

# 基于数字微喷的金属粉末三维打印实现方法研究

高宇<sup>1</sup>, 杨建飞<sup>1</sup>, 邱鑫<sup>1</sup>, 程继红<sup>1</sup>, 郭爱琴<sup>1</sup>, 杨继全<sup>1</sup>, 王浩亮<sup>2</sup>, 刘训<sup>1</sup>

(1. 南京师范大学江苏省三维打印装备与制造重点实验室, 江苏 南京 210042)

(2. 江苏远东电机制造有限公司, 江苏 泰州 225500)

**[摘要]** 金属三维打印能够实现复杂功能零件直接制造与净近成型, 具有广阔的应用前景和重要的研究价值。在高精度金属三维打印领域目前以选择性激光烧结(SLS)工艺为主, 但由于选择性激光烧结工艺的设备成本高、模型成型时间长、金属粉末材料选择范围窄等原因, 限制了其应用范围。本文提出一种“基于数字微喷与 UV 光固化相结合的金属粉末三维打印”实现方法, 开发出一套完整的硬件平台与软件系统, 并进行了相关的实验, 验证了工艺的可行性和开发系统的可靠性。该方法为金属三维打印提供了新的实现方法, 具有较高的研究价值和意义。

**[关键词]** 金属粉末三维打印, 数字微喷, 三维喷墨打印, UV 光固化

**[中图分类号]** TP204 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2017)03-0001-06

## Research on the Realization method of 3D Printing System of Metal Powder Based on Digital Micro Injection

Gao Yu<sup>1</sup>, Yang Jianfei<sup>1</sup>, Qiu Xin<sup>1</sup>, Cheng Jihong<sup>1</sup>, Guo Aiqin<sup>1</sup>, Yang Jiquan<sup>1</sup>, Wang Haoliang<sup>2</sup>, Liu Xun<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of 3D Printing Equipment and Manufacturing, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

(2. Jiangsu Yuandong Motor Manufacturing Co., Ltd, Taizhou 225500, China)

**Abstract:** Metal printing can realize the direct manufacturing and near net forming of complex functional parts, which has a wide application and an important research value. In the field of high precision 3D metal printing, selective laser sintering (SLS) is the main technology. However because of the high cost of the selective laser sintering process, the long molding time and the narrow range of the metal powder material, the application of this technology is limited. This paper presents a new method of 3D printing of metal powder based on digital micro jet and UV light curing, and develops a complete hardware platform and software system. Experiments are carried out to verify the feasibility and reliability of the system. The method for 3D metal printing provides a new method, which has the relatively high research value and significance.

**Key words:** three dimensional printing of metal powder, digital micro injection, three dimensional inkjet printing, UV light curing

三维打印技术是一种基于离散-堆叠原理的快速成型技术, 又称为增材制造<sup>[1]</sup>。三维打印成型工艺较多, 应用领域不同, 能实现金属粉末成型的工艺包括三维喷射打印(three-dimensional printing, 3DP)、选择性激光烧结(selective laser sintering, SLS), 这两种工艺的成型方法和模型的成型效果不同, 各自对应的应用领域也不同。

SLS 是金属粉末成型研究的热点, 是一种采用激光有选择地分层烧结固体粉末, 并使烧结成型的固化层层叠加生成所需要形状零件的技术<sup>[2-3]</sup>。美国 3D Systems 公司在 2016 年 1 月推出的 ProX DMP 320 直接金属 3D 打印机能够打印的最大尺寸为 275 mm×275 mm×420 mm, 缩短了产品生产周期, 提高了金属零部件的质量和性能, 在航空航天、汽车和医疗等领域得到了广泛的应用<sup>[4-5]</sup>。

