

多孔缓冲材料有限元结构 分析与设计方法

DUOKONG HUANCHONG CAILIAO
YOUXIANYUAN JIEGOU
FENXI YU SHEJI FANGFA

孙德强 著



化学工业出版社

多孔缓冲材料有限元结构 分析与设计方法

孙德强 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书共分为6章,分别是:多孔缓冲材料概述,ANSYS有限元结构分析基础,蜂窝材料力学,泡沫材料力学,其他多孔缓冲材料力学以及缓冲设计方法。具体内容包括多孔缓冲材料的概念、制备、性能、应用等基础知识,工程分析、计算机辅助工程分析、结构分析相关概念、有限元法的原理、ANSYS软件,各类多孔缓冲材料力学和相关有限元分析,以及缓冲性能评价和缓冲设计方法。

本书不仅把多孔缓冲材料力学和ANSYS有限元软件两者融合,还推出了各类多孔缓冲材料力学性能仿真、缓冲性能评价、缓冲设计方法的大量原创性内容。既注重理论性,又注重实践性。内容安排由浅入深,循序渐进。适合包装工程专业本科、研究生和包装工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

多孔缓冲材料有限元结构分析与设计方法/孙德强著. —北京:化学工业出版社,2014.10

ISBN 978-7-122-21635-9

I. ①多… II. ①孙… III. ①缓冲包装-有限元分析-结构分析②缓冲包装-包装设计 IV. ①TB485.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第193176号

责任编辑:杨 菁

文字编辑:李锦侠

责任校对:边 涛

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:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张9¼ 字数227千字 2014年11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:30.00元

版权所有 违者必究

Preface

2012年我国包装行业产值为1.3万亿元,居世界第二,其中缓冲包装材料的产值也达(2~3)千亿元,展示各种缓冲材料的力学性能对于促进其合理使用和优化设计具有重要意义。最近包装教育委员会出台的包装工程专业指导性培养计划中将包装应用力学类课程列为专业必修课程,为了解决很多高校苦于找不到合适教材的问题,特编著了本书。

就缓冲材料的力学性能,尤其是动力学性能方面,近几年我们进行了大量相关研究,开展了多项省、厅级研究课题,形成了比较完备的理论体系,取得了大量研究成果,很有必要进行总结出版成书。

本书由6章组成。第1~3章和第6章由孙德强编著;第4章由邢月卿编著,第5章由夏荣厚编著。另外,郑波波、靳向利、沈亚丽、王庆庆、李文娥、王晨阳、孙建建、孔杨、刘艳参与了本书资料收集和文稿校对工作。

本书适合包装工程专业本科和研究生以及包装行业工程技术人员阅读。

本书编写过程中,得到了邢月卿和夏荣厚老师的鼎力支持,前述的郑波波等9位同学参与了全书资料收集和文稿校对工作。本书之所以能够顺利编写,也得到了我的单位领导、父亲、母亲、爱人及女儿的支持和理解。在此,对上述每一个人表示深深的谢意!

本书难免存在疏漏及欠妥之处,敬请读者批评指正。

孙德强

2014年6月于陕西科技大学

Contents

第1章 多孔缓冲材料概述	1
1.1 概念	1
1.2 制备方法	2
1.2.1 蜂窝材料	2
1.2.2 泡沫材料	3
1.3 性能与应用	4
1.3.1 阻隔材料	4
1.3.2 缓冲减振	4
1.3.3 结构材料	5
1.3.4 漂浮材料	5
1.3.5 其他用途	5
1.4 孔穴	6
1.4.1 结构	6
1.4.2 形状	8
1.5 相对密度	15
复习题	16
第2章 ANSYS 有限元结构分析基础	17
2.1 工程分析	17
2.1.1 概念	17
2.1.2 计算机辅助工程分析	18
2.1.3 实例	19
2.2 有限元结构分析	20
2.2.1 有限元法	21
2.2.2 ANSYS 快速浏览	22
2.2.3 有限元分析实例	26
复习题	28
第3章 蜂窝材料力学	29
3.1 六边形蜂窝	29
3.1.1 共面力学	30

3.1.2 异面力学	37
3.2 弹性模量的有限元计算	38
3.2.1 基于特征单元的方法	39
3.2.2 基于单元阵列的方法	40
3.3 动态压缩的有限元模拟	42
3.3.1 方法	42
3.3.2 实例	44
3.4 各种蜂窝材料的力学性能	46
3.4.1 三角形蜂窝	47
3.4.2 四边形蜂窝	59
3.4.3 圆形蜂窝	62
3.4.4 多层 U 形 A 瓦楞	66
复习题	68
第 4 章 泡沫材料力学	69
4.1 变形机制	69
4.2 压缩	70
4.2.1 线弹性变形	70
4.2.2 非线性弹性变形	74
4.2.3 塑性坍塌	76
4.2.4 脆性压溃	78
4.3 拉伸	78
4.3.1 线弹性变形	78
4.3.2 非线性弹性变形	79
4.3.3 塑性坍塌	79
4.3.4 脆性断裂	79
复习题	80
第 5 章 其他多孔缓冲材料力学	81
5.1 木材	81
5.1.1 结构	81
5.1.2 力学性能	82
5.1.3 模型	89
5.2 软木	93
5.2.1 结构	93
5.2.2 力学性能	95
5.3 网状骨质	96
5.3.1 结构	96
5.3.2 力学性能	98
5.3.3 模型	99

