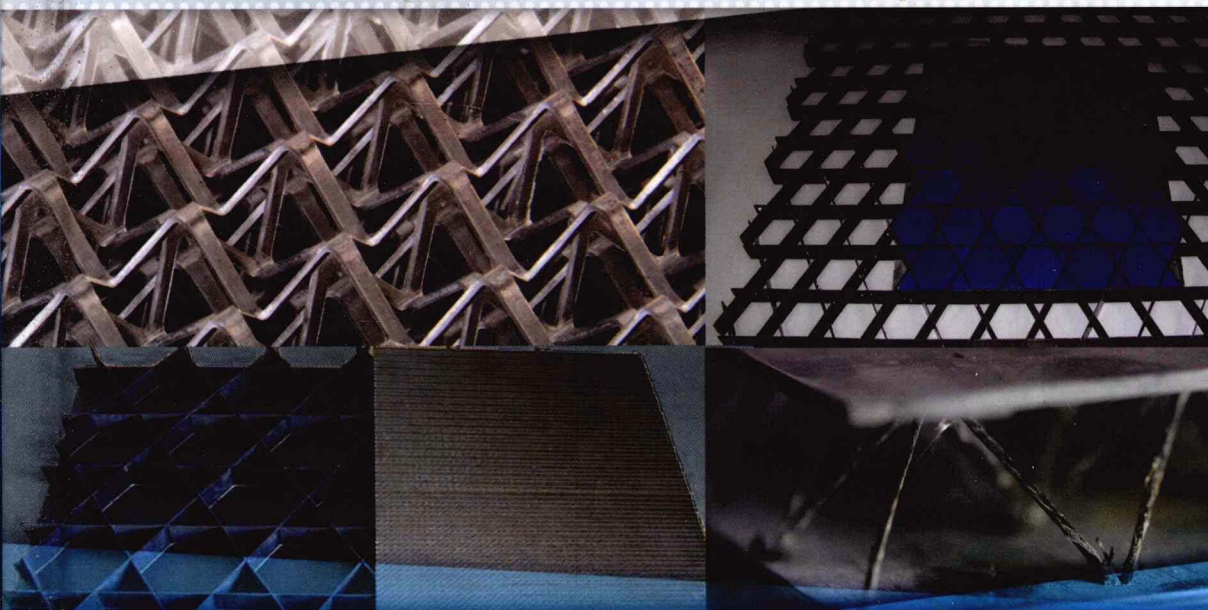




材料科学技术著作丛书

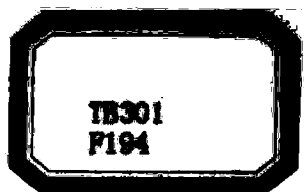
轻质点阵材料力学与 多功能设计

方岱宁 张一慧 崔晓东 著



科学出版社

www.sciencep.com



材料科学技术著作丛书

轻质点阵材料力学与多功能设计

方岱宁 张一慧 崔晓东 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是关于轻质多孔点阵材料力学和多功能设计的专著。全书共 11 章,前 4 章主要介绍轻质多孔点阵材料的应用背景、点阵金属材料和点阵复合材料的制备技术方法、点阵材料的弹性本构关系和破坏理论;第 5 章阐述点阵夹芯结构在爆炸和弹道冲击载荷作用下的力学分析模型;第 6 章讨论含缺陷点阵材料的理论分析方法;第 7 章介绍点阵结构的力学性能及优化设计;后 4 章论述轻质点阵材料的波传播、隐身和传热特性,并讨论其多功能一体化设计。

本书的主要特色在于详细描述了轻质多孔点阵材料力学性能的研究方法并给出了系统完整的分析结果,用简洁的语言解释了点阵材料相比传统材料的特性和优势。这些特征使固体力学、材料科学、冲击动力学等领域的读者能够很容易地抓住问题的物理本质和把握轻质多孔点阵材料的研究现状。

本书可作为固体力学、材料科学、电磁学、冲击动力学等研究领域的教师、研究生和相关专业技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

轻质点阵材料力学与多功能设计/方岱宁,张一慧,崔晓东著. —北京:科学出版社,2009

(材料科学技术著作丛书)

ISBN 978-7-03-025232-6

I. 轻… II. ①方…②张…③崔… III. 轻质-点阵-多孔性材料-材料科学研究 IV. TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 142829 号

责任编辑:刘宝莉 闫井夫 / 责任校对:李奕莹
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 8 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009 年 8 月第一次印刷 印张:15

