研究综述

动物进化的抗冲击策略及其仿生机理研究

邢 运 杨嘉陵 *

北京航空航天大学, 固体力学研究所, 北京 100191

摘 要 经过长期的自然选择, 自然界中的动物已经进化出各种各样高效的、可靠的、适应性强的抗冲击策略和机体防护机制, 抵抗来自周围复杂环境的碰撞和冲击载荷, 保护生物外部结构和内部器官在进行激烈生物活动时不受伤害. 相比传统工程防护结构, 这些天然的生物防御系统具有优异的抗冲击特性、高效的能量耗散效率以及可重复使用等特征. 因此, 近年来, 关于探索生物及其仿生机理的研究越来越受到广大学者的关注. 本文作者结合近期在该领域的研究成果, 综述了自然界各类动物的抗冲击策略与身体防护机制及其相关仿生设计与应用的最新研究进展. 特别地, 我们归纳分析和讨论了面对不同载荷环境时生物抗冲击结构独特的进化过程和非凡的力学性能, 并且介绍了相关的抗冲击仿生应用研究. 最后, 讨论了动物抗冲击策略与防护机制及其仿生应用研究的挑战和未来发展方向. 本文可为研究人员和工程师提供有效的数据资料, 为可重复使用能量吸收装置及其飞行器结构的抗冲击与防护设计提供有益借鉴和仿生依据.

关键词 动物, 抗冲击策略, 防护机制, 仿生, 能量耗散

中图分类号: Q66 **文献标识码**: A DOI: 10.6052/1000-0992-20-027

收稿日期: 2020-10-30; 录用日期: 2021-02-27; 在线出版日期: 2021-03-31

* E-mail: jlyangbuaa@aliyun.com; jlyang@buaa.edu.cn

引用方式: 邢运, 杨嘉陵. 动物进化的抗冲击策略及其仿生机理研究. 力学进展, 2021, 51(2): 295-341

Xing Y, Yang J L. Research progress of impact-resistance strategies and biomimetic mechanism in animal evolution. *Advances in Mechanics*, 2021, 51(2): 295-341

© 2021《力学进展》版权所有

1 引 言

大自然为设计和制造具有优异力学性能的先进材料和结构提供了丰富的仿生灵感. 其中, 动物通过长期的自然选择, 已进化出许多精巧灵敏的生物结构, 来维持其在不同严厉生存环境下的高效稳定运动, 比如奔跑、跳跃和飞行等. 特别是在进行与生存密切相关的激烈生物活动时, 比如捕食、躲避天敌或自我防御等生物行为, 生物体往往会遭受来自周围复杂环境的碰撞和冲击载荷, 极易对生物外部结构和内部器官造成伤害. 然而, 事实上自然界的动物很少会因为自身的生物活动导致生物结构发生失效或破坏, 这说明生物体都拥有完善的抗冲击策略和防护机制来适应自身处在的恶劣生存环境 (Alexander 2003). 生物体所展现出的优异可靠的抗冲击特性、能量吸收能力以及可重复使用特征引起了越来越多研究者的兴趣 (Alexander 1988, Ha and Lu 2020).

对于动物在生物运动中的冲击力学问题, 早在公元前 384—322 年, 古希腊哲学家亚里士多德就对人和动物的日常生活运动进行了观察和记录 (郑秀瑗 2002). 随着时间的发展, 实验技术的提升, 科学家们对此问题进行了越来越细致深入地研究, 同时受到了力学、 材料科学和生物学等学科的广泛关注. 早期的动物抗冲击生物力学行为的研究是以人体为研究对象, 对人奔跑和跳跃时的地面反力和运动学参数进行了一系列测量和分析, 结果表明人在奔跑和跳跃的着陆过程中膝关节是最重要的能量吸收器, 人体着陆缓冲具有很强的自适应控制能力 (DeVita and Skelly 1992, Fenn 1930, James et al. 2003, McNitt-Gray 1993).

与人相比, 其他动物面对的自然环境更加残酷. 为了更好地适应生存环境, 许多动物进化出更具明显优势的缓冲机制和抗冲击生物结构设计. 最初, 研究人员对部分陆地动物的运动方式进行了生物学观察研究, 结果表明随着身体尺度增大或减小, 动物倾向于选择不同的步态作为最佳的运动方式. 生物的特征尺寸在由大到小的变化过程中 (犀牛、大象、牛科动物、马科动物、猫科动物、袋鼠、青蛙、蝗虫、蟋蟀、跳蚤), 运动方式也随着特征尺寸减小发生变化, 主要运动方式由行走转变为奔跑, 再由奔跑转变为跳跃. Alexander (2003) 经过进一步研究, 发现可以用惯性力和重力量级的比值 (弗劳德数) 作为生物运动方式的判定准则. 通常, 在弗劳德数小于 0.5 时, 该生物处于行走状态; 在 0.5 ~ 1 之间时, 该生物处于奔跑状态; 当弗劳德数大于 1 时, 说明其更容易摆脱地面束缚, 该生物的运动方式转变为跳跃. 以上的理论仅适用于陆地动物, 对于水生动物和空中飞行的动物来说, 由于它们受流体作用力更大, 而且受力环境更复杂, 到目前还没有一个像弗劳德数一样的统一判定准则来细致划分水生动物和空中飞行动物的运动方式, 只大体上归类为游行和飞行.

由以上的分类方法可知, 动物在不同的生存空间 (例如陆地、水中和空中) 具有不同的运动方式, 不同的运动方式 (例如奔跑、跳跃、游行和飞行等) 又面对不同的载荷环境. 动物们为适应复杂的生存环境, 有效抵抗外界载荷, 进化出了最适合自身的抗冲击策略和身体防护机制. 本文旨在概述动物的抗冲击生物力学特性研究及其仿生机理的最新进展, 为可重复使用能量吸收装置及其飞行器结构的抗冲击与防护设计提供有益借鉴和仿生依据.

为了更清晰地描述, 本文按照主要生存环境, 将动物分成三大类, 分别为陆地动物, 水生动物

和空中飞行动物. 在每一大类中, 又进一步对不同动物的抗冲击力学机制做了分门别类的汇总. 根据这些抗冲击力学机制的特点, 重点讨论了几种极具代表性动物的典型抗冲击策略和身体防护机制 (表 1). 比如, 在陆地动物中, 2.1 小节总结了大象、犀牛、河马等大型动物的身体防护机制. 2.2 和 2.3 小节从微观层面解释了羊角和马蹄的抗冲击特性, 它们具有相似的抗冲击策略, 是因为羊角和马蹄中都具有角蛋白通过氢键或其他化学键和基质结合形成的复合结构, 用来抵抗分布式的冲击载荷. 2.4 和 2.5 小节从宏观层面描述了猫科动物坠落以及袋鼠跳跃等运动的抗冲击策略, 发现两者的背部对冲击能量的耗散均具有重要作用. 2.6 ~ 2.9 小节综述了以昆虫为代表的节肢动物中常见的抗冲击策略. 与哺乳动物不同, 节肢动物具有发达坚硬的外骨骼和细长的肢体, 如何抵抗运动过程中或生存环境中的冲击载荷, 保证捕食或逃跑时外骨骼和细长的肢体不受损伤, 在以上四小节中给出了总结. 对于水生动物, 3.1 和 3.2 小节归纳分析了龟类甲壳和软体动物外壳的抗冲击策略, 研究发现龟类甲壳和软体动物外壳等均呈现层状的拼合结构, 可以缓冲冲击载荷并抵抗裂纹扩展. 3.3 和 3.4 小节分别讨论了鱼鳞和螳螂虾外壳的抗冲击策略, 它们均具有多级分层纤维结构, 此结构在不减弱材料强度的情况下大大增加了柔韧性, 具有优越的抗冲击和能量缓冲能力. 最后, 在空中飞行动物中, 本文以最具代表性的鸟类为例, 总结了其羽毛及喙部的抗冲击策略. 研究发现, 它们都以最优的状态在多个功能之间取得最佳平衡.

表 1　文章内容总览表

1 引言	2.9 蜘蛛网的抗冲击策略
2 陆地动物	**3 水中动物**
2.1 大象、犀牛、河马等大型动物的身体防护机制	3.1 龟类甲壳的抗冲击策略
2.2 牛科动物角部的抗冲击特性	3.2 软体动物外壳的抗冲击策略
2.3 马蹄墙的抗冲击特性	3.3 鱼鳞的抗冲击策略
2.4 猫科动物的抗冲击策略	3.4 螳螂虾外壳的抗冲击策略
2.5 袋鼠的抗冲击策略	**4 空中飞行动物(以鸟类为例)的抗冲击策略**
2.6 跳跃昆虫中常见的抗冲击策略	4.1 鸟类羽毛及喙部的抗冲击策略
2.7 竹节虫胫骨的抗冲击策略	**5 结论与展望**
2.8 甲壳虫鞘翅角质层的抗冲击策略	

2　陆地动物

2.1　大象、犀牛、河马等大型动物的身体防护机制

根据 Alexander 的动力学相似理论 (Alexander 1976, Alexander and Jayes 1983), 体型较大的动物 (例如大象、犀牛、河马等) 具有很大的体重, 这导致了此类动物的惯性力和重力量级的比值 (弗劳德数) 较低. 这就解释了为什么大象、犀牛、河马等特征尺寸较大的动物具有很低的移动速度, 移动方式通常为行走, 而且很少能观察到它们做疾跑或者跳跃运动. 当外界危险来临时,

大型动物来不及做出敏捷反应. 经过长期的自然选择, 大型动物进化出了像“装甲”一样的厚重皮肤, 它们具有非凡的密度, 韧性和强度, 作为对外界环境具有很强适应性的生物防护结构保护着身体内部器官不受伤害. 研究表明, 大象、犀牛和河马的真皮厚度最后可以达到 40 mm 以上, 可以有效防御狼、豺等中小型猛兽的攻击. 其中, 大象的皮肤具有厘米量级的褶皱与折痕, 这些褶皱互相连结在一起形成了细小的网络通道, 可以收集水分和泥浆. 这就使得在做好身体防撞击的同时, 又不受到厚重皮肤的隔热影响, 能够随着外界气候的改变, 及时与体内进行热量交换, 进行温度调节, 从而保持皮肤的湿润和凉爽 (Martins et al. 2018, Spearman 1970).

相比上述大型动物, 绝大多数陆地动物有更强烈的运动需求, 但不具有厚重的“装甲”皮肤. 为了更好地应对自然环境带来的生存挑战, 其他的中小型生物进化出一系列独特的精巧生物抗冲击机制, 它们具有很高的冲击能量耗散效率和很强的随环境变化的自适应缓冲吸能能力. 由于文章篇幅有限, 下面的章节重点对一些具有代表性的, 特别是可能为今后的先进材料和结构设计带来生物启发的生物抗冲击策略与防护机制做介绍.

2.2 牛科动物角部的抗冲击特性

牛科动物 (如牦牛、羚羊等) 在决斗和相互抵角的过程都伴随有大量的冲击行为, 同时, 这些动物的头部将受到很大的冲击载荷作用. 例如, 大角羊 (*Ovis canadensis*) 在相互抵角过程中受到的冲击力可以达到约 3400 N, 这相当于一辆以 48.3 km/h 速度行驶的汽车发生碰撞时产生的力. 两头雄性大角羊在决斗时的冲击载荷可以达到 450 g, 这一冲击强度已超过人类脑部所能承受的极限 (Gurdjian 1975, Kitchener 1988). 根据对绵羊碰撞的研究, 由于撞击时间极短 (2 ms), 在碰撞时角部材料的应变率能够达到 $10^2 \sim 10^3\ \mathrm{s}^{-1}$ (Geist 1966a). 为了提高角部的战斗效率, 牛科动物角部在优胜劣汰过程中逐渐变得坚硬而强壮, 足以抵抗外界环境的冲击力, 可以耗散冲击能量而不发生断裂; 同时它足够轻的质量为实际应用带来了敏捷性和高效性 (Kitchener 1985, 1988). 这些研究反映了牛科动物角部材料在抵抗高速冲击时的重要性, 事实上, 角部的整体形状以及微观结构对保护牛科动物大脑免遭碰撞损伤具有重要意义 (Drake et al. 2016).

研究发现, 牛科动物角部是一种永久性的结构, 它由包裹在海绵状骨核内芯上的外部角蛋白护鞘构成, 一旦结构破坏就不会再生或恢复. **图 1** 显示了大角羊角的多级结构, 可以看出角蛋白材料具有结构异质性. 在羊角结构内, 发现有纵向定向的微管 (**图 1**) 嵌入在结构基质 (角蛋白细胞) 中 (Kasapi and Gosline 1997, Kasapi and Gosline 1999, Tombolato et al. 2010). 角蛋白细胞被逐层堆叠, 在微管周围以及微管间区域形成层状结构. 牛科动物角部材料的分层结构以及结构和抗冲击力学性能之间的相关性一直受到众多学者的关注.

其中, Geist (1966b) 从进化的角度分析了公羊在相互争斗时长角作为防护结构和能量吸收装置的重要作用; Kitchener 等 (1987, 1988) 从材料角度考察了牛科动物角外部角蛋白的作用, 他们发现这类角蛋白有助于牛科动物角在受到冲击时发生大变形, 从而吸收更多的能量. 经过进一步研究发现, 角部角蛋白由α螺旋状结晶中间丝 (IFs, 直径为 7 ~ 10 nm) 嵌入在无定形的螺旋角蛋白基质中组成 (Fraser et al. 1964, Fraser et al. 1976). α角蛋白包含二硫键以及诸如氢键之类的次价键, 通过将非晶态多肽结合在一起来稳定无定形基质 (Parbhu et al. 1999). 氢键对水合作用

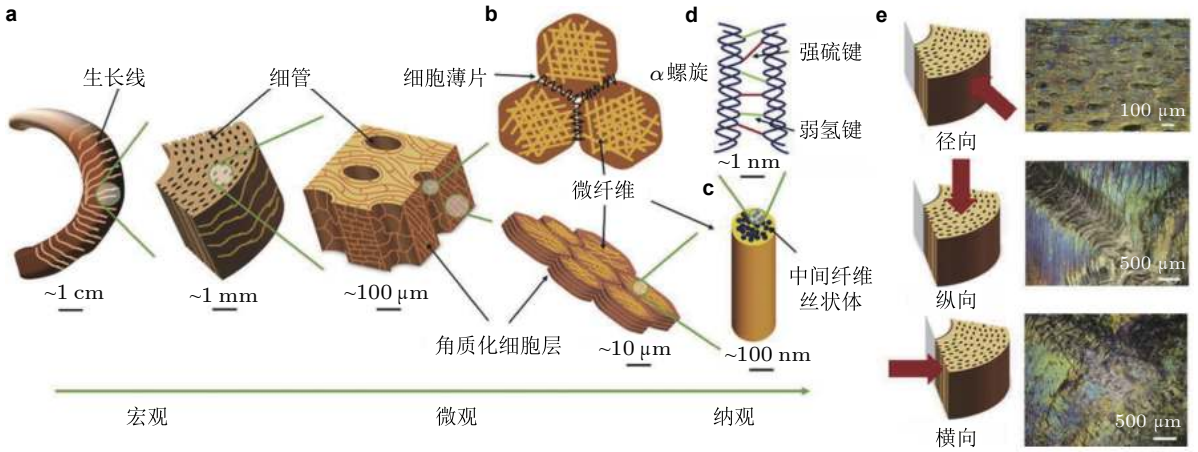


图 1

大角羊角部的多级结构. (a) 在宏观尺度发现, 具有生长线的弯曲角整体结构和羊角椭圆形管状结构局部放大图; (b) 在微观尺度发现, 羊角结构由角质化细胞薄片一层一层堆叠而成, 角质化细胞呈扁平饼状, 直径约 20 ~ 30 μm, 厚度约 1 ~ 2 μm; (c) 在纳观尺度发现, 在羊角角质化细胞平面内随机分布着直径约为 200 nm 的纤维结构, 这些纤维结构由更细的纤维细丝 (直径约为 12 nm) 组成; (d) 在分子尺度发现, 以上提及的纤维细丝呈α螺旋状, 由二硫键和氢键相互连接在一起; (e) 羊角 3 个方向分别受到 30% 压缩量的准静态压力时, 在羊角的纵向和横向表面内均出现了不同形状的剪切带 (Huang et al. 2017)

敏感, 这导致牛科动物角部的力学性能取决于水含量 (Fudge et al. 2003). 有关水合作用影响的研究表明, 角蛋白的强度和刚度随水含量的变化很大. Tombolato 等的研究结果表明, 随着水含量 (wt) 从 10.6% 升高到 34.5%, 大角羊角部的杨氏模量从 2.2 GPa 降低到 0.63 GPa (Tombolato et al. 2010). Kitchener 的研究表明羚羊角的断裂韧性从干燥条件下 (水含量为 0) 的 2.2 MPa/m$^{1/2}$ 增加到新鲜条件下 (水的质量百分含量为 20%) 的 4.5 MPa/m$^{1/2}$ (Kitchener 1987). 以上变化是水分吸收对氢键破坏的结果. 角蛋白基质中有效键数的减少, 使得角蛋白整体结构能够承受更大的塑性变形与应力, 从而提高了结构的极限载荷 (Kitchener and Vincent 1987).

除了水合敏感性外, 材料的各向异性是影响角部力学性能的另外一个主要因素. McKittrick 等 (2012) 分别对羊角样本的 3 个不同方向进行了准静态压缩实验. 3 个压缩方向分别为: 纵向, 沿着羊角的生长方向; 径向, 羊角的主要撞击方向; 横向, 垂直于生长方向的另一个正交方向 (**图 1**). 实验结果表明, 与纵向和横向相比, 径向的弹性模量和屈服强度更小, 这意味着在达到碰撞的失效应力之前, 羊角在径向能够产生更大的变形. 在另一项工作中, Trim 等 (2011) 研究了绵羊角在准静态压缩和拉伸实验下的应力状态, 发现从角的近端区域到远端区域获得的样本性质变化并不明显. 他们还分别观察了绵羊角在受到纵向和横向压缩时的层间屈曲和剪切破坏模式. 在高应变率冲击下, 剪切带、细胞薄层的屈曲、纵向和横向的分层是导致应变软化的原因. 虽然角中微管在径向和横向的准静态实验和冲击实验中都发生了破坏, 但在径向会产生更多的能量吸收和更强的耐冲击性. Johnson 等 (2017) 发现, 随着压缩应变率的增加, 羊角的杨氏模量和屈

服强度仅在两个方向 (纵向和径向) 上增加. 对于拉伸力学行为, Zhang 等 (2013) 证实了家养牛角的纵向弹性模量和拉伸强度均高于横向. Huang 等 (2017) 系统地研究了大角羊角的微细观结构, 准静态和不同冲击速度下的动态力学性能以及损伤机理. 通过霍普金森杆冲击压缩实验检查了羊角在各种应变率下的损伤, 并将结果与准静态压缩实验进行了比较, 对比发现在不同冲击速度下, 羊角具有不同的压缩变形机制. 在干燥条件下, 随着应变率的增加, 会观察到更多的材料破坏. 测试前和测试后的显微镜成像揭示了各种非弹性变形机制, 比如扭结带、 薄片屈曲、 微管塌陷和微裂纹, 这突出了诸如微管和角蛋白薄片等结构单元对抗冲击具有重要作用. 特别是, 微管在径向方向 (羊角的主要撞击方向) 上的塌陷可导致大量的能量吸收, 从而可以保护 大角羊在撞击过程中大脑不受伤害. 以上研究结果阐释了在不同方向和水合作用状态下, 牛科动物角部在形变过程中是如何耗散大量能量的, 揭示了牛科动物的抗冲击策略与机制. 此外, 角成分的分层组织 (例如角蛋白细胞层) 与微管的结合可以为人工合成复合材料的抗冲击和能量缓冲设计提供生物灵感.

2.3 马蹄墙的抗冲击特性

在世界历史中, 马是人类重要的交通工具和行军打仗必不可少的坐骑, 更有“骏马驰千里”的比喻. 马是一种非常善于奔跑的动物, 一般来讲, 马奔跑时的时速大约 20 km/h, 最快的速度能达到 60 km/h, 可以连续奔跑 5 ~ 6 h. 有研究表明, 一匹未钉铁蹄的马在沥青路面上以 4 m/s 的速度小跑, 受到的地面反作用力峰值为 11.5 ~ 16.1 N/kg, 减速度为 $56g$ (Lanovaz et al. 1998). 减速度取决于马蹄着陆的地面: 在泥土和草皮表面上, 马蹄受到的减速度为 $43g$, 而在特定人工合成表面减速度可降为 $28.5g$ (Setterbo et al. 2009). 马蹄的垂直着陆速度随奔跑速度的增加而略有增加, 这表明在较高的奔跑速度下受到的地面反作用力和减速度均略有提高 (Parsons et al. 2011). 尽管与牛科动物的角相比, 马蹄受到的地面冲击力较小, 但与地面的高频接触仍需要出色的能量吸收性能 (Crevier et al. 2010). 因此, 研究者们对马蹄材料的力学性能和基本的能量吸收机理展开了一系列的研究.

研究发现, 马蹄也由构成羊角的α角蛋白堆叠形成的层状结构和嵌入的微米级小管组成. 但是, 角蛋白在这两种生物结构中具有不同形态的层次结构, 主要差异体现在α螺旋状结晶中间丝 (IFs) 的百分比和方向上 (Feughelman 1994, Fudge and Gosline 2004, Kasapi and Gosline 1999). 此外, 尽管两者均包含管状结构, 但马蹄中的管状结构更为复杂 (Pollitt 2004), 显示出与羊角不同的结构, 包括细胞的排列和管状结构的密度等. 因此, 研究马蹄墙的抗冲击机制与能量吸收能力, 并将其与之前对大角羊角 (Huang et al. 2017) 的研究进行比较, 将有助于我们了解大自然针对具有不同生活习惯的物种演化出的不同结构设计, 从而为抗冲击仿生材料的潜在设计提供生物启发.

Kasapi 和 Gosline (1997) 研究了马蹄墙结构的设计复杂性 (**图 2**), 他们发现小管的尺寸、形状和分布密度以及α螺旋状结晶中间丝 (IFs) 的排列取决于整个马蹄墙厚度方向的位置. 小管内的细胞几乎垂直于管间基质中的细胞平面, 而管间基质中的细胞平面几乎与地面平行. 这些作者对马蹄墙进行了拉伸和断裂韧性实验, 以研究其力学行为 (Kasapi and Gosline 1997, Kasapi and

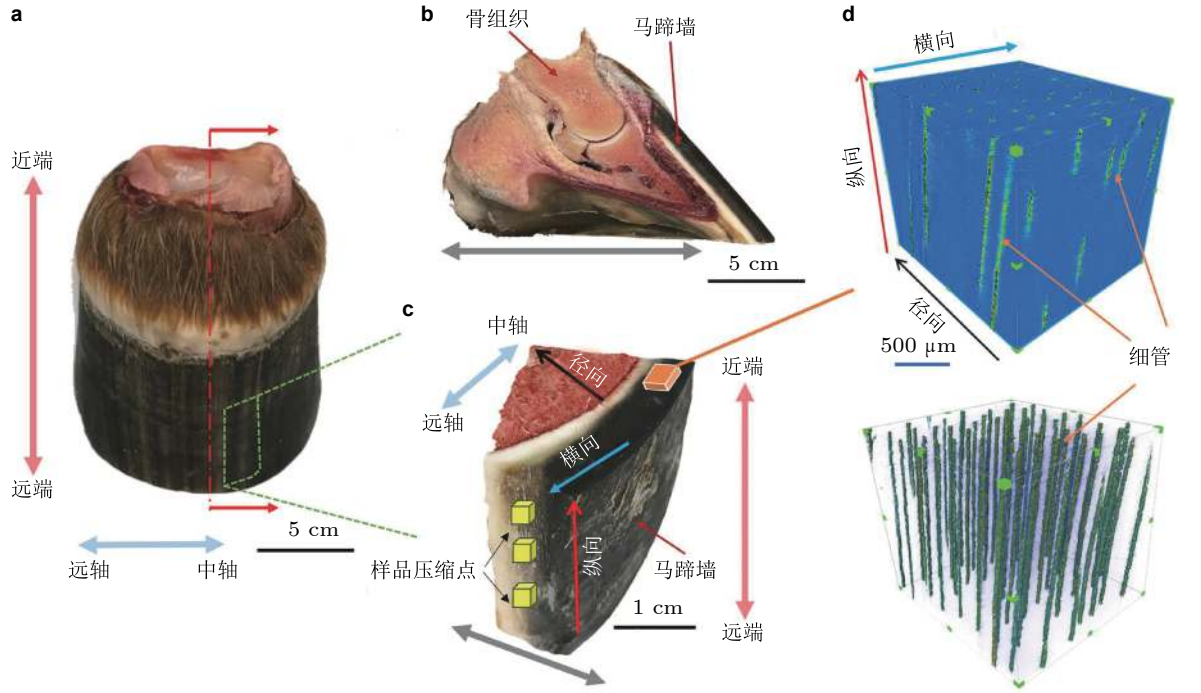


图 2

马蹄墙的抗冲击结构 (Huang et al. 2019). (a) 新鲜马蹄近端到远端的背侧示意图; (b) 马蹄正中矢状面; (c) 除正中矢状面外的马蹄墙横截面. 定义了 3 个方向: 纵向 (近端到远端); 径向 (轴向到背面); 横向方向 (在横断面上与蹄壁周长相切); (d) 马蹄墙和内部小管的三维重建同步 X 射线显微计算机断层扫描图像

Gosline 1999), 结果显示, 在小管和管间基体中, 不同取向的 IFs 可以有效地重新定向裂纹扩展的方向, 从而提高该结构的韧性. 在应变率为3.3×10^{-3} s^{-1} 的情况下, 微观拉伸测试得到的马蹄管区和马蹄管区基质的拉伸性能表明, 马蹄管区的刚度是不均匀的, 平均约为 0.29 GPa; 马蹄墙中心的管间基质刚度为 0.14 GPa. 然而, 这两个区域的屈服强度是相似的, 管区为 4.8 MPa, 管间基质为 4.1 MPa. 研究表明, IFs 的方向及其体积分数 (管区为 23%, 管间基质为 30%) 是影响其力学性能的主要因素 (Bertram and Gosline 1986). Douglas 等 (1996) 报道, 马蹄墙的远端区域 (与地面接触区域) 的抗拉和抗压刚度都高于近端区域 (靠近身体端), 这可能为内部活组织提供应力保护. Bertram 和 Gosline (1986) 研究了含水量对马蹄墙力学性能的影响, 结果表明, 与完全水化的样品相比, 干燥样品的拉伸模量显著下降. 此外, 马蹄墙的抗拉特性对应变率敏感, 其抗拉刚度和强度均随应变率的增加而增加.