复习题	101
第6章 缓冲设计方法	102
6.1 国标中的缓冲包装设计方法	103
6.1.1 相关术语	103
6.1.2 设计要求	103
6.1.3 流程简述	104
6.1.4 具体方法	105
6.1.5 应用技术	107
6.1.6 相关试验	110
6.2 “缓冲系数-最大应力曲线”法	111
6.2.1 设计示例	111
6.2.2 包装用缓冲材料静态压缩试验方法	112
6.2.3 缓冲系数的计算	114
6.3 “最大加速度-静应力曲线”法	116
6.3.1 设计示例	116
6.3.2 包装用缓冲材料动态压缩试验方法	117
6.4 减振防护设计示例	120
6.4.1 示例1	120
6.4.2 示例2	121
6.5 “能量吸收图”法	123
6.5.1 能量吸收图的生成原理	123
6.5.2 材质已知时厚度和密度优化算法	124
6.5.3 材质未知时基材材质优化算法	125
6.6 二维多孔材料共面动态缓冲性能的测定方法	125
6.6.1 技术背景	125
6.6.2 方法细节	126
6.6.3 方法的可行性	130
6.6.4 测定案例	133
复习题	137
参考文献	138

第 1 章 多孔缓冲材料概述

介绍缓冲材料首先从“多孔材料”说起，多孔材料 (cellular materials) 是指一类以固体楞边或壁面所构成的孔穴组合体。多孔材料在我们的生活或工程应用领域中广泛存在，例如蜂窝、泡沫、木材、软木、海绵、珊瑚、骨骼等，甚至面包、馒头等很多食物都是多孔的。

人类使用天然的多孔材料已有数千年的历史，例如埃及金字塔中发现的 5000 年以前的木制品，公元前 27 年的古罗马时代人们就将软木用于酒瓶塞。现在人类已经制造出各种各样的多孔材料。最简单的多孔材料是楞边或壁面呈多边形二维排列，像蜂窝一样周期性地堆积充填平面区间，这种二维多孔材料通称为“蜂窝材料” (honeycombs)，可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，可用于脆弱产品的缓冲包装，从咖啡杯、电子产品到高铁座舱的冲击垫。现有技术不但可以制造聚合物泡沫，而且还可制造金属、陶瓷和玻璃的泡沫材料。多孔材料的应用领域不断增加，主要用于缓冲、减振以及冲击动能的吸收系统，此时多孔材料被称为“多孔缓冲材料” (cellular cushioning materials)。从缓冲材料能量吸收的机理来讲，该用途最终还是来自于其多孔结构。所以，常用缓冲材料大多是多孔材料。

多孔材料的优良性能不单单包括缓冲吸能，还具有吸声、隔热、低密度、比刚度大等特性，可用作隔热、包装、结构、漂浮性材料，还可用作抗静电材料。但本书仅介绍用作缓冲吸能的多孔材料的结构及力学性能，并结合有限元法介绍如何建立其力学分析模型。

1.1 概念

如前所述，多孔材料是一种由形成孔穴 (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。缓冲材料，是指物品因受外力的作用而遭受到冲击或振动时，能吸收外力产生的能量，降低外力大小，以防止物品损坏而使用的防护材料。此类材料包括的范围非常广泛，有天然的材料也有人造的材料。按形状分，有垫块状、薄板状、细片状、纤维状、粒状、隔板、衬垫、框架、压板等。按材质分，有纤维状、气泡状、瓦楞状、皱纹形、蜂窝形、泡沫状、弹簧状等。

当用作缓冲吸能材料时，多孔材料就变成了“多孔缓冲材料”。人造多孔缓冲材料的三种典型结构如图 1-1 所示。其中最简单是多边形作二维排列，像六边形蜜蜂巢穴那样堆积充填平面区间 [见图 1-1(a)]，这种二维多孔材料称为“蜂窝材料”。更普遍的是由孔穴作三维填充的多面体构成，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

仅存在孔穴的棱边（孔穴通过开口的壁面相连），则称该泡沫体是“开孔的”（open-celled）[见图 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密闭隔离，则该泡沫体是“闭孔的”（closed-celled）[见图 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。

