

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.09.007

长玻纤增强聚丙烯激光焊接性能的影响因素

牛志海,王凯,王明义

(上海聚威新材料股份有限公司,上海 201613)

摘要:为实现汽车零部件的轻量化、尺寸稳定性,并满足激光焊接需求,研究了长玻纤增强聚丙烯(PP/LGF)复合材料替代传统玻纤增强尼龙材料的可行性。分别考察了玻纤含量、色粉种类、色粉表面处理、色粉含量及成核剂含量等参数对PP/LGF复合材料力学性能、激光透过率及高温析出特性的影响。结果表明,当LGF质量分数为35%时,PP/LGF复合材料表现出最佳的力学性能与激光透射性能;采用自主研发的红黄蓝三原色(RGB)复配黑色色粉替代传统溶剂黑颜料,可显著降低复合材料在高温环境下的色粉析出风险。通过对RGB复配黑色色粉进行表面改性处理,可进一步增强其与PP/LGF基体的界面结合强度,有效抑制高温析出现象;当RGB复配黑色色粉添加质量分数为0.3%时,PP/LGF复合材料表现出优异的力学性能及激光透过率,并满足黑色外观要求。基于对激光焊接工艺要求的不同,成核剂的添加量应有所区别,对于常规激光焊接应用可不添加成核剂,而在激光焊接工况要求较高时,建议添加质量分数0.5%的成核剂以获得良好的综合性能。研究结果为PP/LGF复合材料在汽车激光焊接零部件中的应用提供了重要的配方设计及工艺优化依据。

关键词:长玻纤;聚丙烯;激光焊接;激光透过率;三原色

中图分类号: TQ327.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)09-0048-07

Factors influencing laser welding performance of long glass fiber reinforced polypropylene

NIU Zhihai, WANG Kai, WANG Mingyi

[Polystar Engineering Plastics(Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201613, China]

Abstract : To achieve lightweighting, dimensional stability, and laser welding compatibility in automotive parts, the feasibility of substituting conventional glass fiber-reinforced nylon with long glass fiber-reinforced polypropylene (PP/LGF) composites was investigated. The effects of glass fiber content, pigment type, pigment surface treatment, pigment content, and nucleating agent content on the mechanical properties, laser transmittance, and high-temperature exudation behavior of PP/LGF composites were systematically evaluated. The results demonstrate that PP/LGF composites with 35wt% LGF exhibit optimal mechanical properties and laser transmission characteristics. Replacing traditional solvent-based black pigments with a custom-developed RGB tri-color (red, yellow, blue) blended black pigment significantly reduce the risk of pigment exudation at high temperature. Surface modification of RGB blended black pigment further enhances its interfacial adhesion with PP/LGF matrix, effectively suppressing high-temperature exudation. At RGB blended black pigment concentration of 0.3 wt%, PP/LGF composite achieves satisfactory black coloration while maintaining excellent mechanical performance and laser transmittance. The addition level of nucleating agents should be adjusted accordingly, depending on the specific requirements of the laser welding process. For regular laser welding applications, the addition of nucleating agents may not be necessary. However, under high-demand laser welding conditions, it is recommended to add 0.5 wt% nucleating agent to achieve favorable overall performance. This study provides critical insights for optimizing the formulation and processing parameters of PP/LGF composites in laser-welded automotive parts.

Keywords : long glass fiber ; polypropylene ; laser welding ; laser transmittance ; RGB tri-color

基金项目: 上海市东方英才计划项目(CYQN2023120)

通信作者: 王明义,博士,研究员,主要研究方向为高分子材料成型加工及设备、聚合物超临界流体发泡成型

收稿日期: 2025-07-25

引用格式: 牛志海,王凯,王明义.长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,2025,53(9):48-54.

NIU Zhihai, WANG Kai, WANG Mingyi. Factors influencing laser welding performance of long glass fiber reinforced polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(9): 48-54.

