

泡沫金属 制备、性能及应用

PAOMO JINSHU ZHIBEI XINGNENG
JI YINGYONG

王录才 王芳 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

013024642

TF125
08

泡沫金属制备、性能及应用

王录才 王芳 著



国防工业出版社

· 北京 ·



北航

C1632453

TF125
08

10305485

内 容 简 介

泡沫金属是多孔材料的一个重要分支,是一种新型的多孔功能复合材料,由于其多孔结构和金属材质同时具有质量轻、透气、吸声、隔热、减振、不燃烧、无污染、高比强度、可重复使用、易回收等多种优良性能,用途范围非常广泛,包括轻质结构材料、吸声材料、过滤材料、建筑装饰材料、热交换材料、生物材料等多个方面,对它的研究会推动整个多孔固体的研究。

本书主要介绍多孔材料和泡沫金属的基本概念和研究发展现状,通孔泡沫金属和闭孔泡沫金属的制备工艺、关键技术和机理分析,泡沫金属的主要性能研究,泡沫金属的各种用途以及一些应用实例。

本书可供从事泡沫金属领域以及设计泡沫金属领域的研究人员、工程技术人员以及高等院校材料和相关专业的师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

泡沫金属制备、性能及应用/王录才,王芳著. —北京:
国防工业出版社, 2012. 10
ISBN 978-7-118-08421-4

I. ①泡… II. ①王… ②王… III. ①多孔金属
IV. ①TF125.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 223183 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 276 千字

2012 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 70.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

总 序

2012年,太原科技大学将迎来60周年华诞。值此六秩荣庆之际,我校的专家学者推出了这套学术丛书,以此献礼,共襄盛举。

60年前,伴随着新中国的成立,伟业初创,百废待兴,以民族工业为先锋的社会主义现代化建设蓬勃兴起,太原科技大学应运而生。60年来,几代科大人始终心系民族振兴大业,胸怀制造强国梦想,潜心教书育人,勇担科技难题,积极服务社会,为国家装备制造行业发展壮大和社会主义现代化建设做出了积极贡献。4万余名优秀学子从这里奔赴国民经济建设的各个战场,涌现出一大批杰出的科学家、优秀的工程师和知名的企业家。作为新中国独立建设的两所“重型机械”院校之一,今天的太原科技大学已发展成为一所以工业为主、“重大技术装备”领域主流学科特色鲜明、多学科协调发展的教学研究型大学,成为国家重型机械工业高层次人才培养和高水平科技研发的重要基地之一。

太原科技大学一直拥有浓郁的科研和学术氛围,众位同仁在教学科研岗位上辛勤耕耘,硕果累累。这套丛书的编撰出版,定能让广大读者、校友和在校求学深造的莘莘学子共享我校科技百花园散发的诱人芬芳。

愿太原科技大学在新的征途上继往开来、再创辉煌。

谨以为序。

太原科技大学校长 郭勇义

2012年6月

前言

“现代人类在制造大的受力结构件时,往往选用密实的固体材料,如钢铁、水泥、玻璃等。而自然界在制造大的受力结构件时,往往使用多孔材料,如木材骨骼、珊瑚等。这其中必然有其奥妙所在。”——Michail F. Ashby。很显然的一个结论是,自然界倾向于以最轻质量、最小能量消耗,完成尽可能多的功能,获得最大的效益,而人类则选择了相反的方向。当然,其中的奥妙不可能一下搞清,需要长时间的研究。但是,向自然学习已成为国际上新材料研发和材料性能改善的一个重要手段,即仿生材料和仿生材料加工学。正是基于这种认识及社会发展的要求,自20世纪六七十年代开始,欧美科学家开始了对多孔材料——一种具有多种优良性能且对自然界和人类生活具有重要意义但一直没有得到足够重视的材料的研究,现已成为了新材料研究领域的一个重要方向。

泡沫金属是多孔材料的一个重要分支,是一种新型的多孔功能复合材料,由于其多孔结构和金属材质同时具有质量轻、透气、吸声、隔热、减振、不燃烧、无污染、高比强度、可重复使用、易回收等多种优良性能,已成为有些特殊条件下无可替代的材料。其用途范围非常广泛,包括轻质结构材料、吸声材料、过滤材料、建筑装饰材料、热交换材料,生物医学材料等多个方面,如汽车的车体结构材料、能量吸收材料、航天飞行器上的减轻质量材料、军用鱼雷的降噪及耐热材料、高速公路上的吸声壁材料等,在军工和科技领域、建筑、环保、汽车、能源、机械、化工等各个工业领域都有重要用途,市场前景非常广阔。此外,对它的研究会推动整个多孔固体的研究,如其本构关系、结构描述、流体在多孔材料中的渗流等问题,具有很高的理论意义。

