

复合材料点阵结构力学性能表征

吴林志 熊 健 马 力 著



科学出版社

复合材料点阵结构力学性能表征

吴林志 熊 健 马 力 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一部关于复合材料点阵结构设计、制备工艺、力学性能表征与评价的专著。全书共 12 章,第 1 章主要介绍点阵结构的研究背景和基本概念;第 2 章主要介绍复合材料点阵结构的制备技术;第 3 章至第 9 章主要介绍复合材料点阵结构的力学性能,包括平压、剪切、侧压、弯曲、扭转、屈曲、振动、低速与高速冲击;第 10 章主要介绍多层级复合材料点阵结构的力学性能;第 11 章阐述复合材料增强型点阵结构的力学性能;第 12 章主要介绍复合材料点阵曲面壳及圆柱壳的力学性能。

本书可供超轻结构及相关领域的科研人员、工程技术人员以及广大力学工作者参考,也可作为高等院校力学类和材料类相关专业师生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料点阵结构力学性能表征/吴林志,熊健,马力著. —北京:科学出版社,2015. 11

ISBN 978-7-03-046181-0

I. ①复… II. ①吴… ②熊… ③马… III. ①复合材料结构力学-力学性能-研究 IV. ①TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 254174 号

责任编辑:牛宇锋 罗 娟/ 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 11 月第一次印刷 印张:15 插页:2

字数:281 000

定价:95.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

随着现代科技的迅速发展,各种新型飞行器不断涌现,而新型飞行器服役环境越来越恶劣,对材料和结构提出挑战,最主要问题是必须同时解决高结构效率和多功能问题。为了满足结构的轻量化和多功能化需求,近年来人们提出了新型点阵材料和结构概念。这一概念提出后,诸多材料科学和力学家对金属点阵结构和复合材料点阵结构进行了研究。先进复合材料点阵结构除具有高比强、高比刚、可设计性强等优点外,其贯通的芯子构型可为结构的多功能化提供丰富的想象空间。

经过多年来的不懈努力,吴林志教授等在复合材料点阵结构的设计、制备工艺、力学性能表征与评价等方面进行了系统的研究,取得了显著的理论和应用成果。该书的主要内容涉及:复合材料点阵结构的拓扑构型设计,包括金字塔构型、四面体构型等;复合材料点阵结构的模具热压一次成型工艺、模具热压二次成型工艺、RTM工艺等;典型载荷作用下复合材料点阵结构的力学性能,包括面外压缩、面外剪切、三点弯曲、面内压缩、扭转;复合材料点阵结构的振动特性及高低速冲击响应等;复合材料多层级点阵结构的力学性能;复合材料点阵曲面壳和圆柱壳的力学性能。除机械载荷外,该书还考虑了高低温及热暴露环境对复合材料点阵结构性能的影响。

该书工作是我国学者在新型复合材料点阵结构研究方面的自主创新成果,它的出版将对我国更轻质复合材料结构的研究具有很好的借鉴作用,对从事先进复合材料及相关学科的科学工作者、研究生和高年级本科生必有较大的参考价值。

杜圣义

2015年10月

前 言

为了实现飞行器减重、增加有效载荷的目标,发展先进轻质复合材料结构,实现结构轻量化和多功能化是迫切需要解决的科学问题。先进复合材料点阵结构不仅具有承载功能,而且其内部开放、贯通的空间易于实现集承载与热控、隐身、吸能、储能、阻尼于一体的多功能特性,是当前国际学术界公认的最有前景的新一代超轻高强结构之一。

复合材料点阵结构的提出和发展源自以下三方面的启示:①自然界中动植物独特的微结构构造和优异的力学性能;②金属点阵结构优异的力学性能;③工程中对结构轻量化和多功能化的迫切需求。作者及其团队近年来一直致力于先进复合材料点阵结构的设计、制备、表征及评价,本书的内容正是作者所在团队近年来的研究成果和学术心得的总结,同时还借鉴了国内外部分具有代表性的研究工作。作者试图系统地介绍先进复合材料点阵结构的制备方法和力学特性,使读者能够全面了解该类结构的特点。本书旨在能抛砖引玉,推动先进复合材料结构的发展,促进超轻复合材料点阵结构的工程应用。

