

材料科学与工程系列

Cellular solids:
structure and properties
(Second Edition)

多孔固体 结构与性能

第2版

Lorna J. Gibson Michael F. Ashby 著

刘培生 译
田民波 校

清华大学出版社

材料科学与工程系列

TB383

25/54

Cellular solids:
structure and properties
(Second Edition)

多孔固体 结构与性能

第2版

Lorna J. Gibson Michael F. Ashby 著

刘培生 译
田民波 校



清华大学出版社
北 京

FAN69/03

EISBN 0 521 49911 9 paperback

Cellular solids: structure and properties(Second Edition)

Lorna J. Gibson and Michael F. Ashby

Copyright © Lorna J. Gibson and Michael F. Ashby, 1997

Original language edition published by the Press Syndicate of the University of Cambridge. All rights is reserved. Authorized simplified Chinese translation edition is published by Tsinghua University Press.

本书中文简体翻译版由清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港特别行政区、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版、发行。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2001-4983

图书在版编目(CIP)数据

多孔固体结构与性能(第2版) / (美)吉布森, (英)阿什比著; 刘培生译. —北京: 清华大学出版社, 2003

(材料科学与工程系列)

书名原文: Cellular solids: structure and properties(Second Edition)

ISBN 7-302-06976-X

I. 多… II. ①吉… ②阿… ③刘… III. 多孔材料—结构性能—研究 IV. TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 070856 号

出 版 者: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦

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

邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

客户服务: 010-62776969

组稿编辑: 宋成斌

文稿编辑: 李艳青

封面设计: 郑 勉

印 刷 者: 北京市清华园胶印厂

装 订 者: 三河市化甲屯小学装订二厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 172×246 印张: 28.5 字数: 537 千字

版 次: 2003 年 11 月第 1 版 2003 年 11 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-06976-X/TB·57

印 数: 1~3000

定 价: 54.00 元

内 容 简 介

本书介绍了多孔固体的结构、性能及其工程设计方法。通过对许多不同类型的多孔固体(如工程蜂窝材料、泡沫材料、木材、网状骨质以及软木等)建立统一的模型,解释了这些形态各异的材料的行为相似性。运用实例分析研究,说明了泡沫材料的性能模型应用于特定工程用途中进行材料的最佳选择的方法。

本书堪称有关多孔固体的经典著作。在第2版中,作者汇总了最新的研究成果,包括金属和陶瓷泡沫材料的制备方法新进展,多孔固体的次屈服行为、断裂韧性、蠕变和蠕变屈曲、多向(多轴)破坏定则及动态压损等新结果,声性能新理论等。另外,在材料性能图表上列出了商用泡沫材料的有关数据和信息,并运用两个新的实例分析展示了工程设计中将图表应用于泡沫材料选择的方法。

本书可作为材料及相关专业(如物理、生物、机械、建筑、医学等)的高年级本科生和研究生的专业课教材,也可作为广大材料研究者和相关领域(如材料力学、结构力学、生物力学等)科研人员及工程技术人员的参考书。

译者序

本书是美国麻省理工学院教授 L. J. Gibson 博士和英国剑桥大学教授 M. F. Ashby 博士合著“Cellular Solids”(第 2 版)一书的译作。Gibson 教授和 Ashby 教授从事多孔固体研究二十多年来,取得了大量研究成果,成为该领域学术界颇具影响的知名学者。本书系统地总结了作者及国际同行多年来辛勤劳动的成果,是该领域近年来的最新力作。内容丰富,涵盖广泛,包括多孔固体的结构、性能和设计等诸多方面。

多孔固体作为一种优秀的工程材料,具有功能和结构的双重属性,是一类广为用户而又具有巨大应用潜力的功能结构材料。它涉及航空航天、原子能、环保、电化学、石油化工、冶金、机械、医药、建筑等行业,用于分离、过滤、布气、催化、电化学过程、消音、吸振、屏蔽、热交换等诸多场合,在科学技术和国民经济建设与发展中发挥着巨大的作用。同时,多孔固体还是一种普遍的生物结构材料,广泛地存在于动植物体和人体当中(如木材和骨骼),发挥着不可替代的生物功能。因此,多孔固体不但是一种值得广为研究和进一步开发的战略性材料,而且也涉及具有极大研究价值的生物材料。

