

# 电场驱动喷射沉积微纳3D打印 技术及应用\*

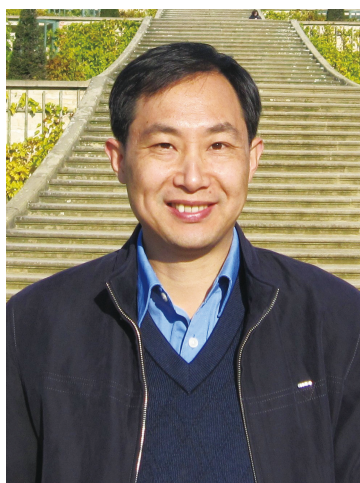
兰红波,赵佳伟,钱 垒,许 权,周贺飞

(青岛理工大学青岛市3D打印工程研究中心,青岛266033)

**[摘要]** 微纳尺度3D打印是增材制造的前沿和研究热点,在航空航天、组织工程、生物医药、微纳机电系统、新材料(超材料、轻量化材料、智能材料、复合材料)、新能源、柔性电子、印刷电子、结构电子、微纳光学器件、微流控器件、可穿戴电子产品、软体机器人等诸多领域和行业有着非常广泛的应用。介绍了课题组近年提出并建立的一种微纳尺度增材制造新工艺——电场驱动喷射沉积微纳3D打印,并论述了近年研究进展和取得的重要成果,介绍了5个工程应用案例。电场驱动喷射沉积微纳3D打印为微纳尺度3D打印和微纳制造提供了一种全新的解决方案,具有良好的工业化应用前景。

**关键词:** 微纳尺度3D打印;电场驱动喷射沉积;微纳增材制造;多材料多尺度3D打印;功能梯度材料/结构

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.01/02.038



兰红波

博士,二级教授,博士生导师,青岛市3D打印工程研究中心主任。国务院政府特殊津贴专家。主要从事微纳增材制造、大面积纳米压印光刻、多材料多尺度3D打印等的研究、开发及工业化应用。出版英文学术著作1本,参编英文学术著作5部;以第一发明人获得美国发明专利2项,中国发明专利30项,发表学术论文86篇。

微纳尺度3D打印(亦称微纳增材制造)是一种新型微纳加工技术,它基于增材制造原理,生产具有微纳特征结构的功能性产品,微纳增材制造包含的尺度比较广泛,主要有微尺度、亚微尺度、纳尺度、原子尺度、宏/微/纳复合多尺度等。与现有的微纳制造技术相比,它具有制造工艺简单、成本低、材料利用率高、材料适用广、无需掩模或模具、直接成形的突出特点,尤其在三维复杂微纳结构、大高宽比微纳结构、复合材料微纳结构、宏/微/纳跨尺度结构、嵌入式异质结构制造以及3D结构电子制造方面具有非常突出的潜能和独特优势<sup>[1-3]</sup>。目前国内外学术界和产业界已经开发的微纳尺度3D打印工艺多达几十种,代表性工艺主要有:基于双光子聚合激光直写、微立

\*基金项目:国家自然科学基金(51775288);山东省重点研发计划(2018GGX103022)。

体光刻成形、电流体喷射打印、微激光烧结/熔化、气溶胶喷射打印、微三维打印(喷射黏结)、聚焦电子束诱导沉积、电化学沉积(Electrochemical Fabrication, EFAB)、激光化学气相沉积、聚焦离子束直写、蘸笔纳米光刻、复合纳米材料3D打印、复合3D打印等。微纳尺度3D打印已经被应用于航空航天、组织工程、生物医药、微纳机电系统、新材料(超材料、轻量化材料、智能材料、复合材料)、新能源(燃料电池、太阳能等)、柔性电子、印刷电子、微流控器件、软体机器人、微纳光学器件等诸多领域和行业,显示出良好的工业化应用前景<sup>[2-9]</sup>。2014年微纳3D打印被美国MIT的《技术评论》评为十大颠覆性的新兴技术。

尽管已经开发出多种微纳尺度3D打印工艺,但是现有的这些技术在实际工程应用中还存在诸多的不

足和局限性,尤其是在宏/微/纳跨尺度3D打印、多材料多尺度3D打印方面面临更大的挑战。迫切需要开发微纳尺度3D打印新工艺、功能性打印材料和工业级装备等。

针对现有微纳尺度3D打印技术的不足和挑战性难题,课题组提出并建立了一种微纳尺度3D打印新工艺——电场驱动喷射沉积微纳3D打印。基于自激发静电场,利用电流体动力喷射和电荷诱导自对正,并结合脉冲锥射流和连续锥射流两种打印工作模式,实现了高效、低成本大面积微纳3D打印,尤其在多材料多尺度3D打印、宏/微跨尺度3D打印方面具有独特的优势和潜能。本文介绍了课题组近年在电场驱动喷射沉积微纳3D打印方面重要研究进展、取得重要成果、以及代表性应用等。

## 电场驱动喷射沉积微纳3D打印基本原理和工作模式

### 1 基本原理

基于电场驱动喷射沉积微纳3D打印包括的主要功能单元: X-Y工作台、衬底(基材/基底/基板等)、打印喷头、高压电源、Z向工作台、气压力精确控制模块、连续稳定供料模块等。提出的一种电场驱动喷射沉积微纳3D打印的结构示意图如图1所示。打印喷头和工作台还可以采用其他的配置形式,实现共形打印和曲面打印。

