

文章编号:1004-7220(2011)05-0395-07

· 述评 ·

生物材料力学研究新进展

冯西桥, 曹艳平, 赵红平, 季湘樱
(清华大学 工程力学系, 生物力学与医学工程研究所, 北京 100084)

摘要: 作为生物力学中一个快速发展的重要研究领域, 生物材料力学旨在通过实验研究和理论分析, 揭示各种天然生物材料的功能、性能、结构和组分之间的基本关系和机理, 并为新材料的仿生设计等提供来自大自然的启示。本文综述了近年来我国学者在该领域取得的一些最新研究进展, 主要内容包括珍珠母、牛角等生物复合材料的强韧化机制, 生物材料表面浸润特性与微纳米结构之间的关系, 以及相关的一些仿生应用。本文还简要介绍了本期专刊所刊登的7篇邀请文章。

关键词: 生物材料; 多尺度力学; 仿生; 强韧化机理; 微纳米结构; 表面浸润
中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

Recent developments in mechanics of biological materials: A brief review

FENG Xi-qiao, CAO Yan-ping, ZHAO Hong-ping, JI Xiang-ying (*Institute of Biomechanics and Medical Engineering, Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: As a rapidly developing area in biomechanics, mechanics of biological materials aims to investigate the fundamental relationship between functions, properties, structures, and compositions of various natural biological materials at different length scales and the underlying physical mechanisms through experimental research and theoretical analysis, and to provide inspirations from the splendid living world for the biomimetic design of new materials. In this paper, some recent achievements, mainly made by Chinese scholars in this field, are briefly reviewed, including the stiffening and toughening mechanisms of such biological composites as nacles and horns, the relation between the surface wetting behavior and the micro/nanostructures, and some relevant biomimetic applications as well. The contents of seven invited papers published in this special issue are also introduced.

Key words: Biological materials; Multiscale mechanics; Biomimetics; Toughening mechanisms; Micro-/nanostructure; Surface wetting

数不胜数的动物、植物和微生物为我们展现了形式多样、性质迥异的各类天然生物材料。这些生物材料大多具有跨越宏观、细观、纳观、分子(原子)等多个尺度的精巧的多级结构, 从而保证生物体实现各个方面的功能。作为一个多学科交叉的研究领域, 生物材料力学与仿生学研究正日益受到越来越

广泛的关注。

生物材料力学旨在通过实验研究和理论分析, 揭示各种天然生物材料多样化的功能、性能、结构和组分之间的基本关系和机理, 并将其原理应用于生物医学、机械制造、电子器件等领域的研究, 为新材料的设计与开发提供创新思路和可靠依据。上世纪

收稿日期:2011-09-10; 修回日期:2011-10-09

通讯作者:冯西桥, 现任清华大学工程力学系生物力学与医学工程研究所所长, 长江学者特聘教授。兼任中国力学学会秘书长和常务理事, 教育部高等学校力学教学指导委员会委员, 《Acta Mechanica Sinica》副主编, 《Engineering Fracture Mechanics》、《Molecular and Cellular Biomechanics》、《International Journal of Applied Mechanics》等期刊编委。E-mail: fengxq@tsinghua.edu.cn。

70年代以来,人们将细观力学的方法引入到对天然生物材料力学性质的研究中,针对动植物的组织和器官,如骨骼、肌肉、根、茎、叶等,开展了关于其结构与力学行为的系统研究,并在宏观结构(如建筑)和材料细观结构(如复合材料、蜂窝结构材料和层状陶瓷材料)等方面进行仿生设计和制造。自90年代以来,随着微纳米技术和计算机技术的快速发展,人们掌握了越来越先进的手段用以观察、测量、分析、表征和模拟在更微小尺度上的材料结构、特性和功能,也发展了越来越多的技术用以制备微纳米结构和系统。在此基础上,生物材料力学与仿生学的研究一日千里,日新月异。天然生物材料所具有的多层次精美结构,尤其是其在微纳米尺度上的结构与性能之间的关联,不仅为新材料的制备、结构优化、性能改进等提供了来自自然界的答案,也为生物医用材料及器械、仿生机器人等的开发带来了启迪。