聚丙烯(PP)成本低廉、密度低、耐蠕变性能优异,然而其强度与抗冲击性能较差,这在一定程度上限制了其直接应用领域。为此,需要通过物理改性、化学改性及其他改性技术提升其综合性能。物理改性包括填充改性、共混改性及增强增韧改性;化学改性则包括共聚改性、接枝改性和交联改性^[1-4]。经改性的PP材料质轻且综合性能优异,已广泛应用于汽车内、外饰领域,成为汽车轻量化与“以塑代钢”战略的典型材料解决方案之一^[5-8]。随着汽车工业对轻量化与成本控制需求的持续提升,PP/长玻璃纤维(LGF)材料的应用得到了进一步推广^[9-11]。特别是在新能源汽车产业快速发展的背景下,汽车零部件对材料耐温性的要求有一定程度降低,这加快了PP/LGF复合材料在汽车领域替代传统短玻纤增强聚酰胺6(PA6)和聚酰胺66(PA66)材料的进程^[12-14],进而拓宽了其应用领域。

随着制造技术的进步,改性工程塑料成型工艺正向低损耗、低污染及高效率的方向发展,其中激光焊接成型技术在复杂塑料件连接上因其独特优势而获得广泛应用^[15-22]。激光焊接性能的关键影响因素为材料特性和激光工艺参数两方面。材料方面,激光透射率是核心因素;透射率越高,焊接过程越易获得良好效果,且工艺参数窗口更宽。工艺参数方面,激光器平均功率、光斑直径、焊接速度、夹具的夹紧力、激光频率以及焊后的冷却时间等均会对焊接质量产生影响。谢正瑞等^[23]探究了影响短切玻璃纤维(GF)增强PP透光率和焊接后剪切应力的因素,包括基体树脂、成核剂、短切GF类型、含量及有机色粉种类。同时考察了焊接功率和焊接速度对GF增强PP焊接后剪切应力的影响。实验结果表明:最优焊接工艺为焊接功率25 W,焊接速度20 mm/s;降低GF直径并采用红/黄色粉可协同提高短切GF增强PP的透光率及焊接后的剪切强度。针对透明PP材料激光透过率高、能量吸收率低的问题,章建胜等^[24]通过在下层PP塑料基体表面涂覆激光吸收剂的方法实现了激光焊接。他们通过正交试验优化了激光焊接工艺参数,结果表明,当吸收剂厚度为54 μm 、激光功率为50 W,焊接速度为100 mm/s,且光斑直径为1 mm时,焊缝剪切强度达到峰值35 MPa,此为最优工艺参数。通过进一步对焊缝截面进行切片分析发现,当下层PP塑料充分吸收激光能量后,焊缝熔池得以扩

展,焊缝深度与宽度增加,有利于提升焊缝的剪切强度。

笔者主要从材料本身出发,为进一步探究影响PP/LGF透激光材料综合性能的各种因素,系统研究了LGF含量、色粉种类及含量、成核剂含量等对PP/LGF复合材料力学性能和激光透射率的影响。此外,研究还进一步验证了透激光色粉与PP基体间的相容性及其耐热稳定性。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PP:1450T,熔体质量流动速率为65 g/10 min (230 $^{\circ}\text{C}$,2.16 kg),台塑工业(宁波)有限公司;

LGF:T838 J,泰山玻璃纤维有限公司;

马来酸酐接枝改性聚丙烯(PP-g-MAH):GPM 200A,宁波能之光新材料科技股份有限公司;

受阻酚类抗氧剂:1010,德国BASF公司;

硫代酯类抗氧剂:PS 802,德国BASF公司;

2,2'-亚甲基双(4,6-二叔丁基苯基)磷酸酯钠:NA 11,艾迪科(中国)投资有限公司;

色粉:溶剂黑X70,上海儒德染料化工有限公司;

1[#]三原色色粉:偶联剂未处理,自制;

2[#]三原色色粉:偶联剂处理,自制。

1.2 仪器及设备

双螺杆挤出机:STS-50,科倍隆(南京)机械有限公司;

LGF浸渍模具:自制;

万能材料试验机:2366,德国Zwick公司;

简支梁冲击试验机:XJJ-50,承德世鹏检测设备有限公司;

热变形维卡软化测试仪:6911,意大利CEAST公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC200PC,德国NETZSCH公司;

塑料激光透射率测量仪:TMG 3S,德国LPKF激光电子股份公司。

1.3 试样制备

首先采用高速混合机对PP、增容剂及抗氧剂等助剂进行预混处理,搅拌桨转速设定为430 r/min,混合时间为3 min。随后,将预混物料加入到双螺杆挤出机中进行熔融共混,挤出机各段温度设定为240~270 $^{\circ}\text{C}$ 。熔体进入浸渍模头(温度设置为

