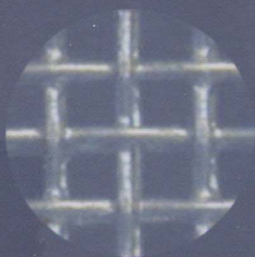
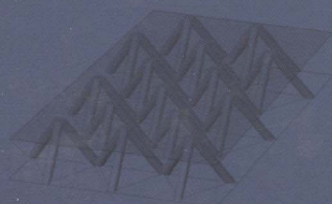
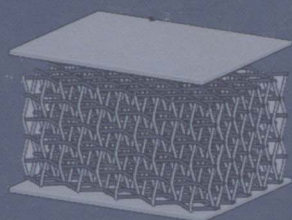




周期性多孔金属材料的热流性能

卢天健 徐峰 文婷 著



 科学出版社
www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

周期性多孔金属材料的热流性能

卢天健 徐 峰 文 婷 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书旨在揭示多功能超轻周期性多孔金属材料 and 结构在强制对流条件下传热传质机理,为研制以多功能超轻多孔材料为基本材料、具有优良传热性能和力学性能的高效紧凑式换热器、微热管等提供理论依据和指导。

本书重点阐述了有序多孔金属材料中的强制对流流动与换热,详细讲述了三种典型的有序多孔金属材料中的流体流动和传热性能,提出了一种评估各种热汇介质总体热特性的方法,并采用这种方法对各种多孔金属材料进行了比较。同时,本书还提供了一种可用于有序多孔金属材料强制对流换热优化设计的理论分析方法。

本书既可作为高年级大学生和研究生的教材,也可作为相关研究人员和工程师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

周期性多孔金属材料的热流性能/卢天健,徐峰,文婷著. —北京:科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-024074-3

I. ①周… II. ①卢…②徐…③文… III. ①多孔性材料:金属材料-周期性传热-性能 IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 065794 号

责任编辑:刘宝莉 闫井夫 / 责任校对:宋玲玲

责任印制:赵 博 / 封面设计:鑫联必升

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 4 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010 年 4 月第一次印刷 印张: 9 3/4

印数: 1—2 000 字数: 184 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

前 言

多孔材料具有良好的力、电、热、声等性能,被广泛应用于航空航天、电子通信、交通运输、原子能、医学、环保、冶金、机械、建筑、电化学和石油化工等领域,涉及减重、抗冲击、减振降噪、隔热保温、散热控制、分离、过滤、布气、电磁屏蔽、电化学、催化反应和生物工程等诸多方面的用途。

近年来,随着先进制造手段的出现以及对多孔材料各种性能认知理解的提高,人们对多孔材料的多功能性能及应用的兴趣与日俱增。多孔材料的多功能性能研究是一项跨学科的研究领域,需要同时采用多种工程手段,其目的是建立起多孔材料整体性能与其内部结构以及组成材料性质之间的关系,从而实现对多孔材料在不同多功能应用场合进行量体裁衣和优化设计。

多孔材料的性能取决于两组独立的参量:一组是描述其几何结构的参量,另一组则是描述其组成材料性质的参量。换言之,对不同结构或不同材料的多孔材料而言,支配其结构-性质关系的基本机理可能是大相径庭的,而研究方法和内容也不尽相同。本书主要讨论具有有序结构的轻质多孔金属材料。除了能承受结构载荷之外,有序结构多孔金属材料还具有以下共同特点:①具有很大的比表面积;②金属材料具有良好的导热性能;③多孔材料的空隙可供气体或液体通过。这些特点使有序多孔金属材料成为制造超轻多功能换热器或热汇的最佳候选材料之一。本书重点介绍了有序多孔金属材料中的强制对流流动与换热,并针对三种典型的有序多孔金属材料中的流体流动和传热性能进行了详细阐述;提出了一种评估各种热汇介质总体热特性的方法,并采用这种方法对各种多孔金属材料进行了比较;提供了一种可用于有序多孔金属材料强制对流换热优化设计的理论分析方法。

