

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.038



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 仿生土木工程研究进展与展望

仇文岗<sup>1</sup>, 何祥嵘<sup>1</sup>, 刘汉龙<sup>1</sup>, 孙伟鑫<sup>1</sup>, 韩馥桢<sup>1</sup>, Raul Fuentes<sup>2</sup>,  
Gustavo Paneiro<sup>3</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 亚琛工业大学 土木工程学院, 德国 亚琛 100600;  
3. 里斯本大学 建筑学院, 葡萄牙 里斯本 1649-004)

**摘要:**随着城镇化水平不断提升,中国每年新增建筑面积约20亿m<sup>2</sup>,大规模基础设施建设对土木工程理论和技术创新的要求越来越高。学者们通过研究自然界的增强增韧、水下黏合、钻孔掘进和轻质高强等现象发现,生物体具有独特的外部形态和组织结构,通过模仿生物体的外部形态、结构特征或运动机理可为土木工程技术创新和可持续发展提供新思路、新原理和新理论。从仿生材料、仿生结构和仿生机械与构筑物3个方面阐述仿生学在土木工程中的应用,列举典型的应用案例,并对仿生土木工程进行总结和展望,为未来的研究提供基础材料。作为新兴的研究方向,仿生土木工程基础理论尚不完善,仿生土木工程涉及生物、材料、结构等多学科的交叉,需要开展不同领域间的协同合作研究。

**关键词:**仿生土木工程;仿生材料;仿生结构;仿生机械与构筑物

**中图分类号:**TU18 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2024)05-0001-15

## Research progress and prospect of bio-inspired civil engineering

ZHANG Wengang<sup>1</sup>, HE Xiangrong<sup>1</sup>, LIU Hanlong<sup>1</sup>, SUN Weixin<sup>1</sup>,  
HAN Fucheng<sup>1</sup>, Raul Fuentes<sup>2</sup>, Gustavo Paneiro<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, RWTH Aachen University, Aachen 100600, Germany; 3. School of Architecture, University of Lisbon, Lisbon 1649-004, Portugal)

**Abstract:** With continuous urbanization, China's annual new construction area is of about 2 billion m<sup>2</sup>, as a result of which the theoretical and technical innovations for large-scale infrastructure construction are increasingly demanding. Scholars have found that organisms have unique external morphology and organizational structure by studying the phenomena of reinforcement and toughening, underwater adhesion, drilling and tunneling, light weight and high strength in nature. By imitating external morphology, structural characteristics or motion mechanism of organisms, they can provide new ideas, principles and theories for innovation and sustainable development of civil engineering. This paper mainly expounds the application of bionics in civil engineering from three aspects: bionic materials, bionic structures and bionic apparatus and

**收稿日期:**2023-01-04

**基金项目:**科技部外专引智项目(G2022165004L, DL2021165001L);重庆市研究生教育教学改革研究项目(yjg223004)

**作者简介:**仇文岗(1983-),男,博士,教授,主要从事岩土工程研究, E-mail: cheungwg@126.com.

**Received:** 2023-01-04

**Foundation items:** High-end Foreign Expert Introduction Program (Nos. G2022165004L, DL2021165001L); Chongqing Graduate Education Teaching Reform Research Project (No. yjg223004)

**Author brief:** ZHANG Wengang (1983-), PhD, professor, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: cheungwg@126.com.

constructions, and lists typical application cases. Finally, the bio-inspired civil engineering is summarized and prospected, which provides basic principles for future research. As an emerging research area, the basic theory of bio-inspired civil engineering is promising not yet perfect. Meanwhile, bio-inspired civil engineering involves the interdisciplinary research of biology, materials, structure and other disciplines, and it is necessary to carry out cooperation between different disciplines.

**Keywords:** bio-inspired civil engineering; bionic material; bionic structure; bionic apparatus and construction

为了适应环境、延续生命,自然界中的生物经过数亿万年的自然选择,已经进化出优异的生物材料、结构和形态,为人类进行工程设计和研发提供了全新的理念和方法<sup>[1]</sup>。在人类发展进步的历史长河中,多姿多彩的大自然一直为人们提供创造灵感和良好的生物原型,从千百年前模仿河里的游鱼发明舟楫,到近代根据蝙蝠的精准定位发明雷达,再到 21 世纪将荷叶的超疏水特性运用到文物保护思想的诞生,人类一直在向大自然学习,并成功地将仿生思想运用在日常生活、实际工程以及科学研究中,逐步推动着仿生思想与仿生理念在人类活动中的发展<sup>[2]</sup>。仿生学是研究自然界生物体的材料组成、结构构造、性状原理等的一门新兴学科,并从宏观和微观的角度去分析生物体的行为和相互作用,从而为工程技术提供新的思想、新的原理和新的方法。

师法自然,仿生学是采用相关生物学知识体系去解决工程问题的重要学科,可为土木工程技术创新和可持续发展提供新思路、新原理和新理论。仿生土木工程是仿生学的一个典型应用,仿生学学科的边缘性与其交叉性决定了仿生土木工程的研究是广泛而先进的,各学科的不断发展与科技的不断进步也将为仿生土木工程的发展提供更多的技术支持<sup>[3]</sup>。加强土木工程仿生科学与技术研究对加快构建形成集约高效、经济适用、智能绿色、安全可靠的现代化土木工程基础设施体系具有极为重要的决定意义。笔者对仿生学与土木工程的关系进行梳理,主要从仿生材料、仿生结构和仿生机械与构筑物 3 个方面阐述仿生学在土木工程中的应用,结合每一种生物突出的相关特性及原理,列举与之匹配的典型应用案例。笔者也对如何有效开展仿生土木工程科研或设计进行思考,并在全文小结基础上对未来研究进行展望。

## 1 仿生材料

仿生材料是一种具备生物优良特性和功能的新型材料。该材料不同于传统材料,它是一种可设计的智能材料,也涉及一些材料学的交叉组合。仿

生材料最大的特点是具备“功能性”,人们根据自然界中生物对特定环境做出的特定的行为或释放的特定物质进行研究,深入剖析这种行为或物质的内在机制和原理,并基于该原理设计出类似生物能对外界环境刺激迅速作出反应的新型功能材料。20 世纪末,学者们开始意识到这种交叉学科的先进性和重要性,在仿生工作上取得了一些开拓性的成果<sup>[4]</sup>;如仿生自然叶片蒸腾作用的热效应和仿生动物消化系统的反应器等。如今,已经有许多仿生材料被应用于土木工程领域。

### 1.1 贻贝、沙堡蠕虫——水下黏合剂

贻贝附着是最早记录生物附着观察的对象之一。1910 年亚里士多德观察到扇形贻贝的固定物由一束粗壮的纤维组成,其末端有黏性。对基底细胞黏附分子的研究始于 Brown(1952),他发现贻贝出色的黏附能力与含有 DOPA(3,4-二羟基苯丙氨酸)的蛋白质有关<sup>[5]</sup>。沙堡蠕虫分泌的“胶水”是三种高度极性蛋白质的交联混合物,该混合物类似于贻贝的基底黏接剂,也含有 DOPA<sup>[6]</sup>。Hofman 等<sup>[7]</sup>指出腺体分泌的黏附材料中除镁、钙外,还有铁、锰、锌,这些离子与 DOPA 配位引起络合,从而促进固化过程。以上研究表明,在固化黏接过程中,DOPA 中的邻苯二酚基团与其他基团通过氢键、 $\pi$ - $\pi$  作用键等方式结合,从而获得内聚力,这在固化过程中起到了关键作用(邻苯二酚基团参与形成内聚力的机理见图 1)。

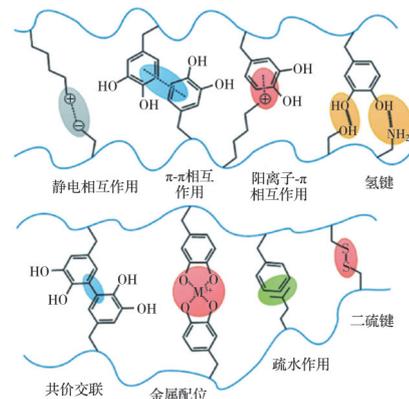


图 1 邻苯二酚基团参与形成内聚力机理<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Mechanism of catechol groups involved in cohesion formation<sup>[7]</sup>

由于在海洋物种的多组分黏附蛋白残基中发现了DOPA独特的工作机理,DOPA基团经常用于合成具有显著水下黏合韧性的功能性湿黏合剂。Jenkins等<sup>[8]</sup>用DOPA或类似分子制备了共聚物水下黏合剂,在某些情况下,可获得可观的批量黏接效果,其强度与商业胶水一样高。Ahn等<sup>[9]</sup>通过用邻苯二酚基团修饰带电两性表面活性剂合成了低分子量邻苯二酚两性离子分子,合成的mfp模拟两性

离子黏合剂表现出非常强的附着力,可达50 MJ/m<sup>2</sup>,并保持凝聚能力。科学家们从贻贝身上发现了一种珍珠质的生物材料,珍珠质连接的足丝十分特别,它能将珍珠质层固定在岩石上,以保护它免受海浪的冲刷<sup>[10]</sup>。Cao等<sup>[11]</sup>受此启发,将这种“足丝”应用在经过表面机械研磨处理的钢材上,其被称为“生物启发多级钢”(贻贝足丝和生物启发多级钢的类比图2)。

