

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第10期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.10.001

论文标题： 竹材增值利用的结构基础

作　　者： 余 雁，任文庭

收稿日期： 2026-05-26

引文格式： 余雁,任文庭.竹材增值利用的结构基础[J].中南林业科技大学学报,2026,46(10):1-20.

Yu Y, Ren W T. Structural basis for the high-value utilization of bamboo[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(10):1-20.

相关论文推荐

Recommended articles

“以竹代塑”科技创新与基础科学问题

Technological innovation and fundamental science for bamboo as a substitute for plastic

“双碳”战略目标下木竹基先进功能材料研究进展

Advanced functional materials derived from natural wood and bamboo resources under the double carbon strategy in China

竹片增强竹塑复合材料的拉伸性能及破坏特征

Study on tensile properties and failure characteristics of bamboo-plastic composites reinforced by bamboo chips

不同芯质竹木复合板的弹性模量和静曲强度

Study on MOE and MOR of bamboo-wood composite panels with different core materials

竹集成材-H型钢-竹集成材组合梁受弯性能

Bending performance of bamboo laminated veneer lumber- H-shaped steel-bamboo laminated veneer lumber composite beams

竹集成材激光雕刻模拟仿真与参数优化

Simulation and parameter optimization of laser engraving of laminated bamboo lumber

第 46 卷 第 10 期
2026 年 10 月

中南林业科技大学学报
Journal of Central South University of Forestry & Technology

Vol. 46 No. 10
Oct. 2026

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.10.001

http: //qks.csuft.edu.cn

竹材增值利用的结构基础

余　雁[1]，任文庭[1, 2]

（1. 福建农林大学 福建 福州 350108；2. 浙江省林业科学研究院 浙江 杭州 310023）

摘　要：竹材因其生长周期短、可再生性强及优异的材料性能，被认为是替代木材、石油基塑料，甚至钢材的重要生物资源。竹材的宏观性能取决于其多尺度结构与组分的协同作用，系统解析竹材多尺度结构特征是实现其增值利用的前提。本文系统综述了近 10 余年来竹材结构与应用研究领域的最新进展，重点概述了竹材细胞壁层结构、孔隙结构、细胞壁组分分子结构的主要特征，以及组分间的相互作用，总结了竹材不同细胞组织结构与性能的关系，提出了竹纤维和薄壁细胞细胞壁新的多尺度结构模型；同时，系统评述了竹材由整竹应用到竹纤维与薄壁细胞精准利用的研究进展；最后，针对当前研究中存在的不足，展望了竹材细胞壁组分相互作用解译、竹纤维与薄壁细胞功能化应用等方面的发展方向。

关键词：竹材；竹纤维；薄壁细胞；细胞壁；增值利用

中图分类号：S781；S795　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)10-0001-20

Structural basis for the high-value utilization of bamboo

Yu Yan[1], Ren Wenting[1,2]

(1. Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350108, Fujian, China;
2. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: Due to its short growth cycle, strong renewability and excellent material properties, bamboo is considered a vital bio-resource for substituting wood, petroleum-based plastics, and even steel. The macroscopic properties of bamboo depend on the synergistic effects of its multi-scale structure and components, therefore, systematically analyzing these structural features is a prerequisite for its value-added utilization. This paper systematically reviews the latest progress in bamboo structure and application research over the past more than a decade. It focuses on the main characteristics of the bamboo cell wall layer structure, pore structure, and the molecular structure of cell wall components, as well as the interactions between these components. The relationship between the structure and properties of different bamboo tissue structures is summarized, and a new multi-scale structural model for the cell walls of bamboo fibers and parenchyma cells is proposed. Meanwhile, the research progress from the utilization of whole bamboo culms to the precise utilization of bamboo fibers and parenchyma cells is systematically evaluated. Finally, addressing the current limitations in research, the paper outlines future development directions in deciphering the interactions of bamboo cell wall components and the functional applications of bamboo fibers and parenchyma cells.

Keywords: bamboo; bamboo fiber; parenchyma cell; cell wall; high-value utilization

在全球石化资源供给趋紧与“双碳”目标持续推进的背景下，开发可再生、可降解、高性能的生物基功能材料已成为林业工程领域的重要研究方向。竹材分布广泛、资源丰富，具有生长周期短、可再生性强、比强度和比刚度高等优点，被视为替代塑料、石化基材料甚至钢材的理想选择[1]。推动竹材资源的增值利用，不仅具有重要的生态意义，也具有显著的经济价值。

推动竹材增值利用的关键在于更深入地了解竹材，特别是更全面地揭示其结构与性能的关系。作为一种天然纤维增强复合材料，竹材主要由竹纤维和薄壁组织构成，二者在解剖、细胞壁构造

收稿日期（Received）：2026-05-26　　**修订日期**（Revised）：2026-08-14

基金项目：“十四五”国家重点研发计划项目（2021YFD2200504）；国家自然科学基金重大项目（32494792）。

第一作者：余雁（yuyan9812@fafu.edu.cn），教授，博士，博士研究生导师。

引文格式：余雁 , 任文庭 . 竹材增值利用的结构基础 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(10):1-20.

Yu Y, Ren W T. Structural basis for the high-value utilization of bamboo[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(10):1-20.

以及细胞壁组成分子结构等不同尺度上均呈现出显著差异，这些差异共同决定了其力学性能、理化特性及应用潜力的差别[2]。因此，基于竹材不同细胞单元的结构特异性和性能特点，开展精准化、差异化增值利用，是推动未来竹产业高质量发展的重要方向。其中，细胞壁作为竹纤维与薄壁细胞的实际承载结构，是揭示其性能形成机制与实现增值利用的关键所在。建立精细的竹材细胞壁结构模型，不仅对竹子生长、生物质转化和仿生科学研究具有重要的科学价值，也是充分挖掘竹材应用潜力、推动竹材增值利用的重要基础。

本文系统总结近 10 年来竹材结构与应用研究进展，重点围绕竹材细胞壁层结构、纳米孔隙结构、细胞壁组分分子结构及相互作用进行评述。在此基础上，总结了竹材不同细胞组织结构与性能之间的构效关系，提出了竹纤维和薄壁细胞细胞壁新的多尺度结构模型。论文还总结了竹材整竹应用以及竹纤维与薄壁细胞精准利用的最新研究进展，并对未来的重点研究方向进行了展望。

1　竹材结构特征

1.1　宏观结构特征

在宏观尺度上，竹材呈现由竹节与节间交替形成的中空锥形结构。竹节处具有特殊横向隔膜结构，竹节中的维管束多向排列，扭曲的维管束起到连接相邻节间、限制局部变形及增强连接区域刚度的作用[3]（图 1）。节间则承担了竹材的轴向和弯曲载荷。沿竹秆高度方向，秆径和壁厚不断减少，但节间长度从基部逐渐增大，在竹秆某个高度达到极值，之后便不断减少。这种兼具中空、分节与渐变特征的宏观构造有利于提高竹材的抗弯刚度、整体稳定性及抗屈曲能力。

1.2　解剖构造特征

去除最外层的竹青和最内层的竹黄后，竹材几乎完全由维管束和薄壁基本组织两大部分构成。维管束的形态特征在竹子分类中具有重要意义，通常可分为双断腰型、断腰型、紧腰型、开放型和半开放型[4]，前 3 种类型主要见于丛生竹中，后 2 种类型则多见于散生竹。沿竹壁径向方向，维管束呈现明显梯度分布，主要表现为维管束尺寸和分布密度的变化（图 2）。以毛竹为例，维管束面积从竹青到竹黄逐渐增大，分布密度则呈现相反的趋势，纤维体积分数也从靠近竹黄侧的约 13% 增加至竹青侧的 50% 以上[5-6]。这种径向梯度结构是竹材密度、力学性能天然变异的重要解剖结构基础。从组织组成上看，维管束主要由导管、韧皮部筛管、纤维鞘以及维管束薄壁组织构成。其中，原生木质部导管和后生木质部导管是竹子生长过程中水分和养分运输的主要通道。韧皮部主要包括筛管和伴胞，竹纤维主要分布在木质部导管和韧皮部附近，以纤维鞘和游离的纤维股形式存在。竹纤维通常具有较大的长径比，其长度

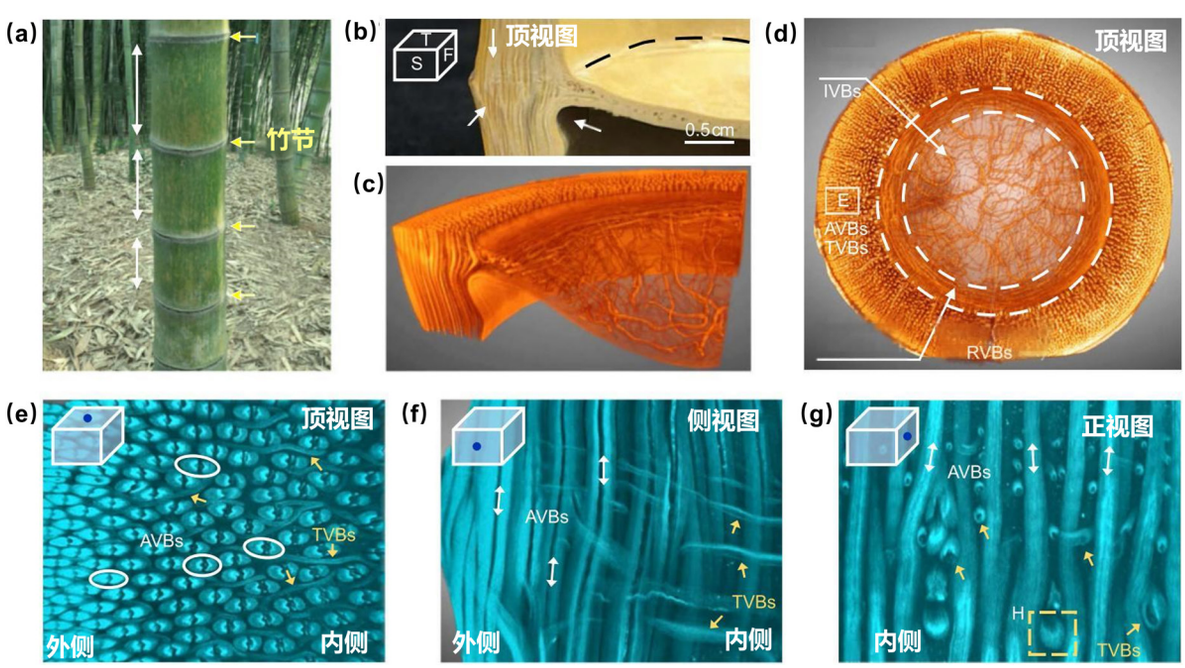
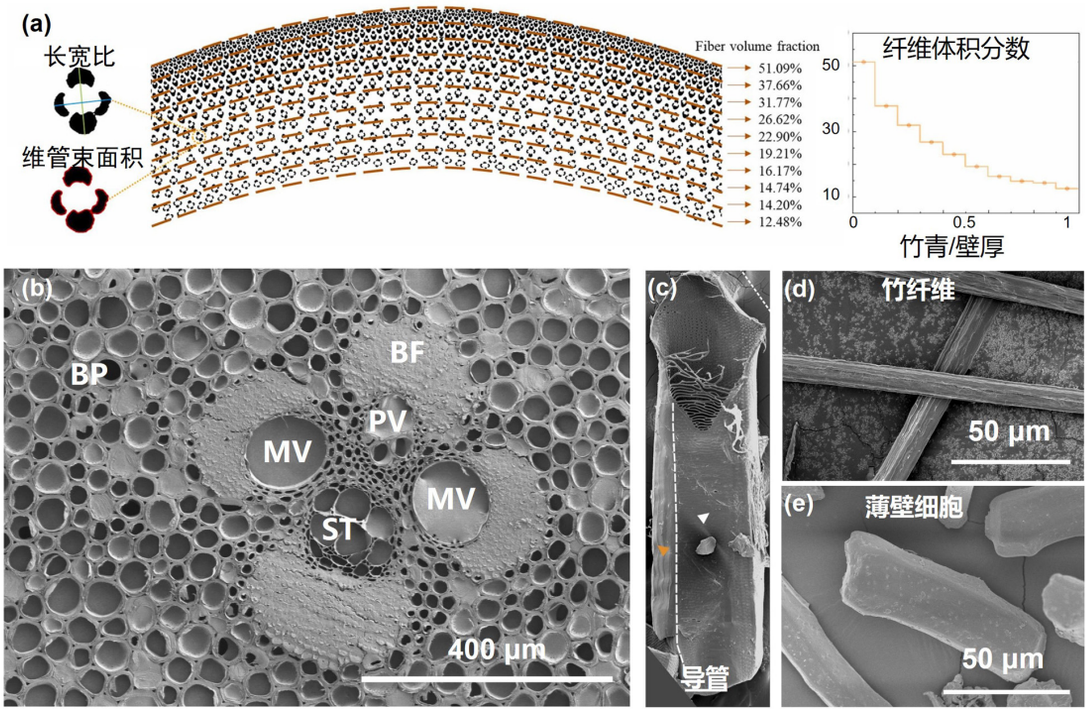


图 1　竹节的三维结构和维管束排列

Fig. 1　The 3D structure and vascular bundle arrangement of bamboo node



（MV：后生木质部导管细胞；PV：原生木质部导管细胞；ST：筛管；BF：竹纤维；BP：薄壁细胞）
(MV: Metaxylem vessel elements; PV: Protoxylem vessel elements; ST: Sieve tubes; BF: Bamboo fibers; BP: Parenchyma cells)

图 2　竹材的解剖构造（a）竹材横切面维管束梯度分布 [5]（b）维管束横切面扫描电镜图（c）导管电镜图 [9]（d）竹纤维电镜图（e）薄壁细胞的电镜图

Fig. 2　The anatomic structure of bamboo (a) The gradient distribution of vascular bundles in the cross section of bamboo[5] (b) Scanning electron micrograph of the cross section of vascular bundles (c) vessels[9] (d) bamboo fibers (e) parenchyma cells

大约在 1.5 ～ 4 mm，宽度大约在 9 ～ 20 μm，但受竹种、竹龄、竹秆高度和径向部位等因素影响 [7]。薄壁基本组织由 2 种薄壁细胞组成，即纵向排列的长形细胞和分散在其中的短细胞。长细胞的平均长度在 100 μm 以上，短细胞的平均长度在 20 μm 左右 [8]。长细胞具有积累和储藏淀粉的功能，而除了节部的少量短细胞能储藏淀粉外，其他短细胞均没有这种功能。

