

# 先驱体陶瓷材料 3D 打印机螺杆挤出装置的设计与优化

李耀刚<sup>1</sup>, 叶晓濛<sup>1</sup>, 纪宏超<sup>1,2</sup>, 张雪静<sup>1</sup>, 郑 镭<sup>1,3</sup>

(1. 华北理工大学机械工程学院, 河北 唐山 063000; 2. 北京科技大学国家材料服役安全科学中心, 北京 100083;  
3. 河北农业大学机电工程学院, 河北 保定 071000)

**摘 要:** 针对陶瓷材料硬脆性带来的难以切削加工技术瓶颈, 开发了一种可用于 3D 打印先驱体陶瓷材料的工艺——热固沉积成型工艺 (thermo-setting modeling, TSM), 基于此工艺, 设计并优化了先驱体陶瓷材料 3D 打印机螺杆挤出装置. 首先, 确定了先驱体陶瓷材料配比并进行材料性质测试, 提出热固沉积成型工艺. 其次, 设计了先驱体陶瓷材料螺杆挤出装置并进行初步打印实验. 再次, 通过 ANSYS Fluent 仿真分析螺杆挤出装置在打印过程中内部流场的变化情况并为优化设计提供依据. 最后, 对螺杆挤出装置进行优化设计, 为了得到更高的打印精度, 将原有的 0.6 mm 喷头直径缩小至 0.5 mm; 仿真分析发现, 将螺杆转速由 40 r/min 提高至 60 r/min, 螺杆外径与机筒内壁的间隙由 0.50 mm 缩小至为 0.25 mm, 可使打印效率提高 49.1%, 并通过打印实验进行验证. 结果表明, 该螺杆挤出装置能够满足 3D 打印精度和效率要求并能打印出形状复杂的先驱体陶瓷零件, 为陶瓷材料零件的成型加工提供了一种途径和方法.

**关键词:** 3D 打印; 先驱体陶瓷材料; 热固沉积成型工艺; 螺杆挤出装置; 设计优化

中图分类号: TH 122; TQ 174

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2019)12-1173-08

doi: 10.11936/bjtxb2018060005

## Design and Optimization of the Screw Extrusion Device for a Precursor Ceramic Material 3D Printer

LI Yaogang<sup>1</sup>, YE Xiaomeng<sup>1</sup>, JI Hongchao<sup>1,2</sup>, ZHANG Xuejing<sup>1</sup>, ZHENG Lei<sup>1,3</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063000, Hebei, China;  
2. National Center for Materials Service Safety, University of Science and Technology Beijing Beijing, 100083, China;  
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, Hebei, China)

**Abstract:** Aiming at the bottleneck of difficult-to-cut machining technology brought about by the hard and brittle nature of ceramic materials, a process for 3D printing precursor ceramic materials—thermo-setting modeling (TSM) was developed. Based on this process, a 3D printer screw extruder for precursor ceramic materials was designed and optimized. First, the ratio of precursor ceramic materials was determined and the material properties were tested. According to this, a thermosetting deposition molding process was proposed. Second, the precursor ceramic material screw extrusion device was designed and the preliminary printing experiment was carried out. Third, through ANSYS Fluent simulation, the internal flow field of the screw extrusion device during the printing process was analyzed. It will provide the basis for optimized design. Finally, the screw extrusion device was optimized. To get higher printing accuracy, the original 0.6 mm nozzle diameter is reduced to 0.5 mm. Through the simulation analysis, the screw rotation speed increases from 40 r/min to 60 r/min, and the gap between the outer diameter of the screw and the inner wall of the barrel is reduced from 0.50 mm to 0.25 mm to improve the printing

收稿日期: 2018-06-08

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目 (E2017209059); 唐山市机械动力学基础创新团队 (18130216A)

作者简介: 李耀刚 (1962—), 男, 教授, 主要从事先进制造技术方面的研究, E-mail: jxlyg@ncst.edu.cn.

efficiency by 49.1% and verified by printing experiments. Results show that the screw extrusion device designed in this paper can meet the requirements of 3D printing accuracy and efficiency and can print complex ceramic parts with complex shapes. It provides a way and method for shaping ceramic parts.

**Key words:** 3D printing; precursor ceramic material; thermo-setting modeling (TSM); screw extrusion device; design and optimization

3D 打印又称为增材制造技术,通过“分层制造,逐层叠加”的原理将计算机中的三维模型打印成三维实体<sup>[1]</sup>. 3D 打印的出现改变了原有的生产、制造方式,将复杂的生产程序简单化. 相比传统的减材制造方式具有节约材料、降低成本的特点,还可以解决结构复杂零件难以加工的问题. 随着 3D 打印技术的不断成熟,3D 打印的研究重点已逐步由 ABS、PLA 等塑料材质转向更广泛的材料领域<sup>[2]</sup>,如:复合材料<sup>[3]</sup>、生物材料<sup>[4]</sup>、金属材料<sup>[5]</sup>、陶瓷<sup>[6]</sup>等. 陶瓷材料具有高硬度、高强度、低密度、耐高温、抗腐蚀等优异性能成为研究的重点<sup>[7-9]</sup>.

