甲虫前翅仿生应用基础研究二十年: 内部结构、模型及其一体化蜂窝板

陈锦祥^{1,2*}

1. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096;

2. Department of Mechanical and Biofunctional Systems, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Tokyo 153-8505, Japan

* E-mail: chenjpaper@yahoo.co.jp

收稿日期: 2017-07-04; 接受日期: 2018-02-01; 网络版发表日期: 2018-06-06

摘要 回顾了笔者从事甲虫前翅仿生研究20年的历程: 前期(1997~2007年)主要指出了甲虫前翅具有以小柱为中空层的轻质变截面边框结构, 由此可获得所需的抗弯模量和转动惯量; 独角仙前翅为非等角的叠层结构、具有异方性的拉伸强度; 首次获得了整个前翅小柱的分布状态; 实施了前翅的剥离实验, 实证了小柱根部具有将剥离破坏转换成纤维拉伸断裂的作用, 从而具有很强的抗剥离力学性能; 同时提出了以蛋白质为芯的小柱模型和(空心)小柱-蜂窝三维结构模型, 阐明了雌雄独角仙和锹形虫前翅结构的不同设计手法及其生物学意义. 中期(2008~2015年)主要开发了一体化蜂窝板的制备技术; 提出了完全一体化蜂窝板的概念与模型; 定性地考察了多体成型、短切增强纤维长度、工艺小孔及其小柱对仿生样品力学性能的影响规律; 初步证实了仿生一体化蜂窝板的优越性. 最后在指出了前期研究成果对同行的影响、中期研究中存在问题的同时, 简介了最新(2015~2017年)的研究进展. 不仅全面验证了笔者最初对甲虫前翅具有轻质高强结构的推理, 而且也充分显示了仿生学的价值和意义所在.

关键词 甲虫, 独角仙, 前翅, 轻质结构, 蜂窝

1 前言

仿生研究是一个十分热门的研究方向^[1~4]. 就甲虫前翅的仿生情况而言, 在国外, 早在19世纪后期, Comstock和Needham^[5]就对甲虫前翅结构作了报道, 并给出了以横隔梁为芯层的断面结构图. 在20世纪, Powell^[6], Gokan^[7]和Mitsuo等人^[8]指出了前翅内有气囊、气管, 昆虫皮肤内有表皮柱等结构^[6~8]; Neville和Caveney^[9], Caveney^[10], Schultz和Rankin^[11], Parker等人^[12]探

讨了鞘翅光学尺度的微观结构与结构色及其影响机理; Zelazny等人^[13~19]报道了甲虫前翅中由几丁质纤维和蛋白质组成的天然复合材料叠层结构及其力学性能; Fiori^[20]报道了前翅断面结构及其左右翅的对接凹凸结构. 到了21世纪, 除了继续对前翅的结构色^[21], 三维结构及其力学性能^[22~24]等进行深入研究之外^[25], Parker等人^[26]报道了沙漠甲虫*Stenocara*表面具有特殊的集水功能, Lomakin等人^[27]报道了前翅的表面硬度和储能模量等性能.

引用格式: 陈锦祥. 甲虫前翅仿生应用基础研究二十年: 内部结构、模型及其一体化蜂窝板. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 701-718

Chen J X. Biomimetic research on beetle forewings in twenty years: Internal structure, model and integrated honeycomb plates (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 701-718, doi: [10.1360/N092017-00208](https://doi.org/10.1360/N092017-00208)

在我国, 1933年张巨伯曾创建了《昆虫与植保》¹⁾, 但直到20世纪80年代有关甲虫的研究还是以新物种的发现^[28,29], 即以根据鞘翅表面的微细结构对甲虫进行分类为主^[30,31]. 到了20世纪90年代, 特别最近的二十多年中, 甲虫结构及其仿生的研究报道快速增加. 以吉林大学任露泉院士为代表, 对甲虫鞘翅表面结构、硬度及其在仿生推土板等中的应用进行了系列性的研究^[32-35], 并在2004年创办了英文科技期刊《仿生工程学报》²⁾; 重庆大学向春霆^[36,37]对鞘翅的微细结构进行了开创性的研究^[38-40]; 陕西师范大学张迎春等人^[41-43]对甲虫鞘翅表面微细结构进行了较为详细的论述; 南京航空航天大学戴振东团队^[44-50]对甲虫鞘翅的锁合机构和仿生小柱模型的防撞性能等进行了实验研究; 现吉林大学的吴薇^[51]和孙霁宇^[52]、上海师范大学刘锋等人^[53-55]、江苏大学袁伟^[56]对前翅结构色及其应用等作了深入的研究. 最近, 北京航空航天大学的向锦武等人^[57]报道了瓢虫前翅的物质构成、表面形态以及内部结构.

笔者自1997年开始了仿生甲虫前翅轻质复合材料的研究开发工作^[58-60], 当时博士课题选择甲虫前翅作为仿生研究对象的理由, 主要是基于以下3方面的推理^[60]: (1) 甲虫前翅需要兼具飞行及保护身体的作用; (2) 甲虫种类繁多, 通过探明各种甲虫的共同特征及其各自的特色, 均可获得仿生的优化设计启示; (3) 甲虫的进化过程漫长, 优化程度应该很高. 即在其后出版的论文中经常提及甲虫的进化时期长、种类多^[61], 其前

翅起着保护躯体和飞行的双重作用, 应该具有优化程度高、设计手法多样和轻质高强的特征^[62]. 这20年中笔者前期(1997~2007年)主要对前翅结构及其力学性能进行了研究^[60,63-65], 并提出了前翅及其小柱的三维结构模型^[60,66-68]. 中期(2008~2015年)主要开发了仿生一体化蜂窝板的仿制技术^[69-71], 并对仿生一体化蜂窝板样品的力学性能进行了研究. 最近则对国内同行的研究进行了较为系统的综述^[72,73], 并对甲虫前翅小柱蜂窝结构的抗压机理及其吸能防撞性能进行了研究. 限于篇幅, 本文主要阐述前期和中期的研究成果及其对国内同行的影响情况.

2 前期: 前翅微细结构、模型及其力学性能

1997~2007年间³⁾主要考察了独角仙(*A. dichotoma*)及其锹形虫(*P. inclinatus*)前翅截面(图1和2)^[64]、面内纤维(图2(b), ☆)的层铺方式^[63]和小柱(图2(b), 宽箭头)结构及其各自的力学性能^[67,68]. 在提出小柱和前翅三维结构模型的同时, 通过对两种不同甲虫及其雌雄独角仙前翅结构的对比, 综述了各自的设计手法及其生物学上的意义^[74,75].

为了便于读者更好地理解本节的内容, 在此先给出了向春霆^[36,37]对甲虫前翅微细结构的六阶分级标准. 即: 一阶, 以夹芯为特征; 二阶, 以层合为特征; 三阶, 以顺时针双螺旋铺层为特征; 四阶, 以纤维的条片结构为特征; 五阶, 以骨牌排列为特征; 六阶, 以几丁质原纤维

图1 (网络版彩图)仿生的甲虫及其三维坐标. (a) 雄独角仙; (b) 雌独角仙; (c) 锹形虫; (d) 前翅坐标位置及其代号. 图中△: 前翅, ☆: 后翅

1) http://www.gmw.cn/content/2005-06/09/content_248501.htm (Oct. 6th 2014)

2) <http://www.jlu.edu.cn/info/1111/35688.htm> (Oct. 6th 2014)

3) 主要为作者攻读博士学位期间(包括预备期, 即1997-10~2001-03, 博士论文完成于2000年12月^[60])

图 2 (网络版彩图)甲虫前翅的主要结构示例. (a) 锹形虫前翅Y3处的断面全景正视图; (b) 断面中上下面板中的纤维层及小柱. ☆: 纤维层; 宽箭头: 小柱. Lu, Ld, Lv和T分别为前翅上层面板、下层面板、芯层和总厚度

包含于基质形成单个骨牌的细观结构为特征. 本节主要围绕前三阶的结构特征, 即以“小柱”为芯层的夹心和纤维层叠结构为主线索, 按纵(即图1中的XZ断面)、横(即XY斜切面)及其纵横交叉(三维空间结构)的空间顺序进行阐述.

