

竹木复合集装箱底板研究现状及展望^{*}

孙建平 蒋志林 梁懿 柳婧如

(广西大学资源环境与材料学院, 南宁 530004)

摘要:文中从竹材组坯、木单板性质、表层竹材、生产工艺、胶黏剂以及无损检测6个方面回顾了竹木复合集装箱底板的研究现状,并在此基础上分析竹木复合集装箱底板的研究趋势;提出竹材组坯角度不同和空心化处理的设计构想;指出在胶黏剂方面应该加强低温固化和降低脆性研究,在材料性能检测方面应利用有限元分析、人工神经网络和计算机图像处理的检测方法。

关键词:竹木复合材料,集装箱底板,研究现状

中图分类号:S784, TS653

文献标识码:A

文章编号:1001-4241(2018)06-0036-06

DOI:10.13348/j.cnki.sjlyyj.2018.0084.y

Research Status and Prospects of Bamboo-wood Composite Container Flooring

Sun Jianping Jiang Zhilin Liang Yi Liu Jingru

(School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The paper reviews the research status of bamboo-wood composite container flooring in terms of bamboo blank arrangement, wood veneer properties, surface bamboo, production process, adhesive and non-destructive testing. Based on the analyses and review, the research trends of bamboo-wood composite container floor were analyzed. The paper also puts forward the design ideas of different angles arrangements of bamboo blanks and hollowing treatment, and points out that the research on adhesives should put focus on low-temperature curing and brittleness reduction. In addition, the methods including finite element analysis, artificial neural network and computer image processing should be adopted for material performance testing.

Key words: bamboo-wood composite material, container flooring, research status

竹材是我国的特色资源,国内竹林面积达到500万 hm^2 ,竹材年总产量1900多万t,相当于1000余万 m^3 的木材^[1]。竹材具有强度高、韧性好的优点。速生树种成材一般要10~15a,而竹子成材3~5a即可,且一次造林成功,每年都可选择性采伐,持续利用。竹木复合集装箱底板是指由竹帘、竹席等竹质单元和木质单板经胶合制成的集装箱底板用胶合板^[2],包括素面竹木复合胶合板和覆面竹木复合胶合板。由于可用于传统集装箱底板制备的硬木资源越来越少,竹木复合集装箱底板因原材料丰富、性能优良、成本低廉和易于自动化生产而得到广泛应用。

本文将总结竹木复合集装箱底板的研究现状,并在此基础上分析竹木复合集装箱底板的研究趋势。

1 竹木复合集装箱底板研究现状

集装箱运输是运输业的重要方式之一,而集装箱底板是主要承重部件,对其物理力学性能要求比较高。所以,形成一个完整的集装箱底板生产体系包括质量保障体系尤为关键,必须考虑其结构设计、加工制备和性能检测的整个过程。在集装箱底板设计过程中,竹材的组坯、木材的材性和表层材料都是必须考虑的重要因素。其中竹材的位置和方向、层数和所

* 收稿日期:2018-06-08;修回日期:2018-08-23。

基金项目:生物质材料科学与技术教育部重点实验室(东北林业大学)开放基金项目(SWZCL2016-05);国家自然科学基金(31660174);广西科技重大专项(桂科AA17204087-16)。

作者简介:孙建平(1974-),男,博士,教授,研究方向为生物质复合材料,E-mail:sjp_jpen@163.com。

占比例对整个集装箱底板的性能有重要影响,而木材的树种种类、密度、含水率和厚度也会在一定程度上影响底板的物理力学性能;另外,竹帘浸胶量、竹材使用形式、竹材分级和竹帘厚度是竹材作为表层材料的影响因素。在底板制作过程中,生产工艺和压缩率以及胶黏剂不仅会影响底板物理力学性能,也会影响生产时间和生产成本。集装箱底板作为结构用材,质量检测与控制是至关重要的一个环节,集装箱底板必须具有良好的抗震、耐冲击、耐老化等性能,所以对集装箱底板的物理力学强度包括顺纹和横纹的抗弯强度、静曲强度和弹性模量等性能有很高要求。下面从组坯方式、木单板性质、表层竹材、生产工艺和压缩率、胶黏剂和性能检测6个方面对竹木复合集装箱底板的研究现状进行综述。

