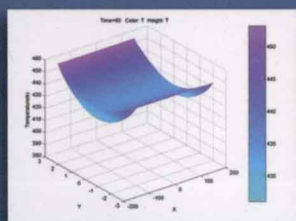




木质层积复合材热压模型与模拟

MUZHICENGJIFUHECAI REYA MOXING YU MONI

李鹏 著
王逢瑚 审



东北林业大学出版社

木质层积复合材热压模型与模拟

李 鹏 著

王逢瑚 审

东北林业大学出版社

版权专有 侵权必究

举报电话：0451 - 82113295

图书在版编目 (CIP) 数据

木质层积复合材热压模型与模拟 / 李鹏著. -- 哈尔滨 : 东北林业大学出版社, 2011. 7

ISBN 978 - 7 - 81131 - 882 - 1

I. ①木… II. ①李… III. ①木质板-层积材: 复合材-热压-模型②木质板-层积材: 复合材-热压-计算机模拟
IV. ①TS653

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 142627 号

责任编辑: 冯 琪

封面设计: 彭 宇

出版发行: 东北林业大学出版社

(哈尔滨市香坊区哈平路六道街 6 号 邮编: 150040)

经 销: 全国新华书店

印 装: 哈尔滨圣铂印刷有限公司

开 本: 880mm × 1230mm 1/32

印 张: 4

字 数: 105 千字

版 别: 2011 年 7 月第 1 版

版 次: 2011 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 20.00 元

如发现印装质量问题, 请与出版社联系调换。(电话: 0451 - 82113296 82191620)

前 言

本书共分四个部分内容,第一部分介绍了木质复合材料智能生产系统的组成;第二部分对木质层积复合材热压过程中板坯内部环境进行了模拟研究;第三部分探讨了热压过程中板坯内部环境试验解与数值方法;第四部分探讨了木质层积复合材热压过程中剖面密度模型与模拟。

木质复合材是既传统又在不断更新的复合材料,它的研发与制造水平随着时代和科技的发展在不断进步,因此建立木质复合材料智能生产系统,在解决木质复合材料及结构设计问题时引入虚拟现实技术,从先进复合材料科学发展的历程来看,这是木质复合材料科学发展的一个重要方向和必然趋势。为了逐步实现木质复合材智能生产系统的构想,应该在木质复合材料已有的研究基础上进一步模型化,同时建立木质复合材料虚拟设计研究体系,逐步开展各类木质复合材料专家系统的研究,书中第一部分就是在这一背景下,从木质层积复合材热压模型化入手,为实现木质复合材智能生产系统做部分基础研究工作。

木质层积复合材热压过程中板坯内部环境模拟研究的目的是在已有的物理、数学、数值方法、计算机模拟、热工学、传递过程原理、木材学、木质材料流变学、胶黏剂化学等工程理论基础上,建立木质层积复合材热压过程中板坯内部环境的模型,利用这些模型由计算机模拟出木质层积复合材的热压过程,通过虚拟热压的形式了解热压过程中板坯内部环境随时间和空间的变化。希望据此更好地设计复合材的生产工艺,控制并预测板材的最终质量,提高木质复合材制造的科学性和目的性。

热压过程中板坯内部环境试验解的数值方法研究,是通过试验的方法对热压过程中板坯内部环境进行研究,并且对试验解做进一步数值方法处理,使得数值解的应用进一步扩大。

本书的第四部分根据垂直密度的形成是在热压过程中内部环境各个加工因素互相影响结果这一理论的基础上,进行了木质层积复合材热压过程中板坯横向压缩模型研究和垂直密度的求解研究等。

本书所述内容为国家自然科学基金(30600469)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(DL10CB02)研究的部分内容,全书研究内容在东北林业大学王逢瑚教授的指导和审阅下撰写。

本书可作为高等林业院校木材科学与工程专业及相关专业本科生及研究生的教辅用书,也可供广大本行业从业人员参考。

由于本人水平有限,书中难免存在疏漏和错误,敬请广大读者指正!

