北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

等密度针阔叶材微观孔隙结构对其压缩吸能行为的影响机制

杨志一 吕文华 祁斌 胡极航 金枝

Influence of micro-pore structure on compressive energy absorption behavior in isodensity hardwood and softwood

Yang Zhiyi, L ü Wenhua, Qi Bin, Hu Jihang, Jin Zhi

引用本文:
杨志一, 吕文华, 祁斌, 胡极航, 金枝. 等密度针阔叶材微观孔隙结构对其压缩吸能行为的影响机制[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(3):203-210. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250300
Yang Zhiyi, L ü Wenhua, Qi Bin, Hu Jihang, Jin Zhi. Influence of micro-pore structure on compressive energy absorption behavior in isodensity hardwood and softwood[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(3):203-210. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250300

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20250300

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

木材压缩吸能特性的尺寸与形状效应
Size and shape effects of wood compression energy absorption characteristics
北京林业大学学报, 2023, 45(11): 152-160. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230252

水分对木材细胞壁孔隙结构影响研究进展
Research progress on the effect of water on pore structure of wood cell wall
北京林业大学学报, 2024, 46(2): 1-8. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230243

不同预处理方法对木材细胞壁孔隙结构影响
Effects of different pretreatment methods on the pore structure of wood cell wall
北京林业大学学报, 2023, 45(11): 140-151. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230158

酶解木质基分级多孔碳的制备及其电化学性能
Preparation and its electrochemical properties of enzymatically hydrolyzed wood-based hierarchical porous carbon
北京林业大学学报, 2024, 46(10): 136-143. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20240026

基于糠醇改性的木材细胞壁孔隙变化对水分的影响
Effects of cell wall pore changes on water of wood modified by furfuryl alcohol
北京林业大学学报, 2023, 45(9): 127-136. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230156

木材微观结构分析方法与特征参数
Analysis methods and characteristic parameters of wood microstructure
北京林业大学学报, 2025, 47(3): 7-18. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20240287

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250300

等密度针阔叶材微观孔隙结构对其压缩吸能行为的影响机制

杨志一　吕文华　祁　斌　胡极航　金　枝
（中国林业科学研究院木材工业研究所，北京 100091）

摘要:【目的】木材作为一种天然多孔材料，在防护领域具有重要应用潜力，但其复杂的多级孔隙结构与各向异性导致现有基于人工材料的吸能理论适用性有限，限制了其在减震领域中的精准设计与高值利用。为此，本研究选取密度相同的典型针叶材与阔叶材，系统比较二者微观孔隙构造对其压缩吸能行为的影响，以期为减震木材的科学遴选、结构设计与性能优化提供理论依据。**【方法】**以密度均为 0.335 g/cm^3 的杉木（针叶材）和轻木（阔叶材）为研究对象，首先采用压汞法和显微观察系统表征其多级孔隙结构及解剖特征；随后通过准静态压缩实验测试二者在顺纹与横纹方向的力学响应，获取应力−应变曲线，并计算能量吸收与力学指标；同时结合超景深三维显微系统动态观察压缩过程中的微观破坏演变过程及形貌变化。**【结果】**(1)尽管杉木与轻木密度相同，总孔隙率相近，但其细胞结构与孔隙分布在多个尺度上存在显著差异。杉木以管胞为主要组成（占比约 95%），早晚材渐变，管胞横截面多呈长方形或多边形；轻木为散孔材，木纤维占比约 75%，横截面接近正六边形。(2)孔隙分析显示，杉木孔径分布更分散，大孔 II 更多，轻木则孔径较小，分布集中、微孔更多。(3)力学测试表明：顺纹压缩时，轻木呈现较平稳的平台阶段，杉木则出现明显应力塌陷；横纹压缩时二者均单调递增呈“应变硬化”，杉木的压缩强度高于轻木。(4)能量吸收分析进一步揭示，轻木在顺纹方向吸能更优且过程平稳，杉木则在横纹方向表现更佳，该差异主要源于细胞形态、材质均匀性及化学组成等因素。(5)破坏形貌观察发现，顺纹压缩下杉木沿木射线与早晚材界面产生贯通裂纹，轻木破坏相对完整；横纹压缩时，杉木早材管胞与轻木导管分别成为主要变形薄弱部位。**【结论】**木材的微观孔隙构造对其压缩吸能行为具有决定性影响。在相同密度下，轻木因纤维截面近似正六边形、材质均匀且微孔丰富，在顺纹压缩中表现出更优的吸能平稳性与总量；杉木则因管胞腔径差异小，早晚材呈梯度分布及较高木质素含量，在横纹压缩中具备更好的能量吸收能力。因此，在实际工程应用中，应根据具体载荷方向与缓冲需求，选择具有相应孔隙特征的木材。本研究从微观结构角度揭示了木材的压缩吸能影响机制，不仅可为防护领域中的木材选材与结构设计提供理论指导，也可为仿生设计高性能多孔吸能材料提供参考。

关键词：杉木；轻木；等密度；孔隙结构；压缩吸能；准静态压缩；减震；防护材料；仿生设计
中图分类号：S781；TB332；O347　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)03−0203−08
引文格式：杨志一，吕文华，祁斌，等. 等密度针阔叶材微观孔隙结构对其压缩吸能行为的影响机制［J］. 北京林业大学学报，2026，48(3)：203−210. Yang Zhiyi, Lü Wenhua, Qi Bin, et al. Influence of micro-pore structure on compressive energy absorption behavior in isodensity hardwood and softwood［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(3): 203−210.

