

亚麻非织造布成型性及其复合材料异型件的研究

摘要

本文根据天然纤维复合材料的巨大发展前景和我国亚麻资源的优势,以天然亚麻纤维为研究对象,使用模压法这种生产成本低,易于实现自动化的方法制作复合材料异型件产品。由于模压法生产异型件时对二维织物的成型性能要求较高,因此在制备增强材料时使用非织造布的加工方法进行,不仅简单高效,而且通过实验发现制成的亚麻非织造布具有良好的成型性,可以深度模压制成几何形状复杂的复合材料异型件。

模压过程的受力情况对制品的质量和模具有很大影响。本文分析此过程时尝试采用简化的二维模型对模压过程进行有限元数值模拟,通过与试验对比发现,简化模型的计算结果与实际非常吻合。其分析结果可为模压工艺的改进,特别是模具的进一步优化设计提供理论依据。

为了提高亚麻非织造布增强体力学性能和纤维体积含量,在模压实验之前采用缝合的方法又对亚麻非织造布进行了增强,通过对缝合后的复合材料板材进行测试发现,缝合可明显提高板材的拉伸性能,但弯曲性能却略有下降。综合缝合对层间性能以及拉伸、弯曲性能的影响分析,确定了缝合增强的可行性。

二维织物的成型性对模压制品的性能影响很大。为了研究缝合后亚麻非织造布的成型性,首先使用冷压工艺在较低压力下制备了半球形复合材料异型件,通过对比亚麻非织造布与层合平纹玻璃布复合材料异型件发现,缝合后的亚麻非织造布具有良好的成型性,模压过程中不出现如织物起拱起皱等影响表面质量的现象,并且经测试半球形复合材料制品发现,适当的缝合工艺提高了制品的性能。其次在冷压工艺的基础上采用高温高压的模压工艺制备了复合材料异型件。由于纤维的含量大大提高,制品的性能克服了冷压工艺制品表现出的断裂应变太小,容易发生脆性破坏的缺点,表现出断裂应变较大,对应力集中不那么敏感的特点。

关键词:天然纤维复合材料; 亚麻非织造布; 复合材料异型件; 成型性; 有限元分析; 优化设计

Study of forming capability of nonwoven flax mat and nonwoven flax mat reinforced composites

ABSTRACT

According to increasingly development of natural fiber reinforced composites and enormous flax fiber resources advantage in China, the paper selected flax fiber as research object, utilizing compression mold method which is a kind of low-cost and easily-automotive way to manufacture irregularly geometric composites. Because of restriction for forming capability of 2D textile while molding, the paper tried to prepare 2D textile by way of nonwoven production that is a easily handled and efficient way, with the result of excellent forming capability in 2D nowoven and possibility of depth molding found in experiment.

State of compression during mold process affected product quality and tool dramatically. In this paper, two dimensional reduced model was analyzed by finite element method as a try to study this process. Compared with experimental result, exact coincidence was found between the calculated model and experimental result. The analysis result could be theoretical reference for parameters amelioration and further optimization design of tool .

In order to improve mechanical property of nonwoven flax mat and fiber volume content , nonwoven flax mat was reinforced by stitching before compression-mold experiment. Through tests for composite plate, the result that tensile property improved apparently and bend property decreased a bit was found. Sum up of effect on interlaminar property, tensile and bend property, feasibility of stitching was configured.

The forming capability of 2D dimensional fabrics could greatly affect the quality of compression-mold product. In order to research the forming capability of nonwoven flax mat, firstly the method of cooling compression experiment was conducted to manufacture hemisphere composite under low press. Comparison between nonwoven flax mat and multilayers of glass fiber plain textile showed that forming capability of stitched nonwoven flax mat are excellent and some abnormal events did not occur during compression mold process, such as textile

bulking and wrinkle. Moreover test showed proper stitching has improved mechanical property of hemisphere composite. Secondly irregularly geometric composite was made under the high temperature and press experimental condition on the basis of cooling compression experiment. Due to fiber content increasing greatly, the product eliminated shortcomings of cooling compression product, such as too small fracture strain, easily fragile fracture etc, showing characteristics of large fracture strain and not sensitive to stress concentration.

KEYWORDS: natural fiber composite; nonwoven flax mat; irregularly geometric composite; forming capability; finite element analysis; optimization design

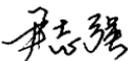
目 录

□	文 摘	
□	英文文摘	
□	独创性声明及学位论文版权使用授权书	
□	引 言	
□	第一章课题的提出及意义	
□	1.1 天然复合材料发展前景	
□	1.2 复合材料异型件的应用及制作方法	
□	1.3 本课题的研究目的与构成	
□	小 结	
□	第二章亚麻非织造布的制备与性能测试	
□	2.1 纤维长度的测试	
□	2.2 纤维细度的测定	
□	2.3 非织造布材料的制备	
□	2.4 非织造布的性能测试	
□	2.4.1 定重测试	
□	2.4.2 厚度测试	
□	2.4.3 拉伸强度测试	
□	2.4.4 顶破强度测试	
□	小 结	
□	第三章缝合非织造布及其复合材料板材的性能	
□	3.1 缝合方法与工艺	
□	3.2 复合材料板材的成型与制备	
□	3.3 缝合对复合材料板材性能的影响	
□	3.3.1 对拉伸性能的影响	
□	3.3.2 对弯曲性能的影响	
□	小 结	
□	第四章缝合非织造布复合材料异型件的冷压成型	
□	4.1 实验方案的制定	
□	4.2 冷压料的制备	
□	4.3 复合材料半球形异型件	
□	4.3.1 半球形模具设计	
□	4.3.2 表面粗糙度处理	
□	4.4 半球形异型件的制作	
□	4.5 非织造布结构对成型性能的影响分析	
□	4.6 异型件的性能测试与分析	
□	小 结	
□	第五章缝合非织造布复合材料异型件的模压成型	
□	5.1 模压成型工艺	
□	5.1.1 模压成型工艺的特点	
□	5.1.2 模压成型工艺的类型	

□	5.2	模压方法的选择
□	5.3	异型件模具的设计
□	5.4	成型压力的计算
□		小结
□		第六章模压过程的有限元分析
□	6.1	分析模型的简化
□	6.2	分析模型的建立
□	6.3	分析单元的选择与建立
□	6.3.1	单元刚度矩阵
□	6.3.2	组集和整体分析
□	6.3.3	分析单元的建立
□	6.4	计算结果分析
□		小结
□		第七章复合材料异型件的制备与实验
□	7.1	原材料的选择与制备
□	7.1.1	缝合方法与工艺
□	7.1.2	成型压力的控制
□	7.1.3	树脂体系的确定
□	7.2	模压成型实验
□	7.3	制品表面质量
□	7.4	实验测试及结果分析
□	7.5	模具的优化设计
□		小结
□		结论
□		参考文献
□		致谢
□		附录一：米泽斯屈服应力
□		附录二：使用 Pro/Engineer 设计软件完成与 ANSYS 的数据交换
□		天津工业大学研究生学位论文附件（随论文附）

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果,除了文中特别加以标注和致谢之处外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果,也不包含为获得 天津工业大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名: 

签字日期: 2004 年 1 月 12 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津工业大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津工业大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索,并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名: 

导师签名: 

签字日期: 2004 年 1 月 12 日

签字日期: 2004 年 2 月 19 日

引 言

众所周知，在国民经济的三大支柱产业——材料、信息、能源中，材料始终起着先导作用。钢铁、铝、塑料等诸多新材料的问世，都曾对人类社会产生过划时代的影响。复合材料的使用则首创了飞机环球不间断飞行的世界记录，不但开辟了航空、航天史上的新纪元，而且翻开了材料科学发展史上崭新的一页，对现代科学技术与工业的进步产生了深远的影响。

复合材料是一种新型材料。它的出现是科学技术史上的一大突破，使人类在使用材料上，从过去为特定的结构选择材料，发展到目前为特定的结构设计材料。复合材料的出现在很大程度上改善和提高了传统单一材料的力学性能、物理性能和化学性能，并且可以解决在工程结构上采用常规材料无法解决的某些关键性问题。因此，不仅飞机、火箭、导弹、舰艇、坦克、人造卫星这些军工产品离不开它，而且运输工具、建筑材料、机器零件、化工容器和管道、电子材料、医疗机械、体育用品和食品包装也离不开它。由此可见，复合材料在国民经济中的作用十分重要。科学家预言，二十一世纪将是复合材料的世纪^[1]。

复合材料是由增强相、基体和填料通过人工复合工艺制造的，具有多相微观结构及特殊性能的固体新型材料系统。组分相材料除界面有弱化学反应外，基本上是物理结合。复合材料按用途分为结构复合材料和功能复合材料；按基体材料分为聚合物复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料；按增强材料分为粒子增强复合材料、薄片增强复合材料、纤维增强复合材料。其中，纤维增强聚合物基复合材料以其比强度高、比刚度大、重量轻、耐腐蚀、成型性好等优点，已大量作为各类结构材料、功能材料被广泛用于各个领域。

随着环保意识的增强，复合材料的力学性能和其可设计性的特点已不再是人们关注的唯一方面，无毒、无害绿色环保天然纤维复合材料的研究越来越引起研究者的关注。木材，棉，麻等纤维素类纤维，不仅具有质轻，廉价，易得和可循环分解对环境无污染的特点，而且具有各自的性能优势。

亚麻纤维具有纤维素质硬、耐摩擦、耐腐蚀、耐水泡和分布广泛等特点，我国麻类资源极其丰富，亚麻纤维属于高强低伸型天然纤维，（抗张 1100MPa，断裂伸长 2.4%），纤维的结晶度与取向度高。麻纤维所具有的这些结构和性能特点，正是复合材料增强纤维所要求具备的基本结构和性能特点^[2]。它与

玻璃纤维和碳纤维等相比,纤维柔软得多。使用非织造布加工方法将亚麻纤维加工成非织造布的形式来制作复合材料增强体,具有工艺简单、高产高速,增厚效果好,经针刺后还具有三维增强效果和良好的成型性等特点。通过整体模压可以制得结构复杂,机械性能良好的异件材料,可广泛运用在建筑工业和汽车工业等领域。对进一步拓宽复合材料的应用范围具有一定的实际指导意义和较高的经济及社会效益。

计算材料科学(Computational Materials Science),又称计算辅助材料设计(Computer-Aided Material Design),是近年来迅猛发展起来的一个多学科交叉新兴研究领域。它吸收和整合不同的学科知识和方法,对材料进行计算机辅助设计。从设计阶段就制定决定材料性能的各项参数和工艺,从而降低了进行物理化学实验的成本和缩短了制作材料的周期,因此对复合材料进行量化设计必须发展材料计算力学^[1]。

随着电子计算机迅猛发展,对复杂工程问题或结构进行计算和分析可以依靠有限元法—数值计算的方法进行准确和快速的计算。

目前,有限元分析技术已广泛应用于复合材料宏观力学分析及工程技术应用的各个领域,并逐渐向细观和微观层次发展。随着对结构复合材料、功能复合材料研究的不断深入,其研究范围也不断扩大,从原有的简单力学分析发展为对力—电—磁—热耦合场的研究。可以这样说,目前凡是大型和重要的工程技术项目,都采用有限元技术来作可行性分析,或作详细的计算校核、或作优化设计。有限元已成为现代工程技术人员必须掌握的一种基本分析工具^[2]。

本课题首先使用缝合的方法对亚麻非织造布进行了加固与层间增强,并研究了缝合对复合材料板材性能的影响。然后根据亚麻纤维本身的特点和亚麻非织造布具有良好成型性这一特点,把制作复合材料异件时的模压法作为研究对象,使用有限元数值分析的方法将模压过程模拟为界面接触问题,模拟了模压过程中可能出现的问题和制品可能出现的破坏部位,取得了与实验结果相一致的结果。最后通过优化设计压制时的各项工艺参数及反复实验获得了表面质量好且性能优良的制品。

第一章 课题的提出及意义

1.1 天然复合材料发展前景

随着环保意识的增强,各行各业特别是与人们生活密切相关的建筑业和汽车工业,将特别青睐绿色。因此,作为绿色产品的天然纤维复合材料将有很大的发展机遇,因为它不仅可以回收利用,而且不会造成污染环境。美国最大的建筑材料经销商 GEORGIA-PACIFIC 公司声称,用回收的木纤维和塑料废料制造的木纤维复合材料装饰材料,近年来成为发展最为迅速的装饰材料。

天然纤维来源丰富,价格低廉,加工方便,在复合材料中应用天然纤维可以降低复合材料的制造成本。这对于天然纤维复合材料的发展是有利的。天然纤维的密度只有玻璃纤维的一半左右,因此用它制得的复合材料重量较轻,这一点对汽车内装饰材料及建筑装饰材料特别有吸引力。汽车及建筑业今后将成为天然纤维复合材料迅速发展的领域。据预测,北美地区 2000—2005 年间天然纤维复合材料汽车零部件的平均年增长率为 50% 左右。到 2005 年,汽车工业对天然纤维的年需求量将超过 4.5 万吨。

目前也存在一些影响天然纤维复合材料发展的不利因素。首先,对于复合材料制造商来说,除了木纤维外,其它天然纤维目前还没有稳定的供货渠道。其次,目前天然纤维的运输成本还较高,这一成本通常要占到天然纤维销售价格的 50% 以上。最后,天然纤维也存在吸湿性较大,与基材树脂的粘接性较差、复合材料的抗冲击强度较低等缺点。这些缺点会限制天然纤维复合材料的应用。所以,今后需要对天然纤维复合材料的助剂,例如润滑剂、紫外线吸收剂、粘接促进剂、抗氧化剂等进行研究,也需要对天然纤维的改性方法,包括改变其结构和表面状态的方法,进行进一步的研究。

1.2 复合材料异型件的应用及制作方法

近些年来产品多样化发展,许多复合材料都需要做成比较复杂的几何形状,传统的层合板复合材料以无法满足制作这些复合材料的需要,制作复合材料异型件零件越来越受到重视。然而,要想获得力学性能良好、表面质量高的异型件材料需要花费较高的生产成本和较长的生产周期,因此实现生产自动化和连续化将有非常重要的意义。如果可以实现更加经济的生产工艺,

复合材料的应用将能进一步得到扩展。

目前制作热固性复合材料异型件主要有以下几种方法:

1. 长丝缠绕工艺: 在纤维缠绕加工中, 经过树脂浸渍的连续纤维粗纱或布带按一定规律缠绕在芯模上, 达到所需厚度进行固化, 形成制品。纤维缠绕制品可应用于汽车驱动轴、直升飞机叶片、氧气罐、管道、球面压力容器、锥形火箭发动机外壳等。这种成型工艺适于制作轴对称形管状复合材料、或封闭形复合材料容器。使用这种方法制作时, 如果芯模的几何形状上有尖锐的拐角存在, 将影响纤维的缠绕, 因此使用长丝缠绕法几何外形应尽量光滑。
2. 袋压工艺: 袋压成型是在手糊成型的未固化制品上, 套上橡胶或其他不透气材料制成柔性袋, 将气体压力施加到未固化的复合材料制品表面再进行固化的工艺方法。在本课题研究初期选用这种方法时发现由于使用的是气体加压的方式, 在制作时要求装置密闭性高, 不易操作; 而且要求起密封作用的柔性袋贴膜性能强, 但当制品具有尺寸较小的凸凹部分和尖锐的拐角时, 很难保证制品质量, 而且密封袋容易破坏; 在制作过程中如发生气体泄漏, 产品质量将受到严重影响。由于这种方法制作时间较长, 适于制作产量不大结构不复杂的制品^[5]。
3. 模压法: 这种方法通常是通过压力装置将 2 维织物压成所需的几何形状。在金属对模中, 在一定的温度和压力作用下固化成型的工艺过程。这种方法生产成本低, 易于实现自动化。但最大的局限性就在于 2 维织物的成型性将直接影响制品的质量, 在模压时模压料往往会发生诸如褶皱、纤维断裂、面内剪切过大织物发生破损, 以及发生厚度差异较大等现象, 严重影响制品的质量^[6]。如果这些可以避免, 使用深度模压的方法将是一种经济快速的方法。因此, 织物本身的成型性在模压方法中起着重要的作用。

