

基于昆虫(体壁及翅)形态结构的仿生学研究进展

饶冉

(西北大学生命科学学院,陕西西安 710069)

摘要 昆虫是一类经历了数十万年的环境变迁的古老物种,并在长期进化过程中形成了许多适应各种特殊环境的形态构造和功能,其因此一直是备受关注的仿生对象之一。充分挖掘具有特殊体表形态结构和优越性能的昆虫资源,利用其构造的原理开发具有特殊性能的新型仿生复合材料和工具,对材料科学的发展具有极为重要的现实意义。该文总结了一些昆虫的体表形态结构功能及其原理,并简单探讨了其应用领域和价值。

关键词 昆虫;形态结构;仿生;材料

中图分类号 S939.99 文献标识码 A 文章编号 1007-5739(2012)18-0266-03

Research Progress on Bionics Based on Morphological Structure of Insect (Exoskeleton and Wings)

RAO Ran

(College of Life Sciences, Northwest University, Xi'an Shaanxi 710069)

Abstract The insect is a kind of old species which has experienced hundred reds of thousands of years of environmental changes and formed adapted construction and function to all kinds of special environment in the longterm evolution. Therefore, It has been one of the bionic objects of great concern. Fully exploiting insect resources which have special morphology, structure and superior performance and using the principles of its structure to develop biomimetics composite materials and tools with special performance are of great importance to material science. The paper summarized the morphology, structure and their principles of body surface of insects and briefly discussed its application fields and value.

Key words insects; morphological structure; bionic; material

在特殊环境中生活的昆虫,为了适应外界环境的不利影响,往往具备其自身特殊的体表形态结构及功能。昆虫的身上有着适应飞行需要的轻量型结构、保护躯体的高强度结构、使其附着各种光滑表面的摩擦结构。因此,昆虫一直是结构仿生的热点。尤其是昆虫的角皮是一种超级天然复合材料,具有壳薄、质轻、高强韧性、抗断裂性能、损伤自愈、疏水等优异性能,随着纳米技术和分子生物学的不断发展,在纳米、微米层面上,现代仿生学开始进入分子水平的模拟生物体系,当前仿生合成、生物矿化等方面逐渐成为创新的方向和科学研究的前沿,对昆虫体壁和翅的仿生材料学研究具有极大的借鉴意义和研究价值。

1 对昆虫表面形貌的研究及仿生学应用

1.1 对鞘翅目昆虫表面形貌的研究

1.1.1 国内相关研究。鞘翅目昆虫出现在早期,通过长期的进化,鞘翅目昆虫的结构得到优化,从而达到适应环境的目的。目前,其鞘翅和外骨骼是最主要的自然材料和仿生对象。鞘翅表面形貌有凹凸、条凸2种结构。其中,吉丁甲虫和大龙虱等为条凸结构形貌,蜚螂、东方龙虱和金龟子等为凹凸结构形貌。研究表明,利用蜚螂触土体表的形貌数据作为基础,通过仿生设计出非光滑表面推土板,在运动速度较高的场合下和与土体发生较大相对切向运动的条件下,一般的光滑表面的减黏降阻效果没有非光滑表面好,目前该推土板已在农业生产中应用^[1]。张迎春等^[2]观测瓢虫科、叶甲科4种昆虫的鞘翅表面超微结构,结果表明试验昆虫鞘翅体表有凹坑结构,部分昆虫鞘翅体表不被毛,但在凹坑中有细毛,而其他鞘翅的体表虽出现被毛,但凹坑中却未发现细毛。另外,有些鞘翅体表现出刻点、刺突,其呈现规则排列,可见这几种昆虫表面结构虽不同,但都是由孔、毛和凹坑构成的复合结构。鞘翅在适应陆地生活、防止昆虫体内水分蒸发方面具有十分重要的作用。

