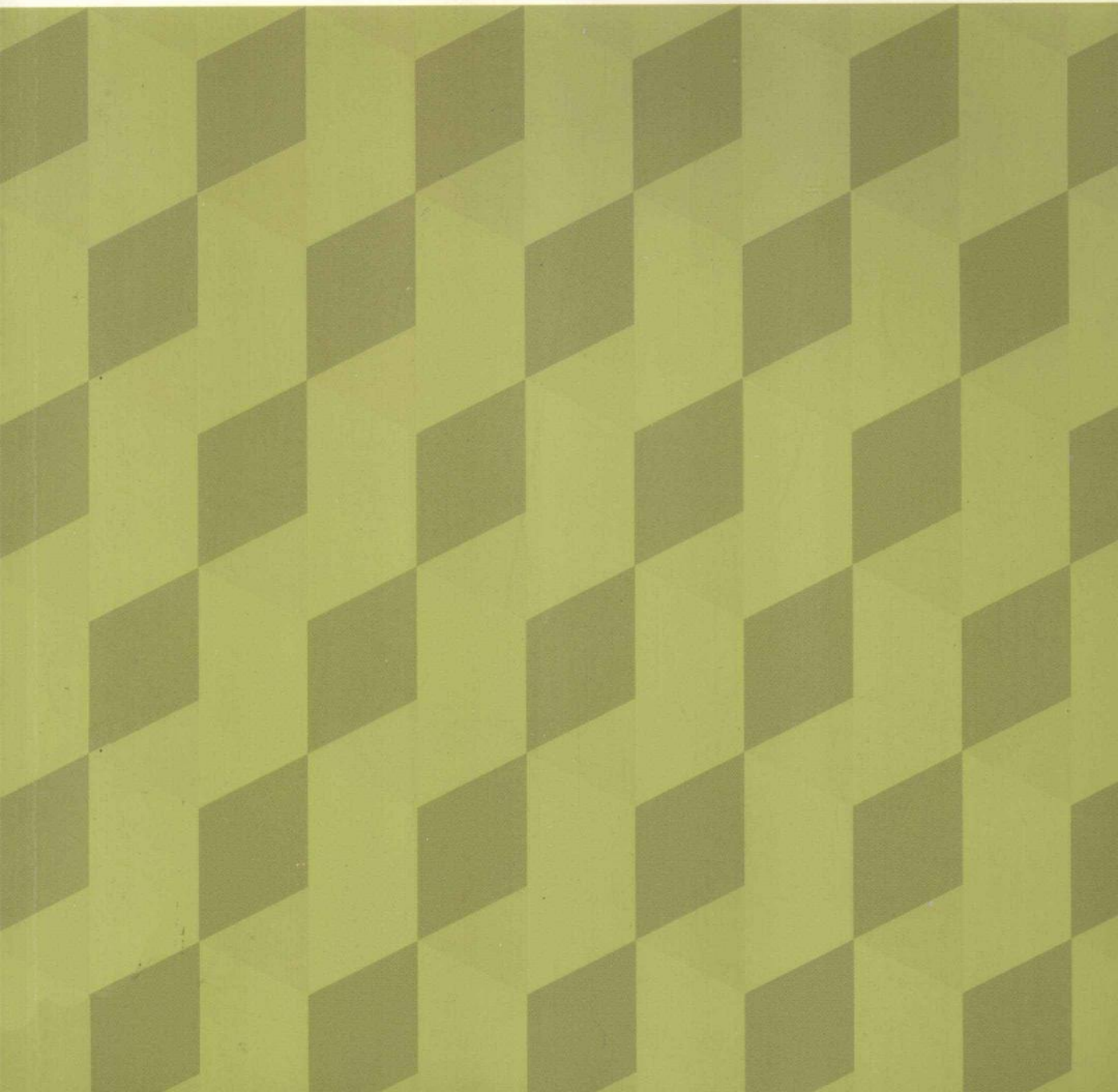


· 力学与材料工程应用 · 力学与先进制造工程应用
· 力学与结构工程应用 · 力学与航空航天工程应用 · 力学与海洋工程应用

夏原 王怀忠 主编

上海科学技术出版社

力学与工程应用



力学与工程应用

夏 原 王怀忠 主编

上海科学技术出版社

内 容 提 要

21 世纪以来,国民经济的发展和对国防安全与人类健康的总体需求,对力学提出了新的挑战,也促进了力学与多学科交叉的发展。力学是一门以工程技术为背景的应用基础性学科,以理论、实验和计算机仿真为主要手段,研究工程技术中的普遍规律和共性问题,并直接为工程技术服务。本书汇集了力学与材料工程、力学与先进制造、力学与结构工程、力学与航空航天、力学与海洋工程等若干交叉领域的典型工程应用案例,从各个侧面展示了重大工程建设与力学及相关领域前沿研究的现状,阐述了从理论到实践所取得的新进展。