Influence of micro-pore structure on compressive energy absorption behavior in isodensity hardwood and softwood

Yang Zhiyi　Lü Wenhua　Qi Bin　Hu Jihang　Jin Zhi
(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: ［**Objective**］ Wood, as a natural porous material, holds significant potential in protective applications. However, its complex hierarchical pore structure and anisotropy limit the applicability of

收稿日期: 2025−08−06　**修回日期:** 2026−01−04
基金项目: 国家自然科学基金项目（32371805）。
第一作者: 杨志一。主要研究方向：木材多功能改性。Email：983436867@qq.com　地址：100091 北京市海淀区香山路中国林业科学研究院木材工业研究所。
责任作者: 吕文华，研究员。主要研究方向：木材多功能改性。Email: lwh_lily@163.com　地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

existing energy absorption theories developed for synthetic materials, thereby hindering precise design and high-value utilization in shock absorption. To address this, this study compares two representative wood species—softwood and hardwood—with equal-density, systematically investigating how their microstructural pore architectures influence compressive energy absorption behavior. The findings aim to provide theoretical foundations for scientific selection, structural design, and performance optimization of shock-absorbing wood materials. [**Method**] *Cunninghamia lanceolata* (softwood) and *Ochroma pyramidale* (hardwood), both with a density of 0.335 g/cm^3, were selected as experimental materials. Mercury intrusion porosimetry and microscopic observation were employed to characterize their hierarchical pore structures and anatomical features. Quasi-static compression tests were conducted along longitudinal and transverse grain directions to obtain stress–strain curves and calculate energy absorption and mechanical parameters. Additionally, a 3D ultra-depth-of-field microscopy system was used to dynamically observe microstructural failure evolution and morphological changes during compression. [**Result**] (1) Despite similar densities and total porosities, significant differences in cellular structure and pore distribution across multiple scales were observed. *Cunninghamia lanceolata* consisted predominantly of tracheids (~ 95%), with gradual earlywood-to-latewood transition and rectangular or polygonal cross-sections; *Ochroma pyramidale*, a diffuse-porous hardwood, contained ~ 75% fibers with nearly regular hexagonal cross-sections. (2) Pore size analysis revealed that *Cunninghamia lanceolata* exhibited a broader pore size distribution with more macropores (Type II), whereas *Ochroma pyramidale* showed smaller, more concentrated pores and a higher proportion of micropores. (3) Mechanical testing indicated that under longitudinal compression, *Ochroma pyramidale* displayed a stable plateau phase, while *Cunninghamia lanceolata* exhibited pronounced stress collapse. Under transverse compression, both species showed monotonic " strain hardening" behavior, with *Cunninghamia lanceolata* demonstrating higher compressive strength. (4) Energy absorption analysis further demonstrated that *Ochroma pyramidale* performed better in longitudinal compression with smoother energy absorption, whereas *Cunninghamia lanceolata* excelled in transverse compression. These differences primarily stem from variations in cell morphology, material homogeneity, and chemical composition. (5) Failure morphology observations revealed that longitudinal compression induced through-cracks along rays and earlywood–latewood interfaces in *Cunninghamia lanceolata*, while *Ochroma pyramidale* maintained relatively intact structure. Under transverse compression, earlywood tracheids in *Cunninghamia lanceolata* and vessels in *Ochroma pyramidale* became the primary sites of deformation and failure. [**Conclusion**] The microstructural pore architecture of wood decisively governs its compressive energy absorption behavior. At equal-density, *Ochroma pyramidale* achieves superior energy absorption capacity and stability in longitudinal compression due to its near-hexagonal fiber cross-sections, material uniformity, and abundant micropores. In contrast, *Cunninghamia lanceolata* exhibits better transverse energy absorption owing to minimal tracheid lumen diameter variation, graded earlywood–latewood distribution, and higher lignin content. Therefore, in practical engineering applications, wood selection should be guided by specific loading direction and cushioning requirements. This study elucidates the compressive energy absorption mechanisms of wood from a microstructural perspective, offering theoretical guidance for material selection and structural design in protective applications and providing insights for bio-inspired development of high-performance porous energy-absorbing materials.

Key words: *Cunninghamia lanceolata*; *Ochroma pyramidale*; isodensity; pore structure; energy absorption; quasi-static compression; shock absorption; protective material; biomimetic design

包装材料在实际服役环境中主要承受压缩载荷，其防护核心在于通过自身塑性变形来耗散外部动能，实现对被保护对象的缓冲作用[1]。多孔吸能材料因其独特的胞状结构和变形机制，可在近乎恒定应力下实现大变形耗能，在包装缓冲领域具有不可替代的吸能防护作用[2]。与泡沫金属、聚氨酯泡沫等高能耗人工多孔材料相比，木材作为天然高分子复合而成的生物质多孔材料，具有固碳、可再生、易加工、

成本低等独特优势，在包装工程、交通运输及航空航天等高端防护领域应用潜力巨大[3−4]。木材作为核燃料运输容器减震器的关键填充材料，压缩吸能可靠性已获工程验证，但压缩吸能相关基础研究却远滞后于应用需求[5]。

当前，多孔材料吸能设计的理论体系主要建立在人工材料的研究基础上，强调通过协同调控孔壁基体特性、孔隙率及孔隙参数（大小、形状、分布）来优化材料的综合能量吸收性能[6]。其中，孔隙率可影响可压缩体积与平台区长度[7]，而孔径参数则控制变形传播路径与平台稳定性[8−9]。针对多孔材料的缓冲行为，目前主要的研究方法是获取应力−应变（缓冲）曲线并计算其在压缩过程中的吸收能量和吸能效率等指标[10]。理想的吸能材料，应在较宽的压缩应变范围内维持应力平稳，形成较长的平台阶段，从而实现能量的稳定耗散[11]。然而，木材经亿万年自然进化而成的多级孔隙构造极为复杂，与人工材料孔隙存在本质差异，其力学响应源于细胞类型、形态、尺寸、壁厚及排列方式等精细结构，且呈现显著的正交各向异性[12]。木材固有的结构复杂性与各向异性，使得基于人工多孔材料建立的经典压缩吸能理论在直接应用于木材时，存在一定的局限性。

