

# 2020年3D打印热点回眸

吴磊<sup>1,2</sup>, 张虞<sup>1,2</sup>, 邹苗苗<sup>1,2</sup>, 宋延林<sup>1,2\*</sup>

1. 中国科学院化学研究所绿色印刷重点实验室, 北京 100190

2. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 3D打印是基于材料累加原理,将计算机中的三维模型通过分层添加材料打印出实物的一种增材制造技术。2020年,3D打印研究在打印机理、技术改进及应用拓展等方面取得了重要进展。从打印方法改进、新型墨水研发、新型结构制备和应用,以及金属3D打印机理研究等方面回顾了3D打印的年度研究热点和代表性成果。

**关键词** 3D打印;光固化;打印精度;打印速度;金属打印

3D打印技术可以快速设计和制造复杂结构,无需昂贵的工具、模具或光刻掩模,开启了计算机可控制备机械、光电等功能结构和器件的增材制造新时代。随着打印方法不断改进和打印材料范围不断扩大,3D打印能够在不同长度范围内以可编程方式控制其成分和体系结构,从而推动了众多领域的创新,如仿生结构、柔性传感器和软体机器人等。2020年是3D打印技术快速发展的一年,科研工作者从打印方法学、功能墨水开发、新型结构制备以及金属零部件的缺陷机制等方面对3D打印进行了深入的研究,为实现产业应用奠定了坚实的基础。

## 1 3D打印技术改进

3D打印发展的方向是提高打印的体量、精度、速度、打印结构的均一性以及打印结构的多材料

化。自2015年美国Carbon 3D公司联合美国北卡罗来纳大学的研究者提出利用透氧层作为光固化界面的连续液面制造技术(continuous liquid interface production, CLIP)<sup>[1]</sup>以来,各国研究者围绕调控光固化界面以实现高速连续3D打印,开展了一系列工作。2018年,中国科学院化学研究所宋延林团队<sup>[2]</sup>提出了利用仿生低粘附润滑层来降低光固化过程中的粘附以提高打印速度的方法。2019年,美国西北大学Mirkin等<sup>[3]</sup>利用流动的聚四氟乙烯液体来作为光固化界面以降低热量累积,并提高打印速度。同年,美国加利福尼亚大学伯克利分校Taylor团队<sup>[4]</sup>提出的计算轴向光刻技术(computed axial lithography, CAL),通过利用轴向切片的技术可以实现体相3D结构成型,避免了传统的逐层制造工艺。

2020年,高精度高速3D打印技术得到进一步发展。针对光固化3D打印过程中液体树脂在打印

收稿日期:2020-12-16;修回日期:2021-01-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51803219,51773206);国家重点研发计划项目(2018YFA0208501)

作者简介:吴磊,副研究员,研究方向为连续3D打印及应用,电子信箱:wulei1989@iccas.ac.cn;宋延林(通信作者),研究员,研究方向为绿色印刷及功能器件,电子信箱:ylsong@iccas.ac.cn

引用格式:吴磊,张虞,邹苗苗,等. 2020年3D打印热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 212-219; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.01.018

结构表面的残留影响打印精度的问题,中国科学院化学研究所宋延林团队<sup>[5]</sup>提出了单墨滴3D打印的策略(图1(a))。通过在3D打印体系中引入可退浸润的三相接触线,有效降低了液体树脂在固化结构表面的残留,同时增加了3D打印体系中固液界面(包括液体树脂与固化界面、液体树脂与空气之间的界面)的自由度及液滴内部树脂的循环,防止高速打印过程中树脂额外固化导致的打印结构凸起或台阶结构,从而显著提高了3D打印的精度和稳定性,实现了高精度、高材料转化率的精细结构3D打印。

针对2019年Taylor团队提出的体相3D结构成型精度较低,只能实现300  $\mu\text{m}$ 的打印精度问题,瑞士洛桑联邦理工学院Delrot团队<sup>[6]</sup>通过反馈增强的层析成像重建技术,将分辨率提高至80  $\mu\text{m}$ ,可以制备厘米级的丙烯酸和有机硅结构。该技术采用透明树脂制成的容器,利用调制器输入的紫外光进行固化(图1(b))。调制器在容器旋转过程中提供多维投影,从而形成所需的形状。进一步在3D打印体系中集成反馈系统,可以精确控制打印过程中树脂的光聚合,从而提高打印结构的几何保真度。经过改进,可以在30 s内打印出巴黎圣母院的拱形扶壁结构,表明该技术在超快制造中的应用前景。

