

应用流变学丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

多孔材料与聚合物材料 流变理论及其应用

Rheological Theory of Porous Materials
and Polymeric Materials and Its Applications

刘人怀 / 主审
张俊彦 赵荣国 / 编著

湘潭大学出版社
Xiangtan University Press

应用流变学丛书
“十二五”国家重点图书出版规划项目

多孔材料与聚合物材料 流变理论及其应用

DUOKONGCAILIAO YU JUHEWUCAILIAO
LIUBIANLILUN JIQI YINGYONG

刘人怀 / 主审
张俊彦 赵荣国 / 编著

图书在版编目(CIP)数据

多孔材料与聚合物材料流变理论及其应用 / 张俊彦,
赵荣国编著. — 湘潭: 湘潭大学出版社, 2015. 12
(应用流变学丛书)
ISBN 978-7-81128-922-0

I. ①多… II. ①张…②赵… III. ①多孔性材料—
流变学—研究②高分子材料—流变学—研究 IV. ①TB39
②TB324

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015)第 319489 号

多孔材料与聚合物材料 流变理论及其应用

张俊彦 赵荣国 编著

责任编辑: 王亚兰

封面设计: 李娜

出版发行: 湘潭大学出版社

社址: 湖南省湘潭市 湘潭大学出版大楼

电话(传真): 0731-58298966 邮编: 411105

网 址: <http://xtup.xtu.edu.cn>

印 刷: 长沙超峰印刷有限公司

经 销: 湖南省新华书店

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 18.5

字 数: 417 千字

版 次: 2015 年 12 月第 1 版

印 次: 2015 年 12 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-81128-922-0

定 价: 38.00 元

(版权所有 严禁翻印)

应用流变学丛书编委会

主 任:欧进萍

副主任:张 平

委 员:(按姓氏笔画排序)

尹久仁	关新春	刘晓梅	吴云鹏
张俊彦	李之达	罗文波	修瑞娟
赵荣国	常晓年	黄宜坚	



前 言

材料是社会进步的物质基础和先导,材料工业对国民经济和国防建设起着关键的支撑作用,是各行各业的基础。新材料是高技术领域的重要组成部分,与信息、生命、能源并称为现代文明和社会发展的四大支柱。在国家重点支持发展的七大战略性新兴产业中,新材料是节能环保、新一代信息技术、高端装备制造、新能源、新能源汽车等五大产业的物质基础。材料产业自身发展和其他新兴产业发展对材料结构性能和功能性能提出的新要求,促使材料的基础理论研究和应用技术研究不断向前发展,各种新材料层出不穷,多孔材料和聚合物材料是其中的两种。

多孔材料具有低密度,独特的表面效应、体积效应,优良的力学、电、热和声学性能,为轻结构、能量吸收和热能管理提供了巨大的潜能。多孔材料各种优良性能的组合,使其应用范围远远超过性能单一的功能材料,因而多孔材料在航空、航天、化工、建材、冶金等领域具有广泛的应用前景。然而,由于多孔材料宏微观结构的多样性、多物理场以及跨尺度特性,使得围绕多孔材料开展的理论与应用研究呈现出多重复杂性,是一个多学科交叉的前沿研究领域。

相对于传统材料如水泥、玻璃、陶瓷和钢铁而言,聚合物材料是后起的材料,但其发展速度及应用的广泛性却大大超过了传统材料。20世纪六七十年代,聚合物材料以每年14%的速度增长,至20世纪七十年代中期,世界聚合物材料和钢产量的体积已经相当,至2013年,世界塑料产量的重量已达2.99亿吨。聚合物材料与钢铁、木材、水泥一起,构成现代社会中的四大基础材料,是农业、工业、能源、交通运输、信息产业乃至宇宙空间和海洋开发等国民经济领域不可或缺的主要材料。