电场驱动喷射沉积微纳3D打印的成形原理不同于压力驱动型3D打印和电流体动力喷射打印,它是一种基于静电感应和电流体动力学的微喷射沉积成形新技术。传统的电流体动力喷射3D打印通常采用导电喷嘴(第1电极)和导电衬底(第2电极)的电场结构,通过在电极对间施加高压电来形成电场。这种结构对于衬底要求具有导电性,并且导电喷嘴与导电衬底之间的距离也一般被限定在3mm以内(限制了打印件

的高度;打印过程稳定性差)。因此,电流体动力喷射打印技术在实际3D打印应用中受到诸多限制。

电场驱动喷射沉积微纳3D打印技术只需将导电喷嘴与高压脉冲电源正极连接,无需接地的对电极,即利用静电感应作用激发(诱导)喷射所需电场,图2是基本原理示意图。在导电喷嘴处施加高电压使其具有高电势,当打印喷头接近或者靠近基板(衬底)时,带正电的喷嘴将与基板出现静电感应作用,导致基板表面和内部的电荷发生迁移,基板的电荷出现重新分布,负电荷分布在基板上表面,正电荷被排斥移动到远离喷嘴的基板下表面,如图2(a)所示。

基板内部电荷位置的变化将影响原有的电场,由于受到基板上表面负电荷的吸引,喷嘴与基板间的电场将增大。在电场力作用下喷嘴处的液(熔)体被拉伸形成泰勒锥,随着电压增大出现锥射流喷射,打印材料喷射沉积到基板上,参见图2(b)。当对导电喷嘴处施加负极高压时,喷嘴液(熔)滴内部及基板表面电荷发生相反现象,所形成电场仍将驱动打印材料喷射至目标衬底上。具体打印工作过程是:(1)首先在导电喷嘴与基板间形成稳定的电场,在气压作用下到达喷嘴末端的微液(熔)滴受到电场的影响,微滴被极化并在其表面聚集正电荷;(2)在电场力、黏滞力、表面张

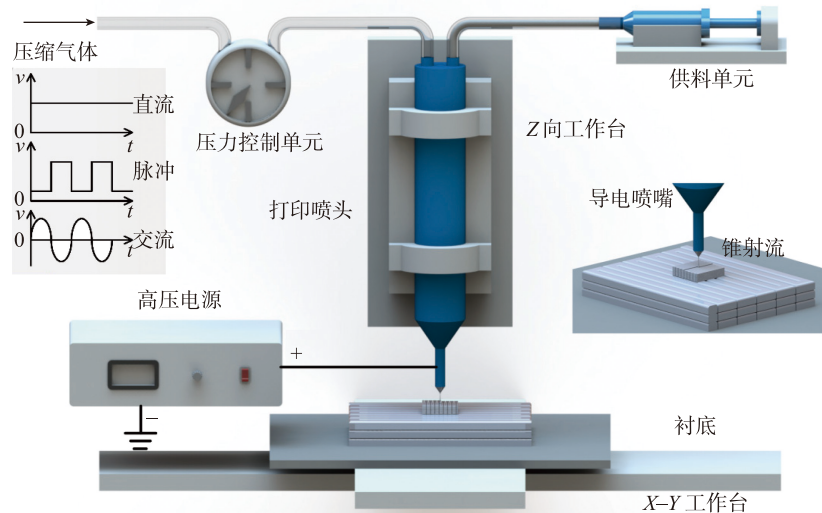


图1 电场驱动喷射沉积微纳3D打印总体结构示意图

Fig.1 Overall structure of electric-field-driven jet deposition based micro-and nano-scale 3D printing

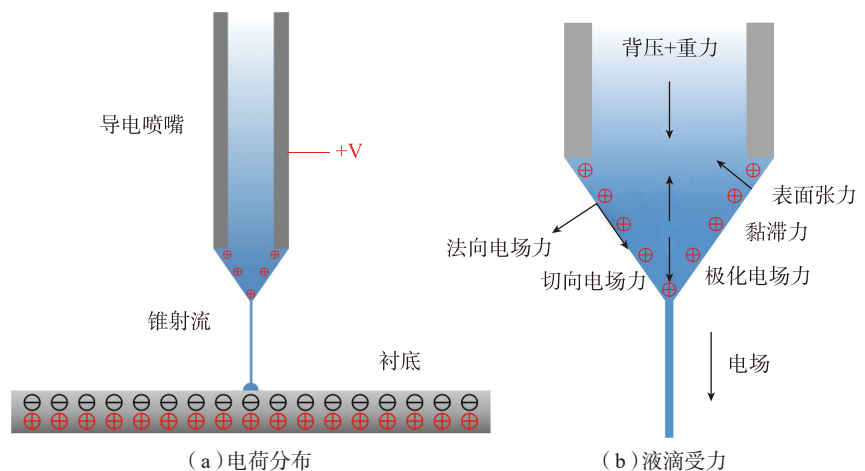


图2 电场驱动喷射沉积微纳3D打印基本原理示意图

Fig.2 Basic principle of electric-field-driven spray deposition micro-nano 3D printing

力等多个力作用下,微滴被逐渐拉伸变形,形成泰勒锥;(3)一旦电场力(静电力)超过液(熔)体表面张力,泰勒锥尖端的液(熔)体将出现喷射,形成非常微细的射流,射流尺寸通常比喷嘴内径低 1~2 个数量级;(4)已喷射出来的液(熔)体在表面张力作用下出现破裂,分裂成极小的微滴,沉积在基板上或者已成形结构上;(5)通过精确控制 X-Y 工作台的移动以及配合喷头喷射的频率的控制,实现微滴在基板上的精准沉积/堆积。每完成一层打印后,打印头向上移动一个层厚的高度,后续通过导电喷嘴与已打印结构之间形成自激发电场,实现下一层特征结构的打印。上述过程不断重复,直至完成整个实体结构的制造<sup>[10-11]</sup>。

