

文章编号:1000-582X(2010)11-062-04

## 昆虫体壁外感觉器的应力放大传感效应

权国政<sup>a</sup>,王熠昕<sup>a</sup>,陈 斌<sup>b</sup>,艾百胜<sup>a</sup>

(重庆大学 a. 材料科学与工程学院;b. 资源及环境科学学院,重庆 400044)

**摘要:**人类对天然生物所具备的应力放大功能的研究,有助于仿生开发适合于工程应用的应变传感器。在场发射电镜下观测到绿金龟子外甲壳的微观形貌,发现绿金龟子外甲壳是典型的正交逐层铺设纤维增强复合板,其上以 40~50 $\mu\text{m}$  的间距分布着直径 50~70 $\mu\text{m}$  的一系列近似圆形的刚毛毛窝,将这种形式表征为逐层正交铺设纤维增强带孔板,通过有限元及加权平均法计算获得孔应力放大系数为 2.424,这种效应提高了外感觉器的灵敏度。进一步观测发现毛孔壁存在一种螺旋纤维结构,可抵御来自各个方向的应力集中,保护了刚毛下的毛窝腺及外体壁安全。

**关键词:**金龟子;感觉器;毛窝;孔洞;纤维

**中图分类号:**Q-331

**文献标志码:**A

## Mechanical amplification of insect campaniform sensilla

QUAN Guo-zheng<sup>a</sup>, WANG Yi-xin<sup>a</sup>, CHEN Bin<sup>b</sup>, AI Bai-sheng<sup>a</sup>

(a. College of Materials Science and Engineering; b. College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Research on the mechanical amplification function of natural organisms presents a bio-inspired approach for the future design of strain sensors to be embedded in engineering bodies. By the observation under FTEM, the micromorphology of chafer cuticle is found as follows: insect cuticle is a typical example of a natural composite plate with cross-fiber laminates reinforced, on the surface of which a series of trichopores with diameter of 50~70  $\mu\text{m}$  are distributed in the space of 40~50  $\mu\text{m}$ . This microstructure is characterized as a composite plate with holes with cross-fiber laminates reinforced. The stress amplification factor that helps to improve sensilla's sensitivity is achieved as 2.424 by finite element method and weighted average method. Furthermore continuous helicoidal fibers around the channel under trichopore are found, which resist stress concentration from every orientation and protect the gland and body wall.

**Key words:** chafer; sensilla; trichopore; hole; fiber

昆虫体壁外传感器是体壁上的大型外长物或者称为细胞性突起。多细胞性突起是在表皮内侧的一层真皮细胞,如足的胫节上所生的距与刺;单细胞性突起,是体壁上典型的外长物,从毛窝中生长出来,叫做刚毛。刚毛与毛窝及内部传感神经元组合形成

钟形感觉器,毛窝就像分布在表皮上的孔,对应力及应变具有明显的放大作用,有效提高传感的灵敏度<sup>[1]</sup>。根据加拿大 Simon Fraser 大学的 MENRVA 团队的最新研究成果显示:这种天然的应变传感器能够探测到纳米尺度的位移<sup>[2]</sup>。当前对于昆虫体壁

**收稿日期:**2010-07-03

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(10872221,10272120);中国博士后科学基金资助项目(20100470813);重庆大学大型仪器设备开放基金(2010011511)

**作者简介:**权国政(1980-),男,重庆大学副教授,博士后,主要从事材料变形行为及跨尺度分析研究,(Tel) 023-65103065;(E-mail) quanz\_2006@yahoo.com.cn。

的应力放大传感机理已经得到了广泛的共识,但对于这种传感器及其所处基体形态的研究报道较少,研究者在对其进行表征时常局限于将其简化为在均质单层板上分布的圆柱形光孔<sup>[1-4]</sup>。

人类对天然生物所具备的应力传感功能的研究,有助于进行仿生开发适合于工程应用的应力放大传感器<sup>[5-7]</sup>。本次研究对象为绿金龟子鞘翅的外甲壳,通过场发射透射电子显微镜观察到刚毛及近似圆形的毛窝坑形态,进一步观察试样断口部位发现金龟子鞘翅的外甲壳是典型的正交逐层铺设纤维增强复合板。将这种传感器形式表征为在正交逐层铺设纤维增强复合薄板上开设一系列的小孔,在纤维板受力变形时小孔会引起应力集中,这种放大效应将传递给刚毛,传感效应得到明显增强。笔者基于对天然生物材料的深入观察,以及对自然现象的不断探究,应用简洁的模型、迅速的计算来解释这种天然生物传感器件的机理及孔壁自我保护功能。