本书中两种三维有序多孔金属材料(三角锥桁架结构和编织结构)的实验数据分别由英国剑桥大学 Tongbeum Kim 博士和田靖博士提供,作者在此向他们表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 多孔材料	2
1.3 有序多孔材料	4
1.3.1 二维有序多孔材料	4
1.3.2 三维有序多孔材料	4
1.4 多孔材料的应用	4
1.5 本书的目的和梗概	6
参考文献	7
第 2 章 有序多孔材料的制备方法	9
2.1 概述	9
2.2 二维有序多孔材料的制备	10
2.2.1 挤压法	10
2.2.2 组装-焊接法	11
2.3 三维有序多孔材料的制备	14
2.3.1 铸造法	15
2.3.2 组装-焊接法	16
2.4 有序多孔材料制备的焊接技术	19
2.4.1 钎焊技术	19
2.4.2 电阻焊	20
2.5 有序多孔材料的强化技术	21
2.5.1 拓扑结构调整	21
2.5.2 梗的中空化强化	21
2.5.3 热处理强化	21
2.5.4 加工硬化强化	21
2.5.5 复合结构强化	21
参考文献	23
第 3 章 二维有序多孔金属材料	25
3.1 二维有序多孔材料的特征	25

3.1.1	什么是二维有序多孔材料	25
3.1.2	二维有序多孔材料的参数	26
3.2	流体流动特性和压损	29
3.2.1	单孔通道内的摩擦压降	29
3.2.2	多孔通道内的压降	33
3.2.3	相关实验研究	36
3.3	传热	41
3.3.1	导热-对流相耦合的传热过程	41
3.3.2	局部温度和热流分布	43
3.3.3	总体传热特征	43
3.4	本章小结	45
	参考文献	45
第4章	三维有序金属多孔材料——桁架结构	47
4.1	三角锥桁架结构的特征	47
4.2	流体流动特征和压降	48
4.2.1	A向流动特征	49
4.2.2	B向流动特征	63
4.2.3	压降	64
4.3	传热	71
4.3.1	局部温度分布	71
4.3.2	局部传热特性	71
4.3.3	总体传热特性	78
4.3.4	扩展面引起的混合效应与对流传热的对比	80
4.4	本章小结	81
	参考文献	82
第5章	编织结构的三维有序多孔金属材料	83
5.1	编织结构的特征	83
5.1.1	什么是编织结构	83
5.1.2	编织结构的三维有序多孔材料的参数	85
5.2	流体流动特性与压降	85
5.2.1	理论模型	86
5.2.2	实验研究	87
5.3	传热特性	95
5.3.1	有效热导率	95
5.3.2	对流换热	97

5.3.3 容积(对流)换热系数	101
5.4 本章小结	104
参考文献	105
第6章 热汇介质热流体性能的综合评价	107
6.1 压损评估	107
6.2 散热能力评估	109
6.3 热流体性能的综合评估	110
6.4 本章小结	114
参考文献	114
第7章 优化设计	116
7.1 二维有序多孔金属材料的肋片模拟模型	116
7.1.1 问题的描述	116
7.1.2 情况Ⅰ:恒温表面	117
7.1.3 情况Ⅱ:恒热流表面	123
7.2 三维有序多孔金属材料的肋片模拟模型Ⅰ:三角锥桁架	125
7.2.1 肋片控制方程的描述	125
7.2.2 传热的经验关联式	127
7.3 三维有序多孔金属材料的肋片模拟模型Ⅱ:编织结构	128
7.3.1 肋片模型的控制方程	128
7.3.2 编织结构的总体传热量	129
7.4 二维有序多孔金属的优化设计	130
7.4.1 优化设计问题的描述	131
7.4.2 渐近线交点分析法	132
7.4.3 优化结果与讨论	139
7.5 本章小结	144
参考文献	144

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

20 世纪 90 年代后期,空间技术的迅猛发展需要尽可能地降低制造和运转成本。在这种需求的驱动下,一个崭新的概念,即多功能结构 (multi-functional structure)应运而生。这种结构将电子元件(多芯片组件,MCM)与信号及电力布线,在一个有嵌入式热控的承载结构中汇为一体,如图 1.1 所示。

