中国科学: 生命科学 2013 年 第 43 卷 第 8 期: 626 ~ 630
SCIENTIA SINICA Vitae www.scichina.com life.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

自然科学基金项目进展专栏

评 述

啄木鸟头部抗冲击性的生物学机理及其应用

卢珊[①②], 倪义坤[①], 刘笑宇[①], 王超[①], 牛旭锋[①], 王丽珍[①*], 樊瑜波[①]

① 北京航空航天大学生物与医学工程学院, 生物力学与力生物学教育部重点实验室, 北京 100191;
②《中国科学》杂志社, 北京 100717
* 联系人, E-mail: lizhenwang@buaa.edu.cn

收稿日期: 2013-01-25; 接受日期: 2013-03-24
国家杰出青年科学基金(批准号: 10925208)、国家自然科学基金(批准号: 11120101001, 11202017, 11272038)、教育部博士点基金新教师基金(批准号: 20121102120039)和北京市自然科学基金(批准号: 7133245)资助项目

摘要 当啄木鸟以高加速度(>1000×*g*)和高频率反复啄木时, 它并不会发生头部或眼部的冲击性损伤. 其原因引起了很多研究者的关注, 其中包括鸟类学家、生物学家, 还有在机械工程学、材料科学及电机工程学领域的科学家等. 一些研究者已经对啄木鸟避免其头部损伤的生物学机理进行了研究. 其他一些则关注这种生物机理的应用. 本文从两方面对现已发表的文章进行综述, 一方面是关于啄木鸟避免头部损害的原因, 另一方面是这一机理对于工程学和人类防护冲击的启示.

关键词
生物机理
啄木鸟
头部伤害
应用

外伤性脑损伤是头部冲击损伤的后果之一, 并且是在航空逃生、战争、车祸以及一般的运动撞击中导致残疾和死亡的主要原因[1~3]. 啄木鸟每天反复地进行啄木行为, 并且每次啄木可达到 6~7 m/s 的速率和大约 1000×*g* 的加速度[4~7], 它的喙有节奏地敲击树枝干寻找虫子, 或吸引异性注意, 或占领领地[7,8]. 啄木鸟是在上百万年的自然进化中产生头部冲击损害抗性的典型代表[9], 它不仅引起了鸟类学家的广泛关注, 还引起了机理工程学、医学工程学、材料科学及电子工程学等领域研究者的兴趣[4~7,10~13]. 很多科学家对于啄木鸟避免头部冲击性损害的研究非常感兴趣[4~6,14,15], 还有一些其他研究致力于寻找制作工程学或人类防护中仿生学减震系统或设备的线索[10~13]. 本文旨在对啄木鸟未发生头部冲击损害的原因及其应用进行综述.

1 啄木鸟头部抗冲击性的生物学机理

啄木鸟应该具备应对头部冲击的功能上的适应性, 这种适应性使得它能够高速啄木而不会发生头部冲击损伤[4~8,16~22]. 早期经典鸟类学、精神学还有生物机理学研究提出了以下一些主要原因.

首先, 在一个完美的垂直冲程中, 啄木鸟可以消除扭转剪切力, 而扭转剪切力可能会撕裂脑脊膜或者引起神经机制的脑震荡[8,14,15,20]. 按照鸟类学家 Sielmann[23]的研究, 斑啄木鸟在 2.10~2.69 s 中会发生 35~44 次冲击, 速度之快以至于无法用 24 帧频的设备完整记录下啄木鸟的运动. May 等人[5]使用一台高速摄像机(彩色帧频为 400, 黑白帧频为 2000)分析了一只活的北美啄木鸟的撞击, 结果表明, 其头部中心和底部的运动轨迹基本沿直线运动, 啄木鸟的脑部

引用格式: 卢珊, 倪义坤, 刘笑宇, 等. 啄木鸟头部抗冲击性的生物学机理及其应用. 中国科学: 生命科学, 2013, 43: 626–630
英文版见: Wang L Z, Lu S, Liu X Y, et al. Biomechanism of impact resistance in the woodpecker's head and its application. Sci China Life Sci, 2013, 56: 715–719, doi: 10.1007/s11427-013-4523-z

