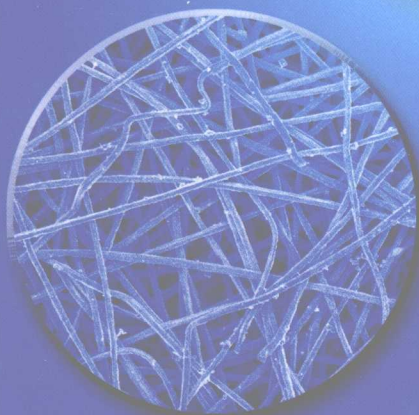


烧结金属多孔材料

奚正平 汤慧萍 等 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

烧结金属多孔材料

奚正平 汤慧萍 等编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2009

内 容 提 要

本书以金属多孔材料的新理论、新技术和新材料为主线,介绍了金属多孔材料基本理论、制备技术、性能表征、功能特性和应用技术。全书共分6章,第1章引入孔形系数与弯曲因子等最新概念,阐述金属多孔材料的孔结构原理、功能特性和孔结构的分形分析;第2章系统论述了金属多孔材料的性能检测方法和原理;第3章论述了烧结金属多孔材料的制备原理与新技术、新材料及应用情况;第4、5两章为烧结金属纤维与丝网复合材料的制备原理与应用技术;第6章论述了烧结金属多孔膜的制备技术与梯度孔结构的形成原理和特殊应用。本书对孔结构特性进行了深入的阐述,为研究孔和材料使用环境的交互作用提供了必要的理论基础。系统阐述了由于孔的存在而表现出的功能特性和相关的金属多孔材料制备理论,为金属多孔材料研制与应用提供了重要的理论支持。突出了研究金属多孔材料应用理论的学科交叉特点。

本书可供从事金属材料研究的工程技术人员阅读,也可作为高等院校金属材料专业的本科生和研究生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

烧结金属多孔材料/奚正平等编著. —北京:冶金工业出版社, 2009. 1

ISBN 978-7-5024-4565-2

I. 烧… II. 奚… III. 烧结—多孔性材料:金属材料
IV. TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 153997 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 张熙莹 美术编辑 张媛媛 版式设计 葛新霞

责任校对 侯 璐 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4565-2

北京盛通印刷股份有限公司印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销
2009 年 1 月第 1 版, 2009 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 22.5 印张; 540 千字; 344 页; 1-3000 册

65.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

序

多孔材料广泛存在于各种生物体中，如动物的骨骼、昆虫的翅膀、树木的躯干等，其中许多奥秘还有待去探索。多孔材料在科学技术与工业界已得到普遍应用，形成了材料科学中的一个重要分支。金属多孔材料是最重要的一类多孔材料，它不但具有全面的特性，还具有因多孔结构而引发的一系列特殊性能，如高比强度和高比刚度（超轻）、高阻尼（消声、减震）、隔热（低热导）等。

金属多孔材料在环保及宇航等领域中发挥着极其重要的作用。如宇航部门中的超轻结构件、发散面板、消冰消声装置、发汗冷却部件；能源部门中的各类电极；煤化工用的通气锥；核燃料与废料的净化装置；环保部门中高效低污染的表面燃烧、高温烟尘与汽车尾气净化等。与金属多孔材料大规模广泛应用形成鲜明对比的是，对这种材料的基础研究深入不够。多孔材料科学工作者任重道远，必须锲而不舍地不断探索。

《烧结金属多孔材料》一书的主编奚正平教授在金属多孔材料的学科领域颇有建树，曾两度获得该领域国家科技进步二等奖。作者所在的西北有色金属研究院是“金属多孔材料国家重点实验室”的依托单位，是国内金属多孔材料门类最全、规模最大、集研究与生产开发于一体的研究院所，从事金属多孔材料的研究与开发已有四十余年，为我国国民经济建设和国防现代化做出了重要贡献。本书综合了该院多年来的研究成果和国内外最新发展状况，全面介绍了金属多孔材料的孔结构特征、表征方法及应用功能，介绍了金属粉末、金属纤维、金属丝网和金属膜多孔材料的最新发展。本书全面分析和阐述了多孔材料的理论、生产实践以及在工业上的应用，这对从事多孔材料研究与开发的科技工作者有重要参考价值，也可作为相关研究生的重要读物。本书的出版，不但对金属多孔材料的理论探索和应用研究等方面有所发现、有所发明、有所创造有促进作用，而且对陶瓷多孔材料的研究与开发也有所启迪。

