

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0142

墨鱼骨结构的力学行为及其应变率效应*

蒋钰婷, 钟东海, 方泽辉, 丁圆圆, 周风华

(宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 墨鱼骨是一种墨鱼内部产生的生物矿化壳, 通过调节壳内的气液比从而实现墨鱼的深浅浮动, 同时满足轻质和高刚度的力学特性, 使墨鱼能够很好地适应深海环境, 所以墨鱼骨是一种典型的高比刚度的多孔材料。为探究墨鱼骨结构的力学性能, 通过 Instron 材料试验机和分离式 Hopkinson 压杆实验装置, 对墨鱼骨在不同加载应变率下的力学行为进行研究。研究表明, 墨鱼骨在准静态加载下, 其应力-应变曲线呈现典型的三阶段变化模式, 即弹性段、平台段和压实段, 具有很好地吸能缓冲作用; 随着加载应变率的提高, 墨鱼骨的初始压溃应力和平台应力也随之增加, 表明墨鱼骨材料对加载应变率存在很强的敏感性。进一步分析不同生长方向的墨鱼骨在准静态压缩下的力学行为, 结果表明随着生长方向的增加, 墨鱼骨结构的刚度和吸能性能都得到了弱化, 从而揭示了墨鱼骨材料压缩行为的各项异性。

关键词: 多孔材料; 墨鱼骨; 高比刚度; 加载应变率; 吸能特性

中图分类号: O347.3 国标学科代码: 13015 文献标志码: A

Mechanical behavior of cuttlebone structure and its strain rate effect

JIANG Yuting, ZHONG Donghai, FANG Zehui, DING Yuanyuan, ZHOU Fenghua

(Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ministry of Education, Ningbo University,
Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: Cuttlefish bone is a biomineralized shell produced inside the cuttlefish that enables deep and shallow floating by adjusting the gas-liquid ratio. As a typical porous material with high specific stiffness, its light-weight and high rigidity make it well adapted to the deep-sea environment. Consequently, cuttlebone is often mimicked to design biomimetic porous materials with high porosity and high stiffness mechanical properties. However, the mechanical behavior of cuttlebone under dynamic loading is still unclear, which is extremely unfavorable for the dynamic design of cuttlebone. This study delves into an extensive exploration of cuttlebone's mechanical behavior under compressions with different loading strain rates using Instron material testing machine and split Hopkinson pressure bar experimental device. Under quasi-static loading conditions, the compressive stress-strain curves of cuttlebone were obtained and exhibited three typical stages, namely linear elastic stage, long plateau stage and densification stage. The specific energy absorption of cuttlebone calculated from the stress-strain curve is illustrated, showing that cuttlebone has a better energy absorption capability compared with other common bionic structures and porous materials. Under dynamic loading scenarios by using split Hopkinson pressure bar, the dynamic stress strain curves of cuttlebone were obtained at loading strain rates of approximate $400\text{--}530\text{ s}^{-1}$. Both the dynamic initial crushing stress and the plateau stress of cuttlebone exhibited a pronounced escalation with increasing loading strain rates, indicating that the cuttlebone structure is strongly sensitive to the loading strain rate. Furthermore, the mechanical attributes of cuttlebone with respect to different growth directions during quasi-static compression tests were investigated. As the growth direction increased, a discernible decline in both stiffness and energy absorption performance within the cuttlebone structure was observed, thus

* 收稿日期: 2023-04-18; 修回日期: 2023-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(11702152); 浙江省自然科学基金(LY21A020005)

第一作者: 蒋钰婷(1997—), 女, 硕士研究生, jiangyuting0721@163.com

通信作者: 丁圆圆(1987—), 男, 博士, 副教授, dingyuanyuan@nbu.edu.cn

revealing the anisotropy of the compression behavior of cuttlefish bone. These insights not only deepen the understanding of cuttlebone's mechanical behavior but also offer valuable knowledge that can inform biomimetic and bioinspired engineering designs for a range of applications.

Keywords: porous material; cuttlefish bone; high specific stiffness; loading strain rate; energy absorption characteristics

近期, 基于生物微结构的仿生多孔材料被广泛提出和研究。根据生物体在自然界中的适应性, 仿生多孔材料表现出优异的力学特性。研究者们对鸟骨、蜂巢^[1-2]、墨鱼骨^[3-6]、贝壳、铁甲虫^[7]的微观结构进行观察, 发现这些天然设计的轻质多孔结构不但在拉伸或压缩加载下展现了较强的力学性能, 而且其微结构在空间上完全对称, 可以很好地支撑生命体。

墨鱼骨是一种独特的轻质多功能多孔材料, 其源自于生活在深海的墨鱼。鉴于墨鱼在深海环境中的特殊活动特性, 墨鱼骨的结构通常被视为一种具有高刚度的轻质多孔材料。这种结构不仅能够有效调节墨鱼在深水中的浮力^[8-9], 而且还起着支撑作用, 保护墨鱼体内的重要器官。具体而言, 墨鱼骨是一种轻质、高刚度、高渗透性的生物多孔材料^[10], 它在维持墨鱼在深海环境中所需特定浮力方面发挥着关键作用。墨鱼骨的结构主要由层状的高孔隙率多孔结构组成, 孔隙率可高达约 90%。其主要组成成分为文石^[11](即碳酸钙的一种结晶形式)。值得注意的是, 墨鱼骨的结构在不同种类的墨鱼之间、同一种类墨鱼的不同个体之间, 甚至同一墨鱼体内不同部位之间, 都存在显著差异。这些差异主要受墨鱼的生长状况和生存环境的影响, 进而在墨鱼骨的形态上体现出来, 如片层和柱间距的变化。Ward 等^[12]和 Boletzky^[13]的研究表明, 在生存环境压力下, 营养不良的墨鱼骨中的片层和柱间距会减小, 从而使墨鱼骨的强度显著增强。Boletzky^[13]还观察到, 墨鱼骨的形态变化可能与墨鱼骨的发育季节有关, 例如夏季和冬季发育的墨鱼骨片层高度存在明显差异。这一发现为深入理解这种独特多孔材料的性质和潜在应用提供了重要的视角。

