

工程木质复合材的 无损检测与性能评价

胡英成 张利 程芳超 著



科学出版社

工程木质复合材的无损 检测与性能评价

胡英成 张 利 程芳超 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书首先以未增强型单板层积材和玻璃纤维网格布增强型单板层积材为研究对象,以 FFT 分析检测方法、人工神经网络方法、均匀设计方法等为主要研究方法,进行了材料力学性能的无损检测、材料生产工艺的优化、材料力学性能的增强设计等方面的研究,构建了动态与静态力学性能之间的线性模型、生产工艺参数与力学性能之间的非线性模型、力学性能增强的优化模型。同时还以胶合木为研究对象,设计试验分析了不同因素对胶合木力学性能的影响,确定了最优的增强方式与尺寸位置参数;建立了基于动态力学性能的胶合木力学性能的预测模型,并且在模型中考虑增强的参数和方式对性能的影响;基于动态力学性能预测了速生木材的静态力学性能,并通过可靠性分析评价了无损检测方法用于木结构设计的安全性;利用多种分析手段分析了木材-FRP 材料粘接界面的形成机理,并找出了这一复合界面中的薄弱环节,从而可以对其进行有针对性的改性与增强。

本书可供大专院校木材科学与技术相关专业的大学生及研究生阅读参考,亦可作为木材科学与技术相关专业的工程技术人员的参考书,也可供材料、建筑、化学等领域的研究人员和工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程木质复合材的无损检测与性能评价/胡英成,张利,程芳超著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-032968-4

I. ①工… II. ①胡… ②张… ③程… III. ①木质复合材料-无损检验 ②木质复合材料-性能分析 IV. ①TB332

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 252418 号

责任编辑:王海光 / 责任校对:张怡君

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:北京美光制版有限公司

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>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012 年 1 月第一次印刷 印张: 10 3/4

字数: 203 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

21 世纪复合材料的发展关键在于努力降低成本,提高可靠性,发展新型复合材料,改善与环境的协调性。工程木质复合材作为复合材料大家族中的一员,完全符合未来复合材料发展与利用的要求。研究开发工程木质复合材不仅对于材料科学与工程的发展有重大价值,而且对于资源利用和环境保护也有重大意义。同时,工程木质复合材在提高人们的生活质量,改善人们的居住环境,保障人们的身体健康和生命财产安全等方面也发挥着重要作用。

目前,在建筑领域,木质材料被广泛使用,尤其是工程木质复合材,被用于建筑托梁、屋顶桁架、工字梁等构件,以及家庭住宅的屋顶、结构框架和地板系统中。随着国民经济的飞速发展,尤其是木结构建筑的推广与发展,木质结构材的供需矛盾将越加明显。我国自实行“天然林保护工程”以来,全国各地相继采取了封山育林的措施,各主要林区纷纷减少木材采伐量,使天然优质木材供需矛盾日益突出。而人工速生林木材质往往不如天然成熟林,主要表现为木材强度低,刚度差,材质松软,尺寸变异大。这些缺点使得由人工速生林木材制成的工程木质复合材在建筑工程结构中的使用范围受到一定程度的影响,因此有必要采取一定的措施加以改进。同时,为了使工程木质复合材得到科学合理的应用,还必须对工程木质复合材各方面的性能(尤其是力学性能)作深入的研究。

本书以两种典型的工程木质复合材——单板层积材和胶合木为研究对象,以大量试验过程及试验数据为支持,重点介绍了其在生产工艺设计、性能增强设计、材料无损检测、材料可靠性设计及材料界面分析等方面的最新研究进展。这些研究不仅有利于丰富和完善工程木质复合材的科学体系,也可以促进工程木质复合材进一步应用于生产实际中,保证产品质量安全可靠,并大大节约原材料,降低生产成本,提高产品竞争力。

本书中的研究是在国家自然科学基金(30700629)、全国优秀博士学位论文作者专项资金(200764)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0328)和中央高校基本科研业务费专项资金(DL09DB02)项目的资助下,所取得的阶段性成果。本研究属于交叉学科,尤其是人工神经网络和可靠性理论在工程木质复合材中的应用,所以有关这方面的研究工作还有待于进一步开展。