2.1 甲虫前翅的纵横剖面结构及其力学特征

2.1.1 纵向剖面

图3以锹形虫为例, 给出了甲虫前翅的断面结构及上下层和芯层的厚度分布情况^[59,64]. 由图3可知, 锹形虫中央部的平均空隙率不到30%^[59]. 但不同种类间的前翅, 其结构尺寸可能相差很大, 如独角仙相应的空隙率约在50%(雌: 45%; 雄: 60%)^[60]. 对同一种甲虫, 其空隙层厚度也因前翅位置不同而可能有较大差异; 特别是前翅左右两端的空隙都要比中间大得多, 如独角仙平均要大3倍以上^[59]. 陈锦祥等人^[59]称具有这种断面特征结构为“边框结构”, 而且前翅在不同的位置具有不同的截面形状——边框结构截面形状是变化的(图4(a)和(b)). 特别是左右翅联接处啮合的结构因Y轴上不同的位置(如Y3和Y2)而异, 但均是具有凹凸的对接结构(图4(a)), 并指出这是一种巧妙的对接结构^[59]. 图4(c)给出了锹形虫前翅边框简易模型及其对通过形心X轴的惯性矩 I_x . 由图4可见, 离前翅根部越近(Y3处)

I_x 越大, 且增幅明显, 这和根部通常需要承受更多的弯曲外力作用一致; 不仅如此, 甲虫的边框结构参数对于前翅中的回转轴(图4(c), o_x-o_y)而言^[59], 能获得较为均匀的极惯性矩. 因此前翅这一变截面边框结构能满足甲虫飞行^[76-78]所需抗弯和抗扭的强度要求^[59].

2.1.2 横向剖面

通过与前翅横向略为倾斜的角度切开前翅, 可观察到雄性独角仙前翅Y2附近的纤维叠层结构(图5(a)和(b))^[60,63]. 可见, 相邻各层之间的夹角并不相等(非等角), 最大约为90°、最小约为65°, 多数分布在72°~80°之间. 对雄性独角仙新鲜前翅的4个不同方向(图5(b), ω 为0°, 45°, 90°和135°)的拉伸实验结果表明: 在拉伸应力-应变曲线和断口破坏形态可分为type I和II两类(图5(c)和(d))^[63]. 其中, type I中的纤维已经完全断裂(图5(d1), ☆), 因而拉伸应力达到一定值后突然减少, 而type II则留有斜向的、没有断裂的架桥纤维(图5(d2), Δ), 因而应力不是骤然减少^[63].

下面阐述前翅拉伸断裂强度与纤维叠层方向及其断口形貌之间的关系^[63]. 图6(a)为每个样号的平均断裂强度及其断口形貌中type I所占比例, 图6(b)为独角仙前翅纤维叠层在任意方向 ω (图5(b))上的平均取向度 η 大小及其此时与Y轴的夹角 θ . 由图6可见, 在 $\omega=0^\circ$

图 3 (网络版彩图)锹形虫前翅纵向断面的结构情况. (a) 电子显微镜照片^[60,75]; (b) 各层的厚度分布情况^[59]

图4 (网络版彩图)锹形虫前翅边框结构^[59,60]. (a) 左右翅对接处的凹凸啮合结构; (b) 外侧; (c) 通过形心的 X 轴的惯性矩 I_x 值

图5 (网络版彩图)雄性独角仙前翅的纤维叠层结构及其前翅拉伸试验结果^[60,63]. (a) 几丁质纤维距表面的层数(经KOH溶液处理); (b) 各层纤维方向(11张照片平均值); (c) 应力-应变曲线; (d) $\omega=0^\circ$ 及 135° 的断面形貌

$\sim 25^\circ$ 这一较大的区间内, η 值均接近最大值(图6(b)), 而此时实验样品中的平均纤维排列方向与拉伸方向的夹角 θ 小, 因而样品断裂时不容易产生架桥纤维, type I所占的比例高, 具有较高的拉伸强度(图6(a))^[60,63], 而 $\omega=90^\circ$ 时则正好相反(图6(a)和(b)). 据此圆满地解释了断裂强度按 90° , 135° , 45° 和 0° 的顺序增加的现象. 那么独角仙前翅采用纤维非等角排列方式的意义何在? 对此, 也可通过分析前翅飞行状态得到解答. 图6(c)给出了独角仙右前翅中各层纤维叠层方向与纤维整体的相互位置关系及其飞行时前翅的展翅状态, 并给出了前翅支撑点与前翅尾部凸起处的连线—回转轴. 可见, 回转轴与前翅的 Y 轴之间成一微小的角度, 而此时轴向的强度处在最大区间内(图6(b)). 由此, 我们有理由认为, 雄性独角仙前翅通过非等角纤维的排列方式既获得较大的轴向(拉伸)强度, 同时兼顾了与其垂直及其

斜向所需要的强度^[60,63]. 此外, 图5(d)的叠层1和2之间的纤维恰好成直角相交, 这与人们绘图时, 先确定一直角坐标⁴⁾不谋而合.

2.2 甲虫前翅的三维结构、模型及其力学性能

本节重点阐述甲虫前翅小柱的微细结构、小柱在前翅的分布情况、前翅的三维结构模型及其抗剥离力学性能.

2.2.1 甲虫前翅的芯层微细结构及其模型

独角仙和锹形虫前翅内部芯层中结构分别如图7和8所示. 可见独角仙小柱细长而锹形虫则粗短, 同时独角仙还具有蜂窝结构(图7(b))^[60]. 利用KOH溶液对前翅进行了煮沸, 去除小柱表层的蛋白质后可知, 小柱最外层纤维有沿轴向成直线排列的(图7(c), 右侧柱), 也

4) [http://en.wikipedia.org/wiki/Coordinates_\(mathematics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Coordinates_(mathematics))(Oct. 6th 2014)

图 6 (网络版彩图)独角仙前翅拉伸强度的异方性及其分析^[60,63]. (a) 各方向的拉伸断裂强度及其type II断口的样品比例; (b) 参数 η 和 ω 之间的关系及其四个取样方向的 θ 值, 其中, β_i 为样品内第 i 层纤维夹角; (c) 纤维叠层方向在前翅中的定位及其飞行时的回转轴

图 7 独角仙前翅中的内部结构^[60]. (a) 小柱外形; (b) 小柱与蜂窝结构; (c) 表面纤维的排列方式. 其中, (c)为经10% KOH溶液煮沸处理的样品

有按螺旋方式排列的(图7(c), 左侧柱); 甲虫小柱在经 KOH溶液处理前为实心柱(图8(a)), 但处理后因蛋白质被强碱溶解就成了空心柱(图8(c), 细箭头)^[60]. 锹形虫前翅小柱微细结构的简易模型如图8(d)所示^[60].

两种甲虫的前翅经KOH溶液处理的相机照片如图9(a)和(b)所示, 由图可见, 甲虫前翅内小柱(图中的小黑点)的密度因甲虫种类不同而有很大差异: 锹形虫

约为独角仙的6倍^[79]. 但不管怎样, 结合图7(b)的蜂窝结构, 笔者在2000年就提出了如图9(c)所示的具有小柱-蜂窝为芯层的独角仙前翅三维简易结构模型^[60,80], 并于2003年给出了空心小柱-蜂窝芯三夹板的概念与模型^[81], 此模型成了我国多所大学硕士研究生课题的原始模型^[50,82,83].