印数:1—2 000

字数:302 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

《材料科学技术著作丛书》编委会

顾 问 师昌绪 严东生 李恒德 柯 俊
 颜鸣皋 肖纪美

名誉主编 师昌绪

主 编 黄伯云

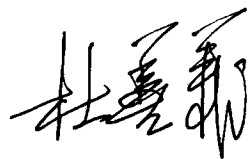
编 委 (按姓氏笔画排序)

干 勇	才鸿年	王占国	卢 柯
白春礼	朱道本	江东亮	李元元
李光宪	张 泽	陈立泉	欧阳世翕
范守善	罗宏杰	周 廉	施尔畏
徐 坚	高瑞平	屠海令	韩雅芳
黎懋明	戴国强	魏炳波	

序

轻质多孔点阵材料是近年来兴起的力学性能极为优异的新一代轻质多功能材料，在航空、航天、航海、交通等领域有广阔的应用前景。这类新型材料具有高孔隙率和微结构有序的特点，其力学机理体现新的特征，但是目前很缺乏该方面的总结性工作。该书从多学科结合的角度系统论述轻质多孔点阵材料的制备技术、变形和破坏机理、冲击载荷作用下的力学分析模型以及波传播、隐身等多功能特性，集中体现了近年来在这方面的研究成果和所形成的理论体系，丰富了固体力学的研究内容，具有重要的学术价值，对固体力学和材料科学领域的研究生和研究人员而言是一本颇有价值的参考书。

该书作者方岱宁教授是具有一定学术造诣的青年学者，具有扎实深厚的复合材料力学理论基础以及材料物理等方面的专门知识，近十年来一直致力于轻质多孔点阵材料的力学和多功能特性的理论与实验研究，取得了一系列创新性成果，在国内外产生了重要的影响。作者以自己多年研究工作为基础，并参考国内外的有关文献和新进展，以专著的形式系统地阐明了轻质多孔点阵材料的力学理论和多功能特性，内容新颖丰富，文献覆盖面广，论述循序渐进，结构清晰严谨，具有很高的学术水平，是一本优秀的学术专著。为此，我非常愿意向读者推荐并作序。



2009年4月27日

前 言

随着航空航天器结构的发展，飞行器特有的服役环境和性能要求产生了结构设计中的新课题：结构超轻型化，结构大尺度展缩与控制，隔热与隔振、电磁屏蔽和可靠运行的主动控制和智能监测的多功能化等问题。轻质多孔点阵材料在这种背景下应运而生。在过去十年左右的时间里，国内外的力学、物理和材料研究人员围绕轻质点阵材料的力学、传热、电磁、致动等多功能进行了广泛的研究，并取得了丰硕的成果。

本书的作者近十年来一直致力于轻质多孔点阵材料的力学和多功能特性研究，获得了较为可观的成果和经验。本书是作者结合自己的研究成果和心得并且参考国内外研究者的工作撰写而成，试图系统地论述轻质多孔点阵材料的力学理论与多功能特性。本书旨在能抛砖引玉，对推动该领域的发展有所裨益。为此，本书不仅侧重于静态力学的理论数值分析，也介绍动态力学行为和多功能特性的成果。作者力图做到，自始至终不但兼顾理论与计算、原理与应用，而且兼顾评述性。因此，本书具有全面、系统、信息量大、理论联系实际、力求反映本领域的最新进展等特点。

本书最后所列的参考文献虽然相当广泛，但远不是全部。由于文献浩繁，难免挂一漏万，对该领域的一些工作可能未曾提及，对此我们表示歉意。作者殷切地期望本书的出版能够对我国轻质多孔材料的研发和应用起到促进的作用，同时也为从事固体力学、材料科学、电磁学、冲击动力学等领域研究的教师、研究生和专业技术人员提供一本专业的参考书。

本书的研究工作曾先后获国家重点基础研究发展计划（973 计划）项目、国家高技术研究发展计划（863 计划）项目、总装“十一五”预研项目、国家自然科学基金委重大研究计划项目的资助，也获得国家自然科学基金委面上项目、重点项目的资助，谨此一并致谢。本书中的一些内容是作者研究组同事、博士后和研究生多年来辛勤劳动的部分成果，作者对他们在这项研究工作中所展示的勤劳、智慧、奉献和精诚合作表示感谢和怀念。在研究工作过程中，作者一直与浙江大学校长中国科学院院士杨卫教授、西安交通大学副校长卢天健教授、哈尔滨理工大学曾涛教授、法国巴黎第六大学 Zhao H 教授、澳大利亚斯威本理工大学