对于竹纤维的高值化利用而言，其增强作用不仅取决于单纤维本身的长度、直径和壁厚，还受到纤维鞘内部单纤维之间界面结合，以及周围薄壁组织约束作用的共同影响。在天然竹材中，竹纤维通常以纤维束形式存在，单纤维之间通过胞间层紧密连接，并与周围薄壁细胞形成嵌套式界面结构。该界面结构一方面有助于维持竹材整体力学稳定性，另一方面也增加了纤维解离和连续化制备的难度。已有竹纤维及其复合材料的研究指出，纤维预处理和提取过程会显著改变竹纤维的长度保持率、表面粗糙度、界面化学特征和力学性能，是影响竹纤维增强复合材料性能的重要因素 [9-10]。

近年来，自上而下制备竹基高强宏纤维的研究进一步表明，尽可能保留竹材天然取向纤维骨架，并通过适度调控木质素和半纤维素基质，可有效提升连续竹纤维材料的强度和结构完整性 [11]。然而，在机械碾压、蒸汽爆破、碱处理、机械疏解等分离过程中，竹种、竹龄、竹秆部位和处理强度均会影响竹纤维的长度保持、界面完整性和细胞壁损伤程度。过强的机械作用或化学处理可能导致纤维束界面剥离、细胞壁层间撕裂、微裂纹扩展以及单纤维横向断裂等损伤形式 [12-13]，从而削弱纤维连续性和后续复合材料中的载荷传递效率。

1.3　细胞壁构造

细胞壁是植物细胞特有的结构，位于细胞膜的外面，不仅为细胞提供保护和支撑，还参与植物生长、细胞分化、细胞间物质交换及水分运输等生理过程。竹材细胞壁具有典型的多尺度分级结构：纤维素分子链之间通过分子间和分子内氢键自组装形成基本纤丝；基本纤丝与半纤维素相互作用形成纤维素微纤丝；微纤丝之间通过半纤维素和木质素基体连接形成不同尺寸的纤维素微纤丝聚集体，进一步组装成细胞壁各亚层。由分子链、微纤丝、微纤丝聚集体到壁层结构的逐级组装，共同决定了竹材的强度、韧性、尺寸稳定

性及加工响应。

竹纤维与薄壁细胞虽然具有相似的细胞壁组分和多壁层构造，但二者在壁层厚度、微纤丝取向、孔隙结构、组分分子结构及组分间相互作用等方面存在明显差异，本文分别从不同尺度层面对细胞壁构造进行阐述。

1.3.1　壁层结构特征

竹材细胞壁与木材细胞壁类似，具有复杂的多壁层结构。竹纤维与薄壁细胞的细胞壁均由初生壁和次生壁构成，其中初生壁较薄，通常与胞间层合在一起称为复合胞间层。次生壁由多个细胞壁亚层组成，不同类型细胞在亚层数量和形态上差异显著。竹纤维是厚壁细胞，次生壁呈厚层和薄层交替排列，一般有 3 ～ 18 层 [14]。薄壁细胞的细胞壁亚层厚度较为接近，数量可多达 11 层，大部分细胞为 7 层左右 [15]。细胞壁亚层由微纤丝聚集体构成，表观直径在 15 ～ 120 nm 之间，且不同壁层间存在明显差异，通常厚层的微纤丝聚集体表观尺寸小于薄层 [16]。

竹子细胞壁呈现多壁层结构的一个重要原因是不同壁层中纤维素微纤丝排列方向存在显著差异。Parameswaran 等 [17] 较早提出竹纤维细胞多壁层结构模型（图 3）。该模型认为：1）竹纤维初生壁中微纤丝呈无规则网状排列；2）初生壁与次生壁之间存在微纤丝角约 50° 的过渡层；3）次生壁由厚层和薄层交替组成；4）厚层中微纤丝取向接近纤维轴向，而薄层中微纤丝取向近于垂直纤维轴向；5）薄层的木质化程度较高。这一多壁层结构模型的大部分观点在许多后续研究中得到支持。Mannan 等 [18] 用偏振成像技术测量了竹纤维的微纤丝角为 4° ～ 29°，薄壁细胞的微纤丝角为 25° ～ 55°。Ahvenainen 等 [19] 使用空间分辨 X 射线衍射技术测量毛竹薄壁细胞的微纤丝角约为 65°，支持了薄壁细胞的细胞壁模型中关于微纤丝取向较大的观点。Hu 等 [14] 应用 LC-PolScope 成像系统测试了竹纤维与薄壁细胞的微纤丝角，证实了两者的微纤丝取向存在显著差异。然而，现有大部分模型对于薄壁细胞各壁层微纤丝取向还不明确。近年来，随着高分辨率电子显微镜、偏振成像和空间分辨 X 射线衍射等技术的发展，竹

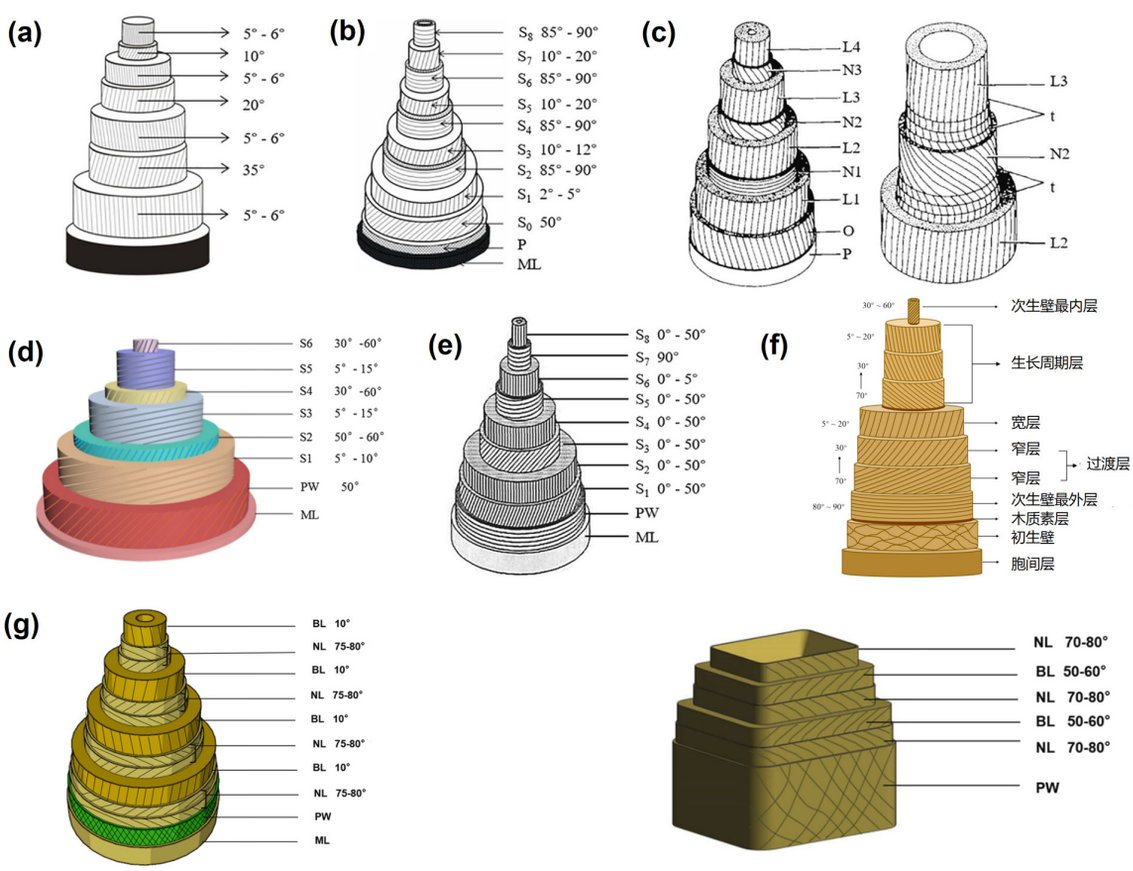


图 3　竹材细胞壁多壁层结构模型（a）Preston and Singh 提出的细胞壁模型 [20]（b）Parameswaran and Liese 提出的细胞壁模型 [17]（c）Wai 等提出的竹纤维细胞壁模型 [21]（d）Hu 等提出的模型 [14]（e）刘提出的竹纤维细胞壁模型 [22]（f）Chen 等提出的竹纤维细胞壁模型 [23]（g）Ren 等提出的细胞壁模型 [24]

Fig. 3　Cell wall structural models of bamboo developed by different teams (a) Preston and Singh model[20] (b) Parameswaran and Liese model[17] (c) Wai model[21] (d) Hu model[14] (e) Liu model[22] (f) Chen model[23] (g) Ren model[24]

材细胞壁亚层结构及其微纤丝取向得到了进一步解析。笔者团队结合高分辨率扫描电子显微镜、固态 ^{13}C 核磁共振和 X 射线衍射等技术发现，竹纤维次生壁具有典型的厚层与薄层交替结构，而薄壁细胞各亚层之间的厚度差异相对较小。两类细胞壁亚层中微纤丝聚集体的表观尺寸约为 20 ～ 120 nm，并在相邻亚层间呈现规律性变化。基于微纤丝聚集体表观尺寸与取向之间的几何关系，估算竹纤维厚层和薄层的微纤丝角分别约为 10° 和 80°；薄壁细胞不同亚层的微纤丝角则主要分布在 50° ～ 80° 范围内 [24]。需要指出的是，不同研究报道的微纤丝角数值存在一定差异，这与竹种、细胞壁亚层、空间分辨率及测试方法不同有关，但总体均表明竹纤维中的纤维素取向程度高于薄壁细胞。上述壁层构造与微纤丝的取向差异，是两类细胞在轴向承载能力、形变方式和加工响应方面表现不同的重要结构基础。

1.3.2　孔隙结构特征

竹材通过自组装形成具有不同孔隙形状、高度互连的层级多孔结构。按孔径尺度，竹材孔隙可以分为大孔（孔径＞ 50 nm）、介孔（2 nm ＜孔径＜ 50 nm）和微孔（孔径＜ 2 nm）[25]。其中，大孔主要是指细胞腔、纹孔等结构；介孔主要源于细胞壁内部孔隙及微纤丝间隙；微孔则存在于细胞壁组分之间 [26]。这些孔隙在竹材中承担不同功能：细胞腔和导管参与水分及营养物质传输，纹孔是细胞间横向疏导的重要通道 [27]，而细胞壁内部的介孔和微孔则直接影响水分吸附、干缩湿胀和化学试剂渗透。

竹材大孔中，纹孔是一类尤为重要的解剖构造，决定了竹材细胞间的横向物质和水分输导。纹孔是细胞壁在次生壁沉积过程中未经过次生加厚而留下的凹陷结构 [28]。竹材纹孔通常由纹孔膜、纹孔口、纹孔腔和纹孔道等部分组成，具缘纹孔还包含纹孔缘和纹孔室等结构。纹孔膜是纹孔中十分重要的结构组成部分，是细胞水分运输的安全阀门，它实际是复合胞间层的一部分，主要由纤维素、木质素和少量果胶组成 [29]。根据是否有纹孔缘，纹孔可以分为具缘纹孔和单纹孔 2 种类型。导管细胞壁以具缘纹孔为主，纹孔常呈对列、互列或混合排列，并主要集中于靠近维管束中心和薄壁组织的一侧，表现出显著的区域选择性，有利于导管与周围细胞之间的物质交换。薄壁细胞纹孔以单纹孔为主，同时存在初生纹孔场、半具缘纹孔对和分枝纹孔腔，其中分枝纹孔能够连接多个相邻细胞，增强薄壁组织内部以及薄壁细胞与导管之间的多向联系。纤维细胞纹孔通常较小、数量较少且纹孔道狭长，主要维持有限的横向连通，从而兼顾物质交换与力学支撑 [30]。总体而言，竹材形成了“导管高效输导、薄壁细胞多向交换、纤维细胞受限连通”的纹孔结构体系，体现了输导、贮藏和机械支持功能之间的协调适应。

介孔和微孔则更多地反映了细胞壁内部纳米尺度的孔隙状态，在细胞壁水分吸附、干缩湿胀以及化学药剂渗透等过程中发挥着直接作用。介孔的孔隙特征可以通过孔径分布、比表面积、孔隙形状等参数进行表征，常用的测试方法有显微观察法、气体吸附法和小角 X 射线散射法等。显微观察法能够较为直观地呈现孔隙形貌及其空间分布特征，但对于小尺寸孔隙难以识别，一般仅限于定性观察。气体吸附法可以对介孔和微孔的孔径分布和孔容等参数进行定量测试，可根据孔径范围选择氮气或二氧化碳作为吸附介质。小角 X 射线散射法可测试开放孔和封闭孔的结构信息，从而较为准确地反映样品内部孔隙情况。Cao 等 [25] 使用氮气吸附法比较了竹材和木材的孔隙结构特征，结果表明竹材细胞壁孔隙率（2.6 ～ 3.8%）低于木材（4.0 ～ 5.1%）。此外，竹材内部不同类型细胞的细胞壁孔隙也存在显著差异，竹纤维与薄壁细胞的介孔孔径分布均集中在 2 ～ 10 nm 之间，但是竹纤维的孔隙率仅为 2.91%，而薄壁细胞的孔隙率为 5.07%[31]，反映了竹纤维与薄壁细胞细胞壁致密程度的显著差异性。

1.3.3　组分分子结构特征

纤维素、半纤维素和木质素是竹材细胞壁的主要化学组分，其中纤维素含量最高，是构成细胞壁骨架的核心成分。纤维素由葡萄糖单元通过 β-1,4- 糖苷键连接而成 [32]。其分子链通过分子间和分子内氢键自组装形成基本纤丝，并进一步形成含有结晶区和非结晶区的微纤丝结构。纤维素结晶度影响细胞壁的强度、刚度和化学稳定性 [33]。基本纤丝由纤维素合成酶复合体合成 [34]，其尺寸大小受后者直接调控。高等植物纤维素基本纤丝中纤维素链的数量一般是 6 的倍数，24 链和 36 链模型被广为接受 [35]。对于竹材，Thomas 等 [36] 运用广角 X 射线散射（WAXS）技术计算竹材基本纤丝的谢乐尺寸（垂直于 200 晶面）为 3.8 nm，同时运用小角中子散射（SANS）技术计算相邻基本纤丝中心到中心的距离为 3 nm，表明竹材纤维素基本纤丝的尺寸特征与木材相近 [37]。值得注意的是，竹材不同细胞类型的纤维素晶体结构存在明显差异。Ren 等 [38] 结合 X 射线衍射和固态 ^{13}C

