

论坛十五：仿生材料论坛

分论坛主席：任露泉 田丽梅 郭志光 陈华伟

15-01

仿生互通蜂窝陶瓷高温储热单元制备及其储蓄热特性

李子源 1,2,王养俊 1,2,商震 1,2,王欢 3,田丽梅 1,2*

1.吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022

2.吉林大学威海仿生研究院, 威海 264207

3.沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110065

* lmtian@jlu.edu.cn

通过光固化 3D 打印方法设计和制备了一种孔道相互连接的氮化铝蜂窝多孔陶瓷, 顶面的中央蜂窝孔内预留了一个注液口, 其他孔道密封, 并且在蜂窝孔壁上设计了从蜂窝中心辐射至边缘的连通孔, 通孔的高度逐渐减小。二元氯盐从注液口注入所有蜂窝孔中, 并使用陶瓷密封剂密封注液口, 最后获得蜂窝储热单元。对蜂窝储热单元的综合性能进行了研究。结果表明蜂窝储热单元的抗压强度可达 81.2 MPa, 储热密度可达 351KJ/Kg, 经过 500 次循环后质量损失率仅为 1.3%。每个蜂窝孔道内的熔盐相互连通, 形成对流并增强传热, 储热速率是常规蜂窝结构的 1.4 倍。互通蜂窝储热单元可用于堆积床式储热系统, 并可适应空气、蒸汽和导热油等换热工质。

关键词: 互通蜂窝陶瓷, 熔盐, 相变储热, 3D 打印

15-02

仿生聚合物复合材料的制备及性能研究*

汪洋, 东为富

江南大学化学与材料工程学院, 无锡, 214122

高强韧轻质复合材料在汽车、航空航天等领域发挥越来越重要的作用。虽然仿贝壳珍珠层结构强韧一体复合材料的制备已取得显著进展, 但在实际应用方面仍有诸多挑战, 如成型工艺复杂、难以三维成型等 1, 2。因此, 如何简单高效制备易于成型的高强高韧复合材料是目前亟需解决的问题。本研究以氧化石墨烯(GO)为结构单元, 首先采用含二硫键或硼酸酯键的动态共价高分子改性 GO, 使其片层间形成动态共价键作用, 因此, 只需经过简单混合加工, 便可制备多尺度“榫卯”结构的高强高韧复合材料(图 1)。该结构可有效降低材料对缺陷的敏感, 更容易提高强度和韧性(结果表明, 这种结构的强度和韧性分别为“砖-泥”结构的 2.3 和 4 倍, 拉伸强度达 260.8 MPa, 断裂功达 11.4 MJ/m³)。此外, 动态共价键可赋予材料良好的重复加工性。通过研究结构单元组装动力学, 获得多尺度结构的调控方法。本研究对于高强韧复合材料的高效制备及应用具有重要意义。

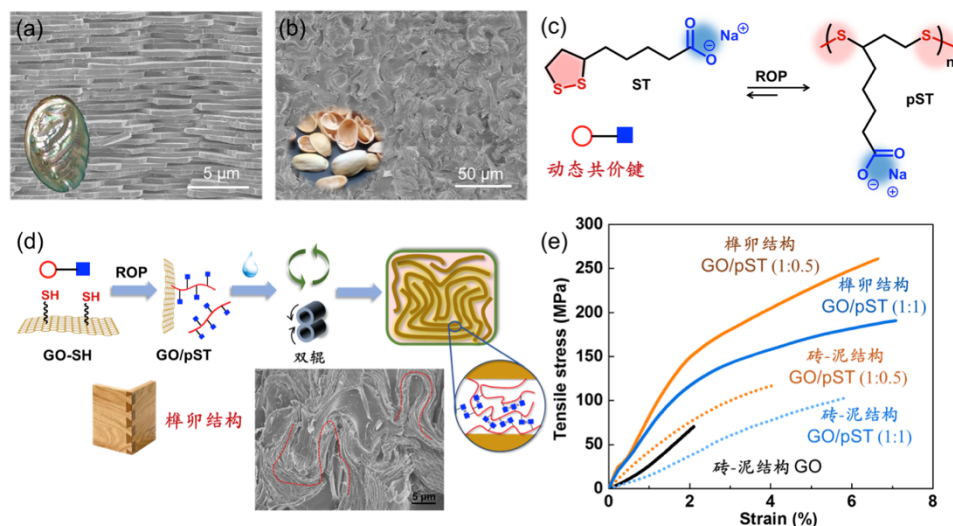


图 1. (a)鲍鱼壳和(b)开心果果壳的 SEM 照片：鲍鱼壳呈现“砖-泥”结构、开心果果壳具有“榫卯”互锁的微观结构；(c)硫辛酸钠开环聚合机理；(d)复合材料的制备流程图及其 SEM 照片；(e)“榫卯”结构和“砖-泥”结构复合材料的力学性能对比

主要参考文献

[1] S Wan, X Li, Y Chen, N Liu, Y Du, S Dou, L Jiang, Q Cheng. High-strength scalable MXene films through bridging-induced densification. *Science*, 2021, 374(6563): 96-99.

[2] Y Wang, T Li, P Ma, S Zhang, H Zhang, M Du, Y Xie, M Chen, W Dong*, W Ming*. Artificial nacre from supramolecular assembly of graphene oxide. *ACS Nano*, 2018, 12(6): 6228-6235.