1.1.2 国外相关研究。Watson et al^[3]对白蚁、蝉翅上的六角形有序微结构阵列进行研究,通过原子力显微镜(AFM)观察,发现结构单元顶部的圆形突起高度、微结构阵列之间的间隔分别为150~350、200~1 000 nm。其指出间隔较大的微阵列结构可以优化昆虫外壳空气动力学、机械强度;间隔较小的微阵列结构可以优化昆虫自清洁性能、表面的光反射性能。通过研究昆虫表皮的强度、硬度、韧性等,有研究人员提出了设计具有这些特性的仿生纤维复合材料的方案^[4]。而Gorb et al^[5]研究认为,由于昆虫表皮结构非常特殊,这使其能够在垂直的光滑表面上进行活动,表皮的附着原理随结构的差异而不同,常见的附着结构大致可分为夹、钩、黏性分泌物、锁、吸盘、垫、膨胀锚、摩擦等。这些对昆虫表面结构的研究为进一步设计开发仿生结构,制备具有类昆虫表面结构的材料表面奠定了基础。

2 鞘翅断面微结构及其三维拓扑规律研究

甲虫鞘翅所具有的独特结构特点使其具有多种优异的性能,因而探索和研究鞘翅内部微结构及其三维拓扑结构特点成为仿生设计和应用的关键所在。目前,该领域的研究主要集中在国内,而国外相对较少。

1973年Rudall和Kennington研究指出,构成外骨骼(即表皮)的2个主要成分(几丁质和蛋白质)是以纤维和基体的形式复合的,几丁质通常占外骨骼干重的25.40%,蛋白质占50%以上。几丁质是一种类似于纤维素的纤维状含氮多糖,基体主要来源于各种蛋白质和其他生物和非生物材料。1986年Hadley把昆虫的外骨骼或表皮分为2个主要部分:外表皮和原表皮。外表皮位于表皮的最外层,由蜡质、鞣化蛋白质(外表皮的蛋白质中不含有几丁质纤维)和脂质组成。原表皮是表皮的最大结构区域,决定外形和机械稳定性,它由一系列薄片板或薄片层组成,这些薄片层沿各个方向排列形成一种不均匀对称的结构,包括横向和纵向2种。原表皮是由完全硬化或完全未硬化或介于二者之间的基体组

收稿日期 2012-08-15

成,基体中都埋有丁质纤维。对昆虫外骨骼和鞘翅微细结构的研究,Gunderson 和 Rebecca Schiavone 采用的是具角黑艳甲,对这些部分进一步的观测发现,其结构是一个类似纤维增强的复合材料,每个部位由许多高度规整的单向性层板组成,这些层板以不同的方向平行于外表皮表面排列,每片层板由单向纤维组成,层板的厚度与纤维尺寸和几何形状有关,不同部位层板数目和厚度是变化的,在鞘翅中观察到的小柱结构,这些硬的、垂直的突出物起到连接鞘翅上下部分的作用,可以提高刚度,同时这些小柱在鞘翅的上下两部分之间提供了更多的空间,可以认为对提高抗冲击破坏能力和减轻重量大有益处;其次,发现有无数的孔洞(导管),这些导管延伸通过表皮,传导蜡质从真皮层到外表皮形成一个防水层;第3个发现是一些微纤在相邻的纤维和层板之间起一种桥联作用,这种特性有助于转移负载,增加纤维粘接于基体的表面积,增加纤维与基体之间及层板之间的撕裂强力^[6]。Hepburn 选用蔷薇金龟(rose chafer)为研究对象,发现甲虫外壳是由丁质纤维和蛋白质基体复合而成的正交层合结构。相邻的由巨原纤组成的薄层通常彼此直角交叉,由贯穿薄层的桥联纤维连接,总的薄层数目依照昆虫的结构需要和不同的外壳部位而变化。纤维薄层这种独特排列的层合板粘合方式,为抗撕裂和抗裂缝传递提供了一个新颖的思路^[7]。不同的昆虫种类或同一种类由于龄期或生长环境的不同结构特性也有所不同。考虑到昆虫的多样性,对昆虫外骨骼和鞘翅的几丁质纤维铺层方式仍是一个公认的尚未解决的问题。最被广泛接受的是 Bouligand 提出的螺旋模型理论,他认为节肢动物的表皮是由一系列由纤维和基体组成的平行于表面铺层的单向薄层逐一堆叠组成,这些连续的薄层通过一些连续小角度的旋转形成一种螺旋结构。Gunderson et al^[8]的研究认为纤维不是单螺旋排列而是双螺旋排列。

