

## 啄木鸟为什么能避免脑损伤?



余同希<sup>1)</sup>

(香港科技大学机械工程系, 香港九龙清水湾)

**摘要** 为了觅食和凿洞, 啄木鸟用它的长嘴反复地冲击树干, 冲击频率很高, 引致的最大减速度可达  $1500g$ . 能实现这样的功能, 靠的是啄木鸟头部的特殊构造, 以及它的脚趾和尾羽. 基于冲击动力学的科学知识, 本文从 4 个方面分析了为什么啄木鸟在频繁、快速和高  $g$  的冲击下能够避免脑部的损伤. 同时, 在啄木鸟头部结构和材料的启发下, 科技人员正在研发新型的缓冲和隔振的装置.

**关键词** 啄木鸟, 冲击, 脑损伤

在全球各地, 除了澳大利亚、新西兰和马达加斯加之外, 生活着大大小小、形形色色的 200 余种啄木鸟, 它们都隶属于鸟类雀形目的啄木鸟科. 世界上现存最大的啄木鸟是生活于东南亚的大斯莱蒂啄木鸟, 约有 500 mm 长, 450 g 重; 而一种最小的姬啄木鸟则只有 80 mm 长, 7 g 重.

大多数啄木鸟生活在森林或树丛中, 在树洞中栖息繁衍, 以昆虫和植物果实为食. 为了从树皮下觅食和在树干上凿洞, 啄木鸟必须用它的长嘴反复地冲击树干, 其频率比用木槌敲小鼓还快. 有人估算出, 有的啄木鸟一天内要敲击树木 8000~12000 次. 还有人的一种带头盖的黑啄木鸟作了测定, 发现它敲击的频率达到 20 Hz, 冲击引致的最大减速度可达  $1200g$ , 甚至  $1500g$  ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  代表重力加速度).

从形态学的分析发现, 与这种高效的觅食和凿洞的功能相适应, 啄木鸟的头部构造是十分特殊的. 它的鸟嘴很长, 既锋利又坚硬, 适合于开凿、撬动和啄击. 它有一条很长的舌头 (有的竟长达 100 mm), 表面有刚毛, 还分泌黏液, 可以像矛那样将猎物戳穿, 或是将其粘住卷起. 尤为奇特的是, 它的舌骨居然向后延伸通过喉咙、绕头骨大半圈, 最终连接于前额 (见图 1). 这种特殊构造使得它的舌头可以伸得很长, 却仍然

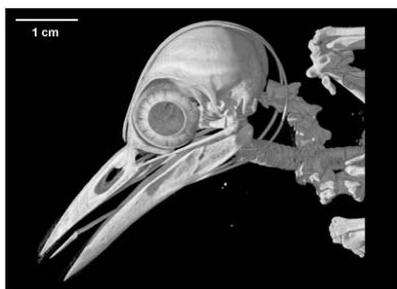


图 1 啄木鸟的头部构造

收放自如. 还有, 啄木鸟的眼睑可以在啄木的瞬间关闭, 防止啄木产生的飞屑伤及眼睛. 生物世界真奇妙!

从力学来看, 为对树干施行反复强冲击, 啄木鸟必须要维持一个平衡的体态, 还要有数个稳固的支承点来提供反力. 与大多数鸟儿不同, 啄木鸟的脚爪是二、三趾向前, 一、四趾向后的, 因而它能牢牢地抓紧树干. 同时, 它的尾部羽毛非常刚硬, 在啄木时尾部紧贴树干, 为啄木鸟在树上的竖直姿态提供另一个支撑点 (见图 2).



图 2 啄木鸟在树上的竖直姿态

我们知道, 当一个人的头部受到猛烈的撞击时 (例如在撞车事故中), 往往会造成脑震荡, 轻者昏迷, 重者死亡. 因此, 从冲击动力学的角度来看, 一个有趣问题是: 在频繁、快速和高加速度 (称为高  $g$ ) 的冲击下, 啄木鸟为什么能够避免脑部的损伤呢?

首先, 啄木鸟的脑部对冲击的承受能力比人强很多. 为了比较啄木鸟和人的脑部抗冲击性能, 假定啄木鸟和人的脑组织的破坏强度相同, 即破坏应力均为

$$\frac{F_w}{A_w} = \frac{F_h}{A_h} = \sigma_y \quad (1)$$

其中  $F$  是作用在脑部的力,  $A$  是脑部的受力面积, 下标  $w$  和  $h$  分别代表啄木鸟和人. 于是有,

$$\frac{m_w a_w}{A_w} = \frac{m_h a_h}{A_h} \quad (2)$$

其中  $m$  和  $a$  分别代表质量和加速度 (或减速度). 从资料查到, 中等体型 (体重约 100 g) 的啄木鸟脑部的质量和半径分

本文于 2012-03-22 收到.

1) 余同希, 博士, 讲座教授, 冲击动力学与塑性力学, E-mail: metxyu@ust.hk

别为 2 g 和 7 mm, 而人的脑部的质量和半径则分别为 1 400 g 和 60 mm. 由此得出

$$\frac{a_w}{a_h} = \frac{m_h A_w}{m_w A_h} = \frac{1400}{2} \times \frac{7^2}{60^2} = 9.5 \quad (3)$$

这表明, 同样当脑组织发生破坏的时候, 啄木鸟受到的减速度约为人的 10 倍; 也就是说, 由于啄木鸟脑部又轻又小, 它对甚高的减速度的承受性比人强 10 倍!

这个简单的计算其实反映了力学中的尺度律. 假定一大一小两个物体 (或结构) 由同样材料构成, 彼此几何上相似, 线性尺度的比为  $\lambda : 1$  ( $\lambda > 1$ ). 这时, 力学的尺度律告诉我们, 就冲击破坏的加速度 (减速度) 而言, 小的物体 (或结构) 的承受能力要比大的那个强  $\lambda$  倍. 在实验中, 缩小尺度的试件比结构原型更耐冲击, 也是一样的道理.