15-03

A wear-resistant superhydrophobic surface based on interpenetrating heterostructure

Jianfu Wang¹, Wei Bing¹, Mingyao Gao¹, Huichao Jin¹, Limei Tian^{1,*}

¹Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun, China.

*lmtian@jlu.edu.cn

Superhydrophobic surfaces have great potential in waterproofing, self-cleaning, anti-icing, oil-water separation, biomedicine, etc. Superhydrophobicity is generally achieved by forming special micro-/nano- structures on solid surfaces, which are easily destroyed after mechanical wear and impact. As a result, the superhydrophobic surface has poor robustness and durability.

This article proposes a superhydrophobic surface based on interpenetrating heterostructure, which composed of a porous substrate and filling materials. After being subjected to friction and wear, the substrate with different wear resistance and the filling material falls off to form a micro-/nano- structures to achieve superhydrophobic effect. Due to the surface hydrophobic structure is formed by friction and wear, it will not destroy the hydrophobic surface even if it is subjected to friction and wear.

Different from the superhydrophobic surface prepared by spraying method, the superhydrophobic surface of the composite interpenetrating heterostructure is formed by friction and wear. Therefore, friction and wear will update the surface hydrophobic structure, and even if it

is subjected to different degrees of wear, it will not destroy the surface hydrophobicity.

Key words: Superhydrophobic, Wear resistant, Heterostructure, Friction

15-04

昆虫翅的结构耦合特性及仿生翼研究

吉爱红

南京航空航天大学

昆虫飞行时的高机动性、高灵活性在大自然中展现着独特的魅力,它利用翅膀的扑动及扭转来改变速度和迎角,产生升力及驱动力矩,从而达到独特的飞行技能。昆虫拥有多样化的翅翼结构和扑翼时的动态特性,其翅翼形态结构与扑动方式对飞行器机翼的设计有很重要的仿生启示。

从黑蚱蝉翅翼的形态结构、力学性能、耦合特性研究入手,观测黑蚱蝉翅翼的几何形态学数据和微观结构,测量翅翼翼膜及翼脉的材料力学特性;建立翅翼的运动学模型,分析前翼扑动的运动学特征参数;建立昆虫前后翼耦合连接理论模型,分析前后翼夹角变化对扑翼飞行的气动影响。对蝴蝶翅膀的代表性翅脉的 SEM 微观形貌进行观测,初步揭示了翅膀在质量较轻的情况下维持结构强度的原因。对翅膜从截面不同方向进行观测,显示出翅膜的多层结构与纤维的方向性排布。根据翅膀 SEM 微观形貌的特殊性分别对翅膀特定区域的结构进行力学性能测试,进一步验证了翅脉对结构强度的贡献及翅膜存在的各向异性。另一方面,对蝴蝶翅膀进行三维扫描并对扫描结果进行逆向重构,获得的翅膀三维模型及力学参数作为后续仿真计算的基础。建立翅膀模型开展有限元仿真分析从而揭示了翅膀扑动过程中的稳定性及维持其稳定扑动的原因。

开展了仿昆扑翼系统的扑动机构与机翼设计,分析扑动过程中机翼的变形与气动力的变化,揭示机翼前缘杆柔性对升力的气动影响;开展了仿生空壁两栖机器人的仿生飞行翅的设计验证。

15-05

一种受动物软骨组织启发的自修复聚氨酯/改性 BN 复合材料,可用于防污和防腐应用

田伟 a, 王帅 a, 赵云飞 a, 田丽梅 a, b, *

a 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 中国长春 130022

b 吉林大学威海仿生研究院, 中国威海 264207

*lmtian@jlu.edu.cn

在海洋中,防污防腐一体化涂层受沙砾冲击而破损是影响其功能的一个重要因素。对此,我们通过原位反应将功能化氮化硼(FBN)和防污剂(DCOIT)引入具有二硫键的聚氨酯中,合成了一种具有可重复自修复功能的防污防腐一体化涂层。选择自修复效率最佳的聚氨酯(PUSS4)作为基材,将具有多个氢键的 FBN 引入 PUSS4,形成具有纤维氢键交联的 BD-PUSS4。有趣的是,纤维氢键交联的 BD-PUSS4 具有优异的机械性能,拉伸应力为 20.64 MPa,比 PUSS4 高 37.5%。BD-PUSS4 具有优异的自修复性能,在 60°C 下修复 48 小时时,其自修复效率可达到 72%。BD-PUSS4 还具有优异的抗腐蚀性能。将 BD-PUSS4 浸入 3.5 wt% 的 NaCl 溶液中 15 天后,其 $|Z|_{0.01\text{Hz}}$ 仍能达到 $1.96 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。此外, BD-PUSS4 还具有优异的防污功能,其抗菌率可达 98.5%。所设计的复合涂层为开发具有防污、防腐蚀和自修复功能的涂层提供了新的思路 and 重要指导。

关键词: 聚氨酯; 自修复; 防污; 防腐

15-06

牙植入体表面柔性膜仿生设计及其摩擦力学性能研究

华李成* 江威力
宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江, 315211
hualicheng@nbu.edu.cn