20世纪90年代,向春霆等^[9]对鞘翅且昆虫鞘翅的各级结构和力学行为进行了深入研究。发现昆虫鞘翅是一个厚度不匀的双曲率壳,该壳采用夹芯的一级细观结构,芯层可采用横隔、纵隔、蜂窝、钉扎等多种夹芯形式。其中蜂窝结构的相邻壁板间有纤维架空桥联;钉扎采用双喇叭结构,喇叭的壁是成层叠就的。

陈 斌等^[10]研究发现,金龟子外甲壳内部的微结构与人造纤维增强复合材料类似,具有几丁质纤维增强角质化蛋白质基体的结构特征,并存在非均匀的纤维铺层以及奇特的异型刺状和球形纤维。建立尖角形刺状和圆球形端头纤维模型,分析球形端头纤维、刺状端头的界面剪应力及受载位移状况,与普通平直端头纤维比较,指出其能提高复合材料强度,改善纤维端头界面剪应力集中现象,增加复合材料抵抗变形破坏能力等。

陈锦祥等^[11]试验建立了甲虫前翅及其小柱结构的简易模型,指出独角仙前翅为具有以小柱为中空层的夹芯层状三合板结构,该结构为一种轻量型的复合材料板材。小柱中的纤维通过大于90°弯曲与上、下层中的纤维连续连接,提高层状纤维强化的复合材料层间的抗剥离性能,为开发轻量型复合材料奠定了基础。电子显微镜观察了这2种甲虫

前翅结构上的异同,考察了甲虫前翅中的优化设计思路^[12]。结果表明,2种甲虫前翅均采用了以小柱为中空层的夹芯层状结构及框架结构的轻量型设计。其中,独角仙前翅为一次性的十分经济的设计方式,而锹形虫则为耐用型设计方式。

张 伏等^[13]利用扫描电子显微镜对4种昆虫鞘翅断面进行了分析,结果显示其均由层状复合材料组成,星天牛鞘翅的纤维(束)形态有空腔结构、刺状结构、孔洞结构、螺旋结构;在花金龟鞘翅的纤维(束)形态有正交叠层结构、“T”型结构和分叉纤维结构;臭蛻螂鞘翅的纤维(束)形态有刺状纤维结构、网状结构、块状凸起结构;龙虱鞘翅的纤维(束)形态有空腔、孔洞结构。针对鞘翅材料的结构特点,总结层状复合材料模型、纤维模型,为轻质仿生复合材料的结构设计提供可供学习和效仿的生物模型。

周 怡等^[14]对东方龙虱鞘翅微观结构的分析,设计出了一种具有层状纤维缠绕方式的仿生轻质结构,制备出了仿鞘翅轻质结构模型,并利用有限元法对该结构模型进行数值分析,通过与单一普通树脂材料的相同结构比较可知,具有纤维缠绕层的仿生轻质结构的3种力学性能均明显优于普通树脂材料的相同结构。说明生物结构中存在这2种不同纤维缠绕方式是合理的,同时也为仿生轻质结构的设计与开发开拓了新思路。

3 昆虫鞘翅和外骨骼仿生复合材料研究现状

目前,国内仿生甲虫外甲壳结构复合材料的研究主要是针对其层状复合材料的层合方式、一级细观增韧结构等的仿生。研究的重点是甲虫外甲壳生物复合材料的层间连接方式、层间铺层结构和层内的纤维分布和形态等。通过优化的仿生结构设计达到复合材料的节约化、智能化、高强度、高模量等一系列优异的性能。

