科学通报 2015 年 第 60 卷 第 31 期: 2949 ~ 2962
自然科学基金项目进展专栏 评 述 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

天然树木和竹子纤维材料的力学性能及仿生研究进展

尹维[①], 田煜[①*], 陶大帅[①], 刘哲瑜[①], 韩志武[②], 张俊秋[②]

① 清华大学摩擦学国家重点实验室, 北京 100084;
② 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022
* 联系人, E-mail: tianyu@mail.tsinghua.edu.cn

2014-12-25 收稿, 2015-03-01 接受, 2015-04-30 网络版发表
国家杰出青年科学基金(51425502)、国家重点基础研究发展计划(2011CB707603)和国家自然科学基金(51175281, 51505248)资助

摘要 大自然中的天然生物纤维材料通常具有成分简单、结构精细、高强高韧和低摩擦系数等特性, 是新材料设计的灵感源泉. 仿生纤维复合材料在现代工业中有广泛的应用. 揭示生物纤维复合材料的纤维素纤维丝分布、角度和密度以及界面结构、结合方式与力学性能、摩擦磨损性能之间的相互关系及机理, 对相关材料仿生具有重要指导意义. 树木和竹子是典型的具有优异力学性能的生物纤维复合材料, 广泛被应用于各种传统建筑和舰船部件. 本文对以树木和竹子为典型代表的生物纤维复合材料, 及其仿生复合材料的纤维特征、力学性能和摩擦磨损性能在近期研究进展进行了综述, 以期为相关仿生高强度、耐磨复合材料的设计、制备提供参考.

关键词
树木
竹子
生物纤维复合材料
仿生复合材料
力学性能
摩擦学性能

天然生物材料几乎都是复合材料, 不同材质、结构、功能的复合使得天然生物材料结构复杂, 性能也远远超过单一结构和材质材料[1]. Thompson[2]总结了植物的生长与形态结构的研究成果, 出版了《On Growth and Form》. Currey[3]研究了大量的生物骨组织矿物质材料结构和力学性能. 2012年, Vincent[4]总结了关于生物材料结构、力学性能等方面的研究成果, 出版了《Structural Biomaterials: (Revised Edition)》. 通过研究, 人们发现贝壳、树木和竹子等天然生物材料, 虽然成分简单, 但是通过复杂的结构精细组合, 赋予了这些生物材料非常好的综合力学性能, 如以贝壳[5]为代表的多层复合材料和以树木[6]、竹子[7]为代表的纤维复合材料具有高强、高韧、耐冲击等力学性能. 从生物学的观点看, 这是生物在长期的自然进化过程中适应环境的结果, 其中蕴藏着深刻的材料设计和力学原理[8].

许多天然生物纤维复合材料具有多尺度、多等级复合结构, 这些复合结构对材料的宏观性能及功能起到至关重要的作用. 这些特殊结构、性能及功能使天然生物纤维复合材料得到广泛应用, 构架、屋顶和木桩等建筑承重部件大多采用木质材料, 墨竹是制造笛、箫等管乐器的最佳材料, 古代舰船绝大多数部件是由硬质树木制造, 古代拉船的纤绳多用斑竹竹篾编制而成. 随着科技的发展, 在现代材料的设计和研究中, 引入了仿生结构设计的思想, 通过"简单组成、复杂结构"的精细组合, 来实现材料的结构和力学特性[9,10]. 要进行仿生, 就需要对生物材料进行分析, 了解其结构及功能的基本原理、规律, 甚至需要到纳米尺度去分析其微观结构特征[11~13]. 目前, 模拟天然生物材料的结构-功能特性, 制造仿生结构-功能一体化材料方面已经取得了丰硕成果, 如仿树木多孔陶瓷材料[14]、仿贝壳多层复合材料[15]和仿骨多孔支架材料[16]等.

在天然生物纤维复合材料中, 树木、竹子是最常见和最典型的材料, 它们具有成分简单、结构精细、轻质等特征, 高强、高韧、耐冲击等力学性能, 低摩

引用格式: 尹维, 田煜, 陶大帅, 等. 天然树木和竹子纤维材料的力学性能及仿生研究进展. 科学通报, 2015, 60: 2949–2962
Yin W, Tian Y, Tao D S, et al. Research progresses of mechanical properties of natural wood and bamboo fiber composites and their biomimetics (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 2949–2962, doi: 10.1360/N972014-01318

擦系数、低黏着、耐磨等力学特性. 仿生纤维复合材料从植物纤维增强的土坯复合材料, 到钢筋增强水泥基复合材料, 再到碳纤维、陶瓷纤维以及硼纤维等增强的聚合物基和金属基复合材料, 人们对其力学性能不断优化, 并进行了大量应用. 研究树木、竹子典型生物纤维复合材料使役条件下的界面结构、界面结合及力学性能的变化规律, 揭示其界面的作用机理, 仿照其界面结构、界面结合方式与力学性能关系进行材料设计, 发明全新材料和提升传统材料的力学性能, 可望解决影响先进复合材料高强度的关键问题. 本文对这方面的研究进行了系统总结, 希望能为相关仿生纤维复合材料研究提供参考与启发.

1 树木和竹子生物纤维复合材料的力学性能及其影响因素

1.1 树木和竹子生物纤维复合材料的微观组织结构

树木、竹子的宏观和微观组织结构各向异性, 是一类结构层次分明、构造有序的天然纤维复合材料, 如图1所示[17]. 宏观尺度上, 树木、竹子是由细胞组成的具有高度各向异性的天然多孔材料. 树木在生长过程中由于气候交替的明显变化而形成轮状结构, 即树木形成层在一个生长周期内向内分生, 产生一层围绕着髓心构成的同心圆次生木质部, 称为年轮. 每一年轮是由靠近髓心一侧每年生长季节早期形成的早材, 和靠近树皮一侧每年生长后期形成的晚才组成[12]. 微观尺度上, 细胞壁可以视为以木质素和半纤维素为基质, 纤维素为增强相的天然纤维增强复合材料. 纳米尺度上, 每个细胞壁亚层可以视为直径为几纳米到几十纳米的刚性纤维素镶嵌在木质素/半纤维素薄壁基体组织中, 从而构成了具有分级结构的细胞壁[18]. 纤维素晶须横切面是方形、长方形或者六边形[19].

细胞壁是树木、竹子纤维的实际承载物质, 其形态结构、化学成分和内部纤维强度是决定其力学性能的主要因素. 木质素、纤维素和半纤维素是树木和竹子细胞壁的主要化学成分. 木质素在细胞壁的骨架物质和基体物质之中, 是在细胞分化的最后阶段木质化过程中形成的, 称为结壳物质或硬固物质, 它的存在增加了细胞壁的硬度. 纤维素以分子链聚集成束和排列有序的微纤丝状态存在于细胞壁中, 起着骨架物质作用. 半纤维素以无定形状态渗透在骨架

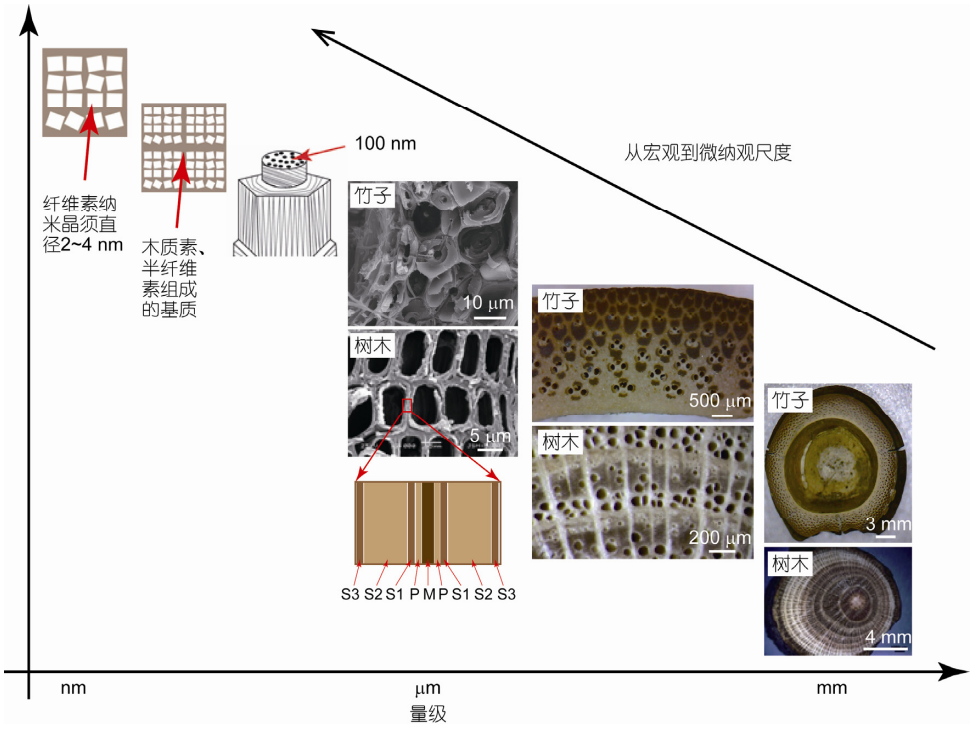

图 1 (网络版彩色)树木、竹子细胞壁多尺度、分级复合结构[17]

Figure 1 (Color online) Multi-scale, hierarchical composite structures of wood and bamboo cell wall[17]

物质之中, 起着基体黏结作用, 故称为基体物质. 除此之外, 细胞壁中还含有次要有机成分(树脂、单宁、色素、果胶和蛋白质等)和无机盐成分(钾、钠、钙、磷和镁等)[2,4].

