

引文格式:秦蕾,刘伟峰,刘旭光. 3D打印与化学化工:共生发展与风险控制[J]. 太原理工大学学报, 2023, 54(3): 399-409.

QIN Lei, LIU Weifeng, LIU Xuguang. 3D printing with chemistry and chemical engineering: symbiotic development and risk control[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2023, 54(3): 399-409.

3D 打印与化学化工:共生发展与风险控制

秦 蕾^{1a,2}, 刘伟峰^{1b,1c}, 刘旭光^{1b,1c}

(1. 太原理工大学 a. 新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 太原 030024; b. 新型碳材料研究院, 太原 030600; c. 材料科学与工程学院, 太原 030024; 2. 山西浙大新材料与化工研究院, 太原 030000)

摘 要:新兴的3D打印技术与传统的化学化工领域之间存在着互利共生的发展关系。化学化工材料以及化学化工领域学科知识的合理有效运用,有助于3D打印技术的施展与提升。而3D打印,作为一种增材制造的先进技术,其发展也有助于通过其物质转化的能力,推动化学化工领域的研究和实践进程。首先对3D打印的概念发展、技术手段和优势特色进行介绍。随后,重点综述总结现阶段常见的化学化工材料在3D打印领域中的应用现状,以及在3D打印影响下的化学化工行业今后的发展趋势。最后,对3D打印技术目前在危险化学品、化学伦理、社会安全 and 市场秩序方面所显现出的问题进行风险评估和对策探讨。期望未来3D打印和化学化工领域,以及其他所涉学科都能够彼此助益,长效发展。

关键词:3D打印;化学化工;材料;科技伦理;风险控制;综述

中图分类号:TB321 **文献标识码:**A

DOI:10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2023.03.001 **文章编号:**1007-9432(2023)03-0399-11

3D Printing with Chemistry and Chemical Engineering: Symbiotic Development and Risk Control

QIN Lei^{1a,2}, LIU Weifeng^{1b,1c}, LIU Xuguang^{1b,1c}

(1a. Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 1b. Institute of New Carbon Materials, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030600, China; 1c. College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi-Zheda Institute of Advanced Materials and Chemical Engineering, Taiyuan 030000, China)

Abstract: There exists a mutually beneficial relationship between flourishing 3D printing technology and traditional chemical industry. The rational and effective adoption of materials and subject knowledge in the field of chemistry and chemical engineering is conducive to the improvement of 3D printing technology. While the development of 3D printing, as an advanced technology of additive manufacturing, also helps promote the research and practice process in the field of

收稿日期:2023-03-03;修回日期:2023-03-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51972221);中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX2022A009);山西省自然科学基金面上项目(20210302124046);山西浙大新材料与化工研究院研发项目(2022SX-TD004);山西省重点研发计划国际合作项目(201903D421077);银川市科技局重点计划项目(2021ZD08)

第一作者:秦蕾(1988-),副教授,主要从事碳基功能吸附材料研究,(E-mail)qinlei@tyut.edu.cn

通信作者:刘伟峰(1986-),副教授,主要从事碳功能材料研究,(E-mail)liuweifeng@tyut.edu.cn

chemistry and chemical engineering through its material transformation ability. In this review, the concept, process, techniques, and advantages of 3D printing is introduced at the beginning. Then, the current application status of common chemical materials in 3D printing field and the future development trend of chemical industry under the influence of 3D printing are summarized. Besides, the risks and countermeasures are assessed and analyzed on issues that become visible in the field of 3D printing, especially those about hazardous chemicals, chemical ethics, social security, and market order. It is expected that in the future, 3D printing, chemical engineering, and other disciplines involved, will help each other and develop sustainably together.

Keywords: 3D imprinting; chemistry and chemical engineering; materials; ethics in science and technology; risk control; review

3D 打印作为一项新兴技术,被称为是“具有工业革命意义”的增材制造技术。3D 打印运用粉状或液体材料,基于分层的数字模型基础,通过快速逐层固化成型。3D 打印使具有各种复杂精细结构和丰富实用性能的物体构建更为现实和便利。

化学化工材料是 3D 打印技术进步和相关行业发展中必不可少的重要因素之一。化学化工材料的合理有效运用,有利于 3D 打印技术的施展与提升。化工过程所涉及的热力学、流体力学、反应工程、化学产品工程、技术制图和设计、材料科学等知识,都会在 3D 打印物料调配与打印成型过程中有所涉及。3D 打印技术的推进,也使得更优性能的化学化工材料、器件、装置、设备等的制造成为可能,进而反过来推动化学化工领域的研究和实践进程,3D 打印目前也已经并将继续被用作化学化工领域研究的重要方式手段。显而易见地,3D 打印与化学化工之间存在着互利共生的发展关系。因此,本文对化学化工材料在 3D 打印中的具体应用与现状进行综述分析,并对该交叉领域未来的发展趋势进行科学展望。

此外,3D 打印技术日渐普及但相应法律、政策、制度、规范等都尚未确立或有待完善,使得 3D 打印技术的两面性日益凸显。因此,本文也对 3D 打印技术目前在危险化学品、化学伦理、社会安全和市场秩序方面所暴露出的问题进行风险评估和对策探讨,以期 3D 打印技术能够获得长远、健康的发展,实现其提高生产力、改善人们生活的本真初心。

1 3D 打印

1.1 3D 打印概念

3D 打印即快速成型技术的一种,它是一种以分层的数字模型文件为基础,运用粉末状金属或塑料等可黏合材料,通过逐层固化成型的方式来构建具有复杂结构物体的技术^[1-2]。3D 打印技术以数字

化、人工智能化及新型材料应用为特征,近几年引起广泛的研究兴趣。

任何新技术都不是一蹴而就的,3D 打印同样不是横空出世的,其从诞生到现在,已经跨越三个世纪,所以有句话称它为“上上个世纪的思想,上个世纪的技术,这个世纪的市场”。3D 打印技术可以追溯到 1976 年喷墨打印机的发明。1984 年,查尔斯·赫尔将光学技术应用于快速原型制造,拉开了 3D 打印的帷幕。然而在此之前的 1859 年,法国雕塑家弗朗索瓦·威廉姆申请了多照相机实体雕塑的专利,首次设计出一种多角度成像的方法来获取物体三维图像,他将 24 台照相机围成 360 度同时进行拍摄,然后用与切割机相连接的比例绘图仪绘制模型轮廓,这也就是今天 3D 扫描技术的鼻祖。此后,研究者们不断深化增材技术的原理与发展。20 世纪 80 年代以来,3D 打印技术引起了全世界的关注,开始进入人们的视野和生活。如今,3D 打印技术已经在制造、医疗、航空航天和军事等多个领域得到了很好的发展和应用^[3-4]。

