

生物质复合材料的性能预测 与优化及可靠性分析

胡英成 张 利 薛 冰 著



科学出版社

生物质复合材料的性能预测 与优化及可靠性分析

胡英成 张 利 薛 冰 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书分为四部分,第一部分为第1章绪论,概述了生物质复合材料的研究现状;第二部分为第2-5章,以典型刨花板类材料为主要研究对象,包括草椰复合刨花板、木质刨花板和定向刨花板,对草椰复合刨花板的性能进行了优化分析,并使用一次二阶矩与蒙特卡洛方法对其在不同工况下的应用可靠性进行了分析;第三部分为第6-9章,以单板层积材为主要研究对象,分析了树种、压缩率、组坯形式、单板厚度及环境相对湿度等因素对其力学性能与可靠性的影响;第四部分为第10章,以典型的工程木质复合梁为主要研究对象,包括集成材梁、木质工字梁、点阵结构复合梁,初步设计了点阵结构复合梁的拓扑结构,对比分析了三种结构木质复合梁的性能,并对其应用可靠性进行了分析。

本书可供木材科学与工程、木结构工程、土木建筑等领域的工程技术人员使用,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

生物质复合材料的性能预测与优化及可靠性分析 / 胡英成, 张利, 薛冰著.
—北京: 科学出版社, 2015.12
ISBN 978-7-03-046675-4

I. ①生… II. ①胡… ②张… ③薛… III. ①生物材料-复合材料-可靠性分析 IV. ①S781.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 306520 号

责任编辑: 王海光 / 责任校对: 何艳萍
责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 北京铭轩堂广告设计公司

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年12月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2015年12月第一次印刷 印张: 13 1/4

字数: 265 000

定价: 82.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

生物质材料具有资源丰富、来源广阔、可再生及可生物降解等特点，因此，进入 21 世纪以来，全世界都十分注重生物质复合材料的开发与应用。木材、竹材、农作物秸秆等是我国分布广、蓄积量大的天然生物质资源。这些天然生物质材料，由于受遗传因素、培育措施、立地条件、气候环境的影响，其本身的材料性能差异性较大，因此，由这些原材料制备的生物质复合材料也随之具有性能不稳定的特点。同时，生物质复合材料还因为组分材料的多重性、制备工艺的不稳定性及生产设备的误差等，都将导致其物理力学性能的变异性较大，最终导致其使用可靠性降低。所以如何有效地评价生物质复合材料产品性能的稳定性及使用可靠性是一个亟待解决的问题。

本书分为四部分内容，第一部分为第 1 章绪论，概述了生物质复合材料的研究现状；第二部分包含第 2 章至第 5 章，以生物质复合材料中的典型刨花板类材料为主要研究对象，包括草椰复合刨花板、木质刨花板及定向刨花板；第三部分包含第 6 章至第 9 章，以生物质复合材料中的单板层积材为主要研究对象；第四部分为第 10 章，以典型的工程木质复合梁为主要研究对象，包括集成材梁、木质工字梁、点阵结构复合梁。本书以大量试验过程及试验数据为支撑，重点介绍了所选取的典型生物质复合材料在性能与结构优化、材料性能无损检测与预测、可靠性分析等方面的最新研究进展。通过这些研究，可对生物质复合材料产品性能的稳定性及使用可靠性的评价提供一些值得借鉴的方法，可对生物质复合材料在工程结构中安全可靠地使用提供理论支撑。

本书由东北林业大学胡英成教授、博士张利（现为西北农林科技大学讲师）、博士薛冰（现为黑龙江科技大学副教授）撰写。

本书中的研究是在国家自然科学基金（31170516、31470581）项目的资助下所取得的阶段性成果。本书所选取的研究对象及书中所使用的可靠性分析方法都很有限，对于其他的众多生物质复合材料及可靠性分析方法，需要进一步深入研究及使用，这也是本研究团队后续的工作。

鉴于作者水平有限，书中欠妥和疏漏之处在所难免，敬请同行和广大读者批评指正。

著 者

2015 年 9 月

目 录

前言

1 绪论.....	1
1.1 稻草刨花板的研究现状.....	1
1.2 单板层积材的研究现状.....	4
1.3 夹芯结构生物质复合材料的研究现状.....	5
1.4 生物质复合材料无损检测研究现状.....	9
1.5 生物质复合材料可靠性研究现状.....	10
1.6 无损检测可靠性的研究现状.....	12
1.7 本书主要的研究内容.....	13
1.7.1 典型刨花板类材料性能与结构的优化及可靠性分析.....	13
1.7.2 单板层积材力学性能与无损检测可靠性研究.....	14
1.7.3 典型工程木质复合梁的结构优化及可靠性分析.....	14
2 稻草及木质刨花板制备工艺的优化.....	15
2.1 稻草刨花碱处理工艺的优化.....	15
2.1.1 试验材料.....	15
2.1.2 试验方法.....	15
2.1.3 结果与讨论.....	19
2.2 稻草刨花板制备工艺的优化.....	22
2.2.1 试验材料.....	22
2.2.2 试验方法.....	23
2.2.3 结果与讨论.....	24
2.3 木质刨花板制备工艺的优化.....	27
2.3.1 试验材料.....	28
2.3.2 试验方法.....	28
2.3.3 结果与讨论.....	30
2.4 小结.....	33
3 草椰复合刨花板的制备与性能分析.....	34
3.1 试验材料与方法.....	34
3.1.1 试验材料.....	34

