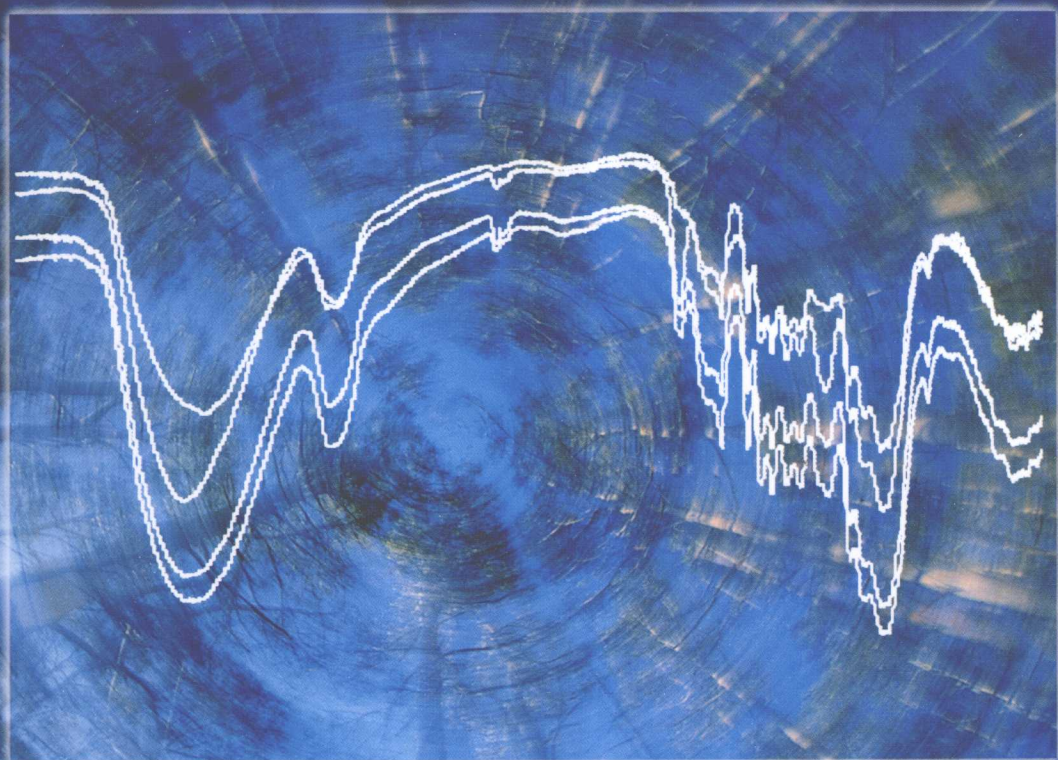


宋魁彦 著
李 坚 审



木材顺纹压缩 与多维弯曲技术



科学出版社
www.sciencep.com

木材顺纹压缩与多维弯曲技术

宋魁彦 著
李 坚 审

科学出版社

北 京

内 容 简 介

利用多学科知识交叉融合提出的木材顺纹压缩与多维弯曲技术,已成为木材科学新技术之一。通过试验研究,作者所在的研究团队实现了木材顺纹压缩和多维弯曲,并可获得较小的弯曲曲率半径。这一技术必将改变木材的特性,提高木材的使用价值。本书是在系统的科学试验研究的基础上撰写而成的,详细地阐述了适合木材顺纹压缩的软化处理方法,木材顺纹压缩的机理,顺纹压缩中应力-应变的本构关系,压缩和回弹中木材弹性、弹塑性的变化规律,顺纹压缩木材在允许的应变范围内木材弯曲后弹性、弹塑性的变化规律,确定木材单维和多维弯曲的最小曲率半径;探讨了弯曲的曲线形零件定形处理方法、定形过程中的各种条件变化对木材弯曲定形的影响。

本书可供木材科学与技术、生物质复合材料、木材功能性改良、木材保护、家具和木制品设计,以及生产等领域的研究人员、工程技术人员及相关专业的师生学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

木材顺纹压缩与多维弯曲技术/宋魁彦著. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-026724-5