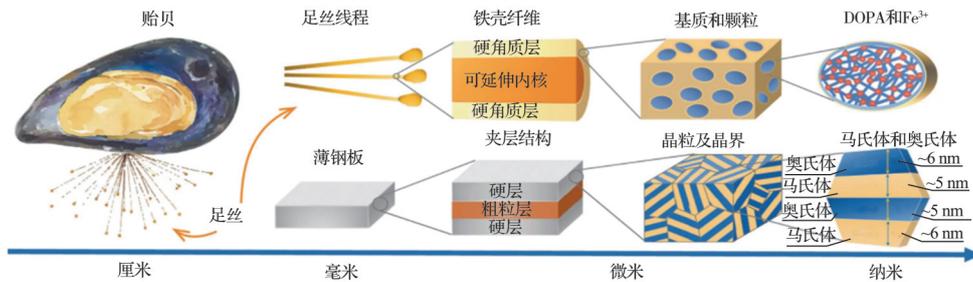


图 2 多级钢结构的整体结构:贻贝足丝与多级钢的夹层结构<sup>[11]</sup>

Fig. 2 Overall structure of multi-stage steel structure: Sandwich structure of mussel foot wire and multi-stage steel<sup>[11]</sup>

根据海洋生物特性研发的水下黏合剂能应用于土木工程中水下预制构件的拼装和组合,在以后的研究中还可以将水下黏合剂和混凝土相结合,研发出水下混凝土黏合剂。与传统混凝土相比,在抗洪抢险时水下混凝土黏合剂表现出一定的优越性。

1.2 细菌——自愈混凝土与增气减饱和

细菌是土壤中最常见的微生物,在地表附近,平均每千克土壤中含有10<sup>9</sup>~10<sup>12</sup>种细菌<sup>[12]</sup>。微生物学家利用某些细菌析出碳酸钙结晶,这一细菌成矿作用被称为微生物诱导碳酸钙沉积<sup>[13]</sup>(Microbial Induced Calcite Precipitation,简称MICP)。2001年,美国南达科塔矿业理工大学最早提出将MICP技术应用于混凝土裂缝修复中<sup>[14]</sup>,基于MICP的自愈混凝土修复的工作原理见图3。此后,荷兰代尔夫特理工大学的研究团队提出了一种基于细菌的自愈性混凝土<sup>[15]</sup>。

利用MICP技术向砂样中灌注菌液以及营养

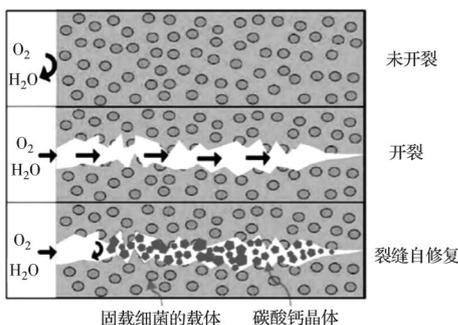


图 3 基于MICP的自愈混凝土的工作原理<sup>[16]</sup>

Fig. 3 Working principle of self-healing concrete based on MICP<sup>[16]</sup>

液,析出方解石结晶,能将松散砂颗粒胶结成整体。通过开展不同尺度的室内试验<sup>[13,17-20]</sup>发现,MICP技术能大幅度改善砂柱或砂基的强度、刚度,以及渗透性能。2010年,荷兰代尔夫特理工大学首次将MICP灌浆技术应用于现场砂砾土稳固工程中,取得了较好的效果<sup>[21]</sup>。厄瓜多尔灌溉衬砌的修复、马群和麒麟门地铁站的修复以及比利时地下室屋顶板的修复都采用了自愈混凝土,并成功避免了开裂的产生<sup>[22-24]</sup>(自愈混凝土浇筑的灌溉衬砌见图4)。徐晶等<sup>[25]</sup>通过测量混凝土的抗压强度恢复率对混凝土裂缝的修复进行研究,他们发现混有微生物芽孢的混凝土在经过1个月后裂缝被充填,且抗压强度有较大回升。通过细菌作用产生氮气减少饱和度可以用来提高土体的抗液化性能,He等<sup>[26]</sup>将反硝化作用产生气泡的砂土试样进行振动台试验,发现细菌诱导的增气减饱和能够有效提高土壤的抗液化能力。研究人员在厄瓜多尔地区通过对比试验发现:自愈混凝土修筑的衬砌比传统混凝土修筑的衬砌表现出来的性能更好,抗开裂能力更强,能在一



图 4 自愈混凝土浇筑的灌溉衬砌<sup>[22]</sup>

Fig. 4 Irrigation lining of self-healing concrete pouring<sup>[22]</sup>

一定程度上保持衬砌的完整性。

在实际工程中,混凝土结构常常受到交通荷载和风荷载等动荷载作用,因此,应开展动荷载作用下的试验来探究动荷载作用下自愈混凝土的修复技术。自愈混凝土目前还没有得到广泛应用的原因包括生产制备成本较高和自愈技术适用范围窄等,需要不断发展新的自愈技术,并朝着绿色环保、经济和适用性广的方向发展。

### 1.3 股骨——仿生愈合剂

股骨是人体的主要承重结构<sup>[27]</sup>,且股骨具有自我修复、自我愈合的特性。人体股骨的主要无机成分为羟基磷灰石,其具有生物相容性,安全性高,且羟基磷灰石具有促进干细胞成骨分化并因此加速骨再生过程的内在能力<sup>[28]</sup>。

在土木工程领域,Sangadji等<sup>[29]</sup>提出,当混凝土中产生裂缝时,注入骨仿生愈合剂,内部会产生羟基磷灰石结构,促使混凝土中出现的裂缝自我修复,羟基磷灰石在裂缝中的生成机理见图5。近年来,研究发现的具有较好的综合力学性能、韧性和良好的耐久性的超高性能混凝土等新型水泥基材料<sup>[31-32]</sup>就是利用骨仿生的原理,制备负载磷酸盐的水凝胶作为修复剂,并以此来形成自修复水泥基材料,该材料可以在发生裂缝处生成羟基磷灰石从而修复裂缝。刘志林<sup>[33]</sup>对模拟裂缝的修复效率表征实验表明,骨仿生自修复水泥基材料具有较好的裂缝修复效果(修复效果图见图6)。

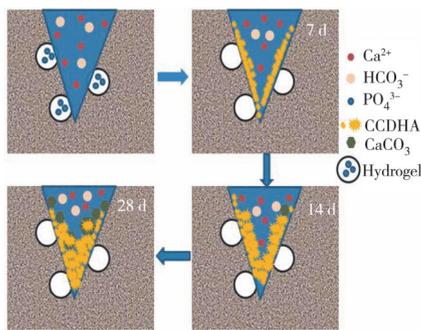


图5 羟基磷灰石在裂缝中的生成机理<sup>[30]</sup>

Fig. 5 Formation mechanism of hydroxyapatite in cracks<sup>[30]</sup>

自修复水泥基材料可以运用在土木工程中的路面工程、隧道工程以及堤坝工程等。关于羟基磷灰石在实际裂缝中生成的热力学动力学条件还未曾被讨论过,因此,可以在后续的研究中继续探究羟基磷灰石在水泥基裂缝中生成的热力学动力学条件。

由上述研究可以看出:为了适应环境,贻贝、沙堡蠕虫、细菌和人类股骨等生物体经历亿万年的演变和进化,形成了结构和功能近乎完美程度的天然

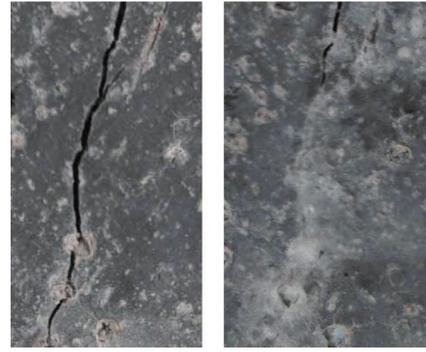


图6 自修复水泥基裂缝的修复效果图<sup>[33]</sup>

Fig. 6 Repair effect of self-repairing cement-based crack<sup>[33]</sup>

生物材料,而仿生材料正是受自然界生物启发,利用新颖的合成策略和源于自然的仿生原理设计出的合成有机、无机等杂化的结构材料和功能材料,研究人员将这些材料运用于土木工程之中,实现了对土木工程材料或结构性能的优化。

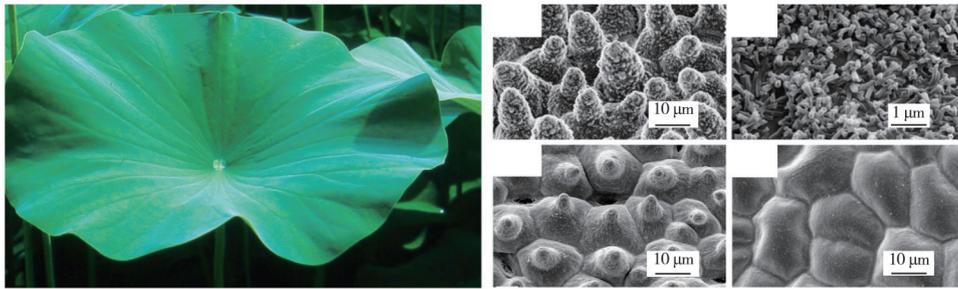
## 2 仿生结构

历经亿万年的演变和进化之后,自然界中生物的各项生理机能和材料组成都处于适应生存的模式,也因此造就了很多独一无二的性能和结构。很多生物都演化出了具有优异机械性能的器官,有些器官用于自身的防护,抵御天敌的捕杀,还有些器官作为武器攻击猎物,即拥有速度又兼具强度。这些独特的性能离不开生物组织中的特殊结构,例如,各类甲虫鞘翅中存在的螺旋“布里刚”结构和虾类螯肢中具有的分层结构等<sup>[34]</sup>。

