



木质功能材料科学技术丛书

# 人工林木材的 指接和胶合

傅 峰 林兰英 付跃进 著



科学出版社

木质功能材料科学技术丛书

# 人工林木材的指接和胶合

傅 峰 林兰英 付跃进 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是国际热带木材组织 (ITTO) 项目 PD69/01 Rev.2 (1) “改进与多种利用中国南方热带人工林木材, 以减少天然林供应不足的压力” 和中日政府间专项技术合作 (JICA 渠道) “中国人工林木材研究” 项目的研究成果。本书以扩大我国人工林木材资源供给和推进木材资源增值利用为目标, 针对我国人工林木材资源加工技术短缺和高效利用不足的现状, 以主要的人工林木材为研究对象, 在科学试验的基础上, 针对人工林木材的特点, 系统、全面地探讨了木材材质和胶黏剂、指接参数的确定、指接工艺和性能、指接的无损预测和有限元分析、胶合工艺和性能、改善胶合性能的方法及胶合耐久性评价等工艺和技术。本书的相关研究成果将开拓我国人工林木材资源增值利用途径, 为推进林产品加工产业升级、带动林业区域特色经济发展提供科技支撑。

本书适合木材科学与技术学科的广大师生、科研工作者, 以及木材加工和家具生产企业的工程技术人员参考阅读。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

---

人工林木材的指接和胶合/傅峰, 林兰英, 付跃进著. —北京: 科学出版社, 2016.1  
(木质功能材料科学技术丛书)

ISBN 978-7-03-046877-2

I. ①人… II. ①傅… ②林… ③付… III. ①人工林-木材接合-研究  
IV. ①TS654

---

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 312377 号

---

责任编辑: 张会格 白 雪 / 责任校对: 张凤琴  
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 北京铭轩堂广告设计有限公司

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

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

\*

2016 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张: 11 1/4

字数: 270 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

近年来,我国加大种植和培育人工林的力度,人工林面积已增加到 6933 万  $\text{hm}^2$ ,蓄积量达到 24.83 亿  $\text{m}^3$ ,继续保持世界首位。此外,由于树龄结构不合理,我国可供采伐利用的成熟林资源少,使可供加工利用的木材资源愈发匮乏。为了满足人们对木质材料的消费需求,我国每年大量从国外进口木材,已成为世界第一大木材进口国。而随着我国部分人工林逐渐成熟并进入采伐期,若能对其进行合理的加工利用,必将大大缓解我国木材的供需矛盾。

集成材是用板材或小方材按木纤维平行方向,在厚度、宽度和长度方向胶合而成的木材制品。集成材没有改变木材的结构和特点,真正意义上实现了小材大用、劣材优用,并且集成材材性稳定,性能优于实体木材。因此,集成材可以代替实体木材,应用于木材行业的各领域,满足人们对实木制品的消费需求。

集成材最大的特点在于将短小的实体木材加工成大断面、长尺寸的板材或方材,从而可提高木材的使用率和附加值,使木材资源得到充分利用,但指接和胶合的工艺与质量问题是目前集成材发展的突出障碍。由于木材指接、胶合涉及木材性质、胶黏剂类型和性能、胶合工艺和指接工艺等多方面因素,以及我国人工林木材种类丰富,不同树种间材质变异大等,人工林木材实木的指接、胶合还存在许多问题,研究人工林实木指接和胶合的工艺与性能,对人工林木材的深化加工利用具有重要意义。

本书以扩大我国人工林木材资源供给和推进木材资源增值利用为目标,针对我国人工林木材资源加工技术短缺和高效利用不足的现状,以主要的人工林木材为研究对象,在科学试验的基础上,针对人工林木材的特点,系统、全面地探讨了木材材质和胶黏剂、指接参数的确定、指接工艺和性能、指接的无损预测和有限元分析、胶合工艺和性能、改善胶合性能的方法、胶合耐久性评价等工艺和技术。本书的相关研究成果将开拓我国人工林木材资源增值利用途径,为推进林产品加工产业升级、带动林业区域特色经济发展提供科技支撑。

本书的相关研究成果得到了 ITTO PD69/01 Rev.2 (I) 和中日政府间专项技术合作(JICA 渠道)等项目的资助。同时,赵喜龙、张玉萍、何盛参加了部分试验工作,在此特致谢忱。本书参考引用了国内外相关文献和资料,在此谨向相关作者表示衷心感谢!

全书在编写过程中,注重基础理论与应用技术相结合,注重内容的广度与深度相结合,以翔实的科学试验数据为依据,语言朴实,结构严谨,力求为从事木材加工和利用的企事业单位和科研工作者及高等院校师生等相关人员提供参考与指导。

