

木质粉末温压成形 原理与技术

Muzhi Fenmo
Wenya Chengxing
Yuanli yu Jishu

吴庆定 著

内 容 简 介

本书为中南林业科技大学机械制造及其自动化学科带头人吴庆定教授在国家自然科学基金项目(30972305)和湖南省高等学校科学研究重点项目(09A101)的资助下,以本人博士论文为基础,综合多年从事粉末冶金、木材科学与技术、机械工程等多学科教学与科研成果撰写而成的。全书共分十章,主要包括木质粉末温成形工艺、模具设计、数值模拟、结合机理、环境友好性评估和应用研究等内容。

本书可作为材料学、木材科学与技术、材料加工工程等学科研究生教材或参考书,也可供生物质功能材料、机械工程材料等领域科研与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

木质粉末温压成形原理与技术/吴庆定著.

—长沙:湖南大学出版社,2011.12

ISBN 978-7-5667-0127-5

I. ①木… II. ①吴… III. ①木质粉末—粉末成形
IV. ①TS653.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 275571 号

木质粉末温压成形原理与技术

Muzhi Fenmo Wenya Chengxing Yuanli yu Jishu

作 者:吴庆定 著

责任编辑:卢 宇 黄 旺

责任校对:祝世英

出版发行:湖南大学出版社

责任印制:陈 燕

社 址:湖南·长沙·岳麓山

邮 编:410082

电 话:0731-88822559(发行部),88821315(编辑室),88821006(出版部)

传 真:0731-88649312(发行部),88822264(总编室)

电子邮箱:pressluy@hnu.edu.cn

网 址: <http://www.hnupress.com>

印 装:长沙瑞和印务有限公司

开本:880×1230 32 开

印张:8.5

字数:245 千

版次:2012 年 1 月第 1 版

印次:2012 年 1 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-5667-0127-5/TB·10

定价:30.00 元

版权所有,盗版必究

湖南大学版图书凡有印装差错,请与发行部联系

作者简介

吴庆定,男,1963年2月出生于湖南桃源县,1987年7月毕业于中南大学粉末冶金专业,2010年12月获得中南林业科技大学工学博士学位。现为中南林业科技大学教授,机械制造及其自动化学科带头人,中南林业科技大学学报(自然科学版)编委,具有“粉体材料科学与工程”、“木材科学与技术”、“机械工程”等多学科专业背景与教学、科研、社会实践经历。创办中南林业科技大学材料成形技术研究所,并任所长;兼任湖南省粉末冶金协



会秘书长、湖南省模具学会副理事长和十余家产学研合作企业高级技术顾问;曾创办高新技术企业湖南省粉末冶金有限责任公司,并任总经理。主持完成省部级科研项目9项、产学研合作项目11项,获湖南省技术发明奖三等奖、湖南省科技进步三等奖、湖南省自然科学论文二等奖、湖南省技术监督科技进步二等奖、湖南省机械工业技术进步一等奖等共8项。发表学术论文20余篇,申请国家发明专利5项。首次提出了木质粉末温压成形新概念,并将木质素玻璃化温度至木质素软化点的温度区间界定为木质粉末温压成形工艺温度选择区间,认为把木材科学与技术学科领域的人造板热压成形定义为温压成形更合适、更严谨;将室温至木质素玻璃化温度区间界定为木质粉末冷成形温度区间,如生物质能源领域的颗粒原料的挤压成形;把高于木质素软化点的温度区间界定为木质粉末热成形温度区间,如炭化木的成形就可以定义

为热成形。率先尝试了将粉末冶金成形理论与技术引入人造板工程,寻找“木质材料无胶热压成形理论与技术”和“金属粉末成形理论与技术”、“材料扩散焊接理论与技术”的交叉点,开展木质粉末温压成形理论与技术的研究,并取得重要进展。