著 者

2010年9月3日

目 录

1	木质复合材料智能生产系统的组成	(1)
1.1	木质复合材料智能生产系统的构想	(1)
1.2	木质层积复合材热压模型化研究	(12)
2	木质层积复合材热压过程中板坯内部环境的模拟	(19)
2.1	热压过程中板坯内部环境广义物理解释	(19)
2.2	研究基础	(22)
2.3	模型的假设条件	(24)
2.4	热固性树脂胶黏剂固化过程模拟研究初步	(25)
2.5	木质层积复合材热压过程中热传导效应的 模拟研究	(28)
2.6	材料导热物理性能模型	(32)
2.7	热压过程中板坯内部气体环境模拟研究	(37)
2.8	热压过程中板坯内部结合水传输的模拟方程	(39)
2.9	模型化研究的空间平面和条件	(41)
2.10	模型计算	(45)
2.11	计算结果的分析	(60)
2.12	本章小结	(71)
3	板坯热压过程中内部环境试验解及数值方法	(74)
3.1	胶黏剂固化过程模拟的实验验证	(74)
3.2	木质层积复合材热压过程中板坯内部温度环境的 试验解研究	(78)
3.3	材料的物理性能实验研究方法	(86)
3.4	板坯热压过程中内部温度的插值不等式模型	(88)

3.5	本章小结	(95)
4	热压过程中板材剖面密度模型与模拟	(98)
4.1	木质层积复合材热压过程横向压缩模型	(98)
4.2	热压过程中板坯剖面压缩模型求解	(102)
4.3	本章小结	(106)
结 论		(108)
参考文献		(111)

1 木质复合材料智能生产系统的组成

1.1 木质复合材料智能生产系统的构想

材料科学的发展促进了国民经济和现代科学技术的发展,而国民经济和科学技术的进步又为新材料的发展提供了方向和技术。进入 21 世纪以后,世界范围内的复合材料制造业面临着市场开拓和技术发展的极大挑战。发展高质量、低成本、短周期的复合材智能生产系统技术是复合材料制造业的发展方向,复合材料智能生产系统的科学性、先进性、正确性和敏捷性对于材料科学的发展及整个国民经济的发展至关重要。

复合材智能化制造系统是基于产品和设计过程并行处理的概念发展起来的,整个系统包括两个子系统:虚拟制造系统(VMS)和实际制造系统(RMS),智能化制造系统囊括了用于发展 VMS 和 RMS 的所有软件工具和机器,其中 20 世纪 90 年代出现的虚拟制造技术是先进制造技术的重要标志之一^[1,2]。虚拟制造与实际制造具有本质的区别,它是在计算机仿真与虚拟现实技术的支持下,随着计算机技术的发展而逐步完善的,这项技术对于先进复合材料的研制和传统材料的革新具有划时代的意义。

木质复合材料既是传统又在不断更新的复合材料,它的研发与制造水平随着时代和科技的发展在不断进步,因此建立木质复合材料智能生产系统,在解决木质复合材料及结构设计问题时引入虚拟现实技术,从先进复合材料科学发展的历程来看,是木质复合材料科学发展的一个重要方向和必然趋势。为了进一步说明

木质复合材料智能生产系统的构想，首先应对复合材料设计理论、复合材料虚拟设计技术有所了解。

1.1.1 复合材料设计的基本理论

复合材料相对于传统材料最大的特点就是材料及结构具有可设计性。设计者可以根据外部环境的变化与要求来设计具有不同特性与功能的复合材料，以满足工程实际对高性能复合材料及结构的要求。这种可设计的灵活性再加上复合材料优良的特性（高比强、高比模等）使复合材料在不同应用领域的竞争中成为特别受欢迎的材料。目前，复合材料的应用已从最初的航空、航天及国防等高科技工业扩展到建筑、工程、汽车等传统领域中来。另外，复合材料的成本高于传统材料，这在一定程度上限制了它的应用。扩大复合材料的应用范围，就必须降低成本，而复合材料的优化设计是降低成本的关键之一。因此复合材料设计是发展复合材料的重要技术，对于木质复合材料的发展，特别是研究新型木质复合材料，如木材与其他不同性质材料复合所获得的新型材料，材料设计理论的发展作用十分重要。

