

文章编号: 1006-9941(XXXX)XX-0001-13

## 固体推进剂 3D 打印单层堆叠过程工艺参数研究

王嘉炜<sup>1</sup>, 史宏斌<sup>1</sup>, 刘宣杰<sup>2</sup>, 宋仕雄<sup>3</sup>, 史佳伟<sup>1</sup>, 王琪虎<sup>1</sup>

(1. 西安航天动力技术研究所, 陕西 西安 710025; 2. 北京航空航天大学, 能源与动力工程学院, 北京 100191; 3. 航天动力技术研究院, 陕西 西安 710025)

**摘要:** 为了更加合理地调配固体推进剂的 3D 打印工艺参数、提升打印质量, 基于单层堆叠过程, 采用数值模拟方法对挤出速度、打印高度以及打印温度 3 个影响因素进行了正交设计研究。通过方差和极差分析计算了各因素影响程度, 并与灰色关联度方法进行了比较, 综合考虑特殊点打印精度后筛选出最优工艺参数搭配, 提出了一种通过单线截面数据计算打印线间距的方法, 并进行单层打印的仿真模拟与实验验证。结果表明, 挤出速度是影响打印质量的主要因素, 当挤出速度为  $12 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、喷嘴高度为  $1.2 \text{ mm}$ 、打印温度为  $55 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 打印成型件质量最优, 参数修正后试件拉伸强度由  $0.21 \text{ MPa}$  上升到  $0.43 \text{ MPa}$ , 密度由  $1.43 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  上升至  $1.65 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 单层打印仿真及实验表明, 参数修正后成型质量明显提升。

**关键词:** 3D 打印; 单层堆叠; 参数筛优; 参数修正

中图分类号: TJ55; V435

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2024210

## 0 引言

在航空航天领域中, 3D 打印技术以其高精度、高效率和高自由度的特点, 固体推进剂装药中展现出广阔的应用前景。3D 打印技术可以突破传统制造行业的关键瓶颈问题, 例如, 多组分药柱成型<sup>[1]</sup>、复杂结构药柱梯度成型<sup>[2]</sup>和材料一体化打印成型<sup>[3]</sup>等。

近十年来, 国内外学者围绕 3D 打印固体推进剂展开相关研究, 已取得相应的进展<sup>[4-6]</sup>。现有的研究表明, 通过筛选合适的配方, 固体推进剂浆料具备一定可打印性, 但直接打印成型得到的药柱存在一定内部缺陷, 其主要原因有两个: 一是固体推进剂浆料通过内部交联反应进行固化, 需要经历升温、保温及降温等环节, 然而 3D 打印成型时无法维持稳定的反应温度, 交联反应速度不足, 下层浆料对上层浆料的支撑力不足, 并且光固化深度有限,

尤其是铝颗粒含量提高时固化深度进一步降低<sup>[7]</sup>; 二是打印试件是由单线到单层再由单层到多层堆叠成型的, 堆叠过程中由于即时固化, 线间融合不彻底时会产生打印纹路, 导致试件内部留下气孔, 进一步导致产品致密度降低、机械强度降低以及燃烧性能不稳定<sup>[8]</sup>。

研究者通常通过光固化高分子体系结构优化<sup>[9-10]</sup>以及调整工艺<sup>[11-12]</sup>来解决打印密度和机器强度低、燃烧不稳定等问题, 例如, 高分子材料的选择与改性、光固化配方的优化以及光固化工艺参数优化。然而, 当前阶段针对工艺环节的研究多采用多次实验试错迭代最优方法, 对于众多工艺参数所产生的影响缺乏深入而全面的探讨, 亟需寻找根据配方确定工艺参数的方法, 以排除工艺环节引入的药柱缺陷, 提升打印质量。

为此, 本研究基于 85% 固含量推进剂建立了打印过程的数值计算模型。通过对单线打印以及单层打印过程的仿真, 探讨了多因素对打印质量的影响, 并筛选、修正工艺参数组合抑制过度堆积、线间融合不充分以及断线等缺陷, 并以不同工艺参数组合进行了单层推进剂的 3D 打印, 以期高固含量推进剂打印参数设置提供参考。

收稿日期: 2024-08-05; 修回日期: 2024-10-29

网络出版日期: 2024-12-31

作者简介: 王嘉炜(2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事固体推进剂增材制造研究。e-mail: xyxxwangjiawei@163.com

通信联系人: 史宏斌(1968-), 男, 研究员, 主要从事固体发动机总体设计。e-mail: 8171shihongbin@163.com

引用本文: 王嘉炜, 史宏斌, 刘宣杰, 等. 固体推进剂 3D 打印单层堆叠过程工艺参数研究[J]. 含能材料, DOI:10.11943/CJEM2024210.

WANG Jia-wei, SHI Hong-bin, LIU Xuan-jie, et al. Process Parameters of Single-Layer Stacking Process through 3D Printing of Solid Propellants[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), DOI:10.11943/CJEM2024210.

## 1 仿真模型

### 1.1 基本假设与模型建立

主体研究内容是固体推进剂在光固化3D打印堆叠过程中的高黏度流体流动问题,尺寸精度、轮廓形状以及表面质量等参数会影响3D打印的成型精度。采用计算流体力学方法(computational fluid dynamics, CFD)对打印过程进行模拟,通过流体体积法(volume of fluid, VOF)获取形状特征,VOF是基于欧拉网格下的界面追踪方法,可准确模拟不同工况下3D打印堆积过程中流体的体积演变。

固体推进剂浆料流动过程十分复杂,为了简化流体数值模拟,仿真时需要考虑主要影响因素而适当忽略次要影响因素<sup>[13]</sup>,因此在建立模型前对该问题作如下假设:

- (1) 由于模型流动时间小于2 s,可以认为全过程推进剂药浆挤出未发生相变;
- (2) 直接挤出过程不涉及热交换,可以认为推进剂药浆温度恒定不变;
- (3) 推进剂药浆的流动状态为层流、VOF多相流;
- (4) 推进剂药浆与喷嘴以及底部壁面均为无滑移壁面;
- (5) 推进剂药浆入口截面速度一致;
- (6) 药浆在挤出过程中没有压缩,流变特性不随时间变化;
- (7) 药浆在基板上不发生变形。

基于上述假设,考虑到流动过程中药浆密度保持恒定,推进剂药浆流动问题所需的控制方程如下。

流体为不可压缩流体,其连续性方程<sup>[14]</sup>由式(1)

给出:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

式中, $\mathbf{u}$ 为速度向量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

流体速度场计算可以由动量方程<sup>[14]</sup>式(2)给出:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{u}$ 为速度向量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $\mu$ 为黏度,可由表观黏度 $\eta$ 给定, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ; $\rho$ 为密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ; $p$ 为压力, $\text{Pa}$ ; $\mathbf{g}$ 为重力加速度向量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ;

VOF方法中相界面捕捉方法由相体积分数的控制方程<sup>[15]</sup>式(3)给出:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (3)$$

式中, $\mathbf{u}$ 为速度向量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $\alpha$ 为相体积分数。

研究基于Herschel-Bukely黏度模型<sup>[16]</sup>模拟流体流动,可以定义不同温度下流体的黏度特性,模型的黏度曲线由式(4)给出:

$$\eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (4)$$

式中, $\eta$ 为表观黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ; $\tau_0$ 为屈服应力, $\text{Pa}$ ; $K$ 为稠度系数,单位取决于 $n$ 的值, $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, $\text{s}^{-1}$ ; $n$ 为流动行为指数。

根据Herschel-Bukely黏度模型<sup>[16]</sup>,对各温度下固体推进剂浆料的原始黏度曲线进行拟合,得到不同温度下的三参数黏度模型,原始黏度曲线测试方法见实验部分。

建立几何模型并划分网格,如图1a所示,包括喷嘴(灰色圆筒)、喷嘴移动区域(黄色区域)、浆料入口(绿色区域)、底部流动区域(蓝色区域)。喷嘴区域的计算精度影响较大,故对两个区域的网格加密以提高计算准确性,如图1b所示。