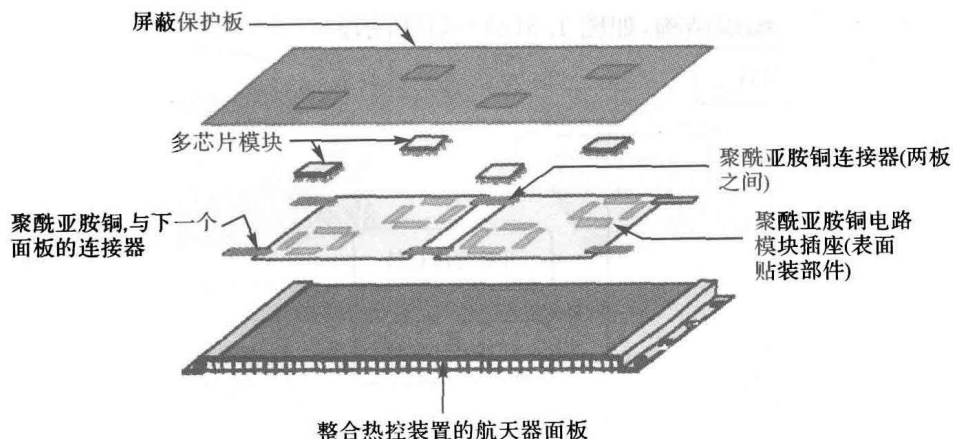


图 1.1 集电、力、热为一体的多功能结构设计^[1]

这一设计理念极大地改变了空间系统的设计手段,并成为结构和控制学界更新整套设计方法的范例^[1~4]。

通过研究人员不懈的努力,在将多功能结构概念与工程材料相结合方面,一类迥然不同的新型材料——多功能材料悄然问世。多孔材料就是具有多功能性能的典型材料^[5~9]。这种材料集力、电、热、声乃至其他性能于一体,达到可以在整个系统水平上进行量体裁衣的目的。近年来,有两个原因使人们对多孔材料的多功能性能的兴趣与日俱增^[7]:①先进的制造手段使生产成本大幅度降低,同时,材料的性能显著提高;②新的研究手段及设计策略的实施,使人们对这些材料的力、电、热、声等性能的综合理解达到了一个更高的水平。

多孔材料的多功能性能是一项跨学科的研究领域,需要同时采用多种工程手段。其目的是建立这种可裁剪材料的内部结构与整体性能之间的定量关系,从而

设计制造出能满足某一多功能应用场合所要求的性质和性能的产品^[10]。

1.2 多孔材料

多孔材料由形成材料本身基本构架的连续固相和形成空隙的流体相组成,其中流体相通常是气相,也可以是液相^[11]。许多天然的材料(如木料、软木、海绵和骨骼等)和人造的材料都属于多孔材料。

如图 1.2 所示,根据其内部结构,多孔材料大体上可以分为两大类,一类具有无序的结构,另一类则具有有序的结构。具有无序结构的主要是泡沫材料,根据它们的空隙结构还可细分为两种,开孔泡沫材料和闭孔泡沫材料,如图 1.3(a)和(b)所示。前者的空隙相互连通,后者的空隙则互不连通。具有有序结构的多孔材料也呈现一些不同的结构,最常见的是二维的棱柱结构,如图 1.3(c)和(d)所示;三维的桁架和编织结构,如图 1.3(e)~(j)所示。

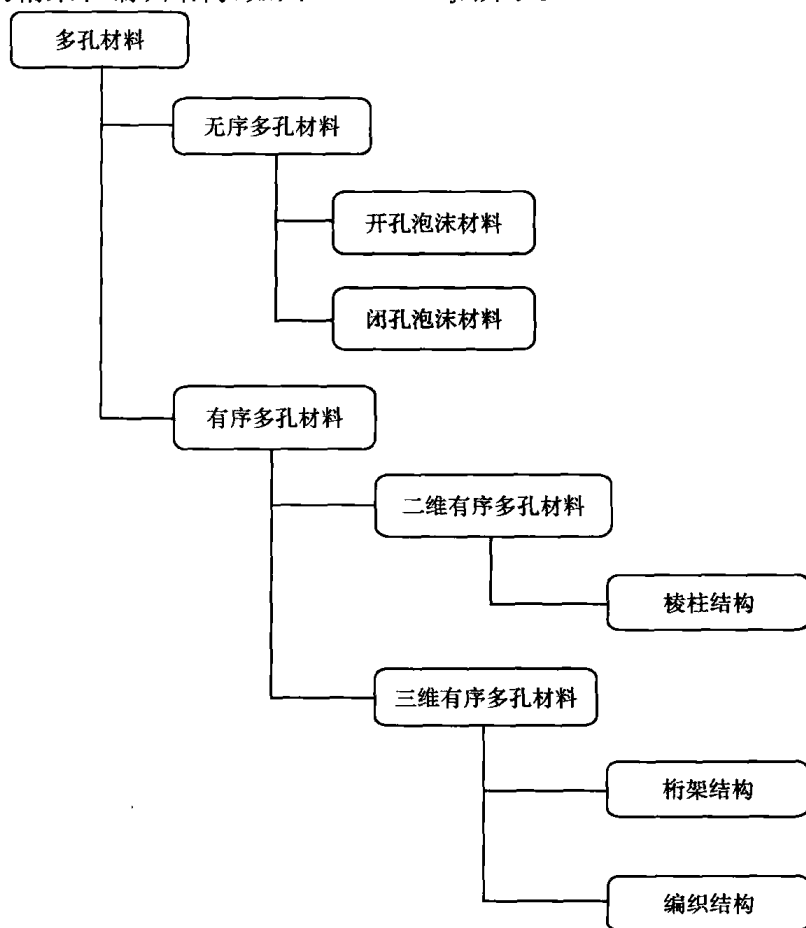
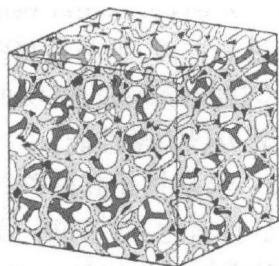
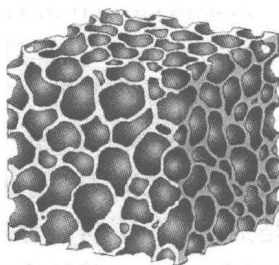