师昌绪

2008年3月

前 言

多孔材料是材料学科中的一个重要分支，金属多孔材料又是最重要的一类多孔材料。它不仅具有金属的特性，而且有着因各类孔的存在而引发的一系列特殊功能，在国民经济中获得了广泛的应用，特别是在能源、环保及宇航等领域发挥着及其重要的作用。然而，与这类材料获得大规模应用形成鲜明对比的是，对这类材料的基础研究远远未深入，更没有系统的理论著作。西北有色金属研究院研究开发多孔材料已有四十多年历史，承担了数十项国家重大课题研究，获得了多项国家级科技成果奖。1978年宝鸡有色金属研究所（西北有色金属研究院的前身）编著出版了当时国内唯一的一部金属多孔材料专著——《粉末冶金多孔材料》，内容仅限于烧结金属粉末多孔材料，没有包括以后大量发展的泡沫金属、金属纤维、金属丝网及梯度孔结构的金属膜等材料，对性能与检测也只做了一般介绍，更没有孔结构的理论论述。该书问世以来已有三十多年了，这些年来金属多孔材料飞速发展，新材料、新理论、新工艺不断涌现，应用领域不断开拓，已成为举世瞩目的一类先进材料，更是能源、环保、石化、冶金、医疗、宇航、酿造等领域不可缺少的重要材料。为了适应金属多孔材料的发展，满足使用部门的需求，我们综合自己多年来的研究成果和国内外的最新发展状况编著了本书。本书重点介绍了金属多孔材料领域的新理论、新发展、新动向，希望能对金属多孔材料的科技工作者和使用部门激发新思想，开拓新思路有所帮助。

本书以金属多孔材料的新理论、新技术和新材料为主线，全面论述了金属多孔材料基本理论、材料制备技术、性能表征与功能特性的基本原理和应用。本书共分6章。第1章引入“孔形系数”与“弯曲因子”等最新概念，阐述金属多孔材料的孔结构原理、功能特性、物理和力学性能，并简要介绍了孔结构的分形分析；第2章系统论述了金属多孔材料的性能检测方法，包括材料孔隙度、比表面积、孔径和孔径分布、流体渗透性、过滤性能、力学性能及物理化学性能的各种检测原理与方法，着重叙述最新方法和原理；第3章论述了烧结金属多孔材料的制备技术、新材料及应用情况，包括离心沉积、注射成形、三维打印、激光与电子束快速成形等新技术和泡沫金属、空心球等新材料；第4章为烧结金属纤维多孔材料，论述了金属纤维的制取方法与原理，金属纤维多孔材料的制备、性能与应用；第5章论述了烧结金属丝网复合材料的制备、原理与应用技术；第6章论述了烧结金属多孔膜的制备技术与梯度孔结构的形

成原理,介绍了多孔金属膜的特殊应用。针对金属多孔材料所表现的功能特性,本书详细阐述了金属多孔材料的流体透过、毛细渗透、能量吸收、传质传热、消声、阻燃等方面的性能,突出了金属多孔材料应用理论的学科交叉特点。

本书内容广泛,既包括宏观孔结构,也包括具有纳米尺度的介孔结构;既有无序孔结构,也有有序孔结构和梯度孔结构;突出了新技术和新材料并力求全面介绍不同时期出现的理论和各类公式以便读者比较;引入“形状系数”和“弯曲因子”等最新理念,更接近于无序孔结构的真实状况;将分形理论引入孔结构的分析,更丰富了孔结构的表征理论;并针对能源与环保等领域的重大需求,将金属多孔材料的现代理论与应用技术紧密结合,阐述了材料的功能特性,突出了理论与实践的结合;书中介绍了有序孔结构、梯度结构和纳米孔结构材料,拓宽了金属多孔材料的应用领域;将流体动力成形、振动成形和快速成形原理和技术应用于多孔材料,丰富了金属多孔材料的制备技术。在结构体系方面,孔结构基本理论和性能检测方法分别独立分章编写,材料部分则按原料来源分类分章编写,将材料制备、性能与应用合为一体,既照顾了学科的系统性,又可便于读者查阅。

在多孔材料愈来愈受到材料研究工作者重视的今天,烧结金属多孔材料作为多孔材料的重要组成部分必然会成为未来的研究热点。国内从事金属多孔材料研究与生产的单位已有百余家,希望本书能为金属多孔材料的科研工作者、工程技术人员以及高等院校相关专业的师生提供重要参考文献,正如师昌绪院士所指出:“在金属多孔材料的理论探索和应用研究方面有所发现,有所创造,促进我国金属多孔材料的发展,而且对陶瓷多孔材料的研究与开发有所启迪”。

