

引用格式:曾勇,蒋雪松,王璞,等.基于深空极端环境的3D打印PA12性能调控[J].材料工程,2026,54(2):80-90.  
ZENG Yong, JIANG Xuesong, WANG Pu, et al. Performance regulation of 3D-printed PA12 based on deep space extreme environment[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(2): 80-90.

## 基于深空极端环境的3D打印PA12性能调控

曾 勇<sup>1,2,3\*</sup>, 蒋雪松<sup>1</sup>, 王 璞<sup>1</sup>, 陈继民<sup>1,2,3</sup>

(1 北京工业大学 物理与光电工程学院, 北京 100124; 2 北京市数字化医疗 3D 打印工程技术研究中心, 北京 100124; 3 北京工业大学 物质科学研究院(怀柔), 北京 101400)

**摘要:** PA12 材料具备良好的热稳定性和耐辐照特性, 在深空制造中具有广泛的应用前景。然而, 在地面采用熔融沉积成形(fused deposition modeling, FDM)制备的 PA12 材料普遍存在孔隙率高、层间结合差等结构缺陷, 导致其力学性能受限, 难以直接在深空环境中使用。为解决这一问题, 本研究提出利用深空极端环境条件对打印材料进行改性, 提高其力学性能使其满足深空制造对结构完整性和力学性能的高要求。通过模拟深空环境中的典型变量, 包括高温热处理、紫外辐照和厌氧固化, 系统评估不同工艺对 PA12 材料微观结构及力学性能的影响。研究表明: 200 °C 下热处理 10 min, 样品弯曲强度提高 66.2%; 引入 3% (质量分数, 下同) 的光引发剂和 4% 的光交联剂并紫外辐照 2 min 后, 样品拉伸强度提升 17.5%; 掺杂 3% 厌氧胶并辐照 2 min 后, 样品压缩强度提高 34.4%。最终, 综合多种处理工艺对样品进行协同调控, 使样品的拉伸、弯曲与压缩强度分别提高 75%、94.2% 和 62.2%。本研究通过模拟深空极端环境探究其对 PA12 材料性能的影响, 验证了利用深空环境变量对 PA12 材料进行改性的可行性, 为实现高性能弹性构件在深空环境下的在轨制造提供了有效技术路径和理论支撑。

**关键词:** 3D 打印; PA12; FDM; 深空极端环境; 力学性能

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000235 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000235

**中图分类号:** TQ174.75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2026)02-0080-11

## Performance regulation of 3D-printed PA12 based on deep space extreme environment

ZENG Yong<sup>1,2,3\*</sup>, JIANG Xuesong<sup>1</sup>, WANG Pu<sup>1</sup>, CHEN Jimin<sup>1,2,3</sup>

(1 College of Physics and Optoelectronic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;  
2 Beijing Engineering Research Center of 3D Printing for Digital Medical Health, Beijing 100124, China;  
3 Institute of Matter Science, Beijing University of Technology, Beijing 101400, China)

**Abstract:** PA12 material has good thermal stability and radiation resistance, and has broad application prospects in deep space manufacturing. However, PA12 materials prepared by fused deposition modeling (FDM) on the ground generally have structural defects such as high porosity and poor interlayer bonding, which limit their mechanical properties and make it difficult to directly use them in deep space environments. To address this issue, this study proposes the modification of printing materials using extreme environmental conditions in deep space to improve their mechanical properties and meet the high requirements for structural integrity and mechanical performance in deep space manufacturing. By simulating typical variables in deep space environments, including high-temperature heat treatment, ultraviolet irradiation, and anaerobic solidification, the effects of different processes on the microstructure and mechanical properties of PA12 materials are systematically evaluated. The results show that after 10 min of heat treatment at 200 °C, the bending strength of the sample increases by 66.2%; after introducing 3% (mass fraction, the same below) photoinitiator and 4% photocrosslinking agent and irradiating with UV for 2 min, the tensile strength of the sample increases by 17.5%; after doping with 3%

anaerobic adhesive and irradiating for 2 min, the compressive strength of the sample increases by 34.4%. Finally, multiple processing techniques are combined to synergistically regulate the sample, resulting in a 75%, 94.2%, and 62.2% increase in tensile, bending, and compressive strength, respectively. This study explores the impact of simulating extreme deep space environments on the properties of PA12 materials, verifying the feasibility of *in-situ* modification of PA12 materials using deep space environmental variables. This provides an effective technical path and theoretical support for the in-orbit manufacturing of high-performance elastic components in deep space environments.

**Key words:** 3D printing; PA12; FDM; extreme deep space environment; mechanical property

随着深空探测任务的不断拓展,航天器的长期稳定运行对深空在轨制造技术<sup>[1]</sup>提出了迫切需求。聚合物3D打印技术因其力学性能好、适应性高,成为航天器在轨制造与维护的重要发展方向之一。2014年,美国宇航局(NASA)率先在国际空间站开展熔融沉积成形(fused deposition modeling, FDM)技术的空间环境验证实验<sup>[2]</sup>,初步证实了微重力条件下利用聚合物材料进行3D打印的可行性<sup>[3]</sup>。然而,深空打印件与地面打印件相比普遍存在15%~20%的力学性能差异,尚未满足长期稳定运行的严苛要求。聚酰胺12(PA12)<sup>[4-5]</sup>因具有优异的热稳定性(熔点178℃)及出色的耐辐照性能,被视为最适合深空环境应用的3D打印高性能聚合物材料之一。然而,FDM成形弹性体聚合物材料制品层间结合力差,其力学性能与传统制造方式相比相差大。因此,FDM成形的弹性体聚合物制品需要进一步后处理以提升其力学性能。太空的微重力或零重力、高真空无氧、强辐照和高低温交变的环境等,满足弹性体聚合物材料厌氧材料固化、热处理以及辐照交联改性的条件;同时在无氧条件下不发生氧化降解反应,避免了弹性体聚合物材料因氧化降解导致性能下降的问题;并且弹性体聚合物材料处理过程的能量取自太阳能,不会额外增加航天器功耗。与纤维增强复合材料相比,直接利用太空环境变量改性处理弹性体聚合物的方法,不仅节省材料,降低空间后处理的难度,而且能降低操作难度,以及航天器内对固液废弃物的限制。近年来,学界围绕改性材料提升FDM制件性能展开了积极探索。在厌氧固化领域,祝军<sup>[6]</sup>开发出一种环保型厌氧胶,有效改善了层间剪切强度,性能提升高达40%,但面临固化周期长(超过6h)的难题;汉高乐泰公司<sup>[7]</sup>则通过改进厌氧胶的基体制备方法,以聚氨酯聚丙烯酸酯克服了传统丙烯酸类厌氧胶的硬脆缺陷,提升了柔韧性与空气稳定性。日本大仓公司<sup>[7]</sup>亦致力于加速厌氧固化过程,提出了添加特定促进剂的方案。在紫外辐照改性方面,华林林<sup>[8]</sup>通过紫外光辐照实现了PA6的有效交联,显著提升了其凝胶含量和拉伸强度,并改善了热稳定性。Sengupta