1.1 组坯方式

竹木复合集装箱底板的主要优点在于利用竹材的力学性能优势来弥补速生木材力学性能不足的缺点,使其性能达到利用硬木制备集装箱底板力学强度的要求。因此,在组坯过程中竹材的位置、方向、层数和所占比例具有很重要的影响。

1.1.1 竹材的位置和方向

在抗弯、抗拉伸等力学性能方面竹材比速生木材有优势,所以在进行组坯设计时要充分考虑集装箱底板的受力情况,结合层合板理论进行集装箱底板芯层和面层的设计。在底板组坯研究中,建立竹木复合集装箱底板的弹性模量预测理论^[3],并根据这一模型预测出最佳的结构设计 $[0_{bc}/0/0/0/0/90/0/90/0/0_c]_s$ (其中bc、c分别表示该层为竹帘板层和中心层;0表示纵向,90表示横向;下标“s”表示结构对称板材;单层厚度 0_{bc} 为3.0 mm),根据最佳组坯制备材料的纵横向弹性模量分别达到10 629和3 611 MPa,纵横向静曲强度分别达到104和43 MPa。武秀明^[4]首先设计4种等级的8层竹木复合单板单元,然后制备19层竹木复合集装箱底板(其中木单板的顺纹方向作为板材的横向,竹帘的顺纹方向作为板材的纵向),以此设计制备的竹木复合集装箱底板的弹性模量(MOE)和静曲强度(MOR)最低分别为12 590和161.42 MPa,最高分别为14 230和183.44 MPa。为了满足纵向和横向的力学强度,竹材横向和纵向排列需遵循一定的规律,通过试验得出^[5]:以21层的竹木复合集装箱底板组坯时表层竹材纵向排列性能最佳,

即 $[0_b/0_2/90/0/90/0/90/0/90/0/0_c]_s$ (下标“b”“c”分别表示该层为竹片层和中心层;0和90表示铺层方向;下标“s”表示结构对称板材;单层厚度 0_b 为3.5 mm,0和90为1.6 mm;下标数字“2”表示在该方向连续铺设的单层数),其物理力学性能满足集装箱底板的使用要求(密度为0.84 g/cm³,纵横向弹性模量分别为10 107和3 025 MPa,纵横向静曲强度分别是103.9和33.6 MPa)。在竹木复合集装箱底板的制作中,竹材通常顺纹排列,且为板材的纵向,多位于底板的表层,以最大限度地发挥竹材性能优势。

1.1.2 竹材层数和所占比例

在组坯中,竹材层数对竹木复合集装箱底板的物理力学性能影响很大,可根据不同的性能要求设计不同的组坯层数。郑忠福^[6]采用3种方式(方式1共21层,添加1层竹纤维素层;方式2共20层,添加2层竹纤维素层;方式3共20层,添加3层竹纤维素层)对竹木复合材进行组坯铺装。其中,材料性能最低的为方式3,其静曲强度为87.5 MPa,弹性模量为8 236 MPa;性能最好的为方式1,其静曲强度为89.1 MPa,弹性模量为10 098 MPa。鲍逸培等^[7]采用23层结构的竹木复合集装箱底板(其中,2层竹表板,21层木单板),其机械物理性能达到国际集装箱使用的要求。由于竹材和木材的材性不同,其对竹木复合集装箱底板的作用和贡献率也不同,材性越好的材料对复合材的贡献率越高,因此不同比例的竹材制作的底板物理力学性能不同。翟志忠等^[8]利用杨木、马尾松、桉木以及竹席和竹帘进行不同的组合设计(方案1竹帘占49.2%,方案2竹席和竹帘占74.2%,方案3竹席和竹帘占71.9%,方案4竹帘占28.4%),研究不同组合材料的纵横向弹性模量、破坏模型以及胶合强度,试验结果表明:方案1的力学强度最低,纵横向MOR分别为99.5和40.3 MPa,纵横向MOE分别为11 174和5 584 MPa;方案4的力学强度最高,纵横向MOR分别为109和48.2 MPa,纵横向MOE分别为10 647和5 193 MPa。在底板制作中,当采用小径竹材不区分竹黄和竹青时,多层竹材增强底板力学性能的作用不明显,主要是由于木材的胶合强度大于竹材。