基于挤出工艺的增材制造技术成本低廉、适用材料广泛、工艺容易控制,为多种陶瓷零件的制造提供了有效的方法,尤其适合于形状复杂的零件,发展前景广阔,是陶瓷增材制造的主要方法之一. 现阶段关于陶瓷材料 3D 打印研究主要偏向于成型工艺方面. 刘骥远等<sup>[10]</sup>采用活塞挤出装置分析了在不同的挤出压力、分层厚度、打印速度等工艺参数下氧化铝陶瓷材料的打印效果,最终打印出了表面精度较高的陶瓷零件. Shao 等<sup>[11]</sup>基于 3D 凝胶打印工艺使用螺杆挤出装置制备的氧化铝陶瓷零件,具有规则外观,打印陶瓷零件的表面粗糙度为  $8.9 \mu\text{m}$ . 但这些研究在挤出装置的设计方面并未进行深入的讨论.

在打印材料方面,根据材料类别主要分为水基材料和有机物基材料两大类. 水基陶瓷材料是以水或水溶液作为液相成分与陶瓷粉混合配制而成的材料, Huang 等<sup>[12]</sup>开发的冷冻挤出成型工艺将水基陶瓷膏体挤出到冷冻环境下的工作台上,由于低温环境水基挤出体不用有机黏结剂也可迅速固化成形,从而提高了膏体的成形性能,避免了因变形而形成的缺陷. 挤出体逐层堆积,直至完成所需成形的三维陶瓷制件,全过程只含有少量有机添加剂,制造过程更加环保. 有机物基陶瓷材料是以有机聚合物为液相成分,与陶瓷粉混合制备的先驱体陶瓷光敏材料,直接成型出线条直径为  $300 \mu\text{m}$  的木堆结构,紫外光辐射后坯体固

化,  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  烧结成致密陶瓷,该陶瓷材料优势在于成型固相成分含量可控、可在分子领域对陶瓷性能进行设计、固化速度可控. 国防科技大学马青松课题组<sup>[14-16]</sup>对陶瓷微粉、纤维增韧陶瓷、耐高温陶瓷等方面的多种先驱体陶瓷进行了长期大量研究,制备了耐高温  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$  的航空陶瓷以及纤维增韧的 SiC 陶瓷等. 本文所用先驱体陶瓷材料为有机物基陶瓷材料.

3D 打印机中材料挤出装置是最核心部件,其肩负着精确、定量传送材料的任务. 丁承君等<sup>[17]</sup>改进了陶瓷 3D 打印机喷头结构,使其实现连续供料. Drotman<sup>[18]</sup>设计了 3D 打印机螺杆挤出装置,能够实现  $0.2 \text{ mm}$  的喷头直径挤出,最大出口速度为  $7.14 \text{ mm/s}$ ,但使用的是树脂材料.

本文开发了基于挤出技术的热固沉积成型工艺,以陶瓷先驱体为液相成分、煅烧高岭土为固相成分制备打印材料,设计了 3D 打印机螺杆挤出装置并成功进行了陶瓷零件的打印. 最后,对螺杆挤出装置的结构和工艺参数进行优化,在提高打印精度的同时实现了打印效率的提高.

## 1 3D 打印陶瓷材料

### 1.1 先驱体陶瓷材料配比

将含氢硅油充当交联剂加入到乙烯基硅油中,再加入适量的氯铂酸和甲基丁炔醇. 氯铂酸作为催化剂用于促进乙烯基硅油和含氢硅油的硅氢加成反应;甲基丁炔醇作为抑制剂用于抑制先驱体陶瓷材料过早凝固. 最后,将 8000 目煅烧高龄土逐渐加入到上述混合溶液中搅拌均匀制得先驱体陶瓷材料,如图 1 所示. 由于该陶瓷材料通过温度控制其固化时间故将该成型工艺称为热固沉积成型工艺 (thermo-setting modeling, TSM).

### 1.2 材料黏度参数测定

打印所用材料表现出明显的非牛顿流体性质,为进一步掌握其性质,通过转矩流变仪测得不同剪切速率下对应的剪切应力,再由测得的各离散点拟合出剪切应力随剪切速率的变化曲线,如图 2 所示. 并得出剪切速率与剪切应力的关系式



图 1 先驱体陶瓷材料

Fig. 1 Precursor ceramic slurry

$$\tau = 28.8 + 7.0895\dot{\gamma}^{1.21129}$$

式中:  $\tau$  为剪切应力;  $\dot{\gamma}$  为剪切速率。

拟合精度为 99.98%, 该关系式与屈服胀塑性流体的剪切应力、剪切速率关系式一致, 即当剪切速率为零时剪切应力为非零常数, 当剪切应力大于屈服值时, 呈现出与胀塑性流体类似的性质。可以得出该流体类型为屈服胀塑性非牛顿流体。

