

## 基于 ANSYS 的竹象虫头管仿生模型抗扭转分析

许 顺, 佟 金, 马云海, 李 默<sup>\*</sup>

(吉林大学生物与农业工程学院/吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025)

**摘 要:** 多层复合管在工程领域中应用广泛, 但对其抗扭性质研究却较匮乏。为揭示竹象虫头管的抗扭转机理, 该文利用电子扫描显微镜、X 射线能谱仪和纳米压痕测试仪对竹象虫头管的内部结构、组成成分和纳米力学特性进行了分析。结果得出, 竹象虫头管是由组织形貌、成分、力学性质各异的多种结构组成的多层中空复合管, 其中外层主要为致密的几丁质, 内层根据组织形貌又可分为轴向层和周向层, 轴向层由片状脂类或糖类聚合物排列而成, 周向层主要由纤维-蛋白基质排列而成, 加强筋径向分布在管壁中, 贯通多个轴向和周向层。其中, 周向层的弹性模量、硬度和刚度最大。在头管结构研究的基础上, 建立了仿生管模型, 并采用 ANSYS 有限元软件对仿生管模型进行扭转分析, 揭示了竹象虫头管多层排列的合理性。同时优化结果表明, 提高内层材料的弹性模量, 可以增加多层复合管的抗扭能力。该研究可为多层复合管抗扭转能力的增强设计提供参考。

**关键词:** 仿生; 有限元法; 模型; 多层复合管; 竹象虫; 扭矩

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.002

中图分类号: S222.52

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-12-0011-06

许 顺, 佟 金, 马云海, 李 默. 基于 ANSYS 的竹象虫头管仿生模型抗扭转分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 11-16. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.002 http://www.tcsae.org

Xu Shun, Tong Jin, Ma Yunhai, Li Mo. Torque analysis on bionic model of bamboo weevil rostrum based on ANSYS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 11-16. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.002 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

多层复合结构以其轻质高强的性质, 在航天、汽车、化工、医学等工程领域都占据举足轻重的地位<sup>[1-4]</sup>。复合管是复合结构中常见的一种形式, 它是由 2 种或 2 种以上不同材料复合而成的一种管材, 综合利用了内外管不同材料的特性, 具有广泛的应用前景<sup>[5-7]</sup>。而对于使用环境复杂的管道或者圆柱壳体, 如血管支架<sup>[4]</sup>、海洋输送管道<sup>[6]</sup>等, 单层或双层复合管由于不耐腐蚀或者疲劳强度不够等原因已不能满足使用要求。于是, 国内外学者对多层复合管进行了研究<sup>[8-13]</sup>, 例如陶梅等<sup>[4]</sup>采用涂覆/喷涂-滤沥的方法制备了具有 3 层管壁结构的可降解组织工程血管支架, Menshykova 等<sup>[8]</sup>通过研究多层薄壁管进行弯曲性能, 讨论了管体力学性能与材料层数、层厚等参数的关系, Wang 等<sup>[9]</sup>通过旋锻等工艺制备出了 Ti/Pb/Cu 的三金属复合管, 李明亮等<sup>[10]</sup>用不锈钢、低碳钢等材料制成了具有抗海水腐蚀的三层金属复合管。但目前对复合管的研究多数是以多层板结构为基础的, 得到的理论并不十分适用于多层管结构, 尤其在管体扭转方面。因此,

还需要对复合管在承受扭矩载荷作用下的力学性质进行深入研究。

竹象虫 (*Cyrtotrachelus bugueti Guer*) 属直翅目象甲科。广泛分布于中国、印度、越南、缅甸、日本、菲律宾等国家和地区。竹象虫一年一代, 以竹笋为生。陈封政等<sup>[14]</sup>、杨瑶君等<sup>[15-16]</sup>的研究表明, 竹象虫每年对竹林的危害率最高可达到 100%。细长的头管是竹象虫的一个明显标志, 头管近似于圆管, 呈褐色, 长约 14 mm, 直径约 1 mm, 连接口器与头部, 不可再生, 一旦头管损坏, 竹象虫将面临死亡。当竹象虫取食时, 头管随口器一起钻透坚硬的笋鞘, 将竹笋内鲜嫩的笋汁吸出。故头管的作用主要有 2 个, 一是进取食物的唯一通道, 二是承受和传递扭矩。

