

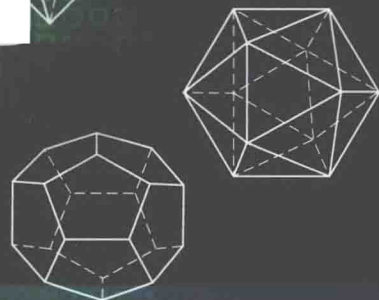
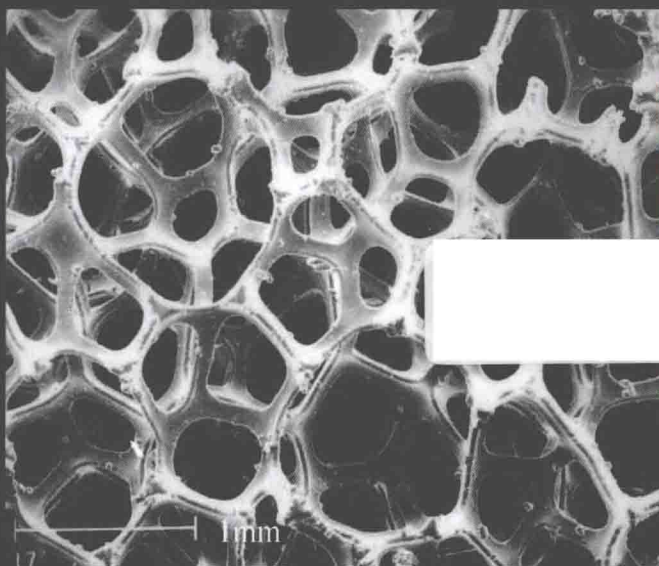


高新技术科普丛书

多孔固体材料

POROUS SOLID MATERIALS

■ 刘培生 陈国锋 编著



化学工业出版社



高新技术科普丛书

多孔固体材料

POROUS SOLID MATERIALS

■ 刘培生 陈国锋 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

多孔固体材料是近些年来得到迅速发展的一种新型功能结构工程材料，其综合性能优异，用途十分广泛，其研究、开发和应用日益受到人们的普遍重视。本书揭示多孔固体形形色色的结构形式以及自然界中丰富多彩的多孔固体形态，解析各种人造多孔固体材料的制备方法和不同用途。全书包括多孔固体结构、自然界中多孔固体、多孔金属、多孔陶瓷、泡沫塑料、多孔固体性能、多孔固体表征等章节，内容新颖、丰富、实用。

本书以多孔固体材料为内容，对其前沿技术及其各行业方面的应用进行了相应的介绍，综合了近年来最新理论和技术成果以及编者多年的技术、科研经验，能使广大读者对多孔固体材料有所领悟，并对其相关知识发生兴趣。本书可供广大材料、化工、生物、机械、建筑和医学等与多孔材料相关领域的一般读者、科研人员及工程技术人员和管理人员及相关专业在校大学生、研究生及教师阅读和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

多孔固体材料/刘培生, 陈国锋编著. —北京:
化学工业出版社, 2013. 11
(高新技术科普丛书)
ISBN 978-7-122-18535-8

I. ①多… II. ①刘…②陈… III. ①多孔性材料-
普及读物 IV. ①TB39-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 231170 号

责任编辑: 朱 彤
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 冯国庆
装帧设计: 史利平

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 北京云浩印刷有限责任公司
710mm×1000mm 1/16 印张 9 $\frac{3}{4}$ 字数 171 千字 2014 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

出版者的话

为了普及和推广高新技术，化学工业出版社自2000年以来组织出版了《高新技术科普丛书》。丛书涵盖了化学、化工、生物、材料、环境、能源、资源、先进制造、信息技术等专业领域，分四批出版，共计44个分册。有别于面向一般大众的科普图书，丛书面向科技工作者编写，知识起点更高，读者层次更专业，已构成了科普书的一个新类别。丛书已被列入“国家科普知识重点图书”，出版后广受读者好评，市场表现也非常突出。有专家评价该丛书“从理论到实践，从技术到工程化及产业化，既反映了最新成就，又充分体现了科学思想和科学精神，对开拓创新有重要作用”。