根据流体黏度公式

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

可求得不同剪切速率下所对应的材料的动力黏度, 式中:  $\eta$  为流体动力黏度;  $\tau$  为剪切应力;  $\dot{\gamma}$  为剪切速率。

根据各离散点拟合出动力黏度随剪切速率的变化曲线, 如图 3 所示, 并得出剪切速率和材料动力黏度的关系式

$$\eta = \frac{28.5}{\dot{\gamma}} + 7 \left( \frac{\dot{\gamma}}{0.9} \right)^{0.21}$$

式中:  $\eta$  为流体动力黏度;  $\dot{\gamma}$  为剪切速率。

拟合精度为 99.986%, 符合 Herschel-Bulkley 模型公式

$$\eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k \left( \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right)^{n-1}$$

式中:  $\eta$  为流体动力黏度;  $\dot{\gamma}$  为剪切速率;  $\tau_0$  为屈服应力;  $\dot{\gamma}_c$  为临界剪切速率;  $k$  为一致性指数;  $n$  为幂律指数, 当  $n < 1$  时, 流体呈剪切变稀性质,  $n > 1$  时, 流体呈剪切变稠性质, 当  $n = 1$  时, 该模型则是牛顿流体的流变模型。

可以看出, 打印实验所使用的先驱体陶瓷材料幂律指数为 1.21, 表明该材料具有剪切变稠性质; 屈服应力值为 28.5 Pa; 临界剪切应力值为  $0.9 \text{ s}^{-1}$ ; 所测得的最大黏度值为  $35.9 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 最小

黏度值为  $14.7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 可以看出该材料具有较高黏度。

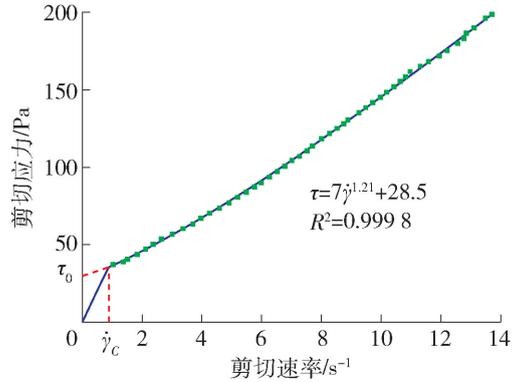


图 2 剪切应力随剪切速率的变化关系

Fig. 2 Relationship between shear stress and shear rate

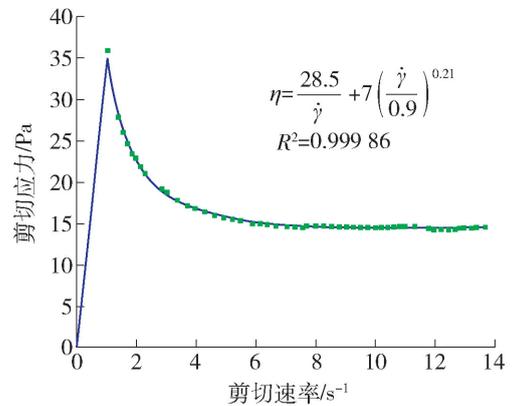


图 3 动力黏度随剪切速率的变化关系

Fig. 3 Relationship between dynamic viscosity and shear rate

### 1.3 材料可压缩性参数测定

在打印过程中, 为了使材料能够根据打印速度要求从喷头流出, 需为待挤出的材料提供足够压强。该压强可使材料产生微小的压缩变形, 虽然压缩量微乎其微但通过直径为  $0.6 \text{ mm}$  的喷头时也是不可忽略的, 因此必须对材料的体积弹性模量进行测试。

实验利用简易的柱塞挤出装置完成, 柱塞挤出装置通过施加压力实现材料的挤出, 在料仓微小体积变化方面具有较高的控制精度, 能够满足材料体积模量测试要求。将贴片式压力传感器埋于容积  $200 \text{ mL}$  的柱塞挤出装置并将出口封闭, 根据液体体积模量原理公式

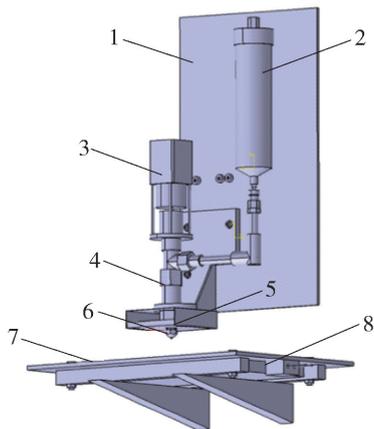
$$K = -\frac{V\Delta p}{\Delta V}$$

式中:  $K$  为体积弹性模量;  $V$  为初始体积;  $\Delta p$  为压强变化量;  $\Delta V$  为体积变化量。

测得,当料仓内的材料体积总变形量 $\Delta V = -10 \text{ mm}^3$ 时,仓内压强提升, $\Delta p = 8.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,此时材料的液体体积弹性模量 $K = 1.7 \times 10^{10} \text{ Pa}$ .