除了基于树脂聚合的光固化3D打印技术,从喷嘴喷出或挤出材料的逐层沉积增材制造技术也是一种常用的3D打印技术。虽然其具有较好的材料通用性,但是受喷嘴孔径尺寸的影响,这种技术在打印速度和分辨率方面受到限制。随着近年来电流体动力喷墨打印技术的开发<sup>[7]</sup>,打印速度得到了一定程度的提升,但通过电压喷射出的液流难以控制,可打印的形貌也非常受限。西班牙罗维拉-威尔吉利大学Rosell-Llompарт联合西班牙ICREA (Catalan Institution for Research and Advanced Studies)研究所Andreu Cabot团队<sup>[8]</sup>提出了一种利用静电射流偏转技术的超高速3D打印方法(图1(c)),通过在电流体动力喷墨打印机周围设置电极,并施加电压产生静电偏转射流以连续调节射流横向加速度。通过该方法,可将纳米纤维逐层堆叠

在一起,最快可实现高达 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的面内打印速度和 $0.4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的垂直方向打印速度,比传统电流体动力喷墨打印技术快3~4个数量级,并且可以打印亚微米级尺度和小曲率半径的3D结构。

随着对3D打印结构材料多样性的需求越来越高,美国哈佛大学的Lewis团队<sup>[9]</sup>提出了多材料3D打印技术。为了进一步解决多材料梯度分辨率低、连续性差和不同材料之间粘结力弱的问题,德国斯图加特大学Wood和Menges课题组联合德国马克斯普朗克智能系统研究所(Max Planck Institute for Intelligent Systems)Sitti课题组<sup>[10]</sup>,提出了将数字处理和3D打印相结合的多材料打印方法(图1(d))。他们设计了一种数字工作流程,允许用户将几何模型与梯度数据相结合,进而创建功能梯度材料数据并生成制造代码,同时调节挤出时间和聚合物的分子量、含量及成型固化的时间。将梯度信息嵌入到设计中,即可生成自定义的制造代码来控制3D打印机和注射泵,从而得到梯度功能材料,进而实现其刚度梯度及可控形变,为多材料程序化打印制备形变结构及软体机器人提供了基础。