### 2.1 荷叶——超疏水特性

荷叶叶面结构的超疏水以及自洁的特性就是“荷叶效应”,又名“疏水效应”。20世纪90年代,两位德国科学家Barthlott和Neihuis将“荷叶效应”归因于荷叶表面乳突的粗糙程度以及荷叶表皮薄膜分泌出的蜡质晶体,江雷<sup>[35]</sup>发现荷叶超疏水的根本原因是荷叶叶面存在非常复杂的多重纳米和微米级的超微结构。

荷叶表面结构的超疏水特性(见图7)具有极大的实际应用价值,促使人造超疏水材料的产生<sup>[37-39]</sup>。为了提高混凝土路面的抗冻性能,王志博等<sup>[40]</sup>基于荷叶叶面的超疏水特性,通过研究荷叶内部的微纳米结构成功研制出了新型的超疏水材料涂层,如超疏水混凝土(见图8)。为了避免大坝长期与水接触浸泡而发生的渗漏现象,李治军等<sup>[42]</sup>基于荷叶叶面的内部超微结构,对坝体表面进行了超疏水涂层设计。

图 7 荷叶表面形貌和扫描电子显微镜(SEM)图像<sup>[36]</sup>Fig. 7 Surface morphology and scanning electron microscope (SEM) images of lotus leaves<sup>[36]</sup>图 8 超疏水混凝土<sup>[41]</sup>Fig. 8 Superhydrophobic concrete<sup>[41]</sup>

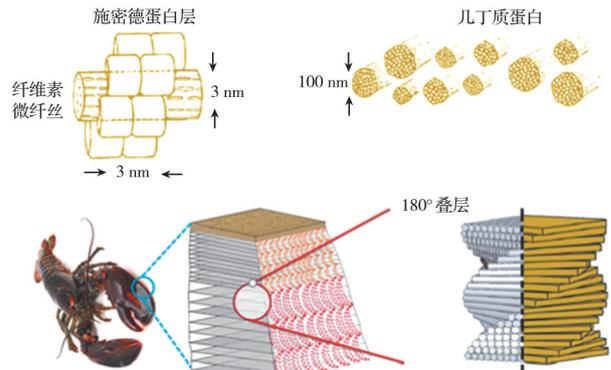
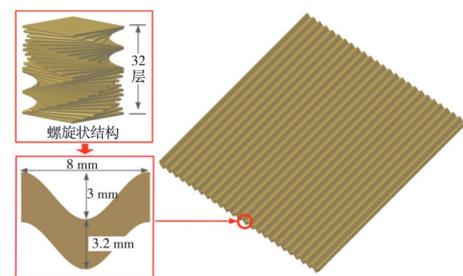
近年来,仿生超疏水材料逐步与石质文物保护相结合,因为它能在保护文物物理力学性质完整的同时,最大限度地维持文物的美学特征。现阶段仿生超疏水材料在实际工程中的运用还在初期探索阶段,今后应更多地借鉴自然界中不同生物的超疏水特性,深入挖掘其中的机理,以满足不同岩石类别和不同赋存环境下文物的使用需求。

## 2.2 龙虾壳——复合板、夹层板

虾的外骨骼强度高、抗冲击性能好,具有优良的力学性能。Bouligand<sup>[43]</sup>提出将龙虾的外骨骼称为螺旋结构(helicoidal structure)或者布利冈结构(Bouligand structure)。龙虾的外骨骼是由蛋白原纤维构成的螺旋立体结构,Moïni等<sup>[44]</sup>从宏观尺度研究了这种螺旋层状结构(见图9)的力学性能,指出螺旋层状堆叠的混凝土试件力学性能比简单层叠的有所提高。Han等<sup>[45]</sup>发现螳螂虾前螯的冲击区结构可近似看作双向正弦波结构。

虾外骨骼独特的螺旋复合结构是一种强质比高的优良结构。受螳螂虾的启发,研发了一种双向正弦波夹层板,Yang等<sup>[46]</sup>通过数值计算和室内实验相结合的方法,对比了3种夹层板的力学性能,发现双向正弦波夹层板具有优良的性质,能更充分发挥其承载力。Han等<sup>[45]</sup>在2020年研发了玄武岩纤维复合层压板(见图10),玄武岩纤维复合层压板即是利用玄武岩纤维这种优良的材料代替虾壳中的蛋白原纤维,制成人工合成的“虾外骨骼”,并将它作为建筑材料使用。

目前,虾外骨骼在土木工程领域中的应用主要

图 9 龙虾外骨骼微观结构图<sup>[44]</sup>Fig. 9 Microstructure of lobster exoskeleton<sup>[44]</sup>图 10 玄武岩纤维复合层压板<sup>[45]</sup>Fig. 10 Basalt fiber composite laminate<sup>[45]</sup>

集中在复合板材领域。新型复合板材还在科研阶段,与此相关的产业化制造、应用示范仍在起步阶段。如何改进生产工艺,建立生产线,实现这些新型板材的规模化生产和降低使用成本等仍是未来亟待解决的问题。

## 2.3 珍珠母——陶瓷增韧

自然界中许多生物材料往往具有精巧设计的非连续交错结构,且内部具有增强增韧相,使生物材料具有良好的抗冲击性<sup>[47]</sup>。贝壳珍珠母作为仿生材料设计研究中的热点,具有“砖-泥”形式的微观结构(见图11),具有比文石高得多的断裂韧性,同时可以吸收能量<sup>[48]</sup>。Currey<sup>[49]</sup>对珍珠母的力学性能进行测试,发现文石片层的几何形状和规则的排列是珍珠母在力学性能和能量吸收方面不断进化和优化的结果。Jackson等<sup>[50]</sup>指出水分可以降低有机质基体的剪切模量和抗剪强度来影响珍珠母的弹性

模量和拉伸强度。Menig 等<sup>[51]</sup>将鲍鱼贝壳珍珠母制成立方体试样进行强度测试,周武<sup>[52]</sup>对珍珠的表面和截面分别进行了纳米压痕实验。

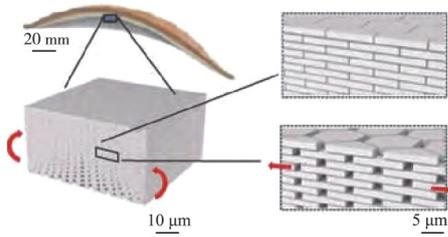


图 11 贝壳珍珠层微观结构<sup>[47]</sup>

Fig. 11 Microstructure of shell nacre<sup>[47]</sup>

珍珠母中的文石片和有机质构成了“砖-泥”结构,其中有机质的存在增强了珍珠母的韧性<sup>[53]</sup>。Sun 等<sup>[54]</sup>用建筑陶瓷镶嵌瓦和软胶黏剂分别模拟硬质文石片和珍珠母中的有机物,并通过落锤试验证明了该陶瓷复合材料的抗冲击性能显著优于简单层状陶瓷复合材料。水泥基复合材料(见图 12)也可参考珍珠母结构,采用混凝土或砂浆设计成层状交错结构,这种复合材料可用作混凝土抵抗冲击荷载的保护层<sup>[54]</sup>。Walther 等<sup>[55-56]</sup>通过真空抽滤辅助组装方法得到了一种规则的层状复合材料,其厚度可以达到 500 nm 以上。



图 12 水泥基复合材料<sup>[54]</sup>

Fig. 12 Cement-based composites<sup>[54]</sup>

贝壳珍珠母的增强增韧机制为土木工程领域,尤其是土木工程结构领域的研究与发展提供了新的思路和新的方法。影响仿生贝壳材料大规模使用和推广的关键因素在于制备技术的不成熟,因此,研究更加精准的试验方法和更加易于操作、能宏观量化的技术是当务之急。

#### 2.4 蜻蜓——薄壁空间结构

蜻蜓翅膀的表面形态、结构和材料等多个因素耦合作用的结果与力学特性息息相关<sup>[57]</sup>。蜻蜓翅膜紧紧包裹着翅脉(见图 13),这种包裹方式能有效减少振翅过程中产生裂纹,对蜻蜓抗疲劳特性起到了一定作用<sup>[58]</sup>。史晓君<sup>[59]</sup>研究了蜻蜓翅膀网格结构对刚度的影响,确定蜻蜓翅膀空间结构的合理性。为了研究蜻蜓翅膀的力学性能,李秀娟<sup>[60]</sup>基于不同形态的网格建立了不同的仿生模型并分析研究。

若在空间结构中采用这种新型结构体系,按一定规律组合网格,则能起到优化结构的作用。受蜻

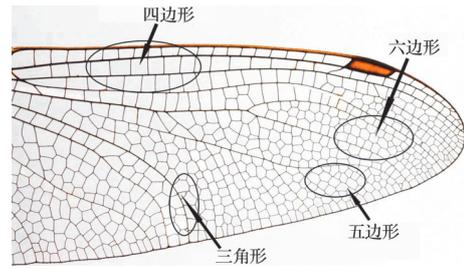


图 13 翅脉网格图

Fig. 13 Vein grid

蜓翅膀的启发,田嘉萌<sup>[61]</sup>在设计新型薄壁空间结构体系实验中,借鉴蜻蜓翅膀的网格分布对网格进行了优化设计,结果表明,优化后的网格能有效提高结构受力性能。蜻蜓翅膀的结构具有良好的刚度和稳定性,而这种优良的结构性能主要归功于翅脉、翅膜的合理分布以及协同工作。史晓君<sup>[59]</sup>把蜻蜓翅膀的结构优越性应用到温室结构设计(见图 14),建立了几种温室的仿生空间结构。Wang 等<sup>[62]</sup>基于蜻蜓翅膀结构的壁面粗糙度,设计了一种新型仿生矩形微通道(BRM)。