基于墨鱼骨结构的独特力学性能, 众多科研工作者开展了深入研究。Yang 等^[14-15]利用先进的数字散斑技术, 将压缩过程中的应力-应变响应与局部应变场的演化相关联, 揭示了墨鱼骨单个腔室失效的逐渐过程, 而非瞬时发生。这一研究不仅突显了墨鱼骨在轻量化、高刚度和高能量吸收方面的优异性能, 也阐明了墨鱼如何通过其细微的“隔壁”微观结构来增强刚度。Mao 等^[16]使用 3D 打印技术制造了模拟墨鱼骨结构的多孔材料。在将这些材料的力学性能与八角形桁架点阵结构、传统聚合物泡沫及金属泡沫进行比较时, 发现墨鱼骨结构展现出卓越的强度和能量吸收能力。Yang 等^[17]通过拓扑优化技术开发出一种类似墨鱼骨的点阵材料, 并对其在冲击载荷下的变形行为和压缩特性进行了研究。结果表明, 这种新型墨鱼骨点阵材料是一种出色的抗冲击和减震候选材料, 为墨鱼骨材料的进一步应用和开发提供了新的思路和可能性。然而, 目前关于墨鱼骨材料的力学行为研究主要集中于准静态压缩性能, 对其在动态力学行为方面的探究相对有限。这一局限性对于仿生墨鱼骨结构在抗冲击、抗爆等应用领域的发展构成了阻碍。因此, 深入探索墨鱼骨结构在动态冲击行为下的性能显得尤为重要。这不仅有助于全面理解墨鱼骨材料的力学特性, 也为其在冲击环境下的应用提供了坚实的科学基础。

本文中从墨鱼骨的微观形态、不同加载应变率下的力学行为等方面开展研究, 探索墨鱼骨结构的静、动态力学行为及其应变率效应。

1 墨鱼骨材料的制备与表征

墨鱼骨材料取自于生长环境相同的东海曼氏无针墨鱼^[18], 为了减小墨鱼骨试样的离散性, 选取生长周期约为 1 a、个体大小差异不大的冷冻墨鱼, 进行解剖获得完整的墨鱼骨, 如图 1 所示。为了获得比较规整的墨鱼骨试样, 在切割过程中对墨鱼骨先进行冷冻处理, 然后进行精加工, 最终获得立方体试样。综合考虑成年墨鱼内部墨鱼骨的整体大小和墨鱼骨内部单个胞元尺寸, 墨鱼骨试样尺寸选取为 10 mm×10 mm×10 mm, 误差控制在 5% 之内, 如图 2 所示。由于墨鱼个体的差异性以及生长的随机性, 导致每个墨鱼骨试样的生长方向不同。为了减少实验误差, 将试样根据生长方向的不同分为 0°~15°, 15°~30°, 30°~45°等 3 个范围, 其中生长方向的角度定义为墨鱼骨层状结构方向与垂直方向的夹角。

墨鱼骨的内部结构呈现出复杂的多孔形态, 墨鱼骨的孔隙率一般保持在 85%~90% 之间。采用扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 对墨鱼骨的内部结构进行观察, 可以发现墨鱼骨结构呈现出横竖隔板相互交错的结构, 从而形成了许多单独的胞元通道, 如图 3 所示。通过观察微观结构, 墨鱼骨的单胞尺寸大约为宽 $200\ \mu\text{m}$ 、高 $400\ \mu\text{m}$, 由水平隔板和垂直隔膜相互组合而成, 水平隔板一般是双层结构, 上层由垂直排列的文石晶体组成, 而下层由相对于彼此旋转的纳米棒组成, 形成胶合板结构, 厚度为 $7\sim 15\ \mu\text{m}$, 垂直隔板呈波浪纹形态, 从腔室的底部到顶部(沿生长方向)摆动, 壁厚大约为 $4\sim 7\ \mu\text{m}$ 。