限于译者水平,书中难免有不妥之处,敬请读者指正。

第 1 版序言

低密度的多孔固体广泛地存在于自然界,并且被人类大规模地生产制造。其结构和力学、热学及其他性能已为数学家、物理学家、工程师甚至食物技术专家详细研究。他们在多孔固体的几何性质和性能行为的某个特殊方面,有着各自不同的兴趣。正因为如此,与任何其他类型的工程材料相比,其涉及的相关文献具有更大的分散性和多样性:迄今为止,还没有哪种出版物能使感兴趣的读者获得有关多孔固体的较为广泛和便于理解的印象。这种现状促使我们编著本书,试图在同一本书中采用普通的术语,以帮助读者对多孔固体有一个全方位的了解。

在撰写本书的过程中,许许多多热心帮助的同仁和朋友对各章节的建议、评论和批判性阅读,使我们受益匪浅。我们特别感谢下列各位给予的帮助,他们是:剑桥工程学系的 C. Calladine 教授、J. Woodhouse 博士、T. Shercliff 女士和 J. Zhang 先生,剑桥植物学系的 P. Echlin 博士,麻省理工学院市政工程系的 L. A. Demsetz 女士、A. T. Huber 女士和 T. C. Triantafillou 先生,麻省理工学院建筑学系的 L. Glicksman 教授,哈佛大学应用科学部的 B. Budiansky 教授、J. Hutchinson 教授、T. McMahon 教授,新南威尔士大学的 K. E. Easterling 教授,孟买印度理工学院的 S. K. Maiti 教授,都柏林 Trinity 学院的 D. Weaire 教授,伦敦帝国学院 Blackett 实验室的 N. Rivier 博士,以及里斯本大学冶金与材料系的 M. Fortes 教授。绘图和显微照片分别由剑桥工程学系的 S. Mason 女士和 J. Godlonton 先生完成,对他们的帮助表示诚挚的谢意。我们还要感谢 Bernard M. Gordon(1948)工程学课程发展基金、麻省理工学院 Sloan 基金和国际合作研究 NATO 计划为本书出版的各阶段工作提供的经费支持。

慷慨提供文中插图的有:伦敦皇家协会、Elsevier Sequoia、Taylor & Francis 出版公司、Plenum 出版公司、剑桥大学出版社、Van Nostrand Reinhold Inc.、英国 Princes Risborough 建筑研究集团公司、施普林格出版社、加拿大纸浆和纸张研究所、丹麦哥本哈根 MunKsgaard 国际出版股份有限公司。

L. J. Gibson

M. F. Ashby

1987 年 8 月

第 2 版序言

本书第 1 版问世 10 年来,人们对多孔固体表现的兴趣已显著增加。由于出现了许多制备陶瓷和金属泡沫材料的新技术,拓宽了人造材料的品种范围及其应用的多样性。对木材、软木和网状骨质的持久兴趣,促使人们进行新实验和建立新模型,去表征天然多孔结构的特性。正是由于这些方面的发展,以及与我们讨论过多孔固体的结构和性能的不同学界的热心科学家和工程师们的促进,本书第 2 版才得以应运而生。我们对第 1 版的每一章节都作了全面修改以紧跟时代,但发现这仍然是不够的。本书(第 2 版)进一步丰富了泡沫材料制备技术的内容,并增加了新的章节以介绍固体泡沫材料对多向载荷、蠕变变形和冲击载荷等力学响应的近期工作。本书还第一次载入了声学性能。此外,还开辟了关于满足具体设计准则的泡沫材料选择以及泡沫材料性能数据来源和数据库的新内容。