核磁共振研究发现，竹纤维的纤维素相对结晶度和晶粒直径高于薄壁细胞，而晶面间距相对较小，表明竹纤维的纤维素分子链排列更为紧密。根据晶粒横向尺寸及纤维素链数目的结构假设，竹纤维基本纤丝可能更接近 24 链模型，薄壁细胞则可能更接近 18 链模型。此外，薄壁细胞中相对不稳定的纤维素比例较高，说明其纤维素晶体的有序性和稳定性相对较低。该结构差异使薄壁细胞在离子液体等化学处理过程中更易发生晶体解构和组分转化 [39]。

半纤维素是由多种单糖构成的短链高分子聚合物，以无定形状态分布在竹材细胞壁骨架之中，具有连接纤维素和木质素的作用。竹材中的半纤维素以聚阿拉伯糖 -4-O- 甲基葡萄糖醛酸木聚糖为主，占总半纤维素的 90% 以上，其结构特征介于针叶材和阔叶材的半纤维素之间。半纤维素中含量最高的糖单元是木糖，随后是阿拉伯糖、葡萄糖醛酸和半乳糖等，可能还含有少量乙酰基 [40]。其中，木糖以 β-1,4- 糖苷键形成主链，阿拉伯糖和葡萄糖醛酸连接到木糖的 C-2 或 C-3 位置。Peng 等 [41] 对热水和不同浓度碱液提取到的半纤维素进行定量结构表征，认为 4-O- 甲基葡萄糖醛酸只连接到木糖的 C-2 位置，而阿拉伯糖可以连接到 C-2 或 C-3 位置。单克隆抗体免疫定位结果显示，竹材细胞壁内还存在少量的 β-(1-3, 1-4) 葡聚糖，主要是在细胞伸长阶段沉积在细胞壁中 [42]。DMSO 提取的半纤维素为低取代 β-(1-4)-D 木聚糖以及 β-(1-3, 1-4) 葡聚糖，然而碱提取的半纤维素主要为 β-(1-4)-D 木聚糖 [40]。竹材半纤维素中，阿拉伯糖和木糖单元的比例与竹龄和竹秆木质化程度呈现负相关 [43]，随着木质化程度的增加，阿拉伯糖和木糖的比例逐渐降低 [44]。在竹材不同类型的细胞中，糖单元比例也有所不同（图 4），^{1}H NMR 表明竹纤维中半纤维素的乙酰化程度（0.069）低于薄壁细胞（0.127）。前者提取的半纤维素仅在 C3 位置发生乙酰化，而从薄壁细胞中提取的半纤维素在 C2 和 C3 位置均发生乙酰化 [40]。此外，尽管竹纤维与薄壁细胞中具有相似的 L- 阿拉伯糖 -4-O- 甲基 -D - 葡萄糖醛酸 -D- 木聚糖，然而薄壁细胞中含有更多的 4-O- 甲基 -D 葡萄糖醛酸单元（图 4b），这种结构差异导致薄壁细胞在碱处理过程中展现出更高的碱抽提效率 [45-46]。

木质素是一种具有三维网状结构的天然芳香族高分子聚合物，填充于细胞壁骨架中，赋予细胞壁刚性、生物抗降解性并降低亲水性，因此被称为结壳物质。竹材的木质素属于 H-G-S 型，即由一定比例的对羟苯基（H），愈创木基（G）和紫丁香基（S）单元通过醚键（C-O-C）、碳碳键

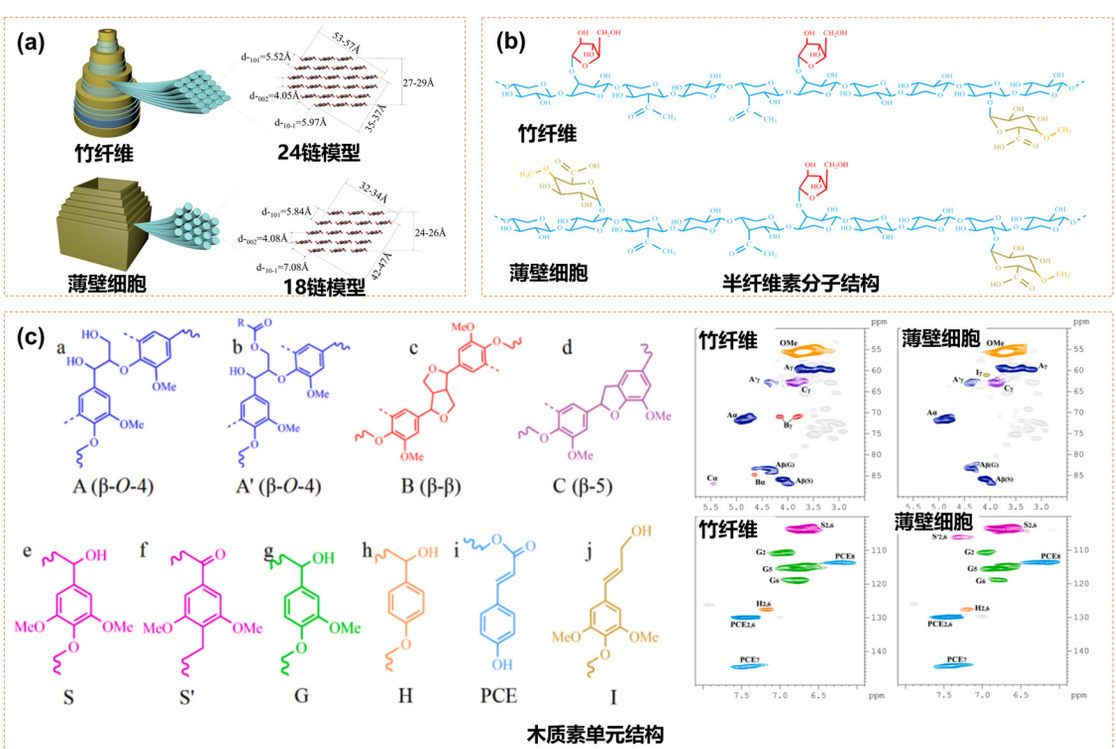


图 4 竹材细胞壁组分的分子结构（a）纤维素晶体结构 [38]（b）半纤维素糖单元结构（c）木质素的单元结构 [45]

Fig. 4 The cell wall molecular structures of bamboo (a) the crystalline structure[38] (b) the structure of hemicellulose (c) the unit structure of lignin[45].

（C-C）等化学键交联而成，其中 S 单元的比例最高，G 单元次之，H 单元的含量较低。Wen 等 [47] 应用核磁共振技术（NMR）对毛竹的木质素构成单元进行了定量分析，发现对羟苯基单元（H）只占了 1% ～ 2%，愈创木基单元（G）占 21% ～ 31%，紫丁香基单元（S）占 67% ～ 78%。此外，竹材还含有较高比例的阿魏酸（FA）和对香豆酸（PCA）单元，阿魏酸以酯键与木聚糖侧链的阿拉伯糖相连，通过醚键与木质素连接 [48]。对香豆酸则酯化于木质素侧链末端的 γ 位，通常不与其他结构单元进一步交联。从木质素结构单元之间的连接方式来看，竹材木质素中常见的键型主要包括 *β*-O-4、*β*-*β*、*β*-5、*β*-1 和 *α*-O-4 等，其中芳基醚键（*β*-O-4）是含量最高的键合方式。*β*-*β*、*β*-5、*β*-1 分别为树脂醇结构、苯基香豆结构与螺环二烯酮结构，均属于 C-C 连接类型 [49]。由于 C-C 键具有更高的化学稳定性，而醚键在化学处理过程中相对更容易发生断裂，因此木质素中不同键型的含量会显著影响其反应活性及细胞壁组分的解离行为。值得注意的是，竹纤维与薄壁细胞木质素在结构组成上均为 S-G-H 型，但二者在结构单元比例和连接键类型上都存在明显差异（图 4c）。薄壁细胞木质素中 S 单元含量更高，其 S/G 显著高于竹纤维（4.67 vs 1.76）；从羟基肉桂酸含量来看，薄壁细胞中含有更多的对香豆酸单元，而竹纤维中则富集更多的阿魏酸单元；从木质素单元连接键来看，薄壁细胞木质素中 *β*-O-4 键含量更高，而竹纤维木质素中 C—C 键比例更高，这表明竹纤维木质素分子结构更趋于高度交联的体型网络，而薄壁细胞木质素则相对更接近于线型结构。总体而言，薄壁细胞由于醚键含量较高、S/G 较大且 C—C 键比例较低，其在碱处理过程中更易发生结构断裂与解聚，这可能是其具有较高碱抽提效率的重要原因之一 [45-46]。

1.3.4　组分间相互作用

纤维素、半纤维素和木质素之间的相互作用显著影响竹材细胞壁的性能。纤维素分子链之间通过分子间氢键自组装形成基本纤丝及其聚集体，构筑成提供机械支撑强度的细胞壁骨架。木质素、半纤维素和果胶等则在纤维素骨架中有序沉积，形成分级有序的复杂结构。细胞壁组分的空间排列规律及它们之间的相互作用是理解细胞壁超微结构及性能特征的重要基础。

细胞壁三大组分中，木聚糖和木质素之间通过化学键连接形成木质素 - 碳水化合物复合体（LCC），羟基肉桂酸被认为是竹材中 LCC 的重要交联物质 [50]。竹纤维 LCC 中存在一定量的苯基糖苷键，源于木聚糖 C-1 与木质素的连接，薄壁细胞 LCC 中检测到 γ 酯键，其可能对应于木聚糖侧链葡萄糖醛酸与木质素之间的连接。由于酯键通常被认为是化学处理过程中较不稳定的连接键 [51]，这也在一定程度解释了为什么薄壁细胞化学处理效率高于竹纤维。相较于木聚糖与木质素之间明确的化学交联，纤维素和木聚糖之间不存在共价键连接，主要通过氢键作用。高等植物细胞壁内木聚糖通过链折叠来增加与纤维素的接触面积，从而增大相互作用强度。竹材细胞壁中，木聚糖可分为支链化程度高和支链化程度低两类。Zhu 等 [46] 通过连续碱处理提取木聚糖发现，支链化程度高的木聚糖被优先提取，而支链化程度低的相对更难提取，暗示后者与纤维素之间具有较强的相互作用。相比之下，通常认为纤维素和木质素之间不存在较强的相互作用，其结合方式主要表现为少量氢键与范德华力。但有学者应用分子动力学模拟认为木质素与纤维素微纤丝之间具有强的相互作用 [52]，但具体作用方式还需进一步研究。除共价连接和分子间作用力外，细胞壁组分的空间取向及其协同变化也可用于判断组分间相互作用。动态二维红外光谱研究表明，纤维素与部分半纤维素组分之间能够形成较为紧密的分子耦合关系 [53]。在竹材中，竹纤维的纤维素和木聚糖表现出较高的取向度，木质素也具有一定取向性（图 5）；薄壁细胞中三类组分的整体取向程度则相对较低 [54]。碱处理脱除部分木聚糖后，薄壁细胞中的木质素取向明显减弱，而竹纤维中的木质素仍保持一定取向，表明竹纤维中木质素、木聚糖及纤维素骨架之间可能存在更强的协同约束作用 [55]。这种组分间相互作用差异有助于解释竹纤维细胞壁较高的结构致密性、界面稳定性和抗化学解离能力。

1.3.5　竹纤维与薄壁细胞的多尺度结构模型

基于竹纤维与薄壁细胞在解剖形态、壁层结构及细胞壁组分分子结构等方面的显著差异，笔者团队进一步构建了二者的多尺度结构模型（图 6），并将两类细胞的关键结构参数及其可能产生的性能影响汇总于表 1。

竹纤维和薄壁细胞均由纤维素、半纤维素和木质素构成 [38]，并具有从分子链、基本纤丝、微纤丝聚集体到细胞壁亚层的分级结构，但二者的组装方式和结构致密程度存在显著差异。竹纤维具有壁厚、腔小和微纤丝高度取向的特征，其次生壁由厚层与薄层交替构成 [24]。纤维素晶体尺寸较大、分子链排列较紧密，木聚糖支化程度较低，

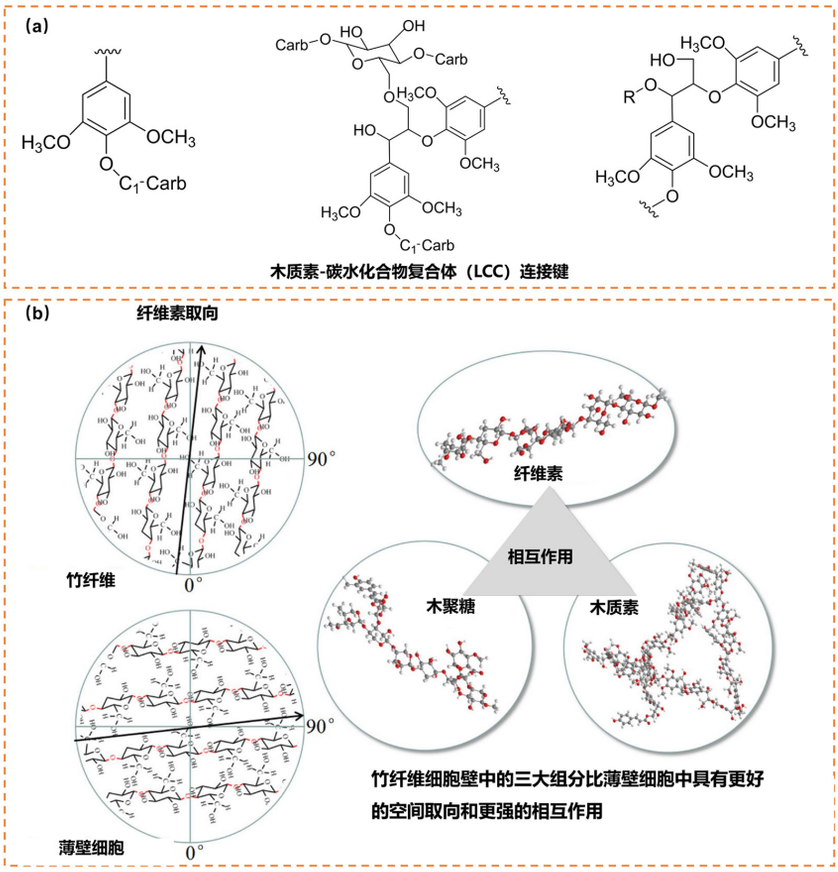


图 5 竹材细胞壁组分间相互作用（a）木质素 - 碳水化合物复合体连接键（b）细胞壁三大组分的空间取向

Fig. 5 Interactions among the components of bamboo cell wall (a) the bonding linkage of lignin-carbohydrate complexes (b) the spatial orientation of the three major components of the cell wall

