DOI: 10.3901/JME.2019.15.064

可拉伸柔性电路的原位封装 3D 打印工艺*

朱伟军^{1,2} 陈言坤¹ 张志坤¹ 田小永¹ 李涤尘¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049;

2. 西安交通大学高端制造装备协同创新中心 西安 710049)

摘要: 可拉伸柔性电路是可拉伸柔性电子关键组成部分。金属铜导线具有良好的电学性能、力学性能、导热性等,在电子行业中应用广泛。但是,常规印刷成形的铜基电路不可拉伸,无法直接用于柔性电子。为此,基于电路结构的柔性化设计和 3D 打印加工技术,提出一种可拉伸柔性金属导线电路的原位封装 3D 打印技术,实现可拉伸金属导线及其封装层的同轴打印成形,将其嵌入到打印的柔性封装膜内,最终完成可拉伸柔性电路的一体化加工。设计了可拉伸变形的金属导线原位封装结构,开发了可用于原位封装打印的喷头结构,研究了原位封装 3D 打印工艺,在此基础上对柔性电路的拉伸性能进行了研究。发展了一种多材料多功能结构的一体化 3D 打印技术,探索了该技术在可拉伸柔性电路加工中的应用,为柔性电子的设计与加工提供了新思路。

关键词: 柔性电子; 屈曲结构; 可拉伸变形; 3D 打印; 增材制造

中图分类号: TG156

In-situ Packaging 3D Printing Process for Stretchable Flexible Circuits

ZHU Weijun^{1,2} CHEN Yankun¹ ZHANG Zhikun¹ TIAN Xiaoyong¹ LI Dichen¹

(1. State Key Laboratory of Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

2. Collaborative Innovation Center of High-End Manufacturing Equipment,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: The stretchable flexible circuit is a key component of stretchable flexible electronics. Metal copper wires have good electrical properties, mechanical properties, thermal conductivity, etc., and are widely used in the electronics industry. However, conventionally printed copper-based circuits are not stretchable and cannot be directly used for flexible electronics. Therefore, based on the flexible design of the circuit structure and 3D printing processing technology, an in-situ package 3D printing technology for stretchable flexible metal wire circuits is proposed to realize coaxial printing of stretchable metal wires and their encapsulation layers. It is embedded in the printed flexible encapsulation film, and finally the integrated processing of the stretchable flexible circuit is completed. A metal wire in-situ package structure with stretchable deformation is designed. The nozzle structure that can be used for in-situ package printing is developed. The in-situ package 3D printing process is studied. Based on this, the tensile properties of the flexible circuit are studied. An integrated 3D printing technology with multi-material multi-function structure is developed, the application of this technology in the processing of stretchable flexible circuits is explored, and a new idea for the design and processing of flexible electronics is provided.

Key words: flexible electronics; buckling structure; stretchable flexibility; 3D printing; additive manufacturing

0 前言

传统的电子产品基于刚性的电路板印刷技术,电子元器件和连接电子元器件的导体都被固定在刚性电路板上,虽然这样有利于保护电子元器件,使其不会轻易损坏,但是一旦有较大的

变形,也会导致电子器件的结构被破坏或者性能失效,这极大地限制了传统电子产品的发展,难以应用在一些特殊的场合。通过人们的不懈追求与各种创新技术的迅猛发展,电子产品目前正在向柔性化的方向发展,未来柔性电子将具有巨大的市场和广阔的前景。

电路的柔性化是一个关键问题,柔性电路是结构电子的关键组成部分。柔性电子也称为印刷电子或者无机电子^[1-2],是一种将电子元件安装在柔性基

* 国家自然科学基金(51505457)和创新人才推进计划-青年科技新星(2017KJXX-14)资助项目。20181109 收到初稿,20190109 收到修改稿