为了更清楚地理解马蹄墙从纳米尺度到宏观尺度的分层结构以及在不同应变率和载荷方向下的抗冲击机制与能量吸收机理, Huang 等 (2019) 使用同步 X 射线微计算机断层扫描技术、纳米压痕技术和透射电子显微镜等对马蹄墙进行了一系列全面的实验, 结合大量的生物力学性能评估, 表征了马蹄墙角蛋白中的分层结构与力学性能的关系. 研究结果显示, 当在10^{-3} s^{-1} 和10^{-2} s^{-1}的应变率下加载时, 压缩力学性能表现出各向同性; 而在10^{-1} s^{-1}的应变率下加载时, 径

向压缩的刚度和强度均低于其他两个方向, 这有利于马蹄在奔跑时产生更大的变形, 吸收更多的能量. 当纵向准静态压缩时, 管状结构的弹性屈曲和破裂是主要的破坏和能量吸收机制. 在以$10^3\ \mathrm{s}^{-1}$的应变率向样品的不同方向撞击后, 马蹄墙可以承受并恢复到其原始尺寸. 马蹄墙内增强的管状结构可保护整个马蹄减少在任何方向上产生的剪切带或裂缝的影响. 与相同水合作用水平下的大角羊角相比, 马蹄墙可吸收更高的能量, 这更有利于马蹄墙在长时间奔跑时抵抗来自地面的冲击载荷作用. 马蹄墙的研究可以启发轻质能量吸收装置和抗冲击复合材料和结构的设计. 比如, 轻质的能量吸收材料和结构设计有可能为车辆或飞行器提供有效的防护系统并提高行驶安全性, 同时从保护环境角度出发可减少燃料消耗.

2.4 猫科动物的抗冲击策略

猫科动物在长期的自然进化过程中形成了卓越的缓冲能力. 例如猎豹的平均跳跃高度和距离分别为 3 m 和 6 m, 奔跑的最大速度可达 29 m/s, 约为百米赛跑世界冠军的 3 倍; 生活于高山地带的雪豹甚至能跳到 6 m 高, 15 m 远; 虎一般的跳跃距离是 5 ~ 6 m, 但最大可达 8 ~ 10 m; 美洲狮跳跃能力极强, 能从 12 ~ 13 m 高的树上或悬崖上跳下, 也能跃过近 7 m 的高度或 10 ~ 13 m 的距离; 野猫的跳跃能力能够达到自己身长的 4.5 倍; 另外, 具有神秘色彩的谚语“猫有九命”也反映出了猫科动物拥有极强的抗坠生存能力的事实 (Diamond 1988). 为此, 不少学者对家猫从不同高度自由坠落的损伤情况进行了统计, 结果发现这些家猫从高空坠落后依然可以维持较高的生存率, 甚至有些竟然没有受伤 (Vnuk et al. 2004, Whitney and Mehlhaff 1987). 其中, 以色列研究人员统计了 107 只家猫生存率随坠落高度的变化情况, 结果仅有 12 只家猫严重摔伤, 其余均安全存活 (Milgram et al. 2013).

对于“猫有九命”和高空坠落“摔不死”的现象, Diamond (1988, 1989) 给出了定性解释, 他认为有四点主要原因: 第一, 特征质量与特征尺寸的三次方成正比, 而特征面积与特征尺寸的平方成正比, 因此应力与动物的特征尺寸成正比, 猫的体型比人小很多, 着陆时经受的应力也小很多; 第二, 无论以何种姿态坠落, 猫总能在空中实现转体, 最终实现四肢着地, 前后肢受伤概率几乎相等, 而人坠落时很难控制自己的姿态, 通常以腿或头着地, 所以人坠楼时通常死亡率较高且受伤多以腿为主; 第三, 猫从高空坠落后通常伸展四肢以增大空气阻力系数, 最终使得猫在触地前达到一个稳定的最终下落速度, 约为 27 m/s, 而人的坠楼最终速度可达 44 m/s; 第四, 猫的前后腿着地时通过关节弯曲和肌肉做功耗散动能, 这种方式无疑增加了缓冲行程, 减缓了猫着地时的冲击力.

对于第二点, 猫无论以何种姿势坠落总能在空中完成转体, 最终实现四脚着地的现象, 我们称之为“猫旋”, 这个问题曾困惑了人们很久. 早在 1894 年, 法国科学家 Marey 首次使用高速摄影机拍摄了“猫旋”的过程, 发现猫在空中转体仅需要 1/8 s (Marey 1894), 如**图 3** 所示. 根据牛顿力学的动量矩守恒定理, 猫的初始动量矩为零, 重力对质心的力矩为零, 猫在空中对穿过质心的纵轴的动量矩应该守恒始终为零, 前半身转体时后半身应该向反方向转体, 不可能出现整体向一个方向转动 180°, 这令科学家们非常困惑.

这一现象被发现之后, 法国科学家 Guyou (1894) 试图对此进行解释, 他认为猫在转体过程中



图 3

猫旋运动与弯脊柱理论 (Kane and Scher 1969)

能通过四肢的开合调整前后半身的惯性矩, 使得前后半身的转体角度不同, 最终实现整体转身. 这种“四肢开合”理论虽然不违背力学规律, 但是在高速摄影中并没有发现四肢开合的现象, 与实际不符.

1969 年, 美国斯坦福大学力学教授 Kane 与 Scher 提出了“弯脊柱”理论, 认为猫在下落过程中, 脊柱依次向各个方向弯曲, 类似于人们做体操时腰部的圆锥运动, 前半身这样运动时全身将做反方向转动, 当前半身圆锥运动一周时全身正好反向转体 180° (Kane and Scher 1969). 为此他们建立了对称的双圆柱体刚体模型分别代表前后半身, 两刚体中间用两个锥面作无滑动的滚动模拟只弯不扭的约束条件, 写出了系统的运动微分方程并用计算机进行了模拟计算, 数值计算表明当刚体间做相对圆锥运动时, 系统的转体过程与“猫旋”的实验记录基本吻合, 如**图 3** 所示, “猫旋”的问题才算基本解决.

“弯脊柱”的理论目前被普遍接受, 并且后人对这种双刚体模型进行了改进和发展, 如刘延柱 (1982) 考虑了非对称的双刚体模型, 钟奉俄 (1985) 考虑了能在任意姿势下转体的模型. 随后, 一些新的数学模型也被提出. Lacquaniti 等 (1990) 通过用配重的方法研究了家猫四肢几何特征对其姿态控制的影响. 他们将家猫躯干和四肢简化为多连杆机构, 利用实验得到的地面反力作为驱动力, 对关节力、关节力矩和重心位置进行逆动力学计算, 发现家猫的四肢几何结构对姿态控制起主要作用.

可以看到, 前人对“猫有九命”的兴趣点主要集中在“猫旋”上, 利用理论力学和数学模型已能合理解释这一现象, 但对于“猫旋”之后的着陆阶段关注不多, 着陆这一阶段恰是缓冲吸能真正发生的阶段, 对理解猫卓越的抗冲击策略和身体防护机制至关重要. 然而, 对猫着陆过程的研究却

很少.

1976 年, Watt (1976) 通过实验研究了猫在突然坠落时的神经反应, 实验中让猫从 40 ~ 50 cm 的高度突然坠落, 测量坠落过程中的肌电图, 对比正常猫、耳石迟钝和耳石切除三种猫的神经反应, 结果发现突然坠落时猫的神经反应分为较早的耳石产生的部分和较迟的非耳石产生的部分, 对于平稳着陆两者缺一不可. 1977 年, Prochazka 等 (1977) 使用类似的实验方法研究了猫在自由坠落时的踝关节肌肉的神经反应. 1983 年, Mckinley 等 (1983) 通过高速摄影仪记录了家猫从一定高度跳跃着陆时的前肢运动姿态, 并测量了其着陆过程中肘关节肌肉的肌电信号. 研究发现, 家猫在跳跃过程中会根据不同的着陆环境做出自适应调节, 通过肌肉收缩直接调节肢体的刚度, 提高自身的抗冲击能力和着陆性能. Prilutsky 等 (1996) 重点研究了踝关节肌腱的生物力学特性以及伸肌与肌腱的综合力学作用, 分析了踝关节肌腱在能量吸收过程中的重要作用. 同时, 又将研究扩展至踝关节和膝关节之间的能量传递过程, 说明了家猫后肢单关节肌肉 (比目鱼肌) 和多关节肌肉 (腓肠肌、趾肌) 的优化配置对于运动效率所起的重要作用. 通过进一步研究, Kaya 等 (2006) 运用家猫后肢多刚体模型预测了每一块肌肉的具体功能. 结果表明, 家猫的腓肠肌和趾肌主要起控制地面反力方向的作用, 而股外侧肌和比目鱼肌主要为动力肌肉, 起加速或减速作用.

随后, Alexander 等 (1986) 研究了哺乳动物的脚掌肉垫在着陆时的作用, 认为脚掌肉垫既需要减缓着陆时的冲击力, 又要防止因反弹而造成脚部离地之后发生失稳, 后者称之为“颤震”. 作者使用一个简单的弹簧质量阻尼模型研究这一问题, 如**图 4** 所示, 其中M和m分别代表身体质量和脚的质量, K和k分别代表腿部和肉垫的刚度, C代表肉垫的黏性. 分析结果表明要避免“颤震”, 脚掌肉垫的着陆速度不能太快, 刚度不能太大, 而脚掌肉垫的阻尼能有效防止“颤震”. 作者对包括猫在内的多种动物的脚掌肉垫进行了动态压缩实验, 实验结果表明脚掌肉垫具有明显的非线性和黏滞性. 其中猫的脚掌肉垫的能量耗散率可达 40%, 能有效防止“颤震”的发生并减缓着陆冲击.

张晓鹏等 (2012) 对猫科动物的脚掌肉垫进行了进一步研究, 给出了上述弹簧质量阻尼模型的解析解, 并基于解析解说明对于脚部和躯干一定的质量比和速度比条件下, 减小峰值载荷需减小脚掌肉垫的刚度, 防止“颤震”现象需减小脚掌肉垫刚度并增大阻尼系数. 但脚掌肉垫的厚度限制了其刚度不能太小, 因此其应力–应变曲线表现出典型的非线性黏弹性是合理的, 初始阶段刚度较小, 随着接触力增大刚度逐渐增大, 保证了肉垫在一定的压缩行程内满足着陆缓冲的需要.

为了更深入地了解猫科动物在着陆过程中的抗冲击策略和能量耗散力学机理, Zhang 等 (2014b) 采用测力板、高速摄影仪和三维运动捕捉系统等实验手段系统研究了猫科动物 (虎和家猫) 在不同跳跃高度下的总体运动姿态、瞬间地面反力变化特征以及四肢关节运动规律等. 研究总结了猫科动物着陆时的抗冲击策略, 发现猫科动物的着陆过程共分为空中身体展开、前肢单独触地压缩缓冲、前后肢共同触地压缩缓 冲和身体反弹恢复四个阶段 (**图 5** 和**图 6**), 在不同的缓冲阶段内, 家猫能够分别用前肢、柔性背部和后肢储存和吸收冲击动能进行多级缓冲吸能, 同时猫科动物能够将前后脚掌并拢一处以保证柔性背部最大程度弯曲储能和稳定着陆, 实现优化的身体抗冲击防护机制.

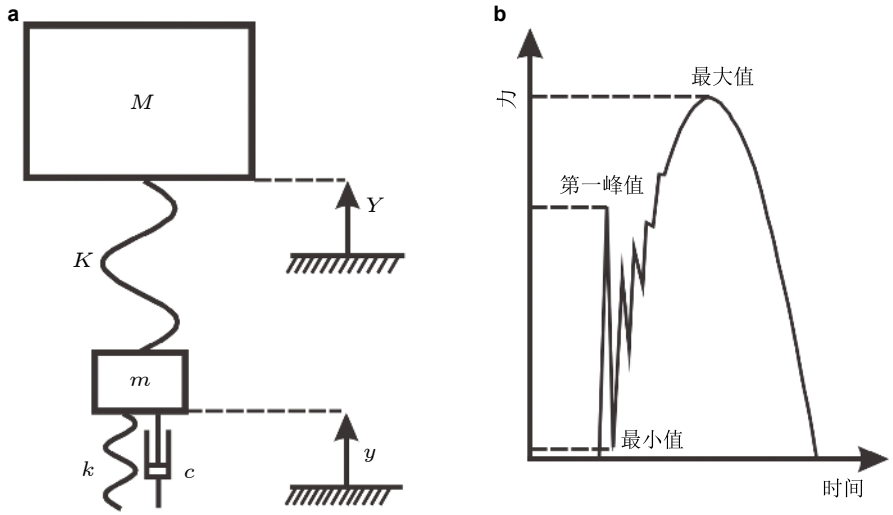


图 4

哺乳动物脚掌肉垫着陆理论分析. (a) 弹簧质量阻尼模型, (b) 着陆地面反力曲线 (Alexander et al. 1986)

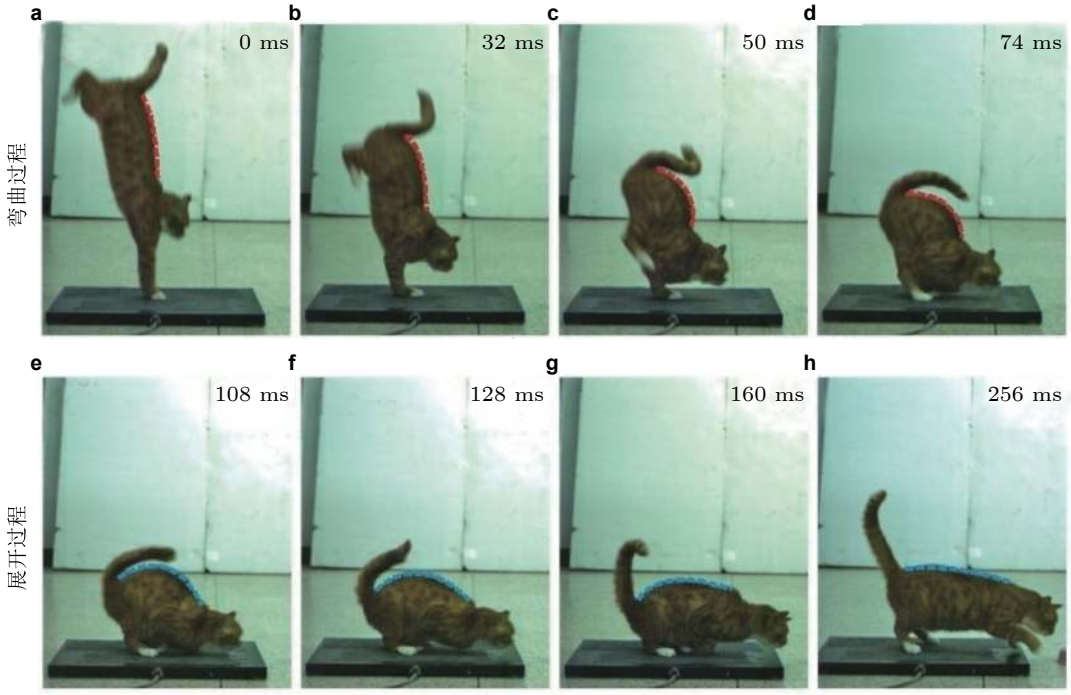


图 5

家猫着陆过程中背部弯曲–展开的典型运动姿态 (Zhang et al. 2014a). (a) ~ (d) 家猫着陆背部弯曲过程. (a) 家猫在前肢触地初始时刻其背部呈完全伸展状态; (b)(c) 随后家猫背部不断弯曲缩短进行能量储存; (d) 当家猫后肢触地时, 其背部的弯曲程度达到最大; (e) ~ (h) 家猫着陆背部展开过程. 着陆后, 家猫的后肢开始压缩缓冲. (e) 背部则保持弯曲状态; (f) 随着后肢缓冲吸能的结束, 家猫的身体发生反弹, 弯曲的背部开始展开; (g)(h) 缓冲结束后, 家猫前后肢分离, 其背部随着身体的向前运动逐渐展开, 背部储存的能量得到释放

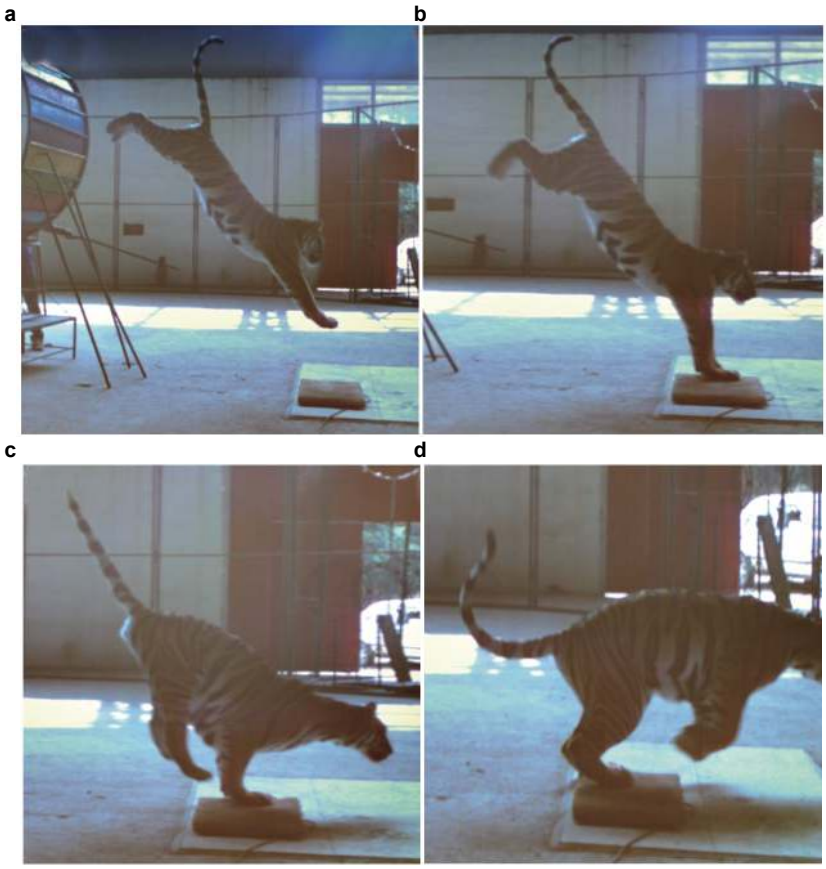


图 6

东北虎着陆过程中背部弯曲–展开的典型运动姿态 (于晖 2016). (a) 空中展开阶段; (b) 前腿着陆阶段; (c) 空中转体和后腿着陆阶段, 此阶段背部弯曲变形以吸收能量; (d) 前后腿分离恢复阶段

研究还发现, 随着跳跃高度的增加, 猫科动物能够通过调整水平起跳速度和着陆姿势来改变不同高度下的初始着陆角大小, 分化形成两种不同的着陆模式 (即 H 模式和 L 模式). 在着陆缓冲过程中地面反力呈现双峰现象 (**图 7**), 随着跳跃高度的增加, 双峰形式由“前高后低”逐渐转向“前低后高”, 肢体所受到的冲击反力峰值逐渐由前肢移向后肢, 使强健有力的后肢承受更多的冲量, 实现了前后肢缓冲地面冲击反力的优化分配. 在猫科动物着陆缓冲策略的实验研究基础上, Zhang 等 (2014a) 进一步对家猫在不同着陆缓冲阶段身体各部位 (包括总体质心、前肢和背部) 能量的吸收和储存进行了详细研究, 系统地分析了家猫自主着陆过程中的能量吸收分配机制和传递方式. 研究发现, 猫科动物能够根据不同的跳跃高度使背部发生不同程度的弯曲用以储存能量, 着陆角越大, 猫科动物的背部柔韧性越强, 更易于弯曲以便储存更多的能量, 该策略有利于猫科动物最大限度地降低四肢所承受的冲击载荷, 从而保证安全着陆.

猫科动物这些优越的跳跃着陆缓冲性能, 以及良好的跳跃抗冲击策略, 不仅让我们深入理解了其进化的生物力学机理和身体防护机制, 而且还为指导未来机械缓冲装置和能量吸收装置的设计与改进提供了重要生物启发. Yu 等 (2015b) 受猫科动物着陆抗冲击策略的启发, 将多级能量

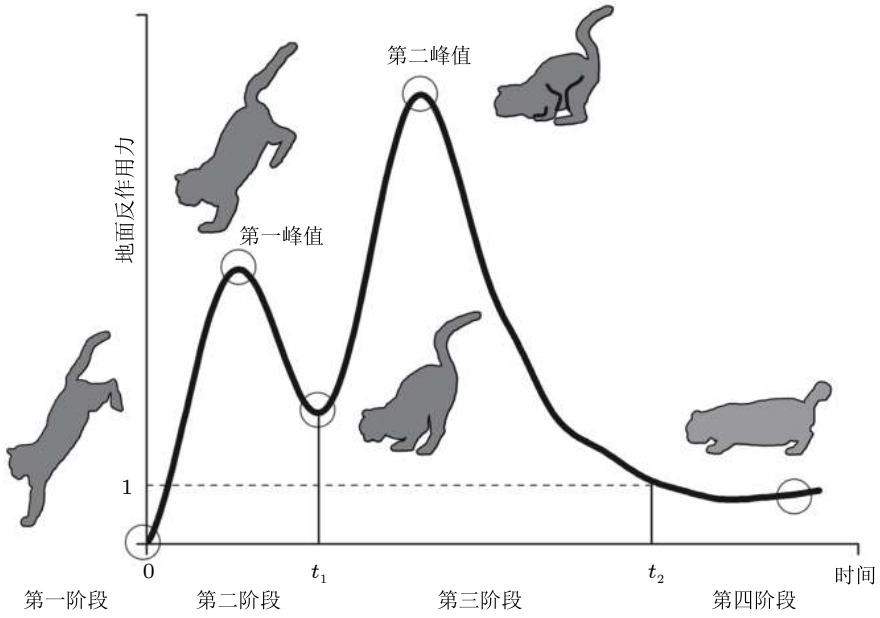


图 7

家猫着陆四个阶段与地面反力的关系 (前后肢分别触地造成地面的双峰现象)(Zhang et al. 2014b)

吸收的概念应用于未来的着陆与缓冲装置中, 设计开发了新型航天员多级缓冲座椅 (**图 8**). 通过理论分析和数值模拟计算发现, 与传统座椅相比, 多级缓冲座椅能显著降低着陆时航天员头部–盆向和胸部–背向的过载加速度, 减小航天员脊柱与头部的受伤风险. 研究还证明, 仿生座椅比传统座椅更能适应复杂极端的着陆环境, 极大地提高了对航天员的安全防护水平.

