

昆虫翼拍动中受载变形的粘弹性本构模型^{*}

鲍麟¹, 胡劲松², 余永亮¹, 程鹏², 续伯钦², 童秉纲¹

(1. 中国科学院研究生院 生物运动力学实验室, 北京 100049;
2. 中国科学技术大学 力学和机械工程系, 合肥 230027)

(郭兴明推荐)

摘要: 昆虫翼拍动受载时发生被动变形, 被看作为有助于改善飞行性能的机制之一。决定这种被动变形大小的一个关键因素是昆虫翼的材料本构关系, 至今缺乏研究。基于蜻蜓翼(离体)的应力松弛实验和模型翼拍动时受载变形的有限元数值分析, 揭示了粘弹性本构关系是昆虫翼材料性能的合理描述, 并研究了粘弹性参数对被动变形的影响

关键词: 本构关系; 粘弹性; 应力松弛; 有限元; 昆虫翼; 被动变形

中图分类号: O345; Q66 **文献标识码:** A

引 言

众所周知, 昆虫依靠在空气中的拍翼方式来产生飞行所需的升力和推力, 其飞行性能远远超过现有的人造飞行器。近十年来, 针对昆虫的拍翼飞行机制, 国内外学者开展了大量的深入研究^[1~4], 但这些研究大都假设昆虫翼是刚性结构。而实验观测不同种属的昆虫飞行^[5~7]均发现, 昆虫翼在拍动时会产生显著的弯曲和扭转变形, 有不少研究者^[8~12]认为, 这种柔性变形效应有可能对飞行的气动力增益、节能或增强稳定性等起重要作用, 成为与拍翼方式相联系的另一个作用机制。事实上, 昆虫的飞行肌仅连接翼的根部, 对于昆虫翼变形的主动控制极少; 主要的是昆虫翼拍动时在惯性力和气动力的作用下所产生的被动变形^[13]。当前迫切需要解决的一个问题是: 昆虫翼受载后是如何被动变形的, 这其中的关键是要确定昆虫翼的本构关系属性。关于其本构关系, 至今尚无认真探讨, 近年来的少量研究^[14~16]都假设昆虫翼是由线弹性材料构成的。而已有的分析^[17]表明, 真实昆虫翼由极薄的表皮构成, 一般是由两层组织——上表皮和前表皮构成。上表皮层主要包括分别由高聚的碳水化合物和蛋白质组成的亚层; 前表皮中含有大量蛋白质, 它们相互交错联结在一起, 在蛋白质间, 还掺杂有大量的直径约 20 nm 长的几丁质微纤维(chitin microfibrils), 类似复合纤维材料的结构。可以推测, 分析此类生物复合材料采用粘弹性本构关系更为适合。

* 收稿日期: 2005_10_17; 修订日期: 2006_02_10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90305009; 10232010; 10072066); 中国科学院创新项目(KJJCX_SW_L04, KJJCX2_SW_L2)

作者简介: 鲍麟(1979—), 男, 江苏徐州人, 在读博士生(Tel: + 86_10_88256133; E_mail: l.bao@263.net); 童秉纲(联系人, Tel: + 86_10_88256264; Fax: + 86_10_88256133; E_mail: tongbg@gucas.ac.cn)。

为了检验粘弹性本构关系属性的猜想,本文首次通过真实蜻蜓翼(离体)的应力松弛实验,发现其本构关系中确实有粘性成分存在;进而建立一个粘弹性本构属性的蜻蜓翼模型,用有限元数值模拟了在惯性力作用下该模型翼的挥拍运动。结果显示,粘弹性本构模型是昆虫翼材料性能的合理描述。

1 蜻蜓翼的应力松弛实验与粘弹性本构关系属性

由于昆虫翼非常复杂,不同的种类具有不同的特性。本文主要选取蜻蜓(Odonata)为研究对象。蜻蜓翼是早期进化出的昆虫翼的典型代表,其特点是大量的径向、横向翅脉分布在翼面上,相交而成复杂的网状结构,同属这种类型的还有蝗虫(Orthoptera)的后翅等^[18, 19]。另一类典型昆虫翼出现在进化后期,其翅脉数量大大减少,但比前一类的更加强壮,翅膜也相应增厚许多。熊蜂(Hymenoptera)、蜂蝇(Diptera)和鹰蛾(Lepidoptera)等具有这类翅膀^[18, 20]。本文最后也将简单讨论这类昆虫翼的性质。