3.1.2	试验方法	34
3.2	结果与讨论	38
3.2.1	草椰比的影响	38
3.2.2	组坯结构的影响	42
3.2.3	冲击韧性分析	42
3.2.4	阻尼比的检测与分析	44
3.2.5	材料结构形貌的分析	48
3.2.6	红外光谱分析	49
3.3	小结	52
4	草椰复合刨花板性能的预测研究	53
4.1	试验材料与方法	53
4.1.1	试验材料	53
4.1.2	试验方法	53
4.2	结果与讨论	57
4.2.1	无损检测结果分析	57
4.2.2	混合定律预测结果分析	61
4.2.3	线性回归预测结果分析	61
4.2.4	BP 神经网络预测结果分析	62
4.2.5	各种预测方法的对比分析	67
4.3	小结	68
5	刨花板性能的统计特征及可靠性分析	70
5.1	试验材料与方法	70
5.1.1	试验材料	70
5.1.2	试验方法	71
5.2	结果与讨论	77
5.2.1	草椰复合刨花板性能的检测结果与统计特征	77
5.2.2	木质刨花板性能的检测结果与统计特征	83
5.2.3	OSB 性能的检测结果与统计特征	90
5.2.4	刨花板性能的可靠性分析	96
5.3	小结	106
6	不同压缩率 LVL 力学性能与可靠性	107
6.1	材料与方法	107
6.1.1	材料准备	107
6.1.2	静态力学试验	108
6.1.3	复合材料力学分析	109

6.1.4	可靠性分析	111
6.2	结果与讨论	112
6.2.1	静力试验分析	112
6.2.2	力学分析	113
6.2.3	微观结构分析	115
6.2.4	基于改进一次二阶矩法的可靠性分析	118
6.3	小结	121
7	不同组坯 LVL 力学性能与可靠性	122
7.1	材料与方法	122
7.1.1	材料准备	122
7.1.2	试验与分析	123
7.1.3	复合材料力学分析	124
7.1.4	计算机模拟	126
7.1.5	可靠性分析	126
7.2	结果与讨论	127
7.2.1	力学分析	127
7.2.2	ANSYS 分析	127
7.2.3	静力试验	133
7.2.4	基于 Monte-Carlo 法的可靠性分析	135
7.3	小结	136
8	不同单板厚度 LVL 力学性能的预测及可靠性	137
8.1	材料与方法	137
8.1.1	材料准备	137
8.1.2	无损检测试验	137
8.1.3	静态力学试验	138
8.2	结果与讨论	138
8.2.1	无损检测结果与静态弯曲弹性模量	138
8.2.2	无损检测结果与静曲强度	142
8.2.3	力学性能预测的可靠性分析	147
8.2.4	单板厚度与力学性能	151
8.3	小结	152
9	不同环境湿度下 LVL 力学性能的预测	153
9.1	材料与方法	154
9.1.1	材料准备	154
9.1.2	模糊贴近度综合评判法	154

9.1.3	无损检测试验	158
9.1.4	静态力学试验	158
9.2	结果与讨论	159
9.2.1	无损检测结果与静态弯曲弹性模量	159
9.2.2	无损检测与静曲强度	165
9.2.3	相对湿度与力学性能	169
9.3	小结	171
10	工程木质复合梁的结构优化与可靠性分析	173
10.1	试验材料与方法	173
10.1.1	试验材料	173
10.1.2	试验方法	174
10.2	结果与讨论	178
10.2.1	木质层板性能检测结果的分析	178
10.2.2	三种复合材性能的对比分析	182
10.2.3	工程木质材料的可靠性分析	186
10.3	本章小结	194
	参考文献	196

1 绪 论

生物质材料 (biomass) 作为一种天然聚合物材料, 主要是由碳、氢和氧 3 种化学元素组成的有机高分子物质, 来源于动植物及微生物等生命体。生物质材料易被自然界的微生物降解为水、二氧化碳和其他小分子, 降解产物可以再次进入自然界循环, 因此其具备可再生与可生物降解的重要特征。常见的生物质材料主要有木材、秸秆、竹材、树皮、纤维素、半纤维素、木质素、淀粉、蛋白质、甲壳素等 (邸明伟和高振华, 2010)。生物质材料具有资源丰富、来源广阔、可再生及可生物降解等特点, 使其得到了广泛的应用。天然生物质资源在蓄积量和生产量上是一切物质资源中最巨大、最恒久的, 千万年来它一直是维持人类生存和发展的主要物质基础之一。