有限元分析利用数学近似的方法对真实物理系统进行有效模拟的重要方法, 通用性强, 适用性广, 善于解决结构、流体、磁场等工程方面的难题, 可代替复杂耗时的实际试验, 降低成本缩短生产周期。有限元法是计算机辅助设计和计算机辅助制造的重要组成部分<sup>[17-20]</sup>, Aguiar 等<sup>[20]</sup>利用有限元仿真分析法分析了多层管梁进的非线性动态特性, 杨智春等<sup>[21]</sup>研究了多层铝管的吸能特性, 赵培等<sup>[22]</sup>分析了影响多层波纹管动态刚度的因素等。

本研究对竹象虫头管的内部结构、主要成分和纳米力学特性进行分析, 并利用有限元软件对仿头管结构建立的三维模型进行仿真模拟, 揭示了头管的抗扭转机理, 以期为提高多层复合管的抗扭能力提供参考。

收稿日期: 2015-09-10 修订日期: 2016-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51475204)

作者简介: 许 顺, 女, 湖南益阳人, 博士生, 主要从事农业工程仿生理论与技术研究。长春 吉林大学生物与农业工程学院和工程仿生教育部重点实验室, 130025. Email: xushun11@mails.jlu.edu.cn

\*通信作者: 李 默, 女, 吉林长春人, 博士, 主要从事农业工程仿生理论与技术研究。长春 吉林大学生物与农业工程学院和工程仿生教育部重点实验室, 130025. Email: moli@jlu.edu.cn

## 1 竹象虫头管结构、成分和纳米力学分析

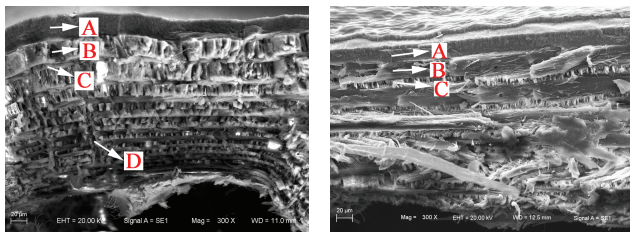
### 1.1 头管结构

本次试验中, 竹象虫样本全部捕获于中国四川乐山郊外竹林, 图 1 为捕获到的一只竹象虫, 其头管生长于身体前端。



图 1 竹象虫头管  
Fig.1 Rostrum of bamboo weevil

将干燥充分的头管横向和纵向剖开, 喷金处理后, 用扫描电子显微观察得到的如图 2 所示的横截面和纵截面图。



a. 横截面  
a. Cross section  
b. 纵截面  
b. Longitudinal section

注: 头管管壁由 A、B、C 和 D 4 种结构组成。  
Note: Rostrum wall is consisted of A, B, C and D.

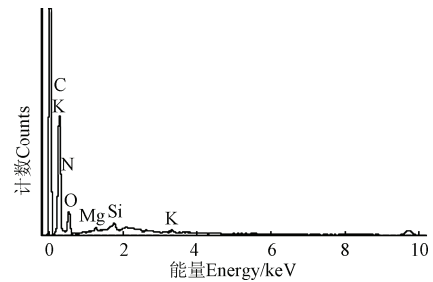
图 2 电镜下的头管断面结构

Fig.2 Cross section and longitudinal section structure of rostrum under electron microscopy

