中国科学 C辑:生命科学 2008 年 第 38 卷 第 6 期: 542 ~ 549
www.scichina.com life.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

甲虫鞘翅间的锁合机构、联接力及其表面织构效应

戴振东[①], 张亚锋[①], 梁醒财[②], 孙久荣[①③]

① 南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所, 南京 210016;
② 中国科学院昆明动物研究所, 昆明 650223;
③ 北京大学生命科学学院, 北京 100871
E-mail: zdddai@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2007-07-28; 接受日期: 2008-02-02
国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2007CB607600)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 60535020 和 50635030)和面上项目(批准号: 90205014 和 50675160)及航空科学基金(批准号: 2007ZA52008)资助项目

摘要 轻质材料、结构和联接机构对高性能飞行器的发展具有重要意义. 利用组织切片技术和 SEM 获得鞘翅及其连接部位的几何结构和形貌; 建立三维运动行为观测系统研究甲虫鞘翅的展开/闭合运动行为, 以求证其运动机构; 建立鞘翅联接力的测量装置, 以测量鞘翅间的联接力. 结果表明: 甲虫鞘翅绕一个轴做简单的旋转运动实现展开/闭合运动; 鞘翅间的联接力可高达自身体重的 160 倍; 鞘翅间的连接是榫嵌入机构、榫表面的微观织构和锁合解开的角度对联接力影响很大. 上述鞘翅轻质结构和联接机构可能对航空航天器的结构和机构设计有启示.

关键词
甲虫
鞘翅
联接机构
鞘翅结构
织构效应

轻质结构和联接机构在航空航天和现代交通领域具有重要的价值, 如卫星每减 1 kg结构质量, 可使火箭和推进剂减轻 500 kg[1]. 统计表明, 对商用飞机、战斗机和卫星或空间站等飞行器, 每减少 1 磅(1 磅 = 0.454 kg)的结构重量, 能带来的经济效益分别约为 300, 3000 和 30000 美元[2]. 飞机零件总数的 60%为连接件[3], 且联接件的性能已成为决定飞行器可靠性和性能质量比的主要因素之一. 轻质、可靠和易于控制的结构和联接机构对舰载飞机的可折叠机翼设计也很重要. 从材料和联接机构的角度开展仿生研究, 达到减轻飞行器质量的目的, 已经有大量研究和许多成功的范例, 如蜂窝结构是航空器上最常用的轻质结构.

在百万年的演化和生存竞争中, 生物体发展了和其生存环境相适应、节能高效和易于控制的材料拓扑结构、表面织构、运动机构和结构. 甲虫是少数几种具有全空间运动(空中飞行、地面/墙面/天花板爬行、地下挖洞甚至水中游泳)能力的动物. 其生存环境和生存方式要求甲虫的运动机构和承载结构具有材料轻质化、运动模式简单化、控制简单有效等特点. 就甲虫鞘翅而言, 从甲虫飞行前翅演化而来, 鞘翅间及鞘翅与身体间进化出了独特的连接结构, 用于保护飞行后翅不受污染、鞘翅还要易于打开, 适应后翅的飞行. 已有对甲虫翅(含前翅和后翅)的研究多数集中在后翅方面. 对前翅(也叫鞘翅)的研究关注到了鞘翅间骨缝联接的形态及其接合方式[4]及进化过程联接方式的演变即刺状联接减少而榫状联接增加[5]. Gorb[6~8]从生物形态学和摩擦学的角度, 研究了许多昆虫身体各部位联接机构, 如蜻蜓头与身体的联接, 翅与身体的联接、飞行前翅与后翅的联接, 鞘翅和身体之间的联接, 为联接结构的仿生设计提供了很好的生物学知识. Gorb 和Goodwyn[9]测定了甲虫鞘翅与身体间的联接力, 但没有研究分析鞘翅的运动

机构, 也没有讨论表面织构对联接力学性能的影响. Hass[10]研究了甲虫后翅的展合问题. 甲虫爪的材料的力学性能[11]、鞘翅的力学性能[12,13]已经有了初步的实验和分析; 对甲虫鞘翅的结构特点和力学性能也有相当数量的研究[14~17].

本文首次系统研究甲虫鞘翅的张合机构, 鞘翅间的联接方式, 联接部位的表面织构对联接的影响, 研究目的是为飞行器的轻质化设计提供仿生的生物学知识.