根据树木细胞壁纤维丝的排列方式、化学成分及形成阶段的不同, 可将其分为初生壁(P)和次生壁(S1层、S2层、S3层). 细胞壁中的纤维束是由多个微纤维束组成, 每个微纤维束的微纤丝又是由许多纤维素分子链有规则地排列而成的微团构成, 纤维束相互结合形成薄层, 从而构成了具有层状分级结构的细胞壁. 其中, S2层占细胞壁平均壁厚的70%~90%, 是细胞壁的主体, 对细胞壁的力学性能影响最大. 竹子维管束(纤维之间通过胞间层黏合组成纤维鞘, 与疏导组织一起形成维管束)分布在柔性均匀的基本组织中形成"海岛结构"的两相复合材料, 分布密度沿径向从内向外连续增大, 使竹子又具有典型功能梯度材料的特点.

1.2 天然树木和竹子生物纤维复合材料结构模型

对生物纤维复合材料树木、竹子的结构模型, 一般认为纤维素纤维丝嵌入到木质素基体中, 而对于半纤维素的存在位置和作用, 还没有得到统一的认识. Kerr和Goring[20]提出将纤维素嵌入到木质素和半纤维素组成的基体物质和结壳物质中, 也就是说, 半纤维素是纤维素的一个"壳", 包围纤维素, 如图2(a)所示. Larsen等人[21]认为, 纤维丝是分散相, 它的外表层带有"半纤维素通道", 如图2(b)所示. Bergander和Salmén[22]认为细胞壁是由纤维素嵌入到木质素和半纤维素组成的混合物基体中形成的复合材料, 如图2(c)所示. 基体和纤维素通过Halpin-Tsai公式[23]偶联, 细胞壁多层结构符合经典层板理论[24].

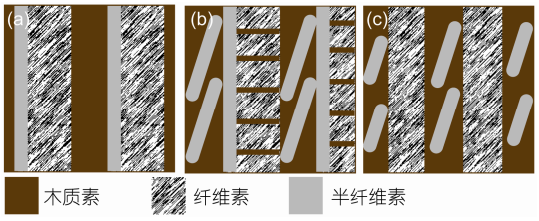

图 2 (网络版彩色)典型树木、竹子纤维复合材料结构模型. (a) Kerr模型; (b) Larsen 模型; (c) Salmén 模型

Figure 2 (Color online) Typical fiber composite structural model of wood and bamboo. (a) Kerr model; (b) Larsen model; (c) Salmén model

1.3 树木和竹子生物纤维复合材料的力学性能、模型

(ⅰ) 力学性能. 树木纤维的各向异性结构, 使其具有各向异性的力学性能. 其弹性模量具有高度各向异性, 其值由大到小顺序为轴向、径向和弦向, 此外, 弹性模量随密度、含水率、温度、微观结构、纤维丝角度、节疤大小和部位的变化而不同[25]. 国内外学者对一些名贵硬木、典型竹子的化学成分、密度和组织结构等进行了深入研究, 其相应的力学性能测试结果如表1所示[26,27].

从表1中可以发现, 相对于树木, 竹子的弯曲强度变化范围较大, 这是由于竹子外密内疏的微观结构特征引起的. 竹子外层到内层的纤维含量逐渐降低, 导致力学性能具有明显的梯度特性, 同时, 断裂模式也相应发生变化. 竹片拉伸强度和弹性模量从外层到内层呈降低趋势, 如图3所示. 外层竹片的断裂呈现沿顺纹理的劈裂状, 而内层竹片断裂较为整齐, 无向顺纹扩展现象[28]. 从外层到内层, 竹纤维纵向弹性模量没有显著变化. 宏观尺度力学测试表明, 竹纤维含量是竹子纵向力学性能的主要影响因素[29].

对于单根纤维力学性能的研究始于20世纪20年代, 一段时间以来, 研究主要集中于测试方法的改进和探索, 之后, 不同学者将相对成熟的测试技术应用于不同树种单根纤维力学性能的研究. Page等人[30]在*Nature*发表了针叶材单根管胞测定方法及其力学特性, 引起了国内外学者及工程技术人员对于单根纤维拉伸技术的兴趣, 相继展开了大量相关研究[31,32].

纳米压痕技术被用于亚微米及纳米尺度对细胞

表 1 几种硬木和竹子的力学性能[26,27]

Table 1 Mechanical properties of several hardwoods and bamboos[26,27]

种类	蛇纹木	愈创木	铁梨木	牧豆木	毛竹	蒿竹
压缩强度(MPa)	82~119	90~126	88~130	66~101	74~75.2	72.6~73
弯曲强度(MPa)	202~241	120~144	170~316	175	65.7~328	63.4~327
弹性模量(GPa)	21.6~23.2	11.1~13.5	17.0~28.0	18.0	3.6~31.5	3.5~32.4
布氏硬度(MPa)	110~196	161	130~172	192	–	–

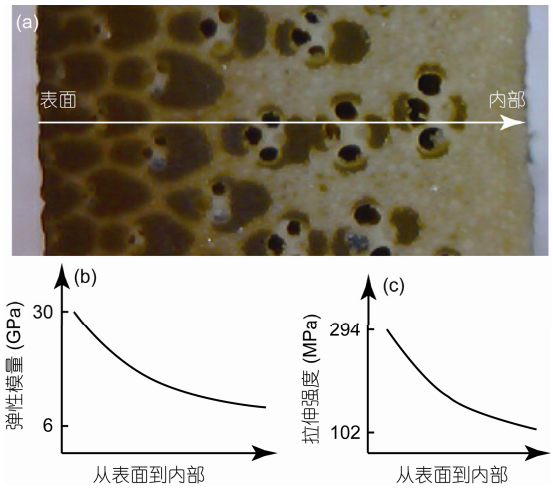

图 3 (网络版彩色)竹子不同位置力学性能变化规律. (a) 竹子表面(左侧)到内部(右侧)形貌; (b) 弹性模量变化规律示意图; (c) 拉伸强度变化规律示意图

Figure 3 (Color online) Mechanical properties of bamboo in different locations. (a) Morphology of the bamboo surface (left side) to the inside (right side); (b) elastic modulus variation; (c) tensile strength variation

壁各层的力学性能表征, 其发展历程如表2所示. 1997年, Wimmer等人[33]应用纳米压痕技术比较了针叶材细胞壁S2层和胞间层之间力学性能的差异. 国内外研究小组随后也分别发表了对针叶材、阔叶材纤维细胞壁和竹子纤维力学性能的系列研究成果[34~39]. 在竹纤维细胞壁纳米压痕研究中发现, 在其所测试的纳米压痕接触深度200~300 nm范围内, 在压痕边缘未发现裂纹, 压痕加载和卸载较为光滑, 没有出现不连续点, 竹纤维细胞壁展现出明显的韧性. 另外, 竹子纤维细胞壁的弹性模量是10.4 GPa, 是软组织细胞壁(3.4 GPa)的约3倍, 但是硬度值(分别为0.44和0.43 GPa)相近. 竹纤维作为增强相, 主要起到增加强韧性的作用[28,40].

