

# 锡作为 3D 打印材料的应用研究

程 宏<sup>1</sup>, 任晓东<sup>1</sup>, 王凌青<sup>1</sup>, 李 新<sup>2</sup>, 庞雪利<sup>1</sup>

(1. 同济大学 工程实践中心, 上海 200092)

(2. 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)



任晓东

**摘 要:** 熔融沉积 3D 打印机所用的材料形态为卷材, 分析了锡丝与应用到熔融沉积 3D 打印机上的 ABS、PLA 卷材在熔点、力学性能、收缩率以及材料熔化或软化后的粘性等性能上的区别。结合锡材料的相关性能, 讨论锡丝在熔融沉积 3D 打印机上应用的可行性, 并从打印速度、层厚、温度 3 个参数入手, 采用控制变量法, 以锡丝堆积的长度与喷嘴行走轨迹总长度的比值为研究对象, 对锡丝的堆积成型进行试验研究, 最后对试验结果进行分析, 得出实用结论, 指出以后相关研究的方向。

**关键词:** 熔融沉积; 锡丝打印; 粘度; 控制变量

中图分类号: TB30 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2018)10-0837-04

## Feasibility Analysis of Tin in the Application of 3D Printing Materials

CHENG Hong<sup>1</sup>, REN Xiaodong<sup>1</sup>, WANG Lingqing<sup>1</sup>, LI Xin<sup>2</sup>, PANG Xueli<sup>1</sup>

(1. Engineering Practice Center, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(2. Electromechanical College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The materials in the form of coils are usually used in the fused deposition 3D printer. The difference between tin wire and ABS, PLA coiled material applied to melt deposition 3D printer was analyzed in this paper, such as melting point, mechanical properties, shrinkage, viscosity after melting or softening and so on. Combining with the relevant properties of tin materials, the feasibility of tin wire applied in the fused deposition 3D printer was discussed. Starting from the three parameters of printing speed, layer thickness and temperature, our team took the ratio of the length of tin wire to the total length of the nozzle's trajectory as the object to study the stacking forming of tin wire by using control variable method. Finally, the results were analyzed to obtain a practical conclusion and the direction of related research was pointed out.

**Key words:** fused deposition; tin wire printing; viscosity; control variable

## 1 前 言

3D 打印技术自 20 世纪 80 年代以来, 经过了长足的发展, 从工艺类型上分为熔融沉积打印、分层实体制造打印、选择性激光烧结打印和熔融沉积打印 4 种类型。熔融沉积 3D 打印机因其结构简单、价格低廉等优点, 得到了广泛应用, 但其打印材料比较有限, 只能打印 ABS、PLA 等工程塑料。如何将低熔点金属应用到熔融沉积打印机是一个充满挑战性的课题。目前, 华中科技大学秦

继昊等利用自制的熔融沉积快速成型(FDM)系统对低熔点金属材料  $\text{Sn}_{99.3}\text{Cu}_{0.7}$  的熔融沉积进行了研究, 实现了单层和多层金属的熔融沉积实验<sup>[1]</sup>, 德克萨斯大学的 Jorge mireles 利用 Stratasys 公司生产的 FDM300 型号的打印机对市场上常见的几种低熔点合金焊丝的熔融沉积进行了研究<sup>[2]</sup>。本文对纯锡在熔融沉积打印机上的应用进行了理论探讨, 并从实验角度进行了相关研究。

## 2 ABS、PLA 卷材和金属锡的性能比较

### 2.1 粘流态温度 $T_f$ 和金属锡的熔点 $T_m$

熔融沉积打印原理是首先将打印材料熔化, 然后将熔化后的材料由挤出机挤出, 进而开始模型的三维堆积, 材料的形态发生了由固相到液相再到固相的变化。ABS

收稿日期: 2017-05-05

第一作者: 程 宏, 男, 1973 年生, 讲师, 博士研究生

通讯作者: 任晓东, 男, 1990 年生, Email:

rxid1990@tongji.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2018.10.11

和 PLA 为非晶聚合物, 应用到熔融沉积打印机时, 喷头的加热温度需高于其粘流态温度  $T_f$ 。金属锡为晶体, 喷头的加热温度需高于其熔点  $T_m$  [3]。表 1 为 ABS、PLA 的粘流态温度  $T_f$  和金属锡的熔点  $T_m$ 。

不同厂家生产的 ABS 和 PLA 的粘流态温度  $T_f$  不同, 故表 1 中的粘流态温度  $T_f$  为温度区间, 在实际应用时喷头的加热温度为 200~270 ℃ 之间, 此加热温度高于金属锡的熔点  $T_m$ 。因此从熔点上考虑, 金属锡是较为理想的熔融沉积 3D 打印材料。