1 材料与方法

1.1 实验动物的采集和饲养

本研究共用 4 种甲虫: 神农蜣螂(*Catharsius molossus* (Linnaeus, 1758)), 采自河南省平顶山市和江苏省如皋县, 置于实验室笼中, 用腐质树叶饲养, 保持较高湿度(n=26); 白星花金龟(*Potosia* (*Liocola*) *brevitarsis* (Lewis, 1879)), 采自陕西省三原县, 置于实验室笼中, 用砀山梨饲养(n=32); 双叉犀金龟(*Allomyrina dichotoma* (Linnaeus, 1771)) (n=16)和巨锯锹甲(*Serrognothus titanus* (Boiscuval, 1835)) (n=10), 采自江苏省南京市紫金山, 捕获后随即进行实验.

1.2 组织及表面织构观察

鞘翅用清水冲洗后自然干燥. 鞘翅需预先进行软化, 石蜡包埋后作生物组织切片并进行观察. 进行电子显微分析的鞘翅需干燥后, 离子溅射喷金后用低真空扫描电子显微镜(JSM-5600LV, 日本)进行观测. 具体前处理工艺见文献[18].

1.3 鞘翅展开/闭合运动行为的观测

采用活体成虫在图 1 所示的实验系统上进行鞘翅运动行为的观测. 该系统由甲虫固定架、反射镜、高速摄像机和图像数据采集组成. 高速摄像(500 幅/s)同步记录甲虫及其在反射镜中的图像, 在计算机中获取标记点的像素位置, 经标定得到三维坐标值(详见文献[19]).

1.4 鞘翅联接力的测量

实验所用仪器(如图 2(a))为南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所研制的多用途材料性能实验仪. 实验时, 将鞘翅从甲虫身上取下后保持自然对接状态, 然后在左右鞘翅上分别施加等值、反向、共线的作用力, 力的作用线与鞘翅中腹部边缘所在平面垂直, 力的作用点的选择应当保证在施加力的过程中鞘翅不发生扭曲且整个鞘翅联接区域同时分开. 将鞘翅一边固定在试样台(图 2(b))上, 另一边在鞘翅间联接长度的中点与绳相连, 绳的另一头固定在传感器上, 调节垂直步进移动系统使绳与鞘翅相切, 移动水平运动系统直到鞘翅联接分离, 传感器上的力通过数据采集并经计算机存储和处理.

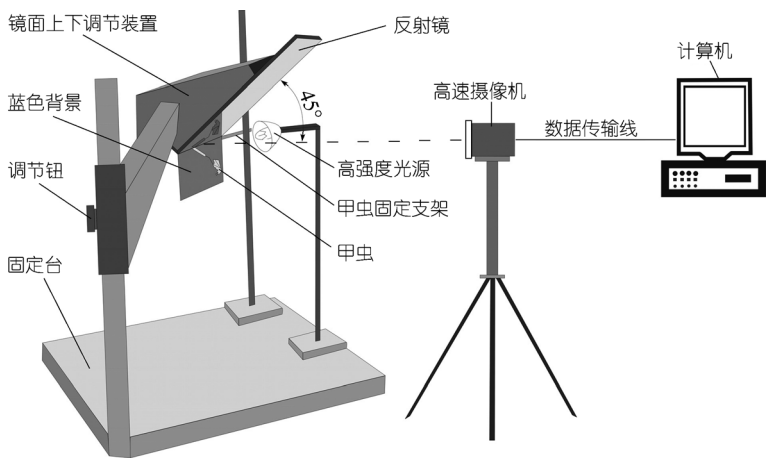

图 1 甲虫鞘翅运动行为学实验系统

甲虫固定在固定架上, 用高速摄像(500 幅/s)同步记录甲虫及其在反射镜中的图像, 图像经标定, 得到三维坐标值(参见图 3)

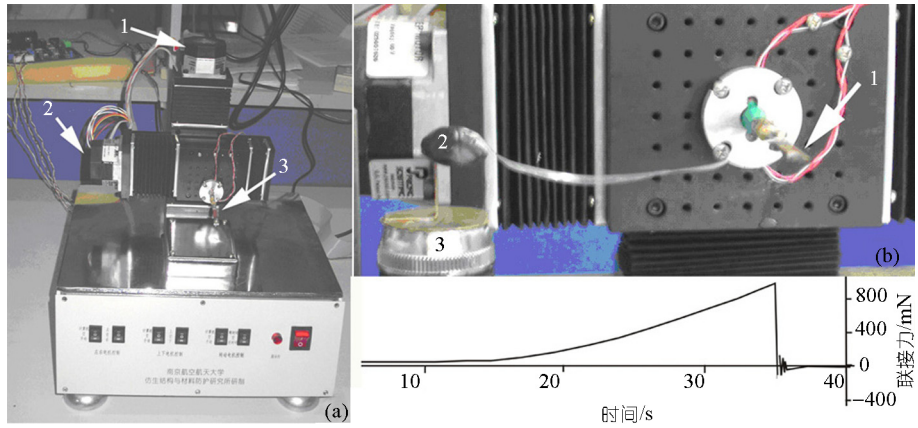

图 2　甲虫鞘翅联接力测试系统及方法

(a) 实验机组成. 1 为垂直步进移动组件, 2 为水平步进移动组件, 3 为二维载荷传感器; (b) 鞘翅(2)一边固定在可转动平台(3)上, 另一边用绳联结到传感器(1)上; (c) 传感器测得的联接力, 其中联结断开时力最大, 作为分析依据