1.1.1.1 复合材料设计的概念

复合材料设计是将组分材料性能及复合材料细微观结构同时考虑，以获得人们所期望的材料及结构特性。与传统材料设计不同，复合材料设计是一个复杂的设计问题，它涉及多个设计变量的优化及多层次设计选择^[3]。

1.1.1.2 复合材料及结构设计的步骤

材料设计的传统方法是借助于设计手册，通过对候选材料实行“炒菜法”来完成的^[4]。近十几年来，来自有经验设计者的启发式推理过程的设计工具专家系统已经形成，并用于处理复合材料设计中的一些问题。启发式的方法在简单的材料设计研究中是非常方便的。然而，它仅能处理一些特殊问题。目前，由于对新

材料的需求日益增长,人们希望在材料研制设计中尽可能地增加理论预见性,以减少盲目性。现代数学、物理、化学等基础学科研究的深入,为新材料的研制提供了许多新的原理和概念,新材料的研制将在数据库和知识库的基础上,利用计算机对新材料的微观结构和性能以及它们之间的关系进行模拟^[5]。为了进一步解决问题,数值优化技术为材料设计提供了一种可行的替代方法,这种方法可对复合材料及结构的一般性问题进行优化设计。例如,对复合材料层合板进行设计,为使其强度达到要求,可利用有限元法并结合适当的强度准则及本构模型对其进行材料及结构参数的优化;又如对复合材料壳体进行设计,为使其稳定性达到要求,可利用有限元法并结合相应的失稳模式及准则对其进行系统优化。

一般来说,复合材料及结构设计大体上有以下步骤(图1-1)。

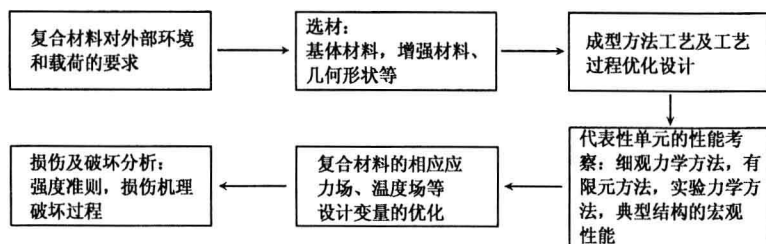


图 1-1 复合材料及结构设计的步骤

首先,确定复合材料及结构所承受的外部环境载荷,如机械载荷、热载荷及潮湿环境等。第二步,根据所承受的环境载荷选择合适的组分材料,包括组分材料种类及几何特征,这部分工作基于人们对已有材料体系基本性能的了解和掌握。第三步,选择合适的制造方法及工艺条件,必要时需对工艺过程进行优化。第四步,利用微观力学理论或有限元分析方法或现代试验测量技术,确定复合材料代表性单元的平均性能与组分材料及细微观结构之间的定量关系,进而确定复

合材料梁、板、壳等宏观结构的综合性能。第五步,对应所有外部环境载荷和各种设计参数变化范围,分析材料的相应变形等。最后,分析复合材料及结构的损伤及破坏过程,主要是利用损伤力学、强度理论、断裂力学等手段。

由上面的设计步骤可以看出,复合材料设计问题不仅要确定增强体的几何特征(连续纤维、颗粒等)、基体材料、增强材料和增强体的微观结构以及增强体的体积分数,还要根据给定的特性及性能规范对上述设计变量进行系统的优化,这是一件比较复杂的事,因此复合材料及结构设计的方法是加快复合材料设计科学的基础,近年来先进的设计方法正逐渐在发展,其发展方向的代表就是虚拟设计技术^[6]。

1.1.2 木质复合材料及其结构的虚拟设计

1.1.2.1 虚拟技术的基本概念及特点

20世纪50年代以前,对大型宏观结构的研究主要是在物理模型上进行仿真试验,如船体比例模型在水槽内的模拟试验。这种模型仿真的方法是利用相似性理论将实际结构模型化,然后按相似准则找到各参数之间的相似关系,进而为工程设计、结构设计提供参考数据。相似性理论属线性范畴,其应用范围具有一定的局限性。有关复合材料及结构的许多特性及性能都是非线性的,如含夹杂复合材料的宏观弹性模量与夹杂的体积分数的关系是非线性的,因此仅仅靠比例模型是无法给出实际复合材料及其结构的性能。通常,复合材料结构具有很强的尺寸效应,需结合先进的实验技术和数值分析方法对其进行认真的研究。现代工业的高速发展对产品结构的性能和可靠性提出了越来越高的要求。20世纪60年代以后,出现了利用计算机的柔性制造系统(FMS)。80年代初,随着计算机仿真技术、信息处理技术的发展,出现了以信息集成为核心的计算机集成制造系统(CISM)。