密度是评价木材物理力学性能的关键指标，与强度、刚度及吸能能力显著正相关[13]。针、阔叶材孔隙构造差异显著，主要体现在细胞类型所关联的大孔形态及分布差异[14]，即使密度相同，也可能因微观孔隙构造不同表现出迥异的力学行为与吸能响应。为揭示木材不同孔隙构造的压缩吸能效应及影响机制，选取等密度针叶材与阔叶材，通过显微观察和压汞法，表征两者解剖和孔隙结构差异；利用准静态压缩实验，系统对比两者不同纹理方向的力学响应、吸能特性及破坏模式，以期为减震木材的科学选材、结构调控与性能优化提供理论支撑。

1　材料与方法

1.1　材　料

人工林杉木（*Cunninghamia lanceolata*），产自江西；轻木（*Ochroma pyramidale*），产自巴布亚新几内亚；气干密度均为（0.335 ± 0.010）g/cm^3，含水率 9% ~ 12%。

1.2　研究方法

1.2.1　解剖特性

选取无缺陷边材，沿相同生长轮，制备 10 mm × 10 mm × 10 mm 试样。利用 Leica RM 2245 轮转式切片机切取厚度为 10 ~ 15 μm 的木材切片，经 1% 番红溶液浸泡染色、乙醇溶液脱水、二甲苯溶液透明，再用中性树胶封片，利用 Olympus BX51 光学显微镜观察木材微观构造，并借助 Image J 软件测算解剖参数。

1.2.2　孔隙结构

选取无缺陷边材，沿相同生长轮，制备 10 mm × 10 mm × 10 mm 试样。将试样干燥至绝干，利用压汞仪 AutoPore IV 9500，测试木材的孔隙率、累计孔体积、孔径大小和分布等孔隙特性，孔径采用 Washburn 公式计算[15]，重复 3 次，取平均值。

1.2.3　压缩性能

制备 20 mm（顺纹 L）× 20 mm（径向 R）× 30 mm（弦向 T）、30 mm（L）× 20 mm（R）× 20 mm（T）、20 mm（L）× 30 mm（R）× 20 mm（T）三种标准试样，30 mm 方向为压缩纹理方向。参照 GB/T 1927.11—2022《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第 11 部分：顺纹抗压强度测定》和 GB/T 1927.12—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第 12 部分：横纹抗压强度测定》，利用万能力学试验机（深圳万测 ETM105D），分别沿木材顺纹、径向、弦向进行压缩测试，加载速度 5 mm/min，压缩行程 27 mm，获得压缩应力－应变曲线，计算破坏强度 σ_c、平台应力 σ_{pl}、致密化应变 ε_d、单位体积吸能值 E_A 和理想吸能率 I 等力学及吸能特性指标[16]，重复 6 次，取平均值；利用高清数码相机拍摄试样压缩过程中的宏观破坏形貌。

1.2.4　微观破坏模式

通过 Leica RM 2245 轮转式切片机，抛光试样，根据前期研究[16]获得的木材应力−应变曲线特征，选取了 4 个典型应变点：1% 应变（弹性阶段）、20% 应变（平台前期）、40% 应变（平台中期）和 60% 应变（致密化过渡期）。利用 Keyence VHX-600 超景深三维显微系统，考察木材在压缩进程中的微观破坏演变及形貌变化。

2　结果与讨论

2.1　解剖特性

等密度杉木和轻木的切面微观构造（图 1）显示两者细胞形态、大小和分布差异显著。针叶材杉木，细胞组成简单，早晚材渐变，晚材带较窄，管胞弦径 18 ~ 38 μm，早材和晚材管胞在横截面上分别呈不规则多边形和长方形；轴向薄壁组织星散状；木射线单列，高 2 ~ 15 细胞；管胞比量高达 95.2%，木射线比量 4.56%，轴向薄壁组织比量仅 0.24%。轻木为散孔阔叶材，导管为卵圆或圆形，单管孔或短径列复管孔（2 ~ 3 个），弦径 150 ~ 220 μm；轴向薄壁组织不见；木纤维横截面近六边形，弦径 10 ~ 22 μm；木射线非

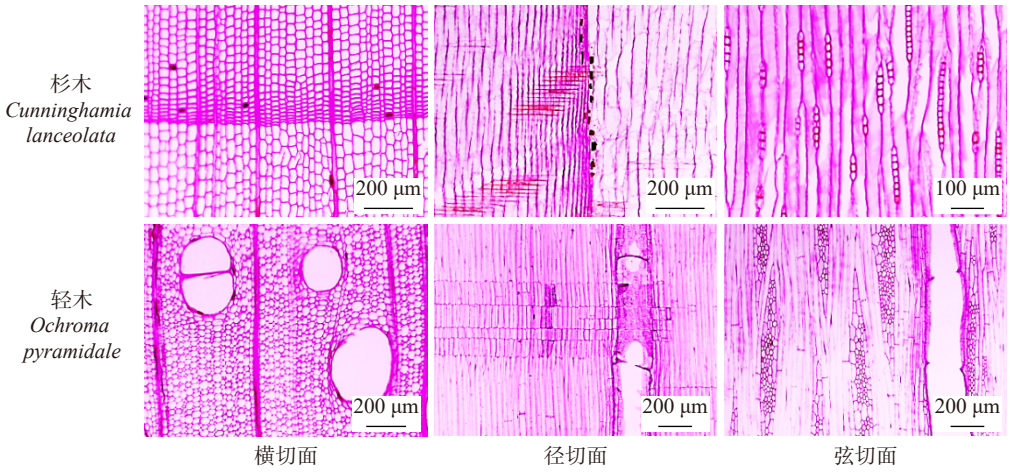


图 1 等密度杉木和轻木的三切面显微构造

Fig. 1 Three section micro-structure of Chinese fir and balsa wood of the same density