如同第 1 版一样,我们得到了许多同仁和朋友慷慨的大力帮助。除了那些已列于第 1 版序言中的以外,我们还要特别感谢剑桥工程学系 D. Cebon 博士和 C. Seymour 先生、格勒诺布尔(Grenoble)大学物理化学系 Y. Brechet 教授和 D. Bassetti 先生、“台湾国立成功大学”J. S. Huang 教授、波士顿哈佛医学院 Beth-Israel 医院矫形生物力学实验室 M. Silva 博士和 W. C. Hayes 教授等人的帮助。如果没有 J. Ladbroke 女士和 S. Mason 女士的文字处理和绘画技巧(以及耐心),也就不可能有手稿和图表的产生,在此对她们表示深深的谢意。

慷慨提供文中插图的有:剑桥大学出版社、皇冠出版集团(Crown)、Elsevier 科学股份有限公司、约翰威利父子公司、Krieger 出版公司、Munksgaard 国际出版股份有限公司、Plenum 出版公司、加拿大纸浆和纸张研究所、施普林格出版社和 Taylor&Francis 出版公司。

最后,我们还要感谢伦敦皇家协会、国际合作研究 NATO 计划和国家科学基金妇女部提供的经费支持,使本书新版得以面世。

L. J. Gibson

M. F. Ashby

1997 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 多孔固体的概念	2
1.3 多孔固体的制备	3
1.4 多孔固体的性能	5
1.5 多孔固体的应用	5
1.6 本书概要	9
1.7 文献	9
参考文献	10
第 2 章 多孔固体的结构	13
2.1 引言	13
2.2 孔穴结构	14
2.3 形状、尺寸和拓扑结构	22
2.4 相对密度的计算	33
2.5 多孔材料的性能表征	37
2.6 结语	42
参考文献	43
第 3 章 材料的性能	46
3.1 引言	46
3.2 聚合物和合成橡胶	50
3.3 金属	63
3.4 陶瓷和玻璃	70
3.5 结语	76
参考文献	77
总体性参考文献	77

第 4 章 蜂窝材料的力学	81
4.1 引言	81
4.2 蜂窝材料的变形机制	82
4.3 蜂窝材料的共面性能: 单向加载(单轴加载)	87
4.4 蜂窝材料的共面性能: 双向加载(双轴加载)	118
4.5 蜂窝材料的异面性能	128
4.6 结语	137
附录 4A 正方孔和三角孔蜂窝材料的弹性模量	138
附录 4B 轴向变形和剪切变形模量的小应变计算	139
附录 4C 蜂窝材料的弹性屈曲	144
附录 4D 非均匀商用蜂窝材料的力学性能	146
参考文献	148
第 5 章 泡沫材料的力学: 基本结果	152
5.1 引言	152
5.2 泡沫材料的变形机制	153
5.3 泡沫材料的力学性能: 压缩	159
5.4 泡沫材料的力学性能: 拉伸	189
5.5 泡沫材料的力学行为总结: 应力-应变图	196
5.6 结语	203
参考文献	203
第 6 章 泡沫材料的力学: 细化	208
6.1 引言	208
6.2 温度和应变速率的影响	209
6.3 泡沫材料性能的各向异性	227
6.4 多向加载(多轴加载)	235
6.5 结语	248
参考文献	249
第 7 章 泡沫材料的热、电、声性能	252
7.1 引言	252
7.2 热性能	252
7.3 电性能	263

7.4 声性能	267
7.5 结语	272
参考文献	273
第 8 章 多孔材料的能量吸收	275
8.1 引言	275
8.2 能量吸收机制	277
8.3 泡沫材料的能量吸收性能表征方法	280
8.4 能量吸收图	283
8.5 包装用泡沫材料的设计与选择	294
8.6 包装用泡沫材料选择的实例分析	298
8.7 结语	304
参考文献	305
第 9 章 泡沫芯体夹层镶板的设计	307
9.1 引言	307
9.2 夹层结构的刚度及其最优化	309
9.3 夹层结构的强度	316
9.4 夹层设计的最优化问题: 刚度、强度和重量	324
9.5 夹层设计的实例分析	328
9.6 结语	337
附录 9A 夹层结构刚度最优化的结果	337
参考文献	339
第 10 章 木材	341
10.1 引言	341
10.2 木材的结构	343
10.3 木材的力学性能	347
10.4 木材结构和性能的模型化	363
10.5 结语	373
参考文献	374
第 11 章 网状骨质	376
11.1 引言	376

