

# 仿生新材料的应用及展望

王博, 张雷鹏, 徐高平, 李晓白, 李焱\*

哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150000

**摘要** 仿生材料的最大特点是可设计性, 运用仿生的手段可以将自然界生物材料的结构及功能赋予人工制造的智能化材料。综述了目前仿生新材料在信息通信、建筑行业、生物医疗、节能减排等领域的应用, 分析了仿生材料在未来的应用方向, 并对仿生材料的前景提出了展望。

**关键词** 仿生材料; 智能化材料; 新材料

仿生材料是一种新型的功能材料, 是建立在自然界原有材料、人工合成材料、有机高分子材料基础上的可设计智能材料。仿生材料的最大特点是可设计性, 人们可提取出自然界的生物原型, 探究其功能性原理, 并通过该原理设计出能够有效感知到外界环境刺激并迅速做出反应的新型功能材料<sup>[1-3]</sup>。作为 21 世纪发展新材料领域的重大方向之一, 仿生材料的研究将融入信息通信、人工智能、创新制造等高新技术, 逐渐使传统意义上的结构材料与功能材料的分界消失, 实现材料的智能化、信息化、结构功能一体化。

仿生材料的出现将成为材料发展历史的又一座里程碑。如何低成本、高效率地制造出新型仿生材料将是其能否继续快速发展的关键问题, 目前, 制造仿生材料核心理念为: 借鉴自然界生物体与生物材料的结构自适应、界面自清洁、界面自感知、能量自供给与转化的基本原理, 发展仿生新型结构材料、新型智能界面材料、新型物质能量转化材料, 为新质战斗力的形成和现役装备的改进改型提供材料的保障与支撑。仿生材料对于推动材料科学的发展与人类社会文明的进步具

有重大的意义<sup>[4-5]</sup>。

现如今仿生新材料在建筑行业、生物医疗、信息通信、节能减排等领域已经得到了较为广泛的应用。例如: 模仿甲虫鞘翅结构设计的建筑混凝土夹芯板、模仿蜂巢设计的蜂窝泡沫橡胶、模仿变色龙设计的柔性变色皮肤、模仿鲨鱼盾鳞结构设计的防污减阻材料等。

## 1 仿生建筑结构材料

仿生建筑材料指的是把自然界中一些生物体当成研究对象, 对生物体的结构和功能进行有关的探索并应用于建筑领域的材料。随着对仿生建筑材料研究的深入, 不断兴起了一些相关的学科, 例如: 仿生设计学、结构仿生学等。其中, 结构仿生学作为仿生建筑材料研究的基础科学, 对于未来仿生材料在建筑结构上的应用十分关键。

中国作为人口大国, 每年全国的粮食生产总量达 5 亿 t 以上, 大量的秸秆、稻草等农业副产物被焚烧, 不仅造成了资源的浪费, 还对大气环境造成了严重的污

收稿日期: 2019-05-20; 修回日期: 2019-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51572058, 51761135123, 51702068)

作者简介: 王博, 博士研究生, 研究方向为机电致变色材料及导电聚合物仿生材料, 电子信箱: wb641368602@163.com; 李焱(通信作者), 教授, 研究方向为仿生材料、热控、激光防护及红外隐身, 电子信箱: liyao@hit.edu.cn

引用格式: 王博, 张雷鹏, 徐高平, 等. 仿生新材料的应用及展望[J]. 科技导报, 2019, 37(12): 74-78; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.12.013

染。从古至今, 秸秆都可以直接与土壤、水等混合作为建筑材料, 但是这样直接制备的建筑材料强度低、无法承载过大的重量。事实上, 秸秆、稻草等农业副产物还可以通过机械叠加的方式与不同种类的材料结合, 在充分利用各自材料优势的基础上, 制成强度高、质量轻的夹层结构。尤其是在承重墙中, 由钢板与混凝土组合而成的夹层结构具有强度高、质量轻等优点, 不仅可用作结构承重材料, 还可用作建筑保温材料, 具有相当可观的经济价值<sup>[6]</sup>。

甲虫, 作为一种人们熟知的生物, 早在几十亿年前就已经存在于地球之上。经过漫长的生物演变过程, 其前鞘翅结构已进化成为一种具有特殊功能的生物结构。例如, 甲虫的鞘翅板三维结构便是一个集伪装与防护相结合的微观结构, 它是一个高度进化、质量轻、强度高的生物结构, 如图 1 所示。南京大学 Chen 等<sup>[7]</sup>利用秸秆等农业副产物, 仿照甲虫的鞘翅结构, 研制了一种新型仿生夹层混凝土夹芯板 SCBEPs, 对 SCBEPs 的力学性能和保温性能进行了有限元分析, 据分析结果得知: 该结构夹芯板具有极高的刚度、更密实的表面密度和更好的耐久性, 相比传统建筑行业的普通夹芯板, 不仅可以节省能源, 还可做到绿色环保。