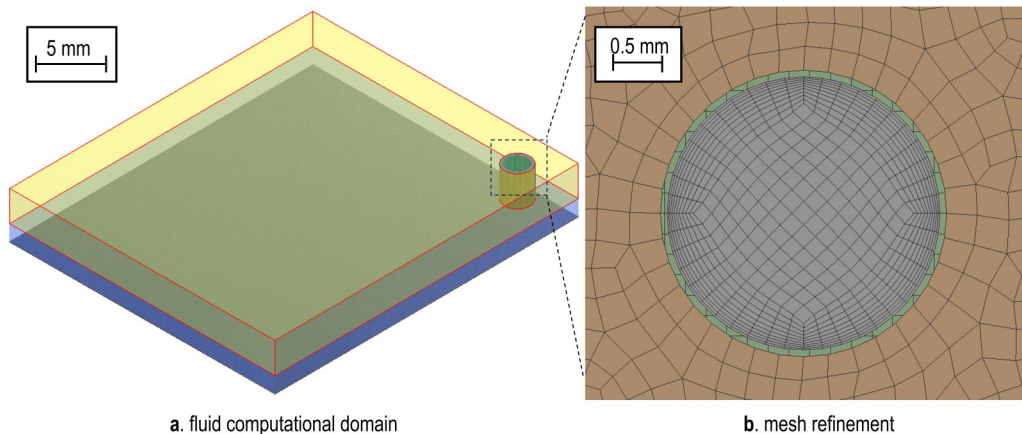


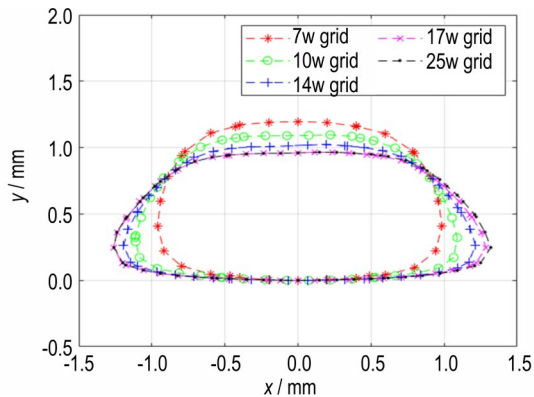
图1 几何模型以及网格划分

Fig.1 Geometric model and mesh generation

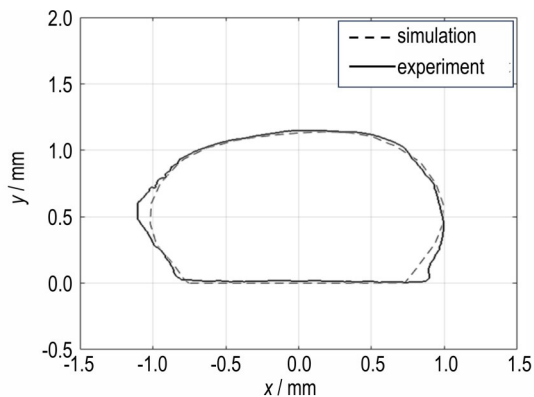
### 1.2 模型验证

为了对模型进行网格无关性与有效性验证,本研究将仿真结果与实验结果进行了对比验证。仿真模型被划分为5组不同尺寸的网格模型,网格数量分别为7万、10万、14万、17万和25万。在相同工况下,从打印稳定段截取同一位置截面,后处理得到截面几何特征参数,由图2a所示。17万网格组与25万网格组截面积误差为1.78%,可以认为通过网格无关性验证。为兼顾精确度与计算效率,取17万网格模型进行后续仿真模拟。

实验采用3D打印设备制备3条平行丝,设定打印高度为1.5 mm,药浆温度为55 °C,挤出速度为20 mm·s<sup>-1</sup>,喷嘴移动速度为20 mm·s<sup>-1</sup>,并采用相同的参数进行仿真。将实验获得的浆料单线固化后横向切开,用MATLAB图像处理工具识别得到截面轮廓<sup>[17]</sup>。仿真与实验结果对比如图2b所示,虽然实验所得的单线轮廓有轻微凸起,但仿真模型能够较准确地捕捉到轮廓边界,二者截面积误差为4.31%,因此认为所得仿真模型有效。



a. sectional shape of different mesh conditions



b. comparison between experiment and simulation

图2 网格无关性与模型有效性验证

Fig.2 Mesh independence and model validation

### 1.3 模拟方法与模型参数

3D打印的成型精度与性能受材料配方和工艺参数影响<sup>[18]</sup>,成型精度是实际打印物体与设计模型的接近程度,由尺寸精度、轮廓形状相似度以及表面质量(平整度和纹理)等参数评判。工艺参数中主要影响因素有喷头的尺寸、打印高度、挤出速度、打印速度以及打印温度等<sup>[19]</sup>。文献已验证相同挤出倍率下,单线截面形状相同,挤出倍率 $\delta_v$ 计算方法<sup>[17]</sup>见式(5):

$$\delta_v = v_e / v_m \quad (5)$$

式中, $\delta_v$ 为挤出倍率,无量纲参数; $v_e$ 为挤出速度, m·s<sup>-1</sup>;  $v_m$ 为打印速度, m·s<sup>-1</sup>。

研究的主体对象为三种工艺参数,温度  $T$ 、打印高度  $H_n$  以及挤出倍率  $\delta_v$  作为自变量,以线高、线宽、截面积等几何因素作为因变量进行仿真模拟。具体方法为:根据打印高度  $H_n$  分别建立多组单线打印模型,在打印模型中分别采用不同挤出倍率  $\delta_v$  以及浆料温度  $T$  用于模拟不同工况下的药浆堆积形态。仿真所得的目标参数是实际高度、打印线宽以及截面积。将仿真结果进行后处理,根据VOF方法提取相体积分数50%的等值面为两相界面,截取等值面,再提取三种目标参数用作对比和分析。

模型入口位置为喷嘴区域上表面,采用速度入口,出口为喷嘴移动区域左右侧面,采用压力出口。喷嘴区域采用动网格的层铺(Layer)法,定义喷嘴沿直线匀速移动,速度为20 m·s<sup>-1</sup>,底部为壁面模拟打印基板。自变量范围的选取覆盖每种因素的所有可用水平,挤出倍率以及打印高度的四种水平等距选取,温度选取参考文献[10],三因素四水平如表1所示。

表1 三因素四水平设定

Table 1 Three-factor and four-level variable setting

Factors	Levels			
	1	2	3	4
$\delta_v$	0.60	0.80	1.00	1.20
$H_n / \text{mm}$	0.90	1.20	1.50	1.80
$T / ^\circ\text{C}$	25.0	55.0	60.0	65.0

模型模拟分为三个部分,分别是单线打印模拟,单层打印模拟。单线打印模拟采用三因素四水平的正交设计为模拟条件,打印线段长度为25 mm。平面打印分为折线打印模拟、矩形平面打印和圆柱平面。折线打印同样采用正交设计中的参数组,在已有的参数组基础上增加了线间距,打印S型平行折线,每段线段长



度为 10 mm, 线间距为 5 mm。矩形平面打印模拟以不同线间距打印单层平面, 每段线段长度为 25mm, 线间距为变量。圆柱平面打印模拟采用同心圆走线方法, 同心圆外半径为 40 mm, 内半径为 35 mm, 线间距为变量。

## 2 实验部分

### 2.1 原材料与仪器

原料: 铝粉, 粒径为  $29\pm 3\ \mu\text{m}$ , 西安航天化学动力有限公司; AP 氧化剂颗粒, 粒径分别为  $330\sim 340\ \mu\text{m}$ ,  $130\sim 140\ \mu\text{m}$  和  $5\sim 10\ \mu\text{m}$ , 大连高佳化学有限公司; 光固化黏合剂, 西安航天化学动力有限公司自制; 以及其他推进剂常用材料: 端羟基聚丁二烯 (HTPB); 甲苯二异氰酸酯 (TDI); 癸二酸二辛酯 (DOS), 黎明化工研究设计院有限责任公司。光固化黏合剂材料为聚丁二烯以及丙烯酸酯, 合成的紫外光固化基体如图 3 所示。