I. ①木… II. ①宋… III. ①木材-压缩-技术②木材弯曲-技术
IV. ①S781

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第019603号

责任编辑:莫结胜 刘 晶/责任校对:李奕莹

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

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>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年2月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010年2月第一次印刷 印张:11 1/4

印数:1—1 500 字数:227 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

多年来,人们针对木材弯曲进行了大量的研究和实践,但是都没有彻底地解决木材弯曲曲率半径小、成功率低及难以实现多维弯曲的问题。随着木制品设计和生产的不断发展,常常需要在产品的造型设计上添加曲线和曲面以满足制品的审美和使用功能的要求,但是采用实木单向弯曲方法生产的曲线形零件存在曲率半径大、成功率低等问题,一直是阻碍国内外木制曲木产品开发和生产的关键问题。

木材顺纹压缩与多维弯曲技术是木材在纵向上进行压缩,然后进行多维方向的弯曲并可获得较小弯曲曲率半径的一项技术,该技术可以拓宽木材应用领域,是一项能够科学、合理地利用木材资源,有利于环保的新技术。木材顺纹压缩与多维弯曲技术可以改变产品的造型、结构和生产现状,使产品的造型优美、结构简洁,同时在生产上既可以实现大规模的专业化生产,又适用于小批量的个性化生产,必将在木制品、建筑门窗、楼梯扶手及装饰材料等领域得到高效的利用。该项研究结果的取得,可以实现木材的精深加工,提高木材的附加值,降低木制品的生产成本,提高企业的经济效益,因此该技术符合我国倡导的由粗放型向集约型方向转化的政策,同时也是一个无污染、投资回报率高且能充分利用我国有限木材资源的先进技术。应用这项技术,必将给我国的木制品行业创造新的活力和经济增长点,为有效地利用木材创造更加广阔的空间。

关于木材顺纹压缩与多维弯曲技术,迄今为止,国内外尚无相关理论的研究报道。丹麦工艺研究所下属的木材和家具研究所经过8年多的生产应用研究,于1988年取得了突破性的进展,并由丹麦压缩木机器有限公司首先制造了工业用的木材纵向压缩样机,用于生产压缩木。国内一些企业引进了几台设备,但是由于丹麦的设备对木材树种的选择要求比较严格,多数国内树种被排除在木材顺纹压缩的范围之外。国内使用这类设备的厂家已开始试图利用我国生长的树种木材试验生产压缩弯曲木,但是由于木材顺纹压缩率较低,获得的木材弯曲曲率半径较大,难以满足木制曲线形零件的生产需要。由于我国树种和国外树种在结构和细胞壁的成分上存在差异,因而必须从基础上下工夫,以解决基础理论研究上的缺憾。

宋魁彦教授自2002年开始致力于该领域的试验和理论研究,并在总结长期研究成果的基础上撰写了《木材顺纹压缩与多维弯曲技术》一书。该书详细地阐述了适合木材顺纹压缩的软化处理方法,木材顺纹压缩的机理,顺纹压缩中应

力-应变的本构关系，压缩和回弹中木材弹性、弹塑性的变化规律，顺纹压缩木材在允许的应变范围内木材弯曲后弹性、弹塑性的变化规律，确定木材单维和多维弯曲的最小曲率半径的方法；同时探讨了弯曲的曲线形零件定形处理方法及定形过程中的各种条件变化对木材弯曲定形的影响。

相信该书的出版发行，必将为木材改性领域拓展更加广阔的空间，并为进一步应用于生产实际提供重要的理论指导。

李 坚

2009 年 4 月

前 言

人们在很早以前就采用蒸煮的方法软化木材，成功地实现了木材的弯曲，并制造出第一把实木弯曲成形的椅子。从那时起，这种工艺在木制品或家具制造业中得到了应用。1842年，托耐特采用化学、机械法弯曲木材的技术在维也纳获得专利并投入了工业化生产。后来人们在木材软化处理上相继研究出水热、微波和化学药剂软化处理方法，但是这些方法仅仅适用于木材的单维弯曲，而且这样弯曲很容易造成木材的断裂，难以获得较小的弯曲曲率半径。