事实上不受扭转剪切力的影响, 当它以 749 cm/s 的前冲击速度和 1200×*g* 的加速度啄木时, 这种旋转力可能会使其脑部产生冲击损伤. 然而, 本实验室先前研究, 利用 2000 帧/s 的高速摄像机拍摄大斑啄木鸟啄物过程头部的运动轨迹[6]. 此外, 还记录了另一种与啄木鸟体型大小相似, 并且有轻微啄物行为的戴胜, 在啄不同物品, 如泡沫塑料、金属笼子和传感器时的情况. 结果发现, 在啄物过程中, 两种鸟都具有线加速度和角加速度, 且大斑啄木鸟的线速度和线加速度峰值都明显高于戴胜, 而其角速度和角加速度峰值都与戴胜接近. 因此, 大斑啄木鸟在啄木过程保持直线轨迹进而抵抗脑损伤的向心力理论是值得怀疑的. Holbourn 方程包含了很多假设[20], 该理论一直应用于长持续时间的受力过程(>6.5 ms), 对于短时的冲动加载并不适用. 方程中假设主要的变量是大脑质量, 并且大脑都具有相似的属性、形状和脑脊液(CSF)浮选效果. 关于线性加速度和角加速度对于头部冲击损伤的影响, 其生物学机理存在非常大的争论[24]. 因此, 啄木鸟头部的线性轨迹并不能作为啄木鸟抵抗头部冲击损伤生物学机理的基础.

另一方面, 啄木鸟的解剖结构也被作为另外一个最主要的因素. 啄木鸟具有大量的特殊形态学结构, 例如, 它有强壮的颈部肌肉, 非常长的长骨, 结实尖锐的喙, 尖锐程度不同的上下喙[10]. 早期经典鸟类学研究表明, 啄木鸟强壮的牵引肌可以作为震动吸收装置或者分散震动装置, 并保持啄木鸟的喙部始终具有弹性刚度[7,16,25]. 一个更详细的关于啄木鸟钻孔行为却不引起脑部损伤的研究与 May 等人[4]的研究一致. May 等人解剖了两只啄木鸟的脑部, 观察了啄木鸟头部的特殊结构, 其中包括结实尖锐突出的喙, 这种喙使其更容易钻洞, 以建巢或者捕食, 还包括被称为舌骨的长舌, 这种舌骨起源于其上颌骨的背部, 穿过右部鼻孔, 在眼部一分为二, 其分开的部分成弓形覆盖在头盖骨的上面部分, 在颈部的两边分开通过枕骨部周围, 在较低的下颌骨部分出现, 然后又在前额下面、狭窄的硬膜下腔、脑脊液部分联合成为一体, 并且啄木鸟的脑部相当小, 而且很光滑, 这样就可以使其能够与头盖骨有较大的接触面积. 25 年前, 加利福尼亚大学的眼科医师 Ivan Schwab 与 May 共享了 2006 年鸟类学诺贝尔奖. Schwab[26]和 Nadis[27]呼吁大家关注 May 之前被忽略的工作. 最近, 啄木鸟头盖骨特殊的局部解剖学结构已经通过数值模拟的方式被定量评估, 包括其特殊的舌骨, 普遍认为这种有趣的舌骨在分散冲击后剪力方面起到了重要作用[4,6,15,26,28]. 此外, 啄木鸟喙部的上下形态学差异在其啄食的过程中也被关注, 它的喙上部外面包裹的组织层比下面的要长 1.6 mm, 相反, 上部喙的高强度骨结构大约比下部的短 1.2 mm[6]. Gibson[19]指出, 啄木鸟颅骨与人类颅骨的不同结构可能是啄木鸟可以避免头部冲击性损伤的重要原因, 啄木鸟颅骨的特殊结构增加了大脑和头盖骨之间的接触面积. 事实上, 绝大多数的鸟类具有与啄木鸟相同的头部形态, 但是小一些的鸟类可能会被一些冲击给击昏, 同样情况下对于啄木鸟却没有影响, 并且一般情况下可以观察到其他鸟类在头部突然撞击到玻璃上时是无意识的, 然后它们会重新振作并飞走, 它们的这种表现使得啄木鸟在经历了强烈撞击却不会出现头部损伤这一现象更加神奇[5].

