

Bamboo—From Raw Bamboo to Glued Laminated Bamboo Structure

Guosong Yang

Beijing Yanhuang International Joint Engineering Co., Ltd., Nanjing Jiangsu
Email: yanggs2019@163.com

Received: Jun. 10th, 2020; accepted: Jul. 3rd, 2020; published: Jul. 10th, 2020

Abstract

This paper briefly introduces the research and development of bamboo material and round bamboo structure at home and abroad, also, the research of two kinds of glued laminated bamboo for structure use are summarized. An in-depth analysis of the research status of modern bamboo structure based on glued laminated bamboo. The results show that there are still many deficiencies used of the structural glued laminated bamboo produced domestically, and some important physical and mechanical properties of modern bamboo structure need further study such as fire and seismic resistance. At present, the lack of design specifications for bamboo structures is the main reason for restricting the development of newly developed bamboo structures based on glued laminated bamboo. It is suggested that a series of further researches should be done on the mechanical model of glued laminated bamboo so as to establish its constitutive relationship, which can be the theoretical support for future research of modern bamboo structures and the preparation of design specifications.

Keywords

Raw Bamboo, Glued Laminated Bamboo, Modern Bamboo Structure, Constitutive Relationship

竹子——从原竹到胶合竹结构

杨国松

北京炎黄国际联合工程有限公司, 江苏 南京
Email: yanggs2019@163.com

收稿日期: 2020年6月10日; 录用日期: 2020年7月3日; 发布日期: 2020年7月10日

摘要

文章简要介绍了国内外对原竹、圆竹结构的发展史和研究现状; 概括总结了两种结构用胶合竹材的研究

进展, 并对以胶合竹为基础的现代竹结构的研究现状做了深入分析。结果表明, 目前国产结构用胶合竹材存在诸多不足, 胶合竹结构的抗火、抗震等关键物理和力学性能还需进一步深入研究。目前, 缺乏竹结构设计规范是限制新型胶合竹结构发展的主要原因, 文章建议进一步开展胶合竹材力学模型的研究, 建立胶合竹材的本构关系, 为未来胶合竹结构的深入研究和设计规范的编写提供理论支撑。

关键词

原竹, 胶合竹, 现代竹结构, 本构关系

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

工程木材是一种绿色环保建材, 轻型木结构在北美、日本、西欧等发达国家也有着非常广泛的应用。由于我国木材资源相对匮乏, 生产生活所需木材需要大量进口, 木结构在我国的发展受到了较大的限制。相比较而言, 我国竹材资源十分丰富, 竹林资源占据了世界竹林资源的 1/5~1/4 [1]。我国竹类植物共 857 种[2], 竹林面积 538.10 万公顷, 毛竹林面积 386.83 万公顷[3]。竹材是多年生草本植物, 生长成材周期短, 一般 3~5 年成材, 并且一次造林可以多次砍伐, 多年收益, 经济效益高[4]。材性研究表明, 竹材具有优良的力学性能, 竹材的顺纹抗拉、抗压强度高, 其比强度和比刚度均接近甚至高于钢材[5], 经过优化处理或对原竹材进行纤维重组后的胶合竹材, 综合性能进一步提高, 完全可以作为一种天然纤维复合材料用于建筑结构领域。

将竹材作为建筑材料在我国具有悠久的历史, 早在 7000 多年前, 圆竹就被作为梁、柱等受力构件用于房屋建筑中[4], 此后的很长一段时间内, 圆竹结构建筑在我国历史上都占据重要地位[6], 国内现存比较典型的竹结构建筑是我国西南地区的“干阑式”竹楼。国外较早使用圆竹结构的南美、非洲等地区, 主要有屋顶、凉亭和桥梁等圆竹空间体系[7]。但是圆竹结构存在明显的缺点: 圆竹的中空结构, 在荷载作用下容易劈裂而丧失承载力; 圆竹结构的节点连接可靠性差等。随着新材料的出现和建筑技术的进步, 圆竹结构建筑逐渐被木结构、砖混结构以及钢筋混凝土结构和钢结构取代。此后, 竹材大多被用于制作竹材工艺品, 在建筑领域多被用来制作建筑模板、脚手架等围护结构, 除了少量利用竹材顺纹抗拉强度高的特点制作的竹筋增强构件外, 原竹材已很少被用于结构构件中。直到近些年, 随着材料学的发展以及竹木胶合技术的进步, 胶合竹材得到了比较快速的发展, 得益于优良的力学性能, 又逐渐被应用到建筑结构中。目前, 较为常见的胶合竹材有两大类: 重组竹材和竹集成材(层合竹材), 胶合竹材突破了圆竹几何尺寸限制, 用于建筑结构中的构件形状、截面尺寸可以灵活选择。学术界, 把克服了传统原竹材料的缺陷, 可以根据实际需求制作任意截面尺寸和构件截面形状的新型胶合竹结构称作现代竹结构。本世纪以来, 人们对胶合竹以及胶合竹结构的研究取得了长足的进步, 并获得了丰硕的研究成果。

作者参考了大量国内外文献资料, 首先对竹材的材性研究做了回顾和总结; 然后, 分别介绍了原竹材以及两种胶合竹材的研究进展; 紧接着, 着重介绍了以胶合竹材为基础的竹构件性能研究、全竹结构建筑的发展现状, 并提出胶合竹材在防腐、抗火、抗震研究等方面存在的不足和有待进一步开展的研究内容。

2. 竹材的力学性能和胶合竹的环境负荷

竹材和几种常见建筑材料的力学参数以及它们生产加工的环境负荷如表 1~3 所示。

Table 1. Mechanical properties of glued laminated bamboo and engineering wood

表 1. 竹材和工程木力学性能[8] [9]

材料	密度 kg/m ³	顺纹抗压 强度 MPa	横纹抗 压强度 MPa	顺纹抗 拉强度 MPa	横纹抗 拉强度 MPa	抗剪强度 MPa	抗弯强度 MPa	抗弯弹 性模量 GPa	比模量 10 ⁶ (m ² s ⁻²)
层压胶合竹	686	77	22	90	2	16	77~83	11~13	16~19
层压胶合竹 ^a	710	73	24	85	-	17	100~120	10~12	14~17
重组竹	1163	86	37	120	3	15	119	13	11
Glubam	820	51	25	83	17	16	99	9.4	11
原竹	666	53	-	153	-	16	135	9	14
云杉	383	36	-	59	-	9	67	8	21
冷杉 LVL	520	57	-	49	-	11	68	13	25

a. 来源于作者材性试验数据，材料的含水率为 10%。

Table 2. Mechanical properties of bamboo and main building materials

表 2. 竹材和几种主要建筑材料力学性能[10]