板上组成的特殊电路,柔性基板一般是聚醚醚酮、聚酰亚胺塑料或透明导电涤纶等高分子材料,它的特点有厚度薄、质量轻、透明、可弯曲等。柔性电路具有很大的优势^[3-4],随着材料学、力学和制造工艺水平的不断发展,近年来被大量科研工作者深入研究,广泛出现在了不同的领域中。已经有科研工作者开发出优秀电学性能的可折叠硅集成电路^[5]、可延展离子电池^[6],由透明柔性电子制成的 IGZO 薄膜晶体管和制成的透明电路^[7]、电子眼相机^[8],应用于娱乐生活领域的柔性无机 LED 显示^[9],应用于生物医疗领域的脑电极^[10]、柔性多功能导管^[11]等产品。柔性电路作为柔性电子器件的重要组成部分,像是人类身体里的血管一样连接着身体内部的各个部位,保证着整个身体的正常运转。同时柔性电路也是电子制造领域的重点研究方向,与传统电路一样,都要满足电子加工行业对电子器件中导电体的要求^[12-13]。现在传统电路中使用的互连导线一般都是铜、金和银,其中金的性能最好,但是相应的金的成本也最高。而铜的性能也较好,而且价格便宜,所以现在普遍使用的是金属铜及铜合金。

随着人们在 3D 打印领域的不断研究,基于 3D 打印技术方式实现电路的柔性化已经成为柔性电子制造领域最为重要的一个研究方向^[14],科研人员开发出许多种新颖的柔性电子制造方法。美国德州南卫理公会大学机械工程系的 Matt Saari 研究团队开发了一种 3D 打印工艺——纤维封装增材制造技术(Fiber encapsulation additive manufacturing, FEAM)^[15-16],此工艺用侧边送丝的方式,实现纤维的铺设与熔融的热塑性材料的层积同步,纤维刚被送出就立刻封装在了打印层里。同轴打印金属实心导线和塑性材料以制造柔性电路的方法十分简便^[17]。该方法的难点在于如何使金属实心导线与可 3D 打印柔性材料同轴挤出,并保证接触良好。

本文提出一种 3D 同轴打印金属实心导线制作柔性电路的方法——可拉伸柔性金属导线电路的原位封装 3D 打印技术。本文设计了可拉伸变形的金属导线原位封装结构,开发了可用于原位封装打印的喷头结构,研究了原位封装 3D 打印工艺,在此基础上对柔性电路的拉伸性能进行了研究。

1 材料与方法

1.1 柔性电路的材料选择

紫铜具有良好的导热性和导电性,可塑性极好,且成本低,本文选用紫铜导线作为柔性电路中的导电体。表 1 是紫铜导线的具体参数。

表 1 紫铜导线的参数

属性	密度/(g · cm ⁻³)	硬度/HB	拉伸强度/MPa	伸长率(%)
紫铜	8.96	35~45	220	45

TPU(Thermoplastic polyurethanes)是一种热塑性聚氨酯弹性体,可加热塑化,化学结构上很少或没有交联,其分子基本是线性的,存在一定的物理交联。本文中 TPU-95A,其性能参数如表 2 所示。

表 2 TPU-95A 的参数

属性	密度/(g · cm ⁻³)	硬度/邵尔	拉伸强度/MPa	伸长率(%)
TPU-95A	1.24	95A	34.3	700

1.2 3D 打印设备

3D 同轴打印方法的实现基于对传统的 FDM 打印机喷头的改进。本文所使用的设备是陕西恒通智能机器有限公司的 3DP-150。

1.3 性能表征方案

本文中主要对金属铜导线、柔性封装 TPU 膜和导线-封装一体化的柔性电路进行性能表征。柔性电路最重要的就是电学性能与拉伸性能,针对这两种性能,设计性能表征的试验方案。数字万用表用于测试铜导线的电阻以及拉伸过程中的电阻变化,还可以用来测量温度。拉伸试验机用于对各拉伸样件进行拉伸测试,以得到拉伸数据,具体包括拉伸时间、拉伸速度、拉伸应力和拉伸位移以及一些曲线图。通过试验所得的各种数据,可以观察或计算得出想要的试验结果。

2 柔性电路的原位封装结构

柔性电路由可拉伸变形的金属导线、柔性同轴封装层和柔性电路封装膜等 3 部分组成,其结构如图 1。其中,金属导线与柔性同轴封装层组成导线-封装复合体。

图 1 柔性电路的原位封装结构

导线选用紫铜材料,同轴封装层和电路封装膜

的均选用 TPU 材料。为使得电路具有可拉伸柔性,需要上述 3 部分均具备可拉伸特性。柔性 TPU 材料的选用,使得同轴封装层和电路封装膜可拉伸,鉴于直导线无法拉伸,本文拟采用屈曲结构使得金属导线具有拉伸性能。