图 1 墨鱼骨结构

Fig. 1 Cuttlefish bone structure

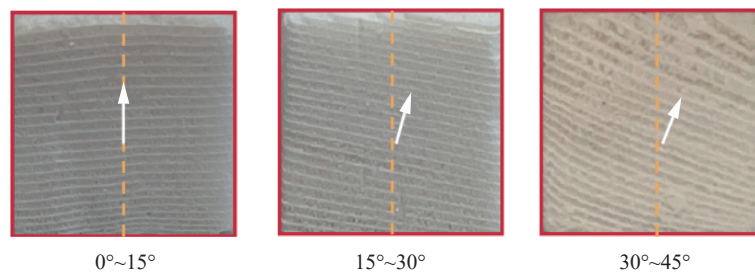


图 2 生长方向不同的墨鱼骨试样

Fig. 2 Cuttlefish bone samples with different growth directions

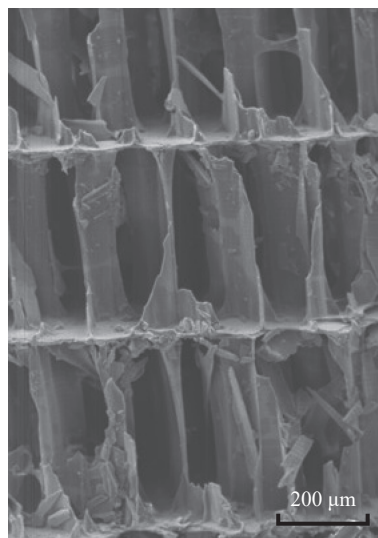


图 3 墨鱼骨的扫描电子显微镜图像

Fig. 3 Scanning electron microscope image of cuttlefish bone

2 墨鱼骨结构的准静态压缩行为

2.1 不同生长方向墨鱼骨的准静态压缩行为

采用 Instron 5966 小型电子万能试验机对墨鱼骨试样进行准静态单轴压缩实验。通过试验机自带的

采集系统记录压缩过程中的位移、压力时程数据, 采用高分辨率摄像机记录墨鱼骨试样的变形过程。在压缩过程中, 分别采用 0.01、0.1 和 1 mm/s 的压缩速率对墨鱼骨试样进行加载, 对应的墨鱼骨压缩应变率为 0.001、0.01 和 0.1 s^{-1} 。墨鱼骨试样及其压缩平台的放置情况如图 4 所示。

墨鱼骨结构的压缩应力-应变曲线和典型变形模式如图 5~6 所示, 如同其他多孔材料的压缩曲线, 表现出明显的三阶段变化模式, 分别为弹性阶段、平台阶段和密实阶段。在弹性阶段 (I), 应力以一定的杨氏模量从 0 开始增加到初始压溃应力; 在应力平台阶段 (II~III), 墨鱼骨结构的压缩应力基本保持在恒定应力水平, 这实际上对应着墨鱼骨结构在静态压缩下逐层压溃的变形机制; 最后阶段为压实阶段 (IV), 此时墨鱼骨结构已经被压实, 压缩应力随着应变的增加而急剧上升, 这一阶段墨鱼骨结构的性能理论上与基材的性能相当。

对比不同生长方向墨鱼骨的准静态应力-应变曲线, 发现随着生长方向的角度由小变大, 墨鱼骨结构的杨氏模量逐渐减小, 平台应力降低, 且伴随着较大振荡。这是由于当墨鱼骨的生长方向角度很小时, 墨鱼骨中的层状结构基本上都是水平的, 试样在压缩过程中呈现逐层压溃模式, 从而产生比较稳定的塑性变形段。当生长方向角度较大时, 墨鱼骨的层状结构将与压缩方向呈较大的夹角, 同时存在着剪切和压缩变形, 从而使得墨鱼骨在压缩过程中出现极大的不稳定变形, 从而导致平台阶段的应力下降和振荡明显。

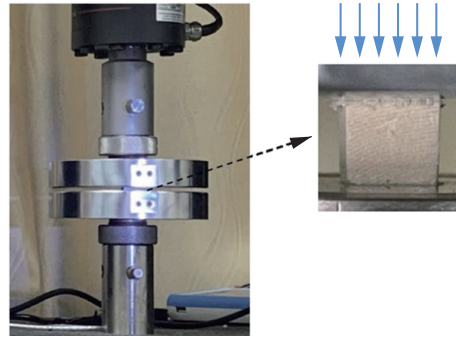


图 4 加载平台及试件放置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of loading platform and specimen placement

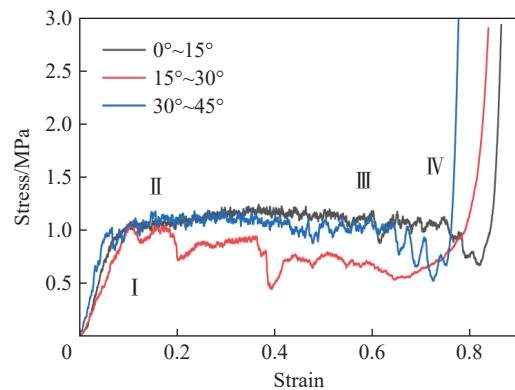
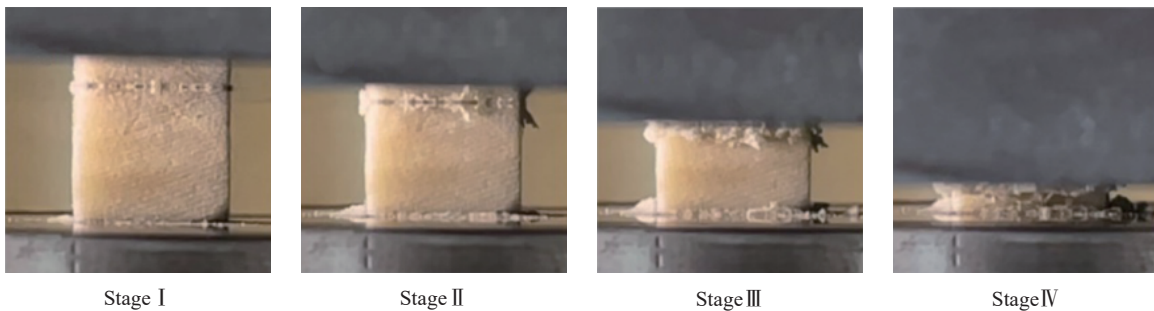


图 5 当加载应变率为 $10^{-3} s^{-1}$ 时不同生长方向墨鱼骨试样的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of cuttlefish bone specimens with different growth directions under compression strain-rate of $10^{-3} s^{-1}$



Stage I

Stage II

Stage III

Stage IV

图 6 当加载应变率为 $10^{-3} s^{-1}$ 时墨鱼骨试样的变形模式

Fig. 6 Deformation mode of cuttlefish bone under compression strain-rate of $10^{-3} s^{-1}$

