

增材制造技术在仿生学中的应用研究进展

丁红瑜¹, 唐佩尧², 尹衍军¹, 关杰仁¹,
陈超¹, 蒋志勇¹

(1. 江苏科技大学 海洋装备研究院, 江苏 镇江 212003)

(2. 江苏科技大学 苏州理工学院, 江苏 苏州, 215600)

摘要: 仿生学是一门古老而又年轻的学科, 在漫长的历史岁月里, 人类通过不断地学习、模仿自然界, 生活水平和社会文明获得了长足发展。然而, 受传统加工方式的制约, 很多仿生结构难以制造出来。增材制造技术是近年来快速发展的一项先进制造技术, 其逐层累加材料实现成形的过程与自然界的生长之道十分契合, 能够制造结构复杂的零部件, 从而促进仿生学的发展。从形态仿生、结构仿生、功能仿生3个方面列举了增材制造技术与仿生学相结合的几个典型应用案例, 对基于增材制造技术的设计、制造及应用领域的从业人员有一定参考意义。

关键词: 仿生学; 形态仿生; 结构仿生; 功能仿生; 增材制造; 结构优化

中图分类号: TG456. 7; TP391. 73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3962(2022)02-0156-05

引用格式: 丁红瑜, 唐佩尧, 尹衍军, 等. 增材制造技术在仿生学中的应用研究进展[J]. 中国材料进展, 2022, 41(2): 156-160.

DING H Y, TANG P Y, YIN Y J, *et al.* Research Progress of Additive Manufacturing Technology Application in Biomimicry[J]. Materials China, 2022, 41(2): 156-160.

Research Progress of Additive Manufacturing Technology Application in Biomimicry

DING Hongyu¹, TANG Peiyao², YIN Yanjun¹, GUAN Jieren¹,
CHEN Chao¹, JIANG Zhiyong¹

(1. Marine Equipment and Technology Institute, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

(2. Suzhou Institute of Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Suzhou 215600, China)

Abstract: Biomimicry is a discipline with long history while young life. In the past thousands of years, by learning and imitating from nature, human society has gained tremendous development. However, complicated bioinspired parts manufacturing is constrained by traditional manufacturing method. Additive manufacturing is a kind of advanced manufacturing technology developed in recent years, during additive manufacturing process, objects are built layer by layer, just like natural world; meanwhile, it is able to print extremely complicated parts. So additive manufacturing is very helpful for developing biomimicry. In this paper, typical application cases are demonstrated on additive manufacturing of morphological biomimicry, structural biomimicry and functional biomimicry, hoping be helpful for researchers who focus on design, production and application in additive manufacturing industry.

Key words: biomimicry; morphological biomimicry; structural biomimicry; functional biomimicry; additive manufacturing; structure optimization

收稿日期: 2020-08-03 修回日期: 2020-09-25

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0310400); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20190979); 江苏高校高技术船舶协同创新中心/江苏科技大学海洋装备研究院项目(1174871801-2); 江苏省双创计划项目(1174901901)

第一作者: 丁红瑜, 男, 1984年生, 博士, 助理研究员,

Email: dinghongyu2018@just.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202008002

1 前言

仿生学是一门学习和模拟大自然, 在制造的人工制品中实现回归自然的仿生发展理念和发展模式的科学^[1]。在漫长的历史长河中, 通过学习和模仿自然界, 人类社会获得了长足发展; 随着技术的进步, 人们不断发明出新的设备、工具和科技, 创造出适用于生产、学习和生

活的先进技术，不断将更多的内涵注入到仿生学中，使其呈现出日新月异的面貌。

受传统加工方法的制约，很多仿生结构只能停留在纸面上，难以制造出来，或者加工成本过高，应用范围受限。增材制造技术（又称 3D 打印技术）是近年来快速发展的一项先进制造技术，其采用的逐层累加材料实现成形的过程暗合了自然界的生长之道，可制造结构复杂零部件的优势摆脱了传统加工工艺的桎梏，使得过去无法实现的复杂设计方案成为现实，从而促进了仿生学的发展。