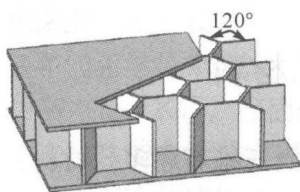
图 1.2 多孔材料的分类



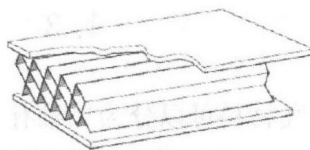
(a) 开孔泡沫材料



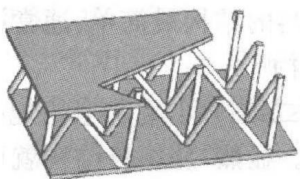
(b) 闭孔泡沫材料



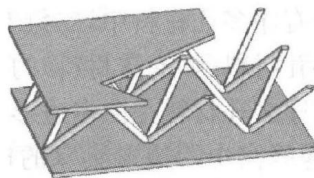
(c) 二维有序多孔材料



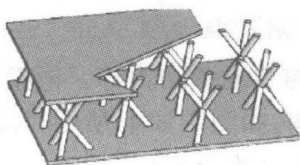
(d) 二维有序多孔材料



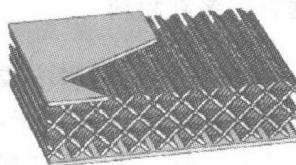
(e) 三维有序多孔材料



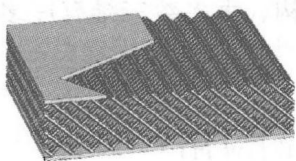
(f) 三维有序多孔材料



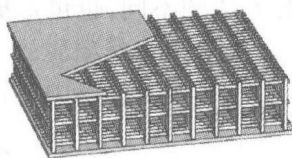
(g) 三维有序多孔材料



(h) 三维有序多孔材料



(i) 三维有序多孔材料



(j) 三维有序多孔材料

图 1.3 各种多孔材料的实例^[9,12,13]

人们可能提出这样的问题,具有有序结构的多孔材料与类似的工程结构有何区别? 英国剑桥大学 Ashby 教授指出两者的主要差别在于它们的尺寸。多孔材料单个空隙的尺寸为毫米级或微米级,远小于工程结构的相应尺寸。正因为如

此,它们既可作为结构,也可作为材料来分析。一方面,可以用经典的结构力学方法,如同分析空间桁架结构一样对其进行分析;另一方面,则必须将多孔材料视为本身具有一系列实实在在特性的“材料”(可以与通常所说的密实的材料相提并论),并采用经典连续介质力学(传热学)来分析其力(热)学性能。

多孔材料的性质取决于两组独立的参量,一组是描述其内部几何结构的参量,另一组则是描述其组成材料性质的参量^[14]。换言之,对不同内部结构或不同材料的多孔材料而言,支配其结构-性质关系的基本机理可能是大相径庭的。本书的阐述重点是具有有序结构的多孔材料。