(ⅱ) 细胞壁力学模型. 在细胞壁力学性能实验表征技术发展的同时, 细胞壁弹性模量的理论预测取得了重要进展. 人们把细胞壁作为纤维素纤维丝嵌入到木质素和半纤维素基体中的复合材料, 从理论上证明了微纤丝角对细胞壁纵向力学性能的决定性作用, 如图4和表3所示. 这些研究以纤维丝角度为主要影响因素, 围绕细胞壁相邻层之间作用展开. Xu和Liu[19]及Mark[41]建立的双壁层结构模型认为, 细胞壁纵向变形引起相邻层相对位置变化. Cave[42]和Schniewind与Barrett[43]建立的剪切束缚模型认为, 细胞壁在承受轴向载荷时不会产生剪切变形. 此外,

表 2 纳米压痕技术测试树木细胞壁力学性能

Table 2 Mechanical properties of the cell wall by nano-indentation

种类	硬度(GPa)	弹性模量(GPa)	参考文献
云杉	0.29	21.3	[33]
	0.47	17.1	[34]
火炬松	0.46	15.9	[35]
白杨	0.49	16.9	[36]
火炬松	0.50	21.4	[37]
黄松	0.55	20.3	[38]
毛竹纤维及软组织	0.44/0.43	10.4/3.4	[39]
	0.23/0.36	16.1/5.8	[28]

Yamamoto和Kojima[44], Keckes等人[45], Zeng等人[28], Li等人[46]和Burgent等人[47]在现有的细胞壁力学模型的基础上, 考虑到纤维丝界面、细胞壁的厚度、形态和排列方式等, 建立了细胞壁力学性能和树木宏观力学性能之间的联系.

(ⅲ) 纤维丝角度和含水率对力学性能的影响. 树木和竹子细胞壁中纤维素的基本单位是纤维丝, 纤维丝与细胞壁轴向之间的夹角称为纤维丝角. 纤维丝角度对树木和竹子细胞壁的弹性模量、断裂强度和断裂应变等均有显著影响. 根据人们的研究结果, 纤维丝角度越大, 细胞壁塑性变形越大, 当纤维丝角小到一定程度后, 细胞壁的应力应变呈现出较好的线性关系, 如图5(a)和(b)所示[48]. Wild等人[49]在对单根管胞进行多周期纵向加载的实验中也发现了管胞的刚性强化现象, 并推测这可能是纤维丝重新取向角度减小造成的. Salmén和Burgert等人[50,51]也对纤维生长以及微纤丝角度对力学性能的影响进行了深入研究, 发现相邻纤维丝不同取向产生的咬合结构使材料具有较高的强度和韧性. 细胞壁的硬度一般随密度增大和木质素含量增多而增大, 而与纤维丝角的变化没有一定的规律性. 树木和竹子的断裂是沿着纤维丝角方向螺旋开裂, 最终的断裂模式与纤维丝角的方向有关. 当纤维丝角度较小时, 断裂是由于纤维丝主链化学键的断裂所致; 当纤维丝角度较大时, 断裂是由于纤维素分子链间的氢键的断裂所致[7,28].

天然树木、竹子纤维素纤维丝在轴向具有较高的强度. 在主要的细胞壁层(S2)内纤维丝陡峭的螺旋缠绕, 大多纤维丝的角度较小, 确保了长度方向上力学性能最佳. 然而, 通过Cave模型计算得到的细胞壁

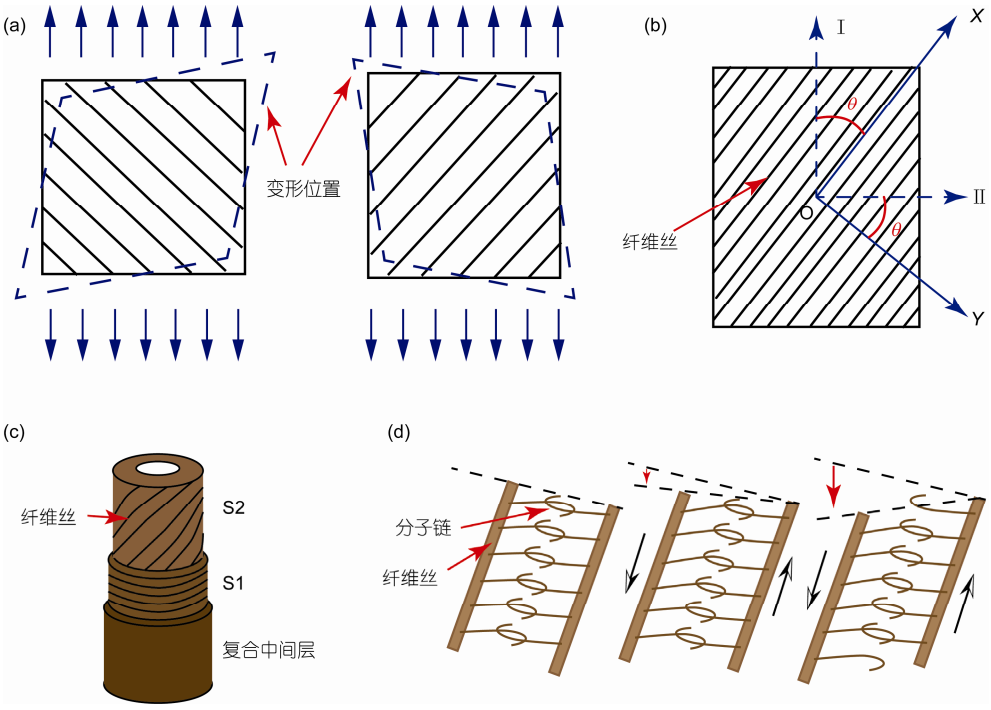

图 4 (网络版彩色)细胞壁受力示意图. (a) 以不同角度缠绕的纤维丝受力过程中相邻层相对位置变化[41]; (b) 细胞壁受力过程中不产生拉剪耦连[43]; (c) 假设纤维丝横向不受剪切力, 同时考虑纤维丝角度、壁层厚度、湿度[44]; (d) 细胞壁两个纤维丝间的尼龙搭扣模型[45]

Figure 4 (Color online) The stress diagram of cell wall. (a) The relative position changes of microfibril in the process of loading[41]; (b) it is not occur to tensile and shear coupling in the process of loading[43]; (c) it was supposed to be not transverse shear force for microfibril, and considering microfibril angle, wall thickness and humidity[44]; (d) velcro model between the two filaments of cell wall[45]

表 3 细胞壁力学的数学模型

Table 3 The mathematical model of cell wall mechanics

模型	备注	参考文献
$E(\theta)=\left[\frac{\cos^4\theta}{E_l}+\left(\frac{-2v_{lr}}{E_r}+\frac{1}{G_{lr}}\right)\sin^2\theta\cos^2\theta+\frac{\sin^4\theta}{E_r}\right]^{-1}$	E_l为沿长度方向的弹性模量, G_{lr}为纵径向剪切模量, E_r为单纤维丝横向弹性模量, v_{lr}为纵径向泊松比, θ为纤维丝角度	[19]
$E(\theta)=c_{11}\cos^4\theta+c_{33}\sin^4\theta+2(c_{13}+2c_{44})\cos^2\theta\sin^2\theta$	c_{ij}为简化的弹性模量E旋转变换过程中的基本单元; 相邻细胞微纤丝角大小相等, 纵向变形时不会产生剪切变形而扭转	[42]

纤维丝低角度区弹性模量与试验值存在一定差异, 如图5(c)所示. 试验曲线呈凹形, 而理论计算曲线呈S形. 对于其他计算细胞壁弹性模量的模型, 无论是不同树种, 还是不同植物, 都存在相似问题. 这可能是由于在纤维丝低角度区, 细胞壁受力过程中, 特殊的界面特征起到了作用. 因此, 进一步研究细胞壁内部纤维界面结构特征以及在受力过程中界面的作用具有重要意义.

树木和竹子的含水率对其力学性能有较大影响, 图5(d)为气干态和饱水态的树木微切片弹性模量变化规律, 气干态的应力应变曲线是凸形的, 初始段为弹性区, 过了比例极限应力后曲线的斜率减小, 但也大致保持线性关系直至断裂. 而饱水态微切片的应力应变曲线是凹形的, 初始段也是一个线性的弹性区, 但其比例极限应力大约只有气干态的一半, 过了比例极限应力以后, 曲线的斜率增大, 但大致保持线性关系直至断裂. 水分弱化了木质素和半纤维素, 拉伸过程中增加了细胞壁内纤维丝之间的滑移, 导致强度降低[52,53].