3DP 工艺的打印过程与 SLS 类似, 不同之处是用喷头代替了激光器喷射粘结剂粘结粉末材料。首先

收稿日期: 2017-03-10。

基金项目: 江苏省政策引导类计划(产学研合作)——前瞻性联合研究项目(BY2016001-01)、南京师范大学青蓝工程(184080H10371)。

通讯联系人: 杨建飞, 副教授, 研究方向: 三维打印。E-mail: 631056602@qq.com

铺粉辊筒铺平一层粉末,喷头按照计算机发送的指令在铺好的粉材上有选择性地喷射粘结剂,喷有粘结剂的粉末被粘结在一起,其他地方作为支撑,层层粘结后去除未粘结的粉末就得到一个实体模型<sup>[6]</sup>. 3DP 工艺省去了模具设计、制造环节,可直接制作任意复杂形状 of 模型,不受模具加工工艺限制,缩短了产品生产周期,提高了生产效率<sup>[7-8]</sup>.

本文在研究 3DP 工艺实现金属打印的同时引入 UV 光固化成型工艺(SLA)来提高金属模型的成型效果. 光固化成型工艺中 UV 树脂在紫外光照射下能快速固化,固化后模型强度高,收缩率小,成型精度高<sup>[9]</sup>. 本文将 UV 树脂作为粘结剂,运用数字微喷技术<sup>[10]</sup>,不仅能够大幅提升打印精度和速度,还能提高粘结剂的利用率,相比 SLS,该工艺打印过程中材料选择范围宽,操作简便,可用于大尺寸零件的直接成型.

### 1 工艺流程及其系统硬件实现

本文根据 3DP 工艺的成型原理结合 UV 光固化工艺设计了如图 1 所示的工作流程. 首先将建立的三维实体模型导入切片软件中生成 G 代码指令文件,指令文件再通过计算机识别翻译来控制各个系统协调工作. 当打印完一层后 UV 紫外灯照射固化,固化后 UV 灯关闭,成型槽下降,供粉槽上升,辊筒铺粉,开始下一层打印,直至模型打印完毕. 硬件结构如图 2 所示<sup>[11]</sup>.

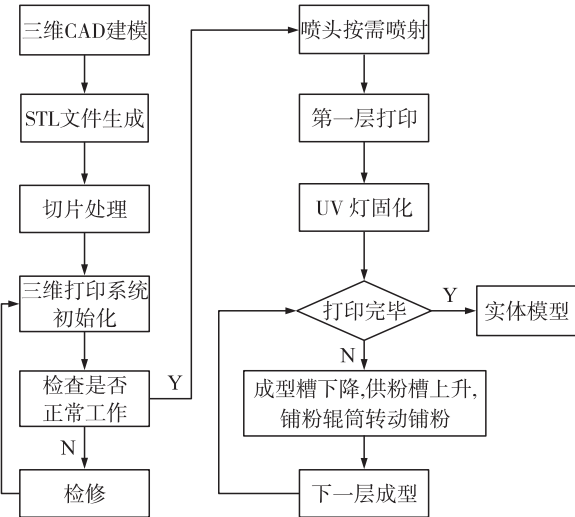
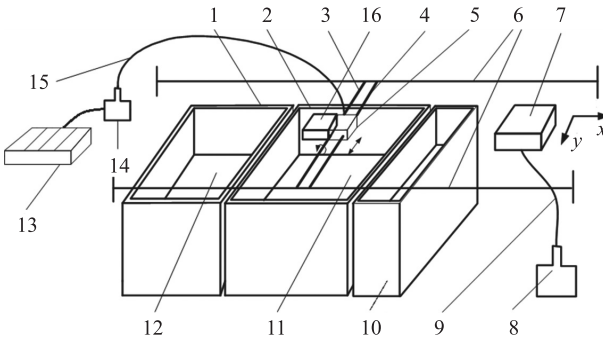


图 1 3DP 工艺打印流程图

Fig. 1 The flow chart of 3DP process



1. 供粉槽;2. 成型槽;3. 旋转滑辊;4. X 轴直线导轨;5. 打印喷头;6. 打印喷头托架导轨;7. 打印喷头清洗槽;8. 废液槽;9. 回收管;10. 回收缸;11. 成型槽活塞;12. 供粉槽活塞;13. 供墨箱;14. 供墨管;15. 供墨泵;16. UV 灯

图 2 硬件系统结构

Fig. 2 Hardware system structure

#### 1.1 喷墨系统

喷墨系统是硬件系统的核心,其控制精度直接影响最终模型的成型效果. 本系统采用基于数字微喷技术的压电式单喷头,具有喷射微滴大小、速度可控等优点.