2.2 不同加载应变率下的墨鱼骨准静态压缩行为

为了排除因墨鱼骨生长方向引起的实验误差, 选用生长方向为 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 的墨鱼骨试样来研究不同加载应变率下的墨鱼骨准静态压缩行为。在加载应变率分别为 10^{-3} 、 10^{-2} 和 $10^{-1} s^{-1}$ 的条件下, 墨鱼骨试样的压缩应力-应变曲线如图 7 所示。由于墨鱼骨的个体差异性, 实际的压缩实验数据存在着较大的离散性。因此, 每种应变率下的压缩实验都做了 3 组重复性实验, 根据重复性实验结果, 绘制了不同加载应变率

下的应力应变曲线, 其中黑色应力-应变曲线即为均值曲线, 阴影部分即为由误差棒集合而成的误差带。

在不同加载应变率下的墨鱼骨均值应力-应变曲线对比结果如图 7 所示。在弹性阶段, 墨鱼骨发生弹性变形, 随着加载应变率的增加, 弹性模量逐渐增大, 并且初始压溃应力也随之增加; 在塑性变形阶段, 墨鱼骨通过隔板的弯曲变形、相互摩擦以及坍塌破坏等方式发生逐层压溃变形, 从而使得其塑性阶段呈现出较长的应力平台段。随着加载应变率的提高, 墨鱼骨材料的平台应力也随之增加。因此, 加载应变率对墨鱼骨的压缩力学行为具有较大的影响。

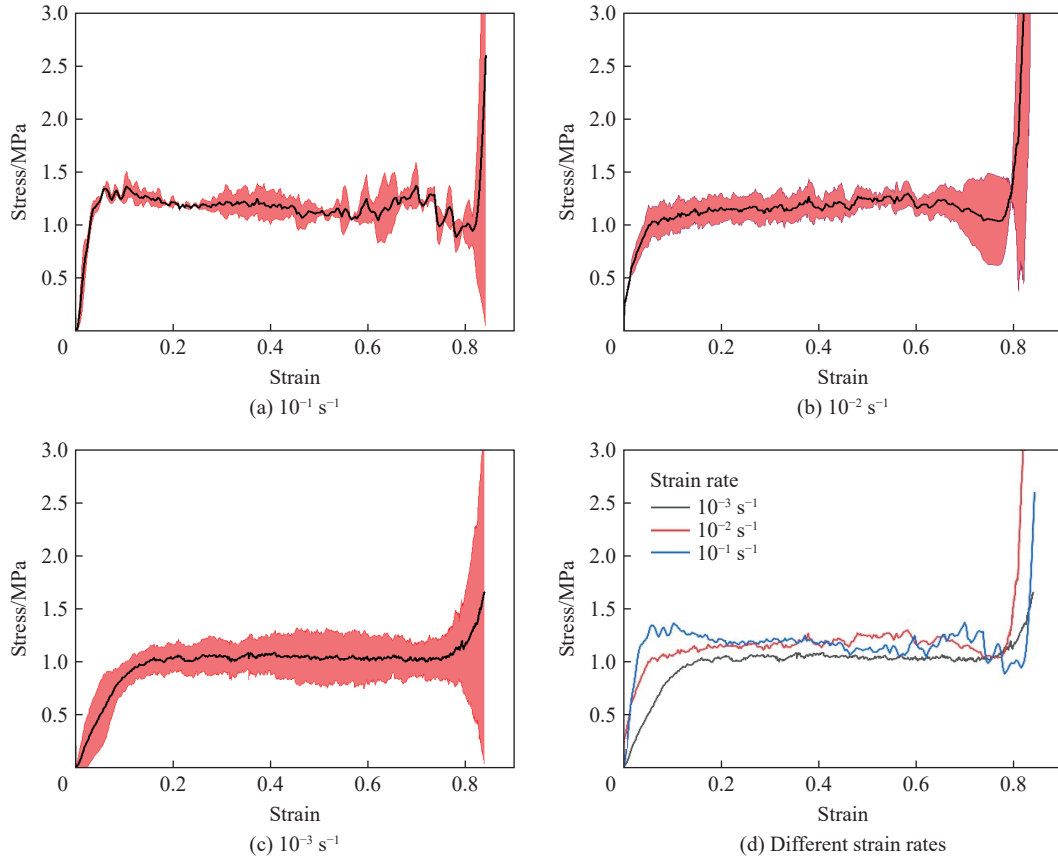


图 7 墨鱼骨试样在不同应变率下的压缩应力-应变曲线

Fig. 7 Compressive stress-strain curves of cuttlefish bone specimens under different strain rates

2.3 墨鱼骨的吸能行为

一般而言, 多孔材料的吸能性能与材料的密度有关。因此, 引入比吸能 Q , 即单位质量吸收的能量, 来研究墨鱼骨材料的能量吸收性能, 比吸能定义为:

$$Q = \frac{\int_0^{\varepsilon_x} \sigma d\varepsilon}{\rho} \quad (1)$$

式中: ρ 为试样的密度, ε_x 为任意压缩应变。然而随着墨鱼骨的压实, 其将会失去吸能缓冲性能, 所以墨鱼骨的有效比吸能需要结合有效压缩应变来确定。多孔材料的有效压缩应变也称为压实应变 ε_D , 超过此值, 墨鱼骨试样可视为压实固体。压实应变 ε_D 一般可通过能量吸收效率 η 的最大值来确定, η 可表示为:

$$\eta = \frac{\int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma_{\max}(\varepsilon)} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{\max}(\varepsilon)$ 为除初始压溃应力外的 $[0, \varepsilon]$ 区间内的最大压应力。随着压缩应变的增加, 能量吸收效率 η 达到最大值, 对应的压缩应变为压实应变 ε_D 。显然, 当压缩应变超过致密应变时, 压缩应力将不再维持在平台应力段了, 呈现快速增长变化, 这意味着墨鱼骨材料的有效能量吸收能力可以由 $[0, \varepsilon_D]$ 区间内的