## 1 观察方法

以绿金龟子的外甲壳(如图 1 所示)为具体研究对象,绿金龟子体长约 28 mm,广泛分布于中国南方地区。绿金龟子的外甲壳电镜试样的制备方法如下:首先剥离绿金龟子的外甲壳,在对其进行 95% 的酒精清洗及干燥脱水后,沿不同方向将其剖切成长宽约 5 mm 大小的试样,用离子溅射仪在其表面进行喷金处理,实现试样表面导电化。将得到的电镜试样用导电胶按不同的观察面分别粘于电镜样品台上,放入 LIBRA-200-FE 场发射透射电子显微镜中进行微结构观察。观察的重点为金龟子鞘翅外壳的刚毛及窝坑的形态,电镜照片上的标尺用来确定微结构的尺寸及位置关系。



图 1 绿金龟子形态

## 2 观察到的体壁外感觉器一般形态

金龟子体壁是包在整个昆虫体躯(包括附肢)外面的一层组织,它来源于一部分外胚细胞层及其分泌物,体壁除具有感觉功能外,还可防止体内水分蒸

发及外来物侵入。体壁表皮上除分布有各种线纹、花纹、小突起及小斑点外,还有大型的刚毛外长物暨外感觉器。刚毛是毛原细胞延长而成的毛状突起,常穿过表皮的毛孔,伸出体壁外。毛原细胞周围常连有一穿孔的膜原细胞,膜原细胞的端部充塞在毛孔内,其表皮形成环状的毛窝腺,毛窝腺凹入毛孔内形成毛窝,这种结构被统称为钟形感觉器<sup>[8-10]</sup>。

在场发射透射电子显微镜中清晰度观察到这种钟形感觉器,如图 2 所示,毛窝很明显是体壁表皮上的缺口,呈现直径为 50~70 μm 的近似圆形,毛窝以 40~50 μm 的近似等间距排列。图 3 为绿金龟子外甲壳的撕裂断面,可以看出这是一种正交逐层铺设纤维增强的复合材料,埋置于蛋白质基体中的单向几丁质纤维平行于外甲壳表面整齐地排列,单向纤维组成单向铺层,两相邻铺层方向夹角呈现近似 90°。

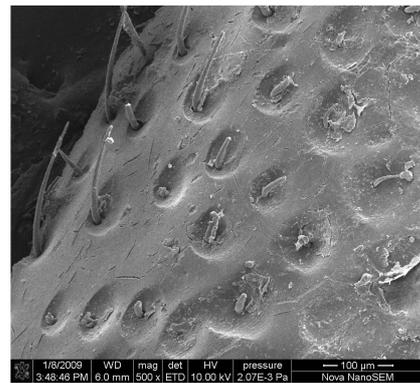


图 2 钟形感觉器外部形态

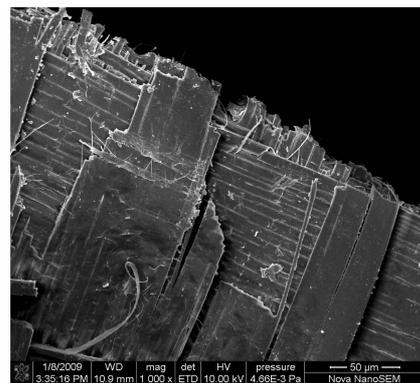


图 3 正交逐层铺设纤维增强结构

## 3 应力放大效应分析

### 3.1 单层单圆孔的应力放大

形体表面的小孔会引起应力集中,含孔板受拉伸载荷时,最大应力发生在孔边与力的作用线成正

交的直径的两端<sup>[11-13]</sup>。在断裂力学中将孔边应力集中处的应力峰值与远场应力的比值定义为应力集中系数,也称为应力放大系数:

$$K_{\sigma} = \sigma_{\max} / \sigma^{\infty} \quad (1)$$

关于应力集中系数的数学求解列式已经涌现了很多<sup>[14-15]</sup>。笔者采用基于弹性有限元法的软件来直接进行计算,使计算的精度及效率都大大提高。

将绿金龟子体壁外钟形感觉器的毛窝形式表征为在正交逐层铺设纤维增强薄板上开设的小孔。以这种形式进行仿生研究,引入一块宽 1mm、长 1mm 的单向纤维增强板,在板中心开设一个直径 0.1 mm 的小孔,如图 4 所示。对各向同性材料来说,根据含孔各向同性板的应力集中系数,就可得到最大破坏应力。但是,对于含孔各向异性板的破坏预测,只有应力集中系数是不够的,必须用组合应力破坏准则代替最大应力破坏准则。设计纤维方向 1、纤维方向 2 的两个单层复合板,方向 1 和方向 2 正交,两种纤维单层板的力学指标如表 1 所示。