总体上说,蜻蜓翼的翅膜和翅脉都是由类似的表皮结构组成,几何形状虽有不同,材料的力学属性应该差异不大。蜻蜓翼的翅膜均被翅脉分割成小方块,也不易从翼上剥离和在实验装置上测量,所以实验的试样主要选取了蜻蜓翼的径脉。每根径脉从活体上切下后,立刻将其末端固定于精密电子天平上(天平处在一个密封方盒内,排除空气湿度、温度和气流等因素的影响),在距离固定点 10 mm 处施加强迫垂直位移,测试试样在弯曲状态下的应力松弛过程。实验数据由电子天平每隔 3 s 采集一次,其结果自动输入到计算机。

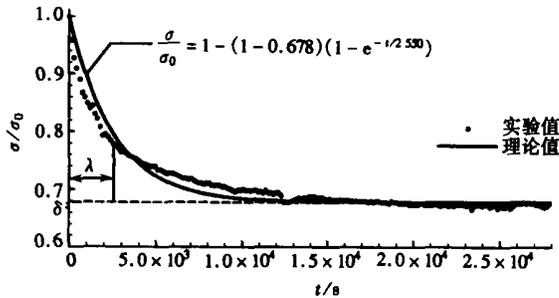


图1 归一化应力松弛曲线(圆圈代表实验测量值,实曲线代表拟合的指数函数曲线)

实验测出的一条典型的归一化应力(即松弛应力 σ 与初始应力 σ_0 之比)松弛曲线如图 1 所示。曲线显示:蜻蜓翼翅脉在施加突变载荷后,存在着明显的应力松弛现象,且松弛分为两个阶段。第一阶段,在比较短的时间内,应力急剧下降;第二阶段,应力在比较长的时间内缓慢降低,并趋于一个稳定值。粘弹性理论中的标准线性固体模型^[21]具有类似的应力松弛属性,其应力_时间松弛方程可写为

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 - (1 - \delta)(1 - e^{-t/\lambda}), \quad (1)$$

其中, t 为时间, δ 为残余应力, λ 为松弛时间。

根据实验数据,利用(1)式拟合应力松弛曲线,可得 δ 和 λ 分别为 0.678 和 2 550 s,则应力松弛方程写作

$$\bar{\sigma} = 1 - (1 - 0.618)(1 - e^{-t/2550}). \quad (2)$$

(2) 式曲线如图 1 中实线所示, 与实验结果吻合良好, 说明标准线性固体模型适合于描述蜻蜓翼的应力松弛属性。

标准线性固体模型本构方程的标准形式^[21]可写作

$$\sigma + \lambda \dot{\sigma} = E\varepsilon + (E\lambda/\delta)\dot{\varepsilon} \quad (3)$$

其中, E 为弹性模量, 表征了材料的弹性属性。参数 λ 和 δ 则表征了材料粘性属性, 残余应力 δ 越小, 松弛时间 λ 越长, 则本构中变化率相关项的系数越大, 即粘性属性越显著。

我们将进一步利用有限元分析方法证明, 此本构模型同样适用于描述蜻蜓翼拍动中的受载变形过程。

2 模型蜻蜓翼受载拍动的有限元分析

实验拍摄的真实蜻蜓翼如图 2 所示。本文忽略了蜻蜓翼的三维空间结构, 采用与真实翼外形相同的平板作为模型翼, 如图 3 所示, 模型展长 R 为 3.2 cm。根据真实蜻蜓翼翅脉、翅膜的分布特点, 模型翼分为 3 个区域, 1 区为前缘径向翅脉区, 2 区为臀脉区(图 2 中蜻蜓翼根部附近颜色较深部分), 其余部分为 3 区, 以较柔软的翅膜为主。翅脉、翅膜的材料本构关系均由 (3) 式定义, 其中粘性参数 δ 和 λ 由应力松弛实验待定, 而其弹性模量 E 是未知的, 计算选取的模量主要保证了抗弯刚度 (EI) 处在实验测量的合理范围之内: 前缘区域(1 区) 厚度设为 0.135 mm(蜻蜓翼径向翅脉的外径长度^[14]), 实验测量展长 3 cm 的昆虫翼展向抗弯刚度约为 $10^{-5} \text{ N}\cdot\text{m}^2$ ^[20], 我们假设前缘翅脉弹性模量为 60 GPa, 估算抗弯刚度约为

$$EI \approx \frac{1}{12}bh^3E \approx 1.23 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{m}^2 \quad (4)$$