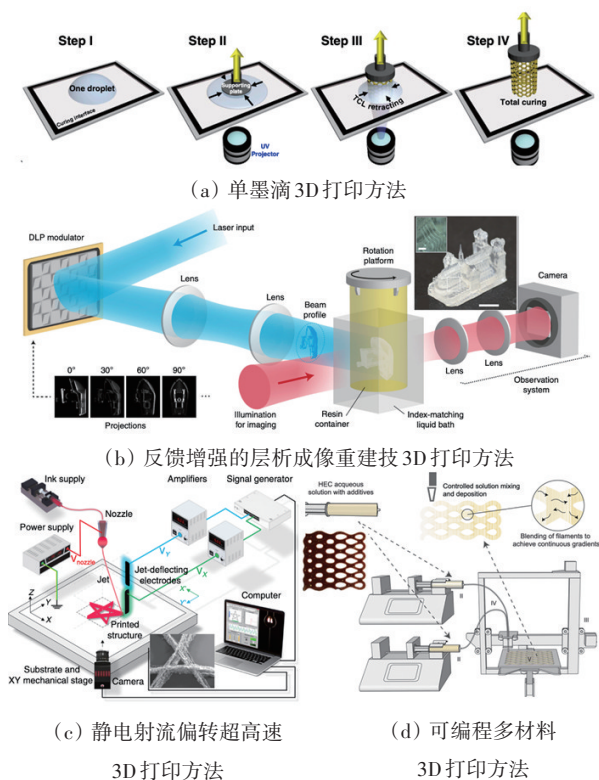


图1 3D打印方法学进展

## 2 3D 打印墨水多样化

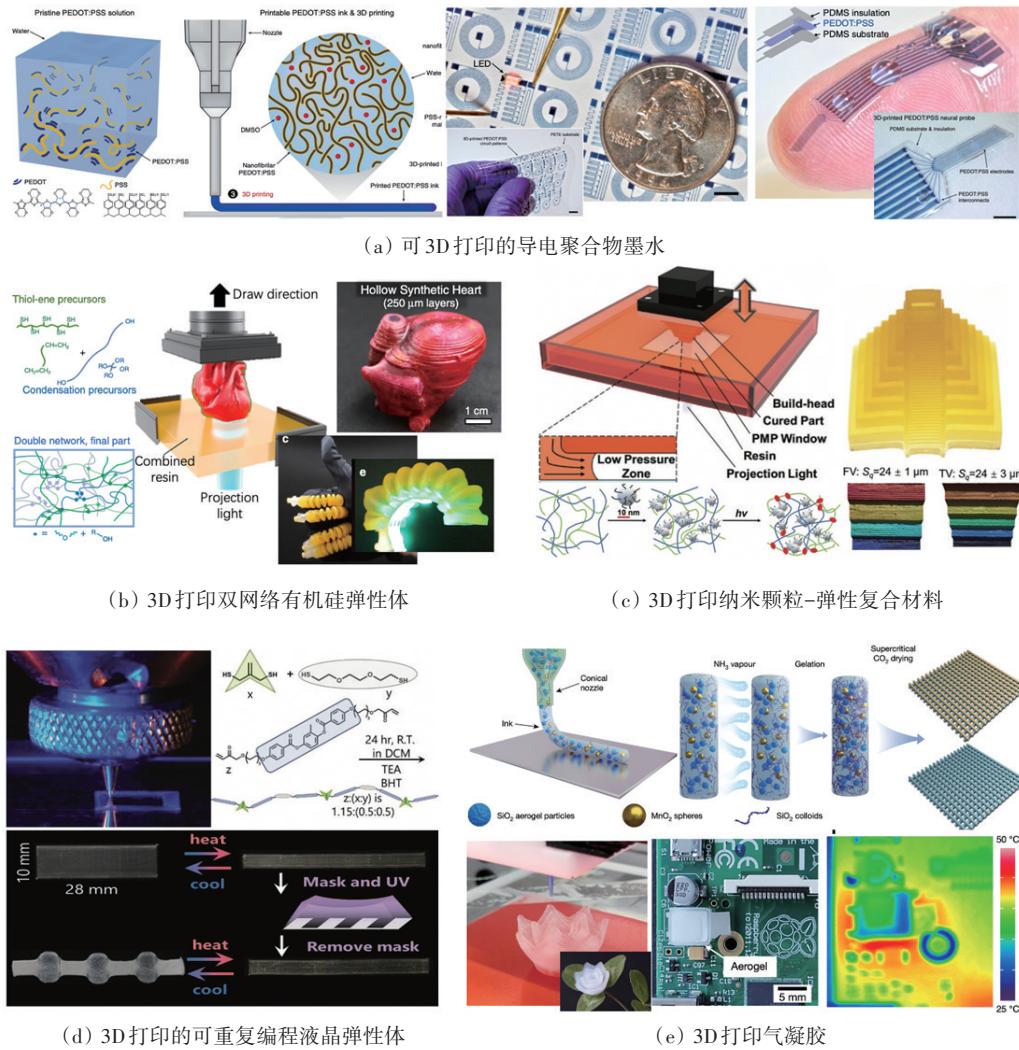
为了充分发挥 3D 打印技术在制造领域的优势,研发高性能 3D 打印墨水是重要的材料基础。3D 打印从技术上大体可以分为两类:第一类是基于光引发聚合、固化的方法,3D 结构是由可聚合的材料固化生成;第二类是基于喷嘴将材料挤出到平台上,通过喷嘴在挤出过程中的水平移动和平台的垂直移动来决定 3D 打印的最终形状。不同的 3D 打印方法和应用领域对墨水的要求不同,因此需要针对性地进行 3D 打印墨水的研发和改进。

为了解决 3D 打印结构的导电性问题,通常使用导电聚合物作为墨水材料。但是传统的导电聚合物通常以单体或聚合物溶液的形式存在,流动性强,成型控制性能较差,难以直接用于 3D 打印。针对这个问题,美国麻省理工学院赵选贺团队<sup>[11]</sup>提出了一种将商用的聚(3,4-乙烯二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)水溶液转化为可 3D 打印的导电聚合物墨水的方法(图 2(a)),通过冷冻及低温真空干燥的方式提取 PEDOT:PSS 溶质,并重新分散于水-DMSO 混合溶剂中,即可调节得到 PEDOT:PSS 分散液的浓度和其流变性。当 PEDOT:PSS 的质量百分比处于 5%~7% 范围时,墨水的流变性和稳定性满足使用需求,在室温下保存 1 个月其流变性能和可打印性没有明显变化。基于这种导电聚合物墨水,该团队实现了导电聚合物微结构的高分辨、高通量、快速直接 3D 打印,并成功监测神经元活动信号,为 3D 打印柔性电子、可穿戴等器件提供了新策略。