(ⅳ) 断裂特征. 树木、竹子为各向异性材料, 其裂纹扩展与裂纹平面位置和裂纹扩展方向有关, 裂纹预置方向及几种树木的断裂韧性如表4所示[54,55]. Wu[56]将正交各向异性模型应用于树木之上, 应用线弹性断裂力学预测了含裂纹树木横纹抗拉强度和顺纹抗剪强度. Triboulot等人[57]应用有限元法对实验结果进行了比较, 认为将树木假定为正交各向

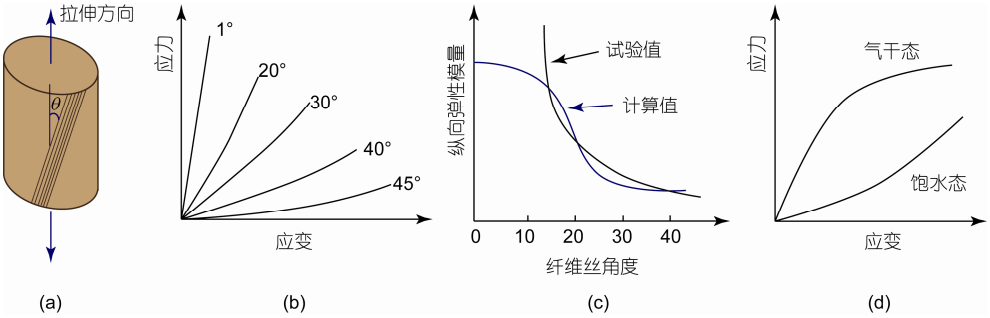

图 5 (网络版彩色)微纤丝角度对细胞壁力学性能的影响规律示意图. (a) 纤维丝角度和拉伸方向; (b) 不同纤维丝角度的应力-应变曲线; (c) 纤维丝角度对弹性模量影响的计算值与试验值; (d) 含水率对力学性能的影响

Figure 5 (Color online) Influence of microfibril angle on the mechanical properties of the cell wall. (a) Microfibril angle and stretch direction; (b) Stress-strain curve of different microfibril angles; (c) calculated and experimental values of elastic modulus; (d) Influence of moisture on mechanical properties

表 4 裂纹预置方向及几种树木的断裂韧性[54,55]

Table 4 Crack preset direction and fracture toughness of several woods[54,55]

种类	断裂韧性K_{IC}(MPa m$^{1/2}$)			断裂能G_f(N/mm)		
	RL	TL	TR	RL	TL	TR
水曲柳	1.17	0.65	–	0.55	0.34	–
柞木	0.55~0.8	0.40	–	0.35~0.37	0.27	0.32
松木	0.26~0.50	0.25	0.36~0.55	0.25	0.42	0.63~0.92

异性体和弹性体以及将断裂力学的概念用于树木是可行的. 在此基础上, 各种树木、竹子的断裂韧性计算和测试得到了广泛研究[58,59]. 但是, 由于竹子的梯度结构对断裂韧性具有较大的影响, 不同测试条件下, 其结果存在较大差异. 例如, Low等人[60]测试得到1年生竹材断裂韧性为8.0 MPa m$^{1/2}$, 5年生竹材的断裂韧性为5.5 MPa m$^{1/2}$. 而Amada和Untao[61]测试发现, 2年生竹子的最大断裂韧性为96 MPa m$^{1/2}$.

生物纤维复合材料裂纹并不是沿一个方向扩展, 裂纹在扩展过程中会发生拐折、弯曲, 甚至分叉现象, 如图6所示[62]. 主要原因是影响裂纹扩展方向的因素很多, 包括应力大小、应力状态, 以及材料形状、物理性质、力学性质、组织状态及结构等因素.

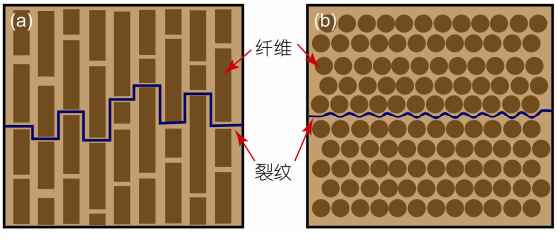

图 6 (网络版彩色)生物纤维复合材料裂纹扩展示意图. (a) 沿纤维方向; (b) 垂直于纤维方向

Figure 6 (Color online) Crack growth and damage of bio-fiber composites. (a) Along the fiber direction; (b) perpendicular to the fiber direction

2 树木和竹子生物纤维复合材料的摩擦学性能

2.1 载荷、滑动速度与温度对摩擦学性能的影响

树木和竹纤维因其具有优异的力学特性, 常作为增强相制造摩擦材料[63]. 生物纤维复合材料在不同滑动速度下的摩擦系数具有较大差异, 而载荷对摩擦系数的影响较小[64]. 几种树木与钢的摩擦系数如表5所示, 愈创木在粗糙表面的钢滑动摩擦时, 与其他种类的相比, 摩擦系数较低, 这是由于其内部含有大量树脂、油类物质[65,66].

松木与钢之间的摩擦研究表明, 在100~130℃时, 松木脂肪酸的润滑性能是影响摩擦系数的主要因素, 随着温度的升高(130~170℃), 脂肪酸润滑膜失效. 不同树木种类, 纤维失效温度不同, 引起摩擦系数产生峰值, 放射松和樟子松纤维失效温度大约在150℃, 而挪威云杉纤维失效温度大约在165℃[67]. 树木与塑料材料摩擦时, 在滑动速度(0.2~0.4 cm s^{-1})较小时, 摩擦系数随滑动速度线性增加, 但滑动速度(>10 cm s^{-1})较大时, 摩擦系数与滑动速度的对数具有线性关系[68]. 两个木块在摩擦过程中, 在正压力的作用下, 温度高于180℃, 树木细胞壁的木质素和半纤维素力学性质发生改变而开始流动, 此时, 纤维素纤维丝卷曲缠绕, 在冷却过程中固定流动的木质素和半纤维素, 形成高密度焊接复合板. Stamm等人[69]对云杉和山毛榉摩擦过程研究表明, 摩擦具体可以分为6个阶段, 如表6所示.

2.2 纤维方向对摩擦学性能的影响

树木作为一种各向异性的天然高分子材料, 会

表 5　几种树木的摩擦系数[66](相对湿度为 10%~14%)

Table 5　Friction coefficient of several woods[66]

种类	钢表面光滑		钢表面粗糙	
	慢速(0.2~0.5 mm s^{-1})	快速(55 mm s^{-1})	慢速(0.2~0.5 mm s^{-1})	快速(55 mm s^{-1})
冷杉木	0.15	0.30	0.59	0.62
南阳杉木	0.13	0.38	0.62	0.59
桉木	0.16	0.22	0.54	0.53
愈创木	0.08	0.19	0.20	0.40
轻木	0.11	0.20		
云杉	0.21	0.30	0.56	0.59
松木	0.14	0.28	0.57	0.65

表 6　木块摩擦过程中摩擦系数和界面温度变化[69](压力 0.78 N，频率 130 Hz，振幅 0.95 mm，湿度 12.8%)

Table 6　Friction coefficient and interface temperature in woods friction process[69]

阶段	温度(℃)	摩擦系数	摩擦焊过程
1	25~140	0.37~0.05	摩擦开始阶段，摩擦系数、界面温度迅速升高. 水分蒸发，温度出现拐点，表面粗糙度下降，摩擦系数降低
2	140~320	0.05	摩擦系数恒定，温度呈线性增加
3	320~380	0.05~0.25	细胞壁分解，引起摩擦系数增大，伴随烟雾产生，界面伴随有润滑
4	420~440	0.25~0.16	随着温度升高，摩擦系数降低
5	440	0.16~0.17	摩擦热与“熔化热”达到平衡，细胞壁分解、烟雾产生，摩擦系数稳定
6	440降至25	0.17~0	摩擦结束，样品冷却，界面“熔化”材料凝固

表现出黏弹性和蠕变. 树木的摩擦系数主要取决于黏附摩擦和滞后摩擦. 研究表明，树木之间的摩擦系数与纤维方向有密切关系，如图7所示[70,71]. 当摩擦垂直于表面纤维方向时，如图7(II)，摩擦系数最高；两个树木纤维方向相互垂直而摩擦方向与其中一个纤维方向一致时，摩擦系数最小，如图7(III). 对杨木、红松和水曲柳的顺纹、横纹和斜纹试样与橡胶带之间的摩擦实验研究发现，由于横纹试样的纹理方向和滑动方向垂直，即树木纤维方向和滑动方向垂直，与顺纹、斜纹试件相比，更容易在树木表面产生划痕，因而横纹试样由于迟滞造成的摩擦最大. 与此相反，由于顺纹试样的纤维方向与滑动方向平行，纤维分子更容易通过，迟滞摩擦最小[72]. 试验得到的顺纹试样静摩擦系数为0.630~0.855，横纹试样的静摩擦系数为0.678~0.963，斜纹试件静摩擦系数为0.672~0.930，动摩擦系数的值为静摩擦系数值的59%~90%，横纹的动/静摩擦系数最大，斜纹次之，顺纹最小.