叠生，射线组织异形 I 及 II 型，单列射线甚少，多列射线宽 2 ~ 7 个细胞，高 7 ~ 50 个细胞；直立或方形射线细胞比横卧射线细胞略高或高得多；导管比量 13.33%，木射线比量 11.94%，木纤维比量 74.73%。总体上，杉木腔径较大，差异较小，而轻木导管与木纤维的腔径差异很大，但管孔整体分布一致。两种木材的横切面细胞形态明显不同：轻木木纤维横截面近似正六边形，承载时应力分布均匀，可实现力的有效传递，避免局部过载；而杉木管胞横截面为长方形或多边形，容易造成应力分布不均，在边角处产生应力集中导致破坏。杉木早晚材差异明显，从早材至晚材，管胞腔径逐渐减小，壁厚逐渐增加，径向呈现出梯度材料特征，可使其压缩吸能更平稳[17]。轻木早晚材无明显差异，材质相对均匀。

2.2 孔隙结构

木材具有天然生长精细复杂的纹孔、胞腔、树脂道等多级孔隙结构。压汞法测试的等密度杉木和轻木的孔隙结构（表 1）显示：两者孔隙率相当，分别为 76.8% 和 76.4%，但轻木的总孔比表面积是杉木的 2.26 倍，杉木的中值孔径和平均孔径分别为轻木的 3.79 和 2.43 倍，说明杉木孔径总体上更大、更分散，轻木孔径更小、更集中。根据进汞体积变化可获得材料孔径分布信息，杉木孔径主要分布于 50.4、831.8、2 053.4、21 296.3 nm 附近，对应于纹孔口和管胞胞腔部位孔隙；轻木孔径主要分布于 283.8、552.0、17 260.9 nm 附近，对应于纹孔口和木纤维胞腔部位孔隙[18]，总体上轻木孔径更小、更集中。木材孔隙可按孔径大小划分为微孔（3.6 ~ 160 nm）、介孔（160 ~ 1 000 nm）、大孔 I（1 ~ 4 μm）和大孔 II（4 ~ 116 μm）4 类[19]。两种木材的累积孔体积、微分累积孔体积与孔径体积占比（图 2）显示：杉木和轻木，密度相同，孔隙率相当，但不同孔径体积占比差异较大。杉木孔径分散，介孔、大孔 I 、大孔 II 各占约 1/3，微孔很少；轻木以介孔为主，占孔体积 60.22%。两者的介孔和大孔 I 的占比之和相近，但杉木大孔 II 更多，轻木微孔更多。

2.3 压缩响应

压缩应力–应变曲线（图 3）显示：等密度杉木和轻木均呈现多孔固体材料典型的 3 阶段特征（弹性阶段、平台阶段和致密化阶段），平台阶段均较长，说明其吸能减震特性均良好。顺纹压缩时，两者初始峰值应力一致，说明顺纹压缩破坏强度主要取决于密度即胞壁实体物质含量；两者平台长度相当，但吸能平稳度明显不同——轻木平台较为平稳略有振荡，杉木平台发生大幅陷落。轻木纤维细胞形态更接近正六边形，且材质相对均匀，承压时受力更均匀，纤维渐次屈曲压溃，吸能相对平稳；而杉木管胞为长方形或多边形，且早晚材差异明显，界面处薄弱的早材管胞更易应力集中，引发陡然破坏，从而吸能骤降。由于管胞、木纤维等主要细胞均轴向生长，木材横纹压缩破坏强度远低于其顺纹，横纹压缩曲线表现为单调递增的“应变硬化”。木射线沿径向生长，径向

表 1 等密度杉木和轻木的孔隙结构

Tab. 1 Pore structure of Chinese fir and balsa wood of the same density

树种	气干密度/（g·cm^{-3}）	总进汞体积/（mL·g^{-1}）	总孔比表面积/（m^2·g^{-1}）	中值孔径/nm	平均孔径/nm	孔隙率/%
杉木 *Cunninghamia lanceolata*	0.335 ± 0.001	2.135 ± 0.032	9.964 ± 0.150	1 862.17 ± 24.69	856.95 ± 9.16	76.80 ± 0.19
轻木 *Ochroma pyramidale*	0.335 ± 0.001	1.984 ± 0.053	22.533 ± 0.410	491.43 ± 6.27	352.19 ± 4.18	76.40 ± 0.11