材料类别	抗拉强度 MPa	抗压强度 MPa	抗弯强度 MPa	顺纹抗剪强度 MPa	弹性模量 GPa
竹材	35~300	24.5~100	68.6~294	10~23	12~20
木材	75~110	30~55	70~150	5~14	9~20
钢材	250~350	250~350	235~400	-	190~210
混凝土	1.26~12.6	12.6~126	1.45~15.6	-	25~38

Table 3. Comparison of carbon emission coefficient and energy consumption of glued laminated bamboo and Industrial materials

表 3. 胶合竹和其它几种材料碳排放系数和生产耗能对比[9]

材料	二氧化碳排放系数(kg/m ³)	生产能耗(GJ/m ³)
Glubam	-261	2.7
工程木	-228	1.2
胶合木	-168	4.5
水泥	2040	11
铝材	6235	362
钢材	8117	448

从表格可以看出，竹材的力学性能优异；和传统建筑材料相比，竹木材料的生产能耗与碳排放低，竹木结构的使用实际是一个固碳的过程，对于生长周期更短的竹材来说，固碳效应则更加明显。

3. 原竹材

原竹材是指直接作为建筑材料的圆竹或是将圆竹切割成竹片单元，除去表面的竹青和竹黄后，用于生产生活的竹材。竹材属于各向异性材料[11]，但更为复杂的是，不同取材部位、竹龄、含水率的竹材力

学性能也不尽相同[12]。近年来,国内外学者对圆竹和竹片的力学性能、原竹材料的变异性能、荷载作用下的力学行为、影响原竹物理力学性能的自然因素等做了较为全面的研究。大量材性试验表明,以圆竹为测试单元的各项力学性能的变异规律与以竹片为测试单元所表现出的规律类似[13]-[18]。竹纤维的变异主要体现在纤维长度和纤维密度的变化,其中,纤维长度只与纤维生长位置相关,和竹龄和胸径无关[19]。竹材在径向和弦向受力作用下具有相同的力学行为[20] [21]。此外,不同海拔高度的竹材基本密度都随其轴向高度的增加而增大,且竹材的基本密度越大其抗压强度、抗弯强度越高。综合研究结果表明,3~4年竹龄,取材部位距地高度适中,含水率10%左右,竹纤维密集度高的竹材力学性能趋于最优[22]-[29]。

4. 胶合竹材

胶合竹材是指采用化学药剂在特定温度下对原竹材进行胶合处理,或是对竹材的纤维进行重组、胶合而成的竹纤维复合材料。

4.1. 原竹材的表面处理

原竹材的表面处理主要是为了降低因环境温湿变化对竹纤维的不利影响从而提高材料的耐久性。研究发现,竹材的含水率不仅影响竹材的力学性能,对竹材的耐久性能也有很大的影响。此外,季节更替产生的温湿循环会加速竹纤维的降解,从而使竹材过早丧失承载力而失效。Te-Hsin Yang [30]等采用空气、氮气、亚麻籽油三种不同热胶合介质对竹材处理后发现,竹材的抗吸水能力都得到了很大程度上的改善。Pallav Saikia [31]等发现,生物化学制剂 BF-N/14 在提高竹材抗拉性能的同时,还能够有效降低竹材中竹纤维和木质素的降解速度,从而提高竹材的耐久性。U. M. K. Anwar [32]等将竹条浸入酚醛后放入恒温恒湿环境中加压固化,从分析结果来看,经过不同固化时间后竹条的吸水性和膨胀系数都有了一定程度的降低,且竹条的抗弯弹性模量和断裂模量也有不同程度的提高。原竹的表面处理是生产制作物理和力学性能更加稳定的胶合竹材的基础。

4.2. 竹集成材

竹集成材是将圆竹沿顺纹方向加工成一定长、宽、厚的竹片单元,养护至含水率10%左右,然后通过胶黏剂经蒸汽热压成型的胶合竹材。竹集成材的研究始于上世纪80年代[33],经过三十多年的发展,在如何提高竹集成材的强度和耐久性以及竹集成材构件的力学性能这几个方面的研究较为深入和全面。

4.2.1. 影响竹集成材强度因素

影响竹集成材强度的因素很多,除了竹材本身外,加工工艺方面如:碳化处理、竹片单元的组坯和接长方式、胶水的类型、施胶量、热压温度、压力大小、热压时间、防腐处理等都影响竹集成材的强度。殷寿柏 [34]通过对比水性高分子异氰酯胶黏剂和酚醛树脂胶黏剂的胶合性能得出,酚醛树脂胶黏剂胶合效果更好。Nugroho [35] [36]发现,在热压胶合时,胶水的渗透速率影响竹材内部的粘结强度。田磊[37]从热压时间、升温速率、热压温度三个方面综合考虑得出,户外竹集成材的最佳热压工艺为:温度130℃,施胶量280 g/m²,压力2 MPa,热压时间3 min/mm。高频热压胶合工艺表明,竹集成材的密度、静曲强度、抗弯弹性模量随施胶量的增加而上升[38]。此外,采用微波辅助酚醛树脂胶固化能够有效提高胶合面的强度[39]。

由于影响胶合竹材强度因素的多样性,决定了研究工作的复杂性与重复性。未来,还需要开展更系统的实验研究,来完善生产工艺以提高竹集成材的强度。

4.2.2. 竹集成材的防腐

为了提高户外竹材耐久性,基材竹片单元在浸胶组坯前要先进行碳化处理,称作防腐前处理,目的是除去竹材中的糖分,提高材料的热稳定性以及降低虫蛀风险。热压成型之后还需要在表面涂刷防腐材料,