3.1 各种不同的仿生复合材料

3.1.1 “蜂窝—柱子”芯夹层复合材料。陈锦祥^[15]等通过对独角仙前翅内部结构的考察研究得到独角仙整个前翅内部存在完整的“网状—小柱”结构,其由气囊构成,它呈现出生物界不规则性多样化。但可认为大多为类似于蜂窝状的多边形,提出了一种“蜂窝—小柱”芯三层轻量型仿生复合材料结构,并可以改变夹芯层中网状“蜂窝”上的小柱根数分布位置和多边形形状,边数及其长短等达到多样化设计的目的。“蜂窝—柱子”芯轻量型仿生结构具有抗压强度高、抗扭曲力强等优点。期望能开发出更加丰富多彩的系列产品可用于从普通的马粉纸包装材料、建筑材料、隔音材料、透明采光板材直到航天航空的机体板材等方面。

3.1.2 螺旋铺层层状复合材料。陈 斌等^[16]通过光学显微镜、扫描电镜(SEM)研究昆虫金龟子和蝉的外甲壳,并进行人工复合材料的比较、强韧机理分析,分析昆虫外甲壳细观结构与其宏观力学性能的关系,为新型人工合成复合材料设计制造提供了借鉴。最后,仿其主要细观结构特征试制了仿生双螺旋铺层层合板,并进行初步研究。比较试验表明,仿生双螺旋铺层层合板比常规铺层层合板有更高的断裂韧性和强度。

3.1.3 异形纤维增强复合材料的研究。蔡长庚等^[17]考察了昆

虫甲壳中纤维形态,制备出仿生异形有机短纤维增强环氧树脂复合材料,并对其光弹性能和拉伸性能进行研究。结果表明,与平直短纤维复合材料相比,在环氧基体中加入凸端或竹节状的聚酰胺短纤维,不仅可以改变复合材料中的应力分布,有利于纤维末端的应力传递,而且能够提高短纤维复合材料的拉伸强度。

3.2 仿生复合材料孔洞结构研究

在对昆虫外骨骼的研究中发现,在表皮观察到的孔洞的形状是与周围的表皮材料同时形成的,从而使这些纤维保持连续性,即纤维没有断头而紧挨孔边绕过。与其相比较,增强复合材料孔洞结构是在部件做好后再钻孔或冲孔形成,从而损伤的纤维在孔洞的周边造成很大的应力集中。Gunderson用单向预浸料使用普通的复合材料加工方法做成预成形孔洞的样品织物,用试验比较了钻孔和预成形孔洞对增强复合材料层合板的极限强度和抗破坏性能的影响。结果显示,预成形孔洞样品比钻孔样品在孔洞的区域其极限强度、抗破坏性能和硬度都有显著的提高,提高强度达39%。预成形孔洞对减少应力集中的作用也是明显的。它有能力在低负荷水平下阻止垂直基体裂缝通过孔洞。预成形孔洞有复杂的破坏机理,其中“孔洞拉拨”破坏模式有助于提高强度和抗破坏性能,韧性也有提高。随后,陈斌等用玻璃纤维/环氧树脂做成仿生双螺旋铺层复合材料层合板,进行了断裂韧性测试和4个不同直径预成形孔洞样品的拉力测试,结果显示双螺旋结构层合板有更高的断裂韧性,预成形孔洞层合板有更高的极限强度,并且随孔洞直径的增大,极限强度的提高幅度也增大^[16,18]。