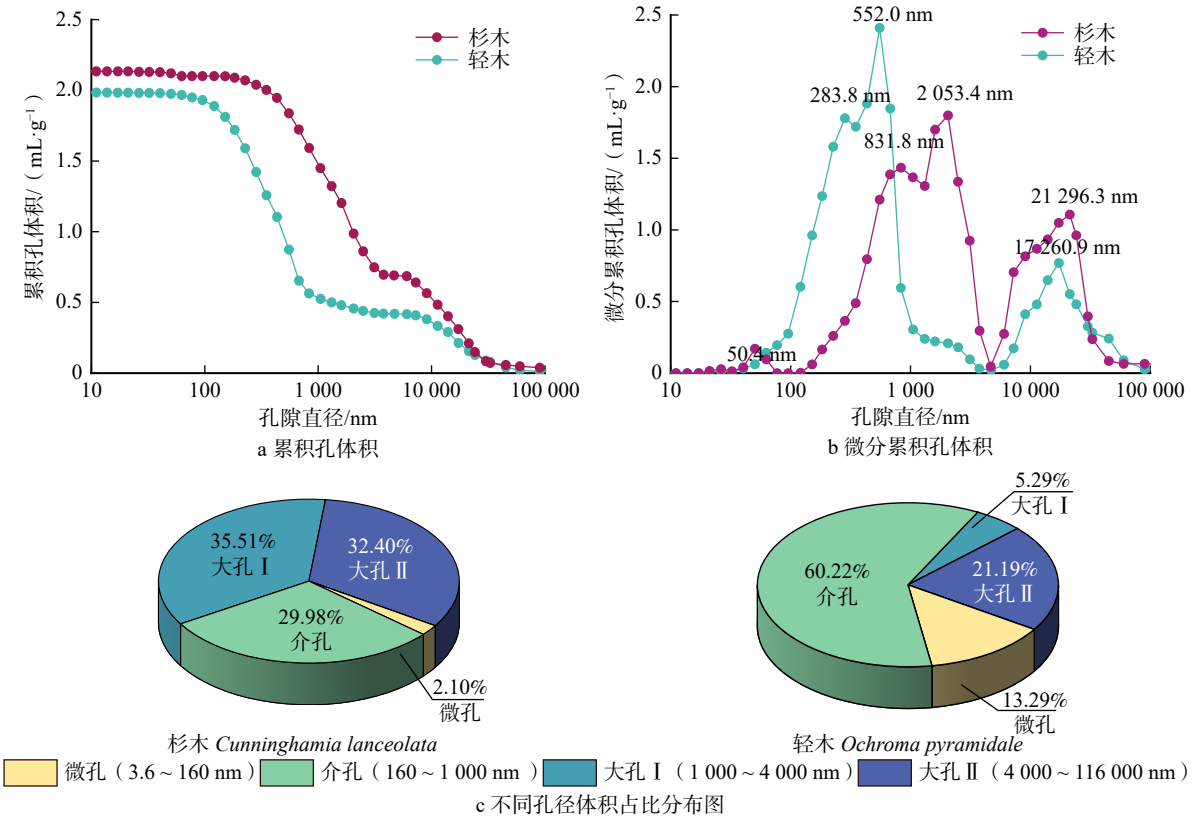


图 2　基于压汞法表征的等密度杉木与轻木孔隙结构

Fig. 2　Comparison of pore structures in equal-density Chinese fir and balsa wood by mercury intrusion porosimetry.

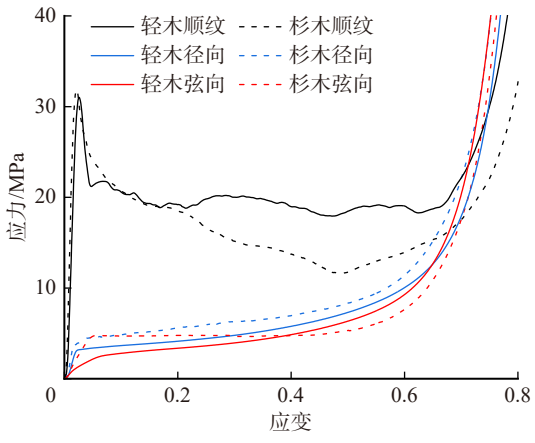


图 3　等密度杉木和轻木在不同纹理方向的压缩应力–应变曲线对比

Fig. 3　Comparison of compressive stress-strain curves for equal-density China fir and balsa wood under different grain orientations.

压缩时射线细胞轴向受力，故同种木材的径向曲线及强度稍高于其弦向[20]。等密度杉木和轻木的径向、弦向屈服应变基本一致，杉木的横纹，尤其是弦向压缩平台，明显比轻木更高、更平稳。其主要原因分析如下：一是强度较弱的木射线薄壁细胞，杉木占比（4.56%）明显比轻木（11.94%）少；二是杉木晚材管胞较强，弦向压缩时起主要承载作用；三是杉木径向从早材至晚材细胞逐渐变小且细胞壁增厚，这种梯度构造有利于压缩吸能过程中塑性变形和坍塌逐级推进，从而使其横纹压缩强度更大，吸能更多。

2.4　压缩性能

木材孔隙率与密度具有直接关系[21]。压汞测试结果表明密度相同杉木和轻木的孔隙率相近，可压缩空间相当。等密度杉木和轻木的压缩力学与吸能特性结果（表 2）显示：两者的顺纹压缩力学与吸能特性均远高于其横纹，径向又略高于弦向；两者相同纹理方向的致密化应变无显著差异。顺纹压缩时，两者的顺纹破坏强度、致密化应变无显著差异，单位体积吸能值差异显著，平台应力、理想吸能率差异极显著；轻木平台应力约为杉木的 1.20 倍，轻木的顺纹单位体积吸能值为 13.14 MJ/m^3，理想吸能率为 0.63，显著高于杉木的单位体积吸能值 11.48 MJ/m^3 和理想吸能率 0.51。横纹压缩时，两者的破坏强度、平台应力、单位体积吸能值和理想吸能率均差异极显著；杉木的径向压缩破坏强度和平台应力分别是轻木的 1.22 和 1.23 倍，弦向压缩破坏强度和平台应力分别是轻木的 2.09 和 1.15 倍，径向、弦向单位体积吸能值分别是轻木的 1.23 和 1.18 倍；杉木的径向、弦向理想吸能率分别为 0.65 和 0.82，轻木的径向、弦向理想吸能率分别为 0.57 和 0.55，杉木的横纹吸能更多更平稳。

与密度相同的杉木相比，轻木材质更均匀，纤维细胞更接近正六边形且胞径更小，孔壁比表面积更大，顺纹压缩时通过孔壁屈曲、摩擦和塑性变形消耗

表 2 等密度不同纹理杉木和轻木的压缩力学及吸能特性

Tab. 2 Compressive mechanics and energy-absorbing properties of Chinese fir and balsa wood with the same density and different grains