多孔固体结构与性能	
11.2 网状骨质的结构	378
11.3 网状骨质的力学性能	383
11.4 网状骨质结构和性能的模型化	388
11.5 结语	392
参考文献	393
 第 12 章 软木	396
12.1 引言	396
12.2 软木的结构	397
12.3 软木的力学性能	400
12.4 软木的用途	404
12.5 结语	407
参考文献	408
 第 13 章 多孔材料的货源、供应商和性能数据	409
13.1 引言	409
13.2 材料和供应商汇编	409
13.3 适用多孔材料的性能范围	414
13.4 实例分析	418
13.5 结语	422
附录 13A 商用泡沫材料及其供应者	422
参考文献	433
 附录 A 各向异性多孔固体的线弹性	434
弹性各向异性的规范描述	434
参考文献	439
 附录 B 单位和换算表	440

第 1 章 绪 论

1.1 引言

“孔穴(cell)”一词来源于拉丁文的“cella”,其意义是指“一个小的分隔空间”、“一个封闭空间”。孔穴让人感兴趣之处在于其群体:对于罗马人是“多孔体(cellarium)”,对于我们(用词没那么雅致)则是“多孔固体(cellular solids)”。这个用词描绘的是一个以固体棱边或固体壁面所构成的孔穴组合体,这种孔穴叠加在一起充填了空间。此类材料普遍存在于自然界,例如木材、软木、海绵和珊瑚等(纤维素(cellulose)一词出自拉丁文的小型 cellula,意指“充满了小小的孔穴”)。

人类应用这些天然多孔材料已有数千年的历史。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(Horace,公元前 27 年)人们就将软木用于酒瓶塞。最近以来,人类已经制造出各种各样的多孔固体。最简单的有由平行棱柱形孔穴构成的蜂窝状材料,用以制作轻质结构部件。更为人们所熟悉的是聚合物泡沫材料,它们可用于任何场合,从可处理的咖啡杯到飞机座舱的冲击垫。现有的技术不但可以制造泡沫聚合物,而且还可制造金属、陶瓷和玻璃的泡沫材料。这些新型泡沫材料在结构方面的应用正不断增加,用于隔热、缓冲以及耐冲击功能的吸收系统。这些用途开辟了多孔固体性能所具备的独特综合性,这些性能最终来自多孔结构。

本书介绍了多孔固体的结构和性能,以及其性能在工程设计中的利用方法等知识。多孔固体是一类重要的工程材料,但也是被出奇地忽略的一种材料。就经济角度而言,作为例子,它们远比纤维复合材料更重要。但相比之下,关于这种材料的文献却少得可怜,绝大多数的大学教科书甚至根本就未提及它们。目前,多孔固体材料正被大规模地生产和应用。如果将木材包括在内,则其商业经济性可与铝业或玻璃业相比拟。然而,几乎相对于其他任何一种材料来说,人们对其研究甚少,知之不多,文献资料也欠充分。