本文从形态仿生、结构仿生、功能仿生 3 个方面列举了增材制造技术的一些典型应用案例，希望能对基于增材制造技术的设计、制造、应用相关领域的从业人员提供借鉴。

2 形态仿生

形态仿生是对生物外在形态的模仿。通过形态仿生可以直观地认识物体各部分的大小、比例协调关系、连接关系等。形态仿生所对应的增材制造技术早些年被称为快速原型技术（rapid prototyping, RP），主要包括熔融沉积成型（fused deposition modeling, FDM）、选区激光烧结（selective laser sintering, SLS）、立体光固化（stereo lithography apparatus, SLA）、喷射成形（polyjet）等工艺。

中国航天员科研训练中心的王健全等^[2]以啄木鸟为研究对象，根据 Micro-CT 显微扫描数据，采用 FDM 工艺重建了啄木鸟头骨的三维模型，完成了啄木鸟的喙部仿生结构的制造。在自然样本量不足的情况下，该模型可为啄木鸟头部性能测试及能量吸收机制的研究提供必要基础，也能用于科普展览、教学演示等活动。

西北工业大学汪焰恩等^[3]研究了骨骼的内部微细结构、术前诊断模型外形轮廓以及力学性能的仿生设计方法，在此基础上通过控制 3D 打印工艺、粉体材料成分和材料参数，得到不同力学性能的骨支架，从而实现了个性化定制的全骨仿生术前诊断模型。利用该模型可以有效反映病患骨折和骨缺损真实特点，并可增加观察视场，明确病症分型，从而有助于制定固定骨钉和骨板实际操作方案、规划替代骨植入方案，为术前手术设计、复位模拟、内置物选择、三维数据测量等重要手术环节提供物理操作模型，从而明显改善手术效果，有效缩短手术时间，减少术中和术后并发症几率。

在部分应用场景中，形态仿生更注重模型的外表，对其内部没有要求，因此，中国科学技术大学 Wang 等^[4]开发了一种特定的算法，采用表皮-支架结构替代原有的实心结构，能够在保证打印件外表面形貌的前提下，大大减少填充材料的消耗，从而减轻模型的重量，节约成本。

在 2020 年抗击新型冠状病毒肺炎疫情过程中，增材制造技术也派上了用场^[5]。在疫情初期，结合形态仿生技术，多材料体素全彩 3D 打印技术被应用于制作新型冠状病毒肺部感染病例的肺部 3D 模型，该模型反映了患者肺部的三维图景，在病理分析、治疗措施制定等方面发挥了积极作用。

图 1 展示了作者所在实验室采用 Polyjet 增材制造技术制备的心脏模型，按照人体心脏进行 1:1 原型复制获得。其使用多种不同颜色的材料，再现了人体心脏的模态，脉络十分清晰。相较于传统教科书上的二维图片（黑白或彩色），三维实体模型更逼真，用于教学演示道具时效果更好。

除了应用于教育教学方面以外，形态仿生还广泛应用于工业产品的初始设计阶段和文创产品领域，能快速将设计师脑海中的产品变成实物直观展现出来，从而提供优化、改进的条件。



图 1 采用 Polyjet 技术制造的人体心脏模型

Fig. 1 3D model of human heart produced by Polyjet technology

3 结构仿生

随着增材制造技术的进步，人们已经不满足于制作仅能用于观赏的模型，而是希望所制造的零件具备承载能力，因此，增材制造技术被应用于结构仿生。结构仿生是通过研究生物肌体的构造，建造类似生物体或其中一部分的机械装置。结构仿生主要靠激光直接成型（direct laser fabrication, DLF）、选区激光熔化（selective laser melting, SLM）、电子束熔化成形（electron beam melting, EBM）、FDM 等工艺实现。

天然贝壳的组成结构与力学性能之间存在良好的匹配规律，贝壳的珍珠层有着“软-硬”交织的层状复合结构和优异的力学性能^[6]，太原理工大学侯祥龙等^[7]应用刚性透明硬材料和黑色类橡胶粘弹性软材料，采用 Polyjet

工艺制备了贝壳仿生复合材料,并对材料的层内装配角度和面内装配角度进行了优化。南京理工大学闻章鲁等^[8]则是以高氮钢作为硬相、以不锈钢作为软相,采用钨极惰性气体保护焊(tungsten inert gas, TIG)增材制造打印出具有仿贝壳珍珠层结构的金属结构件,构件具有良好的强韧匹配性。