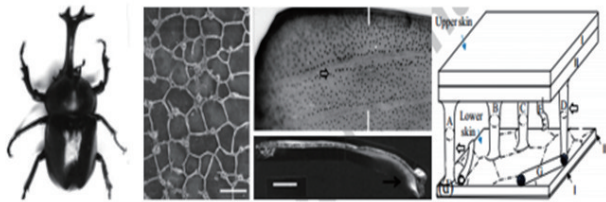


图 1 甲虫鞘翅板的生物原型<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Microstructure of beetle elytra

人类目前对于建筑物设计的发展水平已经达到了前所未有的高度, 不仅能上天入地, 还可横跨江海。人类之所以在建筑领域能够有如此成熟的设计, 有一大半的功劳要归功于自然界的“建筑大师”。著名生物学家 Charles 认为: “蜂巢是世界上最宏伟的建筑物。”<sup>[8]</sup>蜜蜂用蜂蜡建造的蜂巢是一座既牢固又轻巧、既美观又实用的杰出建筑。蜂巢轻质高强, 是建筑材料的发展方向之一。人类从蜂巢上获得了巨大的启示, 创造发明了蜂窝泡沫砼、蜂窝泡沫塑料、蜂窝泡沫橡胶及蜂窝泡沫玻璃等仿生结构材料。实践证明, 这些仿生蜂窝状材料, 既隔热又保温, 结构轻巧、造型美观。目前, 仿

照蜂巢结构设计制备的建筑物已遍布世界(图 2)<sup>[9]</sup>。



图 2 仿蜂巢建筑物设计<sup>[9]</sup>

Fig. 2 Design buildings by imitating honeycomb

## 2 仿生智能修复材料

材料在服役期间不可避免地会产生微裂纹和损坏, 由此引发的宏观应力裂纹会严重影响材料的使用以及设备的运行, 甚至会造成材料的失效并造成损失惨重的事故。如果能在材料内部产生微裂纹前对其进行预防, 对于延长材料的使用寿命、消除工程应用的安全隐患、提高材料的利用率具有重要意义。但是材料内部产生微裂纹的时间点是不易察觉的, 因此如何实现材料的自我修复及愈合是一个需要迫切解决的问题<sup>[10-12]</sup>。

自修复自适应界面材料是近几十年来兴起的一种新型仿生智能材料, 其核心源于对自然界生物体损伤及愈合机理的研究与模仿, 通过补给所需的物质和能量, 进而实现材料内部或者外部损伤的自修复与自愈合<sup>[13]</sup>。自修复自适应界面材料是一种功能类集成材料, 它不仅囊括了智能材料的基础性质, 在接受外界环境的刺激时, 还能主动地调节自身的材料属性, 以达到适应外界环境改变的效果。自适应的含义包括了材料各方面的性质, 如自我回复能力: 指的材料的外形、结构等发生改变后可以自动还原; 自我调节能力: 材料的物理化学状态随着外部环境的变化而发生调整。

仿照猪笼草等植物的表皮结构制备的润滑液浸渍涂层, 同样也是一种不错的自修复界面材料。图 3 所示为 Wong 等<sup>[14]</sup>关于仿猪笼草结构的最新研究成果, 与很多动植物表层分泌保护液的过程类似, 当表面的润滑浸润层受到机械外力作用而被破坏时, 在多孔介质储层中的润滑油会通过多孔介质的动态反馈机制自动补充到表面浸润层, 使其恢复到原来的稳定状态, 从而维持原有的材料性能。