在本书完成之际,衷心感谢哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所的各位学术前辈及同事对作者科研工作的长期支持和帮助。书中介绍的许多工作是作者与合作者一同完成的,他们是王兵博士、王世勋博士、李明博士、姜佳博士、刘加一博士、殷莎博士,在此向合作者表示衷心的感谢。

感谢国家自然科学基金重点项目(编号:90816024)、面上项目(编号:11172080)、青年科学基金项目(编号:11202059,11302060),国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(编号:2006CB601206,2011CB610303)等多年来对相关研究工作的支持。

本书可供力学、复合材料、航空航天工程、机械与土木工程等相关领域的研究人员和工程技术人员使用和参考,也可作为高等院校相关专业的教学参考书。

由于时间仓促,加之作者水平有限,书中难免会有不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2015年10月

于哈尔滨工业大学

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 复合材料点阵结构的研究背景	1
1.3 复合材料点阵结构的基本概念	2
1.3.1 复合材料点阵结构的仿生学启示	2
1.3.2 复合材料点阵结构概念的提出	2
1.4 本书的结构与内容安排	5
第 2 章 复合材料点阵结构的制备技术	6
2.1 引言	6
2.2 嵌锁组装成型技术	6
2.3 纤维丝编织成型技术	9
2.4 模具热压一次成型技术	10
2.5 软膜热压一次成型技术	13
2.6 模具热压二次成型技术	14
2.6.1 制备工艺流程	14
2.6.2 微观组织分析	16
2.7 真空辅助成型技术	17
2.8 本章小结	19
第 3 章 复合材料点阵结构的平压和剪切性能	20
3.1 引言	20
3.2 复合材料点阵结构的平压及剪切理论	20
3.2.1 金字塔点阵结构	20
3.2.2 四面体点阵结构	24
3.2.3 Kagome 点阵结构	27
3.3 平压和剪切载荷下复合材料点阵结构的失效机制	30
3.3.1 杆件欧拉屈曲	30
3.3.2 杆件分层	31
3.3.3 节点断裂	31

3.3.4 面芯脱胶	32
3.4 本章小结	34
第4章 复合材料点阵结构的侧压性能	36
4.1 引言	36
4.2 复合材料点阵结构极限载荷的理论预报	36
4.2.1 宏观屈曲	37
4.2.2 面板皱曲	38
4.2.3 面板压溃	38
4.3 复合材料点阵结构的失效机制图	39
4.4 复合材料点阵结构的侧压试验	40
4.4.1 试件准备和试验方案	40
4.4.2 试验结果和讨论	41
4.5 复合材料点阵结构侧压性能的数值模拟	44
4.5.1 各种屈曲模式的模拟	45
4.5.2 面板压溃的模拟	46
4.6 本章小结	47
第5章 复合材料点阵结构的弯曲性能	48
5.1 引言	48
5.2 复合材料点阵夹芯梁的弯曲刚度	48
5.2.1 三点弯曲载荷下夹芯梁的挠度	48
5.2.2 面板薄厚的定义	50
5.3 复合材料点阵夹芯梁的弯曲强度	50
5.3.1 受力分析	50
5.3.2 面板压溃	52
5.3.3 面板皱曲	52
5.3.4 芯子压溃	53
5.3.5 芯子屈曲	53
5.3.6 节点断裂	53
5.4 三点弯曲载荷下金字塔点阵结构的优化设计	54
5.4.1 杆件的倾角设计	54
5.4.2 杆件的半径设计	54
5.4.3 面板的厚度设计	54
5.4.4 夹芯梁的长度设计	55
5.5 三点弯曲载荷下金字塔点阵结构的试验研究	55
5.5.1 试验方案	55