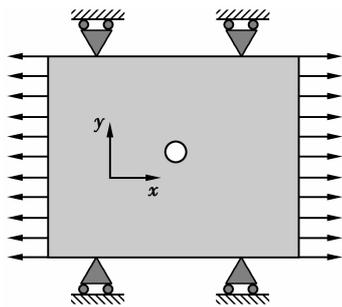


图 4 单圆孔单层板模型

表 1 方向正交的两层纤维单层板的力学指标

序号	$E_x$ /GPa	$E_y$ /GPa	$E_z$ /GPa	$G_{xy}$ /GPa	$G_{xz}$ /GPa	$G_{yz}$ /GPa	$\nu_{xy}$	$\nu_{xz}$	$\nu_{yz}$
1	20.2	21.0	10.0	4.15	4.0	4.0	0.16	0.3	0.3
2	21.0	20.2	10.0	4.15	4.0	4.0	0.16	0.3	0.3

在弹性有限元软件中,分别将单层板纤维方向 1 与  $x$  向重合,单层板纤维方向 2 与  $x$  向重合,单层板的水平两侧在  $x$  向受到 1 000 MPa 的拉应力,单层板的上下两侧在  $y$  向受到位移约束。通过对两个过程求解获得应力场分布规律如图 5 所示,从中看出:最大应力出现孔边与拉伸载荷作用线垂直的直径两端,最小应力出现在孔边与拉伸载荷作用线平行的直径两端。

通过整理模拟数据,获得两种正交单层板的孔应力极值如表 2 所示。远场应力为 1 000 MPa,根

据公式(1)可计算得到两种单层板的应力放大系数为  $K_1=2.409, K_2=2.439$ 。

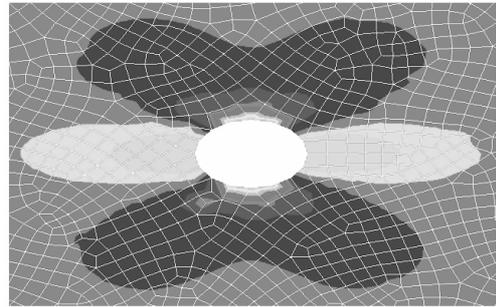


图 5 模拟获得的单圆孔单层板的应力场分布

表 2 方向正交的两层纤维单层板的孔应力极值

序号	最大 Mises 应力/MPa	最小 Mises 应力/MPa
1	2 409	275.5
2	2 439	264.3

### 3.2 正交逐层铺设纤维增强板放大系数计算方法

含孔复合材料层合板由于孔边应力集中引起的破坏分析就更为复杂。首先,层合板中各单层的应力分布是不同的,不同单层显示出不同的各向异性,孔边峰值应力不一定就是最大的单层应力,故孔边的应力集中必随铺层纤维方向而变化。其次,在层合板内部,层间应力值很小,但在孔边附近会产生很大的应力集中,可能引起分层并扩展。另外,含孔层合板的破坏过程是一个刚度不断退化的过程,其分析是一个非线性分析问题。可以把绿金龟子外甲壳看作是  $N$  层正交复合板,其应力集中系数看作各单层应力集中系数的加权平均值,即

$$K_{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^M N_i K_i}{N} \quad (2)$$

式中: $N$  为铺层总数; $M$  为铺层方向数; $N_i$  为第  $i$  方向重复铺层数; $K_i$  为第  $i$  方向铺层应力集中系数。

引入已经计算出来两个应力集中系数  $K_1、K_2$  的值到公式(2)中,又考虑到正交铺层  $N_1 \approx N_2$ ,可以得到  $N$  层正交复合板的孔应力集中系数如下:

$$K_{\sigma} = \frac{N_1 K_1 + N_2 K_2}{N} = \frac{K_1 + K_2}{2} = 2.424 \quad (3)$$

## 4 进一步的讨论

通过对孔应力集中的计算可知,这种毛窝形式可以将远场的应力放大到 2.424 倍,这种应力放大效应

使毛窝中的刚毛更易感知,刚毛将感知到的外来各种压力信息通过毛窝腺传递给体内的神经元。这种效应是灵敏的,但是毛窝带来的应力集中为什么没有破坏绿金龟子的外甲壳呢?此外,这种应力集中为什么没有压迫损伤刚毛根部的毛窝腺呢?