1.3 有序多孔材料

有序多孔材料可以分为二维有序多孔材料及三维有序多孔材料。

1.3.1 二维有序多孔材料

在各种有序多孔材料中,二维有序多孔材料的结构最简单,通常被选作研究其他复杂多孔材料(如泡沫材料)的基本几何结构^[15]。

二维有序多孔材料是由多边形棱柱组成的二维排列,它们紧紧地排列在一个平面上,就像蜂窝中六边形巢室的排列那样^[5]。显然,从拓扑结构就可判断二维有序多孔材料是各向异性的。

1.3.2 三维有序多孔材料

常见的三维有序多孔材料主要有桁架结构和编织结构等。桁架结构中常见的有三角锥桁架,如图 1.3(e)所示;四角锥桁架,如图 1.3(f)所示;Kagome 桁架,如图 1.3(g)所示。编织结构由金属丝编织层相互堆叠形成,如图 1.3(h)~(j)所示。编织层的编织方法可以是平纹、斜纹或简单的金属丝的搭建。另外,由于层与层之间堆叠方法的不同,也可形成不同的结构。大多数三维有序多孔材料也是各向异性的。

1.4 多孔材料的应用

通过选取具有不同物性参数的固体材料并采用不同的内部结构,多孔材料可以呈现出不同的力、热、声、电等物理特性。因此,多孔材料被广泛应用到航空航天、电子通信、交通运输、原子能、医学、环保、冶金、机械、建筑、电化学和石油化工等领域,其主要涉及以下用途:

(1) 超轻。与密实的固体材料比较,多孔材料在降低材料密度的同时,能提高强度和刚度等机械性能^[12,16]。另外,现有的力学性能实验数据表明,低密度的多孔材料仍然具有较高的刚度和屈服强度。因而,多孔材料被广泛应用于轻型结构。

(2) 防冲击。与密实的固体材料相比,多孔材料的冲击韧性大大提高^[17~20]。因而,多孔材料可以用于吸收冲击能量或削弱爆炸波。

(3) 减振降噪。振动及噪声的传播均通过波的传播实现。多孔材料中由于多孔的存在,波的反射、折射及衍射均增多。因此,多孔材料能起到吸波的作用。利用这种性质,多孔材料可以用做减振及吸音材料。

(4) 隔热保温。当多孔材料中没有冷却流体流过时,多孔材料的热传导主要通过固相导热和气相导热来完成。气相的导热性能通常比较低[气相热导率的量级通常为 $10^{-2} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]。当固体也选用低热导率的材料(如陶瓷、塑料等)时,多孔材料的热传导性能非常低。因而,多孔材料可以用做隔热保温材料^[21,22]。

(5) 散热。当有冷却流体流经多孔材料的空隙时,空隙内冷却流体与固相之间的对流换热会因多孔材料的高比表面积而大大增强。当固体选用导热性能良好的材料(如金属)时,多孔材料可以提供良好的散热性能^[7,23,34]。

除了上述主要用途外,多孔材料还涉及分离、过滤、布气、电磁屏蔽、电化学过程、催化反应工程和生物工程等诸多方面的用途。

另外,多孔材料最大的优势在于将上述两种或多种功能相结合,实现多功能用途。例如,多孔材料可以用于航空母舰上喷气式飞机的燃气偏流板,如图 1.4 所示。在飞机起飞前,燃气偏流板作为甲板的一部分需要承受很大的压力,如图 1.4(a)所示;当飞机起飞时,燃气偏流板调至与甲板呈一定倾斜角,这样飞机发动机喷出的高温高速燃气直接冲击到燃气偏流板表面,并沿挡板向上偏转,从而避免高温高速燃气喷向后面的甲板对后面的飞机和人员造成危害。为了使燃气偏流板表面温度在短时间内降至一定水平以下,燃气偏流板内通过采用冷却水循环流动达到对流冷却的效果。为了强化对流传热,可使用桁架结构的多孔金属材料(由于机械负荷太大,常规的带肋片的换热器是不适用的)。