## 2 螺杆挤出装置的设计

先驱体陶瓷材料3D打印机的核心部件是打印机的材料挤出装置,其设计应该保证在打印过程中出料连续、稳定、不发生断料和出料过多的问题.本文设计的材料挤出装置为螺杆挤出装置,其装配图如图4所示.此外还有为料仓内的材料流动提供动力的空气压缩机和调节输入给料仓气压的压力表.料仓的上端开口处接入塑料管,塑料管连接压力表和空气压缩机;下端出料口连接的塑料管使材料能够进入螺杆.打印时需开启空气压缩机,通过压力表读数控制气体压力,使料仓中的活塞产生推力,保证材料始终充满螺杆.打印开始时在电机的驱动下,螺杆旋转产生轴向分力实现材料输送,使材料从喷头流出,并通过加热装置实现固化.



1—打印机机架;2—料仓;3—步进电机;4—螺杆;5—上加热装置;6—喷头;7—打印机底板;8—下加热装置.

图4 螺杆挤出装置装配图

Fig. 4 Screw extrusion device assembly drawing

确保材料能够顺利挤出的重要装置是螺杆,其作用是为内部的材料提供挤出压力迫使材料从0.6 mm的喷头处挤出.将该螺杆设计为等距螺杆,长92 mm,螺距12 mm,内径8 mm,螺杆槽深2 mm,螺杆外径与机筒内壁的间隙为0.5 mm,入口直径为6.5 mm.螺杆内部结构如图5所示.

## 3 打印实验

根据所设计的螺杆挤出装置进行零件加工和组装,如图6所示,利用CATIA绘制需要打印的长5.5 cm宽1.5 cm,高1.0 cm长方体模型并将该模型

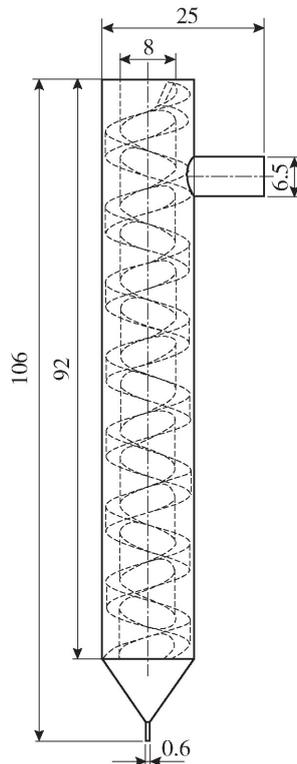
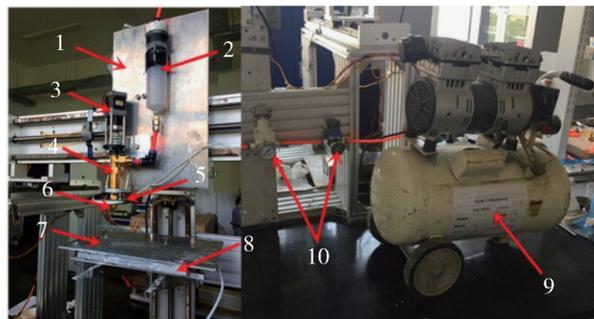


图5 螺杆内部结构图(单位:mm)

Fig. 5 Internal structure of the screw device (unit: mm)

导入到切片软件中,在切片软件中可以将导入的模型旋转到最适合的打印角度,设置层高0.4 mm,打印速度11 mm/s,切片分层生成G代码并导入到3D打印机控制设备中.将先驱体陶瓷材料加满料仓,压入活塞,反复振动料仓排出空气;开启空气压缩机,将压力表读数调整至0.01 MPa;开启加热装置,将加热温度控制在130℃左右以确保打印样品能够实现固化.最后,启动3D打印机完成打印实验.



1—打印机机架;2—料仓;3—步进电机;4—螺杆;5—上加热装置;6—喷头;7—打印机底板;8—下加热装置;9—空气压缩机;10—压力表.

图6 螺杆挤出装置

Fig. 6 Screw extrusion device

利用螺杆挤出装置打印的先驱体陶瓷零件,如

图 7 所示. 可以看出, 打印样品没有缺陷和变形, 陶瓷零件侧壁面纹理清晰, 层次分明, 从正面可以清晰地看出打印过程中的填充样式.



图 7 先驱体陶瓷零件

Fig. 7 Precursor ceramic parts

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真模型的建立

本文运用 CATIA 三维建模软件进行螺杆的建模. 创建整个流道的三维模型, 并对入口区域进行加长处理. 然后通过 CATIA 与 ANSYS ICEM 之间的接口, 把实体模型导入. 运用布尔运算的方法把流场分为入口区域、静止区域、螺旋区域、出口区域 4 个部分, 分别进行网格划分并用 interface 面连接, 如图 8 所示. 入口区域和出口区域采用结构六面体网格划分; 螺旋区域和静止区域形状复杂故采用非结构四面体网格划分, 网格总数为 3 524 133.