260 ℃)的同时,经干燥并施加预张力的 LGF 也被引入模头。在模头中,LGF 经历分散并被熔体充分浸渍。浸渍后的 PP/LGF 复合材料经口模挤出后,由牵引装置以 30 m/min 的线速度拉出,随后经水冷、风干、切粒,制得长度为(10±2) mm 的 PP/LGF 粒子。将制备的 PP/LGF 粒子置于 100 ℃ 恒温干燥箱中干燥 4 h 后,注塑成型为 ISO 标准测试样条和 2 mm 厚色板。

1.4 测试与表征

密度按照 ISO 1183-1-2016 测试,测试介质为去离子水;

拉伸性能按照 ISO 527-2-2012 测试,拉伸速度为 5 mm/min;

弯曲性能按照 ISO 178-2010 测试,弯曲速度为 2 mm/min;

缺口冲击强度按照 ISO 179-1-2010 测试,摆锤能量为 2 J;

负荷变形温度按照 ISO 75-2-2013 测试,负荷为 1.80 MPa,升温速度为 120 ℃/h;

DSC 测试:首先以 30 ℃/min 的升温速率由 30 ℃升温到 220 ℃,恒温 2 min 消除热历史,然后以 10 ℃/min 的速率降温至 30 ℃,恒温 2 min 后再以 10 ℃/min 的速率升温至 220 ℃;

透激光率测试:使用塑料激光透射率测量仪测定尺寸为 60 mm×60 mm×2 mm 的色板对 980 nm 波长激光的透射率;

耐高温析出验证:将 80 mm×50 mm×3 mm 的色板置于 120 ℃恒温烘箱中处理 48 h,观察色粉析出情况。

2 结果与讨论

2.1 LGF 含量对 PP/LGF 复合材料性能的影响

表 1 为不同 LGF 质量分数的 PP/LGF 复合材料配方组成。LGF 含量对材料性能和透激光性能的影响(以下复合材料为本色材料)见表 2。

表 1 不同 LGF 含量的 PP/LGF 复合材料的配方(质量分数)

Tab. 1 Formula of PP/LGF composites with different contents of LGF(mass fraction)				
Materials type	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
1450T	76	66	61	56
GPM 200A	3.0	3.0	3.0	3.0
1010	0.3	0.3	0.3	0.3
PS 802	0.4	0.4	0.4	0.4
NA 11	0.3	0.3	0.3	0.3
T838 J	20	30	35	40

表 2 玻纤含量对 PP/LGF 复合材料性能的影响

Tab. 2 Influence of glass fiber content on properties of PP/LGF composites

Samples	TS/MPa	FS/MPa	FM/MPa	NIS/(kJ·m ⁻²)	HDT/℃	LTC/%
1 [#]	96±4.1	130±7.5	4 400±32.4	19.8±1.6	155.0±0.5	45.4±2.3
2 [#]	105±5.5	164±8.9	6 500±50.6	22.3±2.0	156.3±1.1	26.2±1.9
3 [#]	111±4.8	172±9.1	7 580±55.7	25.4±1.1	157.2±1.6	19.8±1.1
4 [#]	118±5.9	183±6.6	8 200±77.8	31.0±1.7	158.8±0.9	16.0±2.4

Notes: TS represents tensile strength; FS represents flexural strength; FM represents flexural modulus; NIS represents notched impact strength; HDT represents heat deflection temperature; LTC represents laser transmission coefficient, as shown in the following table.

表 2 中,1[#],2[#],3[#]和 4[#]试样分别对应 LGF 质量分数为 20%,30%,35% 和 40% 的 PP/LGF 复合材料。由表 2 性能数据可知,当 LGF 质量分数从 20% 增加到 40% 时,PP/LGF 复合材料的拉伸强度、弯曲强度和缺口冲击强度均呈现上升趋势。主要原因为: LGF 作为材料骨架结构起到了有效增强作用,同时增容剂的加入进一步增强了树脂基体与玻纤的界面结合力,从而协同提升了材料的力学性能^[25]。然而,材料的负荷变形温度变化幅度相对较小。材料对激光的透过率随 LGF 含量增加而显著下降;当 LGF 质量分数为 40% 时,PP/LGF 复合材料的激光透过率仅为 16%,其主要原因为: LGF 含量的增加延长了激光在材料内部的漫反射路径,导致其透过率降低。LGF 质量分数在 20% 至 40% 范围内的 PP/LGF 复合材料激光透过率均超过 10%,可满足激光焊接的基本要求。