5.5.2 试验结果与讨论	56
5.6 本章小结	58
第6章 复合材料点阵结构的扭转特性	59
6.1 引言	59
6.2 扭转问题综述	60
6.3 正交各向异性夹芯结构的扭转解	60
6.3.1 基于普朗特应力函数的扭转解	60
6.3.2 材料和几何参数对等效扭转刚度的影响	64
6.4 复合材料点阵结构的扭转试验和数值分析	66
6.4.1 试验研究	66
6.4.2 等效材料模型	68
6.4.3 实际几何模型	68
6.4.4 结果与讨论	69
6.5 本章小结	72
第7章 复合材料点阵结构的屈曲特性	73
7.1 引言	73
7.2 Allen 模型	73
7.3 复合材料点阵结构的临界屈曲载荷	75
7.3.1 等效参数	75
7.3.2 平衡方程	78
7.3.3 多种边界条件下的临界屈曲载荷	81
7.4 复合材料点阵芯子等效方法的合理性验证	84
7.4.1 等效芯子所储存的应变能	84
7.4.2 离散杆件所储存的应变能	84
7.4.3 应变能比较	85
7.5 结果与讨论	86
7.5.1 与 Allen 模型的比较	86
7.5.2 与试验结果的比较	86
7.5.3 不同位移假设下的临界屈曲载荷	89
7.6 本章小结	91
第8章 复合材料点阵结构的振动特性	92
8.1 引言	92
8.2 夹芯结构振动特性的理论研究	92
8.2.1 基于“折线”模型的夹芯结构振动特性	92
8.2.2 基于改进“折线”模型的夹芯结构振动特性	96

8.2.3 三种不同位移模型比较	100
8.3 复合材料点阵结构振动特性的数值分析	103
8.4 材料性能和几何参数对点阵夹芯结构固有频率的影响	105
8.5 局部损伤对复合材料点阵结构振动特性的影响	108
8.5.1 试件制备	108
8.5.2 试验方法	109
8.5.3 试验与数值结果的比较	110
8.5.4 缺陷敏感性分析	112
8.6 本章小结	122
第9章 复合材料点阵结构的低速及高速冲击响应	124
9.1 引言	124
9.2 试验方法	124
9.3 复合材料金字塔点阵结构的低速冲击试验	125
9.3.1 复合材料金字塔点阵结构的冲击失效机制	125
9.3.2 复合材料金字塔点阵结构的冲击响应	129
9.3.3 热暴露对金字塔点阵结构能量吸收特性的影响	131
9.3.4 热暴露对金字塔点阵结构最大冲击载荷的影响	132
9.4 复合材料金字塔点阵结构冲击后剩余压缩强度的试验研究	132
9.4.1 侧压失效机制	132
9.4.2 冲击后的剩余压缩强度	135
9.5 复合材料点阵结构的高速撞击响应	136
9.5.1 试验原理及设备	136
9.5.2 碳纤维层合板和金字塔点阵结构的破坏模式	137
9.6 本章小结	141
第10章 多层级复合材料点阵结构的力学性能	142
10.1 引言	142
10.2 拉-拉混合型多层级复合材料点阵结构	142
10.2.1 结构概念及制备方法	142
10.2.2 理论分析与破坏机制图	144
10.2.3 试验验证	147
10.2.4 优化与结构效率评价	148
10.3 拉-弯混合型多层级复合材料点阵结构	154
10.3.1 结构概念与制备方法	154
10.3.2 面外压缩响应	157
10.3.3 理论分析	158