此外除增强体和树脂同时混合一次固化成型的方法外, 还有一些先将织物预制成所需的几何外形然后进行固化的方法:

1. 裁片帖覆法 (Cut-Fitting): 这种方法先将织物裁剪成平面小块织物然后将它们用缝合, 粘合等手段连接成空间几何形状。这种方法的最大缺点是连接部分质量容易出现问题, 而且生产成本过高。不易实现自动化生产。
2. 纤维喷射法 (Fibre-spraying): 将裁短至 25—125MM 的纤维利用喷射装置喷射到模具表面与化学粘合剂结合直接形成所需的几何形状。这种方法

制成的复合材料性能相对较低^[7]。

1.3 本课题的研究目的与构成

本课题旨在拓宽天然纤维的应用领域，实现复合材料的绿色环保和对人体无毒，无害的目的；研究更加经济和高效的生产复杂几何结构复合材料的方法。本研究首先使用针刺工艺对非织造布进行加固与层间增强，并对缝合后的复合材料板材进行测试和分析。在制备复合材料异型件时，选用模压法—这种生产成本低，易于实现自动化的制作方法作为研究对象，研究对比亚麻天然纤维非织造布和玻璃纤维平纹织物的成型性，并通过改进和优化制作工艺参数，制作了强度和表面质量理想的复合材料制品。

在研究制作复合材料异型件时，运用有限元数值分析的方法将三维模压过程简化为二维界界面接触问题，模拟了模压过程中可能出现的问题和制品可能出现的瑕疵部位，并与实验结果进行了对比分析。

针对实验中产生的问题提出改进方案，调整模压模具结构以确保在模压时获得均匀的模面压力；调整压制时各项工艺参数确保获得性能优良的制品。

期望通过本课题的研究，能够提高对天然纤维用途的认识，拓宽亚麻天然纤维的利用领域，提高复合材料的环保效益。

小结

可以预测对天然纤维复合材料的研究将会越来越受到重视。特别是使用其制作的复合材料异型件在产品多样化发展的今天更具有巨大的发展潜力，但综合几种制作复合材料异型件的方法可以看出，根据所要制作异型件材料的几何外形和所使用纤维的性能等特点，需要选用适当的制作工艺。

第二章 亚麻非织造布的制备与性能测试

为了了解和掌握原材料的性能本章对亚麻纤维的性能进行了测试，并用针刺法制备了亚麻非织造布，对非织造布的性能进行了测试，以便根据测试结果确定制作异型件的工艺。

2.1 纤维长度的测试

鉴于亚麻纤维为天然纤维，长度分布不如化学纤维规整，故不采用中断切断法，而采用手排法测定亚麻纤维长度。经测试，本研究采用的亚麻有效长度为16.6cm；中间长度为13.1cm；平均长度为10.554cm；短纤维百分率为36.96%。

2.2 纤维细度的测定

采用显微镜法测定了亚麻纤维的细度。

细度测试的10组结果如表 2-1 所示

表 2-1 亚麻纤维细度测试数据

编号	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	平均细度 μm
细度 (μm)	36	16	12	12	12	12	20	40	18	18	19.6

2.3 非织造布材料的制备

实验用亚麻非织造布由天津东丽区海河非织造布有限公司协助制备。该生产线由纤维输入装置、梳理机、铺网机、预刺机、主刺机组成。纤维输入装置采用定重式输入方式；梳理机为江苏常熟无纺机械设备厂生产的迎阳牌 B273A；预刺机和高频主刺机为江苏常熟无纺机械设备厂生产的迎阳牌 YZ-P 加重型。

为了使模压件性能各向相差不大，应在制备亚麻纤维非织造布时减小纵横向强度差异，所以采用交叉铺网的方式。使用两种工艺制备，分别是交叉铺网针刺一次、交叉铺网针刺两次。铺网方向和针刺方向如图 2-1 所示：

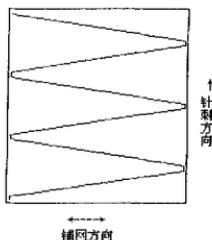


图 2-1 铺网方向和针刺方向示意图

其中针刺一次工艺为低频预刺加固，针刺两次工艺为采用低频预刺后，再用高频主刺加固。

2.4 非织造布的性能测试

实验用亚麻非织造布的性能测试主要包括定重的测试、厚度的测试、试样拉伸测试以及顶破测试。

2.4.1 定重测试

从非织造布不同部位剪取一定尺寸试样3块称重。测试时试样重量由普通天平测得。测得试样定重平均值见表 2-2。

表2-2 亚麻非织造布定重测试统计表

亚麻非织造布	定重 (g)			平均值 (g)
	交叉铺网针刺一次	745.9g	710.3g	
交叉铺网针刺二次	693.8g	643.3g	681.6g	672.9

2.4.2 厚度测试

厚度测试采用常州第二纺织机械厂生产的YG—141型织物厚度仪(分度值10mg)进行测试的。测试时加压50g，压脚面积为50mm²。在非织造布样片5处不同部位测定取平均值，具体测试数据如表 2-3所示：

表 2-3 亚麻非织造布厚度测试统计表

亚麻非织造布	厚度 (mm)					平均值 (mm)
	交叉铺网针刺一次	6.24	6.66	7.03	6.82	
交叉铺网针刺二次	5.03	5.60	6.02	5.55	5.60	5.56

2.4.3 拉伸强度测试

该测试采用南通宏大HD026N电子织物强力仪进行。设定拉伸速率100mm/min，夹距200mm/min。。非织造布裁样分纵、横向（玻璃布无纵横向差异，故取一向即可），取25×5cm矩形各5块取平均值。

试样包括交叉铺网针刺一次、交叉铺网针刺二次亚麻非织造布，以及中碱平纹玻璃布。表 2-4 为测试得各种试样拉伸性能对比结果。

表2-4 各种试样拉伸数据统计表

数据 工艺	横向		纵向	
	断裂强力 (/N)	断裂伸长 率(/%)	断裂强力 (/N)	断裂伸长率 (/%)
交叉铺网针刺一次	7.48	55.67	38.96	29.62
交叉铺网针刺二次	11.66	48.06	49.92	27.52
中碱平纹玻璃布	421.40	0.94	421.40	0.94

2.4.4 顶破强度测试

该测试采用南通宏大HD026N电子织物强力仪进行。设定顶破速率100mm/min。测试数据见表 2-5。

表 2-5 亚麻非织造布顶破测试统计表

工艺	顶破负荷(/N)
交叉铺网针刺一次	732.53
交叉铺网针刺二次	1108.68
中碱平纹玻璃布	—

由于顶破锤的面积较小，实验时直接穿过平纹玻璃布经纬线的空隙，无法测得中碱平纹玻璃布的顶破强度。

从拉伸数据可以看出尽管为减小纵横向强度差异采用交叉铺网方式，但断裂强度纵向仍大于横向，交叉铺网针刺二次非织造布比交叉铺网针刺一次非织造布强度高，比中碱平纹玻璃布的抗拉强度则小的多。从亚麻非织造布纵向拉伸断裂曲线来看，在不断伸长变形阶段，载荷-位移曲线仍保持近似线性关系，显示出亚麻非织造布在拉伸方向具有很大的变形能力，加之纤维间的相对滑移有利于深度模压成型。而平纹玻璃布的断裂伸长只有 0.94%，伸长

方向几乎无变形能力。

从顶破数据可以看出亚麻非织造布可抵抗较大的顶破载荷，而且随着顶破载荷作用面积的增大，顶破负载还将提高。而玻璃纤维平纹布在顶破面积较小的情况下，纤网发生划移，无法抵抗垂直于纤网的力，没有抗顶破的能力。根据这一现象预测在模压时当模压面有尖锐的突起部位时玻璃纤维平纹布发生结构变化及破坏的可能性将大于亚麻非织造布。

小结

亚麻纤维平均长度在 10 cm 左右，显然不能使用长丝缠绕的方法来制备异型件。通过对其非织造布材料的测试发现，亚麻非织造布具有很大的拉伸变形能力，而且抗顶破能力很大，这些特点是使用模压法制备异型件的有利条件

第三章 缝合非织造布及其复合材料板材的性能

针刺工艺使纤网表面的一些纤维随刺针穿过纤网（同时由于摩擦力作用而使纤网受到压缩），犹如许多的纤维束“销钉”钉入纤网，使已压缩的纤网不会恢复原状，缠结力和摩擦力得到很大增强，大大提高了非织造布的层间性能，但实验使用的非织造布增强体层间抗撕裂和分层的能力仍然较弱，纤网很容易发生层间破坏，如果为提高层间性能一味增加针刺密度会使非织造布材料过于密实，大大降低它的成型性能。但层间性能会影响用其制成的复合材料的力学性能，为此需要提高非织造布的层间性能。

缝绉层合板是为提高传统层合板层间性能而发展起来的一种新型结构。试验研究表明，缝绉能有效提高传统层合板的层间剪切强度和层间断裂韧性。但迄今为止，缝绉对层合板面内性能影响的准确预报尚未见报道，而以往对缝绉层合板拉伸刚度和弯曲刚度的试验研究结果出入较大。Hawley 等研究发现， $[45/0/-45/90]_{6S}$ 缝绉层合板（RTM 工艺，改进的锁扣缝绉）在缝绉密度从 $43 \text{ 针}/\text{in}^2$ 增加到 $128 \text{ 针}/\text{in}^2$ （约 $20 \text{ 针}/\text{cm}^2$ ）时拉伸刚度下降了 18.9%。WU 等研究发现，与无缝绉层合相比， $[0_2/90_2]_S$ 、 $[90_2/0_2]_S$ 缝绉层合板的杨氏模量 E_Y 下降了 1.15%—3.75%， E_T 下降了 4.24%—5.38%，因此普遍认为，缝绉并不会导致层合板模量的严重下降。这些研究表明，影响缝绉层合板刚度的因素很多，如成型工艺、铺层参数、缝绉参数或实验条件等的不同导致了这些结果之间的差异^[8]。

鉴于非织造布与层合织物结构的巨大差异，缝绉在提高层间性能的同时，是否会导致非织造布复合材料拉伸和弯曲性能的下降，本研究采用不同的缝合密度对亚麻布进行缝合；使用 RTM 工艺制作板材；测试了拉伸，弯曲性能一以此来分析和研究非织造布缝合的可行性^{[9] [10]}，以及缝合对非织造布复合材料板材的影响。

3.1 缝合方法与工艺

对非织造布拉伸测试时发现，纵向强度明显大于横向强度，所以本实验沿横向方向对交叉一次亚麻非织造布进行了平行缝合。观察缝合对横向拉伸

强力是否有增强效果,缝合方式如图 3-1 所示。

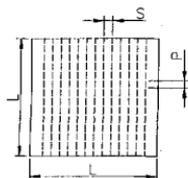


图 3-1 缝合示意图

图中 P 为缝合针距, S 为缝合行距, L 为亚麻非织造布边长。缝合方向垂直铺网方向,缝合形式如 3-2 图。



图 3-2 改进型的锁式缝合示意图

缝合采用三种规格。具体缝合工艺如表 3-1 所示。

表 3-1 缝合工艺参数表

缝合方式	改进型的锁式缝合法	
缝合密度	针距 P	4-5 针/cm
	行距 S	1cm、2cm、3cm
缝 针	12 号	
缝线类型	普通缝纫用涤纶线	

3.2 复合材料板材的成型与制备

RTM (Resin Transfer Molding) 成型,即树脂传递模塑工艺,是在一个耐压的密闭腔内先放好增强材料,再用压力将液态树脂注入模腔,依靠液压浸透纤维材料,然后固化成型^[1]。

根据 RTM 复合固化的原理,本研究设计了简易的真空辅助 RTM 复合固化装置,利用真空泵抽真空的作用,使模具内部与外界大气之间形成压力差,利用模具内外压力差将树脂压入模具中,完成树脂注入。

真空辅助 RTM 复合固化程序如下:

- (1) 检查装置的气密性;把亚麻非织造布放入腔内,将模腔密封。打开

真空泵观察压力值，确定压力读数达到0.09-0.1MPa。

(2) 开启树脂注入阀门，将树脂注入，观察树脂渗透情况。当树脂完全渗透布料后，打开红外灯进行加热。直到树脂完全固化。

(3) 树脂固化完毕，关闭真空泵和红外灯，在室温下放置24小时，取出制品，进行切边、整修，裁片^[12]

3.3 缝合对复合材料板材性能的影响

3.3.1 对拉伸性能的影响

采用岛津万能材料试验机参照 GB-1147-83 对拉伸性能进行测试，加载速度为5mm/min。表3-2为不同缝合间距试件在相同纤维含量下拉伸实验数据，表中值为5个试验样片的平均值，其中力值表示破坏时的最大载荷，变形为对应的最大位移。图3-3、3-4为典型的试样横、纵向载荷-位移曲线。

表 3-2 不同缝合密度试件拉伸数据

缝合间距		1cm	2cm	3cm	无缝合
力值 (kN)	横向	4.5594	5.0333	3.7250	3.3031
	纵向	2.2760	2.4552	2.3041	2.0223
变形 (mm)	横向	3.831	3.581	3.256	1.1906
	纵向	2.393	5.167	3.050	1.731

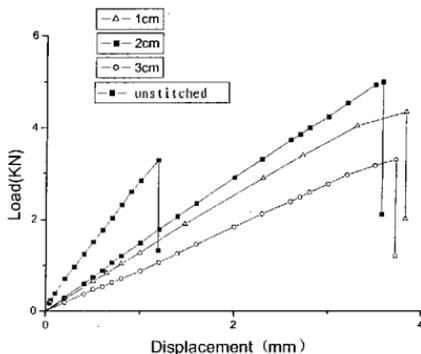


图 3-3 板材试件横向载荷-位移曲线

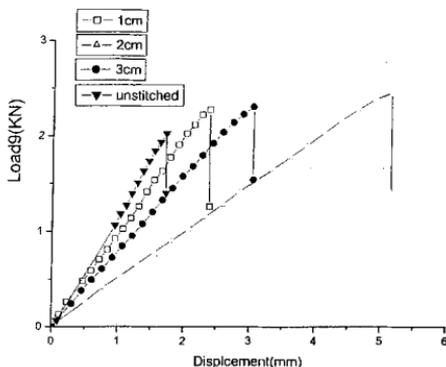


图 3-4 板材试件纵向载荷-位移曲线

从图 3-3、3-4 的拉伸曲线可以看出，经过缝合的材料横纵向拉伸断裂载荷都得到提高，特别是与缝合线方向一致的横向方向提高更加明显。缝合后的板材试件的横向拉伸强度大于纵向拉伸强度，与测试亚麻布时的结果相反（测试亚麻布时纵向拉伸强度大于横向拉伸强度），证明缝合可大大提高了该方向的拉伸性能。从图中还可看出，其为缝合间距为 2 cm 时，试件的拉伸断裂载荷明显高于其他三种试件。说明缝合虽然可以提高材料的拉伸性能，但缝合线密度过小时，缝合作用没被充分发挥，缝合密度过大时会造成太多的纤维损伤，反而会降低拉伸断裂强度。

3.3.2 对弯曲性能的影响

采用岛津万能材料试验机参照 GB-1449-83 对弯曲性能进行测试，跨距为 50mm，加载速度为 3mm/min。表 3-3 显示不同缝合间距试件在相同纤维含量下的弯曲实验数据，表中值为 5 片试验样片的平均值，其中力值表示破坏时的最大载荷，变形为对应的最大位移。

表 3-3 弯曲试验数据

缝合间距 测试数据		1cm	2cm	3cm	无缝合
		力值 (kN)	0.0788	0.1234	0.1234
变形 (mm)	纵向	0.0665	0.1124	0.0654	0.1567
	横向	11.731	7.993	7.993	4.989
	纵向	11.419	7.431	9.858	3.734
	横向				