由于泡沫金属潜在的巨大价值,欧、美、日等国家的许多大学和研究机构,在这一方面进行了深入的研究,在制备工艺、材料结构、性能、基础理论、数值模拟等方面已有了长足的进展,并已开始了商业化应用。国内和国外相比较,起步较晚,但在国家政策的大力支持下,近几年国内的研究进展也很快,由早期的跟踪性研究向原创性发展,由实验室研究向工业化发展,由普通泡沫金属研究向复合结构、复杂结构、纳米化、非晶化泡沫金属的研究发展,并已开始了商业化试生产。

为推进泡沫金属的研究与应用进程,让更多的读者认识这一重要的工程材料,并向太原科技大学60周年华诞献礼,特编著此书。

本书系统介绍泡沫金属的制备技术、性能及应用现状和前景。以作者科研团队的研究成果为基础,介绍国内外的最新研究进展。本书为相关研究和生产人员提供应用方向的引导,同时为应用单位和个人提供技术基础,对推进泡沫金属的应用和研究的深入具有重要意义。全书共分5章:第1章为绪论,介绍多孔材料和泡沫金属的基本概念和研究发展现状,让读者认识多孔材料和泡沫金属;第2章和第3章分别论述通孔泡沫金属和闭孔泡沫金属的制备工艺、关键技术和机理分析,这些内容主要以作者的科研实践为基础,具有新颖性和实用性,有兴趣的读者可以参照这些内容进行泡沫金属的制备和产品的开发,有些观点乃一家之言,期待专家、同行和读者们的批评指正;第4章阐述泡沫金属的主要性能研究,为泡沫金属的应用和评价提供基础;第5章介绍并分析了泡沫金属的各种用途以及一些应用实例,以使读者认识到研究泡沫金属的意义并发现其巨大的商业价值,吸引更多的研究人员、具有战略眼光的投资者加入这一行列,进行研究开发。

除作者科研团队的研究成果外,本书还参考了近年来泡沫金属领域发表的大量文章和著作,在此对这些文献的作者表示衷心感谢!对太原科技大学多年来参与本课题研究的学生、教师、提供研究经费的各类机构以及国内外的合作者们表示衷心的感谢!特别是太原科技大学的张琰教授、柴跃生教授、游晓红教授、任建富高工、武建国老师,是本课题的参加者和见证者,为本书的很多内容做出了特殊的贡献,特别表示感谢!

本书由王录才教授和王芳副教授共同完成。由于作者水平所限,书中难免有错误和不妥之处,恳请各位同行和读者批评指正!

作 者

2012年7月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 多孔材料概述	1
1.1.1 多孔材料的概念	1
1.1.2 多孔材料的分类	1
1.1.3 多孔材料的研究现状及发展前景	3
1.2 泡沫金属概述	4
1.2.1 泡沫金属的概念	5
1.2.2 泡沫金属的分类	5
1.2.3 泡沫金属结构表征	5
1.3 泡沫金属的发展现状与前景	9
参考文献	10
第 2 章 通孔泡沫金属的制备	11
2.1 制备方法简介	11
2.1.1 渗流铸造法	11
2.1.2 熔模铸造法	11
2.1.3 空心球烧结法	11
2.1.4 金属粉末烧结法	12
2.1.5 金属沉积法	12
2.2 渗流铸造法制备泡沫金属	15
2.2.1 工艺原理	15
2.2.2 关键工艺环节分析	16
2.2.3 工装模具及设备	23
2.2.4 产品制备	24
2.2.5 常见缺陷及防止办法	28
2.3 熔模铸造法制备泡沫金属	30
2.3.1 工艺原理	31
2.3.2 关键工艺环节分析	32

2.3.3 常见缺陷及防止办法	45
2.4 通孔泡沫镁合金制备	46
2.4.1 渗流铸造法	46
2.4.2 熔模铸造法	47
2.5 工业化展望	48
参考文献	49
第3章 闭孔泡沫金属的制备	51
3.1 闭孔泡沫金属理论基础	51
3.1.1 泡沫的分类	51
3.1.2 液体泡沫中的气孔特性	53
3.1.3 冶金熔体中的泡沫	56
3.2 制备方法概述	58
3.2.1 熔体发泡法	58
3.2.2 金属前躯体发泡法	62
3.2.3 几种主要制备方法的对比	66
3.3 熔体发泡法制备泡沫铝	66
3.3.1 工艺流程	66
3.3.2 关键工艺环节分析	67
3.3.3 常见缺陷及防止办法	71
3.4 粉末压实熔体发泡法	73
3.4.1 工艺流程	73
3.4.2 关键工艺环节分析	76
3.4.3 发泡过程的理论分析及孔结构的控制	93
3.5 复合结构制备	107
3.6 大尺寸泡沫铝制备技术	111
3.6.1 多前躯体联和发泡	111
3.6.2 连续发泡制备大尺寸泡沫铝	116
3.7 存在问题及发展方向	118
参考文献	119
第4章 泡沫金属的性能研究	122
4.1 概述	122
4.2 力学性能	122
4.2.1 静态压缩性能	122