近些年来,3D 打印技术与计算机建模技术的结合,大大加速了信息制造技术向网络化定制和数字化方向发展,逐渐成为我国国民经济不可或缺的一部分。复合材料、金属材料等现有材料的打印技术是 3D 打印发展的重要方向,也是其他许多制造领域定制产品的主要工作形式。美国 NASA 甚至打算将 3D 打印机送上太空,供航天员随时使用。随着技术的逐渐进步,3D 打印机的应用也越来越广泛,其价格也在逐年下降,正在逐步走进寻常百姓的生活,将在我们的生活中掀起一场革命^[5]。

1.2 3D 打印技术

目前,3D 打印发展迅速,各种技术层出不穷^[6-7]。研究学者尚未对其分类达成共识,但根据其成型方式,主要可以分为六大类,分别为挤压成型、

线状成型、粒状成型、粉末层喷头、层压成型以及光聚合成型^[8]。

1.2.1 挤压成型

挤压成型是聚合物长丝或颗粒等材料被加热并通过喷嘴挤出。其代表的打印技术为熔融沉积造型(FDM)技术,这种技术支持的原料包括固态热熔塑料、共晶系统金属、可食用材料^[9]。FDM技术需要对打印机头进行加热,首先软化热熔性的条形塑料,然后再进行打印成型,这种技术在3D打印领域属于最简单的方式,可适用于个人进行操作生产^[10]。

1.2.2 线状成型

电子束自由成型技术^[11]作为线状成型技术支撑,其工作原理为,真空环境下,高能量密度的电子束轰击金属表面形成熔池,金属丝通过送丝装置送入熔池中熔化。同时,熔池沿预先规划好的路径移动,金属材料凝固并逐层堆积,形成致密的冶金结合体,直至制造出金属零件或毛坯^[12]。这种技术支持几乎任何合金。

1.2.3 粒状成型

以粒状成型的打印技术主要有直接金属激光烧结(DMLS)^[13-14]、电子束熔化成型(EBM)^[15]、选择性激光融化成型(SLM)^[16]、选择性热烧结(SHS)^[17]以及选择性激光烧结(SLS)^[18]。其中DMLS与SLS概念相同,都是采用高功率激光熔合成所需三维形状的块体材料。其中,DMLS适用于几乎任何合金,但SLS则适用于热塑性塑料、金属粉末、陶瓷粉末等材料。EBM是利用电子束轰击物料使其融化实现熔炼,该技术适用于各种钛合金。

SHS是激光切割系统根据计算机提取的截面轮廓数据,从背面涂有热熔胶的纸上用激光切割出工件的内外轮廓。逐层切割黏合,最终成为一个立体的工件。这种打印技术支持纸张、金属薄膜、塑料薄膜等材料。SLM利用金属粉末在激光束的加热下完全熔化,然后冷却凝固成型。钛合金、钴铬合金、不锈钢、铝等材料可采用该技术成型^[19]。

1.2.4 粉末层喷头

石膏3D打印作为粉末喷射成型方式的代表技术,其使用UV固化技术,石膏粉末铺设后由一彩色喷墨打印机喷出不同色彩的UV墨水,辅以紫外光照射,将石膏粘结起来,构成了彩色打印^[20]。采用这种技术打印成型的样品模型与实际产品具有同样的色彩,还可以将彩色分析结果直接描绘在模型上,模型样品所传递的信息较大。其可用于建筑、艺术、装饰等模型的制作,同时还适用于人体修复材料

的制备以及Q版人像的制作。

1.2.5 层压成型

层压成型是通过超声波焊接、钎焊、黏合剂或化学手段将材料片材堆叠并层压在一起,从而形成所需的3D材料^[21-22]。其代表技术为分层实体制造。该技术在打印时,将树脂材料倒入树脂罐中,平台下降进入罐中,激光发射器根据切片层的形状,通过激光振镜扫描固化罐中的树脂,逐层上升,最终得到精细的三维模型。其主要适用于纸、金属膜、塑料薄膜。

1.2.6 光聚合成型

光聚合成型利用紫外光通过逐点或逐层的光照^[23],选择性地固化液态树脂层。其代表性的打印技术为立体光平板印刷技术(SLA)^[24-25]以及数字光处理技术(DLP),两种打印技术均适用于光固化树脂。SLA技术主要支持液态光敏树脂,一般用于商业领域。这种技术是最早被商业化的,由3D Systems的联合创始人兼首席技术官Chuck Hull于20世纪80年代发明。其特性表现在液态树脂遇到激光后固化,具有较高精细度,缺陷表现在成本较高,而且其原料液态光敏树脂具有毒性,对人体有危害性。数字光处理技术是利用DLP打印机光源在最底部投出图案化的紫外光或可见光,最底层的光敏树脂受到图案化的光照射后选择性地固化^[26-27]。每一层固化后,光源会关闭平台抬升一个距离。重复此操作,层层叠加形成三维结构。这种技术打印成本较低、操作简单、成型速度较快。

1.3 3D打印优势

3D打印技术体现了信息技术与先进材料技术、数字制造技术的密切结合,是先进制造业的重要组成部分。对于一切外形定制化、个性化的产品,3D打印技术均显示出巨大优势。

首先其成品速度快。3D打印机可以不用其他设备的辅助,利用电脑直接制作各种零件或模型。与传统工厂不同,在生产零件时,可以将多台设备甚至多条生产线组装起来,而3D打印机则不需要组装,不仅速度更快,还节省了大量的人力物力成本,提高了生产效率。

构型精准多样。3D打印可以轻松制造复杂的形状,其中许多形状无法通过任何其他制造方法来生成。即使形状再复杂,利用3D打印技术也能完成产品设计及制造。在精密零部件制造方面拥有突出优势。