其次, 啄木鸟在啄木时始终保持一种竖直姿态 (图 2), 鸟嘴沿着树干的法线方向往复运动, 敲击引起的脉冲力始终通过脑部的中心, 没有旋转力矩, 因而冲击对脑组织只产生正应力而没有切应力. 这一点对保护脑组织十分重要. 因为动物和人的脑组织是介于固体与流体间的黏性介质, 对剪切和转动的抵抗能力最弱, 如果撞击引起脑部的剪切和剧烈转动, 就会导致脑震荡或失去知觉.

第三, 对啄木鸟头部的解剖发现, 在一层较厚较硬的头盖骨之下有着海绵状的软骨, 特别是在枕骨部分是如此 (见图 3); 而它的体积很小的脑组织正是被这种海绵状的软骨紧紧地包裹着的. 坚硬的头盖骨能够保护软骨和脑组织免受外来的直接伤害; 而海绵状软骨中有大量含空气的孔隙, 可以有效地滤掉冲击带来的高频激励, 并使得冲击产生的应力波经历绕道和“空气弹簧”的作用而衰减, 从而大大降低对脑组织的冲击力. 此外, 上面提到的特殊构造的舌骨 (图 1) 像一根弯曲的长弹簧, 当啄木鸟头部作前后往复的快速运动时, 这根弯曲的长弹簧能起到吸能器和缓冲器的作用.



图 3 啄木鸟的头骨

第四, 由于啄木鸟啄木是一种高频的敲击, 每一次冲击的脉冲时程十分短促, 大约不到 0.5 ms. 其结果, 每次冲击给脑组织带来的冲量都不大, 使之保持在产生损伤的临界值之下. 事实上, 在人们研究汽车碰撞对人的头脑的伤害时很早就发现, 产生损伤的程度大体取决于下述指数 (称为 Gadd Severity Index)

$$G.S.I. = \int_0^T a^{2.5}(t) dt \quad (4)$$

其中  $a(t)$  是在冲击下头部经历的减速度脉冲, 单位为  $g$  (重力加速度);  $T$  是该脉冲的时程, 单位为 ms (毫秒). 从上式可见, 脑部的损伤程度不仅与减速度脉冲的强度有关, 也与它的时程长短有关. 啄木鸟的脑组织在高频而短促的冲击下仍然完好无虞, 其力学道理正在于此.

研究表明, 当按 (4) 式算出的  $G.S.I.=1000$ , 就达到了健康成年人的脑损伤的容限. 式 (3) 表明, 啄木鸟脑部对减速度的承受性比人强 10 倍, 因而可以估计出啄木鸟的脑损伤的容限比人脑高  $10^{2.5}$  倍, 即大约高 300 倍. 另一方面, 因为啄木鸟的脑组织周围有着令应力波衰减的多孔材料层 (海绵状软骨) 和缓冲器 (舌骨), 所以, 与鸟嘴敲击树木时受到的峰值为  $1200g \sim 1500g$  的冲击脉冲相比, 真正传递到啄木鸟脑部的应力脉冲的强度要低得多, 是不会对啄木鸟脑组织造成伤害的.

从啄木鸟脑部的抗冲击性能分析, 我们可以得到什么启发呢? 举一个例子, 用于汽车、航空、航天和军事用途的微电子器件 (如启动安全气囊的传感器、电子陀螺和导弹的引信) 需要在高  $g$  冲击的环境下可靠地工作. 我们从啄木鸟得到启发, 首先知道这些微电子器件应该尽可能设计得小而轻, 以提高它的抗冲击性能; 同时, 可以参照啄木鸟的头部结构, 设计功能类似于海绵状软骨的多孔材料层, 用以衰减应力波和耗散冲击能量; 还可以采用类似于舌骨的黏弹性缓冲器, 对关键的微电子器件进行多重保护. 近年来, 在啄木鸟的启发下, 美国伯克利加州大学以 Yoon 为首的研究组研发出了一种保护微电子器件的装置, 它在一个刚性外壳里放入许多微小的玻璃球, 把微电子器件放在玻璃微球的中间, 利用微球之间的含空气的大量孔隙来起到缓冲和隔振的作用.

瞧, 认识小小的啄木鸟可以让我们学到很多冲击动力学的知识, 还可以给我们带来高技术的创新呢!

补记: 本文完稿后, 北京的一位朋友告诉我, 北航的博士生王丽珍在导师樊喻波教授的指导下对啄木鸟作了生物力学的实验研究和有限元模拟. 有兴趣的读者可以查阅他们的论文: Lizhen Wang, et al. Why Do Woodpeckers resist head impact injury: A biomechanical investigation, PLoS ONE 6(10): e26490. doi:10.1371/journal.pone.0026490, 2011.

## 参 考 文 献

- 1 Woodpecker, Wikipedia. [http://digimorph.org/specimens/Melanerpes\\_aurifrons/](http://digimorph.org/specimens/Melanerpes_aurifrons/).
- 2 Sang-Hee Yoon, et al. Woodpecker-inspired shock isolation by microgranular bed. *J Phys D: Appl Phys*, 2009, 42: 035501
- 3 Sang-Hee Yoon, et al. Shock isolation of micromachined device for high- $g$  applications, Chapter 20 in *Structural Dynamics of Electronic and Photonic Systems*, (edited by E. Suhir, D.S. Steinberg and T.X. Yu), John Wiley & Sons, USA, 2011
- 4 余同希, 卢国兴. 材料与结构的能量吸收. 北京: 化学工业出版社, 2006