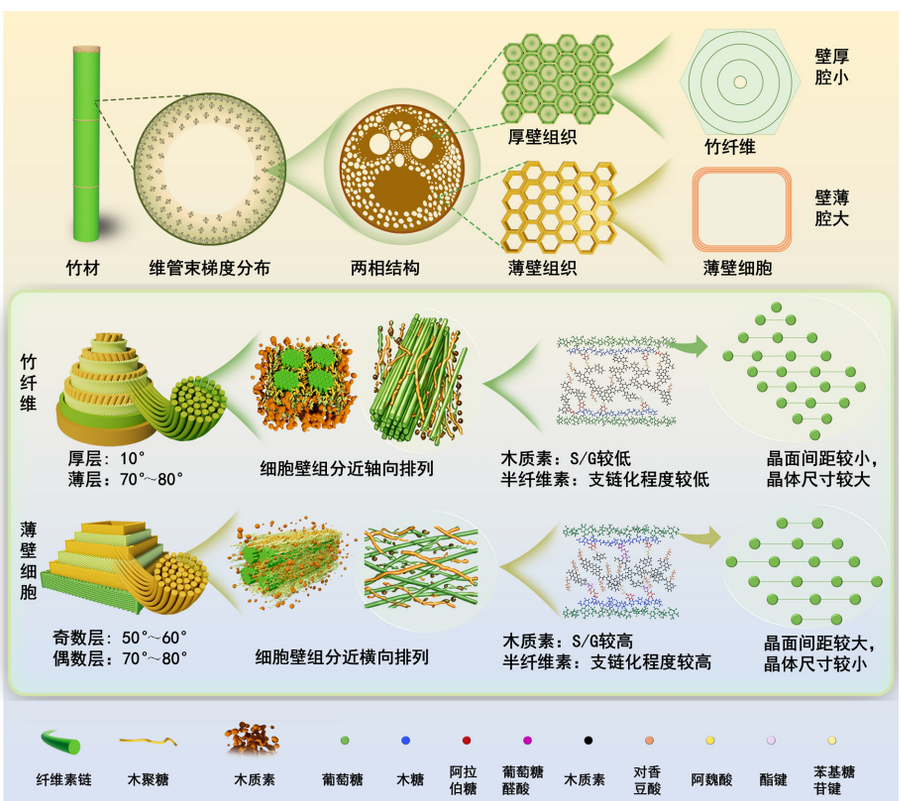


图 6 竹纤维与薄壁细胞细胞壁的多尺度结构模型

Fig. 6 Multi-scale cell wall structural models of bamboo fibers and parenchyma cells

表 1　竹纤维与薄壁细胞的多尺度结构差异及其结构意义 †

Table 1　Multi-scale structural differences between bamboo fibers and parenchyma cells and their structural implications

尺度层级 Scale level	关键参数 Key parameter	竹纤维 Bamboo fiber	薄壁细胞 Parenchyma cell	结构或利用意义 Structural or utilization implication	依据文献 Reference
解剖形态 Anatomical morphology	组织位置与细胞形态	主要分布于维管束中，以纤维鞘和游离纤维股形式存在；壁厚腔小	构成薄壁基本组织，包括纵向长细胞和短细胞；腔大壁薄	竹纤维主要承担力学支撑，薄壁细胞更多参与储藏、传输和物质转化	[7-8]
细胞尺寸 Cell size	长度与宽度	长度约 1.5 ～ 4 mm，宽度约 9 ～ 20 μm	长细胞长度通常＞ 100 μm，短细胞约 20 μm	竹纤维长径比较高，适合增强复合材料；薄壁细胞腔体发达，适合多孔结构和生物质转化利用	[7-8]
壁层结构 Wall layer structure	次生壁层数与形态	厚层和薄层交替排列，一般 3 ～ 18 层	亚层厚度差异较小，数量可多达 11 层，多数约 7 层	壁层结构差异影响细胞壁各向异性、力学响应和加工破坏模式	[14-16,24]
微纤丝取向 Microfibril orientation	微纤丝角	厚层微纤丝角约 10°，薄层约 80°	不同亚层约 50° ～ 80°	竹纤维轴向刚度和强度较高；薄壁细胞轴向承载能力较弱，湿热响应更明显	[14-19]
孔隙结构 Pore structure	细胞壁介孔孔径与孔隙率	介孔主要集中在 2 ～ 10 nm，孔隙率约 2.91%	介孔主要集中在 2 ～ 10 nm，孔隙率约 5.07%	薄壁细胞细胞壁更疏松，水分、化学试剂和生物酶更易进入	[25,31]
组分含量 Component content	纤维素、半纤维素和木质素比例	纤维素含量较高，半纤维素含量较低；木质素总量与薄壁细胞相近	纤维素含量较低，半纤维素含量较高；木质素总量与竹纤维相近	竹纤维更适合力学增强；薄壁细胞更适合组分分离和化学转化	[38,45-46]
纤维素晶体结构 Cellulose crystal structure	结晶度、晶体尺寸和晶面间距	相对结晶度较高；200 和 110 晶面晶体尺寸分别约 27.0 Å 和 41.3 Å；晶面间距较小；更接近 24 链模型	相对结晶度较低；200 和 110 晶面晶体尺寸分别约 26.0 Å 和 39.3 Å；晶面间距较大；更接近 18 链模型	竹纤维纤维素有序性和稳定性较高；薄壁细胞纤维素更易发生溶胀、解聚和晶型转变	[38-39]
半纤维素结构 Hemicellulose structure	木聚糖取代结构	乙酰化程度较低，乙酰基主要位于 C3 位置；阿拉伯糖侧链相对较多	乙酰化程度较高，C2 和 C3 位置均可乙酰化；葡萄糖醛酸单元较多	薄壁细胞半纤维素支化和取代程度较高，碱抽提和化学解离更容易	[40-46]
木质素结构 Lignin structure	S/G 与连接键	S/G 较低，阿魏酸单元较多，C—C 键比例较高，结构更趋于缩合	S/G 较高，对香豆酸单元较多，*β*-O-4 键比例较高，结构相对更易解聚	竹纤维木质素抗解聚能力较强；薄壁细胞木质素更易在碱处理或预处理中断裂	[45-49]
LCC 连接 LCC linkage	木质素 - 碳水化合物连接方式	可检测到苯基糖苷键，木聚糖 - 木质素作用较强	可检测到 γ 酯键，连接键相对更易被化学处理破坏	竹纤维细胞壁组分结合更紧密，薄壁细胞化学可及性更高	[46,50-51]
组分空间取向 Component spatial orientation	纤维素、木聚糖和木质素取向	纤维素和木聚糖取向明显，木质素仍具有一定取向	纤维素微纤丝近垂直于细胞轴向，木聚糖和木质素取向较弱	竹纤维高分子排列更有序，赋予较高力学性能；薄壁细胞结构无序性更高，更易解构	[53-55]
综合结构特征 Comprehensive structural characteristics	致密程度与组分相互作用	壁厚、孔隙率低、结晶度高、组分取向强、木聚糖 - 木质素相互作用较强	壁薄、孔隙率高、结晶度较低、组分取向弱、部分连接键更易解离	二者构成“高强承载单元 - 易转化多孔单元”的结构分工，是整体利用和精准利用的基础	[10-19,31,38-39,45-46,54-55]

† 表中参数根据前文相关研究整理；“结构或利用意义”为基于多尺度结构差异的归纳性解释，其中“24 链模型”和“18 链模型”为基于晶体尺寸及纤维素链数假设提出的推测性结构模型。
The parameters in the table are compiled based on relevant studies mentioned above; the “Structural or Utilization Significance” is a generalized explanation derived from multi-scale structural differences, among which the “24-chain model” and “18-chain model” are speculative structural models proposed based on assumptions about crystal size and the number of cellulose chains.

木质素中缩合型连接比例相对较高[45-46]。与此同时，纤维素、木聚糖和木质素之间表现出较强的取向协同和结构约束作用，共同形成致密、稳定的细胞壁网络。

相比之下，薄壁细胞表现为壁薄、腔大，各细胞壁亚层厚度差异较小，微纤丝角整体较大。其细胞壁孔隙率相对较高，纤维素晶体尺寸较小、晶面间距较大，半纤维素具有较高的乙酰化和支化程度，木质素中 S 单元及 β-O-4 醚键比例较高。薄壁细胞组分的空间取向和协同约束程度相对较弱，其细胞壁表现出较高的可压缩性、溶胀性和化学反应活性[54-55]。

上述差异表明，竹纤维和薄壁细胞分别代表了竹材中“高取向、高致密度、高承载能力”与“高孔隙度、高形变能力、高反应活性”两类结构单元。竹纤维适合作为连续承载骨架或增强相，而薄壁细胞则更适合作为可压缩、可溶解和易转化的基质单元。两类细胞在竹材中的梯度分布与界面耦合共同决定了竹材的宏观力学性能、传质行为和加工响应，也为竹材整体利用与细胞类型导向的精准利用提供了结构基础。

2　竹材不同组织结构与性能关系

竹纤维与薄壁细胞在壁厚、孔隙结构、微纤丝取向、组分含量及分子结构等方面存在显著差异，这些结构特征直接决定了二者在力学性能、理化性质及细胞壁解构效率上的不同表现（图 7）。竹纤维承担了竹材中的主要力学载荷。微力学测试表明，单根竹纤维的纵向弹性模量和拉伸强度可分别达到 44.29 GPa 和 1.7 GPa，其比强度、比模量及断裂延展性均表现出较高水平[56]。安晓静[57]研究了竹纤维鞘和薄壁基本组织的拉伸力学性能，发现竹材纤维鞘拉伸弹性模量、拉伸强度、断裂伸长率分别为 47.33 GPa，729.25 MPa 和 2.04%，而薄壁基本组织仅分别为 1.7 GPa，40.02 MPa 和 3.16%。上述结果表明，竹纤维及其

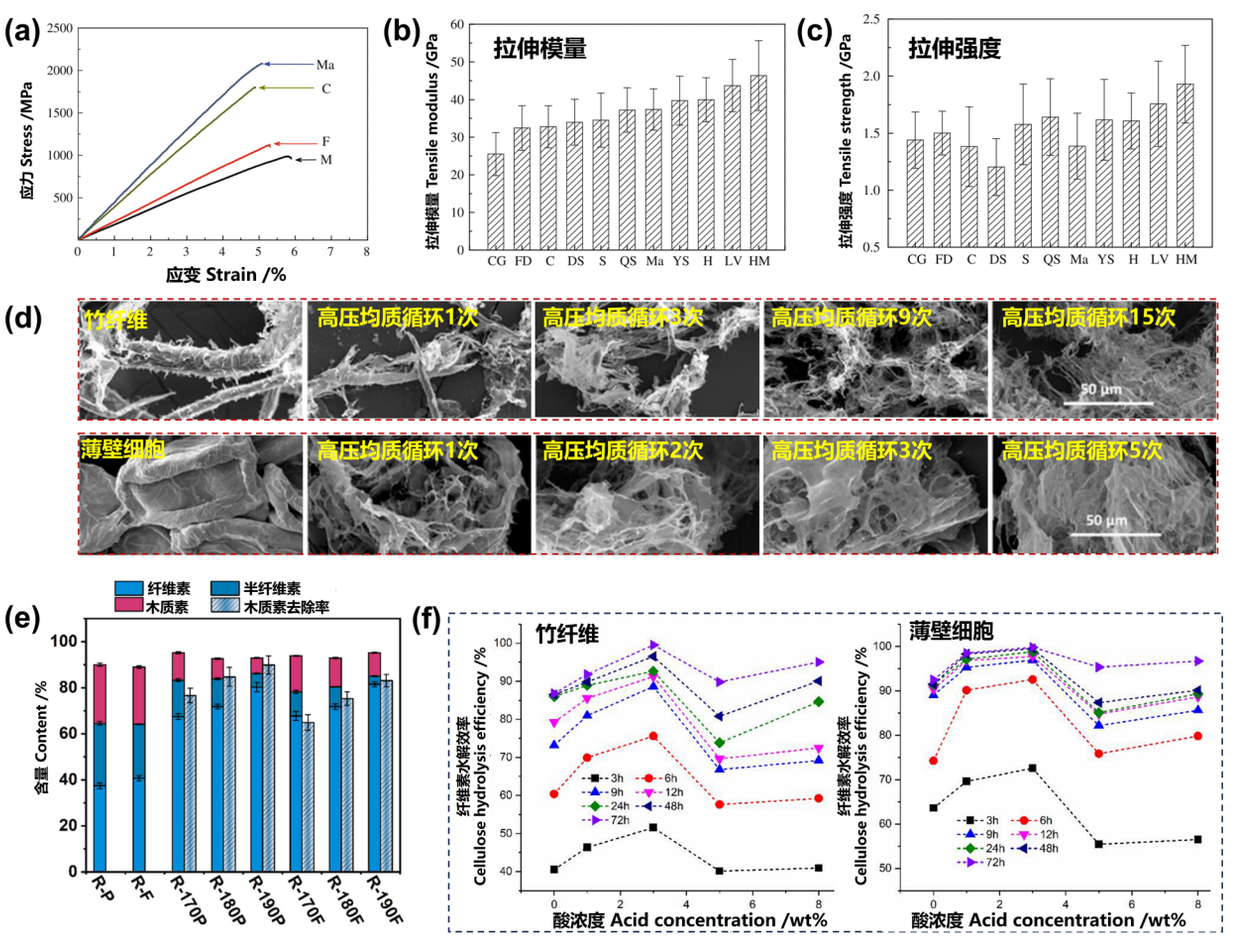


图 7　竹纤维与薄壁细胞的性能差异（a）拉伸应力应变图[56]（b）拉伸模量（c）拉伸强度（d）纳米纤维素制备效率[58]（e）细胞壁组分解离[59]（f）纤维素水解效率[60]