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

2011 年 9 月

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 工程木质复合材的力学性能研究现状	3
1.1.1 单板层积材的力学性能研究现状	3
1.1.2 胶合木的力学性能研究现状	6
1.2 无损检测及其在木材工业中的应用研究现状	7
1.2.1 无损检测概述	7
1.2.2 单板层积材的无损检测研究现状	11
1.2.3 木质复合材料的无损检测研究现状	12
1.3 人工神经网络技术在木材工业中的应用现状	21
1.4 可靠性及其在木材工业中的应用研究现状	22
1.4.1 可靠性概述	22
1.4.2 复合材料的可靠性问题	28
1.4.3 工程木质复合材的可靠性分析研究现状	31
1.5 本书主要研究内容	32
2 理论及方法	34
2.1 力学性能检测方法	34
2.1.1 纵向共振方法	34
2.1.2 弯曲振动方法	34
2.1.3 静力学检测方法	35
2.2 单板层积材力学性能优化方法	37
2.2.1 二次多项式逐步回归方法	37
2.2.2 BP神经网络方法	42
2.3 可靠性分析方法	47
2.3.1 一次二阶矩法(中心点法)	47
2.3.2 改进的一次二阶矩法	48
2.3.3 JC法(验算点法)	48
2.3.4 高次高阶矩法	49
2.3.5 响应面法	49
2.3.6 Monte-Carlo法	50

2.3.7	随机有限元法	50
2.4	界面分析方法	51
2.4.1	环境扫描电子显微镜	51
2.4.2	差示扫描量热法	52
2.4.3	傅里叶红外光谱分析	52
3	单板层积材的性能检测与工艺优化	54
3.1	试验材料与方法	54
3.1.1	试验材料	54
3.1.2	试验方法	54
3.2	结果与讨论	55
3.2.1	垂直加载试件检测结果相关性分析	55
3.2.2	平行加载试件检测结果相关性分析	59
3.2.3	单板层积材生产工艺的回归方程优化	62
3.2.4	单板层积材生产工艺的神经网络优化	66
3.2.5	模型对比	75
3.3	小结	79
4	单层玻纤网格布增强型 LVL 的制备与检测	81
4.1	试验材料与方法	81
4.1.1	试验材料	81
4.1.2	试验方法	82
4.2	结果与讨论	83
4.2.1	垂直加载试件检测结果相关性分析	83
4.2.2	平行加载试件检测结果相关性分析	86
4.2.3	铺设角度的影响	90
4.3	小结	93
5	多层玻纤网格布增强型 LVL 的铺层优化设计	94
5.1	试验材料与方法	94
5.1.1	试验材料	94
5.1.2	试验方法	95
5.2	结果与讨论	96
5.2.1	垂直加载试件检测结果相关性分析	96
5.2.2	平行加载试件检测结果相关性分析	100
5.2.3	铺层位置的优化设计	103
5.3	小结	109
6	杨木胶合木的增强设计	111

6.1	试验材料与方法	111
6.1.1	试验材料	111
6.1.2	胶黏剂	111
6.1.3	试件准备	112
6.1.4	正交试验	112
6.2	结果与讨论	113
6.3	小结	114
7	基于无损检测方法的杨木木结构设计的可靠性分析	115
7.1	试验材料与方法	116
7.1.1	试验材料	116
7.1.2	无损检测方法	116
7.1.3	静态检测方法	117
7.1.4	试验过程	117
7.2	结果与讨论	118
7.2.1	力学试验结果分析	118
7.2.2	杨木试件静曲强度的预测	120
7.2.3	木结构设计	120
7.2.4	可靠性分析	121
7.3	小结	123
8	FRP 增强速生杨木胶合木的无损检测和弹性模量预测	125
8.1	试验材料与方法	125
8.1.1	试验材料	125
8.1.2	无损检测方法	126
8.1.3	静态检测方法	126
8.2	结果与讨论	127
8.2.1	力学试验结果分析	127
8.2.2	均一截面胶合木的弹性模量预测	129
8.2.3	变截面胶合木的弹性模量预测	132
8.3	小结	135
9	FRP 增强杨木胶合木的粘接界面分析	136
9.1	试验材料与方法	136
9.1.1	试验材料	136
9.1.2	环境扫描显微镜	136
9.1.3	差示扫描量热法	136
9.1.4	傅里叶变换红外光谱	137

9.1.5 FRP 表面粗糙度试验	137
9.2 结果与讨论	137
9.2.1 利用环境扫描显微镜研究木材-环氧树脂-FRP 复合界面	137
9.2.2 利用 DSC 研究增强胶合木粘接界面间的化学反应	139
9.2.3 利用 FTIR 研究增强胶合木粘接界面间的化学反应	145
9.2.4 环氧树脂粘接增强胶合木胶接机理分析	148
9.2.5 FRP 表面粗糙度对增强界面粘接强度的影响	151
9.3 小结	151
参考文献	153