高速发展中的生物材料力学与仿生学研究已结出累累硕果,我国学者也在生物材料的结构表征、性能测量、力学机制的理论分析和模拟、仿生材料的设计和制备等诸多方面取得了重要的研究成果^[1]。本文仅就其中的几个侧面加以简要评述。本期《医用生物力学》专刊刊登了该领域的部分学者撰写的7篇文章,以着力反映我国学者的一些最新研究进展。本文最后将对这些文章加以简介。

1 天然复合材料的强韧化机理

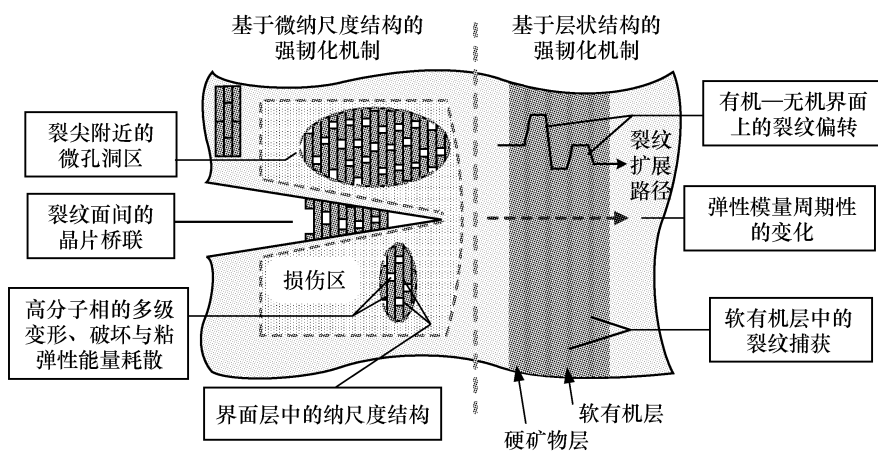
生物体的不同组织,从柔软的皮肤、肌肉、软骨、须毛到坚硬的骨骼、鳞片、甲壳和指爪,都具有与各自的丰富功能相适应的综合性能,其奥秘均源自生物材料结构在从纳观到宏观的各级层次上的有序性和合理性。很多天然生物材料由矿物相和有机高分子相组成,材料具有“软硬兼施”的多级结构设计,这对于其力学性质(特别是强度和断裂韧性)有着独特的作用。在典型的几何形状和排列设计中,非常软的蛋白质将矿物质隔离成变形和破坏均相互独立的纳米晶体,蛋白质和矿物质的纳米复合结构因此获得了较高的强度和鲁棒性。

作为大多数软体动物体的保护壳,贝壳具有优良的力学特性,其力学性能与微纳米结构之间的关系备受关注。贝壳的珍珠母层具有“砖-泥”式结构,其主要结构单元(矿物晶片)的尺度在亚微米至

微米量级;而在矿物晶片间的界面层内和晶片自身内部都存在纳米级的结构。2003年,宋凡等^[2]首次在实验中直接观察到了相邻晶片间起连接作用的矿物桥,矿物桥的直径为20~50 nm。基于对珍珠母微结构的观察,季葆华和高华健^[3]提出了拉伸-剪切链模型,揭示了生物材料纳米结构中的载荷分配规律和强韧化机理:矿物质纳米晶体承担拉压载荷,而蛋白质通过剪切变形在矿物晶体之间传递载荷;通过控制矿物质的排列和几何结构,可以实现对矿物质和蛋白质所承载荷的优化配置。高华健等^[4]认为,当材料的特征尺度达到或小于一个临界尺度时,经典断裂力学的概念将不再适用,材料的断裂行为将由材料微观尺度的非线性行为主导,断裂机理将从经典的Griffith裂纹扩展形式过渡到一个均匀破坏的模式,断裂强度将达到材料的理论强度,并且材料对缺陷不敏感。对于矿物质晶体,这个临界尺度在纳米量级,由此可推断珍珠母矿物晶体的纳米尺度是生物进化过程中材料强度等多方面性能综合优化的结果。