2　结果

2.1　鞘翅的运动机构与联接结构

甲虫在非飞行状态下, 鞘翅闭合, 完整地覆盖在飞行翅上; 在甲虫飞行时, 鞘翅从闭合态张开, 不同的甲虫张开过程均呈现三维空间的转动, 但最终位置可因物种而异. 为认识鞘翅的运动规律和理解其机构组成, 我们在鞘翅末端分别做标记点, 用三维高速摄像系统记录鞘翅的展开和闭合过程, 在录像的每幅图片上, 读出标记点的 X, Y 和 Z 值, 获得标记点的三维运动轨迹(如图 3(a)), 对所有标记点的三维空间几何关系做回归分析, 证明鞘翅的张合运动为绕一个轴的转动, 不同的甲虫鞘翅转轴在甲虫体坐标内的角度也不同(如图 3(b)).

当鞘翅处于锁合状态时, 体视显微镜(Leica, Germany, MZ95, 125 倍)下, 可见两鞘翅通过楔形结构相互联接(如图 4 (a)和 (b)). 靠近头部楔入凸出部位及其对应的楔入槽短而较厚, 刚度较大; 而尾部楔入凸出部位及其对应的楔入槽长而较薄, 从头部向尾部呈现出逐步变化(图 4(c)).

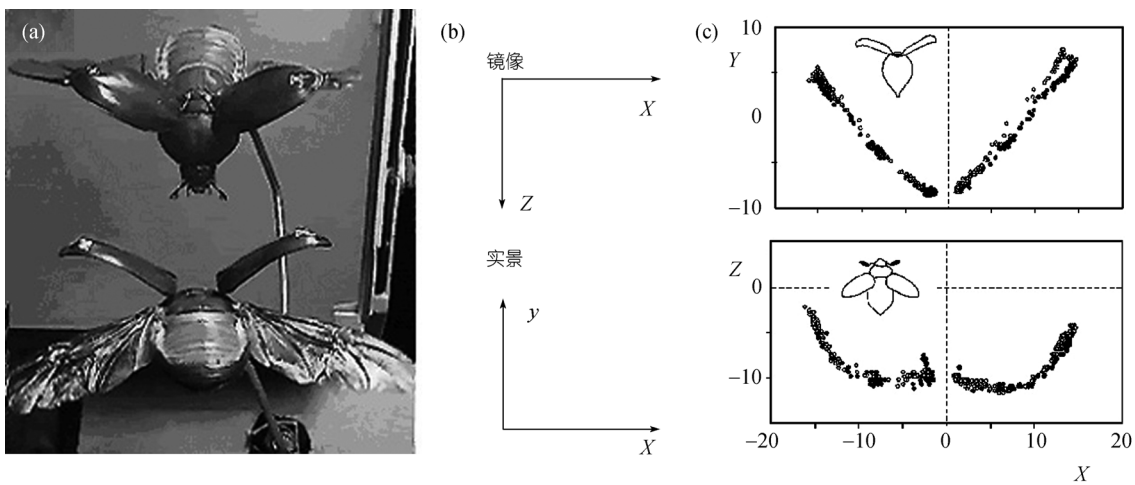

图 3　鞘翅张合轨迹及其运动机构的确认

(a) 用反射镜可同步获得甲虫鞘翅展开及闭合过程的三维图像; (b)实景坐标系和镜像坐标系; (c) 三维数据在 XY(上部)及 XZ(下部)平面内的投影

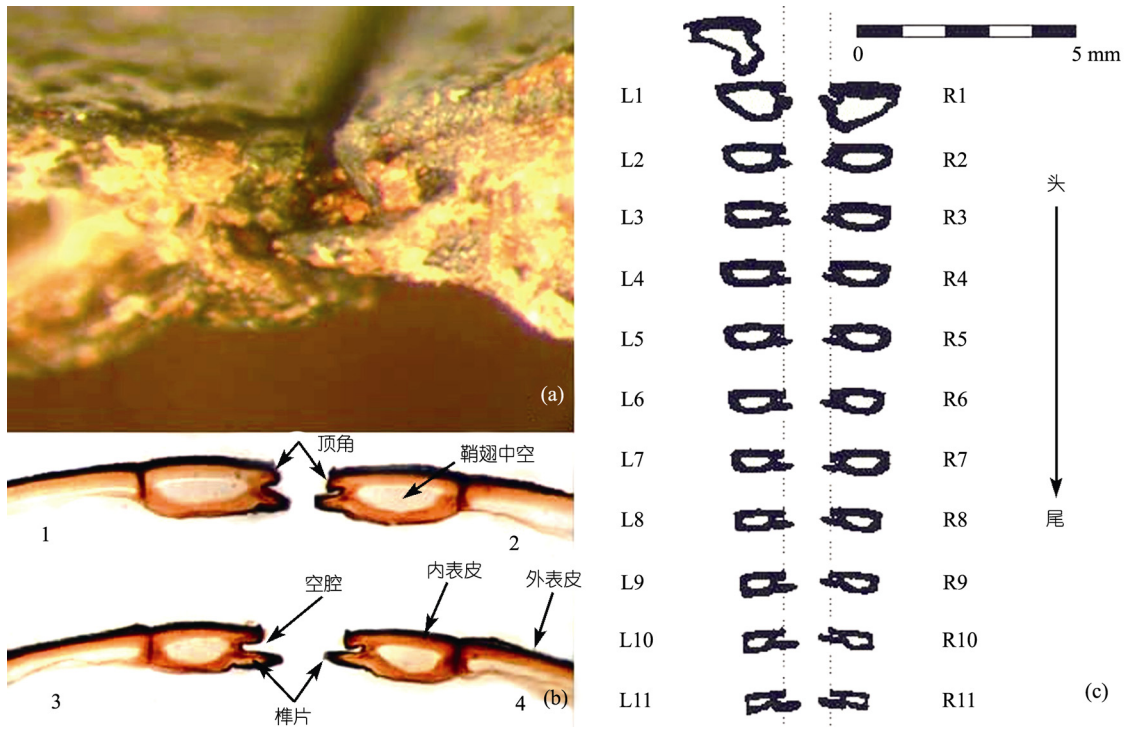

图 4 神农蜣螂鞘翅截面及切片

(a) 左右鞘翅啮合状态(风干样品断面); (b) 切片; (c) 鞘翅中腹部截面几何形态渐变图, 图中 L 表示左侧鞘翅, R 表示右侧鞘翅

2.2 鞘翅间的联接力