为了加工该柔性电路,首先使用单挤出喷头打印底层柔性封装膜,然后使用同轴打印喷头打印导线-封装复合体,最后再更换单挤出喷头打印顶层的柔性封装膜。

3 原位封装 3D 打印喷头设计

打印喷头是实现原位封装柔性电路打印的核心部件。为实现柔性导线的原位封装,本文设计了封装-导线的同轴挤出喷头和封装快速凝固喷头。

本文设计并制作了一种双孔进料的加热块和固定夹具,配合一些其他打印机喷头配件,组装成同轴打印喷头,实现同轴打印实心金属导线的功能。同轴打印喷头的加热端有两个进料孔,上方的孔用来送金属导线铜,侧边的孔用来与挤出机配合,输送 TPU。该加热端可以使 TPU 被挤出的同时,带着金属铜导线从喷嘴一起同轴挤出。同轴打印喷头把同轴打印喷头安装在夹具上。

为了改善同轴打印的打印效果,需要使打印出的 TPU 快速冷却,所以本文对同轴打印的设备进行了改进,添加吹冷气辅助装置。该辅助装置使用空气压缩泵向针管中输送冷却空气,从针头中吹出,使基板上的 TPU 快速冷却,锚固住铜导线。图 2a 和 2b 为同轴 3D 打印喷头的示意图和实物图。

图 2 配置快速凝固装置的同轴挤出喷头

4 原位封装 3D 打印工艺研究

4.1 柔性电路的原位封装打印过程

柔性电路中的柔性基板是保证柔性电路延展性的重要组成部分,可以保护铜导线不被氧化。本文使用 FDM 的方式直接打印 TPU 线材制作可拉伸的膜作为柔性电路的柔性基板。图 3 为柔性封装膜,其结构分为三层,上下两层膜夹着中间一层屈曲的 TPU。

图 3 柔性电路中的柔性封装膜

分别对屈曲导线和封装膜进行了一定的研究后,开始柔性电路标样的制作。图 4 显示的是正在制作的标样与已经制作好的标样。标样的制作成功证明了本文中的同轴打印的可行性。

(a) 打印过程

(b) 打印结果

图 4 导线-封装一体化柔性电路的打印技术

4.2 快速凝固技术对导线-封装同轴度的影响

用如图 2 所示的改进同轴打印喷头打印效果如表 3 所示,对所打印的曲线图像进行处理,使用 ImageJ 软件,调整图像对比度,使图像中的导线与 TPU 更加清晰。两图竖线右边是打印前半段,没有

吹冷气的打印效果,两图竖线左边是打印的后半段,吹冷气后的打印效果。图 5a 是实际打印的图像,图 5b 是处理后的图像。

图 5 快速凝固对导线-封装同轴度的影响

建立与实际长度相同的图像标尺,测量图中曲线的波峰和波谷处两种材料之间的距离。对测得的距离数据进行处理,画出两种成形方式中不同材料之间的偏差柱状图,比较是吹冷气与不吹冷气打印的成形效果。如图 6 所示,吹冷气打印的偏差均值明显要比不吹冷气打印的偏差均值小很多,误差带也小很多,说明吹冷气打印能显著地改善同轴打印屈曲导线的效果,并且提高成形的稳定性。

图 6 快速凝固技术对同轴度的影响

4.3 快速凝固参数的工艺优化

为了探究吹冷气对打印效果的具体影响,设计了一组试验。试验主要研究吹冷气的送气量和送气角度这两个因素对打印效果的影响。由于只研究了两个参数,每个参数三种水平,因此采用全部试验的方法,共 9 种不同参数的打印。表 3 是试验因素水平表。测量两种材料之间的偏差,并求出每种类型距离的平均值和误差带,用偏差的平均值来衡量两种材料的同轴精度。平均值和误差带的值越小,则说明打印的同轴度越好,打印的质量越稳定。