比吸能来评估。因此,有效比吸能可以表示为:

$$Q_e = \frac{\int_0^{\epsilon_D} \sigma d\epsilon}{\rho} \quad (3)$$

考虑墨鱼骨在 10^{-3} s^{-1} 压缩应变率下的力学行为,其应力-应变曲线、比吸能曲线和吸能效率曲线如图 8~9 所示。随着应变的增加,墨鱼骨试样的比吸能逐渐增大。当压缩应变超过某一特定应变时,比吸能随着应变的增加而急剧上涨,这是由于此时试样已完全被压实,应力急剧增大。为了表征墨鱼骨结构的有效压缩行程,通过吸能效率曲线的最大值来确定墨鱼骨结构的压实应变,从而可以确定墨鱼骨结构的有效比吸能。随着压缩应变的增加,吸能效率曲线呈现先增加后下降的变化曲线,这是由于一开始吸能累计量比应力增加速度更快,但墨鱼骨将被压实时,压缩应力的增加速度将大于吸能能力,吸能效率就开始下降。所以可以通过吸能效率的最大值所对应的应变表征压实应变,如图 9 所示。

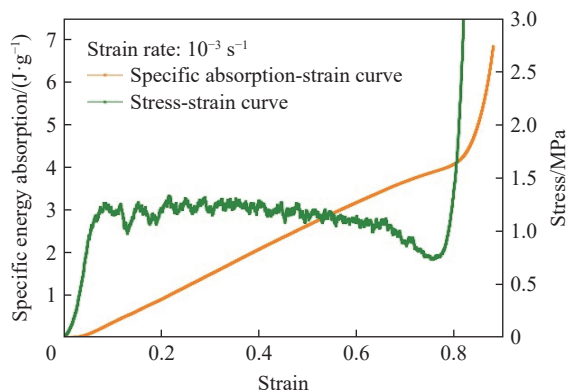


图 8 在加载应变率 10^{-3} s^{-1} 条件下墨鱼骨试样的应力-应变曲线和比吸能曲线

Fig. 8 Stress-strain curve and specific energy absorption of cuttlefish bone samples under compressive strain-rate of 10^{-3} s^{-1}

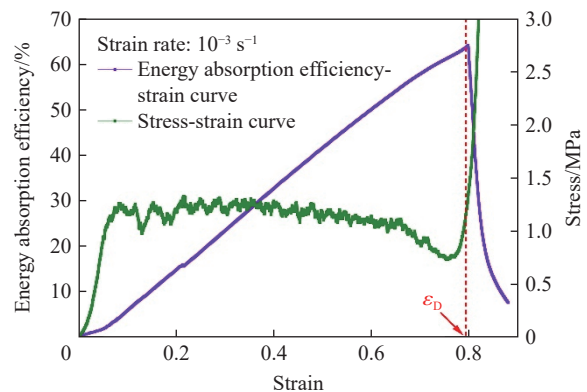


图 9 在加载应变率 10^{-3} s^{-1} 条件下墨鱼骨试样的应力-应变曲线和吸能效率曲线

Fig. 9 Stress-strain curve and energy absorption efficiency of cuttlefish bone samples under compressive strain-rate of 10^{-3} s^{-1}

当墨鱼骨的压实应变确定以后,墨鱼骨的有效比吸能可通过式(3)确定。将墨鱼骨材料的有效比吸能与蜘蛛网^[19]、柚子皮^[19]、骨骼肌^[19]、蜂窝、泡沫铝^[20]、蜂窝铝^[20]等材料的的有效比吸能作对比,如图 10 所示,结果表明墨鱼骨的有效比吸能约为 $3.9 \sim 4.9 \text{ J/g}$,相比其他仿生结构材料和常规多孔材料(如泡沫铝、蜂窝铝),墨鱼骨的吸能性能表现出众,说明墨鱼骨是一种具有良好的吸能能力的仿生多孔材料。

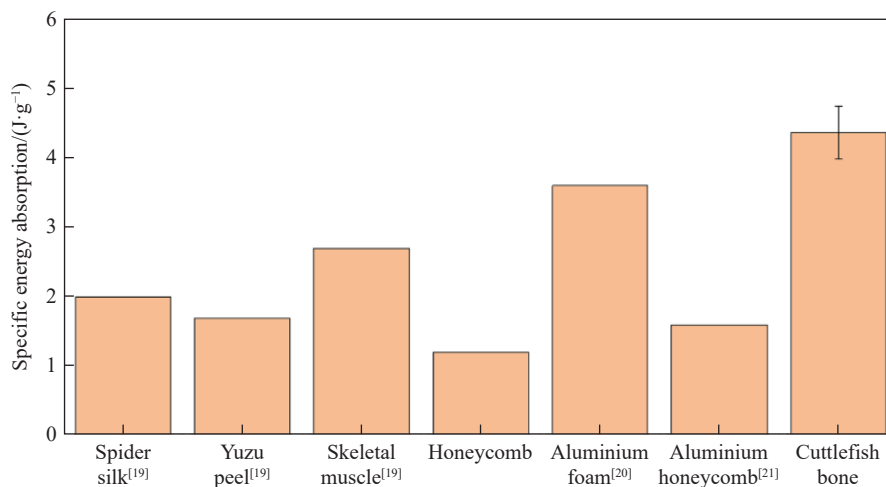


图 10 不同仿生材料的有效比吸能对比

Fig. 10 Comparison of effective specific energy absorption of different bio-inspired materials