1 绪 论

作为当今世界公认四大材料之一的木材,与金属或其他建筑材料相比,具有较高的强重比和突出的隔热保温、吸音隔声以及自然美观、质感舒爽等环境协调性能,为人类创造了舒适、优雅的生活环境,提高了人们的生活质量。随着自然环境的恶化,二氧化碳排放量的增加,全球变暖等一系列环境问题的相继出现,既可循环再生又节能固碳的木质建材越来越受到世界各国的青睐,优质木质建材成为全球的迫切需要。但是,木材有其缺点存在,主要表现在干缩、湿胀,易变形,各向异性,在水、热、光、微生物作用下易于降解、腐朽,易燃烧等,这些不足之处在很大程度上制约了木材在工程结构上的应用。随着世界森林资源结构的巨大变化,高质量的木材资源越来越稀缺,而人们对木质产品的需求和生态环境的要求却不断提高,木质材料供求矛盾日趋明显。

利用人工速生林木材和其他材料复合成新的木质复合材料,是缓解木材资源紧张并提升木材产业结构的有效途径之一。尽管传统的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,然而其相对较低的强度、刚度,以及在耐火、耐燃、耐腐蚀等方面存在的缺点仍然在一定范围内限制了它的应用,在一些要求高强度或高精度的场合中无法与其他材料竞争。纤维增强技术是一种新型的增强技术,用于增强的纤维具有极其优越的性能,包括轻质、高强、高弹性模量、易于裁剪、抗疲劳性能好、耐磨、耐腐蚀、无磁性等。土木工程领域通常应用的纤维材料,主要有碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维、玄武岩纤维等;从材料形式上分,主要有片材、布状片材和板状片材、筋、棒和索等。用纤维及其制品增强木质工程材料不仅可提高木质工程材料的承载力、刚度和韧性,还可提高木结构的耐久性和蠕变性能。

工程木质复合材一般都用作结构材料,取代传统的实体木材。它主要包括单板层积材(laminated veneer lumber, LVL)、单板条层积材(parallel strand lumber, PSL)、定向长刨片层积材(oriented strand lumber, OSL)、结构用集成材(glued laminated lumber, Glulam)、结构用指接材(finger joint wood)、结构用胶合板(structural plywood)、大片刨花板(wafer board)、定向刨花板(oriented strand board, OSB)以及由LVL和结构用胶合板或OSB组合加工而成的工字梁(I-joist)、金属件衔接木材桁架等。

工程木质复合材以其性能可靠,强重比高,良好的耐候性能、耐火性能、抗震性能以及独有的环境性能,作为受力的结构用材可广泛地用于建筑、桥梁、交通运输、

家具等领域。

本书以两种典型的工程木质复合材——单板层积材和胶合木(即结构用集成材)为研究对象,通过对现有的工程木质复合材的力学性能进行分析,探索合适的优化方法,对其力学性能及结构进行优化设计,以实现充分发挥各组分的优点,使材料性能优势互补,改进工程木质复合材的物理力学性能和结构性能,从而扩大木质复合材料在工程结构等方面的应用范围。利用各种研究方法,对工程木质复合材的力学性能进行建模预测、综合评价,为材料的优化设计、开发及工艺优化提供一种可行、高效的方法。通过对工程木质复合材的可靠性优化设计,可使木质复合材料在工程结构中的应用既安全又不造成浪费。最终为工程木质复合材力学性能的无损评价、优化设计、性能预测、安全使用等提供科学依据。

单板层积材(LVL)是一种工程木质复合材,它是使用干燥后的旋切单板与防水胶黏剂胶接,顺木材纹理方向层积组坯在一起,经加热加压制备而成(Çolak et al., 2007)。

单板层积材不仅对木材的综合利用率大大高于其他板材,其特殊的生产工艺也使板材保留了木材的天然特性,并将单板上降低强度的节疤、裂缝等缺陷均匀地分布在产品之中,因而具有工程性能均匀、稳定、强度高等优点。单板层积材还具有规格灵活多变、耐火、抗震、易加工等特点,这些优点决定了单板层积材具有广泛的用途和良好的发展前景(张言海, 2001; 张一帆, 2001)。