印度学者Chand和Dwivedi[73]对竹子纤维各向异性的磨料摩擦磨损行为进行了系统的研究，得出W_{TT}<

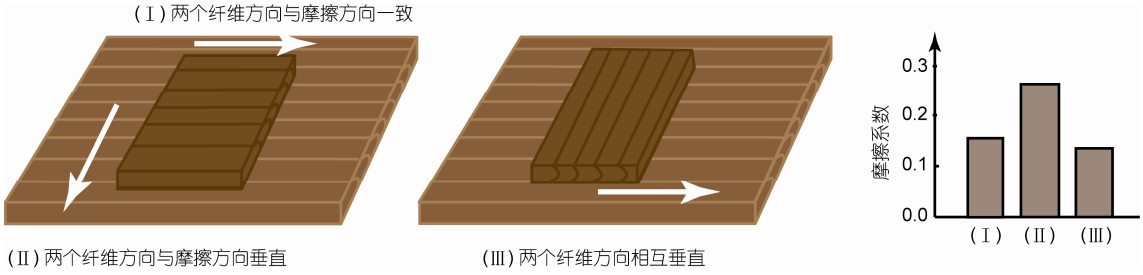

图 7　(网络版彩色)纤维方向对摩擦系数的影响

Figure 7　(Color online) Influence of fiber orientation on friction coefficient

W_{LL}(W_{TT}, W_{LL}分别为垂直于纤维方向的横切面的磨损速率、平行于纤维方向的纵切面沿纤维方向的磨损速率). 而正是单向排列的纤维束使竹子每一个方向都具有独特的摩擦磨损行为, 且各向异性系数是关于载荷的函数. 其中, 各向异性系数W_{TT}/W_{LL}与载荷之间的函数关系如下:

$$\frac{W_{TT}}{W_{LL}} = -aL^2 + bL - c, \quad (1)$$

式中, L为所加载荷, 常数a, b, c分别为0.106, 0.692和0.508.

2.3 纤维密度对摩擦学性能的影响

竹子的拉伸强度、杨氏模量和弯曲强度等性能以及纤维密度都是在外层部分有最高值, 沿着厚度方向逐渐降低. 由于竹纤维的密度从表到里逐渐减小, 且竹纤维的硬度高于基体材料的硬度, 故竹子表层的耐磨性最高, 具有可与工程合金相比拟的性能. 竹子的纤维体积分数沿径向由外向内逐渐减小, 其纤维排布规律可由下式表示[74]:

$$D = 1.70\times10^{-5}V_f^5 - 6.16\times10^{-5}V_f^2 + 0.37V_f - 3.97, \quad (2)$$

式中, D为距竹子外表面的距离(mm), V_f为竹子中纤维的体积分数(%).

2.4 树木和竹子生物纤维复合材料的磨损机理

两种生物纤维复合材料对摩时, 当两个纤维方向同时垂直于摩擦方向时, 接触面之间发生了机械锁合, 同时接触面间的黏附力增大, 导致摩擦系数较大; 而当两个纤维方向相互垂直时, 两个接触面之间的黏附力最小, 摩擦系数达到最小.

生物纤维复合材料的磨损速率取决于纤维与滑动表面的方向, 磨损速率在横切面纤维垂直方向比纵切面纤维平行方向低[75]. 当横切面纤维与滑动界面处于垂直方向时, 试样表面层一定深度的基体组织被首先磨去, 使纤维端头突出于基体之上, 形成一种具有非光滑特征的磨损表面几何形态, 这是一种由磨损过程形成的耐磨形态, 磨料粒子在这种形态的表面上易于产生滚动, 此时, 生物纤维复合材料表现出很强的耐磨性[76].

生物纤维复合材料横切面的耐磨性与竹纤维密度具有函数关系, 在干滑动摩擦磨损条件下, 耐磨性能随纤维含量的升高而增强, 且与硬度分布一致[77]. 在磨料磨损和滑动磨损两种磨损条件下, 以黏着、塑性变形、犁削、开裂、纤维切断等为主要磨损机制[78].

3 仿生纤维增强增韧复合材料

材料设计的两个关键力学性能——强度和韧性往往相互矛盾, 高强度材料其脆性较大, 而高韧性材料其强度较低[79], 生物材料提供了设计同时具有高强高韧新材料的模本[80~82]. 仿生纤维复合材料使用的历史可以追溯到古代, 从古至今沿用的稻草、麦秸等自然纤维增强黏土土坯. 近代的钢筋混凝土、芳纶纤维复合材料以及纳米纤维复合材料等, 都是仿生纤维复合材料的典型例子, 它们已被广泛应用于建筑、机械、化工、材料等领域, 如图8所示[83~85].

从宏观到微观上, 天然生物纤维复合材料具有非常复杂的结构, 仿生纤维增强增韧复合材料主要关注于纤维的分布、缠绕方式、缠绕角度以及纤维界面结构特征等[86~88]. 李世红等人[89]提出了一种只局限于细观尺度的纤维排布模型, 即一束纤维先以左旋方式缠绕, 再将两束这样的纤维束以右旋方式缠绕在一起, 如图9(a)和(b)所示. 采用螺旋碳纤维制成复合材料, 用碳纤维/Sn复合材料对该模型进行了检验, 结果表明这种复合材料具有很高的抗拉强度和抗冲击韧性. 基于竹子纤维和树木管胞研究, 研究人员设计、制备了4种宏观纤维增强复合材料样品, 如图9(c)~(f)所示[41]. 单纤维螺旋简单的复制了植物纤维的排列方式, 它是多层螺旋纤维结构的基本单元. 试

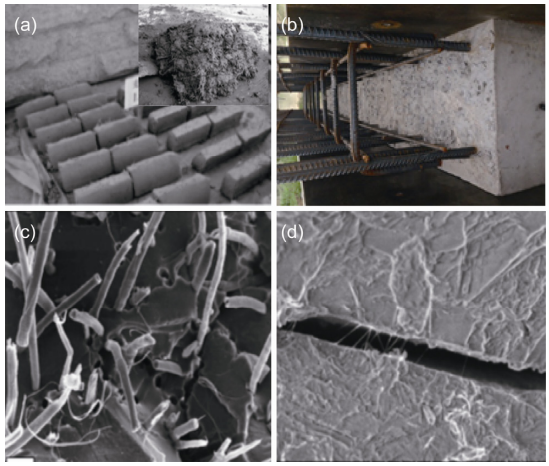

图 8 (网络版彩色)仿生纤维复合材料. (a) 植物纤维增强土坯[83]; (b) 钢筋混凝土; (c) 芳纶纤维增强复合材料[84]; (d) 碳纳米纤维增强复合材料[85]

Figure 8 (Color online) Biomimetic fiber composites. (a) Plant fiber reinforced adobe[83]; (b) reinforced concrete; (c) aramid fiber reinforced composites[84]; (d) carbon nano-fiber reinforced composites[85]

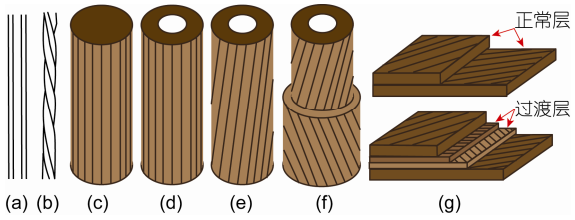

图 9 (网络版彩色)仿生纤维复合材料结构示意图. (a) 均布模型; (b) 仿生螺旋模型; (c) 圆柱体, 纤维沿轴向排列; (d) 空心圆柱体, 纤维沿轴向排列; (e) 单纤维螺旋中空圆柱体, 单层且纤维角度为 15°; (f) 双纤维螺旋中空圆柱体, 80%的纤维以 15°角右螺旋, 20%的纤维以 30°角左螺旋; (g) 模拟纤维界面仿生模型

Figure 9 (Color online) Structure diagram of biomimetic fiber composite material. (a) Uniform model; (b) biomimetic spiral model; (c) cylinder, fibers arranged along the axial; (d) hollow cylinder, fibers arranged along the axial; (e) hollow cylinder of single helix fiber, a single layer and a fiber angle of 15°; (f) hollow cylinder of double helix fiber, 80% of the fibers to the right helix and angle of 15°, 20% of the fibers left helix and angle of 30°; (g) biomimetic interface model

验结果表明, 双纤维螺旋中空圆柱体展现出优异的综合力学性能. 仿树木、竹子纤维界面结构特征, 设计简化的平板模型, 制备玻璃纤维增强环氧树脂和玻璃纤维增强聚酯两种复合材料, 如图9(g)所示[41]. 纤维层间过渡区亚层能提高层间剪切性能和改进相邻层之间的几何和物理的连续性, 能有效提高材料的综合力学性能.