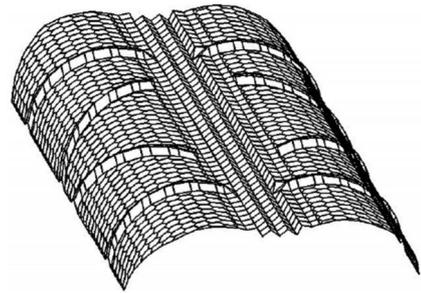


图 14 温室仿生结构模型图<sup>[59]</sup>

Fig. 14 Model of greenhouse bionic structure<sup>[59]</sup>

随着现代设计和智能建造技术的进步,工程师们可以根据蜻蜓的活动特性设计出可展开、可活动的蜻蜓翅膀仿生结构。为了使设计的结构达到功能仿生的目的,工程师们应该让这种仿生结构朝着能够根据外界环境做出“自适应”“自调节”的方向发展。

#### 2.5 蛇皮——蛇皮桩

蛇的鳞片中最重要且最具研究价值的是腹鳞。腹鳞具有超微结构和摩擦各向异性<sup>[63]</sup>,这种超微结构通过减少蛇与地面间的接触面积,减少黏附力和降低摩擦阻力,除此之外,还能增加鳞片的强度。Martinez 等<sup>[64]</sup>对 3D 扫描的鳞片进行 3D 打印并进行界面直剪试验发现,不同尺寸、方向的鳞片导致的直剪试验结果存在显著差异。Hu 等<sup>[65]</sup>发现覆盖在蛇身上的腹鳞片在摩擦系数上表现出较大的各向异性。Stutz 等<sup>[63]</sup>研究了如何从蛇的鳞片中获得灵感建造地基,并基于此提出建造一种形状类似于蛇底的鳞片,并能显著提高竖向承载力的桩基——蛇

皮桩。

由于蛇身鳞片的特殊结构(蛇腹鳞表面的超微结构图见图 15)和功能在运动方式方面的优势,蛇皮仿生思想被广泛应用于各个领域,如蛇形机器人、蛇皮鞋底和仿生蛇皮传感器等<sup>[67]</sup>。Zhong 等<sup>[68]</sup>在此基础上对蛇皮桩的结构和各项特性进行数值模拟深入研究,结果显示蛇皮桩显著提高了桩体的竖向承载力,有效解决了土体位移问题(蛇皮仿生桩的概念图见图 16)。

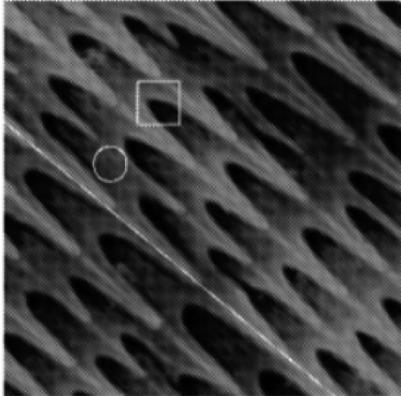


图 15 蛇腹鳞表面的超微结构图<sup>[66]</sup>

Fig. 15 Ultrastructure of snake ventral scale surface<sup>[66]</sup>

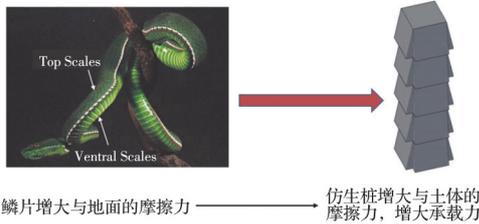


图 16 蛇皮仿生桩的概念图<sup>[68]</sup>

Fig. 16 Concept map of snake skin bionic pile<sup>[68]</sup>

对蛇皮纹理的研究将会成为土木工程师未来研究的重点,因为蛇在运动过程中,蛇皮上的定向纹理会产生各向异性的摩擦特性,而在工程应用中,如何控制两个接触面之间的摩擦是一个常见的挑战。

由上述研究发现:荷叶、龙虾壳、珍珠母、蜻蜓和蛇皮等具有独特的优势结构,土木工程仿生正是基于这种自然界中生物具备的各种优越性,并以此作为研究对象进行合理模拟分析组合,从而得到具有较大发展空间的结构,如:蛇皮桩、复合层压板、水泥基复合材料等。

### 3 仿生机械与构筑物

经过亿万年的进化,自然界中的动、植物材料构成与结构功能都已达到了近乎完美的程度。也因为组成生物体的材料和结构相辅相成,其从宏观上表现出优异的性能,学者们将这种宏观的行为成

功运用于土木工程建设之中,取得了较好的成果,如模仿恐龙外形的“拱形结构”,模仿贝壳、乌龟壳、海螺壳等的“薄壳结构”,模仿车前子叶子排列的“螺旋状结构”等。

#### 3.1 蛭子——钻孔设备

蛭子的生存环境是泥沙,它们依靠足的挖掘,将身体全部埋入泥沙中。Stanley<sup>[69-70]</sup>和 Winter 等<sup>[71]</sup>重现了蛭子钻孔过程并研究了其摇摆运动特征。Winter 等<sup>[72]</sup>通过观察大西洋刀蛭(*E. directus*)的钻孔过程,对其流化作用进行了详细的研究。为了更好地研究蛭子的钻孔掘进行为,Tao 等<sup>[73]</sup>观察到大西洋蛭子向上挖洞策略与向下挖洞策略的不同,向上过程主要包括足部周期性的伸展和缩回,而向下过程则复杂得多,其钻洞步态包括壳扩张、足部伸展、足部收缩、足部扩张等。Wei 等<sup>[74]</sup>通过蛭子内收肌与足部变化描述了蛭子钻孔掘进的过程(见图 17)。

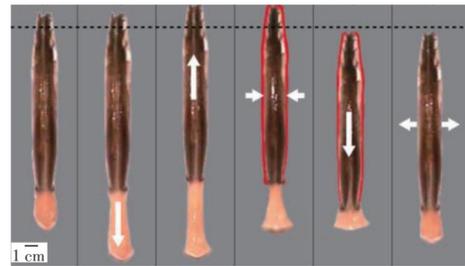


图 17 蛭子的钻孔掘进过程<sup>[74]</sup>

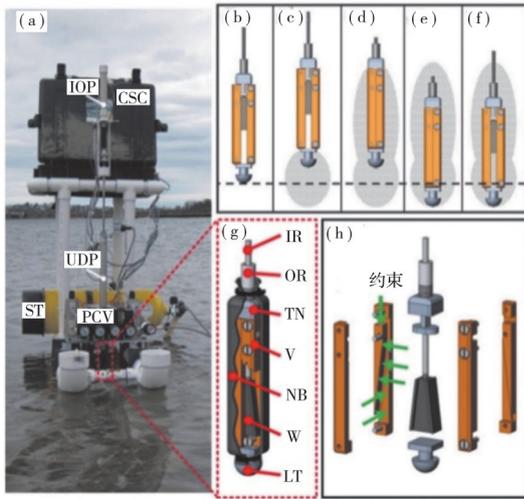
Fig. 17 Drilling process of razor clam<sup>[74]</sup>

蛭子在钻孔过程中会从空腔排水,促使蛭子足部周围的沉积物流化,并在其周围产生流化区<sup>[71]</sup>。Winter 等<sup>[72]</sup>通过测量穴居直腹直肠虫周围的土体变形发现,这种动物通过收缩其阀门来减少阻力,使其周围的基质流化。根据蛭子的流化作用开发出一种水下挖掘机 Roboclam(见图 18)。Roboclam 实现了可与动物相媲美的局部流态化挖洞性能,具有类似线性的能量-深度关系。Tao 等<sup>[73]</sup>以蛭子的双锚原理为研究灵感,研发了一款钻孔机器人 SBOR。

仿生钻孔机器人的研发是涉及多学科融合和协同创新的系统工程,需瞄准世界科技前沿,紧跟新一代信息技术发展趋势,强化顶层设计,充分借鉴钻探领域的成熟经验,持续深入推进数字化、网络化、智能化技术与生物、材料、机械与控制领域技术的结合,突破智能化钻探技术装备研发的技术瓶颈。

#### 3.2 船蛆——盾构机

船蛆(见图 19)是一种软体动物,穴居在帆船的木板中。通过细致观察可发现船蛆利用其前端“木



注:(a)为Roboclam在大西洋刀蛭栖息地挖洞;(b)~(f)为掘进过程示意图;(g)为末端执行器结构剖视图;(h)为末端执行器部件分解图。

图 18 Roboclam<sup>[72]</sup>

Fig. 18 Roboclam<sup>[72]</sup>

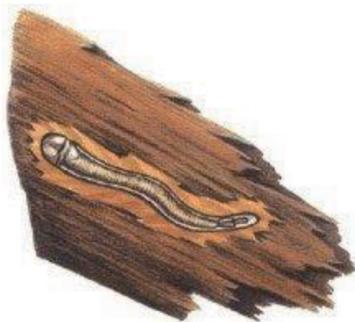


图 19 船蛆

Fig. 19 Boat maggots

锉”反复旋转摩擦,把木材锉下,凿穴而居<sup>[75]</sup>。它使用头部前段的贝壳,每分钟旋转8~12次,借助壳面上的锉状脊,将木材锉下,木屑又继而作为其食料,身体排异分泌石灰质并将其衬于穴道内壁,用于抵抗木板膨胀和保护自己。18世纪末,法国工程师布鲁内尔基于船蛆的钻洞行为,提出了开放型手掘盾构的原型。布鲁内尔与其子完善了盾构结构的机械系统,设计采用了全断面螺旋式开挖的封闭式盾壳。