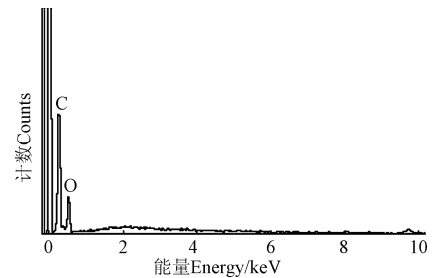
头管是一种中空管状的多层结构。多层结构具有低密度、高韧性、高弹性和优良的机械性能, 在保证足够的强度的前提下, 可以有效的节约材料, 减轻质量<sup>[23]</sup>。由图 2 可知, 头管管壁主要由 4 种基本结构 (图 2 中标注为 A、B、C 和 D) 组合而成。结构 A 是头管外层, 结构 B 与结构 C 为多层交替层叠结构, 主要构成了头管内层, 结构 B 的组织结构与头管轴线平行, 称为轴向层, 结构 C 的组织结构绕头管轴线分布, 称为周向层, 结构 D 是一种沿着头管半径方向分布的柱状或片状结构, 分布位置较为随机, 贯通着多个轴向层和周向层。

### 1.2 头管成分分析

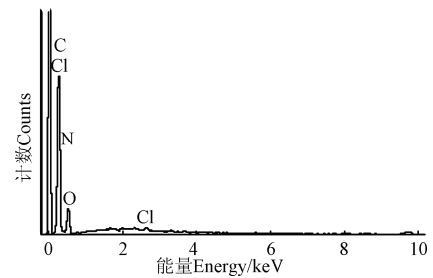
为了准确分析头管各结构, 利用英国 VG 公司生产的 ESCALAB Mark II 型号 X 射线光电子能谱仪对其主要结构进行成分测量。由于结构 D 尺寸很小, 而且分布较为随机, 观测比较困难, 故本文只对结构 A、B 和 C 进行了测试, 得到能谱图如图 3 所示及各元素的含量如表 1 所示。



a. 结构 A 的能谱图  
a. Energy spectrum diagram of structure A



b. 结构 B 的能谱图  
b. Energy spectrum diagram of structure B



c. 结构 C 的能谱图  
c. Energy spectrum diagram of structure C

图 3 竹象虫头管的能谱图

Fig.3 Energy spectrum diagram of rostrum of bamboo weevil

表 1 竹象虫头管元素含量

Table 1 Element contents of rostrum of bamboo weevil

元素 Element	C	N	O	Cl	Mg	Si	K
结构 A Part A	49.54	14.53	33.69	-	0.74	0.92	0.56
结构 B Part B	60.95	-	39.05	-	-	-	-
结构 C Part C	59.45	12.00	28.05	0.5	-	-	-

注: 结构 A、B、C 的位置具体见图 2。

Note: The location of A, B and C are shown in Fig.2.

结合图 2、图 3 和表 1, 分析得到如下结论:

1) 无论是横断面还是纵断面, 结构 A 的断口较为平整, 属于脆性断裂。主要由 C、H、N、O 元素组成, 即主要成分为几丁质, 此外, 还含有 Mg、Si、K 等金属元素和微量元素, 以 Si、Mg 为主的无机成分使得其微观组织结构更加紧密, 有利于提高结构 A 的硬度<sup>[24]</sup>, 从而更好地保持头管的形状。

2) 结构 B 的 C、O 比约为 61:39, 且不含其他元素, 而 C、O、H 元素是构成脂类或者糖类的基本元素, 不含蛋白质或者无机盐等成分。从断口形貌可以看出, 结构 B

的为片状，与头管的轴线平行，同层相邻两片之间有一定的间隙，整体排列疏松有致。这种结构更有利于能量的储存和释放<sup>[25]</sup>，所以，作为头管的主要承载层将有利于提高头管的抗变形能力，确保头管的使用安全。

3) 结构 C 和结构 B 的断口形貌很相似，但结构 C 中除了含有 C、H、O 外，还含有大量 N 及少量的 Cl 元素，可见其主要成分为纤维素和蛋白质。

1.3 头管的纳米力学测试

生物材料本质上是复杂的粘弹性复合材料，其力学性能与内部结构息息相关<sup>[26]</sup>。纳米压痕测试仪能在纳米级尺度上测试材料的弹性模量、硬度和接触刚度等力学性质<sup>[27]</sup>。本文中使用的的是由美国 HYSITRON 公司生产的 TriboIndenter 原位纳米力学测试系统，其最大加载载荷为 30 mN，最小加载载荷为 100 nN，加载分辨率小于 1 nN，纵向位移步长 13 nm，热漂移小于 0.05 nm/s。参照相关试验经验<sup>[28]</sup>，将头管用树脂固化剂包埋后抛光处理制成待测样品，试验采用梯形加载方式对头管管壁结构进行纳米力学测试，加载参数如下：加载峰值为 1 000  $\mu$ N，加载速率为 50  $\mu$ N/s，保压时间 50 s。由于结构 D 分布随机，观测不方便，故本研究只测试了结构 A、结构 B 和结构 C，且各层均测试 6 次，取均值为其相关的纳米力学参数。表 2 为头管各结构的弹性模量、硬度、接触刚度和形变量。