木材、竹材及农作物秸秆等是我国分布广、蓄积量大的天然生物质资源。目前, 我国天然优质林木资源已被过度采伐, 剩余的资源用于防止水土流失和维护生态平衡的意义远重于利用的意义。因此, 速生丰产人工林等低品质木材也就成为了商用木材的主要来源, 今后加工利用的重点是对低质木材、人工速生林和加工剩余物进行技术深度开发及高附加值利用。同时, 我国也是一个农业大国, 农作物秸秆资源十分丰富, 再加上野生禾本科植物资源, 可以说这些资源几乎是取之不尽、用之不竭的, 但大部分农作物秸秆没有得到合理的加工利用, 每年都有大量的秸秆在田间被焚烧, 严重地污染了环境。

由此可见, 低质木材及其加工剩余物与农作物秸秆是我国极为丰富的、重要的天然生物质资源, 亟待进行科学经营与高效利用。因此, 采用生物质资源与其他生物质或非生物质资源的复合, 优化生物质复合材料的结构形式, 创生出能满足于人民生活 and 国民经济发展需求的高性能、多功能、高附加值的新型生物质复合材料是一个重要的研究方向。

1.1 稻草刨花板的研究现状

据统计, 2012 年我国主要粮食稻谷、小麦及玉米的产量分别约为 2.04 亿 t、1.21 亿 t 及 2.05 亿 t (中华人民共和国国家统计局, 2013), 如果按照 1t 粮食产生 1t 秸秆的比例进行换算, 我国预计每年将有 5 亿 t 以上的农作物秸秆资源。但是, 如此丰富的农作物秸秆资源每年都被大量就地焚烧。焚烧秸秆严重影响空气质量, 造成雾霾, 破坏生态环境, 危害人体健康; 焚烧形成的烟雾还容易遮蔽道路, 影

响交通安全,并且存在火灾隐患,威胁群众的生命财产安全(孔凡标等,2013)。因此,人们环保意识的提高,以及对环境可持续发展的关注,都为农作物秸秆等天然生物质资源的综合利用带来了契机(Bismarck et al., 2005; Saadaoui et al., 2013)。以农作物秸秆为原料生产新型人造板就是其中有效的利用途径之一。

与玻璃纤维、碳纤维等合成纤维材料相比,天然秸秆材料有许多优点,如成本低、密度低、资源丰富、分布广泛、利用方式多样、独特的机械性能、碳汇、可再生与可降解、安全的工作环境等(Ray and Rout, 2005; Panthapulakkal et al., 2006)。所以,由农作物秸秆纤维或刨花与石油基胶黏剂胶合制备的秸秆基生物质复合材料得以发展,并在许多国家实现商业化应用(Wu et al., 2010)。

在国外,从20世纪初,农业剩余物就开始用于制造人造板材,最早用于人造板生产的是甘蔗渣;到40年代末,以经济作物秸秆——甘蔗渣与麻秆为原料的人造板生产先后得到不同程度的发展;再到70年代,玉米秸秆、棉秆基人造板的生产工艺相继被研究。目前在国外,麦草与稻草人造板是研究和应用最广的,这种秸秆人造板起初采用脲醛树脂与传统木质刨花板的生产工艺制备,但由于麦草与稻草的表面存在蜡质及硅质,影响板材的胶合强度,板材性能不理想。后来异氰酸酯开始用于生产秸秆人造板,较好地解决了胶合强度差的问题,大大改善了板材的性能,且没有甲醛释放(李晓平和周定国,2008)。

我国从20世纪70年代开始,相继对稻壳、稻草、麦草、甘蔗渣、亚麻屑等农作物秸秆人造板的制备工艺进行了相关探索。初始对稻麦秸人造板的研究,主要是以通过对脲醛树脂胶的改性,使人造板达到标准规定的性能指标。自90年代末以来,鉴于国外利用异氰酸酯胶黏剂制备秸秆板已经取得了成功的经验,同时我国人造板工业的原料供应也日趋紧张,促使我国麦草与稻草人造板的研发进入了新的快速发展时期(于文吉等,2005)。