顺便指出, 笔者还从生物学的角度对雄性独角仙

图 8 (网络版彩图)锹形虫前翅中的小柱结构及其模型^[60]. (a) 小柱纵向剖面图; (b) 小柱上层根部纤维的三维空间排列方式; (c) 小柱的破坏断口; (d) 小柱组成及其纤维排列方式的简易模型. 其中, (b), (c)为经10% KOH溶液煮沸处理的样品

图9 (网络版彩图)甲虫前翅中的小柱分布情况((a), (b))及其简易模型((c), (d))^[60,80]。(a), (b) 锹形虫和独角仙的前翅(经10% KOH处理); (c) 独角仙前翅的三维结构模型, 其中, A~G为小柱, Tc为气管, I为外表皮, II为内表皮, 点画线代表蜂窝结构, (d) 笔者2003年提交发明专利中的空心小柱模型显示图^[81]

和锹形虫以及雌雄独角仙前翅间结构上的差异作出了如下推测: 锹形虫有的能够越冬^[84], 存活数十个月, 而独角仙只存活不超过2个月, 据此可形象地称锹形虫前翅为“耐用品”, 而独角仙前翅为一次性的“消耗品”^[79]。因此, 从保护身体的角度而言, 锹形虫前翅是耐久型结构^[79], 设计手法主要是量的变化(小柱直径粗, 密度大, 上下层厚及其层间为等角叠层); 而独角仙为经济型结构^[79], 采用了不少巧妙和独特的设计手法来达到轻量化的目的, 如蜂窝结构、(雄性)非等角的叠层结构, 以及小柱上粗下细结构^[60,64]。对于雌雄独角仙之间的差异, 雄性的体重和体形, 包括前翅尺寸比雌性显著增大, 但前翅重量却有所减少^[65,75]; 同时雄独角仙可凭借头上长的“独角”进行攻击或保护身躯, 因此其前翅结构很是单薄^[65]。与此不同, 雌独角仙身负繁衍后代的重任, 没有可用来保护的大角, 就只能靠前翅保护身躯^[79]。因此, 雌独角仙前翅的断裂负荷及前翅厚度

显著增大(增幅均在25%以上)^[61], 从而具有比雄性独角仙更加坚实的前翅结构。

2.2.2 前翅中小柱对叠层复合材料的三维强化机理

众所周知, 纤维强化复合材料^[85~87]作为一种轻质高强材料得到了广泛的应用, 但常见的层叠式纤维强化复合材料, 存在层间容易剥离的缺点, 为了考察前述小柱对提高层间的抗剥离性能所起的作用, 在鲜活的独角仙前翅上取下宽度为2.1 mm的细长样品, 实施了甲虫前翅的剥离实验^[67]。图10(a)为剥离表面的电子显微镜照片, 其剥离破坏形貌可分为3类: 小柱根部基本保留(图10(a1))、完全被剥离(图10(a3))及介于这两种之间(图10(a2))^[67]。图10(b)为前翅剥离实验曲线的理想模型, 图中的波峰是由于小柱中的纤维被拉断而引起的, 平坦部分是由几丁质纤维层间的黏结力所造成, 据此可以求得有小柱和没有小柱相比时的抗剥离强化

图10 (网络版彩图)独角仙前翅下层层内的剥离实验结果。(a) 小柱根部的三类破坏形貌^[67]; (b) 假设沿剥离方向只有一列小柱时, 剥离曲线的理想模型, 横轴为试验片被剥离的长度, 纵轴为总剥离力

倍数^[67]. 就独角仙而言强化倍数平均为3倍左右^[67], 可见小柱结构可以极其有效地提高纤维强化复合材料层间的抗剥离性能.

此外, 根据剥离实验中的电子显微镜照片(图11(a)), 建立了二维几何模型(图11(b)), 对剥离先端的主应力状态进行了有限元分析(图11(c)和(d)). 由图可知, 与无小柱(图11(c), $\triangle$)相比, 有小柱时剥离先端应力集中的程度显著减少(图11(d), $\triangle$). 由此可知小柱通过面板层中的纤维与小柱之间的钝角结构(图8)能有效地分散前翅剥离先端的应力集中^[68]. 同时, 在剥离过程中这一钝角不断增大(趋向于 180°), 将小柱与面板中原来接近成 90° 角的纤维(图8), 通过剥离变成了纤维的拉伸断裂(图11(b)), 从而极其有效地提高层间的抗剥离性能.

总之, 通过前期对甲虫前翅的结构及其力学性能的研究结果表明, 无论是从纵向、横向还是纵横交叉的三维结构空间上看, 甲虫前翅均具有优秀的生物结构及其力学性能. 即纵向为“中空+边框”的夹层结构, 具有轻质高强的特征, 能满足甲虫飞行所需抗弯和抗扭的强度要求; 在横向的纤维层铺方式上, 超轻的独角仙前翅将“好钢用在刀刃上”、采用非等角的方式,

而坚实的锹形虫则采用了简便的等角排列方式; 纵横交叉的三维结构空间由小柱结构支撑、独角仙还辅有蜂窝结构. 前翅不仅拥有数以千计的小柱, 而且小柱中心部为蛋白质, 小柱周围的纤维与上下层连续相连, 为完全一体化的蜂窝板. 可见, 前翅的结构非常精巧和复杂, 这也成了我们仿制它的难点所在. 由于在其后的7年间, 笔者先后就职于日本宇宙航空研究机构和东京大学, 从事了与仿生无关的研究工作. 因此尽管笔者在2000年博士学位论文中就已经提出了独角仙前翅结构模型(图9(c), 图中虚线为蜂窝结构), 直到2008年回国后的次年才开发了仿制前翅三维结构的一体化仿生蜂窝板的成型技术^[70,71], 进入了如下所述的中期研究.

3 中期: 一体化仿生蜂窝板的开发

2008~2015年间, 开展了以一体化仿生蜂窝制备技术和力学性能测试分析为中心的研究. 图12(a)~(c)为最初想到一体化蜂窝板模具时的概念图. 其中, 图12(a)和(b)为所用的阴模和阳模, 图12(c)为其组合图; 图12(d)和(e)则为样品效果图和第一块样品照片.

图 11 前翅剥离过程的建模及其有限元解析. (a) SEM照片^[68]; (b) 有限元模型; (c), (d) 剥离先端的主应力分布, 其中, (c)为无小柱, (d)为有小柱情况

图 12 一体化仿生蜂窝板的制备模具^[70]. (a) 阴模; (b) 阳模; (c) 阳模与阴模的组合; (d), (e) 样品效果图及样品. 空心箭头: 小柱或形成小柱所需的空间; 白色箭头: 蜂窝壁或形成它所需的空间; 星号: 定位孔或定位块

操作流程为先用石蜡制作阳模, 预装于阴模中, 在阴模中加入玄武岩纤维和环氧树脂基的混合物, 经低温固化成型, 最后通过加热熔化去除阳模即可得到样品^[70]. 只是生物结构非常优秀, 现阶段无法一步仿制到位, 最初的样品(图12(e)), 不仅存在样品中纤维含量低、成型时间长等缺点, 而且只能用短纤维替代原来生物中的长纤维, 在一侧蜂窝板上也会留下一些工艺小孔. 尽管这一甲虫前翅仿生样品还存在以上问题, 但它为制备仿生一体化蜂窝板提供了一个全新的技术平台^[69,70].

中期以这一平台为基础, 针对最初样品制备工艺上的缺点(纤维含量低、成型时间长)进行了改进; 考察了用短纤维替代生物中长纤维时的仿制效果, 定性地分析了一体化与多体成型蜂窝板力学性能上的差异^[88,89], 首次提出了完全一体化蜂窝板的概念并考察了工艺小孔和蜂窝板中小柱对弯曲力学性能的影响情况, 探明了其具有抗弯曲力学性能好等特征^[90]. 下面按如下3个方向进行综述.

3.1 制备工艺与用短纤维替代长纤维的仿制效果

为节约时间和经费, 同时让研究结果更加具有针

对性, 以玄武岩纤维增强树脂基体复合材料的小柱为实验样品, 测定了其剪切和压缩力学性能. 在此基础上, 结合样品破坏的微细结构, 探讨了如何克服前述纤维含量低, 成型时间长等缺点的问题^[88], 并考察了用短纤维替代长纤维所仿制蜂窝板的仿真效果及其力学特性^[89].

通过对制备工艺的研究, 得到了一套可供制备一体化蜂窝板使用的基体材料配比及工艺条件: 环氧树脂(E51)、固化剂(593)和稀释剂(501)的配比为10:3:1; 并通过提高固化温度, 即: 先60℃恒温预固化2 h, 脱模后再150℃固化处理1 h等措施, 预期可得到纤维含量高, 剪切和压缩性能良好, 加工效率高的一体化蜂窝板^[88]. 据此可制备纤维的体积含量可高达30%(质量比约50%)玄武岩短纤维增强树脂复合材料, 并将成型时间缩短到原来的1/3^[88].