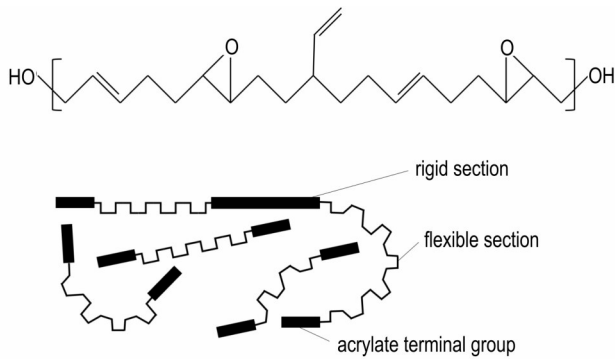


图 3 聚丁二烯分子式及基体示意图

Fig.3 The molecular formula for polybutadiene and diagram of the matrix

仪器: 立式捏合机, 西安航天化学动力有限公司; Anton Paar MCR302 型旋转流变仪, 安东帕有限公司; 3D 打印设备 (西安航天化学动力有限公司与西安交通大学联合开发); 硫化炉, 湖北心海工业智能设备有限公司; 电子天平, 乐祺微电子科技有限公司。

3D 打印设备: 带有防爆系统的增材制造系统, 包括固化紫外灯 (波长 405 nm, 功率 100 W)、打印平台、挤出设备、保温设备、水浴桶以及储料罐等, 其示意图如图 4 所示。

### 2.2 浆料与打印件制备

#### (1) 浆料制备

实验采用的浆料配方是在现有的光固化浆料配方<sup>[10]</sup>基础上调整得到的, 如表 2 所示。将固体推进剂

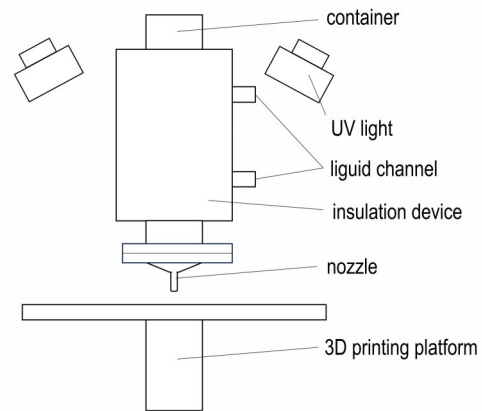


图 4 打印设备示意图

Fig.4 Diagram of printing device

表 2 固体推进剂配方

Table 2 Formula of solid propellant

component	size	mass fraction
HTPB	/	7%~10%
Al	$29\pm 3\ \mu\text{m}$	15%~18%
AP/SiO <sub>2</sub>	$330\sim 340 / 130\sim 140 / 5\sim 10\ \mu\text{m}$	65%~68%
UV-cured adhesive	/	3%~5%
Functional additives	/	4%

组分按照配方依次加入立式捏合机混合, 得到固含量 85% 的固体推进剂浆料; 在进行初步实验时, 使用三种粒径的 SiO<sub>2</sub> 代替 AP 颗粒以保证实验安全性。

为了提升混合浆料的密度, 使用抽取真空并搅拌的方式去除浆料内部的气泡。根据 QJ 1616-89 《复合固体推进剂交联密度测定方法》<sup>[20]</sup> 测试药浆密度, 理论密度为  $1.72\times 10^3\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 除气泡前密度为  $1.58\times 10^3\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 除气泡后密度为  $1.63\times 10^3\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 浆料黏度增加。

#### (2) 打印件制备

研究需要用到的打印件样品有四种, 分别是单线样品、折线样品、圆柱形样品以及工字拉伸件样品。样品的制备方法为, 建立样品模型后导入切片软件, 由切片软件 (Cura) 对样品模型切片, 将定义路径转化为 G 代码输入打印设备, 喷嘴按照解析路径打印堆积, 模型即样品如图 5 所示, 由 4 台波长 405 nm 紫外光灯照射 10 s 左右使浆料预固化, 打印完后将样品放入硫化炉进一步加热固化完全。圆柱形样品以及工字件样品可由 Cura 设置不同线间距, 打印不同填充密度的样品。为了更好地观察打印纹路, 圆柱形药柱内径为 20 mm, 外径为 40 mm, 工字件尺寸为  $120\times 25\times 5\ \text{mm}^3$ 。

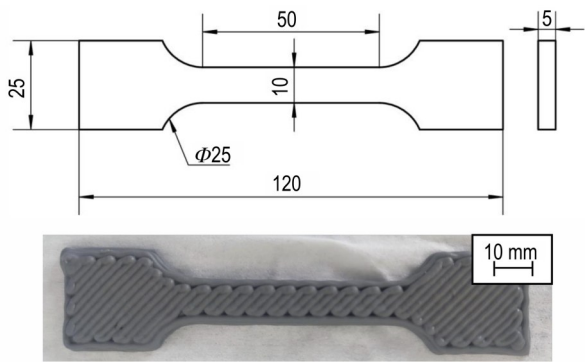


图5 加工模型以及试样

Fig.5 Manufacturing model and sample

### 2.3 实验部分

#### (1) 流变特性的测试

采用 Anton Paar MCR302 型旋转流变仪对浆料进行流变学表观黏度测试,得到不同温度下的黏度-剪切速率曲线,如图 6 所示。药浆出现明显的剪切变稀现象,剪切速率高于  $0.1 \text{ s}^{-1}$  时药浆表观黏度低于  $1000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,基本满足挤出工艺药浆可打印性,设定剪切速率范围为  $0.01\sim 100 \text{ s}^{-1}$ 。由于药浆在制备 2 h 内黏度变化不明显,而在 2 h 后会发生交联反应导致内部固化,黏度会

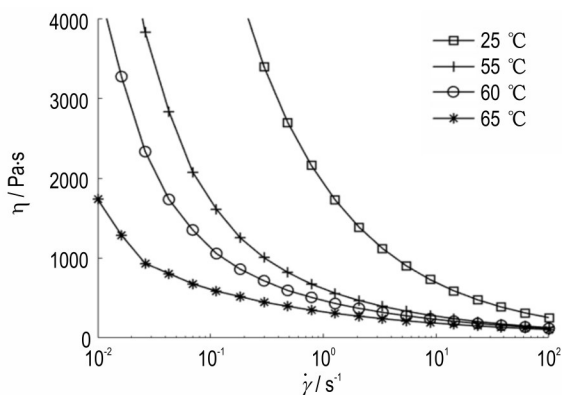


图6 黏度-剪切速率曲线

Fig.6 Viscosity-shear rate curve

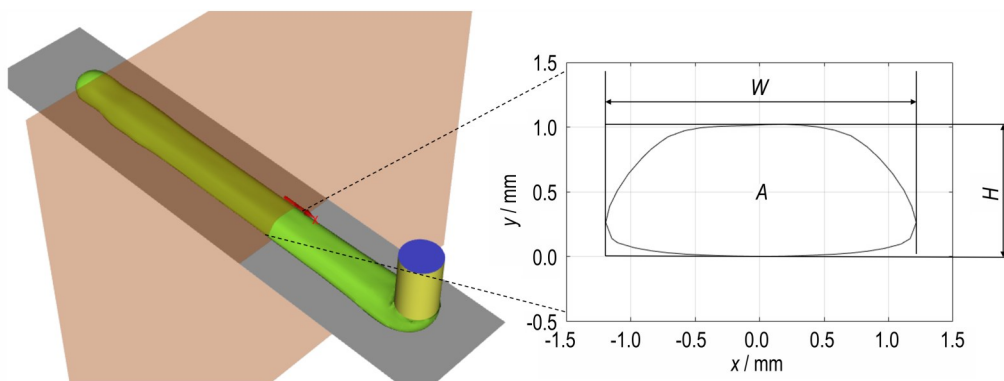


图7 单线截面图

Fig.7 Extraction of geometric characteristics of sections

大幅升高,因此实验样品的制备应在药浆混合完毕 2 h 内完成。

#### (2) 力学性能测试

根据 QJ 924-85《复合固体推进剂单向拉伸试验方法》<sup>[21]</sup>进行力学性能测试。测试时,将 5 组不同线间距制备的拉伸试验件固定于夹具上,设置拉伸速率为  $10 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,拉伸试验件断裂后记录伸长量,根据应力应变曲线计算拉伸强度以及断裂伸长率。