弹性体材料由于具有卓越的机械性能、热阻和化学惰性,成为制备软质器件的理想材料,2020 年,弹性体墨水的开发使得 3D 打印弹性、形状记忆结构取得突破性进展。来自 Facebook Reality Labs (脸书虚拟现实研究实验室)的研究人员 Wallin 和 Mengüç<sup>[12]</sup>联合开发了一种双网络有机硅弹性体, (图 2(b))。他们通过立体光固化的 3D 打印技术实现了高性能的有机硅弹性体的制备。该墨水的关键是选用具有速度快、产率高的硫醇烯分步加成反应,完成第一网络结构;并设计含羟基和醚基的化

合物与第一网络结构形成互穿的双网络结构,且第二网络结构对体系的力学性能起到关键作用。为了进一步增强机械性能,纳米颗粒常被复合于弹性体墨水中,但会导致墨水粘度大幅增加,可 3D 打印性降低。美国康奈尔大学 Shepherd 联合 Facebook Reality Labs 的 Mengüç<sup>[13]</sup>提出了利用连续打印过程中的负压及外部辅助加热的方法来实现纳米颗粒-弹性体复合材料的面成型光固化 3D 打印(图 2(c)),并给出了可打印的纳米颗粒浓度和温度的范围。为了实现弹性体的结构可塑性能,美国哈佛大学 Lewis 团队<sup>[14]</sup>开发了可 3D 打印的液晶弹性体,液晶弹性体在其向列至各向同性转变温度上下循环时可发生可逆形变,由于在弹性体中引入了可光触发的动态键合作用,因此可在可逆形变过程中通过紫外光照射将其形状固定,从而实现形状编程控制(图 2(d))。为了实现 3D 打印结构的多形变操纵,美国佐治亚理工学院 Qi 联合美国俄亥俄州立大学 Zhao<sup>[15]</sup>通过将 2 种磁性颗粒集成于非晶形状记忆聚合物基体中,在磁场驱动下基体可通过磁感应加热而软化,而具有可重复编程性质的磁性颗粒可实现快速且可逆的形状变化,通过冷却可锁定形变形状,且改变用于加热的颗粒负载可实现程序化驱动形变。总之,可 3D 打印弹性体的开发可以显著提高制造柔性 3D 结构的能力,有望应用于软体驱动装置、机器人、柔性电子等领域。

硅气凝胶由于其超低的热导率和开放的孔结构,在隔热、催化、环境修复、光学器件等方面具有广泛的应用前景,但较差的机械可加工性导致其 3D 成型仍存在瓶颈。来自瑞士联邦材料科学与技术研究所的研究人员 Malfait 和 Zhao<sup>[16]</sup>利用凝胶颗粒分散液剪切变稀的性质,实现了气凝胶结构的 3D 打印(图 2(e))。打印所用的硅溶胶由于凝胶颗粒的体积分数高而表现出剪切稀化现象,可在打印过程中从喷嘴流出,但在打印后其粘度会迅速增加,从而确保 3D 结构成型。在打印结束后,将成型的硅溶胶在氨气中凝胶化即可变为气凝胶。3D 打印的气凝胶保留了高比表面积  $751 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  和超低的导热系数  $15.9 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,研究人员同时还展示了 3D 打印的气凝胶结构器件可用于热管理、小型气体



(a) 可3D打印的导电聚合物墨水

(b) 3D打印双网络有机硅弹性体

(c) 3D打印纳米颗粒-弹性复合材料

(d) 3D打印的可重复编程液晶弹性体

(e) 3D打印气凝胶

图2 3D打印墨水多样化

泵、降解挥发性有机化合物等多种应用,展示出该打印技术的巨大潜力。

### 3 3D打印新结构与应用

基于3D打印方法学的改进和新型墨水的开发,一些传统制造技术难以实现的3D结构的制备和应用也在2020年取得了突破。中国科学院化学研究所宋延林团队<sup>[17]</sup>利用3D打印技术仿生构造了三维锥形不对称结构蒸发体系(图3(a)),在高盐度下实现了高效太阳能利用和高速水蒸发。为实现高效的光热转换和海水蒸发,通过有效热管理实现高效水传输和蒸发至关重要。研究表明:所设计