螃蟹的蟹钳十分坚硬,是其捕食的利器。南京航空航天大学顾冬冬团队^[9]解析表征了黄道蟹蟹钳的内部显微结构,发现蟹钳外壳厚度方向的微孔道呈螺旋结构,并且基于 SLM 技术仿生制造了这一结构(见图 2),所用材料为 NiTi 形状记忆合金。经测试表明,该结构的能量吸收系数达到 0.17,表现出良好的抗冲击缓冲性能。

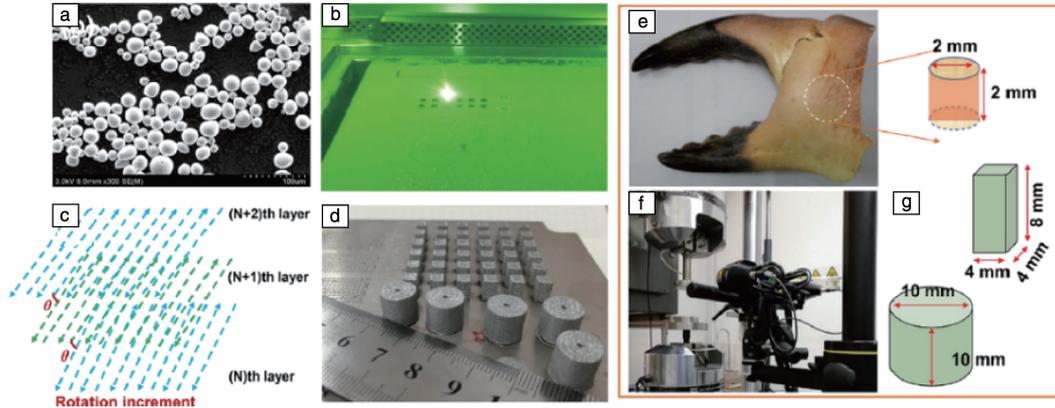


图 2 采用 SLM 技术制造仿生蟹钳结构^[9]: (a) NiTi 预合金粉末的 SEM 照片, (b) 激光与粉末相互作用的图片, (c) 所采用的激光扫描策略, (d) 制造获得的 NiTi 结构件, (e) 黄道蟹蟹钳照片, (f) 在压缩试验期间用于全场应变测量的实验系统, (g) 压缩试验的试样尺寸

Fig. 2 Producing Pagurus's claw structure by SLM technology^[9]: (a) SEM image of NiTi pre-alloy powder, (b) the picture showing the interaction between laser and powder, (c) the applied laser scanning strategy, (d) as-fabricated NiTi components, (e) crab claw of Cancer pagurus, (f) the applied DIC system for full-field strain measurement during compressive test, (g) specimen dimension for compressive test

鸟类之所以能在天上飞,除了翅膀以外,其中空的轻质骨骼结构也是一个重要因素。航空航天领域对减重有着迫切的需求,增材制造技术在这方面大有可为。例如,德国 Fraunhofer 增材制造研究所 Heilemann 等^[10]采用 DLF 技术成形了桁架结构的铝合金机身,并对工艺参数进行了优化。俄罗斯圣彼得堡彼得大帝理工大学的 Orlov 等^[11]通过结构优化软件对基于传统工艺设计的支架进行了优化,优化后零件质量从 868.38 降低为 178.01 g,减轻了 79.5%;所占的体积也相应大幅减小。在轻量化过程中,蜂窝结构是一个重要的仿生对象。自然界的蜂窝由一个个排列整齐的六棱柱形小蜂房组成,每个小蜂房的底部由 3 个相同的菱形组成,这种结构具有节省材料、容量大、坚固等特点。印度国防部材料工程部 Korde 等^[12]总结了采用增材制造技术制造蜂窝结构的研究进展,并指出这种结构在汽车、航空航天等领域有广泛应用前景。

人体骨骼也是经过亿万年自然界优化选择后的结果,其不规则的多孔结构具有轻质、承载能力强的优点。然而,由于各种原因人体骨骼会受到伤害,造成骨缺损,成为骨科临床最常见的疾病之一。骨缺损严重损害身体健康,如何对骨缺损修复重建一直是国际临床难题。采