仅仅是以头部形态学为基础的理论可能具有一定的误导性. 为了解这种神奇的现象, 有研究对啄木鸟特殊舌骨的材料性能和微观形态学进行了研究, 此外还在材料科学方面对其颅骨和喙部进行了研究[6,14,29]. 由于其独特的微、纳米材料分层复合结构, 舌骨表现出一种异常的强度和柔韧性. 舌骨由灵活的软骨和骨架构成, 并且外面覆盖着高强度、高弹性的薄组织层. 软骨骨架和组织层之间的界面由分层的纤维类型组织连接[14]. 此外, 由于骨骼的主要功能是提供稳定支撑, 骨成为最常研究的生物材料之一. 骨骼对于不同的局部刺激都很敏感, 其中包括环境改变引起的机械性能的变化[30]. 大斑啄木鸟的颅骨和喙部的微观结构都可以通过微型计算机断层成像的扫描数据得到, 其中包括骨体积分数(BV/TV)、骨小梁厚度(Tb.Th)、骨小梁数目(Tb.N)、骨小梁间距(Tb.Sp)、结构模型指数(SMI)和骨质密度(BMD)[29]. 啄木鸟头盖骨的 SMI 比其他鸟类的低, 但是 Tb.Th 和 Tb.N 高于其他鸟类. 啄木鸟喙部的 SMI, Tb.N 和 BMD 都明显高, 但 Tb.Th 较低. 啄木鸟颅骨具有更多板状的骨小梁, 更大的厚度, 更多的数量和个别的骨小梁之间更紧密的间距, 可能会导致在啄木的过程中较小的变形, 这些因素可能会降低啄木过程中对大脑的作用力. 相反, 啄木鸟的喙具有更大的棒状结构的数量和更薄的小梁, 可能会导致冲击过程中更大

的变形, 由于冲击力已经被喙部吸收和分散了, 传输到大脑的冲击就会降低. 这些微观参数的结合最终导致啄木鸟与其他鸟类喙的相似强度. 以上研究表明, 单个小梁的形状对于骨骼机械性能有重要影响[31,32]. 具有有机物含量越高的样品在燃烧时会产生更大的物质损失, 含有较多的有机物质的材料在负载时可能表现出更大的灵活性[33,34]. 这两种颅骨与喙部骨骼相比具有较高的灼烧失重, 表明颅骨的骨矿物质的比例小于喙部. 啄木鸟的喙骨的更高的灼烧损失也意味着在冲击的压力下, 可能会发生较大的变形. 因此, 在传输到颅骨之前, 所施加的冲击应力可以被喙骨部分吸收. 啄木鸟颅骨和喙骨的这些独特的机械性能、微观结构和组成成分造就了啄木鸟对于头部冲击性损伤的良好抵抗性.

以上提到的宏观和微观形态学可能同时作用以提升啄木鸟的抗冲击性. 这些不同的特点提供了啄木鸟对于头部冲击性损伤的抵抗性. 骨骼的机械性能取决于其骨组织的微观结构和成分组成[31,32]. 与其他鸟类相比, 由于啄木鸟独特的微观结构, 其头盖骨具有较高的极限强度和抗冲击性能. 这种微观结构包括更多的平面松质骨, 更大的厚度, 更多的数目, 骨小梁之间更小的间隔, 还有更高的骨矿物质成分. 在较高的压力下, 啄木鸟的头盖骨和喙骨表现出与众不同的机械性能, 这与其不同的微观结构和成分组成也是互相联系的.

2 啄木鸟仿生减震系统或设备

在工程学领域中, 啄木鸟头部的吸震作用机理已经成为了一个很有意思的研究课题. 科研人员热衷于发展一种新型的受啄木鸟启发的安全设备, 这种设备可以保护人们以避免冲击损害. 受到啄木鸟可以啄木却不会发生头部损伤的启发, 很多新型的基于啄木鸟动力传递机理的力学性能设备已经处于开发过程中. 研究人员已经设计了一些仿生学的系统和设备[10~13].