Fig. 7　The performance differences between bamboo fibers and parenchyma cells (a) stress-strain curve of bamboo fiber[56] (b) tensile modulus (c) tensile strength (d) efficiency of nanocellulose production[58] (e) deconstruction of cell wall[59] (f) efficiency of cellulose hydrolysis[60]

组成的纤维鞘是竹材高强度和高刚度的主要结构基础，而薄壁组织则更多承担填充、储存和协调变形等功能。

与竹纤维相比，薄壁细胞虽然力学性能较弱，然而在化学预处理和机械解离过程中均展现了明显的易解构和低能耗优势。Wang 等 [58] 分别以竹纤维与薄壁细胞作为原材料制备纳米纤维素，结果发现薄壁细胞的制备能耗不到竹纤维的 1/3。在利用低共熔溶剂（DES）脱除木质素 [59]、碱处理提取半纤维素以及纤维素水解 [39, 60] 等过程中，薄壁细胞也均具有更高的效率。这一现象表明薄壁细胞由于壁薄腔大、细胞壁结构相对疏松、高分子排列有序性较弱等特征，在生物质转化过程中更易被解构，从而表现出突出的“易转化”特性。相反，竹纤维中较高的纤维素含量、较低的半纤维素含量及更致密的组分排列，使其表现出较高的热稳定性和较低的吸湿性 [61]。

除上述静态结构 - 性能关系外，竹纤维与薄壁细胞在加工和服役过程中的动态结构响应同样影响竹材的尺寸稳定性和失效模式。在吸湿和干燥过程中，水分进入或离开细胞壁会引起纤维素微纤丝间距、基质组分构象及细胞壁尺寸发生变化。由于两类细胞在壁厚、孔隙率、微纤丝取向和组分有序性方面存在差异，其膨胀和收缩程度也存在明显差异。Chen 等 [62] 研究发现，毛竹细胞吸湿膨胀具有明显的细胞类型和结构尺度依赖性；Yuan 等 [63] 进一步指出，干燥过程中不同竹材细胞之间存在协同收缩效应；Zhu 等 [64] 基于数字图像相关技术揭示了竹材横向收缩 / 膨胀过程中的全场应变分布和径向差异。从结构上看，薄壁细胞腔体发达、细胞壁孔隙率较高且组分取向较弱，更容易发生吸湿膨胀、干燥收缩和局部塌陷；竹纤维细胞壁较厚，纤维素结晶度和微纤丝取向程度较高，其尺寸响应相对受限，但会约束相邻薄壁组织变形，从而在纤维鞘 - 薄壁组织界面、复合胞间层、纹孔及细胞壁薄层处诱发局部应力集中。经过反复湿干循环后，这些区域可能出现界面脱黏、壁层分离及微裂纹萌生，并进一步影响竹材及其复合材料的尺寸稳定性和耐久性。

综上，竹纤维与薄壁细胞在细胞壁结构上的差异不仅塑造了二者截然不同的静态性能，也决定了其在加工、改性过程中的动态响应及失效模式。竹纤维凭借致密有序的细胞壁结构和优异的力学性能，更适用于复合材料增强等力学支撑型应用；薄壁细胞则因其结构疏松、化学可及性高且易于机械解离，更适用于组分分离、纳米纤维素制备及生物质转化等方向。

3　竹材增值利用

利用竹材独特的结构特征，可开发多种可持续功能材料，实现竹材的增值利用。依据材料利用方式的不同，竹材增值利用可分为整体利用和精准利用。整体利用保留竹材的天然组织结构，对原竹、竹条、竹片、竹篾、竹束等进行直接加工或者功能化改性；精准利用则依据竹材不同细胞组织的结构和性能差异，对其进行分离和定向利用，主要包括竹纤维与薄壁细胞的特异性利用。

3.1　整体利用

原竹应用于建筑是竹材整体利用中历史最悠久、能耗最低的利用模式。在现代竹家具中，原竹家具非常具有特色。在现代工程领域中，原竹的应用已从经验主导逐渐走向标准化、结构化和工程化。围绕竹材整体利用，一系列竹基板材被开发出来，包括展平竹、重组竹、竹集成材和刨花板等。这些材料通过不同尺度竹单元制备、施胶、组坯和热压等工序，将竹材转化为尺寸标准化、性能变异小、可批量制造的工程材料，广泛应用于建筑、家具、室内装修、交通等领域。近年来，竹材利用开始由传统板材利用拓展至高附加值功能材料。利用竹材的连续纤维骨架、多尺度孔隙结构、细胞壁组分特征，研究者发展了多种先进的竹基复合或功能材料，如高阻燃复合材料、电磁屏蔽复合材料、透明竹基材料等，显示了竹基材料在国民经济多个领域的应用前景。

竹材富含淀粉、蛋白质、糖类等营养物质，同时具有吸湿性，极易发生霉变并降低使用价值。随着竹基复合材料在建筑中和室内的应用，其阻燃性能也受到广泛关注。因此，竹材防霉阻燃是竹材整体利用研究中的重要方向。从组织结构角度看，竹材防霉和阻燃性能受到不同细胞类型及其界面的共同影响。薄壁细胞含有较多营养物质，细胞腔较大且细胞壁孔隙率较高，是水分吸附、霉菌侵入和药剂富集的重要区域。在防霉处理中，薄壁组织及其与导管相连的孔道网络在很大程度上决定了防霉剂的渗透深度、负载量和分布均匀性。然而，其较高的化学可及性也可能导致改性剂在湿热环境中迁移与流失。相比之下，竹纤维细胞壁致密、渗透阻力较大，对药剂吸附和传输的贡献相对有限，但其连续取向结构承担着材料的主要载荷，可减缓改性处理后整体力学性能的下降。现有竹材防霉阻燃改性策略可分为三类：

一是无机或小分子阻燃、防霉组分的原位固定，即通过真空加压浸渍 [65]、溶胶凝胶 [66] 或配位组装 [67] 等方法，在竹材细胞壁或者细胞腔中原位生成活性颗粒或者功能相 [68]，从而提升竹材的防霉和阻燃性能（图 8a）。Zhang 等 [67] 通过共价键将苯硼酸基团固定于竹材细胞壁结构中，使湿膨胀率和干收缩率分别降低 20.3% 和 14.8%，兼顾长效防霉、阻燃与尺寸稳定化。二是细胞壁重构与性能增强型改性，即通过木质素脱除或重组、矿化、树脂浸渍和热压等方法 [69]，对竹材细胞壁改性，协同提升竹材阻燃性、尺寸稳定性与力学性能。Chu 等 [70] 利用低共熔溶剂与热处理促进木质素原位溶解 - 迁移 - 重组，显著提升了竹材的尺寸稳定性，干收缩率和湿膨胀率分别降低约 65% 和 53%，同时赋予其阻燃和抗真菌性能。三是在竹材表面或细胞结构中构建致密涂层，提高材料的疏水阻隔能力，从而增强其防霉、阻燃及尺寸稳定性能 [71]。如 Peng 等 [72] 在竹材表面制备席夫碱杂化涂层，所得竹材极限氧指数为 29.1%，且在 97% 的高湿度下具有优异的防霉性。总体来看，由于竹纤维和薄壁细胞在孔隙结构、组分分布和细胞壁致密程度上存在显著差异，未来仍需进一步阐明两类细胞及其界面结构对药剂分布、霉菌侵染路径和长期耐久性的影响，并发展低流失、广谱高效和绿色协同的多功能改性技术，以推动竹材在建筑、桥梁、船舶等领域的长期应用。

除防霉、阻燃材料应用外，竹材用于电磁屏蔽也是近年来的研究热点方向。电磁屏蔽材料是指能够通过反射、吸收及多重散射等作用削弱或阻隔电磁波传播，从而降低电磁干扰、保护电子设备稳定运行并减少电磁辐射污染的一类功能材料。理想的电磁屏蔽材料通常应兼具良好的导电性或磁响应特性，同时满足轻量化、力学稳定性和环境适应性等应用要求。天然竹材本身导电性较低，难以直接获得高效电磁屏蔽性能，但其各向异性的纤维骨架和多尺度孔隙结构为构建轻质导电网络提供了良好的结构基础（图 8b）。从组织结构看，竹纤维沿竹材轴向连续分布，细胞壁厚且纤维素微纤丝高度取向，经碳化或石墨化后有利于形成连续取向的导电骨架，并在复合材料中承担力学支撑作用；薄壁组织和导管则提供较大的细胞腔和连通孔道，有助于降低材料密度，

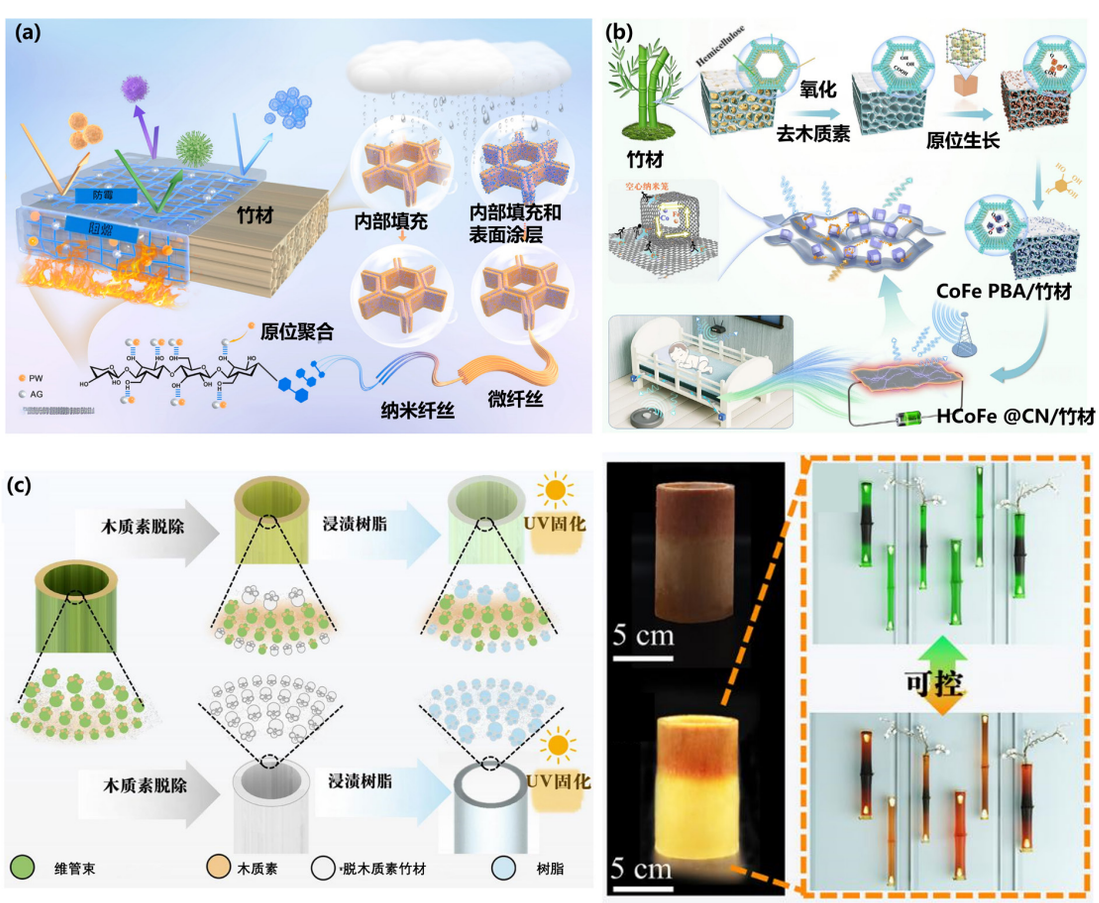


图 8　竹材的整体利用（a）防霉阻燃材料应用 [65]（b）电磁屏蔽应用 [75]（c）竹基透明材料应用 [86]

Fig. 8　The overall utilization of bamboo (a) mold-proof and flame-retardant materials[65] (b) electromagnetic shielding materials[75] (c) transparent materials[86]

并为电磁波在材料内部发生多重反射、散射和界面极化提供空间基础。因此，竹基电磁屏蔽材料性能的提升并不只是依赖外源导电填料，而是取向竹纤维骨架、薄壁组织孔腔网络以及导电或磁性功能组分协同作用的结果。基于这一结构特点，竹材热解碳化及高温石墨化是构建竹基电磁屏蔽材料的有效途径 [73]。通过保留竹材天然多级孔道结构并提高竹炭的石墨化程度，可在材料内部形成连续导电网络，从而显著增强电磁波反射与传导损耗能力。Wang 等 [74] 通过热解制备了具有天然各向异性和分级梯度微通道的竹衍生碳支架，厚度 3 mm 时其屏蔽效能高达 81.52 dB，比屏蔽效能为 1 823 ～ 2 676 $dB·cm^2·g^{-1}$，同时抗压强度为 35.97 MPa，热导率仅 0.161 $W·m^{-1}·K^{-1}$。除单一碳化体系外，另一类重要制备方法是在竹基碳骨架中引入磁性组分，构建电 - 磁耦合网络，从而强化界面极化及多重散射效应，提升竹材对电磁波的吸收衰减能力。Wei 等 [75] 在竹衍生碳复合材料中嵌入超薄空心磁性钴铁碳纳米笼，制得的复合材料在厚度仅 0.14 mm、密度 0.278 g/cm^3 条件下，电磁屏蔽效能达到 50.1 dB，平均反射效能仅 6.57 dB，比屏蔽效能高达 12 872.6 $dB·cm^2·g^{-1}$，同时在 2 V 低电压下表面温度可升至 118 ℃，显示出屏蔽 - 热管理一体化潜力。此外，为满足建筑、家居等应用场景需求，研究者还发展出木 / 竹复合、多层界面组装和纳米金属颗粒负载等技术路线。通过不同材料之间的结构互补和功能耦合，竹基材料不仅可获得较好的电磁屏蔽性能，还能够兼顾力学强度、疏水性、阻燃性及热管理等性能。Zhou 等 [76] 构建了木 / 竹多层复合材料，其中负载铜纳米粒子的竹层提供电磁屏蔽功能，电磁屏蔽效能达到 40 dB，同时材料抗弯强度达到 70.1 MPa，并具备良好疏水和阻燃性能。上述研究表明，通过结构调控、磁性组分引入，竹基材料能够实现高效的电磁波吸收与反射 [77]，并在轻量化、力学性能和热管理方面展现出综合优势，为开发绿色高性能电磁屏蔽材料提供了可行路径，在建筑装饰、智能家居和电子防护等领域具有良好应用前景。