表 2 各结构的弹性模量、硬度、接触刚度和形变量  
Table 2 Reduced moduli, hardness, stiffness and displacement of each part

项目 Items	弹性模量 Elasticity modulus/GPa	硬度 Hardness /MPa	刚度 Stiffness/ ( $\mu$ N $\cdot$ nm <sup>-1</sup> )	位移量 Displacement/nm
结构 A Part A	3.074 $\pm$ 0.301	182.254 $\pm$ 31.248	8.120 $\pm$ 0.335	88.874 $\pm$ 13.950
结构 B Part B	3.152 $\pm$ 0.120	121.392 $\pm$ 6.111	10.283 $\pm$ 0.436	98.072 $\pm$ 6.802
结构 C Part C	8.645 $\pm$ 1.934	246.620 $\pm$ 55.250	19.695 $\pm$ 2.313	36.586 $\pm$ 14.255

由表 2 可知，结构 A、B、C 这 3 种材料的纳米力学性质差异显著。其中，结构 C 的弹性模量、硬度和刚度都是最大的，这种纤维素与蛋白质结合方式，使得材料具有更好吸收能量的能力，表现出良好的力学性能。结构 A 的弹性模量和刚度都小于结构 B，但结构 A 的硬度却比结构 B 大得多，导致这个差异的主要原因应该是结构 A 质地紧密，使头管表面具有良好抵抗硬物压入的能力。

由此得知，头管管壁中，外层结构 A 的主要作用是维持头管的形状，避免外界硬物的破坏，内层是主要的承载层，轴向层结构 B 较为疏松，不仅能存储和释放更多的能量，还能起到缓冲的作用；周向层结构 C 除了承载外，还有加强的作用，提高管体整体的刚度和强度。

2 基于 ANSYS 软件的扭转分析与结构优化

2.1 模型优化

竹象虫头管优异的抗扭转性是其各材料层的力学性质和层叠结构的综合表现。根据竹象虫头管结构特征，

建立的复合管模型称为仿生管。仿生管模型是由一层结构 A、多层结构 B、多层结构 C 层和若干结构 D 按照一定规律复合而成。但实际上 A、B、C、D 重叠构造出的模型体系十分复杂，不适于工程应用，故需要对模型进行合理优化。

由文献[29-30]可知，结构 D 的作用类似于径向加强筋，以平衡径向方向的应力分布。考虑实际应用中，起传输作用的管体所受径向载荷较小，在模型中忽略结构 D，一方面能简化模型，减少计算时间，另一方面能减少由于微小截面引起的计算误差，提高结果质量。又因多层复合管制作成本高加工复杂，工程上现有的多层复合管不超过 3 层。因此，本研究中，将仿生管简化为只含有结构 A、结构 B 和结构 C 各 1 层的圆管模型。

为了考察层叠顺序对管体抗扭转能力的影响，同时也为得到抗扭转性能最优的仿生管模型，将 A、B、C 这 3 种结构的层叠顺序重新进行排列，考察其受扭后的形变大小。模型各结构的层叠顺序如表 3 所示。

表 3 仿生模型中各结构的层叠顺序  
Table 3 Cascading order of each Part in bionic model

编号 Number	外层 Outer layer	中层 Middle layer	内层 Inner layer
1	A	B	C
2	A	C	B
3	B	C	A
4	B	A	C
5	C	A	B
6	C	B	A