本章主要介绍多孔材料的结构、制备方法、使用性能和用途。在本章的结尾,则简要介绍了本书其余部分的梗概和关于多孔材料文献的来源等。

1.2 多孔固体的概念

多孔固体 (cellular solid) 是一种由形成孔穴 (cell) 的棱边和壁面的固体杆或固体板所构成的相互联结的网络体。其三种典型结构示于图 1.1。其中最简单的方式 (图 1.1(a)) 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。因此, 这种二维多孔材料称为“蜂窝材料” (honeycombs)。更普遍的情况是, 孔穴由作三维空间填充的多面体构成, 这种三维多孔材料称为“泡沫材料” (foams)。如果组成泡沫体的固体仅仅只是孔穴的棱边 (因此, 孔穴通过开口的壁面相连), 则称该泡沫体是“开孔的” (open-celled) (图 1.1(b))。如果那些多面体的壁面也是固体的, 以至于每个孔穴都与其相邻的孔穴相互封闭隔离, 则说该泡沫体是“闭孔的” (closed-celled) (图 1.1(c))。当然, 有些泡沫材料含有一部分开孔, 也含有一部分闭孔。孔穴的几何形状和特性表征是其自身具有的令人感兴趣的课题, 同时也是一个发掘创造性分析思维的课题。这方面的较深入论述见第 2 章。

多孔固体区别于其他材料的

最重要特性就是其相对密度 (relative density) ρ^* / ρ_s , 即多孔材料的密度 ρ^* 除以构成孔壁的固体的密度 ρ_s 。特殊的超低密度泡沫材料, 其相对密度可低至 0.001。用于减振缓冲、包装填塞和隔音隔热的聚合物泡沫材料, 其相对密度通常

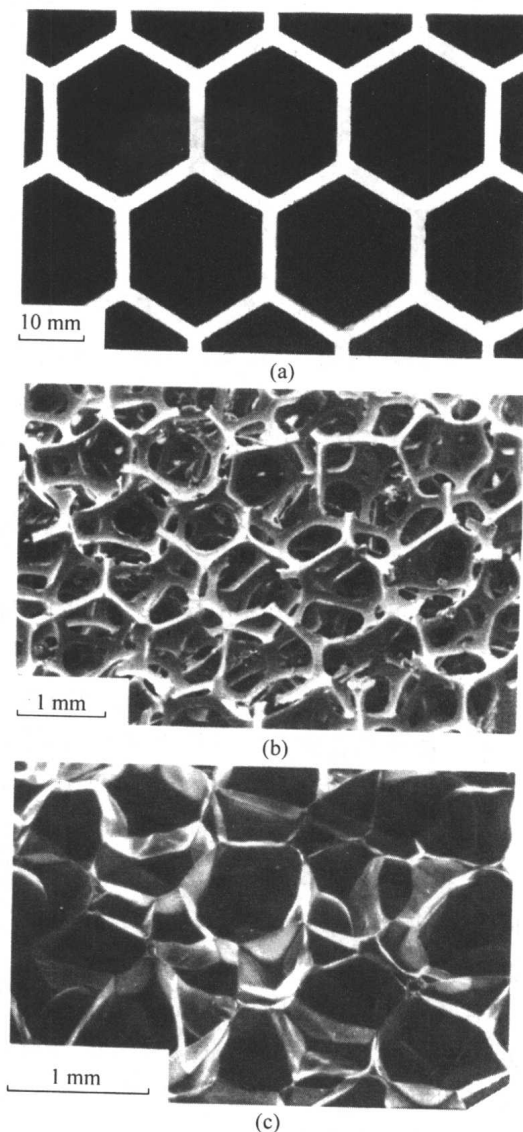


图 1.1 多孔固体举例: (a) 二维蜂窝材料; (b) 三维开孔泡沫材料; (c) 三维闭孔泡沫材料。

为 $0.05 \sim 0.2$ ；软木(cork)的相对密度约为 0.14 ；而大多数软木材(softwood)的相对密度则介于 $0.15 \sim 0.40$ 之间。随着相对密度的增大,孔壁不断加厚,孔隙空间不断收缩。在相对密度约为 0.3 以上时,存在着一个过渡性的转变,即从多孔结构转变成为一个更可以认为是包含着孤立孔隙的固体结构(图 1.2)。本书论述的是相对密度低于 0.3 的真实多孔固体。