产品定制化。3D打印不仅可以提供更大的设计自由度,还可以完全定制设计。由于当前的3D

打印技术一次只能制造少量零件,因此非常适合小批量定制化生产。该定制化概念已被医学、牙科、骨科等领域所接受,用于生产定制义肢、植入物和牙科矫正器具等。从量身定制的完美适合运动员的高级运动装备、跑鞋到定制太阳镜、耳环,3D 打印可经济高效地一次性生产定制各类零件。

有效的成本控制。传统行业在生产新的物品或零部件时,需要根据产品的不同需求,引进新的设备和人才,这不仅增加了成本,也使定价复杂化。只要掌握了这项技术,3D 打印机就可以直接打印出产品,不仅方便,还能降低生产成本,有效控制生产成本。

表 1 3D 打印技术分类、使用材料、典型应用与所涉及的化学化工知识

Table 1 3D printing technology classification, materials, typical applications, and involved chemical knowledge

打印类型	技术方法	打印材料	典型应用	化工知识
挤压成型	熔融沉积	热塑性塑料、共晶系金属、可食用材料	建筑制造、食品制药、生物医学、航空航天	传热、相变、流变学、混合传质、热机械分析
线状成型	电子束自由成型制造,直接金属激光烧结,电子束熔化成型	几乎任何合金,钛合金	航空航天、机电工程、珠宝首饰	传热、流变学、表面张力、晶相分析
粒状成型	选择性激光熔化成型,选择性热烧结,选择性激光烧结	钛合金、钴铬合金、不锈钢、铝,热塑性塑料、金属粉末、陶瓷粉末	航空航天、工业应用、光学设备、矫形植入物	传热、粉末流变学、表面张力、光学分析、热机械分析
粉末层喷头	石膏 3D 打印	石膏	建筑装饰	粉末流变学、表面张力、接触角
层压成型	分层实体制造,立体平板印刷	纸、金属、塑料,光固化树脂	航空航天、工业、可视化模型	传热、表面改性、黏合剂开发、热机械分析、表面化学
光聚合成型	数字光处理	光固化树脂	医疗和牙科模型、正畸设备、工业应用、生物工程、黏合剂和涂层	黏度、交联度、化工动力学、流变学、光学分析、热机械分析

剂^[32]、膜^[33-34]、催化剂^[35-36]、添加剂^[37]等可以进行 3D 打印,进而构建表现更为优异的化工系统。

2.1 3D 打印化学化工材料应用现状

2.1.1 有机高分子材料

3D 打印行业中使用最多的化工材料是有机化学材料,主要指有机高分子材料,包括热固性塑料、生物性塑料、工程塑料和高分子凝胶^[38]等。有机高分子材料以及相应的 3D 打印机设备造价都相对较低。另外,有机高分子材料由于具有可塑性较强、成型材料硬度较大、耐磨、耐高温和抗腐蚀等特点,而具有极强的适应性与应用性,在 3D 打印技术发展的过程中被大量应用,成为 3D 打印技术的重要基础材料之一^[39-40]。在目前的商业市场中,由有机高分子材料制成的 3D 打印商业产品日益兴盛,市场上已经可以见到多种由有机高分子材料 3D 打印制造的日用品和医疗设备,比如鞋子、珠宝、眼镜框架和正畸设备等。在医疗领域,基于患者的磁共振成像和计算机断层扫描数据,可以制作详细的器官 3D 模型,以便外科医生更容易可视化地进行术前规划^[41]。另外,在一些人体临床试验中,3D 打印有机

2 3D 打印与化学化工的共生关系

3D 打印技术与化学化工领域呈现出“互利共生”的关系。如表 1 所呈现的,相关化学化工材料的研发可以促进 3D 打印技术的发展与推广;3D 打印技术的日益成熟完善也促进了化学化工技术的提高与化学化工领域应用范围的拓宽^[28-29]。各类化学化工材料,包括聚合物、陶瓷、金属及各类复合材料等均被广泛应用于 3D 打印行业^[30]。3D 打印具有的能够轻易构建复杂结构形状的特点,使得化工过程中具有特殊几何结构的反应器、过滤器^[31]、吸附

高分子材料植入物也逐渐被用作传统金属植入物的可行替代品^[42],但由于监管问题,其使用目前仍被视为实验医学。

在 3D 打印技术应用的过程中,有机高分子材料需要具备优良的加工性能,以保障后续高精度塑性过程的实施。化学工程学科的相关知识在 3D 打印聚合物的配方调整中至关重要,需要不同的添加剂,例如诱导剂、抑制剂、增稠剂等的含量都会影响 3D 打印产品的性能。

2.1.2 金属材料

3D 打印金属部件可以将金属材料高强度、高导热性和导电性的优点,与 3D 打印材料利用率高、精细结构可调等优势相结合,其产品将成为许多行业的理想选择。例如在航空航天领域,其使用零部件通常以低产量制造,在该领域中 3D 打印金属零件在保证功能性的同时往往质量更轻,因而备受青睐。目前已有液体火箭发动机中使用的燃烧室、推进剂喷射器、燃料泵、推进器、燃料喷嘴和喷嘴衬套等组件、铰链支架、座舱支架连接器、立方体卫星机身、卫星太阳能电池板展开机构和卫星夹芯板等被研发和

制造。在其他一些需要低产量和高几何复杂性金属部件的领域,3D打印金属都在其中扮演着日益重要的角色。例如,在能源生产领域,3D打印金属可用于修复和制造涡轮叶片、热交换器和翼型;在机电工程领域,3D打印金属可用于特种电机制造的铁芯、转子、冷却通道、线圈绕组、热交换器和电机外壳的制造;在生物医疗领域,3D打印金属可被用作医疗器械、支架、牙科和整形植入物的部件;在珠宝设计领域,以贵金属(如金和铂)和非贵金属(如钛和钢)直接3D打印或通过与聚合物复合,可以实现独特设计结构的珠宝首饰设计制造。

金属3D打印过程中需要利用到化学化工领域知识来控制粉末或熔融金属的流动以及传热特性,以获得高质量的金属试样。此外,在使用有机添加剂时,需要控制或消除金属氧化或与碳或氮的有害反应,调控保障金属/合金的性能以满足生产需求。