多年来，尽管人们在探究木材弯曲方面进行了大量的研究和实践，但是这些研究主要集中在木材单维弯曲方面，相关的研究内容是如何找到更好的木材软化处理方法、缩小单维弯曲曲率半径、提高木材弯曲的成功率，以及木材弯曲后的曲线形形状的固定方法，但这些研究都没有彻底地解决木材弯曲曲率半径小、成功率低，以及实现多维弯曲的问题。

木材顺纹压缩与多维弯曲技术研究主要涉及四个方面：一是在木材顺纹压缩前，首先将木材进行软化处理，优化软化处理方法，确定适合木材顺纹压缩的软化处理技术；二是对软化处理后的木材进行顺纹压缩，建立木材顺纹压缩中应力-应变的本构关系，分析压缩和回弹中木材的弹性、弹塑性的变化规律并提出木材顺纹压缩技术；三是在允许的应变范围内对顺纹压缩木材进行单维和多维弯曲，通过分析木材弯曲后的弹性、弹塑性的变化规律，初步建立木材单维弯曲中应力-应变的本构关系，确定木材单维和多维弯曲的最小曲率半径；四是对弯曲的曲线形零件进行定形处理，分析定形方法及定形过程中的各种条件变化对木材弯曲定形的影响。本技术是以东北重要的商品材树种——榆木和水曲柳作为试材，通过上述研究最终得到木材顺纹压缩与多维弯曲技术。

木材顺纹压缩与多维弯曲技术蕴涵着多学科知识的交叉融合，具有一定的理论深度和鲜明的应用性，是当今备受关注的研究热点之一。该技术特别是在木材顺纹压缩应力-应变本构关系的建立、多维弯曲和定形技术等方面，可以填补迄今为止尚无相关研究报道的空白，拓宽木材应用领域，是一项科学、合理地利用木材资源，有利于环境保护的新技术。在未来的木制品设计和生产中，实体木材的多维弯曲可以改变木制品的造型和结构特征，为有效地利用木材拓展了空间。

在本书的撰写过程中，作者援引和参考了相关领域的研究论文、著作及相应的研究成果，在此向相关作者表示衷心的感谢！

在木材顺纹压缩和多维弯曲技术研究过程中，东北林业大学李坚教授给予了

精心的指导并提出了许多重要的和前瞻性的意见，这为该技术的理论和实践研究奠定了重要的基础；李坚教授亦对书稿进行了审阅，并对本书的撰写提出了许多宝贵的意见和建议，同时为本书作序。该成果的取得和立项出版等也得到了国家外国专家局“111计划”项目（B08016）的支持，在此特表示衷心的感谢！

著 者

2009年4月

目 录

序

前言

1 绪论	1
1.1 木质曲线形零件生产现状	1
1.1.1 实木单向弯曲	1
1.1.2 薄板胶合弯曲	1
1.1.3 锯制曲线形零部件	2
1.2 木材顺纹压缩与多维弯曲技术概述	2
1.2.1 木材顺纹压缩与多维弯曲技术要点	2
1.2.2 木材顺纹压缩与多维弯曲技术特点和应用	3
1.2.3 木材顺纹压缩与多维弯曲技术研究难点	3
1.3 木材顺纹压缩与多维弯曲技术研究的设想和创新	4
1.3.1 木材顺纹压缩与多维弯曲技术研究的设想	4
1.3.2 木材顺纹压缩与多维弯曲技术创新	5
2 木材顺纹压缩与弯曲技术基本理论	6
2.1 木材细胞壁结构概述	7
2.1.1 木材细胞壁层结构	7
2.1.2 细胞壁的超微结构	8
2.1.3 细胞壁的结构特征	9
2.1.4 木材微观构造	9
2.2 木材主要成分的物理化学性质概述	10
2.2.1 木材中的纤维素	10
2.2.2 木材中的半纤维素	11
2.2.3 木材中的木质素	11
2.2.4 木材中的抽提物	12
2.3 木材软化处理基本理论	12
2.3.1 物理方法	13
2.3.2 化学方法	18
2.4 木材压缩基本理论	20
2.4.1 材料力学特征	20