聚合物材料性能具有时间相关的特性,因而其在载荷作用下的蠕变对结构使用寿命的影响应该在结构设计中予以考虑。在现代工程结构设计中,虽然已经越来越重视材料的蠕变特性,但是由于缺乏相应的设计标准、工艺规范和可靠的材料性能参数,特别是长期性能参数,导致有些结构在远没有达到设计寿命即先期失效。另外,聚合物材料在自然环境中的老化失效严重影响其在服役过程中的性能和寿命,使各类工程设施和设备过早受到损坏,带来巨大的经济损失。这就要求从科学试验和理论分析两个方面,加强聚合物材料长期力学性能加速表征和老化问题的基础理论研

究和应用技术研究。

本书由“多孔材料力学性能”和“聚合物材料流变理论及其应用”两篇构成。其中,第1章至第7章属于“多孔材料力学性能”篇,由张俊彦编著;第8章至第10章属于“聚合物材料流变理论及其应用”篇,由赵荣国编著。

在“多孔材料力学性能”篇中,第1章介绍多孔材料的分类、制备工艺方法以及多孔材料在各行各业中的应用。第2章基于多孔材料的微观结构,分析材料变形机理,建立蜂窝材料相对密度统一公式,应用细观力学方法求多孔材料的等效弹性模量,探讨多孔材料代表性体积单元各向异性和相对密度对材料力学性能的影响。第3章针对泡沫镍和泡沫陶瓷两类多孔材料开展试验研究,考察多孔材料力学性能的各向异性、温度相依性和应变率相依性,并考察相对密度对泡沫镍材料力学性能的影响。第4章建立二维蜂窝材料的格构模型,推导控制方程的一般表达式,应用 Timoshenko 梁理论,建立适用于大规模二维格构计算的离散模型。第5章介绍多孔材料的破坏理论。对于闭孔材料,将代表单元抽象为含裂纹的球壳模型,并根据 Reissner 型壳体理论,基于壳体裂纹尖端场一般级数解求其相应的应力强度因子;对于蜂窝材料,比较正六边形、正四边形和正三角形等各种形状胞元的断裂韧度,考察胞元形状与断裂韧度的关系;对于开孔泡沫,基于量纲分析方法,推导泡沫材料的破坏极限和断裂韧度表达式,并应用细观断裂模型模拟纳米多孔材料的断裂,给出裂纹扩展条件。第6章建立含缺陷多孔材料理论模型,分别进行含胞壁弯曲缺陷和含胞壁缺省缺陷的多孔材料有限元数值仿真研究,探讨缺陷对多孔材料力学性能的影响规律。第7章分析泡沫材料的吸能机理,介绍 J 因子、C 因子、Rusch 曲线和吸能图等几种表征材料吸能性能的方法,基于分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)试验,考察不同密度开孔与闭孔泡沫铝的动态压缩力学性能,并与准静态压缩力学性能进行比较研究。

在“聚合物材料流变理论及其应用”篇中,第8章介绍线黏弹性流变模型的电学模拟,根据流变模型系统和电学模型系统数学微分方程的相似性,通过电学模型参数与流变模型参数的类比,推导各种线黏弹性流变模型的本构方程。第9章在概述非线性黏弹性本构理论的基础上,重点介绍物理非线性黏弹性中的弹性回复对应原理,并应用弹性回复对应原理,预测不同应变率条件下聚合物材料的单轴拉伸应力响应、等幅循环应变条件下的现时应力响应以及等幅循环应力条件下的现时应变响应。第10章探讨流变时钟本构模型在聚合物材料长期力学性能加速表征和物理老化研究中的应用。首先介绍时间-温度等效原理,并应用时间-温度移位因子,构建聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料的蠕变性能主曲线。然后,介绍时间-温度-应力等效原理和时间-应力等效原理,分别应用这两个原理,对 PMMA 材料和聚丙烯(PP)材料的长期力

学性能进行加速表征。最后,介绍时间-老化时间移位原理,考察老化温度和老化时间对 PMMA 材料蠕变性能的影响,并应用时间-老化时间移位因子构建主曲线,预估参考老化时间和热力学状态条件下 PMMA 材料的长期力学性能。