最新的全国口腔流行病学调查结果显示, 我国达到牙齿健康的人不足 1%, 35-44 岁的中青年人口缺牙率高达 36.4%, 65-74 岁老年人缺牙率高达 86%, 缺牙修复的需求巨大。种植牙是修复牙齿缺失最好的方法之一, 它与天然牙的主要区别在于种植牙植入体表面与牙槽骨直接接触形成刚性联接, 而天然牙与牙槽骨之间有一层柔性牙周纤维膜(牙周膜)形成柔性联接, 将天然牙悬吊在牙槽骨之中, 达到既能固定牙齿又能缓冲咀嚼力的功能。本工作根据牙周膜的结构和功能特性在种植牙植入体表面仿生设计了具有动态力学响应行为的柔性纳米膜, 该膜表现出随纳米变形循环的数量和幅度而变化的动态响应功能。经过多次纳米变形循环后, 纳米膜的弹性力和粘附力可以显著增加。进一步的纳米摩擦实验表明, 纳米膜在的变形循环期间增加弹性和粘附力是基于摩擦电效应。以上特征使得具有柔性纳米膜的钛基牙植入体具有更好的生物相容性和力学缓冲功能。

关键词: 牙植入体; 柔性纳米膜; 仿生设计; 牙周膜; 摩擦力学;

15-07

仿生软体机器人在胃肠道内的应用

Bioinspired soft robots for targeted delivery in gastrointestinal tract

王奔
深圳大学化学与环境工程学院, 深圳, 518060
benwang@szu.edu.cn

软体机器人作为机器人领域的一个重要分支, 能够应对各种不确定的情况, 通过改变自身形状来适应不断变化的周围环境, 实现在复杂环境和狭小区域内的可控运动, 因而在体内疾病的诊断和治疗方面具有重要的应用前景。结合生物杂化的思想, 我们开发了多种仿生软体机器人, 可以用于生物腔道内长距离的细胞和药物靶向递送。所开发的软体机器人具有接近人体组织的模量和较好的弹性, 且载有药物和细胞的机器人具有优异的活性。通过控制外加磁场的强度、频率和方向, 可实现仿生软体机器人的高精度运动。此外, 基于将临床成像技术, 如内窥镜、超声成像、X 射线成像与磁控技术相互整合, 我们开发了长距离微机器人递送平台, 可以用于消化系统腔道内各个区域, 甚至包括一些现有医疗技术还很难达到的狭小腔道内软体机器人的递送。相关研发结果, 对于发展可以用于最小侵入医疗任务(特别是再生医疗)的智能医疗微型机器人铺就了道路。

15-08

Load-responsive bionic kirigami structures for high-efficient fog harvesting

Shanpeng Li^{1,2}, Jingxin Zhu¹, Cong Liu², Ruihua Zhang, Jianlin Liu^{3*}, Zhiguang Guo^{2*}

¹College of Engineering, Lishui University, Lishui 323000, China

²State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China

³College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China

Harvesting fog is a charming approach to alleviating the global water shortage crisis. However, it is extremely challenging to design fog collectors with high efficiency due to the scarce geometric driving structures. Herein, we develop a 3D kirigami structure inspired by the new corrugated driving structures in the Bird's Nest Fern, which can be fabricated by simple

shearing and stretching. Its fog-harvesting efficiency increases with the external load, forming the unique load responsiveness. The kirigami structure owns a 3D array configuration to enhance flow velocity for the efficient droplet condensation rate and has geometric and wetting gradients to transport condensate droplets spontaneously and quickly, contributing to a high water collection efficiency. The efficiency can reach 3.45 times that of a pure iron sheet by only changing the geometric structure, and the highest efficiency can even reach 4.58 times with the assistance of wetting gradients.

15-09

仿鱼类表皮的结构/材质一体化减阻表面的发展和应用

陈登科

鲁东大学交通学院

舰船、飞机等高速运动表面的高效减阻技术仍是一项重大挑战。减阻是鱼类等高速游动生物长期进化形成的优势功能策略,揭示高速游动鱼类表皮结构特征或材质特性与减阻功能机制的相互关系,可为解决高速运动表面高摩擦阻力问题提供可行参考方案。基于此,首先以鲨鱼皮盾鳞结构和海豚弹性表皮为典型生物原型,简要介绍了表皮独特结构特征和弹性材质特性,在此基础上,对金枪鱼表皮拓扑覆瓦鱼鳞结构特征和法向多层弹性材质特性进行了总结,并介绍了其他鱼类表皮的独特结构特征,进而介绍了以鱼类表皮独特结构特征或材质特性为生物原型的减阻表面的仿生制造、减阻特性及减阻机理研究现状。最后,对仿生减阻表面在工程和生活中的应用进行了简要阐述。

15-10

仿生热辐射调控研究进展

王富强

哈尔滨工业大学

仿生学作为一门跨学科的研究领域,不断启发着热辐射调控技术的创新。仿生学通过深入研究自然界中的生物结构和生物过程,使我们能够更好地理解和模仿自然界中的热辐射调控机制。例如,某些昆虫和动植物具有出色的热辐射特性,能够在不同环境条件下有效地调节其温度。通过仿效这些生物体的特征,我们可以设计出具有类似功能的生物启发材料用于热辐射调控,实现更高效的温度管理。本文旨在汇报课题组针对仿生学启发和指导热辐射调控领域做所的一点工作,以及相关应用在辐射制冷布料、辐射制冷涂料、辐射调控节能玻璃、热致变色辐射制冷材料等领域的潜力。在布料领域,这一技术可以应用于开发具备保暖和散热功能的纺织品,以提高舒适度并减少能源消耗。在涂料领域,仿生学启发的涂层可以降低建筑物的表面温度,减少热吸收,降低空调需求,实现节能目标。而在节能玻璃领域,仿生热辐射调控技术可应用于设计智能窗户,提高建筑的能源效率。仿生热辐射调控技术的发展为多个领域带来了新的创新机会,通过借鉴自然界的智慧,我们可以设计出更具可持续性和高效性的材料和应用,为未来的节能与环保目标提供有力支持。