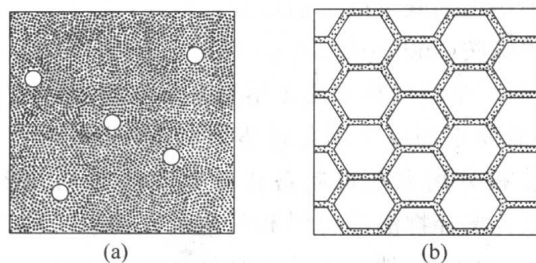


图 1.2 多孔固体和具有孤立孔隙的固体之间的比较

1.3 多孔固体的制备

几乎任何材料都可以进行泡沫化。当然,聚合物是最普遍的。但是,金属、陶瓷、玻璃甚至复合材料,也都可以制备出孔穴。第 2 章将展示多孔材料的广阔景象。在这里只简单总结一下其制备方法。

1. 蜂窝材料

蜂窝状的结构(图 1.1(a))至少可以通过四种方式来制备。最显而易见的方法是先将其片材压成半六边形外廓,然后把把这些波状片粘在一起。更普遍采用的方式是,在平整的片材上将胶刷成平行的条状,再将这些片材堆积起来,使它们顺着条纹粘结在一起。这种片材堆积体拉开(“膨胀”)后即得到蜂窝材料。纸张-树脂蜂窝材料就是采用这种方法制造的。将纸张粘合并膨化,然后浸入树脂进行保护和硬化处理。蜂窝材料也可由模具浇铸而成。图 1.1 中示出的硅橡胶蜂窝材料即是通过浇铸制造的。挤压成型法是制备蜂窝材料时被采用得越来越多的工艺。用于支撑汽车尾气催化剂的陶瓷蜂窝材料就是采用这种方法制备的。

2. 泡沫材料

不同的技术被用来制造不同类型固体的泡沫材料。聚合物的发泡是通过将气泡充入液态单体或热聚合物,使气泡长大并稳定,然后经交联或冷却使其整体固化(Suh and Skochdopole, 1980)。气体充入方式既可是机械搅拌,也可将发泡剂混入聚合物。物理发泡剂即非活性气体,如二氧化碳或氮气,高压下将其

压入热聚合物熔体,然后减压使其膨胀成空泡,或者,将低熔点液体如氯氟-碳(chlorofluoro-carbons)或二氯甲烷(methylene chloride)混入聚合物使其加热挥发从而形成蒸气泡。孔穴尺寸在 $10\mu\text{m}$ 量级的微孔泡沫材料,可由饱和渗透法制得,即在室温下加压将非活性气体渗入聚合物,然后释放压力,并加热这种非活性气体过饱和聚合物至玻璃化转变温度,导致孔穴形核并长大。化学发泡剂是一种添加剂,这种添加剂既可以是加热分解型的,也可以是混合时发生化合作用释放气体型的,钠碳胺(sodicarbonamide)即为一例。每种方法都可制备出开孔或闭孔的泡沫材料。最终结构取决于熔融流体中的流变状态和表面张力。闭孔泡沫材料有时还需要增加一个网化过程,即打破孔壁从而获得开孔泡沫体。最后提及的是,许多相分离方法可制备相对密度低至 0.002 而孔穴尺寸小至 $0.1\mu\text{m}$ 的低密度微孔聚合物泡沫材料和气凝胶:其中一种方法是在流体中析出聚合物而形成低密度凝胶,然后通过蒸发除去流体(LeMay et al., 1990)。

