

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.11.006

光纤激光选区烧结 PA6/GB/CB 复合材料的机理与性能

邓正东^{1,2,3}, 吴泽宏^{1,2,3}, 吴健^{1,3}, 古文全¹, 孙茂银^{1,2,3}

(1. 贵州省冶金化工研究所, 贵阳 550014;

2. 贵州森远增材制造科技有限公司, 贵阳 550014; 3. 贵州省高分子增材制造工程研究中心, 贵阳 550014)

摘要: 聚酰胺 6 (PA6) 在选择性激光烧结 (SLS) 领域的应用, 受到其对常见光纤激光器 1 064 nm 波长吸收率不足的限制。为突破 PA6 材料在激光烧结过程中吸收率的局限, 提高其在 1 064 nm 激光下烧结的成功率与拉伸强度, 选用炭黑 (CB) 作为光吸收增强剂, 同时引入玻璃微珠 (GB) 以提升制件的稳定性和抗变形能力。对制备的复合粉体开展系统表征, 明确了填料对结晶行为及界面强化机制的影响。基于上述材料特性的优化, 进一步匹配了激光烧结工艺参数。研究结果显示, 当炭黑质量分数为 0.5% 时, 复合粉体对 1 064 nm 波长激光的吸收率显著提高至 84.7%。PA6 在激光的快速熔凝作用下成功转变为 γ 晶型。通过正交实验、极差分析以及实际测量性能参数, 确定最佳体能量密度为 0.25 J/mm³ (对应激光功率 160 W, 扫描速度 15 000 mm/s, 扫描间距 0.3 mm)。在此条件下, 复合材料的拉伸强度达到最大值 66.4 MPa, 且 GB 被熔体均匀包覆, 界面结合紧密。

关键词: 选择性激光烧结; 聚酰胺 6; 玻璃微珠; 炭黑; 体能量密度; 拉伸强度

中图分类号: TQ322.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)11-0041-08

Mechanisms and properties of PA6/GB/CB composite materials sintered by selective fiber laser

DENG Zhengdong^{1,2,3}, WU Zehong^{1,2,3}, WU Jian^{1,3}, GU Wenquan¹, SUN Maoyin^{1,2,3}

(1. Guizhou Institute of Metallurgy and Chemical Industry, Guiyang 550014, China; 2. Guizhou Senyuan Additional Materials Technology Co., Ltd., Guiyang 550014, China; 3. Guizhou Province Polymer Additive Manufacturing Engineering Research Center, Guiyang 550014, China)

Abstract : The application of polyamide 6 (PA6) in selective laser sintering (SLS) was limited by its insufficient absorption of the 1 064 nm wavelength, which is commonly emitted by fiber lasers. To overcome the limitation in laser absorption during the SLS process and improve both the success rate and tensile strength of PA6 under 1 064 nm laser irradiation, carbon black (CB) was introduced as a light-absorbing enhancer and glass beads (GB) were incorporated to improve the stability and deformation resistance of the components. The composite powder was systematically characterized, clarifying the influence of fillers on crystallization behavior and interfacial strengthening mechanisms. Based on the optimized material properties, the laser sintering process parameters were further matched. The results show that when the mass fraction of CB is 0.5%, the absorption rate of the composite powder for 1 064 nm laser wavelength significantly increases to 84.7%. Under the rapid melting and solidification effect of the laser, PA6 was successfully transformed into the γ -crystal form. Through the orthogonal experiments, the range analysis, and the performance testing, the optimal volumetric energy density is determined to be 0.25 J/mm³ under the conditions of a laser power of 160 W, a scanning speed of 15 000 mm/s, and a scanning spacing of 0.3 mm, and the tensile strength of the composite reaches a maximum of 66.4 MPa, where the glass beads uniformly coated by the melt and exhibiting strong interfacial bonding.

Keywords : selective laser sintering ; polyamides 6 ; glass beads ; carbon black ; volumetric energy density ; tensile strength

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合服企[2022]006), 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2023]一般 350), 贵阳市科技计划项目(筑科合同[2023] 8-3 号), 贵州科学院青年科学基金(黔科院 J 字[2024]7 号)

通信作者: 孙茂银, 高级工程师, 研究方向为高分子增材制造技术

收稿日期: 2025-08-01

引用格式: 邓正东, 吴泽宏, 吴健, 等. 光纤激光选区烧结 PA6/GB/CB 复合材料的机理与性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(11): 41-48.

DENG Zhengdong, WU Zehong, WU Jian, et al. Mechanisms and properties of PA6/GB/CB composite materials sintered by selective fiber laser[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(11): 41-48.