2.4.2	木材横纹压缩	22
2.4.3	木材顺纹压缩	24
2.5	木材弯曲基本理论	25
2.5.1	木材弯曲原理	25
2.5.2	木材单维弯曲研究要点	27
2.6	木材弯曲定形基本理论	30
2.6.1	木材定形机理	30
2.6.2	木材弯曲定形方法	32
3	木材顺纹压缩与多维弯曲技术研究和试材制备	37
3.1	研究内容	37
3.2	技术路线	38
3.3	树种选择与试材制备	38
3.3.1	树种选择	38
3.3.2	试材制备	42
4	木材顺纹压缩软化处理技术	44
4.1	试验和测试方法	44
4.1.1	水热软化处理	44
4.1.2	复配碱液软化处理	44
4.1.3	水热-微波软化处理	45
4.1.4	最大顺纹压缩率测试	46
4.1.5	单维和多维弯曲曲率半径测试	46
4.1.6	木材纤维相对结晶度测试	46
4.1.7	木材表面性质的 FTIR 测试	46
4.1.8	木材化学组分测试	47
4.2	结果和讨论	47
4.2.1	水热软化处理	47
4.2.2	复配碱液软化处理	54
4.2.3	水热-微波软化处理	63
4.2.4	木材软化处理技术要点	73
5	木材顺纹压缩技术	76
5.1	试验和测试方法	76
5.1.1	木材力学指标测试	76
5.1.2	木材密度测试	76
5.1.3	木材微观构造观察	77
5.1.4	木材顺纹压缩率和 PDR 测试	77

5.2 结果与讨论	77
5.2.1 木材顺纹压缩应力-应变关系	77
5.2.2 木材顺纹压缩应力-应变本构关系建立	86
5.2.3 木材顺纹压缩率和 PDR 变化	91
5.2.4 木材顺纹压缩前后密度变化	94
5.2.5 木材顺纹压缩前后微观构造变化	97
5.2.6 木材顺纹压缩技术要点	103
6 木材多维弯曲技术	106
6.1 试验和测试方法	106
6.1.1 木材力学指标测试	106
6.1.2 木材微观构造观察	106
6.1.3 木材弯曲曲率半径测试	107
6.2 结果和讨论	107
6.2.1 木材弯曲曲率半径变化规律	107
6.2.2 木材弯曲力学分析	115
6.2.3 木材单维弯曲应力-应变本构关系的建立	117
6.2.4 木材弯曲后微观构造变化	121
6.2.5 木材多维弯曲技术要点	123
7 木材多维弯曲定形技术	125
7.1 试验和测试方法	125
7.1.1 直接干燥定形	125
7.1.2 水热-干燥定形	125
7.1.3 微波-干燥定形	126
7.1.4 异氰酸酯树脂定形	126
7.1.5 酚醛树脂定形	127
7.1.6 定形结果的快速测试	127
7.1.7 弯曲木材含水率变化测试	127
7.1.8 微波处理的木材温度测试	128
7.2 结果和讨论	128
7.2.1 榆木木材多维弯曲定形分析	128
7.2.2 水曲柳木材多维弯曲定形分析	144
7.2.3 木材多维弯曲定形技术要点	159
参考文献	163
后记	168

1 绪 论

1.1 木质曲线形零件生产现状

木材由于自身的特性,已经不能满足现代人们采用木材制作多品种产品的需要。在木制品设计中,常常需要在产品的造型设计上添加曲线和曲面以满足制品的审美要求和使用功能要求。在木制品的生产上,现今用于生产曲线形零部件的方法主要有实木单向弯曲、薄板胶合弯曲和锯制曲线形零部件三种方法^[1~4]。

1.1.1 实木单向弯曲

实木单向弯曲是目前生产中采用的一项弯曲加工技术,该技术首先将木材进行软化处理,然后采用外附钢带、内衬弯曲模具的方法进行弯曲,最后采用各种处理方法实现弯曲件的定形加工。

实木单向弯曲的优点是:方材弯曲后的零件基本上保持了直线形方材原有的力学性质,在实际使用中,弯曲后的曲线形零件强度还有所提高;弯曲后的曲线形零件的加工方法与直线形零件的加工方法基本相同,而且零件加工后的表面保持了木材原有的纹理,容易装饰处理。