本书实用性强,适合作为力学及相关工程技术领域的科技人员和大专院校师生教学、科研的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

力学与工程应用/夏原,王怀忠主编. —上海:上海科学技术出版社,2011.6

ISBN 978-7-5478-0635-7

I. ①力... II. ①夏...②王... III. ①力学—研究②工程力学—研究 IV. ①03②TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 245757 号

上海世纪出版股份有限公司
上海科学技术出版社 出版、发行

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 23.75

字数:490 千字

2011 年 6 月第 1 版 2011 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-0635-7/TU·96

定价:80.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换

学术顾问

李家春 胡海岩 周哲玮

学术委员会

主任：胡平

副主任：夏原 王怀忠 庄茁 康顺

段梦兰 周文波 秦夏强

委员：(以姓名拼音为序)

陈璞 邓克文 顾雷 关振群 胡玉银 蒋浩民

李大永 刘杰鸣 陆辛 苗冰 荣克林 王成国

王福军 王建录 谢彬 严波 严川伟 于旭光

岳清瑞 张 建

编委会

主编：夏原 王怀忠

编委：(以姓名拼音为序)

鲍益东 陈光南 顾雷雨 顾倩燕 胡珉 胡振东

黄国君 金峰 李大永 李根国 李志刚 沈浩

王建华 王燕 王忠金 魏宏超 闻鸣 吴慧玲

吴林志 熊健 徐超 叶国强 张正 周质炎

庄欠伟 宗智

序

中国力学学会促进工程应用与产业结合工作委员会全体会议暨力学与工程应用学术研讨会于2010年10月15~17日在上海召开,《力学与工程应用》一书是本次会议的论文集。文集结合力学与材料工程、先进制造、结构工程、航空航天、海洋工程等领域的广泛应用,从多视角分析了重大工程建设与力学及相关领域前沿研究的现状,反映出力学及学科交叉从理论到实践所取得的新进展。

力学是一门重要的基础学科,又有极其广泛的应用前景,在现代工业及社会经济发展中有着不可替代的作用。21世纪以来,经济发展、国防安全与人类健康的总体需求,对力学提出了新的要求,也促进了交叉学科的发展。如,空天科技的发展需要高温气体动力学、非线性动力学与控制等研究方向的新突破;深海开发有赖于流固土耦合力学的新拓展;先进制造技术需要材料工艺力学的新进步;工程结构可靠性需要健康诊断、智能结构力学和主动控制理论的新应用。文集结合力学与工程实际,选择若干交叉领域中较为典型的工程案例,总结与重大工程相关的力学问题研究现状与最新进展,将为今后力学与工程应用的深入发展起到引领作用。

当前,国家正结合“十二五”规划积极部署发展战略性新兴产业,调整经济结构,转变生产增长方式,实现节能减排,应对气候变化。这一方针也必将有助于我国国民经济的可持续发展,并实现在2020年建设创新型国家的宏伟目标。《力学与工程应用》文集的出版,继承我国近代力学事业奠基人钱学森、周培源、钱伟长、郭永怀等所倡导的力学与工程相结合的思想,努力为发展自然科学服务,为发展国民经济服务。几代中国力学工作者遵循这一思想,为国家经济建设和国防事业作出了重要贡献。在新的历史时期,需要我们继续围绕国家重大需求,拓展新思路,探索新方法,取得新成绩,将力学与工程应用结合作为一项事业,让每个力学工作者肩负起弘扬工程科学思想、投身工程科学实践的历史使命。