金属泡沫材料既可由液态加工法制得,也可由固态加工法制得(Shapovalov, 1994; Davies and Zhen, 1983)。将粉末化的金属与粉末化的氢化钛或氢化锆混合,压实并加热至金属的熔点,释放出氢气即可形成泡沫体。机械搅拌液态铝和碳化硅粒子的混合物形成泡沫,冷却后即得泡沫铝。也可将液态金属沿小颗粒四周渗入,而后再去除这些小颗粒:如碳粒可以烧除,盐粒可以滤除。还可以运用无电沉积、电化学沉积或化学气相沉积等方法,使金属涂覆于开孔聚合物泡沫基体。此外,也可通过共晶相变(低共熔点相变)的途径制备泡沫金属:将金属熔化于氢气气氛中,然后经共晶点(低共熔点)冷却,产生的气体即成为金属内部的分离相。固态加工通常是采用粉末冶金方法。运用粉末烧结方法,将金属粉末和空化剂混合,空化剂在烧结过程中分解或挥发。还有一种方法,即在一有机容器中将金属粉末浆料与发泡剂混合,机械搅拌形成泡沫体,然后加热即得多孔金属。将金属粉末浆料涂覆于有机海绵体,使浆料干燥并燃烧以除去有机海绵,也可形成泡沫金属。在一种非常著名的制备方法中,单晶硅由阳极化处理制成了多孔体:将硅晶片插入由氢氟酸、乙醇和水组成的溶液中,通以短时间的电流即可(Bellet and Dolino, 1994)。阳极化处理凿孔,可以获得孔穴尺寸为 10 nm 、相对密度为 0.1 的孔隙连通网状体,而材料仍保持为单晶。

泡沫玻璃可由类似于聚合物发泡的方法制得,主要是应用吹泡剂(通常为 H_2S)。泡沫碳的制备是在一个严密可控环境下使聚合物泡沫石墨化的过程。泡沫陶瓷的制备则是将一种滑浆(陶瓷料在水中或其他一些流体中的一种细腻浆料)渗进聚合物泡沫体内,燃烧这种聚集体使浆料结合在一起,烧除有机物即可获得泡沫陶瓷制品。泡沫陶瓷也可通过在网状碳泡沫基体上进行化学气相沉积制备。另外,将合适的发泡剂水溶液与压缩空气混合预制成水状泡沫,通过该泡沫与水泥浆料的混合,可制得水泥泡沫体。孔穴尺寸小于 100 nm ,密度低至

4 kg/m³的微孔硅泡沫,则已由四烷氧基硅甲烷(tetraalkoxy silanes)的溶胶-凝胶聚合法制得。

多孔固体也可通过将预先膨化好的球状体或颗粒粘合在一起的方法制备。泡沫聚苯乙烯有时即用该法模压制造。玻璃和金属的泡沫体则可由大量中空球烧结在一起获取。将中空球(通常为玻璃球)与粘合剂如环氧树脂混合,可制得合成泡沫材料。另外,将纤维粘合起来可获得低密度垫材(如毡料),它与其他类型的多孔固体有许多共同之处。

最后值得提出的是,有许多食物都是泡沫体结构。像蛋白甜饼这样的食物是由机械搅拌发泡形成的。其他的,像面包,是使用生物发泡剂(酵母)。另外一些,像玉米片,则使用物理起泡剂(蒸气)。而自然界本身能设计出自己制造泡沫体的方式,如单一生物体生长过程形成的部分(如在骨内、在木头内、在软木内、在肺叶内),又如生物体的共同产品(如珊瑚、海绵或某些昆虫的窝巢等)。

1.4 多孔固体的性能

材料的泡沫化显著地拓宽了其在工程领域的应用范围。多孔固体所具有的物理、机械和热性能,可通过与致密固体相同的方法进行测试。图 1.3 示出了这些性能中 4 个指标的范围:密度、热导率、杨氏模量和抗压强度。加点阴影柱表示传统固体跨越的性能范围,实心柱则表明可能制得的发泡材料对这种性能的延伸范围。这种广阔的性能延伸使泡沫材料具备了致密固体难以胜任的用途,提供了工程创造的潜力。低密度可用来设计轻质坚硬部件(如夹层镶板)、大型轻便结构体和各种漂浮物。低热导率则可用于价格低廉而可靠的隔热体,这种隔热效果仅次于价格昂贵的基于真空的方法。低刚性使得泡沫体在许多缓冲减振应用中成为理想的材料。例如,弹性泡沫体是机器安装底座的标准材料,而强度低和压缩应变大则使其在能量吸收应用方面具有吸引力。在各种保护性场合,从计算机到危险废弃物的滤毒装置,多孔固体都存在着一个巨大的市场。下一节将稍加详细地讨论泡沫材料的应用。请读者在阅读时默记图 1.3。

