

# 基于正交试验优化激光烧结尼龙制件表面平滑工艺

高唯<sup>1,2,3</sup>, 邓正东<sup>1,2,3</sup>, 金叶<sup>1,2,3</sup>, 吴健<sup>1,3\*</sup>

(1. 贵州省冶金化工研究所, 贵州 贵阳 550016; 2. 贵州森远增材制造科技有限公司, 贵州 贵阳 550016;  
3. 贵州省高分子增材制造工程研究中心, 贵州 贵阳 550016)

**摘要:** 蒸气表面平滑处理作为提高激光烧结尼龙制件表面质量的重要手段, 其工艺参数对制件表面质量及性能具有较大影响。文章研究溶剂量、溶剂体积分数、处理温度和处理时间对尼龙制件表面粗糙度的影响, 采用正交试验法优化表面平滑处理工艺参数, 对结果进行正交试验极差分析、方差分析及工艺验证。最后得出溶剂量 9 mL、溶剂体积分数 95%、处理温度 60 °C、处理时间 10 min 为最佳处理工艺参数。在该工艺参数条件下进行蒸气表面平滑处理可有效提高制件表面质量、力学性能及防水性能, 拓宽 3D 打印尼龙制件的应用领域。

**关键词:** 表面粗糙度; 表面平滑; 表面质量; 力学性能

中图分类号: TQ320.67

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0145-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.026

## Optimization of Surface Smoothing Process for Nylon Parts Fabricated by Laser Sintering Based on Orthogonal Tests

GAO Wei<sup>1,2,3</sup>, DENG Zhengdong<sup>1,2,3</sup>, JIN Ye<sup>1,2,3</sup>, WU Jian<sup>1,3\*</sup>

(1. Guizhou Institute of Metallurgy and Chemical Industry, Guiyang 550016, China; 2. Guizhou Senyuan Additive Manufacturing Technology Co., Ltd., Guiyang 550016, China; 3. Guizhou Province Polymer Additive Manufacturing Engineering Research Center, Guiyang 550016, China)

**Abstract:** Steam surface smoothing treatment, as an important method for enhancing the surface quality of laser-sintered nylon parts, exhibited significant influence on the surface quality and performance of the components through its process parameters. In the article, the effects of solvent volume, solvent volume fraction, treatment temperature, and treatment time on the surface roughness of nylon parts were investigated. The orthogonal test method was employed to optimize the parameters of the surface smoothing process. The results were analyzed using orthogonal test range analysis, variance analysis, and process validation. Finally, the optimal process parameters were determined as follows: Solvent volume of 9 mL, steam solvent volume fraction of 95%, treatment temperature of 60 °C, and treatment time of 10 min. Under these process parameters, surface smoothing treatment can effectively improve the surface quality, mechanical properties, and waterproof performance of the manufactured parts, thereby broadening the application areas of 3D-printed nylon parts.

**Keywords:** Surface roughness; Surface smoothness; Surface quality; Mechanical properties

选择性激光烧结(SLS)是3D打印技术的一种, 该技术不需要支撑结构, 材料利用率高, 通过激光逐层烧结聚合物粉末材料, 如尼龙(PA)等材料来制造复杂几何形状的制件, 被广泛应用于航空航天、医疗、汽车及消费品等领

域<sup>[1-3]</sup>。然而, SLS技术受其工艺原理限制, 制件表面普遍存在粗糙问题, 这一缺陷限制其在高精度、高表面质量场景中的应用。尼龙材料在进行选择性激光烧结时, 粉末颗粒间存在未完全熔融或黏结不充分的现象, 导致表面存在

收稿日期 Submitted date 2025-03-29; 修回日期 Revised date 2025-04-22; 录用日期 Accepted date 2025-05-23

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合服企[2022]006); 贵州科学院青年科学基金项目(黔科院J字[2024]2号、黔科院J字[2024]4号、黔科院J字[2024]7号)

\*联系人, 348952876@qq.com

引用本文: 高唯, 邓正东, 金叶, 等. 基于正交试验优化激光烧结尼龙制件表面平滑工艺[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 145-150.