#### (3) 密度测试

密度测试采用称量法,拉伸试件拉伸断裂后,用电子天平测试其质量,再将其加入量杯,观察液面上涨刻度,根据式(6)计算其密度。

$$\rho = \frac{m}{\Delta V} \quad (6)$$

式中, $\rho$ 为密度,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $m$ 为质量,  $\text{kg}$ ;  $\Delta V$ 为液面上涨量,  $\text{m}^3$ 。

### 3 单线打印结果以及参数筛优

三维模型的打印过程由切片、走线以及堆积三个部分构成。在走线环节中,线宽与喷嘴尺寸差异越小且截面越接近矩形时,打印堆积环节中线条间融合效果越好,可以更容易地抑制缺陷的生成。因此,理想的单线打印是成型药柱内部质量提升的基础。

#### 3.1 单线仿真正交设计

基于 1.3 节的分析,分别以不同的挤出倍率  $\delta_v$ 、打印高度  $H_n$  以及温度  $T$  进行仿真模拟,如表 2 所示。由正交设计表<sup>[22]</sup>获得 16 组仿真结果,在直线段中截取形状稳定的截面,后处理获取其几何特征,如图 7 所示。基于 16 组单线截面图,可获取各组因变量,分别为截面积  $A$ 、最大线高  $H$ 、最大线宽  $W$ 。

由于每种单线截面形态不一,为了表征截面形状

与理想形状的差距,引入分析变量截面空余率  $P_v$ ,该变量是对几何形状的简单表征,截面与矩形的相似程度越低,对区域的填充效率越低,截面空余率就越高,计算方法由式(7)给出。引入另一分析变量截面宽高比,该变量是对形状扁平程度的简单表征,宽高比值越高,说明打印截面形状越扁平,计算方法由式(8)给出。正交实验结果数据如表3所示。

$$P_v = 1 - \frac{A}{W \cdot H} \quad (7)$$

$$P_e = W/H \quad (8)$$

### 3.2 结果分析

对处理后的数据分别进行方差分析和极差分析<sup>[23]</sup>。方差分析用于对数据主效应进行检验,得到三种工艺参数  $p$  值都低于 0.05,说明三种因素对所有因变量  $A$ 、 $W$ 、 $H$  和  $P_v$  都有显著影响。极差分析可用于揭示不同影响因素对实验结果的影响程度。

结果如图8所示,不同参数对截面积  $A$  的影响程度排序为  $\delta_v > H_n > T$ ,随着挤出倍率  $\delta_v$  的提升,截面面积  $A$  增长近似呈线性关系,层宽  $W$  的变化特征与截面积  $A$  近似。实际层高  $H$  对三种工艺参数敏感度较低,但在数值计算的过程中发现,第3、4组工艺参数下,较低的打印高度  $H_n$  与较高挤出速率  $\delta_v$  配合时会出现过度

表3 正交设计仿真结果

Table 3 Results of orthogonal tests

No.	$\delta_v$	$H_n$ / mm	$T$ / °C	$A$ / mm <sup>2</sup>	$W$ / mm	$H$ / mm	$P_v$ / %	$P_e$
1	0.60	0.90	25.0	1.46	2.53	0.95	39.3	2.66
2	0.80	0.90	55.0	2.10	3.28	0.98	34.9	3.35
3	1.00	0.90	60.0	2.92	3.99	1.02	28.4	3.91
4	1.20	0.90	65.0	3.63	4.62	1.07	26.6	4.32
5	0.60	1.20	55.0	1.33	2.30	0.97	40.7	2.37
6	0.80	1.20	25.0	1.89	2.98	1.05	39.7	2.84
7	1.00	1.20	65.0	2.76	3.60	1.08	29.0	3.33
8	1.20	1.20	60.0	3.30	4.24	1.11	29.7	3.82
9	0.60	1.50	60.0	1.37	2.20	1.02	38.8	2.16
10	0.80	1.50	65.0	1.93	2.79	1.10	36.9	2.54
11	1.00	1.50	25.0	2.43	3.36	1.18	38.5	2.85
12	1.20	1.50	55.0	3.10	3.95	1.22	35.7	3.24
13	0.60	1.80	65.0	1.39	2.21	1.05	39.8	2.10
14	0.80	1.80	60.0	1.89	2.79	1.10	38.0	2.54
15	1.00	1.80	55.0	2.50	3.32	1.16	35.4	2.86
16	1.20	1.80	25.0	3.10	3.82	1.22	33.4	3.13

挤压现象,其层高  $H$  受限、层宽  $W$  扩张过大,导致打印精度、分辨率降低,如图9所示。打印高度  $H_n$  越低、挤出倍率  $\delta_v$  越大、温度  $T$  越高时,截面空余率  $P_v$  越小,自变量对截面空余率  $P_v$  的影响程度排序为  $\delta_v > H_n > T$ ,截