15-11

仿生低粘附复合防除冰表面

刘晓林, 王泽林澜, 赵泽辉, 陈华伟*

仿生与微纳系统研究所, 机械工程及自动化学院, 北京航空航天大学, 北京 100191

*chenhw75@buaa.edu.cn

工程表面积冰会严重影响飞机、风力发电机组和高铁的正常运行，危及生命财产安全。传统的热力除冰技术由于其主动防冰的可靠性和响应直接而应用最为广泛，但由于飞行条件下极强的结冰粘附力，导致能耗非常高、加热温度梯度大、系统复杂；复合材料的应用已成主流趋势，其较差的耐热、导热性也限制了传统热力防冰技术的应用。为满足轻量化、复合材料飞行器的全天候飞行要求，亟需开发低热、低能耗、轻量化、高可靠的新型防除冰技术，突破大型无人机等全天候飞行的难题。飞行器在高速、低温、潮湿的恶劣飞行环境下，积冰与飞行器形成的界面“固-固”接触是结冰强度高、防除冰能耗高的根本原因。通过在结冰界面构建弱隔离层打破强“固-固”接触界面，是降低冰附着强度、实现节能防冰/除冰的一种有效解决方案。我们从荷叶自洁表面、猪笼草湿滑口缘和超韧超滑的皮下脂肪组织等天然防粘表面获得灵感，系统提出了利用“气膜/液膜/超滑弹性膜”打开结冰界面，有效降低结冰粘附力的方法，开发出一系列仿生低粘附防冰表面，包括耐久性超疏水防冰表面[1, 2]、超滑电热防冰涂层[3, 4]和互穿增强柔弹性防冰表面[5]，同时开发了具备电磁兼容[6]、光热[7, 8]、自控温[9, 10]、智能结冰感知[11]、双向可拉伸[12]等多功能复合的防除冰涂层，已实现在多种型号无人机、高铁转向架及风机叶片上的装机应用。

参考文献：

- [1] Liu X, Chen H, Kou W, et al. Robust anti-icing coatings via enhanced superhydrophobicity on fiberglass cloth [J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 138:18-23.
- [2] Liu X, Chen H, Zhao Z, et al. Tunable self-jumping of melting frost on macro-patterned anisotropic superhydrophobic surfaces [J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 409:126858.
- [3] Liu X, Chen H, Zhao Z, et al. Slippery liquid-infused porous electric heating coating for anti-icing and de-icing applications [J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 374:889-896.
- [4] Zhao Z, Chen H, Liu X, et al. Development of high-efficient synthetic electric heating coating for anti-icing/de-icing [J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 349:340-346.
- [5] Wang Z, Zhao Z, Wen G, et al. Fracture-Promoted Ultraslippery Ice Detachment Interface for Long-Lasting Anti-icing [J]. ACS Nano, 2023, 17: 13724–13733.
- [6] Chen J, Zhao Z, Zhu Y, et al. Wave-transparent electrothermal composite film for anti-icing/de-icing [J]. Progress in Organic Coatings, 2023, 183: 107751.
- [7] Zhao Z, Wang Z, Liu G, et al. Liquid-like slippery surface with passive-multi active strategy integration for anti-icing/de-icing [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 474: 145541.
- [8] Zhao Z, Chen H, Zhu Y, et al. A robust superhydrophobic anti-icing/de-icing composite coating with electrothermal and auxiliary photothermal performances [J]. Composites Science and Technology, 2022, 227:109578.
- [9] Wang Z, Zhu Y, Liu X, et al. Temperature self-regulating electrothermal pseudo-slippery surface for anti-icing [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 422:130110.
- [10] Zhao Z, Chen H, Liu X, et al. The development of electric heating coating with temperature controlling capability for anti-icing/de-icing [J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 184:103234.
- [11] Liu X, Zhu Y, Wang Z, et al. A sandwich-structured intelligent anti-icing/de-icing film with ice-oriented power self-regulating performance [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2022, 10(34): 12213-12220.
- [12] Zhao Z, Zhu Y, Wang Z, et al. A biaxial stretchable, flexible electric heating composite film for de-icing [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 162:107124.