啄木鸟的解剖结构特性很多都是与其啄木的行为相联系的. 啄木鸟的喙部由高强度骨骼构成, 其外部包裹了一层角质层, 喙部的整体形状类似于“凿子”. 啄木鸟喙部通过强健的肌肉与其颅骨连接, 连接颅骨的肌肉会在碰撞前收缩[17]. 啄木鸟髋部的骨骼很宽, 可以连接那些与腿部和尾巴相连的粗壮肌肉. 啄木鸟啄木的啄力必定来自于它体内的肌肉. 通过对红头啄木鸟啄木的影响发现, 其啄木的冲力从颈部传递至头部, 并且它身体的运动接近于正弦曲线, 但是头部的运动更接近于锯齿状运动, 可达到更高的撞击速度, 这表明啄木鸟颞部的运动并不仅仅是简单的甩鞭运动. 受到上述啄木鸟身体的非直线运动的启发, Vincent 等人[11]制作了一种低惯性轻量锤子. 这一发明拟用于太空活动, 因为在太空中, 物体在接触以前不存在惯性力, 在使用工具时, 力的方向甚至会被改变, 因此这种基于啄木鸟运动设计的仿生学的锤子与传统的锤子相比具有很多优点. 这种锤子仍然可以应用于一些工作环境很重要的行业, 例如牙科或医学手术.

环境中的微小震源包括大地的震动、平台上物体的移动以及万有引力等. 范围从 1~100 Hz 的不同频率的震动产生于人的走动、换气扇, 甚至是地震[35]. 正如上文所述, 啄木鸟的头部可以很好地化解震动. 当啄木鸟以高速度啄木时, 其脑部受到的冲击相当于啄木鸟体重的 1000 倍, 在这种情况下, 啄木鸟的脑部没有受到任何伤害. 这种抗冲击能力来自于啄木鸟头部特殊的大脑结构[7]. Mei 等人[10]通过基于啄木鸟脑部的仿生力学和组织成分的研究发现, 啄木鸟的神经系统控制了其“主动防震系统”, 该“系统”通过大量的收缩单元和缓冲垫实现其功能. 为更加有效地隔绝来自地面高频率的震动, 在微型制造业的平台基座和地面之间可加装橡胶层. 这一橡胶层类似于啄木鸟颅骨外的软骨和肌肉组织, 目前这一技术已经被用于隔离基座和地面之间的震动. 空气弹簧被用作弹性部件, 相当于啄木鸟头部髓膜外的空间. 该结构采用了强烈的磁伸缩材料, 与啄木鸟通过神经网络连接脑膜和脑髓相似. 经过研究证明, 这种仿生学震动隔离系统在抵抗地面震动干扰时表现良好, 该系统有效隔离了来自基座的不同频率震动, 并且该系统可以有效隔离被动隔震系统很难隔离的低频和超低频震动.

近年来, 在军事应用方面, 对于微型电子设备(MEDs)的需求越来越高, 因为微型电子设备具有小型化、低能耗和低成本的特点[36,37]. 在一些军事应用中, 例如震动纪录系统和坚硬目标智能融化系统中, MEDs 会被长时间暴露于震动环境中, 这在短时间内将汇聚大量的震动能量至设备微小的区域内[38~40]. 直接暴露于高于 100 kHz 的震动环境将对 MEDs 的结构

造成损害. 因此, 设计出一款能够有效抵抗高频率震动的方法是 MEDs 设计中最有价值的成果[41~44]. Yoon 等人[12]在受到啄木鸟颅骨中包含松质骨的灵感激发后, 设计了针对 MEDs 的抗震装置. 其创意是使用微粒床来保护微型电子设备. 在金属外壳之内的微粒床的震荡现象, 控制了不需要的高频机械激发, 使针对于嵌入的 MEDs 的不利影响保持在可接受的限度. 实验结果已经证实, 在提高 MEDs 的冲击耐受性方面, 啄木鸟仿生的抗冲击系统优于传统的使用固体树脂的情况. 在啄木鸟仿生抗冲击系统中, 传输到MEDs的机械冲击动能已经被减弱, 通过微粒床中颗粒-颗粒碰撞, 颗粒-颗粒或者与壁之间的摩擦达到对动能的吸收. 此后, 他们还设计了一个新的减震系统, 以保护微型设备免受不必要的高加速度影响, 这种灵感基于啄木鸟颅骨的松质骨成分[13]. 新的震动吸收系统由两金属外壳内的紧密堆积微镜片和钢螺栓固定的黏弹性层构成, 已验证了在重力耐受性方面具有显著的改善, 这是从啄木鸟颅骨的松质骨成分中得到的灵感. 利用 60 mm 气枪打击普通微型电机, 使用仿生抗震系统时设备的损坏率为 0.7%, 而不使用时, 设备损坏率为 26.4%[12,13].