李象君

前言

20 世纪下半叶,力学在国家科技发展及经济建设中作出了重大贡献,如以两弹一星为代表的国防工业和以长江三峡大坝为代表的土木工程。21 世纪以来,国民经济的发展和国防安全与人类健康的总体需求,对力学提出了新的挑战,也促进了力学与多学科交叉的发展。正如本书中李家春院士所题序言所说:“空天科技的发展需要高速高焓空气动力学和非线性动力学与控制等的新突破;深海开发促进了波浪与结构交互作用及多相流与土力学的发展;先进制造技术需要借助计算力学与材料工艺力学的新进步;工程结构可靠性需要健康诊断、智能结构力学和主动控制理论的新应用。”在中国力学学会促进工程应用与产业结合工作委员会全体成员的共同努力下,本书汇集了许多力学与相关领域工程应用中独到的理论研究、实践经验、计算分析和大量数据资料,其内容涉及航空航天、海洋环境、先进制造、新型材料与工程结构等若干方面,这些内容体现了力学研究与工程应用的紧密结合。

力学是一门以工程技术为背景的应用基础性学科,以理论、实验和计算机仿真为主要手段,研究工程技术中的普遍规律和共性问题,并直接为工程技术服务。它涉及航空航天、造船、核能、建筑、机械、汽车、环境等诸多领域,力学还将在空间技术、海洋工程、环境科学、材料科学、先进制造和生物医学工程等现代科学领域发挥更加重要的作用。国内外出版的涵盖固体、流体及计算力学、一般力学与振动、试验力学、学科交叉及工程应用等诸多方面的论著,展示了力学工作者们通过不懈的努力,卓有成效地推动了力学研究与工程应用,扩大了力学学科的研究领域和影响范围。

力学是一门既经典又具有与时俱进生命力的应用基础性学科,在现代工业及社会经济发展中发挥了不可替代的作用。力学与其他学科交叉,形成了新的学科生长点,丰富了力学的内涵,推动了航空航天、土木、机械制造、材料结构、海洋工程等工业的进步和发展,并不同程度地发挥着引领性的重要作用。本书结合力学与结构工程、力学与材料、力学与先进制造、力学与航空航天、力学与海洋工程等若干交叉领域的典型工程应用案例,从各个侧面展示了重大工程建设与力学及相关领域前沿研究的现状,阐述了力学从理论到实践所取得的新进展。

2 力学与工程应用

中国力学学会秉承创始人钱学森、周培源、钱伟长、郭永怀倡导与工程相结合的指导思想,设立“促进工程应用与产业结合工作委员会”,促进并加强了力学与工程、力学工作者和工程师的联系。几年来,工作委员会的全体成员与力学同仁秉承工程科学的思想,始终坚持以服务国家战略需求为己任,促进了力学在国家重要工程和科学研究中的应用,出版这本书或多或少展示了我们所贡献的绵薄之力,也期望从工程实际的侧面反映出力学学科的工程内涵。

本书以“力学与工程应用学术研讨会”会议交流报告及电子文集为基础,涉及力学与材料、结构工程、先进制造、航空应用、海洋工程、能源工程等诸多领域,通过整理,编辑出版了《力学与工程应用》一书。文集得到上海市力学学会产学研工作委员会、上海城建集团、同济大学、中国二十冶集团有限公司、上海交通大学等单位的支持,在此一并表示衷心的感谢。

夏 原 王怀忠

目 录

第 1 章 力学与材料工程应用	(1)
碳纤维复合材料点阵结构制备及失效行为	吴林志,熊 健,马 力 (3)
激光离散热加工制造方法及其应用	陈光南 (29)
超轻多孔材料能量吸收性能研究	倪长也,金 峰,卢天健 (50)
等离子体电解氧化陶瓷层生长动力学机制与研究现状	夏 原,雷现奇,段红平 (64)
基于光纤光栅的结构健康监测技术及应用研究	黄国君,黄晨光,江中华,等 (82)
第 2 章 力学与先进制造工程应用	(103)
超高强度汽车结构件热冲压技术研究进展	胡 平,马 宁,郭 威,等 (105)
CAE 技术在换热器成形工艺开发中的应用	李大永,唐 鼎,张卿卿,等 (137)
钣金成形快速模拟算法的研究与开发	鲍益东,陈文亮 (148)
脉冲电流对钛合金板材力学行为影响的研究	王忠金,宋 辉 (165)
汽轮机长叶片低周循环疲劳特性研究	胡佳楠,程 凯,由小川,等 (178)
第 3 章 力学与结构工程应用	(191)
大坂核电站填土边坡坡形设计与稳定性研究	张 正,杨子松 (193)
大型基坑群风险过程评估和控制	王怀忠,秦夏强,沈 浩 (199)
大型上体模拟组合式加载系统研制与试验	庄欠伟,吕建中 (212)
基坑开挖对已有建筑影响分析	侯悦琪,王建华 (220)
基于监测数据的围护墙弯矩计算方法及其与基坑安全相关性研究	