本文采用的数字式压电喷头为 PZT-JET5010,参数如表 1 所示,外观如图 3 所示,该喷头打印精度较高,适用范围广.

表 1 压电式喷射点胶阀参数

Table 1 Piezoelectric nozzle parameters

最大点胶频率/Hz	最大驱动电压/V	适用胶液类型	适用黏度范围/cps
500	100	粘合剂、润滑剂、水溶剂、液体聚合物等	0~38 000
适用温度范围/℃	点胶精度/%	开启时间/ms	最小暂停时间/ms
-20~+85	2(在相同压力及温度下)	1~40	1

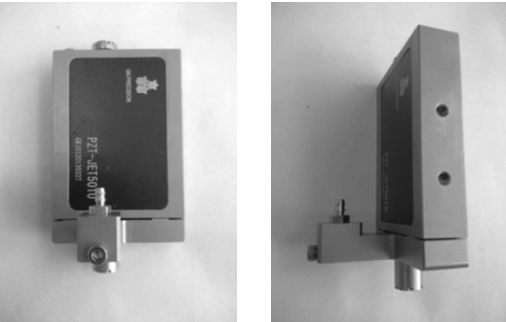


图 3 PZT-JET5010 压电式喷射点胶阀

Fig. 3 PZT-JET5010 piezoelectric nozzle

## 1.2 运动控制系统设计

三维打印设备的运动系统精度直接决定了模型打印的质量,系统硬件如图4所示。喷头连接导轨滑块固定在 $X$ 轴方向的直线导轨上,由计算机发送指令给Trio运动控制卡,通过运动控制卡发送信号脉冲到伺服或步进电机带动同步带实现喷头往复运动,在同步带一端连接一个滚动轮,滚动轮不仅跟随同步带运动且能绷紧同步带提高喷头打印精度。 $X$ 轴方向的机械结构还装备UV紫外灯和铺粉辊筒满足本文工艺的硬件要求,由 $Y$ 轴带动整个 $X$ 轴方向的机械结构往复运动, $X$ 与 $Y$ 方向的配合运动实现二维平面打印。

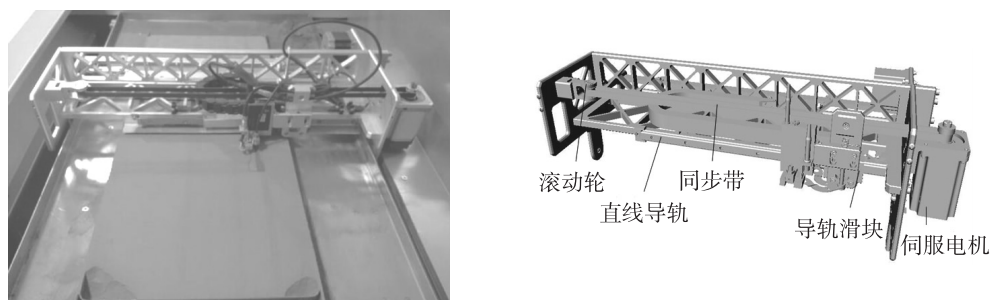


图4 X-Y方向运动系统

Fig. 4 X-Y direction movement system

## 1.3 铺粉装置设计

铺粉辊筒结构如图5所示。铺粉辊筒由步进电机驱动,在辊筒中间装有刮粉板,用于刮去辊筒上粘黏的粉末,同时在辊筒两边加上铺粉挡板以提高铺粉效果。

实际铺粉时,会经过两次铺粉过程,第二次铺粉会起到巩固粉床表面的作用,铺粉辊筒按照图6指定方向转动,同时由 $Y$ 轴带动平移,均匀铺平粉末。辊筒转动与平移的速度、辊筒的直径都会影响铺粉的效果,应保持辊筒转动的线速度与水平移动速度一致,配合合适直径的辊筒,即可提高铺粉质量。