1.2 木材单板性质

胶合强度是衡量竹木复合集装箱底板的重要物理参数,木材单板的树种、密度、厚度和含水率对胶合

强度的影响较大。吴晓明^[9]使用厚度为 1.7 mm 而密度不同的桉木单板(密度约 0.51 g/cm³)、麻拉丝木单板(密度约 0.65 g/cm³)和克隆木单板(密度约 0.79 g/cm³),在不同含水率(0%,8%,16%)条件下制板,试验得出,桉木单板的胶合强度最低(厚度为 1.7 mm,密度约 0.51 g/cm³,含水率 16%);克隆木单板的胶合强度最高(厚度为 1.7 mm,密度约 0.79 g/cm³,含水率 8%)。至于单板密度,一般不宜过大,也不易过低。因为过高或过低都会影响竹木复合集装箱底的胶合质量;而单板含水率对胶合强度也有影响,含水率过高易产生缺陷,同时会延长胶层固化时间,降低胶合强度;含水率过低会阻碍胶黏剂在单板表面的润湿,从而影响胶合性能^[9]。至于单板的厚度因素,研究发现,使用薄单板,竹木复合集装箱底板的力学性能有所增加,但单板层数要增加,并且施胶量会增大,这会增大热压工艺的难度,所以通常使用的单板厚度为 1.2~2.5 mm。

1.3 表层竹材

集装箱底板的主要受力部位处于底板的表层和次表层,表层竹材对竹木复合集装箱底板的物理力学性能有重要影响,影响因素包括竹材浸胶量、竹材质量、竹材分级、竹材制作工艺等。

1.3.1 竹帘浸胶量和使用形式

在制备竹木复合集装箱底板时,竹帘浸胶量的多少会影响竹材的干燥时间和最终竹帘的含水率以及胶合强度。吴晓明^[9]分别使用 4%、8%、12% 的竹帘浸胶量制备竹木复合集装箱底板,当浸胶量为 4% 时材料纵横向 *MOR* 分别为 78.38 和 29.17 MPa,纵横向 *MOE* 分别为 7 794 和 2 008 MPa;而当浸胶量为 12% 时,纵横向 *MOR* 分别为 88.13 和 33.59 MPa,纵横向 *MOE* 分别为 8 357 和 3 569 MPa。用竹材做表层材料一般采用竹片或竹篾的形式。马清相等^[10]考虑其性能及成本等因素,采用的竹片厚度为 4~6 mm,竹片涂胶量(单面)为 140~200 g/m²。鲍逸培等^[7]对竹片表面进行砂光处理,竹片厚度为 3.5 mm 或 4 mm,终含水率为 6%~8%,开展了竹木复合集装箱底板的开发与研究。一般来说竹篾比竹片的厚度薄,竹篾通过棉线编织、热压成竹帘板;将毛竹纵向劈削成宽 15 mm、平均厚度 0.8 mm 的竹篾,使用酚醛树脂胶黏剂采用热进热出的热压工艺制备集装箱底板表面材料,其纵横向 *MOR* 分别为 185 和 114