10.3.4 优化与结构效率评价	161
10.4 本章小结	164
第 11 章 复合材料增强型点阵结构的力学性能	165
11.1 引言	165
11.2 结构与制备	165
11.2.1 波纹板的制备	165
11.2.2 电火花切割法	166
11.2.3 激光切割法	169
11.3 增强型点阵结构的平压及剪切理论	172
11.3.1 斜杆增强型点阵结构的平压模量及强度	173
11.3.2 斜杆增强型点阵结构的剪切模量及强度	174
11.4 增强型点阵结构的平压及剪切试验	175
11.4.1 增强型点阵结构的平压试验	175
11.4.2 增强型点阵结构的剪切试验	178
11.5 几何参数对增强型点阵结构力学性能的影响	181
11.6 复合材料点阵结构剪切强度的比较	183
11.7 本章小结	184
第 12 章 复合材料点阵曲面壳及圆柱壳的力学性能	186
12.1 引言	186
12.2 复合材料金字塔点阵曲面壳的弯曲行为	186
12.2.1 嵌片和嵌锁组装	186
12.2.2 曲面壳的设计与制备	187
12.2.3 弯曲性能的理论研究	190
12.2.4 弯曲性能的试验研究	195
12.2.5 弯曲性能的数值模拟	200
12.3 复合材料金字塔点阵圆柱壳的轴压行为	203
12.3.1 结构与制备	203
12.3.2 轴向压缩性能的理论研究	205
12.3.3 轴向压缩性能的试验研究	208
12.4 本章小结	218
参考文献	220

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

与金属点阵结构相比,复合材料点阵结构具有更加明显的比强度、比刚度优势,因此其在航空航天、交通运输、水面舰艇、重工机械等领域具有重要的应用前景。近十年来,国内外学者在复合材料点阵结构设计、制备、表征及评价等方面取得了较为显著的研究成果,为未来复合材料点阵结构的应用奠定了坚实的基础。本章首先简要介绍复合材料点阵结构的研究背景;然后结合仿生学的启示,阐述复合材料点阵结构的基本概念;最后,给出本书的组织结构及内容安排。

1.2 复合材料点阵结构的研究背景

随着航空航天技术的快速发展,人们对结构轻量化及多功能化提出了迫切需求。传统的轻质结构多为泡沫^[1,2]和蜂窝夹芯结构^[3],尤其蜂窝夹芯结构具有比刚度和比强度高优势,但是这些芯子的内部空间是封闭的,不易实现预埋、传热等多功能要求。作为一种新型轻质结构,点阵结构不仅具有承载功能,而且其内部开放、贯通的空间易于实现集承载与热控、隐身、吸能、作动、储能、阻尼于一体的多功能特性。美国《科学》杂志曾指出,轻质结构的发展方向将逐渐向周期型桁架所构成的点阵结构过渡,并于 2011 年报道了美国加州理工学院关于超轻质镍合金点阵结构方面的工作^[4]。2013 年,美国麻省理工学院的科研工作者批量组装出碳纤维复合材料点阵结构,并将其研究成果发表在《科学》杂志上,作者基于其轻质高强的特点,预测该结构将在航空航天领域具有广泛的应用背景^[5]。美国加州大学欧文分校休斯研究实验室科学家对该轻质结构进行了评论,认为点阵结构将会是未来超轻结构重点发展方向之一^[6]。最近,美国加州理工学院科学家又将点阵结构概念运用到陶瓷微结构中,首次制备出微点阵陶瓷结构,并发现该结构具有很好的力学性能及多功能潜力^[7]。20 世纪末,在美国国防部资助下,有学者对微小卫星结构进行了探索研究,发现微小卫星结构主要是以蜂窝夹芯结构为承载平台的^[8-10]。近年来,美国国防高等研究署(DARPA)和海军研究局(ONR)共同资助哈佛大学、剑桥大学和麻省理工学院开展有关超轻金属结构和有序点阵材料的研发项目^[11],利用点阵结构材料在轻质和传热方面的优势,设计了超高速飞行器中的关键部件^[12-14]。同时,以点阵结构为基础平台,开展舰船以及潜艇壁板结构的