Lu G X 教授、美国斯伦贝谢公司 Xue Z Y 研究员进行密切有益的合作，从他们博学的专业涵养中受益匪浅，在此一并表示真诚的谢意。作者还要衷心感谢亲密同事黄克智院士和杨卫院士多年的支持、鼓励和帮助。

限于作者的理论水平和实践经验，书中难免有疏漏和不当之处，望能得到专家和读者的垂教、批评和指正。

作 者

于北京清华园

2009 年 4 月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 点阵材料的研究背景	1
1.2 点阵材料的特性	5
1.3 本书的结构与内容安排	9
第 2 章 点阵材料的制备工艺	10
2.1 点阵金属材料	10
2.1.1 二维点阵金属材料	10
2.1.2 三维点阵金属材料	11
2.2 点阵复合材料	13
2.2.1 二维点阵复合材料	13
2.2.2 三维点阵复合材料	14
2.3 点阵夹芯结构相关技术	15
第 3 章 点阵材料的弹性本构关系	17
3.1 二维点阵金属材料	17
3.1.1 面内弹性模量	18
3.1.2 面外弹性模量	20
3.1.3 弹性柔度矩阵	22
3.2 三维点阵金属材料	23
3.3 点阵复合材料	26
3.3.1 理论模型	27
3.3.2 有限元计算	30
第 4 章 点阵材料的屈服和破坏分析	32
4.1 基于细观机制的点阵材料屈服准则	33
4.1.1 二维点阵金属材料	33
4.1.2 三维点阵金属材料	37
4.2 点阵材料的唯象屈服准则	39
4.2.1 DFA 准则	39
4.2.2 XVH 准则	43

4.3	点阵材料的弹性屈曲准则	44
4.3.1	二维点阵材料	44
4.3.2	三维点阵材料	46
4.4	点阵金属材料的破坏分析	47
4.5	点阵材料力学性能的各向异性	48
4.5.1	点阵材料的单轴力学性能	48
4.5.2	二维点阵材料力学性能的综合比较	51
4.6	点阵复合材料的破坏分析	53
4.6.1	理论模型	53
4.6.2	有限元计算	54
4.7	静不定点阵材料的极限屈服准则	56
4.7.1	极限屈服分析方法	57
4.7.2	静不定点阵材料的极限屈服面	60
4.7.3	单轴应力下的屈服强度	64
4.7.4	屈服模式的演化	67
4.7.5	主轴方向的等效应力应变关系	68
4.8	点阵材料的弯曲效应	70
4.8.1	单胞的力学分析	70
4.8.2	弯曲效应分析	75
4.8.3	结果与讨论	76
第5章	点阵材料的抗冲击性能	79
5.1	点阵夹芯结构在弹道冲击下的响应	81
5.1.1	二维点阵夹芯结构	81
5.1.2	三维点阵夹芯结构	89
5.2	点阵夹芯结构在爆炸冲击下的响应	96
5.2.1	理论模型	96
5.2.2	数值模拟	105
5.2.3	实验结果	111
5.3	材料在冲击载荷作用下的本构关系以及状态方程	119
5.3.1	金属材料本构模型	119
5.3.2	固体材料状态方程	121
第6章	含缺陷点阵材料的力学性能	126
6.1	含缺陷二维点阵材料的理论模型	126
6.1.1	等效模型	127
6.1.2	等效模型的分解	128

6.1.3 有限元模拟	134
6.2 含缺陷二维点阵材料的应力集中	137
6.2.1 全三角点阵	138
6.2.2 Kagome 点阵	139
第 7 章 点阵结构的力学性能与优化设计	142
7.1 点阵夹芯梁	142
7.1.1 弯曲刚度	142
7.1.2 破坏模式	143
7.1.3 优化设计	144
7.2 点阵柱体结构	146
7.2.1 破坏模式	147
7.2.2 优化方程	148
7.2.3 最优强度设计	150
7.3 点阵圆柱壳结构	152
7.3.1 弯曲主导型点阵圆柱壳的力学性能	153
7.3.2 拉伸主导型点阵圆柱壳的力学性能	158
7.3.3 最优刚度设计	162
7.3.4 最优承载设计	163
第 8 章 点阵材料的波传播特性	165
8.1 声波在点阵结构中的传播	165
8.1.1 周期理论分析模型	165
8.1.2 声波的传播特性	169
8.2 弹性波在点阵结构中的传播	171
8.2.1 小波分析方法	171
8.2.2 弹性波的频散关系	173
第 9 章 轻质多孔材料的隐身性能	176
9.1 泡沫夹芯结构	177
9.2 蜂窝夹芯结构	180
9.3 复合二维点阵吸波结构	183
第 10 章 轻质多孔材料的传热性能	190
10.1 基本热学定义	190
10.2 基本尺度律	191
10.2.1 二维点阵夹芯结构	191
10.2.2 三维点阵夹芯结构	193
10.3 传热性能	194