增材制造技术作为智能制造领域不可或缺的组成部分,正经历从原型制造向功能部件直接成型的过渡转变。在众多增材制造技术中,选择性激光烧结(SLS)因其无需支撑结构、基于数字模型、可加工复杂几何形状的特点,在航空航天、医疗器械和汽车制造领域展现出独特优势^[1-5]。其中,聚酰胺6(PA6)复合材料因其优异的力学性能和环境耐受性,逐渐成为高性能SLS制件的理想材料^[6]。在传统CO₂激光器应用于PA6材料的SLS烧结过程中,激光能量仅作用于粉体表层极浅的深度内,迅速被吸收并转化为热能,再通过热传导融化下层粉体,导致熔池极不稳定,进而使烧结工件的性能差异较大^[7-8]。此外,CO₂激光的光束质量一般,一方面在加工精度和表面质量上表现较差,另一方面,较低的光束质量导致体能量密度(u)均匀性劣势在扩束后更为明显,无法通过增加扩束元件来提高加工效率。CO₂激光器还存在使用寿命短、设备维护成本高等问题,促使研究者将目光转向光纤激光技术。光纤激光SLS技术应用于PA6材料,由于波长为1 064 nm,激光能穿透更深的粉体层,在粉体内部一定体积内产生热量,使熔池更均匀稳定。同时,光束质量因子接近1,扩束放大后光斑能量分布的均匀性依然很高,可将打印过程的填充光斑从0.5 mm增大到1 mm,填充间距相应增大,从而提高整体加工效率。

然而,光纤激光SLS技术加工PA6材料仍面临两大挑战。首先,纯PA6对1 064 nm近红外激光的原生吸收率很低,如果直接使用光纤激光烧结纯PA6粉体,大部分激光能量会穿透粉体或被反射^[9],无法被有效吸收和转化成热能,导致烧结失败。炭黑(CB)是一种常见的吸光剂,加入PA6中可以提高对1 064 nm激光的吸收效率^[10],确保激光能量被粉体层有效吸收,从而在预设参数下实现良好、均匀的烧结。其次,PA6作为半结晶性聚合物,在SLS过程中从熔融态冷却到凝固态时会发生显著的结晶收缩,这种不均匀收缩是导致制件翘曲变形,甚至打印失败的主要原因。玻璃微珠(GB)是一种无机刚性填料,其热膨胀系数远低于PA6材料^[11],且在加工过程中尺寸稳定、不熔化。在PA6中添加GB能有效阻隔聚合物的整体收缩,从而大幅减小总收缩率和内应力,极大改善制件的尺寸稳定性和抗翘曲能力,这是成功打印大尺寸或复杂结构制件的关

键^[12]。同时,GB的加入提高了复合材料的弹性模量和硬度,使制件更不易产生弯曲变形^[13]。研究表明,刚性球形填料与纳米级功能填料的复合使用,通常能产生协同效应,构建更为完善且高效的导热网络^[14]。Zhao等^[15]在环氧树脂中添加氮化硼纳米片(BNNS)和氮化硼微球(BNMS)填料,构建了三维导热网络,所得复合材料的热导率是纯环氧树脂的5倍,其导热能力显著优于单独使用BNNS或BNMS。

笔者借鉴了这一思路,将CB和GB应用于PA6材料的SLS加工中,少量且均匀分散的CB充当了局部的“点热源”,而GB作为“结构骨架”分散在PA6基体中,不仅避免了CB的局部过热聚集,还可以通过调节熔融聚合物的流动与热传导,形成一个更为均匀的烧结热场。在光纤激光SLS技术下,分别研究了PA6粉体中填充CB对光纤激光吸收性能的影响和填充GB对结晶性能的影响,系统分析材料吸收特性与工艺参数优化策略。解决了在聚合物加工中光纤激光替代传统CO₂激光所面临的两大挑战。同时,对粉体材料的微观形貌和结晶特性进行了详尽的表征分析。通过精细调整激光烧结工艺参数,分析了在不同工艺条件下烧结试样的拉伸力学性能,并结合断口形貌的综合分析,最终确定了在光纤激光作用下的最优工艺参数。旨在为多相PA6复合材料的光纤激光SLS成型提供相关理论基础。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PA6: Ultrasint PA6 X028, 巴斯夫(中国)有限公司;

GB: 实心, 平均粒径20 μm , 苏州锦艺新材料科技股份有限公司;

CB: 平均粒径20 nm, 济南鑫正化工有限公司;

偶联剂KH570: 分析纯, 苏州市森菲达化工有限公司。

1.2 主要仪器及设备

吸收光谱仪: UH4150, 日本Hitachi高新技术株式会社;

激光粒度仪: Bettersize2600, 丹东百特仪器有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪: DSC3500, 德国NETZSCH公司;

扫描电子显微镜(SEM): GeminiSEM 300, 德国

ZEISS公司;

X射线衍射(XRD)仪:Ultima IV,日本株式会社理学;

电子万能材料试验机:CTM9100,协强仪器制造(上海)有限公司;

SLS快速成型设备:HT403,湖南华曙高科技有限责任公司,性能参数详见表1。

表1 SLS设备工作能力参数

Tab. 1 Technical parameters of SLS equipment	
Items	Specification
Build cylinder size/mm ³	400×400×450
Layer thickness/mm	0.06~0.3
Laser type	Fiber laser
Power/W	10~500
Max scanning speed/(mm·s ⁻¹)	20 000
Max chamber temperature/°C	220
Dimensional accuracy(≥100 mm)/%	±0.1
Dimensional accuracy(<100 mm)/mm	±0.1