鉴于作者水平有限,书中难免存在错误和遗漏之处,敬请读者批评指正。

著 者

2015 年 8 月

# 目 录

## 前言

|                   |    |
|-------------------|----|
| 第一章 指接胶合的技术现状和意义  | 1  |
| 第一节 指接的技术现状       | 1  |
| 一、指接加工的技术现状       | 1  |
| 二、指接加工存在的问题及发展前景  | 6  |
| 第二节 胶合的技术现状       | 7  |
| 一、影响实木胶合性能的主要因素   | 7  |
| 二、实木胶合性能的改进措施     | 12 |
| 第三节 指接胶合的意义       | 14 |
| 一、扩大人工林木材的利用范围    | 14 |
| 二、提高人工林木材的利用率     | 16 |
| 主要参考文献            | 17 |
| 第二章 人工林木材性质与胶黏剂   | 20 |
| 第一节 人工林木材的主要性质    | 20 |
| 一、木材解剖性质          | 21 |
| 二、木材物理特性          | 23 |
| 三、主要力学和化学性质       | 24 |
| 第二节 胶黏剂种类和主要参数    | 24 |
| 第三节 常用胶黏剂的胶合性能    | 25 |
| 一、胶合工艺与性能检测       | 26 |
| 二、影响胶合性能的因子分析     | 27 |
| 三、胶黏剂对几种木材胶合性能的影响 | 30 |
| 主要参考文献            | 35 |
| 第三章 指接参数的确定       | 36 |
| 第一节 指型和铣齿         | 36 |
| 一、指榫的接合与加工        | 36 |
| 二、铣齿刀的安装与组合       | 36 |
| 三、指榫参数            | 38 |
| 四、指接参数            | 39 |
| 第二节 嵌合度端压曲线分析     | 41 |
| 一、非结构指接材的端压确定     | 41 |
| 二、结构指接材的端压确定      | 48 |
| 主要参考文献            | 51 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 第四章 指接工艺与性能 .....         | 52  |
| 第一节 非结构指接材的工艺与性能 .....    | 52  |
| 一、材料和方法 .....             | 52  |
| 二、杉木非结构指接材的性能 .....       | 52  |
| 第二节 结构指接材的工艺与性能 .....     | 55  |
| 一、材料和方法 .....             | 55  |
| 二、樟子松结构指接材的性能 .....       | 56  |
| 第三节 胶种对指接材性能的影响 .....     | 59  |
| 一、材料和方法 .....             | 60  |
| 二、胶种对指接材性能的影响 .....       | 60  |
| 第四节 指型对指接材性能的影响 .....     | 61  |
| 一、材料和方法 .....             | 62  |
| 二、指型对指接材性能的影响 .....       | 62  |
| 第五节 指接材破坏形式分析 .....       | 63  |
| 主要参考文献 .....              | 65  |
| 第五章 指接材的有限元分析 .....       | 66  |
| 第一节 木质材料有限元模型 .....       | 66  |
| 一、木质材料的有限元模型 .....        | 67  |
| 二、破坏准则 .....              | 68  |
| 三、木材弹性常数的测定 .....         | 70  |
| 四、有限元法分析软件 .....          | 70  |
| 五、指接材的有限元分析 .....         | 71  |
| 第二节 木材力学参数测定 .....        | 71  |
| 一、电测法测定木材力学参数 .....       | 71  |
| 二、电测法试验结果分析 .....         | 75  |
| 三、变跨距三点弯曲试验结果分析 .....     | 76  |
| 第三节 指接材有限元模型分析 .....      | 77  |
| 一、ANSYS 模拟分析的基本过程 .....   | 78  |
| 二、指接端压有限元模型分析 .....       | 80  |
| 三、指接材弹性模量有限元模型分析 .....    | 89  |
| 四、指接材抗弯强度有限元模型分析 .....    | 95  |
| 主要参考文献 .....              | 106 |
| 第六章 人工林木材的胶合工艺与胶合性能 ..... | 107 |
| 第一节 胶合工艺对胶合性能的影响 .....    | 107 |
| 一、材料和方法 .....             | 108 |
| 二、胶合工艺对木材胶合性能的影响 .....    | 108 |
| 第二节 胶合面纹理对胶合性能的影响 .....   | 112 |
| 一、材料和方法 .....             | 112 |
| 二、胶合面纹理对胶合性能的影响 .....     | 113 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 三、胶合面纹理的扫描电镜分析 .....     | 115 |
| 第三节 混合树种胶合的胶合性能 .....    | 120 |
| 一、材料和方法 .....            | 120 |
| 二、不同混合树种胶合的胶合性能 .....    | 121 |
| 三、树种混合胶合的剪切强度效率 .....    | 124 |
| 主要参考文献 .....             | 127 |
| 第七章 人工林木材胶合性能的改善措施 ..... | 128 |
| 第一节 胶合面性能及胶合表面处理方法 ..... | 128 |
| 一、胶合面的表面性能 .....         | 129 |
| 二、胶合面处理方法 .....          | 135 |
| 第二节 人工林木材胶合性能的改善措施 ..... | 136 |
| 一、材料和方法 .....            | 136 |
| 二、胶合面处理对木材胶合性能的影响 .....  | 137 |
| 第三节 节子对木材胶合性能的影响 .....   | 141 |
| 一、材料和方法 .....            | 142 |
| 二、节子对木材胶合性能的影响 .....     | 143 |
| 第四节 抽提物含量对胶合性能的影响 .....  | 147 |
| 一、材料和方法 .....            | 147 |
| 二、抽提物含量对樟子松胶合性能的影响 ..... | 148 |
| 主要参考文献 .....             | 151 |
| 第八章 胶合性能的耐久性评价 .....     | 153 |
| 第一节 胶合耐久性的检测方法 .....     | 153 |
| 第二节 EPI 的胶合耐久性 .....     | 155 |
| 一、杉木的 EPI 胶合耐久性 .....    | 155 |
| 二、杨树的 EPI 胶合耐久性 .....    | 156 |
| 三、巨桉的 EPI 胶合耐久性 .....    | 157 |
| 四、尾巨桉的 EPI 胶合耐久性 .....   | 158 |
| 五、柠檬桉的 EPI 胶合耐久性 .....   | 159 |
| 六、窿缘桉的 EPI 胶合耐久性 .....   | 160 |
| 第三节 PVAc 的胶合耐久性 .....    | 161 |
| 一、杉木的 PVAc 胶合耐久性 .....   | 161 |
| 二、杨树的 PVAc 胶合耐久性 .....   | 162 |
| 三、巨桉的 PVAc 胶合耐久性 .....   | 163 |
| 四、尾巨桉的 PVAc 胶合耐久性 .....  | 164 |
| 五、柠檬桉的 PVAc 胶合耐久性 .....  | 166 |
| 六、窿缘桉的 PVAc 胶合耐久性 .....  | 167 |
| 第四节 不同木材的胶合耐久性 .....     | 168 |
| 主要参考文献 .....             | 171 |