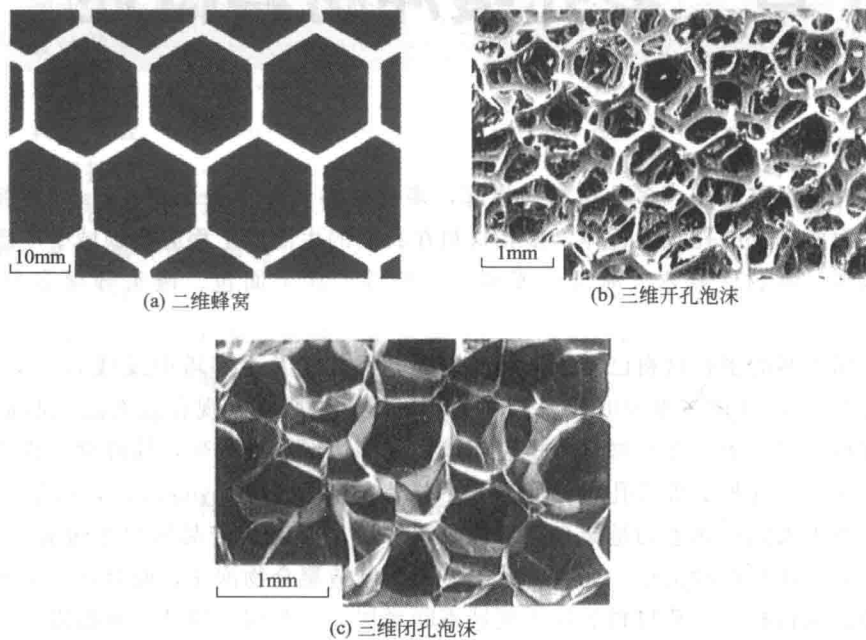


图 1-1 常见多孔材料

多孔材料区别于其他材料最重要的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（壁材）的密度 ρ_s 。多孔缓冲材料中，聚合物泡沫材料的相对密度为 0.05~0.2，软木（cork）的相对密度约为 0.14。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一个更可以认为是包含着孤立孔隙的固体结构。本书论述的是相对密度低于 0.3 的真实多孔固体材料。

1.2 制备方法

尽管聚合物泡沫是最普遍的，但是几乎所有的材料都可以泡沫化。金属、陶瓷、玻璃甚至复合材料，也都可以制出孔穴。在此简单总结一下各种人造多孔缓冲材料的制备方法。

1.2.1 蜂窝材料

六边形蜂窝结构材料 [见图 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，在平整的片材上将黏合剂刷成平行的条状，再将这些片材堆积起来，使它们顺着条纹黏结在一起。这种片材堆积体沿垂直于片材表面的方向拉开（“膨化”）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。将纸张黏合并膨化，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。硅橡胶蜂窝材料即是通过浇铸法制造而成的。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。

1.2.2 泡沫材料

制造不同类型的固体泡沫材料有很多不同的技术。聚合物的发泡是通过将气泡充入液态单体或热聚合物中,使气泡长大并稳定,然后经交联或冷却使其整体固化而成。气体充入方式可以是机械搅拌,也可将发泡剂混入聚合物。物理发泡剂可以是非活性气体,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 dichloride)混入聚合物,加热挥发后在其中形成蒸气泡。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,如钠碳胺(sodium carbon amine)。这些方法都可制备出开孔或闭孔泡沫材料。最终结构取决于熔融流体中的流变状态和表面张力。闭孔泡沫材料若增加一个网化过程,即可打破孔壁从而形成开孔泡沫体。相分离法可制备相对密度低至0.002、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。

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。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上。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。固态加工法通常采用粉末冶金法。通过粉末烧结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。也可以在一有机容器中将金属粉末与发泡剂混合,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上,使浆料干燥并燃烧以除去有机海绵,也可形成泡沫金属。

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(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)渗入聚合物泡沫体内,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 100nm ,密度低至 $4\text{kg}/\text{m}^3$ 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黏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)与黏合剂如环氧树脂混合,可制得合成泡沫材料。另外,将纤维黏合起来可获得低密度垫材(如毡料)。

另外,还有很多多孔材料尽管不应用于缓冲领域,但它们的制备方法却值得我们借鉴或模仿。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。像面包,是使用生物发泡剂(酵母)制得的。另外一些,像玉米片,则使用物理起泡剂(蒸汽)。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、海绵或某些昆虫的巢穴等)。

1.3 性能与应用

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。与其孔壁固体材料相比,多孔材料的密度、热导率、杨氏模量和强度明显低。这使多孔材料具备了其相应致密固体难以胜任的用途,提供了工程创造应用的潜力。低刚性使得多孔材料在许多缓冲减振应用中成为理想的材料。而强度低和压缩应变大则使其在能量吸收应用方面具有优势。多孔缓冲材料除了具有缓冲减振功能以外,还具有更广泛的工程应用。多孔缓冲材料的低密度特性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;其低热导率特性则可用于制作价格低廉而可靠的隔热体,这种隔热体的隔热效果仅次于价格昂贵的基于真空方法的隔热效果。

1.3.1 阻隔材料

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,可制作简单的咖啡杯这样的低级产品,也可制作太空飞船助力火箭隔热装置这样复杂精良的产品。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),都利用了膨化塑性泡沫材料的低热导率。当火患是主要考虑因素(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。同样的,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的要求。结构的热质量越低,则效率越高。泡沫体的热质量与其相对密度成反比。泡沫材料具有非常低的介电损耗,可以进行无衰减或散射的微波传输。电磁波的衰减取决于其传播媒质的介电损失,聚合物泡沫材料的低密度使其具有极低的单位体积损耗因子,适于做天线罩和无线电发射器的外壳。配以合适的填料,聚合物泡沫体还能制成导体,用于抗静电屏蔽层以及价格低廉的传感器。泡沫材料具有消声能力,适于用作噪声消减材料。其高阻尼性能意味着它们具有良好的消声效果,故可用于阶梯教室和会堂的天花板及墙壁的衬里。