15-12

灵感来自珊瑚的海洋防污技术

靳会超*, 田丽梅, 邴薇, 王建福

吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 吉林长春 130022

*jinhc@jlu.edu.cn

海洋生物污损是指海洋中的污损生物(如细菌、藻类和藤壶等)附着在水下表面的一种现象, 是海洋工业面临的一个重大难题 [1]。由于有毒防污涂层对海洋环境的负面影响, 在全球范围内被禁止使用, 开发环保、高效的防污涂层需求迫切。在长期的进化过程中, 珊瑚已经发展出几种优秀的防污策略来防止污损生物的附着 [2]。例如, 荧光珊瑚可以通过发出的荧光来抑制生物污损, 而花环肉质软珊瑚则通过释放天然防污剂和摆动其柔软的触手来降低污损生物的附着。受荧光珊瑚的启发, 制作并测试了三明治结构荧光涂层。结果表明, 荧光对藻类沉降有抑制作用, 而对细菌的粘附无影响 [3]。此外, 还发现涂层对藻类的抑制效果受其发光波长的影响。在此基础上, 以 ZnS:Cu/聚二甲基硅氧烷(PDMS)为材料制备了水流驱动型荧光防污涂层, 该涂层通过荧光驱动和抗菌作用来防止生物污损。用液相色谱质谱联用 (LC-MS)对珊瑚黏液和珊瑚本体中的天然化合物进行了分析, 发现了 7 种浓度最高的化合物 [4]。然后将这 7 种化合物作为防污剂掺入有机硅基体中。结果表明, 天然化合物有利于降低污损生物的附着, 它们通过诱导细胞膜损伤来杀死细菌。还有一种涂层灵感来源于珊瑚的弹性触手, 制作并测试了带有人工触手的仿生表面 [5]。结果表明, 触手在流体激励作用下形成一个不稳定的动态表面, 从而防止污损生物的附着。此外, 受珊瑚的固着生长策略的启发, 采用 PDMS/聚氨酯制造了一种具有增强附着力的梯度涂层。总的来说, 这些防污策略具有环保和高效的特点, 在海洋工业的应用显示出巨大的潜力。

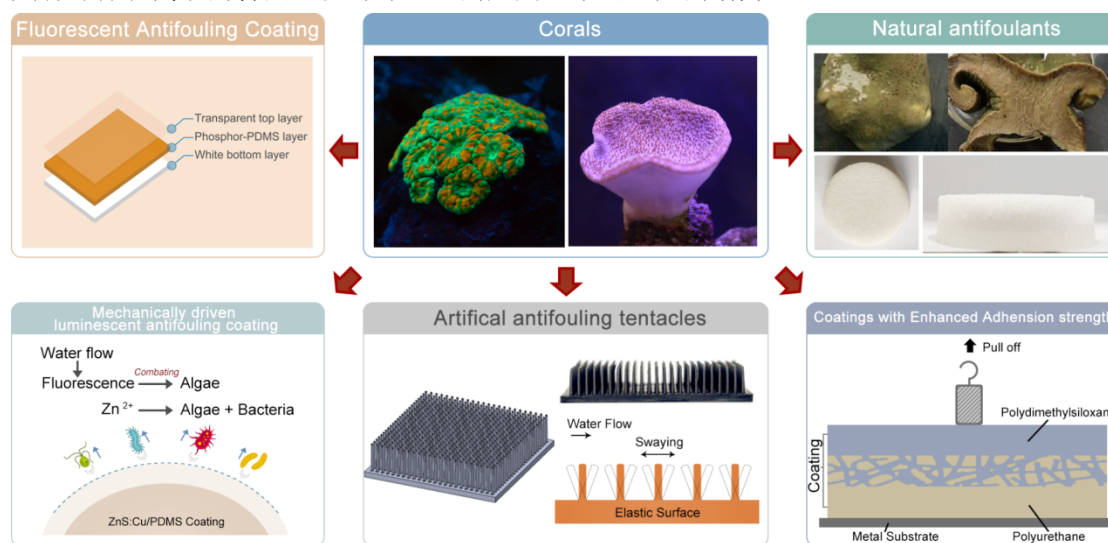


图 1 受珊瑚启发的仿生防污涂层

关键词：珊瑚，仿生，海洋防污，涂层

参考文献：

- [1] Jin H C, Tian L M, Bing W, Zhao J, Ren L Q. Bioinspired marine antifouling coatings: Status, prospects, and future, *Progress in Materials Science*, 2022, 124:100889.
- [2] Tian L M, Yin Y, Jin H C, Bing W, Jin E, Zhao J, Ren L Q. Novel marine antifouling coatings inspired by corals, *Materials Today Chemistry*, 2020, 17:100294.
- [3] Jin H C, Bing W, Jin E, Tian L M, Jiang Y G. Bio-inspired PDMS-phosphor-silicone rubber sandwich-structure coatings for combating biofouling, *Advanced Materials Interfaces*, 2020, 7: 1901577.
- [4] Bing W, Jin E, Tian L M, Jin H C, Liu Z. Construction and application of bionic antifouling coatings inspired by soft coral, *Biosurface and Biotribology*, 2022, 1-10.

[5] Bing W, Tian L M, Wang Y J, Jin H C, Ren L Q, Dong S Y. Bio-Inspired Non-Bactericidal Coating Used for Antibiofouling, Advanced Materials Technologies, 2019, 4:1800480.

15-13

芯-壳结构压电微米纤维的制备及仿生应用研究

俞平 章佳柯 龙江启
温州大学

压电聚合物纤维具有柔性、高长径比、质量轻和成本低的优点，在生物医学、能源和电子信息等领域的传感和驱动器件开发方面有十分广泛的应用。本研究针对现有压电纤维上下电极难分离的问题，创新性地提出力控同轴静电纺丝工艺，将其中一个电极布置于纤维芯部，并一次性完成压电壳层和电极芯层的定位沉积，另一个电极布置于纤维表面，利用溅射工艺成型。研究了不同工艺参数对纤维形貌和定向性的影响，实验结果表明使用凸型同轴针头、芯层聚乙烯吡咯烷酮（PVP）和多壁碳纳米管（MWCNT）的质量分数均为 2~3%、基板速度为 50~200 mm/s、工作电压为 5~6.5 kV、纺丝距离为 20~50 mm 时，同轴泰勒锥和射流保持稳定，沉积的纤维电极芯层同轴包裹于聚偏氟乙烯（PVDF）压电壳层中，并且可实现二维空间上的精确定位。搭建了动态力测试平台，对制备的纤维进行了力敏测试，结果表明纤维对 0.5~50 Hz 频率区间内的正弦激励力具有良好的跟随性。将制备的纤维应用于跳跃机器人仿生纤毛传感器中，实现了对气流扰动的有效测量。