2.5　袋鼠的抗冲击策略

袋鼠是可以进行连续跳跃的哺乳动物, 其在连续跳跃时, 最高可跳到 4 m, 最远可跳至 13 m, 跳跃的行进速度可达 65 km/h, 具有出色的跳跃能力, 可承受高频率和数倍自身重力的地面冲击力 (Alexander 2003). 不仅如此, Dawson 和 Tayloy (1973) 研究发现, 在袋鼠跳跃过程中, 跳跃频率随行进速度增大而增大, 但是能量消耗却随行进速度增大而减小. Windsor 和 Dagg (1971) 发现随着速度增加, 袋鼠腾空时间增加而与地面接触时间减少, 这说明行进速度越快, 袋鼠的弹跳力越大, 离开地面时获得的起跳加速度越大, 但是袋鼠的跳跃周期基本不变. 研究人员进一步将袋鼠与相同质量的四足动物相比较, 发现在高速跳跃时 (速度大于 18 km/h), 袋鼠跳跃比四足动物奔跑能节省更多能量. Alexander 和 Vernon (1971) 研究表明, 袋鼠在跳跃过程中, 身体的总质心相对于躯体质心在垂直方向上的变化并不明显, 说明袋鼠跳跃具有很高的稳定性.

以上优越的跳跃特性将归功于袋鼠高效的抗冲击策略与能量缓冲机制. 初步研究表明, 袋鼠大比例的躯干和后腿占身体总质量的 93%, 这种独特的结构组合方式对其跳跃运动的效率和能量转换起着重要作用 (Alexander 1988). 除此之外, 科学家们依次研究了不同身体结构在袋鼠跳跃过程中的能量存储与释放过程, 从而揭示了袋鼠跳跃的缓冲机制与抗冲击策略.

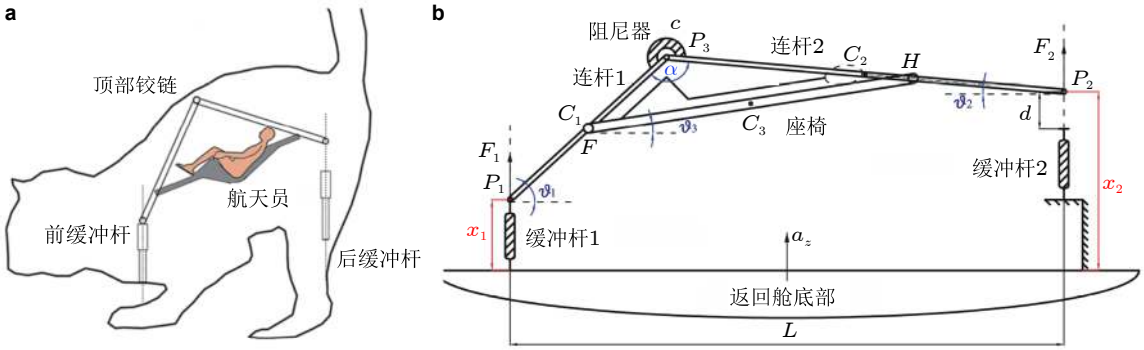


图 8

基于猫科动物着陆仿生原理的新型航天座椅结构设计 (Yu et al. 2015b). (a) 猫科动物多级缓冲方式的仿生启发, (b) 仿生多级缓冲座椅力学模型

研究结果表明, 袋鼠的抗连续冲击机制是身体各部位协同作用的综合结果. 其用于抗冲击载荷的身体缓冲结构主要包括柔性空穴足和后腿及背部中的肌腱. 首先, 袋鼠的柔性长脚结构是由一脚掌骨和三节跖骨组成的具有很长弓形形状的空穴足. 此空穴足使其脚掌像曲梁一样具有弹性, 能将身体重力和跳跃时的地面冲击力有效分散, 同时作为与跟腱和韧带连接的杠杆, 可增大跟腱的伸长量, 有利于吸收更多的着陆冲击能量 (Alexander and Vernon 1971). 其次, 袋鼠后腿中肌肉、跟腱和韧带也具有优异的能量吸收特性 (Kram and Dawson 1998, Morgan et al. 1978). 研究发现, 袋鼠的跟腱比一般的跳跃动物大, 吸收的弹性能量是其肌肉的 10 倍, 它可以像弹簧一样拉伸和弹回, 在此过程中可完成大量的冲击能量吸收与释放. 而且, 跟腱中吸收的能量与冲击力成正比. 这意味着即使袋鼠的跳跃速度增加, 冲击力增大, 也不必增加袋鼠体内的生物能与氧气消耗, 多余的能量将被跟腱所耗散, 同时也有效保护了内部器官不受损伤. 袋鼠的柔性空穴足和后腿跟腱可抵抗大部分的跳跃冲击能量. 随着研究的深入, 研究者还发现袋鼠的背部在跳跃中对冲击能量的缓冲与耗散也起到重要作用. 像猫科动物一样, 跳跃速度较高的袋鼠背屈程度也较大, 在背屈过程中, 袋鼠背部中的肌腱通过背屈将冲击动能转换为变形弹性能. 所储存的能量还有助于调节腿部和尾巴在腾空阶段的运动姿态, 从而保持身体的动态平衡和跳跃稳定性 (Taylor 1978). 此外, Alexander 和 Vernon (1971) 还发现袋鼠的尾部在跳跃过程中通过上下摆动, 可以分别减小着陆和起跳时后足受到的地面冲击反力, 降低了身体结构受到冲击损伤的风险.

袋鼠通过以上各个身体部位的协调配合, 可以高效地缓冲来自地面的冲击能量, 完成规律的跳跃运动. Alexander (1988) 发现可将袋鼠的跳跃过程用质量–弹簧数学模型完美替代和简化 (**图 9**), 用于更清晰地描述冲击能量的吸收与释放. 在腾空阶段, 由于袋鼠体积和质量较大, 空气阻力可以忽略, 质心的运动近似抛物运动; 而着陆阶段, 双腿可看成等刚度弹簧一样被压缩, 地面的反作用力的方向为弹簧与地面接触点和质心的连线, 反作用力的大小可根据弹簧得压缩程度确定. 在进一步研究中, Seyfarth 等 (2002) 确定袋鼠在连续跳跃时, 受到的地面反力成正弦曲线变化规律. 在此理论以及上文提及的冲击能量储存与释放的研究基础上, 袋鼠跳跃时的抗冲击策

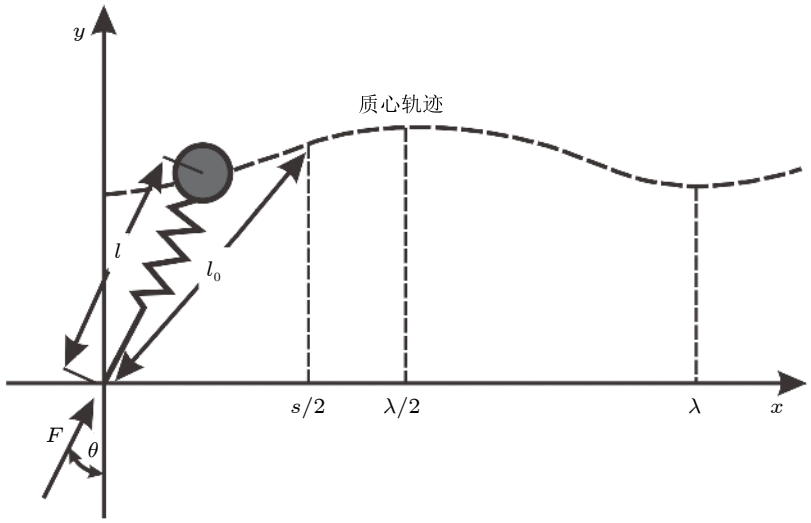


图 9

袋鼠跳跃力学模型 (Alexander 1988)

略与缓冲机制被应用到许多仿生研究中. 比如, 2013 年, 德国 FESTO 公司研制出了仿袋鼠跳跃机器人. 该机器人内部的抗冲击结构设计可帮助实现高效的跳跃运动, 同时还能够保证跳跃过程的稳定性 (王国彪等 2015). 台湾大学的研究人员基于倒立摆模型, 将弯曲弹性杆作为机器人的跳跃腿, 设计了一款仿袋鼠跳跃机器人, 可有效缓冲地面冲击力, 提高机器人的跳跃效率和使用耐久性 (Liu et al. 2014). 西北工业大学的研究团队对袋鼠的跳跃过程进行了一系列系统的研究, 并基于闭链齿轮–五杆机构研制了仿袋鼠跳跃机器人, 近似实现了袋鼠的跳跃及其抗冲击特性 (Bai et al. 2015, 柴辉等 2009, 张铭等 2009).

2.6　跳跃昆虫中常见的抗冲击策略

根据 Alexander (1988) 的动力学相似理论, 特征尺寸越小的动物弗劳德数越大, 因此, 昆虫中常见的运动方式为跳跃运动. 在跳跃运动中, 受到冲击载荷的阶段主要为起跳阶段和着陆阶段. 经过千百万年的自然选择, 昆虫进化出了一系列抗冲击策略和身体防御机制来应对跳跃运动过程中或生存环境里的复杂载荷带来的威胁. 本节将分别从起跳阶段和着陆阶段两方面介绍几种常见的昆虫能量储存与缓冲结构和抗冲击防护策略.

在起跳阶段, 跳跃昆虫的身体会承受相对于自身重力数十倍甚至几百倍的冲击载荷, 这对昆虫身体结构的承载能力提出更高的要求. 比如, 蝈蝈 (螽斯) 在起跳过程中可达到非常高的起跳速度. 为了保证身体结构的安全, 蝈蝈进化出长度是 3 倍身长的细长后腿, 通过延长加速时间从而降低了冲击载荷峰值 (Burrows and Morris 2003). 此外, 为了减小起跳过程中冲击力对细长支撑腿的影响, 一些昆虫利用四条推动腿完成起跳. 由四条推进腿产生的力将分布在更大的区域上, 不仅整体增加了弹跳力, 而且还减小了单个腿的受力, 降低了身体结构损伤的风险. 除了利用更多的起跳腿之外, 昆虫还进化出各种各样辅助起跳策略来减小起跳过程中冲击力带来的威胁. 例

如, 盲蝽 (*Microtechnites bractatus*) (Burrows and Dorosenko 2017), 毛翅蝇 (*Mystacides azurea*) (Burrows and Dorosenko 2015b), 飞蛾 (*Hofmannophila pseudospretella*) (Burrows and Dorosenko 2015a) 和草蜻蛉 (*Chrysoperla carnea*) (Burrows and Dorosenko 2014) 这四类昆虫不仅都由四条推动腿支持跳跃, 并且在起跳过程中还可以利用翅膀获得更大升力, 满足起跳要求的同时, 减小起跳推动腿受到的冲击载荷. 没有翅膀可以借助的昆虫, 常常以自己身体的其他部位帮助起跳. 比如螳螂使用前肢 (Burrows et al. 2015, Sutton et al. 2016), 竹节虫则使用尾部控制跳跃 (Burrows and Morris 2002), 均降低了起跳时推动腿内部的应力水平, 得到了有效的身体抗冲击保护.

另一方面, 跳跃昆虫的身体内部通常都包含有能量存储结构 (Burrows and Sutton 2012, Siwanowicz and Burrows 2017). 这种储能结构本身又是身体的抗冲击防护结构, 它能够将跳跃能量提前存储然后快速释放, 使得昆虫能够获得优异的跳跃能力, 同时又能防止巨大的冲击能量对身体内部器官造成损伤. 比如, 在直翅目昆虫中, 蝗虫 (Bennet-Clark 1975, Burrows and Sutton 2012, Chao et al. 2016) 和蟋蟀 (Burrows and Picker 2010) 等预先将能量储存在后腿关节处的半月板中, 在弹跳过程中, 冲击力分别可达到自身重力的 18 和 306 倍, 而不使身体结构发生损伤. 相比直翅目, 半翅目的昆虫普遍具有更惊人的抗冲击能力. 比如, 叶蝉 (Burrows 2007), 角蝉 (Burrows 2013a, Burrows 2013b), 沫蝉 (Burrows 2003, 2006a, 2006b) 和飞虱 (Burrows 2009, Burrows 2014) 的弹跳冲击力分别可以达到自身体重的 108, 227, 550 和 719 倍, 其中飞虱是目前发现跳跃能力最强的昆虫. 研究还发现跳蚤 (Sutton and Burrows 2011) 和跳甲虫 (Nadein and Betz 2016) 也具有很好的弹跳能力, 在弹跳过程中, 储能结构可承受的冲击力分别为自身重力的 160 和 115.3 倍.

在以上跳跃昆虫中, 身体内部均包含能量存储结构. 由于昆虫生存的环境不同, 所以储能结构也进化出多种多样灵巧的设计. 例如, 在直翅目昆虫中, 后腿关节处进化出可以储存大量能量的半月板 (**图 10**). 在弹跳之前, 肌肉收缩使得半月板弯曲变形, 同时肌肉做功所需的生物能转化为半月板中的弹性变形能, 当弹跳时, 腿部肌肉放松, 将半月板中储存的能量释放, 转化为跳跃运动的机械能. 为了防止后腿关节在半月板释放能量时受到的冲击脉冲过大, 在后腿关节处还进化出了节肢弹性蛋白与半月板相连, 用以缓冲大量的冲击能量 (Burrows and Sutton 2012). 研究发现, 昆虫的特征尺寸越小, 弹跳过载加速度越大, 并且为了增大跳跃效率, 储能结构逐渐向身体上半部分转移. 相比直翅目, 多数半翅目, 以及跳蚤和跳甲虫等昆虫的储能结构出现在胸部位置, 这样可以减轻腿部的质量, 减小跳跃时的能量损耗. 比较研究发现, 虽然各昆虫的储能结构外形设计互不相同, 但是都由坚硬的几丁质材料组合柔软的节肢弹性蛋白组成. **图 11** 是沫蝉胸部的储能结构 (Siwanowicz and Burrows 2017), 外层灰色部分由坚硬的几丁质材料组成, 内部包裹的蓝色部分是柔软节肢弹性蛋白. 当肌肉收缩使得储能结构变形时, 绝大部分的能量储存到几丁质材料中, 此时坚硬的材料起主要作用; 当能量释放时, 柔软的节肢弹性蛋白发挥主要作用, 能够将尖锐的冲击力耗散, 起到缓冲作用, 保护身体结构不受冲击载荷伤害. 坚硬的几丁质和柔软的节肢弹性蛋白这两种材料在昆虫起跳过程中相辅相成, 一个用来提供足够的弹跳力, 另一个用来缓冲弹跳力带来的冲击影响, 保护自身结构不受损伤. 以上储能结构中软硬材料相结合的生物设计方式, 可为微小型机器人或能量放大器的设计提供启发.



图 10

蝗虫的储能结构 (Burrows and Sutton 2012). (a) 蝗虫后腿膝关节外侧面 (黑色区域为半月板, 蓝色区域为节肢弹性蛋白); (b) 蝗虫后腿膝关节内侧面

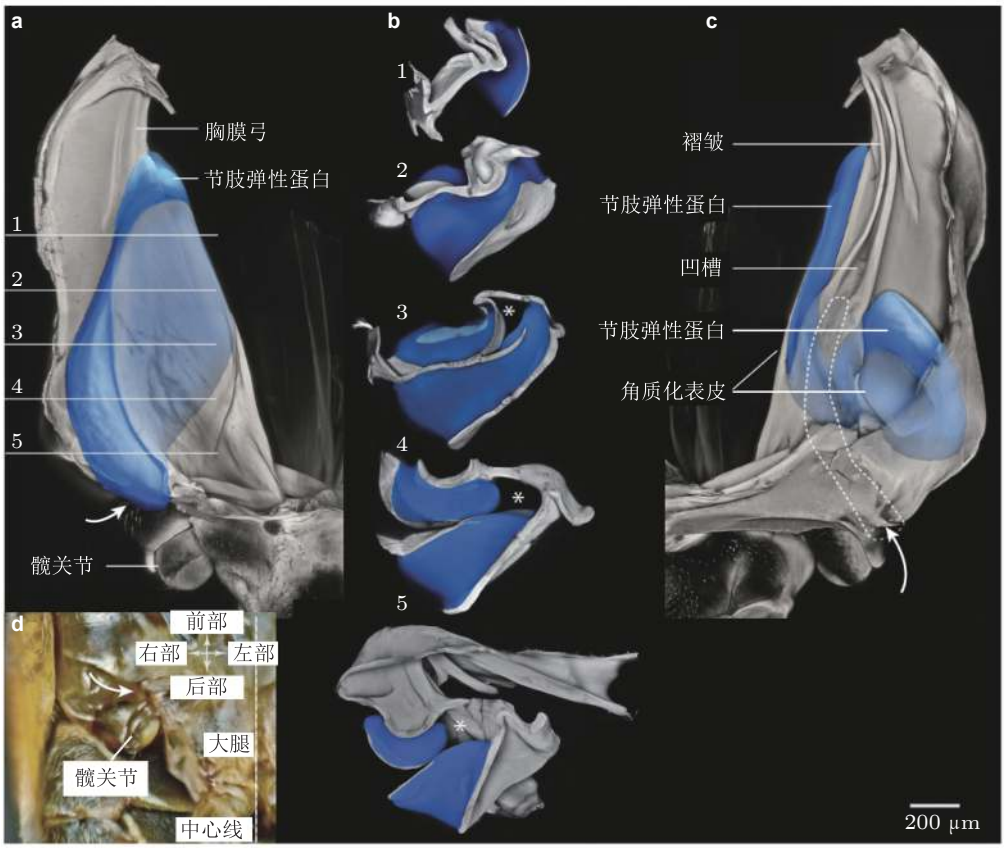


图 11

沫蝉的储能结构 (Siwanowicz and Burrows 2017). (a) 沫蝉右胸膜弓内侧视图, (b) 对应图 (a) 中的 5 个横截面, (c) 沫蝉右胸膜弓外侧视图, (d) 沫蝉后胸右侧腹面图像

在跳跃的着陆阶段, 为了减小与地面的碰撞力, 跳跃昆虫进化出各种各样的调节机制, 来减小着陆速度或调节身体姿态以最安全的方式着陆. 比如, Chen 等 (2015) 研究了翅膀对蝗虫身体姿态调整的重要作用, 翅膀借助空气动力可以帮助蝗虫平稳着陆, 减小地面对身体结构的冲击作用. Cofer 等 (2010) 通过实验与数值仿真研究发现, 蝗虫在翅膀作用失效时, 其腹部在缓冲着陆过程中也起到了不可忽视的控制作用. 对于具有细长身体结构的竹节虫, Zeng 等 (2017) 发现竹节虫从空中降落时可以利用细长的腿节调节身体姿态, 从而达到理想的着陆速度和着陆点, 这非常有利于降低身体受到的冲击载荷. 另一方面, 竹节虫细长的腿节也进化出特殊的结构用于抵抗由于外力引起的屈曲失效, 此部分内容将在后面一节专门讨论. 此外, Chen 等 (2013) 研究了蜘蛛丝在蜘蛛着陆时的姿态调节作用, 结果表明蜘蛛可以精准地控制蜘蛛丝的牵引力, 从而保持稳定性, 以最优的速度和角度缓冲着陆. 蜘蛛丝本身的抗冲击力学行为将在后面一节单独讨论.

在最近的研究中, Xing 和 Yang (2020a) 通过高速摄影运动学观测系统和毫牛级力学测试系统分析发现, 中华斗蟋具有卓越的弹跳特性, 并且在其后腿关节处发现了与蝗虫相似的可以起储能和缓冲作用的半月板结构. 在着陆阶段, 实验研究表明, 不利用翅膀飞行和姿态调整的中华斗蟋在跳跃过程中具有十分可靠的稳定性 (**图 12**), 保证腿部稳定着陆的运动占总数的 74%, 这大大降低了头部在落地时受到冲击损伤的概率.

Xing 和 Yang (2020a) 进一步探索了维持中华斗蟋跳跃稳定性以及安全着陆的内在原因, 通过建立蟋蟀跳跃的数学模型, 精确分析了蟋蟀在跳跃腾空阶段的载荷环境以及空气阻力的影响, 分别得到了压差阻力, 黏滞阻力, 诱导阻力, 以及升力的解析解, 与有限元模拟结果吻合良好. 理论和数值分析结果表明, 蟋蟀的后腿可以调节其在跳跃腾空阶段时的载荷环境, 增大或减小空气阻力的影响, 对于稳定性和着陆抗冲击具有重要影响. 有限元模拟和实验观测显示, 中华斗蟋在腾空上升阶段, 向上旋转后腿, 与身体形成“机翼”流线型结构, 减小空气阻力, 增大升力, 以获得更远的跳跃距离; 在腾空下降阶段, 向下旋转后腿, 增大空气阻力, 减小着陆速度, 从而减小着陆时的冲击反力 (**图 13**). 此项研究揭示了跳跃昆虫增阻抗冲击的新策略, 为微小型空间探测器和小型飞机的设计提供了重要仿生依据.

2.7 竹节虫胫骨的抗冲击策略

在人类生活或工程应用中, 细长结构由于重量轻, 节省材料和出色的力学性能, 通常被设计用于承重和支撑结构 (Shigley et al. 2015). 细长结构是指长度方向的尺寸比其他方向结构的尺寸大得多的特殊结构. 尽管有许多优点, 但仍存在一个主要缺陷, 即在轴向载荷作用下, 即使材料受到的应力远低于材料的屈服强度, 还是容易因发生欧拉屈曲而产生结构失效 (Beer et al. 2012). 为了提高细长结构对欧拉屈曲的抵抗力, 设计人员通过有效地增加横截面积将实心结构设计为中空结构, 从而增大截面惯性矩. 但是, 中空结构在压缩下易发生局部屈曲 (Timoshenko 1961). 如何同时提高细长空心结构对欧拉屈曲和局部屈曲的抵抗性能仍然是一个值得探索的学术问题. 而大自然中昆虫的细长生物结构设计为我们提供了丰富的生物启发资源.

例如, Alexander 发现许多昆虫的腿骨变得细长, 空心的外骨骼可以帮助节省新陈代谢的能量并减少运动中的内在能量消耗 (Alexander 1988). 然而, 在昆虫日常运动甚至紧急逃生中, 我们

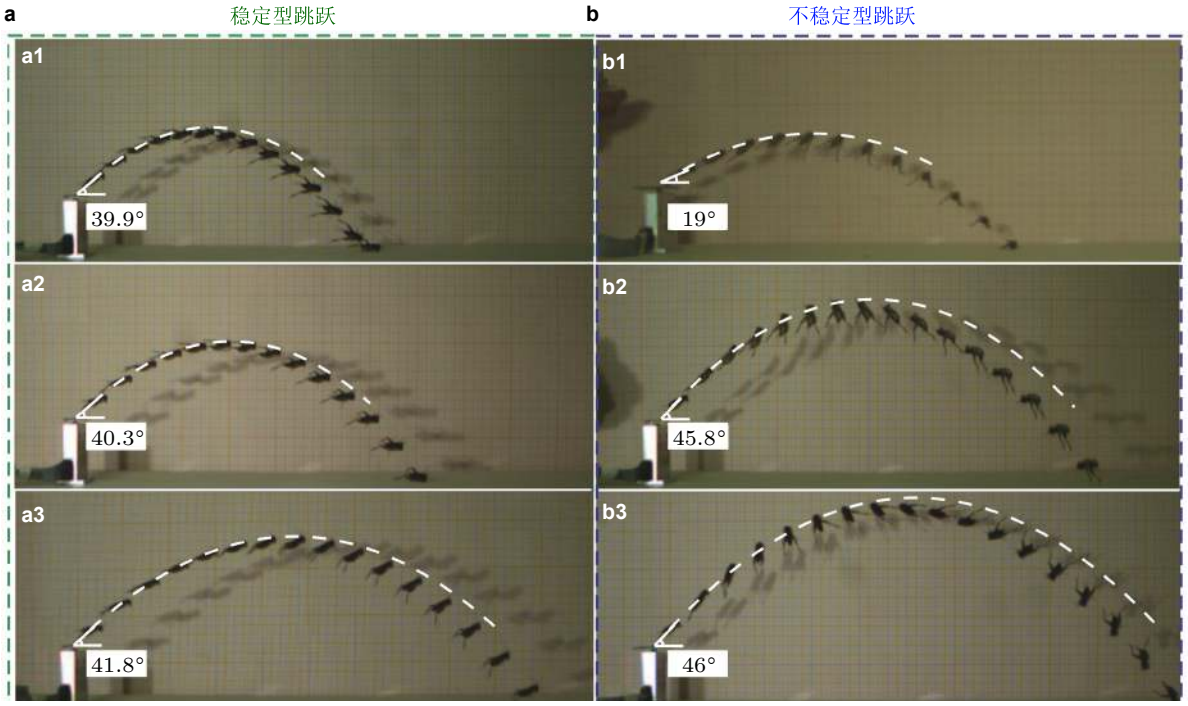


图 12

中华斗蟋的跳跃策略实验分析 (Xing and Yang 2020a). (a) 稳定型跳跃方式, 起跳角分别为: (a1) 39.9°, (a2) 40.3°和 (a3) 41.8°; (b) 不稳定型跳跃方式, 起跳角分别为: (b1) 19°, (b2) 45.8°和 (b3) 46°

很少发现这些纤细的腿部会发生屈曲失效, 特别是在弹跳时的冲击载荷下, 这些细长的生物结构依然完好无损.