将划分好的网格模型导入 Fluent 软件对螺杆挤出装置的挤出过程进行数值模拟. 由于先驱体陶瓷材料的流变模型可用 Herschel-Bulkley 模型描述, 所以设置黏度时选用 Herschel-Bulkley 模型; 根据材料可压缩性测定结果, 设置密度时选用 compressible liquid, 参考压力为 101 325 Pa, 参考密度为 1 538 kg/m<sup>3</sup>, 液体体积弹性模量为 17 GPa. 在室温下挤出成型; 根据雷诺公式估算该挤出成型过程为层流流动. 根据实验过程中压力表读数将入口压力设置为 0.01 MPa, 设置出口压力值为 0 Pa. 由于螺杆挤出装置的螺杆是转动的, 利用相对运动的原理, 假设螺杆附近区域流体即螺旋区域流体与螺杆转速相同, 设置为动网格模型 (mesh motion); 远离螺杆的流体区域即静止区域流体是静止的; 并按照非定常流分析计算. 根据实验情况设置螺杆转速为 40 r/min.

本文选用分离式算法的压力基求解器, 进行瞬态求解计算, 求解控制方程选用稳健性较好的

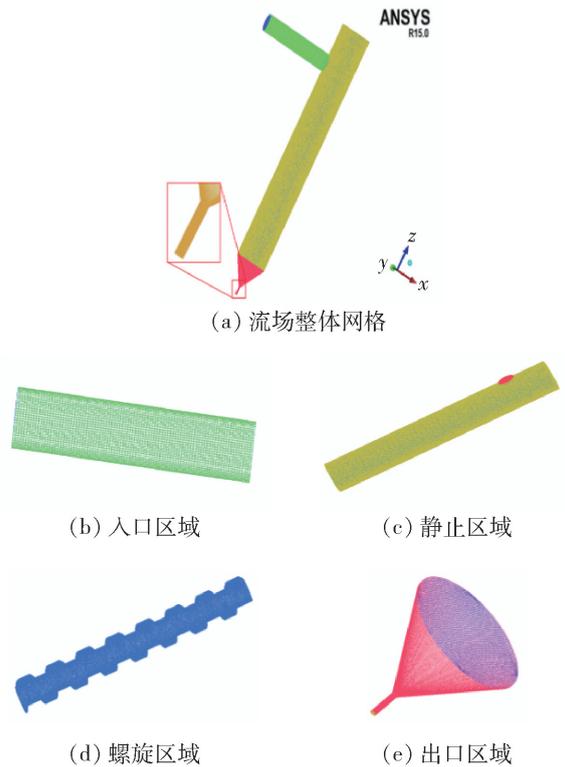


图 8 螺杆装置内流场网格

Fig. 8 Internal flow field mesh of the screw device

SIMPLE 算法, 二阶迎风格式相比与一阶迎风格式求解精度高, 在求解过程中并没有出现收敛困难或发散的情况, 所以选用二阶迎风格式进行计算.

### 4.2 仿真结果分析

通过仿真分析可以得到螺杆挤出装置在打印过程中内部流场的变化情况并为优化设计提供依据. 对螺杆挤出装置在停止转动和恢复转动情况下出口平均流速的变化情况进行仿真, 该情况在打印方向改变时发生, 例如打印模型的转角处. 当打印方向改变时打印速度降低, 这时为了保证出料量均匀, 螺杆停止转动, 能否迅速控制出料量是决定打印精度的关键, 如果不能迅速控制出料量将会导致陶瓷零件表面因过度填充而凸起, 打印的陶瓷零件越厚, 表面越不平整. 打印方向完成改变后, 打印速度提高, 螺杆恢复转动, 此时如果出口流速不能及时恢复至螺杆停转前水平就会出现因材料填充过少而使打印模型凹陷, 导致打印失败.

螺杆挤出装置在停止-启动状态下的出口流速变化情况如图 9 所示. 可以看出, 在打印速度改变前 0.05 s 出口流速已经达到稳定状态, 平均流速为 10.81 mm/s. 随后螺杆停止转动出口平均流速仅用 0.23 s 的时间就从 10.81 mm/s 下降到了 2.25 mm/s,

迅速的控制了出料量,避免了过度填充的出现. 最后打印方向完成改变,螺杆恢复转动,出口平均流速仅用0.1 s便上升至10.7 mm/s,与螺杆停转前流速相当,这表明螺杆挤出装置能够迅速控制出料量以满足3D打印的需要.