最近,邵玥等^[5]对珍珠母的强韧化机理进行了细观尺度的断裂力学建模,并归纳了一些主要的强韧化机制(见图1)。基于珍珠母的“砖-泥”式微结构与晶片桥联机制,建立了含离散桥联的裂纹模型,提出了相应的理论框架用以定量刻画桥联增韧效应及珍珠母的断裂韧性,其理论模型所预测的断裂韧性值与实验测量的结果吻合良好。他们对桥联增韧效应与各微结构参数间的关系进行了系统研究,发现桥联增韧效应对晶片尺寸有很强的依赖性。为了获得较高的桥联增韧比,晶片厚度应该在一个特定的范围内。对晶片尺寸效应的分析证实了矿物晶片的亚微米级厚度与较大的长细比在强化桥联增韧效应、提高珍珠母断裂韧性方面的重要作用。

动物的角类材料也具有很高的强度和韧性。李炳蔚等^[6]对牛角的生物学功能、宏微观结构与力学性能间的关联进行了分析,研究了牛角的增韧机制。实验首次发现了牛角角蛋白外壳具有特殊的波浪层状的微观结构,并测量了角质外壳不同部位在不同水分含量下的单向拉伸力学性能、牛角不同部位的弯曲力学性能、牛角外壳沿厚度和长度方向微米压

图1 珍珠母的一些强韧化机制^[5]Fig.1 Some strengthening and toughening mechanisms in nacre^[5]

痕硬度的梯度分布^[6];通过对牛角不同部位获取的试样的轴向压缩和霍普金森杆冲击试验获得了不同应变速率下牛角的力学性能数据^[7]。此外,他们还基于断裂力学理论和相应的数值模拟方法进一步揭示了牛角的强韧化机理^[8]。

蚕丝是一种由蛋白质组成的天然纤维材料。由蚕丝所构成的蚕茧是一种很好的生物防护结构,并能很好地适应温度、湿度等环境变化。赵红平等^[9-12]测量了蚕茧从内到外各层的力学与热力学性能的变化。研究发现,蚕茧的力学性能沿厚度方向服从一定的梯度变化规律,并且该性能变化适应于板壳结构承载的主要特点:在外加冲击载荷的情况下,最内层所受拉伸正应力最大。他们也分析了蚕茧的断裂破坏特征。结果显示蚕茧的断裂行为体现出明显的多尺度特征,在不同尺度上具有不同的能量耗散机制,从而达到很好的吸能效果。赵红平等^[12]通过超声波方法,首次获得了直径在纳米尺度的蚕丝纤维,通过实验观测揭示了清晰的蚕丝多尺度结构。此种方法还被推广到蜘蛛丝、竹纤维、木纤维、胶原蛋白纤维、甲壳素纤维等众多天然生物材料纳米纤维的制备中,这些纳米纤维材料在生物医学工程等方面具有很好的应用前景。

张凯等^[13-14]对天然蜂窝和蜜蜂丝的多级结构和力学性能进行了系统研究,发现天然蜂窝孔壁具有类似于现代纤维增强复合材料的层状结构,此种结构能起到良好的强韧化效果。

2 天然生物材料的表面力学

天然生物材料不仅具有复杂而有序的多级内部结构,其表面也呈现精巧的多层次形貌和化学非均匀性,进而拥有一些独特的表面性能,如各向异性、超疏水性等。江雷等^[15]研究了荷叶、水稻叶等的表面微结构与表面性质(如荷叶的超疏水性和抗污染能力、水稻叶的各向异性浸润性)之间的关系,并受此启发对材料界面进行改进,制备了一系列具有微米-纳米复合结构和不同表面浸润性质的仿生材料^[16-18]。