注：由于实验试件要求宽度为 15mm，所以在试件上缝编宽度为 2cm 和 3cm 的横向方向均为一根缝合线。

从表 3-3 中可以看出，缝合对材料的弯曲性能影响与对拉伸性能影响呈现相反的趋势，缝合后的材料的最大弯曲载荷比未经缝合的材料出现降低的现象。观察试验片的破坏界面发现弯曲断裂均是在缝合线部位发生，说明缝合线部分在承受弯曲载荷时为复合材料的危险部分。这是由于缝合时线形排列的针孔造成富脂区及应力集中，在承受压力时，这些排列整齐的针孔容易成为裂纹开始的地方。

综上所述，缝合在提高材料拉伸性能上效果明显，而且通过拉伸曲线可以看出缝合间距为 2cm 时材料的拉伸强度最大。当继续增加缝合密度将缝合间距减小到 1cm 时，拉伸强度反而下降，说明过大的缝合密度会造成纤维损伤，另外由于在缝合方向的相邻针脚之间纤维被挤拢，以致缝后厚度发生波形起伏，使复合固化后的材料出现树脂分布不均^[3]，由于这个原因当缝合间距过小时会加重树脂不均的程度，造成材料性能下降。

小结

由于制作模压异型件时可能需要将多层模压料层叠，因此增强层间抗分层的能力将非常重要，通过试验测试，综合缝合对复合材料板材的拉伸、弯曲性能的影响，缝合工艺对异型件材料性能的提高有一定意义。但缝合后的亚麻非织造布是否仍具有良好的成型性仍需要进一步研究。

第四章 缝合非织造布复合材料异型件的冷压成型

本章在前一章确定缝合对复合材料板材的性能有提高作用的基础上, 研究缝合后的亚麻非织造布的成型性以及制成的复合材料半球件的性能。

4.1 实验方案的制定

在制备复合材料半球件阶段, 主要研究缝合后亚麻非织造布的成型性能, 即深度模压制备异型件的可行性。此阶段实验是在较低压力 0.1MPa 和无加热条件下完成。根据上述实验情况为减小制作成本, 此阶段所使用的模具为混凝土模和石膏 ($\text{C}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 模。

为了对比不同缝合密度的对亚麻非织造布的成型性及其复合材料制品的力学性能, 本实验采用不同缝合密度对亚麻非织造布进行加固。缝合仍采用平行缝合的方式, 将缝合间距作为研究变量, 通过实验测试复合材料的力学性能确定最佳的缝合工艺。

4.2 冷压料的制备

实验针对制成品的几何尺寸, 采用三种不同缝合密度对亚麻非织造布进行加固。缝合工艺如表 4-1 所示。

表 4-1 缝合工艺表

缝合方式	改进型的锁式缝合法	
缝合密度	针距	4-5 针/cm
	行距	1cm、2cm、3cm
缝 针	12 号	
缝线类型	普通缝绉用涤纶线	
缝合针刺 亚麻非织造布	交叉铺网针刺一次缝合间距 2cm、交叉铺网针刺一次缝合间距 3cm、 交叉铺网针刺二次缝合间距 2cm、交叉铺网针刺二次缝合间距 3cm	

4.3 复合材料半球形异型件

模具是工业生产的重要工艺装备。用模具生产零件的主要优点是利用率高, 生产效率高, 产品的尺寸规格一致, 特别是对大批量生产的机电产品更能获得价廉物美的效果。模具制造既要保证制品的精度和表面粗糙度, 又要提高效率 and 降低制造成本, 这需要针对不同批量、不同原材料、不同零件形状尺寸

和不同的生产条件，研制各种特殊的模具结构、模具材料和模具制造方法。

4.3.1 半球形模具设计

由于此部分主要研究亚麻非织造布的成型性能，实验采用 0.1MPa 压力并且在无加热条件下进行。因此在控制成本的原则下选择混凝土模和石膏模混合使用的方法，最大限度的降低模具制造的成本。

混凝土模多用于线性规则和重复使用次数少的产品，如螺旋形、波形、圆形、拱形或立体槽状产品，成本低，刚性好。石膏模的特点是耐热、廉价、导热系数小、制造方便。分别使用它们制作模具的阴模和阳模^[4]。

其中为防止在压力下阴模发生开裂，混凝土阴模在制作时加入 50mm—100mm 玻璃纤维作为填料。

4.3.2 表面粗糙度处理

由于水泥材料表面光洁度不高，固化后有孔洞产生，使树脂渗透到孔内，与模具产生螯合力，会造成脱模困难。实验采用 250# 磨料反复对模面进行打磨、抛光，尽量减少不平行于合模方向的缺陷。并打腊膜来增加模面的光洁程度便于脱模。

石膏模完全干燥后用树脂腻子修补，与混凝土模相同进行表面处理提高光洁度。

4.4 半球形异型件的制作

为了对比亚麻非织造布和平纹玻璃布的成型性，采用的模压料为：厚度 4mm 交叉铺网针刺一次缝合间距分别为 1cm、2cm、3cm；厚度 4mm 交叉铺网针刺二次缝合间距分别为 1cm、2cm、3cm；5 层积层平纹玻璃布（单层厚度为 0.2mm）的 7 种规格的模压材料。

利用阴阳对模先将模压料压制成药坯，再将配制好的树脂体系倒入，然后在压力值为 0.1MPa 下压制成型。

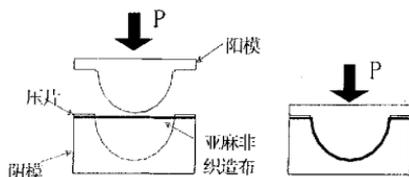


图4-1 半球形件制备过程

4.5 非织造布结构对成型性能的影响分析

亚麻非织造布结构中纤维束互相缠结,而且彼此之间存在较大的摩擦力。通过针刺工艺可以使纤网表面的一些纤维随刺针穿过纤网(同时由于摩擦力作用而使纤网受到压缩),犹如许多的纤维束“销钉”钉入纤网,使已压缩的纤网不会恢复原状,缠结力和摩擦力得到很大增强。在这种非织造布中纤维呈三维分布,呈现宏观有序,细观无序的状态。这种结构既不同于单向纤维增强材料也不同于短纤维增强材料;与二维织物相比,其结构中纤维的自由度更大大,可以很容易地向三维各方向移动与伸缩,比二维织物更容易实现深度模压的可能。

通过对比在模压时亚麻非织造布和层合平纹织物出现的情况发现,尽管使用的层合玻璃布厚度只有1mm(为亚麻非织造布厚度1/4),但在模压时边界发生起拱,起皱。特别是在曲面曲率变化大的边缘地方发生大量起皱现象,如图4-2,4-3中圆内部分所示,造成此处的纤维过度滑移发生明显破坏。但实验发现亚麻非织造布则不发生这些现象。

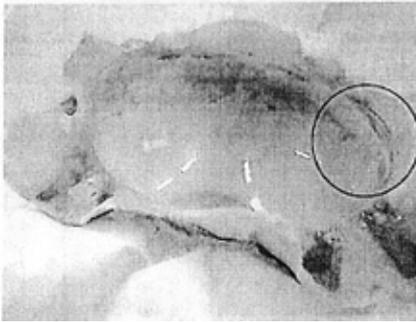


图 4-2 纤维破坏部位图

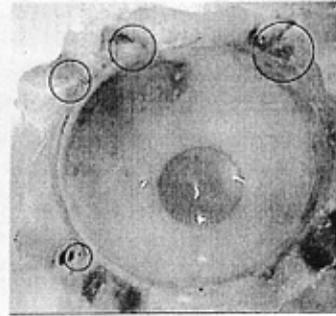


图 4-3 起皱部位图

4.6 异型件的性能测试与分析

异型件采用压缩破坏实验的形式,在日本岛津AG-250KN型材料试验机上进行测试,加载速率为3mm/min,如图4-4所示。图4-6为不同工艺制作的异型件在加载过程中的载荷-位移曲线。表1中最大载荷为制品破坏时的载荷值,所对应位移为最大位移。

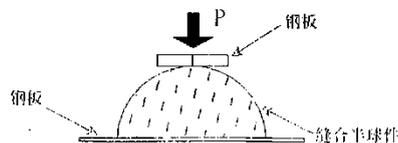
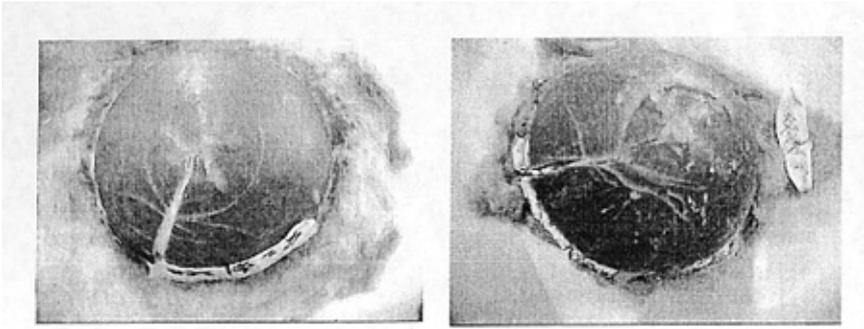


图 4-4 异型件压缩试验示意图



(a) 交叉铺网针刺二次缝合间距2cm (b) 交叉铺网针刺二次无缝加固

图 4-5 实验样品破坏照片

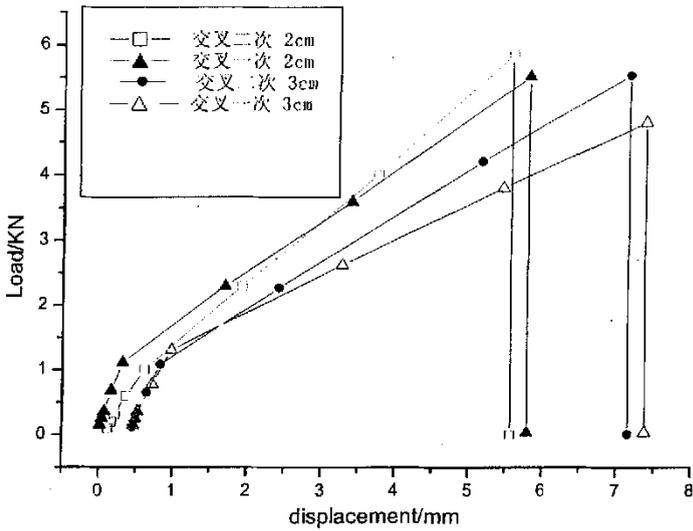


图 4-6 实验样品载荷-位移曲线

表4-2 不同缝合工艺增强异型件的测试结果

制作工艺	测试数据	破坏载荷 (/KN)	最大位移 (/mm)
交叉铺网针刺二次缝合间距 2cm		5.8343	5.617
交叉铺网针刺二次缝合间距 3cm		5.123	7.11
交叉铺网针刺一次缝合间距 2cm		5.080	5.80
交叉铺网针刺一次缝合间距 3cm		4.4312	7.347

从图 4-6 中可看出,在非织造布加工工艺相同的情况下,缝合间距 2cm 的样品均比缝合间距 3cm 的样品承载能力强,变形小。这是因为缝合间距小,纤网更加牢固,增强布的拉伸强度大、拉伸变形小,制品表现出较大的承载能力和较小的变形。但当缝合间距过小时,反而会降低制品的承载能力。一方面,缝合间距过小,非织造布变形能力降低,模压无法进行,从而不能制得理想的制品;另一方面,缝合间距过小,至使在模压过程中大量起皱,从而增加制品的缺陷和弱点,以至在较小外力下即发生破坏,降低了制品的整体强度。本实验制备的缝合间距 1cm 亚麻非织造布,由于缝合间距太小变形能力下降,在模压过程中产生纤网破坏,无法制成制品。

从图4-6中曲线中还可看出,在缝合密度相同的情况下,交叉铺网针刺二次的制品比交叉铺网针刺一次的制品有较大的破坏载荷和较小的变形。当其他工艺不变时,针刺次数多的缝合非织造布制得的异型件制品具有较大的承力能力和较小的破坏形变。这是由于,针刺次数多,则非织造布加固程度大,纤网更加密实,垂直于纤网层的纤维数量多,整体三维性能增强。其复合材料的三维增强效果好,具有较大的承力能力;同时,纤网的层间结合力增大,复合材料中纤维与纤维间,纤维层与树脂间的结合力也随之增大,不易发生位移,从而减小了制品的变形。但当针刺次数过多时,会损伤纤维,纤网不但得不到加固,反而产生很多弱点,严重影响非织造布的力学性能,进而影响了复合材料制品的性能;此外,针刺次数多时,纤网变形能力差,在成型过程中会大量起皱,从而增加了制品的缺陷和弱点,以至在较小外力下即发生破坏,降低了制品的整体强度。

小 结

通过冷压方法制作复合材料半球形件发现,缝合后的亚麻非织造布具有良好的成型性,深度模压制作产品的潜力很大,但由于本章采用的冷压工艺压力值较低,制成的产品纤维含量不高,对应力集中特别敏感,很容易发生突然的断裂破坏,需要提高压制时的压力值以提高纤维的含量。

第五章 缝合非织造布复合材料异型件的模压成型

5.1 模压成型工艺

一般说来,凡是制造玻璃钢制品总需要各种各样的模具。因此国际上有时把各种千差万别的玻璃钢成型工艺统称为模塑成型。但并非所有使用模具制造玻璃钢制品的工艺都称为模压成型工艺。

在模压成型时根据模具是否封闭,也即制品是否包容于模具中,可将玻璃钢成型工艺分为两大类型,即开式成型法和闭式成型法。而闭式成型法也通常被称作对模成型法。尽管此类成型方法很多,但工艺过程十分相似,它们大多采用结构比较复杂的金属对模,模压料约束在两半模具成型面之间,在一定温度和压力下固化成型。事实上,在众多的对模成型方法中,究竟哪些属于模压成型工艺范畴,目前国际上尚有些认识上的差异。就国际上通行的分类,可将模压成型定义为:模压料在金属对模中,受高温高压作用成型异形制品的工艺过程,并且在成型过程中,模具在模压料完全充模之前,一直处于非闭合状态。也就是说,模压成型一般应满足如下几个基本条件:

- 1) 模压料是在模具开启状态下加入的。
- 2) 成型过程中,模压料需要在较高温度条件下快速固化
- 3) 制品成型需要保持较高成型压力,成型压力一般由液压机施加。
- 4) 制品尺寸和形状主要由闭合状态下的模具型腔来保证。

根据上述定义,象真空注射模塑、冷模压、树脂传递模塑(RTM)等不属于模压成型的范畴^[5]。

5.1.1 模压成型工艺的特点

与其他成型工艺相比,模压成型工艺具有如下特点:生产效率高;制品尺寸精确,表面光洁,可以有两个精致表面;生产成本低,易实现机械化和自动化;多数结构复杂的制品可一次成型,无需有损制品强度的二次加工;制品的外观尺寸重复性好。但这种方法也有一些缺点,如压机、压模的设计与制造较复杂,初次投资高,模具在高压之下容易发生形变破坏,此外制品尺寸受设备限制,一般只适于制造中、小型尺寸制品等。

5.1.2 模压成型工艺的类型

根据当前国内外玻璃钢工艺应用与发展的普遍性,模压成型工艺大致可分为短纤维模压法、布料模压法、碎布料模压、层压模压法、缠绕模压法、

织物模压法、定向铺设模压法、吸附预成坯模压法、块状模塑料模压法、片状模塑料模压法。

5.2 模压方法的选择

由于经过缝合的亚麻非织造布结构的特殊性, 本实验选用的实际是预成坯模压法的一种简化方法。为简化名称以后称其为模压法。

预成坯模压法, 经常被称为金属对模成型法, 是指在成型模压制品之前, 预先将模压料仿制成与模压制品的结构、形状、尺寸相一致的坯料, 然后将其放入金属对模内与液体树脂混合, 加热加压成型。由于亚麻非织造布结构中纤维的自由度, 大通过实验发现可以深度模压直接成型, 而不用将模压料仿制成与模压制品的结构、形状、尺寸相一致的坯料, 这大大简化了模压工艺, 更容易实现自动化, 而且制品的厚度调节也更加容易。除此之外这种模压方法可实现较高纤维含量, 因而使制品具有优良的物理机械性能。