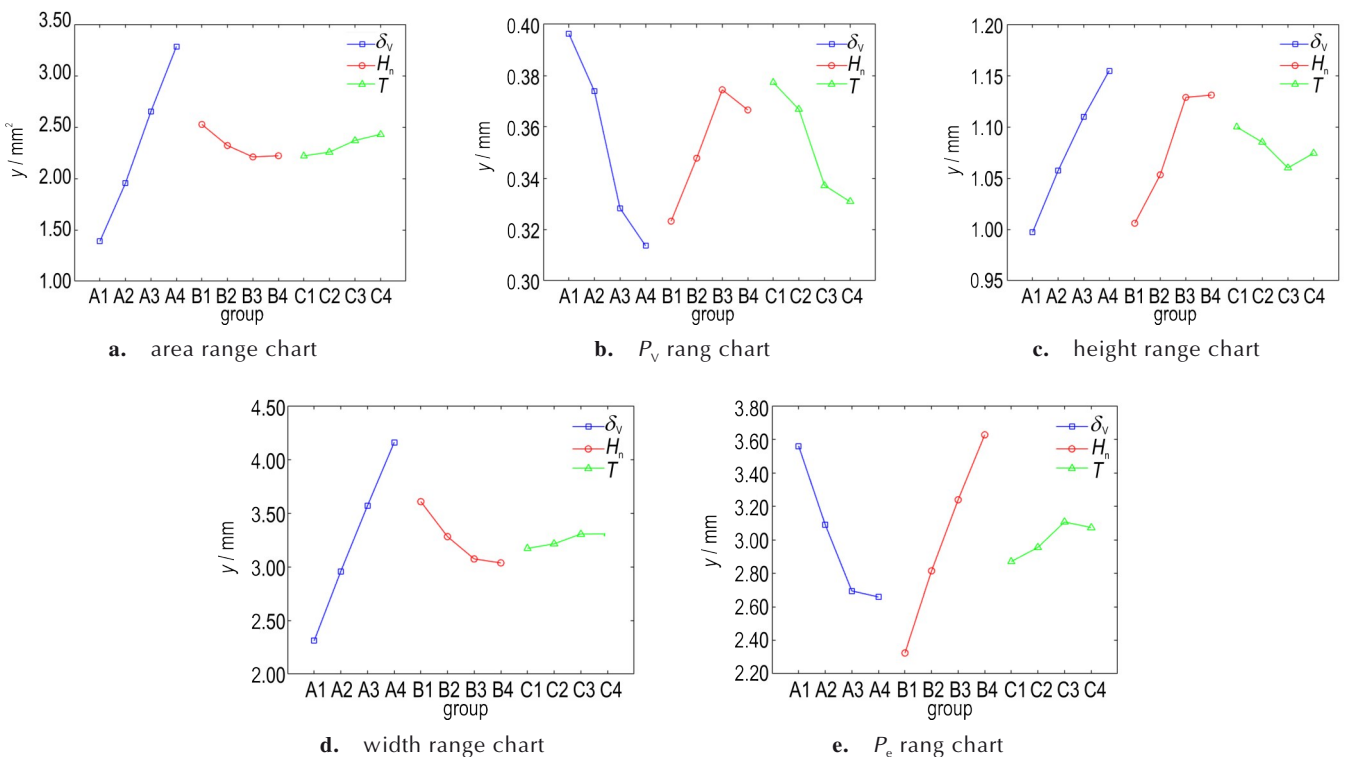


图8 极差分析图

Fig.8 Range analysis chart

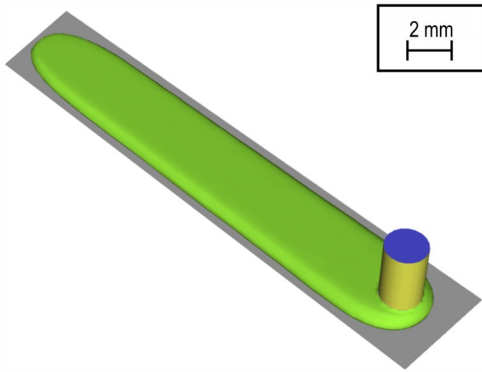


图9 喷嘴挤压上表面

Fig.9 The nozzle is pressing against the upper surface of the slurry

面空余率侧面反映了流体的流动性能,温度  $T$  对其有影响显著,可采用水浴加热等方法降低其黏度以改善流平性<sup>[24]</sup>,与一般的热固性推进剂性质相似。自变量对截面宽高比的影响排序为  $H_0 > \delta_v \approx T$ ,药浆截面越扁,其在多层打印时承载能力强,因此应选择低层高、低挤出倍率以及高温(低黏度)的工艺参数配合。

### 3.3 打印参数筛优

为了筛选出搭配更合理的工艺参数组合,利用灰色关联度分析法对上述工艺参数组合进行处理<sup>[25]</sup>。选取  $W$  和  $P_v$  作为评价指标,在设置理想目标时考虑到打印线宽过宽容易造成线条边缘坍塌,故选取  $W$  值越小越好。而截面空余率一定程度上反映了孔隙缺陷,选取  $P_v$  值越小越好。因此,选取了 16 组结果中的最小线宽以及最小空余率作为理想目标,即  $W=2.20$ ,  $P_v=26.65$ 。

通过式(9)对数据进行归一化处理,由式(10)分配权重系数。

$$\xi_i(k) = \frac{\min_k \min_i |x_0(k) - x_i(k)| + \zeta \max_k \max_i |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \zeta \max_k \max_i |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (9)$$

$$\gamma_j^i = \lambda_1^i \xi_j(1) + \lambda_2^i \xi_j(2) \quad (10)$$

式中,  $i$  为试验序号,取值范围是 1~16;  $k$  为优化目标序号,取值范围 1~2;  $\xi_i(k)$  为关联系数;  $\zeta$  为分辨系数,取值为 0.5;  $x_0(k)$  为理想目标;  $x_i(k)$  是指第  $i$  组试验关于  $k$  目标的试验数据值;  $\lambda_1^j$  与  $\lambda_2^j$  表示第  $j$  组权重系数,取值范围是 1~3,分别对应 (0.3, 0.7)、(0.5, 0.5)、(0.7, 0.3)。

研究时,对优化目标进行权重分配,为了保证打印出的线宽小、空余率小,采用三组权重系数分别计算灰色关联度。根据结算结果,不同权重配比下,第 4、5、

9、13 组灰色关联度最大,接近理想优化目标,而第 4 组参数打印模拟时存在挤压上表面现象,故取第 5、9、13 组为筛优结果。

## 4 单层打印结果及参数修正

由单线打印到单层打印的升维堆积是通过折线打印以及线间融合实现的,二者直接影响打印精度及成型形状,且平面打印引入的打印线间距一般通过试错法确定,往往导致线融合不充分或实际打印层高过大等问题。为了提高打印精度以及线间融合情况,根据 1.3 节的方法,针对折线打印以及线间距修正开展仿真研究。

### 4.1 拐角处打印精度

固体推进剂的单层打印实质上是在单线打印的基础上进行折线堆积,由打印线间距控制。在打印拐角等特殊点时,注意到实际打印与设计的垂直折线形状不符,实验得到的折线如图 10a 所示,为了探究该误差的影响因素,分别以 5、9、13 组参数进行尺寸为 10 mm 的“S”形折线打印,仿真模拟如图 10b 所示。

对打印结果进行处理,分别截取打印俯视图、喷嘴中心沿打印路径切面图进行分析。如图 10c 所示,虚线表示规划路径,实线表示实际打印轮廓,随着打印高度的增加,实际打印路径与理论路径产生的偏移逐渐增大。如图 10d 所示,喷嘴出口右端与流体接触底板间存在水平误差,其误差大小随高度增大而增大,如图 10e 所示。

综上所述,选取合理的参数组合时需要综合考虑每种参数变化对打印形状的影响。挤出倍率升高时,挤出的线条截面积、实际线宽与实际线高都增大,因此挤出倍率应与打印高度匹配,同时,打印高度升高会显著增大理论轮廓与实际轮廓的误差,因此应考虑选择小挤出倍率与低打印高度的参数配合。温度则主要影响药浆的流动性能,仿真结果表明药浆温度的改变对打印线的形态影响较小,但实验过程中发现,药浆在 25 °C 下打印易导致喷嘴堵塞,在 55~65 °C 区间药浆挤出流畅,未发生堵塞,因此,温度介于此区间时满足药浆可挤出性。仿真结果表明,三组参数中第 5 组符合小挤出倍率与低打印高度组合,且温度介于可挤出区间,因此将第 5 组确定为最优工艺参数进行后续参数优化工作,此时,打印高度为 1.2 mm,挤出速度为 12 mm·s<sup>-1</sup>,温度为 55 °C。