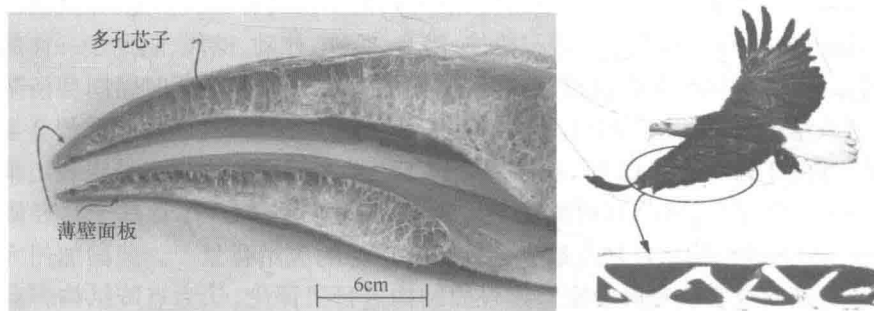
研制,探索出吸能性好、抗击水下爆炸能力强的轻质多功能结构^[15]。

可以看出,为了实现减轻飞行器重量、增加有效载荷的目标,发展先进轻质复合材料结构,实现结构轻量化和多功能化是迫切需要解决的科学问题。轻质复合材料点阵结构兼备轻量化和多功能化特点,是当前国际上被认为最有前景的新一代先进轻质超强韧结构^[16]。

1.3 复合材料点阵结构的基本概念

1.3.1 复合材料点阵结构的仿生学启示

在千百万年的进化过程中,动植物往往选择最优的拓扑构型来适应自然界不断变化的外部环境。著名材料学家、英国剑桥大学 Ashby 教授曾经讲过:“现代人类建造大型承载结构时,常采用致密材料,而自然界做同样的事情通常采用多孔材料。”例如,甲虫外壳、骨头、珊瑚、蜂窝、植物根茎等往往在微观尺度表现为多孔材料^[2,17-20]。图 1-1 列出了犀鸟喙和鸟类翅膀中小梁骨的组织结构,由剖面图可见,其与点阵结构具有很大的相似性。图 1-1(a)所示的外部硬壳可看成点阵结构的面板,而在上下硬壳之间存在许多互相连接的组织结构,可看成点阵芯子^[21]。这种犀鸟的喙部具有较大的刚度和强度,是点阵结构设计的很好范例。受到自然界的启示,将超轻多孔材料作为结构材料的关键在于揭开多孔材料的科学秘密,而开展轻质点阵结构材料及结构的基础研究是解开这一秘密的最佳途径。



(a) 一种犀鸟的喙部解剖图^[21]

(b) 鸟类翅膀中小梁骨解剖图(D.Thompson 拍摄)

图 1-1 犀鸟喙部与鸟翅膀小梁骨解剖图

1.3.2 复合材料点阵结构概念的提出

随着材料制备技术的快速发展,目前出现了大量的轻质夹层结构,如图 1-2 所示。从其微观结构来看,主要可分为三类:天然芯材夹层结构(如轻木芯、岩石芯)、随机孔芯子夹层结构(如聚酯泡沫、金属泡沫等)和周期孔芯子夹层结构(如波纹板