表 3 试验因素水平表

水平	试验因素	
	送气量(气压)/MPa	送气角度/(°)
1	1.4	0
2	2.1	30
3	2.8	60

做出 9 种试验的类型与平均值、误差带的柱状图,如图 7 所示,打印类型从 1 到 9 分别为 0° 1.4 MPa, 0° 2.1 MPa, 0° 2.8 MPa, 30° 1.4 MPa, 30° 2.1 MPa, 30° 2.8 MPa, 60° 1.4 MPa, 60° 2.1 MPa, 60° 2.8 MPa。由图可以看出,在 9 种打印类型中,送气角度为 0°, 送气气压为 2.1 MPa 时,打印的屈曲导线同轴度最好,效果最好;送气角度为 60°, 送气气压为 2.8 MPa 时,打印的屈曲导线同轴度最差,效果最差。试验时使用 0.1 mm 直径导线打印屈曲半径为 3 mm 的结构很容易,屈曲导线的成形精度为 0.3 mm,优于文献中的三维埋线式打印和纤维封装增材制造工艺^[14-15]。

图 7 快速凝固参数对同轴度的影响

4.4 导线直径对同轴度的影响

如图 8 所示,采用不同直径的铜导线($\phi 0.10$ mm、0.08 mm 和 0.05 mm),通过快速凝固处理得到

图 8 导线直径对同轴度的影响

的导线-封装结构。结果表明,导线直径越小,导线-封装的同轴度越好。通过以上分析可知,造成同轴度偏差的主要因素是金属导线的路径偏差,其根源在于屈曲导线的弹性变形。对于同样的屈曲参数,小直径导线更容易被同轴挤出且快速凝固的 TPU 材料所“固定”,从而保持更好的同轴度。

5 柔性电路的拉伸性能研究

5.1 金属导线的拉伸试验

由于铜导线决定了柔性电路的电学性能(本文指电阻),因此需要通过建立铜导线的电阻数学模型。本文对金属铜导线做了拉伸测试,以验证以上结果。选择 5 根直径为 0.1 mm,长度为 100 mm 的铜导线做拉伸试验。首先用拉伸试验机的夹具夹住铜线,用万用表测量记录拉伸前的电阻,然后保持万用表不取下,开始以 50 mm/min 的速度拉伸,直到拉断。期间观察导线的电阻变化情况,记录导线在被拉断前一瞬间的电阻值。拉伸试验机会记录拉伸过程中每一时刻的拉力情况,根据所得到的数据,可以计算的到铜导线拉伸过程中的应力-应变曲线。根据计算结果和记录的电阻值变化情况,验证上文中的结论,如图 9 所示。

图 9 铜导线拉伸的应力-应变图

由图 9 可以看出,0.1 mm 直径的铜导线在被拉断前,变形量约为 16%,电阻最初为 0.33 Ω,被拉断前电阻达到了 0.48 Ω,变化了约 45%,这与本文之前的结论相差不大。重复进行多次拉伸试验,测得多组数据,发现各组数据之间几乎没有差别。

为了了解 Cu 导线在拉伸变形的过程中电阻的变化情况,对其进行了公式的推导。推导过程如下。

首先假设铜导线的横截面积 A 是均匀的圆形,长度为 L ,电阻率 $\rho=1.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$,根据公式可以计算出初始电阻 R

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

再假设拉伸过程中导线是均匀变化的,导线的初始直径为 d ,当拉伸长度为 δL 时,导线的长度增加,横截面积减小,电阻值增大,可以通过计算得到变化的电阻值 δR 为

$$\delta R = \rho \frac{4(L + \delta L)^2}{\pi d^2 L} - \rho \frac{4L}{\pi d^2} \quad (2)$$

变化的电阻值 δR 与初始电阻 R 之比,就是导线电阻的变化率。由式(2)可以看出,变化的电阻值 δR 与拉伸长度 δL 之间为二次关系。根据该公式,当 0.1 mm 直径铜导线的拉伸应变为 20%时,电阻大约变化了 45%。该理论计算值与图 9 所示的试验值相当。

从导线的拉伸时的应变情况和电阻变化情况来看,在柔性基板直接铺设铜导线可能导致柔性电路拉伸时材料变形的不匹配和电路的电学性能变化过大,从而影响柔性电路的使用。所以铜导线不能像传统电路一样直接铺设在柔性基板上以制作成柔性电路。