本书多孔材料内容主要来源于作者 2000 年以来的相关研究成果和国内外相关文献。清华大学杨卫院士、湖南大学傅衣铭教授、湘潭大学张平教授提出了许多宝贵建议,湘潭大学郭小刚教授、尹久仁教授、肖映雄教授、邓旭辉副教授、冯剑军副教授、陈锐林副教授以及研究生甘秋兰、康颖安、熊志远、毛快、伍林、于维学等参加了部分研究或做了部分工作。

在聚合物材料流变理论及其应用研究中,1998 年张淳源教授提出“弹性回复对应原理”,此后该原理得到发展和应用;1999 年张为民教授发表“松弛模量与蠕变柔量的实用表达式”学术论文;2001 年罗文波教授提出“时间-温度-应力等效原理”的一种表述形式,并获得广泛应用。上述这些资料的出处,均附于本书各章“参考文献”中。莎士比亚说:“凡是过去,皆为序曲。”书中引用了许多黏弹性理论与应用研究领域的经典文献,可以说没有这些前期研究工作的积累,此书是不可能写成的,作者对这些研究者先驱性的创新研究成果表示由衷的感谢。特别感谢湘潭大学张淳源教授,中国工程物理研究院陈忠富研究员、徐友钜研究员、胡绍全研究员和青岛科技大学吴其晔教授。张淳源教授引领作者进入流变学研究的瑰丽殿堂,陈忠富研究员指导作者结合科学与工程思维解决工程实际问题,吴其晔教授与作者共同分享其在“软物质流变学”和“高分子结构流变学”两个领域的研究成果,作者从他们的著作中受益良多。此外,陈朝中、罗希挺、李秀娟、李红超、李俊斐、李微、李其棒、刘亚风、言怡、蔡鹏、陈悦、罗仁等研究生与作者展开了有益的合作研究。

本书系《应用流变学丛书》中的分册,丛书于 2011 年入选“十二五”国家重点图书出版规划项目,欧进萍院士担任丛书的项目负责人和编委会主任。为了丛书能够顺利出版,欧进萍院士从百忙之中抽出时间,多次亲临湘潭大学出版社,进行现场办公,确定编委会名单、交稿期限以及图书装帧设计、版式设计等出版事项,与各分册主编研讨丛书分册书名、主要内容、章节结构,提出各分册图书的主要编写要求和修改意见,付出了艰辛的劳动。暨南大学刘人怀院士拨冗仔细审阅本书全文,并提出了许多宝贵的修改意见,使本书蓬荜生辉,增色不少。借此机会,向两位院士的辛勤工作表示诚挚的感谢。

本书中融入的一些主要研究成果,得到国家自然科学基金项目(19772044、19772045、10372087、10572123、10772156、11172256、51375416),教育部科学技术重点项目(209085),湖南省自然科学基金项目(05JJ30014),湖南省教育厅项目(08A069、

14A144、11B125、05C100),湘潭大学研究生教育创新工程项目(4301/0196)等的资助。在此,对国家自然科学基金委员会、教育部、湖南省自然科学基金委员会、湖南省教育厅和湘潭大学研究生院给予的支持表示感谢。

本书的出版得到湘潭大学出版社的支持,在此深表感谢。

“嚶其鸣矣,求其友声。”由于作者水平有限,书中若有不妥之处,敬请读者批评指正。

张俊彦 赵荣国

2015年12月15日于湘潭大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 多孔材料的分类	2
1.1.1 粉末烧结型	2
1.1.2 纤维烧结型	3
1.1.3 铸造型	4
1.1.4 沉积型	4
1.1.5 复合型	4
1.2 历史与现状	4
1.3 力学研究	5
1.4 制备与工艺	6
1.5 性能与应用	9
1.5.1 在化学工业中的应用	9
1.5.2 在电池行业中的应用	9
1.5.3 在汽车工业中的应用	9
1.5.4 在建筑工程中的应用	10
1.5.5 在医学中的应用	10
1.5.6 在环保中的应用	10
1.5.7 在军工中的应用	11
1.5.8 其他用途	12
本章主要参考文献	13
第 2 章 多孔材料的结构与性能	17
2.1 微观结构	17
2.2 变形机理	20
2.3 相对密度	22
2.4 力学性能	25
2.4.1 等效弹性模量	25
2.4.2 各向异性	27
2.4.3 相对密度的影响	33