考虑到采用 PP/LGF 材料替代 PA/GF 材料的可能性,从材料力学性能方面考虑,为确保 PP/LGF 材料的性能与 PA/GF 材料相匹配,须选用 LGF 质量分数在 30% 以上的规格。在实际应用场景中,汽车改性料主要以黑色产品为主。常规的黑色产品通常采用炭黑与其他体系的黑色色粉进行着色处理,但此类色粉会显著降低材料的激光透过率;其中,炭黑对激光具有很强的吸收能力,即使添加量低至 0.2%,也会使材料的激光透过率降至 0%。为确保添加黑色色粉后材料仍能进行高效激光焊接,本研究最终选定 LGF 质量分数为 35% 的 PP/LGF35 材料作为后续研究对象,同时采用自主研发的透激光型三原色黑色色粉。

2.2 色粉种类对 PP/LGF 复合材料性能的影响

在常规激光焊接的聚酰胺(PA)及聚酯类[如聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)、聚对苯二甲酸乙二酯

(PET)]改性材料中,通常采用溶剂黑等有机染料进行着色。此类染料与极性高分子材料基体间具有优异的相容性,既可保持较高的激光透过率,又能耐受高温及溶剂浸泡测试,色粉析出风险较低。然而,PP作为非极性聚合物,与有机黑色色粉的相容性较差,在高温或溶剂浸泡环境下易发生色粉迁移析出,影响制品的长期使用性能。

为解决溶剂黑在PP/LGF复合材料中的析出问题,基于三原色配色原理,自主开发了适用于PP基体的黑色色粉。表3为含有不同种类色粉的PP/LGF复合材料配方。试验结果表明(表4):有机染料对PP/LGF复合材料的力学性能及激光透光率影响较小;而自制三原色黑色色粉的引入导致材料力学性能与激光透光率均出现一定程度的下降。主要原因在于该色粉体系中含无机颜料组分,它一方面减弱了PP树脂与LGF的界面结合强度,另一方面该色粉组分对光线的遮蔽效应加剧,降低了激光的透过率,较有机染料体系降低约12.9%。然而,自制色粉体系在确保着色效果的同时,为解决非极性基体色粉析出问题提供了有效解决方案。

表3 含有不同种类色粉的PP/LGF复合材料配方(质量分数)
Tab. 3 Formula of PP/LGF composites containing different pigment types(mass fraction)

	%		
Materials	5 [#]	6 [#]	7 [#]
1450T	60.7	60.7	60.7
GPM 200A	3.0	3.0	3.0
I010	0.3	0.3	0.3
PS 802	0.4	0.4	0.4
NA 11	0.3	0.3	0.3
T838 J	35	35	35
Solvent-based black pigment(X70)	0.3		
1 [#] custom-developed pigment		0.3	
2 [#] custom-developed pigment			0.3

表4 色粉种类对PP/LGF复合材料性能的影响

Tab. 4 Influence of pigment type on properties of PP/LGF composites

Samples	TS/MPa	FS/MPa	FM/MPa	NIS/(kJ·m ⁻²)	HDT/°C	LTC/%
5 [#]	110±3.2	170±8.5	7 550±60.4	25.2±1.5	157.3±1.4	20.1±1.0
6 [#]	107±2.6	166±6.1	7 310±66.9	23.8±1.1	156.4±1.8	17.5±0.9
7 [#]	109±4.0	168±5.9	7 490±70.1	24.6±1.9	157.0±2.0	17.6±1.2

不同种类色粉对材料耐高温性能的影响如图1所示。第一行(自左向右)依次为含2[#]自制色粉、1[#]自制色粉及有机染料的PP/LGF复合材料色板;第二行为对应色板下方铺设的A4白纸(烘烤前空白对照)。经过高温烘烤后,含有机染料的色板表面出现