2.2 有限元分析前处理

在软件 ANSYS14.5 中进行有限元分析时，选用 3D 壳单元 SHELL181 和质点单元 MASS21。SHELL181 单元适用于薄至中等厚度的分层壳形结构的网格划分，采用自由网格进行单元划分，得到 9292 个单元和 9371 个节点。模拟精度取决于第一剪切形变理论，即 Minding-Reisser 壳理论。当采用 SHELL181 单元后，只需定义各层的厚度、材料等信息。质点单元用于对管体施加均布的扭转载荷。

统一以半径为 220 mm，管长为 2 200 mm 的圆管为例，同时设定管壁结构中每层的厚度为 30 mm。根据表 2 和文献[26-27]，选取结构 A 的弹性模量和泊松比分别为 3.074 GPa 和 0.33；结构 B 的弹性模量和泊松比分别为 3.152 GPa 和 0.28；结构 C 的弹性模量和泊松比分别为 8.645 GPa 和 0.25。管体受到的约束条件与载荷如图 4 所示，将 A 端的所有自由度固定，在 B 端施加大小为 2 000 N $\cdot$ m 的扭矩  $M$ 。

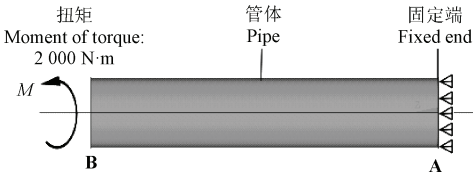


图 4 管体上的约束与载荷  
Fig.4 Constraint and load on pipe



### 2.3 仿真结果与分析

管体抗扭转能力由其在扭转载荷作用下的形变程度决定。图 5 是在扭矩作用下, 1 号仿生管的位移云图, 由图可知, 管体的最大形变发生在管的受力端处, 最大位移为 0.149 mm。其他编号的管体位移形变趋势与图 5 类似, 各仿生管仿真模拟得到的最大位移量如表 4 所示。

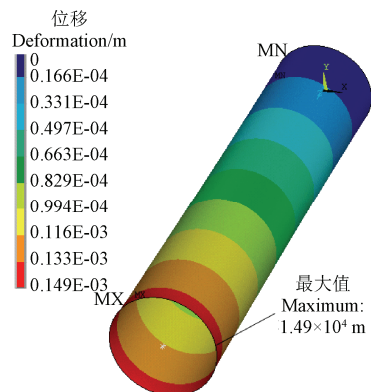


图 5 1 号仿生管的位移形变图

Fig.5 Deformation pattern of bionic-1

表 4 不同仿生管的位移结果

Table 4 Displacement results of all bionic pipes

编号 Number	排序 Cascading order	位移量 Displacement result/m
1	ABC	$1.49 \times 10^{-4}$
2	ACB	$1.95 \times 10^{-4}$
3	BCA	$1.98 \times 10^{-4}$
4	BAC	$1.50 \times 10^{-4}$
5	CAB	$2.52 \times 10^{-4}$
6	CBA	$2.55 \times 10^{-4}$

由表 4 可知, 当管壁最外层为材料 A, 中层为材料 B, 内层为材料 C 时, 管体发生的形变最小, 即刚度是最佳。而作为弹性模量最大的材料层 C, 其所在层的位置对管体抗扭能力的影响较为显著, 当 C 处于外层时, 管体位移形变量最大, 如 5 号管和 6 号管, 其最大位移量分别为 0.252 和 0.255 mm; 当 C 处于中层时, 形变量次之, 如 3 号管和 4 号管, 其最大位移量分别为 0.198 和 0.150 mm; 当处于内层时, 形变量最小, 如 1 号管和 2 号管, 其最大位移量分别为 0.149 和 0.195 mm。由此可以推断出, 对于薄壁复合管, 提高内层材料的弹性模量, 有利于增强多层复合管的抗扭转能力。

此外, 比较 1 号管和 2 号管的形变位移可知, 1 号管的最大形变量比 2 号的最大形变量减少了 23.6%, 即 1 号管的刚度性能为最好。而此时 1 号管各层的排列方式与竹象虫头管管壁中的结构排列是一致的, 这既解释了竹象虫头管管壁结构的合理性, 又验证了模拟试验的有效性。