Citation: GAO W, DENG Z D, JIN Y, et al. Optimization of surface smoothing process for nylon parts fabricated by laser sintering based on orthogonal tests[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 145-150.

微小孔洞和凸起,进一步加剧表面粗糙度( $R_a$ )<sup>[4-6]</sup>。此外,SLS打印过程中粉末床的热应力和冷却收缩也会导致表面质量下降<sup>[7]</sup>。为了改善SLS制件的表面粗糙度,研究人员提出多种后处理技术,其中蒸气平滑处理技术因其操作简便、效果显著而备受关注<sup>[8-9]</sup>。该技术将制件暴露在化学溶剂蒸气中,使制件表面材料发生微溶解并重新流动,填充微观孔隙、平滑阶梯效应,从而提升表面光洁度。蒸气平滑技术不仅可以改善制件的外观和触感,还可增强其机械性能和耐久性,拓宽SLS技术的应用领域<sup>[10-11]</sup>。

本研究设计正交试验,考察表面处理工艺参数对尼龙制件表面质量的影响,优化其工艺参数,达到表面抚平的效果和内部缩紧的状态。基于高分子材料的相似相溶原理,聚合物高分子与溶剂分子间的尺寸差异<sup>[12]</sup>,在表面张力的作用下,分析PA类高分子与溶剂分子间的溶解和扩散实质,揭示化学溶剂蒸气在激光烧结尼龙制件表面的溶解路径及过程。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

尼龙12(PA12),粉末,湖南华曙高科技股份有限公司;无水乙醇( $C_2H_5OH$ ),分析纯,重庆川东化工(集团)有限公司;表面平滑处理剂,smooth-GKSY,贵州森远增材制造科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

光学显微镜(OM),XSP-2CA,上海光学仪器五厂有限公司;扫描电子显微镜(SEM),ZEISS Gemini 300,德国蔡司公司;激光选区烧结设备,SS403,湖南华曙高科技股份有限公司;微机控制电子万能材料试验机,CTM8010,协强仪器制造(上海)有限公司;表面粗糙度仪,TIME3223,北京时代之峰科技有限公司;悬臂梁冲击试验机,三思ZBC1400-X,上海三思实验仪器有限公司;游标卡尺,PD-151,上海宝工工具有限公司。

### 1.3 样品制备

#### 1.3.1 SLS工艺成型制件

采用SLS制作PA12样条和成型制件。成形工艺:预热温度为167℃,激光功率为80W,扫描速度为14.2m/s,铺粉厚度为0.15mm。样条尺寸参照GB/T 1040.2—2022,图1为PA12样条尺寸。

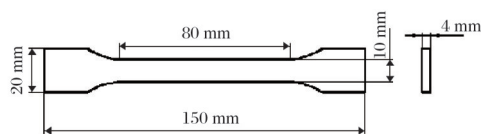


图1 PA12样条尺寸

Fig.1 Size of PA12 splines

#### 1.3.2 蒸气表面平滑处理

先将3D打印制件悬挂至反应腔室内,保持腔室密闭,抽真空,将反应腔室预热,保持10min。同时,在溶剂蒸气

发生器中,加热平滑处理剂至沸点,使其形成溶剂蒸气,通入反应腔室内,使反应腔室完全充满溶剂蒸气,反应结束,在90℃下继续保持30min,直至制件烘干,冷却至室温,得到高表面质量3D打印制件。其中,平滑处理剂沸点为75℃;以无水乙醇作为稀释剂,配制不同体积分数的溶剂。

#### 1.3.3 正交试验设计

以溶剂量(A)、溶剂体积分数(B)、处理温度(C)、处理时间(D)等4个因素设计 $L_9(3^4)$ 正交试验,考察各因素对表面平滑处理制件表面粗糙度的影响。表1为 $L_9(3^4)$ 正交试验因素水平设计。