组别	破坏强度/MPa	平台应力/MPa	致密化应变	单位体积吸能值/(MJ·m^{-3})	理想吸能率
杉木顺纹压缩	31.90	16.41	0.70	11.48	0.51
轻木顺纹压缩	31.00	19.61	0.68	13.14	0.60
p	0.093	0.009**	0.134	0.013*	0.002**
杉木径向压缩	3.91	6.31	0.56	3.44	0.65
轻木径向压缩	3.20	5.10	0.56	2.78	0.57
p	0.006**	< 0.001**	0.277	< 0.001**	< 0.001**
杉木弦向压缩	4.73	4.84	0.54	2.47	0.82
轻木弦向压缩	2.26	4.21	0.54	2.10	0.55
p	< 0.001**	< 0.001**	0.893	< 0.001**	< 0.001**

注：*代表组间差异显著($p < 0.05$)，**代表组间差异极显著($p < 0.01$)。

能量更稳更多，故轻木顺纹吸能更优。横纹压缩时，主要是胞元胞壁侧向塌陷吸收能量，轻木导管尺寸远大于木纤维且腔大壁薄强度较弱，易先承载发生应力集中而破坏；杉木早材管胞腔大壁薄、晚材管胞腔小壁厚强度大，但腔径变化相对较小，呈渐变梯度结构，可实现分级变形，吸能效率提升。此外，杉木木质素含量较高[22]，细胞间横向联结更强、承载能力更大，故横纹压缩吸能更佳。

2.5 破坏模式

2.5.1 宏观破坏形态

等密度不同纹理杉木和轻木在压缩过程中的典型宏观破坏形态如图 4 所示。1%、20%、40% 和 60% 应变分别对应压缩应力–应变曲线的弹性阶段、平台阶段的前期、中期及致密化阶段前的过渡期。1% 应变时，两种木材压缩形态均无明显变化。顺纹压缩，20% 应变时，杉木沿木射线开裂，上压头接触管胞压溃，轻木无开裂，下压头接触细胞屈曲溃败；40% 应变时，杉木中部扭结，轻木边缘木射线开裂；60% 应变时，杉木出现 45°剪切带，轻木破坏形态相对完整。横纹径向压缩时，杉木早晚材“串联”交替变形，能量平稳耗散，20% 应变杉木侧向膨出，早材压溃，40% 应变杉木侧向膨出加剧，60% 应变杉木呈现“V”形褶皱且裂纹显著；轻木压缩形变过程中，侧向略微波浪形膨出，破坏形态完整。横纹弦向压缩时，早晚材“并联”受压，应力沿界面传递；杉木随着应变增加，早晚材分离加剧，尤其是压头接触两端，最终破坏呈“V”形；轻木则在整个过程被逐渐平稳压实，破坏形态规整。

2.5.2 微观破坏形态

等密度不同纹理杉木和轻木在压缩过程中的典型微观破坏形态如图 5 所示。1% 应变时，两种木材不同纹理方向的微观形态均无明显变化。顺纹压缩，20% 应变时，杉木沿木射线及管胞开裂，轻木无开裂，但导管与木纤维轻微屈曲；40% 应变时，杉木中部扭结、裂纹沿木射线与早晚材过渡区扩展，轻木细胞屈曲显著；60% 应变时，杉木细胞屈曲折断，轻木边缘木射线开裂加剧。可见，顺纹压缩弱相结构为早晚材交界和木射线，弱相结构的破坏导致杉木平台陷

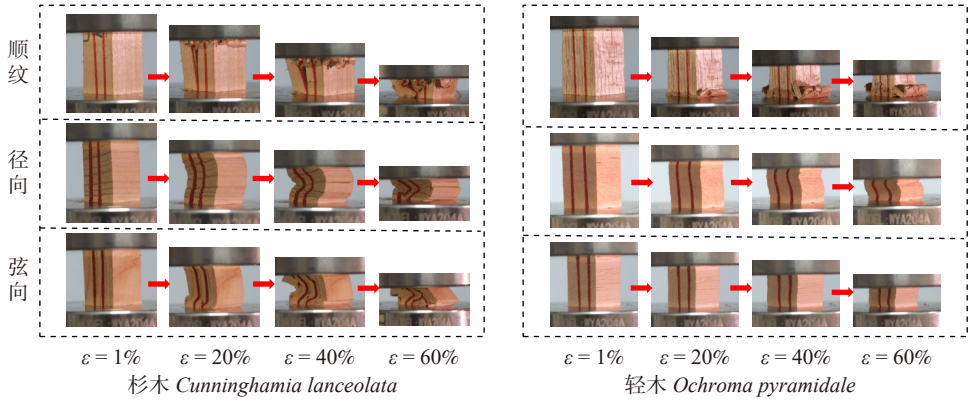


图 4 等密度杉木和轻木在压缩过程中的典型宏观破坏形态

Fig. 4 Typical macroscopic failure modes of Chinese fir and balsa wood with the same density during compression process