仿生纤维摩擦材料需要满足安全性(合适而稳定的摩擦系数、低磨损率、与对偶的匹配性)、舒适性(低抖动、低撞击感)和环保性(低噪音、低磨屑产生、无毒或低毒原材料和天然原材料的使用)的要求[90]. 炭/炭复合材料具有比强度大、模量高、耐高温、耐热冲击、耐腐蚀、热膨胀系数小和摩擦性好等一系列优点, 已经在飞机、火车和汽车上的刹车盘、导弹的鼻锥、火箭发动机尾的喷管和喉衬等方面得到应用[91,92], 如图10所示[93].

4 结论与展望

天然生物材料一般是由简单的成分经过复杂的结构和性能耦合组成的复合材料. 生物复合材料经过自然选择和进化, 在结构和功能方面有着独特优越性能[94]. 树木和竹子细胞壁起支撑和承重作用, 此类生物纤维复合材料因为其独特的材料和结构组成而具有优异的综合力学性能和许多特异的功能. 树木和竹子具有一些优异的摩擦学特性, 如低摩擦系数、低黏着、耐磨等. 这些特性不仅与其内部的显微组织结构, 而且与其生物活性作用有关. 因此, 在

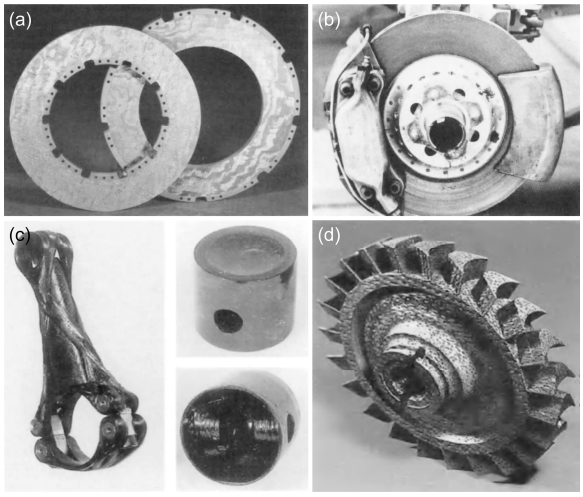

图 10 仿生炭/炭复合摩擦材料[93]. (a) 空客刹车片; (b) 汽车刹车片; (c) 柴油机活塞和连杆; (d) 涡轮机转子

Figure 10 Biomimetic C/C composite friction materials[93]. (a) Airbus brakes; (b) car brakes; (c) diesel engine piston and connecting rod; (d) turbine rotor

树木和竹子摩擦学尤其在仿生摩擦学研究中, 不仅要考虑其纤维组织结构的作用, 更应特别注意生物活性问题. 如果单纯从机械的角度来达到仿生的目的, 是很难取得满意的结果[95]. 涉及树木和竹子的力学性能、摩擦学性能及其仿生纤维复合材料的问题很多, 但开展的研究不可能也没有必要面面俱到. 作者认为以下几个方面可以作为近期以树木和竹子为典型代表的生物纤维复合材料力学、摩擦学及其仿生研究的重点发展方向, 如图11所示. 生物纤维复合材料纤维界面及近界面微区成分、结合方式, 以及纤维形态、尺寸、分布和角度等不均匀的微观结构特征规律值得进一步分析, 以深入评价和理解其材料的微观梯度特性; 在此基础上, 生物纤维复合材料微观动态力学性能、摩擦学特性和纤维界面结构断裂过程也值得深入研究, 以深入评价和理解其材料不均匀的结构特性对微观动态力学、摩擦学性能的影响规律、生物材料的应用和仿生材料的研制具有重要指导作用.

现代纤维复合材料在快速发展过程中, 常存在纤维脆性较大、界面设计困难、纤维易拔出导致增强失效、晶须的尺寸选择困难、陶瓷基复合材料增韧方法的选择困难等问题[96,97]. 因此, 应用仿生纤维增强增韧复合材料功能化的设计原理, 模拟生物纤维复合材料优异的界面材料和结构特征, 可望进一步解决纤维复合材料的界面化学和物理性能稳定性及强韧化问题, 具有重要的学术意义和应用价值.

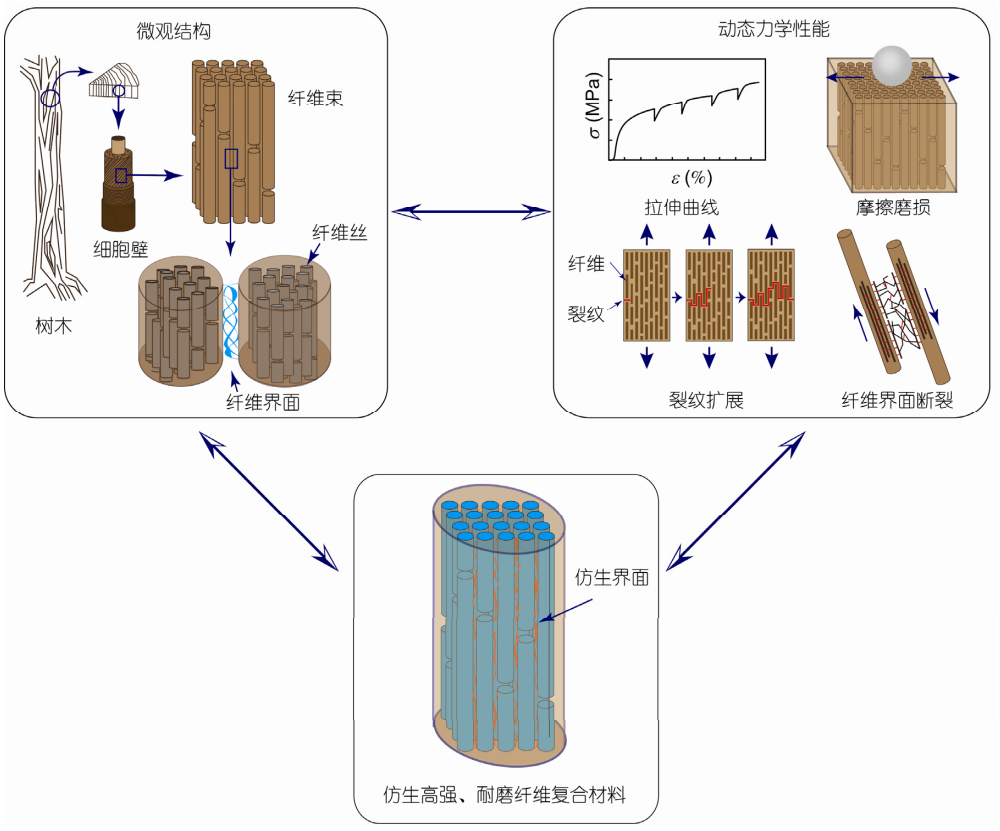

图 11 (网络版彩色)天然生物纤维复合材料的动态力学性能及其仿生研究展望

Figure 11 (Color online) Prospects for dynamic mechanical properties and biomimetic of natural bio-fiber composites

参考文献

1 Aizenberg J, Weaver J C, Thanawala1 M S, et al. Skeleton of euplectella sp.: Structural hierarchy from the nanoscale to the macroscale. Science, 2005, 309: 275–278

2 Thompson D W. On Growth and Form. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1968

3 Currey J D. Bones: Structure and Mechanics. New Jersey: Princeton University Press, 2006

4 Vincent J F V. Structural Biomaterials: (Revised Edition). New Jersey: Princeton University Press, 2012

5 Li L, Ortiz C. Pervasive nanoscale deformation twinning as a catalyst for efficient energy dissipation in a bioceramic armour. Nat Mater, 2014, 13: 501–507

6 Burgert I, Keplinger T. Plant micro- and nanomechanics: Experimental techniques for plant cell-wall analysis. J Exp Bot, 2013, 64: 4635–4649

7 Yu Y, Wang H K, Lu F, et al. Bamboo fibers for composite applications: A mechanical and morphological investigation. J Mater Sci, 2014, 49: 2559–2566

8 Bouville F, Maire E, Meille S, et al. Strong, tough and stiff bioinspired ceramics from brittle constituents. Nat Mater, 2014, 13: 508–514

9 Lu Y X. Significance and progress of bionics. J Bionic Eng, 2004, 1: 1–3

10 Munch E, Launey M E, Alsem D H, et al. Tough, bio-inspired hybrid materials. Science, 2008, 322: 1516–1520

11 Chen P Y, McKittrick J, André M. MeyersBiological materials: Functional adaptations and bioinspired designs. Prog Mater Sci, 2012, 57: 1492–1704

12 Fratzl P, Weinkamer R. Nature's hierarchical materials. Prog Mater Sci, 2007, 52: 1263–1334

13 Han Z W, Yin W, Zhang J Q, et al. Erosion-resistant surfaces inspired by Tamarisk. J Bionic Eng, 2013, 10: 479–487

14 Sun B H, Fan T X, Zhang D, et al. The synthesis and microstructure of morph-genetic TiC/C ceramics. Carbon, 2004, 42: 177–182