5.3 异型件模具的设计

模具是制造增强复合材料制品的重要工具, 复合材料制品的生产工艺、化学物理性质、机械强度、尺寸等都与模具有关。模具设计的合理性和精确性直接影响制品的质量和生产效率, 优质的模具是得到优质制品的前提。模具的特点决定了制品的特点, 模具的构形就是制品的构形。模具的表面光洁度决定了制品的表面光洁度, 模具的精度将反映出制品的精度^[16]。

复合材料成型模具的基本要求如下:

①模具应有足够的机械性能, 如强度、刚度。

②较小的热容量, 以便有效地利用热能, 且具有足够的热稳定性, 以抵抗成型过程中的热冲击。

③尽量选用与加工件热膨胀系数相近的材料, 以减少变形。

④质量轻、便于运输, 且成本低, 易于制造。

⑤维护方便, 有较长的使用寿命。

根据预制产品的形状和成型工艺, 实验用模具采用阴阳对模, 中间配置试样固定装置。此阶段对模具进行进一步的改进, 改进方案主要涉及模具材料、模具结构、模具脱模方式等等。

(1) 模具材料

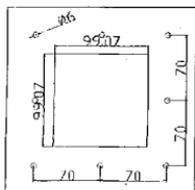


图 5-3 改进模具压片俯视图

(3) 模具脱模装置

在模具阴模、压片、阳模之间加入顶出装置。脱模时用螺杆与螺纹的作用力使阴阳模分离。

(4) 表面光洁度

经过抛光的不锈钢材料的表面光洁程度高，可不必进行打磨抛光处理。

(5) 成型压力

材料使用 3mm 厚不锈钢板，压力提高到 8MPa。实验时发现当压力值超过此界限时模具发生变形。

5.4 成型压力的计算

成型压力的大小在模压成型工艺中很重要，将直接影响制品的强度和数量，过高的成型压力将会造成模具的变形，造成很大的损失。过小难以保证树脂流到模腔各处。在模压成型工艺中，成型压力的大小决定于模压料的品种和制品的结构复杂程度，以及模具的强度。

成型压力是选择压机吨位的依据。根据制品选取的单位压力，按照公式 (5-1) 计算所需的压机表压：

$$P_{\text{表}} = \frac{p_{\text{单}} f_{\text{制品}} P_{\text{最大}}}{T_{\text{压机}}} \times 1000 \quad (5-1)$$

式中： $P_{\text{表}}$ ——压机表压，MPa；

$p_{\text{单}}$ ——制品的单位压力，MPa；

$f_{\text{制品}}$ ——制品的水平投影面积， m^2 ；

$P_{\text{最大}}$ ——压机最大允许表压，MPa；

$T_{\text{压机}}$ ——压机吨位，计算中以 KN 表示。

可以看出式(5-1)没有考虑制品的侧面积，但对于高度(或深度)尺寸较大的制品，在计算成型压力时，应对侧面积加以考虑。模压时侧面积受力情况与几何形状、角度有很大关系，在不同的侧面部位受力情况差异很大。这种复杂的受力情况已很难用解析的方法来求得准确的解析解。实验证明侧面积的受力情况将直接影响到制品的质量和模具的损坏，因此对侧面进行分析对模压工艺的制定和制品质量的提高有重要意义。

小结

选用模压法制备异型件时可以通过调节压制压力有效地改变制品的纤维含量，可以改善冷压阶段制品纤维含量较低的缺点。预制实验表明压制压力对模具的强度和制品的质量有很大影响，所以对模压过程建立准确的分析模型，为模压工艺的改进和制品质量的控制与提高提供了理论依据。

第六章 模压过程的有限元分析

在工程技术领域内，对于许多力学问题或场问题，人们已经得到条件，但能用解析方法求出精确解的只是方程性质比较简单、且几何边界相当规则的少数问题。对于大多数的工程技术问题，由于物体的几何形状较复杂或者问题的某些特征是非线性的，则很少有解析解。这类问题的解决通常有两种途径：一是引入简化假设，将方程和边界条件简化为能够处理的问题，从而得到它在简化状态下的解答。这种方法只在有限的情况下是可行的，因为过多的简化将可能导致不正确的甚至错误的解答。因此，人们多年来寻求和发展了另一种解决问题的途径和方法——数值解法。

已经发展的若干近似数值分析方法中，开始常用的是有限差分法。一个问题的有限差分模型可以给出它的基本方程的逐点近似。当采用较多的结点时，模型的精度便可得到改进。借助于有限差分技术，我们能够处理某些相当困难的问题。但当遇到几何形状复杂的边界条件时，应用有限差分法，解的精度受到限制，甚至发生困难。

近三十年来，随着电子计算机的飞速发展和广泛使用，出现了另一种新的数值方法——有限单元法。其基本前提是：将连续的求解域离散为一组有限个单元的组合物体。这样的组合物体能解析地模拟或逼近求解区域。由于单元能按各种不同的联结方式组合在一起，且单元本身又可以有不同的几何形状，因此可以模型化几何形状复杂的求解域，有限单元法作为一种数值分析方法的另一重要步骤是利用在每一个单元内假设的近似函数来表示全求解区域上待求的未知场函数。单元内的近似函数通常由未知场函数在各个单元结点上的数值以及插值函数表达。这样一来，一个问题的有限单元分析中，未知场函数的结点值就成为新的未知量，从而使一个连续的无限自由度问题变成离散的有限自由度问题。一经求解出这些未知量，就可以利用插值函数确定单元组合物体上的场函数。显然，随着单元数目的增加，也即单元尺寸的缩小，解的近似程度将不断改进，如果单元是满足收敛要求的，近似解最后将收敛于精确解^[17]。

6.1 分析模型的简化

为了说明简化的模型，首先介绍有限元分析中的误差原因。有限单元法

的误差，一般分为两类：计算误差和离散误差。

(1) 计算误差

计算误差是指在数值运算时产生的误差。引起的原因主要有两个：

一是在某一计算阶段由于大量的数值运算，势必要引起累积误差。在单元刚度矩阵计算中，由于它的各个元素都能用显式表示，其中每一个元素的计算次数只有几次到几十次，因此，关于每一个元素的计算误差并不大。由于与同一节点所连结的单元不会太多，最多不过七八个，因而在形成总刚度矩阵 $[K]$ 和总载荷向量 $\{R\}$ 时，也不会引起较大计算误差^[9]。

另一引起计算误差的另一重要原因是所谓“病态方程”问题。

病态方程是指对方程组

$$[K]\{\Delta\} = \{R\} \quad (6-1)$$

当 $[K]$ 或 $\{R\}$ 中的一些元素有一微小变化时，解 $\{\Delta\}$ 却出现一个很大的变化，这类方程就称为病态方程。引入病态方程的一个重要因素是计算机中数的表示和运算方式。以两个刚柔相差很大的单元相邻为例，如图 6-1 所示的结构，假设图中弹簧刚度 $K_A \gg K_B$ 。显然，

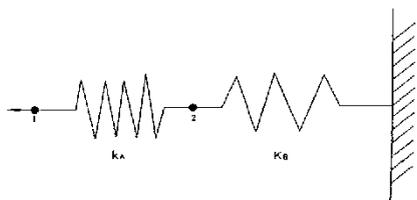


图 6-1 不同刚度弹簧连接单元

结构的总刚度矩阵和相应的逆矩阵为

$$[K] = \begin{bmatrix} K_A & -K_A \\ -K_A & K_A + K_B \end{bmatrix} \quad (6-2)$$

$$[K]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B} & \frac{1}{K_B} \\ \frac{1}{K_B} & \frac{1}{K_B} \end{bmatrix} \quad (6-3)$$

由于 $K_A \gg K_B$ 结构的总刚度矩阵 $[K]$ 中诸元素的值主要由 K_A 决定， K_B 可能被

忽略掉。而由于 $\frac{1}{K_B} \gg \frac{1}{K_A}$ 在逆矩阵 $[K]^{-1}$ 中诸元素的值主要由 K_B 决定, K_A 可被忽略。而 $\{\Delta\} = [K]^{-1}\{R\}$, 即节点位移的正确计算应由 $[K]^{-1}$, 即由 K_B 所决定。但是 $[K]^{-1}$ 是从 $[K]$ 计算得到的, 在 $[K]$ 中由于 K_B 与 K_A 相比太小而有可能被忽略以至丢失, 造成 $[K]^{-1}$ 的不正确, 最终导致 $\{\Delta\}$ 的不正确。

因此当刚度较大的单元被比它柔得多的单元包围时, 会助长较大的计算误差出现。因此如果同时定义模具的钢材材料和比它们刚度小许多亚麻非织造布材料, 不可避免地将会造成病态方程的产生, 将会大大降低求解的精度, 可见适当的简化模型有利于求解精度, 分析时采用刚柔度差距过大的材料反而会造成计算误差的加大。

在模压过程中随着压力的增加, 接触面 B (亚麻非织造布同阴模之间) 的压力随阳模向下位移的增加, 越来越接近接触面 A (亚麻非织造布同阳模之间) 的压力值, 因此在分析侧面积受力情况时, 它们之间的亚麻非织造布已经成为一种传递压力的载体。鉴于在模压过程中, 亚麻非织造布作用的特殊, 可以将它简化为阴模与阳模之间的接触问题。这样的假设比较真实的反应在模压过程中阴模、亚麻非织造布和阳模之间的受力情况, 也并不降低求解的精度, 并且可以避免当两种刚度相差较大的单元混用时造成病态方程的产生。

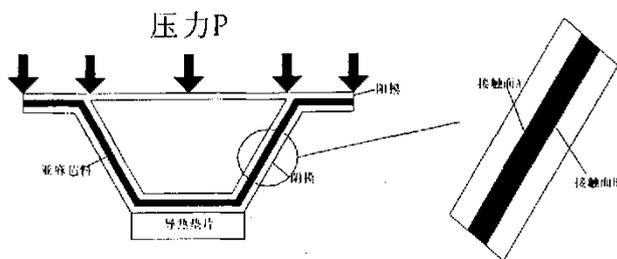


图 6-2 模压剖面与接触面图

(2) 离散误差

离散误差是由于连续体被离散化模型所代替并进行近似计算所带来的。引起离散误差的原因主要是使用具有有限个自由度的一个模型所假设的单元位移函数, 在一般情况下不可能精确表达连续体真实的位移场。还有, 单元

的划分不可能精确地和结构的几何形状拟合（如有时使用二维结构模拟三维结构；二维结构中使用直角单元来模拟曲线边界），此外，载荷的处理和边界条件的假设也不可能与实际情况完全符合等，这些都直接影响有限元法的离散误差。

我们知道，连续体有无限多个自由度，而有限元离散模型只有有限个自由度。如果增加离散模型的自由度数，使单元尺寸趋于零，则离散误差也会趋于零，有限元的近似解将收敛到精确解^[19]。

本实验的模压过程实际是 3 维受力的问题，而且分析时存在不同界面的接触问题，在建立分析模型时既要保证接触界面相重合，又要保证属于不同的模型部分，这将加大建模难度和求解负担，精度也得不到保障。为了分析这一复杂的过程，必须将问题简化才可以使分析成为可能。

基于简化物理模型最大限度地模拟模压时的情况，分析时选取模具的中剖面作为分析对象，将 3 维受力简化为 2 维受力情况，这在一定程度上已造成了一定离散误差。但由于此剖面受力情况具有代表性，因此用此模型作为分析代表可以反应出模压时的受力情况。可以为下一步模压实验和模具改进提供依据。

6.2 分析模型的建立

建立的分析模型如图 6-3 所示。

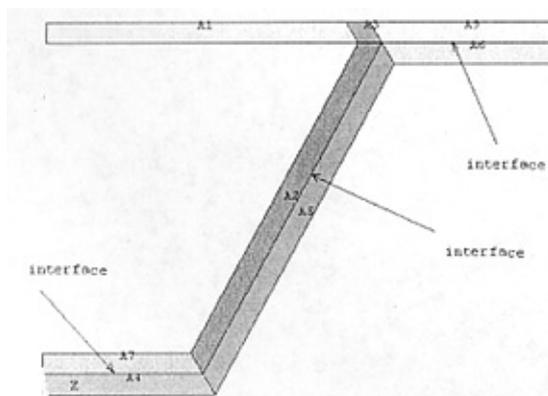


图 6-3 分析区域显示

由于中剖面几何性质具有对称的特点，分析时只选取模型的右半部分进行分析，图中 interface 为亚麻非织造布的等效单元，为使有限元单元生成时不出现几何形状不规则的四边形，影响分析的精度，将整体划分为 8 个面

积单元来模拟。其中面积 A1, A2, A3, A7, A9 为阳模部分模型在下文中称为上面积组, A4, A5, A6 为阴模部分模型在下文中称为下面积组。

阳模部分为一个连续的整体, 所以 A1, A2, A3, A7, A9 面积两两相邻的一条直线边同时被两面积共用。同样阴模部分为一个连续的整体所以 A4, A5, A6 面积两两相邻的一条直线边同时被两面积共用。这样处理使上面积组和下面积组各为一个整体, 而 interface 部分同时存在两条完全重合的直线, 通过定义其中一条为接触单元中的接触面和另一条为接触单元中目标面, 来模拟在阳模和阴模之间的非织造布模压料。

接触是一种很普遍的非线性行为, 它是状态变化非线性类型中一个特殊而重要的子集, 是一种高度非线性行为。本计算使用 ANSYS 面—面接触分析单元模拟模压过程。ANSYS 通过目标单元和接触单元来定义分析模型在变形期间可能发生接触的区域, 在使用时, 分析模型如果还没有被划分网格生成单元, 接触定义向导不起作用。所以应当在定义接触单元前将分析对象离散, 过程与其它离散过程一样, 但需要注意使用恰当的单元类型给接触体划分网格。根据 ANSYS 建立接触单元的原则: 要将网格划分细的凸面定义为接触面, 划分粗的凹面部分定义为目标面^[20]。

6.3 分析单元的选择与建立

使用二维模型模拟三维问题, 使分析得到简化, 但根据分析区域的几何形状使用规则的平面矩形单元进行单元划分, 在斜边处程序自动出现形状极度不规则的单元, 因此将边长为 2 的正方形基本单元变换, 即得到任意四边形单元。

本分析单元选用 4 节点任意四边形单元, 如图 6-4 所示。

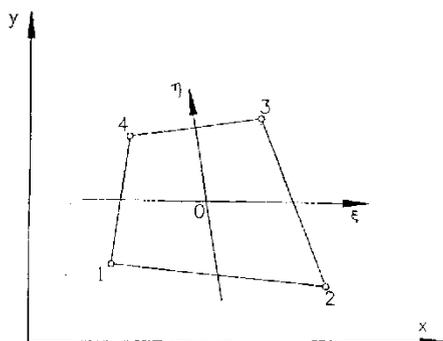


图 6-4 任意四边形单元

它是将边长为 2 的正方形基本单元变换得到，节点按照逆时针顺序编码为 1, 2, 3, 4。每个节点有 u, v 两个位移分量，因此单元共有 8 个自由度，位移模式取为：

$$\begin{aligned} u &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy \\ v &= a_5 + a_6x + a_7y + a_8xy \end{aligned} \quad (6-4)$$

为方便计算，将在整体坐标系 (X, Y) 中四节点变换为局部坐标系 (ξ, η) 中用局部坐标表示的基本单元位移模式一般为：

$$\begin{cases} u(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) u_i(\xi_i, \eta_i) \\ v(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) v_i(\xi_i, \eta_i) \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6-5)$$

式中， n 为单元节点数。 $N_i(\xi, \eta)$ 为形函数，它唯一地确定单元中每一个节点的位移状况。由于上述位移模式也同样适用于节点，因此形函数满足下列条件，并可据此条件来构造形函数

$$N_i(\xi_k, \eta_k) = \begin{cases} 1 & (k=i) \\ 0 & (k \neq i) \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6-6)$$