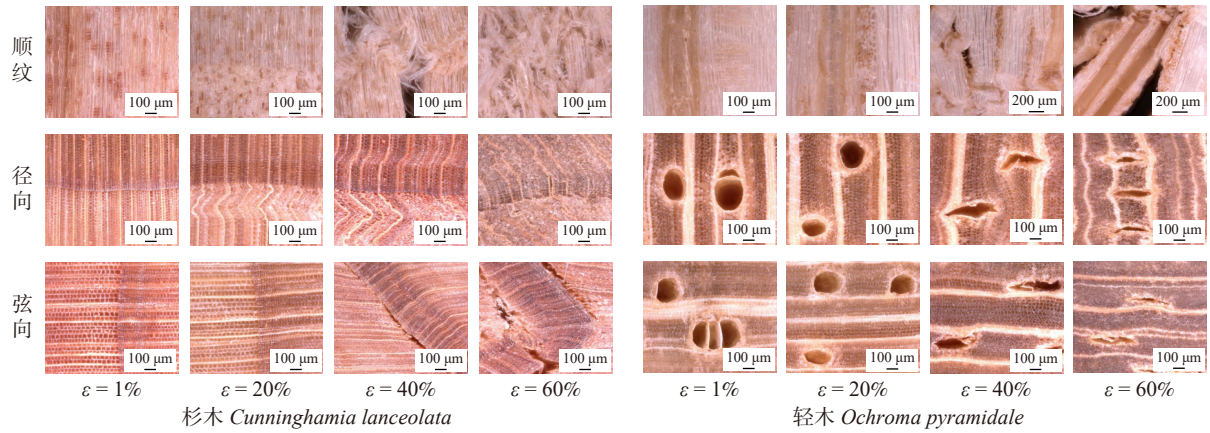


图 5　等密度杉木和轻木在压缩过程中的典型微观破坏形态

Fig. 5　Typical microscopic failure morphology of Chinese fir and balsa wood of the same density during compression process

落，吸能能力下降。杉木径向压缩，20% 应变时，早材木射线屈曲压溃；40% 应变时，晚材木射线屈曲；60% 应变时，管胞近乎密实，裂纹显著。轻木径向压缩，20% 应变时，导管被压扁为椭圆，且越靠近压头变形越大；40% 应变时，导管呈纺锤形，木纤维变形，且近导管木射线变形明显；60% 应变时，木射线屈曲加剧，导管与木纤维接近压溃。杉木弦向压缩，20% 应变时，晚材承力，木射线屈曲；40% 应变时，早晚材交界处萌生裂纹，木射线折断；60% 应变时，木射线断裂与早晚材分离加剧，孔隙压实。轻木弦向压缩，20% 应变时，导管轻微变形；40% 应变时，导管呈纺锤形，木射线微弯，近导管木纤维变形明显；60% 应变时，木射线曲折加剧，导管与木纤维压至接近密实。可见，横纹压缩弱相结构为腔大壁薄的杉木早材管胞和轻木导管。

3　结　　论

选取密度相同、微观构造迥异的针叶材杉木与阔叶材轻木作为研究对象，系统对比了两者的压缩吸能行为。结果表明，轻木与杉木分别在顺纹与横纹方向上表现出最优吸能性能。这一性能差异与其各自的细胞形态及孔隙构造特征直接相关。研究揭示的“构造调控性能”原则及“弱相引导耗散”机制，为人工多孔吸能材料的仿生设计与性能优化提供了重要的理论依据。具体结论如下。

（1）杉木细胞组成简单，早晚材明显，管胞横切面多为长方形或多边形；轻木管孔卵圆形，木纤维横截面近似正六边形。两者介孔和大孔 Ⅰ 综合占比相近，轻木孔径更小、更集中，微孔更多，杉木孔径尺寸更分散，大孔 Ⅱ 更多。多孔材料的孔隙构造差异直接影响压缩过程中的能量吸收机制，孔隙的尺寸、分布与形态共同调控材料内部应力传递、变形与破坏行为。因此，需根据吸能材料的具体载荷条件与应用场景选用不同孔隙特征的木材。

（2）顺纹压缩时，轻木和杉木的破坏强度无显著差异，吸能特性差异显著；横纹压缩时，力学及吸能特性均差异显著；轻木顺纹压缩吸能更优，而杉木横纹压缩吸能更优，这主要与两者的细胞形态、结构均匀性和化学组成等相关。轻木纤维细胞横截面接近正六边形，材质均匀，且微孔含量更多，更利于顺纹压缩吸能；杉木腔径差异较小、早晚材呈渐变梯度结构，且木质素更多，更利于横纹压缩吸能。减振或缓冲材料的性能可通过结构设计定向调控：规整的六边形胞体结构更有利于实现轴向的稳定能量吸收，而具有梯度特征与增强胞壁的结构则更利于通过横向渐进塌陷实现高效侧向能量耗散。

（3）木材的压缩吸能特性与其微观破坏模式有直接联系。顺纹压缩主要是纵向排列细胞壁屈曲失效，经纤维断裂、扭结褶皱、层间分离、相对滑移等变形而耗散能量，弱相结构为木射线与早晚材界面，杉木沿弱相结构产生大裂纹，轻木破坏形态相对完整；横纹压缩主要是胞壁侧向塌陷吸收能量，弱相结构为腔大壁薄的杉木早材管胞和轻木导管。“弱相”调控机制为仿生设计定向吸能材料提供了新思路，即通过有序构建特定“弱相”结构，可引导材料变形，并优化能量耗散路径。

木材在自然进化过程中形成的多级孔隙精细结构极为复杂，且不同结构具有各自的特性和适用性。建议未来研究联合运用多种表征技术，系统解析其孔隙结构的跨尺度特征，同时综合考虑木质素等化学组分在孔隙网络中的协同效应，深入揭示木材结构–性能关系与能量吸收机制之间的内在关联。该研究范式不仅有助于推动木材在高端减震领域的高效、高值化利用，还将为高吸能木材的树种选育、孔隙调控及轻质仿生材料的创制提供理论基础与创新路径。

参 考 文 献

[1] 李继承, 张斌, 谢若泽, 等. 软木材料力学行为及其缓冲吸能特性研究进展综述 [J]. 装备环境工程, 2021, 18(5): 68−78.
Li J C, Zhang B, Xie R Z, et al. Research advance on the mechanical behaviors and energy absorption of soft wood [J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(5): 68−78.