表 1 ABS、PLA 的粘流态温度  $T_f$  和锡的熔点  $T_m$

Table 1 The viscous flow temperature  $T_f$  of ABS, PLA and the melting point  $T_m$  of Tin

Material	$T_f$ (°C)	$T_m$ (°C)
ABS	180~250	—
PLA	120~170	—
Tin	—	231.96 [3]

## 2.2 力学性能

卷材既需要具备一定的硬度, 以保证在夹紧机构的挤压下不会变形, 又需要具有一定的抗拉强度, 以保证在夹紧机构将卷材融入喷嘴时不会被拉断。选用北京太尔时代生产的 ABS 塑料和 Polymaker 生产的 PLA 塑料进行力学性能测试, 表 2 为所测得的 ABS、PLA 的力学性能和锡的力学性能 [3] 比较。

表 2 ABS、PLA 和锡的力学性能

Table 2 Mechanical properties of ABS, PLA and Tin

Material	Yield strength (MPa)	Brinell hardness	Tensile strength (MPa)
ABS	50	108	38
PLA	5.5	88	50
Tin [3]	12	140	40~50

依据上表可知锡的屈服强度介于 ABS 和 PLA 塑料之间, 硬度比 ABS 和 PLA 塑料稍好, 抗拉强度和 ABS、PLA 塑料接近。因此从力学性能的角度考虑, 金属锡是较为理想的熔融沉积 3D 打印材料。

## 2.3 收缩率

材料热收缩、热胀冷缩的存在影响模型打印精度 [4]。金属锡是晶体材料, 不存在热收缩, 仅存在热胀冷缩。熔融沉积打印机打印的模型层与层之间依靠自身的粘性粘结, 选用北京太尔时代生产的 ABS 塑料和 polymaker 生产的 PLA 塑料进行特性收缩率及粘度进行测定。表 3 为所测得的 ABS 塑料、PLA 塑料的收缩率及粘度与锡的收缩率及粘度 [3] 对比。

由表 3 可知, 锡的收缩率比 ABS 和 PLA 的收缩率小

5~6 个数量级, 基本上可以不用考虑冷却变形问题。因此, 从材料热收缩和收缩率的角度考虑, 金属锡是理想的熔融沉积 3D 打印材料。

表 3 ABS、PLA 塑料和锡的收缩率和粘度

Table 3 The shrinkage and viscosity of ABS, PLA plastics and Tin

Material	Shrinkage (%)	Viscosity
ABS	1	2 dL/g
PLA	0.2	6 dL/g
Tin [3]	0.0000267	0.001593 Pa · s (320 ℃)

## 2.4 熔化后或软化后的粘性

熔融沉积打印机打印的模型层与层之间依靠自身的粘性粘结, 选用北京太尔时代生产的 ABS 塑料和 polymaker 生产的 PLA 塑料进行特性粘度测定。结果如表 3 所示, 表中 ABS 和 PLA 塑料的粘度为特性粘度 [5], 锡的粘度为动力粘度 [3], 依据经验公式 (1) 可计算锡的特性粘度 [5]:

$$\eta = \eta_m \times 10^{(2.48 - 3300/T)} \quad (1)$$

式中  $\eta$  为特性粘度,  $\eta_m$  为动力粘度。解得锡的特性粘度为  $1.3100614315812 \times 10^{-6}$  dL/g, 因此锡的粘性差于 ABS 和 PLA 塑料, 这也可能会影响锡用作熔融沉积打印机打印材料。

## 3 锡丝打印实验

设置打印速度为 60 mm/s, 打印温度为 240 ℃, 打印层厚为 0.2 mm, 喷嘴按 80 mm×40 mm 的矩形轨迹移动, 得到堆积结果如图 1 所示。

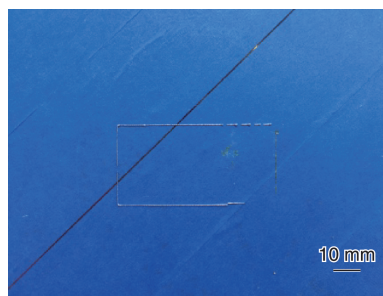


图 1 锡丝堆积试验结果

Fig. 1 Result of the stacking experiment of tin wire

可见, 锡丝可以很好地堆积在打印板上, 但同时也可能会出现堆积不稳定均匀的情况。分别改变速度、温度、层厚, 可以得到不同条件下锡丝堆积长度与轨迹总长度的比值 (以百分比表示), 并据此做出相应的折线图。