表 1 为 4 种甲虫鞘翅间联接力的测试结果. 可见白星花金龟的平均联接力最高(1014 mN, 总实验次数 23 次, 总实验动物数 n=16), 雄性神农蜣螂次之(623 mN), 双叉犀金龟第三(552 mN), 雌性神农蜣螂第四(218 mN), 巨锯锹甲最小(160 mN). 联接力的变动范围较大, 反映了甲虫的个体差异. 手工对接鞘翅与绳处于鞘翅中点位置的差异可造成误差(图 5(a)). 神农蜣螂的联接力雄性明显高于雌性. 为避免个体大小对联接力的影响, 用线绳沿鞘翅间缝测定长度, 得到单位长度鞘翅联接力(如图 5(b)), 结果表明白星花金龟单位长度的联接力显著高于其他几种甲虫的值. 进一步分析联接力与甲虫体重的比, 可见体态最小的白星花金龟(0.64 ± 0.06 g, n=22)联接力约为其自身质量的 160 倍; 巨锯锹甲(2.76 ± 0.98 g, n=10)联接力与体重的比最低, 为其自身质量的 6.5 倍. 以联接力与体重的比值分析, 雄雌间的差别有所减小, 但仍然有明显差距(图 5(b)).

2.3 鞘翅结构和表面织构对联接力的影响

图 6 为鞘翅联接区的几何构形及其表面微观几何(织构). 甲虫鞘翅闭合时, 主要在图 6(a)的 A, B 和 C 区发生接触. 其中 A 区在图 6(b) 中清楚表现为刚毛结构. B 和 C 区在图 6(b)中似为光滑表面, 但进一

表 1 甲虫鞘翅联接力的测试结果

	蜣螂(雄)	蜣螂(雌)	独角仙	巨锯锹甲	金龟子
实验次数	13	16	12	10	23
平均值/mN	623.92	218.21	552.24	160.12	1014.64
最大值/mN	1100.35	634.25	1055.24	342.02	1714.70
最小值/mN	315.82	52.41	170.69	64.57	422.77
偏差	171.41	152.07	206.54	75.77	303.86