4.2.2	泡沫铝拉伸性能	136
4.2.3	复合结构的压缩性能	140
4.2.4	动态力学性能	144
4.2.5	力学性能的计算机模拟	147
4.3	声学性能	165
4.3.1	泡沫金属的吸声性能	165
4.3.2	隔声性能	169
4.4	热学性能	171
4.4.1	导热性能	171
4.4.2	散热性能	173
4.5	其他性能	174
4.5.1	阻尼性能	174
4.5.2	电磁学性能	175
4.5.3	流体透性能	175
4.5.4	高温阻燃性能	178
4.6	结束语	178
	参考文献	179
第5章	泡沫金属的应用	181
5.1	引言	181
5.2	功能材料	182
5.2.1	流体透过元件	182
5.2.2	热交换元件	185
5.2.3	电极材料	191
5.2.4	催化剂载体	192
5.2.5	吸能减振材料	195
5.2.6	环保消声材料	198
5.2.7	电磁屏蔽材料	201
5.3	结构用途	201
5.3.1	交通运输材料	202
5.3.2	建筑材料	205
5.3.3	机械材料	206
5.3.4	生物医学材料	207
5.4	结束语	209
	参考文献	209

第1章 绪 论

1.1 多孔材料概述

多孔材料是自然界普遍存在的一种物质形态,如木材、骨骼、蜂窝等,这是自然界长期进化的选择。换句话说,自然界在完成很多任务时选择了多孔结构或多孔与实体的复合,而人类则往往是用相比之下厚重得多的实体材料。现代人类在设计大的受力结构件时,往往采用实体材料,如钢筋、水泥、玻璃等。但是自然界在构建大的受力结构件时,往往采用多孔材料,如动物的骨骼、木材、珊瑚,这必然有其奥妙所在。很显然的一个结论是,自然界倾向于以最轻的质量、最小的能量消耗,完成尽可能多的功能,获得最大的效益,而多孔材料满足了这种要求。多孔材料普遍存在于人们的周围,在结构、缓冲、减振、隔热、消声、过滤等方面发挥着重大的作用。高孔隙率固体刚性高而密度低,故天然多孔固体往往作为结构体来使用,如木材和骨骼;而人类对多孔材料使用,不但有结构的,而且还开发了许多功能用途。

1.1.1 多孔材料的概念

含一定数量孔洞的固体称为多孔材料,是一种由相互贯通或封闭的孔洞构成网络结构的材料,孔洞的边界或表面由支柱或平板构成。多孔材料中的孔隙是一种功能相,它可以使材料具有一定特殊功能特性。多孔材料的概念可以按下述方式定义,一种材料或一种结构至少必须通过下列两种测试之一,才能列为多孔介质:

(1) 它必须含有称为孔隙或孔洞的空间,这些空间不含固体并已包含在固体或半固体的基质之中。这些孔隙通常含有某些流体,如空气、水、油等,或不同流体的混合物。

(2) 它对各流体应是可渗透的,即液体应能从该材料构成的阻隔物的一面渗入,而又能从另一面泄出。在这种情况下,可称为可渗透的多孔介质;否则,称为不可渗透的多孔介质。