前 言

近年来,为满足制造业结构调整与产品升级的需要,材料成形技术正朝着节能省材、高效环保的方向发展,如金属粉末、木质粉末的温压成形技术。木质粉末温压成形技术是在金属粉末温压成形技术的基础上,紧扣“两型社会”建设要旨,以服务“三农”、弥补制造业过分依赖矿产资源的缺陷为目的发展起来的。金属粉末温压成形实际上是一项集金属粉末室温模压成形和热模压成形的优点发展形成的新技术,是在高于室温但低于金属材料再结晶温度的温度范围内对金属粉末实施的一种加工硬化与再结晶并存的模压成形;不过,由于润滑剂的加入,金属粉末温压成形的机理一般认为是:由于润滑剂在粉末颗粒表面形成润滑膜,温压条件下改善了颗粒之间以及粉末与模壁之间的润滑状态,减少了摩擦阻力,使粉末颗粒的移动和重排变得容易,因而润滑是温压致密化的主导机制;同时由于温度的升高,使粉末颗粒的加工硬化得以有效消除,使得粉末颗粒的塑性变形能力得到改善,从而使压坯的密度得到进一步提高。木质粉末温压成形技术的问世得益于木质材料存在两个特征温度区间,即木质素玻璃化温度和木质素软化点。作者把成形温度界于木质素玻璃化温度以上和木质素软化点温度区间的木质粉末模压成形定义为木质粉末温压成形。木质粉末的温压成形无须添加润滑剂,也不考虑人造板行业使用的任何胶粘剂,在成形温度与压力作用下,木质粉末颗粒由于含有纤维素、半纤维素、木质素等分子团,会发生明显的啮接、变形、延展、塑合与扩散焊接,最终形成具有较高强度的疏水性各向同性木质材料。

木质粉末温压成形技术的开发,主要以木材/竹材加工剩余物、枝桠/藤条等低质木材、农作物秸秆、芦苇秆等的粉末为原料,在封闭模中

采用高压甚至超高压实施无胶模压塑化温压成形,制备可用于滑动轴承、汽车高档内饰件、电磁屏蔽元件等高端产品的高强、耐水、耐磨新型木质材料,原料利用率接近 100%;并综合运用响应面试验设计与分析、有限元分析、热脱附-气相色谱/质谱(TD-GC/MS)、红外光谱(FT-IR)、固体核磁共振 C 谱(C-SNMR)、热失重(TGA)分析、SDDM、SEM 等方法 and 手段,系统研究了木质粉末温压成形原理与技术,实现了木质粉末结合机理的创新,形成了较为完整的木质粉末温压成形原理与技术。木质粉末温压成形原理与技术,实际是粉末冶金学与木质材料学有机交叉的产物,到目前为止,据笔者掌握的资料,还没有其他学者提出和使用木质粉末温压成形的概念,也没有系统阐述木质粉末温压成形原理与技术的专著出版。为了促进交叉学科的发展,提升木质环境功能材料的研发水平,为“两型社会”的建设与“三农”问题的完美解决添砖加瓦,出版论述木质粉末温压成形及相关理论的专著显得十分必要。

中南林业科技大学木材科学与技术国家重点学科与材料成形技术研究所,多年来注重木材科学与技术学科、大材料学科的衔接,特别是以吴庆定、向仕龙、彭万喜三位教授和袁光明博士为主的教学、科研团队,致力于粉末冶金学与木质材料学的有机交叉,积极开展木质粉末温压成形技术的研究工作,获得了国家自然科学基金项目、湖南省杰出青年基金项目、湖南省重大技术创新“新材料专项”计划项目、湖南省高校科学研究重点项目等的资助,对木质粉末温压成形的理论与技术进行了系统深入的研究,申请国家发明专利 3 项,培养博士研究生 1 名、硕士研究生 5 名。遂将部分研究成果整理成书,希望本书的出版有助于带动相关交叉学科的发展,推动木质材料高质清洁利用的基础理论研究、新技术新工艺的开发和新产品的实际应用,从而带动木质粉末功能材料等相关产业的发展,为提高我国新材料产业的创新能力与国际竞争力、实现我国“两型社会”建设目标添砖加瓦。