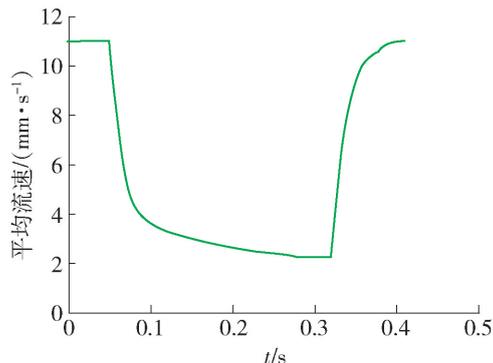


图9 螺杆挤出装置在停止-启动状态下出口流速

Fig.9 Outlet flow rate of screw extrusion device in the stop-start state

#### 4.3 网格无关性验证

实验中3D打印机的打印速度为11 mm/s与仿真中螺杆挤出装置最大出口流速10.81 mm/s相近表明了仿真结果的准确性. 为了进一步阐释仿真结果的合理性,排除网格数量对仿真结果的影响进行网格无关性验证. 在0.6 mm喷头直径下的同一模型,相同边界条件下划分不同数量的网格,网格数量分别为103万、187万、265万、352万、410万. 比较不同网格数量下的出口平均流速最大值,如表1所示. 当网格数量超过265万后,相对标准偏差小于3%. 说明265万网格满足计算精度要求,最终选用的是352万网格.

表1 网格数量与出口流速关系

Table 1 Relationship between mesh quantity and outlet flow rate

网格数量/万	出口平均流速/ (mm·s <sup>-1</sup> )	相对标准差/ %
103	7.70	
187	9.45	18.52
265	11.81	19.99
352	12.01	1.67
410	12.14	1.10

## 5 优化设计

打印速度和喷头直径是影响打印效率和打印模

型质量的2个关键参数. 喷头直径大小影响打印模型线条的粗细,喷头直径越小,打印模型线条越细,成型精度也就越高. 打印速度的快慢取决于出口流速的大小,出口流速大则打印速度也随之提高,否则打印线条就会出现间断或者过粗的缺陷.

为了提高打印精度,将螺杆挤出装置喷头直径缩小为0.5 mm,通过仿真分析确定螺杆挤出装置在停止-启动状态下的出口流速变化情况. 喷头直径由0.6 mm减小至0.5 mm,出口处最高平均流速由10.81 mm/s下降至7.40 mm/s,下降了31.54%,相应的打印速度也随之下落,打印效率降低. 将喷头直径缩小到0.4 mm,打印精度可进一步提高,但是在试验中喷头极易发生堵塞,挤出装置在打印实验后的清洁要求大幅提高,实验成本上升,因此仅将喷头直径缩小至0.5 mm研究.

为了保证在提高打印精度的同时提高打印效率,分别对螺杆转速、槽深、螺距及长度、螺杆外径与机筒内壁的间隙4个关键参数进行探究.

提高螺杆转速可以增加螺杆挤出装置内部压力进而提高出口流速. 将螺杆转速提高至50 r/min和60 r/min观察出口流速变化情况,仿真结果如图10所示. 当螺杆转速提高至50 r/min时出口流速提高至8.90 mm/s;当转速提高至60 r/min出口流速可提高至11.04 mm/s.

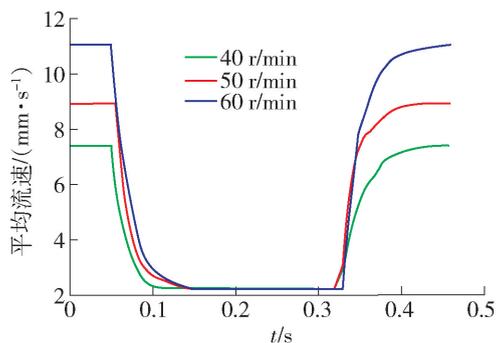


图10 不同转速下出口平均流速

Fig.10 Average outlet flow rate at different speeds

改变螺杆外径与机筒内壁间隙的大小也会对出口流速产生较大影响. 如图11所示,当间隙由0.50 mm增大至0.75 mm时,出口平均流速仅能达到5.01 mm/s;当间隙缩小至0.25 mm时,出口平均流速便可增大到10.68 mm/s. 由此可见缩小螺杆外径与机筒内壁间隙可以增大出口流速提高打印效率. 另一方面,螺杆外径与机筒内壁间隙越小,在螺杆停转时,出口流速降低的越慢;而螺杆恢复转动时,出口流速增加的越快,这说明该间隙可以起到释

放螺杆挤出装置内部压强的作用,这也是该装置能够快速控制出料量的重要原因。

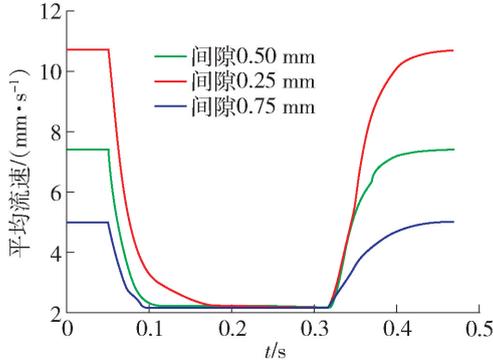


图 11 不同间隙下出口平均流速

Fig. 11 Average outlet flow rate at different gaps

改变螺杆的螺距和长度,希望通过增加螺杆变距段为螺杆挤出装置内部材料提供更大的压强以提高出口流速,将螺杆变距段长度设计为 10 mm,螺距由 12 mm 变为 24 mm. 改变螺杆槽深,分别将螺杆槽深改为 3 mm 和 1 mm 进行研究. 但是,通过仿真分析得出,改变这 2 个因素并未对出口流速的提高有积极作用,因而忽略这 2 个参数对打印带来的影响,保持原参数不变。

