 权坤.双紫外掩模面成型机理及成型精度研究[D].西安:西安科技大学,2019.
- Quan Kun. Research on forming mechanism and accuracy of double ultraviolet mask projection stereolithography technology[D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [15] 钟厉,姚志军,张继祥,等.基于田口方法的碳纤维保险杠注射成型质量分析研究[J].塑料工业,2020,48(10):97-102.
- Zhong Li, Yao Zhijun, Zhang Jixiang, et al. Research on quality analysis of carbon fiber bumper injection molding based on taguchi method[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(10):97-102.
- =====
- (上接第74页)
- [8] 秦玉洁.一种可激光焊接用的改性塑料及其制备方法:CN107652653A[P]. 2018-02-02.
- Qin Yujie. A modified plastic for laser welding and its preparation method:CN107652653A[P]. 2018-02-02.
- [9] 秦玉洁,卢先博,王俊,等.改性聚丙烯各组分对激光焊接性能的影响[J].上海塑料,2021,49(3):49-54.
- Qin Yujie, Lu Xianbo, Wang Jun, et al. Effect of Modified polypropylene components on laser welding performance[J]. Shanghai Plastics, 2021, 49(3):49-54.
- [10] 孔茗. PE与PA66激光透射焊接及其性能研究[J].塑料科技, 2019, 47(9):47-50.
- Kong ming. Laser Transmission welding of PE and PA66 and its properties[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(9):47-50.
- [11] Atsushi M, Shingo N, Yasushi N, et al. Polyamide resin composition for laser welding:JP2018012759A[P]. 2018-01-25.
- [12] 杨振英,于博.3D打印在汽车塑料件设计中的应用与研究进展[J].塑料工业,2017,45(5):11-15.
- Yang Zhenying, Yu Bo. Application and research progress of 3D printing in automotive plastic parts design[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(5):11-15.
- [13] Amanat N, Chaminade C, Grace J, et al. Transmission laser welding of amorphous and semi-crystalline poly-ether-ether-ketone for applications in the medical device industry[J]. Materials & Design, 2010, 31(10):4 823-4 830.
- [14] Paganoa N, Campana G, Fiorini M, et al. Laser transmission welding of polylactide to aluminium thin films industry[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 91:80-84.
- [15] 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.
- [16] 上官同英,刘冬敏,陈志.激光透射焊接掺杂玻璃纤维ABS和PP塑料工艺研究[J].应用激光,2019,39(1):93-97.
- Shangguan Tongying, Liu Dongmin, Chen Zhi. Laser transmission welding of fiberglass-doped ABS and PP[J]. Applied Laser, 2019, 39(1):93-97.