

独角仙生物学特性、鞘翅微观结构及在仿生领域的应用

胡济舟¹, 李文尧^{2*}

(1. 上海星河湾双语学校, 上海 201108;

2. 上海工程技术大学, 上海 201620)

摘要 独角仙是一种广泛分布于我国华北、华中、华南地区及日本和一些东南亚国家的大型甲虫, 学名为双叉犀金龟, 属于鞘翅目金龟子科。独角仙因其观赏价值和科学研究价值引起了广泛关注。本文研究了独角仙甲虫的生物学特性及其成长阶段, 分析了独角仙的鞘翅微观结构及其力学性能, 表明了独角仙的鞘翅是一种轻质、高强度的自然复合材料, 为仿生复合材料的开发提供良好的设计思路。

关键词 独角仙; 成长阶段; 鞘翅结构; 仿生应用

中图分类号: Q811

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2023)02-0103-03

独角仙由卵长成幼虫, 幼虫发展为一龄、二龄和三龄幼虫, 三龄幼虫生长发育并蜕化成蛹, 最后再从蛹中羽化为成虫^[1]。在经过数百万年的进化之后, 独角仙演化出了各具特色的种群, 有些种群的甲壳有着高强度和断裂韧性、高抗挤压和抗剥离能力, 是一种力学性能优异的轻型生物复合材料, 这样优异的力学性能来自独角仙独特的鞘翅微观结构。由于翅鞘的优良的机械性能, 如高强度和韧性、各向异性和自我修复的能力, 激励着科研工作者研究其微观结构以及在多个高端领域的应用^[2]。本文简单描述了独角仙的生物学特性、鞘翅微观结构及其性能, 并总结了其在仿生领域的应用。

1 生物学特性

独角仙成虫一般体型较大, 且雄雌异性(如图 1 所示)。在野生自然环境下, 独角仙成虫在初夏开始出现, 最多见于 6~7 月, 到 9 月则大部分都会死亡。成虫白天多在落叶堆、土壤内或者腐质地等阴暗潮湿环境休息, 具有趋光性和喜湿性。

独角仙成虫交配后, 雌虫会在 1~2 周后产出乳白色或淡黄色圆形或椭圆形虫卵(图 1a)。直径约为 3mm~5mm, 重量不到 1g。虫卵在 1~2 周后孵化为一龄幼虫(图 1b, 中间体型较小者), 重量通常为 1g~3g, 身体直径约 5mm, 头颚宽约 3mm~5mm。一龄幼虫一个月内蜕皮为二龄幼虫(图 1b, 周围 3 只较大者), 重

量通常为 5g~12g, 身体直径约 7mm~12mm, 头颚宽为 5mm~10mm。二龄幼虫再次蜕皮为三龄幼虫(图 1c), 通体为乳白色, 后期会呈黄白色, 头颚的颜色也变成黑褐色。在饲养条件大致相同的情况下, 三龄阶段可以通过重量区分雌雄, 雌虫通常 10g~20g, 雄虫通常 20g~35g。三龄幼虫身体直径长至 2cm~3cm, 头颚宽度增加明显, 可达 10mm 左右。

三龄幼虫在 5~6 个月后开始化蛹, 雄虫头部长出长为 1.5cm~3.0cm 且对称的叉角, 雌虫则没有。化蛹一个月左右后, 独角仙羽化变成成虫(图 1d)。羽化过程持续 12~24 小时, 刚羽化的成虫身体潮湿, 鞘翅为白色且柔软。羽化完成后, 成虫会在蛹室中进行为期 10~12 天的蛰伏。蛰伏期中, 成虫静待鞘翅干燥变硬, 且呈黑色有光泽。雄成虫体长约 5cm~8cm, 特征标志是有一对长约 1.5cm~3.0cm、可活动的对称四分叉角突和一对较短不可活动的双分叉胸角(图 1e)。雌成虫体长约 3cm~6cm, 无角突或胸角(图 1f)。成虫的寿命通常在 2 个月左右。

2 鞘翅微观结构及其性能

独角仙甲虫的翅膀由前翅(也被称为鞘翅)和后翅组成。鞘翅是比较坚硬的, 甲虫的功能翅膀是后翅, 可以飞行。鞘翅是由交叉铺层结构和中间的螺旋缠绕纤维柱构成。这种交叉铺层结构实际上主要是由几丁质纤维和蛋白质组成, 几丁质纤维层以螺旋方式延伸

*本文通讯作者, E-mail: liwenyao@sues.edu.cn.