## 2 两种工作模式

对于宏/微跨尺度 3D 打印,即宏结构形状和微纳特征结构同时制造,制造需要同时兼顾打印精度和效率。为使新提出的电场驱动喷射沉积高分辨 3D 打印新工艺能更好地满足多尺度 3D 打印要求,更好地实现跨尺度结构一体化制造,提出并定义了两种新的打印工作模式:脉冲锥射流模式和连续锥射流模式。根据打印材料和打印特征结构的不同,采用不同的工作模式。对于黏度较低的材料和非常微细结构,使用脉冲锥射流模式打印,保证被打印微特征结构的精度/分辨率(精度优先);对于高黏度材料或者宏观结构打印,优先考虑采用连续锥射流模式打印,在满足精度前提下实现高效打印(兼顾精度,效率优先)。图 3 分别展示了两种打印模式的示意图。

脉冲锥射流模式下采用脉冲直流/交流电压,在脉冲高电压作用下,导电喷嘴末端材料经历:拉伸变形—锥射流喷射—回缩—破裂等过程,最终形成单个微液(熔)滴。利用极细的锥射流能够产生远远小于喷嘴内径尺寸的微滴,结合脉冲电压

和工作台运动的精准控制实现微滴精确按需喷射沉积。对于连续锥射流模式,其使用直流高电压,持续的电场力驱动液(熔)体在喷嘴处形成稳定的泰勒锥,锥射流不间断喷射,打印材料以连续微细线沉积到衬底上或已成形结构上。连续锥射流模式下打印具有较高的打印效率。结合提出的两种工作模式,电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印具有能够同时兼顾打印精度和打印效率的优势。

## 打印过程数值模拟和试验研究

通过数值模拟、试验观测和试验验证的系统研究,对于电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印的成形机理、主要工艺参数的影响因素和规律开展了更深入的研究。

### 1 数值模拟

采用 COMSOL 仿真软件对喷嘴处电场分布和强度、锥射流喷射过程进行数值模拟,不同时刻下电场强

度分布如图 4 所示。模拟结果显示,当施加高压电后,微滴尖端电场强度明显增加,随时间推移,微滴逐渐发生形变形成泰勒锥,最终产生喷射现象。这是由于在高压作用下,液(熔)内部电荷发生定向移动,正电荷聚集于微滴表面,使得微滴表面电势明显高于其他位置,喷嘴内打印材料位于电场中受电场力作用逐渐被拉出,当所受电场力大于微滴表面张力时,微滴分离,完成喷射过程。锥射流喷射过程中流场、电场、电荷密度场之间存在相互促进,相互制约的关系,即气液交界面处的电荷受电场力作用带动液(熔)体运动,使得弯液面发生形变,而电荷位置的变化导致电场的重新分布。

### 2 试验观测

用高速摄像机,对于打印过程进行试验观测。

当使用脉冲锥射流模式打印时,喷射过程如图 5 (a) 所示,微滴

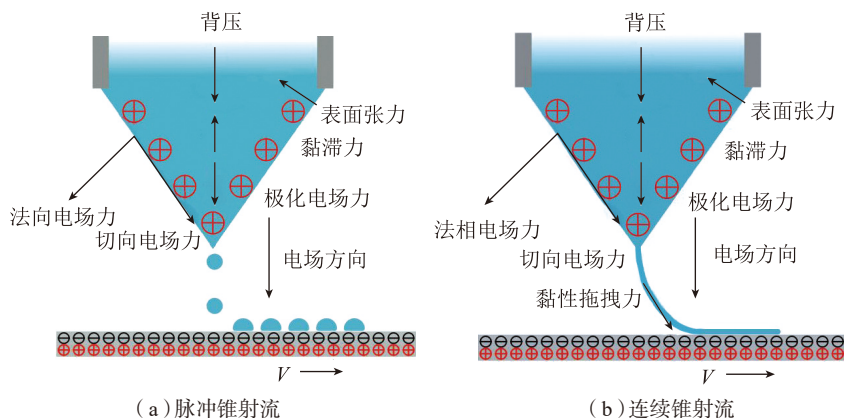


图3 两种工作模式原理

Fig.3 Two working mode principles

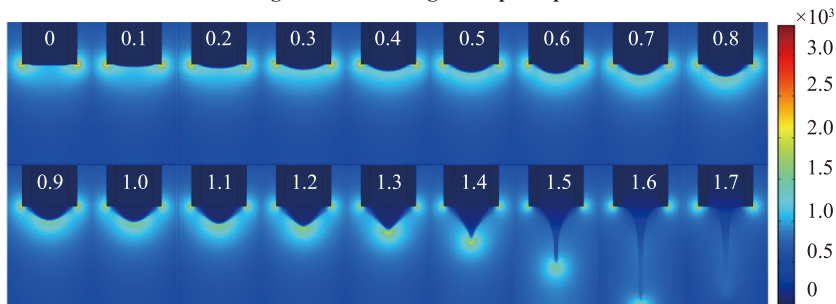


图4 电场驱动喷射沉积微尺度3D打印喷射过程电场强度仿真

Fig.4 Electric field intensity simulation of electric-field-driven spray deposition microscale 3D printing jet process