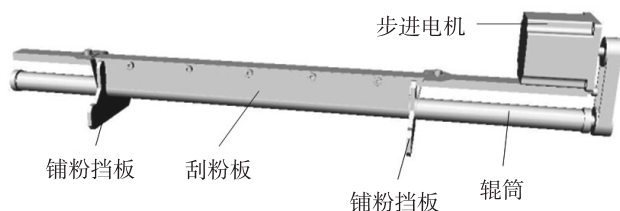


图5 铺粉辊筒结构

Fig. 5 The structure of Roller

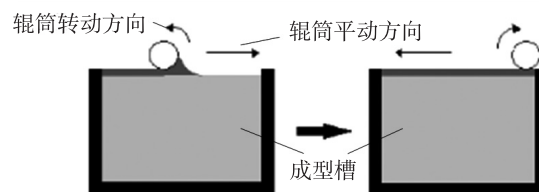


图6 铺粉过程

Fig. 6 The process of laying powder

## 1.4 辅助系统设计

辅助系统主要包括UV供墨系统和UV紫外灯及其冷却系统等。UV供墨系统实现UV墨水不间断供应,供胶压力在 $0\sim 500$  kPa连续可调,当胶桶里的胶量低于设定值时开始警报。目前,UV墨水的品牌很多,其成分和配制各不相同,导致固化时间有所差异。此外,紫外光的强度也会影响UV墨水的固化时间。因此,在设计时要求UV灯的功率能够手动调节,既能够保证UV墨水快速固化,也能避免功率过大而导致灯体升温过快(当UV灯体温度超过 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,冷却系统开始给UV灯降温)。

## 2 软件系统

本文从工艺要求和设备工作方式这两方面考虑设计模型切片软件,软件可对STL文件进行多种操作,如移动、旋转、缩放等,能够对STL文件进行自动修复,切片的厚度和每一层的行间距可手动设置。切片软件获取STL文件中所有三角面片的数据,按照设定的层厚,对模型分层切片,得到每一层切平面与三角面片的交点与交线,将所有交点与交线有序连接起来即可获得该层轮廓。优化切片软件算法,可以提高模型切片的速度和精度,切片效果如图7所示,切片效果图因窗口大小原因视觉上会有误差。

由于每个功能软件相互独立,操作繁琐,需要设计相应的控制软件将其集成起来。本文在VS2010软

件中,用 VB.NET 编写上位机控制软件,如图 8 所示,该软件可实现设备与电脑之间数据的实时传输与接收、设备参数修改、设备初始化、单步运动、喷头清洗及实时反应打印状态等,操作方便. 开始打印时点击 G-Code 按钮,固化在设备内部的 G 代码指令翻译器开始工作直至完成整个打印过程.

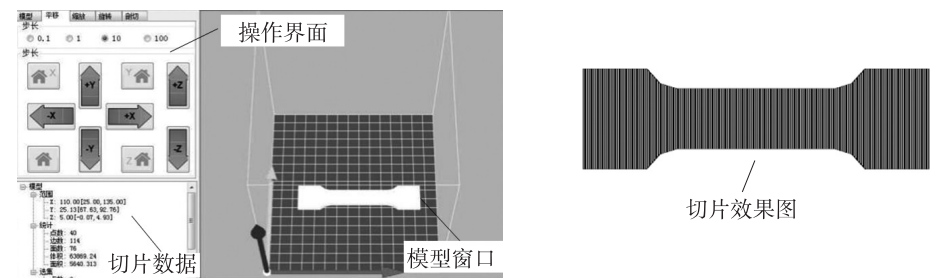


图 7 模型切片  
Fig. 7 Model slice



图 8 上位机软件  
Fig. 8 PC software

3 实验分析

3.1 打印材料

粉末材料是 3DP 工艺的主要材料,粉末材料的特性决定了成型件的致密度、孔隙率、表面粗糙度等. 本文选用粉末粒度为 300 目的 316L 不锈钢粉末,粉末颗粒为超细球形颗粒,适用于 3DP 工艺打印,其化学成分如表 2 所示.