2.1.3 陶瓷材料

陶瓷3D打印的开发和实施在一定程度上比聚合物和金属慢。然而,若将陶瓷的理化性质与3D打印可以生产的几何形状和产量相结合将具有重要的实用价值^[43-44]。陶瓷材料非常容易出现缺陷,在用于3D打印过程时,这种情况更易出现。因此,目前3D打印陶瓷零件应用大多是以孔隙率为优势的几何结构部件生产,例如生物医学领域的骨修复支架材料^[45-46]。此外,由于陶瓷可以承受非常高的温度和不同的电化学环境,因此可以被用作不同催化过程的催化剂载体材料^[47],3D打印陶瓷往往具有复杂的几何形状和极高的比表面积,可以有效提高催化效率^[48]。

陶瓷的熔化温度非常高,这使得直接3D打印成型陶瓷很难实现。化学工程领域知识对于浆料配方、添加剂种类和用量、加工方式等都是必要的。需要调控浆料浓缩悬浮液的成分,并在适当的条件下进行混合,以使原料能够进行3D打印,并在随后的化学步骤中不损坏打印产品结构形状的条件下去除添加剂,才能获得具有理想形状、密度、表面光洁度、机械强度等的陶瓷产品,用以满足实际应用的需求。

2.1.4 混凝土材料

混凝土的3D打印研究,有助于提高原材料的利用率、节约生产劳动成本并提高施工速度^[49]。目前已有研究工作证实3D打印混凝土可用于街道施工和房屋建造^[50]。但在现阶段,3D打印混凝土结构部件的广泛使用尚不成熟,一方面是由于相关工程监管规范尚属空白;另一方面是打印混凝土的钢

筋增强难以实现。需要研发无需钢筋的砌体打印材料,或者在打印过程中人为添加增强材料,以满足建筑施工要求。同样地,化学工程知识在设计混凝土配合比时也不可或缺,需要合理控制传质和化学反应以获得适用于3D打印的、具有适宜流变性能的混合料,以控制混凝土的流动性和凝固速度,从而在与增强相共同沉积的过程中保持所需的形状结构^[51]。

2.1.5 复合材料

有机高分子材料可以与其他材料混合制成复合材料,为有机高分子材料带来新的功能。并且复合材料通常仍然可以通过适用于有机高分子材料的3D打印机进行处理。复合材料的制备获取也需要大量化学工程方面的知识,因为基体和增强材料需要充分相容并适当分散,以获得最适宜的材料。增强材料可以是各种不同形状和尺寸的纤维、有机颗粒和无机材料。通过适当的复合,可以使基体有机高分子材料原有的功能性提高或者具备一些新的性能,诸如机械性能、导热性、导电性、磁性和光响应性等。当具有更加优异性能的复合材料与3D打印相结合可以使相应的3D打印产品具有更加丰富、有效的结构和功能。

当复合材料中增强材料体积占比超过20%时,这类特殊类型的复合材料被称为高度填充复合材料。增强材料大多为可烧结材料,如金属或陶瓷粉末,这些高度填充的有机高分子聚合材料可以通过不同的3D打印方法成形,以获得具有复杂几何形状的金属和陶瓷样品,使得陶瓷、金属陶瓷和硬质金属等难以直接通过3D打印加工的材料制造成为可能。

2.2 3D打印化学化工行业发展趋势

由上可见,3D打印已经日渐普及,逐步在军国防、生产建设、日常生活扮演起越来越重要的角色。特别是在工业和新能源行业,3D打印技术也展现出广阔的应用潜力^[52]。但在许多当前应用中,3D打印仅仅代表着一种快速获得结构/功能部件的方法。而事实上,很多部件是能够通过注塑、铸造、挤压等传统方法生产的。因此3D打印的全部潜力还没能被完全开发利用。应当充分意识到,3D打印不仅指材料的制备/制造方法,更重要的是针对应用的实际需求使产品获得更优性能的技术手段。例如,通过设计和3D打印复杂的互连电极,提高电池在增加功率和能量密度方面的电化学性能^[53-54];或是针对生物体独特的组织结构定向设计制造既具有良

好的机械性能又匹配于人体的 3D 打印皮肤、骨骼、血管等人体组织替代物^[55]。

随着 3D 打印材料及相关技术的不断发展,其应用将从针对特定领域的固化型应用逐步转变为更加合理、科学、环保的发展型应用。由于化工材料在 3D 打印技术应用方面的巨大潜力,3D 化工材料有可能成为我国工业、建筑业、制造业等行业的主要应用材料之一,其重要性将逐步增加。随着 3D 打印技术应用领域的拓宽和相关技术的不断发展,化工材料将进一步创新,形成更为节能、环保、创新的综合材料复合体,这将取代很多的传统材料;同时化工材料的成本将随市场供需不断调整,从而对相关的化工市场和原材料加工产业造成影响。

目前,3D 打印化工材料的应用市场主要以塑料为主,其次为聚乳酸、丙烯酸、尼龙和热塑性塑料等。随着 3D 打印技术不断发展,聚乳酸作为一种可降解的材料将得到广泛应用,并展现出较大的发展潜力。丙烯腈/丁二烯/苯乙烯共聚物(ABS)材料不仅具有极强的坚固性和抗压性,而且也是 3D 打印技术的主要原料之一。因此,聚乳酸和 ABS 材料具有很大的应用市场需求和迫切性。此外,具有耐久性特点的尼龙材料也是 3D 打印材料的有利竞争者之一,在未来的市场中也将占有很大的份额和利用率。

尽管我国目前已经开始广泛应用 3D 打印技术,但由于现阶段的技术水平尚相对初级,仍存在许多问题和局限性。为了推广和实施 3D 打印技术,商业化发展模式对其发展和技术水平的提升至关重要。相关生产领域主要包括 3D 打印材料、3D 打印机和先进 3D 产品的研发生产。需要综合考虑原材料的获取和利用;推进相应打印设备的开发和制造;鼓励高端技术含量的新型 3D 打印产品研发和创造,才能够率先在未来的 3D 打印商业世界中占领一席之地。

3 3D 打印面临的潜在风险及解决方案

由上文可见,3D 打印技术已经给化学化工行业、给生产生活方面都带来了深远的影响和巨大的改变。但是,如同所有的科学技术一样,3D 打印技术也存在两面性。尽管 3D 打印技术研发的初衷也是为了提高生产力、改善人们的生活质量,且近年来展现出了不可估量的价值潜力,但在新兴技术进入生产实践的初期阶段,相应的各方面法律、政策、制度、规范等都尚未确立或者有待完善,加之存在功利主义者不能将个人利益与社会联系起来,3D 打印技