15 Bouville F, Maire E, Meille S, et al. Strong, tough and stiff bioinspired ceramics from brittle constituents. Nat Mater, 2014, 13: 508–514
16 Fu Q, Rahaman M N, Sonny B B, et al. Mechanical and *in vitro* performance of 13–93 bioactive glass scaffolds prepared by a polymer foam replication technique. Acta Biomater, 2008, 4: 1854–1864
17 Han Z W, Yin W, Zhang J Q, et al. Active anti-erosion protection strategy in Tamarisk (Tamarix aphylla). Sci Rep, 2013, 3: 1–7
18 Somerville C, Bauer S, Brininstool G, et al. Toward a systems approach to understanding plant-cell walls. Science, 2004, 306: 2206–2211
19 Xu P, Liu H W. Models of microfibril elastic modulus parallel to the cell axis. Wood Sci Technol, 2004, 38: 363–374
20 Kerr A J, Goring D A I. Ultrastructural arrangement of the wood cell wall. Cellul Chem Technol, 1975, 9: 563–573
21 Larsen M J, Winandy J E, Green F. A proposed model of the tracheid cell wall of southern yellow pine having an inherent radial structure in the S-2 layer. Mater Organismen, 1995, 29: 197–210
22 Bergander A, Salmén L. Cell wall properties and their effects on the mechanical properties of fibers. J Mater Sci, 2002, 37: 151–156
23 Affdl J C, Kardos J L. The Halpin-Tsai equations: A review. Polym Eng Sci, 1976, 16: 344–352
24 Hahn H T, Tsai S W. Introduction to Composite Materials. Pennsylvania: CRC Press, 1980
25 Wang J Y, Cooper P A. Effect of oil type, temperature and time on moisture properties of hot oil-treated wood. Holz Roh Werkst, 2005, 63: 417–422
26 Scholz G, Liebner F, Koch G, et al. Chemical, anatomical and technological properties of Snakewood [Brosimum guianense (Aubl.) Huber]. Wood Sci Technol, 2007, 41: 673–686
27 Xian X J, Xian D G. The relationship of microstructure and mechanical properties of bamboo (in Chinese). J Bamboo Res, 1990, 9: 10–23 [冼杏娟, 冼定国. 竹材的微观结构及其与力学性能的关系. 竹子研究汇刊, 1990, 9: 10–23]
28 Zeng Q Y, Li S H, Zhou B L. The characteristics of biomaterials and biomimetics of composite materials (in Chinese). Acta Mater Comp Sin, 1993, 10: 1–7 [曾其蕴, 李世红, 周本濂. 生物复合材料的特征及仿生的探讨. 复合材料学报, 1993, 10: 1–7]
29 Li H B, Shen S P. The mechanical properties of bamboo and vascular bundles. J Mater Res, 2011, 26: 2749–2756
30 Page D H, El-Hosseiny F, Winkler K. Behavior of single wood fibers under axial tensile strain. Nature, 1971, 229: 252–253
31 Eder M, Stanzl T S, Burgert I. The fracture behaviour of single wood fibres is governed by geometrical constraints: *in situ* ESEM studies on three fibre types. Wood Sci Technol, 2008, 42: 679–689
32 Hughes M. Defects in natural fibres: Their origin, characteristics and implications for natural fibre-reinforced composites. J Mater Sci, 2012, 47: 599–609
33 Wimmer R, Lucas B N, Oliver W C, et al. Longitudinal hardness and Young's modulus of spruce tracheid secondary walls using nanoindentation technique. Wood Sci Technol, 1997, 31: 131–141
34 Gindl W, Gupta H S, Schöberl T, et al. Mechanical properties of spruce wood cell walls by nanoindentation. Appl Phys A, 2004, 79: 2069–2073
35 Tze W T Y, Wang S, Rials T G, et al. Nanoindentation of wood cell wall: Continuous stiffness and hardness measurement. Comp Part A: Appl Sci Manufac, 2007, 38: 945–953
36 Wu Y, Wang S Q, Zhou D G, et al. Use of nanoindentation and silviscan to determine the mechanical properties of 10 hardwood species. Wood Fiber Sci, 2009, 41: 64–73
37 Xing C, Wang S Q, Pharr G M, et al. Effect of thermo-mechanical refining pressure on the properties of wood fibers. Holzforschung, 2008, 62: 230–236
38 Hosseinaei O, Wang S, Rials T G, et al. Effects of decreasing carbohydrate content on properties of wood strands. Cellulose, 2011, 18: 841–850
39 Zou L, Jin H, Lu W Y, et al. Nanoscale structural and mechanical characterization of the cell wall of bamboo fibers. Mater Sci Eng C, 2009, 29: 1375–1379
40 Zou L H, Jin H, Lu W Y, et al. Nanoscale structural and mechanical characterization of the cell wall of bamboo fibers. Mater Sci Eng C, 2009, 29: 1375–1379
41 Mark R E. Cell Wall Mechanics of Tracheids. New Haven: Yale University Press, 1967
42 Cave I D. The anisotropic elasticity of the plant cell wall. Wood Sci Technol, 1968, 2: 268–278
43 Schniewind A P, Barrett J D. Cell wall model with complete shear restraint. Wood Fiber, 1969, 1: 205–214
44 Yamamoto H, Kojima Y. Properties of cell wall constituents in relation to longitudinal elasticity of wood. Wood Sci Technol, 2002, 36: 55–74
45 Keckes J, Burgert I, Frühmann K, et al. Cell-wall recovery after irreversible deformation of wood. Nat Mater, 2003, 2: 810–813
46 Li S H, Zeng Q Y, Xiao Y L, et al. Biomimicry of bamboo bast fiber with engineering composite materials. Mater Sci Eng C, 1995, 3: 125–130
47 Burgent I, Bernasconi A, Nikas K J, et al. The influence of rays on the transverse elastic anisotropy in green wood of deciduous trees. Holzforschung, 2001, 55: 449–454