精细的表面多级微结构及其所带来的浸润特性不仅为植物的花、茎、叶所利用,也赋予了蚊子、水黾、水蜘蛛等动物诸多奇异的生存技能。高雪峰等^[19]实验观察发现,压于水面之上的水黾腿可以承受水黾体重40倍以上的力而不沉入水中,即一条直径约为100 μm的水黾腿可以将水面压下4~5 mm的深度而不会刺破水面。其惊人的拒水能力源于腿表面的微纳米分级结构,空气在微结构内部形成气垫,从而导致了水黾腿的超疏水性质。冯西桥等^[20]对固体材料的表面润湿性与分级结构之间的关系进行了理论研究,提出了相应的力学计算模型(见图2)。为进一步揭示水黾腿具有超强浮力的物理机制,刘建林等^[21]对不同形状的直棒压入液面的过程进行了详细的分析。通过解析求解Laplace方程,得到了直棒浮于液面时产生的弯液面形貌和所受浮力,并确定了临界下沉条件,获得了最大浮力与几何

条件和接触角的定量关系。郑泉水等^[22]的研究结果表明,除了腿部表面的精细微纳米结构,关节变

形使水黾腿具有对水面形状变化的自适应性,从而进一步增强了水黾腿的疏水能力。

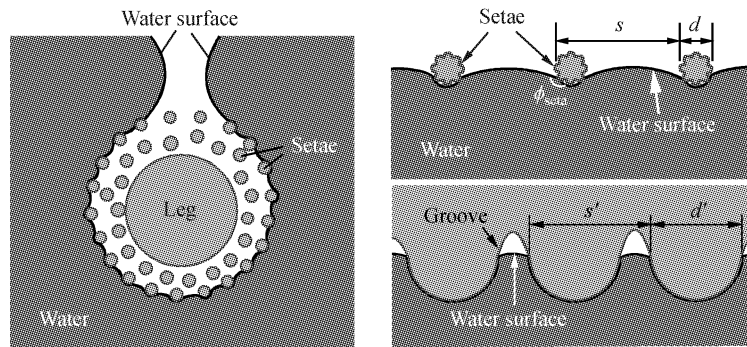


图2 水黾腿浮力的计算模型^[20]

Fig.2 Calculation model for the supporting force of a water strider leg^[20]

吴承伟等^[23-24]则针对蚊子的超疏水腿部结构做了研究。单根蚊子腿能够提供蚊子体重23倍之多的支撑力,腿表面与水的接触角高达 153° 。研究发现,如此优异的超疏水性得益于表面微米级、亚微米级和纳米级的独特三级结构。第三级纳米结构处于第二级结构的底部,作为超疏水特性的最后一道防线,虽很少能接触到水,但却增强了第二级结构的稳定性,同时也阻止了表面上的气泡在第二级结构间的自由流动,进一步保障了超疏水特性。整个蚊子腿的生物设计实现了超轻、减阻、超疏水、最大浮力等多功能的完美协同优化。

3 天然生物材料的仿生研究

“仰瞻凌霄鸟,羨尔归飞翼。”(陆机《东宫作诗》),“取大鸟翻为两翼,头与身皆著毛,通引环纽,飞数百步堕。”(班固《汉书·王莽传》)。虽然羡慕自然的想法符合直观,师法自然的行动古已有之,但要真正做到不仅模其形,而且传其神,关键还在于对内在机制的理解。在对天然生物材料特殊性能背后的力学机制有所了解的基础上,人工产品才有望与自然比肩;更为重要的是,自然智慧给予了我们在材料研究上的诸多灵感,使得我们能将对天然产品的简单复刻升华至对其设计思想的提炼和运用。

如前所述,强韧化的内部结构设计和造就独特浸润特性的表面结构设计是许多天然生物材料引人注目的特点。基于对其结构与性能的关联的研究成果,相关机制已被成功应用到新材料的研发中。在

结构的强韧化设计方面,戴振东等^[25-26]基于对甲虫鞘翅的微观结构和力学性质^[27-28]的深入了解,设计并制造了三种仿鞘翅的轻质结构模型,并对所设计结构的刚度和强度进行了有限元仿真模拟和准静态压缩实验分析,验证了此种仿生结构的有效性。