奚正平教授主持了全书的编写并编写了主要章节,参加本书编写的还有汤慧萍、张健、董领峰、王建永、汪强兵、朱纪磊等。

限于作者的水平,有疏漏之处,请广大读者批评指正。

作 者

2008年3月于西安

目 录

1 烧结金属多孔材料的孔结构及特性	1
1.1 孔与孔隙度	1
1.2 孔结构	3
1.2.1 烧结金属多孔材料中孔的构成	3
1.2.2 孔的形状	5
1.2.3 孔弯曲与粗糙度	6
1.2.4 孔的比表面积	9
1.2.5 孔径与孔径分布	10
1.2.6 有序孔结构	13
1.2.7 梯度孔结构	16
1.2.8 原始粉末对烧结金属粉末多孔材料孔结构的影响	18
1.3 流体力学性能	19
1.3.1 流体流经多孔体的流动状态	19
1.3.2 流体透过烧结金属多孔材料的基本公式	21
1.3.3 渗透系数与孔结构的关系	23
1.3.4 金属泡沫材料的渗透系数	26
1.3.5 多相流透过多孔体时的渗透系数	28
1.3.6 烧结金属粉末与纤维多孔材料渗透性能比较	28
1.4 过滤性能	30
1.4.1 过滤机理	30
1.4.2 过滤效率与精度	33
1.4.3 粉尘泄漏率	35
1.4.4 容尘量	37
1.4.5 流体阻力及流体在过滤方向上的压力损失分布	38
1.5 液体对多孔材料的毛细浸透	44
1.5.1 毛细压力与液体渗透高度	44
1.5.2 吸附的影响	44
1.5.3 孔形状的影响	45
1.5.4 毛细压力与孔结构特性参数的关系	48
1.5.5 液体对真实多孔体的浸渍速度与高度	48
1.5.6 烧结金属多孔材料的毛细管效率	49
1.6 力学性能	52

1.6.1	力学性能与孔隙度的关系	52
1.6.2	孔形、孔径对多孔材料力学性能的影响	54
1.6.3	烧结多孔材料的应力-应变关系	55
1.6.4	烧结金属纤维多孔材料的强度	56
1.6.5	烧结金属泡沫材料的力学性能	58
1.6.6	烧结金属复合丝网的强度	61
1.6.7	能量吸收性能	62
1.7	物理性能	66
1.7.1	热电性能	66
1.7.2	吸声性能	86
1.8	孔结构分形分析	89
1.8.1	分形理论简介	89
1.8.2	多孔材料孔结构分形表征	90
1.8.3	多孔材料渗透系数分形分析	93
	参考文献	95
2	烧结金属多孔材料性能检测	103
2.1	密度、孔隙度、开孔率的测定	103
2.1.1	直接测量计算法	103
2.1.2	流体静力学法	103
2.1.3	简化流体静力学法	105
2.1.4	显微镜分析法	106
2.1.5	漂浮法	107
2.2	比表面积	107
2.2.1	B. E. T 法	108
2.2.2	汞压法	109
2.2.3	透过法	111
2.2.4	小角度 X 射线散射法	112
2.3	流体渗透性	114
2.3.1	渗透系数	114
2.3.2	相对透气系数	120
2.3.3	相对渗透系数	122
2.3.4	流量-压差曲线	124
2.4	孔径与孔径分布	125
2.4.1	显微镜观测法	125
2.4.2	扫描电镜照相-计算机图像分析法	128
2.4.3	X 射线小角度散射	128
2.4.4	气泡法	129
2.4.5	液体置换法	135

2.4.6 汞压法	136
2.4.7 气体吸附法	137
2.4.8 透过法	138
2.4.9 气体扩散法	139
2.4.10 过滤法	140
2.4.11 探针分子法	141
2.4.12 量热测孔法	142
2.5 过滤性能的测定	143
2.5.1 液体过滤性能	144
2.5.2 气体过滤效率	154
2.5.3 纳污量	155
2.5.4 再生性能	155
2.6 力学性能	157
2.6.1 耐压强度	157
2.6.2 疲劳性能	158
2.6.3 剪切强度	159
2.6.4 拉伸强度	159
2.6.5 环拉强度	160
2.6.6 焊接强度	160
2.7 多孔材料的导热性能	161
2.8 多孔材料的吸声性能	163
2.8.1 混响室法	163
2.8.2 驻波管法	164
2.8.3 倒频谱分析法	164
2.9 耐腐蚀性能	165
参考文献	165
3 烧结金属粉末多孔材料	167
3.1 概述	167
3.2 烧结金属粉末多孔材料的传统制备方法	168
3.2.1 模压成形与烧结	169
3.2.2 等静压成形	170
3.2.3 松装烧结	170
3.2.4 粉末轧制	171
3.2.5 粉末增塑挤压	171
3.3 烧结金属粉末多孔材料的新型制备技术	172
3.3.1 离心沉积技术	172
3.3.2 注射成形技术	172
3.3.3 三维打印成形技术	175