整合优化结果,将螺杆挤出装置的喷头直径改为 0.5 mm,转速提高至 60 r/min,螺杆外径与机筒内壁间隙缩小至 0.25 mm 进行仿真分析. 仿真结果如图 12 所示,最大出口流速可达 15.07 mm/s,由此可将打印速度设置为 15 mm/s,达到了既提高了打印质量又提高了打印效率的优化目的。

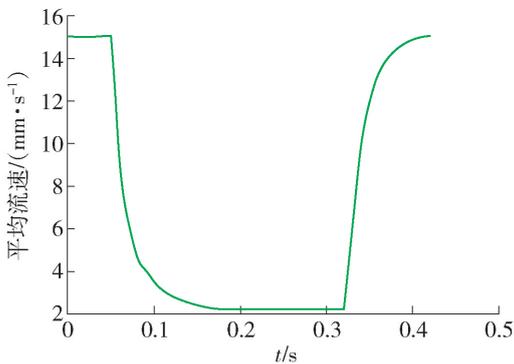


图 12 优化后的螺杆挤出装置在停止-启动状态下出口流速

Fig. 12 Outlet flow rate of optimized screw extrusion device in the stop-start state

根据优化后的结果对螺杆挤出装置进行改进并通过打印实验验证. 打印模型如图 13 所示,可以看出,经过优化后的螺杆挤出装置能够打印出形状复

杂的先驱体陶瓷材料零件,打印出的零件表面质量好,成型精度高,打印速度快,满足了先驱体陶瓷 3D 打印机材料挤出装置的设计要求。

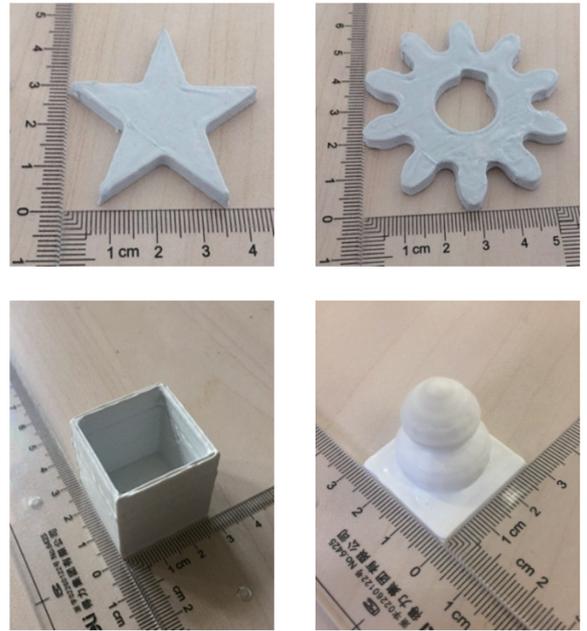


图 13 优化后打印出的陶瓷零件

Fig. 13 Printed ceramic parts after optimization

## 6 结论

1) 根据先驱体陶瓷材料的热固性开发了基于挤出技术的热固沉积成型工艺并得到应用. 通过材料性质测试可知打印所用材料为黏度大,流动性好且具有一定可压缩性的屈服胀塑性非牛顿流体。

2) 使用长 92 mm、螺距 12 mm、内径 8 mm、槽深 2 mm、螺杆外径与机筒内壁的间隙为 0.25 mm、转速 60 r/min 的螺杆挤出装置打印出的先驱体陶瓷零件表面平整、纹理清晰、层次分明,成型精度较高,可以打印出形状复杂的陶瓷零件。

3) 3D 打印中出料速度与打印速度不匹配,会造成打印面不平,形成打印缺陷,所以材料的出料速度对打印质量存在明显的影响. 螺杆挤出装置能够精确控制出料量以满足 3D 打印的需要。

4) 通过对螺杆转速、槽深、螺距及长度、螺杆外径与机筒内壁的间隙 4 个关键参数进行研究,发现只有螺杆转速和螺杆外径与机筒内壁的间隙能够显著影响出料速度,增大螺杆转速和减小间隙能够显著提高出口流速,提高打印效率. 此外,螺杆外径与机筒内壁的间隙可以起到释放螺杆挤出装置内部压强的作用。