# 第一章 指接胶合的技术现状和意义

近年来，我国加大种植和培育人工林的力度，人工林面积已增加到 6933 万  $\text{hm}^2$ ，蓄积量达到 24.83 亿  $\text{m}^3$ （第八次全国森林资源清查），继续保持世界首位，但我国仍然是一个少林国家。此外，由于树龄结构不合理，我国可供采伐利用的成熟林资源少，使可供加工利用的木材资源愈发匮乏。为了满足人们对木质材料的消费需求，我国每年大量从国外进口木材，已成为世界第一大木材进口国。而随着我国部分人工林逐渐成熟并进入采伐期，若能对其进行合理的加工利用，这必将大大缓解我国木材的供需矛盾。

集成材即胶合木（glued laminated timber，简称 Glulam），是用板材或小方材按木纤维平行方向，在厚度、宽度和长度方向胶合而成的木材制品。集成材生产工艺流程如图 1-1 所示。从集成材的生产工艺流程可见，集成材没有改变木材的结构和特点，真正意义上实现了小材大用、劣材优用；从物理性能来看，集成材材性稳定，与其他木质人造板材相比，集成材具有更灵活的幅面及断面结构尺寸；在抗拉、抗压强度和材料质量方面，集成材性能均优于实体木材，强重比大，强度为天然木材的 1~1.5 倍。因此，集成材可以代替实体木材，应用于木材行业的各个领域，满足人们对实木制品的消费需求。

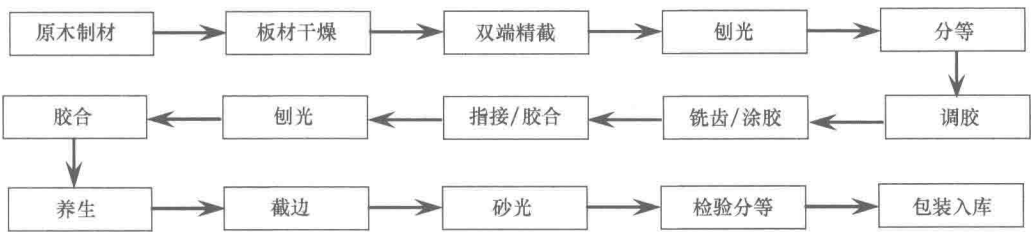


图 1-1 集成材生产工艺流程图

集成材最大特点在于将短小的实体木材加工成大断面、长尺寸的板材或方材，从而可提高木材的使用率和附加值，使木材资源得到充分利用，但指接和胶合的工艺和质量问题是目前集成材发展的突出障碍。由于木材指接、胶合涉及木材性质、胶黏剂类型和性能、胶合工艺和指接工艺等多方面因素，以及我国人工林木材种类丰富，不同树种间材质变异大等，人工林木材实木的指接、胶合还存在许多问题，研究人工林实木指接和胶合的工艺和性能，对人工林木材的深化加工利用具有重要意义。

## 第一节 指接的技术现状

### 一、指接加工的技术现状

随着木材供需矛盾的不断凸显，在木材加工行业中许多新材料得到了很大程度的发

展。指接材在国内的发展虽起步较晚,但随着应用与需求的不断扩大,指接材也逐渐受到关注,在其特点、工艺、胶黏剂、质量检验及应用等多方面,许多国内外学者都进行了深入的研究,取得了大量研究成果,这对于指接材的发展及产业化推广有着非常积极的意义。

### (一) 指接材特点及应用

指接是完成木材工件的纵向接长,是集成材生产的核心环节,其特点是短料长用,劣材优用,可提高木材利用率,是目前应用最广泛的一种木材接长的方法(郝金城,2000)。我国木材资源的日益匮乏,木材供需矛盾也越来越突出。随着人工林的不断发展,小径级木材产量不断增加,如何合理开发利用小径级木材成为解决目前木材供需矛盾的重点。指接材作为一种新型的工程材料,它的出现为小径级木材的利用提供了一条新的途径。通过指接加工,将短木料接长,可获得优质长材,做到小材大用,提高木材的利用率;指接可以得到准确长度的成材,提供给消费者,以减少加工过程中的浪费;通过指接加工,可以矫正木材的弯曲、扭曲变形,获得平直的材料,做到劣材优用;剔除节子、裂纹、腐朽等木材的天然缺陷,然后指接成长材,一定程度上提高了木材等级;指接可以制造较长长度的成材,满足建筑施工的特殊需要;与木材接长的其他方法相比,指接木材损失少,有效胶接面积大,胶合强度高,便于实现机械化生产。

指接材没有改变木材的结构和特点,仍和木材一样是一种天然基材,但从物理性能来看,在抗拉、抗压强度和材料质量的均匀化方面都与实木相差不大。因此,指接材可以代替实木材,应用于木材行业的各个领域,如做门窗部件、橱柜部件、表面美观的地板材料和家具部件。

### (二) 指接生产工艺

指接生产工艺主要包括木材工件的截头、开榫、涂胶、对接、压接、按规定的长度截断和胶层的固化等工序。在工艺控制上,欧阳明八(1987)就提出指接是合理利用小径级速生材的重要技术措施的观点,同时还详细介绍了指接的形式和影响指接强度的因素。此外,李赐生(2001)、李黎(1996)、程瑞香和顾继友(2001)对利用小径木制造指接集成材的应用进行了介绍。郝金城(1992)通过研究齿榫的齿形参数、加工条件及木材材质对指接材强度性能的影响,找出了指接加工的最佳工艺,并测出了指接材的强度性能。

对于指接材的特点及生产工艺,聂涛(1992)和郝金城(1992)提出了指接材生产的最佳工艺参数以及在实际生产中应注意的若干问题。刘艳和鹿振友(2004)探讨了国内外关于指接集成材层板、成品和指接头的力学性能研究情况,并根据我国指接集成材力学性能的研究现状,提出了自己的观点。