3.3.4 激光快速成形技术	177
3.3.5 电子束快速成形技术	179
3.4 烧结金属粉末多孔材料及其性能	183
3.4.1 烧结粉末不锈钢多孔材料	183
3.4.2 烧结粉末钛及钛合金多孔材料	187
3.4.3 烧结粉末镍及镍合金多孔材料	189
3.4.4 烧结粉末铜及铜合金多孔材料	191
3.4.5 烧结粉末金属间化合物多孔材料	192
3.4.6 烧结粉末耐高温多孔材料	197
3.4.7 泡沫金属及金属空心球	199
3.5 烧结金属粉末多孔材料的应用	205
3.5.1 过滤与分离	205
3.5.2 流体分布与控制	207
3.5.3 防撞与防震	208
3.5.4 导热与隔热	208
3.5.5 消声降噪	209
3.5.6 生物植入体	210
3.5.7 多孔电极	210
3.5.8 其他应用	210
参考文献	211
4 烧结金属纤维多孔材料	217
4.1 金属纤维	217
4.1.1 金属纤维概论	217
4.1.2 金属纤维的制备方法	217
4.1.3 集束拉拔金属纤维的特性	232
4.2 烧结金属纤维毡	241
4.2.1 概述	241
4.2.2 金属纤维毡的制备	242
4.2.3 金属纤维毡的过滤性能	263
4.2.4 烧结金属纤维毡的应用	266
参考文献	271
5 金属丝网多孔材料	273
5.1 金属丝及金属丝编织网	274
5.1.1 金属丝的材质及分类	274
5.1.2 金属丝网的基本知识	274
5.1.3 金属丝网的类型	278
5.1.4 工业用金属丝网规格和结构参数	280

5.2 金属丝网多孔材料的制备	280
5.2.1 弹性金属丝多孔材料制备工艺	280
5.2.2 烧结复合金属丝网制备	282
5.2.3 单丝缠绕滤器制备	284
5.2.4 传热或换热用金属丝网材料的制备	284
5.3 烧结金属丝网复合材料的结构及特性	284
5.4 烧结金属丝网复合材料及元件的复合强度	286
5.4.1 剥离法	286
5.4.2 弯曲法	286
5.5 烧结金属丝网复合材料的过滤性能	287
5.6 金属丝网传热性能	289
5.7 金属丝网复合材料的应用	292
5.7.1 过滤与分离	292
5.7.2 阻燃与防爆	295
5.7.3 传热和换热	297
参考文献	298
6 多孔金属膜	301
6.1 膜的定义与分类	301
6.1.1 定义及膜分离过程	301
6.1.2 膜分类	302
6.1.3 金属膜的分类	304
6.1.4 多孔金属膜的过滤性能	306
6.2 烧结多孔金属膜的制备	308
6.2.1 粉末性能对多孔金属膜结构性能的影响	309
6.2.2 金属粉末浆料的配制	314
6.2.3 多孔金属膜的成形	316
6.2.4 干燥对成膜性能的影响	319
6.2.5 多孔金属膜的烧结	320
6.3 多孔金属复合膜的制备	323
6.3.1 两种溶胶制备方法所得的膜层形貌	323
6.3.2 黏合剂对膜形貌的影响	324
6.3.3 金属多孔支撑体	325
6.3.4 制膜液浓度对膜层形貌的影响	327
6.3.5 溶胶陈化时间对膜层形貌的影响	329
6.3.6 热处理温度对膜层形貌的影响	331
6.4 金属镍膜的制备	333
6.4.1 烧结工艺	335
6.4.2 镍膜的孔径和渗透性	336

6.5 多孔金属膜的应用	337
6.5.1 在水处理行业的应用	337
6.5.2 玉米糖浆澄清过滤	338
6.5.3 发酵醪液的菌丝体过滤	338
6.5.4 回收苛性钠	339
6.5.5 油脂净化	339
6.5.6 制药工业：分离和富集微生物	340
6.5.7 不锈钢膜分离系统在化工领域的应用	340
6.5.8 在超高纯气体中的应用	340
6.5.9 在果汁行业中的应用	341
参考文献	342