由基本单元的四条边的方程为：

$$\text{边 } \overline{12}: \eta = -1 \quad \text{即 } 1 + \eta = 0$$

$$\text{边 } \overline{23}: \xi = 1 \quad \text{即 } 1 - \xi = 0$$

$$\text{边 } \overline{34}: \eta = 1 \quad \text{即 } 1 - \eta = 0$$

$$\text{边 } \overline{41}: \xi = -1 \quad \text{即 } 1 + \xi = 0$$

由于形函数 N_i 在 2, 3, 4 节点处的值均为 0，而这三点在边 $\overline{23}$ 和 $\overline{34}$ 上，因此得到：

$$N_1(\xi_k, \eta_k) = C_1(1 - \xi)(1 - \eta) \quad (6-6)$$

而在节点 1 处的值为 1，可得下式：

$$C_1(1 - \xi)(1 - \eta) = 1 \quad (6-7)$$

由于节点 1 在基本单元及局部坐标下的坐标为： $\xi = -1, \eta = -1$ 代入上式得：

$$C_1 = \frac{1}{(1-\xi_1)(1-\eta_1)} = \frac{1}{4} \quad (6-8)$$

这样可得:

$$N_1 = \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) \quad (6-9)$$

同理, 可推导出 N_2, N_3, N_4 , 引进变换 $\xi_0 = \xi_i \xi, \eta_0 = \eta_i \eta$ ($i=1, 2, 3, 4$)

将形函数统一写成:

$$N_i = \frac{1}{4}(1+\xi_0)(1+\eta_0) \quad (6-10)$$

由此基本单元的位移函数可写为:

$$\begin{cases} u(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) u_i \\ v(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) v_i \end{cases} \quad (6-11)$$

坐标变换到原点坐标系下:

$$\begin{cases} x(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) x_i \\ y(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) y_i \end{cases} \quad (6-12)$$

6.3.1 单元刚度矩阵

对于单元来说节点力是通过节点作用于本身单元的力, 所以单元节点力是作用于单元的外力, 显然在单元内部会引起相应的应力, 设此单元各节点有虚位移, 则在单元内有相应的虚应变。根据虚功原理: 外力虚功应等于内力虚功。所以节点力在节点的虚位移上所作的虚功应等于单元内部应力在虚应变上所作的虚功。由此可得到单元应力及单元节点力之间的转换关系。

设单元上的节点力和由之而引起的单元内应力分别为

$$\{F\}^e = \begin{Bmatrix} U_1 \\ V_1 \\ U_2 \\ V_2 \\ U_3 \\ V_3 \\ U_4 \\ V_4 \end{Bmatrix} \quad (6-13)$$

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (6-14)$$

设单元节点由于某种原因发生的虚位移为 $\{\Delta\}^e = \begin{Bmatrix} u_1^* \\ v_1^* \\ u_2^* \\ v_2^* \\ u_3^* \\ v_3^* \\ u_4^* \\ v_4^* \end{Bmatrix} = \{\delta^*\}^e$ (6-15)

在单元内部引起的虚应变为:

$$\{\varepsilon^*\} = \{\varepsilon_x^* \quad \varepsilon_y^* \quad \gamma_{xy}^*\}^T \quad (6-16)$$

外力虚功为:

$$W = [u_1^* \quad v_1^* \quad u_2^* \quad v_2^* \quad u_3^* \quad v_3^* \quad u_4^* \quad v_4^*] \begin{Bmatrix} U_1 \\ V_1 \\ U_2 \\ V_2 \\ U_3 \\ V_3 \\ U_4 \\ V_4 \end{Bmatrix} = \{\delta^*\}^{eT} \{F\}^e \quad (6-17)$$

设单元厚度为 t , 应用虚功方程, 得:

$$\{\delta^*\}^{eT} \{F\}^e = \iint_A \{\varepsilon^*\}^T \{\sigma\} t dx dy \quad (6-18)$$

$$\left(\{\delta^*\}^e \right)^T \{F\}^e = \iint_A \left([B] \{\delta^*\}^e \right)^T [D] [B] \{\delta^*\}^e t dx dy \quad (6-19)$$

$$\left(\{\delta^*\}^e \right)^T \{F\}^e = \left(\{\delta^*\}^e \right)^T \left(\iint_A [B]^T [D] [B] t dx dy \right) \{\delta^*\}^e \quad (6-20)$$

$$\{F\}^e = \left(\iint_A [B]^T [D] [B] t dx dy \right) \{\delta^*\}^e \quad (6-21)$$

$$\{k\}^e = \iint [B]^T [D] [B] dx dy$$

上式则为:

$$\{F\}^e = [k]^e \{\delta\}^e \quad (6-22)$$

这就是表征单元的节点力与节点位移之间关系的方程。

6.3.2 组集和整体分析

得到单元刚度矩阵以后, 为了对结构进行分析和计算, 还需要将各个单元组集起来, 恢复结构原有的整体面貌, 列出整体平衡方程。平衡方程建立了基本未知量和外载荷之间的关系。

假设结构中共有 NE 个单元, n 个节点。经过单元分析, 共获得 NE 组形如 (6-22) 的方程。为了将每个单元矩阵拼装到整体列阵中去, 将各个单元矩阵进行扩张。这样, 每个单元的平衡方程均可变为如下形式:

$$\begin{bmatrix} k_{11} & \Lambda & \Lambda & k_{14} \\ M & O & \Lambda & M & 0 \\ M & \Lambda & O & M \\ k_{41} & \Lambda & \Lambda & k_{44} \\ & & 0 & & 0 \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ M \\ M \\ \delta_4 \\ 0 \end{Bmatrix}_{2n \times 1} = \{R\}_{2n \times 1}^e \quad (6-23)$$

从上式可以看出, 对于每一个单元刚度矩阵的扩展矩阵, 除节点对应的双行双列的元素不为零, 其余元素为零。因此, 可用整体位移列阵代替扩展后的单元位移列阵。对扩展后的各个单元平衡方程求和, 则得:

$$\sum_{e=1}^{NE} [k] \{\delta\} = \sum_{e=1}^{NE} \{R\}^e \quad (6-24)$$

上式中 $[K] = \sum_{e=1}^{NE} [k]$ 是结构中所有单元刚度矩阵的总和, 称为整体刚度矩阵。

整体刚度矩阵中的每一个二维子矩阵均为单元刚度扩大到 $2n \times 2n$ 阶之后, 在同一位置上的子矩阵之和。它是一个奇异矩阵, 只有引入边界约束条件之后, 才是正定矩阵。因此必须考虑边界约束条件, 排除弹性体刚体位移的可能性。

6.3.3 分析单元的建立

分析单元的划分是有限元分析中重要的部分, 这一步骤完成整个分析单元的高离散化, 所以分析单元的种类以及分析单元的形状都非常重要。由于分析采用的是两分离面的接触的方法来模拟模压过程阴模与阳模的作用, 所以需要建立两条重合的直线的来模拟它们之间的模压料, 划分网格时这两条直

线分别属于不同的面积单元，要保证上下两个面积组划分时四边形不出现形状奇异的网格，必须将上面积组和下面积组作为整体来划分。这样划分使接触部分的两条直线为不同尺寸。根据结构的不规则情况选用 4 节点任意四边形单元将分析区域划分为 1703 个元素，节点数为 3185 个。

划分完成后，两面积组实际为分离的部分，并无载荷传递能力，必须建立接触单元将其连接。根据 6.3 建立接触单元的原则，把两条重合的直线中属于上面积组的直线定义为接触单元，把属于下面积组的直线定义为目标单元。接触单元定义完成的显示如图 7 所示。

本课题采用几何面的 1/2 对称面进行分析将对称面的水平方向约束为：

$$u_x = 0$$

在底部施加边界条件：

$$u_y = 0$$

整体网格划分和施加载荷、约束建立完成，如图 6-5 所示。

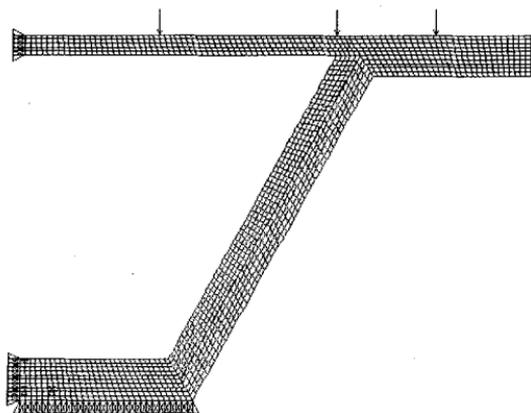


图 6 5 整体网格划分图

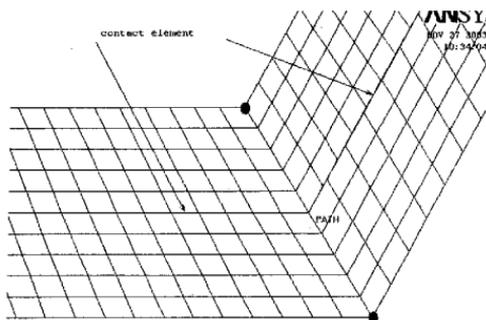


图 6-6 底部网格划分图

以上将原有的力学问题转化为求解有限元代数方程组的问题，由于本分析使用的接触分析是一种高度的状态非线性行为，所以求解时使用非线性求解器进行求解，由于模型中单元节点数多，所以选择 ANSYS 中的 Precondition CG 求解器，并将求解收敛公差调整到 $1E-06$ ，以缩短求解消耗的机时^[21]。

6.4 计算结果分析

通过有限元分析结果屈服应力等值图，可以发现在拐角处发生应力集中现象。此处应力比周围区域大 3 倍左右。

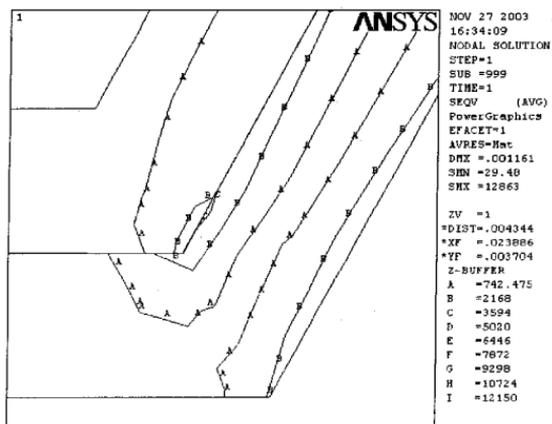


图 6-7 底部应力等值显示

为了清晰的看出拐角处的应力分布情况，建立图 6-6 所示的一条观察路径，将应力值映射到该路径上。映射顺序为由内部节点到外部节点顺序。应力分布情况如 6-8 曲线所示。

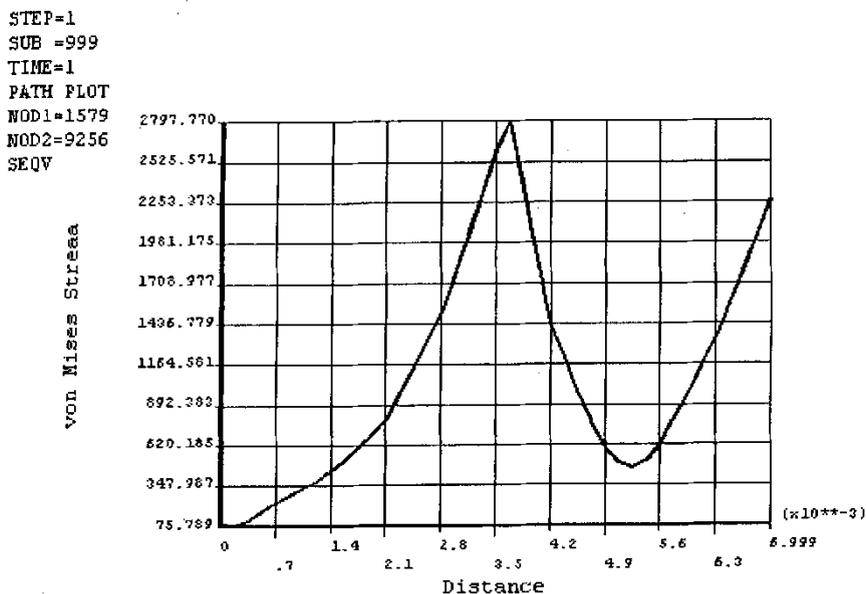


图 6-8 底部路径应力显示

从关系曲线可以看出拐角接触处的应力值远远高于阴模和阳模的其它部位，而实际上亚麻的承载能力远小于使用模具的钢材的承载能力，所以这一区域的亚麻非织造布在模压时是容易破坏的部分。

通过模压实验发现，模压时当模压压力上升到 15MPa 以上时，在阴模和阳模接触的底部四周纤维制品发生破坏，如图 6-9 所示，这一现象与有限元计算结果非常吻合。

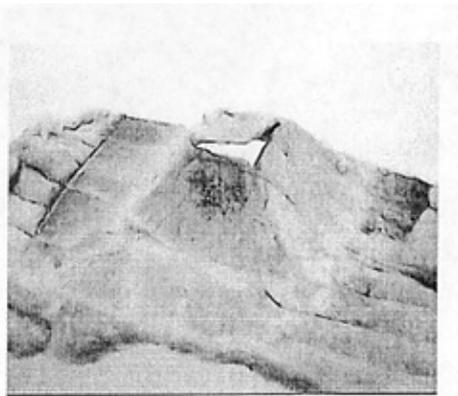


图 6-9 模压制品破坏照片

图 6-10 显示为阴模和阳模上半部分米泽斯屈服应力分布云图,从计算出的云图可以看出这一部分的应力集中并且较大。通过建立两条名为 WW 和 WW1 的路径观察应力情况,其中 WW 路径为侧部阴模与阳模之间米泽斯屈服应力情况。WW1 为阴模图中所示阳模内侧到顶部的分米泽斯屈服应力分布情况。

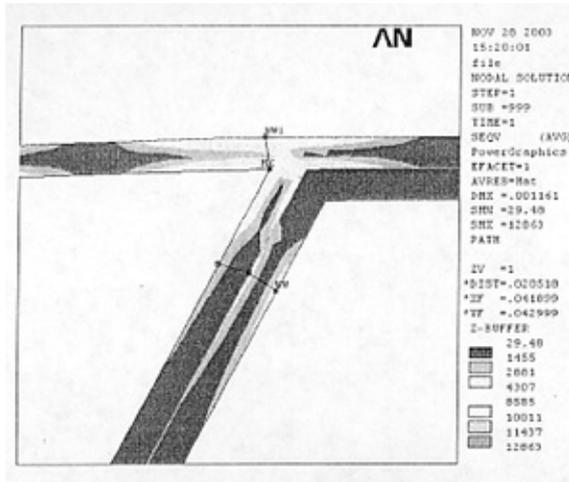


图 6-10 上部应力分布云图

POST1
STEP=1
SUB =999
TIME=1
PATH PLOT
NOD1=1872
NOD2=9476
SEQV2

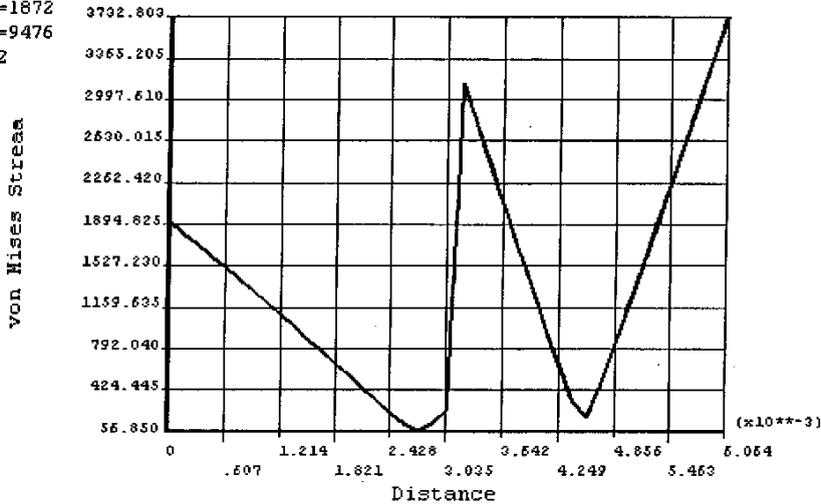


图 6-11 路径 WW 应力等值线

脱模时发现靠近底面的纤维有粘在阴模侧壁不易取出的现象,这是由于侧面受力不均匀造成的,从图 6-10 的应力分布云图可以看出接触部分的应力

分布向底面呈现减小趋势，在底面拐角处突然增大，这一结果与实验现象吻合。

从应力分布曲线可以看出，在 WW 路径上接触部分的应力值较高，但由于处在侧面，不会造成底部那样的切断纤维现象，而是在此处压力较大。脱模时发现这部分由于压力较大，纤维不发生粘在阴模侧壁的现象。此外从曲线可以看出阴模的外侧存在大的应力，在模压时压力过大时可能发生较大变形，损坏模具。实验证明此处确实为薄弱区域，模压压力超过 18MPa 时模具发生很大变形。