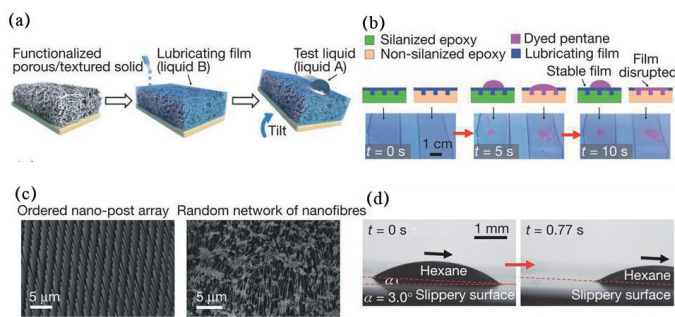
图3 仿猪笼草超光滑自修复多孔表面<sup>[14]</sup>

Fig. 3 Smooth self-repairing porous surface of pitcher plant

“变色龙”当属自然界中的自感知伪装大师。变色龙的表皮有一种结构——皮肤感受器,在变色龙皮肤感受器的表皮细胞内存储着黑色、红色、绿色、紫色、蓝色、黄色等各种颜色的色素细胞。当外界的环境发生变化时,皮肤感受器会接受到光线或温度变化带来的刺激,进而调整内部色素细胞的状态,实现身体的换色。图4所示为加州大学伯克利分校开发的仿生柔性自感知电子皮肤,通过光照响应等外界条件的改变,该皮肤可实现变色<sup>[15]</sup>。

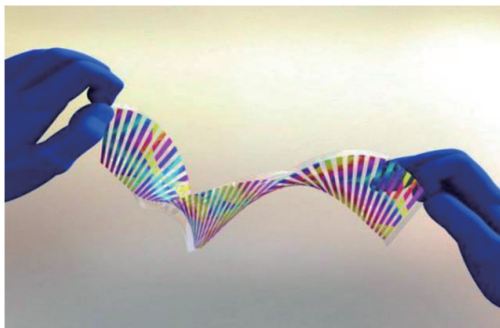
图4 仿变色龙自感知柔性皮肤<sup>[15]</sup>

Fig. 4 Self-aware flexible skin of imitating the chameleon

### 3 仿生节能减阻材料

将仿生材料应用于能源环境研究领域始终是热点前沿问题。大自然中具有自清洁界面的生物十分众多,尤其是栖息在深海中的海洋生物。部分海洋生物随着气候的变化要进行迁徙,迁徙的距离甚至可达上万公里,其表皮自清洁界面的微结构自此过程中发挥了极其重要的作用。海洋生物的自清洁表面可以有效地减小其迁徙时所受海水的阻力,确保其能够完成迁徙。海洋生物的表皮中通常存在着含有大量亲水基团

的蛋白基体,这些基体与海洋生物的表皮层稳固的结合形成一层较厚的疏水层,使得表皮具有自清洁的能力。例如鲨鱼的体表,是一种盾鳞的结构,这种结构之间的沟槽为开发海洋防污减阻涂层提供了思路,图5所示为仿照鲨鱼盾鳞结构设计的自清洁减阻材料。

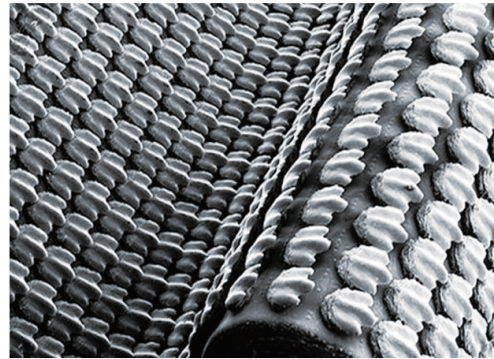
图5 仿鲨鱼盾鳞自清洁减阻材料<sup>[16]</sup>

Fig. 5 Self-cleaning drag reducing material of imitating shark shield scale

仿鲨鱼盾鳞结构防污减阻材料的研究始于20世纪80年代,美国国家宇航局将该研究称为未来航空产业的关键技术<sup>[16]</sup>。仿鲨鱼盾鳞结构防污减阻材料对于飞行器的设计至关重要,是实现飞行器提速、延长飞行器续航时间、减少飞行器燃料损耗的关键一环。

另一种生物,树蛙的趾、指末端吸盘及边缘沟壑明显,吸盘背面呈现出“Y”的形状。正是由于树蛙指、趾末端吸盘的存在,使得树蛙可在植物上敏捷自由的移动。树蛙脚趾表皮的结构为纳米尺度柱体密集排布组成六边形表皮结构单元,结构单元间的空隙充满流体分泌物,宽约1 μm。树蛙脚趾表皮纳米级别的柱体及其间的狭缝可以通过在界面处保持液体薄膜来提高其与基体的黏性。该表皮结构通过黏性液体的充满界面和脱离界面实现界面的黏结和脱黏,有机黏剂不会硬化。狭缝的结构和生理系统可以储存和再生有机黏剂,便于其快速黏附于粗糙表面。