1.3.2 缓冲减振

人造多孔固体材料的第二种主要用途即在包装防护方面。有效的包装必须能够吸收冲击力或由于减速而产生的惯性力的能量,避免内装物遭受危险应力的作用。多孔材料特别适合于此种用途。通过控制其相对密度,多孔材料的强度可在很宽的范围内调节。此外,在几乎

不变的应力作用下,多孔材料能够承受很大的压缩应变(0.7或更大)。所以,大量的能量可被吸收,而不会产生高的应力。许多食物是多孔结构,易咬、易嚼、易于消化,就是这个道理。

多孔缓冲材料的低密度性能意味着这种包装很轻,可降低处理和运输费用。单位体积的低成本和易于成形的特性则意味着异形产品也能完全嵌入泡沫内包装,得到保护而且费用低廉。当前,在包装方面应用最广泛的多孔泡沫缓冲材料有聚苯乙烯、聚氨酯和聚乙烯泡沫。

1.3.3 结构材料

许多天然结构材料本身就是多孔固体,如木材、网状骨质及珊瑚等。这些天然多孔固体都可长期承受很大的静态载荷和周期载荷。人类对天然多孔材料的结构应用历史与人类发展史同步。木材仍然是世界上用得最普遍的结构材料。了解了木材的性能对密度和加载方向的依赖关系,可以改进木材的用材设计。人们对网状骨质的兴趣,则来源于了解骨疾和试图设计出损坏骨骼的替换材料的需要。人造泡沫材料和蜂窝材料的应用领域与日俱增,在实际使用中表现出优良的结构性能。

这方面,最明显的例子是夹层镶板。“deHavilland Mosquito”(一种“第二次世界大战”时的轰炸机)的创新设计是使用了由薄夹板蒙皮粘到轻质木材芯骨上去的镶板。在后来的设计中,轻质木材被醋酸纤维泡沫材料替代。今天,现代飞机上采用的夹层板则使用了玻璃或碳纤维复合材料蒙皮。这层蒙皮由金属铝或纸张-树脂蜂窝材料隔开,也可由刚性的聚合物泡沫体隔开,以便使该夹层镶板具有很大的比弯曲刚度和比弯曲强度。类似技术的应用已延伸到另外一些把质量大小作为关键指标的场合,如太空飞船、雪橇、赛艇和可移动的建筑物等。自然界也发现了夹层镶板结构:头盖骨由两层紧密的骨质中间夹合一层海绵状网眼骨质的轻质芯组成;某些类型的树叶结构也遵循夹层原理;而墨鱼骨则是一种精巧的多层夹层镶板组织。

1.3.4 漂浮材料

多孔材料的最早使用市场之一是用作海上浮标。Pliny(公元77年)描述过软木作为钓鱼浮子的用途。今天,闭孔泡沫塑料被广泛用作漂浮结构的支持体以及用于船体漂浮。比起浮袋或浮腔来,泡沫材料的耐损性要好得多,因为闭孔结构使得它们在严重损坏时仍能保持浮力。它们不会因被深浸入水而受到影响,也不会生锈或腐蚀。漂浮物一般由聚苯乙烯、聚乙烯、聚氯乙烯或硅胶树脂等泡沫材料制成。这些聚合物都易于获得闭孔泡沫体结构,从而具备优异的防水和抗污染的能力。在现代帆船设计中,多孔材料已被用作夹层镶板结构的芯材。这种结构提供了船只甲板和壳体的结构刚性以及漂浮性。

1.3.5 其他用途

泡沫材料和蜂窝材料被用于许多不同标准要求的过滤器。高品质金属铸造不会混入杂质的最佳方式:使熔融金属通过开孔陶瓷泡沫体使其过滤。泡沫衬垫可用作便宜且易于处理的空气过滤装置。基于膜技术的分子过滤器可使一种分子从溶液里的其他分子中分离出来,膜本身就是一种相当特殊的开孔泡沫材料。

泡沫片材可用作墨水、颜料、润滑剂甚至化学反应酶的载体。将颜料或化学品充满泡沫体的孔穴后,当泡沫块受压或受撞击时它们就会慢慢地渗出或排出。在泡沫陶瓷或蜂窝陶瓷

上涂一薄层铂，被普遍用作汽车尾气净化催化剂；同样的泡沫陶瓷还可用作氢化作用以及其他有关能量应用方面的镍和其他催化剂的载体。

在作透气防水膜方面，泡沫材料有其特殊的优势。开孔的聚四氟乙烯（PTFE）透气防水布料可缝制多微孔的防水高质量运动服装和休闲服装。类似材料用作人造皮肤，可免烧伤，且又透气。