1.1.2 多孔材料的分类

多孔材料的分类方法很多,图 1-1 为比较全面的一个分类。

按照孔径尺寸,多孔材料可以分为微孔材料、介孔材料和大孔材料。

按照孔隙率大小,可将它们分成中低孔隙率材料和高孔隙率材料。中低孔隙率材料的孔隙多呈封闭结构(图 1-2)。高孔隙率材料则有三种不同的情况

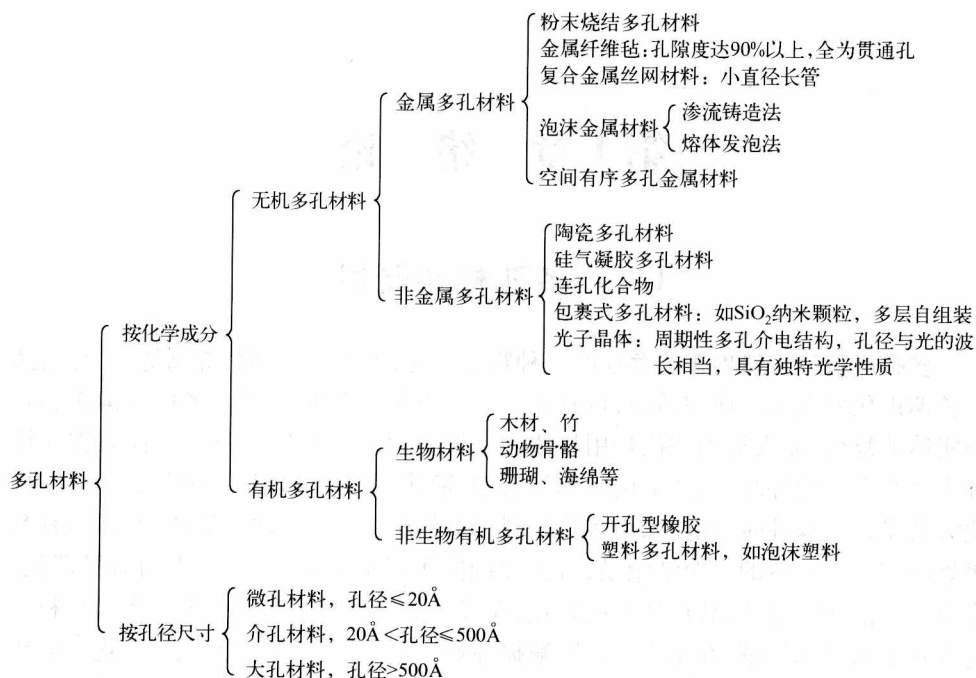


图 1-1 多孔材料分类

(图 1-3):①连续固相为多边形二维排列,类似于蜜蜂的六边形巢穴,故称“蜂窝材料”(图 1-3(a));②连续固相为三维网络,孔隙相互连通,故称“通孔泡沫材料”(图 1-3(b));③连续固相构成孔隙的多面体固体壁面,孔隙呈封闭或半封闭状态,故称为“闭孔泡沫材料”或“半通孔泡沫材料”(图 1-3(c))。

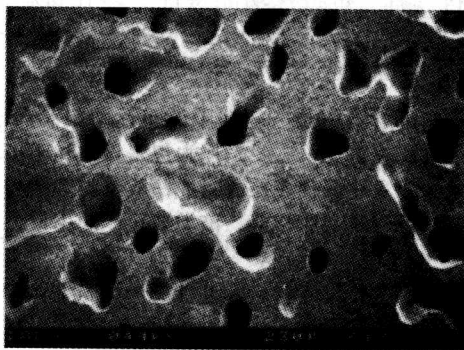


图 1-2 一种低孔隙率闭孔陶瓷泡沫材料微观截面面貌

按材料内部孔隙结构的规则性可分为无序多孔材料和有序多孔材料。无序多孔材料如无定型的氧化硅凝胶、氧化铝凝胶、氧化钛凝胶、微晶玻璃等。有序多孔材料是一类在二维和三维空间上高度有序的多孔材料,它具有孔道排布规则有序、孔径均一、分布很窄等特点。常见的是二维的棱柱结构、三维的桁架和编织结构,