受树蛙趾结构的启发,武汉大学薛龙建课题组<sup>[17]</sup>制备了一种微纳复合六边形柱状阵列,如图6所示。该结构由聚二甲硅氧烷(PDMS)与聚苯乙烯(PS)混合制成,其中PS在PDMS正六边形阵列中呈垂直分布,该结构受到的应力可以在PS与PDMS间进行有效的传递。

随着压电纳米发电机和摩擦电纳米发电机的相继问世,自供电系统对环境机械能的获取变得更加高效、

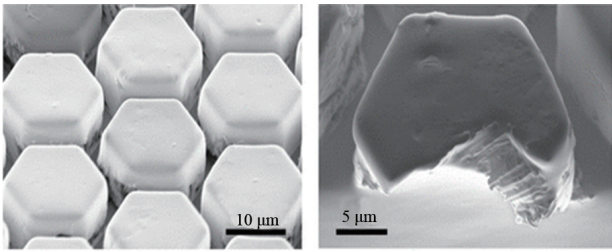
图6 仿树蛙趾结构六边形微纳结构<sup>[17]</sup>

Fig. 6 Hexagonal micro-nano structure of imitating tree frog toe

低损耗和简单。将轻型可变电源引入仿生微型飞行器(BMAV)中,广泛应用于军事侦察或大气污染监测等领域,是当前将仿生材料应用于能源环境研究领域的前沿热点问题。北京交通大学魏国武等<sup>[18]</sup>使用仿生技术研发了一种基于摩擦电机和压电器件相结合的混合柔性纳米发电机(图7),该纳米发电机不仅可以解决供电问题,还可智能监测周围环境的变化。

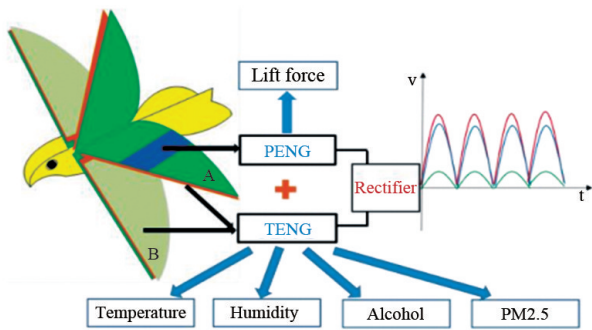
图7 仿生微型飞行器纳米发电机<sup>[18]</sup>

Fig. 7 Bionic micro-air vehicle nano-generator

## 4 仿生智能医学材料

生物医学材料是将工程材料的设计理念运用在医学和生物学的综合体现。目的是为了缩小工程材料和医学材料之间的实际应用差距。生物医学材料的设计结合了工程材料设计和医用材料设计的技巧,以改善医疗诊断、医疗监测的水平。生物医学中仿生材料的概念目前处于医学材料研究的最前沿。

生物的微观世界由一群隐秘的微生物组成,这些微生物拥有令人震惊但尚未开发的功能,提供了巨大的探索机会。这些微生物物种形成微生物群,相互之间有效地协同作用,并执行难以置信的任务。目前人们正在有选择地、可控地将来自生物微观世界的不同

物种组合起来,实现面向创新应用的功能仿生体系结构,以便更好地认识生物微观世界,从而带来新的机遇。美国新泽西州史蒂文斯理工学院机械工程系神经仿生学与神经电医学实验室 Mannoer 等<sup>[19]</sup>成功地使用仿生3D打印技术在蘑菇上种植了蓝藻菌群(图8)。

图8 3D打印纳米生物技术<sup>[19]</sup>

Fig. 8 Nano-biotechnology of 3D printing

仿生材料在医学领域的应用及发展十分艰难,因为在这一领域关联着更多其他基础学科、科研方向的发展,如工程学、微生物学、细胞学、理化科学、预防医学等。目前来看,仿生材料在医学领域的应用尚处于起步的阶段,其未来的发展还有一段漫长的路要走,要坚信仿生材料在医学领域的应用将会对未来社会的进步、科技的进步做出重要的贡献。

## 5 结论

仿生材料的出现将成为材料发展历史的又一座里程碑。如何低成本、高效率地制造出新型仿生材料将是其能否继续快速发展的关键问题。

未来仿生新材料的发展,要顺应国家发展战略,产学研相结合,不断推陈出新、满足新型高新技术产业发展的需求,将仿生科学与微生物学、工程学、细胞学、理化科学等学科紧密结合起来,精确地构建多尺度宏观/微观结构,实现材料的结构功能一体化。但是,就目前来看,国内许多与仿生材料相关的科研工作仅停留在实验室的制备和应用层面,在工程应用及工业生产中的实际效果仍有待考察和检验。因此,合理地设计生产制备工艺,优化制备方法,实现大规模精确的材料制造与加工成型,也是仿生材料领域亟待解决的瓶颈问题。