48 Page D H, Hosseiny F. The mechanical properties of single wood pulp fibers: Part VI. Fibril angle and the shape of the stress-strain curve. J Pulp Pap Sci, 1983, 9: 99–100
49 Wild P M, Provan J W, Guin R, et al. The effects of cyclic axial loading of single wood pulp fibers at elcvated temperature and humidity. Tappi J, 1999, 82: 209–214
50 Salmén L, Burgert I. Cell wall features with regard to mechanical performance. A review COST Action E35 2004–2008: Wood machining-micromechanics and fracture. Holzforschung, 2009, 63: 121–129
51 Burgert I. Exploring the micromechanical design of plant cell walls. Am J Bot, 2006, 93: 1391–1401
52 Matan N, Kyokong B. Effect of moisture content on some physical and mechanical properties of juvenile rubberwood (Hevea brasiliensis Muell. Arg.). Songklanakarin J Sci Technol, 2003, 25: 327–340
53 Wang H K, Yu Y, Yu Y S, et al. Comparative on four mechanical properties of bamboo under air-dried and saturated state (in Chinese). Sci Silvae Sin, 2010, 46: 119–123 [王汉坤, 余雁, 喻云水, 等. 气干和饱水状态下毛竹4种力学性质的比较. 林业科学, 2010, 46: 119–123]
54 Reiterer A, Burgert I, Sinn G, et al. The radial reinforcement of the wood structure and its implication on mechanical and fracture mechanical properties—A comparison between two tree species. J Mater Sci, 2002, 37: 935–940
55 Reiterer A, Sinn G, Stanzl-Tschegg S E. Fracture characteristics of different wood species under mode I loading perpendicular to the grain. Mater Sci Eng A, 2002, 332: 29–36
56 Wu E M. Application of fracture mechanics to anisotropic plates. J Appl Mech, 1967, 34: 967–974
57 Triboulot P, Jodin P, Pluvinage G. Validity of fracture mechanics concepts applied to wood by finite element calculation. Wood Sci Technol, 1984, 18: 51–58
58 Shao Z P, Fang C H, Tian G L. Mode I interlaminar fracture property of moso bamboo (Phyllostachys pubescens). Wood Sci Technol, 2009, 43: 527–536
59 Qiu L P, Zhu E C, van de Kuilen J W G. Modeling crack propagation in wood by extended finite element method. Eur J Wood Wood Prod, 2014, 72: 273–283
60 Low I M, Che Z Y, Latella B A, et al. Mechanical and fracture properties of bamboo. Key Eng Mater, 2006, 312: 15–20
61 Amada S, Untao S. Fracture properties of bamboo. Comp Part B Eng, 2001, 32: 451–459
62 Habibi M K, Lu Y. Crack Propagation in bamboo's hierarchical cellular structure. Sci Rep, 2014, 4: 1–7
63 McLaren K G, Tabor D. The frictional properties of lignum vitae. Br J Appl Phys, 1961, 12: 118–120
64 Iida R, Ohtani T, Nakai T, et al. Changes in wood temperature under high-speed friction. J Wood Sci, 2014, 60: 313–320
65 Svensson B A, Nyström S, Gradin P A, et al. Frictional testing of wood-initial studies with a new device. Tribol Int, 2009, 42: 190–196
66 McKenzie W M, Karpovich H. The frictional behavior of wood. Wood Sci Technol, 1968, 2: 139–152
67 Svensson B A, Holmgren S E, Gradin P A, et al. High strain rate compression and sliding friction of wood under refining conditions. International Mechanical Pulping Conference, 2007
68 Gratton L M, Defrancesco S. A simple measurement of the sliding friction coefficient. Phys Educ, 2006, 41: 232
69 Stamm B, Natterer J, Navi P. Joining wood by friction welding. Holz als Roh-und Werkstoff, 2005, 63: 313–320
70 Chand N, Dwivedi U K, Acharya S K. Anisotropic abrasive wear behaviour of bamboo (Dentrocalamus strictus). Wear, 2007, 262: 1031–1037
71 Xu M J, Li L, Wang M Z, et al. Effects of surface roughness and wood grain on the friction coefficient of wooden materials for wood-wood frictional pair. Tribol Trans, 2014, 57: 871–878
72 Xu M J, Li L, Gao X X, et al. Grain direction infl uencing on the friction coeffi cient between woodand rubber belts (in Chinese). Wood Process Mach, 2013, 23: 38–42 [许美君, 李黎, 高鑫鑫, 等. 纹理方向对木材与橡胶带间摩擦系数的影响. 木材加工机械, 2013, 23: 38–42]
73 Chand N, Dwivedi U K. High stress abrasive wear study on bamboo. J Mater Process Technol, 2007, 183: 155–159
74 Jain S, Kumar R, Jindal U C. Mechanical behaviour of bamboo and bamboo composite. J Mater Sci, 1992, 27: 4598–4604
75 Tong J, Arnell R D, Ren L Q. Dry sliding wear behaviour of bamboo. Wear, 1998, 221: 37–46
76 Tong J, Ren L Q, Li J Q, et al. Abrasive wear behaviour of bamboo. Tribol Int, 1995, 28: 323–328
77 Yakou T, Sakomoto S. Abrasive properties of bamboo. Jpn J Tribol, 1993, 38: 491–497
78 Tong J, Ma Y H, Chen D H, et al. Effects of vascular fiber content on abrasive wear of bamboo. Wear, 2005, 259: 78–83
79 Ritchie R O. The conflicts between strength and toughness. Nat Mater, 2011, 10: 817–822
80 Espinosa H D, Filleter T, Naraghi M. Multiscale experimental mechanics of hierarchical carbon-based materials. Adv Mater, 2012, 24: 2805–2823
81 Ashby M. Designing architectured materials. Scr Mater, 2013, 68: 4–7
82 Ortiz C, Boyce M C. Bioinspired structural materials. Science, 2008, 319: 1053–1054

83 Vali H, Akenjiang T, Hasiyet H, et al. Experimental research on compressive strength of straw fiber adobe (in Chinese). Building Sci, 2012, 28: 61–64 [外力·艾比不拉, 阿肯江·托呼提, 哈斯亚提·哈里丁, 等. 植物纤维单块土坯抗压试验研究. 建筑科学, 2012, 28: 61–64]

84 Shibulal G S, Naskar K. Structurally different short aramid fiber-reinforced thermoplastic polyurethane. Polym Compos, 2014, 35: 1767–1778

85 Makar J M, Margeson J, Luh J. Carbon nanotube/cement composites—Early results and potential applications. In: Banthia N, Uomoto T, Bentur A, et al., eds. In: Proceedings of 3rd international conference on construction materials: Performance, innovations and structural implications. Vancouver: NRC Publications Archive, 2005. 1–10

86 Vishtal A, Retulainen E. Boosting the extensibility potential of fibre networks: A review. BioResources, 2014, 9: 7951–8001

87 Dunlop J W C, Fratzl P. Multilevel architectures in natural materials. Scr Mater, 2013, 68: 8–12

88 Dunlop J W C, Fratzl P. Biological composites. Annu Rev Mater Res, 2010, 40: 1–24

89 Li S H, Zhou B L, Zheng Z Q, et al. A fine-scale bionic model for composite materianls (in Chinese). Mater Sci Prog, 1991, 5: 543–547 [李世红, 周本濂, 郑宗光, 等. 一种在细观尺度上仿生的复合材料模型. 材料科学进展, 1991, 5: 543–547]

90 Cui Y Q, Liu X Q. Performance requirments and effect factors of automotive brake friction material composites (in Chinese). Mater Rev, 2014, 28: 413–416 [崔艳芹, 刘学庆. 汽车制动摩擦材料的性能要求及影响因素. 材料导报, 2014, 28: 413–416]

91 Li H J, Zeng X R, Li K Z, et al. Research and application of carbon—Carbon composites in China (in Chinese). Carbon, 2001, 4: 8–13 [李贺军, 曾燮榕, 李克智, 等. 我国炭/炭复合材料研究进展. 炭素, 2001, 4: 8–13]

92 Policandriotes T, Filip P. Effects of selected nanoadditives on the friction and wear performance of carbon-carbon aircraft brake composites. Wear, 2011, 271: 2280–2289

93 Fitzer E. Carbon Reinforcements and Carbon/Carbon Composites. Berlin: Springer, 1998

94 Meyers M A, McKittrick J, Chen P Y. Structural biological materials: Critical mechanics-materials connections. Science, 2013, 339: 773–779

95 Heuer A H, Fink D J, Laraia V J, et al. Innovative materials processing strategies: A biomimetic approach. Science, 1992, 255: 1098–1105

96 Cui F Z, Zheng C L. Biomimetic Materials (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2004 [崔福斋, 郑传林. 仿生材料. 北京: 化学工业出版社, 2004]

97 Erb R M, Libanori R, Rothfuchs N, et al. Composites reinforced in three dimensions by using low magnetic fields. Science, 2012, 335: 199–204

Research progress of mechanical properties of natural wood and bamboo fiber composites and their biomimetics

YIN Wei[1], TIAN Yu[1], TAO DaShuai[1], LIU ZheYu[1], HAN ZhiWu[2] & ZHANG JunQiu[2]

[1] *State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*
[2] *Key Laboratory of Bionic Engineering (Ministry of Education, China), Jilin University, Changchun 130022, China*

Natural bio-fiber composites have the characteristics of simple elements and sophisticated structure, superior mechanical properties of high strength, high toughness and low coefficient of friction, and are the inspirational sources for the design of new materials. Biomimetic fiber composites have been widely used in modern industry. At present, studies of learning from the natural biological material structure-functional characteristics to manufacturing biomimetic structure—Functional integration material have originated lots of results, such as imitating wood porous ceramic material, imitating shell multi-layer composite materials and imitating bone porous scaffolds, etc. However, a lot of problems still exist, such as fiber is brittle and easy to be pulled out, the size selection of the whisker is difficult, the choice of ceramic matrix composite toughening methods is difficult, etc. To guide advanced biomimetic materials designs, it is important to reveal the relationships between the distribution, angle and density of cellulose, structure and binding mode of interface and the mechanical and frictional properties of the biological fiber composites. Wood and bamboo are the most common natural biological fiber composites which have excellent mechanical properties. They have been widely used in a variety of traditional architectural and ship parts. In this manuscript, recent researches on the mechanical properties of the wood and bamboo as the typical representatives of the natural biological fiber composites have been reviewed. The biomimetic composites of natural fiber materials have been briefly summarized. This tentative review might provide a reference for the design and preparation of biomimetic high strength, wear-resistant fiber composites. Trees and bamboo with excellent tribological properties relies not only on its internal structure, but also on its biological activity. If purely from a mechanical point of view to achieve the purpose of the bionic, it is difficult to obtain satisfactory results. Modern fiber composites in the rapid development process, often there is a big fiber brittle, difficult to interface design, easy to pull the fibers lead to enhanced failure whisker size selection difficult to choose the difficulty of ceramic matrix composites toughened approach the problem. Therefore, the application of bionic fiber reinforced composites toughened functional design principle, simulate biological fiber composite materials and structures excellent interface characteristics, is expected to further address the interface of chemical and physical properties of stability and strength of fiber composites tough problem, has important academic significance and application value.

wood, bamboo, natural biological fiber composites, biomimetic composites, mechanical properties, tribological properties

doi: 10.1360/N972014-01318