5.2 导线-封装的界面强度性能

由于本文制作的柔性电路使用了两种完全不同的材料,两种材料只是物理上的复合,所以制作了 TPU 与铜线的复合膜,用来进行拉伸试验,探究两种材料的界面结合性能。制作测试件的步骤是先打印一层膜,然后把铜线压在打印的膜上,最后再打印一层膜。引线-基体界面强度拉伸试验的原理是通过设备测量出试件的变形长度及拉力,通过

$$S = \pi dl \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (4)$$

计算出界面强度。

试验中测试件测得的应力应变曲线如图 10 所示,通过分析数据与计算,得到以下结论:① 拉伸

图 10 导线-封装膜界面强度拉伸拉力变形量曲线图

过程中通常是导线断裂,但不会从膜中抽出;② 通过计算,两种材料的界面强度高于 0.11 MPa。

5.3 柔性封装膜的力学性能

为了验证上文中制作的 TPU 膜的拉伸性能,使用拉伸试验机设备对其进行拉伸试验。拉伸试验的装夹和拉伸过程如图 11 所示。

(a) 拉伸变形前 (b) 拉伸变形后
图 11 柔性封装膜的拉伸试验

对拉伸试验的数据进行处理,得到拉伸过程的应力-应变曲线,如图 12 所示,是其中的两组试验结果。可以得到以下结论:① TPU 膜的拉伸性能良好,拉伸 3 倍以上才有可能断裂;② TPU 膜能承受的极限拉力在 35 N 左右;③ TPU 膜的断裂位置在两端,证明打印效果良好。

图 12 柔性封装膜的典型拉力变形量曲线

5.4 柔性电路的拉伸性能

对如图 1 结构的试样(长 100 mm×宽 12 mm×厚 0.35 mm)进行拉伸试验。拉伸速度为 50 mm/min。装夹方式是用铜箔粘住标样的两端导线,目的是为了更方便测量电阻。测量时使用拉伸试验机夹持柔性电路标样,用数字万用表夹持柔性电路中导线的两端,测量标样由未拉伸状态拉伸到导线断裂时(即数字万用表显示电阻为无限大)应力应变曲线。

典型应力应变曲线的对比如图 13 所示,包括导线、柔性封装膜和柔性电路。由于柔性电路由导线

和柔性封装膜复合而成,其强度高于各组分。对于柔性电路,10 个试样的拉伸测试表明,柔性电路试样(原长 100 mm)平均被拉伸 21 mm 时,铜线断裂,此时拉伸应力约为 11 N。

图 13 典型拉力变形量曲线的对比

分析图 13 可以得到以下结论:① 标样拉伸应力极限为 10 N 左右;② 标样伸长率为 20%~60%;③ 标样拉伸过程中电阻没有明显变化;④ 导线断裂处多为导线弯曲处(波峰,波谷),与仿真一致;⑤ 标样拉伸过程中,TPU 膜破裂的地方是与导线结合的地方;⑥ 未失效的电路收缩时导线出现平面外弯曲,且柔性电路不能完全收缩。

据报道,研究人员已经制备出拉伸能力为 40% 的 U 型互连结构,并且应用于应变传感器中。一些其他结构制备的柔性互连结构拉伸性能达到 60%。欧洲跨院校微电子中心的相关人员设计并制造了一种弹性互连电路,这种电路可以实现伸缩率达 50%~100%,而不影响电阻值。本文中导线-封装一体化成形的柔性电路在国外还没有人研究,但是只从结构的拉伸性能上相比,还有很大的提升空间。

6 结论

本文提出了 3D 同轴打印柔性电路的成形方法,将金属实心导线铜与塑性柔性材料 TPU 通过同轴打印喷头挤出以成形柔性导线,并利用 3D 打印平台打印柔性基板制作柔性电路。在导线-封装同轴工艺研究中,本文发现冷却环境对导线-封装同轴度有明显影响,据此提出了辅助吹冷气方法,优化了工艺参数,解决了同轴打印屈曲导线锚固的问题。柔性封装 TPU 膜与金属铜导线的界面强度超过铜导线本身的强度 0.11 MPa,表明本文所用材料体系具有很好的兼容性,有望用于实际应用。成形的导线-封装一体化柔性电路在拉伸过程中电阻无变化,伸长率达到 20%~60%,满足柔性电子对电路的电阻