对于未来仿生新材料的规划展望如下:(1)应尽早突破生物材料结构与功能表征等关键技术,揭示典型生物材料卓越性能的内在规律;(2)建立出性能与功能

仿生的设计模板,至少发展出几种典型极端环境(如超轻、抗电磁、低频隐身等)仿生材料的制备方法;(3)研制出满足未来装备智能化、无人化发展的环境敏感响应的材料;(4)对战场的生物附着、环境因素等研发出具有自感知、自适应、自修复能力、并能提升装备效能的新材料;(5)利用仿生新材料研制出典型的器件,且性能应处于世界先进水平,并在武器装备上得以应用。

### 参考文献(References)

- [1] 江雷, 冯琳. 仿生智能纳米界面材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [2] 路甬祥. 仿生学的意义与发展[J]. 科学国人, 2004(4): 22-24.
- [3] 黄尊文. 勾画未来战争的脸谱[J]. 现代军事, 2004(1): 60-61.
- [4] Rana D, Matsuura T. Surface modifications for antifouling membranes[J]. Chemical Reviews, 2010, 110(4): 2448-2471.
- [5] Dalsin J L, Messersmith P B. Bioinspired antifouling polymers [J]. Materials Today, 2005, 8(9): 38-46.
- [6] Mi L, Jiang S. Integrated antimicrobial and nonfouling zwitterionic polymers[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2014, 53(7): 1746-1754.
- [7] Zhang Z J, Chen J X. Effects of changes in the structural parameters of bionic straw sandwich concrete beetle elytron plates on their mechanical and thermal insulation properties[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2019, 90(2): 217-225.
- [8] Tang J S. Large-area high-performance flexible pressure sensor with carbon nanotube active matrix for electronic skin[J]. Nano Letters, 2018, 18(3): 2054-2059.
- [9] Jiang S, Cao Z. Ultralow-fouling, functionalizable, and hydrolyzable zwitterionic materials and their derivatives for biological applications[J]. Advanced Materials, 2010, 22(9): 920-932.
- [10] Chen S, Li L, Zhao C, et al. Surface hydration: Principles and applications toward low-fouling/nonfouling biomaterials[J]. Polymer, 2010, 51(23): 5283-5293.
- [11] Shi C, Yan B, Xie L, et al. Long-range hydrophilic attraction between water and polyelectrolyte surfaces in oil[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2016, 55(48): 15017-15021.
- [12] He K, Duan H, Chen G Y, et al. Cleaning of oil fouling with water enabled by zwitterionic polyelectrolyte coatings: Overcoming the imperative challenge of oil-water separation membranes[J]. ACS Nano, 2015, 9(9): 9188-9198.
- [13] Kirschner C M, Brennan A B. Bio-inspired antifouling strategies[J]. Annual Review of Materials Research, 2012, 42(1): 211-229.
- [14] Wong T S. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity[J]. Nature, 2011, 477(7365): 443-447.
- [15] Zhou X, Xie Q. Inhibition of marine biofouling by use of degradable and hydrolyzable silyl acrylate copolymer [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54(39): 9559-9565.
- [16] 刘宝生. 鲨鱼皮仿生结构应用及制造技术综述[J]. 塑性工程学报, 2014, 4(21): 56-62.
- [17] Xue L J. Hybrid surface patterns mimicking the design of the adhesive toe pad of tree frog[J]. ACS Nano, 2017, 11(10): 9711-9719.
- [18] Wei G W. Self-powered hybrid flexible nanogenerator and its application in bionic micro aerial vehicles[J]. Nano Energy, 2018, 9(54): 10-16.
- [19] Sudeep J, Manu S. Bacterial nanobionics via 3D printing[J]. Nano Letters, 2018, 18(12): 7448-7456.

## Application and prospect of new bionic materials

WANG Bo, ZHANG Leipeng, XU Gaoping, LI Xiaobai, LI Yao\*

Center for Composite Materials and Structure, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China

**Abstract** The most important characteristics of the bionic materials are the ability to be desined. The structure and the function of the biological materials in nature can be obtained by artificial intelligent materials by means of bionics. This paper summarizes the application of the bionic new materials in the fields of information communication, building industry, biological medicine, energy conservation and emission reduction, and analyzes the application direction of the bionic materials in the future, as well assome prospective development of the bionic materials.

**Keywords** bionics; intelligent; new materials ●



(责任编辑 刘志远)