随着我国人工林的不断发展,间伐材的数量不断增加,如何合理开发利用间伐材对于缓和我国的木材供需矛盾有着积极而深远的意义。朱焕明和鲍加芬(1994)等对间伐小径木的指接技术进行了探讨。对间伐材的木材含水率、指接端压的大小和时间、指接

后养护时间、涂胶量、指榫规格等对指接材抗弯强度的影响进行了研究,并测定了苯酚-间苯二酚-甲醛树脂胶胶合的指接材快速老化性能。

### (三) 指榫参数

指榫的齿形参数对指接强度有很大影响,且它们之间也相互影响,改变其中任何一个参数,另一个参数自动变化,这种齿形参数相互关系使研究齿形对指接强度的影响复杂化。指榫几何形状的主要参数有指长、指距、指顶宽、斜率和宽距比。关于指榫几何形状各个主要参数对指接强度的影响国内外学者做了大量研究。

按指接与板面的关系,指接材的连接形式可以分为两种(图1-2):垂直型指接(V型),工件宽度方向见指榫;水平型指接(H型),工件厚度方向见指榫。垂直型和水平型的选择原则是根据指接材使用部位及要求的指接强度、指接材的切削余量、指榫加工精度、生产性和安全性等综合判断来决定的(张金菊和申世杰,2006)。就指接板材而言,垂直型与水平型相比较,指接强度几乎相同,但根据实际生产试验的数据,垂直型指接板材的强度比水平型指接板材的强度大5%左右(Janowiak et al., 1994)。

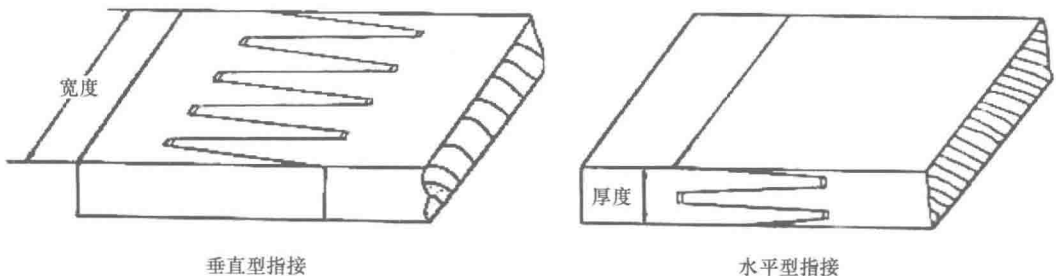


图 1-2 指接材连接形式

国外指接材的发展比国内要早很多,在 20 世纪 30 已经有学者对指接材进行过研究(王庆祥,1995)。为了实现短材的接长,Luxford 和 Krone (1961)设计了多种接头形式,比较它们的连接强度,发现斜接可以获得较好的强度。当斜接的斜度达到  $1/12 \sim 1/10$  时,接长后材料的抗拉强度可以达到实木抗拉强度的  $85\% \sim 90\%$ ,而当斜度达到  $1/20$  时,其抗拉强度几乎可以达到实木的  $95\%$ (Richards and Goodick, 1959; Jessome, 1965)。但是,当斜度过大时,对木材的浪费也非常大。木材指接的连接方式是在斜接的基础上发展起来的,Norman (1955)探讨了小斜度的指接材用作橱柜或门窗的材料的可能性。

对斜度( $t/2L$ )与指接强度和齿距( $t$ )与指接强度的关系研究表明:当  $t/2L = 1/16 \sim 1/8$  时,抗拉强度和抗弯强度达到最大值;当  $t = 4 \sim 10\text{mm}$  时,指接强度达到最大;指顶宽与齿距的比值表示结合部分有效胶合面积的指标,一定程度上表示承载能力的大小,其值小,齿顶宽小,胶合面积大,指接强度高;齿顶宽与齿距的比值根据指接材的用途、刀齿的强度和刀具寿命来确定,一般小于 0.18 用作结构用,小于 0.25 用作非结构用(郝金城,2000)。

在指接材齿形参数对集成材性能的影响研究上,总结出以下几点:①指接材的抗拉

强度随着指接榫头斜度的减小而增大,但是当斜度从 1/12 降低到 1/16 时,强度的增大并不明显;②当指接榫头的斜度和齿顶宽保持不变时,指接榫头的连接强度随着齿间距的增大而增大,但增大的幅度越来越小;③为了获得高强度,必须使指接榫头足够长,斜度足够小,以使有效胶合面积足够大,从而可以抵抗接近实木抗拉强度的剪切载荷作用;④如果前三个条件满足,那么齿顶宽就成为榫头连接强度的决定性因素,齿顶宽越小,则指接榫强度越高;⑤当指接榫头的斜度在 1/16~1/10 的范围内变化时,指接榫净截面上的应力大小并非取决于榫头的斜度,而主要取决于榫头长度与齿间距之比,当两者的比值大于 4 时,最大应力只比材料的抗拉强度小 17%;⑥齿顶宽减小时可以显著提高指接榫的强度,如果需要抵抗较大弯曲和抗拉载荷,那么齿顶宽应在实际可加工的范围内容越小越好。

采用不同形式的指接榫头连接时,材料性能也有很大差异。Bustos 等(2003)研究了不同形式的指接榫头配置加工加拿大黑云杉指接材的结构特性。它采用了三种指接榫头形式,即羽型、嵌入型和翼型,试验结果表明,羽型榫指接材的特性要比其他两种好,尤其是对于水平结构指接材更为明显。此外,Ayarkwa 等(2000)对指接头齿形参数和指接压力对集成材抗弯性能的影响进行了研究,其中齿形参数对材料的抗弯强度值有很大影响,而对抗弯弹性模量影响不大,指接压力则因不同树种而异。