显著色粉析出,析出物完全浸润下方的白纸(图1b中Ⅲ红框区),形成明显着色痕迹,说明有机染料在PP基体中存在迁移缺陷;未经表面改性处理的自制1[#]三原色色粉体系色板呈现微量析出(图1b中Ⅱ红框区),迁移程度较有机染料显著降低,表明自制色粉在高温下仍存在缓慢向表面迁移析出倾向。为解决高温/高湿(含水/乙二醇等溶剂)环境析出难题,通过偶联剂对自制三原色色粉进行表面处理,以增强色粉与PP/LGF复合材料的界面结合力。试验结果显示:经偶联剂表面处理的2[#]色粉体系色板下方白纸与烘烤前状态一致(图1b中Ⅰ),无迁移现象,可有效抑制色粉析出;由表4数据可以看出,相比未经处理的自制三原色色粉体系,偶联剂处理可同时提升复合材料的力学性能,表明经偶联剂表面处理的2[#]色粉体系兼具耐高温析出与优化材料力学性能的效果。

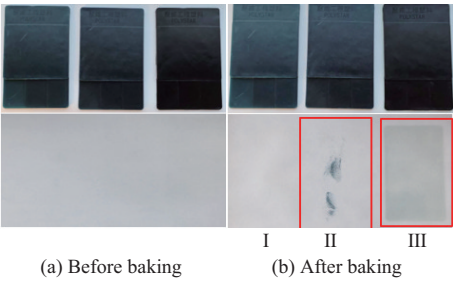


图1 色粉种类对PP/LGF复合材料耐高温性能的影响

Fig. 1 Influence of pigment type on high temperature resistance of PP/LGF composites

2.3 色粉含量对PP/LGF复合材料性能的影响

选择2[#]自制色粉,配制不同色粉含量的PP/LGF复合材料,见表5。经偶联剂处理的三原色色粉含量对PP/LGF复合材料性能的影响见表6。由表6可知,当色粉质量分数从0.15%增加到0.3%时,复合材料的力学性能没有发生显著变化,但激光透过率降低了约13.3%;当色粉质量分数从0.15%提升至0.6%时,复合材料的拉伸强度、弯曲强度、弯曲模量与缺口冲击强度分别下降了4.5%,3.6%,2.0%和12.1%,其中缺口冲击强度下降幅度最大,并且激光透过率下降了28.6%。尽管色粉质量分数为0.15%时复合材料的综合性能最优,但因无机色粉固有染色能力限制导致着色深度不足,无法满足工业应用对产品外观黑度的要求。综合考虑激光焊接工艺要求、材料力学性能及产品外观黑度需求,本研究确定最优色粉添加量为0.3%。

表 5 不同色粉含量的 PP/LGF 复合材料配方(质量分数)
Tab. 5 Formula of PP/LGF composites with different pigment contents(mass fraction)

Materials	8 [#]	9 [#]	10 [#]
1450T	60.85	60.7	60.4
GPM 200A	3.0	3.0	3.0
1010	0.3	0.3	0.3
PS 802	0.4	0.4	0.4
NA 11	0.3	0.3	0.3
T838 J	35	35	35
2 [#] custom-developed pigment	0.15	0.3	0.6

表 6 色粉含量对 PP/LGF 复合材料性能的影响
Tab. 6 Effect of pigment content on material properties of PP/LGF composites

Samples	TS/MPa	FS/MPa	FM/MPa	NIS/(kJ·m ⁻²)	HDT/°C	LTC/%
8 [#]	110±3.2	169±8.8	7 510±50.4	24.8±0.9	157.1±0.8	20.3±1.0
9 [#]	109±3.5	168±7.9	7 490±61.2	24.6±0.6	157.0±1.1	17.6±0.8
10 [#]	105±2.6	163±6.3	7 360±49.6	21.8±1.0	156.0±0.6	14.5±0.6

2.4 成核剂含量对 PP/LGF 复合材料性能的影响

选择 2[#] 自制色粉,并固定质量分数为 0.3%,配制不同成核剂含量的 PP/LGF 复合材料,见表 7。表 8 为成核剂含量对 PP/LGF 复合材料结晶行为的影响,图 2 为复合材料 DSC 结晶曲线。测试结果表明:成核剂的引入使复合材料的结晶温度(T_c)向高温区偏移,当成核剂质量分数增加到 0.5% 时,复合材料的 T_c 较未添加成核剂时提高 5.5 °C,这表明成核剂起到了异相成核效应,促进了 PP 分子链在更高温度下的有序排列。然而,复合材料的结晶焓(ΔH_c)与结晶度(X_c)变化幅度较小,这可能是因为 PP 基体树脂在合成阶段已预置一定量的成核剂,导致复合材料改性过程中二次添加的成核剂含量超过饱和阈值,从而弱化了对结晶度的调控作用。