90 年代出现了许多与计算机技术相关的概念如虚拟制造 (VM)、虚拟型号设计 (VTP)、虚拟企业 (VE)、虚拟现实 (VR)。计算机虚拟技术可以用抽象的数学模型进行反复的仿真试验, 大大降低了研究开发费用, 缩短了研制周期, 特别是能解决试验中难以解决的问题。

1.1.2.2 木质复合材料分析 (数学) 模型的建立

一般来说, 用计算机解决科学计算的问题, 首先需要针对实际问题提炼出相应的数学模型, 然后为所建的数学模型设计出数值计算方法, 经过程序设计之后上机计算, 求出数值结果, 再由实践来检验。数学模型的含义很广, 提法也不一。按照广义的解释, 凡是一切数学概念、数学理论体系、各种数学公式、各种方程式 (代数方程、函数方程、微分方程、差分方程、积分方程等) 以及由公式构成的算法系统等都称为数学模型。按照狭义的解释, 凡是将具体现象、事物的特征和性质给以数学表达的数学结构, 如各种不等式、等式、图、表或框图等, 也叫数学模型。简单地说, 数学模型就是用数学术语对现实世界的描述^[6]。

模型是仿真试验的基础, 数学模型是数学仿真的基础。现代计算机技术的进步, 使数学仿真在仿真技术中占有特殊重要的地位。它的灵活、方便和通用性, 是其他仿真方法无法与它比拟的。数学模型是在特定的建模目的支配和假设条件约束下, 关于真实系统的科学抽象和映射, 如图 1-2 所示。

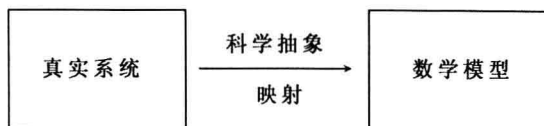


图 1-2 数学模型和真实系统的关系

例如, 在薄板胶合理论中, 经常假定垂直与中面的法线在变形后仍保持直线并垂直于中面, 以及法线的长度不变。上述假设

不仅给问题求解带来方便,而且所得到的结果也具有一定的精度。用科学抽象的方法建立数学模型是对实际系统的近似描述,它不可能无所不包,也不可能非常精确。数学模型相对于实际系统已经简化了,实践表明,对于特定的问题,决定其特征的参量并不是每个都同等重要的,关键在于抓住问题的主要矛盾,才能更好地揭示问题的本质。

建立木质复合材料分析(数学)模型是一个广义的概念,也是一个极其复杂的系统工程,它包括一系列与木质复合材料及其结构性能有关的问题,从木质复合材料的制造一直到使用,整个过程模型化并建立木质复合材料专家系统,例如,木质复合材料及其结构的力学性能分析模型(强度、刚度、损伤容限、断裂韧性、稳定性等),材料选材规范、成型工艺方法(成型方法、工艺控制、工艺过程优化等)、连接问题等。这就需要转变研究思路、扩展研究方向、构建全新的理论系统,因此可能要花很长时间。目前,在复合材料科学研究的基础上,可以解决一些特殊问题,如木质复合材料的动态弹性性能无损检测问题等,然而绝大多数问题目前还没有解决,如木质复合材料强度模型问题、可靠性模型问题等,这些问题在某种程度上限制了虚拟设计技术在木质复合材料设计中更为广泛的应用,这其实是整个复合材料学领域内共有的问题,但是在木质复合材料领域更为明显。比较明智的作法是效仿其他复合材料研究已取得的经验,木质复合材料虚拟设计与基本性能的研究齐头并进,随时吸收理论、数值分析及实验工作的最新成果,为木质复合材料的虚拟设计提供坚实的、可靠的模型基础。