本书系统阐述了木质粉末温压成形的基本原理与技术,包括温压成形木质粉末原料、木质粉末无胶温压成形工艺与木质粉末温压成形模具设计、木质粉末温压成形过程的数值模拟、木质粉末原料的 TD-

GC/MS 分析、木质粉末无胶温压成形结合机理、木质粉末无胶温压成形工艺的环境友好性评估,木质粉末复合材料的温压成形与应用分析等主要内容。本书可作为材料学、木材科学与技术、材料加工工程等学科或专业的研究生教材或参考书,也可供建筑功能材料、机械工程材料、生物质复合材料等领域的科研与工程技术人员参考。

本书撰写过程中,得到了众多木材科学与技术、粉末冶金、材料加工工程、化工工程等领域的专家、同事与同行的指导和帮助,包括向仕龙教授、长江学者贺跃辉教授、李忠海教授、陈桂华教授、彭万喜教授、李国希教授等,在此表示衷心的感谢!

在本书的资料收集、数据整理、图文编辑过程中,得到了徐剑莹教授、唐忠荣教授、陈飞副教授、王荣吉副教授、黄泽才高级工程师、彭波博士、刘克非讲师、杨素文试验师、黄静硕士研究生、戚红晨硕士研究生、吴凤娟硕士研究生、王兰生硕士研究生等的支持与帮助,在此一并表示深深的谢意。

在本书撰写过程中,还借鉴或引用了一些前辈与学者的研究成果和经验,在此表示由衷的感谢!

书中错漏与不足之处,敬请同行和读者批评指正。

作 者

2011 年 10 月

目 次

第 1 章 绪 论

1.1 木质材料的热压与模压成形	(1)
1.1.1 木质材料的热压成形	(1)
1.1.2 木质材料的模压成形	(6)
1.1.3 木质材料干法无胶热压成形	(9)
1.2 金属粉末温压成形	(18)
1.2.1 温成型的基本概念	(18)
1.2.2 金属粉末温压成形	(19)
1.2.3 金属粉末温压成型的特点、致密化机理与启示	(25)
1.3 木质粉末温压成形研究的意义与现状	(26)
1.3.1 木质粉末温压成形的提出	(26)
1.3.2 木质粉末温压成形研究的意义	(28)
1.3.3 木质粉末温压成形研究的现状与前景	(29)
1.4 木质粉末温压成形理论与技术的研究方法	(34)
1.4.1 热脱附-气相色谱/质谱分析法(TD-GC/MS)	(34)
1.4.2 超景深三维立体数码显微镜法(3D SDDM)	(35)
1.4.3 场发射扫描电子显微镜法	(36)
1.4.4 热失重分析法(TGA)	(36)
1.4.5 红外光谱分析法(FTIR)	(37)
1.4.6 核磁共振光谱分析法(NMR)	(39)
1.4.7 体积电阻四探针测量法	(39)

第4章 木质粉末温压成形模具设计

4.1 木质粉末压缩比对温压成形装粉高度的影响	(107)
4.1.1 装粉高度与压缩比的关系	(107)
4.1.2 木质粉末压缩比的测定与计算分析	(108)
4.1.3 木质粉末与金属粉末压缩性的差异	(112)
4.1.4 加粉高度的计算	(113)
4.2 基于 SolidWorks 的木质粉末温压成形模具 CAD 软件	(114)
4.2.1 SolidWorks 软件环境与二次开发思路	(114)
4.2.2 软件系统的总体设计	(115)
4.2.3 软件系统构建的关键技术	(116)
4.2.4 软件运行实例	(118)
4.3 小 结	(120)
参考文献	(121)