MPa,纵横向 *MOE* 分别为 13 775 和 8 960 MPa^[3]。

1.3.2 竹材分级和厚度

在制作竹木复合集装箱底板时,对竹材进行分级再使用,可充分发挥竹材的材性优势。利用竹篾气干密度与抗弯强度之间的关系对竹篾进行分级处理,制备 4 种不同分级的竹木复合单板^[4],最低等级的竹木复合集装箱底板的 *MOE* 为 12 590 MPa、*MOR* 为 161.42 MPa,最高等级的竹木复合集装箱底板的 *MOE* 为 14 230 MPa、*MOR* 为 183.44 MPa。厚度也是影响集装箱底板性能的一个因素,根据标准 GB/T 19536-2015,集装箱底板的厚度都为 28 mm。由于竹帘不容易被压缩,所以竹帘的厚度会影响板材的整体压缩率。用一定厚度的竹帘组坯,采用正交设计方案对竹木复合集装箱底板热压工艺进行优化,得出用 6 层 0.8 mm 厚的竹帘按照 4 层纵向竹帘和下面 2 层横向竹帘的组坯方式,在压力为 5 MPa、时间为 8 min、温度为 150 ℃ 的热压工艺下,可以制成纵横向弹性模量分别为 13 558 和 5 430 MPa、纵横向静曲强度分别为 180 和 110 MPa 的集装箱底板表层材料^[11]。

1.4 生产工艺和压缩率

在制备竹木复合集装箱底板过程中,其生产工艺是一个复杂且重要的过程。由于竹材和木材材性的差异,实际生产中需综合考虑力学性能、能量损耗、生产成本等因素,在热压成型过程中采用冷进冷出的分段加压方式,用厚度规控制板材厚度的工艺比较常见。

1.4.1 生产工艺

在竹木复合集装箱底板制作中,基本上有 3 种成型工艺,即一次热压成型法(将竹帘与芯层旋切木单板按一定的组坯结构和一定的热压工艺一次胶合成竹木复合集装箱底板)、二次热压胶合成型法(先制备表层材料竹帘板,然后与芯层材料进行二次复合)和厚度规控制一次热压成型法(在一次热压成型法的基础上,采用厚度规控制)。在过去的竹木复合集装箱底板研制工艺中,基本上都是采用一次成型热压法^[5-6],由于速生木材的材质比较疏松,而竹材的材质比较密实,所以也有采用二次成型法的^[3,5,12]。因一次成型法难以控制成品的厚度,所以采用厚度规控制一次成型工艺^[5,7-8]。至于加压方式,冷进冷出的方式最为常用。采用冷进冷出的热压工艺,可以使竹材、木材在高温段得到充分软化^[6,8]。为减少产品的厚

度偏差,可使用厚度规控制^[5,7-8]。在冷进冷出的热压工艺中,热压压力对静曲强度和24 h吸水厚度膨胀率的影响较大^[6]。吴晓明^[9]研究了热压压力对竹木复合集装箱底板力学性能的影响,分别3个不同热压压力(2.5,3,3.5 MPa)试验得出,压力为3.0 MPa时纵横向 MOR 分别为82.19和44.12 MPa、纵横向 MOE 分别为8 838和3 236 MPa。

1.4.2 压缩率

竹木复合集装箱底板的压缩率是指板材的组坯厚度减去加压后的成品厚度与加压后成品厚度之比。采用二次成型法制作竹木复合集装箱底板,需要考虑芯板和整板的压缩率。何文^[3]制作南方型杨木芯材单板,当芯板单板压缩率逐渐增加时,成品密度和静曲强度逐渐增加,但当压缩率超过22.64%时产品的弹性模量却只有较小幅度的提高。所以,在压缩率小于22.64%时,可以根据需要逐渐增加芯材压缩率来提高板材的强度。然后,根据竹帘板的力学性能和芯板的压缩率与集装箱底板力学性能的关系研究发现,当整板的压缩率为15.7%时能满足集装箱底板的使

用要求。竹木复合集装箱底板的总体压缩率与弹性模量也存在一定关系。当压缩率较低时,压缩率增大弹性模量显著增大,随着压缩率不断提高,其对弹性模量的正效应逐渐减弱^[5]。采用一次热压成型,当压缩率为55.1%时弹性模量在理论上达到极大值,随后如果压缩率继续增大将会对弹性模量产生负效应。根据集装箱底板对弹性模量的要求,压缩率应大于23.2%。考虑到产品密度及成本,压缩率的最佳范围应为25%~28%。所以可以得出,当采用厚度规控制一次热压成型时,板材整体压缩率的最佳范围是25%~28%;使用二次热压成型时,芯材的压缩率不宜超过22.64%,整板的压缩率约为15.7%。