刨花板类生物质复合材料的性能主要取决于其所使用的胶黏剂的性能,以及胶黏剂与刨花或纤维之间的界面黏接效果(Wang and Sun, 2002),农作物秸秆刨花板也是如此。最常用的石油基胶黏剂为脲醛树脂(UF)、酚醛树脂(PF)及异氰酸酯(MDI或PMDI)。作为水基胶黏剂的UF与PF是制备木质刨花板的主要胶种,但是它们与非木质的农作物秸秆材料之间的胶接性能较差,这主要是因为农作物秸秆表面存在高含量的蜡质与硅质(Cheng et al., 2004; Zheng et al., 2009; El-Kassas and Mourad, 2013)。因此,不经预处理的农作物秸秆原材料与水基胶黏剂制备的秸秆基刨花板有较差的性能。所以,研究人员为改善秸秆材料与胶黏剂之间的界面相容性开展了一系列的研究,提出了一些界面处理方法,主要有热处理和蒸汽爆破处理(Han et al., 2010; Li et al., 2011),酸碱处理(Mo et al., 2001; Zheng et al., 2007; Li et al., 2011; 李晓平等,2006; 王逢瑚等,2007; 李国梁等,2008),偶联剂改性处理(Han et al., 2001; 贾贞和李国梁,2010),酶处理(Schmidt et al.,

2002; Zhang et al., 2003; 连海兰, 2006), 等离子体处理(陈桂华, 2006; 张建红, 2010), 等等。在这些处理方法中, 碱处理(NaOH)是一种比较方便且处理效果显著的方法, 本书也将采用碱处理方法对稻草刨花进行处理, 评价处理前后稻草刨花表面的润湿性能。

秸秆刨花经过预处理后, 其仅与 UF 或 PF 胶黏剂黏接制备的秸秆刨花板的性能仍然不如木质刨花板, 尤其是内结合强度与吸水厚度膨胀率。因此, 研究人员将油基胶黏剂异氰酸酯(MDI 或 PMDI)应用于秸秆刨花板中, 以制备高性能的复合材料(陆仁书等, 1997; 顾继友等, 2000; Li et al., 2010)。异氰酸酯是一种优异的胶黏剂, 它可赋予板材独特的性能, 使用异氰酸酯胶接的秸秆板材有很多优点, 如质轻高强、可生物降解、无甲醛释放、较好的耐水性与胶接性能(Mo et al., 2005)。

相比于 UF 与 PF 胶黏剂, 异氰酸酯胶黏剂也有其固有的缺点, 如较高的产品价格和未固化时较高的毒性(Pan et al., 2006; 周定国, 2008; Li et al., 2009)。在国内市场上异氰酸酯胶黏剂的价格是酚醛树脂胶黏剂与脲醛树脂胶黏剂的 3~10 倍, 导致由异氰酸酯制备的秸秆板的生产成本大大提高。另外, 在生产技术上也存在一些难点, 如施胶均匀性、粘板、板坯初黏性等问题, 要解决这些问题, 势必要增加相应的设备投资, 最终进一步导致秸秆板材生产成本的提高。因此, 成本与胶种成为限制秸秆刨花板工业生产高性价比产品的两个重要因素。所以, 研究人员又将兴趣集中在寻找合适的方法来制备成本低、性能好的秸秆基生物质复合材料, 并且期许在某些应用方面可以媲美木质刨花板。

为解决上述的问题, 研究人员主要从两方面着手: 一方面是使用其他胶黏剂与异氰酸酯进行适当的混合(郝丙业和刘正添, 1993; 刘淑丽, 2003; 严永林等, 2012), 对异氰酸酯进行改性(贾翀等, 2012), 以降低异氰酸酯的使用量来降低产品成本, 或者使用热塑性高聚物(如聚乙烯、聚丙烯等)(张德英, 2008; 于国利, 2011)或无机胶黏剂(如水泥、石膏等)(祝瑜, 2008; 韩景泉, 2009); 另一方面, 是将秸秆刨花与其他生物质材料单元(如木材、竹材)进行混合(Grigoriou, 2000; Yang et al., 2003; 姚飞和周定国, 2005; Hiziroglu et al., 2007; 贾翀等, 2012), 以期能够改善秸秆基生物质复合材料的弯曲性能、胶合性能及尺寸稳定性。但是, 使用无机胶黏剂对农作物秸秆单元进行胶接, 其制品的密度较大、脆性大, 并易失去生物质材料与人亲近的自然感; 使用热塑性高聚物与农作物秸秆单元进行复合制备木塑复合材料, 其制备工艺复杂、添加剂众多, 并且材料最终的自然降解也困难; 只有使用异氰酸酯类胶黏剂对农作物秸秆单元进行胶接, 或者使用木质或竹质等生物质材料与农作物秸秆单元进行一定比例的搭配, 制品的胶接性能才能满足标准规定的要求。

或多或少地使用异氰酸酯类胶黏剂都将提高制品的制备成本,并且异氰酸酯易与水发生反应,这就相应提高了在生产线上对施胶设备密闭性的要求,并且压板后还要解决脱模问题,这些都加大了设备资金的投入;同时,随着木质和竹质资源的大量利用,其供需矛盾也日益突出,价格也日益升高,造成了其与农作物秸秆混杂制备的人造板材料的成本升高,并且复合材料的性能也较单一。所以,寻找新的方法或者新的混杂材料以制备农作物秸秆复合材料,既能够降低农作物秸秆人造板的制备成本,又能够改善其胶接性能,并同时赋予材料强度与韧性两方面性能都优异的新特点,扩大农作物秸秆人造板的应用领域,是一个亟待解决的重要问题。