[2] 徐诗雨, 胡极航, 孔静, 等. 三聚氰胺−尿素−甲醛树脂浸渍改性对杉木压缩吸能特性的影响 [J]. 木材科学与技术, 2024, 38(3): 33−39.
Xu S Y, Hu J H, Kong J, et al. Effect of melamine-urea-formaldehyde resin impregnation on compressive energy absorption properties of Chinese fir wood [J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2024, 38(3): 33−39.

[3] 张文武, 张丹, 王珊珊, 等. 吸能材料缓冲性能评价方法综述 [J]. 包装工程, 2022, 43(5): 143−151.
Zhang W W, Zhang D, Wang S S, et al. Review of evaluation methods for cushioning performance of energy absorbing materials [J]. Packaging Engineering, 2022, 43(5): 143−151.

[4] Yang D, Wang H, Guo S, et al. Coupling effect of porosity and cell size on the deformation behavior of Al alloy foam under quasi-static compression [J]. Materials, 2019, 12(6): 951.

[5] Duraibabu R V, Prithvirajan R, Sugavaneswaran M, et al. Compression behavior of functionally graded cellular materials fabricated with FDM [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 24: 1035−1041.

[6] 陈哲, 刘宇杰, 康国政. 闭孔泡沫铝结构参数对其压缩性能影响的有限元分析 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2012(增刊 2): 84−87.
Chen Z, Liu Y J, Kang G Z. Finite element analysis for effect of structure parameters on compressive property of closed-cell aluminum foam[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012(Suppl. 2): 84−87.

[7] 杨烨凯, 刘中宪, 李军, 等. 玄武岩鳞片合金闭孔泡沫铝的静、动态力学性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2018, 48(5): 178−184,155.
Yang Y K, Liu Z X, Li J, et al. Experimental research on static and dynamic mechanical properties of closed cell aluminum foam with basalt scale [J]. Industrial Construction, 2018, 48(5): 178−184,155.

[8] Kas M, Yilmaz O. Radially graded porous structure design for laser powder bed fusion additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 296: 117186.

[9] 徐诗雨, 吕文华, 胡极航, 等. 木材压缩吸能特性及其压缩力学湿热效应研究进展 [J]. 世界林业研究, 2025, 38(5): 71−77.
Xu S Y, Lü W H, Hu J H, et al. Research progress in energy absorption characteristics of wood and its hygrothermal effect [J]. World Forestry Research, 2025, 38(5): 71−77.

[10] Borrega M, Gibson L J. Mechanics of *Balsa* (*Ochroma pyramidale*) wood [J]. Mechanics of Materials, 2015, 84: 75−90.

[11] 卢芸, 王凯, 付宗营, 等. 木材孔隙结构的调控与利用研究进展 [J]. 木材科学与技术, 2023, 37(6): 1−11,60.
Lu Y, Wang K, Fu Z Y, et al. Research progress on the regulation and utilization of wood pore structure [J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2023, 37(6): 1−11,60.

[12] Kong J, Lyu W, Xu S, et al. Effect of grain orientation on the energy absorption performance of Chinese fir wood under quasi-static compression [J]. Wood Material Science & Engineering, 2025, 20(1): 117−124.

[13] 王哲, 王喜明. 木材多尺度孔隙结构及表征方法研究进展 [J]. 林业科学, 2014, 50(10): 123−133.
Wang Z, Wang X M. Research progress of multi-scale pore structure and characterization methods of wood [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(10): 123−133.

[14] Xu S, Lyu W, Kong J, et al. Pore characteristics and compressive energy-absorption properties of four wood species [J]. Wood Material Science & Engineering, 2026, 21(1): 686−693.

[15] Li L, Wang X, Yan Y, et al. Pore analysis of thermally compressed Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) by mercury intrusion porosimetry [J]. Holzforschung, 2017, 72(1): 57−63.

[16] 孔静, 吕文华, 徐诗雨, 等. 木材压缩吸能特性的尺寸与形状效应 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(11): 152−160.
Kong J, Lü W H, Xu S Y, et al. Size and shape effects of wood compression energy absorption characteristics [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(11): 152−160.

[17] 李坚, 孟卫华, 张大海, 等. 分层密度梯度蜂窝材料面内动态压缩及吸能特性 [J]. 应用力学学报, 2021, 38(6): 2369−2375.
Li J, Meng W H, Zhang D H, et al. Dynamic crushing behavior and energy absorption of hexagonal honeycomb material with layered density gradient [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(6): 2369−2375.

[18] 金枝, 李伯涛, 尹江苹, 等. 木材孔隙连通性评价研究进展 [J]. 林业科学, 2022, 58(5): 177−186.
Jin Z, Li B T, Yin J P, et al. Research progress for the evaluation of wood pore connectivity[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(5): 177−186.

[19] Plötze M, Niemz P. Porosity and pore size distribution of different wood types asdetermined by mercury intrusion porosimetry [J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2011, 69(4): 649−657.

[20] 伍艳梅, 黄荣凤, 高志强, 等. 木材横纹压缩应力−应变关系及其影响因素研究进展 [J]. 林产工业, 2018, 45(11): 11−16.
Wu Y M, Huang R F, Gao Z Q, et al. Research development of influencing factors of stress-strain relationship under wood transverse compression [J]. China Forest Products Industry, 2018, 45(11): 11−16.

[21] 魏金光, 韦亚南, 鲍敏振, 等. 辐射松重组木密度对其孔隙率和性能的影响 [J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(3): 519−523.
Wei J G, Wei Y N, Bao M Z, et al. Effect of density on porosity and physical-mechanical properties of high-performance scrimbers [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2018, 35(3): 519−523.

[22] Chen C, Kuang Y, Zhu S, et al. Structure–property–function relationships of natural and engineered wood [J]. Nature Reviews Materials, 2020, 5(9): 642−666.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 于志明）