等<sup>[9]</sup>则利用电子束辐照对纳米二氧化硅/PA66复合膜进行改性,发现未添加填料的PA66复合膜样品的热稳定性更高。Gupta等<sup>[10]</sup>则利用伽马辐照使PA66材料的拉伸强度提高了22%,但辐照过程中引入的光引发剂残留降低了材料纯度,制约了进一步的应用。而太空的高温、无氧、紫外环境等,满足弹性体聚合物材料原位退火、厌氧材料固化、辐照交联改性的条件。添加厌氧材料使弹性体聚合物材料抵抗外力变形的性能得到提升;添加催化剂和引发剂,则能通过诱导高分子材料内部发生辐射交联,形成三维空间网络结构,从而提升其力学性能。这种直接利用太空环境变量改性处理弹性体聚合物的方法,能够作为实现材料厌氧材料固化以及辐照交联改性的天然平台。然而,当前尚缺乏如何系统协同利用这些深空环境变量进行PA12材料性能优化的深入研究。

本研究创新性地提出“环境自适应改性”的材料优化理念,构建了以热处理-紫外交联-厌氧固化多因素协同作用的工艺体系,利用深空环境自身独特的极端条件对PA12的微观结构和力学性能实施精准调控。通过摆脱传统工艺过度依赖化学添加剂的限制,成功实现了深空环境中PA12打印材料性能的显著提升,为航天器高性能弹性体零部件的深空在轨制造提供了全新的技术路径和关键工艺支持。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

PA12颗粒是由德国赢创德固赛公司生产,型号为L1670的尼龙12粒料,光引发剂为二苯甲酮(BP,浓度 $\geq 99\%$ (质量分数,下同),阿拉丁),光交联剂为三羟甲基丙烷三丙烯酸酯(TMPTA,85%,阿拉丁),混合溶剂为六氟异丙醇(99.5%,阿拉丁),抗氧剂为1010(95%,阿拉丁),厌氧胶为甲基丙烯酸酯(汉高乐泰)。

### 1.2 实验设备

使用真空干燥箱(DZF-6050,上海一恒科学仪器

有限公司)对PA12材料进行干燥;使用研磨粉碎机(3DPANY)将干燥后的PA12粉碎成细小颗粒;通过单螺挤丝机(3DPANY-ONE)对PA12颗粒进行挤丝;通过FDM 3D打印机(TL-D3 V2)对挤出的丝材进行打印;使用紫外光辐照灯(Wash&Cure Plus)对打印后的样品进行紫外辐照实验,该设备额定功率为25 W,UV灯组采用12颗405 nm光源;使用马弗炉(SX-G02163)对打印后的样品进行热处理;使用综合热分析仪(STA449C)进行热重分析和差示扫描量热(TG-DSC)测试,取干燥处理过后PA12样品,切下5~8 mg,用钳锅装好后放入综合热分析仪中,在氮气气氛的保护下,以10 °C/min升温速率将试样所处环境由室温升到600 °C,其中,氮气气体的流速为40 mL/min;使用扫描电子显微镜(SU8020)对样品进行微观形貌表征;使用电子万能材料试验机(JHY-5000)对PA12样品的力学性能进行测试。

### 1.3 实验方法

首先将干燥好的PA12颗粒与一定质量的光交联剂三羟甲基丙烷三丙烯酸酯(TMPTA)、光引发剂二苯甲酮(BP)、抗氧剂1010、厌氧材料(MMA)、厌氧促进剂混合加入烧杯中。其次,在烧杯中加入六氟异丙醇(HFIP)溶剂,在室温25 °C下用磁力搅拌器搅拌24 h使其完全溶解混合。然后,将溶解的液体均匀地倒在干净的玻璃板上静置24 h,使其挥发成膜。将薄膜置于真空干燥箱中60 °C下干燥24 h后,将薄膜样品

剪碎放入破壁机中搅碎成粒,放入挤出机中混合挤出,并拉伸成细丝的形状,调节螺杆的转速和牵引机的细丝牵引速度,设置为30 r/min,控制直径在1.75 mm,将拉伸的长丝卷绕到滚筒上,使用FDM打印机进行样品的打印。然后,将打印的样品件放在紫外辐照灯中于空气气氛中进行光交联,光照时间分别进行1~5 min。同时为模拟无氧环境,打印完成后,将PA混合厌氧材料零件放置真空气氛炉之中,关闭箱门,利用真空泵获得真空环境,使用真空泵将炉内空气抽出,保护腔内绝对压力 $\leq 51.3$  kPa。充入保护气体,待炉内气压达到绝对压力91.3~101.3 kPa时关闭进气阀门。设置气氛炉保持真空环境时间为24 h,对零件进行厌氧固化处理,结束后通入空气,将其取出。每种条件下,本团队均进行了至少3个平行样品的制备与测试,以确保实验结果的可靠性,最终使用电子万能材料试验机对不同工艺的样品进行力学性能的测试。

## 2 结果与分析

### 2.1 热处理工艺对PA12材料的影响

图1为PA12材料的热重分析图。从图1(a)可以看出,178 °C和422 °C分别对应材料的溶解温度和挥发温度<sup>[11]</sup>。PA12样品从打印到最终成品的完整流程如图1(b)所示。

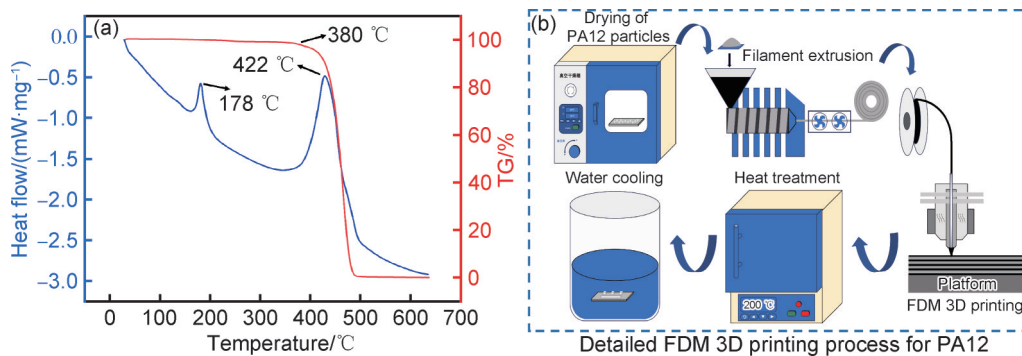


图1 PA12材料的热重分析图

(a)PA12的TG-DSC曲线;(b)基于FDM 3D打印技术打印PA12具体流程图

Fig.1 Thermogravimetric analysis diagram of PA12 material

(a)TG-DSC curves of PA12;(b)detailed process flow diagram for FDM 3D printing of PA12

本团队根据PA12的热重分析设计表1所示的热处理工艺参数。通过电子万能材料试验机对不同热处理工艺的样品进行力学性能测试,其结果如图2所示。可以看出,在热处理温度不同、保温时间相同的情况下,拉伸强度、拉伸模量、断裂伸长率均呈先上升后略微下降的趋势。其中热处理温度为200 °C时,拉

伸强度最大为 $(49.31 \pm 0.82)$  MPa;热处理温度为210 °C时,拉伸模量最大为 $(1479.02 \pm 18.21)$  MPa;热处理温度为210 °C时,保温时间为15 min时,断裂伸长率最大为 $(148.3 \pm 3.5)\%$ 。相较于常温下(25 °C)的拉伸样品,拉伸强度提高了52.4%,拉伸模量提高了26.0%。