关键词：压电纤维、芯-壳结构、力控同轴静电纺丝、仿生微纤毛

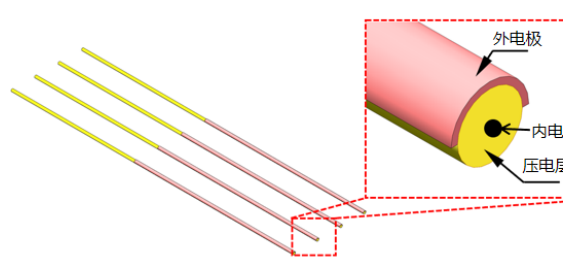


图 1 芯-壳结构压电纤维示意图

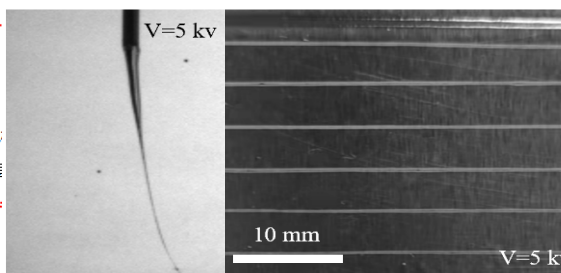


图 2 射流与纤维形貌

15-14

触觉仿生手指的设计及其表面识别算法研究

秦龙辉
机械工程学院，东南大学
lhqin@seu.edu.cn

触觉感知，作为人类最重要的一种感知能力，赋予我们识别不同形状尺寸物体、灵活操纵各类物品、以及与周围环境互动的能力。截至目前，已出现了多种触觉传感器，如电子皮肤、力测量装置、手部康复辅助器件等。不同于现有的大多数触觉传感器，我们受人手指的启发，设计了一款触觉仿生手指。一方面，该手指拥有与人手指相似的形状、尺寸和结构；另一方面，该手指包含多组PVDF压电薄膜和压阻式敏感元件，能实现与人手指接近的触觉感知功能。其中，敏感元件包含在外部柔性皮肤内，在可靠性提高的同时，外界所施加的力和振动刺激也能直接传导进手指内部。而且，该手指能够同时实现对静态力与动态力的灵敏感知。为了验证该手指的识别性能，我们提出了一系列基于人工智能算法的信号处理框架。多路触觉传感信号经过预处理后，会经历小波分解、特征提取、特征筛选和基于极限学习机

的识别模型训练等。通过机器人实验，我们对该手指在接触状态感知和表面识别等方面的能力进行了分析与验证，结果表明：该手指具有高准确率的表面识别性能。该触觉传感器的设计及其信号处理算法，为相关领域的仿生设计和人工智能技术的应用提供了新思路。

关键词：触觉仿生手指；敏感元件；仿生设计；表面识别；人工智能算法

15-15

Design and fabrication of bioinspired macroporous materials

Hao Bai

Zhejiang University

Biological porous materials, such as wood, bone and polar bear hair, have obtained outstanding mechanical and thermal properties by building hierarchical architectures. Specifically, wood exhibit excellent mechanical strength, highly efficient water and nutrient transport capability, and low density due to their hierarchically aligned porous architecture; polar bears can retain thermal homeostasis in the extremely cold Arctic due to outstanding thermal insulation property of their porous hairs; bone has developed highly mineralized porous architecture to realize both high strength and efficient vascularization channels. Learning from these design motifs is believed to provide an effective way to design novel materials with unprecedented properties to meet the ever-growing demands of a sustainable society.

In this talk, I will present our recent progresses in developing cuttlebone-inspired cellular materials to resist large hydrostatic pressure in the deep-sea environment, thermally stealthy textile inspired by polar bear hair, intrinsically self-healable nacre-mimetic composites, and so on. I will also demonstrate the potential applications of these bioinspired porous materials in areas like lightweight vehicles and equipment, thermally efficient textiles and buildings, mechanically functional materials and so on, to support the development of sustainable society. At the end of my talk, challenges and prospects of bioinspired macroporous materials will be discussed.

Keywords: macroporous materials, composite, polar bear hair, ice-templating, hierarchical structure

Reference:

- [1] Xu, Z.; Wu, M.; Gao, W.; Bai, H. Science Advances 2022, 8, eabo0946
- [2] Mao, A.; Zhao, N.; Liang Y.; Bai H. Advanced Materials 2021, 33, 2007348
- [3] Zhao, N.; Li, M., Gong, H.; Bai, H. Sci. Adv. 2020, 6: eabb4712
- [4] Cui, Y.; Gong, H.; Wang, Y.; Li, D.; Bai, H. Advanced Materials 2018, 30, 1706807

15-16

突破光学衍射极限：新型双通道激光直写光刻装置

朱大钊

杭州玉之泉精密仪器有限公司

激光直写（DLW）光刻是一项具有空间三维加工能力的微纳加工技术，在微纳集成器件制造中发挥着重要作用。然而目前市面上流行的 DLW 装置广泛采用单焦点刻写，效率较低，且最小特征尺寸受限于光的衍射极限，无法突破至亚百纳米。为了解决这些问题，本团队开发了一种基于双光子聚合效应的双通道并行激光直写光刻（P3L）系统。该系统突破了光学衍射极限，可以提供 50 nm 的特征尺寸，能够实现各种精细 3D 结构的 DLW 光学制造，并充分利用了激光的偏振分量实现了双通道并行打印，其效率是传统 DLW 的两倍。此外，双通道可以分别执行不同的光刻任务，能广泛应用于制造非周期性结构和高度复杂结构。这