1 烧结金属多孔材料的孔结构及特性

材料按密度可分为两大类：致密材料和多孔材料。多孔材料是指带孔的固体，更确切地说：“多孔材料是固相与气相或固相与液相的复合体。”这里的气相与液相是指多孔材料应用的环境，在多孔材料的实际应用中存在着环境与固体之间的交互作用，因而导致多孔材料一系列的功能特性。烧结金属多孔材料是由金属粉末、金属纤维或金属丝网经烧结而成的具有贯通孔道的一类金属材料，它既具有金属的固有特性，如导电性、导热性、可塑性、可焊性等，又由于孔径与孔径分布、孔隙度可任意控制而具有一系列功能特性，如高渗透性、高比表面积、能量吸收、毛细现象、阻燃与隔热等，在工业上广泛用于过滤与分离、流体分布、消声、减震、表面燃烧、阻燃、热交换、热管、催化剂载体、离化、自润滑、发汗及生物植入体等。

1.1 孔与孔隙度

多孔材料中的孔有三类：贯通孔、盲孔（半开孔）和闭孔，如图 1.1 所示。由于贯通孔与半开孔均与外界环境相连通，因此可统称为开孔。

贯通孔允许流体通孔。盲孔则终止于材料的一面，流体不能通过，但由于它开放于材料的另一面，因此能吸附气体、捕集小颗粒和反应中产生的颗粒。闭孔则只起降低材料密度的作用，它影响多孔体的宏观性能，如密度、强度、导热与导电等，与流体透过和气体吸附功能无关。与整体材料外表相通的开孔在多孔材料的功能应用中起主要作用。

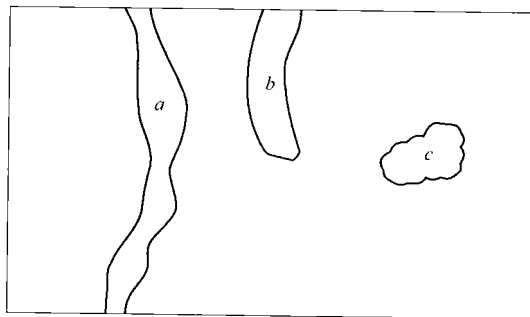


图 1.1 多孔体截面示意图

a—贯通孔；b—盲孔（半通孔）；c—闭孔

孔隙度是相对于密度而言的，材料的密度有两种：

- (1) 真密度，指致密材料（无孔）的密度（ ρ_a ）；
- (2) 相对密度，又称表观密度，包括所有孔隙在内的真实多孔体的密度（ ρ_o ）。

孔隙度是多孔材料中孔体积所占百分数（ ε ），即

$$\varepsilon = V_p / V \quad (1.1)$$

式中 V_p ——材料中所有孔的总体积；

V ——多孔体体积（即孔体积与固体骨架体积之和）。

不同类型的孔有着不同含义的孔隙度，对渗透材料而言，起作用的是贯通孔道。贯通孔道体积所占材料总体积的百分数称为有效孔隙度（ ε_e ），可用下式表示：

$$\varepsilon_v = V_v/V \quad (1.2)$$

式中 V_v ——贯通孔体积。

但在实际应用中采用开孔孔隙度更为普遍。开孔孔隙度用液体浸渍法测得^[1]：

$$\varepsilon_k = (m_{\text{H}} - m)/(\rho_L V) \quad (1.3)$$

式中 m_{H} ——浸渍液体以后多孔体的质量；

m ——浸渍液体前多孔体的质量；

ρ_L ——液体密度。

如果已知致密体的真密度，则

$$\varepsilon = 1 - \rho_a/\rho_0 \quad (1.4)$$

闭孔孔隙度：

$$\varepsilon_o = \varepsilon - \varepsilon_k$$

盲孔孔隙度：

$$\varepsilon_b = \varepsilon - \varepsilon_v - \varepsilon_o$$

对于烧结金属粉末多孔材料，总孔隙度越小，材料中的闭孔和盲孔越多。通常情况下，当 $\varepsilon \geq 18\%$ 时， $\varepsilon_o + \varepsilon_b$ 为 $2\% \sim 5\%$ ， $\varepsilon < 18\%$ 时这一数值会增加。当 ε 为 $7\% \sim 8\%$ 时，实际上通孔已经消失，全部为闭孔与盲孔。当 ε 为 $6\% \sim 20\%$ 时，开孔孔隙度可按经验公式来计算^[1]：