术也引发了人们的顾虑与质疑。对于化学化工领域,由 3D 打印技术普及所带来的危险化学品使用、制造、加工、存储、流通等一系列问题,以及化学伦理方面的疑虑都急需引起人们的重视,从而防患于未然^[56]。此外,在社会范围内,3D 打印所带来的社会安全与市场秩序的争端也值得人们不断地去审视和反思^[57]。

3.1 化学化工安全与安保

3.1.1 危险化学品

首先,在危险化学品的使用方面,一些用于 3D 打印的高分子有机化合物材料会具有一定的毒性。例如用于光聚合成型技术中的液态光敏树脂,在经 SLA 工艺处理的过程中会释放刺激性污染物质,刺激皮肤和呼吸系统,长时间接触人体可能会造成永久性伤害。此外,3D 打印通过熔化纳米粒子、金属、热塑性塑料等基础材料进行加工,在该过程中会产生可吸入颗粒或者挥发性有毒化合物释放到打印设备周边环境,并会不断累积,侵入到人体器官组织而对人身健康造成威胁。第二,在危险化学品的制造加工方面,随着 3D 打印技术的成熟与普及,其对化学化工生产过程的影响越来越大,化学合成领域与 3D 打印技术的应用日益密切。在 3D 打印技术有机合成领域,已经在异相催化剂、化学反应器^[58]、化工反应装置打印方面获得了一定研究进展^[59-60]。一方面,通过提高催化剂效率可以提高生产效率,但对于危险化学品的生产,则有可能造成生产规模过大,增加储存和流通的风险。另一方面,3D 打印技术的日臻成熟使得设备可及性提高,再加之生产成本的不断降低,可能会造成化学品合成和生产的门槛降低,进而由此导致一些危险化学品的违规生产制造;而微反应器等小型生产设备的出现也使得小规模、甚至个人生产“作坊”的化工生产易于滋生,使危险化学品生产和流通的监管难度增加。此外,在危险化学品的储存方面,由于 3D 打印可实现快速、大规模的生产,对危险化学品的储存和运输也提出了新的挑战。另外,由于 3D 打印可进行原位生产的特色,如果 3D 打印机设备发生火、电故障,很容易引起所生产的和未及时转移的危险化学品的燃爆而引起次生事故。

因此,在将 3D 打印技术运用到化学化工行业中时,应当尽可能选用或研发绿色环保的打印原料,对同危险化学品相关的各个环节要提高警觉性。应当制定恰当的安全风险评估制度、要素流向登记制度、违禁品禁印工作制度、可疑情况发现报告制度、

从业人员安全培训制度、内部安全防范工作制度等,确保与3D打印相关的化学化工生产安全有序开展。具体地,可将高风险的打印原料作为危险化学品进行管控,同时对后续废弃物进行无害化处理,比如对于上文提到的液态光敏树脂在丢弃前可用紫外线固化再进行丢弃处置;生产场所应当保持通风,避免可吸入颗粒物或挥发性有毒物质的聚集,并及时、定期对工作场所进行彻底清洁,避免有害物质的沉积;在使用3D打印设备时,要对操作人员进行安全培训教育,以避免操作人员受伤和仪器设备因高温老化出现过热着火、漏电等故障和事故。

3.1.2 化学伦理

由上文3D打印技术的应用领域现状分析可知,在化学、生物、医学领域,3D打印技术现已成功地用于制造人造骨骼、皮肤、血管等。可以预计随着3D打印技术的不断提高,大分子蛋白、可供移植使用的人造组织、器官也能够被打印和制造,用以帮助有此需求的病患^[61-62]。更进一步地,从理论上讲,DNA分子和整个人体的打印也并非是不可实现的。由此,3D打印的潜在风险与其所带来的生态和社会方面的伦理道德问题不容忽视^[63-64]。对于DNA分子的打印,通过3D打印短的单链DNA,有望实现基因合成和编辑,进而用于生物信息存储、生物修复、遗传病诊治等。然而,一方面,该技术有可能导致生态物种、性别等失衡,进而影响到物种多样性和整个生态系统^[65-66]。另一方面,人类DNA信息的泄漏、使用和更改,将会颠覆传统的遗传学说,带来不可预计的社会伦理问题。此外,3D打印技术在细胞、组织和人体打印的可行性使得人们对于“克隆人”的争议愈演愈烈^[67]。当人类生命可以被“制造”时,有可能因此而失去对生命的敬畏之心,而被制造出的个体也将带来一系列权利判定、资源分配、社会位置划分等难以理清的伦理问题。

因此,应当出台相应的国家政策和法律法规,从社会层面建立正确的价值导向^[68]。尽管个体之间不可避免地会存在一定的差异,每一个社会公民仍都应当具有符合社会发展规律并且符合事物之间的联系发展的正确的价值论方向,不能因为个体的利益而与社会整体的利益背道而驰,只有这样,由个体组成的社会才能积极正向地发展。特别是对于3D打印技术的科技研发人员,更加应当树立正确的化学伦理价值观与职业道德观,才会时刻以人道主义视角审视所从事的科学研究工作,致力于提升3D打印技术的利民性,从源头避免和最小化新技术所

带来的负面后果。同时,要规范3D打印行业整体道德水平,对掌握3D打印技术的公司、企业和厂商持续进行道德教育和管理监督,以确保3D打印行业的合理、可控和健康发展。

3.2 社会安全与市场秩序

3.2.1 危险物品

随着3D打印技术的成熟与普及,可能被用于具有高风险性的物品制造,由此带来一定的社会安全隐患。典型地,在武器制造方面,2012年8月,美国德克萨斯大学的学生发起“维基武器项目”(Wiki Weapon Project),设计出一款枪械的3D打印模型图,并将该模型图上传至网络供人下载,仅一年的时间,该模型图即被下载超过10万次。尽管当时利用该模型图通过3D打印机制作出的塑料枪支无论在威力还是在耐用程度上都无法和真正的枪支相比,但随着技术的进一步发展,枪械模型图精密性提高,并用金属而非塑料作为打印材料,则完全可能制作真正的枪械,更甚至于可打印制造其他的武器弹药等。在2018年,3D打印枪支在美国合法化,更引发了广泛的社会正义讨论。事实上,由于3D打印手枪是通过各个部件分别打印后组装制作,很难像传统枪支一样被溯源,因此3D打印手枪也被称为“幽灵枪”。据酒精、烟草、火器和爆炸物局ATF报告显示,自2017年以来,幽灵枪的3D打印量增长了1000%。在2021年1月,美国发生了第一起3D打印枪杀人案件。无独有偶,仅在2022年,加拿大警方就缴获了100多支3D打印枪支。可以清楚地看到,私人制造武器的使用急剧增加,这对社会公共安全造成了巨大威胁。此外,在金融领域,由于3D打印技术“高仿真”的特点,若被用于假币的打印,则有可能破坏国家的经济秩序,引发通货膨胀,引起社会动荡;在建筑领域,由于3D打印技术具有造物成本相对较低的优势,若被用于未经核验的建筑材料制作加工,以次充好用于建筑构建,则会对居民的生命安全构成威胁,成为社会的不安定因素^[69]。