用 3D 打印技术制备金属骨骼植入物是解决这一问题的有效方法之一,目前该技术还处在快速成长期,正日益受到人们的关注^[13]。然而,如何制造出与人体生物相容性好,孔隙率、孔隙分布、强度、模量等各方面与人体骨骼接近,能诱导骨骼生长的植入物,仍需要做大量的研究工作。南京航空航天大学喻长江等^[14]提出了多级晶格仿生微结构建模的概念和方法,获得了特定的弹性模量及抗冲击韧性。四川大学 Zhang^[15]等结合有限元分析及 SLM 技术,制备了具有金刚石型多孔结构的 Ti6Al4V 结构件,有利于骨组织生长。北京航空航天大学 Li 等^[16]对比了具有相同孔隙率的中心对称单元和对角线对称单元的性能差别,发现中心对称单元的抗压能力更强,但抗扭转能力不如对角线对称单元,为结构设计提供了参考。华中科技大学 Yang 等^[17]对增材制造多孔结构件的压-压疲劳性能进行了研究,发现成形后表面喷砂有利于去除粘附粉末,形成残余压应力,从而改善构件的疲劳性能。

总之,结构仿生就是通过研究、分析生物体的结构,了解它们的性能、组成及运动机制,采用恰当的增材制造技术及后处理工艺制造具有类似结构的零件,最终达到节省原材料、提高承载能力、增强构件服役性能的目的。

4 功能仿生

功能仿生是研究和分析自然生物的功能与构造关系,对其具备的特殊功能进行提炼借鉴,结合改进现有产品的短板和不足之处,实现产品的性能提升和更新换代。功能仿生设计源于自然,但不是机械地对自然进行抄袭和复制,而是理解仿生对象生物系统原理的实质,并加以借鉴提升。功能仿生主要依靠 Polyjet、直接墨水书写 (direct ink writing, DIW)、SLM、SLA 等工艺实现。

荷叶具有自清洁功能,现有的研究表明,这一功能的实现源于其表面复杂微米-纳米结构的组合,使其具有超疏水性。南京航空航天大学顾冬冬团队^[18]采用 SLM 工艺获得了具有超疏水表面的镍基纳米复合材料,接触角均大于 90°,在优化的工艺条件下,接触角甚至能超过 150°。中国科学院兰州化学物理研究所王晓龙团队^[19]对超疏水材料领域的研究进展进行了总结,并指出相关技术有望在除污、液体转移、油水分离、减阻等领域获得广泛应用。

光合作用是植物获取能源的重要途径。2018年,美国斯蒂文斯理工学院 Joshi 等^[20]采用材料挤出 3D 打印技术制备了一种能发电的仿生蘑菇。用于实现光合发电作用的 3D 打印墨水由两种材料组成,分别为石墨烯纳米带 (GNRs) 和蓝藻细菌。首先在蘑菇伞上打印 GNRs 电极网络,然后在电极图案上方打印蓝藻。将蘑菇暴露在阳光下可以激活蓝藻的光合作用,而 GNRs 电极网络负责收集由蓝藻细菌产生的电能,最终产生光电流。蓝藻菌产生的电流大小取决于它们的排列方式和密度,蓝藻菌越密集,产生的电能越多。这项工作可能成为下一代生物交叉应用的巨大机遇,可用于环境、防御、医疗和其他领域。

猫舌头上有很多倒刺,能很好地清洁和清除毛皮中的缠结物。美国佐治亚理工学院的 Noel 等^[21]模仿猫舌头上乳突状倒刺的结构,重建一个模型,并采用 SLA 技术实现这一结构,可用于开发易于清洁的发刷、清洁伤口的工具等,在医疗和美容业等领域有潜在应用。

机械手臂的抓取功能是其一项重要的功能,与控制系统结合能够实现物体的精准移动。德国 Fraunhofer 增材制造研究所的 Grzesiak 等^[22]早在 2011 年便提出了采用增材制造技术生产机械手臂实现抓取功能这一理念。吉林大学宋正义等^[23]采用具有热致收缩形变的形状记忆聚合物材料(其在温度和湿度的共同作用下产生相应的变形),结合仿生梯度打印策略最终打印出可实现抓取功能的软体机械手,且抓取质量最大为自身质量的 80 倍。斯里兰卡贾夫纳大学的 Neethan 等^[24]则对 3D 打印义肢的结构优化设计进行了研究,发现只需要对角度进行较小调