对于用短纤维替代长纤维所仿制蜂窝板的仿制效果(图13). 结果表明, 压缩和剪切强度的仿制效果约为80%和70%(图13(a)); 在抗压刚度上, 仿制效果约为85%; 在剪切第I和第II阶段的抗剪刚度上, 分别在90%和200%以上(图13(b))^[89]. 究其原因, 因长纤维小柱中

图13 (网络版彩图)纤维增强复合材料小柱的载荷-位移曲线^[89]. (a)~(c) 压缩; (d)~(f) 剪切. (a), (c), (d) 长纤维; (b), (e), (f) 短纤维

的纤维比短纤维整齐、取向度好, 在抗压刚度和抗剪切第Ⅰ阶段刚度上, 分别约有15%和不到10%的差距; 至于抗压和抗剪刚度, 由于初始阶段纤维和树脂都处在弹性的小变形阶段内, 它们作为一整体变形, 纤维的增强作用还没有体现出来, 所以长、短纤维小柱之间差异不大^[89]. 而在短纤维的剪切第Ⅱ阶段, 与剪切荷载垂直的纤维参与抵抗横向剪切荷载时, 它们与剪切荷载成一定角度或平行排列, 以受拉的形式发挥作用. 我们知道纤维拉伸的力学性能远比抗剪强度好, 因此尽管总体上长纤维增强复合材料较短纤维增强复合材料具有更好的增强效果, 但其第Ⅱ阶段的刚度反而比短纤维差^[89]; 这一结果也从小柱的剪切断口形貌上得到佐证. 由此可知, 短纤维小柱在抗剪切刚度上反而比长纤维更具优势, 为一体化仿生蜂窝板的应用提供了新的线索.

3.2 一体化与多体成型仿生蜂窝板的力学性能

为了探讨一体化蜂窝板的力学性能, 利用蜂窝板有两个面板的特点, 设计了一块蜂窝板中既有多体成型, 又有一体化成型的样品. 即由图14(a)所示的模具制备下面板与芯层一体成型的部分, 由图14(b)所示

的模具制备上面板, 它们之间通过黏接得到单侧一体化蜂窝板^[90]. 通过对其力学性能的测试, 破坏界面是否发生在黏接层, 即可比较多体和一体化这两种不同制备方法所获得的蜂窝板力学性能的强弱.

研究结果表明^[90], 单侧一体化蜂窝板在压缩过程中也可分为弹性、弹塑性、塑性和压实这4个阶段. 但因其蜂窝壁厚且有强化小柱, 因此在过了屈服点后, 负荷下降的幅度不到10%, 具有即便发生蜂窝芯破坏, 也不至于出现突然压溃的力学特性; 单侧一体化蜂窝板的弯曲破坏模式可分为上面板和芯层的胶接层脱胶(图15(c)) and 下面板断裂(图15(d))两类^[90]. 其中前者是由于界面中存在缺陷或较薄弱环节所造成的上面板与芯层剥离的现象. 后者出现在上面板与芯层胶接质量好, 破坏出现在下面板上. 其破坏时的曲线为载荷最大的2号曲线(图15(e)), 不难理解, 这是因为胶接质量良好时, 上面板与芯层形成整体变形, 蜂窝板最终是由下面板拉应力达到抗拉强度而发生面板断裂破坏. 反之, 面板与芯层的胶接面先于面板发生脱胶破坏, 不能充分发挥夹层结构比强度及比刚度高的作用, 破坏载荷均明显下降^[90]. 可见一体化蜂窝板不存在面板-芯层胶接面, 最终破坏由材料破坏控制, 实验证实了它具有能够很好

图 14 (网络版彩图)单侧一体化蜂窝板的模具^[90]. (a) 下面板与芯层一体成型的模具; (b) 面板成型模具. 其中, 两模具均有盖板, 盖板压入模具内腔的深度、即面板厚度由白色箭头所指的预留凸边决定, 红色线圈所示为脱模用的圆形顶针装置

图 15 (网络版彩图)单侧一体化蜂窝板的弯曲实验结果^[90]. (a), (b) 样品黏接前的内部结构; (c), (d) 破坏形态; (c) 侧视图, 黏接处剥离破坏; (d) 俯视图, 下面板破坏; (e) 弯曲载荷-位移曲线

地发挥材料的性能, 抗弯曲力学性能好的特点。

3.3 一体化仿生蜂窝板力学性能的实证研究

根据甲虫前翅具有连续变截面边框结构的特征, 笔者在2012年又提出了带天然封边的、完全一体化的小柱-蜂窝芯夹层板的三维模型(图16(a))^[71]。图16(b)和(c)为完全一体化蜂窝板(以下简称一体化蜂窝板)的制备模具及其样品。由此可知, 一体化蜂窝板的生物原型应该是甲虫前翅, 而不是人们常识的“蜂窝”^[71]。这不仅为仿生学和蜂窝板领域增加了一个有趣的、意味深长的话题, 而且为制备各种组装式的轻质仿生结构复合材料开辟了新的途径^[71]。本节就阐述一体化蜂窝板弯曲及其压缩力学性能。

3.3.1 工艺小孔对一体化仿生蜂窝板弯曲性能的影响

图17为有孔面朝上和朝下时蜂窝板的破坏形态。

不论小孔的朝向如何, 破坏均发生在下面板(图17, 上排)^[91]。从侧面看, 有孔面在上时, 裂缝破坏形态多为上下贯穿的裂缝, 且形态较为复杂的“S”形裂缝(图17(c)), 而有孔面在下时则以相对简单的“T”形较多, 也有非贯穿型裂缝(图17(d))^[91]。一体化蜂窝板三点弯实验结果也表明, 有孔面朝上时的弯曲强度远比有孔面朝下时强。这些都说明有孔面的朝向起着决定性的作用, 有孔面朝上时能充分发挥材料本身的强度。究其原因, 这主要取决于上面板处在压应力状态有关^[91]: (1) 实验所用材料的压缩强度接近拉伸强度的2倍; (2) 说明工艺小孔在受到载荷作用时, 在压应力状态比拉应力更不容易产生应力集中。这与通常所说的圆弧形结构, 具有较强抗压能力观点一致。同时, 通过有限手法揭示了仿生一体化蜂窝板弯曲破坏的形态^[92]。具有小柱的仿生一体化蜂窝板中的小柱可以有效阻止裂缝形成及沿着特定路径发展的机理(图17(a))。并探明了受弯构

图16 (网络版彩图)一体化蜂窝板。(a) 模型^[71]; (b) 阳模与阴模的组合^[91]; (c) 样品^[91]。其中, (b) 中白色的阳模由石蜡制成; (c) 中白线圆所示的为工艺小孔

图17 蜂窝板弯曲破坏图^[92]。(a), (c) 有孔面朝上; (b), (d) 有孔面朝下。图中虚线图表示小柱的位置。上排: 俯视图; 下排: 正视图

件底部主裂缝的开展范围(图17(a)和(d1)的大小)代表了塑性铰的形成区域,在一定程度上能够体现出构件的抗弯能力与延性^[92]。

鉴于工艺小孔对蜂窝板整体抗弯性能的影响很大,而工艺小孔的直径与圆弧曲率对其影响应该是一对矛盾的两个方面:直径大(曲率小),小孔所在的板材断面面积减少,相反直径小曲率大,容易产生应力集中,都会影响抗弯性能。为此考察了工艺小孔直径及其小孔曲率对蜂窝板整体抗弯性能的影响。结果表明^[92]:不论小孔的朝向如何,蜂窝板的弯曲强度随着孔径的增大而减小(图18(a))。据此可知孔径增大导致孔间截面削弱的影响要大于曲率增大时应力集中增加的影响。因此为了减少曲率对弯曲性能的影响,需保证孔间截面削弱程度相同。即在保证截面面积相同且具有不同小孔曲率—如将小孔设计成椭圆形时(图18(b2))便可达到此要求^[92]。图18(c)给出了B点的曲率半径和应力集中系数(B点的应力与AB线上最小应力值之比)的

关系曲线,由图18(c)可知,随着B点曲率半径的增大,应力系数明显减少。尽管这变化趋势是可以不言而喻的,但据此可知当需要在受拉板材或构件上开孔时,将小孔设计成椭圆形,可达到大幅缓解孔边应力集中的效果。因此,当构件在受拉应力方向有较大尺寸,允许将孔洞设计成椭圆时,这一设计方法将为实际工程中蜂窝板及类似弯曲构件的孔洞位置、大小以及形状提供理论依据,也为一体化蜂窝板承受动荷载或疲劳荷载实验提供设计思路^[92]。

3.3.2 一体化蜂窝板的破坏形态与前翅小柱倒角探秘

一体化蜂窝板的破坏主要发生在芯层,包括封边部分,其破坏形态,可分为错位型和压实型两类(图19(a))^[93]。这些破坏形态主要是芯层与面板交界处的应力集中引起(图19(b)),其次是由于短纤维分布的无序性引起。