夹层结构、蜂窝夹层结构、三维中空夹层结构、格栅结构、点阵结构等)。

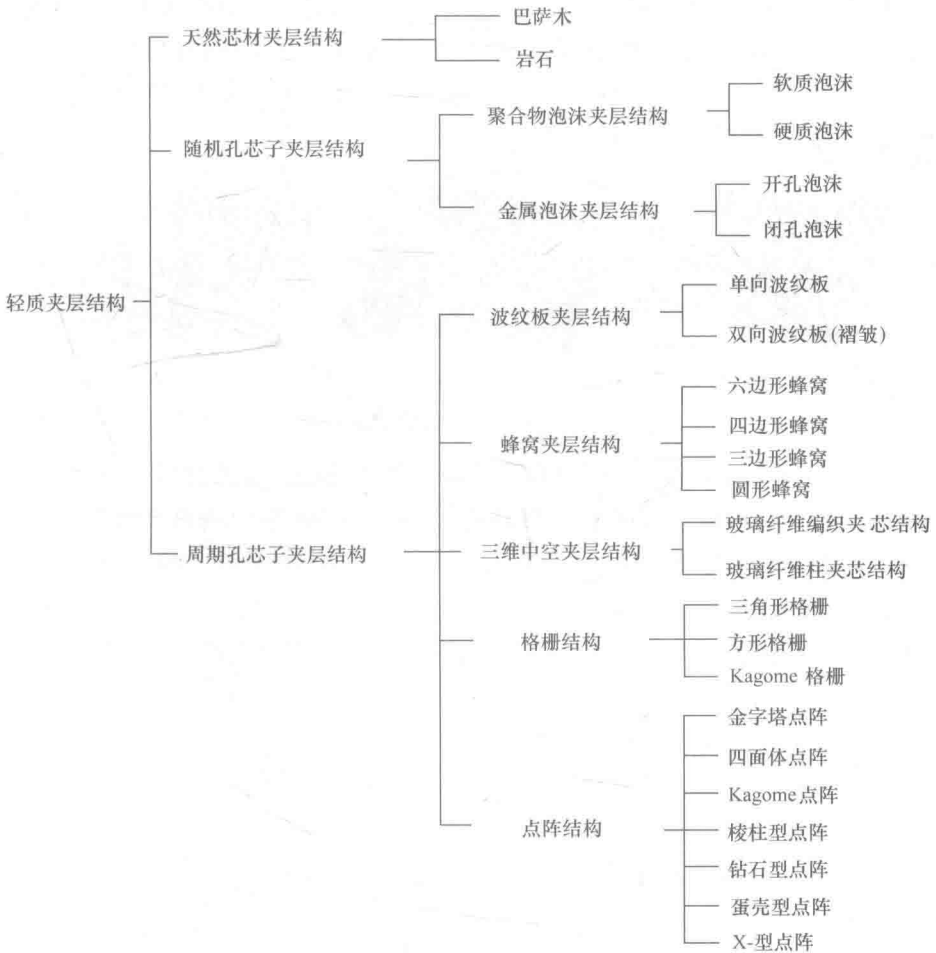


图 1-2 轻质夹层结构分类图

Gibson 和 Ashby^[17]研究了金属和聚合物泡沫材料的力学行为,发现泡沫变形以胞元壁的弯曲为主,其宏观强度由胞元壁的抗弯强度所控制。由于泡沫的胞元壁较薄,所以其抗弯强度很低。如果能设计出一种新型结构材料,使材料的宏观强度由胞元壁的拉压强度控制,那么材料的强度将会大大提高。基于这一思想,2001 年左右,西方材料学界,以加州大学 Evans 教授、哈佛大学 Hutchinson 教授、剑桥大学 Ashby 教授、麻省理工学院的 Gibson 教授等为首提出了轻质点阵结构的概念^[11,22],即结构中每个节点由若干杆件相连,通过设计杆件的数目和连接方式使材料的宏观强度由杆件的拉压强度控制。由于结构形式类似于模拟原子点阵构型而设计出来的静定/静不定多孔有序微结构,所以常被国外学者称为

“truss structure”或者“periodic cellular structure”^[23-26],国内学者称为“点阵结构”或者“周期性桁架结构”^[27-32]。这一概念提出后,人们陆续开展了不同拓扑句型点阵结构力学性能的研究工作,从 Egg-truss^[33]和八面体点阵^[34]到四面体^[35]、金字塔^[36]、Kagome^[37]、棱柱及钻石型^[38]等点阵结构,其中,四面体、金字塔和 Kagome 点阵结构为研究的热点,如图 1-3 所示。

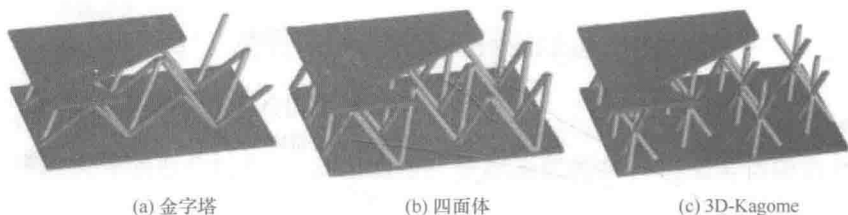


图 1-3 典型的点阵结构^[23]