除了齿形外,影响集成材性能的因素还有很多,其中指接单元长度就是其中之一。Christine 等(1997)的研究表明,随着单元长度的增加,指接材的抗拉强度减小,然而,当长度达到 4.88m 时,其平均顺纹抗拉强度值达到极值;研究结果还表明,指接材单元长度对其顺纹抗拉强度的影响程度比之前的文献研究中所论述的要大两倍。因此,在今后的研究中,还应对不同尺寸和等级的结构用指接集成材中尺寸对其强度的影响进行更为深入的研究。

#### (四) 指接设备

指接材的生产设备对指接材的质量好坏同样有着重大影响。针对我国木材指接加工产品质量差的问题,郝金城(1994)指出,木材指接设备落后是指接材达不到工艺要求的重要原因。王放和张卉(2003)提出了使用指接铣床加工长材时应注意的两个问题,即嵌合度缺陷和木条侧弯,并提出了相应的解决办法。

在指接刀的研究方面,郑国群等(1995)通过对硬质合金单片指接刀在木材指接中的应用进行的研究。郝金城等(1991)则研究了短齿榫铣刀的齿形参数优化,并通过试验进行了验证。指接刀对集成材指接榫的加工精度影响重大,进而对集成材的质量产生影响。指榫铣刀的加工精度对指接强度有明显影响。铣刀指长不一致时,造成有的指榫长,有的指榫短,指接时形成较大的指顶隙,致使应力集中而折断;指榫几何形状不一致,致使部分指接面松离而减少了有效胶合面积,从而指榫强度显著下降(郝金城,1992)。指顶宽的设计也要合理,太薄的指顶宽在铣刀铣削过程中很快就发生过热,导致刀片永久性损坏或变钝。因此,指形铣刀不但几何形状要设计合理而且其加工精度和磨损性更为重要。

在指接榫头的加工方面,主要有刀具加工,模具加工,以及刀具、模具组合加工三种方法(郝金城,1994)。刀具加工是由指接铣刀在工作端部铣削出指榫的加工方法。指榫加工在专门指榫加工机上完成,这种方法在指榫加工中应用最普遍。指榫加工按其操作特性,可分为定位式加工和走刀式加工两种。定位式加工是将工件放置在工作台上,并将其夹紧,然后工作台向固定在一定位置的刀具移动进行加工。走刀式加工是将工件放置在工作台上,并将其夹紧,然后移动水平放置的刀轴进行指榫加工。第二种是利用模压成型的方式进行加工。模具加工是将工件端部压入模具一次加工成指榫的方法。模压加工过程为:夹紧被胶合两个工件的端部,并将其压入加热的模具,放松脱模,涂胶,加压拼接成一体。这种方法只适于模压指榫长度小于10mm的短指榫(Oberg,1961)。但是,利用模压方式加工指接榫头时,木材的密度是一个重要的影响因素,密度越大,木材的可压缩量越小,这样就限制了指接榫头的尺寸和几何形状,因此模压方法加工出的指接榫只适用于非结构用指接材的加工。第三种加工方法结合了以上两种方法的特点,是通过指接榫铣刀进行初步的成型加工,再利用模压的方法进行最终的几何尺寸确定。这种加工方法的特点是指榫的指顶宽极小,使指榫长度增加,经济效果好,解决了机械加工难以加工尖指榫的问题。但这种加工方法生产率低,应用不普遍,只有几个国家用于结构指接材的生产(Strickler,1967)。

从指接工艺的流程上来看,指榫加工是影响指接强度的重要因素。因为不管其中哪个指榫破坏,整个指接材就破坏。若其中一个指榫可靠性低,则视为整个指接材可靠性低。因此,每个指榫的强度高低直接影响整个指接产品。

### (五) 指接用胶黏剂

指接材良好的胶合强度必须要有好的胶黏剂配合,如何研制出适合指接生产的胶黏剂一直是许多研究工作者研究的方向。指接用胶黏剂不仅需要考虑指接后材料的强度问题,同时还要根据用途及性能要求加以区分与使用(李丽霞,1995)。在非结构用指接材胶黏剂方面,脲醛树脂胶是人造板生产企业中应用较多的一种胶黏剂,由于其成本低廉,所以部分学者对其用于指接材生产的可能性进行了探讨。李琳和何林(2003)研究了利用脲醛树脂胶作为指接材胶黏剂时指接材的强度性能,研究结果表明,利用脲醛树脂胶作为集成材生产的胶黏剂在一定程度上是可行的。为了获得高强度的指接材拼接胶黏剂,孟令辉等(1996)、宋克祥等(2001)采用接枝共聚改性聚醋酸乙烯乳液和异氰酸酯预聚体生产出指接材工业用拼接胶黏剂。蒋兴兵等(2005)对高性能指接集成材拼板胶的研制进行了研究,研制出的集成材拼板胶具有无毒、无腐蚀、无污染,常温固化的特点,性能优良,可以满足日本农业标准(JAS),适用于高硬度和抽提物含量高的木材黏接。在结构用指接材胶黏剂方面,刘艳等(2004)、刘铜宾和申世杰(2006)介绍了胶黏剂的选择、特点及其性能,冉全印等(1997)、徐晓沐和高科达(2007)则分别研究了水基聚氨酯和水性高分子异氰酸酯(EPI)胶黏剂在集成材中的应用及其参数控制。虽然文章中有的并没有进行试验验证,但是这对集成材胶黏剂的实际应用还是具有参考价值。