表1  $L_9(3^4)$ 正交试验因素水平设计

Tab.1 Factor and level design of  $L_9(3^4)$  orthogonal test

水平	A/mL	B/%	C/°C	D/min
1	3	90	55	5
2	6	95	60	10
3	9	100	65	15

#### 1.4 性能测试与表征

表面形貌测试:采用光学显微镜在20倍条件下观察制件宏观表面形貌;采用扫描电子显微镜在100倍条件下对处理前后PA12样条微观表面形貌进行观察。

$R_a$ 测试:参照GB/T 1031—2009,采用表面粗糙度仪测试平滑处理前后PA12样条的 $R_a$ ,以表征制件表面质量。

力学性能测试:参照GB/T 1040.2—2022,采用微机控制电子万能材料试验机对PA12样条进行拉伸强度、拉伸模量、断裂伸长率测试,试验速度为(20±2)mm/min。参照GB/T 1843—2008,采用悬臂梁冲击试验机对平滑处理前后的PA12样条的冲击性能进行测试。

尺寸精度测试:尺寸误差 $\leq \pm 0.15$ mm,在表面平滑处理前后,采用游标卡尺分别测量沿X、Y、Z3个主轴方向打印样条(每组 $n=3$ )的宽度与厚度,每个样条上等间距选取3个截面的宽度、厚度进行测量,结果取平均值。

吸水性测试:制件吸水质量变化,对表面面积为94cm<sup>2</sup>的3D打印样品表面平滑处理前后进行防水性能测试,在240min内,分别取13个时间点(分别为0、2、4、6、8、10、20、30、40、50、60、120、240min)记录样品吸水质量,以检验表面平滑处理后3D打印零部件的防渗漏性,表征其疏水性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 正交试验

设计正交试验,对PA12标准样条采用9组不同的表面平滑工艺进行后处理,测试样条粗糙度变化程度。表2为 $L_9(3^4)$ 正交试验结果。

根据极差分析<sup>[13]</sup>,各因素对制件表面粗糙度影响的顺序为: $A>B>D>C$ ,即主要影响因素是溶剂量,其次是溶剂体积分数、处理时间、处理温度。对于溶剂量来说, $k_3$ 最大,粗糙度变化程度最大,为75.3%。这说明溶剂量越大,

越有利于降低PA12标准样条的 $R_a$ ,表面光洁度提高,表面质量随之提高。因此,溶剂量 $A_3$ 最佳,取9 mL。对于溶剂体积分数来说, $k_2$ 和 $k_3$ 的粗糙度变化程度接近,分别为59.5%和60.3%。就经济成本以及处理效果而言,较高的溶剂体积分数并不利于PA12样条表面质量的提升。故在粗糙度变化程度相差不大的情况下,溶剂体积分数 $B_2$ 为最佳,取95%。对于处理温度来说,整个后处理环境处于真空状态下,混合溶剂的沸点会相应降低,而过低或过高的处理温度对PA12样条表面粗糙度变化程度较为相似,表面质量的提升相差不大。所以,处理温度 $C_2$ 为最佳,取60℃。对于处理时间来说,处理时间为10 min时粗糙度变化程度最大,而 $k_1=48.1\%$ , $k_3=49.6\%$ ,相差不大,处理时间过短,PA12样条处理不够充分,处理时过长,可能会导致PA12样条表面出现“流挂”“溶胀”现象,最终破坏PA12样条本身结构。因此,处理时间 $D_2$ 为最佳,取10 min。

表2  $L_9(3^4)$ 正交试验结果Tab.2 Results of  $L_9(3^4)$  orthogonal test

实验号	A	B	C	D	粗糙度变化程度/%
1	1	1	1	1	2.5
2	1	2	2	2	38.9
3	1	3	3	3	30.2
4	2	1	2	3	37.5
5	2	2	3	1	58.5
6	2	3	1	2	67.3
7	3	1	3	2	61.5
8	3	2	1	3	81.1
9	3	3	2	1	83.3
$k_1$	23.9	33.8	50.3	48.1	
$k_2$	54.4	59.5	53.2	55.9	
$k_3$	75.3	60.3	50.1	49.6	
R	51.4	26.5	3.1	7.8	

$A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  4个因素平方和分别为4 014.50、1 358.62、18.62、102.78,误差平方和为0.16,误差自由度为0,无法直接计算 $F$ 值,需合并最不显著的平方和到误差平方和中,由于因素 $C$ 平方和最小,因此,新误差平方和为18.76,新误差自由度为2。表3为矫正后正交试验方差分析。