第5章 木质粉末无胶温压成形过程的数值模拟

5.1 木质粉末物理特征与理想假设	(122)
5.1.1 木质粉末颗粒的物理特征	(122)
5.1.2 木质粉末颗粒压制成形计算机模拟的技术难点	(123)
5.1.3 对木质粉末压坯有限元单元的理想假设	(124)
5.1.4 木质粉末材料的泊松比	(124)
5.2 木质粉末温压成形过程的数值模型	(126)
5.2.1 热弹塑性力学问题的基本方程	(126)
5.2.2 弹塑性分析	(128)
5.3 木质粉末温压成形数值模型的增量有限元法	(131)
5.3.1 热弹塑性问题的增量方程	(131)
5.3.2 高压温压成形力学模型的有限元离散	(132)
5.4 木质粉末温压成形过程的数值模拟	(135)

5.4.1	—20 目杨木/芦苇粉末室温成形数值模拟	(135)
5.4.2	—20 目杨木粉、芦苇粉温压成形的数值模拟 ...	(143)
5.5	压力-密度数学模型	(150)
5.5.1	压力-密度理论方程	(150)
5.5.2	压力-密度修正方程	(157)
5.5.3	木质粉末无胶温压成形压坯压力-密度模型	(159)
5.5.4	杨木粉和芦苇粉压坯压力-密度曲线修正	(159)
5.6	小 结	(161)
	参考文献	(161)

第 6 章 木质粉末原料的 TD-GC/MS 分析

6.1	材料与方法	(163)
6.1.1	试验材料	(163)
6.1.2	分析方法	(164)
6.2	结果与分析	(164)
6.2.1	测定结果	(164)
6.2.2	挥发物化学成分比较	(177)
6.2.3	木质粉末挥发物对温压成形工作环境的影响 ...	(180)
6.3	小 结	(183)
	参考文献	(183)

第 7 章 木质粉末无胶温压成形结合机理

7.1	材料与方法	(184)
7.1.1	试验材料	(184)
7.1.2	材料预处理	(184)
7.1.3	红外光谱(FT-IR)分析	(185)
7.1.4	固体核磁共振(SNMR)分析	(185)
7.1.5	热失重(TGA)分析	(186)
7.2	试验结果与分析	(186)

7.2.1 温压成形对纤维素的影响	(190)
7.2.2 温压成形对纤维素-木质素复合体的影响	(193)
7.2.3 温压成形对纤维素-木质素-半纤维素复合体的影响	(196)
7.3 温压成形对纤维素晶体的影响	(198)
7.4 温压成形对材料结构的影响	(199)
7.5 小 结	(204)
参考文献	(204)

第 8 章 木质粉末无胶温压成形工艺的环境友好性评估

8.1 木质粉末温压成形的环保理念与特征	(206)
8.2 TD-GC/MS 分析	(207)
8.2.1 试验材料选择与制备	(207)
8.2.2 GC/MS 条件与试验方法	(207)
8.2.3 结果与分析	(207)
8.3 小 结	(231)
参考文献	(231)

第 9 章 木质粉末复合材料的温压成形与应用分析

9.1 木质粉末与复合组分	(235)
9.1.1 木质素	(236)
9.1.2 紫铜粉	(237)
9.2 芦苇秆/木质素复合材料	(237)
9.2.1 试件制备	(237)
9.2.2 性能与结构表征	(239)
9.3 芦苇秆/紫铜复合材料	(243)
9.3.1 复合材料制备	(243)
9.3.2 复合材料性能与结构表征	(243)
9.4 小 结	(248)

参考文献·····	(249)
-----------	-------

第 10 章 木质粉末温压成形技术要点与前景展望

10.1 技术要点·····	(250)
10.2 前景展望·····	(252)
10.2.1 目前存在的问题·····	(252)
10.2.2 今后的研究方向·····	(254)

第1章 绪 论

1.1 木质材料的热压与模压成形

除实体木材外,有许多木质材料是由一些基本单元复合成形构成的,这些基本单元有纤维、刨花、单板、木条、木束、木粉、木丝、碎料等,其制品按形状分有板材、方材、薄片、圆柱以及其他异形体。木质材料的成形有多种方法,但最常见的成形方式是热压成形,包括采用上下两平板式的开式热压和不同形状模具的封闭式热压。