时至今日，丛书面市已逾10年。期间，化工技术有不小的应用进展，生物、材料、能源等技术领域又取得了许多重要的突破，很多新技术得以应用于生产，提供了更加优良的产品或服务。举例来说，2007年，日本科学家山中伸弥所在的研究团队通过对小鼠的实验，发现诱导人体表皮细胞使之具有胚胎干细胞活动特征的方法，此方法为治疗多种心血管绝症提供了巨大助力，他因之获得了2012年度的诺贝尔生理学或医学奖。2011年，基于中美两国的能源合作，中国国际航空公司使用现役波音747-400型客机加载由中国石油和美国UOP公司合作生产的航空生物燃料在首都国际机场执行本场验证飞行，获得圆满成功。

为此，我们紧密结合相关产业的国家“十二五”规划，遴选了一批今后有很大应用前景、对国家科技综合实力有重要影响的实用技术，请专家系统归纳整理出版，作为《高新技术科普丛书》的延续和新品，提供给从事相关领域研究的科技工作者，政府、企业的管理人员及相关专业的高校学生。

丛书介绍各类高新技术的原理、特点、重要地位、产业化现状、应用及发展前景，突出“新”及“高科技”；写作风格上力求深入浅出，图文并茂，做到知识性、科学性、通俗性、可读性及趣味性的统一；编写队伍源自国内知名的专家学者，他们均在各自领域取得了丰硕的研究成果。丛书第一批包括下列分册：

太阳电池及其应用

膜技术

新型与特种纤维

多孔固体材料

超临界流体技术及应用

RNA 干扰技术

作为出版者，我们由衷希望丛书的出版能在提升我国科学研究水平方面略尽绵薄之力，真诚祝愿我国科技事业蒸蒸日上、欣欣向荣！

化学工业出版社

2013年8月

前言

Preface

近年来，多孔固体由于其优异的性能且兼具功能和结构的双重属性，提供了工程创造的潜力，大大拓宽了其在工程领域的应用范围。

多孔材料是近些年来得到迅速发展的一种新型功能结构工程材料，其综合性能优异，用途十分广泛，可用于航空航天、能源交通、电子、通信、冶金、机械、化工、医学、环保、建筑等领域，涉及分离过滤、消声降噪、吸能减震、热量交换、电磁屏蔽、电化学过程、催化工程和生物工程等诸多方面的应用，并渗透到人们生活的方方面面。

作者本人长期在科研机构 and 高等院校从事多孔固体的制备和性能研究工作以及专业教学工作，承担科研项目多项，发表论文多篇，获得发明专利授权多项，在本领域十多年来的工作实践中积累了一定的关于多孔固体的知识，并已出版了国内多孔材料方面的几部主要著作，受到相关领域广大读者的普遍欢迎。

本书的切入点就是固体结构中奇妙的“多孔”形态，通过介绍自然界本身存在的多孔固体以及人造的不同多孔固体材料，在其中指明所有能体现出“多孔”形态结构的优越性，使广大读者对多孔固体中的孔隙效能有所领悟，并对其相关知识产生兴趣。

在本书的编写过程中，得到很多业界友好人士的大力支持和热情鼓励，在此谨表衷心感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏之处，希望读者批评指正。

编著者

2013年8月

目录

Contents

◎ 第 1 章 什么是多孔固体	001
1.1 引言	001
1.2 多孔固体的概念	001
1.3 多孔固体的类型	001
1.3.1 蜂窝体	002
1.3.2 泡沫体	002
1.3.3 天然多孔体和人造多孔体	002
1.4 多孔固体的材质	005
1.4.1 多孔金属	005
1.4.2 多孔陶瓷	008
1.4.3 泡沫塑料	009
1.5 总结	011
◎ 第 2 章 多孔固体的结构	012
2.1 引言	012
2.2 孔隙结构	012
2.3 孔隙形状	016
2.4 相对密度	020
◎ 第 3 章 天然多孔固体	023
3.1 引言	023
3.2 木材	023
3.2.1 木材的结构	023
3.2.2 木材的性能	025