表 1 PA12 样品的热处理工艺参数

Table 1 Heat treatment process parameters of PA12 sample

| Serial No. | Temperature/°C | Insulation time/min | Heating rate/(°C·min <sup>-1</sup> ) | Atmosphere | Cooling method |
|------------|----------------|---------------------|--------------------------------------|------------|----------------|
| 1          | 25             |                     |                                      |            |                |
| 2          | 180            | 5, 10, 15           | 5                                    | Air        | Water cooling  |
| 3          | 190            | 5, 10, 15           | 5                                    | Air        | Water cooling  |
| 4          | 200            | 5, 10, 15           | 5                                    | Air        | Water cooling  |
| 5          | 210            | 5, 10, 15           | 5                                    | Air        | Water cooling  |
| 6          | 220            | 5, 10, 15           | 5                                    | Air        | Water cooling  |
| 7          | 230            | 5, 10, 15           | 5                                    | Air        | Water cooling  |

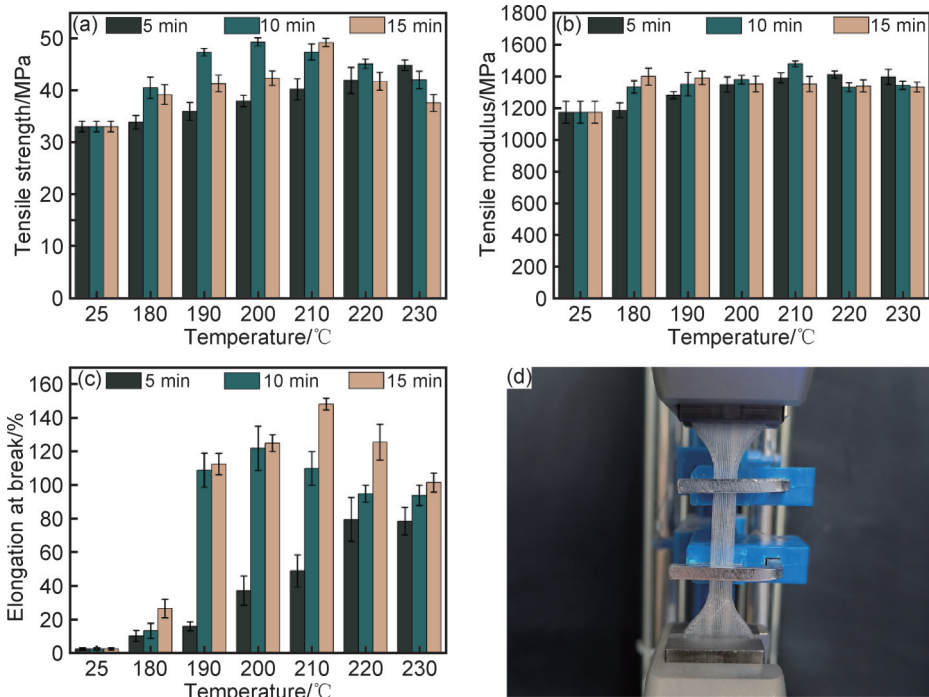


图 2 不同热处理温度、保温时间的 PA12 材料的拉伸性能  
(a) 拉伸强度; (b) 拉伸模量; (c) 断裂伸长率; (d) 拉伸样品

Fig.2 Tensile properties of PA12 materials with different heat treatment temperatures and insulation times  
(a)tensile strength; (b)tensile modulus; (c)elongation at break; (d)tensile sample

当保温时间从 5 min 增加到 10 min 时,样品的性能得到了提升,而当保温时间增加到 15 min 时,样品的拉伸性能有所下降,这是由于在空气下热处理过程中发生热降解<sup>[12]</sup>和热氧化降解,样品表面出现不同程度的老化、发黄的现象,严重影响其使用寿命,导致无法具备 PA12 材料实际的工程应用价值。因此,后续热处理实验过程中保温时间设置为 10 min,有利于提高 PA12 制品的热处理效率。

随后对热处理后的 PA12 样品进行压缩强度的测试。在保持保温时间 10 min 的情况下,改变热处理温度,得到样品的压缩应力-应变曲线如图 3 所示。可以看出,相较于未经过热处理的样品,热处理后样品的压缩性能有较大幅度提升,并且随着热处理温度的增

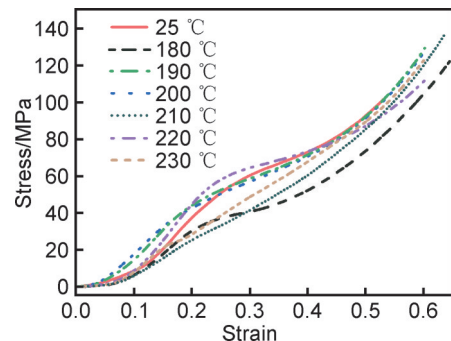


图 3 不同热处理温度下 PA12 材料的压缩应力-应变曲线  
Fig.3 Compressive stress-strain curves of PA12 with different heat treatment temperatures

加,压缩性能呈先增加后下降的趋势。这是由于零件在适当的温度下进行热处理,有助于减少或消除由快

速冷却引起的残余应力,从而提高零件的稳定性和尺寸精度。其次,热处理可以促进丝材内部间结晶的重组和再结晶<sup>[13]</sup>,有助于消除结晶缺陷,加强材料的分子结合,温度越高,为颗粒运动提供的能量越大,颗粒材料完全熔融,烧结件内部大量的孔隙消失,从而改变材料的晶体结构,提高材料的力学性能和耐老化性能,进一步优化材料的耐久性。但过高的温度会导致样品发生热氧化、热降解,使得材料的压缩性能下降。如图3所示,未经过热处理的样品压缩强度为101.61 MPa,而热处理温度为210℃时,样品压缩强度最大为136.63 MPa,相较于未经过热处理的样品压缩强度提高了34.4%。

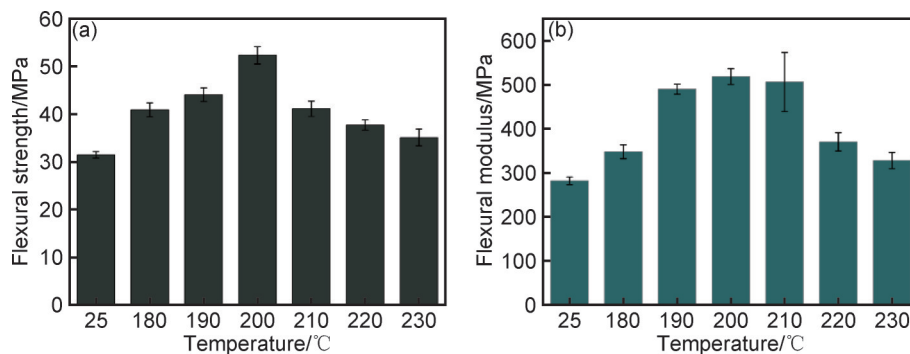


图4 不同热处理温度下PA12材料的性能

(a)弯曲强度;(b)弯曲模量

Fig.4 Flexural strength of PA12 with different heat treatment temperatures

(a)flexural strength;(b)flexural modulus

在相同保温时间、不同热处理温度下PA12样品的光学显微镜图像如图5所示,可以看出,随着热处理温度的提高,样品表面的形貌逐渐改善。这是因为随着热处理温度的升高,样品表面及内部颗粒熔融程度得到提升,在表面张力的作用下填补孔隙;在180℃热处理温度下,相较于未热处理(25℃)样品,其表面丝材逐渐开始熔化,但仍保持较明显的丝态,存在较多孔隙;在190℃热处理温度下,丝材几乎完全熔化在一起,但表面存在一些凹凸的“划痕”,这是因为热处理过程中样品内部空气尚未完全溢出而残留在样品表面;随着热处理温度达到200℃,样品表面空隙逐渐减少,表面质量得到较大提升;在热处理温度达到210℃时,可以看到晶粒粗化和过度生长的晶粒,这也表明过高的热处理温度会降低表面成形质量。由上述测试和表征可知,热处理温度为200℃时,能够有效改善样品表面质量。