1.1.1 木质材料的热压成形

顾名思义,木质材料的热压成形是在温度与压力的作用下使木质材料具有一定的形状与尺寸。本节主要讨论上下两平板式的开式热压,即最常见的单层热压机或多层热压机的热压成形工艺,此工艺被大规模应用于现代人造板工业生产中。

1.1.1.1 木质材料热压成形工艺的应用与现状^[1-4]

木质材料热压成形工艺已在工业中大规模应用,特别是在胶合板、纤维板、刨花板、细木工板等人造板的生产中,是一种历史悠久且相当成熟的成形工艺。压机是这种成形工艺的主要设备。帕斯卡早在17世纪中期就为液压机奠定了理论基础,但直到1847年才出现第一个液压机专利,而第一台真正在生产上使用的液压机则在1863年才问世。液压机应用于人造板的生产是在20世纪初开始的,多层热压机的出现则是在20世纪30年代初期。为适应刨花板和干法纤维板生产的需要,50年代末出现了使热压板同时闭合的多层热压机,70年代又出现了连续平压热压机。目前世界上最大的单层热压机是德国迪芬巴赫公

司制造的总长度为 63 m,幅面为 57.6 m×4 m 的连续式平压热压机,年产定向刨花板 70 万 m³,而辛北尔康普公司的热压板幅面为 3 660 mm×103 700 mm 的 12 层热压机,是年生产能力最大的多层热压机,年产定向刨花板也为 70 万 m³。

胶黏剂是木质材料热压成形常用的添加剂之一,而加压的同时施加温度的所谓“热压”的产生和发展与胶黏剂的发展同步。在合成树脂胶黏剂大规模使用之前,生物胶黏剂是木质材料成形常用的黏结材料,其原料均来自大自然的天然产物,主要包括木质素、单宁、蛋白质以及淀粉、壳聚糖等多糖类物质,其中包含动物胶、大豆胶、血胶、乳胶在内的天然蛋白质胶黏剂及淀粉胶,一直到 20 世纪 60 年代还是主要的木质材料胶黏剂。随着合成树脂木材胶黏剂的大量出现,生物胶黏剂在耐水性、胶接强度等指标上的劣势日趋显现,因此这类木质材料胶黏剂从其巅峰状态消退下去,木质材料加工工业进入了合成树脂胶黏剂的时代,脲醛树脂、酚醛树脂和三聚氰胺甲醛树脂即“三醛”胶从此占据了木质材料成形用胶黏剂的绝大部分。木质材料热压成形在使用生物胶黏剂时,其温度的提高只是为了加快材料水分的蒸发,使加生物胶黏剂的复合材料失水而加快成形。在合成树脂大规模应用于木质材料的成形后,热压有了更重要的意义。因为树脂的固化有确定的温度,形成的时间依赖于热压温度。

木质材料不添加胶黏剂而直接热压成形的工艺与技术也有研究和应用。湿法成形硬质纤维板是典型的不添加胶黏剂而热压成形的人造板产品,但由于废水污染问题,此种工艺在国内外已严格限制应用。木质材料干法生产而不添加胶黏剂(称干法无胶工艺)的研究与实践,国内外 20 世纪 40 年代即已开始进行,80~90 年代达到研究的高峰,国内甚至已成立了专业的无胶人造板公司,也有几条生产线试产无胶胶合人造板。但自 21 世纪以来,除少数研究以外,干法无胶工艺技术的开发与应用已日见冷落。

1.1.1.2 木质材料热压成形工艺与制品性能^[5-8]