3.2.3 木材的用途	027
3.3 网状骨质	029
3.3.1 网状骨质的结构	030
3.3.2 网状骨质的力学性能	032
3.4 软木	033
3.4.1 软木的结构	034
3.4.2 软木的力学性能	035
3.4.3 软木的用途	036
3.5 总结	038

◎ 第4章 多孔金属

039

4.1 引言	039
4.2 多孔金属的概念	039
4.3 多孔金属的制备	040
4.3.1 粉末冶金法	041
4.3.2 纤维烧结法	041
4.3.3 熔体发泡法	043
4.3.4 熔体吹气法	045
4.3.5 渗流铸造法	046
4.3.6 金属沉积法	046
4.3.7 中空球烧结法	048
4.3.8 定向孔隙多孔金属的制备	049
4.3.9 其他方法	053
4.4 微纳孔隙多孔金属	054
4.5 多孔金属的用途	056
4.5.1 过滤与分离	056
4.5.2 消声降噪	058
4.5.3 热量交换	061
4.5.4 多孔电极	066
4.5.5 汽车工业应用	067
4.5.6 生物医学应用	069
4.5.7 其他应用	077
4.5.8 格子结构多孔金属	081
4.5.9 多孔金属复合结构	082

4.6 总结	085
--------------	-----

◎ 第5章 多孔陶瓷

086

5.1 引言	086
5.2 多孔陶瓷的概念	086
5.3 多孔陶瓷的制备	087
5.3.1 颗粒堆积烧结法	087
5.3.2 添加造孔剂法	087
5.3.3 有机泡沫浸渍法	089
5.3.4 发泡法	090
5.3.5 溶胶-凝胶法	090
5.3.6 多孔陶瓷的新型制备工艺	091
5.3.7 蜂窝陶瓷的制备	094
5.4 多孔陶瓷的用途	094
5.4.1 过滤与分离	094
5.4.2 热功能器件	097
5.4.3 传感器件	098
5.4.4 生物材料	098
5.4.5 环境材料	099
5.4.6 化学工程应用	100
5.4.7 声音吸收	100
5.4.8 多孔陶瓷应用总体评述	101
5.5 总结	101

◎ 第6章 泡沫塑料

102

6.1 引言	102
6.2 泡沫塑料的制备	102
6.2.1 泡沫塑料的发泡原理	102
6.2.2 泡沫塑料的成型工艺	103
6.2.3 植物油基泡沫塑料	105
6.3 泡沫塑料的用途	105
6.3.1 隔热与保温	105
6.3.2 包装材料	107
6.3.3 吸声材料	109

6.3.4	分离富集	110
6.3.5	其他用途	111
6.3.6	泡沫塑料应用小结	112
6.4	功能泡沫塑料	113
6.4.1	自熄性泡沫塑料	113
6.4.2	抗静电泡沫塑料	113
6.4.3	磁性泡沫塑料	113
6.4.4	微孔泡沫塑料	113
6.5	总结	114

◎ 第7章 多孔材料性能

115

7.1	引言	115
7.2	多孔材料性能总揽	115
7.2.1	力学性能	115
7.2.2	热性能	117
7.2.3	电性能	117
7.3	泡沫金属性能图	118
7.3.1	刚度和密度	118
7.3.2	强度和密度	118
7.3.3	比刚度和比强度	120
7.3.4	热性能	120
7.4	量值关系	120
7.5	选材设计分析	122
7.5.1	材料性能分布	122
7.5.2	性能分布的公式化	123
7.5.3	多孔固体的优越指标	124