表 9 为成核剂含量对复合材料性能的影响。由表 9 可知,当成核剂质量分数从 0% 增加到 0.3% 时,PP/LGF 复合材料的力学性能与热性能均有所提升,

表 7 不同成核剂含量的 PP/LGF 复合材料配方(质量分数)
Tab. 7 Formula of PP/LGF composites with different nucleating agent contents(mass fraction)

Materials	11 [#]	12 [#]	13 [#]
1450T	61	60.7	60.5
GPM 200A	3.0	3.0	3.0
1010	0.3	0.3	0.3
PS 802	0.4	0.4	0.4
NA 11	0	0.3	0.5
T838 J	35	35	35
2 [#] custom-developed pigment	0.3	0.3	0.3

表 8 成核剂含量对 PP/LGF 复合材料结晶性能的影响
Tab. 8 Effect of nucleating agent content on crystallization of PP/LGF composites

Samples	$\Delta H_c/(J \cdot g^{-1})$	$T_c/^\circ C$	$X_c/\%$
11 [#]	56.74	124.67	27.41
12 [#]	57.63	129.16	27.84
13 [#]	56.30	130.17	27.20

Notes: ΔH_c is cold crystallization enthalpy; T_c is cold crystallization temperature; X_c is crystallinity.

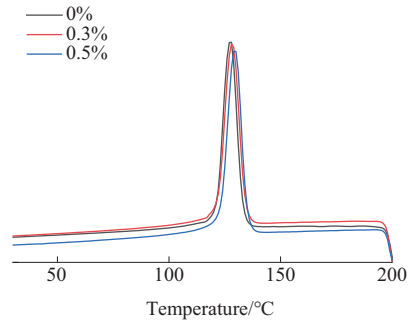


图 2 不同成核剂含量时 PP/LGF 复合材料的结晶 DSC 曲线
Fig. 2 DSC crystallization curves of PP/LGF composites with different nucleating agent contents

表 9 成核剂含量对 PP/LGF 复合材料性能的影响
Tab. 9 Influence of nucleating agent content on properties of PP/LGF composites

Samples	TS/MPa	FS/MPa	FM/MPa	NIS/(kJ·m ⁻²)	HDT/°C	LTC/%
11 [#]	109±3.4	168±4.6	7 490±66.6	24.6±0.6	157.0±1.0	17.6±1.0
12 [#]	111±2.8	172±5.1	7 610±59.4	24.2±0.5	157.6±0.9	17.1±1.2
13 [#]	110±3.7	170±5.8	7 500±48.2	24.5±0.8	156.8±0.6	22.2±0.8

而激光透光率略有下降。当成核剂质量分数进一步增加至 0.5% 时,PP/LGF 复合材料的力学及热性能未发生明显变化,但激光透过率较未添加成核剂时提升了 26.1%。激光透过率的提升原因在于:(1)结晶度下降减弱了激光散射效应;(2)部分 PP 晶粒尺寸减小至激光焊接设备工作激光波长(980 nm)以下,提高了激光透过率。因此,考虑到成本控制,对于常规激光焊接应用,建议不添加成核剂以降低生产成本;对于高精度激光焊接应用场景,建议采用 0.5% 的成核剂添加量以优化激光能量传输效率。

3 结论

(1)当 LGF 质量分数为 35% 时,PP/LGF 复合材料在力学性能与激光透光率之间实现最优平衡。

(2)采用自制的三原色黑色色粉替代常规的溶剂黑,可显著抑制 PP/LGF 透激光复合材料在高温环境下的色粉迁移,有效解决了常规溶剂黑导致的析出问题。

(3)经偶联剂表面处理后,自制三原色色粉在高

温环境下未出现析出现象,表明表面处理有效改善了色粉与PP/LGF基体的界面相容性,增加了界面结合强度。

(4)当偶联剂改性三原色色粉质量分数为0.3%时,PP/LGF复合材料综合性能最优;色粉质量分数低于0.15%时因着色深度不足无法满足产品外观要求;当色粉质量分数达到0.6%时则会导致复合材料力学性能及激光透光率显著下降,显著降低了材料的激光焊接能量传输效率。