实木单向弯曲的缺点是:生产工艺比较复杂,工艺条件难以控制,必须配备专用的加工设备;常常由于选材或工艺控制不当造成弯曲毛料的损坏;木材弯曲的曲率半径大,成功率低,国内生产企业实木单向弯曲的成功率仅为60%~75%。

1.1.2 薄板胶合弯曲

薄板胶合弯曲是由多层平直涂胶的薄板经胶压弯曲,待胶层固化后制成的曲线形部件。薄板胶合弯曲是木材的二次加工,不属于完整意义上的木材弯曲。

薄板胶合弯曲与实木单向弯曲相比具有以下优点:薄板胶合弯曲中芯层材料等级可以低于面层材料,因此采用薄板胶合弯曲可以有效地利用等级较低的材料;薄板胶合弯曲可以制成复杂的曲线形部件;薄板胶合弯曲的形状稳定性好,可以用于室外;薄板胶合弯曲的生产工艺相对简单。

薄板胶合弯曲的缺点是:采用大量的胶黏剂使其成形和固定,不符合产品的

环境保护要求；薄板胶合弯曲生产的零部件，由于薄板的侧面暴露在外，涂饰和装饰效果较差。

1.1.3 锯制曲线形零部件

锯制曲线形零部件方法有两种：一是直接在锯材的配料上通过画线工序，配制出曲线形方材毛料，然后采用铣型加工制成曲线形零件；二是根据生产的效率、曲线形部件的复杂程度、曲线形部件的曲率半径等要求，首先采用实体木材制成实木拼板和集成材，再经过画线工序、配料和铣型加工制成曲线形部件。

锯制曲线形零部件生产和应用的优点是：加工工艺简单，不需要专门的生产设备；可以按需要生产各种类型的曲线形零部件，因此在现代木制品生产中得到了广泛的应用。

锯制曲线形零部件生产和应用的缺点是：锯制的曲线形零部件，由于木材的横向部分纤维被切断，因此零部件的强度低；木材的损失率大，通常随着制成的曲线形零部件曲率半径减小，木材的损失率逐渐加大，目前国内生产企业生产的锯制曲线形零部件的木材平均净料损失率高达 35%~50%。

据统计，我国每年用于制造曲线形零部件使用的优质规格料达 276 000 m³，如果毛料加工损失率平均为 12%，加上实木弯曲、锯制曲线形零部件的损失率平均为 38%，合计总损失率约为 50%，即损失优质规格料 138 000 m³。优质规格料以 2000 元/m³ 计算，一年仅原料损失就达 2.76 亿元，这严重地阻碍了我国木制曲木产品的开发和生产。

1.2 木材顺纹压缩与多维弯曲技术概述

1.2.1 木材顺纹压缩与多维弯曲技术要点

木材顺纹压缩是利用纤维素具有可以伸缩的弹性性能，使纤维或分子链之间产生纵向位移及细胞壁产生褶皱，改变了木材力学性能，并在后续弯曲过程中使木材细胞壁上的褶皱逐渐展平，最大限度地缩小弯曲曲率半径，达到多维弯曲。该技术突破了实体木材只能进行简单的单维弯曲和不能获得较小弯曲曲率半径的难点。木材顺纹压缩中前期的软化处理及控制顺纹压缩的工艺参数等都是研究的难点。

木材顺纹压缩与多维弯曲技术是木材在纵向上进行压缩，然后进行多维方向的弯曲，并可获得较小弯曲曲率半径的技术。该技术的关键点是：首先，实现木材多维弯曲和获得较小弯曲曲率半径，必须研究适合木材顺纹压缩的软化机理和