中国盾构机的研发和应用起步于1953年(盾构机实物图见图20)。1962年上海市城建局隧道工程

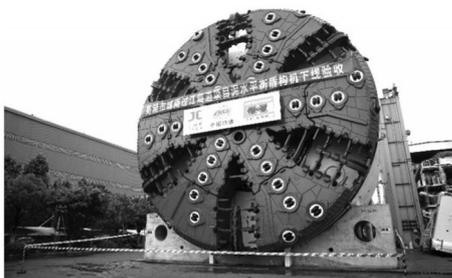


图 20 盾构机实物图<sup>[76]</sup>

Fig. 20 Physical drawing of shield machine<sup>[76]</sup>

有限公司开发了我国首台手挖敞开式盾构机。1973年上海金山石化厂利用网格挤压式盾构机修建了1条污水隧道和2条引水隧道。1986年,中国铁路隧道集团公司开始研制半断面盾构机,并成功用于北京地铁复兴门折返线。

中国盾构机的设计能力正在逐步提升,但刀盘的生产制造主要是借鉴其他国家提供的数据参数,因此,继续寻找相对应的生物并通过仿生制造来提高刀盘及刀具系统的性能是当下的一个重要任务,也是实现中国在盾构机设计从跟跑、并跑到领跑的关键支撑。

### 3.3 龟壳——壳体结构

龟壳是具有良好力学性能的多尺度天然生物复合结构<sup>[77]</sup>。Alibardi等<sup>[78]</sup>从生物物理学方向探讨了龟壳在水中的疏水能力以及防浸润特性,解释了流线型外壳的游动优势。Ampaw等<sup>[79]</sup>使用从金龟龟壳中提取的样本进行压缩试验,揭示了龟壳微观构造优异的抗外界冲击动能的特性。靳宏博等<sup>[77]</sup>通过CT扫描观察发现,龟壳微结构横截面的典型三层结构类似三明治(见图21)。

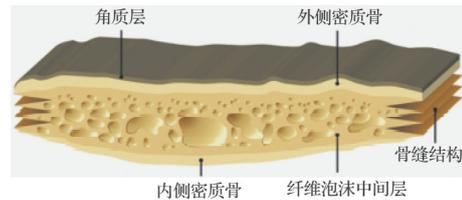


图 21 三明治夹心结构<sup>[77]</sup>

Fig. 21 Sandwich structure<sup>[77]</sup>

谷翠云<sup>[80]</sup>对龟壳进行拉伸和弯曲实验,并进行强度分析。Zhang等<sup>[81]</sup>利用有限元数值模拟方法分析了龟壳低空跌落的撞击情况。Achrai等<sup>[82]</sup>通过实验发现,在冲击荷载作用下,有骨缝的龟壳甲片比无骨缝的甲片吸收更多的冲击能量。杨爽等<sup>[83]</sup>对龟壳的角质层材料进行分析发现,这些薄片成分主要是 $\alpha$ -蛋白质和 $\beta$ -蛋白质。Han等<sup>[84]</sup>受龟壳的三明治泡沫夹芯结构启发,制备了两侧密度高、中间密度低的复合式梯度泡沫铝结构材料(见图22)。侯居光<sup>[85]</sup>根据CT扫描和3D打印,系统分析了龟壳的抗

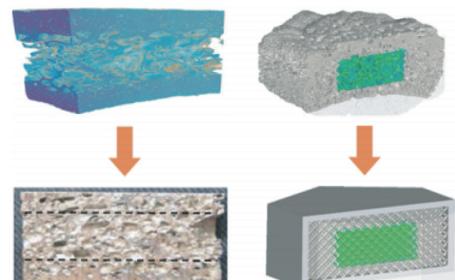


图 22 复合式梯度泡沫铝结构<sup>[84]</sup>

Fig. 22 Composite gradient aluminum foam structure<sup>[84]</sup>

压性能,并开展了仿生龟壳的拱桥优化设计。此外,龟壳壳体结构具有薄壁和张力大的特点。中国国家大剧院(见图 23)作为地标建筑在国际上享有盛誉,这种向上拱起的椭圆形壳体与龟壳结构极为类似,表面拼接而成的钛金属片与龟壳表面由接缝组织连接的盾片有异曲同工之妙。



图 23 中国国家大剧院

Fig.23 National Grand Theatre of China

除了对结构的仿生设计,基于龟壳的建筑材料仿生设计也是一个重要发展趋势。基于龟壳甲片的多尺度构造形式和复合材料分布特点等进行创新仿生设计,能得到更加轻质高性能的材料和结构。在未来,龟壳仿生材料将更趋于绿色和天然,实现循环利用,为可持续发展和“双碳”战略的实施推进贡献力量。

### 3.4 竹子——超高层建筑

竹子具有轻质高强等优异的力学性能,经过长期的自然进化,竹子从宏观到微观均形成了不同尺度的分级结构<sup>[86]</sup>(见图 24)。邵卓平等<sup>[87]</sup>开展了拉伸、弯曲等室内试验,比较了竹节与节间材的强度差异。Abdul Khalil 等<sup>[88]</sup>通过 SEM 和 TEM 手段,研究了竹纤维的微观结构。尚新龙等<sup>[89]</sup>研究了竹子维管束的纤维含量分布情况。吴鹏<sup>[90]</sup>总结了竹子弯矩和截面模量沿轴向的变化趋势。王希慧等<sup>[91]</sup>通过对多组具有代表性的竹子结构几何参数进行实测与文献对比,得出竹身直径、壁厚和竹节间距的平均值沿高度方向的变化特征。

随着科技进步和施工技术的提高,竹子仿生建筑应运而生。台北 101 大楼(见图 25)采用了分节设

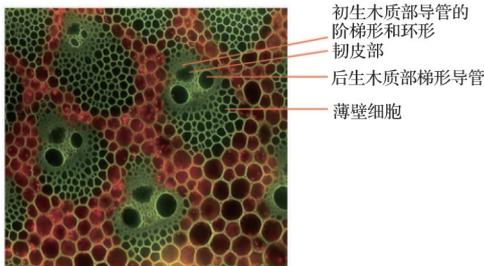


图 24 竹壁微观结构图<sup>[86]</sup>

Fig. 24 Microstructure of bamboo wall<sup>[86]</sup>

计的思路,这一设计思路来源于竹子,竹子因竹节的构造使其抵抗横向剪切的能力增强。西尔斯大厦一度是世界上最高的办公楼,大厦结构工程师为解决关键性抗风结构问题,提出了束筒结构体系的概念,方形空心筒与竹子的空心构造有异曲同工之妙,达到了“轻量化”的效果。基于竹子直径、壁厚、竹节间距的变化规律,设计师将竹子的这些特性应用到了中国国际贸易中心的结构设计中,以达到“轻质高强”的目的<sup>[92-93]</sup>。基于竹子的优异力学性能,学者们还提出了高耸薄壁脱硫塔结构(见图 26)<sup>[91]</sup>和筒式立体停车结构<sup>[94]</sup>。



图 25 台北 101 大楼

Fig. 25 Taipei 101 Building

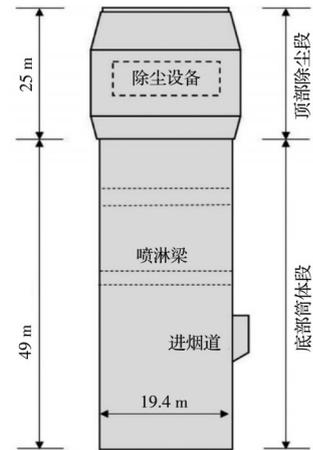


图 26 高耸薄壁脱硫塔结构示意图<sup>[91]</sup>

Fig. 26 Structure diagram of high-rise thin-wall desulfurization tower<sup>[91]</sup>

竹子在土木工程中的潜在利用价值非常大,更好地分析竹子的力学特性,有助于“仿竹”结构的应用,特别是在高层建筑中,这既能缓解土地紧缺的压力,也更有助于提高建筑物抵抗风载、地震等不良因素的性能。

### 3.5 蚁巢——蚁巢仿生建筑

白蚁建造的巢穴能高达几米,不仅功能复杂,

而且非常牢固,冬暖夏凉<sup>[95]</sup>。蚁巢为非线性空间(见图 27),其空间布局和功能都得到了完美体现。蚂蚁常常使用泥土和自己身体分泌物的混合泥浆来加固地下通道和洞穴的侧壁。成熟的蚁巢由腔室、菌圃、蚁路、王室、候飞室和分飞孔 6 部分组成<sup>[96]</sup>。

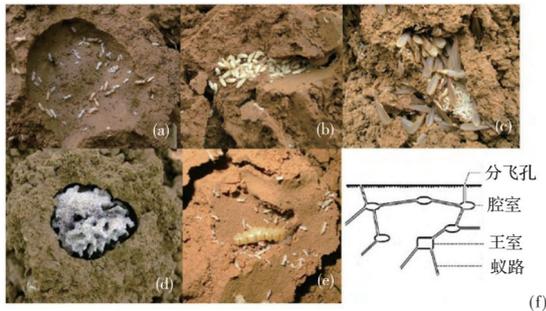


图 27 白蚁巢结构组成及结构示意图<sup>[96]</sup>

Fig. 27 Composition and structure of termite nest<sup>[96]</sup>

通风系统的优化是一个非常复杂的网络优化问题<sup>[97]</sup>,而基蚁巢空间原理提出的蚁群算法可以很好地解决这个问题。蚁群算法不仅适用于新矿井通风系统的优化,也适用于旧矿井通风系统的改进。白蚁巢穴主要有通风和散热两个特性,与烟囱效应相似,津巴布韦的东门中心运用了白蚁巢穴的机理<sup>[98]</sup>,其通风原理见图 28。蚁巢对于温度的调节能力引起众多建筑师的注意,英国伦敦的绍特设计事务所模仿蚁巢进行了马耳他啤酒厂的设计,而美籍华裔建筑师崔悦君也深受启发,提出了“终极塔楼”的建筑构想。