1.5 多孔固体的应用

图 1.3 的 4 个图解直接描述了多孔材料的 4 个主要应用领域:隔热、包装、结构性和漂浮性作用。在这些应用之间,绝大多数所涉及的都是目前生产的泡沫材料。因此,说明即由此展开。但是,还有另外一些重要的正在兴起的应用领域,本节的末尾将对其作简要介绍。

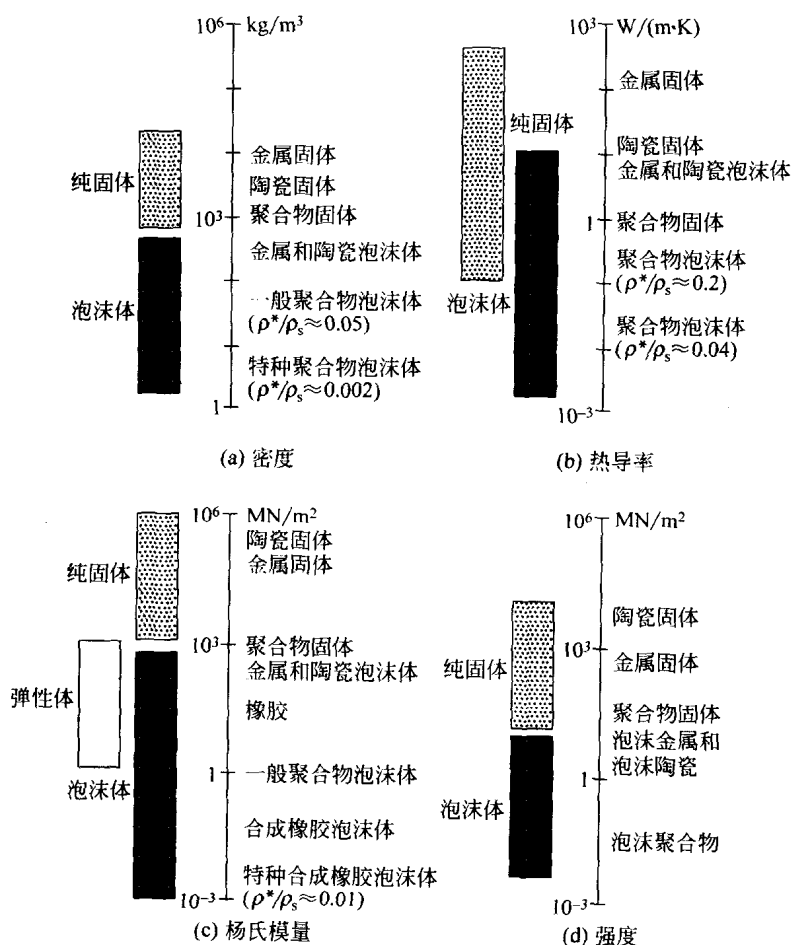


图 1.3 泡沫材料在工程上可利用的性能范围

1. 隔热

聚合物泡沫材料和玻璃泡沫体最大的一种用途就是隔热。利用泡沫材料的低热导率,可制作粗至可处理的咖啡杯这样的低级产品,也可制作精至太空飞船用助力火箭隔热装置这样复杂的精良产品。现代建筑、交通系统(冷藏车和有轨车)甚至船只(尤其是那些设计用于运输液化天然气的船只),都在应用膨化塑性泡沫材料的低热导率。当火患是主要的考虑因素(如在某些建筑内)时,可使用泡沫玻璃。在超低温研究中,泡沫材料的独特优点是其低的热质量(thermal mass),即减少了用来冷却隔热体本身所需冷冻剂的用量。同样地,在高温窑炉设计中,大部分能量消耗用于提高窑炉内设备结构的温度,以使其达到操作水平