表3 矫正后正交试验方差分析

Tab.3 Analysis of variance in orthogonal test after correction

方差来源	平方和	自由度	均方	$F$ 值
A	4 014.50	2	2 007.25	213.99
B	1 358.62	2	679.31	72.42
D	102.78	2	51.39	5.48
误差	18.76	2	9.38	
总计	5 494.66	8		

结合方差分析,并查 $F$ 值分布表,临界值 $F_{0.05}(2,2)=19.0^{[4]}$ ,因素 $D$ 的 $F$ 值小于19.0,对于本实验来说影响较小。而因素 $A$ 和因素 $B$ 的 $F$ 值远大于临界值,表明在 $\alpha=0.05$ 水平下,因素 $A$ 和因素 $B$ 对实验结果有极显著影响,即溶剂量及溶剂体积分数对制件表面平滑处理效果极为显著,与极差分析结果相印证。虽然9次实验中 $A_3B_2C_2D_1$ 工艺最好,粗糙度变化程度最大,降低83.3%,但处理时间过短,并不利于PA12标准样条表面质量的提升。虽然较高的溶剂体积分数会促进制件表面反应,但也增加PA12样条“过处理,发生溶胀”的风险。因此,优选出试验组合为 $A_3B_2C_2D_2$ ,并对此工艺组合进行验证。

## 2.2 工艺验证

### 2.2.1 粗糙度

采用 $A_3B_2C_2D_2$ 工艺参数组合对 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  3个方向打印的PA12样条进行表面平滑处理,对处理前后粗糙度进行测试。图2为不同打印方向PA12样条表面平滑处理前后的粗糙度。从图2可以看出, $X$ 方向处理前为13.75  $\mu\text{m}$ ,处理后为3.53  $\mu\text{m}$ ,粗糙度下降74%; $Y$ 方向处理前为12.56  $\mu\text{m}$ ,处理后为3.18  $\mu\text{m}$ ,粗糙度下降75%; $Z$ 方向处理前为17.39  $\mu\text{m}$ ,处理后为5.27  $\mu\text{m}$ ,粗糙度下降70%。结果表明, $A_3B_2C_2D_2$ 工艺参数组合对PA12样条表面平滑处理有效,且制件外观良好、无损(破坏),表面光洁度得到大幅提高。

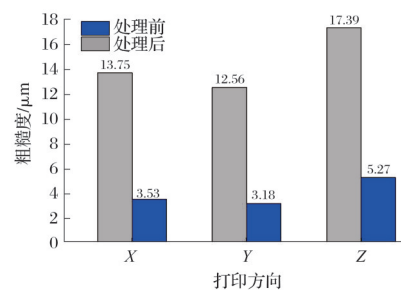


图2 不同打印方向PA12样条表面平滑处理前后的粗糙度

Fig.2 Roughness of PA12 splines before and after surface smoothing treatment in different printing directions

### 2.2.2 力学性能

采用 $A_3B_2C_2D_2$ 工艺参数组合对 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  3个方向打印的PA12样条进行力学性能测试。每个方向的标准样条分别进行5次平行测试,分别对3个方向样条的断裂伸长率、拉伸强度和拉伸模量取平均值。图3为不同打印方向PA12样条表面平滑处理前后的力学性能。从图3可以看出, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 方向的PA12样条断裂伸长率分别提升44.3%、102.7%和117.0%,拉伸强度分别提升8.6%、7.7%和36.8%,拉伸模量分别提升8.5%、4.1%和21.2%。其中,断裂伸长率提升最为明显,断裂伸长率越大,表示材料的延展性越好,即材料在受力时能够产生较大的变形而不断裂,意味着材料的柔软性能和弹性性能更好<sup>[15]</sup>,可改善因断裂伸长率较小而引起的易脆断问题。

综合来说, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  3个方向的PA12样条, $Z$ 方向的断裂