环顾现有的生物质材料中,椰纤维也是一种资源丰富、成本低廉、利用多元、可再生与可降解的木质纤维素基工业用纤维,椰壳纤维是椰树(*Cocos nucifera*)果实的副产品,将椰壳泡在海水中浸蚀或机械加工处理即可得到椰纤维(Rahman and Khan, 2007)。椰纤维在我国的广东省、海南省,以及斯里兰卡、印度、菲律宾、泰国、越南、印度尼西亚等热带和亚热带地区有着广泛的分布(窦明池和姜亚明, 2006)。椰纤维主要由纤维素、木质素、半纤维素、果胶物质及一定含量的杂多糖、矿物质等组成,其中纤维素含量为36%~43%,木质素为41%~45%,半纤维素为0.15%~0.25%,果胶为3%~4%(Varma et al., 1984; 李欣欣等, 1999)。与典型的天然麻纤维相比,如亚麻、大麻、黄麻、苧麻及剑麻,椰纤维具有较低的纤维素及半纤维素含量、较高的木质素含量和较大的微纤丝角(30°~45°),这些特点使得椰纤维具有一些独特的优良性能,表现在韧性、硬度、弹性、润湿性、断裂伸长率、耐水性、耐磨性、耐候性等(Rout et al., 2001; Gu, 2009; Nam et al., 2011)。椰纤维除了传统应用于绳索、垫席、地毯、毡网等外,近年来,椰纤维还逐渐在黏土、水泥、刨花板及高分子复合材料中被用作增强体(叶颖薇等, 1998; Khedari et al., 2004; Asasutjarit et al., 2007; Ezekiel et al., 2011; 姚嘉, 2013)。但是椰纤维与农作物秸秆复合制备复合材料还未见报道。

鉴于以上椰纤维本身的性能及优点,椰纤维可以作为一种混杂材料,与农作物秸秆单元进行复合制备生物质复合材料。在本书中,将使用稻草刨花与椰纤维一起制备稻草刨花板,并使用恰当的方法评价复合材料的性能。

1.2 单板层积材的研究现状

在国际上,对于单板层积材的应用研究与发展已有较长的历史。早在20世纪40年代,对于单板层积材的研究就已经开始了,当时产品主要是用作高强度木质飞机的部件;20世纪60年代,单板层积材的工业化生产首先从芬兰开始,随后在美国、加拿大得到迅速发展,并在承重墙、隔墙、滑动横档、桁架、桥梁、枕木

等领域展示出其潜在市场;日本在 1965 年开始批量生产单板层积材,于 1978 年制定了非结构用单板层积材的 JAS 标准,1988 年又进一步制定了结构用单板层积材的 JAS 标准,对产品外观及物理力学性能做了相关规定。我国的研究始于 1985 年,直到 2006 年 5 月,根据日本的 JAS 236 和 JAS 237 分别制定了非结构用和结构用单板层积材标准。单板层积材的生产和检测有了规范,这在一定程度上促进了我国单板层积材产业的发展(于子绚等,2012;张占宽和刘君良,2005;王春明等,2012;罗建举等,2011)。由于单板层积材在强度设计上比较自由,各向异性小,生产工艺成熟,成品结构性能稳定,因此成为一种广泛使用的建筑材料,并在各国已建立相应设计规范和施工要求。

针对单板层积材的研究工作十分活跃,内容涉及生产工艺、产品质量等方面,其目的是综合发挥单板层积材的产品优势,增加单板层积材的强度,最大限度地改善单板层积材的结构强度指标。当单板层积材压缩范围为 5%~20% 时,其弹性模量(MOE)、比重与压力之间的关系几乎成正比增加(Zhang et al., 1994)。水溶性树脂胶浸渍对单板层积材弯曲弹性模量和横向剪切强度具有一定影响(Chui et al., 1994)。通过试验测定单板层积材静曲强度的研究表明,单板层积材尺寸对静曲强度有一定的影响(Fonselius, 1997)。运用无损检测(NTD)中应力波法和横向振动法来检测单板层积材的弹性模量(MOE),试验结果表明:单板等级越高,单板层积材的 MOE 也越高(Pu and Tang, 1997)。单板等级和相对湿度对单板层积材平行于层积面的弯曲性能有一定的影响,其中单板等级对单板层积材的 MOR(静曲强度)和 MOE 都有重大影响(Tang and Pu, 1997)。树脂的质量百分比对其单板层积材的尺寸稳定性有着较大影响,当酚醛树脂重量百分比达到了 40% 左右时,压缩率为 50% 的单板层积材才能获得较好的尺寸稳定性(中田欣作等,2000)。当使用同一胶种在同一工艺条件下制作单板层积材时,随着单板厚度的增加,水平剪切强度降低,胶缝开裂变长,导致单板层积材的力学性能有所下降(赵丹等,2001)。单板层积材的结构形式、增强方式和压缩率对其弹性模量、静曲强度及蠕变特性的影响较显著(徐咏兰和华毓坤,2002)。而单板厚度对单板层积材的张力有较大影响(Hayashi and Miyatake, 2003)。单板湿热处理对提高单板层积材总体性能有明显作用(朱一辛和关明杰,2008)。浸胶量对纤维化竹单板层积材物理力学性能有显著影响(孟凡丹等,2011)。