1.1.2.3 木质复合材料的虚拟设计

研究已证明,对于复合材料的设计,由于其自身的特点,计算机仿真比较有效,也就是进行复合材料的虚拟设计。建立传统木质复合材料的专家系统和加速新型木质复合材料发展,同样面

临材料设计和材料结构设计的问题。根据已有复合材料设计理论,木质复合材料的设计应该包括功能设计、结构设计和工艺设计三部分。与其他种类的复合材料相比,木质复合材料设计科学刚刚开始,目前在木质复合材料研究中,对于用途单一的木质复合材料,其材料设计主要从功能设计入手,这就要求木质复合材料的功能要满足使用条件的设计;结构设计是由承载条件和工作环境确定结构的形状和尺寸,以确保结构具有足够的使用寿命和可靠性;工艺设计是指满足性能与结构要求的成型方法、制造工艺并做到制造成本低廉。计算机仿真虚拟技术,就是在计算机上实现木质复合材料的设计、制造、功能测试和优化设计的本质过程,计算机数值模拟方法与实验方法相比具有许多优点。

(1) 可以研究任何一个设计参量单独变化时对复合材料及其结构性能的影响,如材料常数、宏细微观结构的几何参数、边界条件、初始条件等的变化对复合材料结构的强度、刚度、稳定性、可靠性的影响。例如,在研究刨花形态对刨花板力学性能影响时,就可以建立刨花铺层模型,因为不同形态的刨花和铺层工艺对于铺层模型的结果影响是不同的,而铺层模型的结果又影响刨花板的密度,进而影响刨花板的力学性能。这种方法不像模型实验那样要求实验时各物理量在满足相似性原理的基础上才能将实测结果近似地应用到实际结构中。

(2) 过去我们为了减少重复试验的次数,采用正交试验的方法。如果采用木质复合材料的虚拟设计技术,就会避免了大量的木质复合材料及其结构的制造过程和重复性试验,因此计算机仿真技术可节约大量的人力、物力等。这一优点是显而易见的,根据已建立的模型,在计算机上实现材料的虚拟制造,可以减少大量的重复实验。

(3) 由于木质复合材料及其结构的设计、制造、性能优化及性能测试都可以在计算机上完成,因此虚拟设计技术可以缩短木

质复合材料的研制周期。

(4) 可以处理数学上无法求解或现有条件无法实现的过程。可以通过建立数学模型后进行虚拟实验,通过计算机仿真找到最佳的方案,而让物理模型实验作为校核用。在木质复合材料的设计阶段,要求对设计的合理性和可靠性加以评价。同时在结构被使用前,也希望对复合材料的工作状况,如对结构的静态和动态性能进行预测。

1.1.2.4 木质复合材料结构的虚拟设计

计算机虚拟实验的研究是为木质复合材料结构设计做数据准备的。复合材料结构设计是基于结构分析的再创造过程,即在保证各部分结构之间互相配合的情况下,根据复合材料结构性能、可靠性、安全性和维修性的要求,甚至是更多目标函数的要求,对材料和结构形式进行设计方案的优化和参数的设计。这一理论对于新型木质复合材料的开发、木质材料与其他不同相材料进行复合有很大帮助,根据复合材料结构设计理论,木质复合材料的结构设计包括以下研究内容。

(1) 根据用途确定出材料的几何尺寸。

(2) 根据空间位置等要求确定结构的布置。

(3) 由环境定出对材料的要求,如抗腐蚀、抗辐射、隔热、隔音等。

(4) 根据多目标函数和约束条件的要求,对主体功能和辅助功能载体进行优化设计。

(5) 将各局部结构组合成总体结构,分析各功能载体对总体结构的影响和作用。对整体结构系统进行经济分析和评价。必要时对结构进行修改,重新设计方案,以得到全局优化设计。

木质复合材料结构设计是利用已掌握的知识和方法,在保证结构具有足够的强度和刚度情况下,尽量降低材料的消耗量,提高产品的功能,最后用计算机数值迭代过程确定工程结构设计的最优方案。木质复合材料的性能除了与组成木质复合材料的原料