2 力学与工程应用

.....	顾雷雨,黄宏伟	(229)
利用椭圆脐点突变模型预测盾构隧道施工期地面过大沉降		
.....	羌培,周文波	(241)
循环荷载作用下筋土界面的力学特性	徐超,石志龙	(253)
第4章 力学与航空航天工程应用		(263)
力学在飞机弹射救生系统中的应用与发展	王恒,肖曙光	(265)
交变内压与温度作用下的压力容器寿命评估	胡盈辉,由小川,庄苗	(274)
飞机座舱盖气动加热数值仿真研究	胡强,洪海明,王嘉颖,等	(283)
一种飞艇蒙皮材料的力学性能试验研究		
.....	周丽娜,由小川,Pierre Vialettes,等	(290)
复合材料 T 型整体化结构的刚度等效方法研究		
.....	刘嘉,张朝晖,彭涛,等	(299)
第5章 力学与海洋工程应用		(311)
离散涡方法模拟二维圆柱涡激振动	宗智,董婧,李章锐	(313)
大型钻井平台平地建造的平移和下水工艺	闻鸣	(321)
海洋结构物的冰激振动、疲劳和断裂	段梦兰,李志刚	(330)

第 1 章

力学与材料工程应用

碳纤维复合材料点阵结构制备及失效行为*

吴林志, 熊 健, 马 力

(哈尔滨工业大学 航天学院复合材料与结构研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 点阵结构是一种新型的结构形式, 因其具有比强度、比刚度高的优势, 同时具有储能、制动、预埋等多功能潜力, 最近几年受到国内外学者的高度关注。这一概念提出后, 人们更多关注的是金属点阵结构。近几年, 随着复合材料点阵结构制备工艺的不断完善, 人们采用不同制备工艺已成功制备出不同拓扑构型的复合材料点阵结构。本文集中概述了目前复合材料点阵结构的制备技术, 包括杆件组装工艺、水切割单杆拼接工艺、水切割嵌锁组装工艺、穿插编织工艺、预浸料一体成型工艺和预浸料二次成型工艺, 已经制备出四面体、金字塔等点阵拓扑形式, 分析了各种制备工艺的特点以及典型载荷下的失效模式, 并结合目前碳纤维复合材料点阵结构的实验数据给出了修正的 Ashby 强度图, 发现点阵结构在低密度时比强度优势明显, 进一步填补材料强度空白。最后, 对复合材料点阵结构的未来发展进行展望。

关键词: 树脂基复合材料; 点阵结构; 力学性能; 碳纤维; 夹芯结构

Fabrication and Crushing Behavior of Low Density Carbon Fiber Composite Lattice Truss Structures

Wu Linzhi, Xiong Jian, Ma Li

(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Sandwich panels have been traditionally made using stochastic cores such as aluminum alloy foam or micro-architecture lattice materials such as hexagonal honeycombs. Cellular lattice truss structures made from light metals with interconnected porosity have recently gained attention as an emerging materials technology for ultra lightweight structural design. They all provide high strength and reasonable stiffness with also permitting their open void spaces to be used for other purposes such as cross flow heat exchange, thermal insulation and multifunctional applications. Carbon fiber reinforced polymer composites have an even higher specific strength than the light alloys and have

* 基金项目: 国家“973”基金(2006CB601206); 国家自然科学基金(90816024, 10872059)

been utilized as facesheet materials in sandwich panels for demanding high strength applications. In this context, Significant progress has been made recently in manufacturing methods including Pultruded fabrication approach, Unidirectional laminate fabrication approach, Bi-axial laminate fabrication approach, Three dimensional interlacing method, One time hot press method and Secondary hot press method. These novel methods for creating lattice core sandwich panels from carbon fiber composite have been investigated and the crushing response of the present truss structures is investigated and the corresponding failure modes are studied. All these lattice truss topologies such as pyramidal and tetrahedral cores have shown recently to fulfill the apparent gap between the existing materials and the unattainable materials limit in the low density region of the Ashby's chart. Then, the paper concludes with a section on the future trends in using carbon fiber composite for manufacturing lattice truss cores.