在场发射电镜下对毛窝继续放大,如图 6 所示,仔细观察可以看出:毛窝的表面覆盖一层角素微纤维,具有增韧、止裂等作用,微纤维层分布着毛孔以使刚毛伸出体壁。将毛窝表面的微纤维层在纳米压痕装置上轻轻的祛除,一个起传感、传质作用的信息、物质传输管道或孔洞呈现出来。通过对此交界处进行更为仔细的观察发现,用于增强、增韧、止裂的纤维在传感、传质的管道或孔洞处不是中断或消失,而是均匀连续的螺旋式绕过,这使得管道或孔洞周围的纤维密度增加,这种形式如图 7 所示。

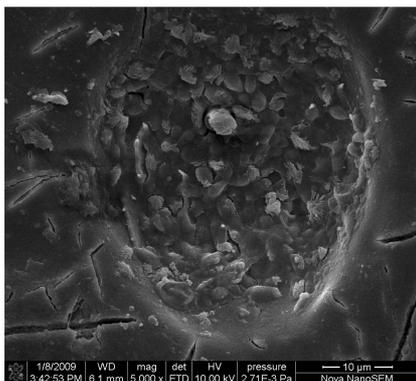


图 6 毛窝的表面形态

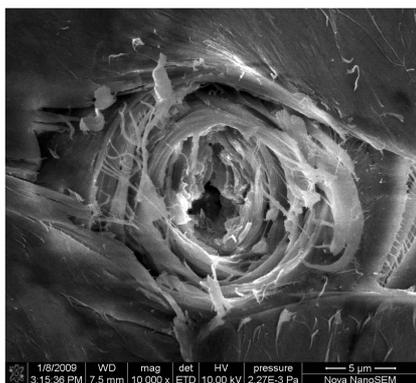


图 7 毛窝的内部形态

螺旋式绕孔结构与孔边高的应力场天然、绝佳的适应。孔洞壁的螺旋纤维可承受孔边来自各个方向的应力集中,从而有效地保护了刚毛下的毛窝腺;另一方面,毛窝产生的应力集中有效消耗了外来的不益能量,从而有效地保护了昆虫外体壁即外甲壳的安全。

## 5 结 论

1)通过场发射电镜观察绿金龟子外甲壳的微观形貌,发现钟形感觉器具有直径为  $50\sim 70\ \mu\text{m}$  的近似圆形毛窝,毛窝以  $40\sim 50\ \mu\text{m}$  的近似等间距排列。同时发现绿金龟子外甲壳是典型的正交逐层铺设纤维增强复合板,大量的毛窝分布其上。

2)表征出两种具有正交异性的单层单孔纤维增强板,通过弹性有限元数值计算获得两种单层纤维板的孔应力放大系数,并应用加权平均法获得无限正交逐层铺设纤维增强板的孔应力放大系数为 2.424。

3)毛窝的应力集中并未破坏昆虫的外体壁及外感觉器,原因在于孔洞壁的螺旋纤维结构与孔边高的应力场天然、绝佳的适应。

### 参考文献:

- [1] LI J X, WANG J J, DENG W. Description of sensilla on the larval antennae and mouthparts of *Spodoptera exigua*[J]. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 2008, 33(3): 443-448.
- [2] VINCENT J F V, WEGST U G K. Design and mechanical properties of insect cuticle[J]. *Arthropod Structure & Development*, 2004, 33(3): 187-199.
- [3] WICAKSONO D H B, VINCENT J F V, PANDRAUD G, et al. Biomimetic strain-sensing microstructure for improved strain sensor: fabrication results and optical characterization[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15(7): S72-81.
- [4] CARLO M, REBECCA B, SALLY C, et al. Concept design of strain sensors inspired by campaniform sensilla [J]. *Acta Astronautica*, 2009, 64(2/3): 176-182.
- [5] COCATRE Z, JAN H, DELCOMYN F. Modeling stress and strain in an insect leg for simulation of campaniform sensilla responses to external forces[J]. *Biological Cybernetics*, 1999, 81(2): 149-160.
- [6] CHEN B, PENG X H, WANG J G, et al. Investigation of fiber configurations of chafer cuticle by SEM, mechanical modeling and test of pull out forces[J]. *Computational Materials Science*, 2004, 30(3/4): 511-516.
- [7] LI B L, WANG Y L, WEI H, et al. Amplified electrochemical aptasensor taking AuNPs based sandwich sensing platform as a model [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2008, 23(7): 965-970.