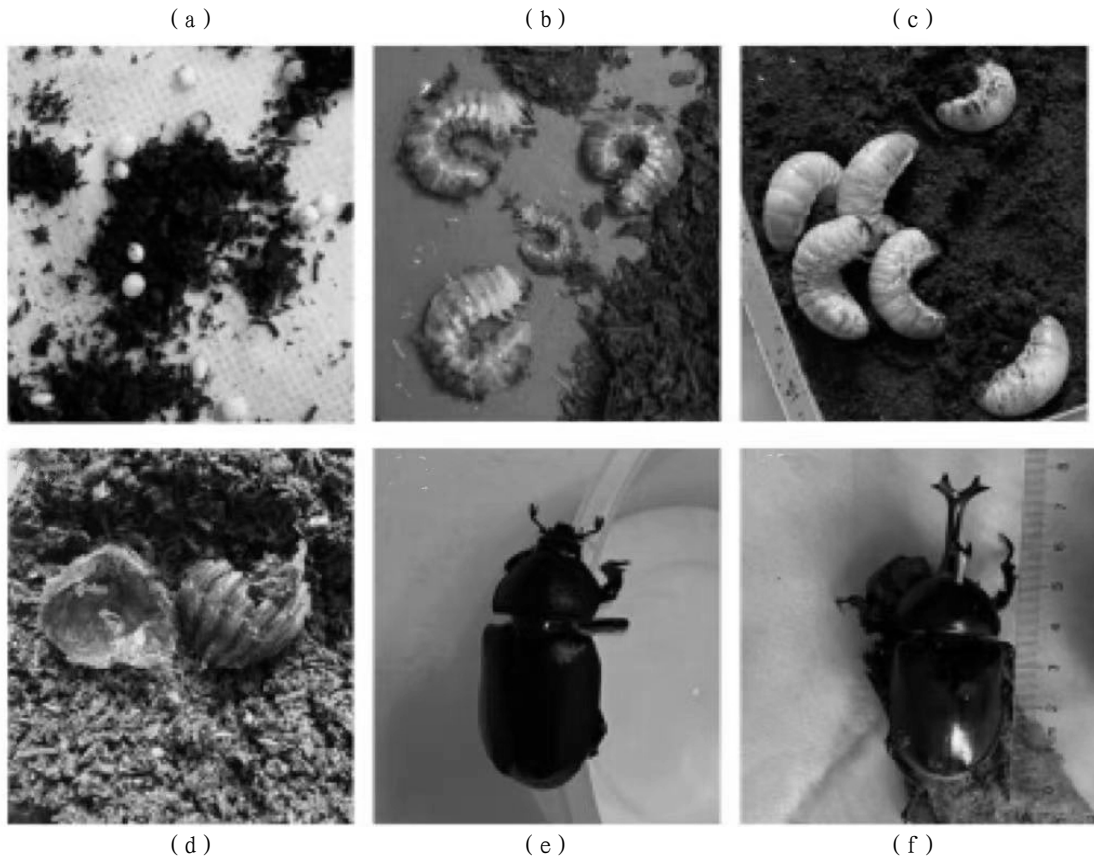


图1 独角仙成长阶段

(注: (a) 卵; (b) 一龄和二龄幼虫 (中间较小者为 一龄幼虫, 周围 3 只较大者为二龄幼虫); (c) 三龄幼虫; (d) 幼虫从蛹中羽化; (e) 雌成虫; (f) 雄成虫。)

到小梁轴中间的纤维柱形成芯层结构, 不仅能起到减重的作用, 还大大加强了鞘翅整体的抗冲击性能, 进而提升鞘翅的断裂韧性。东南大学陈锦祥团队^[3]以独角仙和锹形虫为实验对象, 系统研究了甲虫鞘翅的纵向剖面 and 横向剖面, 通过分析鞘翅断面凹凸对接结构和拉伸应力-应变曲线, 表明甲虫鞘翅具有抗弯曲和抗扭曲的力学性能。

3 仿生应用

由前文对于独角仙甲虫鞘翅微观结构及其性能的研究可以看出, 其独特的鞘翅结构具有轻质和高强度的特质, 是一种优异的轻质复合材料。此外, 基于鞘翅中几丁质纤维层和小梁柱之间的空腔拓扑结构, 可以仿照甲虫鞘翅的结构设计具有空腔的材料, 在空腔内填充一些多功能材料, 比如吸能、隔热等材料。因此, 独角仙独特的鞘翅微观结构及其力学性能可为设计一种新型轻质的仿生材料提供良好的思路, 也为其在仿生领域的应用打下基础。

3.1 热防护系统

高超声速飞行器在飞行过程中不仅会受到气动热的影响, 还会受到气动载荷的影响。因此, 飞行器需要一个热保护系统能够承受气动热和气动载荷, 以减少结构损伤, 特别是在前缘和前锥处。独角仙鞘翅由于独特的微观结构赋予的优异性能, 因而成为热保护系统热阻特性的有力候选材料。韩国建国大学 Le 等人^[4]首先观察了甲虫鞘翅的微观结构, 分别对切翅和活翅模型进行了传热实验研究。结果表明, 独角仙甲虫鞘翅的传热特性为设计热防护系统提供了科学依据, 了解独角仙的鞘翅结构有利于设计飞行器有效的热防护系统。