受力变形,喷射形式为单点微滴喷射。当采用连续射流模式打印时,喷射过程如图 5 (b)所示,喷射形式为连续射流。

电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印是利用静电感应方式形成喷射电场,在打印过程中发现该工艺具有自对正效应。当喷嘴在打印过程中受设备机械精度等影响而发生偏移时,喷射微滴仍朝向已打印实体结构表面沉积。这是因为尽管喷嘴位置发生偏移,但已打印实体相对打印衬底具有一定高度,此时喷嘴与实体表面之间静电感应作用最强,这就使得微滴受电场力偏向实体喷射,在不同偏移量下,打印过程如图 6 所示。

由图 6 可以看出,随着偏移量的增加,自对正效应产生的喷射偏移角度越大,打印在允许偏移量范围内可以继续原位打印。当偏移量为  $200\mu\text{m}$  时,自对正效应不能弥补偏移,打印方向垂直向下。图 6 (f)为在两面已打印的墙结构之间喷射的过程,由于受两面电场力作用,两个方向的自对正作用相互抵消,打印仍然垂直向下。利用电荷诱导自对正效应能够实现多层超微细结构的精准对正堆积,为电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印的实现(按需高分辨沉积,电荷诱导锥射流自对正高精度堆积)提供支撑和保证。

### 3 试验研究

#### 3.1 衬底材质

电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印具有不受衬底/基板材质限制的独特优势。大多数电喷印需要以导电材料作为目标衬底,必须使用绝缘衬底时需将绝缘衬底放置在接地的导电基板上,并且绝缘衬底还有厚度要求。通常静电感应具有普遍适用性,因此,提出的电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印理论上不受衬底/基板和打印材料的制约,不管是导电的和绝缘的衬底/基板都能实现稳定的打印。图 7 展示了使用不同材料衬

底时,均能在喷嘴处形成泰勒锥和一定长度稳定的锥射流。所用衬底从左到右依次为导体不锈钢片、半导体硅片、绝缘体玻璃片、喷嘴尖端与衬底的距离均为  $2\text{mm}$ ,打印材料均为低黏度树脂(黏度  $100\text{mPa}\cdot\text{s}$ ),3 种情况下形成锥射流的临界电压值依次为  $2100\text{V}$ 、 $2500\text{V}$ 、 $3000\text{V}$ 。试验结果显示,电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印对于衬底/基材具有非常好的

普适性,并且对于导电性能越好的衬底喷射所需临界电压值越小。因此,该技术突破了电流体动力喷射打印工艺需要导电衬底或者需要有导电支撑的限制,该新工艺拓宽了实际应用的范围。

#### 3.2 打印材料

电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印适用的打印材料几乎没有限制,诸如高分子材料、金属材料、陶瓷材

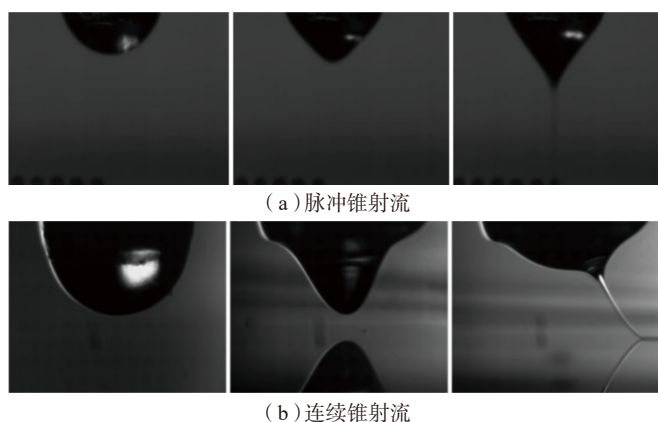


图5 不同打印工作模式喷嘴处液滴喷射动态演化

Fig.5 Dynamic evolution of droplet ejection at nozzles in different print mode of operation