4 昆虫体表疏水性研究进展及在分子水平的仿生研究

昆虫体壁表面的微纳米结构特性,如自清洁、超疏水、定向浸润等是自然界中值得关注的复合材料之一。表面的润湿、疏水作为固体表面最常见的一类界面现象,一般通过液体与固体表面的接触角来衡量,接触角大于 150° 的表面称为超疏水表面。表面超疏水性由固体表面的化学成分与微观几何结构共同决定^[19]。通过分子设计制备高分子表面微米—纳米双重结构,利用聚合物在溶剂蒸发过程中自聚集曲面张力和相分离的原理,在室温和大气条件下一步法直接成膜,构筑类似荷叶微纳米双重结构的聚合物表面。得到了超疏水和疏油性质的仿生涂层水和油的接触角可高达 166° 和 140° ,具有与荷叶表面相似的自清洁效应,同时该仿生表面还具有类似荷叶的自修复功能^[20]。仿生表面最外层在被破坏的状况下仍然保持超疏水和自清洁的功能。但相对于其他固体材料而言,昆虫体表浸润性及疏水性的研究较晚。研究表明,昆虫体表的微纳米结构与其疏水性有很大的关系。长期以来,科学家们对生物表面的疏水性开展了大量的研究,在自然界中荷叶表面是具有疏水性质和自清洁功能的最典型例子之一。现代仿生学在微米—纳米尺度上正在进入分子水平上的模拟生物体系。人们主要对荷叶表面的超疏水性能(荷叶效应)进行了大量研究,借助扫描电子显微镜(SEM)发现荷叶表面有大面积的乳突结构,这些有微米大小乳突的表面还覆盖有纳米级的纤维状或片状精细结构。当水滴落在荷叶表面时,无法穿透这些微结构而

只能停留在乳突的顶端^[21]。Wagner et al^[22]选取了97种昆虫,研究昆虫翅膀上的润湿性、微观结构及它们在受污染时的变化,指出自清洁效应与SM指数(SM Index,翅膀表面积与身体质量的商)有密切关系,SM指数高的昆虫,疏水性能较强,水滴可以移除尘埃。2004年Cong et al^[23]和Chen et al^[24]对蝴蝶鳞片进行了超微结构观察。目前对蝴蝶鳞片表面纳米结构影响蝴蝶表面浸润性质的规律及其机制的研究仍然非常有限。房岩等^[25]利用扫描电子显微镜和视频光学接触角测量仪,对我国东北地区典型常见的6科24属29种蝴蝶翅膀非光滑表面的形态疏水性及疏水机理进行了研究,鳞片表面由亚微米级纵肋及横向连接组成,认为蝴蝶翅膀表面较强的疏水性(静态接触 $136.3^\circ\sim 156.6^\circ$)是翅膀表面微米级鳞片和亚微米级纵肋结构协同作用的结果。对Cassie方程进行修正,建立了新的数学模型及方程。在传统的仿生学设计上,常采用传统的材料合成方法去模拟生物体系。近年来,随着分子生物学、分子物理和纳米技术的发展,尤其是生物矿化在仿软体动物贝壳珍珠层制造仿生高强超韧性层状复合材料,及人体硬组织修复材料的分子仿生构建都是目前研究的热点问题^[26-27]。

仿生合成就是将生物矿化的机理引入无机材料的合成中,以有机物的组装体为模板,去控制无机物的形成,制备具有独特的显微结构的无机材料,使合成材料具有优异的物理性能和化学性能。生物大分子的自组装和纳米合成技术的联合应用,使仿生学研究进入了分子水平。对昆虫的体壁和翅从分子水平进行仿生合成及过程仿生,随着结构生物学的兴起,其在开辟合成新型材料途径方面的前景不可限量。

5 展望

以昆虫为研究对象的仿生学研究一直是国内外的研究热点,在体表微细结构与功能仿生领域,有一大批仿生高性能材料被开发和应用,但是目前还存在着许多问题需要深入研究。目前,现代仿生学越来越向更微观的层次发展,由于高分子材料在结构仿生学和功能仿生学领域都得到了非常广泛的应用,所以在对昆虫体壁及翅的仿生方面由高分子材料构筑各种仿生微器件,并用之组装不同结构和功能的仿生微系统将是今后研究的重点。在仿生学研究方面,要从不同层次、不同领域进行多层次、多方位研究。另外,仿生研究的数字化是通向仿生成功的必经阶段。总之,通过多方面努力,筛选评价具有完美结构和优越性能的昆虫资源,利用现代技术对其超微结构和工作原理进行细致研究,并把这种精巧的结构和功能的实现原理应用于新材料设计制造中,对获得接或超过昆虫天然材料性能的新材料,研制和改进具有特殊功能的机器设备有极其重要的理论和实际意义。