对于泡沫材料，因其已提及的特殊力学性能，从而使其具有一些特殊的用途：可压缩性使其成为瓶塞的最佳选材，该性能还被用于广告牌以及其他需要撼拔钉子的场合；表面有点粗糙，故具有高的摩擦系数，因此可用作盘子、桌子或地板的防滑表层。

1.4 孔穴

1.4.1 结构

多孔缓冲材料的结构变化可从几乎完美有序的蜜蜂蜂窝到无序三维网络的海绵和泡沫体。大约在 1660 年，Robert Hooke 观测到第一种多孔材料软木的孔穴。其所见使他辨明了植物和生物结构的基本单位，即称之为“孔穴”或“细胞”（cell）。

Hooke 仔细绘制出来的软木孔穴图形，表明其在某一平面上具有近似六边形的形状，而在正交于该面的平面上则具有盒式形状（见图 1-2）。细胞以长列方式堆积，细胞壁非常薄，“就像蜂窝内那些薄薄的蜡膜”。

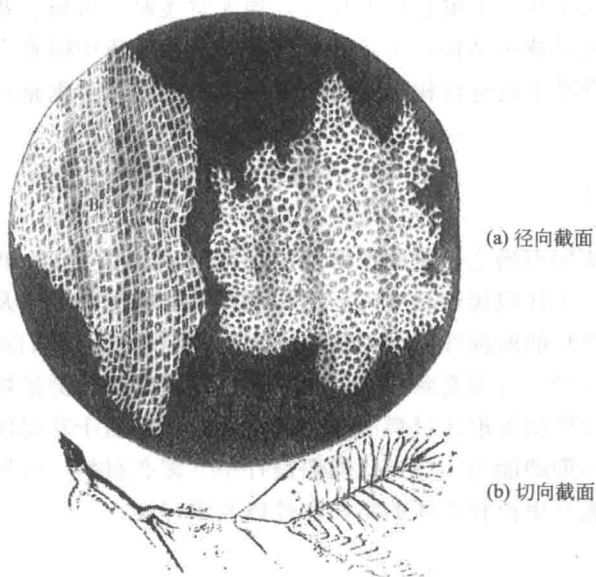


图 1-2 Robert Hooke 观察到的软木径向和切向截面

使数学家、物理学家和生物学家感兴趣的，那就是蜜蜂的蜂巢（见图 1-3），是所有孔构造中最美的和研究得最多的一种结构。蜜蜂的巢穴具有显著的规则性，可用它来概括二维多孔固体。人们大批量地制造金属和纸质的蜂窝材料以作夹层镶板的芯材，而陶瓷蜂窝材料则是作为催化剂的支撑体和热交换器的部件（见图 1-4）。它们大多具有蜂巢似的孔穴，呈六边形 [见图 1-4(a) 和图 1-4(b)]。还可以制备出具有正方形或三角形孔穴的蜂窝材料