Key words: polymer matrix composites (PMCs); lattice truss core; mechanical properties; carbon fiber; sandwich structures

1 引言

夹芯结构是由上下两层高强度、高模量的薄面板和中间较厚的轻质芯材所组成的轻质结构。轻质芯子的作用是尽可能降低结构的重量,增加两面板的截面惯性矩,从而提高结构的抗弯曲刚度。图 1 所示的传统夹芯结构,如蜂窝夹芯结构、泡沫夹芯结构、波纹板等,目前已得到广泛的应用。随着应用领域的不断扩大和深入,工业界对轻质结构(高比强、高比刚)及多功能结构(结构与功能一体化)发展提出了更高的要求。传统的夹芯结构形式已满足不了这种需求,点阵夹芯结构正是在这种发展趋势下应运而生的一种新型结构。弗吉尼亚大学 Wadley 课题组首先研究了由金属材料制备的具有传热和承载一体化的夹芯结构,如图 2 所示。这种夹芯结构一方面具有承载的功能,一方面具有传热功能,极大克服了传统结构空间闭合的缺点^[1]。

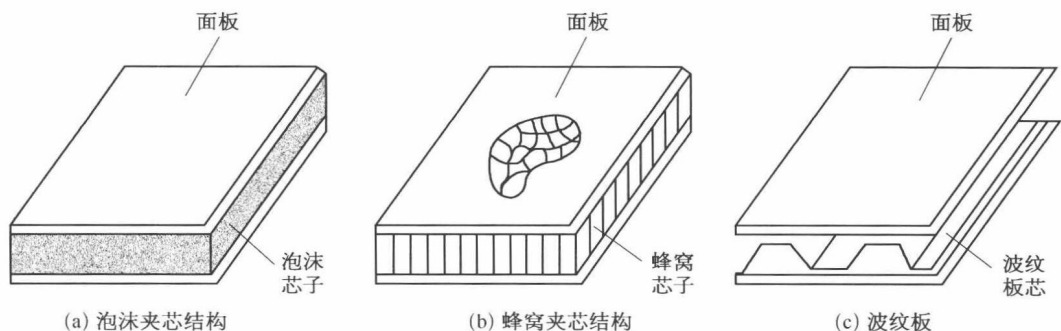


图 1 传统夹芯结构形式

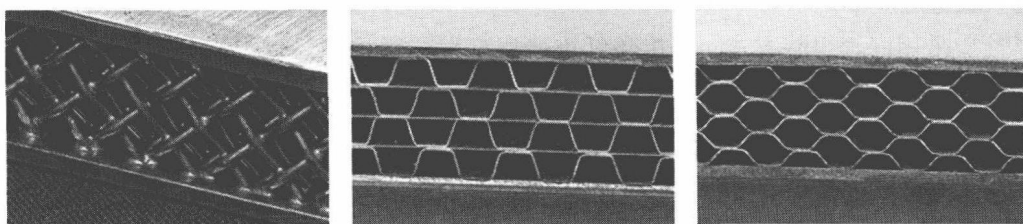


图2 具有传热、承载功能的夹芯结构

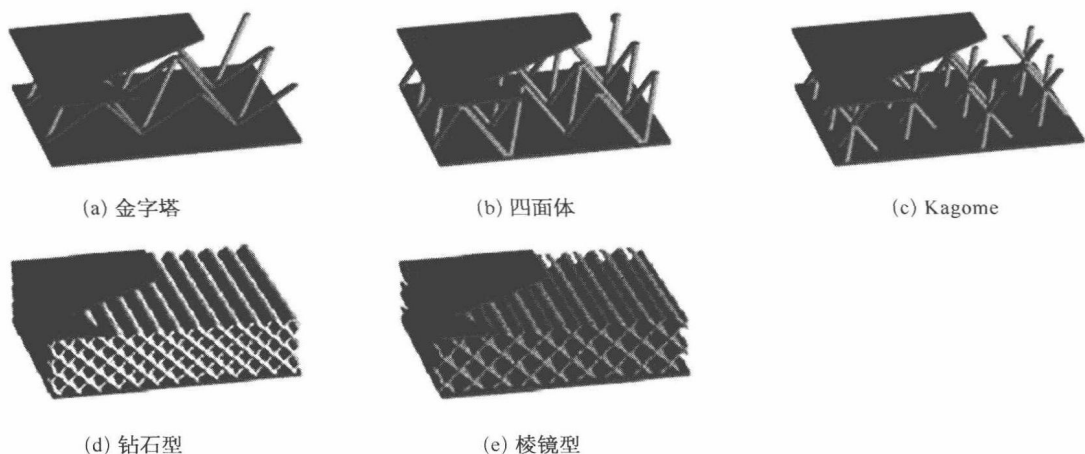


图3 典型点阵结构形式

2001年左右,西方材料学界,以哈佛大学 Evans 教授和 Hutchison 教授、剑桥大学 Ashby 教授、MIT 的 Gibson 教授等人为首提出了点阵夹芯结构概念^[2],这种结构类似于现有的空间网架,只是在尺寸上要小得多,典型结构形式如图3所示。自然界生物骨骼之中也存在类似于点阵夹芯结构形式的组织,即两块面板中间由若干杆件连接而成,典型例子为一种犀鸟嘴部结构^[3],如图4所示。点阵结构空隙率大且相互联通,易于埋置小型元器件、功能材料等,因此可实现结构、热控、储能等多功能一体化。