因此,应当制定明确的法律法规用以限定3D打印技术的可行范围,并建立有效的线上/线下监督机制。每一种3D打印产品在研发、应用和流通环节,都应经过相关部门的严格审核,以规避具有严重隐患的产品开发。对诸如枪支弹药等高危物品的设计与制造应当严格限制管控,需要制定严谨的政策与法规,禁止任何单位和个人私自设计开发和复制传播各类枪支弹药及其他高危物品的3D打印设计图纸;禁止任何单位和个人私自打印和制造直接或

间接用于枪支、弹药及其他危险物品生产的产品;对3D打印技术所诱发的犯罪行为进行严厉处罚,这样才能够保护民众、社会和国家的和平与稳定。对于生物打印的范围同样需要加以界定,鼓励能够应用于医学领域的人造骨骼、血管、器官等的3D打印技术发展,同时严格禁止任何擅自非法的基因或者人体打印研究,将伦理道德时刻摆在技术研究之前。

3.2.2 产品创新

产品制造是生产的一个基本环节,由于3D打印完美的“复制性”特点,其发展使得设计制造业的成败不再取决于生产规模,而更加取决于创新^[70]。3D打印产品的制造基于数字图纸文件,而这些数字图纸文件非常容易被复制和传播。因此,当创新者提出一个新的3D打印产品后,模仿者也将会更加容易在此基础上进行仿制和改造,这就使得创新者的竞争优势周期缩短,盗版等恶性竞争更加难以遏制。3D打印也对知识产权领域产生了极大的冲击和挑战。对于创新者来说,知识产权对该公司、企业的运行和发展至关重要,对于其所制造的产品,拥有足够的独占性、排他性,是获得利润、促进该公司、企业向上发展的关键。3D打印技术产品相较于传统制造业产品更加易于仿制和复制,这将会导致创新者知识产权失效。反之,如果更具创新实力的大型公司、企业完全确保产品3D打印信息不会泄漏,又会使得技术垄断和市场失衡,引起产品价格不合理,制约小企业大众创新,影响市场、社会的发展进程。

因此,应当对现有的知识产权保护法律法规进行修正完善,做好相应的监管,制定相应的惩处措施,严格规范3D打印数据的来源与3D打印产品的复制,明晰数据的来源与流向。同时对3D打印机的使用进行合理限制,禁止未经知识产权所有者允许的打印行为;禁止私自复制与传播3D打印工业设计图纸,以保障创新者的著作权益,促进技术产业与市场经济的良好发展。

4 结论与展望

由上可见,3D打印和化学化工之间的联系是不可否认的,二者都可以从彼此的发展中受益。化学工程知识将继续为3D打印开发更好的材料和设备,而3D打印也有助于通过其物质转化的能力解决化学工程中面临的一些问题。3D打印和化学化工的组合具有非常强大的潜力为人类当前面临的一些紧迫挑战找到解决方案。3D打印可以被当作是一个跨学科学习的起点。未来,需要更多的知识、思想、观点的跨学科融合,才能让3D打印充分发挥其强大潜能。

另一方面,只有3D打印技术的利端显著大于弊端,才能够不被其他技术取代。有必要树立积极的道德价值观,确立相关的制度规范和法律法规,将3D打印给化学化工行业、社会大众、经济市场所带来的安全风险最小化,把3D打印技术限定在合理界限之内,才能让3D打印技术长足发展,福国利民。

参考文献:

- [1] RENGIER F, MEHNDIRATTA A, VON TENGG-KOBLIGK H, et al. 3D printing based on imaging data: review of medical applications[J]. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2010, 5(4): 335-341.
- [2] REVILLA-LEÓN M, ÖZCAN M. Additive manufacturing technologies used for processing polymers: current status and potential application in prosthetic dentistry[J]. *Journal of Prosthodontics*, 2019, 28(2): 146-158.
- [3] DAI S, WANG Q, JIANG Z, et al. Application of three-dimensional printing technology in renal diseases[J]. *Frontiers in Medicine*, 2022, 9: 1088592.
- [4] MACDONALD E, WICKER R. Multiprocess 3D printing for increasing component functionality[J]. *Science*, 2016, 353(6307): aaf2093.
- [5] SHAHRUBUDIN N, LEE T C, RAMLAN R. An overview on 3D printing technology: technological, materials, and applications[J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 35: 1286-1296.
- [6] LIGON S C, LISKA R, STAMPFL J, et al. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing[J]. *Chemical Reviews*, 2017, 117(15): 10212-10290.
- [7] GONZÁLEZ-HENRÍQUEZ C M, SARABIA-VALLEJOS M A, SANZ-HORTA R, et al. Additive manufacturing of polymers: 3D and 4D printing, methodologies, type of polymeric materials, and applications[M]//*Macromolecular Engineering*, 2022: 1-65. <https://onlinelibrary.wiley.com/browse/book/10.1002/9783527815562/toc>
- [8] ALAMMAR A, KOIS J C, REVILLA-LEÓN M, et al. Additive manufacturing technologies: current status and future perspectives[J]. *Journal of Prosthodontics*, 2022, 31(S1): 4-12.
- [9] MOHAPATRA A, DIVAKARAN N, ALEX Y, et al. The significant role of CNT-ZnO core-shell nanostructures in the development of FDM-based 3D-printed triboelectric nanogenerators[J]. *Materials Today Nano*, 2023, 22: 100313.