工艺条件,提高木材顺纹压缩和弯曲的性能;其次,研究木材软化处理后的顺纹压缩机理和工艺,使木材在顺纹压力的作用下,细胞壁中微纤丝之间产生滑移,导致木材细胞壁的壁层纵向形成褶皱,进而实现木材的多维弯曲,其技术重点是研究应力-应变的变化规律,建立应力-应变的本构关系,探讨木材树种、密度、化学组分和结构等的变化与该技术的关系;最后,研究多维弯曲及多维弯曲后的定形机理。木材软化处理和顺纹压缩技术参数等因素是决定木材实现顺纹压缩与多维弯曲的主要技术条件,这些技术条件与木材的细胞结构、木材主要成分中化学组分的变化、细胞壁微纤丝的结构变化有着错综复杂的内在联系^[5~9]。

1.2.2 木材顺纹压缩与多维弯曲技术特点和应用

木材顺纹压缩与多维弯曲技术主要是采用物理加工方法,因此具有以下特点:该项技术无须使用胶黏剂或化学材料,是一项生态环保技术;木材经过软化、压缩处理后可以进行多维方向弯曲,并且弯曲曲率半径小;该技术能充分合理利用有限的木材资源,压缩和弯曲的成功率几乎可以达到100%(试验条件下),因此生产成本低,经济效益好,使产品具有很强的市场竞争力;采用木材顺纹压缩与多维弯曲技术制成的产品,使木制品的造型、结构和工艺等不受木材材性的限制,可以设计和生产各类造型奇特的木制品。

该项技术可以广泛地应用在许多领域,如家具中的各类曲线形零件,建筑上的楼梯扶手拐角,曲线门和门框,车、船上的各类木制曲线扶手,室外各类公共建筑构件,室内装修的各种曲线形零部件,三维曲线的雕刻和工艺品等;可以实现木材的精深加工,提高木材的附加值,降低木制品的生产成本,提高企业的经济效益。该技术符合我国倡导的由粗放型向集约型方向转化的政策,也是一个无污染、投资回报率高和充分利用我国有限木材资源的先进技术;该技术可以拓宽木材应用领域,是一项科学、合理地利用木材资源,有利于环境保护的新技术。在未来木制品的设计和生产中,实体木材的多维弯曲可以改变木制品的造型和结构特征,为有效地利用木材创造了更加广阔的空间。

因此,尽快研究并应用这项技术,必将给我国的木制品行业带来新的活力,创造经济增长点。由于在生产领域的广阔前景,这项技术一直受到发达国家的广泛重视,纷纷投入大量的人力、物力和财力,致力于基础理论和实际应用的研究。

1.2.3 木材顺纹压缩与多维弯曲技术研究难点

木材顺纹压缩与多维弯曲技术蕴涵着多学科知识的交叉融合,具有一定的理

论深度,是当今备受关注的研究热点之一。该项研究,特别是在木材顺纹压缩的应力-应变本构关系的建立、多维弯曲和定形技术等方面,国内外尚无相关研究报道,只是笔者前期进行了一些顺纹压缩与多维弯曲技术的工艺研究。国内一些企业引进了几台丹麦的设备,但是由于丹麦的设备对木材树种的选择要求比较严格,多数国内树种被排除在木材顺纹压缩的范围之外。国内使用这类设备的厂家已开始试图利用我国生长的树种木材试验生产压缩弯曲木,但是由于木材顺纹压缩率较低,获得的木材弯曲曲率半径较大,难以满足生产需要。由于我国树种和国外树种在结构和细胞壁的成分上存在差异,因此必须从基础上下工夫,以解决基础理论研究上的缺憾。

在木材的软化处理、压缩和定形上,多数学者主要研究的是适合横纹压缩或直接单维弯曲的软化处理方法,并以此探讨木材横纹压缩和单维弯曲定形技术。这些研究中的一些相关机理的研究可以为本技术提供一定的帮助,但是由于木材横纹和顺纹压缩存在着较大的差异,因此对于本研究还有许多亟待解决的问题。

木材横纹压缩研究中,各国都取得了一些成绩,特别是日本在该方面的研究取得了较大的突破,并在一定的条件下应用于实际,中国在横纹压缩大变形的试验领域内也实现了突破,找到了横纹压缩大变形应力-应变的定性和定量关系并建立了合理的力学模型。而定性和定量表达木材顺纹压缩的应力-应变关系是突破这一技术的关键点,尽管丹麦在工艺上实现了较大的突破,但是在机理方面没有进行深入细致的研究,尚有许多未解之谜,因此,在木材顺纹压缩、多维弯曲及定形机理等方面尚有许多问题需要探讨。