◎ 第8章 多孔材料表征

125

8.1	引言	125
8.2	多孔材料的孔率	125
8.2.1	数学表达方式	125
8.2.2	显微分析法	126
8.2.3	质量-体积计算法	126
8.2.4	浸泡介质法	127

8.3	多孔材料的孔径	128
8.3.1	显微分析法	129
8.3.2	气泡法	129
8.3.3	气体吸附法	131
8.4	压汞法测定孔隙因素	132
8.4.1	压汞法的基本原理	132
8.4.2	孔径及其分布	133
8.4.3	表观密度和孔率	134
8.4.4	压汞法的实验操作	135
8.5	多孔材料的吸声系数	135
8.5.1	吸声性能的特征	136
8.5.2	吸声系数的检测	136
8.6	多孔材料的电阻率	140
8.6.1	四电极法	140
8.6.2	双电桥法	140

第1章

什么是多孔固体

1.1 引言

说到多孔固体，我们好像比较陌生，远不像我们对金属、塑料、陶瓷这些物质那样熟悉。实际上，多孔固体普遍存在于我们的周围，并广泛出现在我们的日常生活中，起着不同的作用，发挥着重要的功能。例如我们身体里的骨骼，我们经常接触到的花草树木，其实这些都是活生生的多孔固体。自然界到处都有多孔固体，像树叶、木材、软木、海绵、珊瑚、浮石等，它们都是天然的多孔固体。看来，我们与多孔固体并没有距离，只是我们可能没有充分意识到而已。

1.2 多孔固体的概念

顾名思义，多孔固体是一种内部包含大量孔隙的固体，它们由形成孔隙的孔棱或孔壁组成相互联结的网络体，孔隙中则包含着气态或液态物质。不过，并不是所有含有孔隙的固体都能够称为多孔固体，只有其中包含的孔隙能够发挥有用功能时才属于我们所说的多孔固体。比如在固体材料使用过程中经常遇到的孔洞、裂隙等以缺陷形式存在的孔隙，这些孔隙的出现会降低材料的使用性能，因而这些固体材料就不能称为多孔固体。可见，多孔固体要具备两个要素：一是固体中包含有大量的孔隙；二是所含孔隙可以用来满足某种或某些使用性能或功能。

1.3 多孔固体的类型

不同的多孔固体不但可以有不同的相对孔隙含量（即孔隙体积分数），也可以有不同的孔隙形状和不同的孔隙排列方式。于是，出现了不同的多孔固体类型。

1.3.1 蜂窝体

在多孔固体的结构形式中，最简单的方式是多边形作二维排列，像蜜蜂的六边形巢穴那样堆积充填平面区间（图 1.1）。因此，我们形象地称这种二维多孔固体为“蜂窝体（honeycombs）”。在这种情况下，连续固体作为多边形二维排列，孔隙相应地呈柱状空间分隔存在。沿其孔隙的轴向截面切开，我们会看到多边形的密排组合形态，这些孔隙轴向截面所构成的多边形一般为三角形、四边形和六边形。