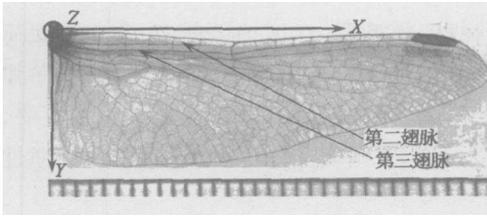


图 2 真实蜻蜓翼图像(以翼根部为原点, 展向为 X 方向, 弦向为 Y 方向, 垂直于纸面向内为 Z 方向, 建立空间坐标系 $OXYZ$)

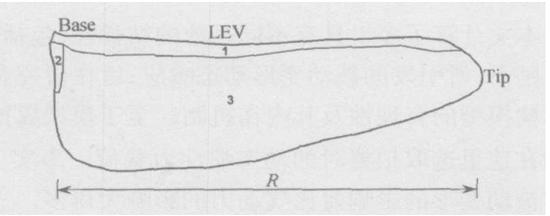


图 3 蜻蜓翼结构有限元模型(翼根部标记为 Base, 翼尖标记为 Tip, 两点之间的水平距离为展长 R 。模型翼根据翅脉、翅膜的分布特点, 分为 3 个区域)

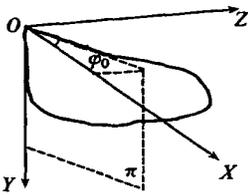


图 4 模型翼定轴往复挥拍运动示意图(根部挥拍角为过点 O 的翼切平面 π 与 OX 轴夹角)

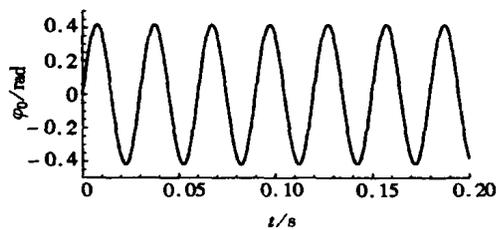


图 5 模型翼定轴挥拍运动中根部挥拍角随时间变化曲线

估算的弹性模量可能略高于真实值, 主要反映了蜻蜓翼三维结构增强刚度的效应^[22]; 2 区平板

厚度设为 0.135 mm, 弹性模量为 12 GPa; 3 区平板厚度设为 0.025 mm, 弹性模量为 3.7 GPa(真实昆虫翼翅膜之值^[23]), 其弦向抗弯刚度经估算为 $1.5 \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m}^2$, 同实验测量值^[20]相符。另外, 模型翼各部分密度 ρ 统一取作 1200 kg/m^3 ^[18]。蜻蜓翼的 Poisson 比 μ 未知, 本文取为 0.25 ^[14], 而且计算发现 μ 取 0.49 时, 结果没有明显差别, 说明在本文算例中 Poisson 比大小并不重要。

模型翼的运动模型抽象自蜻蜓自由飞行的测量结果^[7], 其运动的边界条件为: 根部无平动位移, 仅绕着 Y 轴做定轴往复挥拍(见图 4), 翼根部挥拍角 φ_0 的运动规律表示为

$$\varphi_0 = A \sin(2\pi f_0 t), \quad (5)$$

其中, A 为拍动幅度; f_0 为拍动频率, 本文计算均取 A 为 24.19°, f_0 为 33.4 Hz, 则根部挥拍角随时间变化曲线如图 5 所示。

与缓慢的应力松弛过程不同, 挥拍时模型翼加速率很大, 其惯性力的作用占主要地位, 绕定轴拍动的翼所受到的惯性力作用方向总垂直于翼面, 单位体积上作用的惯性力为

$$F_i = \rho \cdot r \frac{d^2 \varphi_0}{dt^2} = 4\pi^2 f_0^2 A \rho r \sin(2\pi f_0 t), \quad (6)$$