6 参考文献

- [1] 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.
- [2] 张迎春,张莹,郑哲民,等.4种昆虫鞘翅表面超微结构的比较[J].西北大学学报:自然科学版,2001,31(6):522-524.
- [3] WATSON G S, WATSON J A. Natural nano-structures on insects pos-

(下转第272页)

素 2 g 和诺氟沙星 1.5 g,1 个疗程为 5 d。二是红斑病。该病的发病症状为头部、尾部出现出血性红斑,导致该病发生的原因是细菌感染。治疗的方法是避免长期不换水,天气炎热或者周围环境较差时增加换水次数;用 0.3~0.6 mg/kg 二氧化氯消毒,连续使用 2 d。

2 养殖效益

2.1 收获情况

该养殖场 2009 年开始养殖乌塘鳢,养殖周期一般为 5—6 月投放规格为 3~4 cm 的苗种,在翌年 2 月即可以开始收获。养殖周期一般为 8 个月,收获时平均尾重 175 g 左右,最大规格 220 g,成活率可达 90%左右。2009—2011 年乌塘

鳢收获情况如表 1 所示。

表 1 2009—2011 年乌塘鳢收获情况

年份	投苗量 尾	收获尾数 尾	单尾重 g	总重量 kg	成活率 %	平均价格 元/kg
2009	10 000	8 850	185	1 637	88.5	125
2010	12 000	10 596	175	1 854	88.3	120
2011	13 000	11 895	180	2 141	91.5	110

2.2 经济效益分析

乌塘鳢养殖成本、收入核算及经济效益如表 2 所示。2009—2011 年养殖乌塘鳢的盈利分别为 122 641、130 740、135 291 元。其中,2011 年的盈利最大,投入与产出的比例为 1:1.35。

表 2 2009—2011 年乌塘鳢养殖效益

年份	总收入 元	成本//元							盈利//元	投入与 产出比
		苗种	饲料	池塘租金	工资	药物	水电	其他		
2009	204 625	19 200	26 784	6 500	18 000	2 000	6 000	3 500	122 641	1:1.50
2010	222 480	21 600	32 140	6 500	20 000	2 500	6 000	3 000	130 740	1:1.42
2011	235 510	23 400	34 819	6 500	24 000	2 500	6 000	3 000	135 291	1:1.35

3 注意事项

(1)高温不利于乌塘鳢的生长。为了使乌塘鳢适应高温和曝晒的养殖条件,要增加鱼池池水的深度和换水的频率,同时还要放置更多的隐蔽物,以便鱼分散栖息。在冬季,当水温低于 15 ℃时,乌塘鳢一般不出来觅食。当温度低于 10 ℃时,会出现死亡现象。为了使乌塘鳢健康生长,顺利越冬,在冬季之前,要加强营养肥。

(2)隐蔽物的选择在养殖过程中起到较大的作用。使用直径 75 mm、长度 65 cm 的 PVC 管作为隐蔽物,由于其内外壁均光滑,所以方便乌塘鳢的栖息,也不会损害鱼体。捕捉时,只需排干池水,捂住塑料筒两头,即可方便地捕捉到乌塘鳢。

(3)目前在国内销售的乌塘鳢主要以活鱼为主,一般要求规格在 150~200 g,而乌塘鳢在养殖过程中生长速度不平均,生长速度较快的在 11 月就能达到 150 g 以上,可适当挑选先达到规格的先上市,但此时价格比较低;剩余的乌塘鳢可以继续养殖,待越冬后,可以继续喂食以达到上市规格,一般到翌年 5—6 月,乌塘鳢的市场价格比较高,即可出售。