进一步扩展了 DLW 光学制造的潜在应用范围, 使该装置有望成为可支持众多领域发展的实用支撑设备。

关键词: 光学器件加工; 并行直写技术; 突破光学衍射极限; 双光子聚合; 边缘光抑制效应

15-17

一种兼具接触位置和力检测功能的大幅面 柔弹性机器人电子皮肤

张友志, 陈锦苗, 李杭泽, 王浩杰, 周超

温州大学机电工程学院

随着人工智能技术的飞速发展, 越来越多的智能机器人将逐渐走进人们的日常生活。因此, 如何实现人与机器人之间安全友好的信息交互已成为一个重要的研究课题, 而机器人电子皮肤则是实现这一目标的关键手段。本文基于导电织物, 设计了一种兼具接触位置和接触力检测功能的低成本大幅面柔弹性机器人电子皮肤。通过新型“双面效应功能”导电织物设计, 使电子皮肤的结构层数简化为 5 层, 而导电织物内独特的电势自均匀特性, 进一步使电子皮肤的外部引线减少为 5 根。此外, 神经网络算法的应用使电子皮肤具有自学习的“智能”, 即使在复杂的 3D 曲面物体表面也可以灵活而快速地部署。演示了将电子皮肤样品贴附于机器臂进行人-机交互的应用实例。实验结果显示了该电子皮肤在机器人-机交互控制等应用领域的巨大潜力。