单板层积材由于其在规格、强度、性能等方面的独到优势,具有非常广泛的应用范围,按其用途可分为非结构用和结构用两种。其中结构用单板层积材又分为小规格结构材和大规格结构材。非结构用单板层积材主要用于家具、室内装修领域等非承载领域且不强制限定力学性能,适用于室内干燥环境,如门、门窗框、室内隔板、高档家具台面的芯材或框架。结构型单板层积材是强制限定力学性能,用于制作承载结构部件的结构板材,一般具有较好的结构稳定性和耐久性,厚度通常大于等于 25mm,也称为木质工程结构单板层积材,承载结构部件通常长期或瞬间承受载荷。结构用 LVL 一般用于瞬间或长期承受载荷的结构部件,如大跨度建筑设施的梁或柱、木结构房屋、车辆船舶和桥梁等的承载结构部件。小规格结构材主要用作门窗构架、内部墙壁支柱和门窗框、楼梯等建筑部件;大规格结构材可广泛用于建筑托梁,屋顶桁架、工字梁等构件,以及家庭住宅的屋顶、结构框架和地板系统中,也可作车船材、枕木等。在北美洲,单板层积材被大量用来生产工字形楼板托梁,这种托梁将定向刨花板与单板层积材组合,制成为力学性能良好的大规格建筑构件。其工字型的翼缘由单板层积材制成,中间腹板是定向刨花板,充分发挥每一种材料的力学性能。由于其较高的强重比,还特别适合于大跨度梁和一些用木材和钢材无法简单替代的领域(张心安等, 2005)。

胶合木是指利用较短、较薄的板材通过胶合拼接的方法,平行接长,加宽,增

厚,加工成在性质和外观上都保留了实木固有特性的一种大规格材。这样就解决了受天然原木尺寸限制的问题,从而扩大了木材的应用范围。胶合木主要用于建筑工程上作胶合梁、胶合桁架和胶合拱。

胶合木结构可分为两大类:层板胶合木和复合胶合木。层板胶合木是由实木薄板胶合而成的;复合胶合木(composite-glulam)是指胶合板、定向板、LVL、实木板以一定的形式相互胶合而成的结构。按照静力弯曲受力形式看,表层受力最大,因此表层应使用等级较高的木材,以提高整个胶合木的力学性能。

制造胶合木时,应将木板干燥至规定的含水率,同时也可将每层木板作防火、防腐处理;选用的承重结构胶为酚醛类树脂或异氰酸酯类树脂;所选用的针叶材或软质阔叶材,其木板厚度不宜大于 40mm;若采用硬木松和硬阔叶材,木板厚度不宜大于 30mm;对于弧形构件,则其木板厚度不应大于 30mm,且不应大于曲率半径的 1/300。木材在胶合前应将其表面刨光。层板的放置,应使构件中各层木板的年轮方向一致,这样当木板干缩时,胶缝主要受剪,而胶缝的抗剪能力是很强的。如果年轮反向放置,则干缩时胶缝受拉,而胶缝的抗拉能力较弱,往往会导致胶黏剂开裂而失效。各层木板接头的形式有 3 种:指接、斜接和对接,常见的是指接。

1.1 工程木质复合材的力学性能研究现状

1.1.1 单板层积材的力学性能研究现状

鲍甫成等(1999)研究了人工林杨木材性对单板层积材强度的贡献率。提出了衡量单板层积材强度中实木材性所占份额的贡献率概念,以揭示实木材性对单板层积材强度的贡献程度。

徐咏兰等(2002)研究了 LVL 的压缩率、结构形式和增强方式对其蠕变特性、弹性模量(MOE)以及静曲强度(MOR)的影响,提高 LVL 的密度和合理组坯是改善其力学性能和蠕变特性的较好途径;采用浸胶单板可适当改善 LVL 的力学性能;通过提高 LVL 的静曲强度和弹性模量有望改善其蠕变性能。

王卫东等(2003)讨论了酚醛树脂胶、环氧树脂胶和聚氨酯树脂胶等三种胶黏剂用于金属网与杨木单板胶合的情况;研究了用不同金属材料、不同规格的金属网,在不同的组坯条件下压制的层积板的性能。结果表明:金属网对杨木单板层积材的 MOE、MOR 等性能的增强效果比较显著,而且金属网目数是影响层积板胶合强度、MOE、MOR 等性能指标的主要因素。