点阵结构概念提出后,国内外学者在金属材料点阵结构的优化设计、制备工艺及性能表征等方面开展了系统深入的研究^[4~11]。与金属点阵结构相比,复合材料点阵结构的制备工艺较为复杂,2007年才成功制备出碳纤维复合材料点阵结构。Finnegan 等^[12]首次制备出碳纤维金字塔点阵结构,在制备工艺很不成熟的条件下,仍然证明了复合材料点阵结构具有比金属材料点阵结构更加优越的比强度。Russell 等^[13]制备出碳纤维复合材料蜂窝型夹芯结构,采用嵌锁的方

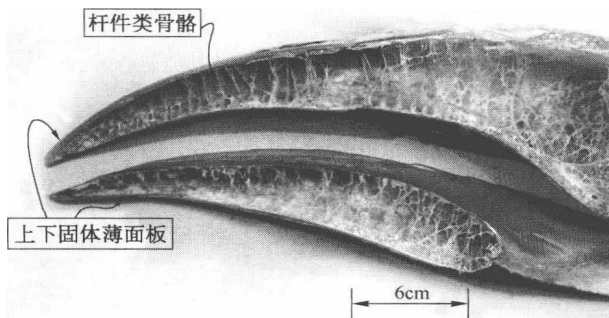


图4 一种犀鸟嘴部横截面图

式组装成四边形蜂窝结构,同样证明其比强度比刚度优势要比金属蜂窝夹芯结构高。范华林等^[14,15]采用嵌锁组装方式制备出碳纤维格栅型夹芯结构,试验结果表明:该夹芯结构要比传统夹芯结构具有更大的比强度比刚度。

从已有的结果看,复合材料点阵结构具有高比强和高比刚的优势,但其成型工艺比较复杂,成本较高,如何制备出性能优异的碳纤维点阵结构是研究者所必须面对的挑战。本文主要概述了碳纤维复合材料点阵结构的制备工艺和失效破坏行为分析,并对未来的发展进行展望,以期为该类结构的工程应用提供参考。

2 碳纤维复合材料点阵结构制备工艺

复合材料成型工艺比较复杂,对机械切割比较敏感,而且制备成本普遍偏高。一般成型纤维增强树脂基复合材料结构主要有手糊成型技术、预浸料成型技术、模压成型技术、热压罐成型技术、软膜成型技术、缠绕成型技术、RTM成型技术、拉挤成型技术。对于复合材料点阵结构,其结构形式复杂,芯子的杆件尺寸一般介于1~5 mm之间,这对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。

2.1 杆件组装工艺

弗吉尼亚大学 Wadley 课题组^[12,16]于2007年首次采用该工艺制备出金字塔型复合材料点阵结构,其制备工艺流程如图5所示。首先,通过拉挤工艺制备出复合材料圆杆,直径为