(5)对于常规激光焊接应用,建议不添加成核剂以降低生产成本;对于高精度激光焊接场景,推荐采用0.5%成核剂添加量以优化激光能量传输效率。

参考文献

- [1] 汪晓鹏. 聚丙烯改性研究进展[J]. 上海塑料, 2017, 45(1):1-6.
WANG Xiaopeng. Progress in research of polypropylene modification[J]. Shanghai Plastics, 2017, 45(1):1-6.
- [2] LEE M J, KWON Y J, PARK J W, et al. A surface engineered inter-layer of reinforced PP separators for balanced electrochemical and self-extinguishable performance in Li-ion batteries: Morphology and thickness control effects[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 520. DOI:10.1016/j.cej.2025.165758.
- [3] WANG S S, ZHANG Y. An innovative binary nano-catalytic flame retardant system for improving the fire safety performance of polypropylene[J]. Materials Letters, 2022, 324. DOI: 10.1016/j.matlet.2022.132663.
- [4] WANG Y Y, LI J, ZHANG Z, et al. Magnetic polypropylene composites with selectively localized reactive nano-Fe₃O₄ in toughener of POE-g-MAH: Towards super toughness, high flexibility and balanced strength[J]. Materials & Design, 2022, 217. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110607.
- [5] 云宁. 聚丙烯复合材料在车用内饰件中的应用研究进展[J]. 合成树脂及塑料, 2024, 41(1):75-77, 81.
YUN Ning. Application of PP composite materials in automotive interior decoration[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2024, 41(1):75-77, 81.
- [6] 赵一权, 董婧晗, 张铜柱, 等. 汽车外饰用再生聚丙烯材料性能研究[J]. 中国塑料, 2023, 37(1):112-118.
ZHAO Yiquan, DONG Jinghan, ZHANG Tongzhu, et al. Study on properties of recycled polypropylene for automobile exterior parts[J]. China Plastics, 2023, 37(1):112-118.
- [7] 胡智清, 周全, 熊建武. 国内车用改性聚丙烯的研究现状及进展[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(6):145-148.
HU Zhiqing, ZHOU Quan, XIONG Jianwu. Research status and development of modified polypropylene for vehicle at home[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(6):145-148.
- [8] 王敏, 胡仁其, 吴谦. 长玻璃纤维增强聚丙烯材料在汽车领域中的应用及前景展望[J]. 上海塑料, 2019, 47(4):10-15.
WANG Min, HU Renqi, WU Qian. Application and prospect forecast of long glass fiber reinforced polypropylene materials in automotive field[J]. Shanghai Plastics, 2019, 47(4):10-15.
- [9] DU B, LI Z X, BAI H M, et al. Mechanical property of long glass fiber reinforced polypropylene composite: From material to car seat frame and bumper beam[J]. Polymers, 2022, 14(9). DOI: 10.3390/polym14091814.
- [10] MORAMPUDI P, NAMALA K K, GAJJELA Y K, et al. Review on glass fiber reinforced polymer composites[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 43:314-319.
- [11] 王峰, 张家辉, 孙文革, 等. 用于汽车轻量化领域的碳纤维增强尼龙66复合材料的制备与研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(7):101-104.
WANG Feng, ZHANG Jiahui, SUN Wenge, et al. Preparation and research of carbon fiber reinforced nylon 66 composites for automotive light weighting[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(7):101-104.
- [12] 薛长鸣. 汽车用尼龙材料改性技术及其应用研究进展[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(6):157-162.
XUE Changming. Research progress in modification technology and application of nylon materials for automobile[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(6):157-162.
- [13] 张坤, 谢剑虹, 刘骞, 等. 尼龙材料在汽车行业的应用及展望[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(5):153-158.
ZHANG Kun, XIE Jianhong, LIU Qian, et al. Application and prospect of nylon materials in automobile industry[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(5):153-158.
- [14] HOU Q N, CHEN Y H, WANG J F, et al. High self-extinguishing and thermal insulating PA66 composites enhanced with flame-retardant cellulose nanocrystals[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 307. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.142129.
- [15] SAHA S, KUMAR V, RENCHECK M L, et al. Development of multifunctional nylon 6, 6-based nanocomposites with high electrical and thermal conductivities by scalable melt and dry blending methods for automotive applications[J]. Materials Today Communications, 2024, 38. DOI:10.1016/j.mtcomm.2023.107657.
- [16] GONÇALVES L F F F, 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. DOI:10.1016/j.infrared.2021.103931.
- [17] MOSKVITIN G V, POLYAKOV A N, BIRGER E M. Laser welding of plastics (review)[J]. Welding International, 2013, 27(9):725-734.
- [18] 曲兆展, 蔡令波, 谢良越, 等. 激光透射焊接异种塑料的实验研究[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(2):91-95.
QU Zhaozhan, CAI Lingbo, XIE Liangyue, et al. Experimental