路径 WW1 显示图 6-10 所示的阳模部分应力情况，可以看出内外侧出现较大的应力，有可能破坏。但实际由于阳模上面与压机平面相接触，不会发生塌陷现象。

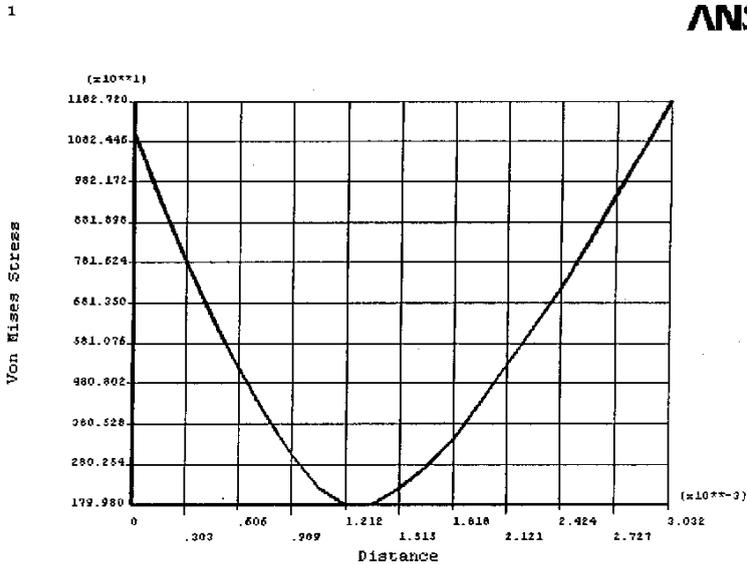


图 6-12 路径 WW1 应力等值线

定义接触单元可以将接触部分的结果取出，清晰的观察接触部分的各个结果，其中包括接触面的压力，如下图曲线所示在底面拐角处界面压力突然上升，有扎断纤维的可能，与实验相片所示结果一致。

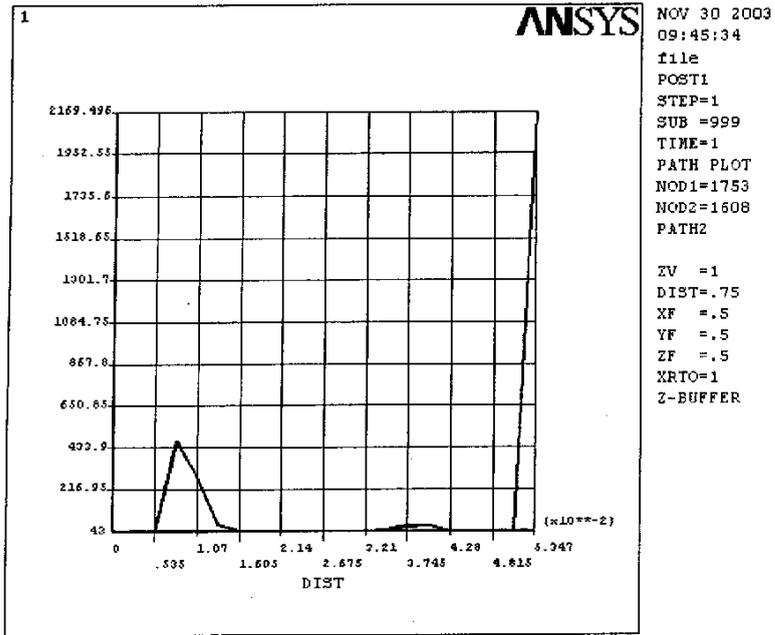


图 6-13 侧面压力曲线

ANSYS 提供了详细的结果信息，使分析者可以对数据进行分析时得到更多的信息，并且将求解结果利用计算机交互图形的技术显示成形象的图象，使分析者从大量数字结果中寻找规律的困难中解脱出来^[23]，大大降低了判读结果的工作量，下面的整体主应力分布向量图充分显示了使用有限元分析高效、误差小的特点。

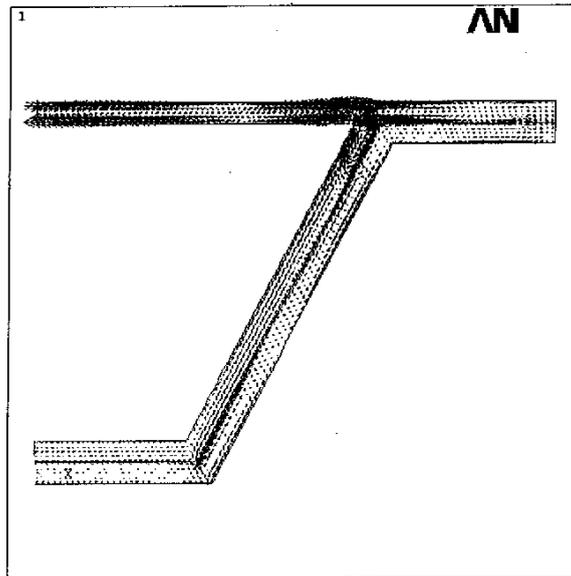


图 6-14 主应力分布向量图

从图中密集的向量箭头分布可容易地判断出模压料在模压时所受的压力分布情况和模具有可能发生形变的危险区域,通过预制实验证明,这一分析结果准确地反映了实际情况,与实验现象非常吻合。

小结

确立了本研究所用的有限元分析方案流程如图 6-15 所示。

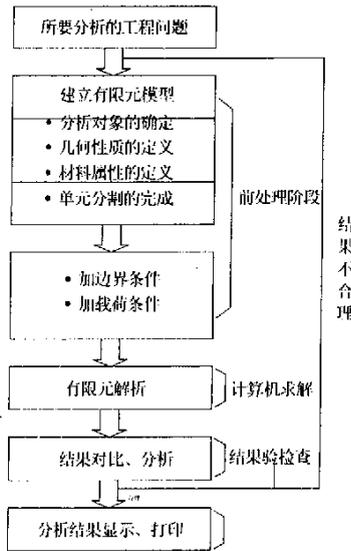


图 6-15 ANSYS 有限元分析流程图

为了在研究模压过程中对模压料和模具的影响,采用不同元素接触的方法将模压问题模拟成分离单元的接触问题,并通过将三维问题简化为中剖面的二维问题使复杂的模压研究成为可能。在定义接触单元时根据 ANSYS 定义接触面和目标面的原则,将网格划分细的凸面定义为接触面,划分粗的凹面部分定义为目标面将重合部分的两条直线定义为变形期间可能发生接触的区域。

在离散化时,考虑到几何形状的原因使用 4 节点任意四边形单元将分析区域划分为 1703 个元素 由 3185 个节点构成。由于使用的接触单元为高度的状态非线性,所以单元划分的恰当与否将对结果产生很大影响。

通过对比实验中发生的现象和有限元解析结果证明,所采用的有限元分析方案与模压实验现象的相吻合。为制备模压复合材料工艺以及后面的模具优化改进提供了理论依据。

第七章 复合材料异型件的制备与实验

在试制半球形复合材料异型件时发现亚麻非织造布具有良好的成型性能,并且通过对不同缝合工艺增强的复合材料性能测试发现,交叉铺网针刺二次、缝合间距为 2cm 时制品表现出最佳的力学性能。但从图 4-5 的破坏照片可以看出,制品表现出脆性断裂,破坏在瞬间产生。造成这一现象的原因有:模压时 0.1MPa 的压力过小,使制品中的纤维含量过低;常温下固化,在树脂体系中加入的促进剂和固化剂含量较大,这也是造成制品性能不佳的原因。

7.1 原材料的选择与制备

通过第四、五章所述的半球形制品的制作与测试发现,纤维含量过低是造成制品脆性断裂的主要原因,所以本研究的异形件采用半球形制品中两倍厚度的亚麻非织造布作为模压料。根据前面半球形件的性能测试结果,在此阶段采用性能较好的交叉铺网针刺二次的亚麻非织造布作为增强材料。

7.1.1 缝合方法与工艺

为提高纤维体积含量,采用双层亚麻布叠层作为增强体。故层间缝合增强比在制作半球形制品时作用更加重要。

在第一阶段模压制备复合材料半球形件时发现缝合线增加了模压的难度,当平行缝合间距为 1cm 时,已经无法压制制品。这是因为缝合密度过大降低了亚麻非织造布的成型性,同时缝合形式也是造成模压困难的原因之一。因此根据模压时非织造布由四周向中心缩聚这一几何变化特点。且如下图所示,对角线部位的位移相对较直边部位的位移小这一规律。

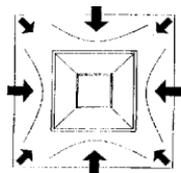


图 7-1 模压料运动方向

在本阶段缝合增强采用三种不同的缝合形式对非织造布进行缝合增强,目的是使缝合线在模压过程中不对模压布料的运动构成障碍,而造成纤维断

裂。根据第三章实验测试半球形件时发现,平行缝合同距 2cm 时为最佳缝合工艺,因此本章研究的异型件采用的平行缝合同距为 2cm。三种缝合的方式如图 7-2 所示。具体缝合工艺如表 7-1 所示:

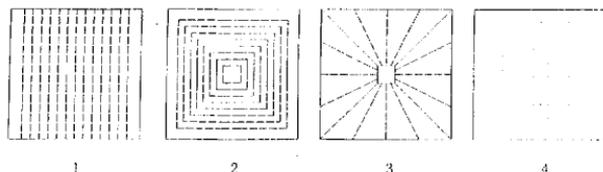


图 7-2 缝合线形图

表 7-1 缝合工艺表

序号	缝合工艺		
	缝合方式	改进型的锁式缝合法	
	缝线类型	涤纶线	
	缝合线形	缝合密度 (4-5 针/ cm)	密度(g/m ²)
1	平行缝合	平行线间距 2cm	1144.4
2	正方形缝合	相邻缝合同距 1.5cm	1177.3
3	放射形缝合	缝线之间角度 22.5 度	1115.8
4	无缝合	—	1279.7

7.1.2 成型压力的控制

根据(5-1)式,也可以从压机表压计算制品成型时实际承受的单位压力。实验用 YTD71-45A 吨位 450KN 油压机进行模压。固定压机表压在 8MPa 来计算制品成型时实际承受的单位压力。制品的水平投影面积如图所示。

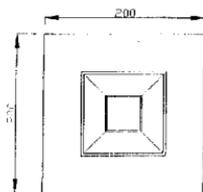


图 7-3 模压制品水平投影(mm)

根据公式得

根据公式得

$$P_{\text{压}} = \frac{P_{\text{表}} T_{\text{压机}}}{f_{\text{制品}} P_{\text{最大}}} \times 10^{-3}$$

实验中采用固定压机表压 $P_{\text{表}} = 8 \text{ MPa}$; 制品的水平投影面积 $f_{\text{制品}} = 0.04 \text{ m}^2$; 压机最大允许表压 $P_{\text{最大}} = 60 \text{ MPa}$; 压机吨位 $T_{\text{压机}} = 450 \text{ KN}$ 。

则得到:

$$P_{\text{压}} = 1.5 \text{ MPa}$$

满足模压时 1.4-2.1 MPa 的压力足以使上、下模合拢, 使材料流至模腔各处的压力条件。

7.1.3 树脂体系的确定

该实验采用的树脂为不饱和聚酯树脂 196^s, 具有较好的韧性。196^s 主要用于制造需要较大韧性的制品, 如受冲击力的船体与交通工具, 还可广泛用于做聚酯增强材料的表面胶层, 也可用于铸件。表 7-2 为 196^s 树脂性能表。

表 7-2 196^s 树脂性能表

树脂型号	粘度 25℃ PaS	凝胶时间 25℃ min	酸值 KOH mg/g	固体含量 %
196 ^s	0.25-0.75	4.5-20	25-35	50-65

过氧化甲乙酮引发剂 (活性氧含量 $\geq 5.0\%$) / 环烷酸钴液促进剂 (钴含量 0.8-1%)。

7.2 模压成型实验

(1) 装料量估算

计算的模压时异型件制品模压有效面积为 264 cm^2 , 根据缝合亚麻非织造布的密度和亚麻纤维的密度 1.46 g/cm^3 换算得到亚麻纤维体积。如表 7-3 所示。树脂密度用烧杯称重后计算可得 1.02 g/cm^3 。本实验纤维体积含量控制在 20% 左右。

表 7-3 纤维体积含量表

序号	亚麻非 织造布 质量 (g)	亚麻 纤维 体积 cm ³	196 [#] s 树 脂用量 (g)	196 [#] s 树脂体积 cm ³	纤维体积含量 (%)
1 号	30.31	20.76	101.1	99.11	20.1
2 号	31.07	21.28	104.9	102.84	20.69
3 号	29.46	20.18	114.9	112.64	17.91
4 号	33.78	23.14	120g	117.64	19.67

由于采用缝合增强的双层亚麻非织造布，树脂不容易浸透纤维层，因此树脂体系中加入了树脂重量 7% 的丙酮作为稀释剂，使用过氧化甲乙酮引发剂和环烷酸钴液促进剂均为树脂重量的 0.8%，树脂体系如表 7-4 所示。

表 7-4 树脂体系表

序号	过氧化甲乙酮 (g)	环烷酸钴液(g)	丙酮 (g)
1 号	0.81	0.81	7.1
2 号	0.83	0.83	7.3
3 号	0.92	0.92	8.0
4 号	0.96	0.96	8.4

(2) 脱模剂的涂覆

使用美国生产的 PMR 脱模剂涂覆阴模和阳模表面，用量在满足脱模效果的情况下尽可能少，涂覆均匀后放置 10 分钟以上后装料。

(3) 装料

先将树脂浸透模压料然后再压制成型的顺序。实验证明这种方法有效的防止了树脂料外溢的现象。

主要工序为：平铺亚麻布料在聚酯脱模纸上，将树脂倒上用另一张聚酯脱模纸盖上，接着用略小于制品面积的重物压在上面，通过上下两层透明的脱模纸观察浸透情况，发现树脂浸透上下两层布料并且浸透面积与重物相近时，将布料放置到阴模和阳模之间，开启压机进行模压。

(4) 压制成型

压制工序中最重要技术环节是压制制度的选定和控制。压制制度主要指温度制度和压力制度。

本实验采用快速压制工艺，从加压成型到树脂固化约需 15 分钟左右。压力控制在 8MPa。

由于模压料中含有一定量的挥发物，特别是丙酮含量较大，这些挥发物质在压制过程中若不能有效排除，将对制品质量带来不利影响。由于实验采用快速压制工艺，压制时间短，在短时间内会生成大量的挥发性物质，产生气泡、分层等缺陷。因此在模压过程中采取多次放气措施，即在加压初期，压力上升到一定值后，随即卸压启模放气，再加压充模，这样反复多次，以达到放气充模的效果。

温度制度包括装模温度、升温速度、成型温度以及保温等。本实验采用先将模具预热到 50℃ 然后装料，升温速度在快速压制工艺中不用考虑。成型温度主要取决于模压料的树脂系统，其高、低会对成型时其他工艺参数和制品质量有一定影响，一般来说，在一定范围内提高成型温度，可以缩短制品固化时间，提高制品性能。本实验成型温度为 85℃。

为使制品固化完全及消除内应力，实验选用保温时间 15 分钟。制品的脱模在 60℃ 进行，由模具设计的顶出机构顶出制品。

7.3 制品表面质量

尽管使用的模压料密度接近制备半球形材料时的非织造布密度的 2 倍，但在 8MPa 的高压力之下，实验制成的制品表面均无褶皱产生，图 7-4 为制品内部表面质量情况，图 7-5 所示为制品外部表面质量情况，可以看出在拐角处制品仍然表现出很好的外观质量。没有出现纤维破坏和表面起皱的现象。证明了亚麻非织造布具有良好成型性的特点。