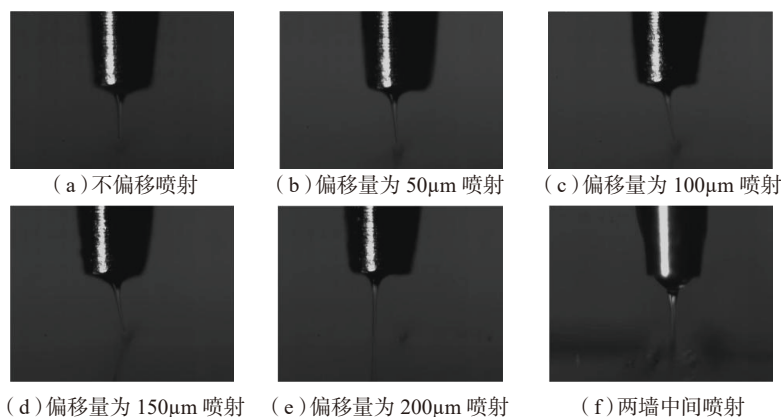


图6 不同偏移量下的自对正效应

Fig.6 Self-aligning effects at different offsets

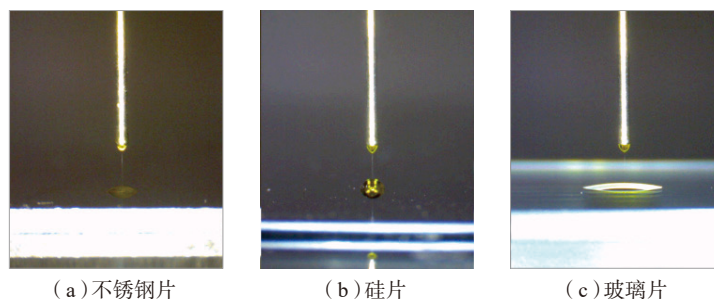


图7 不同衬底情况下锥射流

Fig.7 Cone jet in different substrate conditions

料、纳米材料、生物材料、复合材料等；而且打印材料的黏度范围非常宽泛，目前该工艺已经实现了最高黏度  $12000\text{mPa}\cdot\text{s}$  材料的稳定打印(可实现更高黏度的打印材料，如导电银胶和热熔融复合材料等)。使用内径为  $60\mu\text{m}$  的打印喷嘴，实现最高分辨率  $2\mu\text{m}$  微结构打印。图 8 的试验结果显示，采用光敏树脂、纳米导电银浆、聚己内酯(PCL)、PMMA 这 4 种打印材料，均能打印出高分辨率和高表面质量(优良的线宽粗糙度)图案。聚己内酯(PCL)常温下为固体，其熔点  $56\sim 64\text{ }^\circ\text{C}$ ，采用电场驱动喷射沉积热熔融型微纳 3D 打印能够很容易实现亚微尺度结构打印。使用光敏树脂、纳米银浆和 PCL 打印微细线结构时，3 种材料虽然黏度差别很大，但通过调整打印工艺参数，均能实现  $10\mu\text{m}$  以下高分辨率结构的打印。现有电流体动力喷射打印难以实现导电材料打印，尤其是高黏度导电材料的打印，例如采用电流体动力喷射打印导电银胶材料时，由于导电喷嘴与衬底之间距离很小，导电银浆射流极易在两者间空气击穿发生放电甚至短路现象，无法保证打印稳定性和连续性。电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印衬底不需要接地，即便射流使喷嘴与目标衬底连接，也不会出现放电短路现象。

### 电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印机

目前课题组已经完成了 3 代电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印机的开发，图 9 是最新研制的电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印机，最大成形尺寸为  $200\text{mm}\times 200\text{mm}\times 50\text{mm}$ ，运动系统采用高精度直线电机，定位精度为  $\pm 5\mu\text{m}$ ，重复定位精度为  $1\mu\text{m}$ ，并带有视觉观测模块、真空加热吸附平台、自动供料模块等，同时搭配自主研发的电场驱动高分辨率打印喷头以及电场驱动热熔融高分辨率打印

喷头，分别适用于中高黏度液体材料与热塑性聚合物材料 3D 打印。目前利用该设备已经完成了超微细电路、透明电极、透明电磁屏蔽、透明电加热玻璃、生物支架、大面积微尺度模具、复合材料和功能梯度材料 3D 打印等实际打印和测试。

### 电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印典型工程应用

针对不同应用领域的需求，使用不同的打印材料，课题组已经完成多个工程案例的打印和测试。本文重点介绍以下 5 个典型案例。

#### 1 透明电极和超微细电路

透明导电电极(Transparent Conducting Electrodes, TCEs)需同时具有良好的导电性能和透光性能，尤其是柔性透明导电电极还具有优良的机械性能(延展性、柔韧性、抗弯曲

性能)。目前透明导电电极已经成为触摸屏、太阳能电池、OLED、LCD、电子纸等的重要组成部分。金属(银)网格透明电极不仅具有与 ITO 相媲美的透光性和导电性，还具有柔韧性强、适用于软硬衬底(基板)、成本低等突出优点，目前被学术界和产业界认为是新一代最理想透明电极之一。目前，学术界和产业界已经提出制造银网格透明电极的多种方法，诸如光学光刻、纳米压印、喷墨打印、气溶胶打印等多种制造技术，然而这些技术或解决方案目前均存在一定的局限性。电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印为高性能、大面积透明电极高效、低成本规模化制造提供了一种理想的解决方案。以纳米银浆为打印材料(其黏度为  $9500\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，表面张力为  $32\text{dynes/cm}$ )，采用连续锥射流模式打印，使用内径  $60\mu\text{m}$  喷

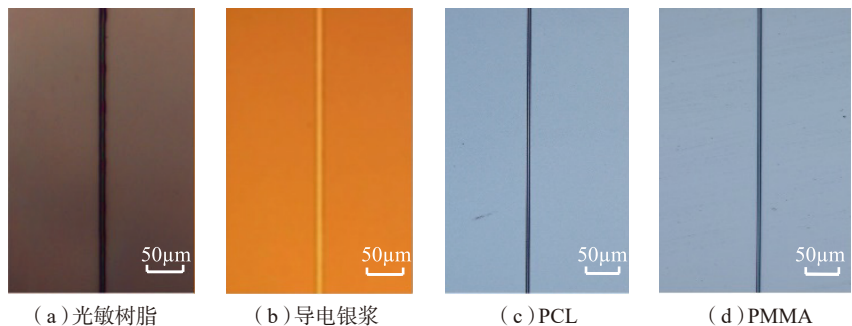


图8 不同打印材料打印的细线图案

Fig.8 Thin line patterns printed with different printed materials

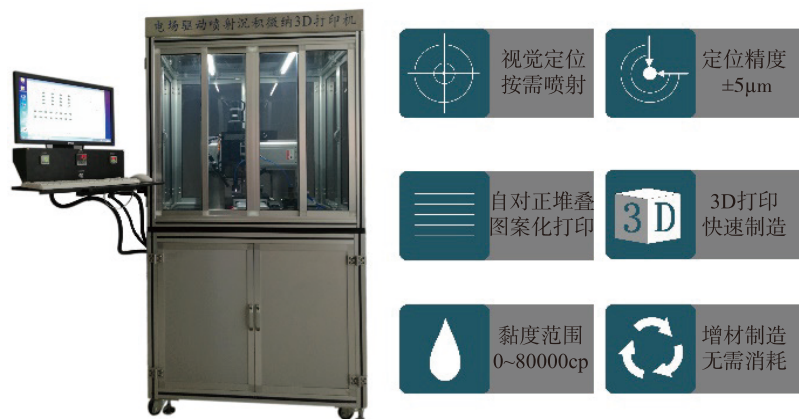


图9 自主研发具有完全知识产权的电场驱动喷射沉积微纳3D打印机

Fig.9 Independently developed electric field driven spray deposition micro-nano 3D printer with complete intellectual property rights