吕斌等(2004)通过对不同树种制得的单板层积材的静曲强度和弹性模量的对比,发现无论垂直或平行加载,静曲强度和弹性模量与树种及材性关系甚大,桉树等高密度树种呈现较高的静曲强度和弹性模量,而用杨树制得的单板层积材具有

较小的静曲强度和弹性模量,而水平剪切强度无论是垂直还是平行加载对树种差别不大。

朱一辛等(2005)研究了在杨木单板层积材中加入竹材作为增强材料,以提高杨木单板层积材冲击性能。结果表明:将竹材加入杨木单板层积材,可以明显地改善杨木单板层积材的冲击韧性。

王小青等(2005)以浸渍酚醛树脂的杨木单板和竹帘为原料制备竹木复合单板层积材,探讨制造工艺对复合材料性能的影响。结果表明:单板厚度、树脂浓度、压缩率对 MOE 和 MOR 有显著影响;组坯方式对 MOR 影响显著;而吸水厚度膨胀率的影响作用比较复杂。

贾娜等(2006)测试了由高频热压方法制造的桦木和椴木单板层积梁的密度、静曲强度、弹性模量和水平剪切强度等力学性质,结果表明:桦木和椴木 LVL 梁具有较大的密度、MOR 和较高的 MOE,其主要物理力学性能受树种的影响较大,桦木 LVL 梁的主要性能均优于椴木 LVL 梁。

朱一辛等(2006)在不同温湿度条件下,对竹材增强单板层积材进行处理,分析了经过处理后竹材增强 LVL 力学性能的变化。结果表明:经过高温高湿处理后,竹材增强 LVL 的力学性能均出现了明显的衰减;经过低温处理后,竹材增强 LVL 的弹性模量和静曲强度都有微弱增长的趋势;在高低温交变处理过程中,竹材增强 LVL 的弹性模量和静曲强度处于上下波动的状态。

李世宏等(2007)采用碳纤维布对杨木 LVL 梁、柱增强。梁采用在生产过程将碳纤维布复合到 LVL 中的增强方式,柱采用外贴碳纤维布箍增强方式。通过试验选择了合理的梁、柱截面形式,试验结果表明碳纤维布增强杨木 LVL 梁、柱的承载力明显提高,其他受力性能也得到显著改善。

刘焕荣等(2007)以杨木单板和竹帘为原料,采用低分子量水溶性酚醛树脂浸渍处理,通过干燥、组坯、热压等工艺制备竹木复合强化单板层积材。探讨了组坯方式、压缩率、热压温度、热压时间对竹木复合强化单板层积材弹性模量和静曲强度的影响。结果表明:表层为一层竹帘的竹木复合强化单板层积材的 MOE 和 MOR 较大。

程丽美等(2008)研究了玻璃纤维对杨木单板层积材弯曲性能的增强效果。结果表明:玻璃纤维对杨木单板层积材的纵横向静曲强度、弹性模量的增强效果显著,特别是横向的 MOR、MOE 的增强幅度更大。

朱一辛等(2008)对杨木单板的湿热处理规律以及对杨木单板层积材性能影响的研究结果表明,单板湿热处理后产生了塑化,形成了一部分不可恢复的变形;对抗拉强度的影响不显著;对单板压缩率和膨胀率有着特别显著的影响。单板湿热处理后经过低压压制,可以得到与高压压制相同密度的板材,且板材的断面密度差异小,水平剪切强度和静曲强度得到增加,弹性模量没有显著变化,吸水厚度膨胀

率得到降低。

刘焕荣等(2009)探讨了采用低分子质量酚醛树脂浸渍处理杨木单板的方法制备杨木单板层积材的生产技术。结果表明:施胶量相当时,浸渍方式与涂胶方式生产的单板层积材相比,密度相当,吸水厚度膨胀率(24hTS)降低,胶合强度、弹性模量和静曲强度得到提高。采用浸渍树脂方式生产的密实型强化杨木单板层积材随着吸药量的增多,密度增大;24hTS减小;胶合强度随着吸药量的增加先增大而后趋于平稳;MOE和MOR先增大后减小。

Chui等(1994)制造了两种类型的LVL,一种LVL使用的单板都用水溶性PF浸泡,另一种LVL则只浸泡外层单板。经过取样,测其力学性能,发现与未经处理的LVL相比,上述两种LVL的力学性能和尺寸稳定性都有所提高。