图6显示了不同热处理条件下PA12试样的断裂面SEM图像。图6(a)显示了未经热处理的FDM打印PA12试样,其断面清晰展现出层叠结构特征及打印丝材间的界面。局部放大图进一步揭示了大量不

对保温时间为10 min不同热处理温度下的PA12样品进行三点抗弯测试,其结果如图4所示。可以看出,未经过热处理的样品弯曲强度为(31.48±0.67) MPa,弯曲模量为(281.63±8.52) MPa;相较于未经过热处理的样品,热处理后样品的弯曲性能显著提升,并且随着热处理温度的增加,弯曲性能呈先增加后小幅度下降的趋势;其中热处理温度为200℃时,样品弯曲强度最大为(52.31±1.81) MPa,弯曲模量最大为(518.66±18.02) MPa,弯曲强度提高了66.2%,弯曲模量提高了84.2%。表明通过热处理工艺能够有效改善FDM成形烧结件的抗冲击性能。

规则的层间孔隙。这些主要源于FDM工艺中熔融丝材未能完全熔合的固有缺陷,作为应力集中点,显著降低了材料的力学性能。经190℃热处理后,如图6(c)所示,得益于PA12分子链活动性的增强及由此促进的丝材间熔融与扩散,层间孔隙的数量与尺寸均有所减小,界面结合得到改善。当热处理温度升至200℃,如图6(e)所示,材料内部微观结构得到显著优化。如图6(f)所示,丝材间的孔隙几乎完全消除,形成了致密、均一的微观结构,表明打印丝材在此温度下实现了高度的相互熔融。尤为重要的是,断裂面呈现出明显的塑性变形特征,如材料被拉伸后形成的纤维丝和韧窝结构。这标志着材料的断裂模式由相对脆性向韧性转变。这种微观结构的致密化、界面结合的强化以及断裂韧性的提高,共同构成了其宏观力学性能的显著增强。

## 2.2 紫外辐照和厌氧工艺对PA12材料的影响

将干燥后的PA12颗粒与一定质量的光引发剂二苯甲酮(BP)、光交联剂羟甲基丙烷三丙烯酸酯(TMPTA)、抗氧剂1010进行掺杂并通过挤丝机制成丝材,随后通过FDM打印机将丝材制备成测试样品。

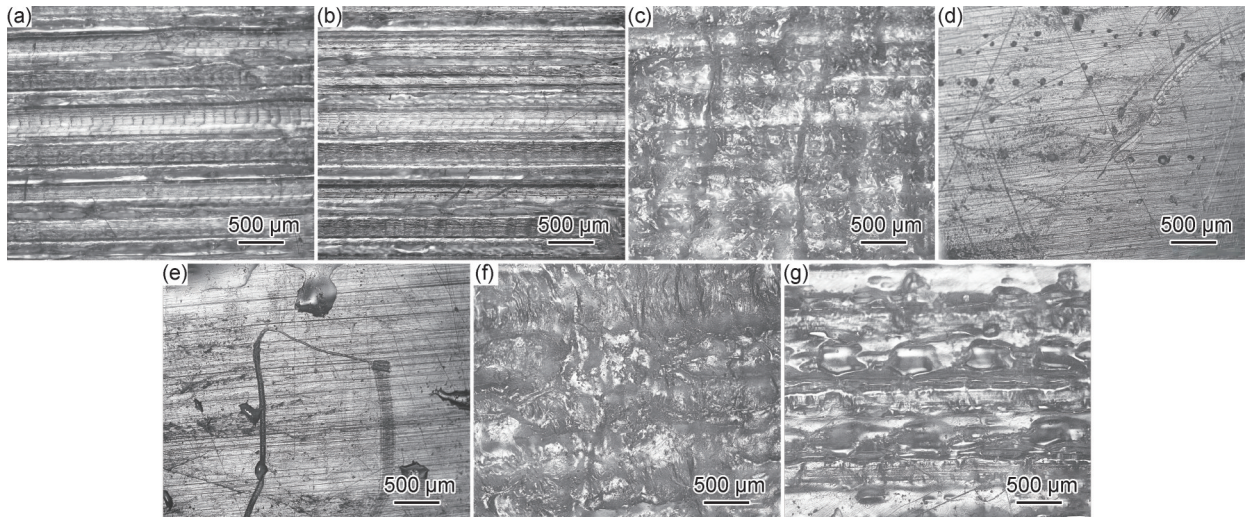


图 5 不同热处理温度下 PA12 的光镜图像

(a) 25 °C; (b) 180 °C; (c) 190 °C; (d) 200 °C; (e) 210 °C; (f) 220 °C; (g) 230 °C

Fig.5 CLSM spectra and optical microscope of PA12 with different heat treatment temperatures

(a) 25 °C; (b) 180 °C; (c) 190 °C; (d) 200 °C; (e) 210 °C; (f) 220 °C; (g) 230 °C