的3D锥形结构表面可以束缚梯度厚度的水膜,同时3D蒸发器的不同高度对太阳光的吸收不同,导致水的蒸发存在蒸发梯度,主要的蒸发位点为3D结构的顶部,因此水膜沿3D结构的侧壁呈现温度梯度,并由于马兰戈尼效应使水流向更快的蒸发区域,从而显著提高水蒸发速率和能量的利用效率。高盐度水蒸发时,水膜厚度梯度和蒸发场梯度导致3D结构表面存在盐的浓度梯度和顶部盐结晶特征,结晶的盐很容易去除,因而可以连续工作。该系统海水淡化速率达 $1.72 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,有很强的应用前景。

美国加利福尼亚大学圣迭戈分校的Wangpra-seurt和Chen联合英国剑桥大学的Vignolini<sup>[18]</sup>利用

3D打印制备了仿珊瑚结构来实现微藻类的规模培养(图3(b))。藻类自遮蔽引起的光衰减是微藻培养规模扩大的关键限制因素,珊瑚在进化的作用下已成为一种优化的光子增强系统,具有出色的光合量子效率,因此在其内部可实现空间高效的微藻生长。受珊瑚启发,研究者通过调节打印墨水的性质,发展了一类能够与活体生物相互作用的材料,进一步通过对打印结构调节,成功地以微米分辨率模拟了活珊瑚组织和其内部骨骼的形态特征,以及其光学、机械和藻类共生特性。在该3D打印的仿生珊瑚培养基内部能够以高空间的细胞密度( $10^9$ 个细胞 $\text{mL}^{-1}$ )生长微藻,为3D打印生物组织提供了研究基础。

东南大学顾忠泽与赵祥伟团队<sup>[19]</sup>基于激光直写技术提出了一种用于原子力显微镜扫描探针的3D设计和加工方案(图3(c)),该探针可以利用自身机械特性来减少探针与样品间的机械作用,以提高探针在成像优化上的准确性和有效性。通常在探针扫描过程中,机械相互作用会在尖端和样品表面之间施加排斥力,从而导致两者变形。而微结构探针尖端的多孔结构可充当压缩缓冲器,通过自身

的弯曲减少频繁接触过程中的样品变形,获得更好的成像精度和对比度。研究人员在硅、PDMS和生物样本在内的3种微图案上,验证了微结构探针在成像优化上的准确性和有效性,进一步拓宽了3D打印的结构多样性和应用范围。

射频探头前端作为磁共振系统的核心组件,极大地影响着磁共振实验结果的质量。常规的磁共振线圈通常是通过手动绕组和印刷电路板光刻技术制造的,存在三维微型线圈成型困难、与样品腔匹配程度差等问题。厦门大学陈忠团队<sup>[20]</sup>利用熔融沉积制造和光固化技术3D打印出一体化磁共振探头前端框架(图3(d)),并利用液态金属灌注技术填充线圈模型管路形成射频线圈,从而制备出一体化磁共振射频探头。通过对打印材料和液态金属进行系统筛选和优化,提高了探头的信噪比。该3D打印的探头能够执行常规和非常规的磁共振实验,包括原位电化学分析、离子分离的原位反应监测以及小样本的磁共振成像。由于3D打印技术的灵活性和准确性,可以精确地获得微米级的复杂线圈几何形状,从而缩短了制造时间,扩展了应用场景,为定制化的磁共振检测提供了新思路。