1.3 试样制备

基础复合体系由质量分数70%的PA6粉体与质量分数30%的GB组成。为深入探究CB含量对光吸收性能的影响,将CB作为变量组分,并设置了三个不同的添加水平,质量分数分别为0%,0.3%和0.5%。在进行其他表征试验时,选取了添加质量分数0.5% CB的样品作为研究的主体。此外,基于对粉体流动性、粒径分布以及DSC的初步分析结果,研究在后续的粉体烧结配方中引入了质量分数0.5%的硅烷偶联剂,旨在优化界面性能,并对其效果进行了系统评估。烧结实验前,根据配方比例,将PA6、GB和CB加入混料机中。首先,将硅烷偶联剂溶解于无水乙醇中,然后通过喷雾法均匀添加到复合粉体原料中。接着,使用高速混料机在1 600 r/min的转速下搅拌3 min。最后,通过100目筛网进行筛分,制备出适用于实验的PA6/GB/CB粉体。

在完成PA6/GB/CB粉体的制备后,使用计算机辅助设计(CAD)软件创建相应拉伸样条的三维模型。将模型导入SLS设备的操作软件中,进行合理的排版设置。

烧结前,将制备好的PA6/GB/CB复合粉末导入设备成型缸,并利用加热系统将粉床温度预热至PA6熔点以下10~20 °C的特定温度,以减少热变形。烧结过程中,采用优化的工艺参数进行成型。激光依据模型截面轮廓与填充滤芯选择性扫描,使粉末逐层熔融黏接。样条全部烧结完成后,待成型缸冷却至安全温度,小心取出样件块体,并使用压缩空

气清除其表面未烧结的残留粉末。最终,获得独立的拉伸样条,用于后续的性能测试。

1.4 测试与表征

吸收光谱测试:将粉体与溶剂充分溶解,倒入比色皿中,然后把比色皿放置在样品架上。设置波长范围200~1 100 nm,以300 nm/min的速度进行扫描,采样间隔为0.5 nm,通过校准后得到相关数据。

DSC测试:利用DSC对粉体的相变温度进行测量分析。称取8 mg左右粉体样品均匀地平铺在坩埚内并密封处理,在N₂保护下,以10 °C/min的速率从20 °C升温至235 °C,保温10 min,然后再降至30 °C,记录数据。

粒度分布测试:将一定量PA6/GB粉体溶于分散剂中,配置悬浮液,然后把悬浮液倒入校准好的激光粒度仪中,依据散射光的强度分布获得粒径分布相关数据。

XRD测试:对样品进行广角XRD分析,靶材为铜靶,室温下扫描角度范围10°~35°,扫描速度2°/min。

力学性能测试:使用电子万能材料试验机测试SLS设备打印的测试样条的力学性能,依据GB/T 1040.2-2022,试件的具体形状及尺寸如图1所示,拉伸速度为5 mm/min。

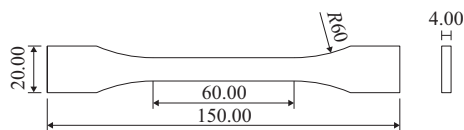


图1 拉伸试件尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions of tensile specimens(unit:mm)

2 结果与讨论

2.1 PA6/GB粉体的吸收光谱分析

图2为不同CB含量的PA6/GB粉体的吸收光谱图,从图2可以清晰地看出,添加极少量的CB(0.3%和0.5%)就能大幅提升复合粉体在1 064 nm处的激光吸收率(分别提升了17.5%和22.1%),验证了CB作为光纤激光下高效吸光剂的核心作用^[16-17]。未加入CB的PA6/GB粉体在1 064 nm处有62.6%的吸收率,原因可能是PA6分子中的C—H, N—H键在近红外区域有泛频和合频吸收带,而GB在近红外波段是透明的,光在入射时形成米氏散射,最终导致光在PA6颗粒表面出现本征吸收,穿透GB后,光散射在粉体颗粒堆积形成的孔隙中,经过复杂的散射和反射,部分光可能在多次反射中被吸收。但这个吸收率对于SLS加工明显偏低,过低的吸收率需

要更高的激光功率才能达到烧结所需的熔融温度,增加了能耗,可能导致烧结深度不足,层间结合力弱,更重要的是,吸收不均匀性更大,导致烧结件性能不稳定。添加质量分数为0.3%的CB,吸收率增加了17.5%,CB粒子相对均匀地分散在PA6/GB粉体颗粒表面,构建起一个初步有效的吸光网络,大部分入射激光在这个浓度下被有效吸收,从工艺参数上考虑意味着相同激光功率下,粉体的吸收能量显著增加,粉体床温度会更高,可以通过降低预热温度和提高扫描速度来维持烧结过程中的 u 并提高效率。当CB质量分数增加到0.5%时,粉体的吸收率增加到84.7%,吸光网络更加致密,粉体表层的CB已经吸收了绝大部分入射光,深层的CB粒子可能无法接收到足够的光子,表现出边际效应递减的规律。在实验过程中,由于CB不仅具备吸光剂的特性,还兼具着色剂的功能,最终确定采用CB质量分数0.5%的PA6/GB粉体,这样既能有效提升吸光度,又能显著增加黑色度。