在表(界)面的设计方面,天然生物材料优异的疏水性能往往得益于材料的表面微结构,宋凡等^[29]将此思想应用于提高陶瓷材料抗热震性的研究。通过等离子刻蚀技术和酸腐蚀方法,他们成功地在陶瓷材料表面制备出了仿蜻蜓翼膜表面^[30]的超疏水纳米结构,有效地扩大了材料的表面积,使陶瓷表面与水的接触角提高了 50° 以上,获得了良好的超疏水性。由此,在陶瓷的热震过程中,经过仿生处理后的表面上能够自动覆盖一层空气膜。这层空气膜使陶瓷的表面热阻增加了近万倍,使陶瓷与热震介质间剧烈的温差所产生的热应力只能作用在陶瓷表面的超疏水纳米结构上而不能直接作用于陶瓷材料的实际部位,从而大幅提高了陶瓷的抗热震性,克服了陶瓷的热震失效。

此外,许多生物器官和组织相应于各自功能要求的一些独特性质也为人类的技术发展拓宽了思路。蚊子的口针可以轻易地刺穿皮肤,并在皮下自由弯曲以寻找毛细血管,表现出优异的整体力学性质。孔祥清和吴承伟^[31-33]的研究发现,蚊子口针主要由六个部件组成,材料表面具有与淬火金属相媲美的硬度,但内部弹性模量(~ 6.0 GPa)却与普通高分子材料相当;六个部件相互协调,通过蚊子下颚

表面锋利的微纳锯齿的振动刺入人体皮肤,平均刺入力仅为 $\sim 16.5 \mu\text{N}$ 。材料和结构的这种协同优化赋予了蚊子口针优异的刺入性能。受此启发,他们研制出了一种带微纳锯齿的振动切割微型手术刀。任露泉研究组^[34-36]则借鉴了一些具有止裂功能的生物体表形貌,即不同形貌和力学性质单元交错耦合从而得以延迟和阻断裂纹的扩展,通过激光加工技术制备了具有仿生耦合表面的制动毂,成品具有良好的抗疲劳特性。

4 本专刊主要内容简介

本期专刊刊登的7篇文章,内容覆盖从细胞到组织的诸多基本力学问题和在相关生物医学工程领域的探索与实践。

细胞是生命活动的基本单元。细胞内的钙信号与细胞的自我更新、增殖、分化、凋亡等行为密切相关,而力学刺激对细胞钙信号的影响明显。理解钙信号的传递机制、掌握钙信号的调控方法,对于我们认识细胞行为,进而控制细胞命运等具有关键性的意义。胡漫等^[37]通过由自组装分子单层技术构建的成骨细胞阵列,研究了细胞间的间隙连接和ATP在力致胞间钙传递过程中的作用。其结果显示胞间间隙连接并非胞间钙传递的必需路径。此研究成果加深了对细胞钙响应的理解。

了解生物组织的力学特性有着重要的生物学和医学意义。刘志远与杨庆生^[38]提出了一种改进的纳米压痕技术,可用于测量生物组织的力学性质;并运用此方法测定了红细胞和骨骼的蠕变、生物黏性、非均匀性、各向异性等特性。骨骼是身体的支撑,其微结构和多尺度力学特性的关系一直是一个研究热点。罗青等^[39]采用有限元计算结合随机场理论及概率损伤分析的方法,研究了骨组织中矿物晶体与胶原纤维的相互作用对微损伤扩展方式的影响。其成果有助于理解骨中的能量耗散过程和骨折的机制。陈斌等^[40]的实验研究则揭示了哺乳动物胫骨良好韧性背后的机理。他们首先通过扫描电镜观察清晰地揭示了胫骨的多级微纳结构;再通过建立复合材料模型和制备与测试仿生复合材料证实了此种多层结构确实有利于胫骨断裂韧性的提高。此项研究也为仿生设计提供了新思路。

随着细胞工程学与组织工程学的发展,生物医

学领域的相关人工材料研究方兴未艾。基底膜作为细胞载体,是体外细胞力学实验中的基本材料。马信龙^[41]等自制了一种硅橡胶膜细胞载体,并通过有限元分析和实验测试的方法分别评价了膜内的应变分布和生物相容性,结果显示此基底膜能为细胞力学实验提供良好的条件。汪饶饶等^[42]则聚焦于一种广泛运用的牙科修复材料——CAD/CAM氧化锆陶瓷。通过制作材料平板试样,进行赫兹触压实验并采用光测技术分析位移,研究者测定了四种氧化锆材料的抗压强度和断裂模式,为此种生物替代材料的应用和发展提供了参考。