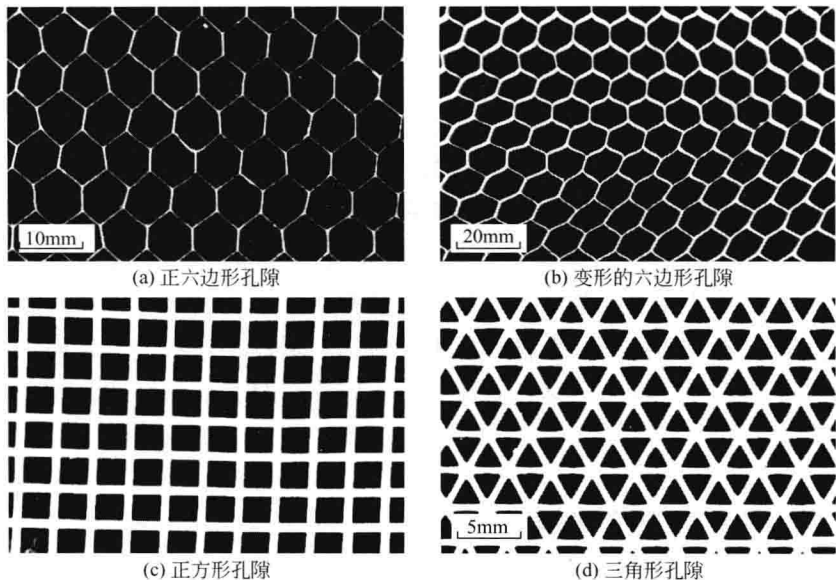


图 1.1 不同孔隙形状的蜂窝体形貌

1.3.2 泡沫体

还有一种情况更为普遍，那就是孔隙由作三维空间填充的多面体构成，我们将这样的三维多孔固体称为“泡沫体（foams）”。其中固体呈连续三维网状分布的叫做“三维网状泡沫体”（图 1.2），固体呈连续球形、椭球形或多面体壁面分布的叫做“胞状泡沫体”（图 1.3）。

1.3.3 天然多孔体和人造多孔体

多孔固体包括天然多孔固体和人造多孔材料两大类。天然多孔固体的存在十分普遍，例如动物和人类用来支撑肢体的骨骼（图 1.4）、植物用来进行光合作用的叶片（图 1.5），还有木材（图 1.6）、海绵、珊瑚（图 1.7）、浮石（图 1.8）和火山岩（图 1.9 和图 1.10）等。植物叶片和活树干中的孔隙内所含流体相都是液体，即我们所说的树液，而人造多孔材料（图 1.2 和图 1.3）

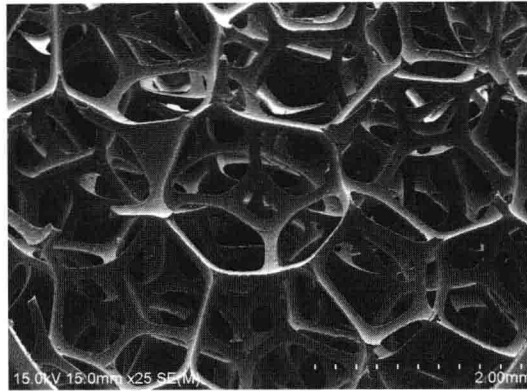


图 1.2 三维网状泡沫体形貌示例

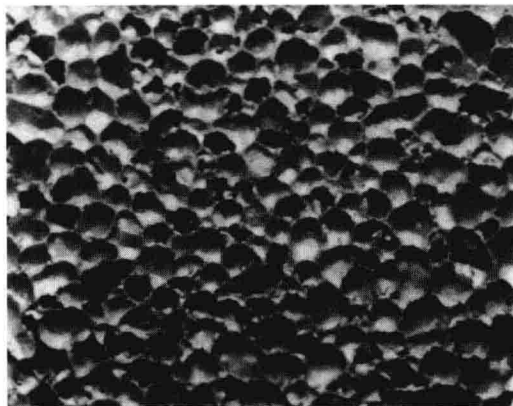
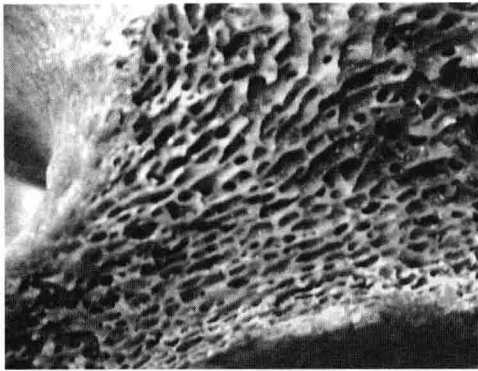