[见图 1-4(c) 和图 1-4(d)]。

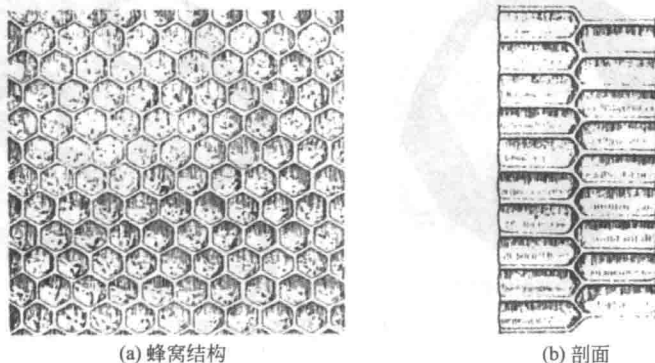


图 1-3 蜂窝结构

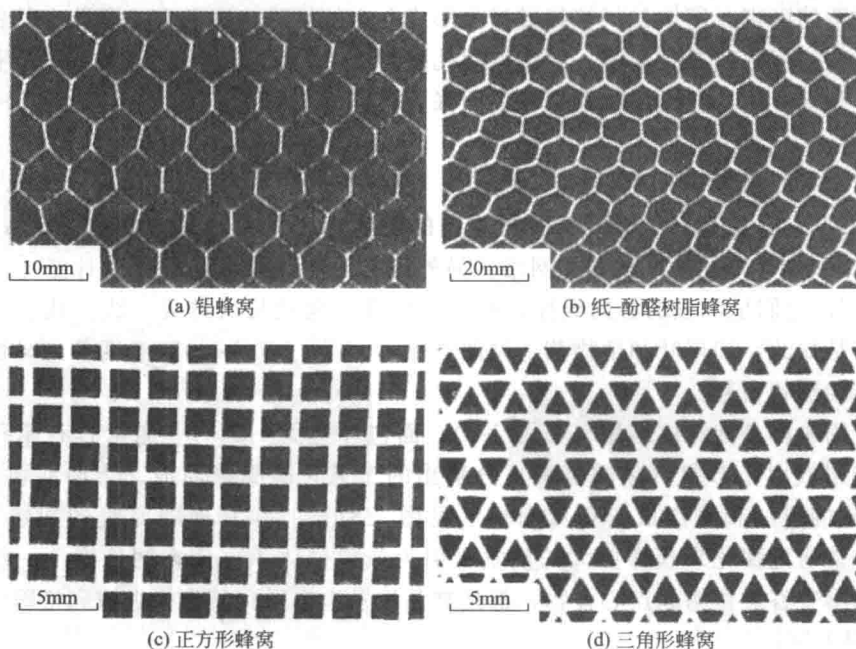


图 1-4 二维多孔材料

三维多孔固体（又称泡沫材料）的几何研究有着几乎与蜂窝材料同样悠久的历史。在 Plateau (1873) 关于固体几何学的论文中，认为孔穴形状是菱形十二面体（一种 12 个面的石榴石形态）。将空间分隔成这种形状的孔穴，其排列是肯定可以实现的，但那不是实现三维多孔固体最有效的方式。一个多世纪以来，单位体积中表面积最小的空间填充孔穴，被认为是 Kelvin (1887) 提出的面略弯曲的十四面体 (tetrakaidecahedron) [见图 1-5(a)]。Weaire 和 Phelan (1994) 将计算机软件用于表面积的最小化处理，探明了单位体积中表面积更小的单位孔穴 [见图 1-5(b)]。这种单位孔穴由 6 个十四面体的孔穴（12 个五边形面和 2 个六边形面）以及 2 个五边形的十二面体构成，它们全都是等体积的。该十四面体孔穴按 3 个正交轴的方式排列，十二面体孔穴则处于其空隙部分，从而产生一个总体简单的立方晶格结构。

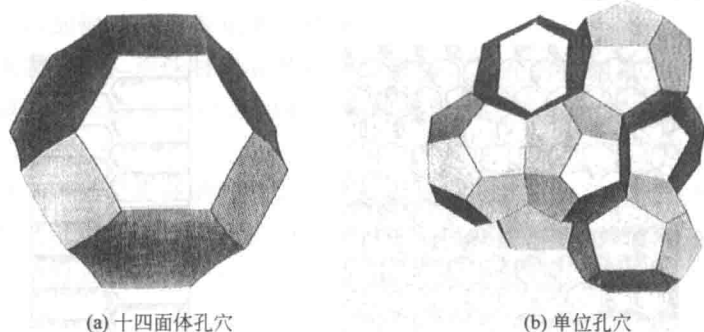


图 1-5 Kelvin 的十四面体孔穴以及 Weaire 和 Phelan 的单位孔穴

图 1-6 显示出了一组人造泡沫材料，其中三种是聚合物的，两种是金属的，另有两种是陶瓷的，还有一种是玻璃的。图 1-6(a) 和图 1-6(b) (均为聚合物) 展示了开孔泡沫材料和闭孔泡沫材料的区别。固体材料被拉成杆而形成孔穴的棱边。通常有 4 条孔穴的棱边在一个顶点交汇联结，但并非总是这样。固体膜使孔壁封闭，但固体均匀地分布在棱边和孔壁两者之间的情况是很少的。在发泡过程中，表面张力将固体拉向孔穴的棱边，而留下一个由粗棱架住的薄壁。

天然泡沫材料展现出了更多的变化形态 (见图 1-7)。其中，如软木或轻木 [见图 1-7(a) 和图 1-7(b)]，具有几乎像蜂窝一样规则的闭孔；另一些如海绵或网状骨骼 [见图 1-7(c) 和图 1-7(d)]，则是棱杆的开孔网络。另外还有一些，如珊瑚或墨鱼骨骼 [见图 1-7(e) 和图 1-7(f)]，它们呈明显的各向异性：孔穴在特殊方向拉长或排成一线。几乎所有的天然多孔固体都是如此，如尾叶和植物茎 [见图 1-7(g) 和图 1-7(h)] 的极度各向异性，主要由其孔穴拉长的形状引起。

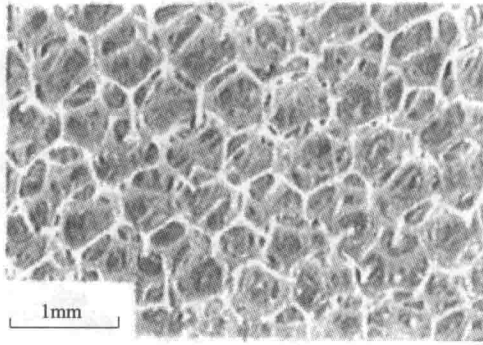
许多食物也都是泡沫体结构 (见图 1-8)，面包 [见图 1-8(a)] 通常具有闭孔，由发酵粉的发酵作用或由小苏打 (碳酸氢钠) 分解出的二氧化碳膨胀而成。蛋白甜饼 [见图 1-8(b)] 由发泡的蛋白和糖组成。巧克力棒 [见图 1-8(c)] 和其他硬而脆的甜饼 [见图 1-8(d)]，则常常通过膨化来获得更大的诱吃吸引力或单位体积更便宜的价格。一些利润最高的种类，如早餐谷类食物和点心食物，都是靠蒸汽发泡来得到其膨松组织和松脆性的 [见图 1-8(e) 和图 1-8(f)]。