通过对单板层积材研究现状的回顾可以看出,关于其物理特性与力学性能方面的研究比较全面,但对于其无损检测及动态特性性能的研究较少,尤其是其应用可靠性研究更是少有涉足。因此,限制了单板层积材在更加广阔领域的应用及其安全可靠与经济合理的使用。

1.3 夹芯结构生物质复合材料的 research 现状

夹芯结构是由上下两层高强度高模量的薄面板和中间较厚芯子所组成的轻质

结构。轻质芯子起到尽可能降低结构重量、增加两面板截面惯性矩的作用,从而提高结构的抗弯曲刚度;面板胶接在芯子上,从而实现荷载在芯子和面板之间的传递。夹芯结构的面板主要承受面内荷载和弯曲荷载,而轻质芯子主要承受面外剪切荷载(许孟辉和邱志平, 2013)。

夹芯结构复合材料与传统材料相比,主要有以下几个方面的特点(徐朝阳, 2007)。

(1) 优越的复合效应。夹芯结构复合材料是由面板与芯子复合而成的,但它不是简单的复合,而是在复合效应下形成新的优异性能。例如,在弯曲荷载作用下,夹芯复合材料的下面板被拉伸、上面板被压缩、芯子传递剪切力,从力学角度看,它与工字梁很相似,面板类似工字梁的翼缘,芯层类似工字梁的腹板。因为芯子的高度比面板高出几倍,使得截面惯性矩四次方增大,并且面板在夹芯的支持下也不易失稳。

(2) 优越的可设计性。夹芯复合材料可根据实际需要进行灵活多变的优化设计,能用作夹芯结构的材料很多,如纸质、木质、金属、塑料等,设计时可以根据夹芯结构的力学性能与功能要求而选择。可设计的功能诸如有保温隔热、隔音降噪、吸振防撞、隐身防弹等。例如,轻木芯具有高压缩性能,蜂窝芯具有高剪切性能,泡沫芯具有较好的绝热性能,金属芯具有良好的电磁屏蔽效果等。

(3) 质轻高强。夹芯结构面板很薄、芯子很轻,与实心结构相比要轻得多且刚性大,减重效果极为明显,是一种质轻高强的高效结构材料。

总之,夹芯结构复合材料因为具有结构轻量化、比刚度高、比强度高、降噪减振、韧性强、可设计能力强、高能吸收好、抗撞击性好、电磁屏蔽等多种突出性能,所以在高铁列车车体、航空航天、房屋建筑、汽车制造、船舶等领域得到了广泛应用(孙小曼, 2013)。

最早的夹芯结构是 1856 年由英国人希利和艾伦使用上下两层纸板与中间的波纹纸芯制作的瓦楞纸板,现在这种夹芯结构瓦楞纸板普遍被用作包装材料。但夹芯结构却在航空航天领域得到了深入的发展。1940 年,英国人希尔将以桃花芯木面板与轻木芯子制作的夹芯材料第一次应用于其设计的飞翼式飞机的机翼上;之后,德国哈威兰飞机公司生产的“蚊式”飞机也使用了这种夹芯结构;后来为提高构件的结构性能,使用铝质面板取代了木质面板,铝箔蜂窝芯材取代了轻木芯子;1945 年,美国的杜法公司和马丁公司把金属蜂窝夹芯结构成功地用在飞机结构上,显示出了优异的性能(王兴业等, 2007)。自此,夹芯结构就进入了如火如荼的发展阶段,其制备材料从金属材料发展到高分子材料,理论研究也得到了深入的探索,其应用也从航空航天领域扩展到民用领域。