1.3 木材顺纹压缩与多维弯曲技术研究的设想和创新

1.3.1 木材顺纹压缩与多维弯曲技术研究的设想

木材顺纹压缩与多维弯曲技术研究的总体设想是:①探索出适合木材顺纹压缩的软化处理方法,分析其软化机理并优化软化工艺参数;②对软化处理后的木材进行顺纹压缩,建立木材顺纹压缩中应力-应变的本构关系,分析压缩和回弹中木材的弹性、弹塑性的变化规律;③对顺纹压缩后的木材进行弯曲,以获得较小的弯曲曲率半径并实现多维弯曲,分析木材弯曲后的弹性、弹塑性的变化规律,初步建立木材弯曲中应力-应变的本构关系,确定木材单维和多维弯曲的最小曲率半径;④对于弯曲的曲线形木材进行定形处理,分析定形方法、定形过程中的各种条件变化对弯曲木材定形的影响。

1.3.2 木材顺纹压缩与多维弯曲技术创新

实现木材顺纹压缩与多维弯曲技术的设想,将从以下几个方面进行研究和创新。

(1) 首次在木材材性上,将榆木、水曲柳的幼龄材和成熟材分别进行了木材软化、顺纹压缩、单维和多维弯曲,以及弯曲定形的系统性研究。

(2) 在软化处理研究上,探索出幼龄材、成熟材在软化处理前、后的木材化学组成成分、相对结晶度等方面的变化规律与木材顺纹压缩、多维弯曲及定形的关系。特别是针对木材软化不足或过度对木材顺纹压缩的影响,探索出适合木材顺纹压缩的软化处理方法和工艺条件。

(3) 在顺纹压缩研究上,建立顺纹压缩应力-应变本构关系,分析压缩和回弹中木材的弹性、弹塑性、密度变化,以及顺纹压缩后细胞壁内形成褶皱的变化规律,揭示木材顺纹压缩的机理。

(4) 在多维弯曲研究上,针对木材弦向、径向弯曲曲率半径的大小,分析木材的材性、顺纹压缩率、永久变形率(permanent deformation ratio, PDR)等因素与木材单维和多维弯曲曲率半径的关系,初步建立单维弯曲应力-应变的本构关系,分析木材细胞壁褶皱和展平的基本变化规律。

(5) 在弯曲定形研究上,探索出适合本技术的定形方法和定形机理等,特别是分析和研究了定形过程中的各种条件变化对多维弯曲试材定形的影响。

2 木材顺纹压缩与弯曲技术基本理论

人们在很早以前就用火烤法弯曲木材,但由于弯曲曲率半径有限,远远不能满足木制曲线形零部件生产的需要。1830年德国工匠采用蒸煮法软化木材,成功地实现了木材的弯曲,并首先制造了第一张实木弯曲成形的椅子。从那时起,这种工艺在家具制造业中开始了应用。1842年,托耐特采用化学法和机械法弯曲木材的技术在维也纳获得了专利并投入了工业化生产,1853年托耐特在生产中发现,若板材达到一定厚度,在弯曲木材的凸面接近中心处会出现崩裂,之后托耐特经过反复研究和试验,发现在弯曲木材的凸面加上一条金属带,使木材弯曲时的中性层外移,可以获得较小弯曲曲率半径^[1~3,10]。第二次世界大战时,这种弯曲木还应用于飞机制造业和要求较高的建筑构件上。后来人们在木材软化上相继研究出水热处理、微波处理和化学药剂处理等方法^[1],但是这些方法仅仅适用于木材的单维弯曲,而且这样弯曲很容易造成木材的断裂且难以获得较小单维弯曲曲率半径。