称作为防腐后处理,目的是防止因渗水而加速竹纤维老化。张禄晟[40]等采用两种水载铜基防腐剂:季铵铜和铜唑对竹集成材进行表面防腐处理后发现,竹集成材的耐腐蚀性能得到了很大程度的提高,并且防腐效果随着药量的增加而提高。张融[41]等开发出的防霉乳液涂料能够有效地减缓水对竹集成材的渗透速度。虽然此类方法防腐效果显著但也存在明显的不足,水载型防腐材料的抗流失性能普遍较差,若竹材用于户外,需要定期维护。

不难发现,防腐后处理需要解决防腐材料的流失问题,但目前并没有较好的措施来解决,而且后处理一般只是在竹材表面涂刷防腐材料,一旦防护层遭到破坏,竹材的腐蚀速度将大大加快。有学者尝试彻底的防腐前处理,即采用浸渍的方式对竹篾单元进行防腐处理,以季铵铜和铜唑加压浸渍处理的毛竹精刨竹条为单元制作的防腐竹集成材的弹性模量和断裂模量都略有下降,胶合层的剪切强度有所提高[42],但这种方式的经济性较差,同时也不能忽略防腐材料对竹材力学性能的影响。

4.2.3. 竹集成材构件力学性能

试验研究表明,竹集成材抗弯性能和胶合木相当[35]。Sharma [43]等对竹集成材梁构件的抗弯性能进行研究,并与木材进行了对比。Sinha [44]等通过足尺试验探讨了胶黏剂对竹集成材梁强度和刚度的影响,同时验证了该材料在建筑结构中应用的可行性。针对梁构件的综合试验研究表明,竹集成材梁极限承载力由刚度控制,而非强度控制;梁的受弯破坏表现出明显的脆性特征;剪跨比对梁的承载力影响较大,且随着剪跨比的增大,梁的抗弯承载力下降较快[45] [46]。苏毅[47]等通过试验发现,受弯破坏时,竹梁破坏时的挠度过大,并提出以挠度作为控制指标进行梁构件设计。Mujiman [48]等发现,采用截面存在一定曲率的竹片胶合而成的梁构件的耐久性、刚度、延展性都优于矩形截面竹片,并且当竹片厚度在 7 mm 时梁构件性能达到最佳状态。在梁的受拉侧,采用纤维增强复合材料(FRP)筋能够显著增强梁截面的刚度和抗弯承载力[49] [50] [51]。采用箍筋增强的竹集成材梁构件在经过许用循环次数都为 200 万次的疲劳荷载作用下,承载力比裸梁提升了 26% [52]。苏靖文[53]等对竹集成材方柱墩轴压力学性能所做的初步研究表明,竹集成材的两个横纹方向的抗压强度接近,顺纹抗压强度约是两个横纹方向的 5 倍。

4.3. 重组竹材

重组竹材是一种将竹材纤维重新组织经高温高压固化而成的新型竹质材料。重组竹材的施胶量较大,密度刚度比竹集成材大,其重度一般在 1.0 以上,由于重组竹材的工艺水平比较低,表观加工缺陷多,因此,重组竹材大都用于包装板材、建筑模板等围护结构。重组竹材采用的也是热压胶合工艺,在防腐处理上与竹集成材类似。

俞云水[54]等对竹席竹帘胶合竹工字型梁抗弯性能进行的试验研究表明,竹梁腹板和翼缘采用螺栓连接的可靠性不高,腹板和翼缘间的剪力不能有效传递,腹板的破坏为剪切破坏,进一步说明材料存在明显的工艺缺陷。

湖南大学基于竹席竹帘胶合板开发出纵横向纤维比为 4:1 的新型胶合竹材 Glubam [9],并且针对该材料的材性、构件和结构性能开展了较为系统的研究。李佳[55]对不同竹纤维布置下胶合竹抗剪性能对比得出,当纵横向纤维比为 4:1 时,Glubam 抗剪性能最优,并给出了该纤维比下 Glubam 力学性能强度设计值与允许应力值。杨瑞珍[9] [56]针对 Glubam 的材性和螺栓连接性能进行了试验研究。单波[57]采用人工气候加速老化试验方法对 Glubam 耐候性能的试验表明,Glubam 具有良好的尺寸稳定性,材料的内结合强度对老化时间最为敏感,随着时间的推移下降幅度显著,干湿循环是其老化的主要影响因素。

经过试验研究分析、结合试点工程建造经验和使用效果,2012年肖岩[58]等提出将 Glubam 作为未来建筑结构用材,并给出以中国木材容许应力设计方法为基础的 Glubam 容许设计应力建议值。此前肖岩[59]课题组测试了一根足尺长度为 10 m 的 Glubam 竹桥梁在自重荷载作用下的长期蠕变性能,竹梁受弯部分采用 CFRP 增强,3.7 年后的蠕变变形约为 7.98 mm。试验数据和相关分析表明,高温和潮湿气候会增加其蠕变速率、受拉侧 CFRP 能够提高竹梁的承载力、经长期荷载作用后竹梁的强度和刚度存在一定程度的下降。该结论与魏洋[49]等对 FRP 筋增强竹集成材梁构件的力学性能研究结果相吻合。曾竞宜[60]研究了 Glubam 梁的抗疲劳特性,在 200 万次疲劳循环加载后,Glubam 梁试件刚度没有明显变化,但极限承载力下降约 15%。宦亚鹏[61]也对 Glubam 工字型竹梁的抗弯性能进行了初步研究,和俞云水[54]等有所不同,该试件腹板和翼缘采螺栓与胶黏剂组合连接。实验表明,腹板和翼缘的连接效果可靠性有了一定提高,但是从最终的破坏形态来看,Glubam 工字型梁的承载力一般由受压区域腹板的侧向稳定性能控制,并建议,如果需要进一步提高 GluBam 工字梁的承载力,可以通过改变腹板所用竹篾的配置方向和数量来提高腹板的抗剪强度和抗拉强度。轴心受压 Glubam 柱承载力实验研究表明:长柱破坏主要是由稳定控制,而短柱破坏主要由材料强度控制[62] [63]。

与重组竹相比,竹集成材的强度与其相近、刚度略小,竹集成材中竹片单元之间经热压胶合后连接更为密实,耐久性能明显优于重组竹。因此,重组竹结构更适合应用在气候相对干燥,或有低湿度要求的室内环境中。