具体地说对于边框部分,如图19(b1)的黑色细箭

图 18 小孔直径对蜂窝板受弯性能影响的有限元解析结果^[92]。(a) 弯曲破坏荷载及体积比强度随孔径的变化曲线; (b) 小孔朝下时孔间应力的考察位置及其路径; (c) 图(b)中B点应力集中系数与曲率半径关系曲线

图 19 一体化纤维蜂窝板切断面平压破坏时破坏形态^[93](a)及其应力分布((b), (c)). 十字星: 错位式; 三角: 压实型破坏

头所示向右下方应力分布形态, 与图19(a)各分图中左上的错位破坏现象完全一致; 对于蜂窝壁, 如图19(b2)的两个黑色细箭头所示那样, 有向左右倾斜, 大致呈左右对称的应力集中^[93]. 因此, 除了发生倾斜形式的破坏之外, 由于应力集中左右对称, 可以发生向下压缩型的破坏(图19, 三角形). 除了前述的应力因素之外, 也由于蜂窝板用短纤维强化, 而短纤维的分布有较大的无序性, 从而导致破坏形态更加复杂^[93]. 再从载荷-位移曲线(图20)上看, 尽管本次实验所仿制的一体化蜂窝板还不完善, 但一体化纤维复合材料蜂窝板载荷的最大值、阶段III和IV的分散性, 远比短纤维增强小柱小(图13(b)), 也略比长纤维增强小柱小(图13(a)). 这说明同样是短纤维强化复合材料, 制备成一体化蜂窝板, 样品破坏过程中, 分散性小, 表明生物结构具有优秀的整体性力学性能^[93].

尽管一体化蜂窝板具有整体性好等优势, 但如前所述芯层的应力集中是本次实验中蜂窝板发生破坏的主要原因——特别是在本实验中暂时没有在芯层与面板之间设计圆弧过渡(简称为“倒角”), 而前翅本身小柱和面板之间是有倒角的^[60]. 在垂直相交构件的连接处, 有倒角比没有倒角能缓解应力集中. 因此, 研究的重点是要考察倒角中圆弧的直径, 为蜂窝壁厚度的多少倍时既获得较好的应力缓解效果, 又不至于用太多的材料^[93]. 正巧我们早期测定了独角仙前翅中层之间过渡圆弧直径与小柱直径之比 ζ (图21(a)和(b))^[60]. 由图可见独角仙前翅中 ζ 大多在1.5~2.5之间. 考虑到生物本身 ζ 大小与原来小柱的直径大小有关, 据此, 给出了两种不同蜂窝壁厚度下, 有限元解析的最大应力与 ζ 的关系

图20 (网络版彩图)仿生一体化蜂窝板压缩的荷载-位移曲线^[93].

曲线(图21(c))及其 $\zeta=2.0$ 蜂窝壁应力情况(图21(c)). 由图21(c)可知, 尽管两种蜂窝壁厚度时下降的斜率较为接近, 但 ζ 大于1.0后应力缓和效果较大, 且 ζ 大于1.5时随着 ζ 的增加则蜂窝壁厚 $T=1.2$ 比2时缓和效果更好^[93].

对前述的解析结果, 首先可做如下的物理解释(图22): 蜂窝壁薄, 倒角小时对蜂窝壁的约束不大(图22(a1)), 缓和应力的效果弱(图21(c), I₁, II₁); 而当蜂窝壁厚, 倒角大时(图22(b2)), 所起应力缓和效果的速度减慢(图21(c), I₃, II₃)^[93]. 而在前翅结构中, 其小柱直径小时采用了较大的 ζ , 相反却采用了较小的 ζ (图22(b)). 这样可得到不同小柱直径下缓和效果较为接近的效果. 即圆满解释了(图21(b))中 ζ 与直径之间的分布关系, 同时也探明了为什么独角仙前翅小柱和层之间圆弧过

图21 (网络版彩图)独角仙前翅中小柱的结构参数及其仿生模型中对应力的影响情况. (a), (b) 小柱的结构参数 ζ 的定义及其与小柱直径的关系^[60]; (c) 最大Mises应力与 ζ 的关系曲线^[93]. 图(c)中 T 为蜂窝壁厚度, $T=2$ 中3条点画线分别与 $T=1.2$ 的虚线平行, 以方便比较它们之间的斜率大小

图 22 (网络版彩图)不同 t 和 ζ 时的断面形状^[93]. (a) $T=1.2$ mm; (b) $T=2$ mm

渡直径大于小柱直径的力学意义^[93].

其次, 根据甲虫前翅小柱结构参数的有限元分析结果, 提出了工程应用中采用 ζ 大于1.0倒角直径进行圆弧过渡的建议^[93]. 具体采用多少, 可根据具体的蜂窝板结构参数及其应用领域等实验情况确实. 尽管有关一体化蜂窝板采用 ζ 大于1.0倒角后力学性能的提高效果, 还有待于今后实验证实, 但本研究结果为完善仿生一体化蜂窝板结构、提高其压缩力学性能指明了研究方向^[93].

4 对同行的影响、存在问题以及最新进展

4.1 前期的研究成果及其对同行的影响

如前所述, 甲虫前翅无论是从纵向、横向还是纵横交叉的三维结构空间上看, 均具有优秀的生物结构及力学性能. 从纵向剖面看, 甲虫前翅具有以小柱为中空层的轻质变截面边框结构, 由此可获得所需的抗弯模量和转动惯量. 从独角仙前翅的横向剖面的层铺方式看, 前翅中的纤维为非等角的叠层结构, 具有异方性的拉伸强度, 从而拥有更加轻质高强的特征. 从纵横交叉的三维空间角度来看, 独角仙拥有小柱蜂窝结构, 小柱中的纤维对层状层叠复合材料具有很强的抗层间剥离效果. 早在2000年左右, 笔者就提出了甲虫前翅以蛋白质为芯层的小柱模型, 以实心小柱蜂窝为芯层的轻质仿生三维模型^[60], 并于2003年提出了空心小柱-蜂窝芯层结构夹层板的模型^[81]. 2004年指出了雄独角仙可凭借“独角”进行攻击或保护身躯, 且其成虫的生命周期短, 因此为经济型的小柱-蜂窝结构, 而锹形虫需要越冬, 生命周期长, 为耐久型的纯小柱芯三层板结构^[79-81].

这些前期的研究成果对国内外的同行产生了积极

的影响. 国际上主要是引用为主, 并开展了相关的研究^[94-96]. 而国内, 除了这一类引用^[57,97]之外, 更有根据笔者前期的仿生简易模型, 直接作为硕士研究课题的原始模型^[50,82,83]. 如, 2006年李兴冀^[82]、张剑等人^[98]根据前述模型^[62,64], 设计了仿生模型, 他们使用聚氯乙烯硬质泡沫塑料、不饱和树脂和玻璃纤维制作了一体成型的复合材料柱-泡沫塑料, 并测定了其压缩、三点弯曲和剪切力学性能^[82,98]. 2010年宋文伟等人^[99]设计了3种前翅仿生结构, 并用工程塑料ABS的材料属性, 在Ansys workbench进行了准静态压缩和三点弯曲的分析^[99]. 其中的模型III, 就是以笔者的小柱蜂窝结构为模型. 2011年周怡等人^[100]根据笔者的模型^[62,64], 给定了一些具体的参数, 考察了小柱中双层纤维均为线性排列和其中一层为螺旋排列时的力学性能. 同年郭婷和王跃方^[50]根据笔者的小柱模型(图8(d)), 建立了4种管状模型, 使用铝合金材料的属性, 分别在等直径和等质量两种条件下, 由ANSYS/LS-DYNA软件分析了它们的耐撞性和抗冲击能力. 结果表明, 通过合理的设计可以使模拟甲壳虫芯柱的结构在吸能方面达到圆管结构的水平, 抗撞性优于圆管结构. 可见, 笔者前期所提小柱及其轻质三维仿生简易模型, 为推动建立我国甲虫前翅仿生模型起到很好的促进作用.