在生物材料的表面浸润与黏附方面,于洋等^[43]研究了黏附现象中两表面间液桥的拉伸、断裂过程,具体考察了球形表面和平面间液桥的断裂距离与固体表面的几何参数、液体的物理性质和液桥体积之间的关系,研究成果为黏附的利用与控制提供了有益参考。

致谢:感谢国家自然科学基金项目(10732050)的资助,也感谢本专刊所有作者提供稿件以及国内诸多学者为本文提供资料。

参考文献:

- [1] Chen CQ, Cui JZ, Duan HL, et al. Perspectives in mechanics of heterogeneous solids [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2011, 24(1): 1-26.
- [2] Song F, Soh AK, Bai YL. Structural and mechanical properties of the organic matrix layers of nacre [J]. *Biomaterials*, 2003, 24(20): 3623-3631.
- [3] Ji B, Gao H. Mechanical properties of nanostructure of biological materials [J]. *J Mech Phys Solids*, 2004, 52(9): 1963-1990.
- [4] Gao H, Ji B, Jäger IL, et al. Materials become insensitive to flaws at nanoscale: Lessons from nature [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2003, 100(10): 5597-5600.
- [5] 邵玥. 珍珠母强度与断裂性能的理论研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [6] Li BW, Zhao HP, Feng XQ, et al. Experimental study on the mechanical properties of the horn sheaths from cattle [J]. *J Exp Biol*, 2010, 213(3): 479-486.
- [7] Li BW, Zhao HP, Feng XQ. Static and dynamic mechanical properties of cattle horns [J]. *Mater Sci Eng C*, 2011, 31(2): 179-183.
- [8] Li BW, Zhao HP, Qin QH, et al. Numerical study on the