Tang和Pu(1997)研究了单板等级和相对湿度对南方松单板层积材性能的影响,通过对由三种等级的单板组坯生产出的五种类型的单板层积材的研究,发现单板等级对MOE和MOR有着显著的影响。相对湿度的增加对MOE和MOR有着相当大的削弱作用,相对湿度从65%到95%时(23.9℃),MOR的降低量从16.3%到23.9%,MOE的降低量从24.7%到32.4%。

Shupe和Hse等(1997)研究了单板等级对火炬松单板层积材力学性能的影响,得出具有最佳力学性能的单板组坯方式为:最底层的拉伸边配置两层A等级的单板,压缩边配置一层A等级的单板,芯层为C等级的单板。

Lee和Tang等(1999)研究了单板连接(斜接和搭接)设计对用全幅旋切黄杨单板和酚醛树脂胶生产的LVL的静态弯曲性能的影响,发现单板搭接的LVL的MOE和MOR与无单板接头的LVL相近,而单板斜接的LVL的力学性能相对较低。Özçifçi(2007)也研究了单板斜接对单板层积材弯曲强度和弹性模量的影响,发现单板斜接角度减小,LVL的性能会增强。

Harding等(1998)研究了幼龄材和组坯方式对辐射松单板层积材各种性能的影响。Kamala等(1999)根据不同标准检测用人工林橡胶木制造的LVL的力学性能,发现其许多性能和柚木一样,且通过了剥离实验。Troughton等(2000)研究了喷蒸技术在单板层积材制造中的应用,其有利于缩短热压时间,增加产量和效益。Biblis(2001)研究了南方松LVL在跨厚比相同的检测条件下梁的厚度对MOR的影响,发现随着厚度增加,MOR的值显著降低。Aydlın等(2004)发现使用的单板树种、使用的胶种对单板层积材的力学性能有显著的影响。Madhoushi等(2004)将玻璃纤维增强树脂拉挤棒使用室温环氧树脂胶合到LVL方块材中,研究了其的拉伸疲劳强度。Uysal(2005)使用PF、PVAc、D-VTKA和UF胶制备了松木和杉木单板层积材,对这些单板层积材进行蒸汽处理后,考察了胶合强度和尺寸稳定性。

从上面的研究可以看出:人们从单板层积材的原材料、加工工艺、力学性能等

方面进行了大量的研究,虽然也有使用树脂浸渍、金属网增强、碳纤维及玻璃纤维增强单板层积材等方面的研究,但在使用玻璃纤维网格布对单板层积材进行增强设计方面的研究较少,对速生杨木树种单板层积材增强设计方面的研究有待于进一步的深入。

1.1.2 胶合木的力学性能研究现状

Wangaard(1964)率先提出用玻璃纤维加固木梁的思想,并对其进行了试验研究。Biblis(1965)研究了6种不同木材的玻璃纤维增强木梁的结构性能,并提出了一种计算纤维增强木梁的刚度和强度的计算方法,通过试验研究验证了其有效性。Plevris和Triantafillou(1992)率先发表了对木梁和柱的张拉面粘贴了单向纤维布进行抗弯性能实验;Triantafillou和Fardis(1997)对粘贴U形FRP(fiber reinforced plastic,纤维增强塑料)箍的木梁进行了抗剪性能试验。上述研究的结果表明,纤维布加固后的木构件在抗弯、抗剪强度、刚度和延性等方面均有非常大的提高。Plevris、Triantafillou等学者的研究表明,纤维布加固木节点和木构件,可以提高木结构的承载力、刚度和抗震性能,由于纤维布自重轻而薄,加固后几乎不影响结构的外形,也不增加结构的自重,从而保持了传统建筑的风格,特别适用于一些具有历史意义的纪念性木建筑。杨会峰和刘伟庆(2006)利用解析模型对FRP增强胶合木梁的弯曲变形进行模拟和评价,结果显示解析模型可以用于FRP增强胶合木梁的弯曲变形预测和模拟。杨会峰和刘伟庆(2007)又利用解析模型模拟了FRP增强胶合木梁的黏结剪应力和受弯性能,取得了较好的效果。