5. 竹材的力学模型和破坏准则

有关竹材的研究大多集中在材料的材性以及构件的承载力等方面,针对竹材破坏模式、骨架曲线及滞回特性等相关研究很少,不同种类胶合竹的微观破坏特性的对比还缺乏充足的试验数据。当前,竹结构受力构件承载力计算依然参考木结构设计计算公式。邵卓平[20] [21]对竹片在压缩大变形下的微观力学行为和应力-应变关系的研究表明,竹材在径向和弦向受压时具有相同的屈服极限,在轴向压缩大变形下的屈服极限是横压屈服极限的 3 倍,竹材在不同温度三向受压大变形过程可分为三个阶段:线弹性阶段、屈服后弱线性强化阶段和幂强化阶段,且温度越高竹材的屈服强度越低。Sina Askarinejad [64]等通过试验和有限元分析了竹材的断裂和混合模式下的抗力曲线行为,微观结构显示,竹材的纤维密度由外径向内径递减,刚度以及抗弯承载力也由外径向内径递减,但是竹纤维密度越高其断裂韧性越小,一旦有裂纹产生,在相同应力作用下,越靠近竹材外径,裂缝开展速率越高。因此,对竹结构改善强度和变形抗力的要求与改善其韧性和抗弯性能有着不同的要求。李海涛[65]等对侧压竹集成材的受力应力-应变模型和破坏机理的研究表明,侧压竹集成材破坏过程可以总结分为三个阶段,即弹性阶段、弹塑性阶段、韧性断裂阶段,并基于试验数据,给出精细的应力应变模型。周泉[66]在 Glubam 梁构件的试验研究中,结合 Tsai-Wu 失效准则的平面应力公式,提出了 Glubam 梁平面应力状态下的失效准则公式,并以此为基础得到 Glubam 梁在弯剪作用下的失效准则公式。虽然 Glubam 属于正交各向异性材料,但是在分析过程中,只是根据实际工程应用中主要计算在单个受力平面变形的情况,忽略泊松比的影响,集中考虑弯矩和剪力对承载力和变形的影响。因此,该模型是简化的力学模型。

可以发现,对竹材力学模型的研究大多处于根据试验数据做定性分析阶段,还没有建立相应的数学模型,而对纤维重组后的重组竹材的研究几乎还是空白,因此,为了更深入地对竹材进行研究,建立不同种类胶合竹材的力学模型是胶合竹材研究的重要组成部分。

6. 竹结构的发展与应用现状

竹材具有良好的工程适应性,原竹材可用于模板工程、脚手架工程等围护结构工程;优质竹材经胶

合处理后可用于加固工程、组合结构，另外，全竹结构也早已经突破了传统的圆竹结构形式，在全竹框架结构、装配式竹结构、桥梁工程等领域都取得了积极进展。

6.1. 圆竹结构

传统的原竹结构是用竹杆作为结构的构件，辅以其他建筑材料，通过捆绑、穿斗式节点、螺栓连接、钢板连接和套筒连接等连接方式将这些构件连接起来[11] [67]。目前，世界竹资源富集地区仍然保留有各类竹质传统民居。在亚洲，中国的“干阑式”竹建筑，台湾省的“竹厝”、印度的 Ekra 竹房；南美洲的哥伦比亚、委内瑞拉等国流行的 Bahareque 竹建筑；非洲的埃塞俄比亚等国 Sidama 竹屋等也是典型代表。这些传统原竹结构建筑大部分都采用圆竹作为梁柱结构，墙体以绑扎竹片作为骨架结构，泥土作为填充物，能够有效地遮蔽风雨[68]。但是，由于原竹结构房屋的设计建造基本依赖经验，加上圆竹几何形状特点，原竹结构的节点的强度低、可靠性差。为了解决这个问题，我国学者巩富[69]提出采用钢板螺栓连接代替绑扎连接的大跨度竹三角框架圆竹结构。Villegas [70]在节点位置的空心竹竿中加入一定配比的水泥砂浆，并用钢螺栓穿孔加以连接，该方法能够有效缓解传统原竹建筑节点强度低的问题。1989 年 Shoei Yoh [71]采用钢管插入原竹，并用螺栓将两者连接，钢管承载力足以承受螺栓传来的力，两个螺栓所处位置相互垂直。此节点螺栓数量较多，适用于承受较大荷载。

尽管采用新的节点形式能够一定程度上提高原竹结构的承载力，但原竹结构过于简单的构造形式很难满足当前人们的使用空间和审美要求。

6.2. 竹组合结构构件及组合结构

竹组合构件及组合结构一般指原竹材料或胶合竹材与其它建筑材料组合发挥作用的组合构件及结构。常见的竹组合构件有竹筋混凝土组合梁柱构件、竹木组合构件、钢竹组合构件及组合空间网架结构等。原竹组合构件是利用竹材质轻且抗拉强度高的力学性能特点，在降低组合结构自重的前提下提高结构或构件的力学性能。

6.2.1. 竹 - 混凝土组合结构

竹筋混凝土最早出现在 20 世纪初，那时在很多钢产量还比较低的地区，人们发现，以竹筋代替钢筋用于混凝土构件中，既能够充分利用自然资源，又能达到节约钢材的目的[67]。但是由于早期的竹筋并没有采取防水防腐处理，竹筋的干缩严重，竹材和混凝土的粘性也比较差，组合结构的强度和耐久性都不理想[72]，直到胶合竹材的应用才有了比较大的改观。K. Ghavami [73]研究发现，和素混凝土相比，竹筋增强混凝土梁的极限承载力提高了 400%，经过 negrolin-sand-wire 胶合优化处理后，竹纤维和混凝土的粘结能力提高了 90%，并预测，随着对材料的研究深入，未来以竹筋替代钢筋是完全可以期待的[74]。Masakazu Teral [75]通过对预应力竹筋混凝土梁的受弯破坏与素混凝土和预应力钢筋混凝土受弯破坏进行对比，得出预应力竹筋混凝土梁的抗弯承载力数倍于素混凝土梁的抗弯承载力，在计算方法上可以近似采用预应力钢筋混凝土。陈瑞麟[76]通过对比试验发现，虽然竹纤维混凝土的强度比钢纤维混凝土强度略有降低，但仍然能满足工程使用需要。