头,打印速度为 240mm/s,在玻璃基材打印的透明电极如图 10 所示。线宽  $10\mu\text{m}$ ,周期  $500\mu\text{m}$ ,透明电极尺寸  $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 。

## 2 组织工程支架与单细胞培养板

微尺度网格三维结构在生物工程等领域具有非常广泛的工程应用,其中两个典型应用为组织支架与单细胞培养板。组织支架是一种三维多孔结构,理想的组织工程支架必须具有可控的孔隙率、孔径尺寸和微孔分布。单细胞培养板要求每个方格相互不干涉,细胞不会通过网格壁随意移动,从而达到单个细胞单独培养。打印材料选用聚己内酯材料,聚己内酯是一种具有良好生物相容性、良好有机高聚物相容性的生物材料。使用连续锥射流模式,施加直流高压电,电压 1200V,通过改变打印速度、打印平台及打印喷嘴温度,进而可以调节细丝下垂度分别打印制作组织工程支架(图 11 (a))和单细胞培养版(图 11 (b))。其中组织支架的尺寸为  $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ ,线宽为  $30\mu\text{m}$ ,周期为  $300\mu\text{m}$ ,支架高度为  $200\mu\text{m}$ ;培养板尺寸为  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ ,线宽为  $10\mu\text{m}$ ,周期为  $100\mu\text{m}$ ,培养板高度为  $30\mu\text{m}$ 。

## 3 大尺寸微尺度模具

大尺寸微尺度模具是微纳米压印、软光刻、微流控器件等诸多领域最重要的工艺要素,然而大尺寸微尺度模具高效、低成本制造一直是学术界和产业界所面临的一项挑战性难题。传统的光学光刻和电子束直写等制造方法存在生产成本低、周期长的问题,尤其是目前几乎无法实现  $8\text{in}$  ( $1\text{in}=2.54\text{cm}$ ) 以上无拼接大尺寸微纳模具(母版)制造,限制了这些技术普及和更广泛应用。

以 PCL、PMMA (聚甲基丙烯酸甲酯) 等为打印材料,结合电场驱动熔融喷射沉积微纳 3D 打印技术,提供了一种大尺寸无拼接微尺度模具快速、低成本制造的新方

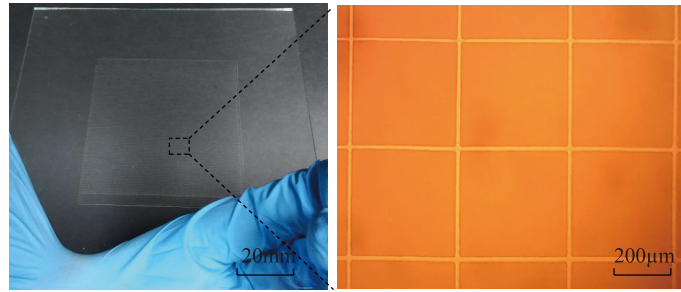
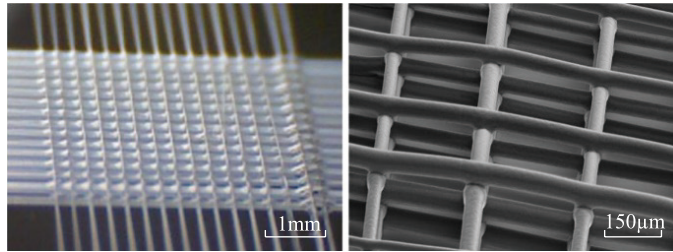
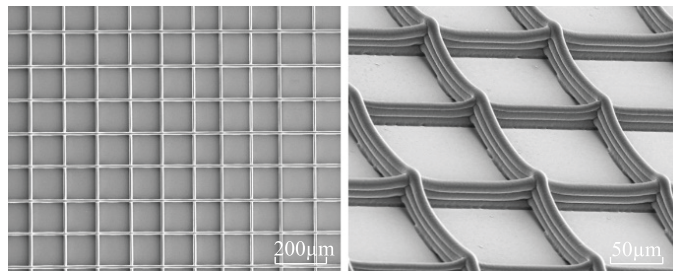