4.2 中期的研究进展及其存在问题

如前所述, 中期主要在制备工艺上克服了前述纤维含量低和成型时间长等缺点, 得到了较为优良的一体化蜂窝板的制备工艺. 同时分析了用短纤维替代生物中长纤维时的仿制效果, 发现并验证了短纤维小柱在抗剪切刚度上比长纤维更具优势的特性. 通过设计和制备单侧一体化蜂窝板, 测定了其压缩和弯曲等力学性能, 探明了其在压缩过程中具有即便发生蜂窝芯

破坏,也不至于出现突然压溃的力学特性,以及弯曲破坏时一体化蜂窝板最终破坏取决于材料强度本身,从而具有整体性好的特点。根据甲虫前翅具有连续变截面边框结构的特征,在2012年又提出了带天然封边的、一体化的小柱-蜂窝芯夹层板的三维模型。并分析了工艺小孔对其整体抗弯性能的影响及机理,探明了一体化仿生蜂窝板样品平压时的破坏机理及独角仙前翅小柱和层之间倒角的圆弧直径需要大于小柱直径的原因所在。

因此,尽管从定性的角度,可以确信一体化蜂窝板比多体成型好,小柱-蜂窝结构应该具有更好的力学性能,然而这些研究均以实验研究为主,既没能定量或半定量地给出一体化蜂窝板到底比多体成型板好多少,也没有从机理层次对小柱-蜂窝结构,如2003年就已经提出的空心小柱-蜂窝结构夹层板^[81],到底具有多大优势?什么是其内在的强化机制?这些都有待于深化研究。

4.3 最新的研究进展

针对中期研究中存在的问题,为了更加全面地掌握我国甲虫前翅仿生领域的研究进展情况,笔者从数年前开始通过对我国在甲虫前翅结构及其仿生应用方面文献的全面系统的分析与归纳,并于2015年完成了相关的综述论文^[72,73]。综述了近20年内我国在甲虫前翅轻质结构及其仿生研究领域的主要研究成果,提出了一些需要注意和值得探讨的问题。并对未来20年内甲虫前翅轻质仿生材料领域内可能的研究方向做了一些展望。2015年后本人的最新研究大多就是根据那些展望而展开的:

目前已经通过实验验证等手法,证实了综述论文中所提的若干质疑问题。诸如新鲜甲虫前翅极限应变应该大于干燥的,东方龙虱的小柱应该也是实心的^[73];首次提出了“甲虫板”的概念^[101],从理论和机理上探明了甲虫板的抗压、吸能强化机理及其强化效果^[102,103]。这些研究成果,不仅克服了前述4.2节中所存在的问题,为开展前翅小柱蜂窝结构的防撞应用指明了研究

方向,而且其优越的抗压和吸能力学性能,也为开展甲虫板在诸多领域的产业化奠定了基础^[104,105]。此外,也对小型甲虫前翅结构特征,独角仙各部分纤维层叠方式的力学性能等进行了研究。在刚过去的二年中,又申请了近10项发明专利^[106,107],为开发轻质仿生产品奠定了坚实的基础。限于篇幅,相关内容将在后续论文中进行详细的报道。

5 结束语

通过回顾这20年对独角仙和锹形虫两种甲虫前翅结构及其仿生应用的研究历程,即通过对前翅结构解剖、提出简易模型、到样品仿制及其对甲虫前翅和仿制样品力学性能测试的分析,很庆幸如前言中所述20年前的三个方面的推理,其正确性不断地得到了证实。

前期从纵向的中空边框结构、横向的非等角纤维层叠、纵横交叉的小柱根部的抗剥离结构和对力学性能的分析,到提出以蛋白质为芯的小柱模型和蜂窝-小柱三维结构模型(1998~2000年),包括小柱(中空)-蜂窝芯结构三夹板(2003~2005年),独角仙轻质结构和锹形虫耐久型结构的设计手法及其生物学意义(2004~2007年);中期开发了制备仿生蜂窝板的技术(2008~2010年),提出了一体化蜂窝板的生物原型是甲虫前翅,而不是人们常识的“蜂窝”,并初步证实了仿生一体化蜂窝板的优越性(2011~2015年);直到最近又探明了其具有优秀的抗压和吸能力学性能(2015~2017年),再次证实了甲虫前翅确实是一种轻质高强结构,也充分显示了仿生学的价值和意义所在。

最后想要说明的是,经过这20年的科研积累,已经完成了对甲虫前翅结构模型化、仿制及其力学性能的测试分析研究,争取在今后的5~10年之间,在继续深化仿生基础的同时,把甲虫板技术转化成科学技术生产力,加速甲虫板的产业化进程,最终让甲虫板为提高人类的生活质量和生活水平发挥其应有的作用。

参考文献

- 1 Gao X, Jiang L. Water-repellent legs of water striders. *Nature*, 2004, 432: 36~36
- 2 Liu K, Jiang L. Bio-inspired design of multiscale structures for function integration. *Nano Today*, 2011, 6: 155~175
- 3 Liu Q, Jiang L, Shi R, et al. Synthesis, preparation, *in vitro* degradation, and application of novel degradable bioelastomers—A review. *Prog*

- [Polymer Sci](#), 2012, 37: 715–765
- 4 刘克松, 江雷. 仿生结构及其功能材料研究进展. *科学通报*, 2009, 54: 2667–2681
 - 5 Comstock J H, Needham J G. The Wings of Insects. *Am Natist*, 1899, 33: 845–860
 - 6 Powell P B. The development of wings of certain beetles, and some studies of the origin on the wings of insects. *J New York Entomol Soc*, 1904, 13: 237–243
 - 7 Gokan N. On the tracheation and distribution of the sacs in elytra of Scarabaeid beetles. In: *The Annual Meeting of the Entomological Societh of Japan*. Entomological Society Japan, 1966
 - 8 Mitsuo M, Kitano O, Hideo K, et al. *Insect biology*. Tamagawa Univ, 1984, 5: 56–62
 - 9 Neville A C, Caveney S. Scarabaeid beetle exocuticle as an optical analogue of cholesteric liquid crystals. *Biol Rev*, 1969, 44: 531–562
 - 10 Caveney S. Cuticle reflectivity and optical activity in scarab beetles: The role of uric acid. *Proc R Soc B-Biol Sci*, 1971, 178: 205–225
 - 11 Schultz T D, Rankin M A. The ultrastructure of the epicuticular interference reflectors of tigerbeetles (*Cicindela*). *J Exp Biol*, 1985, 117: 87–110
 - 12 Parker A R, Mckenzie D R, Large M C J. Multilayer reflectors in animals using green and gold beetles as contrasting examples. *J Exp Biol*, 1998, 201: 1307–1313
 - 13 Zelazny B, Neville A C. Quantitative studies on fibril orientation in beetle endocuticle. *J Insect Physiol*, 1972, 18: 2095–2121
 - 14 Hepburn H R, Ball A. On the structure and mechanical properties of beetle shells. *J Mater Sci*, 1973, 8: 618–623
 - 15 Vincent J F V. Insect cuticle: A paradigm of natural composites. *Symp Soc Exp Biol*, 1980, 34: 183–210
 - 16 Porter T W, Chapman R F. *The Insects: Structure and Function*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 190–192, 420–424
 - 17 Hepburn H R. *The Insect Integument*. New York: Elsevier Scientific Publication Company, 1976
 - 18 Youdeowei A. *Laboratory Manual of Entomology*. New York: Oxford University Press, 1977
 - 19 Vincent J F V. Insect cuticle: A paradigm of natural composites. *Symp Soc Exp Biol*, 1980, 34: 183–210
 - 20 Fiori G. La ‘sutura’ elitrale de coleotteri. In *Atti del Congresso Nazionale Italiano di Entomologia*, 1975, 10: 91–111
 - 21 Lenau T, Barfoed M. Colours and metallic sheen in beetle shells—A biomimetic search for material structuring principles causing light interference. *Adv Eng Mater*, 2008, 10: 299–314
 - 22 Kamp T V D, Greven H. On the architecture of beetle elytra. *Entomol Heute*, 2010, 22: 191–204
 - 23 Lomakin J, Huber P A, Eichler C, et al. Mechanical properties of the beetle elytron, a biological composite material. *Biomacromolecules*, 2011, 12: 321–335
 - 24 Lomakin J, Arakane Y, Kramer K J, et al. Mechanical properties of elytra from *Tribolium castaneum* wild-type and body color mutant strains. *J Insect Physiol*, 2010, 56: 1901–1906
 - 25 Pang C, Kim T, Bae W G, et al. Bioinspired reversible interlocker using regularly arrayed high aspect-ratio polymer fibers. *Adv Mater*, 2012, 24: 475–479
 - 26 Parker A R, Lawrence C R. Water capture by a desert beetle. *Nature*, 2001, 414: 33–34
 - 27 Lomakin J, Huber P A, Eichler C, et al. Mechanical properties of the beetle elytron, a biological composite material. *Biomacromolecules*, 2011, 12: 321–335
 - 28 Chen S X, Tan J J, Yu P Y. Results of the zoologico-botanical expedition to southwest China. *Acta Entomol Sin*, 1961, 10: 457–481
 - 29 Chen S X, Tan J J, Yu P Y, et al. Results of the zoologico-botanical expedition to southwest China. *Acta Entomol Sin*, 1962, 11(S1): 120–138
 - 30 Wang C P, Chen Q Z. Study in the classification and identification of elytra of some adult storage beetles and their species affinis under a flying spot microscope. *J Zhengzhou Grain Coll*, 1987, 2
 - 31 Jiang Y C, Zhu P Y, Wang X P. The changing regulation of the black spot in lady-beetle, *harmoniaaxyridis* with yellow background and a method of numeral mark. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 1989, 40: 21–24
 - 32 Ren L Q, Chen D, Hu J G, et al. Initial exploring for mechanism of decreasing resistance and reducing adhesion of the biomimetic bulldozing plate. *Trans CSAE*, 1990, 6: 13–20
 - 33 Qaisrani A R, Tong J, Ren L Q, et al. The effects of unsmoothed surfaced on soil adhesion and draft of bulldozing plates. *Trans CSAE*, 1993, 9: 7–13
 - 34 程红, 孙久荣, 李建桥, 等. 臭蜣螂体壁表面结构及其与减粘脱附功能的关系. *昆虫学报*, 2002, 45: 175–181
 - 35 Sun J Y, Wu W, Ling M Z, et al. A dynamic nanoindentation technique to investigate the nanomechanical properties of a colored beetle. *RSC Adv*, 2016, 6: 79106–79113