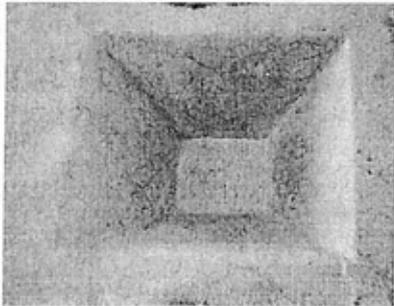


图7-4 制品内表面情况

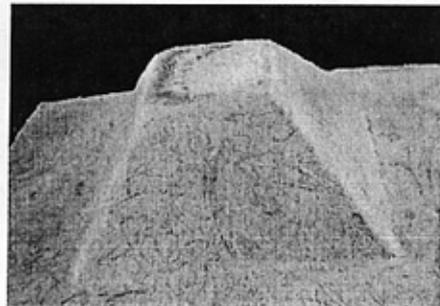


图7-5 制品外表面情况

7.4 实验测试及结果分析

对上述制品进行了压缩破坏测试，采用日本岛津（AHIMADZU）AG-250KN型材料试验机，加载速率为3mm/min。加载情况如图7-6所示。

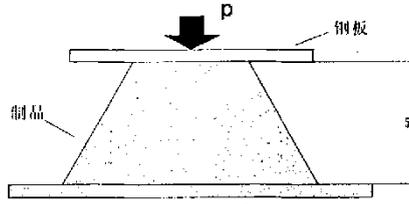


图 7-6 压缩破坏测试

根据材料试验机记录各个制品的数据，采用ORIGIN软件绘制成的位移-载荷关系如图7-7, 7-8, 7-9, 7-10所示。

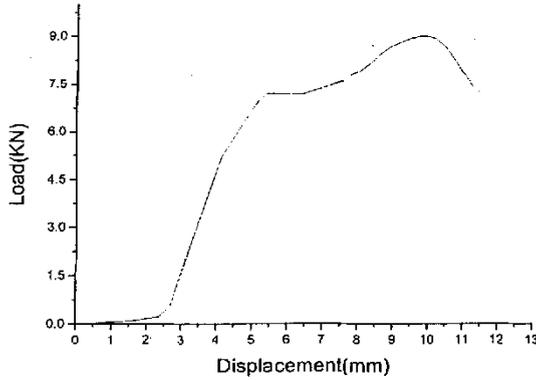


图 7-7 1号制品载荷-位移曲线

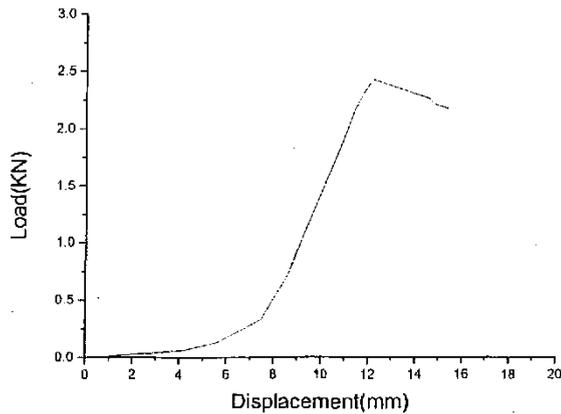


图 7-8 2号制品载荷-位移曲线

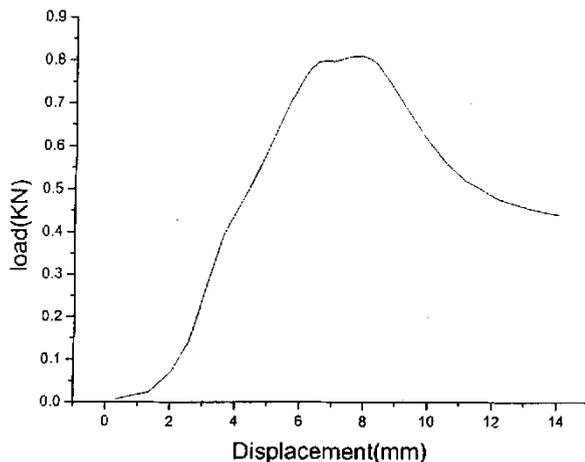


图 7-9 3号制品载荷-位移曲线

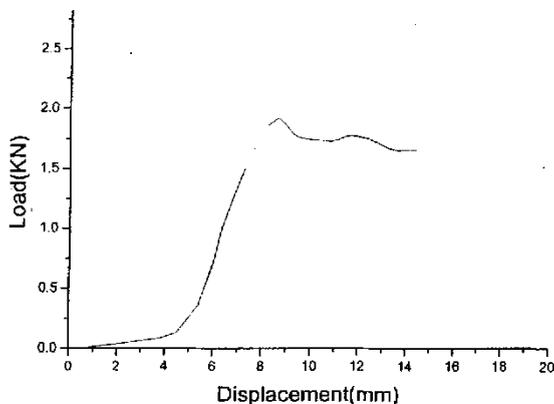


图 7-10 4号制品载荷-位移曲线

由图1、2、3、4中的载荷-位移曲线可见，每条曲线的初始部位比较平缓，这是由于测试时制品边缘有没被树脂浸透的纤维布，它们在测试台上造成接触面不是严格的水平平面。载荷继续加大制品进入变形阶段，四件制品在此阶段曲线斜率均变化不大，近似弹性变形状态。其中1号制品的曲线在达到第一个载荷峰值后又出现另一个载荷峰值。在两个载荷峰值之间曲线斜率变小表明制品抗变形能力已经变小。而其他制品在达到最大载荷后承载能力明显下降，曲线斜率表现为负值。

四条曲线中3号曲线的最大载荷最小，原因是底部纤维在模压时有部分被轧断，复合固化后并未显示，但在实验压力下很快造成制品损坏。如图7-11中圆圈部分所示。

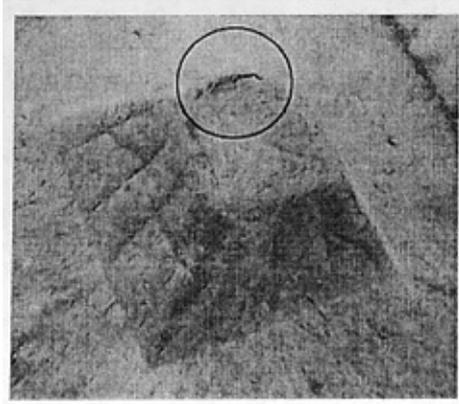


图 7-11 3号制品破坏图

四条曲线中1号曲线承载能力最强，最大载荷值达到8.99KN，2号制品的最大承载值为2.422KN，4号制品最大承载值为1.9218KN。与复合材料半球形结果相同，缝合提高了制品的力学性能。其中平行缝合间距2cm的缝合工艺制成的制品强度最高。

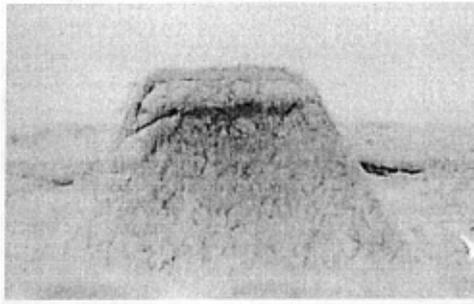


图7-12 4号制品破坏图

以4号制品的破坏相片为例，对比半球形复合材料的载荷-位移曲线和破坏照片可见，制品不发生瞬间破坏。复合材料半球形破坏后无剩余强度，而模压所得的制品发生较大变形后仍具有一定的剩余强度。这一特点在使用其制品时可获得更高的安全储备。但也反映出纤维含量过高与初期设计的纤维含量不符，造成此缺点的原因主要有：

1. 在实验使用的85℃下，树脂的粘度降低，流动性增强。再加上稀释剂丙酮的存在，使得树脂体系粘度过低，在很小的压力下极易发生外溢。
2. 使用压机的保压性能差。当压力由于保压性差逐渐下降时，需重新施加压力造成压力可能超出预定范围，树脂溢出。
3. 模具设计原因造成。当模压进行时由于没有定位装置，使得阳模施

加的力完全由布料承担，当压力值向上波动时，树脂发生溢出。

7.5 模具的优化设计

通过实验和制品测试发现模压实验的模具设计存在一些缺陷，造成制品质量的一些问题主要有：

1. 本实验使用 3mm 的不锈钢作为模压模具的材料刚度不足，压力增大时，模具容易发生较大变形。
2. 制品中的树脂浸入不匀，主要原因是模压时亚麻非织造布在模具内受力不均造成的，这和模具在模压时承力部位的设计有关。
3. 由于没有定位装置，厚度控制精度差，而且模压时造成大量树脂外溢，使制品纤维含量过高。
4. 模压时树脂被部分挤出，这给计算纤维与树脂含量造成一定困难，鉴于以上问题对模压模具进一步做优化设计。

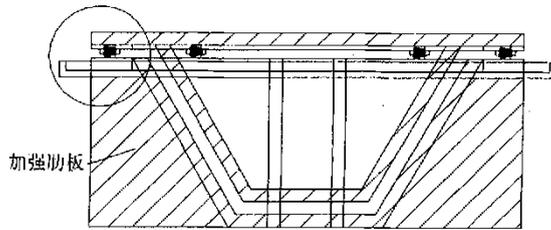


图 7-13 模具闭合状态正视图

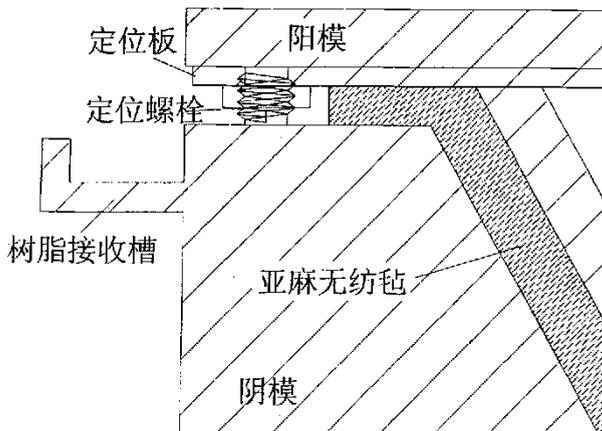


图7-14 模压装置放大图

1) 从图 7-14 可见，通过调节定位螺栓可以顶升定位板的位置，可在 3mm 范围内精确地调节模压制品的厚度，可以有效的防止树脂溢出。

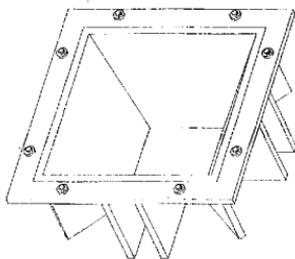


图 7-15 阴模轴侧图

2) 通过有限元计算分析和模压发现, 模具阴模模面外侧有较大变形, 为了增加模面的抗变形能力增加 12 个加强肋板防止由于压力过大时造成的变形, 从有限元分析可以看出模压料在模压过程中受力不均匀, 通过实验发现脱模时有粘模现象发生。通过加强肋板还可以将模压压力传递给模面侧部, 提高模压制品的质量。

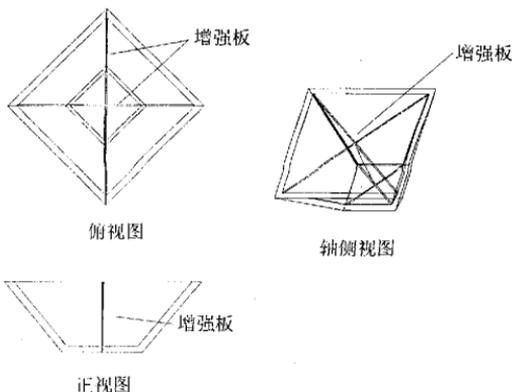


图 7-16 阳模内腔显示

3) 由于模具内侧拐角处发生应力集中现象, 模压过程发现另一变形较大的部位发生在阳模腔底部位, 而这一部位的变形修复困难很大。为增大抗变形能力, 将阳模腔内增加 2 个交叉的增强板, 可以提高模腔强度, 防止变形发生。

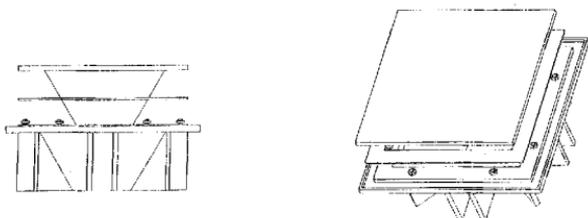


图 7-17 模具配合状态图

4) 由于实验采用溢式模压结构, 尽管采用定位装置, 树脂仍可能外溢, 这给计算纤维含量造成困难。修改后在阴模的四周增加树脂接收槽装置来接收溢出的树脂。此外由于观察不到模腔中树脂固化情况, 给确定起模时间带来困难, 通过观察树脂接收槽内的树脂固化情况, 可以确定停止给压和给温的时间, 将制品取出。

5) 使用不锈钢作为模具材料发现它的硬度太低在高压下很容易发生变形, 为此修改后的模具使用铸钢作为模具材料, 厚度增大到 4mm。为了提高模具的耐腐蚀性可采用表面镀铬的方法来进行表面处理。

小结

通过模压实验发现缝合后亚麻非织造布仍具有良好的成型性, 并且制品的性能也有所提高, 而且制品的表面质量好。这种利用亚麻非织造布的成型性一次模压生产异型件的方法很大程度上降低制作复杂几何结构复合材料的难度, 提高了生产效率, 降低了生产成本。将会促进天然亚麻纤维复合材料的应用与发展。

结 论

本文以天然亚麻纤维为原材料，使用针刺非织造布的加工方法将亚麻纤维制成纤维毡，然后采用缝合的方法对亚麻非织造布进行了加固，将缝合非织造布与热固性树脂进行复合，制作了亚麻非织造布复合材料；采用模压法制作了上述材料的异型件，并对其进行了力学性能测试与分析。通过本研究可以得出如下结论：

1. 使用缝合的方法对亚麻非织造布进行加固，可以改善亚麻非织造布的力学性能。缝合后材料的拉伸性能提高明显，弯曲性能却呈现下降趋势。但综合考虑，缝合对提高材料的层间及综合力学性能有明显作用。

2 经与层合玻璃布进行对比发现缝合后的亚麻非织造布具有良好的成型性能，适合做深度模压的异型件产品。确定了缝合增强亚麻非织造布深度模压的可行性和缝合增强的有效性。

3. 设计并制作了适合深度模压的钢质模具。将模压过程的三维问题简化为二维接触问题，采用有限元分析的方法，利用 ANSYS 有限元分析软件对模压过程进行了模拟，取得了与预制实验一致的结果。证明了接触假设模拟模压过程的有效性及其预测破坏的准确性。