多孔材料多功能用途的另一个例子是用做大规模集成电子封装中的超轻多功能散热装置。这些散热装置要同时承受高的结构载荷和热载荷。与传统的散热材料相比,多孔金属材料在力学和热学以及其他性能方面均有无可比拟的优越性^[8,29,34~37]。开孔金属泡沫制造成本低廉,尽管早期曾作为一种优良的散热材料,但其承载能力远逊于相同密度的有序多孔金属材料。这是因为开孔金属泡沫在承受力学载荷时,其变形是受孔壁弯曲支配的。而对大多数有序多孔材料而言,其变形是受孔壁拉伸控制的^[38]。并且有序多孔材料的拓扑结构在制造过程中可实现精确控制。因此,有序多孔金属材料已成为制造超轻多功能散热装置的最佳候选材料。



(a) 飞机起飞前燃气偏流板承受力学载荷



(b) 飞机起飞后燃气偏流板承受热载荷

图 1.4 航空母舰上喷气式飞机的燃气偏流板

1.5 本书的目的和梗概

本书将阐述具有有序结构的多孔金属材料中的强制流动与换热。这种材料的多功能设计应用重点是要建立多孔金属材料内部拓扑结构与其整体性能的关系,并优化其几何参数使之能用于各种热力多功能结构和器械^[16,25,39]。

全书的梗概如下:第1章是绪论;第2章简单介绍各种有序多孔金属材料的制备方法;第3章依据相关文献中理论、实验和数值模拟研究,全面阐述二维多孔金属材料内流体压降和传热特性;第4章和第5章分别介绍具有桁架结构和编织结构的三维多孔金属材料内的流体流动和传热性能;第6章提出评估各种热汇介质

总体热特性的方法,并用这种方法对各种多孔金属材料进行比较;第7章提出对各种有序多孔金属材料强制对流换热进行优化设计的理论分析方法。

参 考 文 献

- [1] Barnett D M, Rawal S P. Multifunctional structures technology experiment on Deep Space 1 Mission. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1999, 14(1): 13—18.
- [2] Das A, Obal M W. Revolutionary satellite structural systems technology: A vision for the future. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 1998, 2(21-28): 57—67.
- [3] Fosness E, Guerrero J, Qassim K, et al. Recent advances in multi-functional structures. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2000, 42: 23—28.
- [4] Barnett D M, Rawal S, Rummel K. Multifunctional structures for advanced spacecraft. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2001, 38(2): 226—230.
- [5] Gibson L J, Ashby M F. *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [6] Evans A G, Hutchinson J W, Ashby M F. Cellular metals. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 1998, 3(3): 288—303.
- [7] Evans A G, Hutchinson J W, Ashby M F. Multifunctionality of cellular metal systems. *Progress in Materials Science*, 1999, 171—221.
- [8] Ashby M, Evans A, Fleck N, et al. *Metal Foams: A Design Guide*. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [9] Wadley H N G. Multifunctional periodic cellular metals. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2006, 364: 31—68.
- [10] Seepersad C C, Fernandez M G, Panchal J H, et al. Foundations for a systems-based approach for materials design//The 10th AIAA/SSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference Albany. New York, 2004.
- [11] 刘培生. 多孔材料引论. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [12] Fleck N A. An overview of the mechanical properties of foams and periodic lattice materials. *Symposium on Cellular Metals and Polymers*, 2004.
- [13] Queheillalt D T, Syceck D J, Wadley H N G. Ultrasonic characterization of cellular metal structures. *Materials Science and Engineering A*, 2002, 323: 138—147.
- [14] Ashby M F. The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2006, 364: 15—30.
- [15] Chen C, Lu T J, Fleck N A. Effect of inclusions and holes on the stiffness and strength of honeycombs. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001, 43: 487—504.
- [16] Hayes A M, Wang A J, Dempsey B M, et al. Mechanics of linear cellular alloys. *Mechanics of Materials*, 2004, 36: 691—713.
- [17] Wu E B, Jiang W S. Axial crush of metallic honeycombs. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(5-6): 439—456.
- [18] Papka S D, Kyriakides S. Experiments and full-scale numerical simulations of in-plane crushing of a honeycomb. *Acta Materials*, 1998, 46(8): 2765—2776.
- [19] Rathbun H J, Radford D D, Xue Z, et al. Performance of metallic honeycomb-core sandwich beams under