本章主要参考文献	36
第 3 章 多孔材料的实验研究	38
3.1 泡沫镍的实验研究	38
3.1.1 材料及所用设备	38
3.1.2 单轴拉伸	39
3.1.3 各向异性实验	41
3.1.4 单轴压缩	42
3.1.5 温度相依	42
3.1.6 应变率相依	47
3.1.7 相对密度的影响	48
3.2 泡沫陶瓷的实验研究	49
3.2.1 材料及实验方法	49
3.2.2 实验结果和分析	50
本章主要参考文献	54
第 4 章 多孔材料的格构模型	57
4.1 格构模型	57
4.1.1 概述	57
4.1.2 代表单元的变形能、变形比能	59
4.1.3 本构关系	59
4.1.4 几种特例	60
4.2 离散模型	61
4.2.1 单元模型	61
4.2.2 米字型结构	62
4.2.3 特例	65
4.2.4 算例	68
4.2.5 结果讨论	71
本章主要参考文献	72
第 5 章 多孔材料的破坏	73
5.1 闭孔多孔材料的断裂	73
5.1.1 Reissner 型球壳的基本方程	75
5.1.2 基本方程的简化	77
5.1.3 极坐标下的基本方程	78

5.1.4 裂纹尖端场	79
5.1.5 应力强度因子	82
5.2 开孔多孔材料的断裂	82
5.3 多孔材料的细观断裂模型	86
本章主要参考文献	89
第 6 章 缺陷对多孔材料性能的影响	90
6.1 胞壁弯曲的影响	91
6.2 胞壁缺省的影响	95
6.3 计算机模拟	97
6.3.1 胞壁弯曲的模拟	97
6.3.2 胞壁缺省的模拟	99
本章主要参考文献	113
第 7 章 多孔材料的能量吸收	115
7.1 吸能机理	116
7.1.1 开孔泡沫平台期吸能	116
7.1.2 开孔泡沫的黏性耗散	117
7.1.3 闭孔泡沫中的流体压缩	117
7.2 吸能模型	117
7.2.1 Janssen 因子法	117
7.2.2 Cushion 因子法	118
7.2.3 Rusch 曲线法	118
7.2.4 能量吸收图	118
7.3 泡沫铝的高速冲击实验	120
7.3.1 SHPB 的实验原理	120
7.3.2 动态压缩实验	123
7.3.3 相对密度对泡沫铝动态压缩力学性能的影响	125
7.3.4 应变率对泡沫铝动态压缩力学性能的影响	126
7.3.5 变形机理	127
7.3.6 相对密度对泡沫铝吸能性能的影响	129
7.3.7 相对密度对泡沫铝吸能效率的影响	130
本章主要参考文献	132

第 8 章 线黏弹性流变模型电学模拟	133
8.1 流变模型理论基本元件	134
8.1.1 弹簧与电容	134
8.1.2 黏壶与电阻	135
8.2 二元流变模型及其电学模拟	136
8.2.1 Kelvin 体与延迟弹性	136
8.2.2 Maxwell 体与应力松弛	139
8.3 多元流变模型及其电学模拟	143
8.3.1 标准线性体	143
8.3.2 Burgers 体	147
8.3.3 广义 Kelvin 体与延迟谱	151
8.3.4 广义 Maxwell 体与松弛谱	155
本章主要参考文献	159
第 9 章 弹性回复对应原理及其应用	161
9.1 非线性黏弹性本构理论	161
9.1.1 本构理论中的变形描述	161
9.1.2 多重积分型本构关系	164
9.1.3 单积分型本构关系	165
9.1.4 单积分型本构关系比较	169
9.1.5 非线性黏弹性本构关系的其他形式	170
9.2 弹性回复对应原理	171
9.2.1 简化三维非线性黏弹性本构关系	172
9.2.2 线黏弹性与线弹性本构关系对应性	176
9.2.3 非线性黏弹性与非线性弹性本构关系对应性	177
9.3 蠕变柔量与松弛模量表达式	180
9.3.1 标准线性体蠕变柔量与松弛模量	181
9.3.2 Rabotnov 体蠕变核	183
9.3.3 蠕变柔量与松弛模量的实用表达式	185
9.4 聚丙烯材料非线性黏弹性性能实验	187
9.4.1 试样与实验条件	187
9.4.2 单轴拉伸破坏实验	187
9.4.3 不同应变率条件下的单轴拉伸实验	188
9.4.4 应力松弛和蠕变实验	188
9.4.5 等幅循环应变实验	189
9.4.6 等幅循环应力实验	190