昆虫细长的腿是最常见的天然复合结构, 具有出色的抗屈曲能力 (Parle et al. 2016b). 实际上, 它们不同的角质层外骨骼是通过自然选择进行优化的, 最后演变成各种大小和形状以适应来自生存环境的复杂作用力. Parle 等 (2016a, 2016b) 研究了几种昆虫胫骨的抗压和抗弯力学特性, 包括蝗虫、蟑螂、竹节虫和大黄蜂, 结果表明这些昆虫的胫骨具有很高的抗屈曲安全系数. Ghara 等 (2011) 指出用于硬质基体穿透的黄蜂产卵器的直径略大于用于较软基体穿透的黄蜂产卵器, 大直径提高了弯曲刚度, 可有效防止在外力载荷下的屈曲失效.

与其他昆虫类似, 竹节虫细长的胫骨在准静态和动态载荷下可提供足够的抵抗力, 以防止爬行, 跳跃, 甚至从高处植被掉落等运动产生的地面冲击力对后腿造成屈曲破坏 (Burrows and Morris 2002, Zeng et al. 2017, Zeng et al. 2015). 最近, Schmitt 等 (2018) 采用压缩实验和现代成像技术相结合的方法, 研究了竹节虫胫骨在每个胚胎后发育阶段的压缩力学特性, 通过实验阐述了竹节虫胫骨的抗屈曲机制, 首次提供了竹节虫在整个生命周期中胫骨角质层生物力学特性变化的定量数据. 研究表明竹节虫胫骨空心结构采用了最佳的半径与厚度之比. 此外, 作者证明胫骨内部填充的柔软弹性纤维以及外部沿纵向和圆周方向定向分布的几丁质纤维也是防止胫骨屈曲的有效策略. 根据 Schmitt 等的实验结果, Xing 和 Yang (2019) 注意到, 竹节虫幼虫期的胫骨横截面大

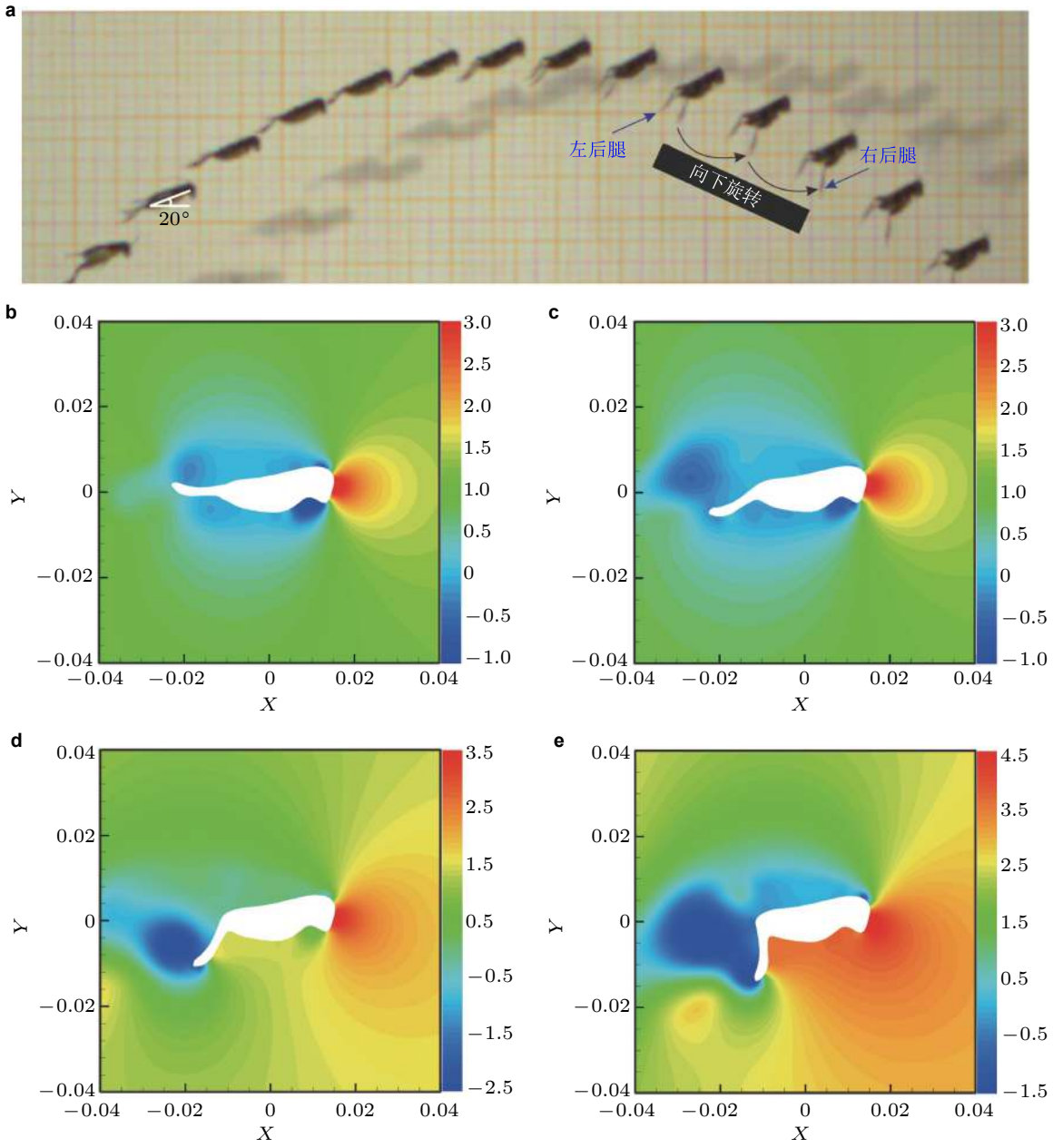


图 13

中华斗蜱增阻抗冲击策略 (Xing and Yang 2020a). (a) 中华斗蜱后腿增阻及其姿态调控实验分析; (b) ~ (e) 后腿与身体的夹角对压强分布的影响, 夹角分别为: (b) −15°, (c) 15°, (d) 45°和 (e) 75°

部分为五边形. 成虫期的胫骨横截面在身体近端为圆形, 在身体远端为五边形. 此外, 竹节虫胫骨空心结构的壁厚从近端到远端逐渐减小. 但是, 对于这样独特的天然细长胫骨的横截面形状设计, 先前的研究并没有给出详细的解释. Xing 和 Yang (2019) 重建了竹节虫胫骨的三维几何模型, 结合理论分析, 有限元仿真和实验讨论了不同横截面形状对细长胫骨抗屈曲能力的影响 (**图 14**). 基于大挠度理论, 作者提出的相应力学模型可以准确预测屈曲时的结构响应和力学行为 (包括欧

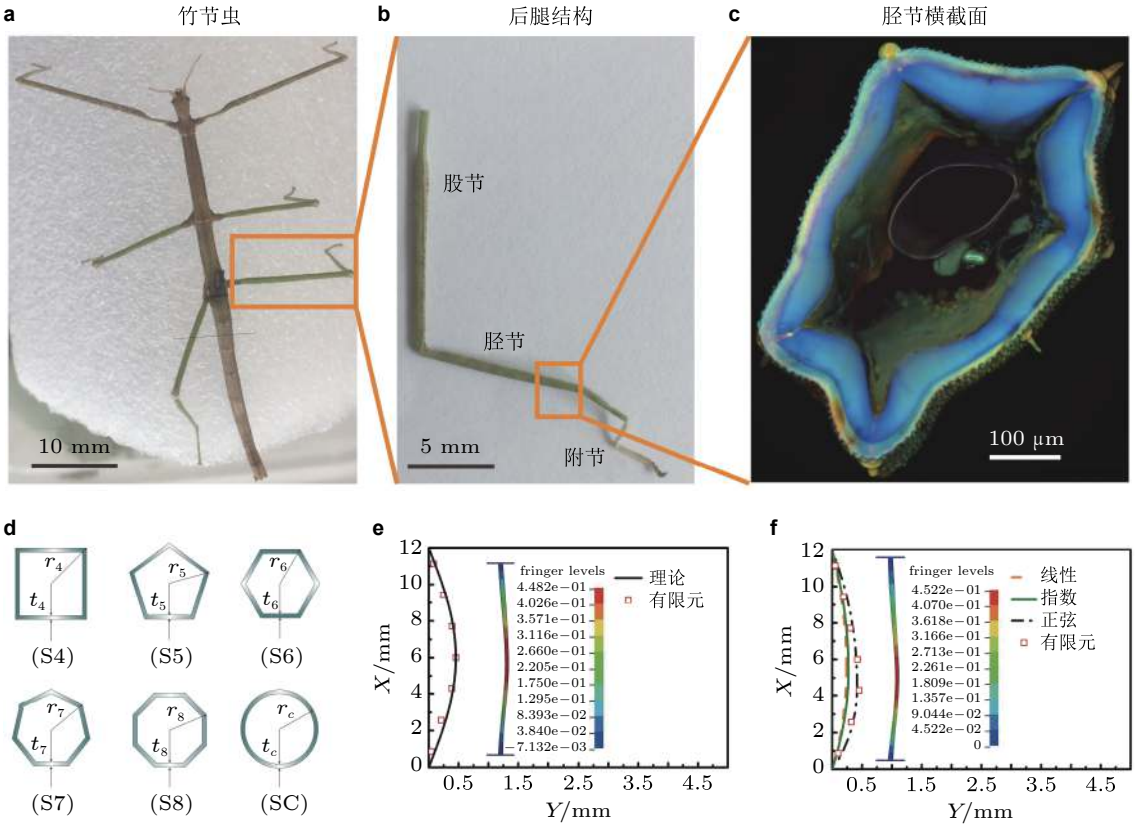


图 14

竹节虫后腿的抗屈曲策略研究 (Xing and Yang 2019). (a) 竹节虫, (b) 竹节虫后腿结构, (c) 竹节虫胫骨横截面的共聚焦激光扫描显微图像, (d) 不同多边形横截面示意图, (e) 等梯度胫骨发生欧拉屈曲时的理论预测与数值模拟挠度曲线比较, (f) 不同梯度胫骨发生欧拉屈曲时的理论预测与数值模拟挠度曲线比较

拉屈曲和局部屈曲). 研究发现, 五边形 (S5) 截面是平衡欧拉屈曲和局部屈曲抵抗能力的最佳折衷策略, 并且, 通过界面变化和壁厚变化, 可以为竹节虫胫节提供最佳的应力分布和抗屈曲方案. 这项工作为新型航天器可展结构和适用不同地貌的航天着陆器缓冲装置提供了设计思路.

2.8　甲壳虫鞘翅角质层的抗冲击策略

昆虫角质层是自然界最复杂的生物复合材料之一, 其具有多级层合结构, 包括不同刚度梯度的搭配组合, 作为外骨骼不仅可以维持昆虫的身体形状和稳定性 (Neville 1975), 还可以作为防御盔甲保护昆虫免受捕食者和生存环境中其他威胁的侵害 (Wang et al. 2018).

先前的研究表明, 昆虫角质层结构通常由上表皮, 中表皮和内表皮 3 部分组成 (Barbakadze et al. 2006, Hadley 1986). 上表皮是最外层的蜡状角质层, 即使不包含几丁质纤维, 依然在 3 个表皮层中拥有最高的刚度 (Vincent and Wegst 2004). 上表皮的下层是中表皮, 其具有致密的几丁质–蛋白结构, 此结构的硬度和刚度由于硬化可能会变得更高 (Andersen 1979, Hopkins and Kramer

1992). 作为角质层的最内层, 内表皮比中表皮更柔软, 含水更多 (Appel et al. 2015, Michels and Gorb 2011). 由此可知, 角质层的外层更硬, 更坚固, 它可防止表面遭受穿透或冲击破坏; 而角质层内层更柔韧, 更具黏性, 这有助于耗散更多的冲击能量, 并阻止裂纹进一步向内层传播 (Dirks and Dürr 2011, Rajabi et al. 2016). 然而, 最近的一项研究报道了象鼻虫 (*Pachyrhynchus sarcitis kotoensis*) 具有硬化的内表皮, 其内表皮的刚度超过了中表皮和外表皮. Wang 等 (2019) 对此进行了系统的实验, 揭示了象鼻虫内表皮的硬化程度, 并量化了硬化对内表皮材料特性的影响. 此外, 作者通过一系列数值模型分析了硬化的内表皮对昆虫外骨骼的力学稳定性的影响. 他们第一次提供了内表皮硬化的证据, 并发现硬化的内表皮增加了角质层的力学稳定性, 并提高了外骨骼抵御捕食者咬伤的能力.

如上所述, 沿角质层厚度方向的刚度分布对于昆虫的生存至关重要. 不同的刚度分布设计可以满足不同昆虫特定的生存需求, 并为此提供足够的抵抗力来防止捕食者和恶劣环境造成的载荷损伤 (Combes and Daniel 2003, Lee et al. 2017, Parle et al. 2016a, Rajabi et al. 2015). 通过上表皮, 中表皮和内表皮的协同组合, 它可以形成具有特殊功能的独特梯度材料, 从而提高对昆虫身体的防护能力 (Mccullough 2014, Peisker et al. 2013, Rajabi et al. 2018). 研究沿厚度方向的硬化与刚度分布规律, 不仅有助于更深层次地揭示昆虫角质层的防护机制, 而且对前沿工程应用的发展也提供了重要生物启发.

受昆虫角质层中纳米纤维骨架结构和硬化反应的启发, Chen 等 (2019) 设计开发了一种表面脱乙酰壳多糖纳米纤维 (SD-ChNF) 与明胶混合的水凝胶材料, 具有优异的力学特性. 通过改变和调节 SD-ChNF 与明胶之间醌交联的反应时间, 可以有效地控制和改变所制备的仿生水凝胶的拉伸性能. 受生物启发制备出的醌交联 SD-ChNF /明胶水凝胶在生物医学工程应用中具有巨大潜力, 可用做人造腱和韧带的基本组成材料. 受天然昆虫角质层材料的组成和分层结构的启发, Fernandez 和 Ingber (2012) 制造了一种可控制设计材料, 该材料可实现天然复合材料的优异性能, 包括可达到与铝合金相当的强度和韧性, 但其密度只有铝合金的一半. 这项工作对于塑料替代品的开发和再生医学的研究具有重要价值.

但是, 前人的研究没有报告沿厚度方向的刚度梯度分布的确切形式, 也没有文献解释哪种刚度梯度分布对结构的防护最有效.

Barbakadze 等 (2006) 通过纳米压痕实验测量了甲虫角质层的弹性模量和硬度. 在此基础上, Rajabi 等 (2017) 建立了精确的昆虫角质层有限元模型, 并为有限元模型分配了几种不同的刚度分布, 以模拟这些层状复合材料在纳米压痕实验下的力学行为. 结果表明, 沿其厚度的不连续的指数刚度梯度分布与先前的实验数据吻合最好. 但是, 为什么昆虫的角质层会沿厚度方向形成不连续的指数刚度梯度? 这种刚度梯度分布对昆虫角质层的防护特性有什么影响? 刚度梯度分布在冲击载荷下是如何有效起作用的? 这些问题仍然不清楚.

为了回答这些问题并弄清楚梯度生物材料如何抵抗冲击并保护内部器官免受伤害, Xing 和 Yang (2020b) 研究了昆虫甲壳角质层的多级分层结构的力学性能, 特别是冲击载荷下的盾状甲壳的力学响应, 以揭示其抗冲击策略和防撞保护的内在机理 (**图 15**). 结果表明, 甲壳角质层界面

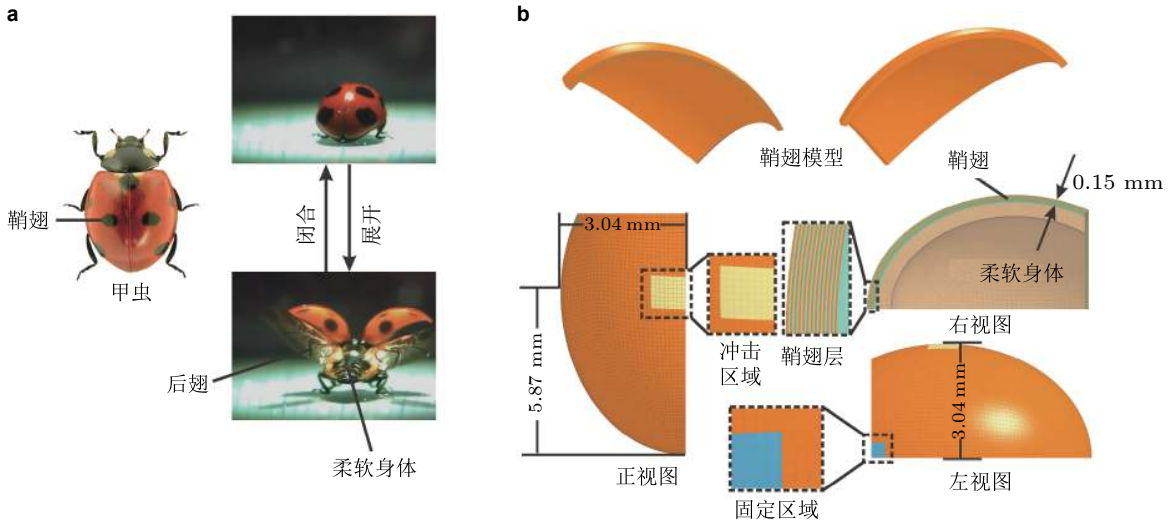


图 15

甲虫鞘翅的抗冲击策略研究 (Xing and Yang 2020b). (a) 甲虫及其鞘翅展开与闭合状态, (b) 甲虫鞘翅的三维几何模型及其抗冲击性能的数值模拟示意图

的不连续性和整个层厚度的刚度梯度分布对防止应力波传播和提高耐冲击性有重要影响. 作者通过理论和数值方法证明, 沿厚度方向具有不连续的指数刚度梯度 (DC-EXP) 的甲壳虫等昆虫角质层在冲击载荷下产生最小的应力和碰撞力, 从而获得最佳的抗冲击性能和防御效果. 此外, Xing 和 Yang (2020b) 还在准静态压缩和冲击载荷作用下分别比较和讨论了具有不同刚度梯度的甲壳角质层对昆虫鞘翅的防护性能的影响. 研究证明, 外表皮层刚度大于内表皮层的角质层具有更好的抗冲击载荷的效果; 而内表皮层刚度大于外表皮层, 或者内外表皮层均有高度硬化, 刚度相差不多的角质层更有利于抵抗捕食者的静态咬合力 (**图 16**). 这项工作揭示了甲壳角质层刚度分布的自然选择规律, 并且对设计和开发具有更强抗冲击性能的先进多功能防护结构提供了重要仿生启发.

2.9　蜘蛛网的抗冲击策略

蜘蛛丝以轻质和超凡的强韧性著称, 能承受多种大小和速度的猎物撞击. 蜘蛛网在捕食时拦停猎物的过程就是典型的能量吸收过程, 具有极高的吸能效率. 蜘蛛网以圆形居多, 虽然蜘蛛圆网内有多种丝线, 但主要由径线和周线组成. 以十字园蛛 (*Araneus diadematus*) 为例, 其径线主要是大壶状腺产生的牵引丝, 周线主要是鞭状腺产生的黏丝, 两种丝线的力学性质也有很大不同 (Gosline et al. 1999). 其中, 牵引丝是目前已知的最强韧的材料 (Gosline et al. 2002, Vollrath and Porter 2009), 与一般的生物材料如蚕丝、胶原蛋白、弹性蛋白、木材等相比, 牵引丝的刚度更高, 强度更大; 而与一些以高强度著称的人造材料相比, 如尼龙、芳纶、碳纤维、高强度钢等, 牵引丝虽然强度不及, 但延展率和材料韧性要远高于它们. 综合来看, 牵引丝高强度与高韧性的完美结合是目前自然界中任何材料所不能比拟的. 黏丝的力学性质与合成橡胶类似, 初始刚度极

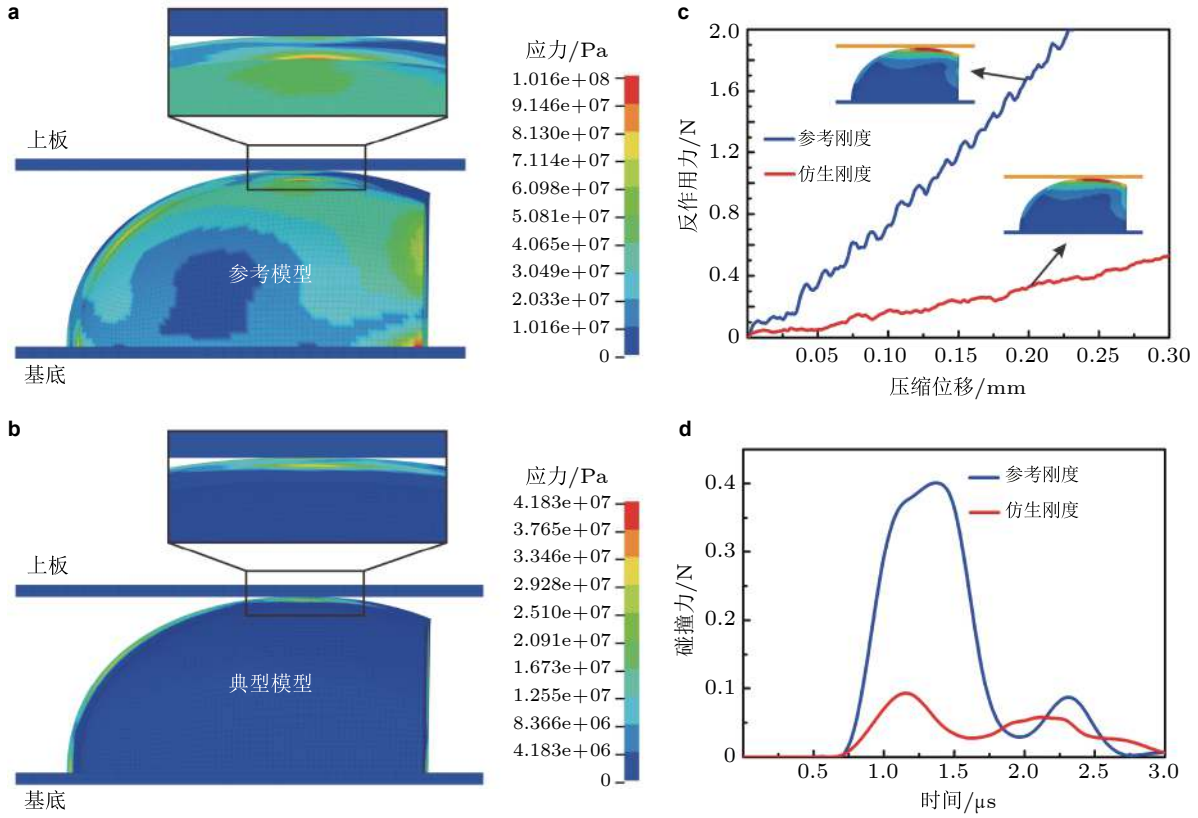


图 16

不同刚度梯度的甲壳角质层对昆虫鞘翅的防护性能的影响 (Xing and Yang 2020b). (a) 内部软化角质层受压应力云图, (b) 内部硬化角质层受压应力云图, (c) 图 (a) 和图 (b) 所示鞘翅模型在准静态载荷下的力位移曲线, (d) 图 (a) 和图 (b) 所示鞘翅模型在冲击载荷下的力位移曲线. 红色实线表示内部软化鞘翅角质层, 蓝色实线表示内部硬化鞘翅角质层

低, 说明材料极其柔软, 但延展性极好, 极限应变可达 2.7, 虽然略低于合成橡胶, 但强度却是橡胶的 10 倍. 研究还发现, 蜘蛛网径线和周线的应力应变关系有很大的不同, 但它们都具有很高的韧性和黏滞系数 (耗散能量与加载能量之比), 这与蜘蛛网的捕猎功能是匹配的. 蜘蛛网在捕猎过程中不仅需要极高的韧性, 保证丝线不会轻易断裂, 还需要具有较大的黏滞效应高效耗散猎物动能. 前人实验表明, 当循环加载的最大应变接近极限应变时, 牵引丝和黏丝的黏滞系数均可达 65% (Denny 1976).