6.2.2. 竹木组合构件

竹木组合梁构件一般将竹材布置在受拉侧以提高组合梁的抗弯承载力。Andy W. C. Lee [77]在 1997 年对竹增强南方松 OSB 梁的抗弯性能的试验表明，竹筋增强后的组合梁抗弯刚度有了明显提高。冷予冰[78]等通过试验研究表明，在受拉区以胶合竹代替工程木能够大幅提高组合梁的承载力。高黎[79]等在对不同结构形式的预制竹木组合墙体的保温与隔声性能研究发现，竹木组合墙体的保温和隔声性能较差，还需要通过新的结构形式和构造措施加以改善。

6.2.3. 钢竹组合结构

国内外学者对不同形式钢竹组合构件的抗弯性能[80] [81] [82]、钢竹组合墙体和组合框架结构的抗震性能[83] [84]、钢竹组合网架结构的力学性能[85]进行的研究表明,竹材和钢材有较好的组合效应,钢竹组合结构的整体性较好;由于竹材具有较高的强重比,因此,在组合结构自重降低的情况下强度并没有明显降低;组合结构节点的可靠性、组合结构墙体钢板厚度决定了结构的抗震性能。谢桥军[86]等对 2 榀跨度均为 20 m 的胶合竹结构大跨度全竹屋架和“人”字形钢-竹屋架进行静力加载试验。试验结果表明,胶合竹屋架的破坏属于脆性破坏,而采用高强钢棒作为下弦拉杆的钢-竹屋架体系各项性能优于传统桁架形式的竹屋架体系。

6.2.4. 竹材在加筋工程中的应用

在加筋土工程中,和其它昂贵的合成材料相比,竹筋经防腐防虫处理后应用于加筋土工程中具有非常明显的成本优势。党发宁[87]等在探讨竹筋格栅在路堤工程中的应用的可能性的研究表明,竹筋格栅在完全失效前,土体固结作用已经可以将路堤的安全系数提高到满足规范要求。吕韬[88]等在高填方土质边坡中竹筋的应用研究中,肯定了竹筋在高填方土质边坡中的作用及竹材的使用对于改善生态环境的意义。

6.3. 现代全竹结构

现代竹结构体系是基于现代力学、材料学、结构设计及实验学等理论,通过开发新型竹结构材料,建立工业化生产方法、利用现代结构设计、施工方法以及维护技术将竹材构件拼接安装而成的一种新型结构体系[89]。现代竹结构使用的工程竹构件的截面尺寸和形状具有多样性,且全部可以通过工厂化生产,产品质量更加稳定可靠。

但目前国内外尚无结构用胶合竹技术规程和竹结构设计规范。胶合竹材用于建筑结构的研究依然处于起步阶段,还缺乏系统的竹结构力学性能试验以及相应的分析理论和设计方法。虽然有木结构设计规范作为参考,但是材料性质差异决定了胶合竹结构设计要从最基本的容许应力设计方法开始[1]。在此背景下,国内外学者对不同形式竹结构建筑的设计建造、综合性能进行了初步探索。

6.3.1. 竹结构住宅

1) 轻型框架竹结构

轻型框架竹结构房屋类似轻型木结构房屋,是未来我国以竹代木的一个发展方向。早在 2004 年,我国云南的一所小学校舍就采用了竹材人造板。2009 年,湖南大学建成首座现代竹结构双层别墅。2011 年陈国[90]对 Glubam 竹结构房屋抗震性能进行的振动台试验表明,Glubam 竹结构房屋抗震性能优异,加速度达到 0.5 g 时,结构的整体性依然完好。杨云芳[91]等探讨了竹集成材结构房屋的结构形式、构造方法及技术难点,肯定了竹集成材结构建筑的综合经济优势。肖岩[89] [92] [93]课题组针对轻型框架竹结构的构造处理和建造方法等关键技术、抗震设计方法、抗火性能以及生命周期的能耗和碳排放展开了系统的研究,竹结构内外墙系统可以有效减轻建筑物的自重,从而减少由建筑物自重所产生的地震作用;在防火石膏板的保护下,此类竹结构房屋的耐火时间可以达到 1.0 h;采用全生命周期法量化分析法将此类竹结构建筑和其它几种建筑结构进行对比表明,竹结构房屋是最适合人居的绿色住宅。黄东梅[94]等采用同样的生命周期评价方法对竹结构住宅整体环境性能进行评估发现,竹结构住宅的主要环境负荷来自传统建筑材料。

2) 装配式竹结构

装配式竹结构是具有质量轻、成本低廉、构造简单、抗震性能优异、装配方便等优点的新型模块化装配式房屋体系。目前,胶合竹结构构件已经进入工厂化生产阶段,国内对装配式竹结构的研究已经取

得一些进展。单波[95]等设计了几种预制圆竹构件,经过极限承载力试验后,建造了一座预制装配式圆竹建筑,验证了装配式圆竹建筑技术可行性和实用性。2008年肖岩[96]等基于 Glubam 开发出快速装配式现代竹结构抗震活动板房并用于汶川地震灾后重建工作。2009年余立永[97]给出 Glubam 装配式竹结构房屋的设计和建造方法,抗震试验表明,装配式竹结构具有良好的整体性,抗震性能优异。同年,魏洋[98]等参照木结构“梁柱结构体系”设计建造了两层装配式抗震安居房。陈国[99]等结合湖南衡阳蔡伦竹海胶合竹结构住宅工程,对其关键技术及施工措施进行了深入探讨,提出装配式竹结构的防潮措施。装配式竹结构活动板房与轻钢结构活动板房抗火试验对比表明,竹材的导热系数更小,装配式竹结构的梁、柱、墙体以及屋面具有更好的抗火能力和更长的耐火极限[100]。

6.3.2. 竹结构桥梁

木结构桥梁在北美有着非常广泛的运用,据美国联邦公路局 2002 年公布的数据显示,美国现役木结构桥梁达到 32,400 座,还有大量木结构桥梁在建。虽然木结构桥梁建造技术相对成熟,但由于我国木材资源短缺,没有大规模建设木结构桥梁的现实基础,但可以利用我国竹材资源丰富,发展竹结构桥梁。目前国内已经有学者将目光转向以竹代木,在国内发展竹结构桥梁。