表 2 316L 不锈钢粉末化学成分  
Table 2 Chemical composition of 316L stainless steel powder %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
≤0.03	≤1	≤2	≤0.035	≤0.03	10~14	16~18	2~3	Bal

3.2 粘结剂的选择

粘结剂选用 VeroWhitePlus™(RGD835),该材料粘度较高,喷头温度在 70 ℃ 左右时打印效果较好. 使用光功率为 218 W 的 UV 固化灯照射该材料,可在 1 s 内实现完全固化,固化后的性能指标如表 3 所示. 该材料能够实现快速固化金属粉末,具有固化强度高和收缩率小等优点,且经大量实验测试确定该材料对喷头与金属粉末无腐蚀性破坏,适合作为此工艺的粘结剂.

表 3 VeroWhitePlus™(RGD835) 固化后的性能指标  
Table 3 The performance index of VeroWhitePlus™(RGD835) after curing

抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%	弹性模量/MPa	抗弯强度/MPa	弯曲模量/MPa	热变形温度(0.45 MPa)/℃	热变形温度(1.82 MPa)/℃
50~65	10~25	2 000~3 000	75~110	2 200~3 200	45~50	45~50



### 3.3 打印测试

打印流程如图 1 所示,模型打印的质量由打印的工艺参数决定,包括喷墨量、 $X$  与  $Y$  方向的运动速度、铺粉层厚、扫描间距等. 这些参数没有固定的值,需要相互协调配合才能优化打印精度. 调节压电喷头的压力与开关时间,控制液滴喷射的速度、大小与轨迹,避免液滴在平整的粉末表面发生扩散、溅射、卫星滴,使液滴大小满足精度要求且喷射在指定位置,观察粘结剂与粉末之间的交互作用. 经调试后,模型每一层打印效果如图 9 所示.

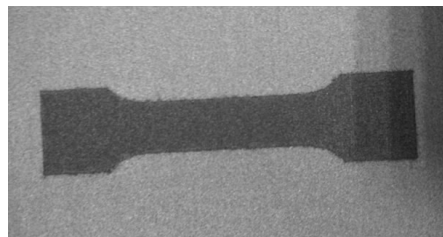


图 9 每层打印效果

Fig. 9 The printing effect of per layer

为了检验设备的稳定性与 UV 光固化工艺的可行性,已对设备进行大量的打印测试. 图 10、图 11 分别为由 CAD 建模软件生成的打印模型和使用设备打印的金属毛坯, CAD 模型与打印的实际尺寸相比误差在 1.3% 以内. 由于液滴在粉床内部渗透过多增加了模型边缘厚度、打印层厚与模型切片层厚不同等打印工艺原因,导致模型打印产生误差.