- study on laser transmission welding of dissimilar plastic[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(2):91-95.
- [19] 王瑛,张鹏. 汽车仪表盘黑色塑料激光透射焊接研究[J]. 精密成形工程, 2021, 13(4):154-158.
- WANG Ying, Zhang Peng. Research on laser transmission welding of black car dashboards thermoplastic polyurethane plastic[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(4): 154-158.
- [20] ELSHEIKH A, OMER M A E, BASEM A, et al. Recent advances and future prospects of laser welding technology for polymeric materials: A review[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 35:7 417-7 440.
- [21] HAQUE M S, MOEED K, ZAKA M Z. Laser welding of thermoplastics - A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 64: 1 479-1 485.
- [22] LIU J M, QUAN D, SCARSELLI G, et al. Developments and future prospects of welding technology for carbon fiber thermoplastic composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2025, 297.
- DOI:10.1016/j.compositesb.2025.112314.
- [23] 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 Yanan. Research status and influence factors of laser welding performance of short glass fiber reinforced polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(9): 70-74, 86.
- [24] 章建胜,金蛟,王海峰. 透明 PP 塑料激光焊接工艺研究[J]. 塑料工业, 2022, 50(3):165-169.
- ZHANG Jiansheng, JIN Jiao, WANG Haifeng. Technics research of laser welding for transparent PP plastic[J]. China Plastics Industry, 2022, 50(3):165-169.
- [25] 张中伟,何书珩. 长玻纤增强 PP 材料界面行为对其力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(8):114-118.
- ZHANG Zhongwei, HE Shuheng. Effect of interfacial behavior on properties of long glass fiber reinforced PP[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(8):114-118.
-
- (上接第 25 页)
- [11] 方辉. 不同结构苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯嵌段共聚物的性能研究[J]. 橡胶工业, 2025, 72(3):177-184.
- FANG Hui. Study on properties of SEBS with different structures [J]. China Rubber Industry, 2025, 72(3):177-184.
- [12] SUN HX, ZHANG J. Modified epoxy resin with SEBS-g-MAH to fabricate crack-free and robust hydrophobic coatings on the surface of PP/SEBS matrix[J]. Surfaces and Interfaces, 2022, 28. DOI:10.1016/j.surfin.2021.101662.
- [13] 袁煜艳. SIS、SEBS 产品及其在热熔胶中的应用[J]. 粘结, 2007 (5):49-52.
- YUAN Yuyan. Application of SIS and SEBS in hot melt adhesives [J]. Adhesion, 2007(5):49-52.
- [14] 仇磊,丁武斌,常媛玲,等. 聚丙烯基热熔胶的制备以及对铝板剥离性能的研究[J]. 粘结, 2016(2):59-61.
- QIU Lei, DING Wubin, CHANG Yuanling, et al. Preparation of polypropylene based hot melt adhesive and its peeling properties to aluminum plate[J]. Adhesion, 2016(2):59-61.
- [15] REN Y Q, SUN X J, LI Y F, et al. Relationships between impact performance and structures of rotationally molded crosslinked high-density polyethylene[J]. Polymer Engineering and Science, 2021, 61(2):410-419.
- [16] GUPTA A K, PURWAR S N. Crystallization of PP in PP/SEBS blend and its correlation with tensile properties[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1984, 29(5):1 595-1 609.