2006年肖岩[101]等采用短薄胶合竹板拼接、整体冷压胶合成型的大尺寸竹梁,通过预制装配方式建造了一座现代竹结构人行天桥。2008年湖南大学现代竹木及组合结构研究所采用指接胶合竹板关键技术,解决了竹结构桥梁在跨度和承载力方面的难题后,在湖南省耒阳市设计建造了世界首座可行车竹结构桥梁[102]。该桥主跨达到 10 m,设计最大通行质量为 8 吨,目前该桥已安全使用近十年并且状态良好。

7. 结论与展望

我国竹材资源丰富,以竹代木发展竹结构既是结合国情又充分利用了可再生资源,符合绿色发展的时代主题。结构用胶合竹材性能也必将随着材料科学与生产工艺的进步而逐步完善。以胶合竹材为基础的新型竹结构体系在我国具有广阔的发展前景,特别是在新农村建设以及文化建筑产业具有很高的推广价值。总体来说,胶合竹材的工程应用基本还处在探索性应用阶段,未来还需要大量而系统的研究工作加以完善,作者总结归纳出以下几点值得重视和进一步展开研究:

1) 与钢材、混凝土材料相比,竹材更加环保,但目前生产成本还比较高,综合经济效益不明显,还需要进一步改进生产工艺,提高生产效率,以降低材料生产成本从而提高其在工程结构领域的竞争力。

2) 目前国内尚无胶合竹生产的行业标准,原竹材料加工与产品检验主要依赖经验,致使胶合竹性能参数的离散性较大,材料的可靠性不高,最终导致研究的重复性。而缺乏设计规范又使得竹结构的设计与推广面临合法性问题。

3) 目前针对胶合竹材的研究大部分集中在材性和构件的强度,如何提高竹材的耐久性依然是一个重要课题。虽然已经有学者对材料的耐久性展开研究,但目前并没有给出大幅提高竹材耐久性的有效解决方案。

4) 抗火也是竹结构研究中的另一个重要课题。从已经开展的单层竹结构建筑抗火试验研究中可以发现,试验对象的屋面较轻,传递给梁构件的荷载比较小,在竹构件表面有防火石膏板的保护下,试件在模拟火灾中表现出较好的抗火性能。但是一个不能忽视的问题在于,目前,广泛用于热压工艺生产胶合竹构件的酚醛树脂胶的熔点只有 130℃左右,当建筑发生火灾后,即使胶合竹构件没有直接与火接触,其温度也很容易上升到酚醛树脂胶的熔点,也会使结构构件的承载力大幅度下降。当全竹结构层高超过两层,梁上部荷载较大时,温度效应对结构梁的不利影响就不能完全忽略。

参考文献

- [1] 肖岩, 单波. 现代竹结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [2] 易同培, 史军义. 中国竹类图志[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [3] 贾治邦. 中国森林资源报告[M]. 中国林业出版社, 2009.
- [4] 李霞镇, 钟永, 任海青. 现代竹结构建筑在我国的发展前景[J]. 木材加工机械, 2011, 22(6): 44-47.
- [5] 张波. 可再生竹材在建筑领域中的资源化利用研究进展[J]. 化工新型材料, 2016, 44(10): 30-32.
- [6] 肖岩, 李佳. 现代竹结构的研究现状和展望[J]. 工业建筑, 2015, 45(4): 1-6.
- [7] Zea Escamilla, E. and Habert, G. (2014) Environmental Impacts of Bamboo-Based Construction Materials Representing Global Production Diversity. *Journal of Cleaner Production*, **69**, 117-127. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.067>
- [8] Sharma, B., Gatóo, A., Bock, M., et al. (2015) Engineered Bamboo for Structural Applications. *Construction and Building Materials*, **81**, 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.077>
- [9] 杨瑞珍. Glulam 材料的性能研究与应用[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [10] 潘毅, 李家佳, 李玲娇, 等. 现代竹材在建筑结构中的应用现状[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(A2): 115-118.
- [11] 陈溪, 许清风, K. A. Harries. 竹材力学性能及其在土木工程中应用的研究进展[J]. 结构工程师, 2015, 31(6): 208-217.
- [12] 周芳纯. 竹材物理力学性质的研究[J]. 南京林产工业学院学报, 1981, 2(1): 1-32.
- [13] 张丹, 王戈, 张文福, 等. 毛竹圆竹力学性能的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(7): 119-123.
- [14] 陈复明, 江泽慧, 王戈, 程海涛. 单向及双轴向压缩载荷下的圆竹径向力学性能[J]. 深圳大学学报(理工版), 2012, 29(6): 527-533.
- [15] Dixon, P.G. and Gibson, L.J. (2014) The Structure and Mechanics of Moso Bamboo Material. *Journal of the Royal Society Interface*, **11**, Article ID: 20140321. <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.0321>
- [16] Keogh, L., O'Hanlon, P., O'Reilly, P., et al. (2015) Fatigue in Bamboo. *International Journal of Fatigue*, **75**, 51-56. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.02.003>
- [17] Chen, H., Cheng, H., Wang, G., et al. (2015) Tensile Properties of Bamboo in Different Size. *Journal of Wood Science*, **61**, 552-561. <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1511-x>
- [18] Meng, Z., Wei, C.-G., Li, J.-Q., et al. (2015) The Energy Absorption of Bamboo under Dynamic Axial Loading. *Thin-Walled Structures*, **95**, 255-261. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.06.017>
- [19] 马灵飞, 马乃训. 毛竹材材性变异的研究[J]. 林业科学, 1997, 33(4): 356-364.
- [20] 邵卓平. 竹材在压缩大变形下的力学行为 I. 应力-应变关系[J]. 木材工业, 2003, 17(2): 12-14.
- [21] 邵卓平. 竹材在压缩大变形下的力学行为 II. 微观变形特征[J]. 木材工业, 2004, 18(1): 27-29.
- [22] 张令峰, 许海峰, 汪佑宏, 等. 不同海拔高度及坡向对毛竹解剖特征影响及其与物理力学性质关系[J]. 安徽农业大学学报, 2009, 36(1): 77-80.
- [23] 汪佑宏, 王善, 王传贵, 等. 不同海拔高度及坡向对毛竹主要物理力学性质的差异[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(1): 20-22.
- [24] 黄艳文, 吴夏华, 钱俊. 不同竹龄、部位竹材经软化后的力学性能比较研究[J]. 竹子研究汇刊, 2015, 34(2): 40-46.
- [25] 张晓冬, 程秀才, 朱一辛. 毛竹不同高度径向弯曲性能的变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2006, 30(6): 44-46.
- [26] 邵卓平, 黄盛霞, 吴福社, 等. 毛竹节间材与节部材的构造与强度差异研究[J]. 竹子研究汇刊, 2008, 27(2): 48-52.
- [27] Askarinejad, S., Kotowski, P., Shalchy, F., et al. (2015) Effects of Humidity on Shear Behavior of Bamboo. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, **5**, 236-243. <https://doi.org/10.1016/j.taml.2015.11.007>
- [28] Lo, T.Y., Cui, H.Z. and Leung, H.C. (2004) The Effect of Fiber Density on Strength Capacity of Bamboo. *Materials Letters*, **58**, 2595-2598. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2004.03.029>
- [29] Sharma, B., Harries, K.A. and Ghavami, K. (2013) Methods of Determining Transverse Mechanical Properties of Full-Culm Bamboo. *Construction and Building Materials*, **38**, 627-637. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.116>
- [30] Yang, T., Lee, C., Lee, C., et al. (2016) Effects of Different Thermal Modification Media on Physical and Mechanical Properties of Moso Bamboo. *Construction and Building Materials*, **119**, 251-259. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.156>