- effects of hierarchical wavy interface morphology on fracture toughness [J]. *Comput Mater Sci*, (In press).
- [9] Zhao HP, Feng XQ, Cui WZ, *et al.* Mechanical properties of silkworm cocoon pelades [J]. *Eng Fracture Mech*, 2007, 74(12): 1953-1962.
- [10] Zhao HP, Feng XQ, Yu SW, *et al.* Mechanical properties of silkworm cocoons [J]. *Polymer*, 2005, 46(21): 9192-9201.
- [11] Zhao HP, Feng XQ, Shi HJ. Variability in mechanical properties of *Bombyx mori* silk [J]. *Mater Sci Eng C*, 2007, 27(4): 675-683.
- [12] Zhao HP, Feng XQ, Gao H. Ultrasonic technique for extracting nanofibers from nature materials [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90(7): 073112-2.
- [13] Zhang K, Si FW, Duan HL, *et al.* Microstructures and mechanical properties of silks of silkworm and honeybee [J]. *Acta Biomater*, 2010, 6(6): 2165-2171.
- [14] Zhang K, Duan H, Karihaloo BL, *et al.* Hierarchical, multi-layered cell walls reinforced by recycled silk cocoons enhance the structural integrity of honeybee combs [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107(21): 9502-9506.
- [15] Feng L, Li S, Li Y, *et al.* Super-hydrophobic surfaces: From natural to artificial [J]. *Advan Mater*, 2002, 14(24): 1857-1860.
- [16] Feng L, Song Y, Zhai J, *et al.* Creation of a superhydrophobic surface from an amphiphilic polymer [J]. *Angewandte Chemie*, 2003, 115(7): 824-826.
- [17] Feng L, Li S, Li H, *et al.* Super-hydrophobic surface of aligned polyacrylonitrile nanofibers [J]. *Angewandte Chemie Int Ed*, 2002, 41(7): 1221-1223.
- [18] Feng L, Yang Z, Zhai J, *et al.* Superhydrophobicity of nanostructured carbon films in a wide range of pH values [J]. *Angewandte Chemie Int Ed*, 2003, 42(35): 4217-4220.
- [19] Gao X, Jiang L. Water-repellent legs of water striders [J]. *Nature*, 2004, 432(7013): 36-36.
- [20] Feng XQ, Gao X, Wu Z, *et al.* Superior water repellency of water strider legs with hierarchical structures: Experiments and analysis [J]. *Langmuir*, 2007, 23(9): 4892-4896.
- [21] Liu JL, Feng XQ, Wang GF. Buoyant force and sinking conditions of a hydrophobic thin rod floating on water [J]. *Phys Rev E*, 2007, 76(6): 066103.
- [22] Zheng QS, Yu Y, Feng XQ. The role of adaptive-deformation of water strider leg in its walking on water [J]. *J Adhes Sci Technol*, 2009, 23(3): 493-501.
- [23] Wu CW, Kong XQ, Wu D. Micronanostructures of the scales on a mosquito's legs and their role in weight support [J]. *Phys Rev E*, 2007, 76(1): 017301.
- [24] 孔祥清, 吴承伟. 蚊子腿表面多级微纳结构的超疏水特性 [J]. *科学通报*, 2010, 55(16): 1589-1594.
- [25] 杨志贤, 戴振东. 甲虫生物材料的仿生研究进展 [J]. *复合材料学报*, 2008, 25(2): 1-9.
- [26] 宋文伟, 郭策, 马岩, 等. 仿甲虫鞘翅轻质结构的力学性能研究 [J]. *机械科学与技术*, 2010, 29(10): 1376-1384.
- [27] 杨志贤, 戴振东, 郭策. 东方龙虱鞘翅: 形态学及力学性能研究 [J]. *科学通报*, 2009, 54(12): 1767-1772.
- [28] 杨志贤, 王卫英, 虞庆庆, 等. 四种甲虫鞘翅的力学参数测定及微结构观测 [J]. *复合材料学报*, 2007, 24(2): 92-98.
- [29] Song F, Meng S, Xu X, *et al.* Enhanced thermal shock resistance of ceramics through biomimetically inspired nanofins [J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 104(12): 125502.
- [30] Song F, Xiao K W, Bai K, *et al.* Microstructure and nano-mechanical properties of the wing membrane of dragonfly [J]. *Mater Sci Eng A*, 2007, 457(1-2): 254-260.
- [31] Kong XQ, Wu CW. Mosquito proboscis: An elegant biomechanical system [J]. *Phys Rev E*, 2010, 82(1): 011910.
- [32] Kong XQ, Wu CW. Measurement and prediction of insertion force for the mosquito fascicle penetrating into human skin [J]. *J Bionic Eng* 2009, 6(2): 143-152.
- [34] Zhang Z, Zhou H, Ren L, *et al.* Effect of units in different sizes on thermal fatigue behavior of 3Cr2W8V die steel with biomimetic non-smooth surface [J]. *Int J Fatigue*, 2009, 31(3): 468-475.
- [35] Tong X, Zhou H, Zhang ZH, *et al.* Effects of surface shape on thermal fatigue resistance of biomimetic non-smooth cast iron [J]. *Mater Sci Eng A*, 2007, 467(1-2): 97-103.
- [36] 张志辉, 任露泉, 周宏, 等. 抗热疲劳仿生耦合制动毂的激光加工参数 [J]. *吉林大学学报*, 2009, 39(4): 953-958.
- [37] 胡漫, 李平, 高宇欣, 等. 流体剪切力作用下无间隙连接成骨细胞阵列内的钙响应 [J]. *医用生物力学*, 2011, 26(5): 402-407.
- Hu M, Li P, Gao YX, *et al.* Calcium response in osteoblast network without gap junction under shear flow [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(5): 402-407.
- [38] 刘志远, 杨庆生. 基于纳米压痕法的关节软骨保湿测量技术 [J]. *医用生物力学*, 2011, 26(5): 408-412.
- Liu ZY, Yang QS. Measurement of articular cartilage in water based on nanoindentation method [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(5): 408-412.
- [39] 罗青, 王晓渡, 荣起国. 利用有限元研究骨中微损伤发展 [J]. *医用生物力学*, 2011, 26(5): 413-419.
- Luo Q, Wang XD, Rong QG. Finite element study on the microdamage progression within bone [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(5): 413-419.
- [40] 陈斌, 张智凌, 尹大刚, 等. 胫骨生物复合材料多级微纳结