从轻质多孔材料优化设计的角度,Ashby 等^[39]指出,泡沫材料属于弯曲主导型材料,而点阵材料属于拉伸主导型材料。Deshpande 等^[33]给出了含有 12 个或 12 个以上杆件节点的周期性桁架结构,认为其是一种典型的拉伸主导型点阵材料。对于常见的金字塔、四面体、Kagome 点阵结构,由于其杆件承受拉压变形为主,所以也习惯称其为拉伸主导型材料。对于弯曲主导型的泡沫材料,其模量和强度由下式给出:

泡沫材料的弹性模量为

$$\frac{E^*}{E_s} \propto \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^2 \quad (1-1)$$

泡沫材料的屈服强度为

$$\frac{\sigma^*}{\sigma_s} \propto \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^2 \quad (1-2)$$

泡沫材料的压溃强度为

$$\frac{\sigma^*}{\sigma_s} \propto \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{3/2} \quad (1-3)$$

对于拉伸主导型的点阵材料,不考虑材料的方向性,其模量与强度由下面两式给出

$$\frac{E^*}{E_s} \propto \frac{\rho}{\rho_s}, \quad \frac{\sigma^*}{\sigma_s} \propto \frac{\rho}{\rho_s} \quad (1-4)$$

式中, ρ 和 ρ_s 分别为多孔材料及母体材料的密度; E^* 和 E_s 分别为多孔材料及母体材料的弹性模量; σ^* 和 σ_s 分别为多孔材料及母体材料的强度。由以上四式不难发

现,对于孔隙率较高的多孔材料,拉伸主导型材料的模量和强度明显高于弯曲主导型材料的模量和强度;多孔材料模量和强度与母体材料的模量和强度密切相关。由此可见,点阵结构属承载效率高的轻质结构;相对金属合金材料,纤维增强树脂基复合材料点阵结构具有更高的比强度和比刚度。

1.4 本书的结构与内容安排

本书内容主要围绕复合材料点阵结构展开,涉及内容较多,既有结构制备方面,又有结构实验表征、理论分析和数值计算方面。作者试图从逻辑上梳理清楚,使书中的内容循序渐进、由浅入深。全书共12章,第1章为绪论,介绍复合材料点阵结构的概念和应用背景;第2~9章系统介绍复合材料点阵结构的平压、剪切、侧压、弯曲、扭转、振动及冲击性能,涵盖点阵结构在工程应用中一些典型载荷;第10章介绍多层级复合材料点阵结构的力学性能;第11章介绍复合材料增强型点阵结构的力学性能,着重解决点阵结构面芯强度较低的问题;第12章介绍复合材料点阵曲面壳及圆柱壳的力学性能。