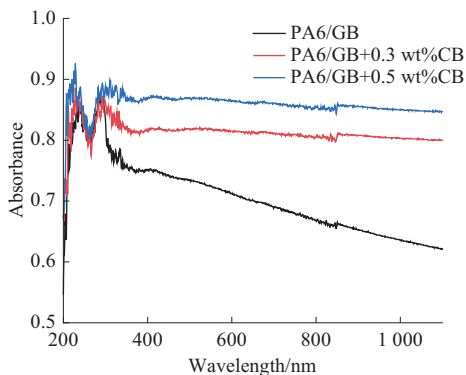


图2 PA6/GB粉体在不同CB添加量下的吸收光谱图

Fig. 2 Absorption spectrogram of PA6/GB powder at different CB addition amounts

2.2 PA6/GB粉体的微观形貌

对PA6/GB粉体进行形貌表征,图3为PA6/GB粉体的SEM照片,由图3可知,纯PA6粉体是通过液氮粉碎制备的,整体呈现出不规则的形状,有尖锐边沿。对PA6颗粒表面进行放大,观察到表面粗糙,可增强PA6与混合填料的机械啮合,但具有高休止角,堆积密度低,铺粉时容易出现孔隙和不均匀。GB的最大尺寸为35 μm ,表面光滑且呈球形状,无破碎现象。其在PA6不规则粉体颗粒间发挥了“滚珠轴承”的功能,有效降低了颗粒间的摩擦和啮合。此外,GB作为刚性无机粒子,其硬度远高于PA6聚合物。当这些微珠均匀分散于PA6基体中时,不仅能起到增强相的作用,还能有效阻碍聚合物的塑性

变形。CB为纳米级颗粒,在图像中呈现出PA6表面均匀的灰黑色覆盖,未见黑色聚集体。其主要作用是作为吸光剂和染色剂,确保粉体整体染色均匀。在0.5%质量分数下,CB未出现团聚现象,避免了局部吸热过度引起的不稳定性。

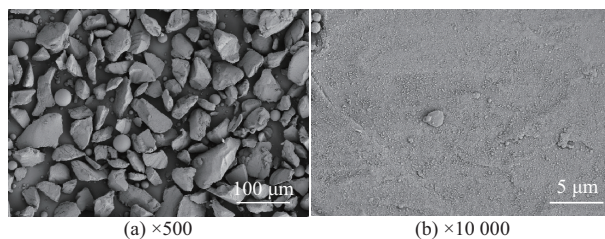
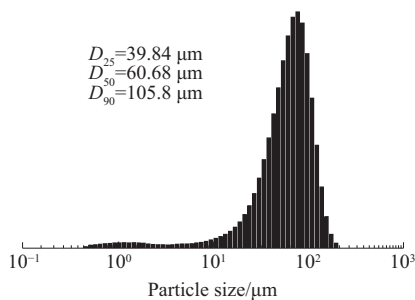


图3 PA6/GB粉体的微观形貌

Fig. 3 Microscopic morphology of PA6/GB powder

图4为PA6/GB粉体的粒径分布图,粒径分布整体表现出宽泛的区间,复合粉体累计体积占比达到25%时对应的粒径为39.84 μm ,相比GB粒径更大,小颗粒比例升高,在混合粉体中GB的填充为主导,可嵌入PA6大颗粒间隙中。累计体积占比达到50%时对应的粒径为60.68 μm ,平均粒径位于SLS技术加工的理想粒径区间,在烧结过程中流动性和烧结效果均能达到较优状态。累计体积占比达到90%时对应的粒径为105.8 μm ,表明大颗粒占比较为稳定,在铺粉过程中需要控制层厚,同时降低滚筒速度避免铺粉不均匀。这里优选的铺粉厚度设置为0.12 mm,滚筒速度设置为180 mm/s。



D_{25}, D_{50}, D_{90} refer to the particle diameter corresponding to 25%, 50%, and 90% cumulative volume distribution of the powder sample

图4 PA6/GB粉体的粒径分布

Fig. 4 Particle distribution curves of PA6/GB powder

2.3 PA6/GB粉体的DSC分析

图5为纯PA6与PA6/GB粉体的DSC曲线,由图5a中得到纯PA6的熔融峰为220.9 $^{\circ}\text{C}$,熔融焓为59.85 J/g,烧结窗口为33.3 $^{\circ}\text{C}$;PA6/GB的熔融峰为221.9 $^{\circ}\text{C}$,熔融焓为35.17 J/g,烧结窗口为27.4 $^{\circ}\text{C}$,添加GB后晶体的完善度微增,其中GB的质量分数30%时,理论熔融焓应该为41.90 J/g,理论计算见式

(1),但实测值35.17 J/g比理论低16.1%,可能存在界面约束效应^[18],GB阻碍分子链折叠,形成薄片晶。同时诱导较低熔点的 γ 晶型生成,这一项需要进一步通过XRD验证。

$$\Delta H_{m, \text{mix}} = \Delta H_{m, \text{pure}} \times (1 - \omega_f) = 59.85 \times 70\% \quad (1)$$