1.5 胶黏剂

胶黏剂对竹木复合集装箱底板的性能有重要影响,胶种、涂胶量、固含量、浸渍时间对底板的设计、制作和使用都很关键,施胶量与材料的静曲强度、弹性模量、密度有较为明显的关系。表1为6例制备竹木复合集装箱底板的施胶工艺。

表1 竹木复合集装箱底板的施胶工艺

方案	胶种	固含量/%	pH 值	黏度/CPS	(双面)涂量/(g/m ²)
方案1 ^[4]	水溶性酚醛树脂	44.53		350	
方案2 ^[5]	水溶性酚醛树脂	43~47	10~12	400~480	
方案3 ^[6]	酚醛树脂	45~47	10~13	150~200	
方案4 ^[7]	水溶性酚醛树脂	>45	10~12	350~400	300~400
方案5 ^[8]	酚醛树脂	45	12	200	280
方案6 ^[13]	水溶性 PF-1 型酚醛树脂	52.7	10~12	700	300~320

从表1可以看出:

1)在竹木复合集装箱底板的制备过程中,采用酚醛树脂胶是因为作为结构材料集装箱底板对力学性能、耐候性能和耐老化性能要求高;部分选用水溶性酚醛树脂胶,主要是考虑胶黏剂的湿润性能和环保性能。

2)固含量是酚醛树脂胶黏剂的一个重要参数,胶黏剂固含量一般控制在45%(±5%),在实际操作中主要根据胶黏剂的黏度来确定其具体数值。

3)随着pH值的升高,酚醛树脂凝胶时间先缩短后变长,固化速度先快后慢,甲醛的释放量逐渐降低,pH值一般控制在10~12,在实践中胶黏剂的酸碱性

还需要根据竹材和木材本身的酸碱性来决定。

4)黏度也是木材胶黏剂的重要性能指标,若黏度过大,胶液流动性变差,渗透性变差,容易造成缺胶,使胶接强度下降。黏度一般为200~400 CPS。

5)涂胶量对竹木复合集装箱底板的胶合强度有显著影响,随着施胶量的增加,胶合强度一般先增后降;综合考虑板材的力学性能和生产成本,施胶量一般控制在300~400 g/m²。

6)面粉添加剂可以提高胶黏剂的初粘性、降低胶层的脆性,提高胶合强度;但添加过多的面粉则会使胶液黏度过高,不易于胶层的流动和铺展,会降低胶合强度。随着面粉添加量的增加,胶合强度呈现出

提高的趋势;但当面粉添加量大于5%,胶合强度的增加趋势趋于平缓。其中方案5添加了5%~10%的面粉。

1.6 竹木复合集装箱底板性能检测

竹木复合集装箱底板作为结构用材使用,对其物理力学性能如抗弯强度、弹性模量、抗冲击性能等都有很高的要求。因此,竹木复合集装箱底板的质量检测与质量控制尤为重要。有学者利用非线性规划模型、有限元分析和直接预测复合常数对竹木复合材料的性能进行无损检测;也有学者基于 ANSYS 参数化设计语言,并且通过参数化变量方式建立分析模型,获得了集装箱底板的强度等性能参数;还有学者通过建立静曲强度的预测模型、应力波在固体介质中的传播来实现竹木复合集装箱底板的无损检测。