- shock loading. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, 43: 1746—1763.
- [20] Fleck N A, Deshpande V S. The resistance of clamped sandwich beams to shock loading. *Journal of Applied Mechanics*, 2004, 71: 386—401.
- [21] Torquato S, Gibiansky L V, Silva M J, et al. Effective mechanical and transport properties of cellular solids. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1998, 40(1): 71—82.
- [22] Lu T J, Chen C. Thermal transport and fire retardance properties of cellular aluminum alloys. *Acta Materials*, 1999, 47(5): 1469—1485.
- [23] Lu T J. Heat transfer efficiency of metal honeycombs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, 42: 2031—2040.
- [24] Calmide V, Mahajan R. Forced convection in high porosity metal foams. *ASME Journal of Heat Transfer*, 2000, 122: 557—565.
- [25] Gu S, Lu T J, Evans A. On the design of two-dimensional cellular metals for combined heat dissipation and structural load capacity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44: 2163—2175.
- [26] Hoffmann F. Heat Transfer Performance and Pressure Drop of Kagome Core Metal Truss Panels [Ph. D. Thesis]. Cambridge: University of Cambridge, 2002.
- [27] Hoffmann F, Lu T J, Hodson H P. Heat transfer performance of Kagome structures//The 8th UK National Heat Transfer Conference. Oxford, 2003.
- [28] Kim T. Heat Transfer in Lattice-Frame Materials. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [29] Kim T. Fluid-Flow and Heat-Transfer in a Lattice-Frame Material [Ph. D. Thesis]. Cambridge: University of Cambridge, 2003.
- [30] Kim T, Hodson H P, Lu T J. Pressure loss and heat transfer mechanisms in a lattice-frame structured heat exchanger. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2004, 218(11): 1321—1336.
- [31] Kim T, Zhao C Y, Lu T J, et al. Convective heat dissipation with lattice-frame materials. *Mechanics of Materials*, 2004, 36: 767—780.
- [32] Tian J. Fluid Flow and Heat Transfer in Woven Textiles [Ph. D. Thesis]. Cambridge: University of Cambridge, 2005.
- [33] Lu T J, Valdevit L, Evans A G. Active cooling by metallic sandwich structures with periodic cores. *Progress in Materials Science*, 2005, 50: 789—815.
- [34] Lu T J, Stone H A, Ashby M F. Heat transfer in open-cell metal foams. *Acta Materialia*, 1998, 46: 3619—3635.
- [35] Bastawros A F, Evans A G, Stone H A. Evaluation of Cellular Metal Heat Dissipation Media. Technical Report MECH 325, DBAS, 1998.
- [36] Tian J, Kim T, Lu T J, et al. The effects of topology upon fluid-flow and heat-transfer within cellular copper structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47: 3171—3186.
- [37] Wen T. Thermo-Fluid Characteristics of Metallic 2D Cellular Materials [Ph. D. Thesis]. Cambridge: University of Cambridge, 2007.
- [38] Evans A G, Hutchinson J W, Fleck N A, et al. The topological design of multifunctional cellular metals. *Progress in Materials Science*, 2001: 309—327.
- [39] Seepersad C C, Dempsey B M, Allen J K, et al. Design of multifunctional honeycomb materials. *AIAA Journal*, 2004, 42(5): 1025—1033.

第2章 有序多孔材料的制备方法

2.1 概 述

与传统材料相比,二维与三维有序多孔金属材料具有良好的可设计性,可根据不同的工程需求对其微观结构进行优化设计,以达到材料本身的多功能协同优化,这就给材料和力学工作者提供了更大的创新空间。

有序多孔材料的制备方法与材料的种类、拓扑结构以及孔径范围密切相关,直接影响着有序多孔材料应用的可行性和技术经济特性。以桁架结构和编织结构为主的三维有序多孔材料经历了近十年的发展,在部分借鉴金属、陶瓷和复合材料制备技术的基础上,形成了适合有序多孔材料的多种制备技术和工艺。有序多孔材料的制备技术主要有熔模铸造^[1~3]、挤压法^[4~7]、切槽方法^[8]、冲孔网冲压-钎焊法^[9,10]、钢板网折叠-钎焊法^[11]、三维编织法^[12]等。根据工艺特征,这些技术可分为三类,即铸造法、挤压法和组装-焊接法。图 2.1 给出目前主要的制备技术。