10.3.1	二维点阵夹芯结构	194
10.3.2	三维点阵夹芯结构	195
第 11 章	点阵材料的多功能优化设计	199
11.1	轻质热防护点阵材料的优化设计	199
11.1.1	设计方案及问题提法	199
11.1.2	模型的建立与求解	200
11.1.3	数值结果和优化设计	203
11.2	轻质点阵致动器的优化设计	204
11.2.1	致动器的结构设计	205
11.2.2	参数设置	207
11.2.3	优化方程的推导	207
11.2.4	优化计算及结果	210
11.3	轻质吸波蜂窝夹芯梁的优化设计	213
11.3.1	力学性能	213
11.3.2	优化计算及结果	214
参考文献		217

Contents

Preface

Foreword

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Lattice materials	1
1.2 The excellent performances of lattice materials	5
1.3 Structure of the book	9
Chapter 2 Fabrication of lattice materials	10
2.1 Metal lattice materials	10
2.1.1 Two dimensional metal lattice materials	10
2.1.2 Three dimensional metal lattice materials	11
2.2 Lattice composites	13
2.2.1 Two dimensional lattice composites	13
2.2.2 Three dimensional lattice composites	14
2.3 Lattice sandwich structures	15
Chapter 3 Elastic constitutive relations of lattice materials	17
3.1 Two dimensional lattice materials	17
3.1.1 In-plane elastic moduli	18
3.1.2 Out-of-plane elastic moduli	20
3.1.3 Elastic compliance matrix	22
3.2 Three dimensional lattice materials	23
3.3 Lattice composites	26
3.3.1 Theoretical model	27
3.3.2 Finite element simulation	30
Chapter 4 Yield and collapse analysis of lattice materials	32
4.1 Mechanism based yield criterion	33
4.1.1 Two dimensional lattice materials	33
4.1.2 Three dimensional lattice materials	37
4.2 Phenomenological yield criterion	39
4.2.1 DFA yield criterion	39

4.2.2	XVH yield criterion	43
4.3	Elastic buckling criterion	44
4.3.1	Two dimensional lattice materials	44
4.3.2	Three dimensional lattice materials	46
4.4	Collapse analysis	47
4.5	Anisotropy of mechanical properties	48
4.5.1	Uniaxial mechanical properties	48
4.5.2	Comprehensive comparison	51
4.6	Collapse analysis of lattice composites	53
4.6.1	Theoretical model	53
4.6.2	Finite element simulation	54
4.7	Ultimate yield of statically indeterminate lattice materials	56
4.7.1	Formulation of ultimate yield surface	57
4.7.2	Ultimate yield surfaces	60
4.7.3	Yielding responses of the lattice structures under uniaxial loading	64
4.7.4	Evolution of the yield modes	67
4.7.5	Effective stress-strain relation in principal directions	68
4.8	Bending effect	70
4.8.1	Mechanical analysis of unit cell	70
4.8.2	Influence of bending effect	75
4.8.3	Results and discussion	76
Chapter 5	The impact resistance of lattice materials	79
5.1	Ballistic impact	81
5.1.1	Two dimensional lattice sandwich structure	81
5.1.2	Three dimensional lattice sandwich structure	89
5.2	Impulsive impact	96
5.2.1	Theoretical model	96
5.2.2	Numerical simulation	105
5.2.3	Experimental investigation	111
5.3	Constitutive relation and state equation in dynamic response	119
5.3.1	Constitutive relation of metal materials	119
5.3.2	State equation of solid materials	121
Chapter 6	Mechanical performance of imperfect lattice material	126
6.1	Theoretical model of two dimensional imperfect lattice material	126