其中, ρ 为模型翼密度; r 为当地转动半径。

模型翼的挥拍动力学计算采用四边形壳单元网格和 Newmark 时间推进法, 作为初步的定性研究, 计算采用了线性小变形模型。经过验证, 本文计算均采用 1200 的网格单元数和 10^{-7} 的时间步长。

3 数值结果分析和讨论

本文计算了多组具有不同系数的粘弹性(包括线弹性)模型翼, 在挥拍运动中, 在交变载荷的激励下, 所引发的被动变形动态响应, 旨在研究和鉴别哪些情况是合乎实际的, 以揭示粘弹性本构模型的合理性及其内在机制。至于模型翼拍动时受哪种的载荷激励, 这本身并不重要, 我们在这里选取拍翼时的动态惯性力载荷。事实上, Combes^[16]早已指出, 对于多数昆虫, 惯性力对被动变形的影响要比气动力的影响大得多。

粘弹性模型翼的本构关系均由(3)式定义, δ 和 λ 系数组合确定了粘弹性本构的粘性属性, 本文选取了 4 组系数组合(见表 1)。第 1 组, $\lambda = 0$ 且 $\delta = 1$, 代表线弹性本构模型翼。第 2 组参数均依据应力松弛实验确定。第 3 组和第 4 组则分别比实验参数增大了松弛时间 λ 和减少了残余应力 δ , 用以比较说明本构中增大粘性属性对变形的影响。

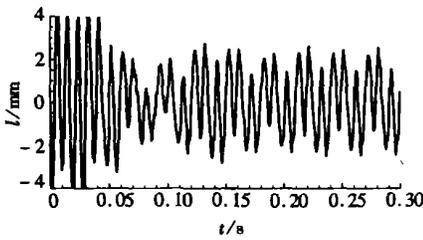
表 1 不同粘弹性模型翼的粘性系数

| 模型翼序号 | λ | δ |
|---------|-----------|----------|
| 1(弹性) | 0 | 1 |
| 2(实验参数) | 2550 | 0.678 |
| 3 | 25500 | 0.678 |
| 4 | 2550 | 0.3 |

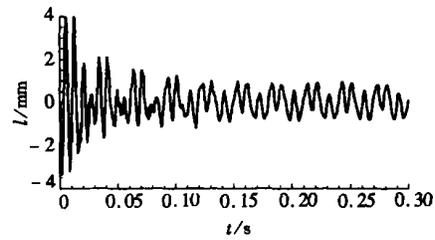
怎样来鉴别上述多组模型翼的被动变形响应是否合理而具有现实意义呢? 其准则是: 设昆虫翼从某个瞬时开始拍动, 受到周期性稳态变化的载荷激励作用(惯性力和气动力都是这类载荷), 所引起的翼面任一点的变形过程应该快速地趋近稳态, 且不会引起显著的高次谐振。这个准则已被对昆虫翼变形的实际观测所证实。不失一般性地, 我们主要考察 4 组模型翼翼尖的变形过程(见图 6 和图 7)。

由图 6 可见, 与粘弹性模型翼相比, 线弹性模型翼的动态变形规律偏离了上述准则。在拍

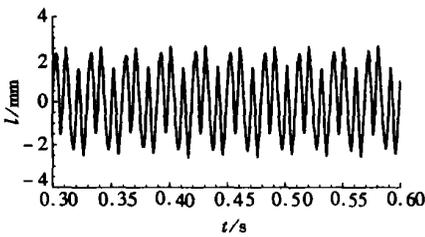
动初始阶段(图 6a, b), 弹性变形的曲线杂乱无章, 看不出周期性变化规律; 而粘弹性变形的幅值则从开始迅速地减小, 且其相位逐渐呈现出周期性变化的趋势。达到稳态拍动阶段后(图 6c, d), 弹性变形的幅度明显偏大, 而且包含有很大幅度高频谐振(见图 6e, f 中, 频率为 f_1 和 f_2 的谐振振幅远超实际测量值), 这些都与实验观测^[7] 不符; 在粘弹性变形中, 高频谐振已被大大地抑制了, 使得变形的幅值减小, 并趋近于稳态周期性, 比较接近真实情况。试设想: 如果把昆虫翼看作一个弹性系统, 任何激励都会引发多种频率的伴随振动, 由于空气介质的阻尼很小, 不足以起到使之衰减的作用, 其结果必然是翼存在着较显著的系列高次谐振的变形成分, 即翼不停地抖动, 这种情况实际上是不存在的。正是由于昆虫翼经历了亿万年的进化, 其材料性能不仅有弹性, 而且还有粘性, 足以阻滞这种情况的出现。