种类、体积含量有关外，还与木质复合材料的细微观结构参数密切相关。因此可根据结构的使用情况及外部环境，选择适当的匹配参数以满足对结构设计的要求。数值模拟能根据仿真结果修改宏观结构布局、改变调度控制策略，从而修改不合理的设计方案，提高设计水平，保证产品质量。

1.1.3 木质复合材料智能生产系统

前面介绍过复合材料智能制造系统包括虚拟制造系统和实际制造系统两个部分。为了说明复合材料虚拟设计及制造系统对实际制造系统的作用，必须介绍一下实际制造系统和虚拟制造系统的概念。一般来说，复合材料实际制造系统是由实际物理系统、实际信息系统和实际控制系统三部分组成的。实际物理系统包括所有物质实体，如材料、设备、模具、控制器等；实际信息系统包括信息处理与决策，如信息传递、设计等。实际信息系统可以通过媒介与实际控制系统和实际物理系统交互信息。虚拟制造系统是由虚拟物理系统、虚拟信息系统和虚拟控制系统组成的。复合材料智能制造系统是由虚拟制造系统和实际制造系统组成的，如图 1-3 所示。虚拟物理系统可以根据所需要的产品、现存的设备和材料形成，而实际物理系统由设备选择、材料（包括它们的组分）和输入到虚拟信息系统中的初始工艺参数确定。实际工艺参数由来自虚拟物理系统的信息输出所调整的虚拟信息系统和虚拟控制系统所提供。实际产品工艺依赖于实际工艺参数。实际物理系统的传感信号被输入到实际信息系统，然后实际信息系统通过与虚拟传感信号的在线比较，适当调整工艺参数。通过无损评价产品最后的性能和指标可以确定下来。

根据复合材料智能生产系统理论，可以设想我们木质复合材料智能制造系统是根据材料设计、结构设计、工艺及可靠性平行发展来进行的。图 1-4 显示了复合材料及其结构的虚拟设计及

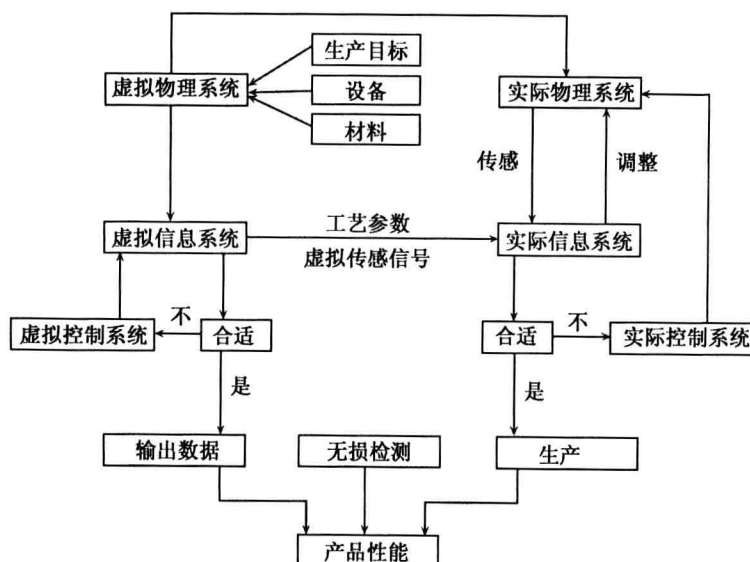


图 1-3 复合材料智能制造系统

制造的流程图。从图中可看出，复合材料及其结构的一体化制造需经过复合材料及结构的基本测试、材料及结构的设计、材料选择、外载分析、有限元分析、优化设计、破坏与失效判断、成型及工艺过程优化及式样制作等一系列步骤。它们之间是相互关联、相互影响的，因此需要将复合材料及其结构的一体化制造过程作为一个系统工程加以认真仔细研究，不可轻视某个环节的作用。对于传统的木质复合材料，如刨花板、胶合板和纤维板来说，由于它们的使用功能已经确定下来，适合它们的智能制造系统可能大大简化，或者是重点发展其中的一个或几个环节，例如，工艺设计环节和无损检测环节一直是近些年来木质复合材料领域内研究的热点，但是如果要开发新的木质复合材料，研究思路应该按照图1-4所示的顺序进行，只有这样木质复合材料科学才能得到更大进步，这是由复合材料科学发展证明的。