伸长率、拉伸强度、拉伸模量提升最为明显,极大地改善Z方向存在的打印工艺固有缺陷<sup>[16]</sup>,减少表面孔隙,表面质量得以提升。

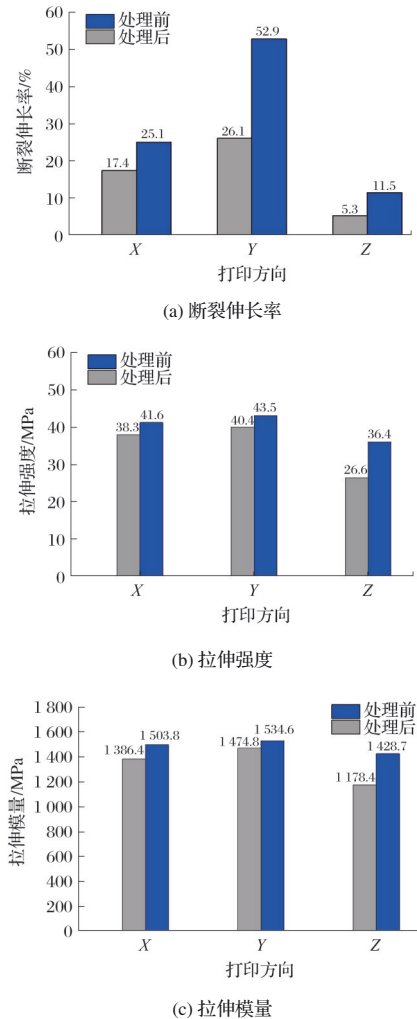


图3 不同打印方向PA12样条表面平滑处理前后的力学性能  
Fig.3 Mechanical properties of PA12 splines before and after surface smoothing treatment in different printing directions

### 2.3 表面质量

图4为PA12样条表面平滑处理前后对比。从图4可以看出,表面平滑处理工艺能够有效提升零部件表面的光洁度。采用显微镜观察处理前后的PA12样条表面,经表面平滑处理后,表面微观的凹凸部分被“抚平”, $R_a$ 可由17.36  $\mu\text{m}$ 降低至5.15  $\mu\text{m}$ 。为了进一步分析PA12样条表面,采用扫描电子显微镜对处理前后表面进行观察发现:未处理前,PA12样条存在较多未烧结成型的粉末颗粒;处理后,表面粉末大颗粒被溶解流平,表面更加平整,大幅提升PA12样条表面质量。平滑处理剂与尼龙类高分子材料溶解度接近,高分子材料表层发生溶解,高分子聚合物链之间的次级键被破坏,形成流动态,流至更稳定的位置<sup>[17]</sup>。微观上,制件表面存在部分残留溶剂,真空抽除后制件表面会存在部分坑洞。

为进一步验证表面质量对力学性能的影响,对不同批

次同类型PA12样条进行表面平滑处理,并对其进行力学性能测试。表4为PA12样条的力学性能。从表4可以看出,PA12样条未处理前断裂伸长率、拉伸强度、拉伸模量分别为7%、36 MPa和1 404 MPa;处理后3组样条的断裂伸长率分别为19%、17%和16%,拉伸强度分别为39、42、40 MPa,拉伸模量分别为1 496、1 395、1 390 MPa。结果表明:表面平滑处理后样品拉伸强度没有损失,且略有增加,样条的断裂伸长率显著增加,而拉伸模量略有降低。断裂伸长率的增加,表明表面孔隙减少,聚合物表面上裂纹起始位点的减少,使力学性能增强,同时提升材料的耐久性和可靠性<sup>[18]</sup>。因此,可以通过调节表面平滑处理工艺参数来实现SLS成型件表面不同的光滑程度以及所需要的力学性能。

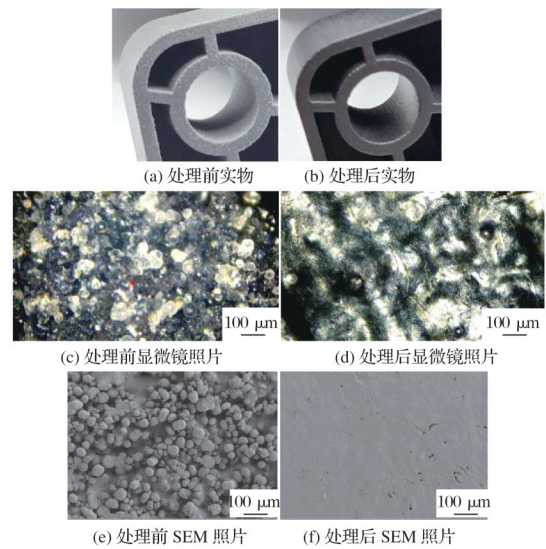


图4 PA12样条表面平滑处理前后对比  
Fig.4 Comparison of PA12 splines before and after surface smoothing treatment