Bohanan(1962)最早提出在木结构中施加预应力。Triantafillou(1992)对预应力FRP加固木梁进行了研究。结果表明,施加预应力后构件的强度比非预应力FRP梁约提高15%,比普通木梁提高30%,同时刚度也明显增加。Plevris(1995)和Davids(2001)分别对FRP加固木梁的徐变进行了研究,发现FRP加固木梁后,可提高构件的承载力,而且明显地削弱了蠕变对构件的影响。王锋等(2005)对预应力纤维材料加固木梁进行了理论分析,给出了预应力条件下黏结应力的解析解,并提出了简单实用的预应力施工方法——预弯法。Jia和Davalos(2006)采用人工神经网络方法对FRP加固的悬臂木梁界面的疲劳性能进行了研究,结果表明,人工神经网络能有效地预测加固梁的疲劳性能,如加载率对裂缝发展的影响,这将有利于组合结构界面设计规范的发展。FRP优良的材料特性使该加固方法具有明显技术优势:高强高效;不影响结构自重及尺寸;施工方便,操作性强,不需要大型施工设备,施工占用空间少;适用于各种类型和形状结构部位的加固修补;抗疲劳、耐腐蚀性能好。

Pantelides等(2010)利用FRP材料对木质桁架中的胶接接头进行修补,结果表明FRP的加入明显提高了胶接接头抵抗重力和地震力交互作用的能力。

Naghypoura 等(2011)利用 FRP 材料对木塑复合材进行增强,并建立了非线性模型对这一增强体系进行预测,结果表明,FRP 的增强效果明显,且模型预测较准确。Raftery 和 Harte(2011)利用 FRP 材料对低劣质胶合木进行增强,并利用弯曲试验评价了这一体系的承载能力,结果表明,FRP 对胶合木的弹性模量和静曲强度均有较大的提升作用,但对静曲强度的提升更加明显。Yahyaei-Moayyed 和 Taheri(2011a,2011b)的两个研究均证明了 FRP 对木质材料的蠕变性能有所改善。

由上述研究可以看出:许多研究人员利用纤维、FRP 等高强材料对木质工程材料进行了增强研究,并对其力学性能、增强效果进行了分析,但未见有对其进行增强设计和局部增强的报道。

1.2 无损检测及其在木材工业中的应用研究现状

1.2.1 无损检测概述

1.2.1.1 无损检测的定义

无损检测是一门以不破坏被检测对象的性质和使用效果为前提,对材料进行有效的检验和测试,借以评价材料的完整性(缺陷分析)或其他(物理力学)特性的综合性应用科学技术。

随着科学和工业技术的迅速发展,高温、高压、高速度和高负荷已成为现代工业的重要标志,但它的实现是建立在材料(或构件)高质量的基础之上的,为确保这种优异的质量,必须采用不破坏产品原来的现状、不改变其使用性能的检测方法,对产品进行百分之百的检测(或抽检),以确保其可靠性和安全性,这种技术就是无损检测技术。

无损检测技术,就是研发和应用各种技术方法,以不损害被检对象未来用途和功能的方式,利用材料内部结构异常或缺陷存在所引起的对热、声、光、电、磁等反应的变化,来探测各种工程材料、零部件、结构件等内部和表面缺陷,并对缺陷的类型、性质、数量、形状、位置、尺寸、分布及其变化做出判断和评价(刘贵民,2006)。

一般来说,缺陷检测是无损检测中最重要的方面。因此,狭义而言,无损检测是基于材料的物理性质因有缺陷而发生变化这一事实,在不改变、不损害材料和工件的状态和使用性能的前提下,测定其变化量,从而判断材料和零部件是否存在缺陷的技术(王自明,2004)。

无损检测技术的应用范围十分广泛,在机械制造、石油化工、造船、汽车、航空航天和核能等工业中得到了普遍应用。无损检测工序在材料和产品的静态和动态检测以及质量管理中,已成为一个不可缺少的重要环节。无损检测人员已发展成

为一只庞大的生力军,享有“工业卫士”的美誉(刘贵民,2006)。

1.2.1.2 无损检测的目的

无损检测的目的是定量掌握缺陷与强度的关系,评价构件的允许负荷、寿命或剩余寿命;检测设备(构件)在制造和使用过程中产生的结构不完整性及缺陷情况,以便改进制造工艺,提高产品质量,及时发现故障,保证设备安全、高效可靠地运行。具体地说,无损检测的目的主要有以下三个方面(刘贵民,2006)。

(1) 质量管理

各种产品的使用性能、质量水平等量化指标,通常在其技术文件中都有明确规定。无损检测的主要目的之一,就是对非连续加工(如多任务序生产)或连续加工(如自动化生产线)的原材料或零部件提供实时的质量控制。如控制材料的冶金质量、加工工艺质量、组织状态,涂镀层的厚度以及缺陷的大小、方位与分布等。在质量控制过程中,将由无损检测获得的质量信息反馈到设计与工艺部门,可反过来促进其改进产品的设计与制造工艺,从而提高产品质量、降低成本、提高生产效率。