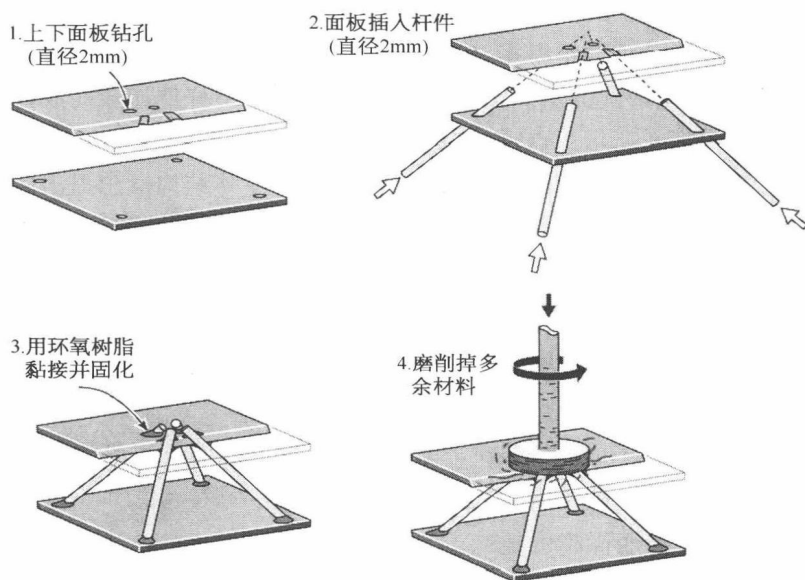


图5 杆件组装工艺流程图

2 mm, 同时在面板上预先钻出圆孔; 然后, 将圆杆与面板机械组装在一起, 将复合材料圆形杆件按照一定规律排列, 形成金字塔点阵结构, 并通过环氧树脂固化; 最后, 磨掉两端多余的材料, 制备出的结构样件如图 6 所示。从本文后面的力学性能分析可以发现, 该制备工艺成型的金字塔点阵结构没有发挥杆件的最大潜力, 破坏模式往往是杆件穿过而板, 而且制备过程复杂, 机械加工较多。

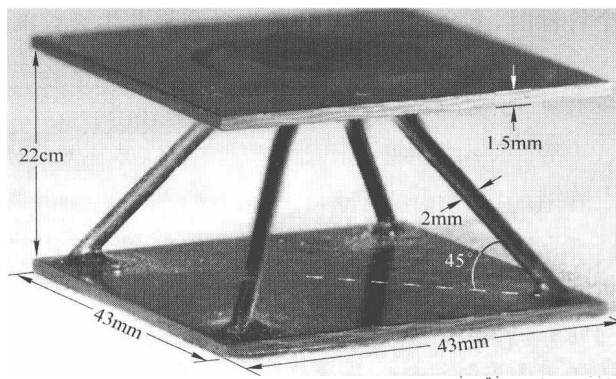
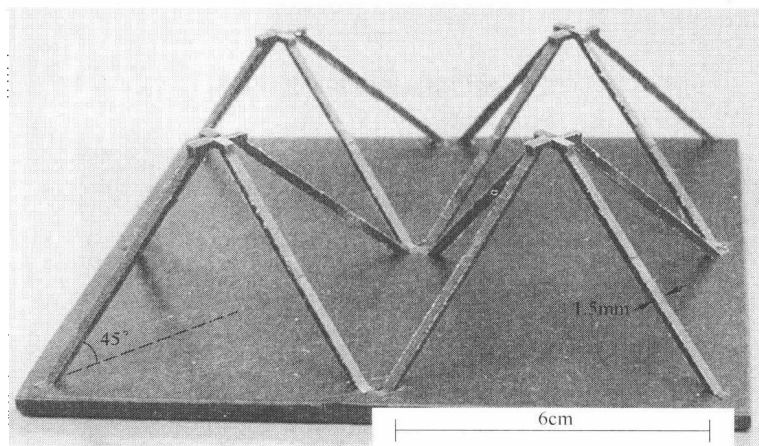
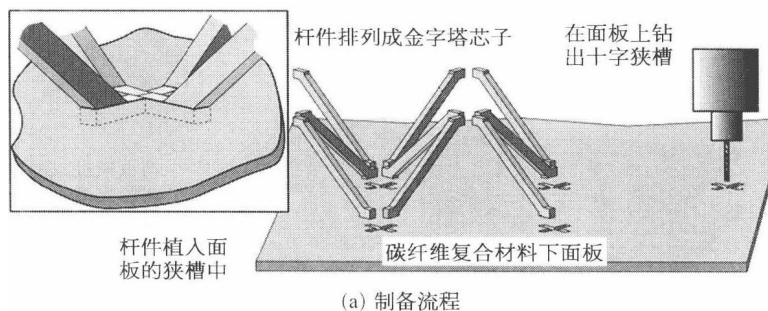