表4 PA12样条的力学性能

样品	断裂伸长率/%	拉伸强度/MPa	拉伸模量/MPa
PA12(未处理)	7	36	1 404
PA12(处理1)	19	39	1 496
PA12(处理2)	17	42	1 395
PA12(处理3)	16	40	1 390

### 2.4 冲击性能

3D打印工艺为分层制造,层与层之间的结合可能不够紧密,导致制件表面较为粗糙或有微裂纹,成为应力集中点,导致冲击性能较低<sup>[19]</sup>。因此,随机取5组PA12样条进行表面平滑处理。图5为PA12样条表面平滑处理前后的冲击强度。从图5可以看出,5组样条处理前的冲击强度分别为4.72、4.53、4.54、4.59、4.55  $\text{kJ/m}^2$ ;处理后的冲击强度分别为7.17、6.77、6.18、6.72、6.70  $\text{kJ/m}^2$ ,5组样条的冲击强度分别提高52%、49%、36%、46%、47%。结果表

明:化学表面平滑后处理可使层间分子链重新排列并形成更强的结合<sup>[20]</sup>,减少层间缺陷,提高表面质量,从而提高韧性。经过表面平滑处理的PA12样条,其冲击性能可提高30%~50%,更适合用于承受动态载荷或冲击的场合。

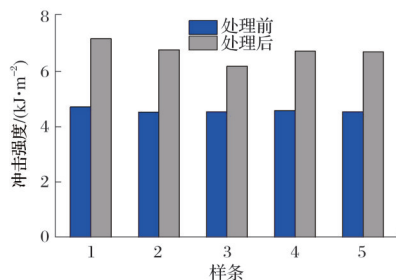


图5 PA12样条表面平滑处理前后的冲击强度  
Fig.5 Impact strength of PA12 splines before and after surface smoothing treatment

## 2.5 尺寸精度

抽取相同工艺参数下5组PA12样条,进行表面平滑处理,对3D打印样条处理前后的宽度及厚度进行测量。图6为PA12样条表面平滑处理前后的尺寸。从图6可以看出,尺寸变化均小于0.4%。每组样品表面无明显变化趋势,这种可忽略不计的尺寸变化使零件公差和精度特征细节得以保留。

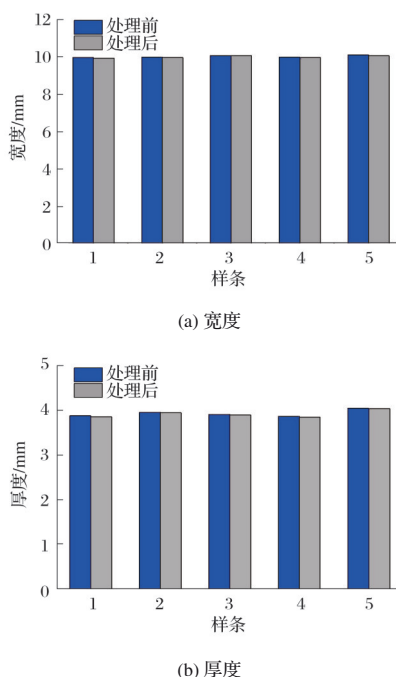


图6 PA12样条表面平滑处理前后的尺寸  
Fig.6 Dimension of PA12 splines before and after surface smoothing treatment

## 2.6 防水性

为考察处理前后PA12样条的吸水性,记录PA12样条在水中浸泡一定时间后的质量,以此判断其防水性。图7为PA12样条表面平滑处理前后防水性。从图7可以看出,

随着浸泡时间的增加,未处理的PA12样条质量在不断增加,240 min后,其总质量为36.8 g,共增加4.4 g;而处理后的PA12样条其质量几乎无明显变化。结果表明:水倾向于粘在未处理样品的表面,这导致高表面积零件的质量增加。经过处理后的样品表面,水珠独立分布,此时的样品表面具有一定的疏水性<sup>[21]</sup>,说明处理后的样品具有较好的防水性。