竹基透明材料则代表了竹材向光学功能化方向的重要拓展，其制备方法与透明木材相似，通常以竹材天然纤维骨架为模板，通过脱木素或木质素改性去除具有强光吸收的组分，再浸渍与纤维素折射率相匹配的聚合物以填充孔隙，降低光散射，从而制备具有一定透光性和雾度的透明材料 [78-79]（图 8c）。从组织结构角度看，透明竹材的形成不仅依赖脱木素和树脂填充过程，还受竹材细胞结构协同作用的影响。其中，竹纤维提供连续的力学支撑骨架，而薄壁细胞及导管的孔腔结构则影响试剂渗透和树脂填充均匀性，进而决定材料的光学性能。因此，实现良好的透光性与力学性能，需要在保持纤维骨架完整性的同时提高孔隙填充的均匀性与界面匹配程度。如 Wang 等 [80] 采用低浓度氢氧化钠处理竹材，所得 1 mm 透明竹透过率达 80%，热导率仅 0.203 $W·m^{-1}·K^{-1}$，低于透明木材和普通玻璃。由于竹材本身密度高且缺乏横向输导组织，其透明化难度通常高于木材。Wang 等 [81] 提出木质素改性结合环氧树脂浸渍策略，使材料在可见光区透过率达 87%、雾度约 90%、拉伸强度 118 MPa、韧性 4.5 $MJ·m^{-3}$，且热导率约 0.33 $W·m^{-1}·K^{-1}$；Wang 等 [82] 进一步提出“碱预处理 - 交联 - 脱木素”策略，实现大尺寸柔性透明竹材的制备，1.0 mm 样品透过率和雾度分别为 80% 和 72%，拉伸强度 78.5 MPa。在此基础上，透明竹材的研究进一步拓展至阻燃、防水、光管理和定向扩散等多个方向 [83]。例如，Su 等 [84] 构建三层阻燃屏障后，透明竹的点火时间延长至 116 s，总放热仅 0.7 $kJ·m^{-2}$，总烟量 0.063 m^2；Zhang 等 [85] 制备激光驱动竹扩散器可实现定向白光输出，最优样品显色指数为 81.2。与此同时，Wang 等 [86] 保留整根竹子的自然中空结构，6.23 mm 厚整竹复合材料透光率约 60%，纵向拉伸强度 46.40 MPa，吸水质量变化率小于 4%，并可与电磁屏蔽膜组装成多层节能构件，屏蔽效能达 46.3 dB。总体来看，竹基透明材料已由早期单一“透明替代玻璃”发展为集高透光、高雾度、高强度、低热导率以及电磁屏蔽、阻燃、柔性和光调控于一体的多功能材料体系，在节能建筑、智能窗、柔性电子、光伏器件和光学扩散领域展现出一定应用前景，但未来仍需进一步解决大尺寸连续制造、长期耐候性、界面老化及低成本绿色树脂体系开发等问题。

3.2　精准增值利用

3.2.1　竹纤维基功能材料

近年来，竹材的利用模式逐渐由传统的整体加工向精准增值利用方面转型升级。从组织构成上看，竹材本质上是一种以竹纤维为增强相、薄壁细胞为基体相的两相复合材料。竹纤维与薄壁细胞在细胞壁结构和性能上存在显著差异，精准增值利用就是基于对竹纤维和薄壁组织细胞结构、化学、力学和加工特性的深入了解，研发能充分发挥其理化特性和性能优势，而其他生物质原料

难以竞争的新材料和新产品。

凭借高比强度、可再生和可生物降解等优势，竹纤维近年来在高性能复合材料、绿色可降解材料、生物医用材料等领域展现出广阔的应用前景（图 9）。在结构增强复合材料方面，竹纤维凭借其天然有序排列的结构和良好的力学性能，能够显著提升聚合物基体的强度、刚度与韧性。研究表明，通过界面工程调控竹纤维与聚合物基体之间的相互作用，如引入动态 Zn—O 键 [87]、氢键、纳米 TiO_2 颗粒 [88] 或纤维素纳米纤维 [89] 等，可以有效改善纤维与聚合物基体的界面结合强度，增强载荷传递效率，抑制分层和界面失效，从而突破传统纤维增强聚合物中“高强度 - 高柔韧性难以兼得”的瓶颈。基于这一思路构建的竹纤维增强聚丙烯酸酯、聚丙烯、聚己内酯及环氧树脂复合材料 [90]，不仅表现出优异的机械强度和弯曲韧性，还能够承受大角度弯折、扭转甚至复杂服役工况，显示出其在安全防护、轻量化装备、航空航天、医疗器械及户外结构件等领域的应用潜力。

在塑料替代领域，竹纤维的应用价值尤为突出。由于竹纤维本身具备可生物降解性和较低的环境负荷，研究者正尝试利用其开发全生物质复合材料、可降解包装材料和一次性餐具等绿色产品。例如，通过将竹纤维与醛基化竹纤维进行水相混合和热压成型，可以在不使用胶黏剂的前提下，制备出兼具高强度、高硬度和可回收、可降解的全竹纤维复合材料，其力学性能明显优于传统竹塑复合材料 [91]。同时，多尺度纤维重构、离子交联、氢键网络构筑等方法还使竹纤维材料具备良好的可塑性和形状可设计性，为其替代传统不可降解塑料提供了现实途径 [92]。在食品包装和餐具领域，竹纤维通过与淀粉 [93] 或其他天然组分 [94-95] 复合，可形成稳定的三维交织网络，使材料兼具较高的拉伸强度、耐油性、疏水性和热稳定性，并能在自然条件下较快降解，显著降低白色污染和碳排放。这表明竹纤维不仅是一类优良的力学增强材料，更是推动绿色制造和循环经济发展的关键生物质资源。

随着功能材料需求的提升，竹纤维的应用已拓展到导电储能、智能穿戴、生物医学和光学功能材料等高附加值方向。一方面，竹纤维经金属镀层、导电组分修饰或与薄壁细胞协同构筑后，可制成兼具导电性和柔韧性的纤维电极，展现出较高比电容、能量密度和可编织性，可用于纤维状超级电容器和可穿戴储能器件 [96]。另一方面，在生物医用领域，竹纤维因其弹性模量与部分人体硬组织比较接近，可作为牙科纤维桩等植入修复材料的增强相 [97]。与此同时，一些研究还通过在竹纤维复合体系中引入银纳米粒子等功能相 [68]，使材料兼具阻燃、导热、自清洁和抗菌等多种性能，进一步拓宽了其在建筑、户外装饰和功能防护场景中的应用。此外，通过对竹材进行部分脱木素处理，采用“自上而下”的方法可直接制备具有室温磷光特性的竹纤维 [98]，其发光性能受温度、湿度和激发条件调控，并可与水溶性荧光染料结合实现后发荧光发射。

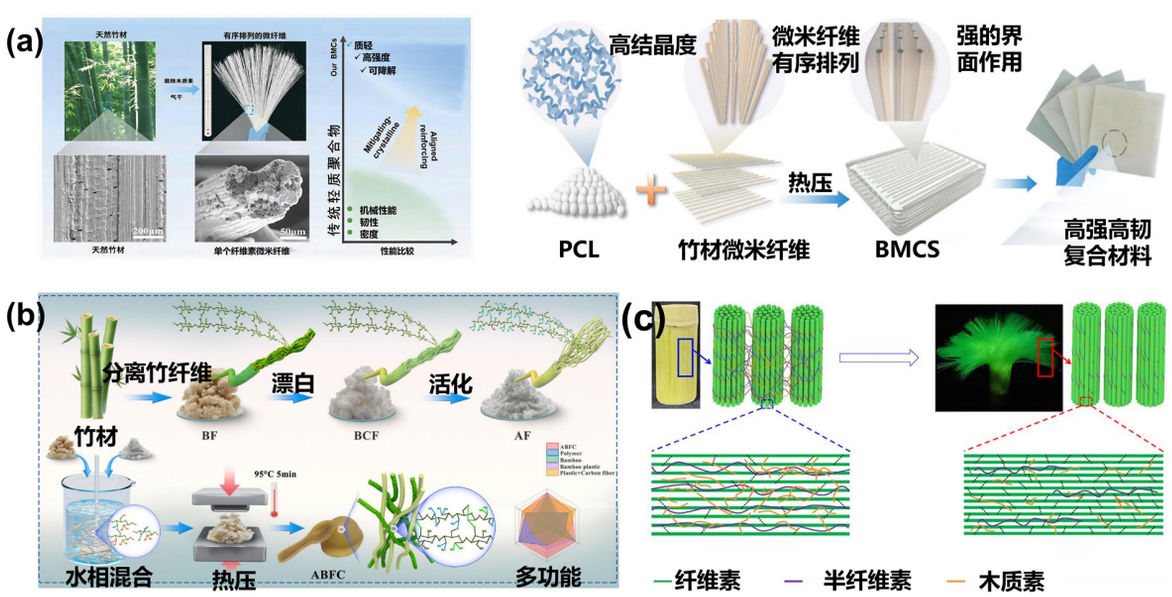


图 9　竹纤维的增值利用途径（a）长纤维增强复合材料（b）竹纤维模压材料（c）竹纤维荧光材料

Fig. 9　The value-added utilization of bamboo fibers (a) long fibers for reinforcing composite materials (b) bamboo fiber molded materials (c) bamboo fiber fluorescent materials

总体来看，竹纤维的应用研究已由早期单纯作为天然增强填料，逐步转向围绕多功能集成绿色材料开展系统性设计。未来，竹纤维材料的发展仍需进一步解决长纤维连续化制备、界面耐久性以及在潮湿、热氧、紫外等复杂服役环境下稳定性与可靠性不足等关键问题。

3.2.2　薄壁细胞基功能材料

近年来，竹材薄壁细胞因其孔腔发达、比表面积大、细胞壁疏松等特点，逐渐由竹材加工过程中的低价值副产物转变为理想的生物炼制资源，在再生纤维素材料、微胶囊、吸附与储能材料、绿色包装、光学薄膜及气凝胶等领域展现出广阔的应用前景（图 10）。研究表明，竹材薄壁细胞相较于竹纤维具有更高的脱木素效率和酶解效率，在低共熔溶剂预处理过程中更易发生木质素迁移、*β*-O-4 键断裂及分子量下降，是生物质精炼过程中的优选原料 [59]。同时，预处理后形成的纳米级木质素组分有利于木质素纳米颗粒的制备，而残余纤维素基底也具有进一步开发纳米纤维素材料的潜力。Chen 等 [99] 将薄壁细胞来源的微 / 纳米纤维素进行机械解离和酯化改性，可构筑兼具高透光率、可调雾度、良好力学性能与抗眩光能力的生物基光学管理薄膜，拓宽了竹材薄壁细胞在柔性光学材料中的应用范围。此外，在再生纤维素领域，竹材薄壁细胞纤维素经溶解再生后制备出再生纤维素薄膜，并实现纤维素 I 到纤维素 II 的晶型转变，从而为废弃竹生物质资源的增值利用提供了新途径 [100]；在生物医用和缓释载体方面，利用脱木素和冻融处理可将竹薄壁细胞转化为空心微胶囊 [101]，该类微胶囊不仅保留了天然薄壁细胞腔体和层级多孔结构，而且具备较高比表面积和较多表面活性位点，能够实现药物的高效负载、酸响应释放，表现出良好的可降解性和环境友好性，为天然生物质微胶囊替代合成高分子微胶囊提供了新的思路。

在能源存储和污染治理领域，竹材薄壁细胞独特的多孔结构同样赋予其显著优势。经碳化和活化处理后，薄壁细胞可转化为高比表面积、高

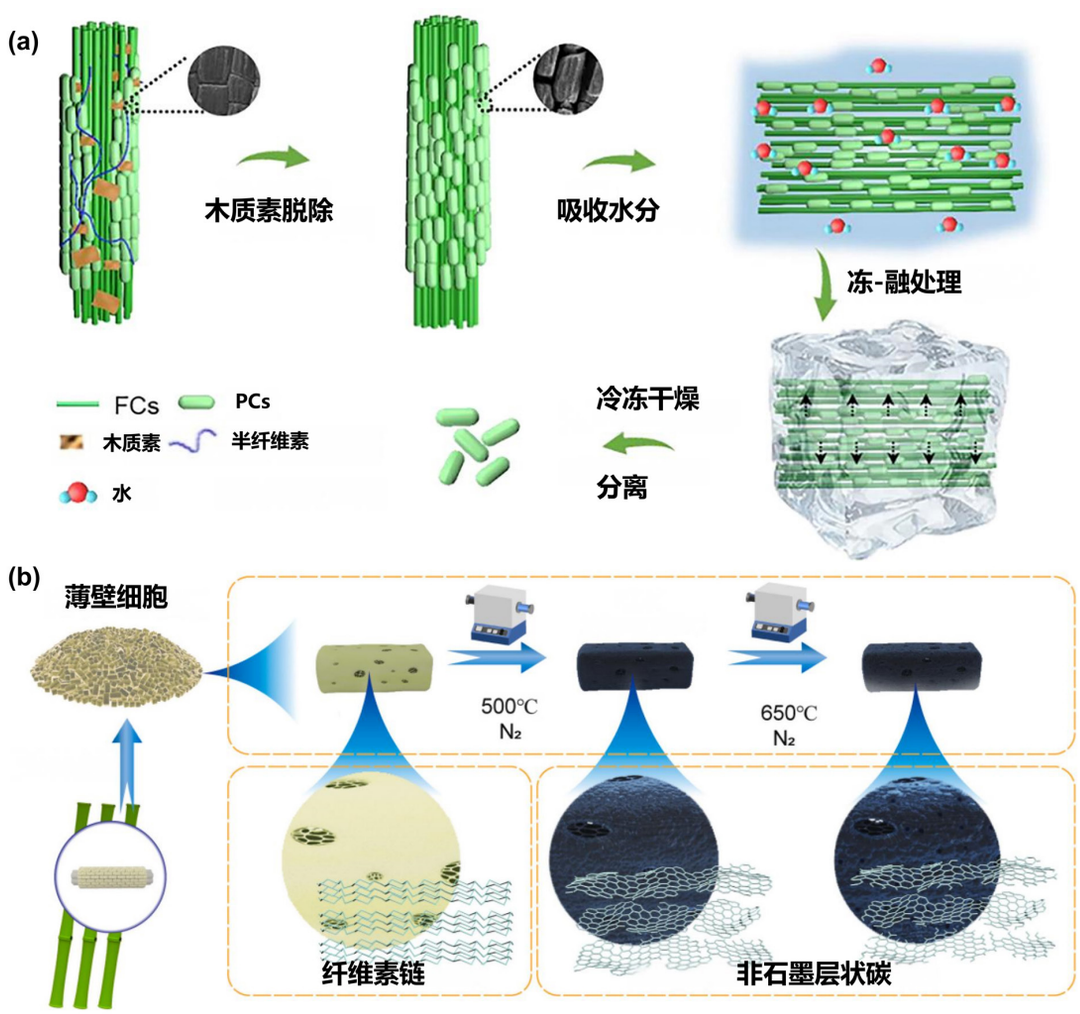


图 10　薄壁细胞的增值利用途径（a）薄壁细胞用于缓释胶囊材料（b）碳材料制备

Fig. 10　Value-added utilization of parenchyma cells (a) capsule materials (b) carbon materials