第 1 章 绪 论

材料是社会进步的物质基础和先导,材料工业对国民经济和国防建设的发展起着关键的支撑作用,是各行各业的基础。可以说,没有先进的材料,就没有先进的工业、农业和科学技术。因此,历史学家将材料作为文明社会进化的标志,把历史划分为石器时代、陶器时代、青铜器时代、铁器时代。从世界科技发展史看,重大的技术革新往往起始于材料的革新。反过来,近代新技术的发展又促进了新材料的研制。新材料是高技术的重要组成部分,与信息、生命、能源并称为现代文明社会发展的四大支柱,因此,新材料技术和产业的发展将会有力地推动和促进我国基础产业、支柱产业以及其他高技术的发展。目前涌现出各种各样的新材料,多孔材料便是其中一种。

由于多孔材料具有密度低,独特的表面效应、体积效应,优良的力学、电、热和声学性能,为轻结构、能量吸收和热能管理提供了巨大的潜能。上述性能的组合使其应用范围远远超过单一功能型材料,在航空航天、化工、建材、冶金等领域具有广泛的应用前景。由于问题的复杂性、材料的多样性,多孔材料又是一个多学科交叉的前沿研究领域,备受理论界和工程界的关注和重视。

20 世纪 90 年代至今,多孔材料已成为研究热点,不少国际知名研究机构把它作为 21 世纪新材料研究的一个专门热点。例如,美国陆军研究办公室将泡沫金属等多孔材料列为 21 世纪材料研究的新趋势之一,美国宇航局(NASA)也积极展开相关研究^[1]。第 20 届国际理论与应用力学联合大会就列出了多个多孔材料专题分会^[2],近几年多孔材料方面的研究论文也以极快的速度增长。

在多孔材料研究领域里,影响最大的是国际著名材料学家、美国麻省理工学院材料科学与工程系 Gibson 教授和英国剑桥大学工程系 Ashby 教授。他们的研究始于 20 世纪 80 年代^[3,4],其成果有:计算六边形蜂窝材料在互相垂直的两个方向加载时的弹模和泊松比,确定弹性弯曲变形和塑性屈服机理,导出屈服应力表达式,得出三维多孔材料的弹模、屈服强度的表达式等。1987 年,他们出版了专著《Cellular solids: structure and properties》,对前人的研究进行了系统的概括和总结。十年后,该书加入了新的研究成果,由剑桥大学出版社出了第二版^[5],影响很大,引用频率非常高,堪称此领域的经典之作。2000 年,他们又出版了《Metal Foams, A Design Guide》^[6]。

从 20 世纪 90 年代,一些国际著名力学家开始介入此领域的研究,如美国斯坦福大学航空航天系 Christensen^[7~11],哈佛大学 Hutchinson^[6,12~15],波兰科学院 Kowalski^[16~24]等。

本章介绍多孔材料(以多孔金属材料为主)的分类、研究历史与现状、材料制备、工艺和应用。

1.1 多孔材料的分类

含一定数量孔洞的固体叫多孔材料,它是一种由相互贯通或封闭的孔洞构成的网络结构的材料,孔洞的边界或表面由支柱或平板构成。典型的孔结构大致包括两种:一种是由大量多边形孔在平面上聚集形成的二维结构,由于其形状类似于蜂房的六边形结构而被称为“蜂窝”材料;更为普遍的是由大量多面体形状的孔洞在空间聚集形成的三维结构,通常称之为“泡沫”材料。有的文献把 45%~90% 内孔隙率的材料叫多孔材料,大于 90% 的叫泡沫材料;而从大量的国内外文献来看,称为泡沫材料的孔隙率并未大于 90%,如熟知的泡沫铝,其孔隙率往往低于 80%;有的文献把 40%~98% 内孔隙率的材料叫泡沫材料;还有的文献则认为,由于该材料最初采用发泡法制备,故称之为发泡材料,以后发明的渗流等制备法,称之为通气性材料,更合适的名称应为多孔泡沫材料,简称多孔材料或泡沫材料。总之,目前没有一个统一、严格、公认的定义。多数学者将多孔材料和泡沫材料视为等同概念,本书也是如此。