图 10 打印的大面积透明电极

Fig.10 Printed large area transparent electrode



(a) 组织支架



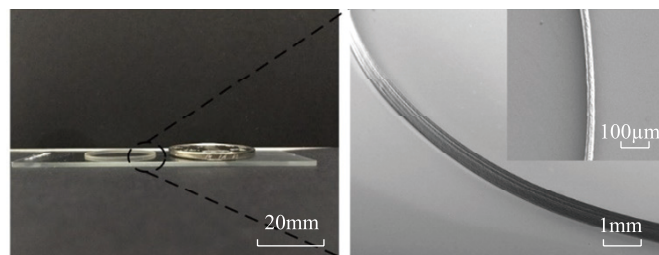
(b) 单细胞培养板

图 11 微尺度网格三维结构

Fig.11 Microscale grid three-dimensional structure



(a) 线栅结构模具



(b) 大高宽比微尺度圆环

图 12 大尺寸微尺度模具

Fig.12 Large size micro-scale mold

法。图 12 是制造的线栅结构大尺寸微模具和大高宽比圆环结构微模具。其中线栅结构微模具尺寸为  $80\text{mm} \times 80\text{mm}$ , 线宽为  $4\mu\text{m}$ , 周期为  $200\mu\text{m}$ , 图形高宽比为  $1:0.3$ 。大高宽比圆环结构微模具壁厚为  $20\mu\text{m}$ , 直径为  $20\text{mm}$ , 高度为  $500\mu\text{m}$ , 高宽比达到  $25:1$ 。

#### 4 功能梯度材料 / 结构

复合材料 3D 打印尤其是功能梯度材料 / 结构 3D 打印代表增材制造未来的发展方向, 尤其是功能梯度材料在航空航天、生物医疗、软体机器人、可穿戴设备等领域具有广泛的应用。采用电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印, 并结合课题组先前提出的主动混合喷头多材料 3D 打印技术, 已经实现了连续功能梯度材料 3D 打印。主动混合喷头多材料 3D 打印技术是将不同材料按不同组分配比实时进料, 在喷头处进行主动混合搅拌, 形成具有不同理化性能的复合材料, 最后再进行三维打印。图 13 (a) 是打印的介电材料功能梯度零件, 基体材料为 PLA, 掺杂填料为石墨烯, 零件打印材料由纯 PLA 开始通过逐渐在 PLA 内增加石墨烯材料, 改变材料的介电常数, 介电材料功能梯度零件在高电压领域具有非常广泛的工业化应用。图 13 (b) 是打印的变刚度功能梯度结构, 基体材料为 PDMS, 掺杂填料为纳米碳化硅, 变刚度功能梯度结构在柔性电子、软体机器人、可穿戴设备等领域具有广阔的应用前景。

#### 5 3D 结构电子和嵌入式电子

三维结构电子是典型的多材料多尺度功能性产品 / 器件, 在航空航天、可穿戴设备、MEMS、医疗电子等领域有着广泛的应用前景, 但是采用现有的制造技术实现 3D 结构电子产品低成本批量化制造是一项难题。结合多喷头打印技术, 电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印为其提供了一种全新的解决方案。图 14 是课题组打

印的一种 3D 结构电子原型, 基体材料是光固化树脂(黏度  $800\text{mPa} \cdot \text{s}$ ), 导电结构材料是导电银胶(黏度  $8000\text{mPa} \cdot \text{s}$ )。基体为圆台形状, 底部直径为  $15\text{mm}$ , 顶面直径为  $11\text{mm}$ , 圆台高度为  $4\text{mm}$ ; 在圆台顶部打印出螺旋形状导电结构(打印材料使用导电银胶), 线宽为  $300\mu\text{m}$ 。由于导电银胶常温下即可快速固化, 不需要高温加热等后处理工艺, 不会影响甚至导致打印件的损坏。结合“Pick-and-Place”技术, 图 15 是打印的嵌

入式电子产品。基体材料为 ABS 材料, 导电结构材料是导电银胶。ABS 用于构建电子器件的基体部分, 当电路沟槽结构打印完成后, 将电子元件嵌入基体内, 并在导线沟槽内打印导电银胶, 连接各个电子元件, 使电路导通, 最后使用 ABS 将元件进行封顶完成最终制作。