如图 1-4 所示。二维有序多孔材料的结构最简单,通常被选作研究其他复杂材料的基本几何结构,如蜂窝材料、纺织品等。

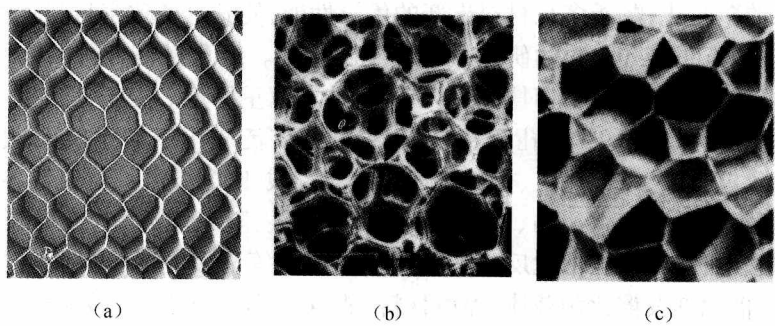


图 1-3 高孔隙率多孔材料
(a) 蜂窝材料; (b) 开孔泡沫材料; (c) 闭孔泡沫材料。

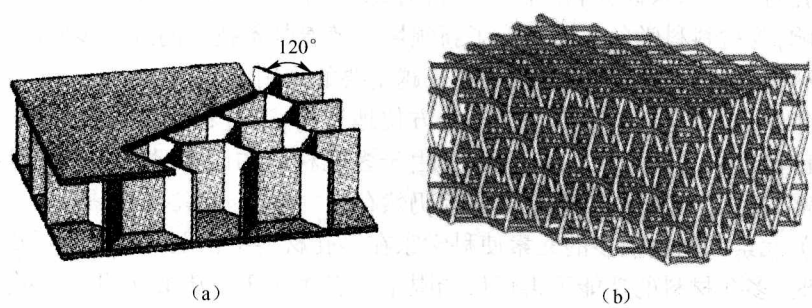


图 1-4 有序多孔材料
(a) 二维有序多孔材料; (b) 编织结构的三维有序多孔材料。

按材质可以分为多孔金属、多孔陶瓷、泡沫碳和泡沫塑料等。常用多孔金属材料的材质有青铜、镍、钛、铝、不锈钢、以及其他金属和合金。承载结构件一定要轻,否则就不如用传统的块体金属或合金来制备,因此可以选用泡沫铝、泡沫镁、泡沫钛或其他轻质多孔金属来适应这种用途。医学应用则选用钛,因为其具有生物组织的相容性,在含有侵蚀性介质或出现高温的情况下,则可选用钛或不锈钢。

1.1.3 多孔材料的研究现状及发展前景

千百年来,天然的多孔材料被人们广泛利用。在 5000 多年前的古埃及金字塔中就已经使用了木制建材,在罗马时代软木就被用作酒瓶的瓶塞。自 20 世纪六七十年代开始,欧美科学家开始了对这种对自然界和人类生活具有重要意义,但一直没有得到足够重视的材料进行研究,并成为了新材料研究领域的一个重要方向。人们开始自己制造多孔材料,其中最简单的是由大量相似的棱形孔洞组成的蜂窝状材料,可用作轻质构件。更常见的是高分子泡沫材料,其用途广泛,可用于小到随处可见的咖啡杯,大到飞机坐舱的减振垫。现代技术的发展使得金属、陶瓷、玻

璃等材料也能像聚合物那样发泡。这些新型泡沫材料正逐渐地被用作绝缘、缓冲、吸收冲击能量的材料,从而发挥了其由多孔结构决定的独特的综合性能。

材料的多孔化,赋予多孔材料崭新的优异性能,使其具备致密材料无法比拟的用途,大大拓宽了多孔材料的研究领域和应用范围。多孔材料有时以结构用途为主,有时以功能用途为主,有时则兼具结构和功能双重用途。由于其丰富的孔隙结构形态、不同的材质、宽广的孔隙率范围,它们已广泛应用于航空航天、电子与通信、原子能、电化学、石油化工、交通运输、冶金、机械、医学、环保、建筑等各种领域,涉及流体分离过滤、流体分布、消声降噪、吸能减振、阻尼缓冲、电磁屏蔽、隔热阻火、热交换、电化学过程、催化反应工程和生物工程等诸多方面,可制作过滤器、流体分离器、催化剂及催化剂载体、隔声材料、消声器、能量吸收器、减振缓冲器、电磁屏蔽器件、电磁兼容器件、换热器、散热器,以及多孔电极等。此外,还可制作多种复合材料、生物材料(如 Ti 合金人工骨骼等)、填充材料和轻质结构材料。

多孔材料的深入研究和广阔应用将对 21 世纪的材料科学技术产生重大而深远的影响,为材料科学的发展开辟了新领域。随着制备技术的进一步发展,多孔材料将在科技、生产、生活等领域发挥越来越重要的作用。

近年来,对多孔材料的研究已经全方位地展开,通过科学工作者的努力,在这一领域已经取得了明显的进步。但是,由于多孔材料的制备、性质、功能等各方面的研究需要综合的知识,因此对其研究仍然存在一些需要解决的问题:

(1) 元素周期表众多的元素使科学家在多孔材料结构上的变化有了更多的选择。同时,多孔材料的功能不再仅仅局限于其表面的活性基团,深埋多孔固体材料中的另一部分也在起着非常重要的作用。

(2) 由于有机功能化的基团在微孔与中孔材料中的应用,科学家更加期望有机合成能成为推动多孔材料发展的有力工具。

(3) 如何实现多孔结构材料从纯静态的控制向动态控制的转变。多孔材料中的一些结构基团可进行光致异构化或者光的二聚作用,从而允许例如气体的渗透、储存、释放等性质的动态改变,但对这方面机理与深化的研究仍然是需要解决的重点问题。