在生物质复合材料领域,夹芯结构也有所发展,瓦楞纸板作为最早出现的夹芯结构,现在已成为应用最广的包装材料,同时木质或其他纸质夹芯结构材

料一般也都是作为包装或装饰材料得以应用。近年来木质夹芯结构材料主要的研究如下。

在国内,许小君等(2004)设计了一种以废旧瓦楞板、三合板、钙塑板和纸为面板,以添加了不同量发泡剂的聚氨酯材料为芯材,以瓦楞板、纸、纱布和铜丝为夹层,利用聚氨酯发泡材料自身的黏合力构成了功能性夹芯复合材料,这种材料可作为具有防潮、隔热、隔音等功能的功能性材料使用;徐朝阳(2007)利用不同的木质材料作面板与纸质蜂窝材料复合制备绿色包装材料,并研究了这种夹芯材料的共面异面变形机制、抗弯性能及流变特性;方海等(2009)以玻璃纤维树脂面板与泡桐木芯材制备了一种用于快速拼装道面垫板的夹芯材料,可用于抢险救灾、军事应急等,如在紧急情况下,用于快速建设临时道路,或用于快速修补遭到大范围破坏的道路、机场等;陈林等(2012)又研究了以泡桐木作为芯材,竹、GFRP作为面层的夹层梁试件的弯曲性能;韩超(2012)制造了木质单板覆面浸渍蜂窝纸夹层复合材料、木塑板覆面浸渍蜂窝纸夹层复合材料及木塑发泡夹芯复合材料,研究了其在弯曲、冲击、侧压等方面的性能;郭禾苗(2012)基于“质量功能展开(QFD)”和“发明问题解决理论(TRIZ)”对新型木质吸声板的开发进行了相关研究,制备了面穿孔单层及双层蜂窝夹芯木质吸声板。

在国外,Kawasaki等(2003)研究了应用于木结构剪力墙或楼面板中的木质夹芯板材的面内剪切性能,这种板材是由胶合板面板与低密度纤维板芯子组成,在2006年,又研究了这种板材的隔热保温性能和四点弯曲性能(Kawasaki and Kawai, 2006; Kawasaki et al., 2006);Kljak和Brezović(2007)研究了由三层胶合板面板与PVC泡沫芯子组成的夹芯材料的弯曲性能,分析了胶合板中单板厚度比对材料性能的影响;Atas和Sevim(2010)研究了轻木芯子与PVC泡沫芯子(以环氧树脂基玻璃纤维复合材料为面板)在冲击荷载下的性能;Fernandez-Cabo等(2011)也使用低密度纤维板为芯子、OSB为面板制备了一种夹芯材料以用作建筑材料,并分析了这种材料的剪切性能;Banerjee和Bhattacharyya(2011)使用3层胶合板制备了一种波纹状芯子,并用三层胶合板作面板制备成了夹芯结构,并分析了其面外剪切性能及在荷载下的破坏形式;Chen等(2011)对应用于家具中的蜂窝夹芯结构板材进行了弯曲蠕变性能的研究,这种板材由硬纸板或中密度纤维板或胶合板为面板与牛皮纸蜂窝芯子制备而成;Sargianis等(2013)研究了天然材料基夹芯复合材料的吸音和振动阻尼性能,这种夹芯材料的面板采用竹纤维或棉纤维的乙烯基酯树脂复合材料,芯层分别采用Rohacell硬质泡沫或轻木材料,研究者将其与环氧树脂基碳纤维复合材料夹芯结构的性能对比,以期应用于民用飞机中。

通过以上研究可知,以木质材料制备夹芯结构复合材料,芯层多采用蜂窝结构,或泡沫材料,或轻质的木质板材,少有涉及其他的芯子结构形式。在国内以

研究夹芯结构板材的功能性或装饰性为主；由于在日本及欧美木结构住宅较多，国外多以研究材料的力学性能为主。总之，随着低碳绿色的健康生活方式的提倡，木质夹芯结构复合材料还需要开拓性的研究，多样性的夹芯结构拓扑形式需要引入研究。

在航空航天领域，夹芯结构得到广泛深入的研究，夹芯结构的形式也不断增多，新形式层出不穷。2000 年左右，空间点阵夹芯结构的概念首先被普林斯顿大学 Evans 教授、哈佛大学 Hutchinson 教授 (Evans et al., 2001)、剑桥大学 Ashby (2001) 教授等提出。点阵结构类似于现有空间网架结构，它由连接节点与节点间的杆件单元，按照一定的空间周期规律进行扩展而成。对比于当前常用的轻质材料，点阵夹芯结构具有更高的比强度和比刚度，其满足了大型航空航天器构件超轻结构设计（轻质、高强、高韧和防湿热）和多功能性（承载、散热、减振、吸能）设计的要求。集材料设计、结构设计与功能设计为一身的协同优化设计出的点阵夹芯结构，已成为当前国际上最有应用前景的新一代先进、轻质、高强、高韧与多功能的结构材料（许孟辉和邱志平，2013）。