3 墨鱼骨的动力压缩行为

为了探讨墨鱼骨结构在高应变率下的压缩行为,采用 Hopkinson 杆实验技术对墨鱼骨试样进行动态压缩测试。由于墨鱼骨试样的细观结构特性,要将整个试样压实需要较长的加载时间和较大的加载能量,所以采用传统的分离式 Hopkinson 压杆实验技术无法实现墨鱼骨结构的变形测试。本文将采用直撞式 Hopkinson 杆实验技术对墨鱼骨的动力行为进行测试^[21],并结合应力波分离技术来实现墨鱼骨结构的长时动态应力应变曲线提取。

根据测试要求,选用直径为 14.5 mm 的钢杆作为 Hopkinson 压杆的撞击杆、透射杆和吸收杆。透射杆上同时粘贴普通电阻应变片和半导体应变片用于应力信号测量,并采用高速摄影仪对墨鱼骨的变形过程进行记录,拍摄频率为 $50\,000\text{ s}^{-1}$ 。加载装置和试样的位置如图 11 所示,从左往右顺序是撞击杆、墨鱼骨试件和透射杆。

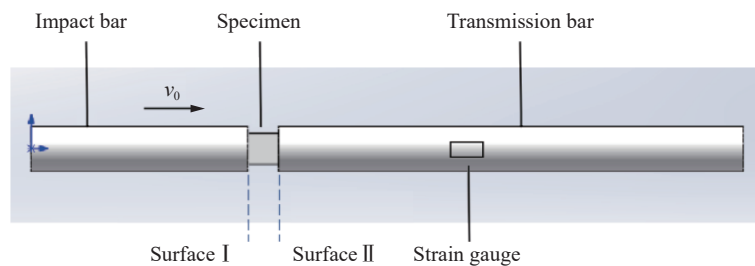


图 11 直撞式霍普金森杆装置示意图

Fig. 11 Schematic diagram of direct impact Hopkinson pressure bar

陈浩等^[22]在引入应力均匀性假设的前提下,提出直撞式 Hopkinson 杆中试件的应变率 $\dot{\varepsilon}_s$ 、应变 ε_s 、应力 σ_s 可由以下公式进行计算:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{1}{L_s} \left[v - \int_0^t \frac{A_0 E_0 \varepsilon_t(\tau)}{m} d\tau - c_0 \varepsilon_t(t) \right] \\ \varepsilon_s(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}_s(\tau) d\tau \\ \sigma_s(t) = \frac{A_0}{A_s} E_0 \varepsilon_t(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: m 和 v 分别表示撞击杆的质量及初速度, L_s 为被测试样的原始长度, E_0 为弹性杆的杨氏模量, c_0 为弹性杆中一维应力波波速, A_s 和 A_0 是试样和压杆的横截面积, $\varepsilon_t(t)$ 为透射杆中的右行应力波,考虑到应变片提取的长时应力波信号含有反射波叠加信号,所以需要进一步通过应力波分离技术^[21-22]得到完整的右行波信号。

墨鱼骨在不同加载气压下的应变率变化曲线和动态应力应变曲线如图 12~13 所示。当给定加载气压后,由直撞式 Hopkinson 杆实验技术基本上可以实现墨鱼骨试样在恒应变率下的大变形加载,如图 12 所示,随着加载气压从 0.15 MPa 增加到 0.30 MPa,墨鱼骨材料的加载应变率从 380 s^{-1} 增加到 530 s^{-1} ,而且加载应变率具有很好的稳定性。墨鱼骨的典型动态应力应变曲线如图 13 所示,可见墨鱼骨的动态应力应变曲线也呈现出弹性段、平台段和压实段,而且随着加载应变从 400 s^{-1} 增加到 530 s^{-1} ,墨鱼骨的动态平台应力也随之增加。

采用高速摄影仪记录墨鱼骨结构在动态冲击过程中的变形行为,如图 14 所示。与准静态变形模式相比,动态载荷下的墨鱼骨展现出不一样的变形模式,主要体现在其塑性变形并不是在一个端面触发,而是同时在试样的两端面开始触发并逐步被压实。由此可知,墨鱼骨的变形模式也受加载应变率的影响。由于变形模式随着加载应变率的增加而改变,所以墨鱼骨的应力应变行为也将受加载应变率的影响。

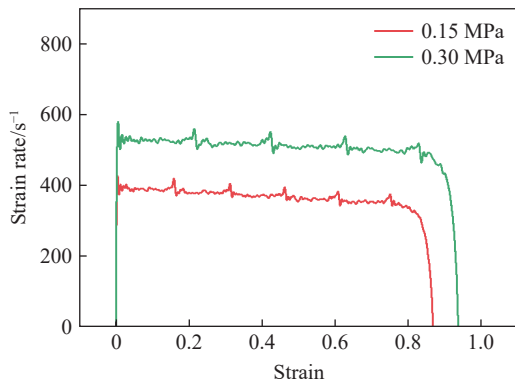


图 12 不同加载气压下的应变率变化曲线
Fig. 12 Variation curves of strain rate under different loading pressure

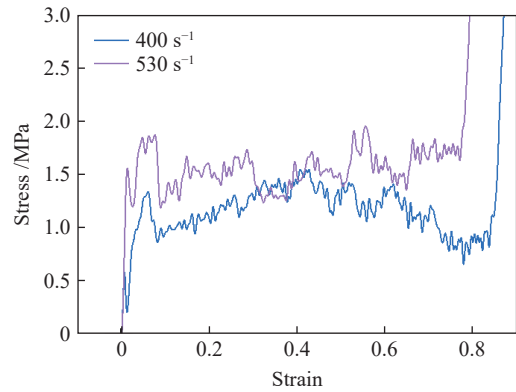


图 13 不同加载应变率下的墨鱼骨动态应力-应变曲线
Fig. 13 Dynamic stress-strain curves of cuttlebone under different loading strain rates