(4) 提高多孔材料在形态与组装方面的可控性。先进材料的应用越来越需要复杂的固体材料能够按照人们的意愿使用,但是,得到某些具有特定形状与功能的多孔材料仍然具有相当的难度。

(5) 如何深化各学科在多孔材料领域的交叉。潜在的应用使其扩展到了新的领域,促进了多孔材料更深的发展,因此交融各学科的知识、技术,推动多孔材料在各学科、各领域的应用显得尤其重要。

1.2 泡沫金属概述

多孔金属属于多孔材料的一种,泡沫金属则属于多孔金属的一类。泡沫金属

的概念从 20 世纪 40 年代后期就开始出现。80 年代中期以后,世界各国开始了对泡沫金属的性能、制备及应用等领域的研究。1943 年美国人 Sosnik 首先进行了铝发泡的尝试并获得了专利技术。1950 年—1980 年近 30 年里,泡沫金属研究基本处于不活跃阶段。1983 年,G. J. DVIES 发表的论文是泡沫金属系统化研究开始的标志。近 20 多年来,泡沫金属的研发十分活跃,是多孔材料的一个重要的组成部分和分支。L. J. Gibson 和 M. F. Ashby 1988 年出版了《多孔固体结构和性能》专著,该著作至今仍是多孔材料领域的重要论著;2000 年,M. F. Ashby 等第一次系统地总结了泡沫金属的制备、性能和应用;2001 年,J. Banhart 的论文对泡沫金属的近期研究和发展工作进行了系统的总结;2002 年,H. P. Degischer 出版了最新的泡沫金属论著,是目前泡沫金属的研究成果的最新总结;90 年代后期,J. Banhart 等创立了泡沫金属国际性学术机构,每年举办国际学术会议等活动。1999 年,第一届世界泡沫金属学术会议(MetFoam'99)在德国不来梅顺利召开,重点是关于泡沫铝的制造和应用。随后,世界泡沫金属学术会议每隔两年召开一次,现已召开过 7 届,泡沫金属俨然已发展成为一门重要的学科和技术领域。欧洲、美国、日本等发达国家的研发活动都十分活跃,已涌现出一批泡沫金属产品的公司(如 Shinko-Wire, Cymat, Aluligt, Schunk, Karnan, Neuman-Alufoam 等),并且不断有新公司加入到该行列。

1.2.1 泡沫金属的概念

泡沫金属是指用特殊方法制成的具有多孔结构的金属材料,由金属基体和孔隙相复合而成,其孔结构特征为,高孔隙率(63% ~ 90%)和较大孔径范围(0.05 mm ~ 5.5 mm),孔径尺寸为毫米级。其特点在于,由于其多孔结构和金属材质而同时具有质量轻、透气、吸音、隔热、减振、吸收冲击、不燃烧、无污染、高比强、可重复使用、易回收等多种优良性能,从而在能源、通信、化工、冶金、机械、建筑、交通,甚至航空航天、武器应用等领域中有着广泛应用前景,成为有些特殊条件下无可替代的材料,是一种新型的多功能结构和功能材料。

1.2.2 泡沫金属的分类

根据泡沫金属孔结构的不同可分为闭孔泡沫金属和通孔泡沫金属,如图 1-5 所示。闭孔泡沫金属的孔洞是各自封闭互不相连的,而通孔泡沫金属的孔洞是相互贯通的。

另外,根据泡沫金属的基体不同可分为泡沫铝、泡沫铁、泡沫镍、泡沫铜等。

1.2.3 泡沫金属结构表征

泡沫金属性能的优劣主要取决于它的孔隙或孔洞的结构,包括气孔的类型、形状、大小、分布、数量、均匀性、贯通性以及比表面积等因素。不同的孔隙和孔洞结构,性能和用途就会有很大差别。一般主要采用下列几个参数来描述泡沫金属的结构特征。