### 3 结 论

1) 通过对竹象虫头管进行材料形貌、组成成分和纳米力学性质的分析, 揭示了头管的抗扭转机理: 头管是一种中空的多层复合的管结构, 且内层材料中具有高弹

性模量、高刚度的性质。

2) 通过有限元软件 ANSYS 对仿生复合管模型计算分析得到, 提高多层复合管内层材料的弹性模量有利于增强管体的抗扭转能力。同时, 解释了竹象虫头管结构抗扭转特性的合理性。

### [参 考 文 献]

- [1] Mutasher S A. Prediction of the torsional strength of the hybrid aluminum/composite drive shaft[J]. Materials & Design, 2009, 30(2): 215—220.
- [2] Sivakumar P, Wim V P, Joris D, et al. Comparison of the crushing performance of hollow and foam-filled small-scale composite tubes with different geometrical shapes for use in sacrificial cladding structures[J]. Composites Part B: Engineering, 2010, 41(6): 434—445.
- [3] Hutař P, Šestáková L, Kněsl Z, et al. Special fracture mechanics specimens for multilayer plastic pipes testing[J]. Polymer Testing, 2009, 28(8): 785—792.
- [4] 陶梅, 张磊, 向虎, 等. 具有三层管壁结构组织工程血管支架的生物力学性能[J]. 中国生物医学工程学报, 2006, 25(6): 728—732.
- [5] Tao Mei, Zhang Lei, Xiang Hu, et al. Biomechanical properties of tissue engineered vascular scaffolds of three-layered wall[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2006, 25(6): 728—732. (in Chinese with English abstract)
- [6] 贺家智. 多层复合管制造技术和工程应用[J]. 机械, 1996, 23(1): 44—48.
- [7] 李循迹, 李厚补, 常泽亮, 等. 油田集输用塑料合金复合管管体爆裂分析[J]. 失效分析与预防, 2014, 9(5): 275—279.
- [8] Li Xunji, Li Houbu, Chang Zeliang, et al. Failure analysis of anticorrosion plastic alloy composite pipe for oil gathering and transportation[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 9(5): 275—279. (in Chinese with English abstract)
- [9] Sayman O. Analysis of multi-layered composite cylinders under hygrothermal loading[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(7): 923—933.
- [10] Menshykova M, Guz I A. Stress analysis of layered thick-walled composite pipes subjected to bending loading[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, 88: 289—299.
- [11] Wang H, Han J. Fabrication of laminated-metal composite tubes by multi-billet rotary swaging technique[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(1): 713—719.
- [12] 李明亮. 多层复合管液压胀接原理与工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [13] Li Mingliang. Study of Principle and Process on Multi-layer Clad Pipe Formed by Hydraulic Expansion[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张红. 埋地钢质管道补口部位三层结构 PE 防腐工艺研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2007.
- [15] Zhang Hong. Research on Suture Technique of 3PE