关键词: 电子皮肤, 导电织物, 大幅面, 可拉伸, 机器人

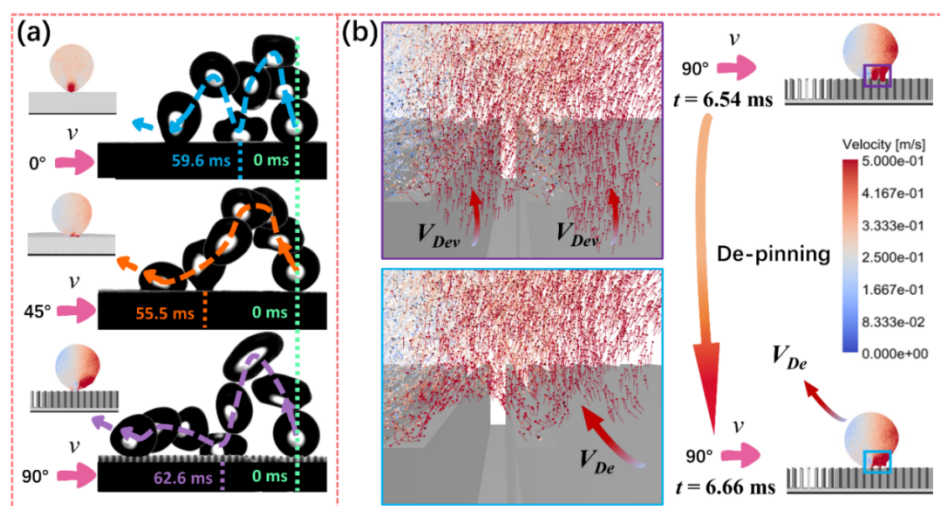
15-18

液滴/气泡的仿生操控

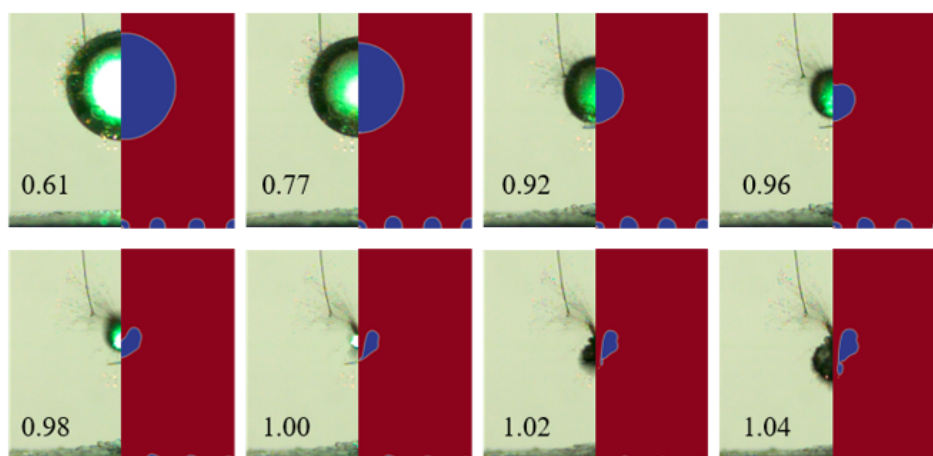
张成春, 魏振江, 辛振涛, 王琳、郑益华

吉林大学工程仿生教育部重点实验室

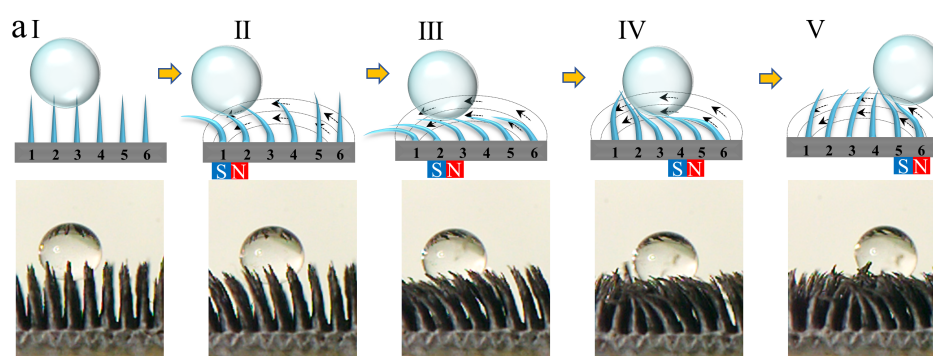
在自然界中, 生物利用液滴和气泡来生存、进化和繁荣。报告主要汇报通过模仿生物表面的形貌及结构特征开发的一系列具有液滴、气泡操纵能力的功能表面。报告主要包括以下几个方面: 以翠鸟羽毛为仿生原型, 设计加工了各向异性沟槽阵列表面, 在振动、表面曲率、各向异性、超疏水性的共同作用下, 实现跨介质航行器出水过程水滴的高效脱附; 受肺部纤毛和荷叶效应启发, 设计制备磁响应纤毛阵列表面, 通过磁场调控固-液-气三相接触线实现液滴的智能操控; 以水蜘蛛等昆虫在水下黏附气泡为灵感, 设计了水下超亲气表面, 利用空化气泡和表面气膜的震荡相位差, 实现了空化气泡的反向射流, 缓解了空化气泡对于壁面的损伤; 基于稗草叶片具有优异的液滴粉碎能力, 通过多尺度脊状结构诱导液膜的各向异性铺展和回缩, 进而形成稳定极低的液柱, 从而加速液滴破碎。基于仿生策略研发具有液滴、气泡操控能力的表面, 在微流控、表面快速脱水、表面抗空蚀等领域具有重要的现实意义。



移动仿生表面液滴翻滚



表面气泡层实现空化气泡定向操控



磁性纤毛实现液滴定向操控



稗草叶片仿生表面实现液滴完全破碎

15-19

智能仿生抗菌材料

赵杰 1*, 刘紫婷 1, 易要贞 1, 任露泉

1 吉林大学, 工程仿生教育部重点实验室, 长春市人民大街 5988 号, 130012

*邮箱: jiezhao@jlu.edu.cn

病原菌在医疗器械材料表面的粘附对人类健康构成了严重威胁。抗生素的过度使用已导致多重耐药性细菌的出现。为了提供一个有效的替代方案,本研究受到生物纳米结构抗菌表面启示,并进一步结合智能结构性能,使其具有更高的抗菌效果。这些智能仿生微纳结构不仅通过物理机械撕裂作用杀死了附着在其表面上的细菌,还通过智能响应机制,如温度、湿度和光照,自适应地调整其性能,从而更有效地解决耐药性问题。此外,我们还结合微纳加工和制造技术,进一步优化了这些智能结构,使其具有更好的耐久性和时效性。在此基础上,深入研究了结构表面形态、光热转化性能、润湿性以及聚合物链的温控响应性与其抗菌性能之间的密切关系。

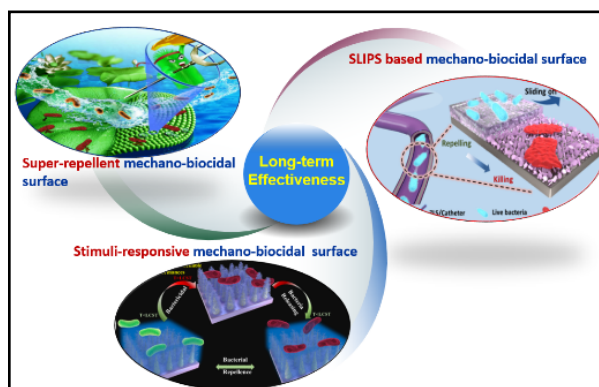


图1 智能仿生结构抗菌材料抗菌机制

关键词: 仿生表面; 微纳结构; 智能响应性; 抗菌性**参考文献**

- [1] Liu, Z.; Yi, Y.; Wang, S.; Dou, H.; Fan, Y.; Zhao, J.;* Ren, L. ACS Nano **2022**, **16**, 16549.
[2] Jiang, R.; Yi, Y.; Hao, L.; Chen, Y.; Tian, L.; Dou, H.; Zhao, J.; * Ming, W.; Ren, L. ACS Appl. Mater. Interfaces **2021**, **13**, 60865.

15-20

海洋装备防污、防腐仿生新材料

吉林大学 田丽梅

污损与腐蚀是危害海洋装备的罪魁祸首,特别是对于海洋工程装备,危害尤甚。本项目组针对海洋装备表面生物污损、腐蚀情况,长期开展相关研究工作。本文受珊瑚防污策略、鲸豚类皮肤的特殊防腐结构启发,开展了系列“谐动防污”、“天然产物”仿生防污材料、抗空泡腐蚀防护仿生材料、防污防腐一体化仿生材料的研究工作,从材料的仿生构建原理、制备、性能、防污防腐机制及其示范性应用进行了详细的研究。

上述仿生新材料的研究工作,为海洋装备防污、防腐需求提供了新思路、新材料。