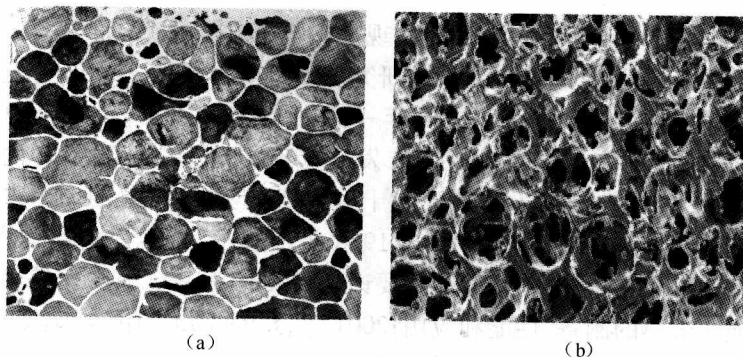


图 1-5 不同孔结构的泡沫金属照片

(a) 闭孔泡沫金属; (b) 通孔泡沫金属。

1. 孔径

孔径为泡沫金属的基本参数,是泡沫金属最重要的指标之一,对泡沫金属的透过性、渗流速度、过滤性能等其他一系列的性质均有显著影响。泡沫金属的孔径是指多孔体中孔隙的名义直径,一般都只有平均或等效的意义。其表征方式有最大孔径、平均孔径、孔径分布等,相应的测定方法也有很多,如断面直接观测(显微分析)法、气泡法、透过法、压汞法、气体吸附法、离心力法、悬浮液过滤法、X 射线小角度散射法等。

其中,直接观测法适用于测量个别或少数孔隙的孔径,而其他的间接测量均是利用一些与孔径有关的物理现象,通过试验测出各有关物理参数,并在假设孔隙为均匀圆孔的条件下计算出等效孔径。

显微分析法是利用样品放大后直接观测泡沫金属孔径的方法。在一定放大倍数下观测试样断面的孔隙结构,通过标准刻度来度量视场中的孔隙个数和孔隙尺寸,从而计算出试样的孔径及其分布,其中孔径分布是不同孔径范围内孔隙个数的百分数。具体测试方法:首先得出断面尽量平整的多孔材料试样,然后通过显微镜或投影仪读出断面上规定长度内的孔隙个数,由此计算平均弦长 L ,再将平均弦长换算成平均孔隙尺寸 D 。大多数孔隙并非球形,而是接近于不规则的多面体构型,但在计算时为方便起见仍将其视为具有某一直径 D 的球体。其表达式为

$$D = L/0.785^2 = L/0.616 \quad (1-1)$$

式中: D 为多孔体的平均孔径; L 为测算处的孔隙平均弦长。

测量通孔泡沫金属的最普遍的方法是气泡法。用浸润性良好的液体浸润试样,通过抽真空或煮沸的方法使试样开孔隙完全饱和后,用气体将试样孔隙中浸入的液体缓慢推出。当气体压力由小到大逐渐达到一定值时,气体即可推开孔隙中的液体而冒气泡(图 1-6),根据此时的压力差就可计算出多孔试样的等效毛细管直径,即

$$d = \frac{4\sigma \cos\alpha}{\Delta p} = \frac{4\sigma \cos\alpha}{p_g - p_l} = \frac{4\sigma \cos\alpha}{p_g - 9.81\rho h} \quad (1-2)$$

式中: d 为多孔试样的等效孔径(m); σ 为试验液体的表面张力(N/m); α 为浸润液体对多孔试样的浸润角($^\circ$); Δp 为试样两侧的静态压力差(Pa); p_l 为气泡形成

的水平面上试验液体的压力(Pa); ρ 为试验液体密度(kg/m³); h 为试验液体表面到试样表面的高度(m)。

最大的孔道出现第一个气泡,计算出来的孔径为试样的最大孔径。该孔径值实际上表征的是孔道最窄部位(图1-7)。

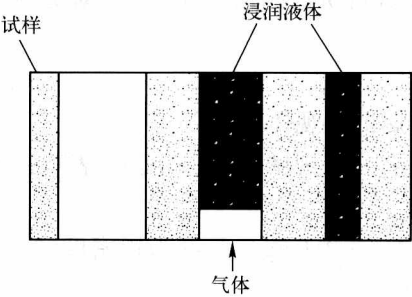


图 1-6 气泡法测试多孔试样孔径的示意图

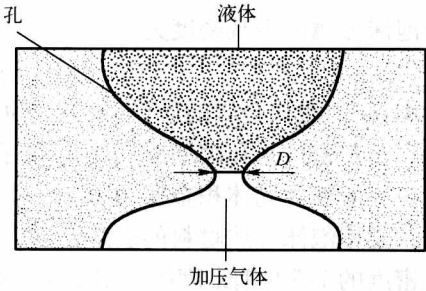


图 1-7 气泡法的孔径计算值的表征部位

2. 孔隙率

泡沫金属的孔隙率是泡沫金属中孔隙或孔洞所占体积与多孔体表观总体积之比率,一般以百分数表示,也可用小数来表示。多孔体的孔隙有通孔和闭孔两种形式,相应地,孔隙率分为通孔率和闭孔率。通孔率和闭孔率的总和就是总孔隙率。平时所说的孔隙率就是指的总孔隙率。其中开口孔隙包括贯通孔和半通孔,这两种孔隙内部的表面都是开放的形态,如图1-8所示。在使用过程中,大多利用的是贯通孔和半通孔。只有作为漂浮、隔热、包装及其他结构件等用途时才需要较高闭孔率。孔隙率的测量方法有直接法、光学法、气体膨胀法、密度法、排水法等。