- Anticorrosion Coating for Buried Steel Pipeline[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王维德, 王雄清, 陈封政. 沐川县竹林主要害虫大竹象的调查[J]. 乐山师范学院学报, 2002, 17(4): 49—50.  
Wang Weide, Wang Xiongqing, Chen Fengzheng. Preliminary investigation on *Cyrtotrachelus longimanus* in *sinocalamus affinis* of muchuan county[J]. Journal of Leshan Teachers College, 2002, 17(4): 49—50. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王维德, 陈封政, 王雄清. 长足大竹象繁殖行为的初步研究[J]. 四川动物, 2005, 24(4): 540—541.  
Wang Weide, Chen Fengzheng, Wang Xiongqing. Reproductive behavior of *Cyrtotrachelus bugueti*[J]. Sichuan Journal of Zoology, 2005, 24(4): 540—541. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陈封政, 王维德, 王雄清, 等. 乐氰乳油对长足大竹象的防治试验[J]. 中国森林病虫, 2006, 24(5): 34—36.  
Chen Fengzheng, Wang Weide, Wang Xiongqing, et al. Control experiment against *Cyrtotrachelus buqueti* with dimethoate plus fenvalerate EC[J]. Forest Pest and Disease, 2006, 24(5): 34—36. (in Chinese with English abstract)
- [15] 杨瑶君, 汪淑芳, 牟翹. 四川乐山市竹林主要病虫害调查初报[J]. 四川林业科技, 2009, 30(1): 62—65.  
Yang Yaojun, Wang Shufang, Mu Chi. A preliminary report on investigations of bamboo pests in Leshan city, Sichuan province[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2009, 30(1): 62—65. (in Chinese with English abstract)
- [16] 梁梓, 汪淑芳, 杨瑶君, 等. 长足大竹象成虫前胸背板及鞘翅超微结构观察[J]. 四川动物, 2013, 32(3): 423—425.  
Liang Zi, Wang Shufang, Yang Yaojun, et al. Ultrastructure on pronotum and elytra of *Cyrtotrachelus buqueti*[J]. Sichuan Journal of Zoology, 2013, 32(3): 423—425. (in Chinese with English abstract)
- [17] Minak G, Abrate S, Ghelli D, et al. Low-velocity impact on carbon/epoxy tubes subjected to torque—experimental results, analytical models and FEM analysis[J]. Composite Structures, 2010, 92(3): 623—632.
- [18] Ooi J B, Wang X, Lim Y P, et al. Parametric optimization of the output shaft of a portal axle using finite element analysis[J]. Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2013, 59(10): 613—619.
- [19] 张立香, 刘守荣, 毛恩荣, 等. 基于 ANSYS 的农机底盘驱动桥壳可靠性分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 37—44.  
Zhang Lixiang, Liu Shourong, Mao Enrong, et al. Reliability analysis of agricultural machinery chassis drive axle housing based on ANSYS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(2): 37—44. (in Chinese with English abstract)
- [20] Aguiar L L, Almeida C A, Paulino G H. Dynamic analysis of risers using a novel multilayered pipe beam element model[J]. Marine Structures, 2015, 44: 211—231.
- [21] 杨智春, 袁潘. 填充泡沫铝的多层铝管动态压溃吸能特性研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25(1): 12—16.  
Yang Zhichun, Yuan Pan. Numerical study on the energy absorption of foam-filled multi-layers aluminum tubes under dynamic axial crushing[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(1): 12—16. (in Chinese with English abstract)
- [22] 赵培, 马伟, 余永健, 等. 多层波纹管动态刚度的影响因素研究[J]. 压力容器, 2012, 29(1): 15—19.  
Zhao Pei, Ma Wei, Yu Yongjian, et al. Research on influencing factors of dynamics stiffness of multi-layer bellows[J]. Pressure Vessel Technology, 2012, 29(1): 15—19. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘静. 整体中空层连复合材料结构与性能的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.  
Liu Jing. Study of Hollow Integrated Sandwich Composites' Structure and Property[D]. Wuxi: University of the South, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [24] 冯庆玲. 生物矿化与仿生材料的研究现状及展望[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(3): 378—383.  
Feng Qingling. Review of current biomineralization and biomimetic materials[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005, 45(3): 378—383. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张伏, 高吭, 佟金, 等. 四种昆虫鞘翅断面的超微观结构及仿生模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 105—109.  
Zhang Fu, Gao Hang, Tong Jin, et al. Research on elytron section microstructure of four species beetles and biomimetic models[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(6): 105—109. (in English with Chinese abstract)
- [26] Sun Jiyu, Wu Wei, Xue Weiliang, et al. Quantitative nanomechanical properties of the cuticle of the multicolored asian lady beetle using the modulus mapping technique[J]. Current Nanoscience, 2015, 11(2): 245—252.
- [27] Sun J Y, Guo Y J, Tong J. Testing methods for nanoindentation property of the cuticle of bovine hoof wall and dung beetle's foreleg femur[J]. Journal of terramechanics, 2006, 43(3): 355—364.
- [28] 孙霁宇. 臭蜣螂表皮纳米力学测试方法和纳米力学行为[D]. 长春: 吉林大学, 2005.  
Sun Jiyu. Analyzing Methods for Nanoindentation and Nanomechanical Properties of the Cuticle of Dung Beetle *Copris Ochus Motschulsky*[D]. Changchun: Jilin University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [29] Tang Zhiliang, Liu Shutian, Zhang Zonghua. Analysis of energy absorption characteristics of cylindrical multi-cell columns[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 62: 75—84.
- [30] 唐智亮. 薄壁结构轴向冲击能量吸收性能分析与改进设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.  
Tang Zhiliang. Analysis and Design Improvement of Thin-walled Structures for Energy Absorption Under Axial Crush[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese with English abstract)