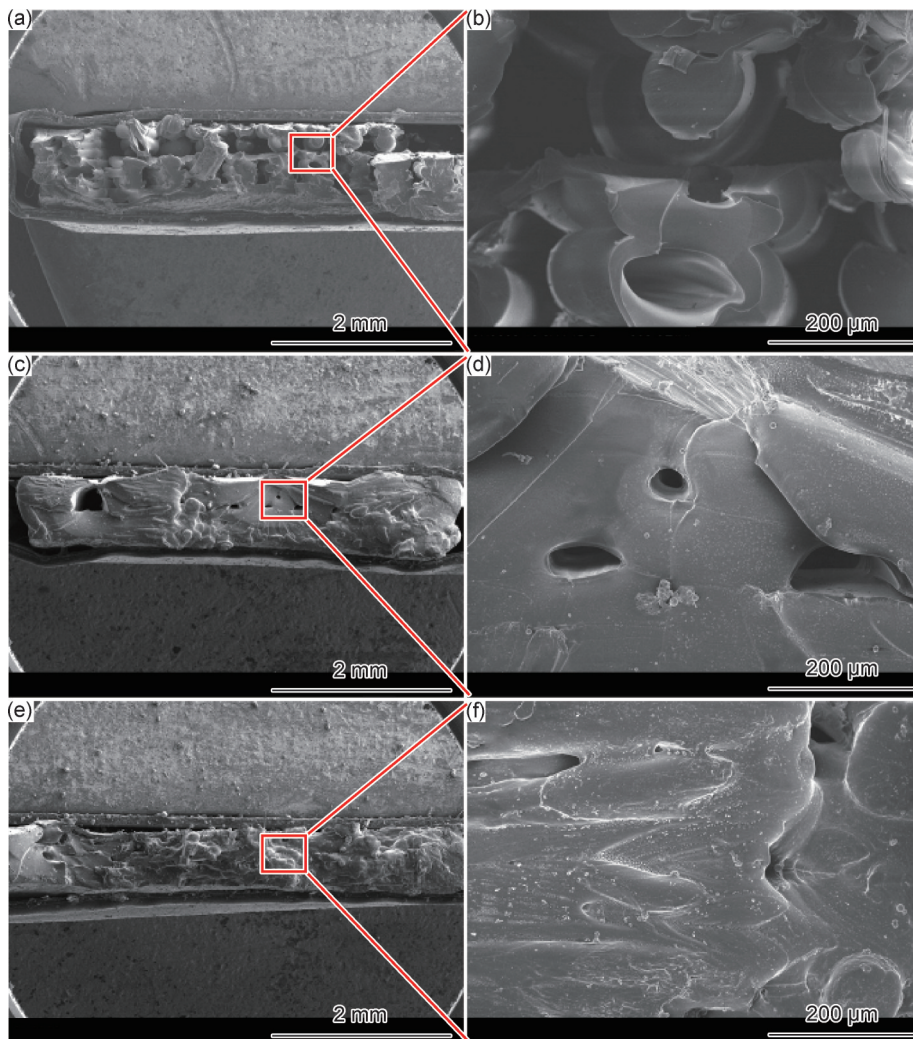


图 6 不同热处理温度下 PA12 的 SEM 图谱

(a), (b) 25 °C; (c), (d) 190 °C; (e), (f) 200 °C

Fig.6 SEM images of PA12 under different heat treatment temperatures

(a), (b) 25 °C; (c), (d) 190 °C; (e), (f) 200 °C

图7(a)所示为固定辐照时间2 min, PA12复合材料样品拉伸强度随不同含量光引发剂BP的变化情况。可以看出,当BP含量为3%(质量分数,下同)时,拉伸强度达到了最大值37.20 MPa,随后增加BP含量,拉伸强度却降低至36.41 MPa。这种情况可以解释为两种原因:(1)光引发剂BP在三重激发态与基态之间发生自猝灭和三重态-三重态猝灭,导致交联反应效率降低;(2)过多的引发剂碎片与聚合物上的活性位点结合,抑制了交联反应的进行<sup>[14-15]</sup>。随后在保证BP含量

为3%和辐照时间相同的条件下,研究不同光交联剂TMPTA<sup>[16-17]</sup>含量对于PA12样品拉伸强度的影响,结果如图7(b)所示。可以看出,当TMPTA含量为4%时,拉伸强度达到相对最大值(38.92±0.30) MPa。相较于常温下(25°C)拉伸试样,拉伸强度提高了17.9%。再继续增加TMPTA含量,强度增长趋势接近平缓。过多光交联剂TMPTA的添加并不能进一步大幅度地提高强度,反而增加了成本的开销,因此确定4%为TMPTA的最佳添加值。

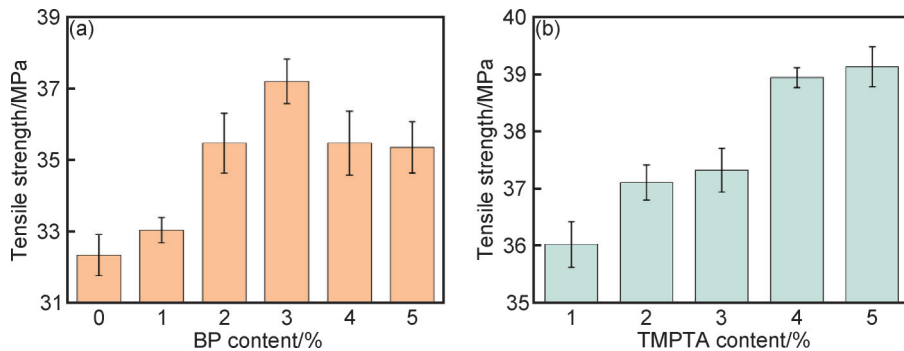


图7 PA12的拉伸强度随BP(a)和TMPTA含量(b)的变化

Fig.7 Variation of tensile strength of PA12 with BP (a) and TMPTA(b) contents

图8展示了BP含量为3%和TMPTA含量为4%时,PA12样品经过不同辐照时间后,样品拉伸强度和断裂伸长率的变化。可以看出,随着辐照时间的增加,PA12样品的拉伸强度逐渐增强,当辐照时间为2 min时,拉伸强度从37.12 MPa增加到了最大值43.63 MPa,提高了17.5%,随后于3 min时出现下降,这种现象是紫外光诱导的交联增强效应与光氧化降解破坏效应之间竞争与平衡的直接体现<sup>[18]</sup>。在辐照初期,交联反应占据主导,通过形成网络结构显著提升了材料的拉伸强度,尽管同时也因分子链运动受限而降低了断裂伸长率。当辐照时间过长,达到3 min时,累积的紫外光能量会导致

PA12发生显著的光氧化降解<sup>[19-20]</sup>,如分子链断裂和氧化,这种降解对材料结构的破坏效应超过了交联所带来的增强效应,从而使得材料的拉伸强度反而下降。

将不同含量的厌氧材料甲基丙烯酸酯(methylmethacrylate, MMA)加入上述所制备的PA12复合材料中,并对其制备的PA12复合材料样品进行拉伸和压缩性能测试<sup>[21-22]</sup>,结果如图9所示。从图9(a)可以看出, MMA的添加对PA12复合材料样品的拉伸强度有显著提高,当MMA的含量为3%时,PA12复合材料样品的拉伸强度增加到最大值47.21 MPa,相较于未加MMA的PA12基体的拉伸强度提高了47.5%。而当MMA含量超过3%时,复合材料的拉伸强度逐渐下降,且挤出的丝材不均,这是由于随着厌氧材料的增多导致MMA难以分散而发生团聚。同时过多的MMA掺杂会增加熔融状态下PA12材料的黏度和黏稠度,使打印过程中的熔融状况不稳定,导致挤出物在打印过程中的流动性下降,从而影响打印形貌的准确性和表面的光滑度,也会导致挤出机的喷嘴受到更大的压力,使挤出速度和压力不均衡,造成挤出机喷头堵塞。从图9(b)可以看出,厌氧材料的添加使材料的压缩强度显著提升。当含量不超过3%时,压缩强度得到逐渐地提升,其中含量为3%时,样品压缩强度最大为117.21 MPa,压缩模量最大为393.72 MPa。可以得

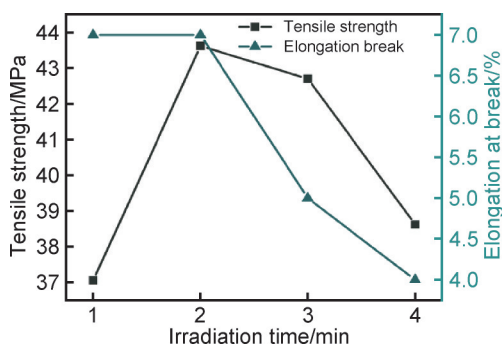


图8 PA12的拉伸强度与断裂伸长率随辐照时间变化

Fig.8 Variation of tensile strength and elongation at break of PA12 with irradiation time

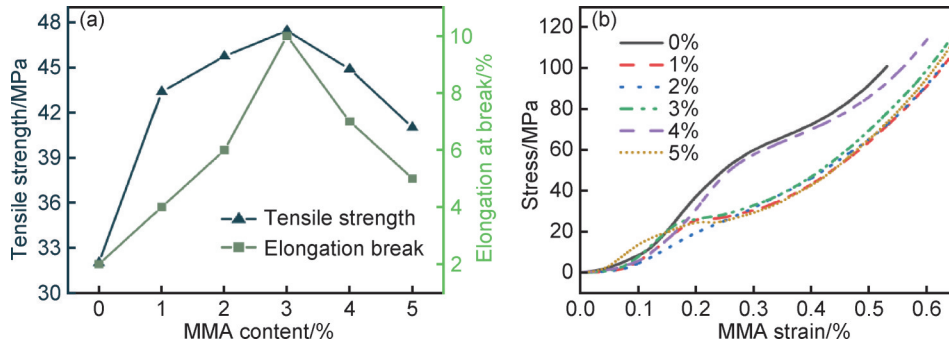


图9 不同MMA含量下PA12的拉伸强度(a)及压缩应力-应变曲线(b)