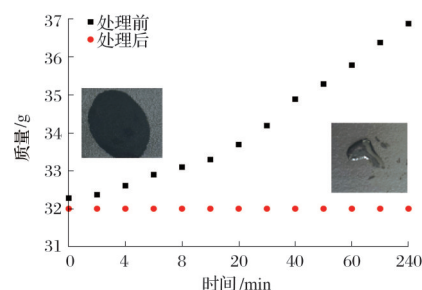


图7 PA12样条表面平滑处理前后防水性  
Fig.7 Waterproof performance of PA12 splines before and after surface smoothing treatment

## 2.7 表面平滑机理

3D打印技术在逐层叠加时存在固有工艺缺陷,PA表面存在部分未烧结的粉末,导致3D打印制件存在表面粗糙、性能较差等问题。表面平滑处理通过溶剂蒸气在真空状态下均匀分布,并覆盖3D打印成型件暴露表面,溶剂蒸气与制件表面会存在一定温度差,溶剂蒸气与3D打印制件表面接触,蒸气会以气液两种形式存在,促使制件表面发生微溶解。制件表面微观凸起和凹下部位受表面张力的影响,溶解速率不一致<sup>[22-23]</sup>,其中表面微观凸起的部位优先溶解,且溶解速率大于凹下部位。由于高分子与溶剂分子的尺寸相差悬殊,两者的分子运动差别较大,溶剂分子能够较快地渗透进入凸起部分的高聚物,而高分子向溶剂的扩散非常慢。此时,凸起的高聚物的溶解过程会经过两个阶段:先是溶剂分子渗入高聚物内部,使高聚物体积膨胀,即“溶胀”;然后高分子均匀分散在溶剂小液滴中,溶剂分子对溶质分子相互产生作用力,此作用力大于高分子间分子的内聚力,形成完全溶解的分子分散的均匀体系<sup>[24]</sup>。

图8为表面平滑处理路径。从图8可以看出,溶解后的液态受表面张力影响,有尽可能缩小的趋势,已溶解的凸起部分就会向下凹部分流动,凝固后表面孔隙减小,形成较为光滑平整的表面,PA12样条表面颗粒堆积密度进一步提高,从而提高PA12样条的表面光洁度、表面质量、力学性能及防水性能。

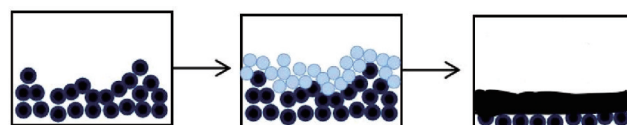


图8 表面平滑处理路径  
Fig.8 Path of surface smoothing treatment

### 3 结论

通过正交试验得出最优工艺参数,并经过工艺验证,结合经济绿色等综合考量,得出最佳工艺参数组合 $A_3B_2C_2D_2$ ,即溶剂量为9 mL、溶剂体积分数为95%、处理温度为60 °C、处理时间为10 min。值得注意的是,溶剂量需随着处理量或处理表面积的增加而增大。蒸气表面平滑处理可将制件表面粗糙度降低高达75%,形成光滑、防水的表面,使制件可应用于航空、汽车等对气密性和流线型要求高的领域。通过减小孔隙微孔和减少应力集中提高零件的抗冲击性、断裂伸长率和防水性,同时保持尺寸精度,使制件可用于复杂内部结构处理。

未来,应开发可重复使用的溶剂回收系统,降低长期运营成本,响应全球绿色制造,使其朝着更高效、多材料兼容和智能化方向发展;可通过与多轴加工、激光清洗等技术集成形成全自动后处理流水线,满足高精度领域需求。后处理方法的优化将辅助增材制造不断发展进步,实现最佳打印效率和制件可靠性。