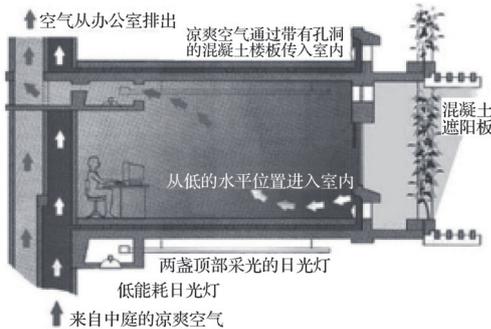


图 28 津巴布韦东门中心通风原理<sup>[98]</sup>

Fig. 28 Ventilation principle of Zimbabwe East Gate Center<sup>[98]</sup>

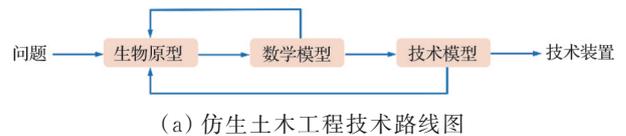
基于白蚁巢穴行为仿生提出的高层建筑构想依旧存在一些问题,如底层和高层温差较大。未来研究中,可继续运用仿生设计理念和计算机技术去探索这些问题的解决方案。

通过上述研究可以发现:蛭子、船蛆、龟壳、竹子和蚁巢等生物具有优良的结构性能,研究学者将这种性能运用于土木工程建设中,发明出了高效的仿生机械并使得建筑物和构筑物朝“轻质高强”和

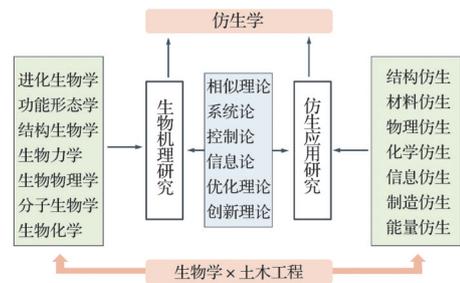
“绿色环保”的方向发展。

### 4 研究步骤

开展仿生土木工程研究的重要环节是依据原型建立各种“模型”。首先要对生物体的某种结构与功能进行仔细观察和研究,合理简化,建立生物模型;对生物模型进行分析、综合、抽象,转化成可量化及易于评价的数学模型;根据数学模型或直接根据生物模型,应用各种技术手段,经过反复实验、改进,建立工程技术模型,最终实现技术装置研发与应用,技术路线如图 29(a)所示,具体包括 4 个步骤:功能分析、相似评价、进化设计和模型试验。



(a) 仿生土木工程技术路线图



(b) 学科交叉图

图 29 仿生土木工程技术路线与学科交叉

Fig. 29 Bionic civil engineering technology route and interdisciplinary

### 5 结论

对仿生与土木工程的联系进行梳理,主要从仿生材料、仿生结构和仿生机械与构筑物 3 个方面阐述了仿生学在土木工程中的应用,并结合每一种生物突出的相关特性及原理,列举了与之匹配的典型应用案例。主要结论如下:

1) 为了适应环境,贻贝、沙堡蠕虫、细菌和人类股骨等生物体经历亿万年的演变和进化形成了结构和功能近乎完美的天然生物材料,研究人员将这种材料运用于土木工程中,分别研制出了生物启发多级钢、自愈混凝土材料、仿生愈合剂等,从而实现了土木工程材料的优化。

2) 荷叶、龙虾壳、珍珠母、蜻蜓和蛇皮等生物具有独特的优势结构,仿生结构正是基于这种自然界中生物所具备的各种优越性,并以此作为研究对象进行合理地分析与模拟,从而得到具有较大发展空间的结构,如超疏水混凝土、复合层压板、水泥基复合材料、蛇皮桩等等。

3) 蛭子、船蛆、龟壳、竹子和蚁巢等生物具有优良的结构性能,学者们不仅模仿这些生物的外在特征,还会模仿非生命体的很多物质,如数学曲线和物质的内在规律等,最终发明了高效的仿生机械并且使得建筑物和构筑物朝“轻质高强”和“绿色环保”的方向发展,如:仿生钻孔机器人、盾构机、台北101大楼、津巴布韦的东门中心和中国国家大剧院的设计。

## 6 展望

仿生土木工程是从自然界生物中汲取其优异的宏微细观结构及轻质高强等力学性能,通过计算机或数字技术处理后建立土木工程与生物体之间的关联关系,最终运用于土木工程低碳环保、绿色化、智能化提升的一门新兴交叉学科。随着新时代对土木工程技术要求的不断提高和仿生技术的日臻完善,仿生土木工程的未来发展将会越来越趋向创新化、综合化、复杂化和智能化。目前的仿生主要集中在结构仿生、功能仿生、材料仿生和形态仿生4个方面,而对微观仿生的研究与应用还比较少,因此,应当加强对生物微观结构的研究并将其运用于土木工程的建设之中。同时,仿生土木工程还需要进一步同生物、材料、机械、控制等多领域多学科交叉,共同推动仿生土木工程的发展。

土木工程师既可以独立对生物某一方面或某一个因素进行单元仿生,也可以同时模拟生物的多个方面或者多个要素进行多元耦合(协同)仿生,如蚯蚓在土壤中穿行时,将自身和环境一切有利于脱附减阻的因素(构形、形态、材料、柔性、电渗、润滑、蠕动等)充分调动、有机耦合、相互协调,以此来高效完成脱附减阻功能。蚯蚓钻土展示的耦合仿生是模仿生物多因素相互耦合、协同作用的仿生,比单元仿生优越,是更接近生物实际的仿生,是从概念、理论、内容到方法上的全新的仿生,有望解决传统单元仿生难以有效或者高效解决的问题。耦合仿生在土木工程领域的研究亟待开展。

### 参考文献

- [1] BHUSHAN B. Biomimetics: Lessons from nature: An overview [J]. Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2009, 367(1893): 1445-1486.
- [2] 刘合, 杨清海, 裴晓含, 等. 石油工程仿生学应用现状及展望[J]. 石油学报, 2016, 37(2): 273-279.  
LIU H, YANG Q H, PEI X H, et al. Current status and development prospect of petroleum engineering bionics [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(2): 273-279.
- (in Chinese)
- [3] 陈志华, 张倩. 仿生结构研究综述[C]//第十二届全国现代结构工程学术研讨会暨第二届全国索结构技术交流会, 北京, 2012.  
CHEN Z H, ZHANG Q. Review on bionic structure research [C]//The 12th National Symposium on Modern Structural Engineering and the Second National Cable Structure Technology Exchange Conference, Beijing, 2012. (in Chinese)
- [4] 郭帅帅, 封文江, 朱影, 等. 仿生材料研究综述[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2015, 33(2): 160-163.  
GUO S S, FENG W J, ZHU Y, et al. Review on biomimetic materials [J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2015, 33(2): 160-163. (in Chinese)
- [5] WAITE J H. Adhesion a la moule [J]. Integrative and Comparative Biology, 2002, 42(6): 1172-1180.
- [6] ZHAO H, SUN C J, STEWART R J, et al. Cement proteins of the tube-building polychaete *Phragmatopoma californica* [J]. Journal of Biological Chemistry, 2005, 280(52): 42938-42944.
- [7] HOFMAN A H, VAN HEES I A, YANG J, et al. Bioinspired underwater adhesives by using the supramolecular toolbox [J]. Advanced Materials, 2018, 30(19): e1704640.
- [8] JENKINS C L, MEREDITH H J, WILKER J J. Molecular weight effects upon the adhesive bonding of a mussel mimetic polymer [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(11): 5091-5096.
- [9] AHN B K, DAS S, LINSTADT R, et al. High-performance mussel-inspired adhesives of reduced complexity [J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 1-7.
- [10] RITCHIE R O. The conflicts between strength and toughness [J]. Nature Materials, 2011, 10(11): 817-822.
- [11] CAO S C, LIU J B, ZHU L L, et al. Nature-inspired hierarchical steels [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-7.
- [12] MITCHELL J K, SANTAMARINA J C. Biological considerations in geotechnical engineering [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(10): 1222-1233.
- [13] DEJONG J T, FRITZGES M B, NÜSSLEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(11): 1381-1392.
- [14] RAMACHANDRAN S K, RAMAKRISHNAN V, BANG S S. Remediation of concrete using microorganisms [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(1): 3-9.
- [15] JONKERS H M, SCHLANGEN E. Crack repair by concrete-immobilized bacteria [C]//Proceedings of the First International Conference on Self Healing