Fig.9 Tensile strength (a) and compressive stress-strain (b) curves of PA12 with different MMA contents

出,PA12复合材料压缩强度相较于纯PA12压缩强度 101.65 MPa,提高了 15.4%,压缩模量相较于纯PA12 压缩模量 200.84 MPa,提高 96.0%,表明通过厌氧固化能够有效改善FDM成形件的压缩性能,压缩模量 得到较大幅度提升。

图 10 为厌氧材料含量对复合材料弯曲性能的影响。

随着厌氧材料含量的增加,弯曲性能呈先增加后 小幅度下降的趋势,其中当MMA含量为3%时,样品弯曲 强度最大为 45.36 MPa,弯曲模量最大为 450.78 MPa。 由图 4 可知,未添加厌氧材料的纯 PA12 样品弯曲强度 为 31.48 MPa,弯曲模量为 281.63 MPa,弯曲强度提高了 44.1%,弯曲模量提高了 60.1%。

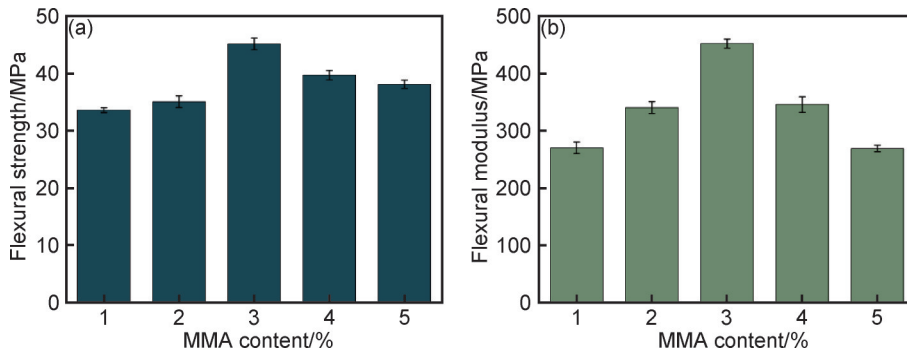


图 10 PA12的抗弯强度随MMA含量变化

(a)弯曲强度;(b)弯曲模量

Fig.10 Flexural strength of PA12 varies with content of MMA content

(a)flexural strength;(b)flexural modulus

图 11 比较了对照组、厌氧固化及紫外辐照处理后 PA12 样品的 FT-IR 光谱。所有样品均展现了 PA12 的典型特征吸收峰:在 3300  $\text{cm}^{-1}$  处的 N—H 的伸缩振动峰,与氢键的强度密切相关,3090  $\text{cm}^{-1}$  处由 N—H 伸缩与酰胺-II 模式的费米共振造成的肩状峰以及分别位于约 1645  $\text{cm}^{-1}$  和 1545  $\text{cm}^{-1}$  的酰胺-I (主要为 C=O 伸缩)与酰胺-II (N—H 弯曲与 C—N 伸缩耦合)特征带<sup>[23-24]</sup>。与对照组相比,经过厌氧固化和紫外辐照处理后,PA12 的主要特征峰强度呈现一致性增强。具体而言,3300  $\text{cm}^{-1}$  (N—H 伸缩)、1645  $\text{cm}^{-1}$  (酰胺-I, C=O 伸缩)及 1545  $\text{cm}^{-1}$  (酰胺-II, N—H 弯曲)处的吸收峰强度均显著升高。这种增强通常与氢键作用的改变有关:氢键的形成或增强会降低相关基团(如 N—H, C=O)的电子云密度,反映在 FT-IR 谱

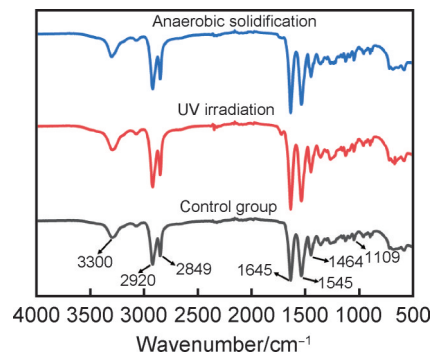


图 11 复合 PA12 综合处理后的红外光谱

Fig.11 FT-IR spectra of composite PA12 after comprehensive treatment

图上即吸收峰强度的增加或峰形的宽化,此现象指示 处理后样品中氢键数量增多,促进了样品结晶完整性的 提升或结晶度的增加。同时,1109  $\text{cm}^{-1}$  附近 C—O

伸缩振动峰的增强也较为明显,进一步暗示了分子间作用力的变化。

### 2.3 深空极端环境对PA12材料的影响

对经过综合后处理的PA12复合材料进行了系统的力学性能测试,如图12所示。拉伸性能方面,处理后PA12样品的拉伸强度显著提升,三个平行样品的测试值分别为54.60、55.14、50.20 MPa,其中最大拉伸强度较纯PA12拉伸强度(31.48 MPa)提高了75.0%。相应的断裂伸长率分别达到139.5%、137.0%和125.1%,显示出良好的延展性。这些结果表明,所采用的综合后处理策略(紫外辐照、厌氧固化及热处理)能够有效克服FDM工艺固有的缺陷,使打印PA12的拉伸性能接近甚至达到传统注塑件的水平。三点弯曲测试结果进一步证实了综合后处理的有效性,如图12(c),(d)所示。处理后PA12样品的弯曲强度分别

为61.12、60.47、62.87 MPa,弯曲模量则分别为582.57、554.83、535.97 MPa。与图4中纯PA12的弯曲强度(31.48 MPa)和弯曲模量(281.63 MPa)相比,处理后PA12的最大弯曲强度和弯曲模量分别提升了94.2%和106.9%。压缩性能测试结果如图12(e)显示,处理后PA12样品在初始阶段表现出线性弹性行为,随后在达到最大压缩应力后发生破坏性断裂。三个平行样品的压缩强度分别为164.84、157.50、163.82 MPa,相较于图9(b)中提到的纯PA12的压缩强度(101.61 MPa)提高了62.2%,表明综合后处理同样有效地增强了材料的抗压能力。综上所述,通过对FDM打印的PA12施加紫外辐照、厌氧固化及热处理的综合后处理,其拉伸、压缩及弯曲等关键力学性能均得到大幅度协同提升,图13为纯PA12样品与综合处理后的PA12复合材料样品的微观形貌对比图。可以看到,纯PA12样品的