虽然蜘蛛丝的力学特性已经被人们熟知, 但对蜘蛛网的整体抗冲击力学行为和能量吸收机制等问题还没有完全理解. 比如牵引丝与黏丝都具有很高的韧性和很强的黏滞效应, 为什么在圆网中被分别当做径线和周线使用? 径线与周线各自的作用分别是什么? 除了蜘蛛丝材料本身卓越的力学性质外, 蜘蛛网的高效吸能与网的结构设计有什么关系? 网内的应力应变分布是怎样的?

早在 1987 年, Craig (2010) 就指出蜘蛛网的吸能不仅取决于丝的性质, 也取决于网的结构. 通过实验和计算, 研究考察了材料属性和网的结构对能量吸收的影响, 发现对于吸能较强的网, 网

的结构设计对能量吸收贡献很大. 但计算中使用简单线弹性模型为丝线材料建模, 且径线和周线均使用同一种材料, 这显然过于简化了这一问题. Lin 等 (1995) 使用有限元方法研究了蜘蛛网拦阻过程中的吸能问题. 作者考虑了径线与周线的黏性和非线性, 并对两种丝线材料分别通过仿真与实验分析, 作者认为, 空气阻力在蜘蛛网的耗能中起着重要作用. Alam 等 (2005, 2007) 建立了蜘蛛网整网模型, 考虑了丝线材料的非线性和预应力, 运用数值方法更精确地研究了蜘蛛网的静态与动态响应问题, 但是研究并没有对能量耗散进行定量分析.

Sensenig 等 (2012) 使用实验方法直接测量了蜘蛛网拦阻过程中径线、周线与空气阻力 3 种途径在总耗能中的比重. 研究选取多张真实蜘蛛网进行了松木块模拟猎物撞击实验 (**图 17**), 使用高速摄影仪对整个拦阻过程进行拍摄, 通过处理图像可获得网内主要节点和松木块的运动学数据, 由运动学数据可获得丝线应变和松木块的机械能变化. 径线与周线预先进行材料实验获得其应力应变关系和黏滞系数, 结合拦阻过程中的丝线应变可分别计算径线与周线在整个过程中的能量耗散. 空气阻力的耗能通过简化的空气动力学公式和网内节点的运动学数据计算得到. 实验结果显示, 径线在蜘蛛网的能量耗散中占据主导地位, 而周线与空气阻力在总耗能中的比重较低. 为了对蜘蛛网抗冲击策略与拦阻吸能的内在机理进行深入研究, 于晖 (2016) 基于有限元方法模拟了蜘蛛网拦阻猎物的全过程. 在此基础上, Yu 等 (2015a) 基于非线性黏弹性材料模型 (ZWT 模型) 对蜘蛛网拦阻吸能问题进行了研究, 分析了拦阻过程中的力学响应和能量耗散规律, 并与线性模型结果进行了对比. 研究结果显示, 与线性模型对比, 黏弹性模型更接近真实实验结果. 蜘蛛网受猎物撞击时, 径线应变较小但应力较大, 周线应变较大但应力较小. 三种能量耗散途径在拦阻过程中的作用显示, 径线占据主导地位, 周线与空气阻力的能量耗散作用较小, 其中周线对拦阻过程后续的粘附和缠绕猎物起到重要作用. 研究还考虑了材料的应变率效应, 结果表明, 猎物初始动能对三种途径在总耗能中的比例分配具有显著影响: 初始动能越大, 径线耗能比例越大, 空气阻力耗能比例越小, 周线耗能比例基本不变. 此外, Yu 等 (2015a) 对蜘蛛网整体结构的研究表明, 冲击对网的影响局限于撞击点附近, 与撞击点直接接触的丝线应力较大, 而撞击点周围的丝线应力仍维持较低水平, 这有利于蜘蛛网被猎物冲破后的快速修补和完善. Guo 等 (2018) 通过对周线和径线的力学性能系统地测量, 发现周线的直径和抗拉刚度沿蜘蛛网的径向方向具有明显的梯度变化, 而径线具有更高但近似均匀的刚度. 研究结果表明, 由于周线力学性能的梯度变化, 无论飞行猎物撞击网的哪个位置, 蜘蛛网都显示出几乎均匀的能量吸收能力. 这种抗冲击策略与能量缓冲机制大大提高了捕获猎物的效率. 在微观方面, 由于其复杂的纳米复合结构, 组成蜘蛛丝或蚕丝的丝蛋白的强化机制仍然有很多未知. 在最新的研究中, Li 等 (2020) 报道了这种天然丝蛋白材料不同于金属和其他聚合物的优异力学行为, 并且揭示了一种关于天然丝蛋白增韧机制的新策略. 研究结果表明, 在剪切载荷作用下, 丝蛋白中存在多个界面微裂纹成核和堆积现象, 将链间界面分成小段, 通过以上方式, 丝蛋白即使在超长链下也能获得较高的强度. 这是软物质微结构设计的一种十分重要的策略, 可以避免由于链长增加而导致的“越大越弱”的局面. 这项研究不仅有助于揭示蜘蛛丝的抗冲击与能量吸收机理, 而且对于构建具有长链分子的强聚合物缓冲材料设计提供了仿生指导.

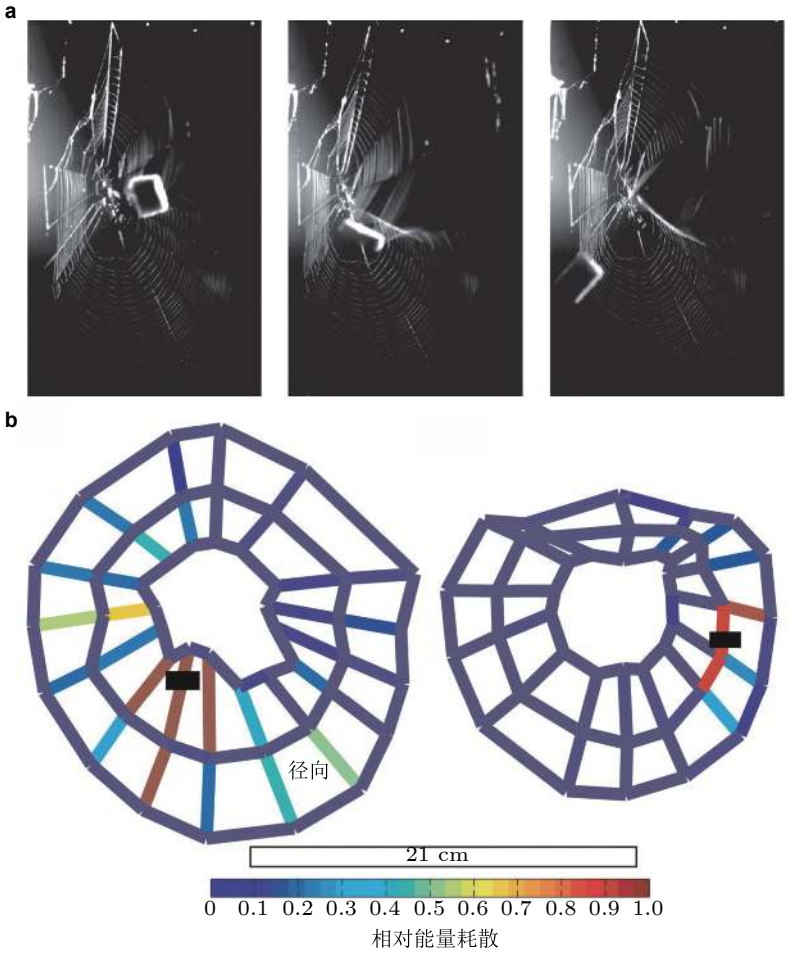


图 17

蜘蛛网抗冲击特性分析 (Sensenig et al. 2012). (a) 真实蜘蛛网拦阻实验, (b) 拦阻过程网内丝线能量耗散云图

3 水中动物

3.1 龟类甲壳的抗冲击策略

龟类爬行动物身体背部和腹部都覆有坚硬的甲壳, 可有效抵御外部的冲击载荷, 保护其自身不受损害. 与上述贝类等软体动物的外壳不同, 乌龟等动物的甲壳在整体上可视为三明治夹芯结构, 由外到内分别由坚硬的外侧密质骨、柔软的纤维质泡沫和坚硬的内侧密质骨组成, 见示意图 (**图 18**) (Dunlop et al. 2011).

从该三明治夹芯结构可看出乌龟甲壳是典型的抗冲击防护结构. 此外, 乌龟背部的甲壳由多块不规则骨板拼合而成, 块与块之间形成错综复杂的骨缝结构. 针对龟类甲壳的以上特征, 相关学者近几年从整体甲壳的抗压性能、微观结构、不同部位的弯曲性能和抗冲击特性等方面都进行了很多研究 (Achrai and Wagner 2013, Balani et al. 2011, Damiens et al. 2012). 在实验方面,

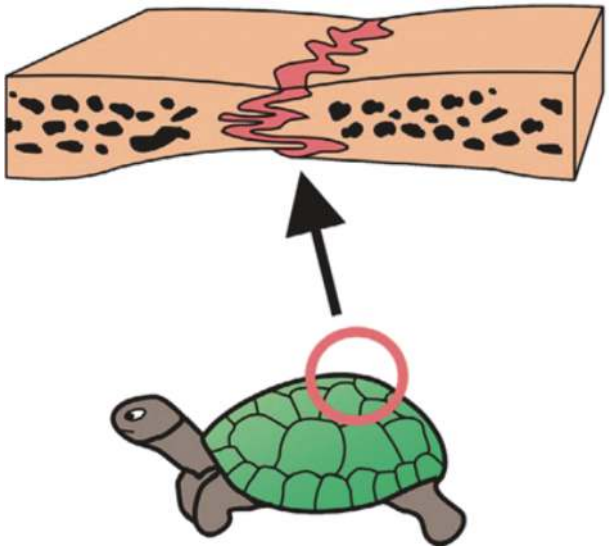


图 18

乌龟甲壳结构示意图 (Dunlop et al. 2011)

Krauss 等 (2009) 首次利用 Micro-CT、扫描电子显微镜和光学显微镜对龟壳进行了微观观测, 发现了龟壳背部存在的大量自锁形式的骨缝结构 (如**图 19** 所示), 并以此阐述了乌龟甲壳刚度随外载荷大小变化的自适应特性.

随后, Achrai 等 (2014, 2015) 分别对乌龟腹部和背部不同区域的甲壳进行了一系列微观尺度的实验研究, 包括电镜扫描、纳米压痕和三点弯曲等, 测得了不同区域 (如骨缝区域、肋拱区域等) 甲壳的弹性模量和硬度, 讨论了水合作用对龟壳力学性能的影响. Achrai 和 Wagner (2015) 还对乌龟甲壳在冲击载荷和循环载荷下的力学行为进行了测试, 分析了甲壳中角质层和骨缝结构的能量吸收能力以及对断裂和失效方面的增强作用. Magwene 和 Socha (2013) 对整个龟壳进行了平板压缩和尖头压缩实验, 分析了整体龟壳的相对位移、失效模式和所能承受的最大载荷. 此外, 他们还通过三点弯曲实验测得了局部骨缝结构区域的抗弯性能, 结果再次表明骨缝结构具有很强的能量吸收能力. 为了更深入地了解龟壳的抗冲击特性, 研究人员通过建立整体或局部的乌龟甲壳模型, 用数值方法分析了甲壳的骨缝结构、分块壳体尺寸以及块数对其静动态响应的影响 (Fish and Stayton 2014, Zhang et al. 2012). 针对骨缝结构, Li 等 (2012, 2013) 从理论上运用余虚功原理建立了骨缝复合结构的解析模型, 分析了复杂界面形状对整体结构刚度、强度、韧性以及载荷传递等方面的影响, 揭示了骨缝结构在力学性能方面的增强作用. 在此基础上, Zhang 和 Yang (2015) 研究了龟壳等生物防护结构的抗冲击策略, 特别是受到冲击载荷时所涉及的交错层合介质中应力波的缓冲以及简谐波的反射和透射等问题. 研究发现, 龟壳的骨缝结构 (骨–胶原质–骨) 的几何形貌对其反射性能和禁带特性有重要影响, 改变几何形貌可以实现对层合骨缝结构的弹性波反射性能和禁带特性的调控, 达到在特定频率下滤波抗冲击的目的.

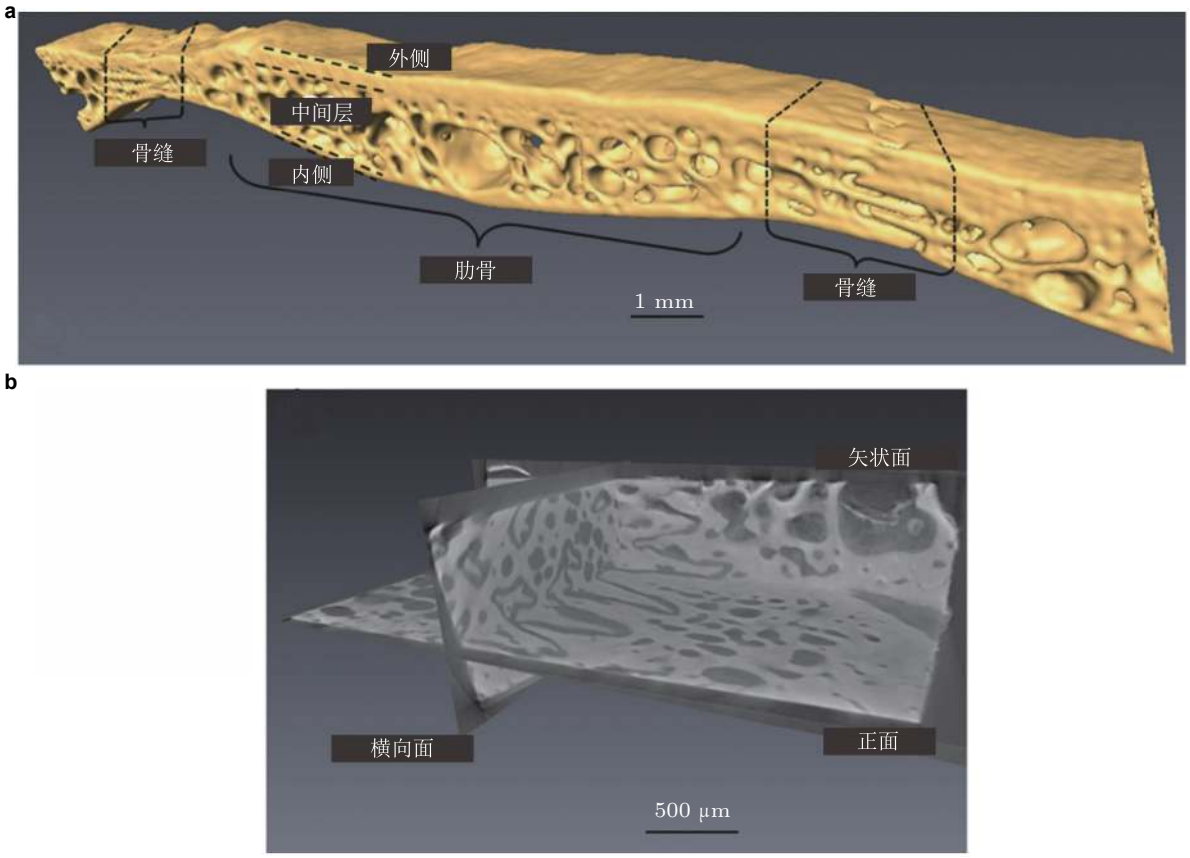


图 19

乌龟甲壳骨缝的微观结构 (Krauss et al. 2009). (a) 龟壳的 Micro-CT 重构模型, (b) 骨缝区域在 3 个平面的横截面 (正中矢状面, 正面和横向面)

3.2 软体动物外壳的抗冲击策略

自然界中, 贝类等软体动物外表面通常都拥有坚硬的保护壳, 以保证其身体在受到冲击等意外载荷时不受损伤. 由于大自然中的生存竞争, 使得这些动物的保护壳具有很高的强度和韧性. 贝类外壳由 95% 的文石晶片 (碳酸钙) 和 5% 的胶原质构成, 其多级微观组织犹如“砖块–灰浆”结构, 文石晶片对应“砖块”, 胶原质对应“灰浆”, 如**图 20** 所示 (Meyers et al. 2008).

针对这一特殊结构, 国内外许多学者通过实验测试、理论分析和数值模拟等方法对微纳米尺度下贝壳的增强增韧机制、抗冲击力学行为、缺陷不敏感性等方面进行了广泛的研究 (Ji and Gao 2004, Nukala and Simunovic 2005, Rabiei et al. 2010, Shao et al. 2014, Zhang et al. 2010). 例如, Wang 等 (2001) 通过实验观测发现了贝壳中文石晶片上的纳米粗糙微粒, 分析了该粗糙微粒产生的应变硬化效应及其增韧作用; Shao 等 (2014) 利用微结构断裂力学模型分析讨论了“砖块–灰浆”结构参数在提高贝壳强度、断裂韧性以及缺陷不敏感性方面所起的重要作用. 需要注意的是, 上述这些研究均局限于贝壳的准静态力学行为. 相比之下, 贝壳冲击动力学行为方面的研究成果较少. 在实验方面, Mohanty 等 (2006) 测得了不同频率下贝壳的损耗模量和损耗因子, 分析

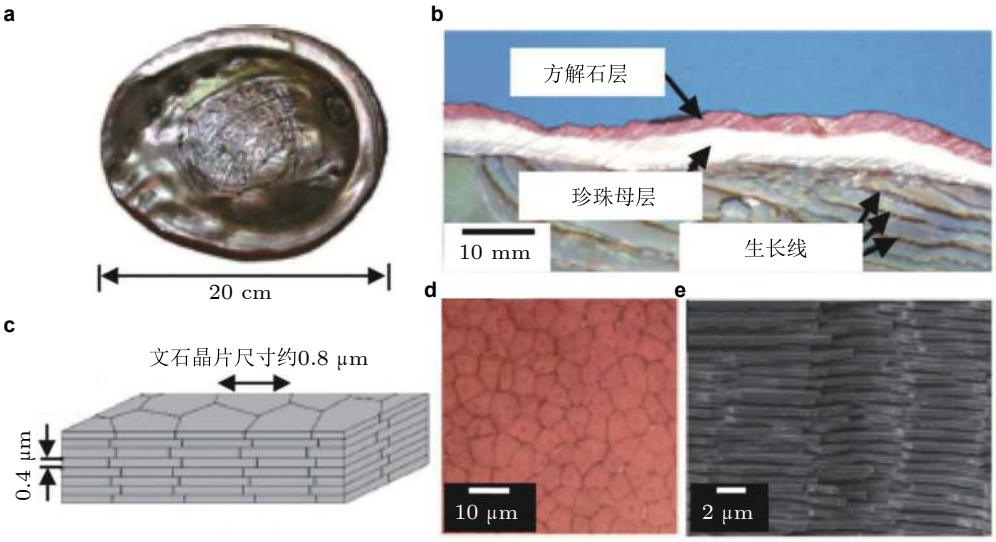


图 20

贝壳多尺度下的分级结构 (Meyers et al. 2008). (a) 整体壳结构, (b) 宏观尺度下的分层结构, (c) 微米尺度下的“砖块–灰浆”结构, (d) 细胞平面内文石晶片结构, (e) 厚度平面内文石晶片结构

了贝壳中含水量对其黏性行为的影响; Huang 等 (2011, 2014) 利用霍普金森杆获得了贝壳的高应变率力学行为, 发现了贝壳在冲击载荷下的自我强化效应和能量耗散机制. 随后, Knipprath (2011) 建立了贝壳的“砖块–灰浆”结构有限元模型, 通过数值模拟分析了贝壳几何参数对其高应变率力学行为的影响. 在理论方面, Dutta 等 (2012, 2013) 借助剪切滞后理论给出了贝壳类砖砌结构的动力学解析模型, 揭示了“砖块”相互搭接长度对冲击力传递的影响.

3.3　鱼鳞的抗冲击策略

鱼身表面的柔韧鳞片形成的皮肤盔甲可以用来保护自己不受外来冲击载荷的伤害, 这可以启发我们研究其抗冲击策略与防护机制, 从而进一步指导设计出具有优越的抗穿透力和能量吸收能力的仿生防护装置. Yang 等 (2012) 研究发现, 鱼的鳞片是由外部硬矿物层覆盖多层胶原纤维组成的多级结构 (**图 21**), 与整体矿物材料相比, 此结构在不减弱材料强度的情况下大大增加了柔韧性.

为探索真实情况下鱼鳞的防护策略, Zhu 等 (2013) 研究了在遭受捕食者攻击时, 鳞片群体之间的相互作用与整体的抗冲击机制. 研究表明, 条纹鲈鱼 (*Morone saxatilis*) 的鱼鳞使得能够刺穿皮肤的极限力提高四到五倍. 虽然如此, 鱼身体内局部的大挠度和高应变可能会导致尖锐的压头在刺入鳞片之前就造成皮肤软组织钝伤. 但是, 在鱼类穿刺部位周围进行的立体成像和图像相关分析显示, 在周围鳞片的共同作用下, 有助于在较大体积上重新分配穿刺力, 从而限制了软组织中的局部变形和应变, 降低钝伤的风险. Quan 等 (2018) 通过实验分析, 揭示了有 4 亿年存在历史的腔棘鱼的独特防御机制. 这种防御力是由具有独特的层间双螺旋多级结构的弹性鳞片提供的, 这种弹性鳞片具有出色的抗变形失效的能力. 与其他弹性鳞片不同的是, 腔棘鱼鳞片中的胶原纤

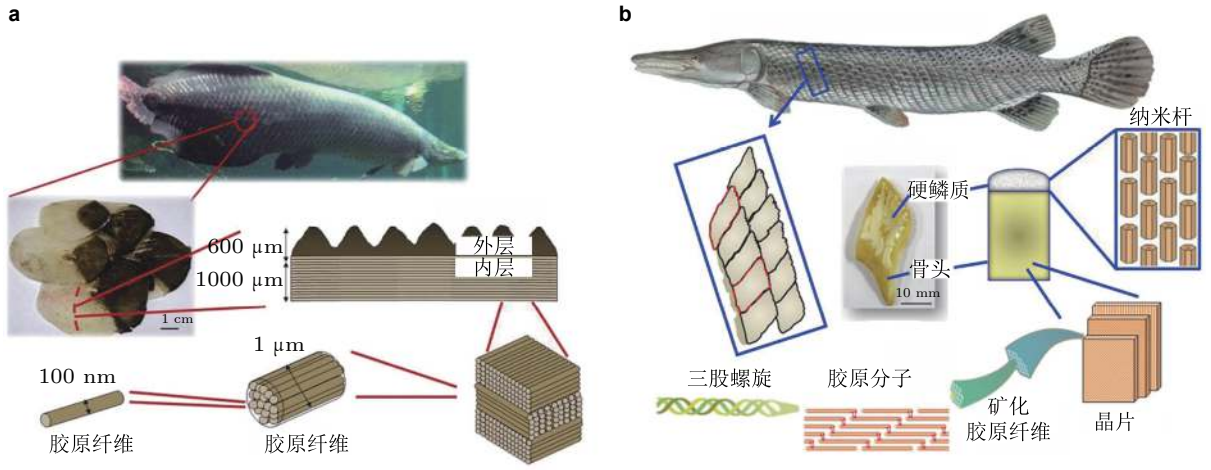


图 21

鱼鳞护甲的多级分层结构 (Yang et al. 2012). (a) 巨滑舌鱼鳞片护甲多级分层结构 (包含矿物层和胶原纤维层), (b) 短吻鳄鳞片护甲多级分层结构 (包含硬磷质层和矿化胶原纤维层)

维呈束状嵌入在基质中, 并垂直于层状结构 (双螺旋纤维), 提供了附加的刚度和抗变形能力. 此外, 此种结构还拥有多种阻止裂纹扩展的机制, 使其成为抵抗食肉动物攻击的出色抗冲击防御材料.