6.1.1	Equivalent model	127
6.1.2	Decomposition of the equivalent model	128
6.1.3	Analytical solution and finite element simulation	134
6.2	Stress concentration in two dimensional imperfect lattice material	137
6.2.1	Triangular lattice materials	138
6.2.2	Kagome lattice materials	139
Chapter 7	Mechanical properties and optimal design of lattice structures	142
7.1	Lattice sandwich beam	142
7.1.1	Bending stiffness	142
7.1.2	Failure mechanism	143
7.1.3	Maximum specific strength design	144
7.2	Lattice column structure	146
7.2.1	Failure mechanism	147
7.2.2	Governing equation of optimization	148
7.2.3	Maximum specific strength design	150
7.3	Lattice cylindrical shells	152
7.3.1	Cylindrical shells made from the bending-dominated planar lattices	153
7.3.2	Cylindrical shells made from the stretching-dominated planar lattices	158
7.3.3	Maximum specific stiffness design	162
7.3.4	Maximum loading capacity design	163
Chapter 8	Wave propagation in lattice material	165
8.1	Sound propagation in lattice material	165
8.1.1	Periodic theory model	165
8.1.2	Sound propagation property	169
8.2	Elastic wave propagation in lattice material	171
8.2.1	Wavelet method	171
8.2.2	Dispersion relation of the elastic wave	173
Chapter 9	Wave absorbing property of lattice materials	176
9.1	Sandwich structure with foam cores	177
9.2	Hexagonal honeycomb sandwich structure	180
9.3	Sandwich structure with two dimensional lattice cores	183
Chapter 10	Thermal characteristics of lattice materials	190
10.1	Thermal definitions	190

10.2	Basic scaling	191
10.2.1	Two dimensional lattices sandwich structure	191
10.2.2	Three dimensional lattices sandwich structure	193
10.3	Thermal performance	194
10.3.1	Two dimensional lattices sandwich structure	194
10.3.2	Three dimensional lattices sandwich structure	195
Chapter 11	Multifunctional optimal design of lattice materials	199
11.1	Lightweight thermal protection material	199
11.1.1	Design theme	199
11.1.2	Theoretical model	200
11.1.3	Optimization results	203
11.2	Lightweight lattice cored actuators	204
11.2.1	Structural design of actuators	205
11.2.2	Selection of design parameters	207
11.2.3	Derivation of the optimization equation	207
11.2.4	Optimization results	210
11.3	Lightweight wave absorbing honeycomb sandwich beam	213
11.3.1	Mechanical properties	213
11.3.2	Optimization results	214
References		217

第 1 章 绪 论

1.1 点阵材料的研究背景

随着高新技术的发展,人们已不再满足于材料单纯的轻质化,而是寻找兼有轻质和其他某种或某几种优良性能相结合的先进材料以适应不同的需求。作为一种生物材料中普遍存在的典型结构,多孔介质在自然界动植物体中发挥着不可替代的生物功能。许多天然结构材料本身就是多孔固体,如木材、骨头及珊瑚等,能够长期承受很大的静态载荷和周期载荷。与此相类似,近年来随着材料制备和成形加工技术的迅速发展而出现的超轻多孔材料也是以高孔隙率(大于 70%)为特点,包含贯通或非贯通的二维或三维空隙的一类新颖多功能材料(Evans,2001;Evans et al.,2001)。

多孔材料按其微结构规则程度可分为无序和有序两大类,前者主要指泡沫化材料(foam),而后者主要指点阵材料(lattice material),因其微观结构与晶体点阵构型类似而得名。根据微结构构造形式的不同,点阵材料又分为二维和三维点阵材料。二维点阵材料主要指由多边形进行二维排列、在第三方向拉伸成棱柱而构成的蜂窝材料(honeycomb material),也被称为格栅材料(grid material);三维点阵材料则是由杆、板等微元件按一定规则重复排列构成的空间桁架结构。关于多孔材料的详细分类已列于图 1.1 中,图 1.2 则分别给出一种典型二维点阵材料和三维点阵材料的结构示意图。

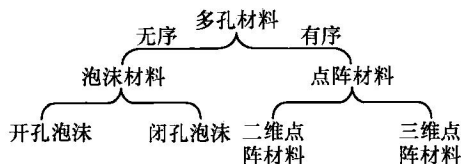


图 1.1 多孔材料的分类图

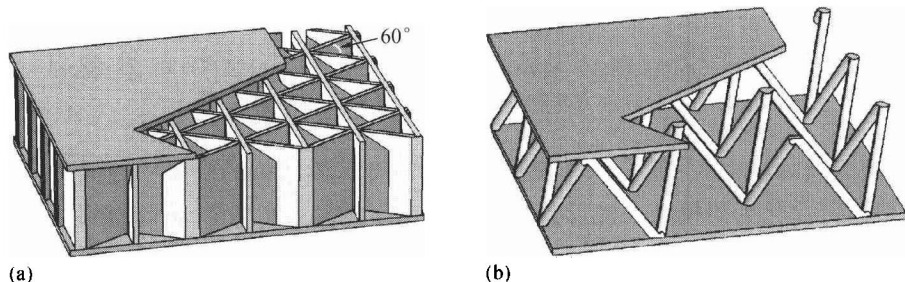


图 1.2 典型二维点阵材料和三维点阵材料的结构示意图(Wadley,2006)