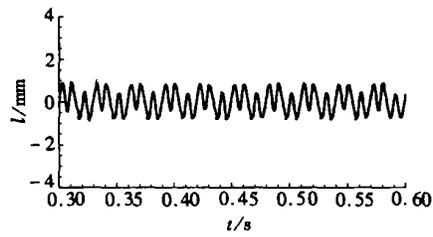
(a) 模型翼 1 拍动初始阶段的变形过程



(b) 模型翼 2 拍动初始阶段的变形过程



(c) 模型翼 1 拍动稳态阶段的变形过程



(d) 模型翼 2 拍动稳态阶段的变形过程

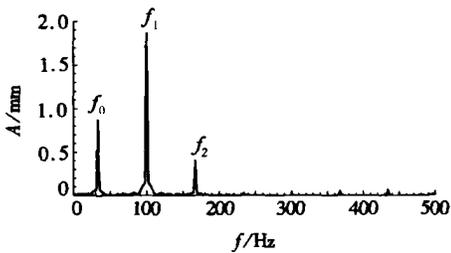
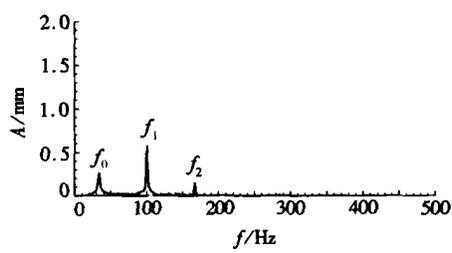
(e) 模型翼 1 拍动稳态阶段变形的频谱图
(低频 f_0 为拍翼频率)(f) 模型翼 2 拍动稳态阶段变形的频谱图
(低频 f_0 为拍翼频率)

图 6 两类模型翼绕定轴挥拍运动中的翼尖动态变形

(左列表示模型翼 1 的弹性变形, 右列表示模型翼 2 的粘弹性变形)

在确认蜻蜓翼粘弹性本构属性的同时, 我们还有必要分析本构关系中粘性大小对动态变形的影响。图 7(a)~(c) 显示了 3 个粘弹性模型翼稳态阶段变形规律的比较: 模型翼 2 为由实验确定粘弹性系数的模型翼; 模型翼 3 相对于 2, 增大了松弛时间, 即粘性增大了; 模型翼 4 相对于 2, 减小了残余应力, 也是粘性增大了。可以看到三者变形具有类似之处, 都符合上述关于变形合理性的判别准则, 但是其幅度依次减少, 这说明: 1) 不论参数 λ 和 δ 大小的粘弹性本

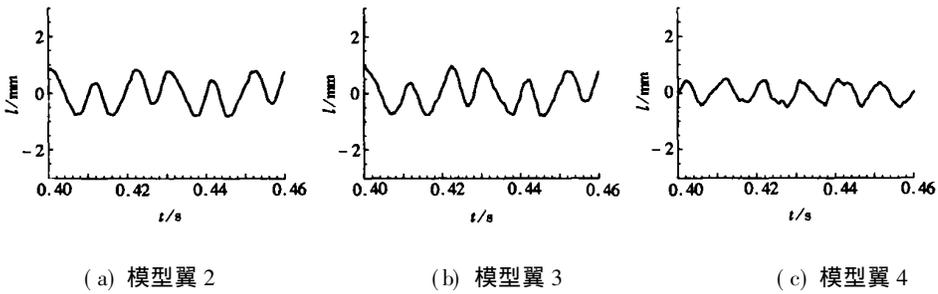


图 7 不同粘弹性模型翼绕定轴挥拍运动中, 达到稳态拍动阶段时的翼尖变形随时间变化曲线((a)~(c)分别为表 1 中的粘弹性模型翼 2~4)