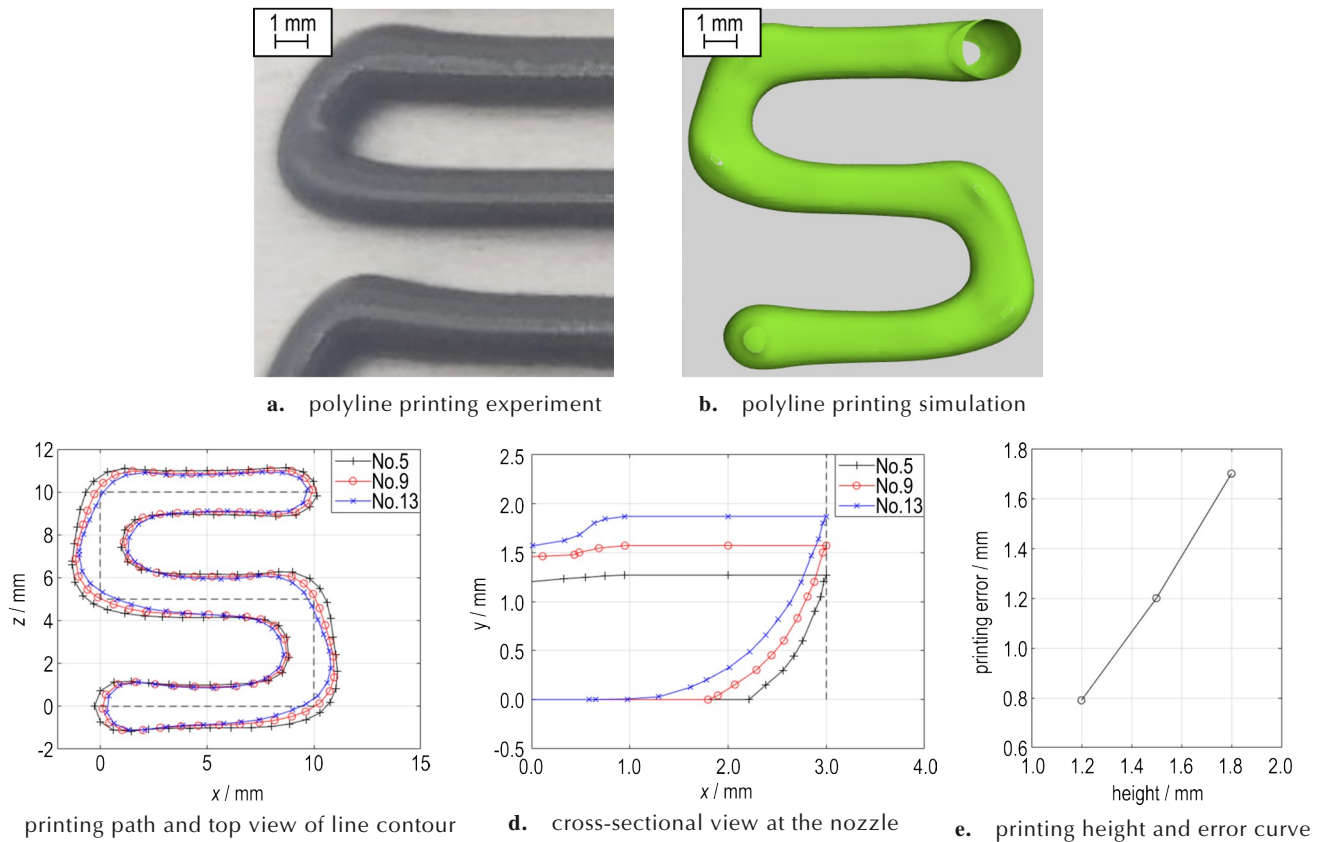


图10 折线打印精度  
Fig.10 Polyline printing accuracy

4.2 工艺参数修正

由单线打印过渡到单层打印时会额外引入工艺参数—打印间距。根据建立的单层打印模型,打印五条平行线。实验室一般直接使用喷嘴直径或略小于直径的值作为打印间距,打印间距过宽时线间融合不充分,过窄时容易形成挤压导致药面刮坏。为了使打印间距设定适中,改善打印质量,以下提出一种通过截面特征计算打印间距的方法。

假设打印间距设定最优时,打印线之间既不存在凹陷,也不存在突出,即药浆融合时层高不变,在保证挤出速度不变的情况下,理想药浆截面示意图如图11所示。

根据阴影面积相等,可以计算最佳打印间距,打印间距  $L$  可由截面空余率  $P_v$  以及线宽  $W$  计算,计算公式由式(11)给出:

$$L = W \times (1 - P_v) \tag{11}$$

选取筛优参数第5组作为实验组,随机抽取另一组参数第9组作对比组,分别进行平面单层打印,并提取层高、线宽、截面积及空余率进行数据分析,其结果如表4所示:

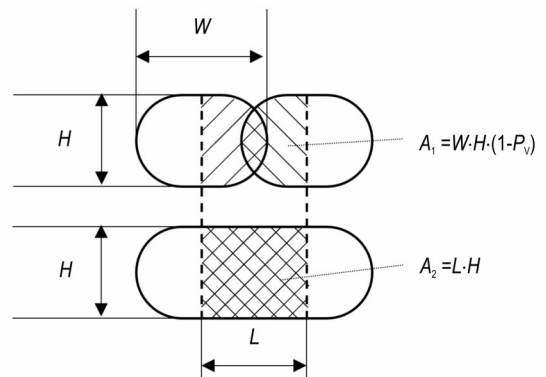


图11 药浆截面示意图  
Fig.11 The schematic diagram of the cross-section of the slurry

打印间距补偿对线宽影响较明显,且能有效改善表面形态。如表4以及图12所示,图12a~d分别对应实验组原本参数、实验组修正参数、对比组原本参数、对比组修正参数对应的打印表面形态及其切面形态。参数补偿对整体层高以及截面积的影响较小,实验组以及对照组层高变化分别为7.9%和3.0%,但整体层宽减小,变化率分别为21.1%和8.0%,截面内部空隙



表 4 单层打印结果

Table 4 Result of Single-layer Printing

group	experimental group		control group	
	original parameters No.5	corrected parameters No.5#	original parameters No.9	corrected parameters No.9#
$H / \text{mm}$	1.04	1.13	1.30	1.34
$W / \text{mm}$	10.44	8.23	11.15	10.26
$A / \text{mm}^2$	7.53	7.72	10.52	10.61
$P_v$	30.6%	17.0%	27.4%	22.8%

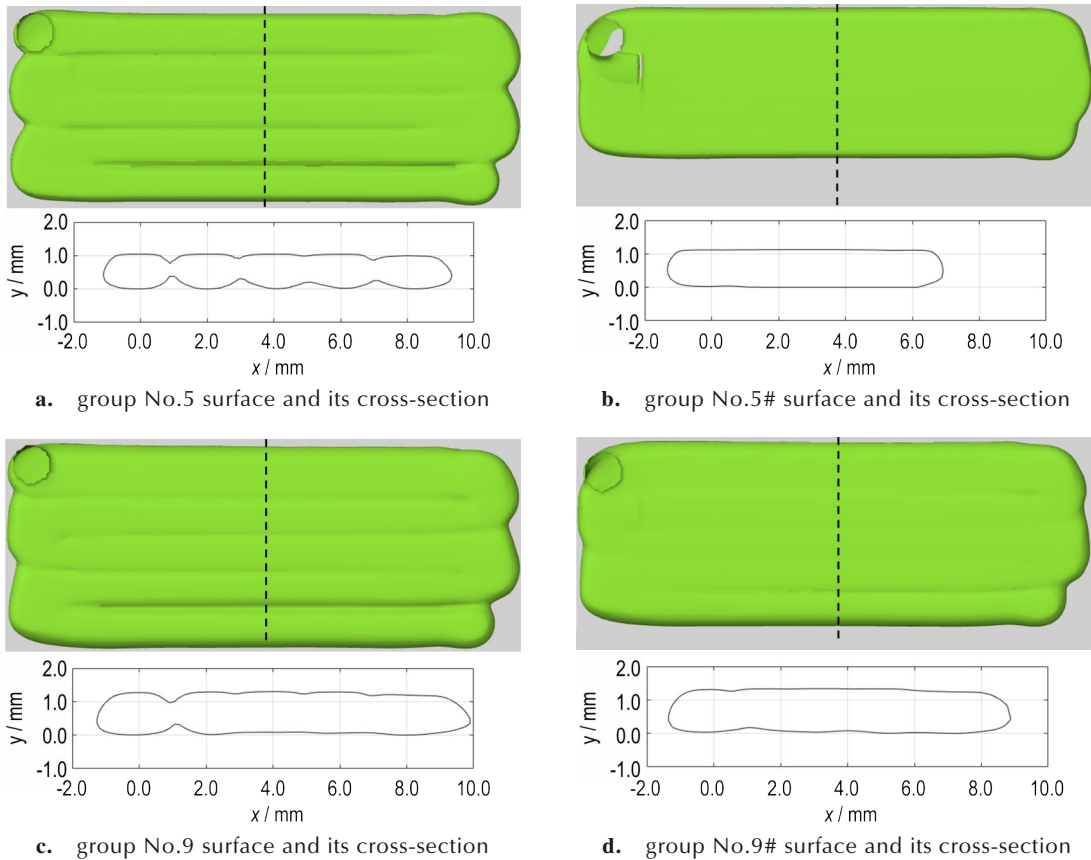


图 12 参数筛优以及修正结果

Fig.12 Results of parameter screening and optimization

减小,后者层宽层高变化幅度不大的原因是理想线间距与计算最佳线间距误差比前者小。

实验组参数修正后截面形状均匀,上下表面平整没有凹陷,修正后空余率仅 17.0%,比修正前空余率下降 13.6%,而对比组修正后截面空余率为 22.8%,比修正前降低 4.6%,上下表面虽有轻微凸起但比修正前有所改善,表明对比组修正改善幅度有限。

分别采用第 5 组以及 5#组工艺参数加工 5 份拉伸试件,固化后测试其力学性能,其中一组拉伸试验结果如图 13 所示,第 5 组试件平均拉伸强度为 0.21 MPa,断裂延伸率为 38.7%,第 5#组试件平均拉伸强度为