- [10] CANO-VICENT A, TAMB UWALA M M, HASSAN S S, et al. Fused deposition modelling: current status, methodology, applications and future prospects[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 47: 102378.
- [11] 张学军, 唐思熠, 肇恒跃, 等. 3D打印技术研究现状和关键技术[J]. *材料工程*, 2016, 44(2): 122-128.
ZHANG X J, TANG S Y, ZHAO H Y, et al. Research status and key technologies of 3D printing[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2016, 44(2): 122-128.
- [12] KWON O, JIN H, SON J, et al. Dose calculation of 3D printing lead shield covered by biocompatible silicone for electron beam therapy[J]. *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, 2021, 44(4): 1061-1069.
- [13] SESHAGIRIRAO D V, RAJU S, MANTRALA K M. Investigation of impact strength, micro hardness and metallurgical analysis of DMLS fabricated CoCrMo alloy samples[J]. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2023, 10(1): 19-31.
- [14] SINGH R, KHAN M M, PRADHAN S R, et al. On meta-structure inspired 3D printing of dual alloys using DMLS[J]. *National Academy Science Letters*, 2023, 46(1): 37-41.
- [15] JIN M, CHUNG H, KWON P, et al. Effects of different titanium surfaces created by 3D printing methods, particle sizes, and acid etching on protein adsorption and cell adhesion, proliferation, and differentiation[J]. *Bioengineering (Basel)*, 2022, 9(10): 514.
- [16] LIU L Y, YANG Q S, MIAO B J, et al. Anisotropic and elastoplastic characteristics of 3D printed graphene/aluminum composites by coupled experimental and numerical analysis[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, 29(28): 7387-7398.
- [17] ZHAN R, LYU J, YANG D, et al. Large-scale SHS based 3D printing of high-performance n-type BiTeSe: Comprehensive development from materials to modules[J]. *Materials Today Physics*, 2022, 24: 100670.
- [18] OLAKANMI E O, COCHRANE R F, DALGARNO K W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties[J]. *Progress in Materials Science*, 2015, 74: 401-477.
- [19] BUCHBINDER D, SCHLEIFENBAUM H, HEIDRICH S, et al. High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 271-278.
- [20] GUO C F, ZHANG M, BHANDARI B. Model building and slicing in food 3D printing processes: a review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2019, 18(4): 1052-1069.
- [21] SAVANDAIAH C, MAURER J, PLANK B, et al. Rapid consolidation of 3D printed composite parts using compression moulding for improved thermo mechanical properties[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2022, 28(10): 1943-1955.
- [22] LAOUTID F, LENOIR H, MOLINS SANTA EULARIA A, et al. Impact-resistant poly(3-hydroxybutyrate)/poly(ϵ -caprolactone)-based materials, through reactive melt processing, for compression-molding and 3D-printing applications[J]. *Materials (Basel)*, 2022, 15(22): 8233.
- [23] EMAMI M M, BARAZANDEH F, YAGHMAIE F. Scanning-projection based stereolithography: method and structure[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 218: 116-124.
- [24] REVILLA-LEON M, SADEGHPOUR M, OZCAN M. An update on applications of 3D printing technologies used for processing polymers used in implant dentistry[J]. *Odontology*, 2020, 108(3): 331-338.
- [25] BARCELOS A M F. Researching beliefs about SLA: a critical review[C]. Dordrecht: Educational Linguistics, Springer, 2003.
- [26] HAZEVELD A, SLATER J, REN Y J. Accuracy and reproducibility of dental replica models reconstructed by different rapid prototyping techniques[J]. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 2014, 145(1): 108-115.
- [27] XIAO R, DING M, WANG Y, et al. Stereolithography (SLA) 3D printing of carbon fiber-graphene oxide (CF-GO) reinforced polymer lattices[J]. *Nanotechnology*, 2021, 32: 235702.
- [28] 赖石林, 廖旭, 张辉, 等. 3D打印技术在有机合成化学中的应用[J]. *有机化学*, 2019, 39(7): 1858-1866.
LAI S L, LIAO X, ZHANG H, et al. Application of 3D printing technology in organic synthetic chemistry[J]. *Chinese Journal of Organic Chemistry*, 2019, 39(7): 1858-1866.
- [29] AMORES I D, GONZÁLEZ-GUTIÉRREZ J, GARCÍA I M, et al. 3D Printing-Present and future-A chemical engineering perspective[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, 187: 598-610.
- [30] LEE J Y, AN J, CHUA C K. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials[J]. *Applied Materials Today*, 2017, 7: 120-133.
- [31] XU X, XIAO S, WILLY H J, et al. 3D-Printed grids with polymeric photocatalytic system as flexible air filter[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2020, 262: 118307.
- [32] MENDES D N D L, GASPAR A, FERREIRA I, et al. 3D-printed hybrid zeolitic/carbonaceous electrically conductive adsorbent structures[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2021, 174: 442-453.
- [33] ISSAC M N, KANDASUBRAMANIAN B. Review of manufacturing three-dimensional-printed membranes for water treat-