3 结论

啄木鸟的宏观、微观形态的进化优化使得它在功能上适应了其独特的生活方式. 啄木鸟的头部作为复杂的冲击吸收系统是多种因素共同作用的结果, 没有任何单独的因素能够具备这种功能. 当头部重击树干时, 其舌骨, 不对称的上、下喙骨, 狭窄的硬膜下腔, 较少的脑脊液, 相对较小、平滑的脑部, 致密的松质骨(尤其是在枕骨部), 头盖骨内的大脑定向, 较低的脑部质量和脑表面积比例都使得啄木鸟与人类相比具有更多的优势[4,5,45]. 同时, 强有力的牵引肌, 和不对称的上、下喙骨长度形成了减震器和分配器, 并保持啄木鸟的喙部始终具有弹性刚度[6,7,16,17,25]. 通过之前的研究分析, 可以得出结论, 即啄木鸟的减震功能的实现包含了很多特征. 啄木鸟也被认为是生物工程设计优越性的真实证明, 了解更多的啄木鸟头部抵抗冲击的生物力学机理、材料性能和松质骨的分布可能会对一些新型的安全帽、运动产品或者其他的能够很好地抵抗冲击的设备的设计有所帮助. 此外, 这对工程学中新型减震复合材料的结构设计也提供了一些线索.

参考文献

1 Martin E, Lu W, Helmick K, et al. Traumatic brain injuries sustained in the Afghanistan and Iraq wars. Am J Nurs, 2008, 108: 40–47
2 Park E, Bell C J D, Baker A J. Traumatic brain injury: can the consequences be stopped? Can Med Assoc, 2008, 178: 1163–1170
3 Powell J W. Cerebral concussion: causes, effects, and risks in sports. J Athl Train, 2001, 36: 307–311
4 May P, Fuster J, Newman P, et al. Woodpeckers and head injury. Lancet, 1976, 1: 454–455
5 May P R, Fuster J M, Haber J, et al. Woodpecker drilling behavior—an endorsement of the rotational theory of impact brain injury. Arch Neurol, 1979, 36: 370–373
6 Wang L, Cheung J T, Pu F, et al. Why do woodpeckers resist head impact injury: a biomechanical investigation. PLoS ONE, 2011, 6: e26490
7 Spring L W. Climbing and pecking adaptations in some north American woodpecker. Condor, 1965, 67: 457–488
8 Bock W J. An approach to the functional analysis of bill shape. Auk, 1966, 83: 10–51
9 Rubner M. Materials science: synthetic sea shell. Nature, 2003, 423: 925–926
10 Mei D, Yang K, Chen Z. Design of an ultra-precision vibration isolation system by imitating the special organic texture of woodpecker's brain. In: Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Singapore, 2004
11 Vincent J F V, Sahinkaya M N, O'Shea W. A woodpecker hammer. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2007
12 Yoon S H, Roh J E, Kim K L. Woodpecker-inspired shock isolation by microgranular bed. J Phys D Appl Phys, 2009, 42: 035501-1-035501-8
13 Yoon S H, Park S. A mechanical analysis of woodpecker drumming and its application to shock-absorbing systems. Bioinspir Biomim, 2011, 6: 016003
14 Zhou P, Kong X Q, Wu C W, et al. The novel mechanical property of tongue of a woodpecker. J Bionic Eng, 2009, 6: 214–218
15 Oda J, Sakamoto J, Sakano K. Mechanical evaluation of the skeletal structure and tissue of the woodpecker and its shock absorbing system. JSME Int J Ser A, 2006, 49: 390–396