## Torque analysis on bionic model of bamboo weevil rostrum based on ANSYS

Xu Shun, Tong Jin, Ma Yunhai, Li Mo\*

(College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University/Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** Multi-layered composite cylindrical pipes have been widely used in pipeline transportation engineering field because of its high corrosion resistance and good wearing resistance. However, there is still a lack of theoretic analysis on torsion. The bamboo weevil (*Cyrtotrachelus bugueti* Guer) lives on bamboo shoots. Its rostrum bears big torque while drilling into bamboo. To reveal the torque-bearing mechanisms of rostrum, in this study, the detailed geometric structural parameters, composite elements and nano-mechanical properties of rostrum were respectively analyzed by electron scanning microscope, X-ray energy spectrometer and nanoindenter. The electronic microscope photographs showed that bamboo weevil rostrum was a hollow pipe mainly composed of 3 parts, i.e. outer layer, inner layers and reinforcing ribs. And the inner layers could be divided into axial layers and circumferential layers based on their morphology. The reinforcing ribs perforated several axial layers and circumferential layers along the radial direction, but its size and distribution were very randomly. From the element spectrum diagrams and nanomechanical tests, it was found that the outer layer of rostrum contained carbon (C), hydrogen (H), nitrogen (N) and oxygen (O), which are essential elements to composite chitin, and furthermore, it also contained inorganic salts like silicon (Si), magnesium (Mg) and potassium (K). And in this layer, the elasticity modulus, hardness and stiffness were 3.074 GPa, 182.254 MPa and 8.12  $\mu\text{N/nm}$ , respectively. The main component of axial layers was saccharides or lipid that was dependent on the chemical union of C, H and O, and its elasticity modulus, hardness and stiffness were 3.152 GPa, 121.392 MPa and 10.283  $\mu\text{N/nm}$ , respectively. The circumferential layers contained C, H, N, O and chlorine (Cl), and its elasticity modulus, hardness and stiffness were the highest, which were 8.645 GPa, 246.620 MPa and 19.695  $\mu\text{N/nm}$ , respectively. From the measurement result, the main characteristics of bamboo weevil rostrum could be found. First, rostrum was a hollow multilayer pipe, which had nice strength and stiffness. Second, the outer layer was chitin, the axial layers consisted of sheet saccharides or lipid, and the circumferential layers contained protein and fibers. Specially, the circumferential layers had excellent mechanical capacity that made the rostrum more powerful. Third, the thickness of each axial layer changed in a certain sequence from outside to inside. In addition, the radial ribs connected several layers, which was conducive to better balance the stress and deformation on different bearing layers. Finally, the bionic multilayer pipes designed by learning the rostrum were modeled after appropriate simplification and majorization, and the torsional deformation was examined. The finite element analysis (FEA) method was applied to analyze the rationality of the cascading order of pipe wall in ANSYS software. In the FEA, SHELL181 and MASS21 were employed, and all models were free meshed. The computer simulation results demonstrated that, if the outer layer had low elastic modulus material, and the inner layer had high elastic modulus material, the torsional deformation on the pipe would be the smallest. That is, enhancing the elastic modulus of inner layer material will be beneficial to strengthen the torsion capacity of the multilayer composite pipes. In addition, the simulation proved the reasonability of rostrum wall structure. The results on the torque-bearing mechanisms of bamboo weevil rostrum can provide theoretical references for the design of the multilayer composite pipes, especially for transporting pipe.

**Keywords:** bionics; finite element method; models; multilayer pipe; bamboo weevil; torque