式中: $\Delta H_{m, \text{mix}}$ 为PA6/GB粉体的熔融焓; $\Delta H_{m, \text{pure}}$ 为纯PA6的熔融焓; ω_f 为填充率。

从结晶曲线观察,纯PA6结晶峰为177.8 °C,结晶焓为45.94 J/g;PA6/GB的结晶峰为176.9 °C,结晶焓为29.24 J/g,添加GB后,结晶焓降低了36.4%,且结晶温度降低0.9 °C,烧结窗口降低5.9 °C,表明GB的添加未发生异相成核作用,可能通过界面约束效应抑制了结晶过程。熔融-结晶能量循环失衡,净吸收能量从13.91 J/g降低至5.93 J/g,进一步证实结晶行为改变。

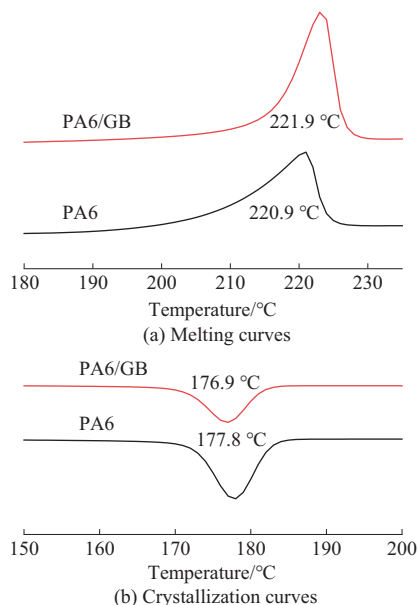


图5 DSC图谱对比

Fig. 5 Comparison of DSC curves

2.4 PA6/GB粉体的XRD分析

为进一步验证烧结过程中的晶型变化,从图6的XRD谱图中可以看出,纯PA6和PA6/GB粉体的特征衍射峰分别出现在21°和21.4°,且均显示为单一峰,该特征峰形貌和 γ 晶型高度吻合^[19-20],同时 γ 晶型特征熔点与DSC熔融峰221.9 °C相符合。增加GB导致峰位右移了0.4°,衍射角增大,根据布拉格方程,晶面间距减小,这是晶格收缩的表现,表明GB的加入使PA6的 γ 晶胞发生收缩,形成了更为致密的晶体结构。GB表面的官能团与PA6酰胺基团形成强大的相互作用,如同“拉紧”了分子链,这种

作用优化和强化了 γ 晶型内部的氢键网络,可能使分子链的平行排列更为规整,链与链之间的距离缩短,形成了一个更为紧凑、分子间作用力更强的 γ 晶格。这并非晶体缺陷,而是一种界面诱导的结构优化。要破坏这种稳定的晶体结构,需要更高的温度,这直接导致了熔点的上升。同时,GB与PA6分子链在界面处形成的强键合,为晶体提供了额外的稳定性,提高了这部分晶体的熔融所需能量,验证了DSC中添加GB后熔融峰温度增大1 °C。

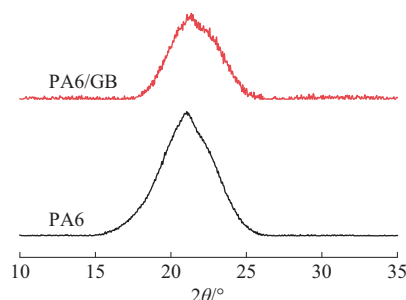


图6 XRD曲线对比

Fig. 6 Comparison of XRD curves

尽管GB提供了异相成核位点,但其强烈的界面相互作用如同一把“双刃剑”。一方面,它促进了成核;另一方面,也“锚定”了其周围的PA6分子链,严重限制了链段向晶核扩散及进行规整折叠的动力学过程。这种受限的生长环境使得大量链段无法及时参与结晶或无法完美折叠,导致最终形成的晶体整体完善度下降。因此,GB的“界面约束”具有双重性:首先,在结构上,它致密化稳定了 γ 晶格,从而提升了熔点;其次,在动力学上,它抑制了晶体的完善生长,从而降低了结晶温度和结晶度。

为了优化复合材料的晶体特性并改善晶体的生长抑制,从工艺段着手,在烧结工艺中通过延长保温时间并减缓冷却速度,以优化整个烧结过程。加工完成后两小时内,将温场维持在190 °C,从而有效促进晶体生长并完善其结构,最终提升制件的性能。从材料端出发,在复合粉体中添加了质量分数0.5%的硅烷偶联剂^[21]。硅烷偶联剂的烷氧基团在水解后与GB表面的羟基发生反应,而其另一端的有机官能团则与PA6基体进行相互作用或化学反应,在界面处构建起桥梁结构,有效改善相容性,并促进填料的异相成核作用。此外,偶联剂的加入还能显著提升复合材料的强度^[22]。