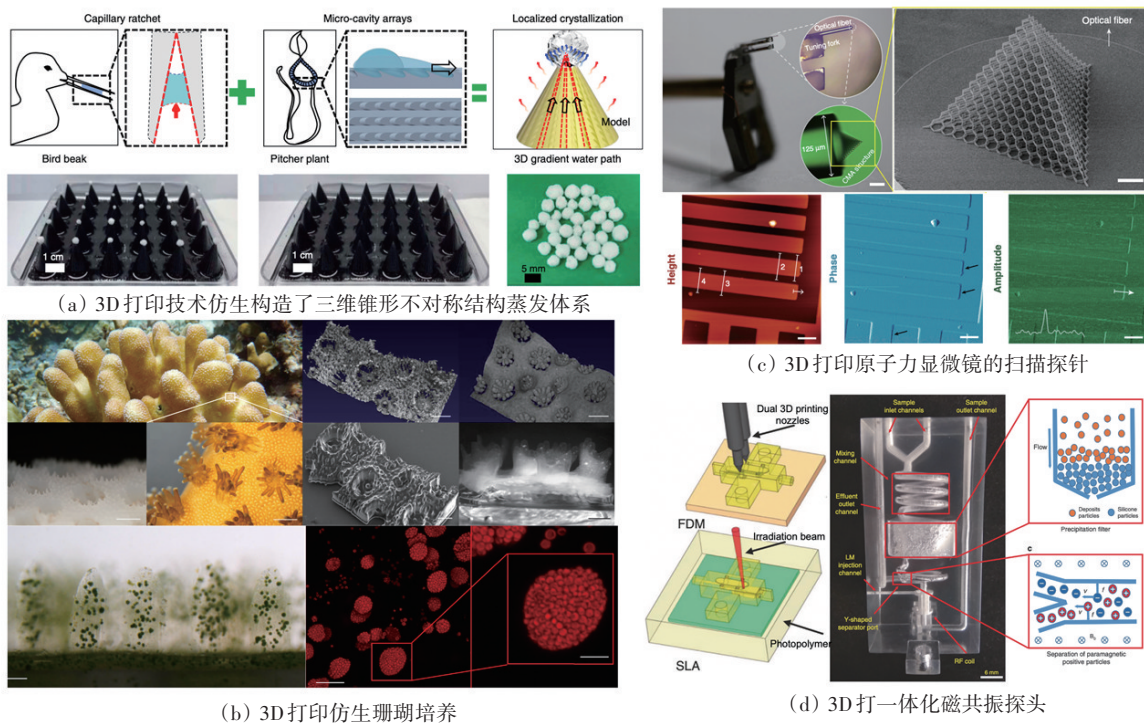


图3 3D打印新结构与应用

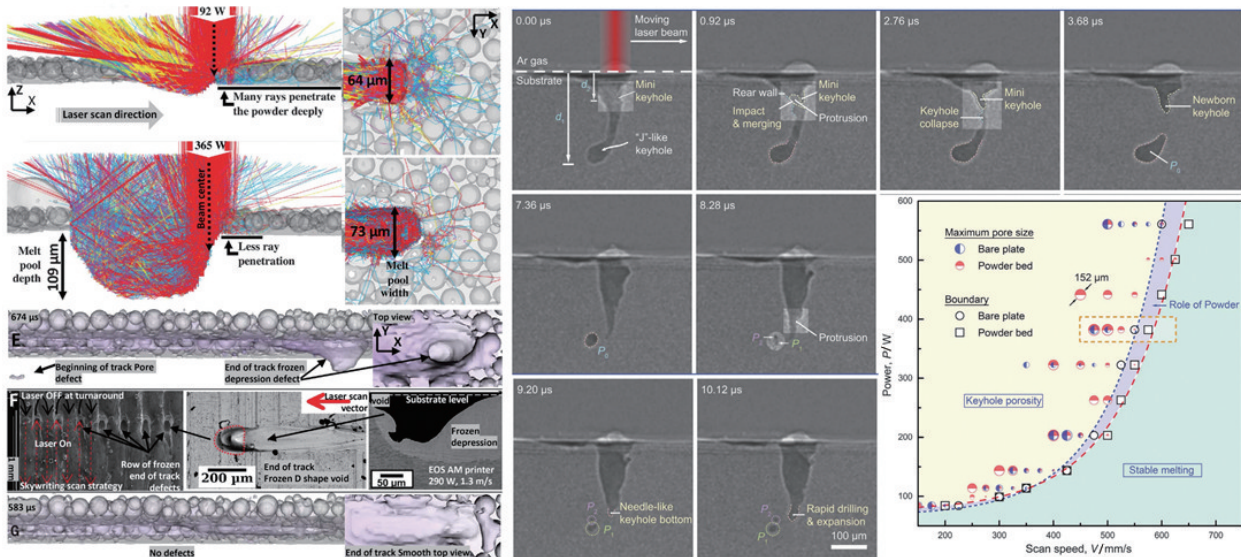
### 4 金属 3D 打印机理取得重大进展

金属零部件是工业应用极为广泛的产品类型,其通过 3D 打印的实现会给制造业带来变革。随“工业 4.0”进程的加快,金属零部件的制备面临着快速开发、个性化定制、轻量化等需求,而 3D 打印技术具备成形自由度高、可用材料范围广及制造环节少的特点,很好地契合了金属零部件产品的未来发展趋势。