16 Bock W J. Kinetics of the avian skull. J Morphol, 1964, 114: 1–41
17 Bock W J. Functional and evolutionary morphology of woodpecker. Ostrich, 1999, 70: 23–31
18 Mlikovsky J. Brain size in birds: 3. Columbiformes through Piciformes. Vestn Cesk Spol Zool, 1989, 53: 252–264
19 Gibson L J. Woodpecker pecking: how woodpeckers avoid brain injury. J Zool, 2006, 270: 462–465
20 Holbourn A H S. Mechanics of head injuries. Lancet, 1943, 2: 438– 441
21 Ommaya A K, Gennarelli A T. Cerebral concussion and traumatic unconsciousness: correlation of experimental and clinical observations on blunt head injuries. Brain, 1974, 97: 97
22 Ommaya A K, Hirsch A E. Tolerances for cerebral concussion from head impact and whiplash in primates. J Biomech, 1971, 4: 13–31
23 Sielmann H. My year with the woodpeckers 1959. London: Barrier and Rockliff, 1959. 139
24 King A I, Yang K H, Zhang L, et al. Is head injury caused by linear or angular acceleration. In: IRCOBI Conference, Lisbon, Portugal, 2003
25 Beecher W J. Feeding adaptations and systematics in the avian order Piciformes. J Washington Acad Sci, 1953, 43: 293–299
26 Schwab I R. Cure for a headache. British J Ophthalmol, 2002, 86: 843
27 Nadis S. Hard-hitting endeavour captures Ig Nobel. Nature, 2006, 443: 616–617
28 Cho Y J. Damping System in Woodpecker's Head. Reports of Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2002
29 王丽珍, 张宏泉, 樊瑜波. 啄木鸟颅骨及颌骨的材料学特征在头部抗冲击性中的作用. 中国科学: 生命科学, 2012, 42: 234–239
30 Müller R. Hierarchical microimaging of bone structure and function. Nat Rev Rheumatol, 2009, 5: 373–381
31 Ciarelli M J, Goldstein S A, Kuhn J L, et al. Evaluation of orthogonal mechanical properties and density of human trabecular bone from the major metaphyseal regions with materials testing and computed tomography. J Orthop Res, 1991, 9: 674–682
32 Dalen N, Hellstrom L G, Jacobson B. Bone mineral content and mechanical strength of the femoral neck. Acta Orthop Scand, 1976, 47: 503–508
33 Koutsopoulos S. Synthesis and characterization of hydroxyapatite crystals: a review study on the analytical methods. J Biomed Mater Res, 2002, 62: 600–612
34 Kandori K, Horigami N, Yasukawa A, et al. Texture and formation mechanism of fibrous calcium hydroxyapatite particles prepared by decomposition of calcium-EDTA chelates. J Am Ceram Soc, 1997, 80: 1157–1164
35 Zhang C L, Mei D Q, Chen Z C. Active vibration isolation of a micro-manufacturing platform based on a neural network. J Mater Proc Technol, 2002, 129: 634–639
36 Brown T G, Davis B, Hepner D, et al. Strap-down microelectromechanical (MEMS) sensors for high-G munition applications. IEEE Trans Magn, 2001, 37: 336–342
37 Yoon S H, Son J T, Oh J S. Miniaturized g- and spin-activated Pb/ HBF4/PbO2 reserve batteries as power sources for electronic fuzes. J Power Sources, 2006, 162: 1421–1430
38 Gupta Y M, Sharma S. Shocking matter to extreme conditions. Science, 1997, 277: 909–910
39 Yoon S H, Kim K L. Passive low pass filtering effect of mechanical vibrations by a granular bed composed of microglass beads. Appl Phys Lett, 2006, 89
40 Alexander R M, Bennet-Clark H C. Storage of elastic strain energy in muscle and other tissues. Nature, 1977, 265: 114–117
41 Britan A, Ben-Dor G, Igra O, et al. Shock waves attenuation by granular filters. Int J Multiphase Flow, 2001, 27: 617–634
42 Bakken J, Slungaard T, Engebretsen T, et al. Attenuation of shock waves by granular filters. Shock Waves, 2003, 13: 33–40
43 Veprik A M, Babitsky V I. Vibration protection of sensitive electronic equipment from harsh harmonic vibration. J Sound Vib, 2000, 238: 19–30
44 Bhatti R A, Wang Y R, Wang Z C. Particle impact damping in two dimensions. Key Eng Mater, 2009, 413–414: 415–422
45 Self Z. Why don't woodpeckers get headaches? J Exp Biol, 2012, 215: V–VI