3.2 仿生建筑材料

独角仙的鞘翅结构经过漫长的进化过程, 已成为具有特殊生物功能的优良生物结构。蜂窝板是一种常见的复合材料结构, 具有轻质、高强度的特点, 已广泛应用于航空、建筑以及公共交通等领域, 在地震、

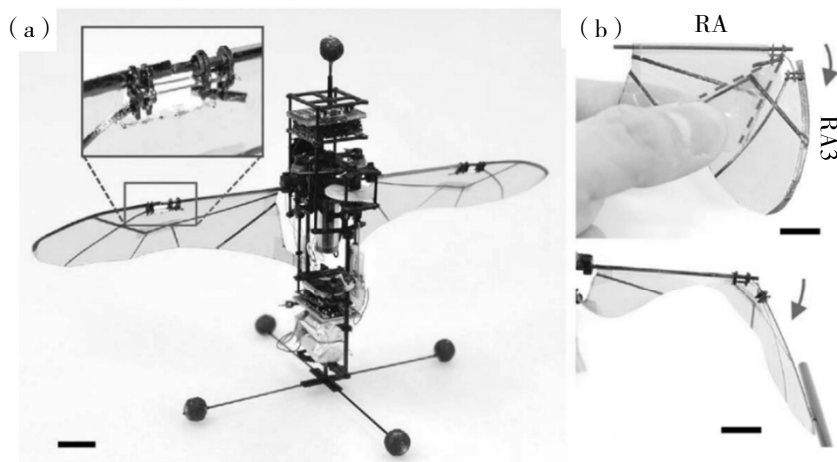


图 2 扑翼机器人折叠机翼的实现

洪水等自然灾害应急工程中也发挥了重要作用,如应急桥梁建设、灾民和军队临时建筑等。东南大学陈锦祥团队^[5]对基于甲虫鞘翅结构研发的仿生蜂窝板进行了长期的研究,虽然在制备过程中尚存在纤维含量低、成型时间长、无法准确仿制精确的鞘翅微观结构等缺点,但依旧为鞘翅仿生结构的制备提供了一个崭新的方向和平台。

3.3 微型扑翼飞行器

近年来,小型自主或遥控飞行器(简称微型飞行器)在工程界引起了广泛关注,大量应用于危险环境探测、侦察和搜救。然而飞行器在升力产生和飞行控制方面遇到了巨大的挑战,因此,需要设计合理的仿生机翼来产生足够的升力和较高的飞行性能。独角仙拥有坚硬的前翅(鞘翅)和可折叠的后翅,而且鞘翅的旋转角度和锁翼系统是提高甲虫飞行能力的重要特征,这些都引起了科技工作者对其机翼折叠机构和飞行运动学的研究兴趣。韩国建国大学Phan团队^[6]受独角仙展翅的启发,展示了如何使一个具有悬停功能的扑翼机器人实现机翼折叠(如图2所示),使扑翼机器人在碰撞后安全飞行。可折叠机翼为解决机翼碰撞问题提供了一种有效的方法,有助于提高机器人的办事效率和安全性。

4 总结

1. 自然条件下,独角仙从卵孵化经历一龄、二龄和三龄幼虫,再成长为成虫,约需7个月时间;成虫为雌雄异型,具有坚硬的甲壳,有趋光性和喜湿性的特征^[7]。

2. 独角仙鞘翅显示了夹心板结构和中间有空隙层和小梁的框架结构,是具有拱形空腔的中空轻质生物

复合材料,小梁中的几丁质纤维层之间的曲线状连续连接形成层合板复合材料结构。

3. 独角仙鞘翅生物复合材料有着优异的抗剥离结构和抗压、抗弯等力学性能,是一种轻质、高强度的复合结构,其在仿生领域的研究有着极高的价值和意义,应用领域广泛。

参考文献:

- [1] 陈俊屹. 不同土壤环境对双叉犀金龟3龄幼虫至成虫发育过程的影响[J]. 科学咨询/科技管理,2021(06):67-68.
- [2] 魏茂,郭建军. 资源昆虫双叉犀金龟研究进展[J]. 山东农业生物学报,2022,41(01):49-55.
- [3] Zhang Z J, Chen J X, Elbashiry E M A, et al. Effects of changes in the structural parameters of bionic straw sandwich concrete beetle elytron plates on their mechanical and thermal insulation properties[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2019(90):217-225.
- [4] Le V T, Ha N S, Goo N S. Thermal protective properties of the Allomyrina dichotoma beetle forewing for thermal protection systems[J]. Heat Transfer Engineering, 2019, 40(17-18):1539-1549.
- [5] 同[3].
- [6] Phan H V, Park H C. Mechanisms of collision recovery in flying beetles and flapping-wing robots[J]. Science, 2020, 370(6521):1214-1219.
- [7] 牛兰岚. 节肢动物蜈蚣和独角仙抗菌活性成分的分离及结构鉴定[D]. 河南:河南科技大学,2015.