构模型, 都具有阻尼高次谐振的作用, 促使变形过程趋于稳态; 2) 随着粘性增大, 变形的整体幅度也随之减小了, 但是如果粘性太大, 会阻碍昆虫利用其柔性变形的效应, 而且将为其粘弹性翼在拍动中损耗的功率付出太多的代价, 这也不符合实际情况。

4 结 论

本文通过真实蜻蜓翼的应力松弛实验发现其材料存在着明显的粘弹性特征, 该生物材料的本构关系可描述为标准线性固体模型。为了验证此本构模型是否同样适用于模拟拍动翼的变形过程, 我们根据实验测量所得的蜻蜓翼结构特性, 建立了一个简化的平板模型翼。采用有限元法计算了不同粘弹性(包括纯弹性)的模型翼, 在惯性力作用下绕定轴往复挥拍中的动态变形过程。翼尖动态变形的结果显示, 线弹性模型翼拍动时产生的被动变形过大, 且含有极大的高次谐振成分, 使翼不停的抖动, 完全偏离稳态周期变形规律, 与实验观察结果不符。而粘弹性模型翼产生的被动变形, 其高次谐振幅度受到了材料粘性大小不等的阻尼作用, 动态变形的幅值相对减小, 且在不同程度上趋近于稳态规律, 这个结果接近于昆虫飞行的实际观测情况。因此, 把翼的材料看作线弹性是不适当的, 粘弹性才是蜻蜓翼本构关系属性的合理描述。进一步的参数比较发现, 模型翼本构中的粘性成份越大, 在相同拍动运动条件下, 翼的被动变形幅度越小。但是粘性过大无疑会增大拍动过程的能耗, 所以蜻蜓翼材料本构中的粘性系数大小应该在一个恰当的范围内, 既能保证动态变形较快趋近于稳定的周期过程, 具有适当的变形幅值, 又不至于消耗过多的能量。

虽然本文主要计算了蜻蜓翼, 但是亦可进行推广。Combes^[20]等人系统测量了 6 个目, 16 个不同种的昆虫翼的抗弯刚度, 结果发现其刚度似乎和翅脉、翅膜的分布形式无关, 只和翼的外形相关。可以证明, 昆虫翼拍动可以经归一化处理为统一的模型翼拍动问题。由此可知, 粘弹性本构模型不仅适用于蜻蜓翼, 也应该是昆虫翼的一个普遍性质。不仅如此, 在鱼类游动研究^[24]中, 早已发现粘弹性本构关系更适合于鱼体被动变形的计算。推而广之, 粘弹性本构关系应该是一切有机生物体材料的固有性质。

致谢: 本文工作得益于清华大学曾理江教授及其研究组的大力帮助, 在此谨表忱谢!

[参 考 文 献]

- [1] Ellington C P, Van den Berg C, Willmott A P, et al. Leading edge vortices in insect flight[J]. Nature, 1996, 384(6610): 626—630.