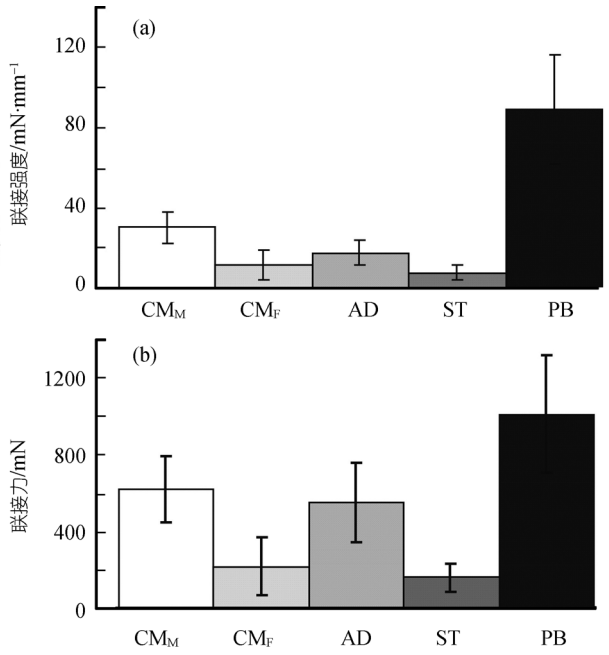

图 5

(a) 鞘翅间联接力 (b)鞘翅间联接强度 CM_M为雄性神农蜣螂, CM_F为雌性神农蜣螂, AD为双叉犀金龟, ST为巨锯锹甲, PB为白星花金龟

步观测(图 6(c))可见 B 区为几微米的倒刺结构. C 区为十几微米的短刺. 为研究上述 3 个部分表面织构对联接力的贡献, 用手术刀在显微镜下分别剔除图 6(a)中 A, B 和 C 各区的短毛刺, 仔细将鞘翅对接, 用 1.4 所述的方法测定去除 A, B 和 C 区短毛刺情况下的鞘翅联接力, 实验结果见图 7. 去除图 6(a)中 A 区的毛刺后, 鞘翅间的联接力没有变化(图 7(a)); 但去除图 6 中 B 和 C 区的毛刺, 联接力降低到几乎为零. 由此可见, 甲虫鞘翅间榫形联接区表面的织构在鞘翅的联接中起到了主要的作用. 同时说明这 3 个区域的表面织构在鞘翅联接结构中起不同的作用.

鞘翅间受力方向对联接力影响的实验方案见图 8 右上角. 实验中调节实验机垂直运动系统, 可以调节图 2(b)中绳的位置, 从而测定不同受力方向下鞘翅间的联接力. 实验结果表明, 在–60°~60°范围内, 鞘翅间联接力会随着夹角的增大而减小, 神农蜣螂的雄性鞘翅间联接力显著(图 8 中曲线 A, B)高于雌性(图 8 中曲线 C). 该结果提示, 若甲虫能够控制鞘翅展开时的角度, 则能够用较小的力将鞘翅联接顺利打开.