图 6 采用杆件组装工艺制备的碳纤维复合材料金字塔点阵结构

2.2 水切割单杆拼接工艺

随后 Wadley 课题组^[12,16]在杆件组装工艺基础上, 进一步发展了水切割单杆拼接工艺。杆件是由通过切割层合板而得到的, 杆件两端有小部分凸台; 在上下面板采用高精度的钻孔机钻出十字形狭槽, 将单杆放入十字形狭槽中, 并灌入环氧树脂进行固化成型, 即可形成碳纤维金字塔点阵夹芯结构, 如图 7 所示。通过失效分析发现, 该工艺尚存在缺点, 即形成单



(b) 2×2 单细胞示意图(去掉上面板, 相对密度 $\rho=0.5\%$)

图 7 水切割单杆拼接工艺

个杆件时,多余的凸台部分成为最容易萌生裂纹的地方。

2.3 水切割嵌锁组装工艺

Wadley 课题组^[12,16]于 2007 年首次采用水切割组装工艺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 8 所示。第一步,制备出 0/90 铺层层合板;第二步,采用高压水枪对层合板进行切割,将层合板切割成所设计的形状和尺寸;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式的凹槽,将点阵芯子与面板组装在一起,并用环氧树脂进行黏接固定。图 9 即为采用该工艺成型的碳纤维复合材料金字塔点阵结构。该制备工艺也存在机械切削较多的缺点,但具有芯子能批量成型的优

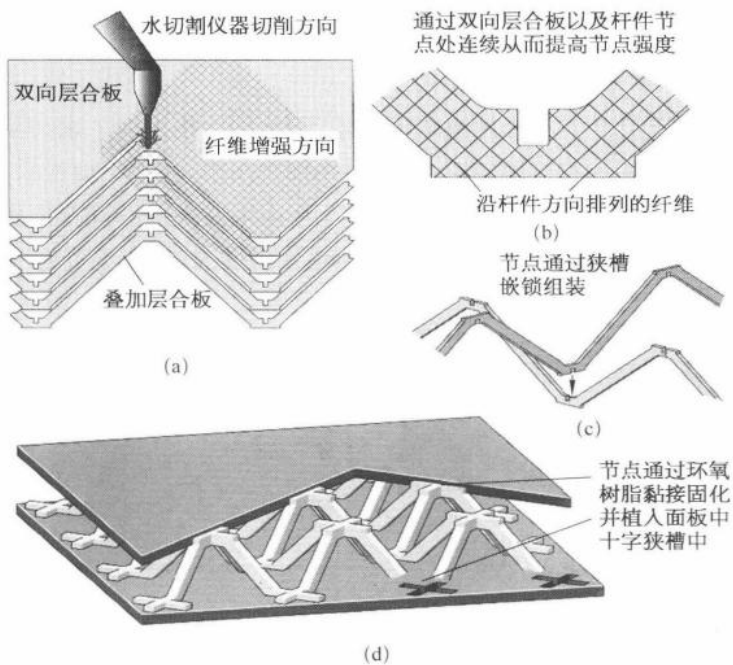


图 8 水切割嵌锁组装工艺流程图

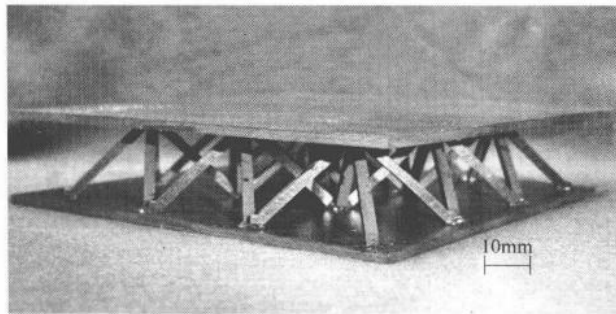


图 9 采用水切割嵌锁组装工艺制备的碳纤维金字塔点阵结构($\rho=3.5\%$)