低密度固体可由其他方式组合，如纤维随机编织垫，其结点可粘接在一起：纸、毡和棉毛织物均如此；保护美国太空飞船返回大气层着陆用的热瓦 (thermal tiles) 也是这样 (见图 1-9)。

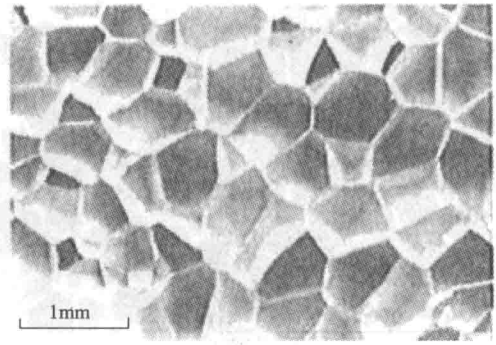
二维泡沫是以高规则方式堆积的，肥皂泡沫和泡沫筏说明了固体泡沫材料的许多拓扑学上的特性 [见图 1-10(a) 和图 1-10(b)]。固体泡沫材料能烧结成三维刚硬低密度的结构。因每个泡都是中空，所以整个结构体的相对密度很低。图 1-10(c) 显示出了铝球堆积形成的结构，其他金属和玻璃也可形成类似的结构。每个粒子都是一个薄球壳，这些壳体在其接触点与相邻球壳粘接。如同更传统的多孔固体一样，该类材料密度低，是一种良好的绝热体。

1.4.2 形状

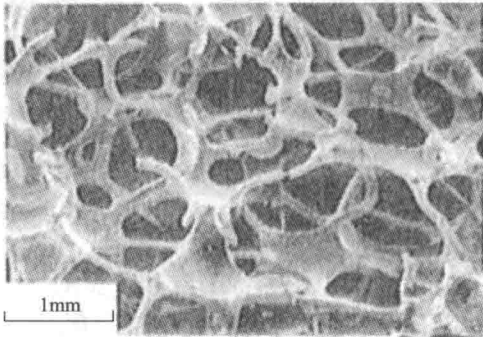
作二维平面堆积填充的单位孔穴见图 1-11，它显示出了各向同性孔穴和各向异性孔穴