- [31] Saikia, P., Dutta, D., Kalita, D., *et al.* (2015) Improvement of Mechano-Chemical Properties of Bamboo by Bio-Chemical Treatment. *Construction and Building Materials*, **101**, 1031-1036. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.106>
- [32] Anwar, U.M.K., Paridah, M.T., Hamdan, H., *et al.* (2009) Effect of Curing Time on Physical and Mechanical Properties of Phenolic-Treated Bamboo Strips. *Industrial Crops and Products*, **29**, 214-219. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.05.003>
- [33] 李海涛, 张齐生, 吴刚, 等. 竹集成材研究进展[J]. 林业工程学报, 2016, 1(6): 10-16.
- [34] 殷寿柏. 室外结构用竹集成材的胶合研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- [35] Nugroho, N. and Ando, N. (2000) Development of Structural Composite Products Made from Bamboo I: Fundamental Properties of Bamboo Zephyr Board. *Journal of Wood Science (Japan)*, **46**, 68-74. <https://doi.org/10.1007/BF00779556>
- [36] Nugroho, N. and Ando, N. (2001) Development of Structural Composite Products Made from Bamboo II: Fundamental Properties of Laminated Bamboo Lumber. *Journal of Wood Science*, **47**, 237-242. <https://doi.org/10.1007/BF01171228>
- [37] 田磊. 户外竹集成材制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2013.
- [38] 阮氏香江, 张齐生, 蒋身学. 竹集成材高频热压胶合工艺及性能研究[J]. 林业科技开发, 2014, 28(4): 109-112.
- [39] Zheng, Y., Jiang, Z., Sun, Z., *et al.* (2014) Effect of Microwave-Assisted Curing on Bamboo Glue Strength: Bonded by Thermosetting Phenolic Resin. *Construction and Building Materials*, **68**, 320-325. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.014>
- [40] 张禄晟, 覃道春, 任红玲, 等. 防腐后处理工艺对竹集成材耐久性的影响[J]. 林产工业, 2013, 40(5): 55-57.
- [41] 张融, 张禄晟, 费本华, 等. 硅烷胶合丙烯酸酯乳液涂饰竹集成材的防水防霉性能[J]. 林产工业, 2013, 40(6): 57-59.
- [42] 张禄晟, 覃道春, 任红玲, 等. 防腐前处理对竹集成材力学性能的影响[J]. 林产工业, 2013, 40(4): 54-56.
- [43] Sharma, B., Gatóo, A. and Ramage, M.H. (2015) Effect of Processing Methods on the Mechanical Properties of Engineered Bamboo. *Construction and Building Materials*, **83**, 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.048>
- [44] Sinha, A., Way, D and Mlasko, S. (2013) Structural Performance of Glued Laminated Bamboo Beams. *Journal of Structural Engineering*, **140**, 1-8.
- [45] 魏洋, 蒋身学, 吕清芳, 等. 新型竹梁抗弯性能试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(1): 88-91.
- [46] 李海涛, 苏靖文, 张齐生, 等. 侧压竹材集成材简支梁力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(3): 121-126.
- [47] 苏毅, 宗生京, 徐丹, 等. 竹集成材简支梁抗弯性能试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(1): 54-60.
- [48] Mujiman, Priyosulistyo, H., Sulistyo, D. and Prayitno, T.A. (2014) Influence of Shape and Dimensions of Lamina on Shear and Bending Strength of Vertically Glue Laminated Bamboo Beam. *Procedia Engineering*, **95**, 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.161>
- [49] 魏洋, 骆雪妮, 周梦倩. 纤维增强竹梁抗弯力学性能研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(2): 11-15.
- [50] 吕清芳, 魏洋, 蒋身学, 李国芬, 张齐生. FRP 筋增强竹梁的力学性能试验研究[C]//第六届全国 FRP 学术交流会, 郑州, 2009.
- [51] 吕志涛, 魏洋, 蒋身学, 吕清芳, 张齐生. 新型竹梁抗弯性能试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(1): 88-91.
- [52] 孟旭. 箍筋增强型竹梁力学及疲劳性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [53] 苏靖文, 李海涛, 杨平, 等. 竹集成材方柱墩轴压力学性能[J]. 林业科技开发, 2015, 29(5): 89-93.
- [54] 喻云水, 周蔚虹, 刘学. 竹质工字梁抗弯性能的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(1): 154-156.
- [55] 李佳. 不同竹纤维布置下的胶合竹抗剪性能[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [56] 杨瑞珍. 胶合竹材力学性能及螺栓连接性能的研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [57] 单波, 肖岩, 陈杰. 格鲁斑胶合竹耐候性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(4): 26-32.
- [58] 肖岩, 杨瑞珍, 单波, 等. 结构用胶合竹力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(11): 150-157.
- [59] Li, L. and Xiao, Y. (2014) Creep Behavior of Glulam and CFRP-Enhanced Glulam Beams. *Journal of Composites for Construction*, **20**, Article ID: 04015028.
- [60] 曾竟谊. 关于现代竹结构动力性能的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2011.