孔容的生物质碳材料，既可作为超级电容器电极表现出较高的比电容、良好的倍率性能和循环稳定性[102]，也可作为吸附剂高效去除亚甲基蓝等阳离子染料[103]，体现出其在储能与废水处理中的双重应用价值。与此同时，基于薄壁细胞多孔碳骨架的结构优势，将其与聚乙二醇及碳纳米管等复合后制备出形状稳定复合相变材料，不仅有效抑制了有机相变材料的泄漏问题，而且显著提高了热导率、潜热储存能力及光热转换效率，在竹基建筑材料和热管理领域具有良好的应用潜力[104-105]。除储能材料外，竹材薄壁细胞在绿色自胶合复合材料和包装制品中也具有重要价值。由于其腔大壁薄且相对易于解聚，在热压过程中易于变形，薄壁细胞能够在竹纤维之间形成致密互联，从而显著增强自胶合竹复合材料的内部结合强度、尺寸稳定性和耐湿性能，使其在无甲醛家具、室内装饰和包装材料领域也表现出较强的应用潜力[106]。同时，通过改进热压工艺制备的竹薄壁细胞托盘还兼具较高的力学性能、抗氧化性、抗菌性及生物降解性[107]，显示出其在绿色食品包装中的应用潜力。总体而言，薄壁细胞的研究已由传统低值废弃物燃料利用逐步拓展至纳米纤维素材料、储能材料等增值利用方向。然而，未来实现薄壁细胞的增值利用仍需进一步突破细胞高效分离和细胞壁组分低能耗清洁分离等关键技术，推动其由实验室研究向规模化应用的快速转变。

4 总结与展望

竹材作为一种重要且丰富的天然生物资源，是替代石油基材料的重要原料，实现其增值利用的关键在于深入揭示竹材结构与性能之间的关系。近年来，尽管学术界对竹材壁层结构、细胞壁超微结构、细胞壁高分子结构有了更加深入的认识，但是受限于现有表征方法的空间和时间分辨率，对竹材细胞壁分子水平的结构和组装机制的认识仍比较薄弱。此外，竹材先进功能材料的规模化、连续化制备与工程耐久应用仍面临诸多挑战。未来，基于竹材单元结构特性开展精准增值利用是竹材增值利用的重要方向，研究应聚焦以下几个方面：

1）细胞壁分子水平结构解译方面，需要进一步阐明细胞壁高分子之间的相互作用机制。竹材纤维素与木聚糖、木聚糖与木质素之间存在复杂的结构关联，纤维素与木质素之间是否存在直接相互作用、其作用方式仍有待进一步明确。未来应结合原位二维固态核磁共振波谱、二维红外光谱及分子动力学模拟等手段，从纳米和分子尺度解析细胞壁高分子之间的相互作用机制。

2）竹纤维增值利用方面，仍需重点突破竹长纤维连续化制备、水稳定性提升、界面耐久性增强以及复杂环境条件下服役可靠性等关键问题。未来应重点发展低损伤、高效率的竹纤维分离与连续化制备技术，在尽可能保持纤维长径比和本征力学性能的同时，提高制备过程的稳定性和可规模化程度。

3）薄壁细胞增值利用方面，仍需进一步突破竹薄壁组织细胞高效分离、细胞壁组分低能耗制备等关键技术，寻找更多适合竹薄壁细胞的应用场景，推动其由实验室研究向规模化应用转变。

4）竹纤维和薄壁组织的精准重组利用。竹纤维和薄壁组织细胞存在显著的多尺度结构和化学差异性。如何利用这种差异性并通过两者之间的精准重组，更高效地制备先进竹基功能材料是非常值得深入思考的问题。作者团队开始利用竹纤维和薄壁组织细胞在不同溶剂中的溶解速率差异性开展微纳复合膜、复合水凝胶以及复合气凝胶的研究，并显示出了令人鼓舞的成效。

参考文献：

[1] 吴义强 .“ 以竹代塑 ” 科技创新与基础科学问题 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(1):1-22.
Wu Y Q. Technological innovation and fundamental science for bamboo as a substitute for plastic[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(1):1-22.

[2] 朱家伟 . 竹材细胞壁高分子组成、结构、微区分布及相互作用 [D]. 北京 : 中国林业科学研究院 ,2022:50-58.
Zhu J W. The composition, structure, micro-distribution and interaction of cell wall polymers in bamboo[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2022:50-58.

[3] Chen S M, Zhang S C, Gao H L, et al. Mechanically robust bamboo node and its hierarchically fibrous structural design[J]. National Science Review,2023,10:nwac195.

[4] 连彩萍 , 刘嵘 , 张淑琴 , 等 . 竹材维管束解剖构造的研究进展 [J]. 林产工业 ,2018,45(9):8-12.
Lian C P, Liu R, Zhang S Q, et al. Research progress on anatomical structure of bamboo vascular bundles[J]. China Forest Products Industry,2018,45(9):8-12.

[5] 徐皓诚 . 刚竹属竹材径向梯度结构与不对称弯曲行为的关系研究 [D]. 北京 : 中国林业科学研究院 ,2022:44-54.
Xu H C. The radial gradient structure of *Phyllostachys* and its relationship with asymmetric bending behavior[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2022:44-54.

[6] 李言 , 陈然 , 宋莎莎 , 等 . 毛竹径向梯度变异性及其性能调控机制研究进展 [J]. 世界林业研究 ,2026,39(1):29-37.
Li Y, Chen R, Song S S, et al. Research progress on radial gradient variability and performance regulation mechanisms of moso bamboo[J]. World Forestry Research,2026,39(1):29-37.

[7] 杨淑敏 , 江泽慧 , 任海青 . 竹类解剖特性研究现状及展望 [J]. 世界竹藤通讯 ,2006,4(3):1-6,12.
Yang S M, Jiang Z H, Ren H Q. Present status and advances in anatomical characteristics of bamboo[J]. World Bamboo and Rattan,2006,4(3):1-6,12.

[8] 连彩萍 . 毛竹材薄壁细胞超微构造研究 [D]. 北京 : 中国林业科学研究院 ,2020:17-26.
Lian C P. Ultrastructure of parenchyma cells in moso bamboo [*Phyllostachys edulis*][D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2020:17-26.

[9] Liu D G, Song J W, Anderson D P, et al. Bamboo fiber and its reinforced composites: structure and properties[J]. Cellulose, 2012,19:1449-1480.

[10] Chen C, Li H T, Dauletbek A, et al. Properties and applications of bamboo fiber: a current-state-of-the-art[J]. Journal of Renewable Materials,2022,10(3):605-624.

[11] Li Z H, Chen C J, Xie H, et al. Sustainable high-strength macrofibres extracted from natural bamboo[J]. Nature Sustainability, 2022,5:235-244.

[12] Zhao W J, Zhang J, Zhang W F, et al. Effect of bamboo unit morphology on the preparation of bamboo fibers by steam explosion[J]. Industrial Crops and Products,2023,202:117066.

[13] Chen Q, Wei P L, Tang T, et al. Quantitative visualization of weak layers in bamboo at the cellular and subcellular levels[J]. ACS Applied Bio Materials,2020,3(10):7087-7094.

[14] Hu K L, Huang Y H, Fei B H, et al. Investigation of the multilayered structure and microfibril angle of different types of bamboo cell walls at the micro/nano level using a LC-PolScope imaging system[J]. Cellulose,2017,24:4611-4625.

[15] Lian C P, Liu R, Zhang S Q, et al. Ultrastructure of parenchyma cell wall in bamboo (*Phyllostachys edulis*) culms[J]. Cellulose, 2020,27:7321-7329.

[16] Ren W T, Guo F, Liu M H, et al. The arrangement and size of cellulose microfibril aggregates in the cell walls of sclerenchyma fibers and parenchyma tissue in bamboo[J]. Journal of Renewable Materials,2021,9(12):2291-2301.

[17] Parameswaran N, Liese W. On the fine structure of bamboo fibres[J]. Wood Science and Technology,1976,10:231-246.

[18] Mannan S, Zaffar M, Pradhan A, et al. Measurement of microfibril angles in bamboo using Mueller matrix imaging[J]. Applied Optics,2016,55(32):8971-8978.

[19] Ahvenainen P, Dixon P G, Kallonen A, et al. Spatially-localized bench-top X-ray scattering reveals tissue-specific microfibril orientation in moso bamboo[J]. Plant Methods,2017,13:5.

[20] Preston R D, Singh K. The fine structure of bamboo fibres I: optical properties and X-ray data[J]. Journal of Experimental Botany,1950,1:214-226.

[21] Wai N N, Nanko H, Murakami K. A morphological study on the behavior of bamboo pulp fibers in the beating process[J]. Wood Science and Technology,1985,19:211-222.

[22] 刘波 . 毛竹发育过程中细胞壁形成的研究 [D]. 北京 : 中国林业科学研究院 ,2008:77-79.
Liu B. Formation of cell wall in developmental culms of *Phyllostachys pubescens*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2008:77-79.

[23] Chen M L, An X, He Y, et al. Ultra-microstructure analysis and model development of bamboo fiber cell walls[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2024,280:135986.

[24] Ren W T, Zhu J W, Guo F, et al. Estimating cellulose microfibril orientation in the cell wall sublayers of bamboo through dimensional analysis of microfibril aggregates[J]. Industrial Crops & Products,2022,179:114677.

[25] Cao M D, Ren W T, Zhu J W, et al. Cell wall pore structures of bamboo evaluated using gas adsorption methods[J]. Holzforschung, 2022,76(8):754-764.

[26] 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.

[27] 刘嵘 . 毛竹材细胞壁的纹孔特征研究 [D]. 北京 : 中国林业科学研究院 ,2017:1-2.
Liu R. Characteristics of pits in bamboo (*Phyllostachys edulis* (Carr.) J. Houz.) cell walls[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2017:1-2.

[28] Lian C P, Liu R, Cheng X F, et al. Characterization of the pits in parenchyma cells of the moso bamboo [*Phyllostachys edulis* (Carr.) J. Houz.] culm[J]. Holzforschung,2019,73(7):629-636.

[29] 费本华 , 刘嵘 , 刘贤淼 , 等 . 竹材纹孔结构及表征方法研究进展 [J]. 林业工程学报 ,2019,4(2):13-18.
Fei B H, Liu R, Liu X M, et al. A review of structure and characterization methods of bamboo pits[J]. Journal of Forestry Engineering,2019,4(2):13-18.

[30] Luo J J, Lian C P, Liu R, et al. Comparison of metaxylem vessels and pits in four sympodial bamboo species[J]. Scientific Reports,2019,9:10876.

[31] Ren W T, Cao M D, Zhou Y, et al. Pore structure evolution of bamboo fiber and parenchyma cell wall during sequential chemical removal[J]. Industrial Crops & Products,2023,193: 116165.

[32] 任文庭 . 竹材纤维素的超分子结构及其对水解糖化的影响 [D]. 北京 : 中国林业科学研究院 ,2021:1-2.
Ren W T. The Supramolecular structure of bamboo cellulose

and its effect on hydrolysis saccharification[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2021:1-2.

[33] 胡凯莉 , 黄艳辉 , 姚春丽 , 等 . 竹纤维细胞壁研究进展 [J]. 中国造纸学报 ,2017,32(1):55-61.
Hu K L, Huang Y H, Yao C L, et al. Research advances in bamboo fiber cell wall[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2017,32(1):55-61.

[34] Ding S Y, Zhao S, Zeng Y N. Size, shape, and arrangement of native cellulose fibrils in maize cell walls[J]. Cellulose,2014,21: 863-871.

[35] Fernandes A N, Thomas L H, Altaner C M, et al. Nanostructure of cellulose microfibrils in spruce wood[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011,108(47):E1195-E1203.

[36] Thomas L H, Forsyth V T, Martel A, et al. Diffraction evidence for the structure of cellulose microfibrils in bamboo, a model for grass and cereal celluloses[J]. BMC Plant Biology,2015,15:153.

[37] Guo J, Rennhofer H, Yin Y F, et al. The influence of thermo-hygro-mechanical treatment on the micro- and nanoscale architecture of wood cell walls using small- and wide-angle X-ray scattering[J]. Cellulose,2016,23(4):2325-2340.

[38] Ren W T, Guo F, Zhu J W, et al. A comparative study on the crystalline structure of cellulose isolated from bamboo fibers and parenchyma cells[J]. Cellulose,2021,28:5993-6005.

[39] Ren W T, Zhu J W, Guo F, et al. Structural evolution of cellulose from bamboo fibers and parenchyma cells during ionic liquid pretreatment for enhanced hydrolysis[J]. Biomacromolecules, 2022,23(5):1938-1948.

[40] Bai Z Y, Lyu Z W, Rao J, et al. The effect of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) cell types on the structure of hemicelluloses[J]. Industrial Crops & Products,2022,187:115464.

[41] Peng P, Peng F, Bian J, et al. Isolation and structural characterization of hemicelluloses from the bamboo species *Phyllostachys incarnata* Wen[J]. Carbohydrate Polymers, 2011,86:883-890.

[42] Suzuki K, Kitamura S, Sone Y, et al. Immunohistochemical localization of hemicelluloses and pectins varies during tissue development in the bamboo culm[J]. The Histochemical Journal, 2002,34:535-544.