(下转第 76 页)

- ZHAO ZU-DE, CHEN XUE-WEN, CHEN JUN, et al. The design optimization for hot forging process of connecting-rod based on approximate model and numerical simulation[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(5): 748-756.
- [7] 周杰, 刘敏, 王平, 等. 汽车曲轴终锻模阻力墙新型结构参数试验[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 229-234.
- ZHOU JIE, LIU MIN, WANG PING, et al. Experiment on parameters of new finish forging die structure of automobile crankshaft called resistance wall[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 229-234.
- [8] BEHRENS B A. Finite element analysis of die wear in hot forging process[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 305-308.
- [9] PAN G H, SANTNER T J. Theory of screening procedures to identify robust product designs using fractional factorial experiments[J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2004, 125(1/2): 59-84.
- [10] DEJAEGHER B, CAPRON X, VERBEKE J S, et al. Randomization tests to identify significant effects in experimental designs for robustness testing [J]. Analytica Chimica Acta, 2006, 564(2): 184-200.
- [11] ALAM F M, MCNAUGHT K R, RINGROSE T J. A comparison of experimental designs in the development of a neural network simulation metamodel[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2004, 12 (7/8): 559-578.
- [12] KLEIJNEN J P C. An overview of the design and analysis of simulation experiments for sensitivity analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 164(2): 287-300.
- [13] KLEIJNEN J P C. Kriging metamodeling in simulation; a review [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 192(3): 707-716.
- [14] WANG H, LI G Y, ZHONG Z H. Optimization of sheet metal forming processes by adaptive response surface based on intelligent sampling method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 197(1/3): 77-88.
- [15] SATHIYA P, ARAVINDAN S, HAQ A N, et al. Optimization of friction welding parameters using evolutionary computational techniques [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 (5): 2576-2584.
- [16] LIU W, YANG Y Y. Multi-objective optimization of sheet metal forming process using pareto-based genetic algorithm [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 208(1/3): 499-506.
- [17] NORTH C H, JOINES J A, KAY M G, et al. A genetic algorithm for function optimization: a matlab implementation[DB/OL]. <http://www.ie.ncsu.edu/mirage/GAToolBox/gaot/. /pap>.

(编辑 王维朗)

~~~~~

(上接第 65 页)

- [8] WICAKSONO D H B, PANDRAUD G, GRACIUN G, et al. Fabrication and initial characterisation results of a micromachined biomimetic strain sensor inspired from the Campaniform sensillum of insects[J]. Proceedings of IEEE Sensors, 2004, 2: 542-545.
- [9] VINCENT J F V, CLIFT S E, MENON C. Biomimetics of Campaniform Sensilla: Measuring Strain from the Deformation of Holes [J]. Journal of Bionic Engineering, 2007, 4 (2): 63-76.
- [10] SKORDOS A, CHAN P H, VINCEN J F V, et al. A novel strain sensor based on the campaniform sensillum of insects[J]. Biomimetics; Technology Transfer from Biology to Engineering, 2002, 360(1791): 239-253.
- [11] CHEN B, PENG X, WANG W, et al. Research on the microstructure of insect cuticle and the strength of a biomimetic preformed hole composite [J]. Micron, 2002, 33(6): 571-574.
- [12] CHEN B, PENG X H, FAN J H. Round-hole-fiber distribution in insect cuticle and biomimetic research[J]. JSME International Journal Series C, 2004, 47(4): 1128-1132.
- [13] ZHANG L Q, YUE Z Q, LEE C F, et al. Stress solution of multiple elliptic hole problem in plane elasticity [J]. American Society of Civil Engineers, 2003, 129 (12): 1394-1407.
- [14] STROBLE J K, STONE R B, WATKINS S E. An overview of biomimetic sensor technology[J]. Sensor Review, 2009, 29(2): 112-119.
- [15] VINCENT J F V, WEGST U G K. Design and mechanical properties of insect cuticle[J]. Arthropod Structure and Development, 2004, 33(3): 187-199.

(编辑 王维朗)