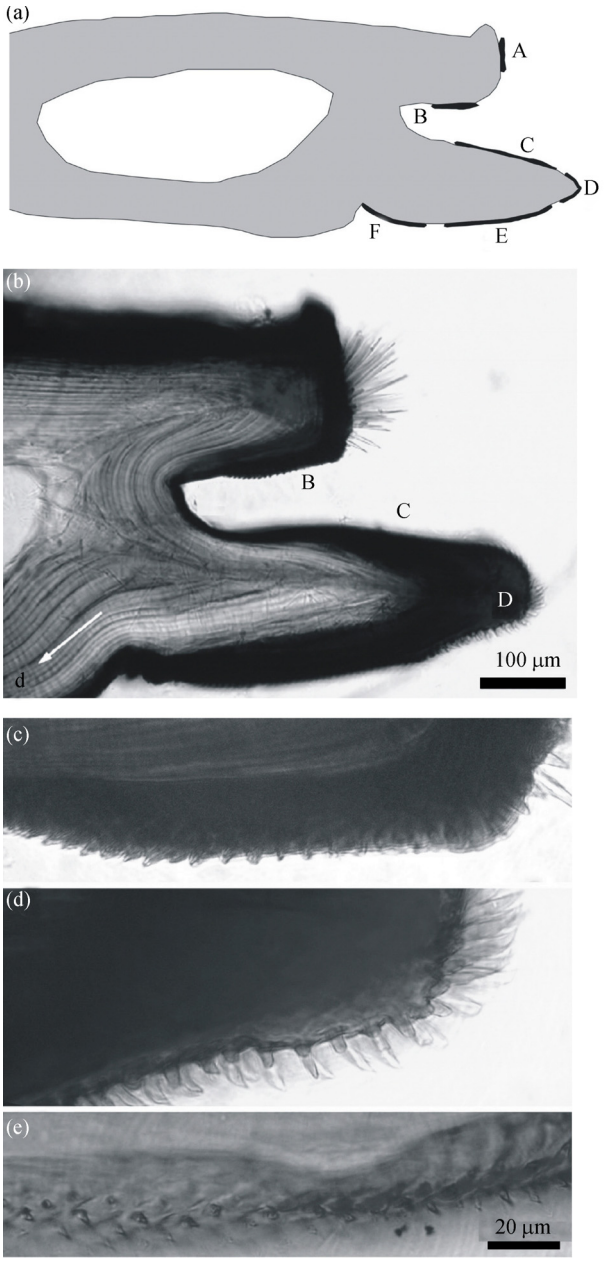

图 6 鞘翅联接区域的微观织构形态

(a) 鞘翅间联结的接触区; (b) 联接区域细观切片; (c) 鞘翅接触区 B 表面织构; (d) 鞘翅接触区 C 表面织构; (e) 鞘翅接触区 D 的表面织构

3 讨论

3.1 鞘翅运动和锁合机构

采用鞘翅三维运动轨迹测定方法, 得到鞘翅的运动轨迹揭示鞘翅是绕单轴转动实现展开和闭合运动, 甲虫采用了最简单的机构和结构. 不同的甲虫其

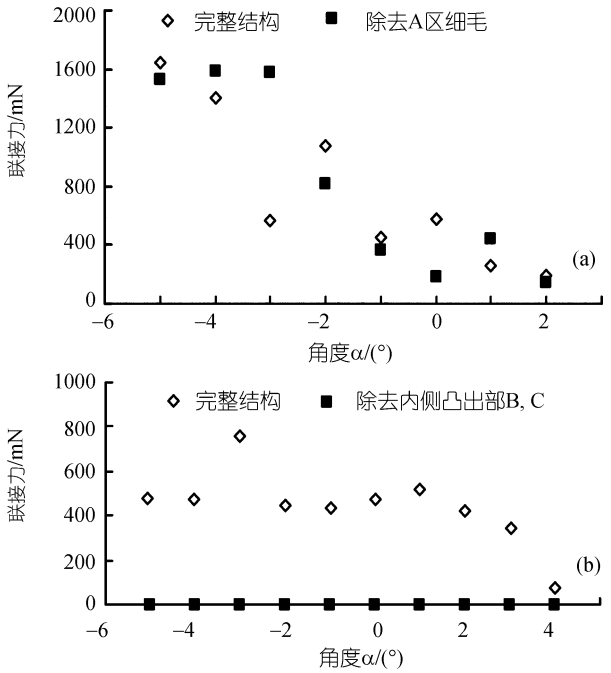

图 7 神农蜣螂鞘翅啮合区的表面织构对联接力的影响

(a) 去除 A 区毛刺的鞘翅间的联接力对比; (b) 去除 B 区的鞘翅间联接力的对比

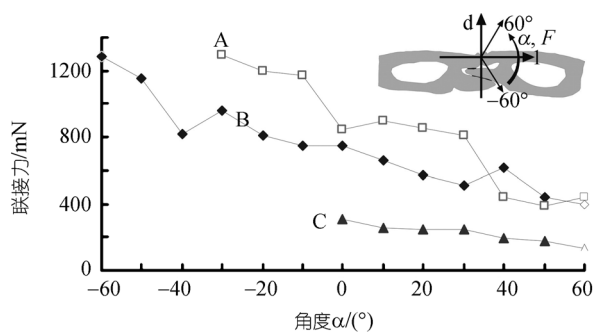

图 8 神农蜣螂鞘翅间联接力与拉力方向的关系

图中 A, B 为雄性、C 为雌性蜣螂鞘翅间的联接力. 右上图中 l 为侧向, d 为背向, α 为拉力与侧向的夹角, F 为联接力, 箭头表示角度 α 的方向

转轴所在位置有所不同. 舰载飞机机翼的展开和折叠与交叉鞘翅的展开和折叠非常相似, 现有设计常采用单轴转动结构, 其中转轴的空间位置是设计中的关键参数. 解剖学研究表明鞘翅的转动由两块肌肉驱动, 分别实现展开和闭合.

鞘翅的锁合机构采用了形状相近的楔形的榫结构(图 4), 头部结构受到较大的力, 实体尺寸较大, 转动情况下鞘翅间相对运动距离较小, 因而楔形凸出和槽部尺寸较小. 尾部相对位移较大, 楔形凸出和槽部尺寸也较大. 表明甲虫鞘翅间的榫联接结构具有很好的几何和力学相关性. 事实上, 榫联接是常用的航空联接方式, 如发动机的叶片和轮盘的联接. 这种联接方式的优点是接触面积大, 而且有类似拉链的自锁结构及易于打开的特点.