(a) 二维全三角点阵材料;(b) 三维四棱锥点阵材料

二维点阵材料通常是由其代表性单胞在两个方向延拓而形成的,因而我们一般只关心其结构在延拓面内的构型。常见的二维点阵构型如图 1.3 所示(Zhang et al., 2008b; Wang et al., 2004),主要包括:六边形点阵、四边形点阵、Kagome 点阵、全三角点阵、菱形点阵、混合型点阵、正方静不定点阵和新型 Kagome 点阵。

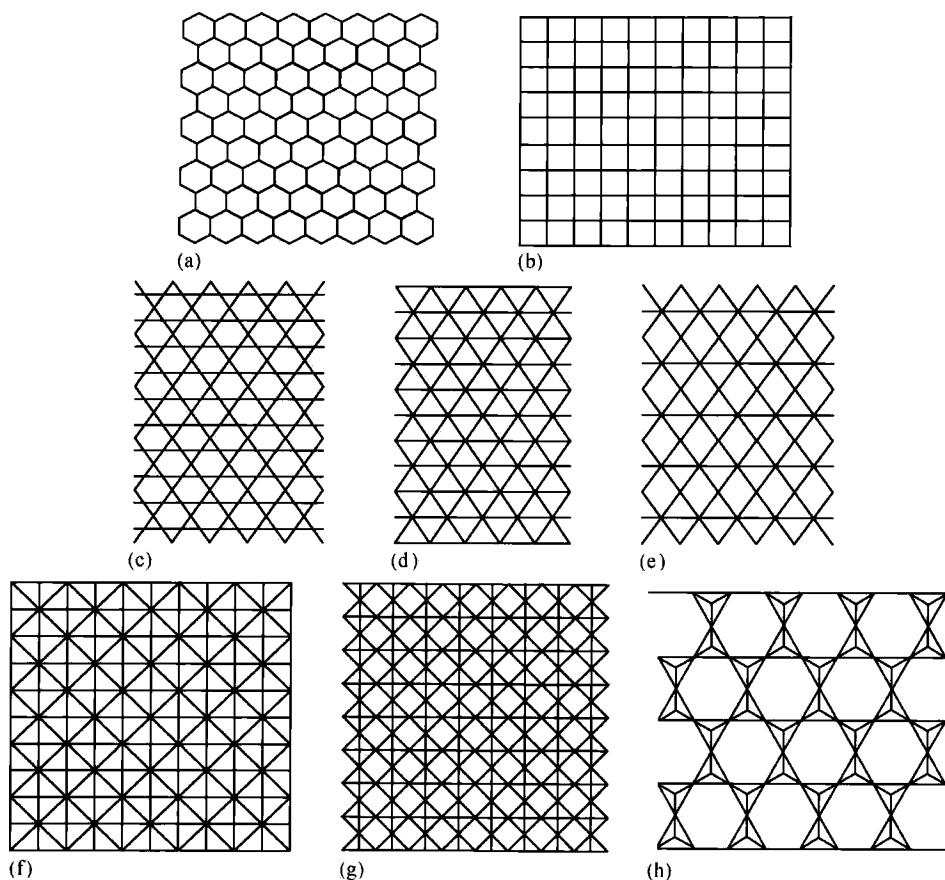


图 1.3 常见二维点阵构型

(a) 六边形点阵; (b) 四边形点阵; (c) Kagome 点阵; (d) 全三角点阵; (e) 菱形点阵; (f) 混合型点阵;
(g) 正方静不定点阵; (h) 新型 Kagome 点阵

因为点阵材料的相对密度一般小于 30%, 且其微结构的壁厚一般比长度小很多, 所以可简化为梁模型来进行力学分析。在面内载荷作用下, 点阵材料可能承受轴向力、弯矩和剪力的作用。Deshpande 等(2001b)的工作表明, 当点阵材料的几何构型满足一定的条件时, 胞壁主要受轴向力作用, 或者说其他内力贡献可以忽略, 此时单胞主要通过内部各胞壁的拉压来抵抗外载和整体变形, 这类点阵结构材