国外学者也对指接材用胶黏剂进行了大量研究。其中,Ronald(1981)指出,目前

用于指接材加工的胶黏剂主要有苯酚-间苯二酚树脂、间苯二酚树脂、三聚氰胺树脂、尿素-三聚氰胺树脂、脲醛树脂和热塑性及热固性聚乙烯树脂胶黏剂,其中尿素-三聚氰胺树脂、脲醛树脂和聚乙烯树脂胶黏剂多用于非结构指接材的加工。Properzi 等(2001)研究了一种室外用指接材生产用胶黏剂,这种胶黏剂能够快速固化,不需要加入间苯二酚,可以作为室外用指接集成材的胶黏剂使用。Sterley 等(2004)研究利用单组分聚氨酯胶黏剂对湿材进行胶合,研究结果表明,试样压好后立即检测的初始剪切强度为窑干后最终强度的 22%~50%,陈放 24h 后测量的强度比立即测量的剪切强度略有增大。

## (六) 指接材质量控制与检验

在指接材的质量检验方面,目前主要的检验方法是对照相关标准中的检测指标进行试验测定,相关的标准不多,但能满足指接材性能检测的要求。

国内在 2007 年出台了非结构用指接材的性能检测标准(GB/T 21140—2007),除外观质量检测外,主要的物理力学性能检测指标有抗弯强度、浸渍剥离率和含水率。

在结构用指接材的检测标准方面,我国还未出台相关标准。日本农业标准 JAS MAFF, Notification No.590 *Finger-Jointed Structural Lumber for Wood Frame Platform Construction* 中规定了结构用指接材的力学性能检测方法。与国内非结构指接材标准相比,该标准在检测方法上略有不同,但检测指标一样。

结构用指接材的一个重要用途是生产木结构用集成材梁,指接材的性能就直接影响木结构的稳定性。Noren(1965)的研究表明集成材梁的变形在达到其所能承受的最大载荷的 2/3 之前,不会受到指接接头的影响。当指接头承受拉伸载荷作用时,材料静曲强度值降低 20%左右。Castro 和 Paganini(2003)研究了利用 7 种力学等级的杨树和桉树指接材层板以不同组合方式生产的小尺寸集成材梁的性能。试验结果表明,桉树与桉树及桉树与杨树胶合而成的集成材梁的力学性能很好,其结构特性也较稳定。

在指接集成材的质量控制与检测方面,不管是结构用还是非结构用指接材,指接接头质量的好坏都取决于指接榫的质量,应按照强度最差的榫头来进行质量评价。而 Kaiserlik 和 Pellerin(1977)等通过检测指接材中的应力波,对材料的质量进行了评价。

## 二、指接加工存在的问题及发展前景

### (一) 指接加工存在的问题

我国指接材起步于 20 世纪 80 年代末,近几年发展较快,主要集中在东北和沿海地区,产品主要以外销为主。国内家具行业已经开始使用指接材,但市场还有待于进一步开拓。

目前国内木材指接加工的主要问题是产品质量差,指接材的强度只能达到实体木材强度的 40%~50%,且指接接合不严密,出现小面弯曲,时而发生脱榫或榫底出现裂缝以及表面质量粗糙等,满足不了实际使用要求,影响外表美观(李志高,1998)。其原因之一就是木材指接设备落后,达不到指接工艺的要求。

国内指接材生产仍处于回收利用加工剩余物阶段,产品质量低,指接材有效率仅 50% 左右,且产品质量不稳定,应用受限制。因此如何获得指接强度高而稳定的指接材并扩大其应用范围,是目前指接材生长中亟待解决的问题(郝金城,2000)。

## (二) 指接材生产的有利条件

我国指接材在生产原料、生产工艺、销路和经济效益等多方面表现出较好的发展前景。

我国适合生产指接材的树种很多,并且这些树种遍布于全国各地,为指接材的生产提供了充足的原料。

指接材生产在国外已经开展了几十年,我国近几年也已步入成熟。指接工艺所需设备,国内目前已基本上可以满足,并可为实现高质量产品的生产创造条件。

目前已普遍开展用指接材生产长条地板,销路一直不错,除部分供国内需要之外,大部分用于出口创汇,并且有供不应求的趋势。

小径原木的材质差、缺陷多、利用率低,直接加工的产品很难使企业获得较好的经济效益;而用小径原木生产指接材可做到小材大用,使小径级原木成倍增值,效益显著。

## 第二节 胶合的技术现状

国内外在实木胶合方面做了大量的工作,分别从木材特征、胶黏剂、胶合工艺等方面着手,研究了影响实木胶合性能的主要因素,并且从提高胶合面加工质量、改善胶合面润湿性能和胶合面抽提物处理等角度出发,探寻提高胶合质量的方法,改善胶合性能。

### 一、影响实木胶合性能的主要因素

#### (一) 木材构造与组分

胶合要求胶合强度应大于等于木材强度,胶合破坏发生在木材中,即木材破坏率较高。木材的密度大、强度高,胶合强度常低于木材本身的强度,且木破率较低。Freeman (1959) 研究 22 种阔叶树材的物理、化学特征与胶合性能的关系,以及 Sellers 等 (1988) 研究 6 种不同密度阔叶树材的酚醛树脂 (PF)、脲醛树脂 (UF) 和酪素三种胶黏剂的胶合特征,均发现木材密度是影响剪切强度和木破率的主要因素。木材密度在  $0.7 \sim 0.8 \text{ g/cm}^3$  (含水率=12%) 时,胶合强度随着木材密度的增大而有增大的趋势,但木破率降低;木材密度大于  $0.8 \text{ g/cm}^3$  时,胶合强度和木破率随着密度增加而降低,密度越高的木材,胶合越困难。分析原因是木材密度高,细胞壁厚、孔隙率低,胶黏剂渗透少,机械结合力弱,导致胶合强度低。另外,高密度木材吸收胶黏剂溶剂或水分的速度慢,影响胶黏剂固化,降低了胶合强度 (Vick, 1999; Hse and Kuo, 1988)。