另外,根据验收标准,也可以利用无损检测技术把原材料或产品质量控制在设计要求的范围内,以免无限度地提高质量要求,甚至在不影响设计性能的前提下,使用某些有缺陷的材料,从而提高资源利用率,提高经济效益。

(2) 在役检测

使用无损检测技术对装置或构件在运行过程中进行监测,或者在检修期进行检测,能及时发现影响其安全运行的隐患,防止事故。这对于重要的大型设备,如核反应堆、桥梁建筑、铁路车辆、压力容器、输送管道、飞机、火箭等,能防患于未然,具有重要的意义。

在役检测不仅可以及时发现隐患,更重要的是可以根据发现的早期缺陷及其发展程度(如疲劳裂纹的萌生与发展),在确定其方位、形状、尺寸和性质等的基础上,对装置或构件能否继续使用及其安全运行寿命进行评价。

(3) 质量鉴定

制成品在进行组装或投入使用之前,应进行最终检验,即质量鉴定。其目的是确定被检对象是否达到设计性能,能否安全使用,即判断其是否合格。这既是对前面加工工序的验收,也可以避免给以后的使用造成隐患。应用无损检测技术在铸造、锻压、焊接、热处理以及切削加工的工序中,检测材料或部件是否符合要求,可以避免对不合格产品继续进行徒劳无益的加工。这项工作一般叫做质量检查,实质上也属于质量鉴定的范畴。

质量鉴定是非常必要的,特别是那些将在复杂恶劣条件(如高温、高压、高应力、高循环载荷等)下使用的产品。在这方面,无损检测技术表现了能进行百分之百检验的无比优越性。

无损检测是实现质量控制、保证产品安全可靠、节约原材料、改进工艺和提高

劳动生产率的重要手段,目前已成为产品制造和使用中不可缺少的组成部分。

1.2.1.3 无损检测技术的特点

无损检测技术具有以下特点(刘贵民,2006)。

(1) 不会对构件造成任何损伤

无损检测是在不破坏构件的前提下,利用材料物理性质的变化来判断构件内部和表面是否存在缺陷,不会对材料、工件和设备造成任何损伤。

(2) 为查找缺陷提供了一种有效方法

任何部件、设备在加工和使用过程中,由于其内、外部各种因素的影响,不可避免地会产生缺陷。使用人员有时不但要知道其是否有缺陷,还要确定缺陷的位置、大小及其危害程度,并对其发展进行预测和预报。无损检测诊断技术为此提供了一种有效方法。

(3) 能够对产品质量实施监控

产品在加工和成型过程中,如何保证质量及其可靠性非常关键。无损检测技术能够在铸、锻、冲压、焊接、切削加工等各工序中,检查工件是否符合要求,可避免徒劳无益的加工,从而降低产品成本,提高产品质量和可靠性,实现对产品质量的监控。

(4) 能够防止因产品失效引起的灾难性后果

机械零部件、装置或系统,在制造或服役过程中丧失其规定功能而不能工作,或不能继续可靠地完成其预定功能称为失效。失效是一种不可接受的故障。1986年1月28日,美国“挑战者”号航天飞机升空70s后发生爆炸,7名宇航员全部遇难,直接经济损失12亿美元。究其原因是由于固体火箭助推器尾部连接处的O形密封圈失效使燃料泄漏所致。如果用无损检测诊断技术提前或及时检测出失效部位和原因,并采取有效措施,就可以避免灾难性事故的发生。

(5) 应用范围广阔

无论是金属材料(磁性和非磁性,放射性和非放射性),还是非金属材料(水泥、塑料、炸药等);无论是锻件、铸件、焊件,还是板材、棒材、管材;无论是内部缺陷,还是表面缺陷,都可以应用无损检测技术进行缺陷检测。因此,无损检测技术广泛应用于各种设备、压力容器、机械零部件等的检测诊断,受到工业界的普遍重视。

由于无损检测技术具有以上特点,因此在工程中得到了广泛应用。

1.2.1.4 无损检测技术的发展历程

(1) 无损检测技术发展的三个阶段

无损检测经历了三个发展阶段,即无损检查(nondestructive inspection, NDI)、无损检测(nondestructive testing, NDT)和无损评价(nondestructive evaluation, NDE),见表1-1。目前一般统称为无损检测(NDT)。