如果构成孔洞的固体只存在于孔洞的边界(孔洞之间是相通的),则称为开孔;如果孔洞表面也是封闭的,即每个孔洞与周围孔洞完全隔开,则称为闭孔。而有些孔洞则是半开孔半闭孔的。有两种情况,一种是同时研究多孔固体和其中的流体(液体、气体),要考虑多相物(主要是流固)耦合,一般用混合物理论^[25,26],以及在其基础上发展起来的多孔介质理论^[27,28]。从已有的文献看,这样的多孔材料通常叫多孔介质(Porous Media),如饱和土壤。另一种是不考虑孔中的流体,把材料看作单相固体,采用连续介质力学理论来研究,此时叫作多孔材料。本书的研究属后者。多孔材料有天然和人造两种,从材质可分为金属(图 1-1)和非金属(图 1-2),我们主要讨论人造多孔金属材料。以下介绍多孔金属材料的主要类型和特点^[29]。

1.1.1 粉末烧结型

该类材料是发展较早的一种,孔径大都小于 0.3 mm,孔隙率一般不高于 30%,也可通过特殊的工艺制成孔隙率远大于 30% 的产品。一般的有机、陶瓷和玻璃等多孔体难以同时满足强度、塑性、高温等使用条件,粉末冶金多孔金属在一定程度上弥补了以上材料的不足,从而得到迅速发展。