纤维素、半纤维素和木素三大主要成分的含量,以及抽提物的组分类型和含量都显

著影响胶合性能。纤维素、半纤维素含量高的木材,因含有相对较多的羟基等表面极性基团,从而易与极性的胶黏剂胶合(Scoville, 2001)。密度较高的人工林木材,其低木素、高半纤维素含量和较短的纤维,以及高生长应力等使得其胶合材的尺寸稳定性差,环境温、湿度变化时木材变形施加给胶层的应力大,常出现分层或开缝现象,并影响胶合稳定性和耐久性能。

此外,木材解剖特征也影响胶黏剂在木材表面的渗透。良好的胶合,要求胶黏剂能渗透到木材表面的几层细胞中。木材细胞类型、幼龄材含量、早晚材比率和纹孔尺寸等对胶合性能有一定的影响(Sellers et al., 1988; Freeman, 1959)。阔叶材的导管和针叶材的管胞,这两类大尺寸的细胞,是胶黏剂在木材表面渗透的主要途径。纹孔的孔径大小和闭塞情况、幼龄材含量等影响胶黏剂的渗透。此外,早材比晚材容易渗透。

我国杉木、杨树人工林木材密度低、材质疏松,容易透胶,胶合时易产生缺胶现象;桉树木材细胞壁上多附物纹孔,且密度高、纤维素含量高,胶黏剂渗透少,机械胶合少,胶合较困难,表现为胶合强度比实木低,木破率低。

## (二) 抽提物

抽提物是导致某些木材胶合分层的主要因素,影响胶合和加工。抽提物包括单宁、各种单糖、淀粉、脂肪酸、树脂胶、树蜡等,它们可能破坏木材的表面极性和润湿性,影响胶合形成。抽提物可从以下三方面影响胶合性能:①污染胶合面,改变胶合面的极性和润湿性;②影响胶黏剂固化速度和凝胶特征;③部分抽提物与胶黏剂不兼容,排斥胶黏剂的吸附(Serneck et al., 2002)。部分人工林木材(如桉树),密度高、抽提物含量高,且水溶性抽提物在干燥过程中可向胶合面移动、堆积,在抽提物未经过处理时胶合木材,其胶合强度和木破率均较低。

抽提物污染胶合面,影响胶合面极性和润湿性能。抽提物可降低木材表面的润湿性:非极性的抽提物是导致水溶性胶黏剂润湿木材性能变差的主要因素(Hse and Kuo, 1988; Scoville, 2001; Sernek et al., 2002); Nguyen 和 Johns (1979) 用苯醇除去弱极性和非极性抽提物后,花旗松(Douglas-fir)木材的表面润湿性能明显提高;Chen (1970) 用多种有机溶剂去除抽提物后,发现亚洲几种阔叶树材的润湿性能得到改善,UF 的胶合强度随润湿性呈线性增加。此外,单宁、油性树脂等细胞原生质残余物和渗透物质,也会排斥胶黏剂润湿木材表面(Sellers et al., 1988)。

抽提物还影响胶黏剂的固化和胶合耐久性,这与胶黏剂固化的 pH 和木材缓冲容量有关。Roffael 和 Rauch (1974)、Abe 和 Akimoto (1976) 发现栎木、龙脑香的酸性抽提物,可降低碱性固化 PF 的 pH,产生二甲亚基醚键链接,延长固化时间。Hse 和 Kuo (1988) 发现酸性抽提物可缩短 PF 凝胶时间,产生不完全凝胶,阻碍树脂渗透。此外,酸性抽提物还可增加固化后 PF 的水溶性,降低胶层耐久性(Sellers et al., 1988)。对于酸催化固化的胶黏剂,抽提物可加速或减慢固化速度,主要由木材缓冲容量和胶固化的 pH 决定。柚木、红栎等的水溶性抽提物可延长 UF 的固化时间(Hse and Kuo, 1988);白栎的乙醇抽提物可减少 UF 41% 的凝胶时间(Marian and Stumbo, 1962)。

### (三) 加工特征

木材的表面质量、表面加工精度、不同加工部位对胶合有较大影响。木材的表面性状是实现木材胶合的重要因素,木材是被胶合表面具有最不均匀表面的材料之一,这种现象增加了木材的表面积,为胶黏剂的润湿、渗透和胶联提供了方便,但空气含于其中,加之表面粗糙,不利于胶合界面形成紧密的接触。

木材干燥方法和干燥缺陷均可影响胶合性能。Sernek (2002) 用 X 射线光电子能谱仪检测不同温度 (50~200℃) 干燥的木材表面,发现接触角随干燥温度的升高而增大;Shupe 等 (2001) 研究了美国南部 22 种阔叶树材的润湿性,发现冷冻干燥的木材表面接触角最小,气干次之,炉干最大。此外干燥条件 (如干燥温度、湿度、气流速度、方向等) 还影响水溶性抽提物向木材表面移动的速度和数量 (Hse and Kuo, 1988; Sernek et al., 2002; Kuo et al., 1984), 从而影响木材的胶合性能。

机械加工质量关系到胶合表面的粗糙度和表层细胞的破坏程度,进而影响胶合性能 (Vick, 1999; Stehr and Johansson, 2000)。Stehr 等用扫描电镜观察锯切和刨切后的木材表面,发现近表面 0.1~0.2mm 厚内的细胞强度比木材内部细胞强度要低,称为木材表面弱界面层 (mechanical weak boundary layer, MWBL), 而剪切破坏常发生在这层细胞或细胞附近 (Stehr and Johansson, 2000; Stehr and Sören, 2000)。此外,木材表面粉尘污染和长期暴露在光照、热量和空气中,表面活化性和润湿性降低 (Sellers et al., 1988; Hse and Kuo, 1988; Sernek et al., 2002), 也影响木材的胶合性能。