- 构的韧性机理[J]. 医用生物力学, 2011, 26(5): 420-425.
- Chen B, Zhang ZL, Yin DG, *et al.* Toughness mechanism of hierarchical micro-nanostructure from shankbone bio-composite [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(5): 420-425.
- [41] 马信龙, 李爽, 付鑫, 等. 硅橡胶膜细胞载体的应力分析及生物相容性研究[J]. 医用生物力学, 2011, 26(5): 426-431.
- Ma XL, Li S, Fu X, *et al.* Stress analysis and biocompatibility research on a cell carrier with silicon rubber membrane [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(5): 426-431.
- [42] 汪饶饶, 王丹, 徐远志, 等. 比较 4 种 CAD/CAM 氧化锆抗压强度和断裂模式[J]. 医用生物力学, 2011, 26(5): 432-435.
- Wang RR, Wang D, Xu YZ, *et al.* Comparison of compressive strength and fracture mode between four kinds of CAD/CAM zirconia [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(5): 432-435.
- [43] 于洋, 王学卫, 吴群. 基于 Surface Evolver 模拟的液桥断裂距离研究[J]. 医用生物力学, 2011, 26(5): 436-440.
- Yu Y, Wang XW, Wu Q. Rupture distance of liquid bridge based on Surface Evolver simulation [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(5): 436-440.

· 信 息 ·

祝贺我刊顾问钱煦院士获美国国家科学奖章

2011 年 9 月 27 日, 美国总统奥巴马公布了 2011 年度七位美国国家科学奖章(National Medal of Science)获得者名单, 其中华人生物学家、美国加州大学圣迭戈分校(University of California, San Diego, UCSD)教授钱煦(Shu Chien)榜上有名。美国国家科学奖章和国家技术与创新奖章分别设立于 1959 年和 1980 年, 代表美国政府赋予科学家、工程师以及发明人的最高荣誉。

钱教授是美国国家科学院、国家医学科学院、国家工程院和国家艺术与科学学院院士, 中国科学院外籍院士。现任美国加州大学圣迭戈分校大学教授(University Professor)、医学工程研究所所长。

钱教授是世界著名生物医学工程、生理学、生物力学和生物流变学家, 长期从事机械力对基因表达和信号转导的影响、整体和系统生物学、组织细胞分子生物工程、细胞膜的分子结构和生物力学特性、大分子跨血管内膜的传输、生理和病理状态下血液流变学和微循环动力学研究。

钱教授发表论文 400 余篇, 出版专著 9 部; 获血液流变学研究 Nanci 奖章、临床血液流变学 First Fahraeus 奖章、微循环研究 Landis 奖、美国自然科学基金会特殊创造基金奖、美国国立卫生院 MERIT 奖、微循环研究 Zweifach 奖、生物医学工程 ALZA 奖、美国机械工程学会 Melville 奖、中美工程师科学家协会终身成就奖、生理学 Ray Daggs 奖、生物医学工程杰出贡献奖、生物流变学 Poiseuille 金奖、美国医学与生物工程研究所 Pierre Galletti 奖、亚裔美国人 2005 年度工程师称号等; 北京大学、上海交通大学、四川大学、重庆大学、中国医学科学院和北京航空航天大学等院校名誉教授。他先后担任欧洲微循环学会执委、美国国立卫生院科学评审咨询委员、美国华人医学会主席、美国华人学者和专家协会主席、国际流变学会主席、美国生物力学委员会执委、美国生理学会主席、国际生理科学联合会司库、国际生理科学大会主席、国际生物流变学大会主席等。

具体信息可见: http://ucsdnews.ucsd.edu/newsrel/awards/2011_09shu_chien.asp

本刊编辑部

2011-10-25