- ment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(29): 36091-36108.
- [34] TIJING L D, DIZON J R C, IBRAHIM I, et al. 3D printing for membrane separation, desalination and water treatment[J]. *Applied Materials Today*, 2020, 18: 100486.
- [35] CHEN L, ZHOU S, LI M, et al. Catalytic materials by 3D printing; a mini review[J]. *Catalysts*, 2022, 12(10): 1081.
- [36] CHANG S, HUANG X, AARON ONG C Y, et al. High loading accessible active sites via designable 3D-printed metal architecture towards promoting electrocatalytic performance[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(31): 18338-18347.
- [37] AMIN YAVARI S, LOOZEN L, PAGANELLI F L, et al. Antibacterial behavior of additively manufactured porous titanium with nanotubular surfaces releasing silver ions[J]. *ACS Applied Material and Interfaces*, 2016, 8(27): 17080-17089.
- [38] ASKARI M, AFZALI NANIZ M, KOUHI M, et al. Recent progress in extrusion 3D bioprinting of hydrogel biomaterials for tissue regeneration; a comprehensive review with focus on advanced fabrication techniques[J]. *Biomaterials Science*, 2021, 9(3): 535-573.
- [39] RYAN K R, DOWN M P, HURST N J, et al. Additive manufacturing (3D printing) of electrically conductive polymers and polymer nanocomposites and their applications[J]. *eScience*, 2022, 2(4): 365-381.
- [40] BOUZIDI K, CHAUSSY D, GANDINI A, et al. 3D printable fully biomass-based composite using poly(furfuryl alcohol) as binder and cellulose as a filler[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 293: 119716.
- [41] BASTAWROUS S, WU L, LIACOURAS P C, et al. Establishing 3D printing at the point of care; basic principles and tools for success[J]. *Radiographics*, 2022, 42(2): 451-468.
- [42] KANG J, WANG L, YANG C, et al. Custom design and biomechanical analysis of 3D-printed PEEK rib prostheses[J]. *Bio-mech Model Mechanobiol*, 2018, 17(4): 1083-1092.
- [43] LAKHDAR Y, TUCK C, BINNER J, et al. Additive manufacturing of advanced ceramic materials[J]. *Progress in Materials Science*, 2021, 116: 100736.
- [44] ANG X, TEY J Y, YEO W H, et al. A review on metallic and ceramic material extrusion method; materials, rheology, and printing parameters[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 90: 28-42.
- [45] LIM H K, HONG S J, BYEON S J, et al. 3D-Printed ceramic bone scaffolds with variable pore architectures[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(18): 6942.
- [46] LY M, SPINELLI S, HAYS S, et al. 3D Printing of ceramic biomaterials[J]. *Engineered Regeneration*, 2022, 3(1): 41-52.
- [47] PAPETTI V, DIMOPOULOS EGGENSCHWILER P, DELLA TORRE A, et al. Additive manufactured open cell polyhedral structures as substrates for automotive catalysts[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 126: 1035-1047.
- [48] LI T, GONZALEZ-GUTIERREZ J, RAGUZ I, et al. Material extrusion additively manufactured alumina monolithic structures to improve the efficiency of plasma-catalytic oxidation of toluene[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 37: 101700.
- [49] AHMED G H. A review of "3D concrete printing": materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 66: 105863.
- [50] SHAKOR P, NEJADI S, PAUL G, et al. Dimensional accuracy, flowability, wettability, and porosity in inkjet 3DP for gypsum and cement mortar materials[J]. *Automation in Construction*, 2020, 110: 102964.
- [51] BOS F P, MENNA C, PRADENA M, et al. The realities of additively manufactured concrete structures in practice[J]. *Cement and Concrete Research*, 2022, 156: 106746.
- [52] LI H, LIANG J. Recent development of printed micro-supercapacitors; printable materials, printing technologies, and perspectives[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(3): 1805864.
- [53] LI X, LING S, ZENG L, et al. Directional freezing assisted 3D printing to solve a flexible battery dilemma: ultrahigh energy/power density and uncompromised mechanical compliance[J]. *Advanced Energy Materials*, 2022, 12(14): 2200233.
- [54] ZHANG F, WU K, XU X, et al. 3D Printing of graphite electrode for lithium-ion battery with high areal capacity[J]. *Energy Technology*, 2021, 9(11): 2100628.
- [55] BHAGIA S, BORNANI K, AGRAWAL R, et al. Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries[J]. *Applied Materials Today*, 2021, 24: 101078.
- [56] GROSS B C, ERKAL J L, LOCKWOOD S Y, et al. Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences[J]. *Analytical Chemistry*, 2014, 86(7): 3240-3253.
- [57] 刘步青. 3D打印技术的内在风险与政策法律规范[J]. *科学经济社会*, 2013, 31(2): 130-132, 137.
LIU B Q. The potential risks and policy constraints, legal norms of 3D printing technology[J]. *Science Economy Society*, 2013, 31(2): 130-132, 137.
- [58] 周澳, 李熙腾, 李鑫培, 等. 3D打印多通道微反应器用于萃取分离 In^{3+} 和 Fe^{3+} [J]. *化工进展*, 2019, 38(5): 2093-2102.
ZHOU A, LI X T, LI X P, et al. Extraction and separation of In^{3+} and Fe^{3+} using a 3D printing multichannel microreactor

- [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(5): 2093-2102.
- [59] ZHU J, WU P, CHAO Y, et al. Recent advances in 3D printing for catalytic applications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 433: 134341.
- [60] YUAN Z, LIU L, RU W, et al. 3D printed hierarchical spinel monolithic catalysts for highly efficient semi-hydrogenation of acetylene[J]. *Nano Research*, 2022, 15(7): 6010-6018.
- [61] TRIPATHI S, MANDAL S S, BAURI S, et al. 3D bioprinting and its innovative approach for biomedical applications[J]. *MedComm*, 2023, 4(1): e194.
- [62] ZHANG J, EYISOYLU H, QIN X-H, et al. 3D bioprinting of graphene oxide-incorporated cell-laden bone mimicking scaffolds for promoting scaffold fidelity, osteogenic differentiation and mineralization[J]. *Acta Biomaterialia*, 2021, 121: 637-652.
- [63] 毛新志, 李旭. 3D生物打印技术的伦理思考[J]. *武汉理工大学学报(社会科学版)*, 2016, 29(3): 429-432, 444.
MAO X Z, LI X. Ethical considerations on 3D biological printing[J]. *Journal of Wuhan University of Technology(Social Sciences Edition)*, 2016, 29(3): 429-432, 444.
- [64] NG W L, CHUA C K, SHEN Y F. Print me an organ! Why we are not there yet[J]. *Progress in Polymer Science*, 2019, 97: 101145.
- [65] RAMUNDO L, OTCU G B, TERZI S. Sustainability model for 3D food printing adoption[C]//2020 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC). IEEE, 2020.
- [66] ALHUMAYANI H, GOMAA M, SOEBARTO V, et al. Environmental assessment of large-scale 3D printing in construction: A comparative study between cob and concrete[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 270: 122463.
- [67] 赵婉. 关于科学技术创新的辩证分析-以"3D"打印技术为例[J]. *产业创新研究*, 2019(10): 43-44, 52.
- [68] 陈爱丽. 对3D打印技术的负面价值影响[J]. *大众标准化*, 2020(10): 108-109.
- [69] NGO T D, KASHANI A, IMBALZANO G, et al. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 143: 172-196.
- [70] 毛卫东. 3D打印制造伦理的问题及其价值探析[J]. *机电工程技术*, 2016, 45(7): 61-64.
MAO W D. Probe on problems and their values in aspects of manufacturing ethic of 3D printing[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2016, 45(7): 61-64.

(编辑:杨 鹏)