[43] Yue P P, Fu G Q, Hu Y J, et al. Changes of chemical composition and hemicelluloses structure in differently aged bamboo (*Neosinocalamus affinis*) culms[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2018,66(35):9199-9208.

[44] Wang K L, Wang B, Hu R B, et al. Characterization of hemicelluloses in *Phyllostachys edulis* (moso bamboo) culm during xylogenesis[J]. Carbohydrate Polymers,2019,221: 127-136.

[45] Zhu J W, Ren W T, Guo F, et al. Structural elucidation of lignin, hemicelluloses and LCC from both bamboo fibers and parenchyma cells[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2024,274:133341.

[46] Zhu J W, Guo F, Ma C Y, et al. The alkaline extraction efficiency of bamboo cell walls is related to their structural differences on both anatomical and molecular level[J]. Industrial Crops & Products,2022,178:114628.

[47] Wen J L, Sun S L, Xue B L, et al. Quantitative structural characterization of the lignins from the stem and pith of bamboo (*Phyllostachys pubescens*)[J]. Holzforschung,2013,67(6): 613-627.

[48] Yuan T Q, Sun S N, Xu F, et al. Characterization of lignin structures and lignin-carbohydrate complex (LCC) linkages by quantitative ^{13}C and 2D HSQC NMR spectroscopy[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2011,59(19):10604-10614.

[49] Wen J L, Sun S L, Xue B L, et al. Structural elucidation of inhomogeneous lignins from bamboo[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2015,77:250-259.

[50] Huang C X, Tang S, Zhang W Y, et al. Unveiling the structural properties of lignin-carbohydrate complexes in bamboo residues and its functionality as antioxidants and immunostimulants[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering,2018,6(9): 12522-12531.

[51] Lyu Z W, Bai Z Y, Su L Y, et al. Unveiling lignin structures and lignin-carbohydrate complex (LCC) linkages of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) Fibers and parenchyma cells[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023,241:124461.

[52] Youssefian S, Rahbar N. Molecular origin of strength and stiffness in bamboo fibrils[J]. Scientific Reports,2015,5:11116.

[53] Akerholm M, Salmén L. Interactions between wood polymers studied by dynamic FT-IR spectroscopy[J]. Polymer,2001,42: 963-969.

[54] Zhang X X, Guo F, Yu Z F, et al. Why do bamboo parenchyma cells show higher nanofibrillation efficiency than fibers: an investigation on their hierarchical cell wall structure[J]. Biomacromolecules, 2022,23(10):4053-4062.

[55] Zhu J W, Ren W T, Guo F, et al. The spatial orientation and interaction of cell wall polymers in bamboo revealed with a combination of imaging polarized FTIR and directional chemical removal[J]. Cellulose,2022,29:3163-3176.

[56] Ren D, Yu Z X, Li W J, et al. The effect of ages on the tensile mechanical properties of elementary fibers extracted from two sympodial bamboo species[J]. Industrial Crops & Products, 2014,62:94-99.

[57] 安晓静 . 竹子的多尺度拉伸力学行为及其强韧机制 [D]. 北京 : 中国林业科学研究院 ,2013:25-30.
An X J. Multi-scale tensile mechanical behavior and toughening mechanism for bamboo[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013:25-30.

[58] Wang H K, Zhang X X, Jiang Z H, et al. A comparison study on the preparation of nanocellulose fibrils from fibers and parenchymal cells in bamboo (*Phyllostachys pubescens*)[J]. Industrial Crops & Products,2015,71:80-88.

[59] Zhang C, Guo K N, Ma C Y, et al. Assessing the availability of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) fibers and parenchyma cells for producing lignin nanoparticles and fermentable sugars by rapid carboxylic acid-based deep eutectic solvents pretreatment[J]. Industrial Crops & Products,2023,193:116204.

[60] Jin K, Kong L Y, Liu X G, et al. Understanding the xylan content for enhanced enzymatic hydrolysis of individual bamboo fiber and parenchyma cells[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019,7(22):18603-18611.

[61] Guo F, Zhang X X, Yang R L, et al. Hygroscopicity, degradation and thermal stability of isolated bamboo fibers and parenchyma cells upon moderate heat treatment[J]. Cellulose, 2021,28(13):8867-8876.

[62] Chen Q, Fang C H, Wang G, et al. Hygroscopic swelling of moso bamboo cells [J]. Cellulose,2020,27:611-620.

[63] Yuan J, Chen L, Mi B B, et al. Synergistic effects of bamboo cells during shrinkage process[J]. Industrial Crops and Products,2023,193:116232.

[64] Zhu J Y, Tan Y J, Chen K W, et al. Evaluation of transverse shrinking and swelling of bamboo using digital image correlation technique[J]. Industrial Crops and Products,2024,211:118274.

[65] Liu Z, Yang S L, Wang Z W, et al. Leach-resistant modified bamboo with fire-retardant and anti-mildew properties via *in situ* synthesis[J]. Construction and Building Materials,2024,427: 136249.

[66] Zhang Y, Chen H, Bai M Y, et al. Convert bamboo into high-performance, long-time durability, and fire-retardant with hyperbranched polyethylene glycol and boron[J]. Chemical Engineering Journal,2024,491:152107.

[67] Zhang Y, Bai M Y, Zhang A, et al. A facile and small-molecule regulated borate network gelation to improve the mildew proof, fire-retardant of bamboo[J]. Industrial Crops & Products,2023,197:116602.

[68] Hu J, Lin J, Yu Y L, et al. Multifunctional bamboo-based fiber composites fabricated by assembling 3D network structures of bamboo and spatial distribution of silver nanoparticles[J]. Composites Science and Technology,2024,255:110739.

[69] He W, Wang R, Pang Q Y, et al. High strength, superior fire retardancy, and dimensional stability of cellulosic hybrids[J]. Green Chemistry,2023,25(22):9413-9421.

[70] Chu S M, Li Y Q, Shi Y, et al. A green strategy based on in situ lignin fusing and reorganization: synergistic enhancement of dimensional stability and permeability in bamboo[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering,2025,13(39):16736-16746.

[71] Shan J Y, Liu G Y, Wu J Y, et al. Development of mechanically robust and flame-retardant epoxy/bamboo composites utilising cable-like phytic acid - Cu^{2+} layer-by-layer structures on bamboo fibres[J]. Construction and Building Materials,2025,489:142418.

[72] Peng C H, Zhong J H, Ma X J, et al. Transparent, hard-wearing and bio-based organic / silica hybrid coating for bamboo with enhanced flame retardant and antifungal properties[J]. Progress in Organic Coatings,2022,167:106830.

[73] Sun W, Lou Z C, Xu L, et al. Bioinspired carbon superstructures for efficient electromagnetic shielding[J]. ACS Applied Materials and Interfaces,2023,15(3):4358-4370.

[74] Wang G, Lai D G, Xu X H, et al. Lightweight, stiff and heat-resistant bamboo-derived carbon scaffolds with gradient aligned microchannels for highly efficient EMI shielding[J]. Chemical Engineering Journal,2022,446:136911.

[75] Wei J, Sun X, Gao Q Y, et al. Hollow CoFe-MOF @ bamboo derived lightweight carbon composites for high-efficiency electromagnetic interference shielding and thermal management[J]. Advanced Functional Materials,2026,36(7): e13845.

[76] Zhou Y X, Liu S Q, Zhu M J, et al. Multifunctional wood-bamboo hybrid materials for effective electromagnetic interference shielding[J]. Construction and Building Materials,2024,440:137450.

[77] Wang C C, Zhong Z J, Hu C S, et al. *In-situ* growth of mycelium-bamboo heterogeneous interfaces: biofabricated porous carbon for efficient electromagnetic interference shielding and Joule heating[J]. Carbon,2026,246:120960.

[78] Wang Z H, Wang X, Zhang Y L. Properties of transparent bamboo based on different positions of bamboo[J]. Industrial Crops & Products,2023, 202:117077.

[79] Wang W, Gan J, Yuan Q P, et al. Flexible and transparent bamboo composites enabled by a dual-resin blending strategy[J]. Chemical Engineering Journal,2025,509:161256.

[80] Wang X, Shan Y S, Shi S Q, et al. Optically transparent bamboo with high strength and low thermal conductivity[J]. ACS Applied Materials and Interfaces,2021,13(1):1662-1669.

[81] Wang Y Y, Guo F L, Li Y Q, et al. High overall performance transparent bamboo composite via a lignin-modification strategy[J]. Composites Part B: Engineering,2022,235:109798.

[82] Wang K L, Peng H Z, Gu Q Y, et al. Scalable, large-size, and flexible transparent bamboo[J]. Chemical Engineering Journal, 2023,451:138349.

[83] Wang Y, Zhang Y, Zuo Y F, et al. Bioinspired precision peeling of ultrathin bamboo green cellulose frameworks for light management in optoelectronics[J]. Nano-Micro Letters,2026,18:19.

[84] Su J H, Yang Y D, Wan C C, et al. A novel flame-retardant, smoke-suppressing, and superhydrophobic transparent bamboo[J]. Research,2024,7:0317.

[85] Zhang J, Zhang L, Meng Y, et al. Aligned fiber induced laser-driven bamboo diffuser enabling highly directional illumination

applications[J]. Advanced Functional Materials,2025,35: 2419025.

[86] Wang J, Wu X Y, Wang Y J, et al. Green, sustainable architectural bamboo with high light transmission and excellent electromagnetic shielding as a candidate for energy-saving buildings[J]. Nano-Micro Letters,2023,15:11.

[87] Hou J K, Liu J H, Wu X Z, et al. Highly strong yet flexible polyacrylate composites reinforced with bamboo macrofiber via dynamic metal-linker bonds[J]. Advanced Functional Materials, 2025,35(40):2504292.

[88] Guo J, Cao M D, Ren W T, et al. Mechanical, dynamic mechanical and thermal properties of TiO_2 nanoparticles treatment bamboo fiber-reinforced polypropylene composites[J]. Journal of Materials Science,2021,56:12643-12659.

[89] Xia L M, Wu J Y, Wang H, et al. Enhanced mechanical performance of bamboo fiber/polypropylene composites via micro-nano reinforcing strategy[J]. Composites Part B: Engineering,2024,280:111488.

[90] Li L, Li H M, Chen Y T, et al. The potential and challenges of delignified bamboo fiber as reinforcement for composites: the effects of fiber length, bamboo nodes and PVA treatment on strength[J]. Composites Part B: Engineering,2026,313:113370.

[91] Zhang W J, Zhang J, Ren W T, et al. Moldable and degradation-enabled all-bamboo fiber composites with high mechanical strength through an eco-friendly aqueous processing route[J]. Composites Part B: Engineering,2026,314:113457.

[92] Guo D K, Ren W T, Yao S S, et al. Conversion of bamboo into strong, waterproof, and biodegradable thermosetting plastic through cell wall structure directed manipulation[J]. ACS Nano, 2024,18(35):24414-24425.

[93] Chen X Y, Chen F M, Jiang H, et al. Replacing plastic with bamboo: eco-friendly disposable tableware based on the separation of bamboo fibers and the reconstruction of their network structure[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2023,11(19):7407-7418.

[94] Liu C, Luan P C, Li Q, et al. Biodegradable, hygienic, and compostable tableware from hybrid sugarcane and bamboo fibers as plastic alternative[J]. Matter,2020,3(6):2066-2079.

[95] Hu J, Zhang Y H, He Y Q, et al. Transformation of bamboo: from multiscale fibers to robust and degradable cellulose-based materials for plastic substitution[J]. Small,2025,21(27):2411339.

[96] Lin Q Q, Jiang P, Ren S H, et al. Advanced functional materials based on bamboo cellulose fibers with different crystal structures[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,2022,154:106758.

[97] Huang A Y, Ni L M, Feng X Q, et al. A bioinspired bamboo fiber post integrating customizable architecture and modulus-matching mechanics promotes the development of personalized dental restoration[J]. Chemical Engineering Journal,2025,524:169776.

[98] Zhai Y X, Zhou J Y, Dang B, et al. Room-temperature phosphorescence from bamboo fibers and designed materials[J]. ACS Materials Letters,2025,7(3):1119-1126.

[99] Chen Y, Zhang Y T, Long J, et al. Multiscale cellulose-based optical management films with tunable transparency and haze fabricated by different bamboo components and mechanical defibrillation approaches[J]. Carbohydrate Polymers,2025,348:122811.

[100] Gao X, Li M, Zhang H, et al. Fabrication of regenerated cellulose films by DMAc dissolution using parenchyma cells via low-temperature pulping from yunnan-endemic bamboos[J]. Industrial Crops & Products,2021,160:113116.

[101] Li X X, Liao Q, Yang Y, et al. Facile, high-yield, and freeze-and-thaw-assisted approach to fabricate bamboo-derived hollow lignocellulose microcapsules for controlled drug release[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering,2022,10(47):15520-15529.

[102] Xia Y, Zuo H F, Lyu J L, et al. Preparation of multi-layered microcapsule-shaped activated biomass carbon with ultrahigh surface area from bamboo parenchyma cells for energy storage and cationic dyes removal[J]. Journal of Cleaner Production,2023,396:136517.

[103] Yao Y X, Zuo H F, Liu Y J, et al. Efficient dye adsorption of mesoporous activated carbon from bamboo parenchyma cells by phosphoric acid activation[J]. RSC Advances,2024,14(18):12873-12882.

[104] Zheng C W, Zhang H Y, Xu L L, et al. Production of multifunctional bamboo-based phase change encapsulating material by straightforward dry ball milling[J]. Journal of Energy Storage,2022,46:103630.

[105] Zheng C W, Zhang H Y, Xu L L, et al. Carbonized bamboo parenchyma cells loaded with functional carbon nanotubes for preparation composite phase change materials with superior thermal conductivity and photo-thermal conversion efficiency[J]. Journal of Building Engineering,2022,56:104749.

[106] Chen H, Shi J J, Zhong T H, et al. Tunable physical-mechanical properties of eco-friendly and sustainable processing bamboo self-bonding composites by adjusting parenchyma cell content[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering,2023,11(28): 10333-10343.

[107] Gao X J, Qin H L, Wang S, et al. A novel binderless self-bonding bamboo parenchyma cell tray: exploring formation mechanisms and functional properties for enhanced fresh produce preservation[J]. Food Chemistry,2026,501:147557.

[本文编校：吴 彬]