3.2 鞘翅联接力

从上述测试结构可以看到, 鞘翅间的联接力是身体质量的 6.5 ~ 160 倍, 该结果一方面说明鞘翅联接具有很高的联接强度, 同时提示鞘翅的联接必然存在精巧的控制方式. 实验发现甲虫鞘翅与前胸背板间呈三角形的小盾片是鞘翅联接的展开控制结构. 在小盾片上施加一个很小的外力, 鞘翅便轻松地打开锁合(图 9). 解剖发现, 小盾片下有若干组肌肉, 它们其中的一部分控制着鞘翅的锁合. 肌肉使小盾片向下运动, 会带动鞘翅形成较大的分离角(图 8 中α增加), 而这种情况有利于鞘翅的解除锁合. 测试结果也支持上述分析. 从鞘翅的结构看, 在榫联接两端比较容易使嵌入的凸出部分脱离嵌入而解除锁合.

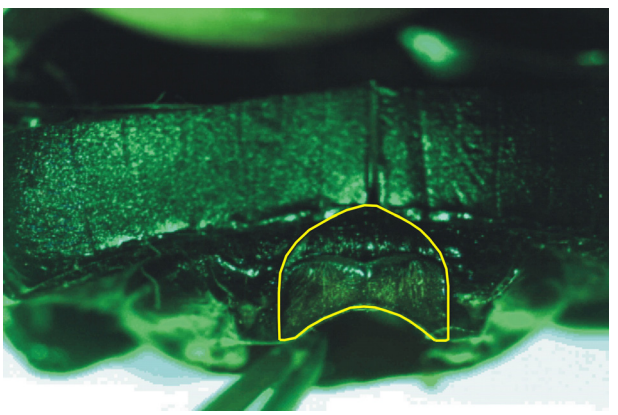

图 9 小盾片对鞘翅锁合的控制

鞘翅间联接力与甲虫鞘翅运动模式密切相关. 巨锯锹甲在飞行时, 从背向视图和侧向视图可见鞘翅的展开角接近 90° (图 10 (a)). 白星花金龟飞行时, 鞘翅仅微微打开(图 10(b)), 可推测鞘翅前部仍然处于锁合状态. 几种鞘翅的联接部位的微结构见图 11, 联接力最大的白星花金龟鞘翅楔入的凸出部分

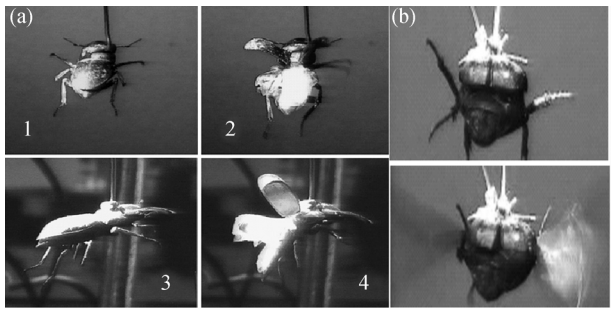

图 10　巨锯锹甲和花白金龟鞘翅锁合和展开的几何状态

(a) 背向视图(1, 2)和侧向视图(3, 4), 巨锯锹甲在飞行时鞘翅展开到近 90°; (b) 花白金龟的背向视图, 鞘翅仅有很小的展开

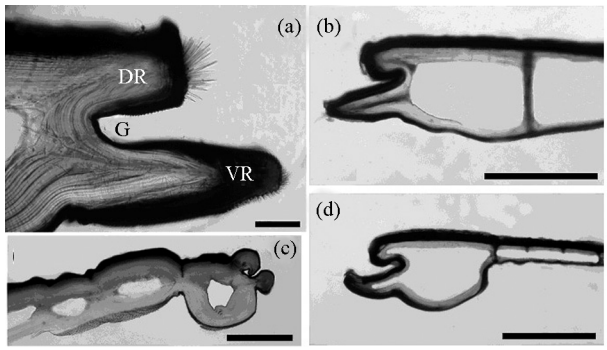

图 11　甲虫鞘翅间的联接结构

(a) 神农蜣螂; (b) 独角仙; (c) 巨锯锹甲; (d) 金龟子. 标尺示 100 μm

有一个明显弯钩结构(图 11(e)), 这样能够保障鞘翅间非常紧密的联接. 当鞘翅轻度外翻(图 8 中 α 取为正值), 使飞行翅展开时, 两鞘翅的楔入部分能够方便地沿凸出的弧段转动, 鞘翅依然能够处于联接状态. 联接力最小的巨锯锹甲的鞘翅微结构见图 11(d), 结构上不能保证有很好的楔入和锁合, 因此联接力最小. 神农蜣螂和双叉犀金龟的鞘翅联接处微观结构相近, 鞘翅两边能够较好地楔入, 但没有弧形钩状结构, 因此联接力大小相近. 上述分析表明, 鞘翅间联接的几何结构对联接力的大小有非常重要的影响.