2.5 制件力学性能分析

针对PA6/GB的光纤激光烧结工艺,结合CB 85%能量吸收约束,设计正交实验方案,重点解析 u 与力学性能的映射关系。PA6/GB粉体材料在SLS成型过程中,最重要的工艺参数包括成型温度、激光功率、扫描速度、扫描间距、层厚。笔者以激光功率(A)和扫描间距(B)为实验变量,其他参数为恒定值。其中,成型温度204℃,扫描速度15 000 mm/s,层厚0.12 mm。正交实验中每组实验结果测试三个试样,取平均值。 u 的计算见式(2)。

$$u = \frac{P \cdot \eta}{v \cdot h \cdot d} \quad (2)$$

式中: u 的单位 J/mm^3 ; P 为激光功率,单位 W ; η 为能量吸收率,取值85%; h 为层厚,取值0.12 mm; v 为激光扫描速度,取值15 000 mm/s; d 为扫描间距,单位mm。

为了明确各因素对拉伸强度影响的主次顺序以及每个因素的最佳水平,以构建最优工艺方案,正交实验的因素水平见表2。正交实验中各参数对 u 和拉伸强度的影响见表3,图7为9组实验的烧结样条。在激光功率为160 W,扫描间距为0.3 mm下拉伸强度达到最高值,为66.4 MPa。通过将同一因素下同一水平的3个实验值相加,计算得到该因数的 K_i 值($i=1,2,3$)。各因素在不同水平下 K_i 值的最大值与最小值之差即为极差(R)^[23],极差的大小反映了该因素对实验过程影响的显著性。拉伸强度的极差分析结果详见表4。以试验因素为横坐标,每个水平下烧结样条的拉伸强度 K_i 值为纵坐标,绘制出拉伸强度与各因素水平的关系图,如图8所示。

表2 正交实验因数水平表

Tab. 2 Orthogonal experimental factor level table

Level	Factor	
	A/W	B/mm
1	100	0.25
2	130	0.3
3	160	0.35

Notes: A is power; B is scan spacing.

根据表4的分析结果,各因素对烧结件拉伸强度的极差影响程度: $R_A > R_B$,表明激光功率对拉伸强度的影响最为显著,其次是扫描间距。

为了量化各因素的贡献率并检验其影响的统计显著性,进行方差分析。拉伸强度的方差分析结果见表5。查阅 F 分布表,在显著性水平 $\alpha=0.05$ 的情况下, F 临界值为 $F_{0.05}(2,4)=6.94$ 。结果显示,激光

表3 正交实验各因素水平下的 u 和拉伸强度

Tab. 3 u and tensile strength at each factor level in orthogonal experiments

Samples	A/W	B/mm	$u/(\text{J} \cdot \text{mm}^{-3})$	Tensile strength/MPa
1 [#]	100	0.25	0.19	54.4
2 [#]	100	0.3	0.16	50.5
3 [#]	100	0.35	0.13	47.6
4 [#]	130	0.25	0.25	65.9
5 [#]	130	0.3	0.20	57.5
6 [#]	130	0.35	0.18	52
7 [#]	160	0.25	0.30	58.5
8 [#]	160	0.3	0.25	66.4
9 [#]	160	0.35	0.22	62.7

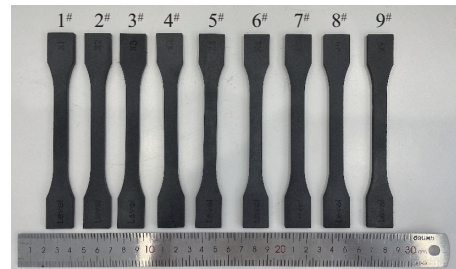


图7 实验样条

Fig. 7 Experimental samples

表4 拉伸强度的极差分析表

Tab. 4 Range analysis table for tensile strength

Value	A	B
K_1	152.5	178.8
K_2	175.4	174.4
K_3	187.6	162.3
K_{AVE}	171.8	171.8
R	35.1	16.5
Optimization level	A_3	B_1

Notes: K_{AVE} is horizontal mean; R is range; A_3 is power of 160 W; B_1 is scan spacing of 0.25 mm.

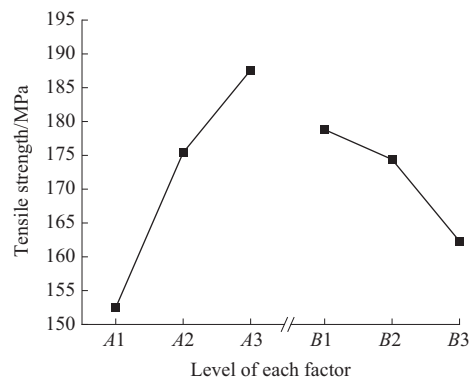


图8 拉伸强度与各因素水平的关系图

Fig. 8 Relationship plot between tensile strength and factor levels

功率的 F 值(4.08)小于 F 临界值(6.94),统计上不显著;扫描间距的 F 值(0.94)同样小于 F 临界值(6.94),统计上亦不显著。然而,这一结果主要受限于实验样本量(n)较小($n=9$)和自由度(df)有限($df=4$)。从贡

献率角度分析,激光功率的贡献率为58.1%,是主要影响因素;扫描间距的贡献率为13.4%,为次要影响因素;误差及交互作用的比重较大,占28.5%。

表5 拉伸强度的方差分析表

Tab. 5 Variance analysis table for tensile strength					
Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-value	Contribution
A	211.68	2	105.84	4.08	58.1%
B	48.66	2	24.33	0.94	13.4%
Residual error	103.88	4	25.97		28.5%
Total	364.22	8			100%