通常金属零部件的 3D 打印使用激光粉末床熔融技术,该方法使用激光束或电子束扫描熔化 2D 金属材料粉末,并通过不断的重复熔化、层层堆积形成预设的 3D 结构。然而,在激光熔融粉末过程中,会产生以每秒数百米的速度逸出熔池的蒸汽,这种高通量的蒸汽会产生复杂的气流,从而带走散布在激光路径经过的松散粉末颗粒,严重时会导致颗粒飞溅物,进而导致有较大面积的区域缺少粉末。蒸汽及颗粒飞溅物的产生与激光、粉末和熔池 3 个因素均相关,且激光-粉末-熔池之间相互作用的动力学问题非常复杂,不可避免地会在打印金属结构内部产生缺陷。基于现有的通过超高速 X 射线技术来探测熔池无法完全捕获熔池形态和微孔动力学所需的空间和时间分辨率,因此该机理目前尚不明确。美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室的

Khairallah 团队采用高保真的多物理场模型进行模拟<sup>[21]</sup>(图 4(a)),并采用原位 X 射线和其他分析技术对其模拟进行了验证,提出一种新的金属 3D 打印缺陷形成机制。该建模使用了完整的激光射线追踪技术,可提供 3D 温度、速度和其他数据,并且具有预测性。同时将流体动力学与纳秒级的热扩散相结合,可以准确地观察高动态和非线性的激光粉末和激光熔池的相互作用。该结果还给出了减少飞溅与缺陷并提高 3D 打印金属零件可靠性的制备路线图,得出了稳定熔池动力学和最小化缺陷的标准,有助于提高金属零件制造的可靠性。

2020 年,激光粉末床熔融技术除了在缺陷机理模拟方面的突破,清华大学赵沧、卡内基梅隆大学 Rollett 和弗吉尼亚大学 Sun 合作<sup>[22]</sup>,针对高功率、低扫描速度的激光熔化条件下产生的锁孔现象进行了原位观测分析(图 4(b)),并总结了锁孔形成机理。他们通过将连续波模式的高斯激光束以不同的功率和速度沿一条直线扫描样品,并通过原位高速 X 射线成像技术,以高空间速率(50~5000 kHz)、高空间分辨率(2.0~3.0 mm/像素)和高时间分辨率(0.1~7500 ns)记录整个过程的 X 射线图像,定量勾画锁孔孔隙边界,阐明了粉末效应并揭示了激光粉末床熔融过程中锁孔的初始来源和运动规律。研究发现,锁孔气泡缺陷区域的边界清



(a) 多物理场模型模拟激光粉末床熔融过程

(b) 高速 X 射线成像观测激光粉末床熔融过程中锁孔产生机理

图 4 金属 3D 打印机理取得进展

晰、平滑,且受金属粉末加入的影响甚微,缺陷是由小孔尖端的严重不稳定性引起的,而锁孔根部的失稳可以在熔池中释放出声波,进而驱动气泡快速远离锁孔,并被凝固前端捕捉。当气泡被凝固前端捕捉,便成了缺陷。这一发现为锁孔形成的原因提供了新的认识,并提供了3D打印金属零件的功率-速率相图。

3D打印金属的过程也对打印的微观结构和性能起重要作用。德国马克斯·普朗克钢铁研究所(Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH)的Kürmsteiner发现,在激光粉末沉积的过程中<sup>[23]</sup>,可通过高冷却速率和循环再加热等方式对加工参数进行数字控制,从而精确控制复合金属材料的微观结构。在3D打印合金过程中,通过周期性的加热过程,可以使铁铝镍合金中镍铝组分析出,从而实现类似大马士革钢的新型层状结构的3D打印。其具有交替的硬质和软质层,因此具有1300 MPa的拉伸强度和10%的伸长率,显示出比传统大马士革钢更好的机械性能。该原位沉积强化和局部微观结构控制的方法还可以用于制造其他类型的硬质合金,拓展了3D打印金属结构的应用。

## 5 结论

在增材制造快速发展的大趋势下,3D打印技术展现出广阔的发展前景。近年来,3D打印技术日臻完善,3D打印的产品种类和实际应用不断拓展。3D打印技术未来发展的重要方向之一是在多尺度(纳米尺度、微观尺度和宏观尺度)上创建形状精确可控的三维结构,但目前高打印精度、大打印体量和快速打印速度还难以同时实现,且材料、结构和性能仍受较大局限,需要进一步研究突破。相比传统的减材制造技术,3D打印技术具有简便快捷、绿色环保的优势,相信通过科研工作者的努力,将对众多制造领域带来技术变革。