- 36 向春霆. 自然复合材料机理和仿生复合材料的研究: 昆虫鞘翅的设计——它的逐级细观结构和力学行为. 博士学位论文. 重庆: 重庆大学, 1994
- 37 向春霆, 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. 力学进展, 1994, 24: 220–232
- 38 Chen B, Yang X K. A study on the genus *Donaciolagria* pic from China. Entomol Sin, 1997, 4: 121–128
- 39 陈斌, 彭向和. 生物自然复合材料的结构特征及仿生复合材料的研究. 复合材料学报, 2000, 17: 59–62
- 40 Chen B, Peng X H, Fan J H. Fiber-reinforce characteristics of chafer cuticle and research on structure of branched fiber. Chin J Mater Res, 2003, 17: 630–636
- 41 Zhang Y C, Hai S W, Zhang J X, et al. A study on dorsal surface of *Dactylispa* (Tr) Angulosa with SEM. J Shanxi Normal Univ (Nat Sci Ed), 2001, 29: 70–73
- 42 Zhang Y C, Liu H J, Zheng Z M. Ultrastructure of *Henosepilachna vigintioctomaculata* and *H. Vigintioctopunctata*. Insects Knowl, 2002, 39: 132–135
- 43 Huang D G, Jiang S H. A comparative study on the ultrastructure of five species of the genus *Agrypnus* (Coleoptera: Elateridae). Entomotaxonomia, 2004, 26: 175–184
- 44 Zhang Y F, Dai Z D, Xie L S. Histological structures of the dung beetle, *Copris ochus* Motschulsky integument. Acta Entomol Sin, 2003, 46: 429–435
- 45 虞庆庆. 甲虫鞘翅材料力学性能测试及微结构研究分析. 硕士学位论文. 南京: 南京航空航天大学, 2006
- 46 Frantsevich L, Dai Z D, Wang W Y, et al. Geometry of elytra opening and closing in some beetles (Coleoptera, Polyphaga). J Exp Biol, 2005, 208: 3145–3158
- 47 Yang Z X, Wang W Y, Yu Q Q, et al. Measurements on mechanical parameters and studies on microstructure of elytra in beetles. Acta Mater Compos Sin, 2007, 24: 92–98
- 48 戴振东, 张亚锋, 梁醒财, 等. 甲虫鞘翅间的锁合机构, 联接力及其表面织构效应. 中国科学C辑: 生命科学, 2008, 38: 542–549
- 49 Dai Z, Yang Z X. Macro-/micro-structures of elytra, mechanical properties of the biomaterial and the coupling strength between elytra in beetles. J Bionic Eng, 2010, 7: 6–12
- 50 郭婷, 王跃方. 仿甲壳虫芯柱的缓冲吸能结构. 工程力学, 2011, 28: 246–251
- 51 吴薇. 两种甲虫体色变化不可逆/可逆构色机制研究. 硕士学位论文. 吉林: 吉林大学, 2016
- 52 Sun J Y, Wu W, Liu C, et al. Investigating the nanomechanical properties and reversible color change properties of the beetle *Dynastes tityus*. J Mater Sci, 2017, 52: 6150–6160
- 53 刘锋. 甲虫的结构色与结构变色研究. 博士学位论文. 上海: 复旦大学, 2008
- 54 Liu F, Yin H W, Dong B Q, et al. Inconspicuous structural coloration in the elytra of beetles *Chlorophila obscuripennis* (Coleoptera). Phys Rev E, 2008, 77: 012901
- 55 Liu F, Dong B Q, Liu X H, et al. Structural color change in longhorn beetles *Tmesisternus isabellae*. Opt Express, 2009, 17: 16183
- 56 袁伟. 结构色纤维面料的制备及其光学性质研究. 博士学位论文. 苏州: 苏州大学, 2014
- 57 Xiang J W, Du J X, Li D C, et al. Functional morphology and structural characteristics of wings of the ladybird beetle, *Coccinella septempunctata* (L.). Microsc Res Tech, 2016, 79: 550–556
- 58 Chen J X, Iwamoto M, Ni Q, et al. Study on the optimum composite material structure and its mechanical properties (I): Research on the beetles wing structure. In: 28th Symposium Composites of Japan the Society of Materials Science, 1999. 269–273
- 59 陈锦祥, 岩本正治, 倪庆清, 等. 甲虫上翅的断面构造和其最适性(日文). 材料, 2000, 49: 407–412
- 60 Chen J X. Fundamental study on biomimetics composites. Technical Report. Kyoto: Kyoto Institute of Technology, 2001
- 61 中根猛彦, 大林一夫, 野村镇, 等. 原色昆虫大图鉴第2卷(甲虫篇)(日文). 东京: 北隆馆, 1978
- 62 Chen J X, Ni Q Q. Three dimensional compose structures in the fore-wing of beetles. Acta Mater Compos Sin, 2003, 20: 61–66
- 63 Chen J, Iwamoto M, Ni Q Q, et al. Laminated structure and its mechanical properties of the fore-wing of beetle. J Soc Mater Sci Jpn, 2001, 50: 455–460
- 64 Chen J X, Ni Q Q, Xu Y, et al. Lightweight composite structures in the forewings of beetles. Compos Struct, 2007, 79: 331–337
- 65 Chen J X, Dai G Z, Xu Y L, et al. Optimal composite structures in the forewings of beetles. Compos Struct, 2007, 81: 432–437
- 66 Chen J X, Ni Q, Endo Y, et al. Distribution of trabeculae and elytral surface structures of the horned beetle, *Allomyrina dichotoma* (Linné) (Coleoptera: scarabaeidae). Insect Sci, 2002, 9: 55–61