### 3.1 不同速度打印

喷嘴的温度设置为 232 ℃, 打印层厚设置为 0.2 mm,

打印速度分别设置为 30, 40, 50, 60, 70 和 80 mm/s。实验结果如图 2 所示。

由图 2 可知, 打印速度过快或过慢均不利于锡丝的堆积, 并当打印速度超过 60 mm/s 时, 堆积长度急剧下降, 故最佳打印速度在 60 mm/s 左右。

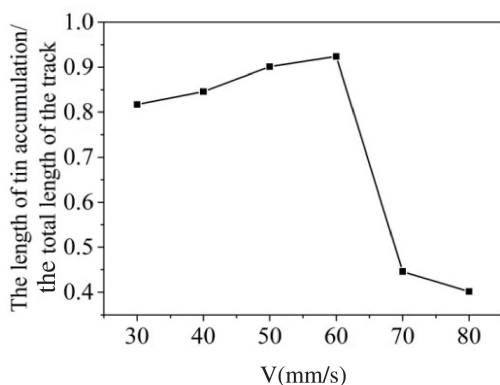


图 2 不同速度打印结果

Fig. 2 The printing results under different speed

### 3.2 不同层厚打印

喷嘴温度设置为 232 °C, 打印速度设置为 60 mm/s, 打印层厚分别设置为 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35 和 0.4 mm。实验结果如图 3 和图 4 所示。

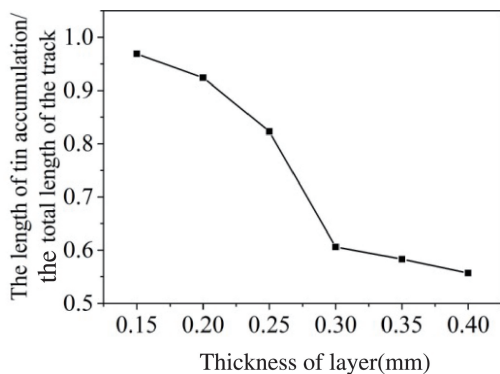


图 3 不同层厚打印结果

Fig. 3 The printing results under different thickness

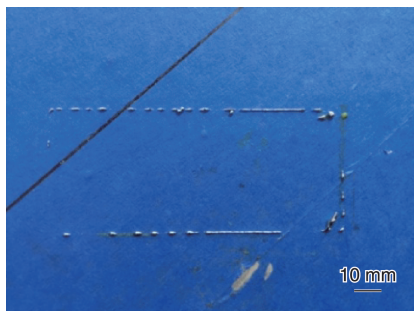


图 4 层厚为 0.3 mm 时锡丝堆积图

Fig. 4 Tin wire stacking diagram with a thickness of 0.3 mm

由图 3 和图 4 可知, 打印层厚越大, 锡丝的堆积长度越短。打印层厚超过 0.3 mm 时, 会出现液滴堆积在打印板上的情况。

### 3.3 不同温度打印

打印速度设置为 60 mm/s, 打印层厚设置为 0.2 mm 的情况下, 打印温度分别为 232, 237, 242, 247 和 252 °C。实验结果如图 5 所示, 由图可知, 打印温度越高, 锡丝堆积长度越短。

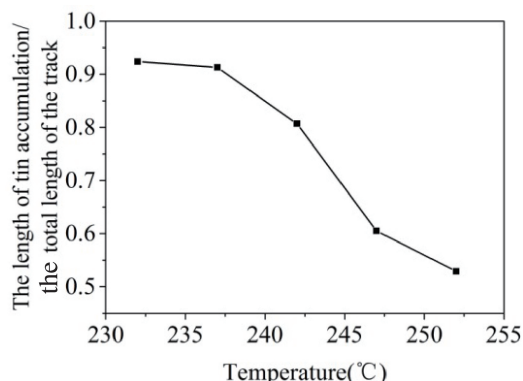


图 5 不同温度打印结果

Fig. 5 The printing results under different temperature

## 4 图形打印试验

由锡丝打印实验可知, 速度、层厚和温度影响锡丝在打印板上的堆积, 具体影响堆积长度和是否出现液滴堆积的现象。打印速度为 60 mm/s、打印层厚为 0.2 mm、打印温度为 232 °C 是一组比较合理的参数设置, 并以此设置进行矩形模型打印试验, 结果如图 6 所示。



图 6 矩形模型打印结果

Fig. 6 Result of rectangle model printing

由图 6 可知, 锡丝在打印板上堆积效果较差, 试验失败, 推测原因为锡的粘结性不足。通过进一步在打印板上涂粘结剂, 进行单层和双层矩形打印试验, 结果如图 7 和图 8 所示。