3.3　表面织构

甲虫表面织构对性能的影响, 国内外已经有了广泛的研究. Beament[20]表明织构对润湿性的影响; Park等人[21]研究了沙漠甲虫鞘翅表面织构与收集水能力间的关系. 孙久荣等人[22, 23]研究了甲虫的表面织构与抗黏附能力间的关系. 研究结果用于农业机械的减粘脱附, 取得了很好的效果. 本实验证明, 鞘翅联接部位的微观织构, 对联接力有很大的影响, 提示在未来仿生设计时, 表面的结构及其摩擦性能必须给予足够的重视.

3.4　存在问题

现有研究充分揭示了甲虫鞘翅联接机构、结构、联接力及其与表面织构的关系. 但鞘翅的闭合过程的楔入机制尚需要研究. 鞘翅联接部位的微观摩擦性能应做深入的测试. 楔入状态下的接触力学规律尚需要继续研究.

致谢　前苏联院士、乌克兰科学院 Schmalhausen 动物研究所的 Leonid Frantsevich 教授在研究初期给了很好的指导, 在此表示衷心的感谢.

参考文献

1　易维坤, 杜斌. 航天制造技术. 北京: 中国宇航出版社, 2003. 27—28
2　轻质高强的镁合金材料在航空航天及高精尖军事领域的应用展望. http://www.efst.sh.cn/showKnowledge. do?id=336
3　张福兴. 机载电子设备中的螺纹联接. 光电对抗与无源干扰, 2002, 3: 38—40
4　Fiori G. La 'sutura' elitrale dei coleotteri. Atti del Congresso Nazionale Italiano di Entomologia, 1975, 10: 91—111
5　Klima J. Die Gesperre der Kafer-Elytren und deren phylogenetische Bedeutung (Insecta: Coleoptera). Berichte des Naturwissenschaft lich-medizinischen Vereins in Innsbruck, 1983, 70: 155—165
6　Gorb S N. Ultrastructure of the thoracic dorso-medial field (TDM) in the elytra-to-body arresting mechanism in tenebrionid beetles (Coleoptera: Tenebrionidae). J Morphol, 1999, 240: 101—113[DOI]
7　Gorb S N. Fricrional surfaces of the elytra to body arrestion mechanism in tenebrionid beetles (Coleoptera: Tenebrionidae): design of

co-opted fields of mecrotrichia and cuticle ultrastructure. Int J Insect Morphol Embryol, 1998, 27: 205—225[DOI]
8 Gorb S N. Ultrastructrual architecture of the microtrichia of the insect cuticle. J Morphol, 1997, 234: 1—10[DOI]
9 Gorb S N, Goodwyn P J P. Wing-locking mechanisms in aquatic Heteroptera. J Morphol, 2003, 257(2): 127— 146[DOI]
10 Hass F, Wootton R J. Two basic mechanisms in insect wing folding. Proc: Biol Sci, 1996, 263(1377): 1651—1658[DOI]
11 Dai Z D, Gorb S N, Schwarz U. Roughness-dependent friction force of the tarsal claw system in the beetle *Pachnoda marginata* (Coleoptera , Scarabaeidae) . J Exp Biol, 2002, 205: 2479—2488
12 杨志贤, 虞庆庆, 戴振东, 等. 四种甲虫鞘翅的力学参数测定及微结构观测. 复合材料学报,2007, 24(2): 92—98
13 虞庆庆, 杨志贤, 戴振东, 等. 东方龙虱鞘翅微结构及力学性能研究. 自然科学进展, 2006, 16(3): 365—369
14 陈锦祥, 倪庆清, 李庆, 等. “蜂窝-柱子”芯夹层轻量型仿生物复合材料结构. 复合材料学报, 2005, 22(2): 103—108
15 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(2): 220—232
16 Vincent J F V, Wegst U G K. Design and mechanical properties of insect cuticle. Arthropod Structure & Development. 2004, 33: 187—199[DOI]
17 Watson G S, Watson J A. Natural nano-structures on insects-possible functions of ordered arrays characterized by atomic force microscopy. Appl Surf Sci, 2004, 235: 139—144[DOI]
18 戴大临, 张清敏. 生物医学电镜样品制备方法. 天津: 天津大学出版社, 1993
19 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 (16): 4045—4058[DOI]
20 Beament J W L. Wetting properties of insect cuticle. Nature, 1960, 186: 408—409[DOI]
21 Parker A R, Lawrence C R. Water capture by a desert beetle. Nature, 2001, 414: 33—34[DOI]
22 孙久荣, 程红, 丛茜, 等. 蜣螂(*Copris ochus* Motschulsky)减粘脱附的仿生学研究. 生物物理学报, 2001, 17(4): 785—793
23 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(2): 175—181