- Materials, 2007.
- [16] 李珠, 冯涛, 周梦君, 等. 基于科式芽孢杆菌矿化沉积的混凝土裂缝自修复性能试验研究[J]. 混凝土, 2017(6): 5-8.  
LI Z, FENG T, ZHOU M J, et al. Experimental study on self-healing performance of concrete cracks based on mineralization of *Bacillus cohnii* [J]. Concrete, 2017(6): 5-8. (in Chinese)
- [17] DEJONG J T, SOGA K, BANWART S A, et al. Soil engineering in vivo: Harnessing natural biogeochemical systems for sustainable, multi-functional engineering solutions [J]. Journal of the Royal Society Interface, 2011, 8(54): 1-15.
- [18] WHIFFIN V S, VAN PAASSEN L A, HARKES M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique [J]. Geomicrobiology Journal, 2007, 24(5): 417-423.
- [19] VAN PAASSEN L, HARKES M P, VAN ZWIETEN G, et al. Scale up of BioGrout: A biological ground reinforcement method [C]//17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, 2009.
- [20] LI B. Geotechnical properties of biocement treated sand and clay [D]. Nanyang Technological University, 2015.
- [21] DEJONG J T, SOGA K, KAVAZANJIAN E, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: Progress, opportunities and challenges [J]. Geotechnique, 2013, 63(4): 287-301.
- [22] BELTRAN M G, JONKERS H, MORS R, et al. Field application of self-healing concrete with natural fibres as linings for irrigation canals in Ecuador [J]. Doklady Earth Sciences, 2015, 426(1): 665-668.
- [23] QIAN C X, ZHENG T W, ZHANG X, et al. Application of microbial self-healing concrete: Case study [J]. Construction and Building Materials, 2021, 290: 123226.
- [24] VAN MULLEM T, GRUYAERT E, CASPEELE R, et al. First large scale application with self-healing concrete in Belgium: Analysis of the laboratory control tests [J]. Materials, 2020, 13(4): 997.
- [25] 徐晶, 王彬彬. 陶粒负载微生物的混凝土开裂自修复研究[J]. 材料导报, 2017, 31(14): 127-131.  
XU J, WANG B B. Research on self-healing of concrete cracks by ceramsite immobilized microorganism [J]. Materials Review, 2017, 31(14): 127-131. (in Chinese)
- [26] HE J, CHU J, IVANOV V. Mitigation of liquefaction of saturated sand using biogas [J]. Geotechnique, 2013, 63: 267-275.
- [27] 王兆宜, 尹大刚, 祝文静, 等. 骨的多级结构及其仿生研究[J]. 价值工程, 2018, 37(26): 161-162.  
WANG Z Y, YIN D G, ZHU W J, et al. Investigations of hierarchical structure and bionic of bone [J]. Value Engineering, 2018, 37(26): 161-162. (in Chinese)
- [28] 李筱媛. 羟基磷灰石在骨修复过程中降解-扩散-重构行为的可视化观察[D]. 济南: 山东大学, 2020.  
LI X Y. Visual observation of degradation-diffusion-reconstruction behavior of hydroxyapatite in bone repair process [D]. Jinan: Shandong University, 2020. (in Chinese)
- [29] SANGADJI S, SCHLANGEN E. Mimicking bone healing process to self repair concrete structure novel approach using porous network concrete[J]. Procedia Engineering, 2013, 54: 315-326.
- [30] 李秋, 陈万煜, 陈伟, 等. 骨仿生自修复水泥基材料设计、制备与性能研究[C]//中国硅酸盐学会水泥分会第七届学术年会论文摘要集, 2018.  
LI Q, CHEN W Y, CHEN W, et al. Design, preparation and properties of cement-based material for bone biomimetic self-healing [C]//Abstract collection of the 7th Annual Academic Meeting of Cement Branch of Chinese Silicate Society, 2018. (in Chinese).
- [31] 王军洁, 王凯星, 秦亚洲, 等. 水泥基复合材料修复和加固既有混凝土构件界面粘结性能研究进展[J]. 中国水运, 2020, 20(6): 256-258.  
WANG J J, WANG K X, QIN Y Z, et al. Research progress on interfacial bonding properties of cement-based composite materials for repairing and strengthening existing concrete members [J]. China Water Transport, 2020, 20(6): 256-258. (in Chinese)
- [32] BRÜHWILER E, DENARIÉ E. Rehabilitation and strengthening of concrete structures using ultra-high performance fibre reinforced concrete [J]. Structural Engineering International, 2013, 23(4): 450-457.
- [33] 刘志林. 骨仿生自修复水泥基材料的设计制备与研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.  
LIU Z L. Design, preparation and research of bone bionic self-repairing cement-based materials [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [34] 石绍迁. 结构仿生玄武岩纤维增强复合材料抗冲击性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.  
SHI S Q. Study on impact resistance of structural bionic basalt fiber reinforced composites [D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)
- [35] 江雷. 从自然到仿生的超疏水纳米界面材料[J]. 化工进展, 2003(12): 1258-1264.  
JIANG L. Nanostructured materials with superhydrophobic surface—From nature to biomimesis [J]. Chemical Industry Progress, 2003(12): 1258-1264. (in Chinese)
- [36] 张拓, 阮军. 荷叶疏水机理与仿乳突固体颗粒在超疏水涂层中的应用研究进展[J]. 涂料工业, 2019, 49(7): 81-87.

- ZHANG T, RUAN J. Research progress in hydrophobic mechanism of lotus leaf and application of mastoid-like solid particles in superhydrophobic coatings [J]. *Paint & Coatings Industry*, 2019, 49(7): 81-87. (in Chinese)
- [37] NOSONOVSKY M, BHUSHAN B. Roughness-induced superhydrophobicity: A way to design non-adhesive surfaces [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2008, 20(22): 225009.
- [38] KIM D, KIM J, PARK H C, et al. A superhydrophobic dual-scale engineered lotus leaf [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2008, 18(1): 015019.
- [39] CHEN W, FADEEV A Y, HSIEH M C, et al. Ultrahydrophobic and ultralyophobic surfaces: Some comments and examples [J]. *Langmuir*, 1999, 15(10): 3395-3399.
- [40] 王志博, 牛志强. 超疏水材料涂层对混凝土抗冻性能的影响[J]. *新型建筑材料*, 2017, 44(2): 107-110.  
WANG Z B, NIU Z Q. Effect of super hydrophobic material coating on frost resistance of concrete [J]. *New Building Materials*, 2017, 44(2): 107-110. (in Chinese)
- [41] 高英力, 李学坤, 黄亮, 等. 超疏水仿生水泥路面防覆冰设计及模型试验[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(10): 3288-3294.  
GAO Y L, LI X K, HUANG L, et al. Anti-icing design and model test of super hydrophobic and bionic cement pavement [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(10): 3288-3294. (in Chinese)
- [42] 李治军, 董智, 陈末, 等. 仿生超疏水材料在寒区土石坝防渗的应用前景与展望[J]. *水利科学与寒区工程*, 2019, 2(4): 44-47.  
LI Z J, DONG Z, CHEN M, et al. Application prospect of bionic super-hydrophobic materials in seepage prevention of earth-rock dams in cold regions [J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2019, 2(4): 44-47. (in Chinese)
- [43] BOULIGAND Y. Twisted fibrous arrangements in biological materials and cholesteric mesophases [J]. *Tissue and Cell*, 1972, 4(2): 189-217.
- [44] MOINI M, OLEK J, YOUNGBLOOD J P, et al. Additive manufacturing and performance of architected cement-based materials [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(43): 1802123.
- [45] HAN Q G, SHI S Q, LIU Z H, et al. Study on impact resistance behaviors of a novel composite laminate with basalt fiber for helical-sinusoidal bionic structure of dactyl club of mantis shrimp [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 191: 107976.
- [46] YANG X F, MA J X, SHI Y L, et al. Crashworthiness investigation of the bio-inspired bi-directionally corrugated core sandwich panel under quasi-static crushing load [J]. *Materials & Design*, 2017, 135: 275-290.
- [47] 马晶, 张明鉴, 刘强, 等. 仿生刀具研究进展综述[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(13): 261-281.  
MA J, ZHANG M J, LIU Q, et al. A review of the research progress of bionic cutting tools [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(13): 261-281. (in Chinese)
- [48] SUN J Y, BHUSHAN B. Hierarchical structure and mechanical properties of nacre: A review [J]. *RSC Advances*, 2012, 2(20): 7617-7632.
- [49] CURREY J D. Mechanical properties of mother of pearl in tension [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series B Biological Sciences*, 1977, 196(1125): 443-463.
- [50] JACKSON A P, VINCENT J F V, TURNER R M. The mechanical design of nacre [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series B Biological Sciences*, 1988, 234(1277): 415-440.
- [51] MENIG R, MEYERS M H, MEYERS M A, et al. Quasi-static and dynamic mechanical response of *Haliotis rufescens* (abalone) shells [J]. *Acta Materialia*, 2000, 48(9): 2383-2398.
- [52] 周武. 结构-功能仿生复合材料研究与设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.  
ZHOU W. Research and design of structure-function bionic composites [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [53] 孙晋美, 郭万林. 基于珍珠母堆垛微结构复合材料力学特性[J]. *南京航空航天大学学报*, 2009, 41(5): 660-664.  
SUN J M, GUO W L. Mechanics properties of composite materials based on stacked microstructure of nacre [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2009, 41(5): 660-664. (in Chinese)
- [54] SUN Y Y, YU Z W, WANG Z G. Bioinspired design of building materials for blast and ballistic protection [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2016, 2016: 1-6.
- [55] WALTHER A, BJURHAGER I, MALHO J M, et al. Large-area, lightweight and thick biomimetic composites with superior material properties via fast, economic, and green pathways [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(8): 2742-2748.
- [56] WALTHER A, BJURHAGER I, MALHO J M, et al. Supramolecular control of stiffness and strength in lightweight high-performance nacre-mimetic paper with fire-shielding properties [J]. *Angewandte Chemie*, 2010, 49(36): 6448-6453.
- [57] REN L Q, LIANG Y H. Biological couplings: Classification and characteristic rules [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(10):