结合图8的极差分析,虽然理论上的最优参数组合为A3B1,但与实际观察到的最大值A3B2存在偏差。为了验证极差分析的推荐结果,进行了补充实验,激光功率设定为160 W,扫描间距为0.25 mm,并对5组样条进行了拉伸强度测试,结果记录于表6。检验实验的平均拉伸强度低于原实验第8组的强度。

表6 拉伸强度补充实验

Tab. 5 Supplementary experiments of tensile strength			
Samples	Power/W	Scan spacing/mm	Tensile strength/MPa
1	160	0.25	54.5
2	160	0.25	60.5
3	160	0.25	56.1
4	160	0.25	57.6
5	160	0.25	57.2
Average	160	0.25	57.2

通过对比图9中因素间的交互作用,以扫描间距为横坐标,拉伸强度为纵坐标,绘制了功率为100,130,160 W时的拉伸强度变化曲线。观察到三条曲线并不平行,特别是在160 W功率下,曲线的非平行性尤为明显,这揭示了各因素间存在显著的交互作用。因此,在确定最佳烧结参数时,应以实际测量的性能数据为依据。

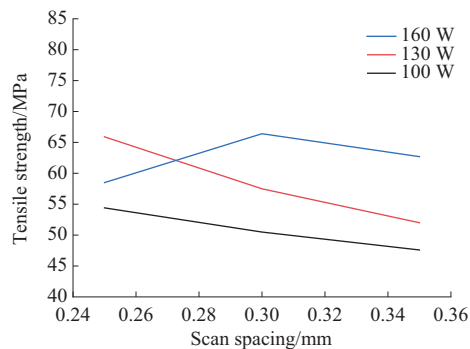


图9 因素交互作用图

Fig. 9 Factor interaction diagram

图10为不同 u 下的拉伸断口的SEM形貌特征,通过对不同 u 下的拉伸断面的微观形貌,探讨了不同烧结参数对性能的影响。当 u 在0.13~0.2 J/mm³时,可能是由于能量不足,导致“欠烧结”,结合图10a和图10b,显示出大量未熔颗粒和孔隙,孔隙多为不规则形状,拉伸破坏主要发生在孔隙和弱界面处,强度较低。当 u 在0.25 J/mm³时,能量输入达到黄金平衡点,结合图10c和图10d,PA6基体完全熔融形成连续相,拉伸强度达到最大值66.4 MPa;GB被熔体均匀包裹,界面结合紧密;孔隙率较低,孔隙基本为球形,GB表面PA6形成纳米级 γ 晶,这种压缩晶格能提升界面剪切强度。当 u 在0.3 J/mm³处,输入能量过高引发热降解,结合图10e和图10f,表现在PA6分子链断裂产生气孔,孔隙形状变得更为扁平,GB周围出现热应力裂纹,此时材料内部缺陷成为主要应力集中源,强度开始下降。

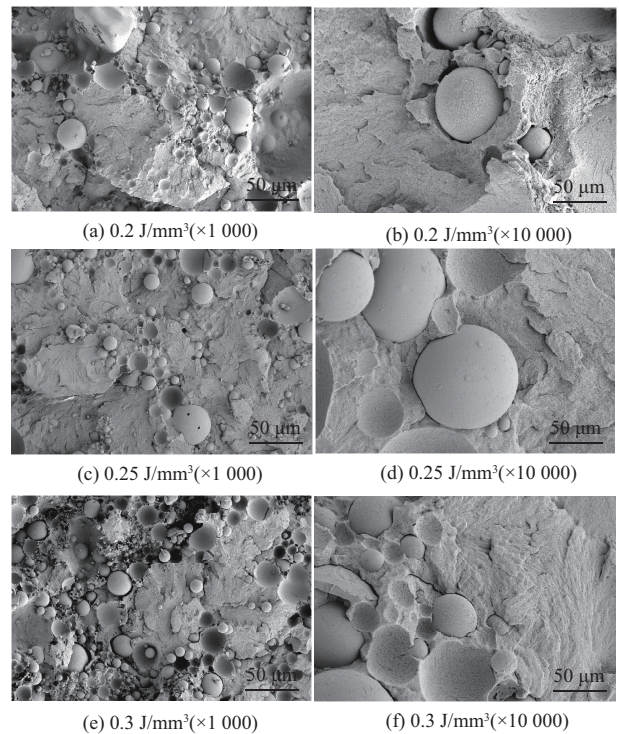


图10 不同 u 下的拉伸断口的SEM形貌特征

Fig. 10 SEM morphology of tensile fracture under different u

3 结论

本研究成功解决了PA6/GB复合材料在光纤激光选区烧结(SLS)过程中面临的两大核心挑战:激光吸收率低与烧结收缩变形大。

(1)针对激光吸收率低的难题,引入CB作为吸光剂。当添加质量分数0.5%的CB时,粉体的吸收率从62.6%显著提升至84.7%,从根本上解决了光

纤激光能量利用率低的关键瓶颈,为后续稳定烧结奠定了坚实的能量基础。

(2)在应对烧结收缩与变形问题上,通过材料与工艺的协同优化实现了有效控制。尽管PA6/GB复合材料本身具有烧结窗口窄(27.4 °C)、易收缩的特点,但通过优化烧结温度与冷却区间的温度梯度,并添加偶联剂,增强了异相成核能力,提高了熔融稳定性,从而从机理上抑制了因结晶度差和应力集中导致的变形倾向。