- 67 陈锦祥, 岩本正治, 倪庆清, 等. 甲虫上翅层间强化机理研究(日文). 日本机械学会论文集A, 2001, 67: 273–279
- 68 陈锦祥, 岩本正治, 倪庆清, 等. 甲虫翅根的破坏类型及其模型分析(日文). 日本机械学会论文集A, 2002, 68: 364–369
- 69 Chen J X, Wu Z S, Wu G, et al. US Patent, No.13/406, 441, 2012
- 70 Chen J X, Guo S, Wan C, et al. Integrated honeycomb technology motivated by the structure of beetle forewings. *Mater Sci Eng-C*, 2012, 32: 1813–1817
- 71 Chen J X, Xie J, Zhu H, et al. Integrated honeycomb structure of a beetle forewing and its imitation. *Mater Sci Eng-C*, 2012, 32: 613–618
- 72 Chen J X, Xie J, Wu Z S, et al. Review of beetle forewing structures and their biomimetic applications in China: (I) On the structural colors and the vertical and horizontal cross-sectional structures. *Mater Sci Eng-C*, 2015, 55: 605–619
- 73 Chen J X, Zu Q, Wu G, et al. Review of beetle forewing structures and their biomimetic applications in China: (II) On the three-dimensional structure, modeling and imitation. *Mater Sci Eng-C*, 2015, 55: 620–633
- 74 Chen J X, Ni Q Q, Xie J. Light weight composites structure of beetle forewing and its mechanical properties. In: *Composites and Their Properties*. Croatia: Rijeka, 2012. 359–390
- 75 Chen J, Wu G. Beetle forewings: Epitome of the optimal design for lightweight composite materials. *Carbohydr Polym*, 2013, 91: 659–665
- 76 Schneider P, Hermes M. The function of the elytra in the *Melolonthic* flight mechanism in beetles. *J Compar Physiol A*, 1976, 106: 39–49
- 77 Taylor R A J, Bauer L S, Poland T M, et al. Flight performance of *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) on a flight mill and in free flight. *J Insect Behav*, 2010, 23: 128–148
- 78 Machin K E, Pringle J W S. The physiology of insect fibrillar muscle. II. Mechanical properties of a beetle flight muscle. *Proc R Soc B-Biol Sci*, 1959, 151: 204–225
- 79 陈锦祥, 倪庆清, 徐英莲. 甲虫前翅结构中的优化设计. 复合材料学报, 2004, 21: 88–92
- 80 陈锦祥, 倪庆清. 甲虫前翅中的三维复合材料结构. 复合材料学报, 2003, 20: 61–66
- 81 陈锦祥, 倪庆清. 一种中间为多边形栅格的夹层强化结构. 中国专利, CN1278848C, 2006-10-11
- 82 李兴翼. 复合材料柱/泡沫夹芯结构板成型工艺及性能研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- 83 周怡. 仿甲虫鞘翅的层状纤维缠绕结构设计及其力、热性能研究. 硕士学位论文. 南京: 南京航空航天大学, 2011
- 84 Ueno S, Kurosawa Y, Sato M. The coleoptera of Japan in color. Hoikusha: Hoikusha Publishing Co. Ltd., 1999, 328–350
- 85 Yi X S, Wu G, Pan Y. Properties and applications of filled conductive polymer composites. *Polym Int*, 1997, 44: 117–124
- 86 益小苏, 张明, 安学锋, 等. 先进航空树脂基复合材料研究与应用进展. 工程塑料应用, 2009, 37: 72–76
- 87 董慧民, 安学锋, 益小苏, 等. 纤维增强聚合物基复合材料低速冲击研究进展. 材料工程, 2015, 43: 89–100
- 88 Gu C L, Liu J X, Chen J X, et al. Technological parameters and design of bionic integrated honeycomb plates. *J Bionic Eng*, 2014, 11: 134–143
- 89 He C L, Chen J X, Wu Z S, et al. Simulated effect on the compressive and shear mechanical properties of bionic integrated honeycomb plates. *Mater Sci Eng-C*, 2015, 50: 286–293
- 90 Chen J X, He C L, Gu C L, et al. Compressive and flexural properties of biomimetic integrated honeycomb plates. *Mater Des*, 2014, 64: 214–220
- 91 Zhou M, Xie J, Chen J X, et al. The influence of processing holes on the flexural properties of biomimetic integrated honeycomb plates. *Mater Des*, 2015, 86: 404–410
- 92 Zhang X M, Liu C, Chen J X, et al. The influence mechanism of processing holes on the flexural properties of biomimetic integrated honeycomb plates. *Mater Sci Eng-C*, 2016, 69: 798–803
- 93 Chen J X, Tuo W Y, Zhang X M, et al. Compressive failure modes and parameter optimization of the trabecular structure of biomimetic fully integrated honeycomb plates. *Mater Sci Eng-C*, 2016, 69: 255–261
- 94 Noh M Y, Muthukrishnan S, Kramer K J, et al. Cuticle formation and pigmentation in beetles. *Curr Opin Insect Sci*, 2016, 17: 1–9
- 95 Dikshit V, Prasanth N A, Kumar J D, et al. Investigation of quasi static indentation on 3D printed honeycomb based truncated-pyramid square structure. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2016)*. Singapore: Research Publishing, 2016. 116–121
- 96 van de Kamp T, Riedel A, Greven H. Micromorphology of the elytral cuticle of beetles, with an emphasis on weevils (Coleoptera: Curculionoidea). *Arthropod Structure Dev*, 2016, 45: 14–22
- 97 李正官, 郭策. 仿生吸能结构的设计及耐撞性研究. 机械制造与自动化, 2012, 41: 115–117
- 98 Zhang J, Li D H, Li X J, et al. Processing technology of sandwich with compound core of composite pillar and foam plastic. *Mater Sci Tech*,

- 2008, 16: 76–81
- 99 宋文伟, 郭策, 马岩, 等. 仿甲虫鞘翅轻质结构的力学性能研究. 机械科学与技术, 2010, 29: 1376–1379
- 100 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. 中国机械工程, 2011, 22: 1969–1973
- 101 Chen J X, Zhang X M, Okabe Y, et al. Beetle elytron plate and the synergistic mechanism of trabecular-honeycomb core structure. *Sci China Tech Sci*, 2018, <https://doi.org/10.1007/s11431-018-9290-1>
- 102 Chen J X, Zhang X M, Okabe Y, et al. The deformation mode and strengthening mechanism of compression in the beetle elytron plate. *Mater Des*, 2017, 131: 481–486
- 103 Zhang X M, Xie J, Chen J X, et al. The beetle elytron plate: A lightweight, high-strength and buffering functional-structural bionic material. *Sci Rep*, 2017, 7: 4440
- 104 Zhang X M, Chen J X, Okabe Y, et al. Influence of honeycomb dimensions and forming methods on the compressive properties of beetle elytron plates. *Jnl Sandwich Struct Mater*, 2017, 9: 109963621773199
- 105 Zhang X M, Chen J X, Okabe Y, et al. Compression properties of metal beetle elytron plates and the elementary unit of the trabecular-honeycomb core structure. *Jnl Sandwich Struct Mater*, 2017, 9: 109963621772282
- 106 张晓明, 陈锦祥, 谢娟, 等. 一种蜂窝夹层板. 中国专利, CN105398100A, 2016-03-16
- 107 陈锦祥, 张晓明, 谢娟, 等. 一种仿生吸能盒. 中国专利, 申请号201610903362.0

Biomimetic research on beetle forewings in twenty years: Internal structure, model and integrated honeycomb plates

CHEN JinXiang^{1,2}

¹ Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;

² Department of Mechanical and Biofunctional Systems, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Tokyo 153-8505, Japan

This work reviewed the twenty years of history that the author is engaged in the biomimetic research on beetle forewings: at prophase (1997–2007), that the beetle forewings possessing the lightweight structures with a core layer composing of the hollow trabeculae and voids and variable cross-sectional sealing edge was mainly proposed, which can obtain the required bending modulus and moment of inertia; the *A. dichotoma* forewings are non-equiangular laminated structure and have the anisotropic tensile strength; the distribution of trabeculae in whole forewings was obtained for the first time, and the peeling test of forewings was performed, which experimentally demonstrated that the root of trabeculae have the function of converting the stripping failure to fiber tensile fracture, thus it has strong anti-stripping mechanical properties; meanwhile, a model of trabeculae with the core of protein and three dimensional structure model of trabeculae (hollow)-honeycomb was presented at the same time, the different design methods and biological significance of forewing structure in male and female *A. dichotoma* and *P. Inclinator* were illuminated; at metaphase (2008–2015), the preparation technology of integrated honeycomb plates was mainly developed, the concept and model of full integrated honeycomb plates was proposed, the influence of the multi-body forming, short fiber reinforcement material, processing holes and trabeculae on the mechanical behavior of biomimetic samples were qualitatively investigated, the superiority of the biomimetic integrated honeycomb plates was confirmed; the influence of the previous research results on peers was pointed out, meanwhile some problems existing at prophase and the latest research progress (2015–2017) were briefly introduced. The work not only fully verified the first induction of author toward the beetle forewings with lightweight and high-strength structure, but also incisively and vividly showed the elegant appearance of beetle forewings as the paragon of lightweight and high-strength structural optimization design.

beetles, *A. dichotoma*, forewings, lightweight structure, honeycomb

doi: [10.1360/N092017-00208](https://doi.org/10.1360/N092017-00208)