第2章 复合材料点阵结构的制备技术

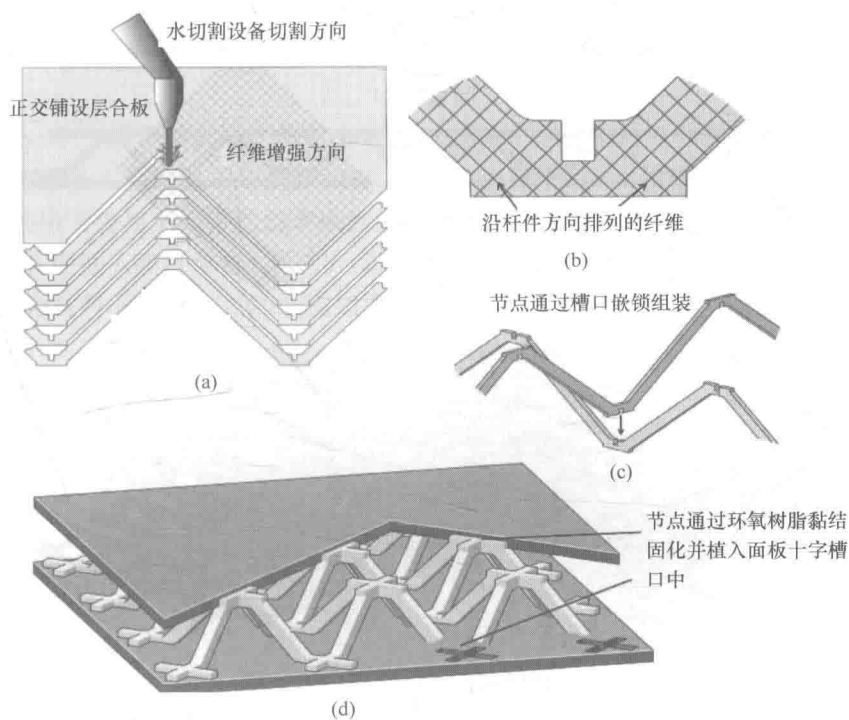
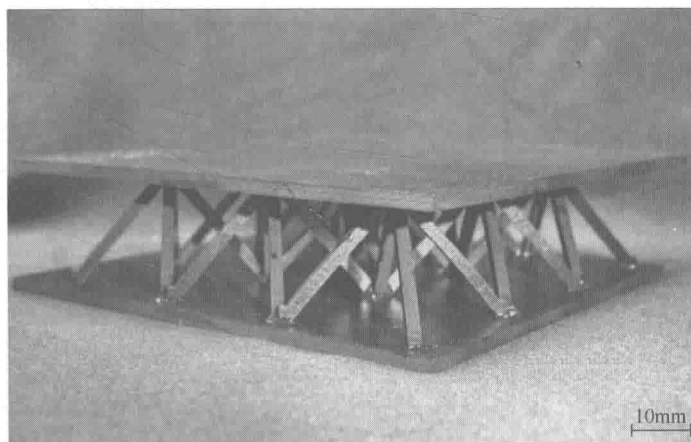
2.1 引言

纤维增强树脂基复合材料为各向异性材料,成型过程对模具依赖性强。与金属点阵结构相比,制备碳纤维复合材料点阵结构在初期存在很大的困难。对于各种典型的点阵结构,其结构形式复杂,芯子的杆件尺寸一般介于1~5mm,这对复合材料成型工艺有特殊的要求,尤其是模具的设计,需要综合考虑脱模、模具压力、温度场分布等因素。目前,针对复合材料点阵结构,人们相继发明了嵌锁组装成型技术^[40,41]、网架穿插编织成型技术^[42]、纤维丝编织成型技术^[43]、模具热压一次成型技术^[44]、模具热压二次成型技术以及真空辅助成型技术^[45],制备了金字塔、四面体、3D-Kagome等复合材料点阵结构。

2.2 嵌锁组装成型技术

Finnegan等^[41]采用水切割组装法制备出碳纤维复合材料金字塔点阵结构,其制备工艺流程如图2-1所示。第一步:制备出 $0^{\circ}/90^{\circ}$ 铺层层合板;第二步:采用高压水枪对层合板进行切割,将层合板切割成设计好的形状和尺寸;第三步:将切割的杆件进行嵌锁组装,形成金字塔芯子;第四步:在面板上预先切割出十字架形的凹槽,将点阵芯子与面板组装在一起,并用环氧胶进行黏结固定。图2-2为采用该成型工艺制备的碳纤维复合材料金字塔点阵结构。该成型工艺的优点是芯子能批量成型,极大提高了芯子的成型效率。然而,该制备工艺也存在以下缺点:①机械切削多;②纤维杆中有一半纤维垂直于纤维杆的方向,不能充分发挥其承载的潜力;③嵌锁工艺对杆件精度要求极高,常在嵌锁槽口处产生初始缺陷。

在嵌锁组装工艺中,嵌锁构件是十分重要的组成单元,改变嵌锁构件的结构形式即可制成不同构型的轻质结构。在上述嵌锁技术基础上,吴林志课题组^[46]进一步改进了嵌片形式,如图2-3所示,该嵌片具有较大的面芯黏结面积,可提高复合材料点阵结构的面芯界面强度。两种经过改进的嵌片进行组装即可批量成型金字塔点阵芯子,如图2-4所示。

图 2-1 水切割组装法制备复合材料金字塔点阵结构流程图^[41]图 2-2 碳纤维复合材料金字塔点阵结构^[21]