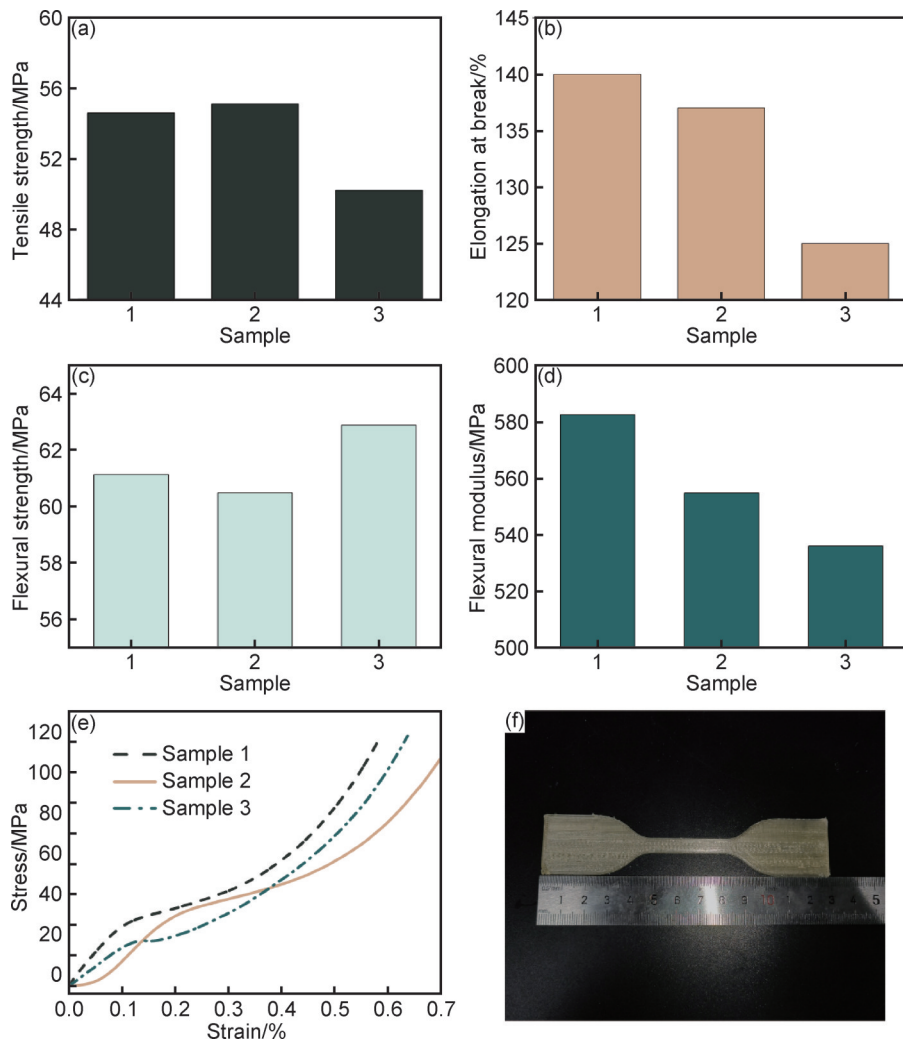


图12 复合PA12综合处理后的力学性能

(a)拉伸强度;(b)断裂伸长率;(c)弯曲强度;(d)弯曲模量;(e)压缩应力-应变曲线;(f)复合PA12经综合处理后的样品宏观照片

Fig.12 Mechanical properties of composite PA12 after comprehensive treatment

(a)tensile strength;(b)elongation at break;(c)flexural strength;(d)flexural modulus;(e)compressive stress-strain curve;

(f)macroscopic photos of sample after comprehensive processing of composite PA12

丝材排列间距较大,丝间结合松散,存在明显的孔隙和间隔,整体结构疏松。而经过紫外辐照、厌氧固化与热处理等多重工艺处理后的复合 PA12 样品,丝材之间结合更加紧密,未观察到明显的脱粘、分层或空隙现象,整体呈现出高度致密的结构。这种结构致密性的提升主要归因于后处理工艺对材料表面能和界面扩散行为的调控,促使丝材在沉积过程中进一步交

错融合,形成连续性更好、密度更高的内聚结构。进一步观察可见,复合 PA12 材料在多种工艺作用下表面形貌明显改善,表面颗粒显著减少,整体趋于平滑均匀,无明显凹凸、裂纹或划痕,表面质量明显优于未处理样品。综合来看,后处理工艺不仅优化了内部结合状态,也有效提升了材料的表面致密性与完整性,为其在结构性要求较高的深空场景中应用提供了基础保障。

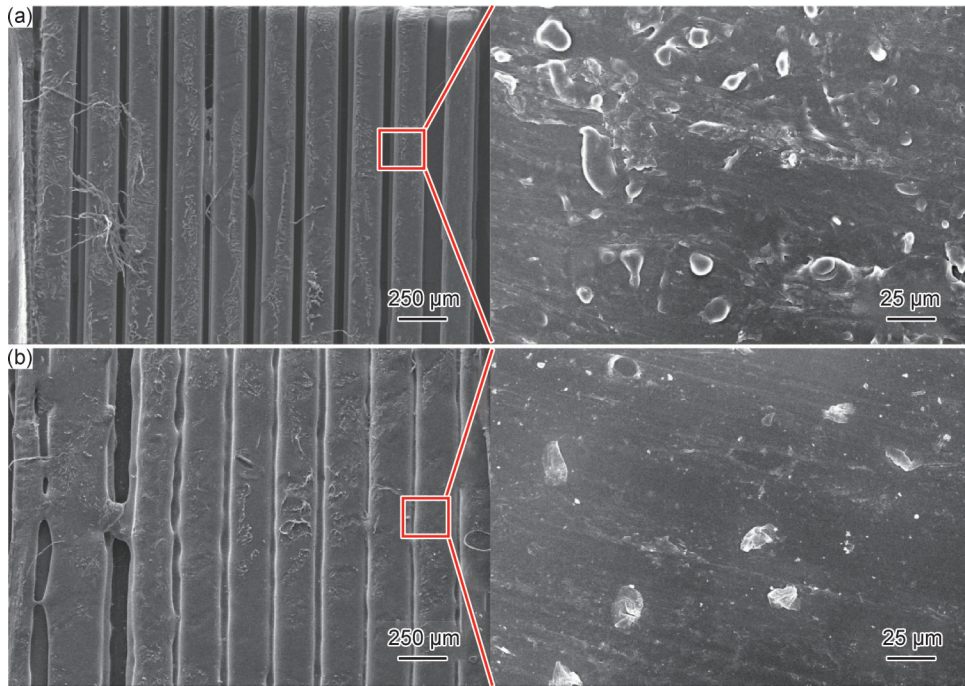


图 13 PA12 样品表面 SEM 图

(a) 纯 PA12 和局部放大图; (b) 综合处理后的复合 PA12 和局部放大图

Fig.13 SEM images of PA12 sample surfaces

(a) neat PA12 and its magnified view; (b) synergistically treated PA12 composite and its magnified view

### 3 结论

(1) 通过热处理工艺能够促进 FDM 成形 PA12 试样颗粒的熔融生长和微观织致密化,消除内部孔隙缺陷;随着温度逐渐升高,力学性能基本呈先上升后下降的趋势。光学显微镜显示随着热处理温度的逐渐升高,试样表面及内部颗粒熔融程度得到提升,温度过低不利于颗粒的熔融生长,温度过高会使 PA12 氧化分解,晶粒粗化和过度生长的晶粒,导致力学性能下降。SEM 断面形貌图像显示出实验过程中分离产生的塑性变形以及断面的孔隙基本消失。确定了最佳热处理温度为 200 °C,最佳保温时间为 10 min,样品的弯曲强度提高了 66.2%,弯曲模量提高了 84.2%,表明通过热处理工艺能够有效改善 FDM 成形烧结件的抗冲击性能。