以上的研究发现, 天然鱼鳞的结构和抗冲击策略可以有效地防御多种类型的威胁, 并可以启发我们设计出具有吸引力的新型多功能防护系统. 例如, 受到巨骨舌鱼 (*Arapaima gigas*) 皮肤盔甲的启发, Signetti 和 Pugno (2014) 提出了一种仿鱼鳞防护板, 该板是由坚硬的外表面和柔软的内衬层组成的陶瓷复合板, 大大改善了传统陶瓷板的抗冲击特性, 可应用于工程结构的抗冲击防护. 除了单个鳞片的仿生机理研究, 研究者们还根据鱼鳞的重叠策略在皮肤防御中的显著作用, 提出了新的抗冲击复合结构 (Ghosh et al. 2014, Liu et al. 2016, Porter et al. 2017), 其中 Vernerey 和 Barthelat (2014) 还从理论上解释了重叠的鱼鳞具有高效的抗冲击策略 (**图 22**).

受到鱼身层叠鳞片柔性装甲的启发, Rudykh 等 (2015) 设计了混合的刚性板/软基质材料结构, 此仿生结构在保持柔韧性的同时能够提供有效的防穿透的防护能力. 作者对此仿生结构的 3D 打印样品进行了压痕和弯曲测试, 结果表明, 其耐穿透性可以增加 40 倍, 而柔韧性下降不到 5 倍. Martini 和 Barthelat (2016) 结合激光雕刻和拉伸–释放的方法制造了像鱼鳞一样的柔性护甲. 与连续的均匀陶瓷层相比, 该仿生柔性护甲不仅具有更强的柔韧性, 而且具有更强的抗侵彻性和耐损伤性. 并且该装甲的耐侵彻性是软弹性体的 10 倍左右, 这使得它成为传统防护装备非常有吸引力的替代品.

鳄鱼以硬鳞或皮肤骨化的形式进化出了柔软的铠甲用于身体防护, 此铠甲由有限尺寸的硬板嵌在软质组织上形成, 其中的硬板部分起到抗冲击防护作用, 而这些软质组织为硬板部分的相对运动提供了其运动所需的灵活性. Chintapalli 等 (2014) 用激光雕刻的方法制造出了上述片段式集成铠甲, 从而实现了仿鳄鱼皮的防护概念. 与相同厚度的连续玻璃板相比, 研究中提出的仿生片段式集成玻璃的耐穿透性提高了 70%. Miranda 等 (2019) 通过有限元模型分析了鳞片几何

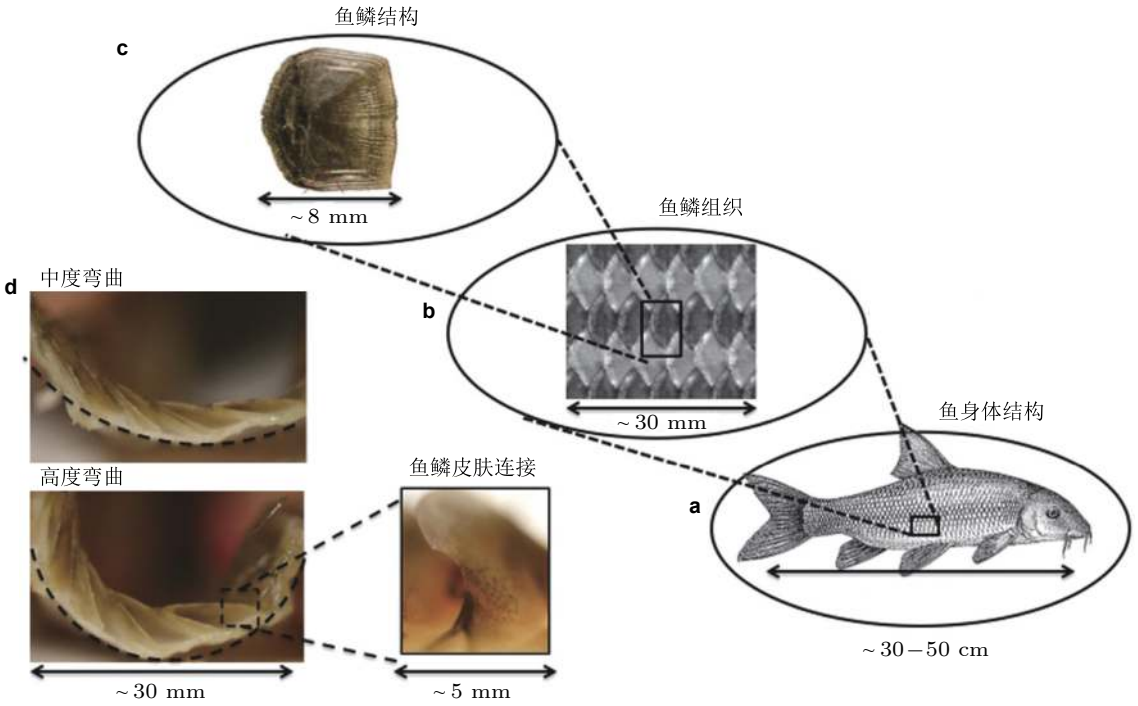


图 22

鱼鳞的变形与重叠抗冲击策略 (Vernerey and Barthelat 2014). (a) 单个鳞片结构, (b) 鳞片重叠结构, (c) 鳞片结构在整体的分布, (d) 在弯曲过程中鳞片重叠结构的变形

形状和其他冲击参数对仿生片段式集成陶瓷护甲的防弹性能的影响. 结果表明, 在没有降低冲击中心的防护强度的情况下, 片段式集成设计大大减小了损伤区域的大小. 最近, Mirkhalaf 等 (2018) 模仿鳄鱼皮的抗冲击策略提出了一种新型自锁材料 (TIMs) (**图 23**). 通过研究发现, TIMs 的抗冲击特性是没有采用自锁策略材料的 10 倍. 采用不同的自锁策略, Mirkhalaf 等 (2014) 用激光雕刻技术在玻璃设计中引入了由聚氨酯填充的锯齿状界面. 研究证明, 该抗冲击仿生策略显著增强了玻璃的能量耗散能力和结构韧性. 最近, Yin 等 (2018) 模仿鱼鳞和节肢动物角质层的增韧交叉层结构, 提出了一种新型夹层玻璃, 该玻璃的韧性可比普通玻璃提高 50 倍.

3.4　螳螂虾外壳的抗冲击策略

口足目动物是一群具有攻击性并且十分好斗的海洋甲壳类生物, 他们进化出高度发达的掠食前附肢 (趾肢) 专门用来捕食具有坚硬外壳保护的软体动物. 具有“捣碎器”称号的甲壳类动物趾肢进化出球茎状的外形, 能够以巨大的力量和速度击碎软体动物的外壳、蟹的外骨骼以及其他由坚硬的矿化结构作为防护系统的生物. 比如, 雀尾螳螂虾的趾肢击打运动可由静止状态瞬间达到 23 m/s 的冲击速度, 期间产生超过 10 000 g 的过载加速度, 这是在自然界观察到的最快和最强的冲击现象之一. 该趾肢能够重复传递并承受高达 1500 N 的冲击力而不发生毁灭性的结构破坏, 相当于承受了 5.58 mm 口径手枪射出子弹的威力, 证明了其作为一种特殊的耐损伤天然材料具有高效的抗冲击策略 (Patek et al. 2004).

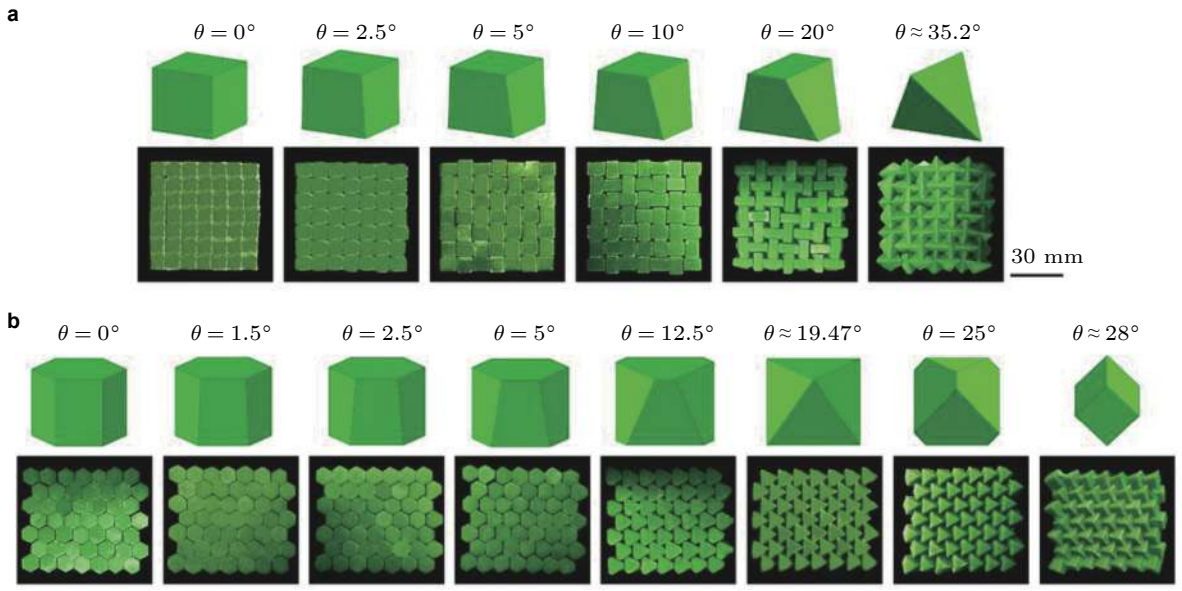


图 23

仿鳄鱼皮自锁抗冲击材料 (Mirkhalaf et al. 2018). (a) 基于正方形中间截面的截短四面体自锁瓦块单体结构, (b) 基于六边形中间截面的截短八面体自锁瓦块单体结构

甲壳类动物趾肢优异的抗冲击力学特性得益于其生物材料与结构的设计. 先前的工作证明雀尾螳螂虾的掠食前附肢是一种由无定形形式的碳酸钙和磷酸钙以及结晶磷灰石矿化的α几丁质纤维组成的多区域复合结构 (Weaver et al. 2012). 研究结果显示, 这种多区域复合结构内部的周期性区域是主要的能量吸收层, 具有良好的抗冲击和耐损伤特性. 此外, 掠食前附肢中柔软的纳米纤维聚合物和坚硬的矿化物的结合提供了周期性的模量搭配, 从而导致裂纹在传播时产生变形, 在螺旋 (Bouligand) 结构的作用下, 变形的裂纹在扩展时进一步发生扭曲, 这种天然设计增加了引起结构断裂所需的能量, 提高了结构的损伤容限 (Weaver et al. 2012). Guarin-Zapata 等 (2015) 的工作表明这种螺旋周期性结构在撞击过程中还具有剪切波滤波的效果. 为了更深入地了解雀尾螳螂虾前附肢的抗冲击机制, Yaraghi 等 (2016) 首次发现了该结构冲击区域的超微结构 (**图 24**), 并研究了超微结构特征与力学特性之间的关系. 冲击区域的超微结构是由螺旋状α几丁质纤维与磷灰石结合矿化后形成的高度致密的阶梯状正弦排列结构. 有限元分析和实验表明, 正弦排列结构在应力重分布和抗压载荷作用下的面外刚度方面得到了增强. 而且, 面外矿化纤维与螺旋面内矿化纤维的正弦排列组合, 可以使面外抗压强度和韧性达到最佳状态, 在抵抗结构破坏的同时将最大冲击载荷传递给猎物.

受到雀尾螳螂虾的前附肢超微结构抗冲击策略的启发, Yang 等 (2017) 提出了一种新型轻量级双正弦波纹状 (DSC) 夹芯板结构, 如**图 25** 所示. 通过有限元数值模拟方法研究了双曲波纹夹芯板结构在准静态载荷作用下的面外压缩力学行为, 分析讨论了双曲波纹仿生夹芯板结构优异的力学性能. 与传统的三角形波纹夹芯板以及正弦波纹夹芯板结构相比, 双曲波纹板结构具有更

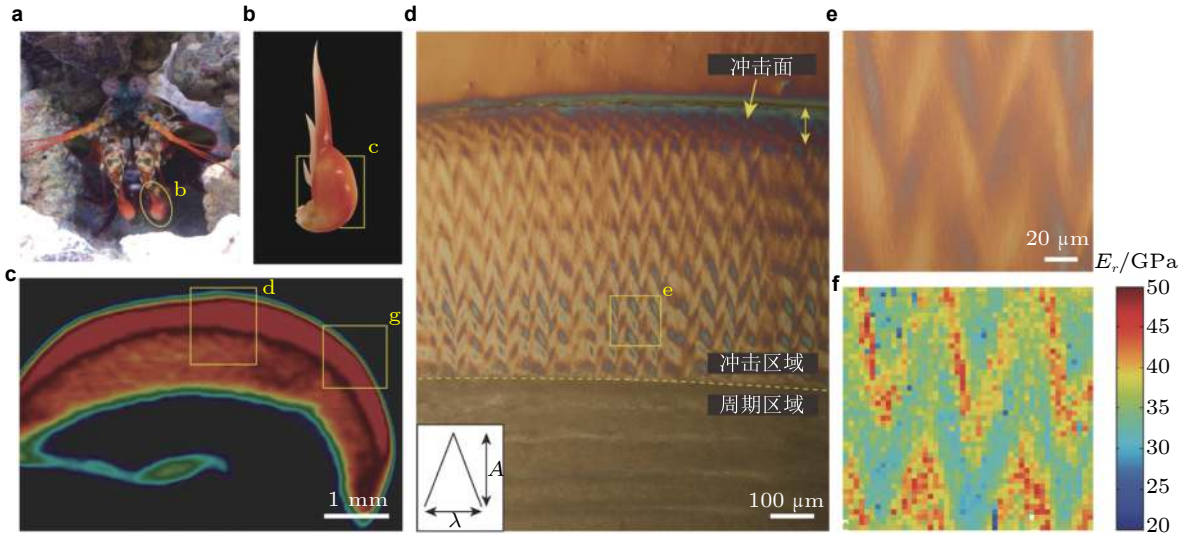


图 24

雀尾螳螂虾掠食前附肢 (趾肢) 抗冲击结构 (Yaraghi et al. 2016). (a) 雀尾螳螂虾 (掠食前附肢用黄色圆圈标注); (b) 图 (a) 黄色圆圈标注的雀尾螳螂虾掠食前附肢结构; (c) 掠食前附肢正中矢状面 CT 扫描图; (d) 图 (c) 中标记区域的高倍微分干涉对比图像, 突出显示了受撞击表面和周期性受撞击区域; (e) 图 (d) 中受撞击区域的高倍微分干涉对比图像; (f) 受撞击区域 (e) 的高分辨率纳米压痕图, 显示了与在受撞击区域内观察到的人字形图案分布相关联的弹性模量振荡

高的吸能比以及更低的初始峰值载荷, 避免了在冲击过程中对被保护结构的初始损伤, 大大提高了夹芯板的能量吸收性能. 通过设计双曲波纹夹芯板结构的振幅、波数以及厚度, 还可以针对不同的能量吸收与缓冲需求设计出特定的工程防护结构.

在此基础上, Yang 等 (2018a, 2018b) 设计研究了一系列用于能量吸收的仿生抗冲击结构. 比如, 由正弦式波纹板与三角管相结合的新型波纹蜂窝结构, 结合了传统六边形蜂窝结构以及波纹管结构的优点, 具备较高的能量吸收能力以及较低的初始峰值载荷. 这种独特的设计方法传承了雀尾螳螂虾的抗冲击策略的优点, 既可保证其在承受冲击载荷过程中充分吸收外部冲击能量, 同时又可以降低对被保护目标的初始损伤.

除了以上的研究介绍外, 还有大量的水中生物的抗冲击策略值得研究人员去探索. 最近, 研究人员结合多种实验技术, 揭示了墨鱼骨高能量吸收效率和高耐损伤的力学机理 (Yang T et al. 2020). 通过研究墨鱼骨的宏观响应与其微观结构之间的关系, 获得了墨鱼骨重要的抗冲击策略, 比如如何协同增强轻质、高刚度和高能量吸收等机械性能, 这些策略有望用于工程多孔陶瓷和晶格超材料的抗冲击设计. 关于探索材料的晶格设计与分布对力学性能的优化, Fernandes 等 (2020) 研究了玻璃海绵的矿化骨骼系统, 结合有限元模拟和对不同晶格几何形状的 3D 打印样本进行了力学测试, 揭示了玻璃海绵的对角线加固策略可在给定数量的材料上实现最高的抗屈强度, 有助于实现正方形晶格几何结构的几何优化, 以避免整体结构屈曲, 对改进现代基础结构应用中的抗冲击材料具有指导意义.

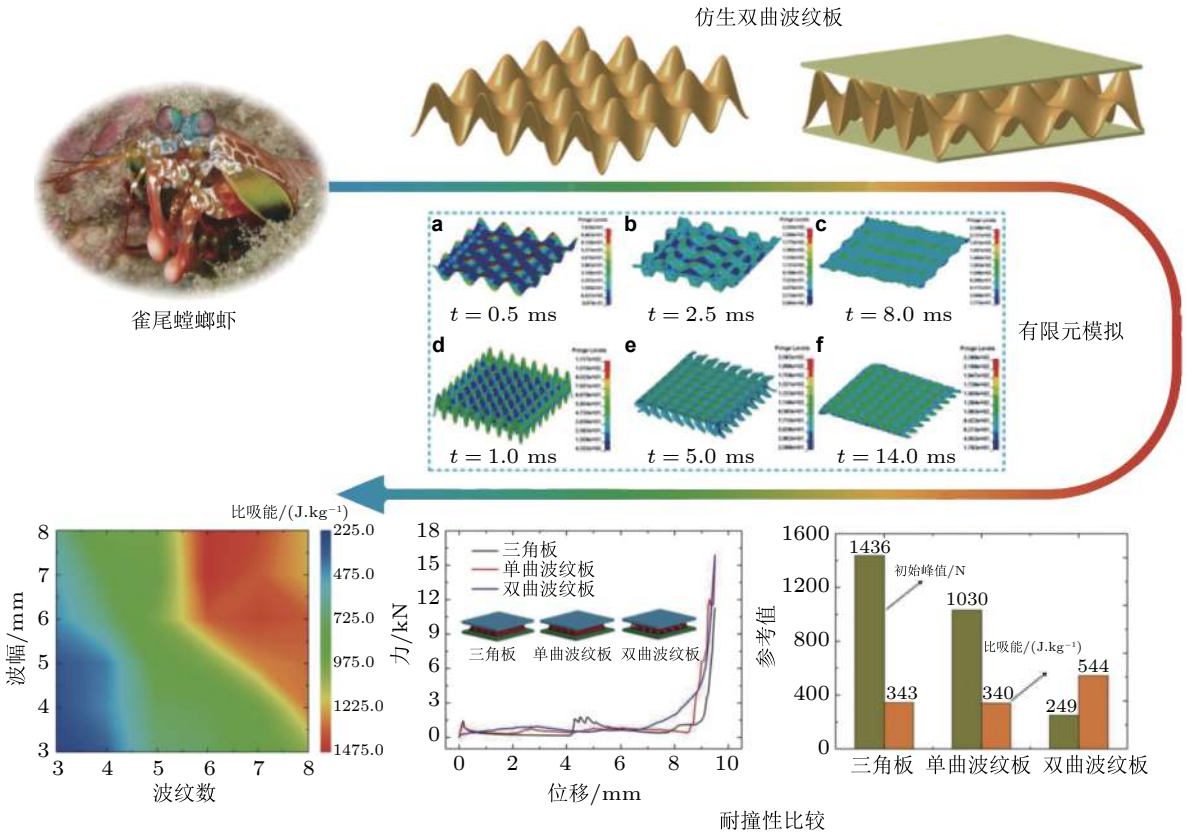


图 25

仿雀尾螳螂虾双正弦波纹状 (DSC) 夹芯板结构及其力学测试 (Yang et al. 2017). (a) 雀尾螳螂虾, (b) 雀尾螳螂虾仿生双正弦波纹板, (c) 仿生双正弦波纹夹芯板结构, (d) 仿生双正弦波纹板在压缩载荷下的变形模式, (e) 双正弦波纹夹芯板的能量吸收特性比较, (f) 三类波纹夹芯板结构的压缩力位移曲线比较, (g) 双正弦波纹夹芯板的比吸能云图

4 空中飞行动物 (以鸟类为例) 的抗冲击策略

4.1 鸟类羽毛及喙部的抗冲击策略

飞行不是鸟类的专属领域, 然而, 鸟类在飞行效率和持续时间方面大大优于其他飞行动物. 例如, 最近有报道称雨燕 (Apus) 在迁徙期间会定期飞行 10 个月. 鸟类的这种非凡能力归功于它们极其轻便的羽毛. Meyers 和他的合作者们在这方面做了大量的研究工作, 分别从材料和结构两个大方面阐述了羽毛独特的抗冲击特性与策略 (Sullivan et al. 2017a, Sullivan et al. 2019a, Sullivan et al. 2019b, Sullivan et al. 2017b). 研究发现, 鸟类羽毛通过跨多个尺度的有效设计来实现在飞行过程中抵抗来自空气动力载荷的冲击作用. 比如, 在纳米级, 胶原蛋白和β-角蛋白的原纤维表现出高度的组织性, 从而导致优越的单向抗冲击力学性能. 在中尺度上, 这些原纤维将它们自身排列成纤维束, 以抵抗特定的抗冲击要求. 在宏观尺度上, 已经出现了结构特征的精确选择, 当与局部中尺度材料布置协同结合时, 这种天然进化的超轻型羽毛结构, 对弯曲和扭转载荷具有超

强的抵抗力. 更重要的是, 羽毛内部从纳米级到宏观级不寻常的结构特征组合, 可以在轻质, 弯曲/扭转刚度和强度之间取得平衡, 从而有效地抵抗外界冲击载荷 (Sullivan et al. 2016, Sullivan et al. 2018, Wang and Meyers 2017). 此外, 鸟羽毛在风中甚至灌木丛中长途飞行时具有抗撕裂的超强耐用性. Zhang 等 (2018) 揭示了羽毛的超耐用性源于其可修复的串联滑锁系统, 该系统由钩形物, 滑轨和滑轨末端的棘刺作为终端结构组成 (**图 26**). 当受到外力作用时, 钩状件可沿滑轨可逆地滑动, 当施加较大的拉力时, 钩状件可被钩状端部的脊柱锁定, 甚至由于互锁结构的解开而滑动得更远. 相邻倒钩分离前的伸长率最高可达到 270%, 即使经过 1000 次分离和修复循环, 分离力仍可保持在初始值的 80% 以上. 这些结果证明, 串联的滑锁系统确保了鸟羽毛具有优异的抗冲击能力.

另一方面, 鸟类在日常的啄食和打斗过程中, 其喙部会承受外界频繁的冲击载荷, 保护脑部和身体内部不受损伤. 所以, 鸟类喙部结构的抗冲击特性吸引了众多学者的关注. 经研究, 鸟类喙部主体由片状角蛋白层叠而成, 一些材料学家对其力学性能也进行了系统详细的研究. Seki 等 (2005, 2006) 通过一系列微观材料实验 (如 X 射线能量谱观测、硬度测试、弯曲测试等) 和有限元模拟技术系统地分析了犀鸟喙部的弹性模量、拉伸强度、不同应变率下的断裂韧性以及失效弯曲强度. Soons 等 (2012) 建立了一种爪哇雀上喙部的三维有限元层合模型, 从冲击应力缓冲角度分析了角蛋白与其头部密质骨弹性模量的优化配置方式. 具有优越抗冲击特性的代表当属啄木鸟喙部. 啄木鸟在树干中啄食时其头部受到的冲击加速度可达到 1200 g (May et al. 1976), 远远超过了人类的生理极限.