木材顺纹压缩与多维弯曲技术的理论和应用研究在我国尚处在基本理论和试验研究阶段,没有在实际应用上得到进一步的深入研究。一些工厂采用丹麦压缩木机器有限公司生产的设备进行了一些压缩木试验,得到榆木顺纹压缩率为11.59%,水曲柳顺纹压缩率为12.88%;当解除外力后,榆木PDR为4.41%,水曲柳PDR为4.4%^[5]。由于得到的木材顺纹压缩率和压缩回弹永久变形率的参数不够理想,因此限制了木材多维弯曲的曲率半径。

国内外对木材顺纹压缩方面的研究很少,以往只在木材横纹压缩方面进行了研究,德国在20世纪30年代就开始了横纹压缩的研究,并应用到生产实际中。木材横纹压缩是在尽可能不破坏木材细胞壁的前提下,采用前期软化处理后,横纹压缩木材,提高木材的利用价值。它可以使材质轻软、密度较低的木材通过压缩加工使其在物理力学性能方面得到改善,同时还可对不同形状的木材进行整形,但是存在横向压缩材吸湿后膨胀和恢复率较大的缺陷,有待进一步研究^[11~20]。

木材顺纹压缩是利用纤维素具有可以伸缩的弹性性能,使纤维或分子链之间产生纵向位移,细胞壁产生褶皱,改变了木材力学性能,在后续弯曲过程中,木材细胞壁上的褶皱会逐渐展平,达到最大限度地缩小弯曲曲率半径以及实现多维弯曲,突破了实体木材只能进行简单的单维弯曲和不能获得较小弯曲曲率半径的难点。木材顺纹压缩中,前期的软化及控制顺纹压缩的工艺参数等都是研究的难点。由于顺纹压缩和横向压缩的目的不同、研究方法不同,因此各自的压缩机

理、定形机理和工艺参数也存在较大差异。

2.1 木材细胞壁结构概述

木材是由许许多多具有一定壁层厚度的空腔细胞构成的,这些细胞的细胞壁是植物细胞所特有的一种结构。木材细胞壁的结构特性,决定了木材及其制品的性质和品质。

2.1.1 木材细胞壁层结构

木材是由许多细胞组成的,细胞之间由胞间质黏结在一起。树木细胞的形成与增大是由形成层分裂形成新的细胞,而这些细胞主要由细胞核、核仁、原生质和细胞壁等组成,随着细胞的增大,原生质不再充填胞腔,而在胞腔内出现胞液,到细胞成熟时,其体积比新生细胞增大数倍或数百倍,原生质被增多的细胞胞液挤向胞腔周围,同时细胞核移向细胞壁的一侧,形成非常厚的细胞壁,此时胞腔几乎形成了空腔。不论树木的种类差异多大,细胞壁的薄厚差距多大,细胞壁都具有分层现象。在光学显微镜下,通常可以将细胞壁分成胞间层、初生壁和次生壁^[1,20]。

2.1.1.1 胞间层

胞间层是细胞分裂后最早形成的分隔部分,随着细胞的形成,在胞间层的两边形成初生壁。树木胞间层的厚度一般为 $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$,主要由木质素及少量胶体状的果胶物质组成,在偏光显微镜下可以显出各向同性。不过,在成熟的细胞中已很难区别出胞间层,因为通常在胞间层出现后,很快就在它的两边沉积了纤维素并形成了初生壁,这种沉积过程是逐渐转变的。到了有次生壁发育的细胞壁上,胞间层常常很薄,已经很难将胞间层和随后形成的初生壁之间分出界限,通常又将胞间层与初生壁合在一起,称之为复合胞间层^[1,21,22]。

2.1.1.2 初生壁

初生壁是细胞分裂后在胞间层两边最初沉积的壁层,其壁层厚度一般为 $0.2\sim 3\ \mu\text{m}$ 。初生壁中的纤维素含量比较少,一般仅占该壁层成分的 $4\%\sim 10\%$,但是由此构成的微纤丝具有高度的独立性,互相分开成为疏松的网状,具有弹性。在微纤丝之间充填着大量的木质素,这就是为什么初生壁与胞间层难以分开的缘故,在初生壁和胞间层构成的复合胞间层中,主要成分是木质素,其次是半纤维素和纤维素。初生壁外表面上沉积的微纤丝排列方向与细胞轴略成直角,随