4 参考文献

[1] 沈康强.中华乌塘鳢养殖方法[J].农家科技,2012(3):42.
 [2] 林振伟.中华乌塘鳢池塘无公害高产养殖技术[J].养殖与饲料,2010(6):14-15.
 [3] 林振伟.中华乌塘鳢苗种健康培育技术[J].中国水产,2010(4):56.
 [4] 钟恒.中华乌塘鳢高产高效养殖技术[J].广西水产科技,2009(2):39-41.
 [16] 陈斌,彭向和,范镜泓.生物自然复合材料的结构特征及仿生复合材料的研究[J].复合材料学报,2000,17(3):59-62.
 [17] 蔡长庚,许家瑞.异形有机短纤维增强环氧树脂复合材料拉伸性能的研究[J].纤维复合材料,2002,19(4):10-13.
 [18] GUNDERSON S L,LUTE S L J A.The use of preformed holes for increased strength and damage tolerance of advanced composites[J].Journal of Reinforced Plastics and Composites,1993,12(5):559-569..
 [19] 傅爱红,李春福.超疏水表面的研究进展及制备技术[J].材料导报,2012,26(9):46-51.
 [20] 徐坚.自清洁功能的高分子仿生表面研究取得新进展[J].中国科学院院刊,2005,20(1):45-48.
 [21] 杜晨光,夏帆,王树涛,等.仿生智能浸润性表面研究的新进展[J].高等学校化学学报,2010,31(3):421-431.
 [22] WAGNER T,NEINHUIS C,BARTHLOTT W. Wettability and contaminability of insect wings as a function of their surface sculptures[J].Acta Zoologica:Stockholm,1996,77(3):213-225.
 [23] CONG Q,CHEN G H,FANG Y,et al. Study on the super-hydrophobic characteristic of butterfly wing surface[J].J Bionics Eng,2004,1(4):249-255.
 [24] CHEN G H,CONG Q,FENG Y,et al. Study on the wettability and self-cleaning butterfly wing surface[M]//COLLINS M,BREBBIA C.Design and Nature II. Boston:WIT Press,2004:245-252.
 [25] 房岩,孙刚,王同庆,等.蝴蝶翅膀表面非光滑形态疏水机理[J].科学通报,2007,52(3):354-357.
 [26] 孙娜,吴俊涛,江雷.贝壳珍珠层及其仿生材料的研究进展[J].高等学校化学学报,2011,32(10):2231-2239.
 [27] 沈军,李全利,唐旭炎,等.壳聚糖-磷酸化壳聚糖聚电解质复合物水凝胶的组装与仿生矿化[J].中国组织工程研究与临床康复,2010,14(47):8814-8817.

(上接第 268 页)

sible function of ordered arrays characterized by atomic force microscopy [J].Appl Surf Sci,2004,235(2):139.
 [4] VINCENT J,WEGST U.Design and mechanical properties of insect-cuticle[J].Arthropod Structure and Development,2004,33(3):187.
 [5] GORB S N.Walking on the ceiling:structures,functional principles,and ecological implications[J].Arthropod Structure and Development,2004,33(1):1.
 [6] 樊健美.甲虫鞘翅结构仿生材料的应用基础研究[D].杭州:浙江理工大学,2005.
 [7] HEPBURN H B,BALL A.On the structure and mechanical properties of beetle shells[J].Material Science,1973,8(5):618-623.
 [8] GUNDERSON S,SCHIAVONE R.The insect exoskeleton;a natural structural composite[J].JOM,1989,41(11):60-62.
 [9] 向春霖,范镜泓.自然复合材料的强韧化机理和仿生复合材料的研究[J].力学进展,1994(2):220-231.
 [10] 陈斌,吴新燕.金龟子外壳纤维结构分析[J].材料科学与工程学报,2006,24(5):683-686.
 [11] 陈锦祥,倪庆清.甲虫前翅中的三维复合材料结构[J].复合材料学报,2003,20(6):61-66.
 [12] 陈锦祥,倪庆清,徐英莲.甲虫前翅结构中的优化设计[J].复合材料学报,2004,21(5):88-92.
 [13] 张伏,佟金,周江,等.中国农业工程学会学术年会会议论文[C].山西:[出版者不详],2009.
 [14] 周怡,郭策,朱春生,等.具有层状纤维缠绕的仿甲虫鞘翅轻质结构的设计及其力学性能分析[J].中国机械工程,2011,22(16):1069-1073.
 [15] 陈锦祥,倪庆清,李庆,等.“蜂窝-柱子”芯夹层轻量型仿生物复合材料结构[J].复合材料学报,2005,22(2):103-108.