$$\varepsilon_k/\varepsilon = 7.0(\varepsilon - 0.06) \quad (1.5)$$

对于烧结金属纤维与丝网材料，当 $\varepsilon > 10\%$ 时，全部为贯通孔。烧结金属纤维多孔材料的孔隙度最高可达 98% 。材料中孔的均匀性取决于纤维层数 (N_f)，可用材料厚度与纤维直径之比来表示： $N_f = h/d_f$ ，式中 h 为材料厚度， d_f 为纤维直径。一般情况下， N_f 至少应大于 7。作为过滤材料，烧结金属粉末多孔材料的孔隙度应大于 18% ，烧结金属纤维与丝网复合材料的孔隙度应大于 10% 。

多孔材料中孔截面与材料总截面的百分比称面孔隙度 (ϕ)。烧结金属粉末多孔材料的孔隙度与组成材料的粉末颗粒直径无关，只与粉末颗粒的堆积方式有关。由同一直径的球形颗粒组成的多孔体，其孔隙度可按图 1.2 来计算：

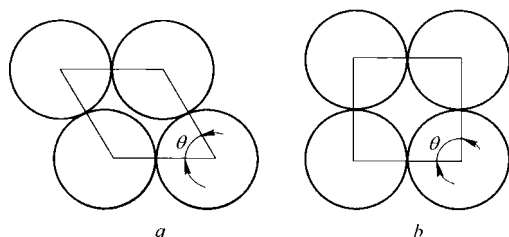


图 1.2 同一直径球形颗粒堆积截面
a—密排堆积， $\theta = 60^\circ$ ；b—松散堆积， $\theta = 90^\circ$

$$\varepsilon = 1 - \pi/[6(1 - \cos\theta) \sqrt{1 + 2\cos\theta}] \quad (1.6)$$

$$\phi = 1 - \pi/(4\sin\theta) \quad (1.7)$$

按式 1.6 与式 1.7 计算，当 $\theta = 60^\circ$ 时， $\varepsilon = 25.9\%$ ， $\phi = 9.3\%$ ， $\theta = 90^\circ$ 时， $\varepsilon = 47.6\%$ ， $\phi = 21.6\%$ ，可见材料的体积孔隙度与面孔隙度相差很大，密排堆积时，两者相差 28.8% ，松散堆积时，两者相差 26.1% 。对于各向异性材料，这种差别会更大。如同

方向叠层的多孔烧结金属网, 体积孔隙度一定时, 面孔隙度可在很大范围内变化, 体积孔隙度为 26.5% 的 10 层烧结金属网, 面孔隙度可在 15% ~ 16% 之间变化, 将孔隙度减小至 16.1%, ϕ 可缩小至 15% ~ 25%。然而对于多数孔分布均匀的材料, 如由非球形粉末制取的多孔镍、钼、钨等材料, 体积孔隙度与面孔隙度基本相同。对于由不同直径的球形颗粒所组成的多孔材料, ε 与 ϕ 均小于由相同直径球形颗粒所组成的多孔材料。 ε 与 ϕ 的关系可由经验公式确定^[1]:

$$\varepsilon = K_1 \phi^{1.4} \quad (1.8)$$

式中 K_1 ——常数。

可由 ε 与 ϕ 的计算数据得出, $\theta = 60^\circ$ 时 $K_1 = 0.166$; $\theta = 90^\circ$ 时 $K_1 = 0.261$ 。

1.2 孔结构

构成烧结金属多孔材料应同时满足以下条件:

(1) 由非均相或多相材质组成, 其中至少有一个相不是固体。固体通常构成整体骨架, 非固体部分所占空间称为孔空间, 它被气体或液体所填充。

(2) 材料中的固相分布应形成孔的网络, 且一些孔空间必须是连通的以使流体通过, 连通孔空间称为有效孔空间。

(3) 从流体动力学的观点来考虑, 闭孔和盲孔只能作为固相基体的一部分来对待。烧结金属粉末多孔材料中孔的构成除粉末颗粒构成的孔空间外, 还应包括少数粉末颗粒内部所带来的内部孔洞。金属纤维与丝网的丝材通常不存在内部孔洞, 因此烧结金属纤维和丝网复合材料中孔的形成只考虑纤维和丝网的堆积形式。