利用非线性规划模型、有限元分析以及应力波等方法研究构建模型实现竹木复合材料性能的无损检测与分析。例如, Xiao 等^[14]采用非线性规划模型研究竹木复合枕木工艺参数(浸胶量、材料密度、热压时间和热压温度)对其性能的影响发现,当浸胶量为15.5%、目标密度为0.8 g/cm³、热压时间为0.65 min/mm、热压温度为170 ℃时为最佳方案,其 MOR 为60.08 MPa、MOE 为5 985.3 MPa、IB 为0.475 6 MPa、TS 为4.69%。另外, Chen 等^[15]利用有限元分析方法构建高精度的预测模型,通过模型优化竹木复合板材结构设计。除此之外, Wu 等^[16]基于复合力学和能量方法,利用输入表层和芯层的特性推导出竹木复合材料的理论模型弹性常数,并利用修正的三点弯曲测试来验证。集装箱底板材料不仅有竹木复合材料,还有传统的阿必东硬木、新型塑料、全竹质、蜂窝板等,有学者对其无损检测进行了相关研究。例如,刘峻等^[17]基于 ANSYS 参数化设计语言建立有限元分析模型,获得了材料的变形、应力等性能参数;龚洋^[18]研究通过测试获得塑料底板的弹性模量及极限断裂应力等参数,为底板静态分析提供性能参数,实现底板性能无损检测;刘峻等^[19]通过获得的弹性模量及极限断裂应力等参数为静态分析提供性能参数。在竹木复合集装箱底板的研究中应用无损检测相对较少,有通过研究压缩率和涂胶量对集装箱底板静曲强度的影响建立静曲强度和弹性模量的相关模型达到材料性能无损检测的目的^[20],也有采用可编程控制器(PLC)与工控机相结合的方法进行接触式弹性模

量无损检测^[21],或者利用应力波法对竹木复合集装箱底板的机械物理性能和密度实现了无损检测^[22]。

2 竹木复合集装底板研究展望

竹木复合集装箱底板是以竹代木、以竹养木、以竹胜木的重要措施和方法,对于发挥我国的资源优势具有非常重要的现实意义和较大的社会效益。因此,竹木复合集装箱底板具有广阔的发展前景。

2.1 竹材组坯

目前在设计和制备竹木复合集装箱底板的研究中,对于组坯一般采用奇数层设计(通常为19层、21层或者23层)的中心对称结构,顺纹(0°)或横纹(90°)的实芯设计。未来可以加强以下几方面研究:

1) 尝试竹材或木单板使用不同角度的排列方式,如15°、30°、45°、60°等,有目的、有针对性地设计集装箱底板的力学强度。

2) 进行空芯化设计,根据集装箱底板受力弯曲时应力分布特征,采用高强度的竹材制作表面材料,再用木材做支架型,这样可以在满足力学性能的前提下减少木材的使用量,从而降低成本。

3) 竹材对竹木复合集装箱底板的性能增强有重要作用,可系统研究竹材的位置、数量、比例、厚度等因素对材料性能的影响,对竹木复合集装箱底板的结构和性能进行优化设计。

2.2 胶黏剂

竹木复合集装箱底板需要具有较好的耐水耐候性能和胶接性能,常用的酚醛树脂(BF)固化速度比较慢,固化温度高,且脆性大,易吸湿,所以可以对以下几方面集中研究:

1) 快速、低温固化酚醛树脂胶黏剂的开发。使用传统的BF必须延长热压时间、提高热压温度才能保证产品质量,造成生产效率低、能耗大,严重制约了BF在木材工业中的应用。可以通过加大甲阶BF的反应程度、提高BF碱性、加入固化促进剂、BF与快固型树脂复合、加入氢氧化钡催化剂、加入一定量间苯二酚甲醚(RF)树脂等手段实现BF的快速低温固化。

2) 高性能结构酚醛树脂的研发。传统酚醛树脂的脆性大、收缩率高、不耐碱、易吸潮、耐电弧性能差,这使酚醛树脂的应用和发展受到很大限制,可以通过加入柔性链和支链对酚醛树脂进行改性,开发柔性好、胶合强度高的新型结构用酚醛树脂胶黏剂。

2.3 无损检测

要全面了解集装箱底板的物理强度必须通过大量抽样试件的破坏性试验,这会造成时间、经济、材料方面的浪费;而采取无损检测技术对竹木复合集装箱底板实行在线检测,才能保证每一块底板的质量要求,同时又可以节约原材料。因此,实现竹木复合集装箱底板的无损检测具有重要的现实意义。目前,对竹木复合集装箱底板通常是通过测得破坏型数据建立数学模型以及利用可编程控制器与工控机相结合的方法预测静曲强度,从而达到无损检测的目的。将来可进一步加强以下几个方面的研究:

1)利用有限元方法建立无损检测模型,这样通过输入单板的材性便可得到竹木复合集装箱底板的物理力学性能,不仅可以实现竹木复合集装箱底板的无损检测,同时也可以优化结构层设计,设计出性能更优的竹木复合集装箱底板。

2)通过人工神经网络模型建立材料制备工艺参数与材料性能之间的关系,模仿人脑从经验中学习和从所学知识中提取知识的功能来预测竹木复合集装箱底板的物理力学性能。

3)利用计算机图像处理技术对竹木复合集装箱底板性能进行无损检测,通过灰度共生矩阵、马尔可夫随机场、傅里叶变换、小波变换、Contourlet 变换等方法对竹木复合集装箱底板的截面进行处理和分析,提取出特征参数,进而研究这些特征参数与材料性能的关系,实现竹木复合集装箱底板性能的检测与评价。

参 考 文 献

[1]竺肇华. 中国热带地区竹藤发展[M]. 北京:中国林业出版社,2001.
 [2]杨帆,胡生辉,何思东,等. 集装箱底板用胶合板[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
 [3]何文. 竹木复合集装箱底板结构与胶合工艺研究[D]. 南京:南京林业大学,2005.
 [4]武秀明. 竹木复合集装箱底板的设计、制造与评价[D]. 北京:中国林业科学研究院,2015.

[5]张齐生,孙丰文. 竹木复合集装箱底板的研究[J]. 林业科学, 1997,33(6):546-554.
 [6]郑忠福. 竹纤维束编织帘在竹木复合集装箱底板生产中的应用探讨[J]. 中国人造板,2016,23(5):15-17.
 [7]鲍逸培,文家孺. 竹木复合集装箱底板开发与研究[J]. 建筑人造板,1997(3):13-16.
 [8]翟志忠,陈玉和,赵斌,等. 新型结构竹木复合集装箱底板的生产技术[J]. 木材加工业,2011,25(5):44-46.
 [9]吴晓明. 低温固化酚醛树脂胶黏剂在集装箱底板上的应用研究[D]. 南京:南京林业大学,2012.
 [10]马清相,舒善柏. 竹质复合集装箱底板生产线工艺设计[J]. 湖南林业科技,1999,26(3):58-61.
 [11]何文,蒋身学. 竹木复合集装箱底板表层材料的研制[J]. 中国人造板,2006,13(7):33-35.
 [12]顾萍. CT技术在木材无损检测领域的应用研究[J]. 纳税,2017(5):121.
 [13]鲍甫成,傅峰. 人工林杨木材性对单板层积材强度的贡献率[J]. 林业科学,1999,35(2):87-94.
 [14]XIAO S L, LIN H, SHI Q S, et al. Optimum processing parameters for wood-bamboo hybrid composite sleepers[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2014,33(21):2010-2018.
 [15]CHEN F M, WANG G, LI X J, et al. Laminated structure design of wood-bamboo hybrid laminated composite using finite element simulations[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2016, 35(22):1661-1670.
 [16]WU X F, XU J Y, XAO J X. Calculating elastic constants of binderless bamboo-wood sandwich composite[J]. Biosources, 2015, 10(3): 4473-4484.
 [17]刘峻,高建和. 基于有限元的集装箱底板静力分析[J]. 制造业自动化,2012,34(24):95-98.
 [18]龚洋. 新型蜂窝集装箱地板结构的优化设计[D]. 广州:华南理工大学,2012.
 [19]刘峻,高建和. 集装箱塑料底板材料性能测试[J]. 机械制造及自动化,2013,42(4):98-100.
 [20]孙丰文. 竹木复合集装箱底板静曲强度的预测模型[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2006,30(5):10-14.
 [21]高燕秋,王兆伍,孙丰文. 竹木复合集装箱底板弹性模量的无损检测[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2001,25(6):69-72.
 [22]张双燕,费本华,陶仁中. 竹木复合集装箱底板的研究进展[J]. 木材加工机械,2011(1):36-39.