由图 7 和图 8 可知, 加入胶水粘结剂后, 锡丝在打

印板上粘结效果较好。但当打印第二层时,失去了胶水的粘结,由于压力和剪切力的存在,已堆积好的第一层被破坏,最终堆积试验失败。

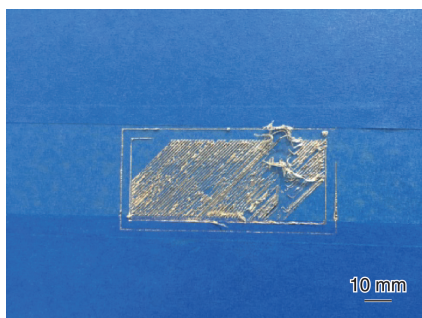


图 7 涂粘结剂单层矩形模型打印结果

Fig. 7 Result of single-layer rectangular printing with coating adhesive



图 8 涂粘结剂双层矩形模型打印结果

Fig. 8 Result of double-layer rectangular printing with coating adhesive

## 5 结 论

综上所述,从熔点和力学性能的角度考虑,锡有作为熔融沉积 3D 打印材料的可能性。液锡的流动性过好导致锡丝堆积不均匀,这可以通过改变层厚、温度和打印速度解决;粘性较差导致的堆积不均匀,可以通过在打印板上加入粘结剂来提高粘结效果,这也反证了理论分析的正确性。锡丝目前在使用上最大的障碍是粘结力不足,最佳的改善途径为在纯锡中加入添加剂(或进一步探讨锡合金材料),以改善粘性。

## 参考文献 References

[1] Qin Jihao(秦继昊), Zhang Honghai(张鸿海), He Long(何 龙),

*et al. Machinery Design & Manufacture*(机械设计与制造)[J], 2016 (1): 105-107.

[2] Zhan Lina(战丽娜). *Science & Technology Information*(科技资讯)[J], 2016, 14(8): 1-2.

[3] Ke Suofu(柯索夫). *Tin*(锡)[M]. China: Geological Publishing House, 1954.

[4] Zhang Yunbo(张云波), Qiao Wenyu(乔雯钰), Zhang Xinxin(张鑫鑫), *et al. Shanghai Plastics*(上海塑料)[J], 2015(1): 1-5.

[5] Chen Huizhao(陈惠钊). *Viscosity Measurement (Revised)*(粘度测量(修订版))[M]. China: China Metrology Publishing House, 2003.

[6] Zheng Ninglai(郑宁来). *Synthetic Materials Aging and Application*(合成材料老化与应用)[J], 2015(5): 144.

[7] Wang Xueying(王雪莹). *China High-Tech Enterprise*(中国高新技术企业)[J], 2012(26): 3-5.

[8] Jiang Hong(江 洪), Kang Xueping(康学萍). *Advanced Materials Industry*(新材料产业)[J], 2013(10): 30-35.

[9] Du Yulei(杜宇雷), Sun Feifei(孙菲菲), Yuan Guang(原 光), *et al. Journal of Xuzhou Institute of Technology(Natural Sciences Edition)*(徐州工程学院学报)(自然科学版)[J], 2014, 29(1): 20-24.

[10] Tang Tongming(唐通鸣), Zhang Zheng(张 政), Deng Jiawen(邓佳文), *et al. New Chemical Materials*(化工新型材料)[J], 2015, 43(06): 228-230+234.

[11] Qiao Wenyu(乔雯钰), Xu Huan(徐 欢), Ma chao(马 超), *et al. Engineering Plastics Application*(工程塑料应用)[J], 2016, 44(03): 18-23.

[12] Sun Jujie(孙聚杰). *Screen Printing*(丝网印刷)[J], 2013(12): 34-39.

[13] Wang Yanqing(王延庆), Shen Jingxing(沈竞兴), Wu Haiquan(吴海全). *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2016, 36(4): 89-98.

[14] Tang Tongming(唐通鸣), Lu Yan(陆 燕), Li Zhiyang(李志扬), *et al. Modern Chemical Industry*(现代化工)[J], 2015(7): 50-52.

[15] Mireles J, Espalin D, Roberson D, *et al. Solid Freeform Fabrication Proceedings*[C]. USA: University of Texas at Austin (freeform), 2012: 836-845.

[16] Wang Baitong(王柏通). *Thesis for Doctorate*[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2014.

[17] Chen Shuoping(陈硕平), Yi Heping(易和平), Luo Zhihong(罗志虹), *et al. Materials Review*(材料导报)[J], 2016, 30(7): 54-59.

[18] Jin Zefeng(金泽枫), Jin Yangfu(金杨福), Zhou Mi(周 密), *et al. China Plastics Industry*(塑料工业)[J], 2016, 44(2): 67-70.

(编辑 吴 锐)