为了探索啄木鸟头部的抗冲击策略, 许多研究人员都对其抗冲击特性进行了分析. Gibson (2006) 通过对啄木鸟的解剖, 发现了啄木鸟头盖骨的特殊构造 可增大与脑组织的接触面积, 从而降低冲击应力, 揭示了头盖骨的能量吸收机理. 在此基础上, Wang 等 (2011) 通过微型 CT 扫描建立了啄木鸟头部的有限元模型, 结合高速摄影系统和啄食力传感器研究了啄木鸟头部的宏观、微观形态结构和力学性能. 结果表明, 覆盖上喙的外组织层比下喙长 1.6 mm; 上喙的高强度骨结构比下喙短 1.2 mm, 并且喙的形态会影响撞击力, 脑组织应变. 研究发现, 啄木鸟的长舌骨的特殊结构起到了头部安全带的作用, 尤其是在撞击后, 大多数啄食力始终由较长的喙承担, 起到了缓冲作用. Lee 等 (2014) 利用纳米压痕仪、扫描电子显微镜和透射电子显微镜测得了一种红腹啄木鸟喙部微纳米尺度下的几何形貌和力学性能, 分析了其喙部微结构的几何特征. 相比白羽鸡和犀鸟, 他们发现该啄木鸟喙部角质区存在大量层合波纹状的骨缝结构, 如**图 27** 所示. 从力学角度来看, 该类层合交错结构显然有助于啄木鸟喙部对冲击应力波的高效缓冲和能量吸收, 这也进一步反映了啄木鸟优异的抗冲击特性. Liu 等 (2017) 使用树干状压电–力传感器和高速摄影仪测量了啄木鸟的啄食脉冲, 并用材料点法 (MPM) 模拟了啄食过程, 讨论了能量传输和大脑的冲击响应. 通过缩放分析来衡量啄木鸟的头部伤害标准 (HIC) 和平均合加速度 (Ar), 以评估大脑受损的可能性. 最后, 通过数值模拟分析了在较高啄速下的冲击响应, 发现喙部的材料特性对于抗冲击具有重要作用. 在自然竞争中, 鸟类喙部进化出的最优抗冲击策略在啄食与能量缓冲两个相反方面达到最佳平衡.

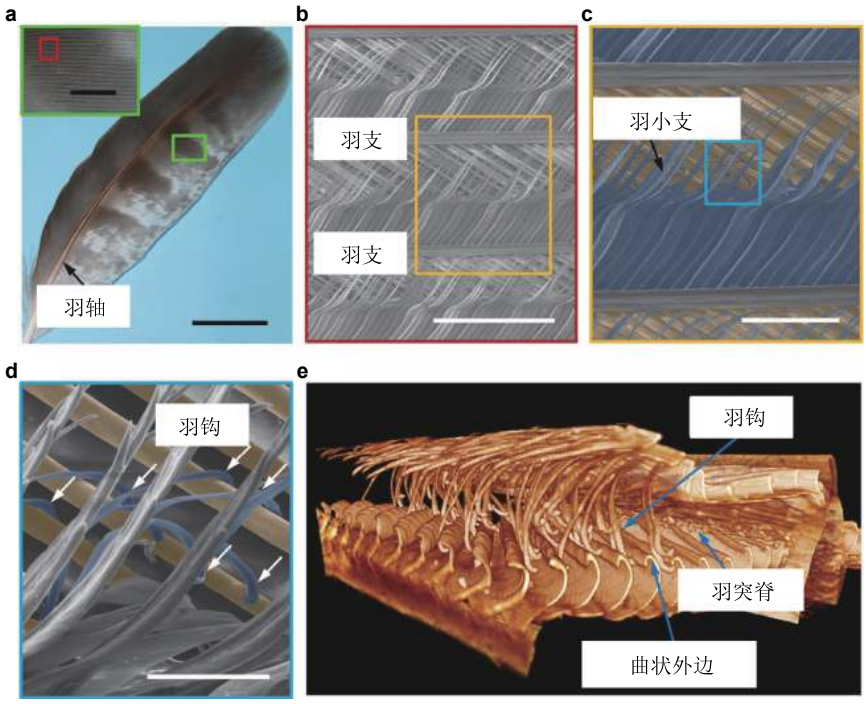


图 26

羽毛的层级结构 (Zhang et al. 2018). (a) 羽毛叶片由许多侧分支组成, 这些分支平行排列, 相对于主轴成约30°的角度, 初级侧枝称为倒钩; (b) 相邻的倒钩紧密重叠, 形成致密的羽毛叶片, 在倒钩的两侧出现了二阶侧枝; (c) 和 (d) 来自一个倒钩的钩子钩住相邻的倒钩并固定羽毛叶片; (e) 小钩钩住相邻倒钩上小叶的弯曲边缘, 可以观察到更细的齿状脊柱立体结构

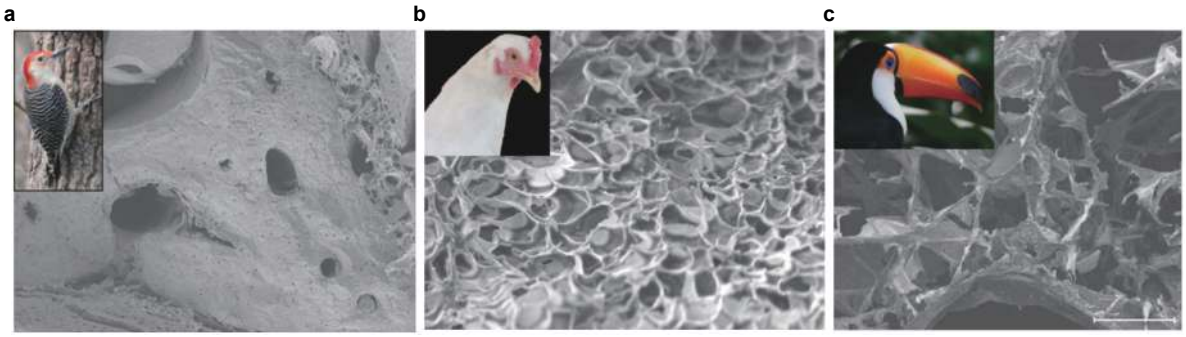


图 27

三种鸟类的波纹状骨缝结构 (Lee et al. 2014). (a) 啄木鸟, (b) 白羽鸡, (c) 犀鸟

5 结论与展望

本文简要介绍了自然界各类动物的抗冲击策略与身体防护机制, 以及相关仿生设计与应用的最新研究进展. 并以不同载荷环境类型为基础, 总结了这些天然生物结构进化的独特特征与优

异的抗冲击力学特性. 为研究人员和工程师提供了动物抗冲击策略及其仿生机理研究的有效数据资料, 为可重复使用能量吸收装置及其飞行器结构的抗冲击与防护设计提供了有益借鉴和仿生依据.

动物的抗冲击策略与身体防护在近年来得到生物、机械、力学、材料等多个学科的关注与研究, 体现出很强的学科交叉特点. 经过简化归纳不难发现, 这些研究主要涉及两个方面的内容: 动物的抗冲击生物力学行为及其仿生机理. 前者旨在运用自然科学的方法, 探索动物在恶劣环境中所展现出的优异生物力学特性的成因和所进化出的高效抗冲击力学机制, 从本质上揭示自然界中动物的各类抗冲击策略. 后者以前者为基础和启发, 进一步研究生物抗冲击力学机制的仿生设计与应用. 特别是与我国重大战略需求紧密结合, 可以推进对新概念能量吸收装置的开发以及工程结构和人体防护系统的设计与制造. 因此, 如何从结构与材料层面更精确地观测与揭示动物的抗冲击策略, 以及综合考虑影响抗冲击仿生材料与结构的各项工程实际因素和性能需求, 进行多学科为一体的协同优化设计仍然是抗冲击仿生力学领域内相关学者需要进一步深入研究的问题.

致 谢　国家自然科学基金 (11032001) 资助项目.

参 考 文 献

柴辉, 李建华, 葛文杰. 2009. 基于可调齿轮-五杆机构的仿袋鼠跳跃机器人运动步态分析. 机器人, **31**: 487-492 (Chai H, Li J H, Ge W J. 2009. Gait analysis on bionic kangaroo-hopping robot based on adjustable geared five-linkage mechanism. *Robot*, **31**: 487-492).

刘延柱. 1982. 自由下落猫的转体运动. 力学学报, **4**: 388-393 (Liu Y Z. 1982. On the turning motion of a free-falling cat. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **4**: 388-393).

王国彪, 陈殿生, 陈科位, 张自强. 2015. 仿生机器人研究现状与发展趋势. 机械工程学报, **51**: 27-44 (Wang G B, Chen D S, Chen K W, Zhang Z Q. 2015. The current research status and development strategy on biomimetic robot. *Journal of Mechanical Engineering*, **51**: 27-44).

于晖. 2016. 基于仿生原理的新型缓冲与能量吸收装置的研究. 北京: 北京航空航天大学.

张铭, 葛文杰, 柏龙, 陈晓红. 2009. 星面探测仿生弹跳机器人设计、仿真及实验. 机器人, **31**: 481-486 (Zhang M, Ge W J, Bai L, Chen X H. 2009. Design, simulation and experiment of a bionic hopper for planet exploration. *Robot*, **31**: 481-486).

张晓鹏, 杨嘉陵, 于晖. 2012. 猫科动物脚掌肉垫缓冲力学特性分析. 生物医学工程学杂志, **29**: 1098-1104 (Zhang X P, Yang J L, Yu H. 2012. Mechanical buffering characteristics of feline paw pads. *Journal of Biomedical Engineering*, **29**: 1098-1104).

郑秀瑗. 2002. 现代运动生物力学. 北京: 国防工业出版社 (Zheng X Y. 2002. Modern Sports Biomechanics. Beijing: National Defense Industry Press).

钟奉俄. 1985. 关于自由下落猫的双刚体模型. 力学学报, **17**: 72-77 (Zhong F E. 1985. A two-rigid-body model of the free-falling cat. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **17**: 72-77).

Achrai B, Bar-On B, Wagner H D. 2014. Bending mechanics of the red-eared slider turtle carapace. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **30**: 223-233.

Achrai B, Bar-On B, Wagner H D. 2015. Biological armors under impact-effect of keratin coating, and synthetic bio-inspired analogues. *Bioinspiration & Biomimetics*, **10**: 016009.

Achrai B, Wagner H D. 2013. Micro-structure and mechanical properties of the turtle carapace as a biological composite

shield. *Acta Biomaterialia*, **9**: 5890-5902.

Achrai B, Wagner H D. 2015. The red-eared slider turtle carapace under fatigue loading: The effect of rib-suture arrangement. *Materials Science and Engineering: C*, **53**: 128-133.

Alam M S. 2005. Damage tolerance in naturally compliant structures. *International Journal of Damage Mechanics*, **14**: 365-384.

Alam M S, Wahab M A, Jenkins C H. 2007. Mechanics in naturally compliant structures. *Mechanics of Materials*, **39**: 145-160.

Alexander R M. 1976. Estimates of speeds of dinosaurs. *Nature*, **261**: 129-130.

Alexander R M. 1988. Elastic Mechanisms in Animal Movement. Cambridge: Cambridge University Press.

Alexander R M. 2003. Principles of Animal Locomotion. Princeton: Princeton University Press.

Alexander R M, Bennett M B, Ker R F. 1986. Mechanical properties and function of the paw pads of some mammals. *Journal of Zoology*, **209**: 405-419.

Alexander R M, Jayes A S. 1983. A dynamic similarity hypothesis for the gaits of quadrupedal mammals. *Journal of Zoology*, **201**: 135-152.

Alexander R M, Vernon A. 1971. The mechanics of hopping by kangaroos (Macropodidae). *Proceedings of the Zoological Society of London*, **177**: 265-303.

Andersen S O. 1979. Biochemistry of Insect Cuticle. *Annual Review of Entomology*, **24**: 29-59.

Appel E, Heepe L, Lin C P, Gorb S N. 2015. Ultrastructure of dragonfly wing veins: Composite structure of fibrous material supplemented by resilin. *Journal of Anatomy*, **227**: 561-582.

Bai L, Ge W, Chen X, Tang Q, Xiang R. 2015. Landing impact analysis of a bioinspired intermittent hopping robot with consideration of friction. *Mathematical Problems in Engineering*, **2**: 1-12.

Balani K, Patel R R, Keshri A K, Lahiri D, Agarwal A. 2011. Multi-scale hierarchy of chelydra serpentina: microstructure and mechanical properties of turtle shell. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **4**: 1440-1451.

Barbakadze N, Enders S, Gorb S, Arzt E. 2006. Local mechanical properties of the head articulation cuticle in the beetle Pachnoda marginata (Coleoptera, Scarabaeidae). *Journal of Experimental Biology*, **209**: 722-730.

Beer F P, Johnston E R, Dewolf J T, Mazurek D F. 2012. Mechanics of Materials. McGraw-Hill.

Bennet-Clark H C. 1975. The energetics of the jump of the locust Schistocerca gregaria. *Journal of Experimental Biology*, **63**: 53-83.

Bertram J E A, Gosline J M. 1986. Fracture-toughness design in horse hoof keratin. *Journal of Experimental Biology*, **125**: 29-47.

Burrows M. 2003. Froghopper insects leap to new heights. *Nature*, **424**: 509.

Burrows M. 2006a. Jumping performance of froghopper insects. *Journal of Experimental Biology*, **209**: 4607-4621.

Burrows M. 2006b. Morphology and action of the hind leg joints controlling jumping in froghopper insects. *Journal of Experimental Biology*, **209**: 4622-4637.

Burrows M. 2007. Kinematics of jumping in leafhopper insects (Hemiptera, Auchenorrhyncha, Cicadellidae). *Journal of Experimental Biology*, **210**: 3579-3589.

Burrows M. 2009. Jumping performance of planthoppers (Hemiptera, Issidae). *Journal of Experimental Biology*, **212**: 2844-2855.

Burrows M. 2013a. Jumping mechanisms in gum treehopper insects (Hemiptera, Eurymelinae). *Journal of Experimental Biology*, **216**: 2682-2690.

Burrows M. 2013b. Jumping mechanisms of treehopper insects (Hemiptera, Auchenorrhyncha, Membracidae). *Journal of Experimental Biology*, **216**: 788-799.

Burrows M. 2014. Jumping mechanisms in dictyopharid planthoppers (Hemiptera, Dicytyopharidae). *Journal of*

Experimental Biology, **217**: 402-413.

Burrows M, Cullen D A, Dorosenko M, Sutton G P. 2015. Mantises exchange angular momentum between three rotating body parts to jump precisely to targets. *Current Biology*, **25**: 786-789.

Burrows M, Dorosenko M. 2014. Jumping mechanisms in lacewings (Neuroptera, Chrysopidae and Hemerobiidae). *Journal of Experimental Biology*, **217**: 4252-4261.

Burrows M, Dorosenko M. 2015a. Jumping mechanisms and strategies in moths (Lepidoptera). *Journal of Experimental Biology*, **218**: 1655-1666.

Burrows M, Dorosenko M. 2015b. Jumping mechanisms in adult caddis flies (Insecta, Trichoptera). *Journal of Experimental Biology*, **218**: 2764-2774.

Burrows M, Dorosenko M. 2017. Jumping performance of flea hoppers and other mirid bugs (Hemiptera, Miridae). *Journal of Experimental Biology*, **220**: 1606-1617.

Burrows M, Morris O. 2002. Jumping in a winged stick insect. *Journal of Experimental Biology*, **205**: 2399-2412.

Burrows M, Morris O. 2003. Jumping and kicking in bush crickets. *Journal of Experimental Biology*, **206**: 1035-1049.

Burrows M, Picker M D. 2010. Jumping mechanisms and performance of pygmy mole crickets (Orthoptera, Tridactylidae). *Journal of Experimental Biology*, **213**: 2386-2398.

Burrows M, Sutton G P. 2012. Locusts use a composite of resilin and hard cuticle as an energy store for jumping and kicking. *Journal of Experimental Biology*, **215**: 3501-3512.

Chao W, Hao Z, Feng X. 2016. Structures, properties, and energy-storage mechanisms of the semi-lunar process cuticles in locusts. *Scientific Reports*, **6**: 35219.

Chen C C, Li D G, Yano H, Abe K. 2019. Insect cuticle-mimetic hydrogels with high mechanical properties achieved via the combination of chitin nanofiber and gelatin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **67**: 5571-5578.

Chen D, Chen K, Zhang Z, Zhang B. 2015. Mechanism of locust air posture adjustment. *Journal of Bionic Engineering*, **12**: 418-431.

Chen Y K, Liao C P, Tsai F Y, Chi K J. 2013. More than a safety line: Jump-stabilizing silk of salticids. *Journal of the Royal Society Interface*, **10**: 20130572.

Chintapalli R K, Mirkhalaf M, Dastjerdi A K, Barthelat F. 2014. Fabrication, testing and modeling of a new flexible armor inspired from natural fsh scales and osteoderms. *Bioinspiration & Biomimetics*, **9**: 036005.

Cofer D, Cymbalyuk G, Heitler W J, Edwards D H. 2010. Control of tumbling during the locust jump. *Journal of Experimental Biology*, **213**: 3378-3387.

Combes S A, Daniel T L. 2003. Flexural stiffness in insect wings. I. Scaling and the influence of wing venation. *Journal of Experimental Biology*, **206**: 2979-2987.

Craig C L. 2010. The ecological and evolutionary interdependence between web architecture and web silk spun by orb web weaving spiders. *Biological Journal of the Linnean Society*, **30**: 135-162.

Crevier N, Robin D, Pourcelot P, Falala S, Holden L, Estoup P, Desquilbet L, Denoix J, Chateau H. 2010. Ground reaction force and kinematic analysis of limb loading on two different beach sand tracks in harness trotters. *Equine Veterinary Journal*, **42**: 544-551.

Damiens R, Rhee H, Hwang Y, Park S J, Hammi Y, Lim H, Horstemeyer M F. 2012. Compressive behavior of a turtle's shell: experiment, modeling, and simulation. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **6**: 106-112.

Dawson T J, Taylor C R. 1973. Energetic cost of locomotion. *Nature*, **246**: 313-314.

Denny M. 1976. The physical properties of spider's silk and their role in design of orb webs. *Journal of Experimental Biology*, **65**: 483-506.

DeVita P, Skelly W A. 1992. Effect of landing stiffness on joint kinetics and energetics in the lower extremity. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, **24**: 108-115.

Diamond J M. 1988. Why cats have nine lives. *Nature*, **332**: 586-587.

Diamond J M. 1989. How cats survive falls from new york skyscrapers. *Natural History*, **98**: 20-26.

Dirks J H, Durr V. 2011. Biomechanics of the stick insect antenna: Damping properties and structural correlates of the cuticle. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **4**: 2031-2042.

Douglas J, Mittal C, Thomason J, Jofriet J. 1996. The modulus of elasticity of equine hoof wall: Implications for the mechanical function of the hoof. *Journal of Experimental Biology*, **199**: 1829-1836.

Drake A, Donahue T L H, Stansloski M, Fox K, Wheatley B B, Donahue S W. 2016. Horn and horn core trabecular bone of bighorn sheep rams absorbs impact energy and reduces brain cavity accelerations during high impact ramming of the skull. *Acta Biomaterialia*, **44**: 41-50.

Dunlop J W C, Weinkamer R, Fratzl P. 2011. Artful interfaces within biological materials. *Materials Today*, **14**: 70-78.

Dutta A, Tekalur S A, Miklavcic M. 2013. Optimal overlap length in staggered architecture composites under dynamic loading conditions. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **61**: 145-160.

Dutta A, Vanderklok A, Tekalur S A. 2012. High strain rate mechanical behavior of seashell-mimetic composites: Analytical model formulation and validation. *Mechanics of Materials*, **55**: 102-111.

Fenn W O. 1930. Frictional and kinetic factors in the work of sprint running. *American Journal of Physiology*, **93**: 433-462.

Fernandes M C, Aizenberg J, Weaver J C, Bertoldi K. 2020. Mechanically robust lattices inspired by deep-sea glass sponges. *Nature Materials*, **267**: 2687.

Fernandez J G, Ingber D E. 2012. Unexpected strength and toughness in chitosan-fibroin laminates inspired by insect cuticle. *Advanced materials*, **24**: 480-484.

Feughelman M. 1994. A model for the mechanical properties of the α-keratin cortex. *Textile Research Journal*, **64**: 236-239.

Fish J F, Stayton C T. 2014. Morphological and mechanical changes in juvenile red-eared slider turtle (Trachemys scripta elegans) shells during ontogeny. *Journal of Morphology*, **275**: 391-397.

Fraser R, MacRae T, Miller A. 1964. The coiled-coil model of a-keratin structure. *Journal of Molecular Biology*, **10**: 147-156.

Fraser R, MacRae T, Suzuki E. 1976. Structure of the a-keratin microfibril. *Journal of Molecular Biology*, **108**: 435-452.

Fudge D S, Gardner K H, Forsyth V T, Riekel C, Gosline J M. 2003. The mechanical properties of hydrated intermediate filaments: insights from hagfish slime threads. *Biophysical Journal*, **85**: 2015-2027.

Fudge D S, Gosline J M. 2004. Molecular design of the a-keratin composite: Insights from a matrix-free model, hagfish slime threads. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Science*, **271**: 291-299.

Geist V. 1966a. The evolution of horn-like organs. *Behaviour*, **27**: 175-214.

Geist V. 1966b. The evolutionary significance of mountain sheep horns. *Evolution; International Journal of Organic Evolution*, **20**: 558-566.

Ghara M, Kundanati L, Borges R M. 2011. Nature's Swiss Army Knives: Ovipositor structure mirrors ecology in a multitrophic fig wasp community. *PloS One*, **6**: e23642.

Ghosh R, Ebrahimi H, Vaziri A. 2014. Contact kinematics of biomimetic scales. *Applied Physics Letters*, **105**: 233701.

Gibson L J. 2006. Woodpecker pecking: How woodpeckers avoid brain injury. *Journal of Zoology*, **270**: 462-465.

Gosline J M, Guerette P A, Ortlepp C S, Savage K N. 1999. The mechanical design of spider silks: From fibroin sequence to mechanical function. *Journal of Experimental Biology*, **202**: 3295-3303.

Gosline J M, Lillie M, Carrington E, Guerette P, Ortlepp C, Savage K N. 2002. Elastic proteins: Biological roles and mechanical properties. Philosophical transactions-Royal Society. *Biological Sciences*, **357**: 121-132.

Guarin-Zapata N, Gomez J, Yaraghi N, Kisailus D, Zavattieri P D. 2015. Shear wave filtering in naturally-occurring bouligand structures. *Acta Biomaterialia*, **23**: 11-20.

Guo Y, Chang Z, Li B, Zhao Z L, Zhao H P, Feng X Q, Gao H J. 2018. Functional gradient effects on the energy absorption of spider orb webs. *Applied Physics Letters*, **113**: 103701.

Gurdjian E S. 1975. Re-evaluation of the biomechanics of blunt impact injury of the head. *Surgery, Gynecology & Obstetrics*, **140**: 845-850.

Guyou M. 1894. Note relative a la Communication de M. Marey (in French). *Comptes rendus hebdomadaires des seances del academie des sciences*, **119**: 717-718.

Ha N S, Lu G. 2020. A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications. *Composites Part B: Engineering*, **181**: 107496.

Hadley N F. 1986. The arthropod cuticle. *Scientific American*, **86**: 104-112.

Hopkins T L, Kramer K J. 1992. Insect cuticle sclerotization. *Annual Review of Entomology*, **37**: 273-302.

Huang W, Yaraghi N A, Yang W, Velazquez-Olivera A, Li Z Z, Ritchie R O, Kisailus D, Stover S M, McKittrick J. 2019. A natural energy absorbent polymer composite: The equine hoof wall. *Acta Biomaterialia*, **90**: 267-277.

Huang W, Zaheri A, Jung J Y, Espinosa H D, Mckittrick J. 2017. Hierarchical structure and compressive deformation mechanisms of bighorn sheep (Ovis canadensis) horn. *Acta Biomaterialia*, **64**: 1-14.

Huang Z W, Li H Z, Pan Z L, Wei Q M, Chao Y J, Li X D. 2011. Uncovering high-strain rate protection mechanism in nacre. *Scientific Reports*, **1**: 00148.

Huang Z W, Pan Z L, Li H Z, Wei Q M, Li X D. 2014. Hidden energy dissipation mechanism in nacre. *Journal of Materials Research*, **29**: 1573-1578.

James C R, Bates B T, Dufek J S. 2003. Classification and comparison of biomechanical response strategies for accommodating landing impact. *Journal of Applied Biomechanics*, **19**: 106-118.

Ji B, Gao H. 2004. Mechanical properties of nanostructure of biological materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **52**: 1963-1990.

Johnson K, Trim M, Francis D, Whittington W, Miller J, Bennett C, Horstemeyer M. 2017. Moisture, anisotropy, stress state, and strain rate effects on bighorn sheep horn keratin mechanical properties. *Acta Biomaterialia*, **48**: 300-308.

Kane T R, Scher M P. 1969. A dynamical explanation of the falling cat phenomenon. *International Journal of Solids and Structures*, **5**: 663-666.

Kasapi M A, Gosline J M. 1997. Design complexity and fracture control in the equine hoof wall. *Journal of Experimental Biology*, **200**: 1639-1659.

Kasapi M A, Gosline J M. 1999. Micromechanics of the equine hoof wall: optimizing crack control and material stiffness through modulation of the properties of keratin. *Journal of Experimental Biology*, **202**: 377-391.

Kaya M, Leonard T R, Herzog W. 2006. Control of ground reaction forces by hindlimb muscles during cat locomotion. *Journal of Biomechanics*, **39**: 2752-2766.