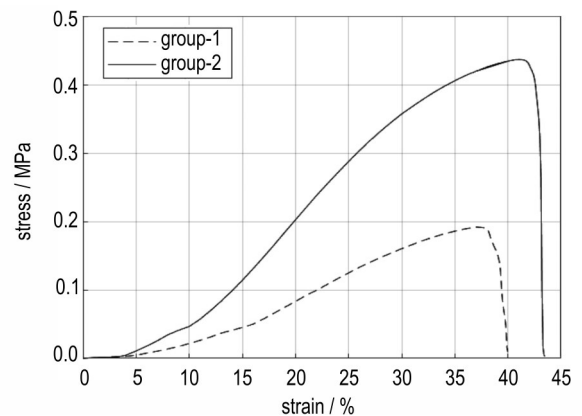


图 13 应力-应变曲线

Fig.13 stress-strain curve

0.43 MPa, 断裂延伸率 42.9%, 密度由  $1.43 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  上升至  $1.65 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 第 5 组试件密度甚至低于浆料密度, 其可能的原因是试件固化后内部存在大量气孔。两组工艺参数打印结果表明, 线间融合充分时可以显著提升其力学性能。

### 4.3 圆柱形药柱打印模拟以及实验

为了验证最优打印间距的计算方法是否适用于非

直线堆叠情况, 仿真部分分别采用 5 组和 5# 组工艺参数, 模拟圆柱形药柱的打印过程, 实验部分采用相同的工艺参数打印圆柱形固体推进剂试样, 如图 14 所示, 仿真 14a~b 及实验结果 14c~d。结果表明, 采用修正后参数打印的药柱表面纹路更浅, 平整度高, 没有明显的融合不完全缺陷。改修正方法对非直线堆叠情况同样适用。

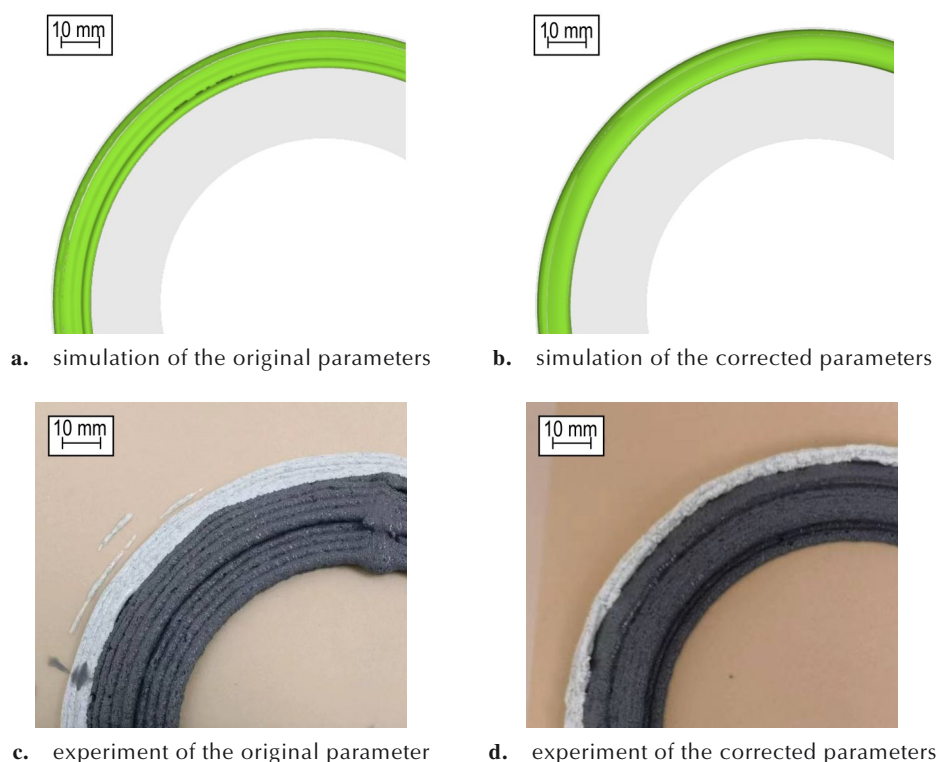


图 14 仿真及实验条件下的药柱质量

Fig.14 Surface quality of propellant grains under simulation and experimental conditions

## 5 结论

为了提高打印药柱的表面质量、避免缺陷形成, 基于动网格技术及 VOF 模型建立了固体推进剂药浆堆叠的仿真模型。对单线成型质量的影响因素进行了多组正交实验, 筛选出最优工艺参数组合并修正, 最后进行单层打印间距验证。对工艺参数的探讨可以得到以下结论:

(1) 提出了一种针对打印线间距的参数修正方法。单层打印矩形平面时, 打印参数经过修正, 其空余率降低了 13.6%, 降低幅度明显, 对应拉伸强度由 0.21 MPa 提升至 0.43 MPa, 试件密度由  $1.43 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  上升至  $1.65 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。将修正后的参数用于圆柱型药柱实验, 表面质量获得明显提升。

(2) 挤出速度对成型质量影响最大, 选取挤出速度时应考虑其对线宽、空余率以及打印效率的影响; 选取小挤出倍率和低打印高度的参数组合可以有效改善打印形状; 温度升高能改善药浆流平性能, 有效降低截面空隙生成, 但温度过高时可能导致药浆内部交联反应加剧, 实验室应将温度升高至  $55 \text{ }^\circ\text{C}$  以上以确保药浆的挤出过程流畅。

(3) 针对实验室条件下的 2 mm 喷嘴建立了线堆积仿真模型, 最优工艺参数应为挤出速度  $12 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、喷嘴高度 1.2 mm 以及打印温度  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ , 此时单线形态最接近理想情况。该结果是综合考虑线宽精度、截面空余率以及拐角处打印精度得到的。同时, 该仿真模型也可用于走线堆叠的预先模拟。

参考文献:

- [1] MCCLAIN M S, AFRIAT A, MONTANO B J, et al. Dynamic combustion of functionally graded additively manufactured composite solid propellant[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2021, 37(5): 725-732.
- [2] CHANDRU R A, BALASUBRAMANIAN N, OOMMEN C, et al. Additive manufacturing of solid rocket propellant grains[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2018, 34(4): 1090-1093.
- [3] 王璐, 苗楠, 赵永超, 等. 推进剂/绝热层一体化材料的增材制造工艺[J]. *航天制造技术*, 2022, 235(5): 34-36+40.  
WANG Lu, MIAO Nan, ZHAO Yong-chao, et al. Additive manufacturing process of solid propellant/insulation integrated material[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2022, 235(5): 34-36, +40.
- [4] MICHAEL C, ALIX C, NICHOLAS E, et al. 3D printer for paraffin based hybrid rocket fuel grains[C]//53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, Kissimmee, Florida, 2015:5-9.
- [5] SONG S, REN Q, TANG M, et al. A study on ultra-low-pressure ratio technology on the basis of 3D-printed propellant for a solid rocket motor[J]. *Aerospace*, 2023, 10(10): 862.
- [6] 王璐, 赵永超, 苗楠, 等. 复合固体推进剂直写式 3D 打印工艺及其性能[J]. *固体火箭技术*, 2021, 44(5): 650-655.  
WANG Lu, ZHAO Yong-chao, MIAO Nan, et al. Direct-writing 3D printing technology and characteristics of composite solid propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2021, 44(5): 650-655.
- [7] MCCLAIN M S, AFRIAT A, RHOADS J F, et al. Development and characterization of a photopolymeric binder for additively manufactured composite solid propellant using vibration assisted printing[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(6): 853-863.
- [8] MCCLAIN M S, GUNDUZ I E, SON S F. Additive manufacturing of ammonium perchlorate composite propellant with high solids loadings[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3): 3135-3142.
- [9] 周明月, 王立民, 梁导伦, 等. 复合固体推进剂与电阻式温度传感器一体化增材制造技术[J]. *含能材料*, 2022, 30(9): 927-936.  
ZHOU Ming-yue, WANG Li-ming, LIANG Dao-lun, et al. Integrated additive manufacturing technology of composite solid propellant and resistive temperature sensor[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2022, 30(9): 927-936.
- [10] 史钰, 任全彬, 黄谱, 等. 一种改性 HTPB 固体推进剂的流变特性及其 3D 打印成型[J]. *含能材料*, 2022, 30(8): 826-832.  
SHI Yu, REN Quan-bin, HUANG Pu, et al. Rheological properties and 3D printing of a modified-HTPB solid propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(8): 826-832.
- [11] JONES R D. Additive manufactured thermoplastic-aluminum nanocomposite hybrid rocket fuel grain and method of manufacturing same: US9822045B2[P]. 2016-09-25.
- [12] 史佳伟, 徐秉恒, 史宏斌, 等. 喷嘴结构及工艺参数对固体推进剂 3D 打印挤出成型的影响分析[J]. *固体火箭技术*, 2023, 46(5): 740-746.  
SHI Jia-wei, XU Bing-heng, SHI Hong-bin, et al. Analysis of nozzle structure and process parameters on 3D printing extrusion forming of solid propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2023, 46(5): 740-746.
- [13] 任礼, 白海清, 鲍骏, 等. FDM 型 3D 打印机喷嘴多目标优化设计[J]. *机床与液压*, 2022, 50(11): 154-160.  
REN Li, BAI Hai-qing, BAO Jun, et al. Multi-objective optimization design of FDM 3D printer nozzle[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2022, 50(11): 154-160.
- [14] 闻建龙, 王贞涛, 王晓英, 等. 工程流体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2023: 38-56.  
WEN Jian-long, WANG Zhen-tao, WANG Xiao-yin, et al. *Engineering fluid mechanics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2023: 38-56.
- [15] 潘丽萍, 王强, 贺铸. 实用多相流数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2020, 11-14.  
PAN Li-ping, WANG Qiang, HE Zhu, et al. *Practical multi-phase flow numerical simulation* [M]. Beijing: China Science Press, 2020, 11-14.
- [16] 江晓瑞, 李卓, 韩秀洁, 等. 固体推进剂药浆改进 Herschel-Bukely 模型及其在仿真分析中的应用[J]. *推进技术*, 2019, 40(9): 2137-2143.  
JIANG Xiao-rui, LI Zhuo, HAN Xiu-jie, et al. Ameliorated Herschel-Bukely model of solid propellant slurry and its application in simulation analysis[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(9): 2137-2143.
- [17] 周建刚. 基于 CFD 的 3D 打印混凝土可建造性与工艺参数相关度研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022.  
ZHOU Jian-gang. Study on correlation between constructability and process parameters of 3D printed concrete based on CFD[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2022.
- [18] 姜一帆, 赵凤起, 李辉, 等. 墨水直写增材制造技术及其在含能材料领域的研究进展[J]. *火炸药学报*, 2022, 45(1): 1-19.  
JIANG Yi-fan, ZHAO Feng-qi, LI Hui, et al. Direct ink writing technology for additive manufacturing and its research progress in energetic materials[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2022, 45(1): 1-19.
- [19] 肖磊, 王庆华, 李万辉, 等. 基于三维打印技术的纳米奥克托今与梯恩梯熔铸炸药制备及性能研究[J]. *兵工学报*, 2018, 39(7): 1291-1298.  
XIAO Lei, WANG Qing-hua, LI Wan-hui, et al. Preparation and performances of nano-HMX and TNT melt-cast explosives based on 3D printing technology[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(7): 1291-1298.
- [20] 行业标准-航天. QJ 924-1985: 复合固体推进剂单向拉伸试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.  
Industry Standard-Aerospace, QJ 924-1985: Unidirectional tensile test method for composite solid propellants[S] Beijing: China Standard Press, 1985.
- [21] 行业标准-航天. QJ 1616-1989: 复合固体推进剂交联密度测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.  
Industry Standard-Aerospace, QJ 1616-1989: Method for Determination of Crosslinking Density of Composite Solid Propellant[S] Beijing: China Standard Press, 1989.
- [22] 白永健, 陈赞, 张思, 等. 熔融沉积成型 3D 打印拉丝缺陷的正交实验研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2022(10): 2093-2103.  
BAI Yong-jian, CHEN Yun, ZHANG Si, et al. Orthogonal experiment of fused deposition molding 3D printing drawing defects[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2022, 56(10): 2093-2103.

- [23] 季丽, 黄爱玲. 统计学原理与SPSS应用[M]. 上海: 立信会计出版社, 2021: 283.  
JI Li, HUANG Ai-ling. The principles of statistics and applications of SPSS [M]. Shanghai: Lixin Accounting Publishing House, 2021: 283.
- [24] 王杰, 齐瑶, 祁威, 等. 高固含量热固性固体推进剂3D打印技术[J]. 固体火箭技术, 2024, 47(3): 397-404.  
WANG Jie, QI Yao, QI Wei, et al. 3D printing technology for high solid content thermoset solid propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2024, 47(3): 397-404.
- [25] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 412.  
LIU Si-feng. Grey systems theory and its applications[M]. Beijing: China Science Press, 2021: 412.

## Process Parameters of Single-Layer Stacking Process through 3D Printing of Solid Propellants

WANG Jia-wei<sup>1</sup>, SHI Hong-bin<sup>1</sup>, LIU Xuan-jie<sup>2</sup>, SONG Shi-xiong<sup>3</sup>, SHI Jia-wei<sup>1</sup>, WANG Qi-hu<sup>1</sup>

(1. The Institute of Xi'an Aerospace Solid Propulsion Technology, Xi'an 710025, China; 2. School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China; 3. Academy of Aerospace Solid Propulsion Technology, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** The process parameters have a direct impact on the 3D printing quality of solid propellant grains. To more reasonably adjust the 3D printing process parameters and improve printing quality, based on the single-layer stacking process, a numerical simulation method was employed to conduct an orthogonal experimental study on three influencing factors: extrusion speed, printing height, and printing temperature. The degree of influence of each factor was calculated through variance and range analysis. The grey relational analysis method was adopted for comparison, and the optimal combination of process parameters was selected after comprehensively considering the printing accuracy of special points. A method for calculating the printing line spacing based on single-line cross-sectional data was proposed for the first time, and simulation and experimental verification were conducted. The results indicated that the extrusion speed had the greatest impact on printing quality. When the extrusion speed was set to  $12 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , the nozzle height was 1.2 mm, and the printing temperature was  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ , the printed part exhibited optimal quality. After parameter adjustment, the tensile strength of the specimen increased from 0.21 MPa to 0.43 MPa, and the density rose from  $1.43 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  to  $1.65 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Single-layer printing simulations and experiments demonstrated a significant improvement in molding quality after parameter adjustment.

**Key words:** 3D printing; single-layer stacking process; parameter optimization; parameter correction

**CLC number:** TJ55;V435

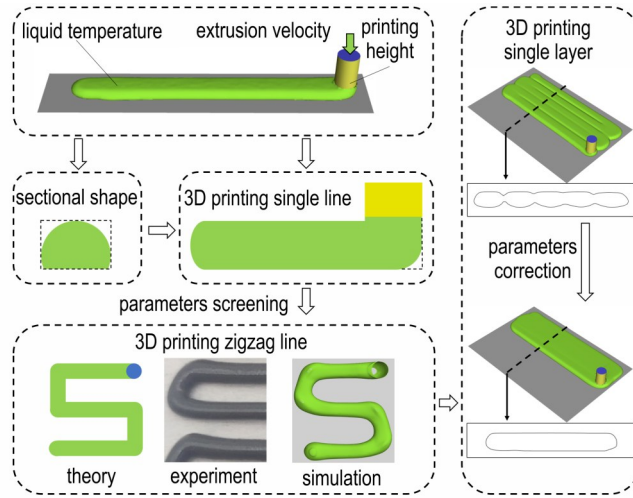
**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2024210

(责编: 高毅)



图文摘要：



Based on the characteristics of 3D printing technology, this study acquired cross-sectional geometric features from printed single lines and explored the influence of different process parameters on printing results. A combination of parameters with higher printing accuracy and better stacking effect was selected from multiple sets of process parameters, and a calculation method for printing line spacing was proposed. Simulation and experimental verification were conducted using the selected and revised parameters.