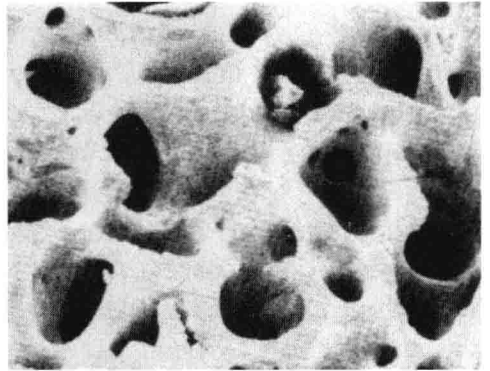
图 1.3 胞状泡沫体形貌示例

中的孔隙内所含流体相多为气体。

人类应用天然多孔固体的历史相当悠久。在埃及金字塔中已发现有至少 5000 年以前的木材制品，早在古罗马时代人们就将软木用于酒瓶塞。目前人类已经制造出各种各样的人造多孔固体，最为人们所熟悉的是聚合物泡沫材料即泡沫塑料，它们可用于许多场合，从可处理的咖啡杯到飞机座舱的冲击垫。利用现有的技术，人们不但可以制造泡沫塑料，而且还可制造出具有多孔结构的金属、陶瓷和玻璃。这些新型多孔材料在结构方面的应用不断增加，用于隔热、缓冲以及耐冲击功能的吸收系统等。这些用途开辟了多孔固体所具备性能的独特综合优势，这些性能最终都源自多孔结构。



(a) 鲸鱼骨



(b) 人体股骨

图 1.4 多孔骨质形貌示例

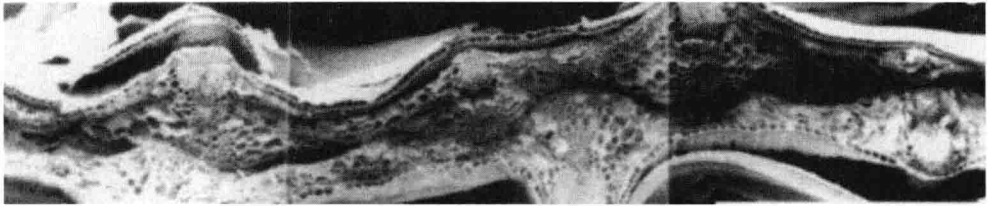
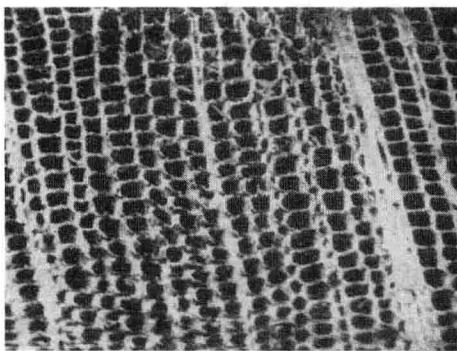
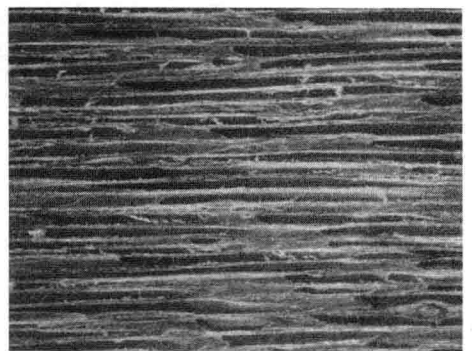