(3)在工艺窗口的确定与效果验证方面,通过系统的参数优化,确定了最佳工艺参数组合:预热温度204 °C,激光功率160 W,扫描速度15 000 mm/s,扫描间距0.3 mm,层厚为0.12 mm。在该参数下,PA6基体完全熔融,形成致密的连续相,GB被均匀包裹且界面结合紧密,使成型件孔隙率降至最低。证实该最佳工艺参数组合可以获得尺寸稳定、结构致密的高质量制件。

综上所述,研究通过“吸光剂添加”与“工艺-材料协同调控”的组合策略,为高反射/半结晶聚合物材料的光纤激光SLS成形提供了一套完整且行之有效的解决方案。该成果深化了对光纤激光与复合材料相互作用机理的理解,同时将PA6/GB复合材料的光纤激光SLS技术推向实用化,在汽车轻量化部件、功能化集成原型制造等领域展现出明确的工业化应用潜力。

参考文献

- [1] ZHANG J P, WANG D Y, LI Y Y, et al. Application of three-dimensional printing technology in environmental analysis: A review[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2023. DOI: 10.1016/j.aca.2023.341742.
- [2] SONG Y Z, GHAFARI Y, ASEFNEJAD A, et al. An overview of selective laser sintering 3D printing technology for biomedical and sports device applications: Processes, materials, and applications[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 171. DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.110459.
- [3] MORANO C, PAGNOTTA L. Additive manufactured parts produced using selective laser sintering technology: Comparison between porosity of pure and blended polymers[J]. *Polymers*, 2023, 15(22). DOI:10.3390/polym15224446.
- [4] YEHA H M, HAMADA A, SEBAEY T A, et al. Selective laser sintering of polymers: Process parameters, machine learning approaches, and future directions[J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, 8(5). DOI:10.3390/jmmp8050197.
- [5] PANDAV G, KARANWAD T, BANERJEE S. Sketching feasibility of additively manufactured different size gradient conventional hollow capsular shells (HCSs) by selective laser sintering (SLS): From design to applications[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2024, 151. DOI:10.1016/j.jmbbm.2024.
- [6] 周英伟,樊玉鹏,于瑞龙,等.选择性激光烧结用聚合物复合材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2024, 38(19):283–291. ZHOU Yingwei, FAN Yupeng, YU Ruilong, et al. Research progress of polymer composites for selective laser sintering[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(19):283–291.
- [7] 师平,白亚琼.选择性激光烧结成型尼龙6的拉伸性能研究[J]. *现代塑料加工应用*, 2021, 33(4):29–33. SHI Ping, BAI Yaqiong. Tensile mechanical properties of PA6 based on selective laser sintering[J]. *Modern Plastics Processing and Applications*, 2021, 33(4):29–33.
- [8] WANG L F, LIU Y H, ZHU X G, et al. Investigation on the Mechanical Properties of PA6 by SLS[J]. *Applied Laser*, 2016. DOI:10.14128/j.cnki.al.20163602.136.
- [9] 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.
- [10] 田仁杰,朱光明,吕玉伟,等.炭黑对聚醚醚酮激光吸收影响的实验研究及数值模拟[J]. *中国塑料*, 2020, 34(10):44–50. TIAN Renjie, ZHU Guangming, LYU Yuwei, et al. Experimental study and numerical simulation for effect of carbon black on laser energy absorption of PEEK[J]. *China Plastics*, 2020, 34(10):44–50.
- [11] TANAKA K, MORIOKA N, KAWAGUCHI M, et al. Effect of silica addition to resin on fiber matrix interfacial shear strength of carbon fiber reinforced polyamide resin at high temperature[J]. *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 2022, 71(6):501–507.
- [12] ROUWAY M, TARFAOUI M, CHAKHCHAOU N, et al. Additive manufacturing and composite materials for marine energy: Case of tidal turbine[J]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2023, 10(6):1 309–1 319.
- [13] 夏学莲,史向阳,梁全星,等.聚氨酯包覆空心玻璃微珠增强增韧浇铸尼龙6研究[J]. *塑料科技*, 2024, 52(4):70–74. XIA Xuelian, SHI Xiangyang, LIANG Quanxing, et al. Study on cast nylon 6 reinforced and toughened by hollow glass microspheres coated with polyurethane[J]. *Plastics Science and Technology*, 2024, 52(4):70–74.
- [14] 叶丽军,洪佳晖,杨利平,等.聚合物导热复合材料三维网络构筑及性能研究进展[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(10):5 445–5 469. YE Lijun, HONG Jiahui, YANG Liping, et al. Progress on 3D network construction and properties of thermally conductive polymer composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(10):5 445–5 469.