## 参考文献:

- [1] LIU N, GUO H, FU L, et al. Three-dimensional photonic metamaterials at optical frequencies[J]. *Nature Materials*, 2008, 7(1): 31-37.
- [2] 杨孟孟, 罗旭东, 谢志鹏. 陶瓷3D打印技术综述[J]. *人工晶体学报*, 2017, 46(1): 183-186.  
YANG M M, LUO X D, XIE Z P. Review of 3D printing technology of ceramic[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2017, 46(1): 183-186. (in Chinese)
- [3] GE Q, QI H J, DUNN M L. Active materials by four-dimension printing[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(13): 68-225.
- [4] YAN Y, WANG X, PAN Y, et al. Fabrication of viable tissue-engineered constructs with 3D cell-assembly technique[J]. *Biomaterials*, 2005, 26(29): 5864-5871.
- [5] 张阳军, 陈英. 金属材料增材制造技术的应用研究进展[J]. *粉末冶金工业*, 2018, 28(1): 63-67.  
ZHANG Y J, CHEN Y. Research on the application of metal additive manufacturing technology [J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2018, 28(1): 63-67. (in Chinese)
- [6] LOUS G M, CORNEJO I A, MCNULTY T F, et al. Fabrication of piezoelectric ceramic/polymer composite transducers using fused deposition of ceramics [J]. *Mrs Proceedings*, 2000, 542(1): 124-128.
- [7] 黄森俊, 伍海东, 黄容基, 等. 陶瓷增材制造(3D打印)技术研究进展[J]. *现代技术陶瓷*, 2017, 38(4): 248-266.  
HUANG M J, WU H D, HUANG R J, et al. A review on ceramic additive manufacturing (3D printing) [J]. *Advanced Ceramics*, 2017, 38(4): 248-266. (in Chinese)
- [8] 苗赫濯, 林旭平, 齐龙浩. 先进结构陶瓷材料研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(增刊1): 14-19.  
MIAO H Z, LIN X P, QI L H. The progress of research on advanced structural ceramics [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37 (Suppl1): 14-19. (in Chinese)
- [9] 熊亮萍, 许云书. 陶瓷先驱体聚合物的应用[J]. *化学进展*, 2007, 19(4): 567-574.  
XIONG L P, XU S Y. Application of preceramic polymers [J]. *Progress in Chemistry*, 2007, 19(4): 567-574. (in Chinese)
- [10] 刘骥远, 吴懋亮, 蔡杰, 等. 工艺参数对3D打印陶瓷零件质量的影响[J]. *上海电力学院学报*, 2015, 31(4): 376-380.  
LIU J Y, WU M L, CAI J, etc. Influence of operating parameters on 3D printing ceramic parts[J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2015, 31(4): 376-380. (in Chinese)
- [11] SHAO H, ZHAO D, LIN T, et al. 3D gel-printing of zirconia ceramic parts[J]. *Ceramics International*, 2017, 43: 13938-13942.
- [12] HUANG T, MASON M S, ZHAO X, et al. Aqueous-based freeze-form extrusion fabrication of alumina components [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2009, 15(2): 88-95.
- [13] LI Y Y, LI B, SUN J B, et al. Direct write assembly of 3-dimensional structures with aqueous-based piezoelectric inks [J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 512-515: 390-394.
- [14] 马青松, 简科, 陈朝辉, 等. 溶胶-凝胶法合成氧化铝-氧化硅纳米粉[J]. *国防科技大学学报*, 2002, 24(4): 25-28.  
MA Q S, JIAN K, CHEN Z H, et al. Synthesis of alumina-silicon dioxide nanopowders via sol-gel process [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2002, 24(4): 25-28. (in Chinese)
- [15] 马青松, 陈朝辉, 郑文伟, 等. 先驱体转化法制备连续纤维增强陶瓷基复合材料的研究[J]. *材料科学与工程学报*, 2001, 19(4): 110-115.  
MA Q S, CHEN Z H, ZHENG W W, et al. Research and development of continuous-fiber-reinforced ceramic matrix composites fabricated by precursor-infiltration-pyrolysis[J]. *Materials Science and Engineering*, 2001, 19(4): 110-115. (in Chinese)
- [16] 马青松, 陈朝辉, 郑文伟, 等. 热压辅助先驱体裂解制备的三维/Si-O-C复合材料的微观结构与力学性能[J]. *航空材料学报*, 2004, 24(5): 26-30.  
MA Q S, CHEN Z H, ZHENG W W, et al. Microstructure and mechanical properties of carbon fiber reinforced silicon oxycarbide composites fabricated via hot-pressing assisted pyrolysis of polysiloxane [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2004, 24(5): 26-30. (in Chinese)
- [17] 丁承君, 吴畏, 朱智辉. 陶瓷3D打印机喷头结构与仿真分析[J]. *天津工业大学学报*, 2017, 36(4): 84-88.  
DING C J, WU W, ZHU Z H. Structure design and simulation analysis of ceramic 3D printer nozzle [J]. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2017, 36(4): 84-88. (in Chinese)
- [18] DROTMAN D T J. Design of a screw extruder for additive manufacturing[D]. San Diego: University of California, 2015.

(责任编辑 杨开英)