整即可改善使用性能并降低成本,说明 3D 打印功能仿生构件方向还有很大的挖掘潜力。

3D 打印技术还被用来制造各种传感器件。近年来,3D 打印的耳朵、皮肤、眼睛相继问世^[25-27],给更多失能人士带来了福音。

2013 年,美国普林斯顿大学 Michael 等^[25]使用 3D 打印技术打造了一个内嵌电线的 3D 软骨耳。这只人造耳具备人耳的软骨结构,而安置在耳朵内部的旋转天线则可以组成耳蜗螺旋,可以“听”到超越人类听力范围的无线频率(图 3)。这样,它就可以帮助听觉神经末梢有问题的患者重新恢复或提高听力能力,这一研究成果获得了业内广泛关注。



图3 采用增材制造技术制造的人工耳^[25]

Fig. 3 Bionic ear made by additive manufacturing technology^[25]

在前期研究基础上,2017年,美国明尼苏达大学的 Michael 等^[26]发明了仿生皮肤。他们使用一种特制的打印机打印出柔性电子传感设备,外观接近真正的皮肤。打印机 4 个喷嘴能喷出不同类型的“墨水”以打印各个分层。其中,底层是硅胶材质,往上依次为导电油墨制成的电极、硬币大小的压力传感器以及能冲洗掉的牺牲层。传统的 3D 打印系统往往使用在高温下成型的热固性材料,而此项研究中使用的多层“墨水”可以在室温下成形,这意味着它有可能直接打印到人体皮肤上,并实时感应到脉搏变化。这种仿生皮肤发展前景可观,既能制成可穿戴设备,通过皮肤监测人体健康状况,还能帮助探测危险化学品或爆炸物。

2018 年,Michael 研究组又在打造仿生眼方面迈出了重要的一步,使用 3D 打印机创建了一个能够检测光照水平变化的“人造眼”。他们使用半球形玻璃圆顶作为成型基底,首先使用定制的 3D 打印机,从银粒子基础墨水开始打印,分散的墨水保持在原地并均匀地干燥,而不是沿着弯曲的表面流散;然后,他们使用半导体聚合物材料打印可将光转化为电能的光敏二极管,由此制造出了一个能够检测光照水平变化的三维“人造眼球”^[27]。仿生眼模仿视网膜的功能与植入物协同工作,将其“看到”的

图像转换为视网膜细胞可接收的电脉冲, 视网膜细胞将图像信号传回大脑。这一技术有望让数百万人重见光明。

此外, 利用增材制造技术打印活体生物器官也有了长足进步。2015 年, 美国 Organovo 公司利用增材制造技术将活细胞组合在一起形成可用的器官结构, 成功打印出全细胞肾脏组织^[28]。这一成果有助于患有肾脏疾病的病人恢复健康, 同时也展现了增材制造技术在打印具有功能性、灵活性、适应性性能要求的组织器官方面的独特优势。

5 结 语

本文从形态仿生、结构仿生、功能仿生 3 个方面阐述了增材制造技术在仿生学方面的应用, 并列举了一些典型应用案例。仿生学是一门快速发展的学科, 近年来的研究取得了长足进步, 但也存在很多问题, 例如由于制造精度、复杂度的限制, 很多具有优异性能的结构采用传统加工方法难以实现。在这类问题的突破方面, 增材制造技术以其独特的技术优势, 可以起到十分积极的作用。增材制造技术与仿生学相辅相成、相得益彰, 未来将在各行各业中大展身手, 获得更广阔的应用空间。