- 2791-2800.
- [58] WANG X S, LI Y, SHI Y F. Effects of sandwich microstructures on mechanical behaviors of dragonfly wing vein [J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(1): 186-192.
- [59] 史晓君. 基于蜻蜓翅膀的温室结构仿生设计研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.  
SHI X J. Bionic design of greenhouse structure based on dragonfly wings [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [60] 李秀娟. 蜻蜓翅膀功能特性力学机制的仿生研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.  
LI X J. Bionic study on mechanical mechanism of functional characteristics of dragonfly wings [D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- [61] 田嘉萌. 蜻蜓翅膀结构仿生及新型薄壁空间网格结构体系研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.  
TIAN J M. Study on bionic structure of dragonfly wings and new thin-walled spatial grid structure system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [62] WANG Z, LI B G, LUO Q Q, et al. Effect of wall roughness by the bionic structure of dragonfly wing on microfluid flow and heat transfer characteristics [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 173: 121201.
- [63] STUTZ H H, MARTINEZ A. Directionally dependent strength and dilatancy behavior of soil-structure interfaces [J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(9): 2805-2820.
- [64] MARTINEZ A, PALUMBO S, TODD B D. Bioinspiration for anisotropic load transfer at soil-structure interfaces [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(10): 04019074.
- [65] HU D L, NIRODY J, SCOTT T, et al. The mechanics of slithering locomotion [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(25): 10081-10085.
- [66] 张占立, 杨继昌, 丁建宁, 等. 蛇腹鳞表面的超微结构及减阻机理[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(9): 155-158.  
ZHANG Z L, YANG J C, DING J N, et al. Study on ultrastructures and resistance-reducing mechanism of ventral scales' s surface from three species of snakes [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(9): 155-158. (in Chinese)
- [67] LIU J D, TONG Y C, LIU J G. Review of snake robots in constrained environments [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2021, 141: 103785.
- [68] ZHONG W H, LIU H L, WANG Q, et al. Investigation of the penetration characteristics of snake skin-inspired pile using DEM [J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(6): 1849-1865.
- [69] STANLEY S. Why clams have the shape they have: An experimental analysis of burrowing [J]. *Paleobiology*, 1975, 1: 48-58.
- [70] STANLEY S M. Coadaptation in the Trigoniidae, a remarkable family of burrowing bivalves [J]. *Palaeontology*, 1978, 20.
- [71] WINTER A G, DEITS R L H, HOSOI A E. Localized fluidization burrowing mechanics of *Ensis directus* [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2012, 215(12): 2072-2080.
- [72] WINTER A G, V, DEITS R L H, et al. Razor clam to RoboClam: Burrowing drag reduction mechanisms and their robotic adaptation [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2014, 9(3): 036009.
- [73] TAO J J, HUANG S C, TANG Y. SBOR: A minimalistic soft self-burrowing-out robot inspired by razor clams [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2020, 15(5): 055003.
- [74] WEI H Y, ZHANG Y L, ZHANG T, et al. Review on bioinspired planetary regolith-burrowing robots [J]. *Space Science Reviews*, 2021, 217(8): 87.
- [75] 刘福丹, 李延新, 孙秀伟. 浅谈木质渔船的防蛆与防腐 [J]. *渔业现代化*, 2006, 33(3): 49-50.  
LIU F D, LI Y X, SUN X W. On maggot prevention and corrosion prevention of wooden fishing boats [J]. *Fishery Modernization*, 2006, 33(3): 49-50. (in Chinese)
- [76] 杨民强. 盾构机液压系统研究进展综述[J]. *液压与气动*, 2022, 46(10): 170-181.  
YANG M Q. Summary of research progress of hydraulic system of shield machine [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2022, 46(10): 170-181. (in Chinese)
- [77] 靳宏博, 张志强, 宋亮. 龟壳结构的力学性能研究现状及展望[J]. *力学与实践*, 2020, 42(2): 143-150.  
JIN H B, ZHANG Z Q, SONG L. A review of studies of mechanical properties of turtle carapace [J]. *Mechanics in Engineering*, 2020, 42(2): 143-150. (in Chinese)
- [78] ALIBARDI L, TONI M. Skin structure and cornification proteins in the soft-shelled turtle *Trionyx spiniferus* [J]. *Zoology*, 2006, 109(3): 182-195.
- [79] AMPAW E, OWOSENI T A, DU F, et al. Compressive deformation and failure of trabecular structures in a turtle shell [J]. *Acta Biomaterialia*, 2019, 97: 535-543.
- [80] 谷翠云. 巴西龟壳结构与性能[D]. 长春: 吉林大学, 2009.  
GU C Y. Structure and properties of Brazilian tortoise shell [D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- [81] ZHANG W, WU C W, ZHANG C Z, et al. Numerical study of the mechanical response of turtle shell [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2012, 9(3): 330-335.
- [82] ACHRAI B, BAR-ON B, WAGNER H D. Biological

- armors under impact: Effect of keratin coating, and synthetic bio-inspired analogues [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, 10(1): 016009.
- [83] 杨爽, 彭志龙, 姚寅, 等. 龟壳角质层的微结构特征及拉伸力学性能 [J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2020, 50(9): 090012.  
YANG S, PENG Z L, YAO Y, et al. The microstructure and tensile property of the cuticle of turtle shells [J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2020, 50(9): 090012. (in Chinese)
- [84] HAN B S, XU Y J, GUO E Y, et al. Microstructure and mechanical properties of tortoise carapace structure bio-inspired hybrid composite [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2018, 31(9): 945-952.
- [85] 侯居光. 基于龟壳的拱桥仿生设计研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.  
HOU J G. Research on bionic design of arch bridge based on tortoise shell [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [86] 刘国敏, 马陈远. 基于竹结构的仿生研究进展与发展趋势[J]. *林业和草原机械*, 2021, 2(4): 1-6.  
LIU G M, MA C Y. Research progress and development trend of bionics based on bamboo structure [J]. *Forestry and Grassland Machinery*, 2021, 2(4): 1-6. (in Chinese)
- [87] 邵卓平, 黄盛霞, 吴福社, 等. 毛竹节间材与节部材的构造与强度差异研究[J]. *竹子研究汇刊*, 2008, 27(2): 48-52.  
SHAO Z P, HUANG S X, WU F S, et al. A study on the difference of structure and strength between internodes and nodes of moso bamboo [J]. *Journal of Bamboo Research*, 2008, 27(2): 48-52. (in Chinese)
- [88] ABDUL KHALIL H P S, BHAT I U H, JAWAID M, et al. Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review[J]. *Materials & Design*, 2012, 42: 353-368.
- [89] 尚新龙, 毛腾飞, 管鑫, 等. 天然竹筒内竹纤维的分布规律研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2013(3): 93-96.  
SHANG X L, MAO T F, GUAN X, et al. A study of the distribution of vascular bundle in a natural bamboo tube [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2013(3): 93-96. (in Chinese)
- [90] 吴鹏. 基于竹子宏微观特性的立柱结构仿生设计[D]. 河北 秦皇岛: 燕山大学, 2015.  
WU P. Bionic design of column structure based on macro and micro characteristics of bamboo [D]. Qinhuangdao, Hebei: Yanshan University, 2015. (in Chinese)
- [91] 王希慧, 宋波, 徐明磊. 仿竹设计在高耸薄壁脱硫塔结构中的应用[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(8): 55-61.  
WANG X H, SONG B, XU M L. Application of imitation bamboo design in high-rise thin-walled desulfurization tower structures [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(8): 55-61. (in Chinese)
- [92] 果莲. 台北 101: 大厦十载[J]. *中国连锁*, 2013(10): 84-87.  
GUO L. Taipei 101: Ten years of building [J]. *China Chain Store*, 2013(10): 84-87. (in Chinese)
- [93] 刘鹏, 何伟明, 郭家耀, 等. 中国国际贸易中心三期 A 主塔楼结构设计[J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(Sup1): 8-13.  
LIU P, HO G, KWOK M, et al. Structural design of The Mega Tower of China World Trade Center(phase 3A) [J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(Sup1): 8-13. (in Chinese)
- [94] 贺拥军, 刘小华, 周绪红. 仿竹型筒式立体停车结构的环箍层布置研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(4): 1-7.  
HE Y J, LIU X H, ZHOU X H. Research on arrangement of hoop-layers of imitating bamboo drum type tridimensional parking structure [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2013, 40(4): 1-7. (in Chinese)
- [95] 石晓园. 基于三种动物巢穴“营造”方式的空间建构研究[D]. 南京: 南京艺术学院, 2017.  
SHI X Y. Research on spatial construction based on three ways of “building” animal nest [D]. Nanjing: Nanjing University of the Arts, 2017. (in Chinese)
- [96] 贾豹, 韦戈, 陈正麟, 等. 小头钩白蚁巢结构研究[J]. *应用昆虫学报*, 2016, 53(5): 1124-1129.  
JIA B, WEI G, CHEN Z L, et al. Nest structure of *Ancistrotermes dimorphus* Tsai et Chen [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2016, 53(5): 1124-1129. (in Chinese)
- [97] 田恒, 张文虎, 邓四二, 等. 基于改进蚁群算法的多值属性系统故障诊断策略[J]. *控制与决策*, 2021, 36(11): 2722-2728.  
TIAN H, ZHANG W H, DENG S E, et al. Fault diagnosis strategy of multi-valued attribute system based on improved ant colony algorithm [J]. *Control and Decision*, 2021, 36(11): 2722-2728. (in Chinese)
- [98] 陈子颖. 过去、现代和未来: 未来城市发展构想: 基于高层动态仿生建筑的探讨[J]. *艺术与设计(理论)*, 2018, 2(9): 59-61.  
CHEN Z Y. The past, the modern and the future: The concept of future urban development, research on high level dynamic bionic architecture [J]. *Art and Design*, 2018, 2(9): 59-61. (in Chinese)