### 参考文献(References)

- [1] Tumbleston J R, Shirvanyants D, Ermoshkin N, et al. Continuous liquid interface production of 3D objects[J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1349-1352.
- [2] Wu L, Dong Z, Du H, et al. Bioinspired ultra-low adhesive energy interface for continuous 3d printing: Reducing curing induced adhesion[J]. *Research*, 2018: 4795604.
- [3] Walker D A, Hedrick J L, Mirkin C A. Rapid, large-volume, thermally controlled 3D printing using a mobile liquid interface[J]. *Science*, 2019, 366(6463): 360-364.
- [4] Kelly B E, Bhattacharya I, Heidari H, et al. Volumetric additive manufacturing via tomographic reconstruction[J]. *Science*, 2019, 363(6431): 1075-1079.
- [5] Zhang Y, Dong Z, Li C, et al. Continuous 3D printing from one single droplet[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4685.
- [6] Loterie D, Delrot P, Moser C. High-resolution tomographic volumetric additive manufacturing[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 852.
- [7] Park J U, Hardy M, Kang S J, et al. High-resolution electrohydrodynamic jet printing[J]. *Nature Materials*, 2007, 6(10): 782-789.
- [8] Liashenko I, Rosell-Llompart J, Cabot A. Ultrafast 3D printing with submicrometer features using electrostatic jet deflection[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 753.
- [9] Skylar-Scott M A, Mueller J, Visser C W, et al. Voxellated soft matter via multimaterial multinozzle 3D printing[J]. *Nature*, 2019, 575(7782): 330-335.
- [10] Giachini P A G S, Gupta S S, Wang W, et al. Additive manufacturing of cellulose-based materials with continuous, multidirectional stiffness gradients[J]. *Science Advances*, 2020, 6(8): eaay0929.
- [11] Yuk H, Lu B Y, Lin S, et al. 3D printing of conducting polymers[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1604.
- [12] Wallin T J, Simonsen L E, Pan W Y, et al. 3D printable tough silicone double networks[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4000.
- [13] Wang K Y, Pan W Y, Liu Z, et al. 3D printing of viscoelastic suspensions via digital light synthesis for tough nanoparticle-elastomer composites[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(25): 2001646.
- [14] Davidson E C, Kotikian A, Li S C, et al. 3D printable and reconfigurable liquid crystal elastomers with light-induced shape memory via dynamic bond exchange[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(1): 1905682.
- [15] Ze Q J, Kuang X, Wu S, et al. Magnetic shape memory polymers with integrated multifunctional shape manipula-

- tion[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(4): 1906657.
- [16] Zhao S Y, Siqueira G, Drdova S, et al. Additive manufacturing of silica aerogels[J]. *Nature*, 2020, 584(7821): 387–392.
- [17] Wu L, Dong Z C, Cai Z R, et al. Highly efficient three-dimensional solar evaporator for high salinity desalination by localized crystallization[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 521.
- [18] Wangpraseurt D, You S T, Azam F, et al. Bionic 3D printed corals[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1178.
- [19] Sun L D, Gu H C, Liu X J, et al. 3D-printed cellular tips for tuning fork atomic force microscopy in shear mode[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5732.
- [20] Xie J, You X, Huang Y, et al. 3D-printed integrative probeheads for magnetic resonance[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5793.
- [21] Khairallah S A, Martin A A, Lee J R I, et al. Controlling interdependent meso-nanosecond dynamics and defect generation in metal 3D printing[J]. *Science*, 2020, 368(6491): 660–665.
- [22] Zhao C, Parab D N, Li X X, et al. Critical instability at moving keyhole tip generates porosity in laser melting[J]. *Science*, 2020, 370(6520): 1080–1086.
- [23] Philipp K, Markus B W, Andreas W, et al. High-strength Damascus steel by additive manufacturing[J]. *Nature*, 2020, 582(7813), 515–519.

## Achievements of 3D printing in 2020

WU Lei<sup>1,2</sup>, ZHANG Yu<sup>1,2</sup>, ZOU Miaomiao<sup>1,2</sup>, SONG Yanlin<sup>1,2\*</sup>

1. Key Laboratory of Green Printing, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences (ICCAS), Beijing 100190, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** 3D printing is an additive manufacturing technology that rapidly turns computer-aided designs into complex 3D objects on demand. As an attractive research field and emerging industrial technology, 3D printing research made great progress in mechanism, method and functionalization in 2020. This article reviews the research hotspots and representative results of 3D printing from the aspects of printing method improvement, new ink development, solidification nucleation mechanism, new structure preparation, as well as new applications.

**Keywords** 3D printing; photopolymerization; printing precision; printing speed; metal printing ●



(责任编辑 王丽娜)