### 结论

电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印技术是课题组近年提出并发展建

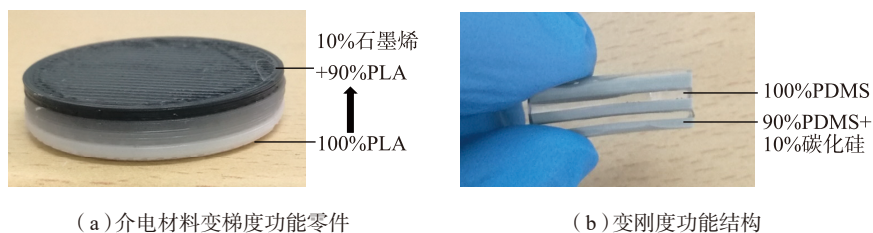


图 13 大尺寸微尺度模具

Fig.13 Large size micro-scale mold

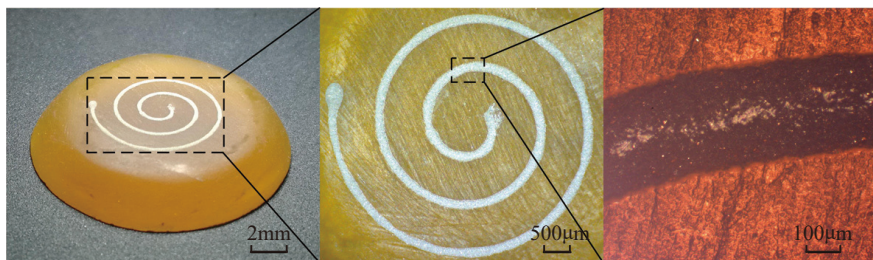


图 14 3D 结构电子

Fig.14 3D structure electronics

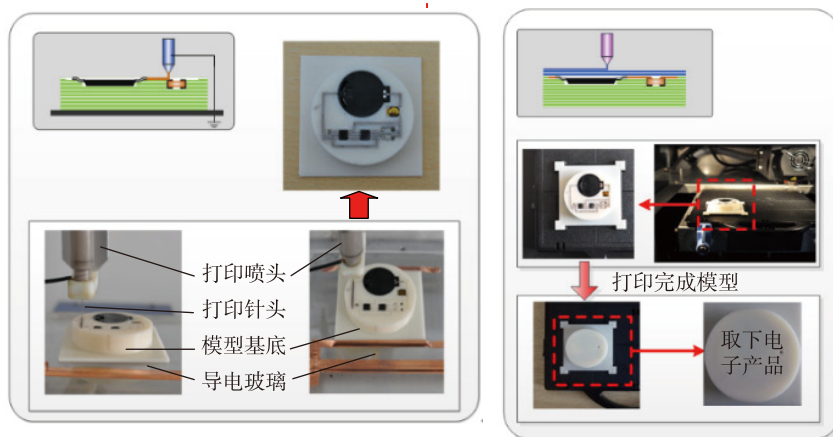


图 15 嵌入式电子产品一体化打印

Fig.15 Embedded electronic product integrated printing

立的一种微纳尺度增材制造新工艺,基于自激发静电场,利用电流体动力喷射和电荷诱导自对正,并结合脉冲锥射流和连续锥射流两种打印工作模式,实现了高效、低成本大面积微纳 3D 打印。它具有以下显著优势和特点:适合多种打印材料,尤其适合高黏度材料打印;适用于硬质和柔性不同类型基材(衬底)的打印,能够实现共形和曲面 3D 打印,尤其是在多材料多尺度 3D 打印、宏/微跨尺度 3D 打印方面具有独特的优势和潜能。

本文介绍了课题组在电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印基础理论、数值模拟和试验研究等方面的重要研究进展,尤其对电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印技术已经开展的典型工程应用做了重点论述。

电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印作为一项新技术,在基础理论、成形机理和规律、工程应用等方面还需要开展更为深入的研究,未来尤其是在功能打印材料、打印分辨率和精度、打印稳定性、多材料多尺度 3D 打印等方面需要寻求更大的突破。

电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印距离广泛工业化应用还有很长的道路。

### 参考文献

- [1] LEWIS J A, AHN B Y. Three-dimensional printed electronics[J]. *Nature*, 2015, 518(7537): 42–43.
- [2] DERBY B. Printing and prototyping of tissues and scaffolds[J]. *Science*, 2012, 338(6109): 921–926.
- [3] 兰红波, 李涤尘, 卢秉恒. 微纳尺度 3D 打印 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45(9): 919–940.
- LAN Hongbo, LI Dichen, LU Bingheng. Micro-nanoscale 3D printing[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2015, 45(9): 919–940.
- [4] VAEZI M, SEITZ H, YANG S. A review on 3D micro-additive manufacturing technologies[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67(5–8): 1721–1754.
- [5] MACDONALD E, WICKER R. Multiprocess 3D printing for increasing component functionality[J]. *Science*, 2016, 353(6307): 2093–2093.
- [6] TRUBY R L, LEWIS J A. Printing soft matter in three dimensions[J]. *Nature*, 2016, 540(7633): 371–378.

[7] COMPTON B G, LEWIS J A. 3D-printing of lightweight cellular composites[J]. *Advanced Materials*, 2015, 26(34): 5930–5935.

[8] BARTLETT N W, TOLLEY M T, OVERVELDE J T, et al. A 3D-printed, functionally graded soft robot powered by combustion[J]. *Science*, 2015, 349(6244): 161–165.

[9] KONG Y L, TAMARGO I A, KIM H, et al. 3D printed quantum dot light-emitting diodes[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(12): 7017–7023.

[10] QIAN L, LAN H B, ZHANG G M, et al. A novel microscale 3D printing based on electric-field-driven jet deposition[C]//ASME 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2018.

[11] 钱垒, 兰红波, 赵佳伟, 等. 电场驱动喷射沉积 3D 打印 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2018, 48(7): 773–782.

QIAN Lei, LAN Hongbo, ZHAO Jiawei, et al. Electric-field-driven jet deposition 3D printing[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2018, 48(7): 773–782.

通讯作者: 兰红波, E-mail: hblan99@126.com。

## Electric-Field-Driven Jet Deposition Based Micro-and Nano-Scale 3D Printing Technique and Its Application

LAN Hongbo, ZHAO Jiawei, QIAN Lei, XU Quan, ZHOU Hefei

( Qingdao Engineering Research Center for 3D Printing, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China )

**[ABSTRACT]** Micro-and Nano-scale 3D printing is a new frontier in additive manufacturing. It has been used in various fields including the aerospace industry, tissue engineering, MEMS, new materials (metamaterials, lightweight materials, smart materials, composite materials), new energy, flexible electronics, printed electronics, micro/nano optical devices, soft-body robots, etc. This paper presents a novel micro-and nano-scale 3D printing developed by our research group which is named the electric-field-driven jet deposition based micro-and nano-scale 3D printing technique. The recent progresses and significant results of this technique are described. In addition, five typical cases are introduced. The electric-field-driven jet deposition based micro-and nano-scale 3D printing provides a new and prospect solution for micro-nano scale 3D printing and micro-and nano manufacturing, and shows a high potential in industrial applications.

**Keywords:** Micro-and nano-scale 3D printing; Electric-field-driven jet deposition; Micro/nano additive manufacturing; Multi-material and multi-scale 3D printing; Functionally gradient material/structure

( 责编 铃兰 )