参考文献 References

- [1] 任露泉, 梁云虹. 仿生学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 1-10.
REN L Q, LIANG Y H. The Introduction of Bionics[M]. Beijing: Science Press, 2016: 1-10.
- [2] 王健全, 付文文, 马红磊, 等. 航天医学与医学工程[J], 2017, 30(2): 103-107.
WANG J Q, FU W W, MA H L, et al. Space Medicine and Medical Engineering[J], 2017, 30(2): 103-107.
- [3] 汪焰恩, 李欣培, 杨明明, 等. 中国科学: 信息科学[J], 2015, 45(2): 235-247.
WANG Y E, LI X P, YANG M M, et al. Science China: Information Science[J], 2015, 45(2): 235-247.
- [4] WANG W M, WANG T Y, YANG Z W, et al. ACM Transactions on Graphics[J]. 2013, 32(6): 177.
- [5] 丁红瑜, 唐佩尧. 就业与保障[J], 2020, 8: 186-188.
DING H Y, TANG P Y. Employment and Security[J], 2020, 8: 186-188.
- [6] 张靓, 赵宁, 徐坚. 中国材料进展[J], 2018, 37(6): 419-427.
ZHANG L, ZHAO N, XU J. Materials China[J], 2018, 37(6): 419-427.
- [7] 侯祥龙. 贝壳仿生复合材料的静动态力学性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
HOU X L. Study on the Static and Dynamic Mechanical Properties of Shell Biomimetic Composite [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [8] 闻章鲁. 基于贝壳珍珠层特征的金属仿生设计和电弧增材制造研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
WEN Z L. Metal Bionic Design and Arc Additive Manufacturing Based on Pearl Layer Characteristics of Shell[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017.
- [9] MA C L, GU D D, LIN K J, et al. Applied Surface Science[J], 2019, 469: 647-656.
- [10] HEILEMANN M, BECKMANN J, KONIGORSKI D, et al. Procedia CIRP[J], 2018, 74: 136-139.
- [11] ORLOV A, MASAYLO D, POLOZOV I, et al. Key Engineering Materials[J], 2019, 822: 526-533.
- [12] KORDE JAY M, SHAIKH M, KANDASUBRAMANIAN B. Polymer-Plastics Technology and Engineering[J], 2018, 57(17): 1828-1844.
- [13] 刘晶. 北京印刷学院学报[J], 2019, 27(3): 92-99.
LIU J. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication[J], 2019, 27(3): 92-99.
- [14] 喻长江, 戴宁, 李大伟, 等. 中国机械工程[J], 2019, 30(9): 1111-1118.
YU C J, DAI N, LI D W, et al. China Mechanical Engineering[J], 2019, 30(9): 1111-1118.
- [15] ZHANG B Q, PEI X, ZHOU C C, et al. Materials and Design[J], 2018, 152: 30-39.
- [16] LI J, CHEN D S, ZHANG Y Y, et al. Journal of Bionic Engineering [J], 2019, 16: 468-479.
- [17] YANG L, YAN C Z, CAO W C, et al. Acta Materialia[J], 2019, 181: 49-66.
- [18] ZHANG H M, GU D D, MA C L, et al. Applied Surface Science[J], 2019, 476: 151-160.
- [19] YAN C Y, JIANG P, JIA X, et al. Nanoscale[J], 2020, 12(5): 2924-2938.
- [20] JOSHI S, COOK E, MANNOOR M S. Nano Letters[J], 2018, 18(12): 7448-7456.
- [21] NOEL A C, HU D L. PNAS[J], 2018, 115(49): 12377-12382.
- [22] GRZESIAK A, BECKER R D I, VERL A. Assembly Automation[J], 2011, 31(4): 329-333.
- [23] 宋正义, 复杂组分梯度仿生 3D 打印系统及其 3D-4D 打印应用研究. 长春: 吉林大学[D], 2019.
SONG Z Y. 3D Printing System of Complex Component Gradient Bionics and its 3D-4D Printing Application[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [24] NEETHAN R, NIDERSHAN S, MUGILGEETHAN V, et al. Materials Today: Proceedings[J], 2020, 23: 8-11.
- [25] MANNOOR M S, JIANG Z W, JAMES T, et al. Nano Letters[J], 2013, 13(6): 2634-2639.
- [26] GUO S Z, QIU K Y, MENG F B, et al. Advanced Materials[J], 2017, 29(27): 1701218.
- [27] PARK S H, SU R T, JEONG J W, et al. Advanced Materials[J], 2018, 30(40): 1803980.
- [28] UZARSKI J S, XIA Y, BELMONTE J C I, et al. Current Opinion in Nephrology and Hypertension[J], 2014, 23(4): 399-405.