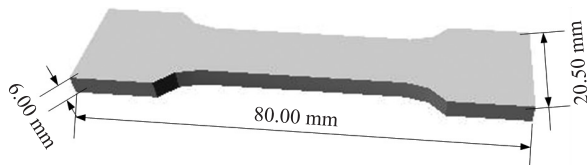


图 10 CAD 模型

Fig. 10 CAD Model

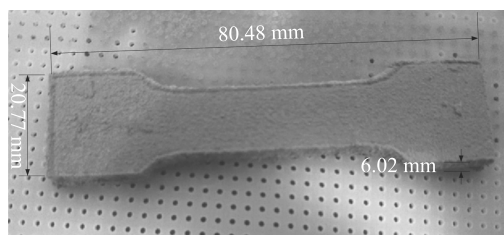


图 11 金属毛坯

Fig. 11 Metal blank

## 4 结语

本文研究了一种将 3DP 与 UV 光固化两种工艺相结合的金属三维打印成型方法,并自主设计了三维打印成型系统,经理论分析和打印测试后,由 CAD 模型与打印测试件尺寸对比误差在 1.3% 以内确定了设备的可靠性和 UV 光固化工艺的可行性. 在接下来的研究中,将使用阵列式压电喷头代替本文使用的点胶阀提高模型打印效率,继续优化工艺参数以提高打印精度,改善模型边缘的光滑程度. 由于金属毛坯使用 UV 树脂粘结仍然比较脆弱,需对金属毛坯后处理工艺进行研究,使其真正体现金属的特点.

### [参考文献] (References)

- [1] 杨继全,郑梅,杨建飞,等. 3D 打印技术导论[M]. 南京:南京师范大学出版社,2016:1-16.  
YANG J Q,ZHENG M,YANG J F,et al. Introduction to 3D Printing Technology[M]. Nanjing:Nanjing Normal University Press,2016:1-16.(in Chinese)
- [2] ROMBOUTS M,KRUTH J P,FROYEN L,et al. Fundamentals of selective laser melting of alloyed steel powders[J]. CIRP annals-manufacturing technology,2006,55(1):187-192.
- [3] 顾冬冬. 激光烧结铜基合金的关键工艺及基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2007.  
GU D D. Key process and basic research of laser sintering copper based alloy[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2007.(in Chinese).
- [4] 刘秀梅,徐志锋. 选区激光烧结在航空件铸造中的应用[J]. 金属加工(热加工),2010(13):19-22.  
LIU X M,XU Z F. Application of selective laser sintering in aviation parts casting[J]. MW metal forming,2010(13):19-22.(in Chinese).
- [5] 深圳市模具技术学会. 3D Systems 发布新型高精度,高效金属打印设备 ProX™ DMP 320[J]. 模具制造,2016(2):34-35.  
SHENZHEN DIE & MOLO TECHNOLOGY SOCIETY. 3D Systems released a new high-precision,highly efficient metal printing equipment ProX™ DMP 320[J]. Die and mould manufacture,2016(2):34-35.(in Chinese).

- [6] 朱天柱. 压电式喷射三维打印成型系统开发与实验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.  
ZHU T Z. Development and experimental research of piezoelectric jet 3D printing system[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2012.(in Chinese).
- [7] 李飞. 三维喷射打印技术(3DP)在铸造行业的应用[C]//2016 重庆市铸造年会论文集. 重庆,2016:1-4.  
LI F. Application of three dimensional jet printing technology(3DP) in foundry industry[C]//Proceedings of the 2016 Annual Meeting of Chongqing Foundry. Chongqing,2016:1-4.(in Chinese).
- [8] 杨永泉,刘文辉,金天拾. 喷墨砂型三维打印技术在发动机缸体试制上的应用[C]//2014 中国铸造活动周论文集. 北京:中国机械工程学会,2014:1-6.  
YANG Y Q,LIU W H,JIN T S. Three-dimensional inkjet printing technology of sand is applied in engine cylinder[C]//Proceedings of 2014 China Foundry Week. Beijing:Chinese Mechanical Engineering Society,2014:1-6.(in Chinese)
- [9] LI S,CHEN W,LIU F,et al. NN-GA based printing parameters optimization for 3DP[C]//IEEE international symposium on assembly and manufacturing. Xi'an,2013:160-162.
- [10] 尹亚楠. 数字微喷光固化三维打印成型装置设计与试验[D]. 南京:南京师范大学,2015:16-24.  
YIN Y N. Design and experiment of digital micro injection curing 3D printing device [D]. Nanjing: Nanjing Normal University,2015:16-24.(in Chinese)
- [11] 夏俊,杨继全. 彩色三维打印机控制系统的开发[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2009,9(2):8-12.  
XIA J,YANG J Q. Development of control system for color 3D printer[J]. Journal of Nanjing normal university(engineering and technology edition),2009,9(2):8-12.(in Chinese)

[责任编辑:严海琳]