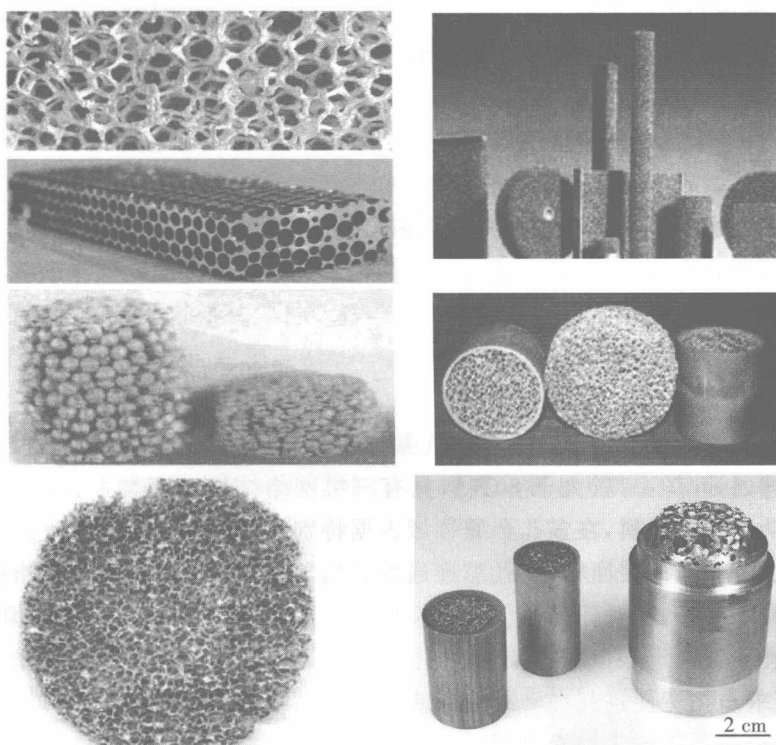


图 1-1 多孔金属

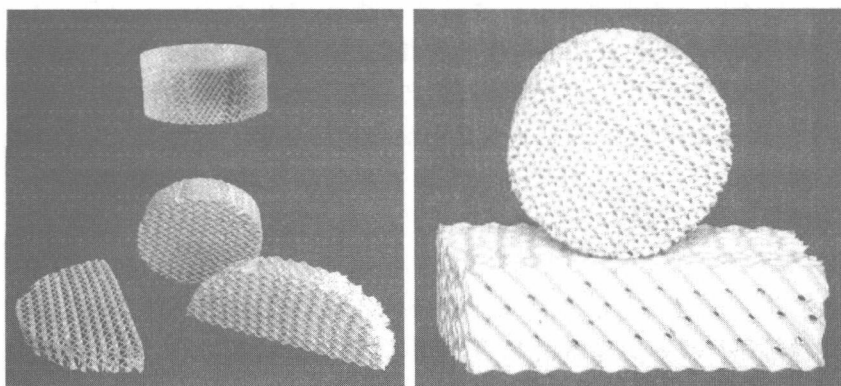


图 1-2 多孔陶瓷

1.1.2 纤维烧结型

此类材料是粉末烧结型材料的改进。一般来说,用金属纤维制取的多孔材料,其性能优于用金属粉末制取的多孔材料,如用直径与金属粉末粒度相同的金属纤维制取的过滤

材料,其渗透性比粉末制取的高十几倍,还具有较高的强度、抗腐蚀性和热稳定性,孔隙率可达 90% 以上,且全部为贯通孔,塑性和冲击韧性好,容尘量大,多用于过滤条件苛刻的行业,被称为第二代多孔金属过滤材料。

1.1.3 铸造型

该类材料由熔融金属或合金冷却凝固形成,随铸造方式不同可覆盖较宽的孔隙范围,以及具备各种形状的孔隙,其典型代表是泡沫铝。产品大多为闭孔或半闭孔,也可铸成三维连通孔的高孔隙率产品。

1.1.4 沉积型

该类材料系由原子态金属在有机多孔基体表面沉积后,去除有机体烧结而成。主要特点是孔隙连通,孔隙率高(大于 80%),具有三维网络结构。这类多孔材料是一种性能优异的新型功能结构材料,在多孔金属领域占据特别重要的地位。从某种意义上说,它以低密度、高孔隙率、高比表面积、高孔隙连通性和均匀性等人们期望的综合指标,将多孔金属材料带入巅峰状态,这对任何其他多孔金属产品来说都是望尘莫及的。但它的特性也决定其强度会受到一定限制。这类多孔材料在 20 世纪 70 年代就已开始批量制造与应用,应用的需求与拓宽促进其在 20 世纪 80 年代得到迅速发展,目前国内外均大规模批量生产,其典型产品是泡沫镍和泡沫铜。

1.1.5 复合型

该类材料由不同金属或金属与非金属复合制成,如在石墨毡上电镀一层镍,制成石墨-镍复合多孔材料;也可由多孔金属作芯层,制成叠合金属复合多孔体,如用不锈钢纤维毡与丝网复合制作的复网毡。通过复合,使产品兼备不同材料的优点,并使综合基础提高,从而产生一种全新的性能,更好地满足产品的使用要求。

1.2 历史与现状

人们对多孔材料的结构、制备做过大量研究,最早可追溯到 1660 年,Robert Hooke 对天然多孔材料——软木的显微镜观察,第一次发现了软木的多孔结构,从而确定了植物、生物结构的基本单元。他首次称这种基本单元为细胞(cell),随后(1664 年)在出版的《Micrographia》一书中,Hooke 详细记录了观察结果,绘出了观察到的多孔图形。

20 世纪 50 年代人们就已掌握生产金属泡沫的方法,但因为当时难以控制生产过程及生产成本太高而一直没有得到推广应用。到了 20 世纪 80 年代,由于制造技术的突飞猛进,生产成本的大幅下降,金属泡沫的生产逐渐受到重视,并在消声、减振、分离工程、催化载体、屏蔽防护、吸能缓冲等一些高技术领域获得了广泛应用^[30~31]。

目前,国际上以日本 Amagasaki 公司的 ALPORAS 泡沫金属最为著名,20 世纪 90