(2) 当 BP 含量为 3%, TMPTA 含量为 4%, 辐照

时间为 2 min 时, PA12 样品的拉伸强度从 37.12 MPa 增加到了 43.63 MPa, 提高了 17.5%。这是因为紫外辐照可以引发光交联剂的交联反应,形成交联网络结构,使材料表面变得更加致密。

(3) MMA 的最佳含量为 3% 时, PA12 复合材料样品的拉伸强度达到最大值 47.21 MPa, 提高了 43.0%, 压缩强度达到 117.21 MPa, 相较于纯 PA12 样品提高了 15.4%。表明适当的厌氧材料的加入可以填充 FDM 打印 PA12 颗粒间的空隙,提高材料的密实性和均匀性。这有助于减少拉伸件中的孔隙和缺陷,并提高其整体强度和稳定性。

(4) 通过紫外辐照、厌氧固化和热处理的多重后处理手段对样品进行协同调控,其力学性能得到了显著提升,并与注塑件的性能相一致。结合 SEM 显微结构分析,从丝材结合紧密程度、孔隙度与表面形貌等微观角度,阐明了后处理工艺通过提升结构致密性与

表面完整性实现力学性能增强的内在机理,从而验证了基于多重后处理调控进行材料改性的有效性。

(5)为进一步推进PA12在深空极端环境中的应用,以下方面需要做进一步的研究:开展不同增强相或抗辐射添加剂对PA12复合材料的力学性能与微观组织形貌影响关系的研究;开展基于深空极端环境的PA12复杂构型特征力学性能调控研究。

### 参考文献

- [1] 王敏,时云,杨天豪,等.空间在轨3D打印进展及关键问题分析[J].航天制造技术,2021(3):62-65.  
WANG M, SHI Y, YANG T H, et al. Present situation of the technology development of American in-orbit manufacturing and its enlightenment [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2021 (3): 62-65.
- [2] PRATER T, BEAN Q, WERKHEISER N, et al. 3D printing in Zero G technology demonstration mission: summary of on-orbit operations, material testing and future work [C]//AIAA Young Professional Symposium. Reston, VA, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [3] SNYDER M, DUNN J, GONZALEZ E. The effects of microgravity on extrusion based additive manufacturing [C]//AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition. San Diego: AIAA, 2013.
- [4] PETOUSIS M, VIDAKIS N, MOUNTAKIS N, et al. Three-dimensional printed polyamide 12 (PA12) and polylactic acid (PLA) alumina ( $Al_2O_3$ ) nanocomposites with significantly enhanced tensile, flexural, and impact properties [J]. Nanomaterials, 2022, 12(23):4292.
- [5] PETOUSIS M, MOUTSOPOULOU A, KORLOS A, et al. The effect of nano zirconium dioxide ( $ZrO_2$ )-optimized content in polyamide 12 (PA12) and polylactic acid (PLA) matrices on their thermomechanical response in 3D printing [J]. Nanomaterials, 2023, 13(13):1906.
- [6] 祝军. 厌氧胶环保固化体系的研究 [C]//第二届长三角胶业精英论坛暨浙江省粘接技术协会第九次会员代表大会论文集. 杭州: 浙江省粘接技术协会, 2018:110-117.  
ZHU J. Research on the environmentally friendly curing system of anaerobic adhesives [C]//Proceedings of the Second Yangtze River Delta Adhesive Industry Elite Forum and the 9th Member Representative Conference of Zhejiang Adhesive Technology Association. Hangzhou: Zhejiang Province Adhesive Technology Association, 2018: 110-117.
- [7] 廖佩姿,吴迪. 厌氧胶专利技术综述 [J]. 河南科技, 2021, 40(35): 146-148.  
LIAO P Z, WU D. Review on patent technology of anaerobic adhesive [J]. Henan Science and Technology, 2021, 40(35): 146-148.
- [8] 华林林. 尼龙6的紫外光交联及其阻燃材料的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.  
HUA L L. Studies on photo-crosslinking of PA6 and its flame retardant materials [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [9] SENGUPTA R, TIKKU V K, SOMANI A K, et al. Electron beam irradiated polyamide-6, 6 films: I : characterization by wide angle X-ray scattering and infrared spectroscopy [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2005, 72(5):625-633.
- [10] GUPTA S K, SINGH P, KUMAR R. PALS and physico-chemical study of swift heavy ions and gamma radiation irradiated polyamide nylon 66 polymer [J]. Vacuum, 2015, 121:177-186.
- [11] TSIOPSTIAS C. On the latent limit of detection of thermogravimetric analysis [J]. Measurement, 2022, 204:112136.
- [12] BERNARD S, YOUINOU L, GILLARD P. MIE determination and thermal degradation study of PA12 polymer powder used for laser sintering [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(6):1493-1500.
- [13] PAOLUCCI F, VAN MOOK M J H, GOVAERT L E, et al. Influence of post-condensation on the crystallization kinetics of PA12: from virgin to reused powder [J]. Polymer, 2019, 175:161-170.
- [14] WANG S Y, LIU H, PAN Y Q, et al. Performance enhancement of silver nanowire-based transparent electrodes by ultraviolet irradiation [J]. Nanomaterials, 2022, 12(17):2956.
- [15] XIE H, HU L H, SHI W F. Synthesis and photoinitiating activity study of polymeric photoinitiators bearing BP moiety based on hyperbranched poly (ester-amine) *via* thiol-ene click reaction [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 123(3):1494-1501.
- [16] PAOLETTI L, FERRIGNO G, ZORATTO N, et al. Reinforcement of dextran methacrylate-based hydrogel, semi-IPN, and IPN with multivalent crosslinkers [J]. Gels, 2024, 10(12):773.
- [17] WANG W Z. Photocrosslinking of an ethylene-propylene-diene terpolymer and the characterization of its structure and mechanical properties [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 93(4):1837-1845.
- [18] BEHR M, FUERST J, ROSENTRITT M. The error of tensile strength tests and an approach for improvement [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2018, 87:138-142.
- [19] ZWEIFEL H. Degradation of polymers by photooxidation [J]. Chimia, 1993, 47(10):390.
- [20] MICHELAS M, WIMBERGER L, BOYER C. A general approach for photo-oxidative degradation of various polymers [J]. Macromolecular Rapid Communications, 2024, 45(20):2400358.
- [21] HAO W F, LIU Y, WANG T, et al. Failure analysis of 3D printed glass fiber/PA12 composite lattice structures using DIC [J]. Composite Structures, 2019, 225:111192.
- [22] NASIM M, GALVANETTO U. Mechanical characterisation of additively manufactured PA12 lattice structures under quasi-static compression [J]. Materials Today Communications, 2021, 29:102902.
- [23] TONTOWI A E, CHILDS T H C. Density prediction of crystalline polymer sintered parts at various powder bed temperatures [J]. Rapid Prototyping Journal, 2001, 7(3):180-184.
- [24] CHILDS T C, TONTOWI A E. Selective laser sintering of a crystalline and a glass-filled crystalline polymer: experiments and simulations [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2001, 215(11):1481-1495.

基金项目:人因工程重点实验室基金(HFNKL2023WW09)

收稿日期:2025-04-29;录用日期:2025-05-23

通讯作者:曾勇(1987—),男,研究员,博士,主要研究方向为3D打印,联系地址:北京市朝阳区南磨房路平乐园100号北京工业大学理科楼M407(100124),E-mail:watnd@163.com

(本文责编:齐书涵)