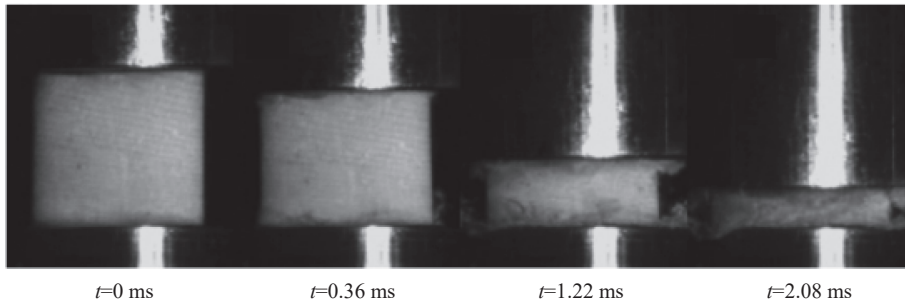


图 14 墨鱼骨在动态试验下的破碎过程

Fig. 14 Crushing process of cuttlefish bone under dynamic test

考虑不同加载应变率下的墨鱼骨压缩应力-应变曲线,如图 15 所示。当加载应变率分别为 10^{-3} 、 10^{-2} 、 10^{-1} 和 530 s^{-1} 时,墨鱼骨的压缩应力-应变曲线存在着明显的差异,具体表现在随着加载应变率的提高,墨鱼骨的初始压溃应力和平台应力明显增加,从而其吸能能力也随之增加。为了评估墨鱼骨结构的平均压溃应力,引入压缩平台应力 σ_{pl} ,其定义为:

$$\sigma_{pl} = \frac{\int_{\varepsilon_y}^{\varepsilon_D} \sigma d\varepsilon}{\varepsilon_D} \quad (5)$$

式中: ε_y 是指初始屈服应变。由此,对不同加载应变率下的应力应变曲线进行计算,可以获得墨鱼骨试样在不同加载应变率下的压缩平台应力,如图 16 所示。当加载应变率分别为 10^{-3} 、 10^{-2} 、 10^{-1} 和 530 s^{-1}

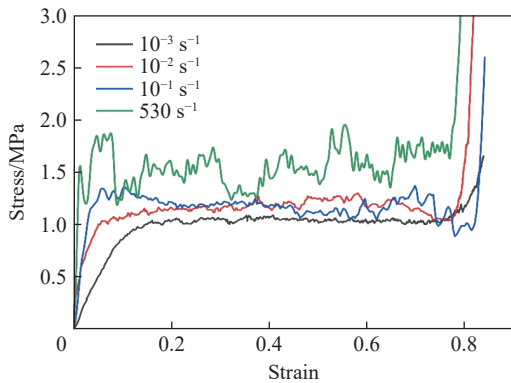


图 15 在不同压缩应变率下墨鱼骨试样的应力-应变曲线
Fig. 15 Stress-strain curves of cuttlebone samples under different loading strain rates

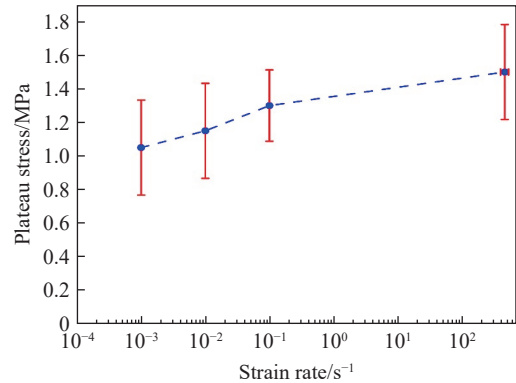


图 16 加载应变率增加时墨鱼骨平台应力的变化曲线
Fig. 16 The variation of the plateau stress of cuttlebone with increase of compressive strain-rate

时, 压缩平台应力分别为 1.08、1.18、1.32 和 1.52 MPa。可见, 与准静态压缩条件下的平台应力相比, 墨鱼骨的动态平台应力要高得多, 这意味着墨鱼骨的应力应变行为具有明显的应变率效应。从力学机制上看, 这种结构应变率效应可认为是由墨鱼骨基底材料的应变率效应所引起的, 文献 [23-24] 中也可以发现动物的皮质骨存在着很明显的应变率效应。

4 结 论

本文中通过 Instron 材料试验机和直撞式 Hopkinson 杆实验技术对墨鱼骨试样的静、动态力学行为进行研究。研究表明: (1) 墨鱼骨结构是一种典型的轻质多孔结构, 其准静态应力应变曲线表现出典型的三阶段形式, 即弹性段、平台段和压实段; (2) 墨鱼骨结构的生长方向对其静态压缩行为具有很大的影响, 随着生长方向的增加, 墨鱼骨结构的杨氏模量逐渐减小, 平台应力也随之降低; (3) 墨鱼骨结构具有优异的吸能能力, 其静态有效比吸能可达到了 4.1 J/g, 优于大多数仿生多孔结构和常规多孔材料的有效比吸能; (4) 墨鱼骨结构的力学行为对加载应变率具有很强的敏感性, 具体表现在其平台应力随着加载应变率的提升而上升。

参考文献:

- [1] COMPTON B G, LEWIS J A. 3D-Printing of lightweight cellular composites [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(34): 5930–5935. DOI: 10.1002/adma.201401804.
- [2] ZOK F W, RATHBUN H, HE M, et al. Structural performance of metallic sandwich panels with square honeycomb cores [J]. *Philosophical Magazine*, 2005, 85: 3207–34. DOI: 10.1080/14786430500073945.
- [3] CADMAN J, CHEN Y H, ZHOU S W, et al. Creating biomaterials inspired by the microstructure of cuttlebone [J]. *Materials Science Forum*, 2010, 654: 2229–2232. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.654-656.2229.
- [4] SHERRARD K M. Cuttlebone morphology limits habitat depth in eleven species of sepia (cephalopoda: sepiidae) [J]. *The Biological Bulletin*, 2000, 198(3): 404–414. DOI: 10.2307/1542696.
- [5] ROCHA J, LEMOS A F, AGATHOPOULOS S, et al. Scaffolds for bone restoration from cuttlefish [J]. *Bone*, 2005, 37(6): 850–857. DOI: 10.1016/j.bone.2005.06.018.
- [6] JIAN S, WANG Y, ZHOU W, et al. Topology optimization-guided lattice composites and their mechanical characterizations [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 60: 402–411. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.12.027.
- [7] RIVERA J, HASSEII M S, RESTREPO D, et al. Publisher correction: Toughening mechanisms of the elytra of the diabolical ironclad beetle [J]. *Nature*, 590(7844): E21. DOI: 10.1038/s41586-020-03106-6.
- [8] DENTON E J, GILPIN-BROWN J B. The buoyancy of the cuttlefish, sepia officinalis [J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1961, 41(2): 319–342. DOI: 10.1017/s0025315400023948.
- [9] ROCHA J H G, LEMOS A F, AGATHOPOULOS S, et al. Hydrothermal growth of hydroxyapatite scaffolds from aragonitic cuttlefish bones [J]. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 2006, 77(1): 160–168. DOI: 10.1002/jbm.a.30566.
- [10] BIRCHALL J D, THOMAS N L. On the architecture and function of cuttlefish bone [J]. *Journal of Materials Science*, 1983, 18(7): 2081–2086. DOI: 10.1007/bf00555001.
- [11] CADMAN J, ZHOU S, CHEN Y, et al. Characterization of cuttlebone for a biomimetic design of cellular structures [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2010, 26(1): 27–35. DOI: 10.1007/s10409-009-0310-2.
- [12] WARD P D, BOLETZKY S V. Shell implosion depth and implosion morphologies in three species of sepia (cephalopoda) from the Mediterranean Sea [J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1984, 64: 955–966. DOI: 10.1017/s0025315400047366.
- [13] BOLETZKY S V. Biology of early life stages in cephalopod molluscs [J]. *Advances in Marine Biology*, 2003, 44: 143–203. DOI: 10.1016/S0065-2881(03)44003-0.
- [14] YANG T, JIA Z, CHEN H S, et al. Mechanical design of the highly porous cuttlebone: a bioceramic hard buoyancy tank for cuttlefish [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(38): 23450–23459. DOI: 10.1073/pnas.2009531117.
- [15] EDWARD L, JIA Z, YANG T, et al. Multiscale mechanical design of the lightweight, stiff, and damage-tolerant cuttlebone: a

- computational study [J]. *Acta Biomaterialia*, 2022, 154: 312–323. DOI: 10.1016/j.actbio.2022.09.057.
- [16] MAO A, ZHAO N, LIANG Y, et al. Mechanically efficient cellular materials inspired by cuttlebone [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(15): 2007348. DOI: 10.1002/adma.202007348.
- [17] YANG C, LI Q M. Advanced lattice material with high energy absorption based on topology optimization [J]. *Mechanics of Materials*, 2020, 148(10): 103536. DOI: 10.1016/j.mechmat.2020.103536.
- [18] 谢慕原, 李鹏飞, 徐汉祥, 等. 基于内壳生长纹的浙江海域曼氏无针乌贼生长特性 [J]. *浙江海洋大学学报 (自然科学版)*, 2022, 41(4): 279–285. DOI: 10.3969/j.issn.1008-830X.2022.04.001.
- XIE M Y, LI P F, XU H X, et al. Growth characteristics of *sepiella maindroni* based on growth increments of cuttlebone in coastal water of Zhejiang [J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition)*, 2022, 41(4): 279–285. DOI: 10.3969/j.issn.1008-830X.2022.04.001.
- [19] QI C, JIANG F, YANG S. Advanced honeycomb designs for improving mechanical properties: A review [J]. *Composites, Part B. Engineering*, 2021, 227: 109393. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109393.
- [20] 曾斐, 潘艺, 胡时胜. 泡沫铝缓冲吸能评估及其特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2002, 22(4): 358–362.
- ZENG F, PAN Y, HU S S. Evaluation of cushioning properties and energy-absorption capability of foam aluminium [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(4): 358–362.
- [21] 宋玉环, 肖久梅. 聚氨酯/蜂窝铝复合材料的缓冲吸能特性研究 [C]//北京力学学会学术年会, 北京, 2016: 442–443.
- [22] 陈浩, 郭鑫, 宋力. 直接撞击式大变形霍普金森压杆实验技术 [J]. *宁波大学学报 (理工版)*, 2018, 31(4): 70–73. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5132.2018.04.012.
- CHEN H, GUO X, SONG L. A direct impact Hopkinson pressure bar technique for material testing in large deformation [J]. *Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition)*, 2018, 31(4): 70–73. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5132.2018.04.012.
- [23] PARK S. W, ZHOU M. Separation of elastic waves in split Hopkinson bars using one-point strain measurements [J]. *Experimental Mechanics*, 1999, 39(4): 287–294. DOI: 10.1007/bf02329807.
- [24] PIYUSH U, PRAVEER S, NAVIN K. Effect of organic matrix alteration on strain rate dependent mechanical behavior of cortical bone [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2022, 125: 104910. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2021.104910.

(责任编辑 王易难)