4. 缝合增强可有效地提高板材及异型件的力学性能，但缝合形式与缝合工艺存在最佳值，本研究最佳缝合方式为平行缝合，最佳缝合密度为 2cm。

5. 针对实验出现的问题，为了防止模具在模压过程中的破坏、提高制品的质量，对模压模具提出改进方案。

参考文献

- [1] 方岱宁. 先进复合材料的宏微观力学与强韧性设计: 挑战与发展. 复合材料学报, 2000/5, Vol. 17, No. 2: 1~4
- [2] 张一浦. 苧麻落麻纤维增强热固性树脂复合材料的制备及性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料. 2002(1). 13-14
- [3] 王鹏飞等. 苧麻布增强UP复合材料的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2000. (2) 18-20
- [4] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在ANSYS上的实践. 西安, 西北工业大学出版社, 1999/8, 第1版: 1~60
- [5] 王善元. 张汝光. 纤维增强复合材料. 中国纺织大学出版社. 1998. 119-123.
- [6] 姜亚明, 张剑寒, 胡金莲. 平面织物成型研究. 天津工业大学学报. 2002. 第21卷第4期 41-46.
- [7] Dr.-Ing. A. Busgen. Shape Weaving-new invention for producing 3D-shaped Woven shells. Techtexsil Symposium in Frankfurt/M., June 19-21, 1995
- [8] 桂良进, 范子杰, 陈宋渝, 酃正能, 缝纫层合板的本构关系研究(1) - 缝纫单层板有效弹性常数分析. 复合材料学报. 2002年 第一期 第19卷
- [9] J.L.BOS, M.J.A. VAN DEN OEVER, O.C.J.J. PETERS. Tensile and compressive properties of flax fiber for natural fiber reinforced composites. JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 37(2002) 1683-1692
- [10] S.K. GRANKHAIL, R.W. HEIJENRATH and T. PEIJS. Mechanical properties of natural-fiber-mat reinforced thermoplastic based on flax fibers and polypropylene. Applied composites materials 7: 351-372. 2000
- [11] 梁志勇 段跃新 林云 张佐光. RTM 工艺专用混合型树脂体系研究—热性能与力学性能研究. 玻璃钢/复合材料. 2000年 11月 15-17
- [12] 赵渠森 赵攀峰. 真空辅助成型工艺(VARI)研究. 纤维复合材料. 2002年 3月 42-46.
- [13] 曾敦敦. 复合材料的细观破坏机制与强度[M]. 北京: 科学出版社. 2002. 64-70
- [14] 玻璃钢成型中常用模具的种类与特点. 纤维复合材料. 2002. (1) 56
- [15] 黄家康, 岳红军, 黄永祺. 复合材料成型技术. 化学工业出版社. 1999年 1月第1版. 258-269

- [16] 肖景容. 模具计算机辅助设计与制造. 国防工业出版社. 1990. 21-24
- [17] 王勳成 邵敏. 有限单元法基本原理与数值方法. 1988年9月第一版
- [18] 周中坚, 卢耀祖. 机械与汽车结构的有限元分析. 同济大学出版社
1997. 96-97
- [19] O. C. 监凯维奇. 有限元法 上册 [英]. 科学出版社 1985年10月
- [20] 夸克工作室. 有限元分析 ANSYS 与 Mathematica. 清华大学出版社
- [21] 易日. 使用 ANSYS 6.0 进行静力学分析. 北京大学出版社. 2002. 215-238
- [22] 3D finite element analysis of tensile notched strength of 2/2 twill weave fabric composites with drilled circular hole
- [23] 赵龙, 谢象利. 复合材料缝纫技术研究. 复合材料的现状与发展—第十一届全国复合材料学术会议论文集. 中国科学技术出版社. 2000. 9. 344~346
- [24] Nam-Jeong Lee, Jyongsik Jang*. The effect of fibre content on the mechanical properties of glass fibre mat/polypropylene composites. *Composites: Part A* 30(1999)815-822
- [25] 王震鸣, 杜善义, 张恒, 范赋群. 复合材料及其结构的力学、设计、应用和评价. 北京大学出版社, 1998年7月第一版 1-14
- [26] R.J.Palmer, M.B.Dow, and D. L. Smith, "Development of Stitching Reinforcement for Transport Wing Panels." 1st NASA Advanced Composite Technology Conf... Part 2, 621(1991)
- [27] 王俊勃, 万振江, 赵川, 李英民, 贺辛亥. 苧麻纬编针织复合材料的研制. *高分子材料科学与工程*. 第18卷, 第5期 2002. 9. 88
- [28] 卢徇, 章明秋, 容敏智, 畅桂成, 曾汉民. 剑麻纤维增强聚合物基复合材料. *复合材料学报*. 2002, 第5期, 第19卷
- [29] 蔡希林. AutoCAD 2000 中文版实用教程. 清华大学出版社. 2001
- [30] 林清安. Pro/ENGINEER 2001 零件装配与产品设计. 清华大学出版社. 2002
- [31] V.Kostopoulos, Y.P.Markopoulos, G.Giannopoulos, D.E.Vlachos. Finite element analysis of impact damage response of composite motorcycle safety helmets. *Composites: Part B* 33(2002)99-107

致 谢

本文系在导师王瑞教授的悉心指导之下完成的。在课题的研究和写作过程中，得到天津工业大学复合材料研究所，非织造布教研所，纺织材料实验室的大力协作，在此谨致谢忱。

衷心感谢王瑞教授和焦晓宁副教授，从论文选题到理论探讨，从原材料制备到实验分析，从论文审校到最终定稿，无不凝聚着他们大量的心血，他们严谨的治学作风将使我受益终生。

感谢纺织学院刘长河老师在非织造布制备阶段给予的大力协助。

感谢纺织材料实验室的张毅老师和李伟老师，在原材料性能测试过程中给予的大力协助。

感谢天津工业大学复合材料研究所的陈利老师和张国力老师在复合材料制作过程和测试中给予的大力协助。

此外感谢我的同学刘丽研在课题实验和论文写作过程中的帮助。

在此论文即将完成之际，衷心感谢导师王瑞教授在我研究生学习期间在学业与生活上给予的极大帮助和关心。同时感谢所有那些曾经帮助和支持本课题研究的老师和同学。

附录一：米泽斯屈服应力

米泽斯屈服条件是工程应用的常用屈服条件之一。这种屈服条件又可称为畸变能条件，它认为与物体中一点的应力状况对应的畸变能达到某一数值时该点便屈服。从物理上可以解释为：材料的形状改变弹性比能达到某一极限值时，材料开始屈服；或者可以解释为：当材料八面体上的剪应力达到某一极限值时，材料开始屈服。

以主应力表示的米泽斯屈服条件为

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = k^2 \quad (1)$$

其中 k 为表征材料屈服特征的参数，可由简单拉伸屈服实验确定。此时 $\sigma_1 = \sigma_0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0, \sigma_0$ 为简单拉伸屈服应力。将此值代入式子 (1) 可得

$$k = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_0$$

在三维情况下，米泽斯应力计算公式为：

$$\sigma_{eq} = \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)]^{\frac{1}{2}}$$

其中 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ 为三维应力状态下的各应变分量， ν 为泊松比， E 为杨氏模量。

附录二：使用 Pro/Engineer 设计软件完成与 ANSYS 的数据交换

Pro/Engineer(Pro/E)是由美国 Parametric Technology Corporation (PTC, 参数科技)于1989年开发的唯一的一套机械设计自动化软件产品,它以参数化和基于特征建模的技术,提供给设计师一个革命性的方法去实现机械设计自动化。Pro/Engineer最大的特点是采用单一数据设计,并且是一种全关联(Full Associatively)的软件。由于Pro/E中所有的模型互相连接,因此在开发产品的过程中,设计者在任何时候所做的修改,都会调整到整个设计中,这种功能正符合现代产业中所谓的同步设计(Concurrent Engineering)概念。

由于有限元法的独特优点就是可以求解结构形状和边界条件都相当任意的问题,但将实际情况的物理模型抽象为有限元计算的数学模型,是一项综合性的工作,据有关资料统计,在整个使用有限元法分析的时间里,前处理部分占40%-50%,后处理占60%-55%。而通过使用有限元软件求解的时间只占5%左右。由于有限元计算模型的专用程度高,计算模型无法供实际生产和制作使用,这大大降低了模型的利用效率,因此在实际项目中有限元模型必须同可以有效输出模型数据的程序接口。为此使用 Pro/Engineer 设计软件与 ANSYS 的数据交换分析流程方案如图。

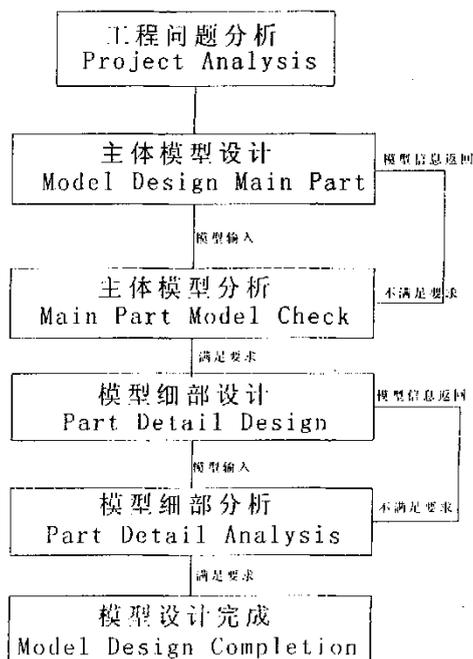


图1 数据交换分析流程方案

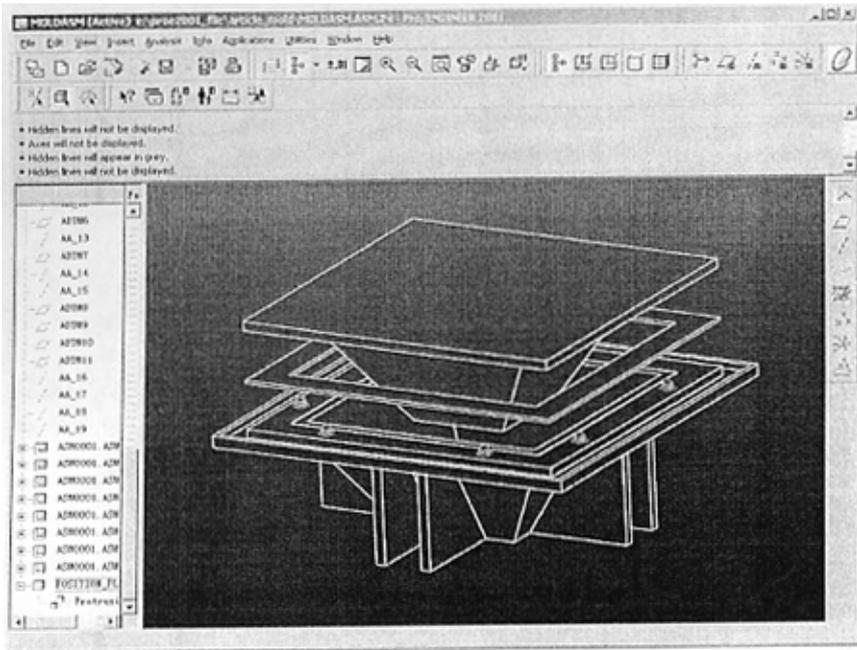


图 2 PRO/E 模具配合图

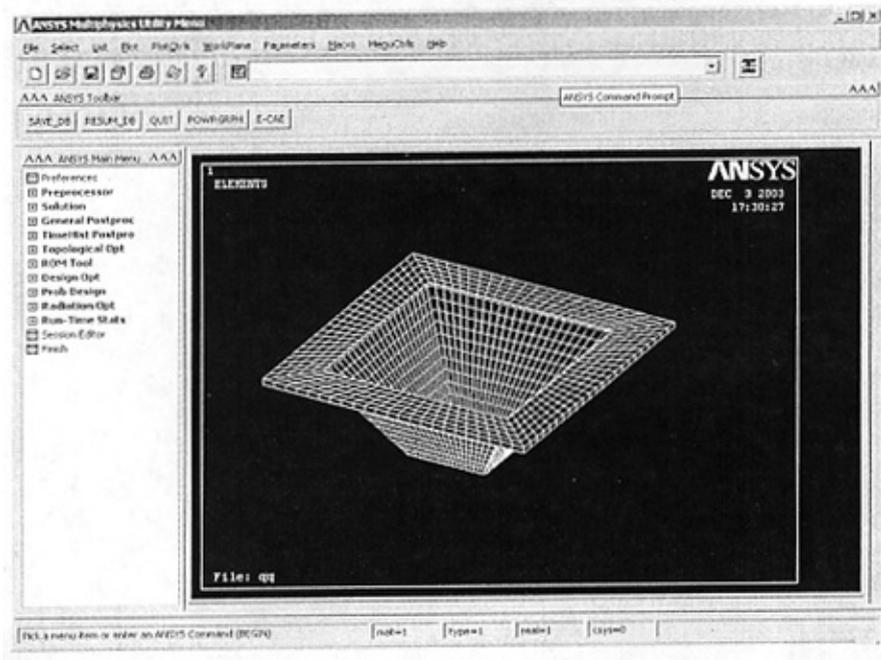


图 3 ANSYS 有限单元图

下图是 ANSYS 模拟制品在压缩试验下的 MISE 应力分布云图和试验实体照片。可以看出在分析云图中应力最大的地方正是试验时制品发生破坏的部位，与实际情况一致。通过这个简单的模型分析可以看出使用 ANSYS 可以帮助设

计者在设计阶段就可以找出设计结构的薄弱部位，进而采取相应的办法来改善，可以大大减小进行试验的成本。

现在的产品设计往往需要综合结构、流体、电磁场、声场和耦合场等问题考虑，要在最短的时间内解决这样复杂的问题，必须依靠功能强大的计算机来解决。

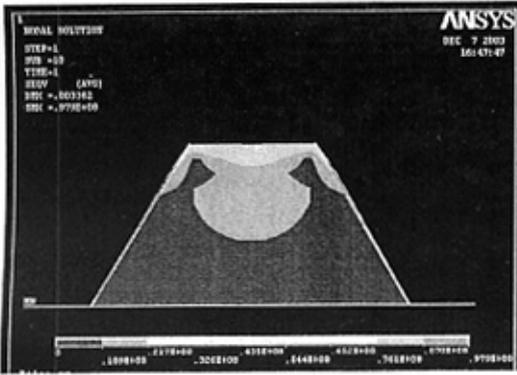


图4 有限元分析MISE应力云图

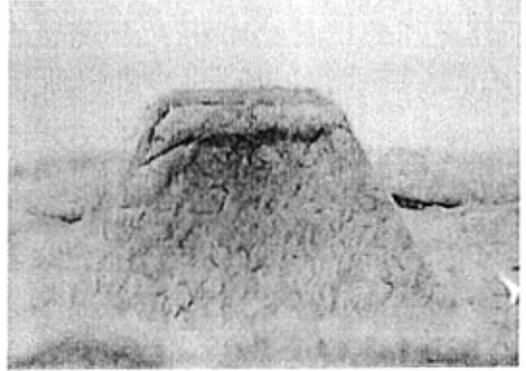


图5 实际制品变形照片

ANSYS 有限元软件的使用可以大大提高了工作的效率，为高效准确的完成各种工程提供了方便。

天津工业大学

研究生学位论文附件(随论文附)

姓名 尹志强	学位层次 硕士	专业 服装设计 与工程	导师 王瑞教授
论文题目	亚麻非织造布成型性及其复合材料 异型件的研究		
<p>论文新观点、新内容、新方法及创新点有哪些？在国内、外处于何水平？有何实际指导意义？</p> <p>根据模压法生产异型件时对二维织物的成型性要求较高这一特点，课题首次采用亚麻非织造布的形式来制作复合材料中的增强体，通过实验发现亚麻非织造布具有良好的成型性，对深度模压成型极为有利。此外，课题中将三维模压过程尝试性地简化为二维接触问题取得与实际非常吻合的结果，为进一步工艺改进和模具优化提供了理论依据。</p> <p>目前我国各科研部门尤其是一些高校已经开始研究制备不同麻纤维的复合材料，主要还在研究阶段，至今还没有很多工程应用。国外对麻纤维复合材料及其制品的研究开发工作开展得较早。欧洲关于这方面的研究以德国、英国、丹麦和意大利为主。德国麻类纤维增强复合材料主要用于汽车行业，比如 Benz、Ford 等汽车公司。亚洲以印度等国的研究工作为主，采用黄麻、剑麻、亚麻及竹纤维作为增强材料，与热固性或热塑性聚合物复合，制成天然纤维增强聚合物复合材料制品，已开始工程应用。</p> <p>随着环保意识的增强，各行各业特别是与人们生活密切相关将特别青睐绿色。因此，作为绿色产品的天然纤维复合材料将有很大的发展机遇，因为它不仅可以回收利用，而且不会造成污染环境。天然纤维来源丰富，价格低廉，加工方便，在复合材料中应用天然纤维可以降低复合材料的制造成本。这对于天然纤维复合材料的发展极其有利。此外天然纤维的密度只有玻璃纤维的一半左右，因此用它制得的复合材料重量较轻，这一点对汽车内饰材料及建筑装饰材料特别有吸引力。</p> <p>本课题的研究对我国亚麻复合材料的应用具有积极的推动作用。</p>			
2003年12月26日			