实践表明,木质材料热压成形的制品质量不仅与原料的性质、形状结构及添加剂有关,也与热压成形中的温度、压力和时间等因素相关。

表 1.1 列出了主要的热压成形木质材料的原料单元、热压工艺和制品性能等信息。

表 1.1 热压成形木质材料的原料单元、热压工艺和制品性能

产品名称	原料单元	树脂添加量 /%	热压温度 /℃	热压压力 /MPa	制品断面结构	静曲强度 /MPa	弹性模量 /MPa	内结合强度 /MPa
刨花板	刨花、碎料	8~15	160~220	2.0~3.2	三层或渐变	10~18	—	0.2~0.5
硬质纤维板	纤维	0	190~210	5.0~7.0	均质	30~40	—	0.5~1.2
中密度纤维板	纤维	8~15	160~220	2.5~3.5	均质	20~30	2 400~2 600	0.4~0.8
高密度纤维板	纤维	10~15	160~220	4.5~5.5	均质	35~40	3 400~3 600	0.7~1.2
胶合板	单板、薄木	8~12	100~120	0.6~1.2	层状	—	—	—
细木工板	单板、木条	6~10	100~120	0.6~1.2	芯层木条表面单板	10~18	—	—

注：树脂为脲醛树脂胶黏剂；热压压力一般为高压段压力。

下面根据表 1.1 进行相关分析。

(1) 热压压力

热压成形中加压的目的非常明确：①使制品密实化，达到规定的密度；②使单元之间形成点、面接触，有利于氢键的形成和范德华力结合；③平衡制品内部产生的蒸汽压力；④有利于制品内添加剂或温度作用下产生的可流动体的扩散流动。显然，不同形态的原料单元对成形的压力有很大的影响，规则而体积较大的单元，相互之间易于接触，与松散的、不规则的单元相比，其所用的压力要低。表中胶合板、细木工板属于前者，刨花板和纤维板属于后者。

制品的最终密度要求决定热压成形压力大小的选择。密度较高的

硬质纤维板的成形压力高达 5.0~7.0 MPa,是中密度纤维板的 2 倍。

(2)热压温度

热压成形中温度的作用非常明确:①使制品中的胶黏剂达到要求的固化温度;②塑化或软化原料;③有利于制品中的木质素等热塑性组分产生热塑融合作用;④有利于木质材料中的氢键形成和化学基团的结合。在添加胶黏剂的热压成形中,使制品中的胶黏剂达到要求的固化温度是确定温度高低的主要因素;而在不添加胶黏剂的热压成形中,如湿法成形的硬质纤维板,温度的确定依赖②③④中作用的产生。以下有专门的讨论。

热压温度的确定还与热压的方式有关,表中的数据主要参照间歇式平压,对于连续式平压,它一般分成多段,且不同段的温度不同。

(3)无胶硬质纤维板的热压成形

迄今为止,能够为市场提供大规模不添加胶黏剂的人造板产品仅有湿法成形的硬质纤维板,其热压成形过程对本书所研究的课题具有重要的借鉴作用,故在此作专门讨论。

热压前,湿法硬质纤维板的板坯成形是借鉴造纸工业的长网成形。板坯经过长网脱水后进入热压机热压。热压分为 3 个阶段,第 1 阶段称为挤水段,该阶段的目的是排除板坯中存在的大量自由水,采用 5~7 MPa 高压,时间很短,在板坯中温度未达到 100 °C 时结束此阶段。第 2 阶段称干燥段,主要目的是蒸发板坯中尚存的水分,当板坯中的水分达到 10%~15% 时结束此段。此阶段的压力仅维持在 0.5~1.07 MPa。第 3 阶段是成形的关键,该阶段的目的是:①密实板坯以达到规定的密度;②使板坯中的木质素、半纤维素热塑融合;③使氢键形成和范德华力结合形成。这一阶段的温度要求较高,达 180 °C~210 °C,使纤维软化,木质素和其他热塑物熔融流展在纤维表面。同时采用较高的压力(5~7 MPa)压缩纤维,这有利于可流动物质的流动铺展。当水分达到 1%~3% 时,结束此阶段。生产实践表明,第 3 阶段是控制硬质纤维板质量的关键。研究认为,这一阶段木质材料中的热塑融合物覆盖在纤维表面并冷却后形成了结壳物质,将纤维结合在一起。

(4)热压成形制品的性能