Kitchener A. 1985. The effect of behavior and body-weight on the mechanical design of horns. *Journal of Zoology*, **205**: 191-203.

Kitchener A. 1987. Fracture toughness of horns and a reinterpretation of the horning behaviour of bovids. *Journal of Zoology*, **213**: 621-639.

Kitchener A. 1988. An analysis of the forces of fighting of the blackbuck (Antilope cervicapra) and the bighorn sheep (Ovis canadensis) and the mechanical design of the horn of bovids. *Journal of Zoology*, **214**: 1-20.

Kitchener A, Vincent J F V. 1987. Composite theory and the effect of water on the stiffness of horn keratin. *Journal of Materials Science*, **22**: 1385-1389.

Knipprath C, Bond I P, Trask R S. 2011. Biologically inspired crack delocalization in a high strain-rate environment. *Journal of the Royal Society Interface*, **9**: rsif20110442.

Kram R, Dawson T J. 1998. Energetics and biomechanics of locomotion by red kangaroos (Macropus rufus). *Comparative Biochemistry and Physiology Part B*, **120**: 41-49.

Krauss S, Monsonego-O Pnan E, Zelzer E, Fratzl P, Shahar R. 2009. Mechanical function of a complex three-dimensional suture joining the bony elements in the shell of the red-eared slider turtle. *Advanced Materials*, **21**: 407-412.

Lacquaniti F, Taillanter M L, Lopiano L, Maioli C. 1990. The control of limb geometry in cat posture. *Journal of Physiology*, **426**: 177-192.

Lanovaz J, Clayton H, Watson L. 1998. In vitro attenuation of impact shock in equine digits. *Equine Veterinary Journal*, **30**: 96-102.

Lee H T, Kim H J, Kim C S, Gomi K, Taya M, Nomura S, Ahn S H. 2017. Site-specific characterization of beetle horn shell with micromechanical bending test in focused ion beam system. *Acta Biomaterialia*, **57**: 395-403.

Lee N, Horstemeyer M F, Rhee H, Nabors B, Liao J, Williams L N. 2014. Hierarchical multiscale structure-property relationships of the red-bellied woodpecker (Melanerpes carolinus) beak. *Journal of The Royal Society Interface*, **11**: 20140274.

Li D, Wang Q, Xu C, Cheng Y, Zhang Y, Ji B. 2020. How does nature evade the "Larger is Weaker" fate of ultralong silk β-sheet nanocrystallites. *Nano Letters*, **20**: 8516-8523.

Li Y, Ortiz C, Boyce M C. 2012. Bioinspired, mechanical, deterministic fractal model for hierarchical suture joints. *Physical Review E*, **85**: 031901.

Li Y, Ortiz C, Boyce M C. 2013. A generalized mechanical model for suture interfaces of arbitrary geometry. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **61**: 1144-1167.

Lin L H, Vollrath F, Edmonds D T. 1995. Structural engineering of an orb-spider's web. *Nature*, **373**: 146-148.

Liu G H, Lin H Y, Lin H Y, Chen S T, Lin P C. 2014. A Bio-Inspired Hopping Kangaroo Robot with an Active Tail. *Journal of Bionic Engineering*, **11**: 541-555.

Liu P, Zhu D, Yao Y, Wang J, Bui T Q. 2016. Numerical simulation of ballistic impact behavior of bio-inspired scale-like protection system. *Materials & Design*, **99**: 201-210.

Liu Y Z, Qiu X M, Ma H L, Fu W W, Yu T X. 2017. A study of woodpecker's pecking process and the impact response of its brain. *International Journal of Impact Engineering*, **108**: 263-271.

Magwene P M, Socha J J. 2013. Biomechanics of turtle shells: How whole shells fail in compression. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology*, **319**: 86-98.

Marey M. 1894. Des mouvements que certains animaux executent pour retomber sur leurs pieds, lorsqu'ils sont precipites dun lieu leve. *Comptes rendus hebdomadaires des seances del academie des sciences*, **119**: 714-717.

Martini R, Barthelat F. 2016. Stretch-and-release fabrication, testing and optimization of a flexible ceramic armor inspired from fish scales. *Bioinspiration & Biomimetics*, **11**: 066001.

Martins A F, Bennett N C, Clavel S, Groenewald H, Hensman S, Hoby S, Joris A, Manger P R, Milinkovitch M C. 2018. Locally-curved geometry generates bending cracks in the African elephant skin. *Nature communications*, **9**: 3865.

May P R A, Newman P, Fuster J M, Hirschman A. 1976. Woodpeckers and head injury. *The Lancet*, **307**: 454-455.

Mccullough E L. 2014. Mechanical limits to maximum weapon size in a giant rhinoceros beetle. *Proceedings Biological Sciences*, **281**: 70-84.

Mckinley P A, Smith J L, Gregor R J. 1983. Responses of elbow extensors to landing forces during jump downs in cats. *Experimental Brain Research*, **49**: 218-228.

McKittrick J, Chen P Y, Bodde S G, Yang W, Novitskaya E E, Meyers M A. 2012. The structure, functions, and mechanical properties of keratin. *JOM*, **64**: 449-468.

McNitt-Gray J L. 1993. Kinetics of the lower extremities during drop landings from three heights. *Journal of Biomechanics*, **26**: 1037-1046.

Meyers M A, Chen P Y, Lin A Y M, Seki Y. 2008. Biological materials: structure and mechanical properties. *Progress in Materials Science*, **53**: 1-206.

Michels J, Gorb S N. 2011. Detailed three-dimensional visualization of resilin in the exoskeleton of arthropods using confocal laser scanning microscopy. *Journal of Microscopy*, **245**: 1-16.

Milgram M, Bibring M, Aroch I. 2013. Epidemiological, clinical and hematological findings in feline high rise syndrome in

israel: A retrospective case-controlled study of 107 cats. *Israel Journal of Veterinary Medicine*, **68**: 28-37.

Miranda P, Pajares A, Meyers M A. 2019. Bioinspired composite segmented armour: Numerical simulations. *Journal of Materials Research and Technology*, **8**: 1274-1287.

Mirkhalaf M, Dastjerdi A K, Barthelat F. 2014. Overcoming the brittleness of glass through bio-inspiration and micro-architecture. *Nature Communications*, **5**: 3166.

Mirkhalaf M, Zhou T, Barthelat F. 2018. Simultaneous improvements of strength and toughness in topologically interlocked ceramics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **115**: 9128-9133.

Mohanty B, Katti K S, Katti D R. 2006. Dynamic nanomechanical response of nacre. *Journal of Materials Research*, **21**: 2045-2051.

Morgan D L, Proske U, Warren D. 1978. Measurements of muscle stiffness and the mechanism of elastic storage of energy in hopping kangaroos. *The Journal of Physiology*, **282**: 253-261.

Nadein K, Betz O. 2016. Jumping mechanisms and performance in beetles. I. Flea beetles (Coleoptera: Chrysomelidae: Alticini). *Journal of Experimental Biology*, **219**: 2015-2027.

Neville A C. 1975. Biology of the Arthropod Cuticle. Berlin: Springer Press.

Nukala P K V V, Simunovic S. 2005. Statistical physics models for nacre fracture simulation. *Physical Review E*, **72**: 041919.

Parbhu A N, Bryson W G, Lal R. 1999. Disulfide bonds in the outer layer of keratin fibers confer higher mechanical rigidity: correlative nano-indentation and elasticity measurement with an AFM. *Biochemistry*, **38**: 11755-11761.

Parle E, Herbaj S, Sheils F, Larmon H, Taylor D. 2016a. Buckling failures in insect exoskeletons. *Bioinspiration & Biomimetics*, **11**: 016003.

Parle E, Larmon H, Taylor D. 2016b. Biomechanical factors in the adaptations of insect tibia cuticle. *PloS One*, **11**: e0159262.

Parsons K, Spence A, Morgan R, Thompson J, Wilson A. 2011. High speed field kinematics of foot contact in elite galloping horses in training. *Equine Veterinary Journal*, **43**: 216-222.

Patek S N, Korff W L, Caldwell R L. 2004. Biomechanics: Deadly strike mechanism of a mantis shrimp. *Nature*, **428**: 819.

Peisker H, Michels J, Gorb S N. 2013. Evidence for a material gradient in the adhesive tarsal setae of the ladybird beetle Coccinella septempunctata. *Nature Communications*, **4**: 1661.

Pollitt C C. 2004. Anatomy and physiology of the inner hoof wall. *Clinical Techniques in Equine Practice*, **3**: 3-21.

Porter M M, Ravikumar N, Barthelat F, Martini R. 2017. 3D-printing and mechanics of bio-inspired articulated and multi-material structures. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **73**: 114-126.

Prilutsky B I, Herzog W, Leonard T R. 1996. Role of the muscle belly and tendon of soleus, gastrocnemius, and plantaris in mechanical energy absorption and generation during cat locomotion. *Journal of Biomechanics*, **29**: 417-434.

Prochazka A, Schofield P, Westerman R A, Ziccone S P. 1977. Reflexes in cat ankle muscles after landing from falls. *The Joumal of Physiology*, **272**: 705-719.

Quan H C, Yang W, Schaible E, Ritchie R O, Meyers M A. 2018. Novel defense mechanisms in the armor of the scales of the "living fossil" coelacanth fish. *Advanced Functional Materials*, **28**: 1804237.

Rabiei R, Bekah S, Barthelat F. 2010. Failure mode transition in nacre and bone-like materials. *Acta Biomaterialia*, **6**: 4081-4089.

Rajabi H, Darvizeh A, Shafiei A, Taylor D, Dirks J H. 2015. Numerical investigation of insect wing fracture behaviour. *Journal of Biomechanics*, **48**: 89-94.

Rajabi H, Jafarpour M, Darvizeh A, Dirks J H, Gorb S N. 2017. Stiffness distribution in insect cuticle: A continuous or a discontinuous profile?. *Journal of the Royal Society Interface*, **14**: 20170310.

Rajabi H, Shafiei A, Darvizeh A, Babaei H. 2016. Experimental and numerical investigations of crack propagation in dragonfly wing veins. *AmirKabir Jounrnal of Science & Research Mechanical Engineering*, **48**: 61-64.

Rajabi H, Shafiei A, Darvizeh A, Gorb S N, Durr V, Dirks J H. 2018. Both stiff and compliant: Morphological and biomechanical adaptations of stick insect antennae for tactile exploration. *Journal of the Royal Society Interface*, **15**: 20180246.

Rudykh S, Ortiz C, Boyce M C. 2015. Flexibility and protection by design: Imbricated hybrid microstructures of bio-inspired armor. *Soft Matter*, **11**: 2547-2554.

Schmitt M, Buscher T H, Gorb S N, Rajabi H. 2018. How does a slender tibia resist buckling? The effect of material, structural and geometric characteristics on the buckling behaviour of the hindleg tibia in the postembryonic development of the stick insect Carausius morosus. *Journal of Experimental Biology*, **221**: jeb173047.

Seki Y, Kad B, Benson D, Meyers M A. 2006. The toucan beak: Structure and mechanical response. *Materials Science and Engineering: C*, **26**: 1412-1420.

Seki Y, Schneider M S, Meyers M A. 2005. Structure and mechanical behavior of a toucan beak. *Acta Materialia*, **53**: 5281-5296.

Sensenig A T, Lorentz K A, Kelly S P, Blackledge T A. 2012. Spider orb webs rely on radial threads to absorb prey kinetic energy. *Journal of the Royal Society Interface*, **9**: 1880-1891.

Setterbo J J, Garcia T C, Campbell I P, Reese J L, Morgan J M, Kim S Y, Hubbard M, Stover S M. 2009. Hoof accelerations and ground reaction forces of thoroughbred racehorses measured on dirt, synthetic, and turf track surfaces. *American Journal of Veterinary Research*, **70**: 1220-1229.

Seyfarth A, Geyer H G M, Blickhan R. 2002. A movement criterion for running. *Journal of Biomechanics*, **35**: 649-655.

Shao Y, Zhao H P, Feng X Q. 2014. On flaw tolerance of nacre: A theoretical study. *Journal of The Royal Society Interface*, **11**: 20131016.

Shigley M B. 2015. Shigley's Mechanical Engineering Design. New York: McGraw-Hill.

Signetti S, Pugno N M. 2014. Evidence of optimal interfaces in bio-inspired ceramiccomposite panels for superior ballistic protection. *Journal of the European Ceramic Society*, **34**: 2823-2831.

Siwanowicz I, Burrows M. 2017. Three dimensional reconstruction of energy stores for jumping in planthoppers and froghoppers from confocal laser scanning microscopy. *eLife*, **6**: e23824.

Soons J, Herrel A, Genbrugge A, Adriaens D, Aerts P, Dirckx J. 2012. Multi-layered bird beaks: A finite-element approach towards the role of keratin in stress dissipation. *Journal of the Royal Society Interface*, **9**: 1787-1796.

Spearman R I C. 1970. The Epidermis and its Keratinisation in the African Elephant (Loxodonta Africana). *Zoologica Africana*, **5**: 327-338.

Sullivan T N, Chon M, Ramachandramoorthy R, Roenbeck M R, Hung T T, Espinosa H D, Meyers M A. 2017a. Reversible attachment with tailored permeability: The feather vane and bioinspired designs. *Advanced Functional Materials*, **27**: 1702954.

Sullivan T N, Hung T T, Velasco A, Meyers M A. 2019a. Bioinspired avian feather designs. *Materials Science and Engineering: C*, **105**: 110066.

Sullivan T N, Meyers M A, Arzt E. 2019b. Scaling of bird wings and feathers for efficient flight. *Science Advances*, **5**: eaat4269.

Sullivan T N, Pissarenko A, Herrera S A, Kisailus D, Lubarda V A, Meyers M A. 2016. A lightweight, biological structure with tailored stiffness: The feather vane. *Acta Biomaterialia*, **41**: 27-39.

Sullivan T N, Wang B, Espinosa H D, Meyers M A. 2017b. Extreme lightweight structures: Avian feathers and bones. *Materials Today*, **20**: 377-391.

Sullivan T N, Zhang Y L, Zavattieri P D, Meyers M A. 2018. Hydration-induced shape and strength recovery of the feather. *Advanced Functional Materials*, **28**: 1801250.

Sutton G P, Burrows M. 2011. Biomechanics of jumping in the flea. *Journal of Experimental Biology*, **214**: 836-847.

Sutton G P, Doroshenko M, Cullen D A, Burrows M. 2016. Take-off speed in jumping mantises depends on body size and a

power limited mechanism. *Journal of Experimental Biology*, **219**: 2127-2136.

Taylor C R. 1978. Why change gaits? recruitment of muscles and muscle fibers as a function of speed and gait. *American Zoologist*, **18**: 153-161.

Timoshenko S P. 1961. Theory of Elastic Stability. New York: McGraw-Hill.

Tombolato L, Novitskaya E E, Chen P Y, Sheppard F A, McKittrick J. 2010. Microstructure, elastic properties and deformation mechanisms of horn keratin. *Acta Biomaterialia*, **6**: 319-330.

Trim M W, Horstemeyer M F, Rhee H, Kadiri H E, Williams L N, Liao J, Walters K B, McKittrick J, Park S J. 2011. The effects of water and microstructure on the mechanical properties of bighorn sheep (Ovis canadensis) horn keratin. *Acta Biomaterialia*, **7**: 1228-1240.

Vernerey F J, Barthelat F. 2014. Skin and scales of teleost fish: Simple structure but high performance and multiple functions. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **68**: 66-76.

Vincent J F V, Wegst U G K. 2004. Design and mechanical properties of insect cuticle. *Arthropod Structure & Development*, **33**: 187-199.

Vnuk D, Pirkic B, Maticic D, Radisic B, Stejskal M, Babic T, Kreszinger M, Lemo N. 2004. Feline high-rise syndrome: 119 cases (1998-2001). *Journal of Feline Medicine & Surgery*, **6**: 305-312.

Vollrath F, Porter D. 2009. Silks as ancient models for modern polymers. *Polymer*, **50**: 5623-5632.

Wang B, Meyers M A. 2017. Light like a feather: A fibrous natural composite with a shape changing from round to square. *Advanced Science*, **4**: 1600360.

Wang L, Cheung T M, Pu F, Li D, Zhang M, Fan Y. 2011. Why do woodpeckers resist head impact injury: A biomechanical investigation. *PloS One*, **6**: e26490.

Wang L Y, Jafarpour M, Lin C P, Appel E, Gorb S N, Rajabi H. 2019. Endocuticle sclerotisation increases the mechanical stability of cuticle. *Soft Matter*, **15**: 8272-8278.

Wang L Y, Rajabi H, Ghoroubi N, Lin C P, Gorb S N. 2018. Biomechanical strategies underlying the robust body armour of an aposematic weevil. *Frontiers in Physiology*, **9**: 1410.

Wang R Z, Suo Z, Evans A G. 2001. Deformation mechanisms in nacre. *Journal of Materials Research*, **16**: 2485-2493.

Watt D G. 1976. Responses of cats to sudden falls: an otolith-originating reflex assisting landing. *Journal of Neurophysiology*, **39**: 257-265.

Weaver J C, Milliron G W, Miserez A, Evans-Lutterodt K, Herrera S, Gallana I, William M, Brook S, Pablo Z, Elaine D, David K. 2012. The stomatopod dactyl club: A formidable damage-tolerant biological hammer. *Science*, **336**: 6086.

Whitney W O, Mehlhaff C J. 1987. High-rise syndrome in cats. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, **191**: 1399-1403.

Windsor D E, Dagg A I. 1971. The gaits of the Macropodinae (Marsupialia). *Journal of Zoology*, **163**: 165-175.

Xing Y, Yang J L. 2019. A compromise reveals buckling resistance strategy of a naturally slender tibia. *Advanced Theory and Simulations*, **2**: 1900051.

Xing Y, Yang J L. 2020a. Experimental investigations on the strategies of fighting crickets Velarifictorus micado to manipulate air resistance. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, **63**: 264611.

Xing Y, Yang J L. 2020b. Stiffness distribution in natural insect cuticle reveals an impact resistance strategy. *Journal of Biomechanics*, **109**: 109952.

Yang T, Jia Z, Chen H S, Deng Z F, Liu W K, Chen L N, Li L. 2020. Mechanical design of the highly porous cuttlebone: A bioceramic hard buoyancy tank for cuttlefish. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **117**: 23450-23459.

Yang W, Chen I H, Gludovatz B, Zimmermann E A, Ritchie R O, Meyers M A. 2012. Natural flexible dermal armor. *Advanced Materials*, **25**: 31-38.

Yang X F, Ma J G, Shi Y, Sun Y X, Yang J L. 2017. Crashworthiness investigation of the bio-inspired bi-directionally corrugated core sandwich panel under quasi-static crushing load. *Materials & Design*, **135**: 275-290.

Yang X F, Ma J G, Sun Y X, Yang J L. 2018a. Ripplecomb: A novel triangular tube reinforced corrugated honeycomb for energy absorption. *Composite Structures*, **202**: 988-999.

Yang X F, Sun Y X, Yang J L, Pan Q. 2018b. Out-of-plane crashworthiness analysis of bio-inspired aluminum honeycomb patterned with horseshoe mesostructure. *Thin-Walled Structures*, **125**: 1-11.

Yaraghi N A, Guarin-Zapata N, Grunenfelder L K, Hintsala E, Bhowmick S, Hiller J M, Betts M, Principe E L, Jung J Y, Sheppard L, Wuhrer R, McKittrick J, Zavattieri P D, Kisailus D. 2016. A sinusoidally-architected helicoidal biocomposite. *Advanced Materials*, **28**: 6835-6844.

Yin Z, Dastjerdi A K, Barthelat F. 2018. Tough and deformable glasses with bioinspired cross-ply architectures. *Acta Biomaterialia*, **75**: 439-450.

Yu H, Yang J L, Sun Y X. 2015a. Energy absorption of spider orb webs during prey capture: A mechanical analysis. *Journal of Bionic Engineering*, **12**: 453-463.

Yu H, Zhang Z, Liu H, Yang J, Wang L, Yang L. 2015b. A new landing impact attenuation seat in manned spacecraft biologically-inspired by felids. *Chinese Journal of Aeronautics*, **28**: 434-446.

Zeng Y, Lam K, Chen Y, Gong M, Xu Z, Dudley R. 2017. Biomechanics of aerial righting in wingless nymphal stick insects. *Interface Focus*, **7**: 20160075.

Zeng Y, Lin Y, Abundo A, Dudley R. 2015. The visual ecology of directed aerial descent in first-instar nymphs of the stick insect Extatosoma tiaratum. *Journal of Experimental Biology*, **218**: 2305.

Zhang F L, Jiang L, Wang S T. 2018. Repairable cascaded slide-lock system endows bird feathers with tear-resistance and superdurability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **115**: 10046-10051.

Zhang Q B, Li C, Pan Y T, Shan G H, Cao P, He J, Lin Z S, Ao N J, Huang Y X. 2013. Microstructure and mechanical properties of horns derived from three domestic bovines. *Materials Science and Engineering: C*, **33**: 5036-5043.

Zhang W, Wu C W, Zhang C Z, Chen Z. 2012. Numerical study of the mechanical response of turtle shell. *Journal of Bionic Engineering*, **9**: 330-335.

Zhang Z, Yang J, Yu H. 2014a. Effect of flexible back on energy absorption during landing in cats: A biomechanical investigation. *Journal of Bionic Engineering*, **11**: 506-516.

Zhang Z, Yu H, Yang J, Wang L, Yang L. 2014b. How cat lands: Insights into contribution of the forelimbs and hindlimbs to attenuating impact force. *Science Bulletin*, **59**: 3325-3332.

Zhang Z Q, Liu B H, Y, Hwang K C, Gao H. 2010. Mechanical properties of unidirectional nanocomposites with non-uniformly or randomly staggered platelet distribution. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **58**: 1646-1660.

Zhang Z Q, Yang J L. 2015. Biomechanical dynamics of cranial sutures during simulated impulsive loading. *Applied Bionics and Biomechanics*, **1**: 1-11.

Zhu D J, Szewciwa L, Vernereyb F, Barthelat F. 2013. Puncture resistance of the scaled skin from striped bass: Collective mechanisms and inspiration for new flexible armor designs. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **24**: 30-40.

(责任编委: 戴兰宏)

Research progress of impact-resistance strategies and biomimetic mechanism in animal evolution

XING Yun　　YANG Jialing*

Institute of Solid Mechanics, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract　After a long period of natural selection, animals in nature have evolved a variety of efficient, reliable, and adaptable impact-resistance strategies and body-protective mechanisms to resist impact loads from the complex environment they live in, protecting the organisms from injury when they carry out the intense biological activities. These naturally biological defensive systems are characterized by superiorly impact-resistance tolerance, highly energy-dissipated efficiency, and reusability compared to the traditional protective structures used in engineering. In recent years, more and more researchers have paid attention to the study on biomechanical behavior and biomimetic mechanism of organisms in resisting impact loading. In this paper, combining the recent studies in this field, we reviewed the latest research progress in impact-resistance strategies and body-protective mechanisms of various animals in nature and related bio-inspired designs and engineering applications. In particular, we summarized and discussed the unique evolutionary process and extraordinary mechanical properties of biological impact-resistant structures under different loading environments and introduced the related investigations on the biomimetic applications in resisting impact loads. Finally, we analyzed the challenges and developments of the research on impact-resistance strategies and biomimetic mechanisms in animal evolution. This review provides practical data for researchers and engineers and offers a useful reference and bionic basis for the impact-resistance and protective designs of reusable energy absorption devices and aircraft structures.

Keywords　animal, impact-resistance strategy, protective mechanism, bionic, energy dissipation



杨嘉陵, 北京航空航天大学教授、博士生导师, 校学术委员会副主任, 校教学指导委员会委员, 中国科协工程力学类专业认证委员会委员, 总参陆航局武装直升机高层专家等, 是国务院政府特殊津贴专家. 2000 年以来历任北航固体力学研究所所长, 航空科学与工程学院院长, 教育部第 5 届科技委员会学部委员, 教育部教学指导委员会力学专业委员会副主任委员, 中国力学学会常务理事, 北京力学会副理事长等. 主要从事: 冲击动力学、塑性力学、仿生力学、飞行器抗冲撞和防护技术研究. 发表学术论文 180 余篇 (SCI 收录 150 余篇), 专利 30 余项. 2000 年获教育部自然科学一等奖, 2013 年获教育部科学技术进步一等奖, 2016 年获国家发明二等奖.

Received: 30 October 2020; accepted: 27 February 2021; online: 31 March 2021

* E-mail: jlyangbuaa@aliyun.com; jlyang@buaa.edu.cn

© 2021 *Advances in Mechanics*.