木材的含水率也影响胶黏剂固化和胶合材的稳定性,主要表现为不同含水率的木材胶合在一起,干缩性差异可导致分层、翘曲。因此,含水率偏差应控制在±2%以内 (Stehr and Sören, 2000)。胶黏剂种类和性状,以及胶合环境等对木材含水率的要求是不同的。多数胶黏剂适合的含水率为 7%~16%,高含水率木材 (15%~25%) 胶合的产品易翘曲,一般家具等室内用产品应在 5%~7%,室外用含水率为 7%~16% (Sellers et al., 1988)。

### (四) 胶黏剂

胶黏剂是影响木材胶合性能的关键因素,胶黏剂的树脂类型、固体含量、pH、黏度、固化条件、适用期以及胶黏剂对木材的湿润性、胶层状态与厚度等都影响木材的胶合性能。良好的胶合性能要求胶黏剂具有很好的流动性、润湿性,能通过溶剂蒸发、催化剂催化或加热处理等,产生化学反应转化成坚硬的固体,并在使用过程中保持强度 (顾继友, 1999)。

目前,我国实木胶合常用胶黏剂主要分为以下三类:一是主要用于胶合室外结构用材的胶黏剂,如酚醛树脂 (PF)、间苯二酚甲醛树脂 (RF)、苯酚-间苯二酚甲醛树脂 (PRF)、异氰酸酯胶黏剂 (MDI)、水性高分子异氰酸酯 (EPI) 等胶合强度高、耐久性好的胶黏剂 (聂涛, 1992);二是主要用于胶合室内或温湿度变化小的环境的胶黏剂,如脲醛树脂 (UF) 和酪素胶黏剂 (Casein Resin) 等耐水性、耐候性略差的胶黏剂 (Hanifi et al., 1999),以及主要用来胶合非结构用材的聚醋酸乙烯酯 (PVAc) 乳液和热熔胶等;三是一些改性

的胶黏剂,如用松树树皮提炼的单宁改性的 PF 胶,也用在木材的胶合中(Vázquez et al., 2003)。

1) 脲醛树脂:脲醛树脂(urea-formaldehyde, UF)是开发较早的热固性树脂之一,目前是我国产量和使用量最大的木材胶黏剂,是由尿素 $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$ 与 37% 甲醛(HCHO)水溶液在碱催化剂催化条件下缩聚制得的线性脲醛聚合物。一般来讲,甲醛/尿素的摩尔比为 1.5~2.0,反应最先生成一羟甲基脲和二羟甲基脲,然后由羟甲基与氨基进一步缩合制得水溶性树脂。脲醛树脂通常以氯化铵为固化剂,加热酸性固化或催化剂催化固化,固化后的树脂无毒、无色。脲醛树脂成本低,主要用于温、湿度变化小的环境中。

2) 酚醛树脂:酚醛树脂(phenol-formaldehyde, PF),是由苯酚( $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ )和甲醛(HCHO),在摩尔比大于 1 和碱类物质作催化剂的条件下缩聚,然后经中和、水洗而制成的热固性树脂。目前,由于酚醛树脂具有良好的耐酸性能、力学性能、耐热性能、胶合强度高,耐沸水、热、气候性好,广泛应用于结构材和室外用人造板的制造。我国酚醛树脂产量仅次于 UF,但是,酚醛树脂存在生成成本高、毒性大,初黏性低、渗透性强、固化时间长、固化温度高,固化后胶层脆、耐碱性差等缺点。

3) 间苯二酚甲醛树脂:间苯二酚甲醛树脂(resorcinol-formaldehyde, RF),由间苯二酚( $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_2$ )和甲醛(HCHO)在酸或碱性催化剂存在下进行反应制得的水溶性的树脂,具有胶合强度高,耐水性、耐久性和耐热性好,可室温固化或加热固化或加催化剂固化等优点。目前,主要用于难胶合的木材、结构材或室外用材的胶合。间苯二酚甲醛树脂最大的缺点是成本最高、胶层颜色深。

4) 聚醋酸乙烯酯:聚醋酸乙烯酯(polyvinyl acetate, PVAc),又称白乳胶,由醋酸乙烯在乙酸存在下聚合成,聚合度通常为 250~600,聚合完成后,树脂中残存的微量催化剂(通常为过氧化物)、单体和(或)溶剂经真空干燥、蒸汽汽提、洗涤或联合处理法除去。聚醋酸乙烯酯通常为白色乳液,室温固化,固化后有一定弹性,是热塑性树脂,耐热性、耐水性能差,加载时,胶层易发生蠕变。聚醋酸乙烯酯广泛地用于室内木材胶合,尤其是室内实木胶合。

5) 苯酚-间苯二酚甲醛树脂:苯酚-间苯二酚甲醛树脂(phenol-resorcinol formaldehyde, PRF),是用间苯二酚对酚醛树脂进行改性,以克服一般酚醛树脂固化温度高和固化时间长的缺点,主要由间苯二酚( $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_2$ )、苯酚( $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ )、甲醛(HCHO)缩合而成。间苯二酚改性酚醛树脂成本比间苯二酚甲醛树脂低,可室温固化,也可加热或加催化剂加速固化,耐水性优越,胶合性能好。目前,主要应用于室外结构材和部分难胶合木材的胶合。

6) 水性高分子异氰酸酯:水性高分子异氰酸酯(emulsion polymer isocyanate, EPI)初期胶合力强,能够在短时间内完成加压,可冷压、热压及高频胶合,是一种快速胶合胶黏剂,适用于非结构材及结构材用集成材等的拼板胶合。另外,水性高分子异氰酸酯具有较高的胶合强度,一般胶合后放置 6h,可进行切削加工,在胶合后 7 天可达最高强度。此外,水性高分子异氰酸酯胶黏剂固化后具有良好的耐热性、耐水性和耐溶剂性能,且无有机挥发物释放。但是,水性高分子异氰酸酯存在陈化时间过长、成本高等缺点。