- [2] Dickinson M H, Lehmann F O, Sane S P. Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight [J]. *Science*, 1999, **284**(5422): 1954—1960.
- [3] SUN Mao, TANG Jian. Lift and power requirements of hovering flight in *Drosophila virilis*[J]. *J Exp Biol*, 2002, **205**(16): 2413—2427.
- [4] YU Yong-liang, TONG Bing-gang. A flow control mechanism in wing flapping with stroke asymmetry during insect forward flight[J]. *Acta Mech Sinica*, 2005, **21**(3): 218—227.
- [5] Ennos A R. The kinematics and aerodynamics of the free flight of diptera[J]. *J Exp Biol*, 1989, **142**(1): 49—85.
- [6] Willmott A P, Ellington C P. The mechanics of flight in the hawkmoth *Manduca sexta* I —Kinematics of hovering and forward flight[J]. *J Exp Biol*, 1997, **200**(21): 2705—2722.
- [7] WANG Hao, ZENG Li-jiang, LIU Hao, et al. Measuring wing kinematics, flight trajectory and body attitude during forward flight and turning maneuvers in dragonflies[J]. *J Exp Biol*, 2003, **206**(4): 745—757.
- [8] Mueller T J. Fixed and Flapping Wing Dynamics for MAV Applications[M]. AIAA Progress in Astron and Aeron, Massachusetts: AIAA, 2001, 195.
- [9] Alexander R M. Winging their way[J]. *Nature*, 2000, **405**(6782): 17—18.
- [10] Wootton R J. From insects to microveechicles[J]. *Nature*, 2000, **403**(6766): 144—145.
- [11] Dudley R. Unsteady aerodynamics[J]. *Science*, 1999, **284**(5422): 1937—1938.
- [12] 童秉纲, 陆夕云. 关于飞行和游动的生物力学研究[J]. *力学进展*, 2004, **34**(1): 1—8.
- [13] Wootton R J. Functional morphology of insect wings[J]. *Annu Rev Entomol*, 1992, **37**: 113—140.
- [14] Antonia B K, Ute P, Werner N. Biomechanical aspects of the insect wing: an analysis using the finite element method[J]. *Computers in Biology and Medicine*, 1998, **28**(4): 423—437.
- [15] Herbert R C, Young P G, Smith C W, et al. The hind wing of the desert locust (*Schistocerca gregaria* Forskål) III—A finite element analysis of a deployable structure[J]. *J Exp Biol*, 2000, **203**(19): 2945—2955.
- [16] Combes S A, Daniel T L. Into thin air: contributions of aerodynamic and inertial-elastic forces to wing bending in the hawkmoth *Manduca sexta*[J]. *J Exp Biol*, 2003, **206**(17): 2999—3006.
- [17] Vincent J F V. Insect cuticle: a paradigm for natural composites[J]. *Symp Soc Exp Biol*, 1980, **34**(1): 183—210.
- [18] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight II —Morphological parameters[J]. *Phil Trans R Soc Lond B*, 1984, **305**(1122): 17—40.
- [19] Wootton R J, Evans K E, Herbert R, et al. The hind wing of the desert locust (*Schistocerca gregaria* Forskål) I —Functional morphology and mode of operation[J]. *J Exp Biol*, 2000, **203**(19): 2921—2931.
- [20] Combes S A, Daniel T L. Flexural stiffness in insect wings I —Scaling and the influence of wing venation[J]. *J Exp Biol*, 2003, **206**(17): 2979—2987.
- [21] 周光泉, 刘孝敏. 粘弹性理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996.
- [22] Newman D J S, Wootton R J. An approach to the mechanics of pleating in dragonfly wings[J]. *J Exp Biol*, 1986, **126**(1): 361—372.
- [23] Smith C W, Herbert R H, Wootton R J, et al. The hind wing of the desert locust (*Schistocerca gregaria* Forskål) II —Mechanical properties and functioning of the membrane[J]. *J Exp Biol*, 2000, **203**(19): 2933—2943.
- [24] Cheng J Y, Pedley T J, Altringham J D. A continuous dynamic beam model for swimming fish[J]. *Phil Trans R Soc Lond B*, 1998, **353**(1371): 981—997.

Viscoelastic Constitutive Model Related to Deformation of Insect Wing Under Loading in Flapping Motion

BAO Lin¹, HU Jin_song², YU Yong_liang¹,
CHENG Peng², XU Bo_qing², TONG Bing_gang¹

(1. Laboratory for Biomechanics of Animal Locomotion, Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China;

2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, P. R. China)

Abstract: Flexible insect wings deform passively under periodic loading during flapping flight. The wing flexibility is considered as one of the specific mechanisms on improving insect flight performance. The constitutive relation of the insect wing material plays a key role on the wing deformation, but has not been clearly understood yet. A viscoelastic constitutive relation model was established based on the experimental results: the stress relaxation experiment of a dragonfly wing (in vitro). This model was examined by the finite element analysis of the dynamic deformation response for a model insect wing under the action of the periodical inertial force in flapping. It is revealed that the viscoelastic constitutive relation is rational to characterize the biomaterial property of insect wings in contrast to the elastic one. The amplitude and form of the passive viscoelastic deformation of the wing is evidently dependent on the viscous parameters in the constitutive relation.

Key words: constitutive relation; viscoelasticity; stress relaxation; finite element analysis; insect wing; passive deformation