### 参考文献

- [1] HAN W, KONG L B, XU M. Advances in selective laser sintering of polymers[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2022, 4(4): 042002.
- [2] RAZAVIYE M K, TAFTI R A, KHAJEHMOHAMMADI M. An investigation on mechanical properties of PA12 parts produced by a SLS 3D printer: An experimental approach[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2022, 38: 760-768.
- [3] 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): 197.
- [4] GOLHIN A P, TONELLO R, FRISVAD J R, et al. Surface roughness of as-printed polymers: A comprehensive review[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 127(3): 987-1043.
- [5] KARAKURT I, LIN L W. 3D printing technologies: Techniques, materials, and post-processing[J]. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2020, 28: 134-143.
- [6] DHAKAL N, WANG X L, ESPEJO C, et al. Impact of processing defects on microstructure, surface quality, and tribological performance in 3D printed polymers[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 23: 1252-1272.
- [7] LI H L, GENG X L, HUANG L, et al. Effect of surface quality on the fracture behavior of 3D printed lattice structures[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2023, 43: 170-180.
- [8] SYRLYBAYEV D, SEISEKULOVA A, TALAMONA D, et al. The post-processing of additive manufactured polymeric and metallic parts [J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2022, 6(5): 116.
- [9] CHOCHAN J S, SINGH R, BOPARAI K S. Vapor smoothing process for surface finishing of FDM replicas[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 26: 173-179.
- [10] VALERGA A P, BATISTA M, FERNANDEZ-VIDAL S R, et al. Impact of chemical post-processing in fused deposition modelling (FDM) on polylactic acid (PLA) surface quality and structure[J]. *Polymers*, 2019, 11(3): 566.
- [11] LUPONE F, PADOVANO E, CASAMENTO F, et al. Process phenomena and material properties in selective laser sintering of polymers: A review[J]. *Materials*, 2021, 15(1): 183.
- [12] LAVECCHIA F, GUERRA M G, GALANTUCCI L M. Chemical vapor treatment to improve surface finish of 3D printed polylactic acid (PLA) parts realized by fused filament fabrication[J]. *Progress in Additive Manufacturing*, 2022, 7(1): 65-75.
- [13] 杨露, 孟家光, 薛涛. 3D打印工艺参数对PLA试件拉伸强度的影响[J]. *塑料工业*, 2021, 49(5): 73-77.
- [14] 郑玲, 邓鑫, 焦晓岚, 等. 基于正交试验优化PLA的3D打印工艺参数[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(10): 68-72.
- [15] Bochnia J, Zmarzły P, Szot W. Effect of selective laser sintering on stress relaxation in PA12[J]. *Polimery*, 2024, 69(3):179-185.
- [16] 李彬, 李子杰, 顾海, 等. 化学处理对熔融沉积成型件力学性能的影响[J]. *机械科学与技术*, 2020, 39(1): 144-149.
- [17] CHOCHAN J S, SINGH R, BOPARAI K S, et al. Dimensional accuracy analysis of coupled fused deposition modeling and vapour smoothing operations for biomedical applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 117: 138-149.
- [18] DIZON J R C, GACHE C C L, CASCOLAN H M S, et al. Post-processing of 3D-printed polymers[J]. *Technologies*, 2021, 9(3): 61.
- [19] MAGRI AEL, BENCAID S E, VANAEI H R, et al. Effects of laser power and hatch orientation on final properties of PA12 parts produced by selective laser sintering[J]. *Polymers*, 2022, 14(17): 3674.
- [20] JIN Y F, WAN Y, ZHANG B, et al. Modeling of the chemical finishing process for polylactic acid parts in fused deposition modeling and investigation of its tensile properties[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 240: 233-239.
- [21] ARBAIN N A, HILWA N, ZINI M, et al. Wettability characterization of 3D printed polymer membranes with candle soot coating[J]. *Jurnal Tribologi*. 2024,40: 148-63.
- [22] KHOSRAVANI M R, ANDERS D, REINICKE T. Effects of post-processing on the fracture behavior of surface-treated 3D-printed parts [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2023, 46: 148-156.
- [23] TORRES J, ABO E, SUGAR A J. Effects of annealing and acetone vapor smoothing on the tensile properties and surface roughness of FDM printed ABS components[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2023, 29(5): 921-934.
- [24] 王琛, 蒋旻翰. 丙酮浸泡处理对3D打印ABS成型件表面质量及光泽度影响[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(6): 88-91.