要求,初步证明了本文提出的柔性电路制作方法的可行性。

参 考 文 献

- [1] 许巍, 卢天健. 柔性电子系统及其力学性能[J]. 力学进展, 2008(2): 137-150.
XU Wei, LU Tianjian. Flexible electronics system and their mechanical properties[J]. *Advances in Mechanics*, 2008(2): 137-150.
- [2] 冯雪, 陆炳卫, 吴坚, 等. 可延展柔性无机微纳电子器件原理与研究进展[J]. 物理学报, 2014(1): 9-26.
FENG Xue, LU Bingwei, WU Jian, et al. Review on stretchable and flexible inorganic electronics[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014(1): 9-26.
- [3] 张乃柏, 郭秋泉, 杨军. 数字打印柔性电子器件的研究进展[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46(4): 75-90.
ZHANG Naibo, GUO Qiuquan, YANG Jun. The development of digital printing technologies for flexible electronics devices[J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2016, 46(4): 75-90.
- [4] SONG J, FENG X, HUANG Y. Mechanics and thermal management of stretchable inorganic electronics[J]. *National Science Review*, 2016, 3(1): 128-143.
- [5] KIM D H, AHN J H, CHOI W M, et al. Stretchable and foldable silicon integrated circuits[J]. *Science*, 2008, 320 (5875): 507-511.
- [6] XU S, ZHANG Y, CHO J, et al. Stretchable batteries with self-similar serpentine interconnects and integrated wireless recharging systems[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1543.
- [7] TRIPATHI A K, SMITS E C P, van der PUTTEN J, et al. Low-voltage gallium-indium-zinc-oxide thin film transistors based logic circuits on thin plastic foil: Building blocks for radio frequency identification application [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98 (16): 488.
- [8] KO H, STOYKOVICH M, SONG J, et al. A hemispherical electronic eye camera based on compressible silicon optoelectronics[J]. *Nature*, 2008, 454 (7205): 748-753.
- [9] PARK S, XIONG Y, KIM R, et al. Printed assemblies of inorganic light-emitting diodes for deformable and semitransparent displays[J]. *Science*, 2009, 325 (5943): 977-981.
- [10] KIM D, VIVENTI J, AMSDEN J, et al. Dissolvable films of silk fibroin for ultrathin conformal bio-integrated electronics[J]. *Nature Materials*, 2010, 9 (6): 511-517.
- [11] KIM D, LU N, GHAFARI R, et al. Materials for multifunctional balloon catheters with capabilities in cardiac electrophysiological mapping and ablation therapy[J]. *Nature Materials*, 2011, 10 (4): 316-323.
- [12] 李银华, 刘平, 田保红, 等. 集成电路用铜基引线框架材料的发展与展望[J]. 材料导报, 2007(7): 24-26, 47.
LI Yinhua, LIU Ping, TIAN Baohong, et al. Development and expectation of copper-based lead frame material used in intergrated circuit[J]. *Materials Review*, 2007(7): 24-26, 47.
- [13] 叶方, 高雪松, 周琴. 集成电路塑封中引线框架使用要求[J]. 电子与封装, 2003(2): 26-29.
YE Fang, GAO Xuesong, ZHOU Qin. Application requirements for lead frame used for IC plastic encapsulation[J]. *Electronics & Packaging*, 2003(2): 26-29.
- [14] 罗斌, 夏华翅, 陈花玲, 等. 离子凝胶材料的三维打印工艺[J]. 机械工程学报, 2018, 54 (17): 157-164.
LUO Bin, XIA Huachi, CHEN Hualing, et al. Research on 3D printing process of ionic gel [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(17): 157-164.
- [15] SAARI M, COX B, RICHER E, et al. Fiber encapsulation additive manufacturing: An enabling technology for 3D printing of electromechanical devices and robotic components[J]. *3d Printing and Additive Manufacturing*, 2015, 2(1): 32-39.
- [16] COX B, SAARI M, XIA B, et al. Fiber encapsulation additive manufacturing: Technology and applications update[J]. *3d Printing and Additive Manufacturing*, 2017, 4(2): 116-119.
- [17] MACDONALD E, WICHER R. Multiprocess 3D printing for increasing component functionality[J]. *Science*, 2016, 353 (6307): 8.

作者简介: 朱伟军(通信作者), 男, 1983 年出生, 博士。主要研究方向为增材制造(3D 打印)技术。
E-mail: wjzhu@xjtu.edu.cn