1.2.1 烧结金属多孔材料中孔的构成

图 1.3 为金属粉末和纤维的有序堆积形式^[2]。图中, X 为颗粒或纤维间距。当纤维为立方体有序排列时 (图 1.3a), X 与纤维直径无关; 粉末松散堆积时, $X = 0.414d_s$; 粉末密排堆积时, $X = 0.366d_s$; 不同直径球体混合堆积时, $X < 0.366d_s$; d_s 为粉末颗粒直径。

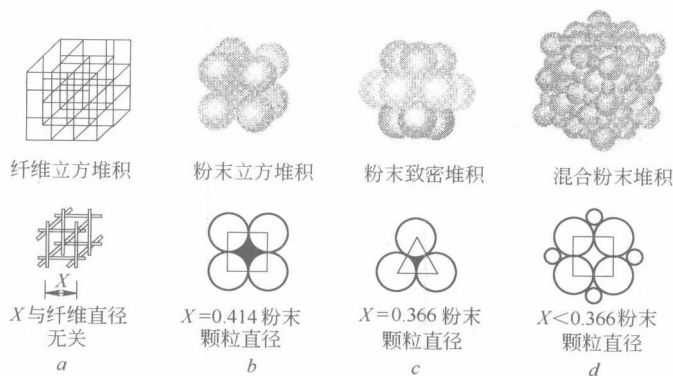


图 1.3 多孔材料中纤维与粉末的有序堆积形式

a—纤维的立方堆积; b—同一直径球形颗粒的松散堆积 (立方体堆积);

c—同一直径球形颗粒的密排堆积; d—不同直径球形颗粒的混合堆积

对于金属纤维多孔材料,大多数情况下,纤维呈无序排列,如图 1.4 所示。孔形呈不规则状态,这种无序排列在大多数情况下,孔结构是非均匀的,孔结构的均匀性需通过纤维层数来调整,纤维层数越多,孔结构越均匀。图 1.5 为材料的最大孔径与纤维层数的关系^[3]。随着纤维层数的增加,材料中形成大孔的几率越小,材料的最大孔径值趋于平稳。与烧结金属粉末多孔材料相比,烧结金属纤维多孔材料可形成孔径与孔隙度的大范围连续区域,如图 1.6 所示^[2]。可见粉末颗粒的两种堆积形式所构成的有效孔径是固定的,而纤维多孔材料的有效孔径是随孔隙度的变化而连续可变的。