传统的工程木质复合材料在宏观上多为实心结构，而点阵结构属于多孔结构，在木材、珊瑚和骨头等许多天然材料中就有存在，能够长期承受很大的静荷载和周期荷载为其显著的优点。点阵结构是由连接在节点上的杆单元组成的满足拉伸主导型的周期结构，根据微结构构造，可分为二维和三维点阵结构。二维点阵结构，又被称为蜂窝结构或格栅结构，是由杆件构成的多边形在二维平面进行周期排列并在第三方向拉伸形成的点阵结构，常见的二维点阵构型有四边形、全三角点阵、六边形点阵、菱形点阵、混合型点阵和新型 Kagome 点阵等。三维点阵结构是由杆件等微元件按一定规则沿空间周期排列形成的桁架结构，三维点阵结构比二维点阵结构具有更大的设计空间，结构形式更为多样，比较具有代表性的三维点阵构型主要有直柱型点阵、斜柱型点阵、金字塔点阵、四面体型点阵、八面体型点阵、纤维编织型点阵等（王晓峰，2012；吴林志等，2012）。

集成材、工字梁及单板层积材等是已经广泛应用的工程木质材料，也是“劣材优用”的典型产品。虽然这些传统的工程木质复合材料可以在一定程度上克服木材固有的一些缺点，拓宽木材的应用领域，使木材资源得到高效利用；然而其相对较低的比强度及比刚度、较大的比重、较高的价格，以及在隔音、减振、隔热、降噪等方面功能单一，这些不足的存在仍然在一定范围内限制了它们的应用，在一些要求自重轻、强度高、功能多的场合中无法与其他建筑材料竞争。所以，如何对工程木质复合材料从结构上进一步优化，从而节约材料以降低成本、减轻重量，并且能够赋予材料更好的性能、更多的功能，是一个重要的研究课题。

因此，本书针对现有的工程木质复合材料的结构与性能的不足，从结构与功能一体化设计的思路出发，探索将点阵夹芯结构应用于工程木质复合材料的设计

中, 实现既能满足结构承载的要求又能满足多功能化(质轻、减振、降噪、隔音、隔热、电磁屏蔽等)的要求, 制备出结构功能一体化的高性能工程木质复合材料。这种材料可应用于建筑工程、车体工程、桥梁工程等既需要结构承载又需要多功能化要求的领域, 可提升木质复合材料的经济、科技与生态价值。

1.4 生物质复合材料无损检测研究现状

无损检测(也称为非破坏检测), 是指在不破坏材料原有材质和形状情况下, 检测材料的某些特性。无损检测的最大优点是在不破坏材料原有特性的情况下, 短时间内就可获得检测结果, 有利于操作人员尽快做出判断, 并且对于生产的连续性和生产效率的提高是有利的。木材无损检测技术是无损检测技术在木材和木质工程材料中的应用, 其采用多种物理检测方法和手段, 对木材及木质材料进行检测, 从而评价材料的物理性能、生长特性、力学性能及缺陷(孙建平等, 2011)。检测木材与人造板的力学性能指标通常包括: 密度、含水率、弹性模量、静曲强度及内结合强度等。对人造板的物理力学性能进行无损检测的方法主要有以下几种: 纵波传播、纵向共振、弯曲振动、表面波传播等(胡英成, 2004)。

在 20 世纪 60 年代, 随着木材无损检测技术的发展, 针对人造板领域的研究也广泛开展。松本昴、堤寿一研究了胶合板静态弹性模量和动态杨氏模量的相关关系。Narayanamurti 等(1977)针对三层胶合板进行了无损检测, 结果表明, 动态杨氏模量与静态弹性模量有密切相关性, 且动态弹性模量大于静态弹性模量。Dunlop(1980)根据声波在刨花板内部传播时间的长短及材料幅面宽度, 测定了板内声波传播速度, 然后利用通过刨花板的声速与刨花板强度的相关性, 预测了刨花板的力学强度。Greubel(1989)采用超声波技术对工业刨花板进行了无损检测, 结果表明, 刨花板内的声波传播速度与横向抗拉强度有着较为密切的线性相关性。

董玉库等(1995)、中尾哲也(2002)等运用力学理论分析及力学试验对中密度纤维板、刨花板等在厚度方向呈非均质性的材料进行了研究, 检测了抗弯弹性模量和剪切弹性模量。Shyamasunder 等(1994)运用声波无损检测法对胶合板弹性模量和刚性模量进行了研究, 研究表明, 动态弹性模量与静态弹性模量间有较好的线性相关性, 但动态弹性模量与刚性模量的相关性尚需进一步的研究。Greubel 和 Wissing(1995)运用弯曲振动无损检测方法对单层与三层工业制造刨花板和实验室型刨花板的弹性模量和剪切模量进行了测量。Niemz 等(1997)研究了刨花板内的声波传播速度, 研究表明, 声波传输速度与弯曲强度、弯曲弹性模量之间有着较为密切的线性相关性; 并且刨花板密度和胶黏剂含量对声波传播速度有着较大影响。