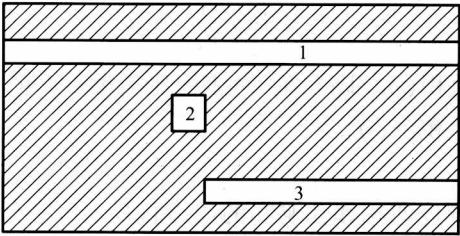


图 1-8 泡沫金属孔结构示意图

1—贯通孔;2—闭孔;3—半通孔。

根据定义,泡沫金属孔隙率的表达式为

$$p = \frac{V_p}{V_t} \times 100\% = \frac{V_p}{V_s + V_p} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中: V_p 为多孔体中孔隙的体积(cm³); V_t 为多孔体的表观总体积(cm³); V_s 为多孔体中致密固体的体积(cm³)。

密度法的依据是同时测量试样的表观密度和试样中基体的密度:

$$P = 1 - V_m/V = 1 - m/\rho_m V \quad (1-4)$$

式中: p 为泡沫金属的孔隙率(%); V_m 为泡沫金属骨架的体积(m^3); V 为泡沫金属的表观体积(m^3); m 为试样的质量(kg); ρ_m 为泡沫金属骨架的密度(kg/m^3)。

3. 表观密度

表观密度是指泡沫金属单位体积内基体材料所占的质量份额, 根据实测法可得泡沫金属的表观密度为

$$\rho = m/V \quad (1-5)$$

式中: m 为泡沫金属的质量(kg); V 为泡沫金属的表观体积(m^3)。

表观密度与孔隙率成反比关系, 孔隙率增大, 表观密度减小; 反之, 表观密度增加。一般仅为同体积金属的 $1/10 \sim 3/5$ 。

常用泡沫金属材料的表观密度为 $180 kg/m^3 \sim 480 kg/m^3$, 约为铝密度的 $1/10$, 钛密度的 $1/20$, 钢密度的 $1/30$, 木材密度的 $1/3$ 。

4. 比表面积

比表面积是指单位质量或单位容积的多孔材料中孔洞和孔隙的内表面积。前者为质量比表面积, 后者为体积比表面积。测定比表面积的方法主要有气体吸附(BET)法、流体渗过法和压泵法等。

气体吸附法是一种测量比表面积的经典方法, 其中包括静态法和动态法, 可测比表面的范围为 $0.001 m^2/g \sim 1000 m^2/g$ 。当测量小比表面时, 应尽可能选用低饱和蒸气压的吸附质, 如氢气、氦气等(以提高测量精度)。采用氦吸附质时, 可测比表面下限达 $0.001 m^2/g$ 。根据吸附法测得泡沫金属的比表面积表达式为

$$S_M = \frac{S}{M_x} \quad (1-6)$$

$$S_V = \frac{S}{V_x} \quad (1-7)$$

式中: S_M 为质量比表面积(m^2/kg); S_V 为体积比表面积(m^2/kg); M_x 为试样的质量(kg); V_x 为试样的体积(m^3)。

5. 通孔率

泡沫金属某一孔洞连通相邻孔洞间的通道直径 r 与原有孔径 R 之比称为泡沫金属孔隙的通孔率(图 1-9)。一般用 φ 表示, 即

$$\varphi = r/R \times 100\% \quad (1-8)$$

一般来说, 泡沫金属的结构特征通常包括以下几个方面:

(1) 孔径较大且变化范围大, $0.1 mm$ 至数毫米(一般粉末冶金多孔金属孔径不大于 $0.3 mm$);

(2) 孔隙率高, 可达 $40\% \sim 98\%$ (一般粉末冶金多孔金属的孔隙率低于 35%);

(3) 密度小, 随孔隙率而变化, 仅为同体积金

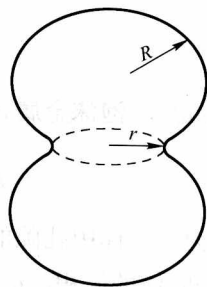


图 1-9 泡沫金属通孔率示意图