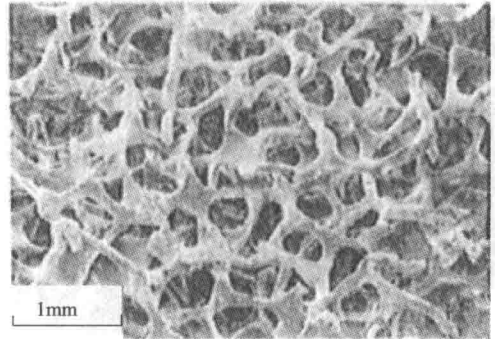
(a) 开孔聚氨酯



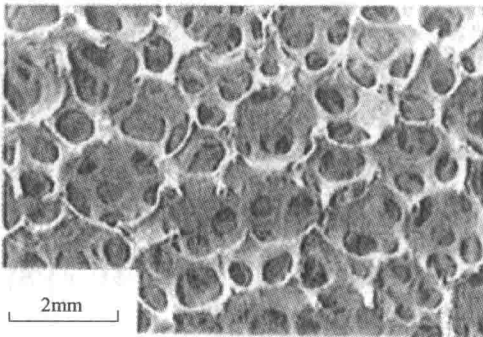
(b) 闭孔聚乙烯



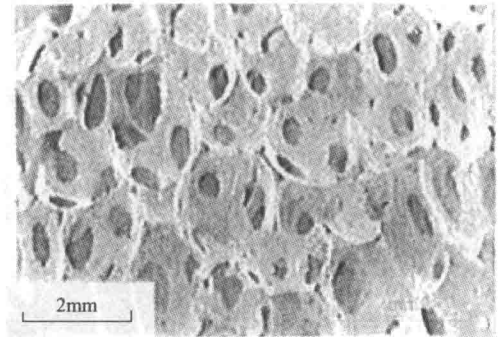
(c) 镍



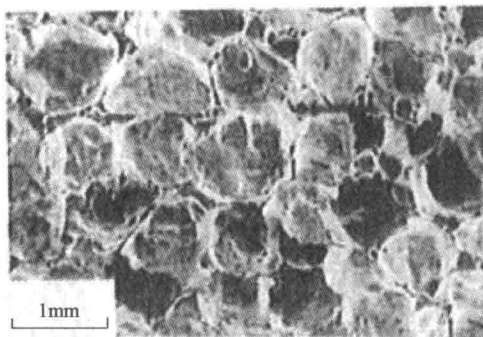
(d) 铜



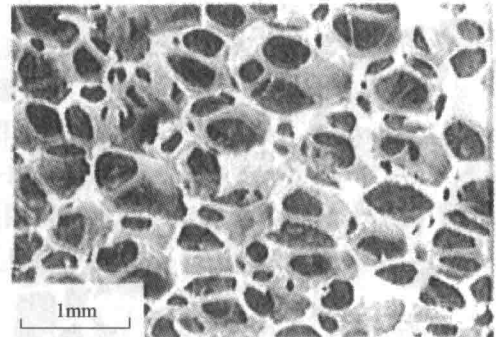
(e) 钛



(f) 莫来石

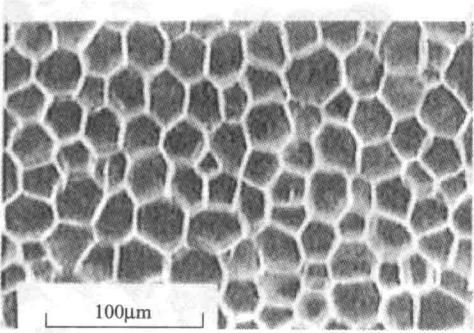


(g) 玻璃

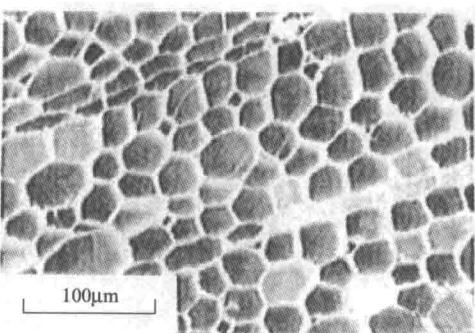


(h) 兼有开孔和闭孔的聚醚

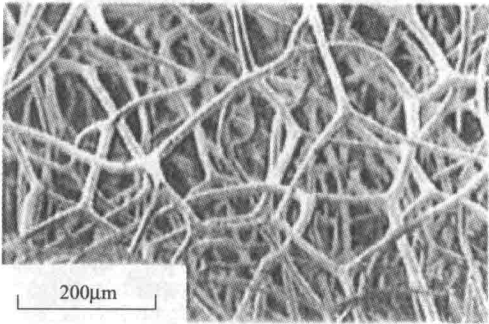
图 1-6 三维多孔材料



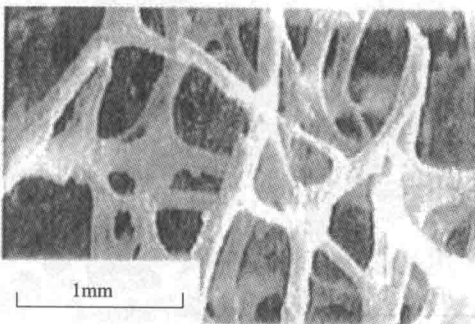
(a) 软木



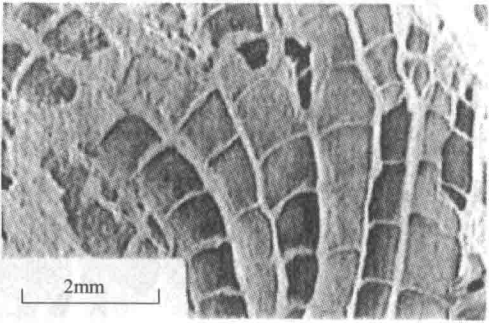
(b) 轻木



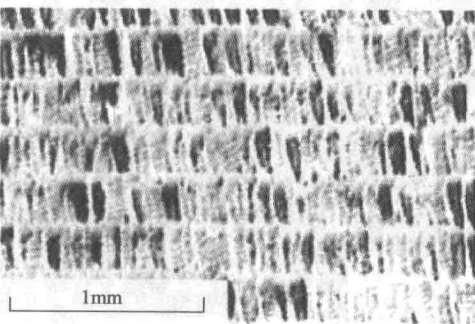
(c) 海绵



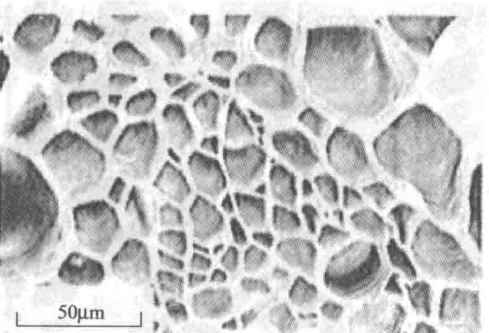
(d) 网状骨骼



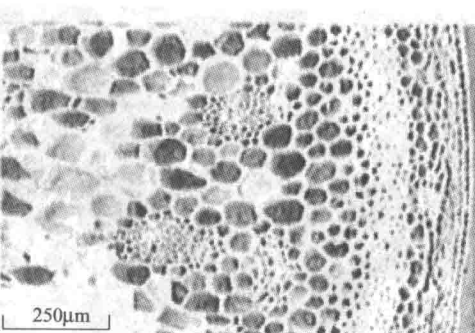
(e) 珊瑚



(f) 墨鱼骨骼



(g) 尾叶



(h) 植物茎

图 1-7 天然多孔材料