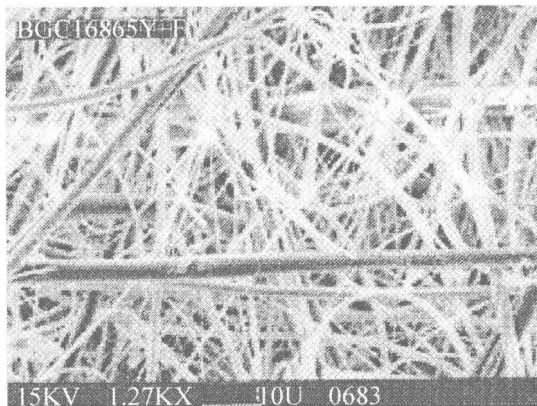


图 1.4 不锈钢纤维毡表面形貌

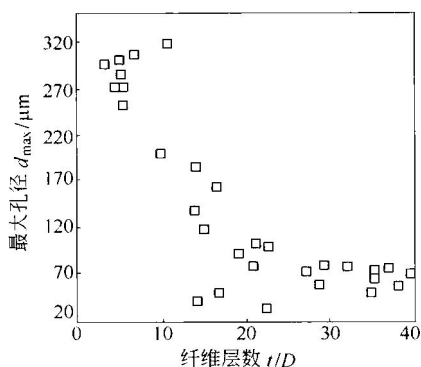


图 1.5 纤维材料的最大孔径与纤维层数的关系

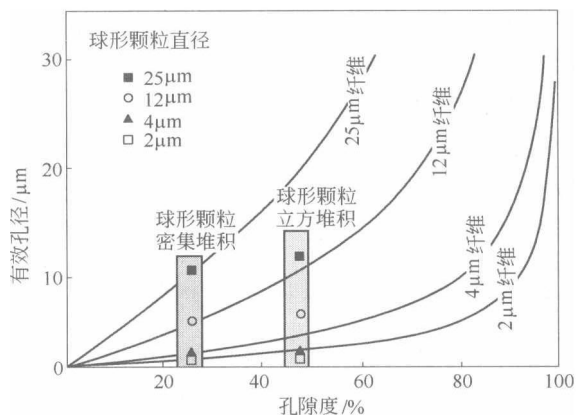


图 1.6 烧结金属纤维与粉末多孔材料的有效孔径与体积孔隙度的关系

金属丝网按纺织方式可分为四种:平织网、绫织网、平叠织席形网、绫织席形网,如图 1.7 所示。金属丝网由不同直径的经线和纬线编织而成,不同直径的金属丝和不同的编

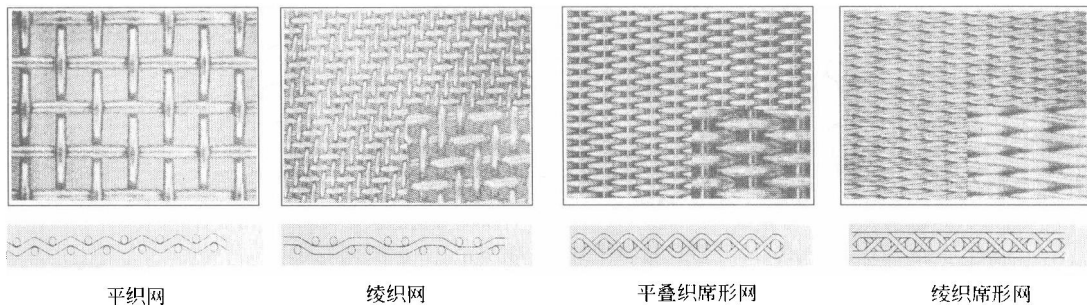


图 1.7 不同编织方法构成的金属丝网

织方法构成不同尺寸的网孔，已形成系列化标准产品。同一种网，网孔尺寸均匀而稳定。

烧结金属丝网材料是由多层不同网孔尺寸的金属丝网相叠经加压烧结而制成，一般由3~9层网组成，最典型的是5层网。图1.8为5层网截面示意图，由两层支撑层、两层保护层和一层控制层组成。控制层为网孔尺寸最小的一层，起控制孔径的作用。保护层的网孔尺寸大于控制层。支撑层网孔最大，通常由席形网组成，起强度支撑作用，在过滤中起增加纳污容量的作用。

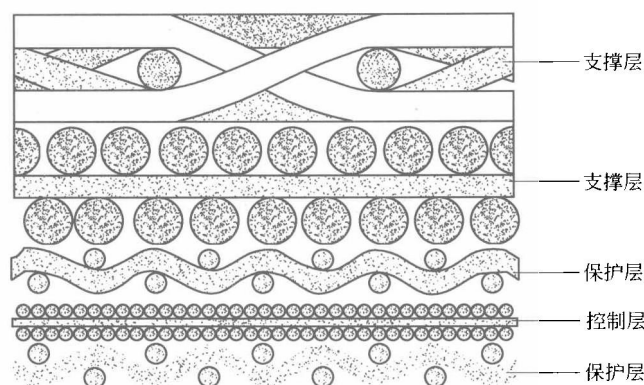


图 1.8 5 层网截面示意图

由于金属网的网孔尺寸固定而均一，在所有烧结金属多孔材料中，烧结金属丝网的孔径最为精确而均匀，孔径分布最为集中，用于过滤时，过滤精度最容易控制，是一种典型的有序孔结构材料。

1.2.2 孔的形状

烧结金属多孔材料中孔的形状十分复杂，它取决于原材料的起始状态（粉末粒度分布、颗粒形状、表面粗糙度、纤维直径和长/径比等）和制取工艺（成形方法、成形压力、烧结制度等），图1.9为几种典型的孔截面示意图。

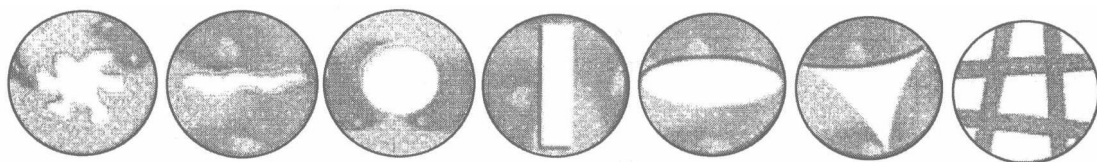


图 1.9 孔截面示意图

孔的形状用形状因子（ F ）来定量描述^[4]：

$$F = \frac{4\pi A}{\rho_p^2} \quad (1.9)$$

式中 A ——孔的截面积；

ρ_p ——孔周长。

圆形孔和正方形孔的形状因子为1，而狭长缝隙式孔的 F 值趋近于零。孔截面大于