- [61] 宦亚鹏, 肖岩. GluBam 胶合竹工字梁抗弯性能的研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(6): 79-84.
- [62] 肖岩, 冯立, 吕小红, 等. 胶合竹柱轴心受压试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(4): 13-17.
- [63] 吕小红. GluBam 柱轴心受压试验研究及有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [64] Askarinejad, S., Kotowski, P., Youssefian, S., et al. (2016) Fracture and Mixed-Mode Resistance Curve Behavior of Bamboo. *Mechanics Research Communications*, **78**, 79-85. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2016.02.001>
- [65] 李海涛, 张齐生, 吴刚. 侧压竹集成材受压应力应变模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(6): 1130-1134.
- [66] 周泉. Glubam 胶合竹梁试验研究及工程应用[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [67] 单波, 王艺莹, 肖岩, 张长青. 胶合竹-混凝土组合梁 RPC-钢复合连接件试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2020, 47(1): 66-75.
- [68] 刘可为, 奥利弗·弗里斯. 全球竹建筑概述——趋势和挑战[J]. 世界建筑, 2013(12): 27-34.
- [69] 巩富. 大跨度竹结构的研究[J]. 河北农业大学学报, 1963, 2(1): 52-57.
- [70] Villegas, B. and Villegas, M. (2003) *New Bamboo: Architecture and Design*. Villegas Editores, Bogotá.
- [71] Hogan, L. and Archer, G.C. (2009) Development of Long Span Bamboo Trusses. *5th International CSAAR Sustainable Architecture and Urban Development Conference*, Tripoli, Libya, 3-5 November 2009, 1-16.
- [72] 胡松林. 竹筋混凝土板的初步研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1956(10): 3-24.
- [73] Ghavami, K. (1995) Ultimate Load Behaviour of Bamboo-Reinforced Lightweight Concrete Beams. *Cement & Concrete Composites*, **17**, 281-288. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00018-8](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00018-8)
- [74] Ghavami, K. (2005) Bamboo as Reinforcement in Structural Concrete Elements. *Cement and Concrete Composites*, **27**, 637-649. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.06.002>
- [75] Terai, M. and Minami, K. (2011) Fracture Behavior and Mechanical Properties of Bamboo Reinforced Concrete Members. *Procedia Engineering*, **10**, 2967-2972. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.492>
- [76] 陈瑞麟, 曾家民. 竹纤维混凝土主要力学性能的试验研究[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 1990, 11(4): 377-381.
- [77] Lee, A.W.C., Bai, X. and Bangi, A.P. (1997) Flexural Properties of Bamboo-Reinforced Southern Pine OSB Beams. *Forest Products Journal*, **47**, 74-78.
- [78] 冷予冰, 许清风, 王明谦. 胶合竹木梁抗弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(7): 89-99.
- [79] 高黎, 王正, 常亮. 预制竹木组合墙体的保温与隔声性能[J]. 木材工业, 2010, 24(1): 26-28.
- [80] 李玉顺, 单炜, 黄祖波, 等. 钢竹组合空心楼板的抗弯性能试验[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(6): 32-33.
- [81] 韦庆白. 钢竹组合板抗弯承载能力的理论分析[J]. 工业建筑, 2010, 40(A1): 480-482.
- [82] Li, Y., Shen, H., Shan, W., et al. (2012) Flexural Behavior of Lightweight Bamboo-Steel Composite Slabs. *Thin-Walled Structures*, **53**, 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.01.001>
- [83] 葛贝德, 李玉顺, 吴岩, 等. 钢竹组合墙体的抗震性能试验研究[J]. 低温建筑技术, 2008, 30(2): 79-81.
- [84] 翟佳磊, 李玉顺, 黄帅, 等. 钢-竹组合框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(z1): 60-66.
- [85] 杨秋旺, 肖岩, 吴越, 等. 新型钢-胶合竹组合网架的试验研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2016, 38(5): 7-12.
- [86] 谢桥军, 肖岩. 大跨度胶合竹结构屋架受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(4): 47-53.
- [87] 党发宁, 刘海伟, 王学武. 竹子作为抗拉筋材加固软土路堤的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 44-48.
- [88] 吕韬, 焦涛, 孙金坤. 高填方土质边坡中竹筋的应用研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(7): 91-96.
- [89] 肖岩, 陈国, 单波, 等. 竹结构轻型框架房屋的研究与应用[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 195-203.
- [90] 陈国. 现代竹结构房屋的试验研究与工程应用[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [91] 杨云芳, 何礼平. 竹集成材结构房屋建造技术初探[J]. 华中建筑, 2008, 26(1): 88-89.
- [92] 肖岩, 马健, 单波, 等. 竹结构轻型框架房屋火灾安全性能试验研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(2): 165-169.
- [93] 陈国, 肖岩. 紫竹院公园竹框架房屋生命周期分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2015, 40(1): 81-86.
- [94] 黄东梅, 周培国, 张齐生. 竹结构民宅的生命周期评价[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(5): 148-152.
- [95] 单波, 高黎, 肖岩, 等. 预制装配式圆竹结构房屋的试验与应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(3): 7-14.

-
- [96] 肖岩, 余立永, 单波, 等. 现代竹结构在汶川地震灾后重建中的应用[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(3): 14-18.
- [97] 余立永. 装配式现代竹结构房屋设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [98] 魏洋, 吕清芳, 张齐生, 等. 现代竹结构抗震安居房的设计与施工[J]. 施工技术, 2009, 38(11): 52-54.
- [99] 陈国, 肖岩. 蔡伦竹海胶合竹结构住宅施工关键技术[J]. 建筑技术, 2013, 44(8): 746-749.
- [100] 周泉, 余立永, 肖岩, 等. 装配式竹结构房屋受火试验研究与模拟分析[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(7): 60-65.
- [101] Xiao, Y., Zhou, Q. and Shan, B. (2010) Design and Construction of Modern Bamboo Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, **15**, 533-541. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000089](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000089)
- [102] 肖岩, 周泉, 单波. 现代竹结构车行桥梁的建造与研究[C]//第 18 届全国结构工程学术会议. 第 18 届全国结构工程学术会议论文集: 第 III 册. 北京: 《工程力学》杂志社, 2009: 516-522.