图 1.5 植物叶片多孔结构示例（鸢尾属植物叶片）



(a) 横向截面



(b) 纵向截面

图 1.6 松木中的多孔结构

对于人造的三维多孔材料，还可按材质组成的不同而再分为多孔金属、多孔陶瓷和泡沫塑料等几个类型。下面予以简单概括，由此可以获得一定的了解和认识。

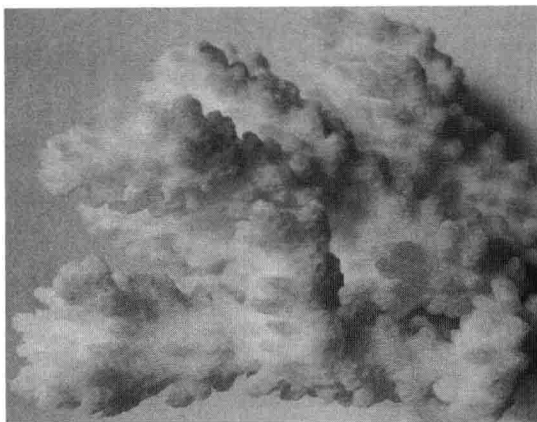


图 1.7 珊瑚多孔形貌示例

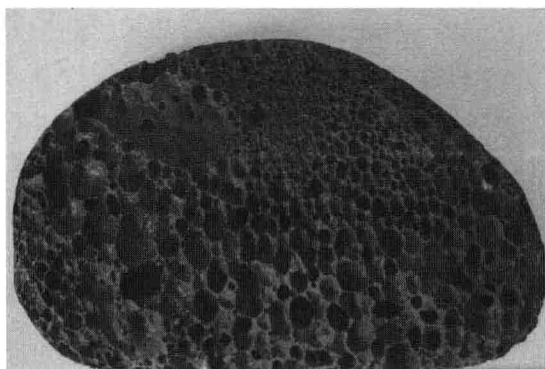


图 1.8 浮石表面多孔形貌示例

1.4 多孔固体的材质

1.4.1 多孔金属

多孔金属是一种兼具功能和结构双重属性的新型工程材料，其在近 30 年来得到了迅速发展。由于孔隙的存在而变得很轻，这种轻质材料不仅保留了金属的可焊性、导电性及延展性等金属特性，而且具备体积密度低、比表面积大、吸能减振、消声降噪、电磁屏蔽、热导率较低、通孔体可以透气透水等自身的特性。因此，其应用在不断增加，其研究是国际材料界的一个前沿热点。

早在 1909 年，国外专利就已经提到过粉末冶金多孔制件，到 20 世纪 20 年代末至 30 年代初出现了若干制取粉末冶金过滤器的专利。第二次世界大战期间，由于军事上的目的，粉末冶金多孔材料得到迅速发展。飞机、坦克上采

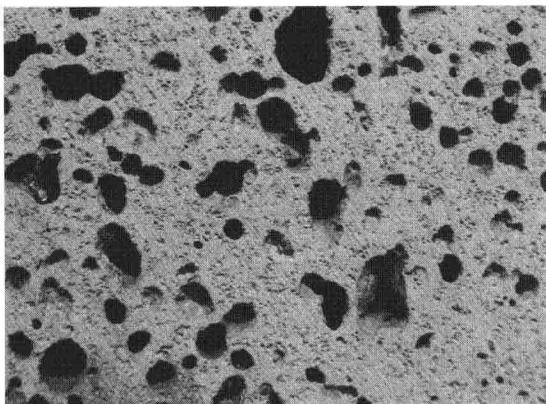


图 1.9 火山岩截面多孔形貌示例



图 1.10 火山岩制作的艺术品示例

用粉末冶金过滤器；多孔镍用于雷达开关；多孔铁代替铜作炮弹箍；铁过滤器用于灭焰喷射器等。20 世纪 50 年代利用发散冷却的方法将能够抗氧化的多孔材料用于飞机喷气发动机的燃烧室和叶片上，这样大大提高了发动机的效率。随着化工、冶金、原子能、航空与火箭技术的发展，后来人们还研制出了大批耐腐蚀、耐高温、耐高压、透气性高的粉末冶金多孔材料。到 20 世纪 60 年代又出现了钛合金、不锈钢等抗腐蚀、耐高温的粉末烧结多孔产品以及具有特殊用途的多孔钨、钼及难熔金属化合物等多孔金属材料。

缘于上述应用对已有多孔体进行改进，后来又出现了金属纤维烧结多孔材料。用金属纤维所制多孔材料，具有更高的机械强度，更好的塑性和冲击韧性，更大的容尘量，可用于许多过滤条件要求苛刻的行业，被称为“第二代多