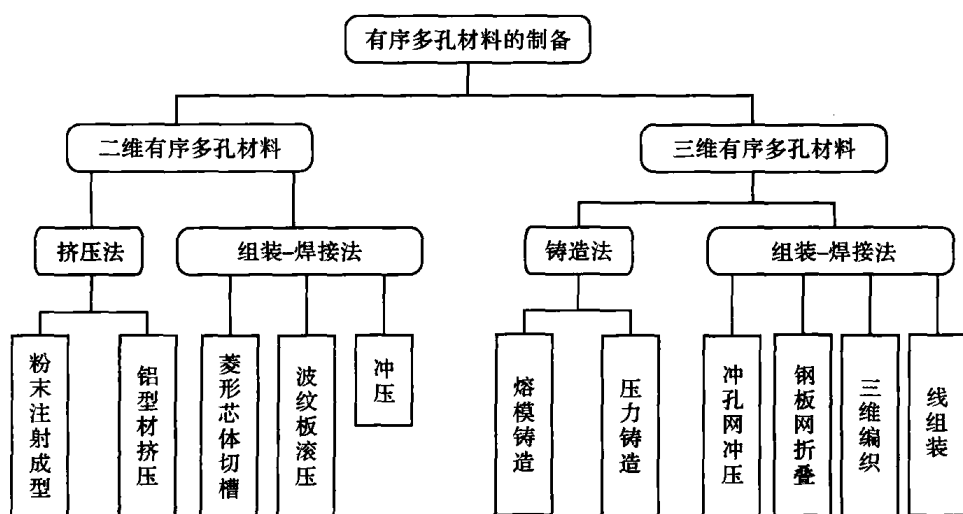


图 2.1 有序多孔材料的制备方法

2.2 二维有序多孔材料的制备

2.2.1 挤压法

挤压法作为一种少切削或无切削的塑性加工方法与自由锻、模锻等成形工艺相比,具有很大的优越性。一般而言,挤压件精度高、光洁度高,而且材料利用率明显高于其他加工方法。

1. 粉浆挤压成型

这一方法早已广泛用于制造汽车中的二维有序多孔陶瓷触媒。近来美国佐治亚理工学院(Georgia Institute of Technology)的轻型结构研究组(Lightweight Structure Group)采用这种方法制造二维有序金属多孔材料^[4~6],其制造流程主要分为三步,如图 2.2 所示。第一步是原料制备,原料呈糊状,以金属氧化物为基体,并含有润滑剂、胶黏剂以及其他添加物等辅料。第二步是成形,在室温下将糊状原料挤压到一个可互换的模子,然后使之干燥。第三步是直接还原,在低于所用材料熔点的温度下,去除金属矿砂或氧化物中的结合氧,直接制成金属产品。在还原过程中,氢气与氧作用生成的水蒸气要从系统中排出,二维有序多孔材料的开口结构,使氢气和水蒸气易于排出。

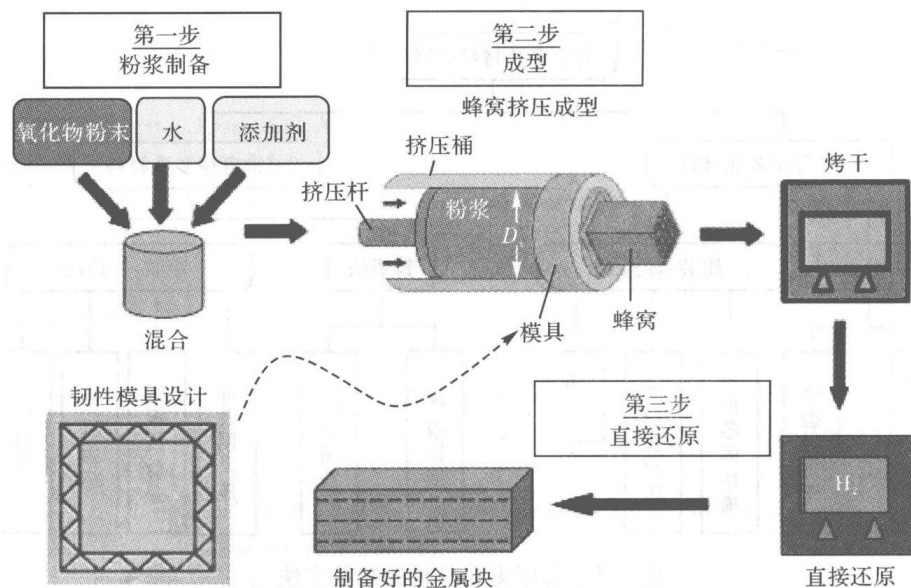


图 2.2 粉浆挤压法的主要工艺流程^[4]