

[英] Michael F. Ashby
[美] Anthony G. Evans
[英] Norman A. Fleck
[美] Lorna J. Gibson
[美] John W. Hutchinson
[美] Haydn N. G. Wadley

著

刘培生
王习述 译
李言祥

李言祥 校

泡沫金属设计指南

Metal Foams: A Design Guide



冶金工业出版社

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

泡沫金属设计指南

[英] Michael F. Ashby [美] Anthony G. Evans [英] Norman A. Fleck 著
[美] Lorna J. Gibson John W. Hutchinson Haydn N. G. Wadley

刘培生 王习术 李言祥 译
李言祥 校

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2006

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2006-4933 号

Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier.

Copyright © 2000 by Elsevier.

All rights reserved.

This first edition of Metal Foams: A Design Guide by Michael F. Ashby is published by arrangement with ELSEVIER INC, of 525 B Street, Suite 1900 San Diego, CA 92101, USA

图书在版编目 (CIP) 数据

泡沫金属设计指南/ (英) 阿什比 (Ashby, M. F.) 等著;

刘培生等译. —北京: 冶金工业出版社, 2006. 11

书名原文: Metal Foams: A Design Guide

ISBN 7-5024-4107-7

I. 泡… II. ①阿… ②刘… III. 多孔性材料: 金属材料—设计—指南 IV. TG14-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 120694 号

出 版 人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 张 卫 (Tel: 010-64027930; E-mail: bull2820@sina.com)

马文欢 (Tel: 010-64027931; E-mail: whma2005@126.com)

美术编辑 李 心 责任校对 石 静 李文彦 责任印制 牛晓波

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2006 年 11 月第 1 版, 2006 年 11 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 8.625 印张; 268 千字; 257 页; 1-2000 册

25.00 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

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

内 容 简 介

泡沫金属的研究处于汽车工业、航空工业以及其他重量相依性工业等领域的技术发展前沿,以这种材料制备的金属部件在重量方面的优势明显超过以常规方式铸造或机加工的实体金属部件。本书内容涉及泡沫金属的诸多优点以及泡沫金属的应用,内容包括绪论,泡沫金属的制备,泡沫金属的表征方法,泡沫金属的性能,材料选择的设计分析,简单结构的设计公式,泡沫金属的本构模型,泡沫金属的疲劳设计,泡沫金属的蠕变设计,“三明治”夹层结构,能量控制,包装和冲击保护,吸声和减振,热控制和换热,泡沫金属的电性能,泡沫金属的切割、精加工和连接,成本评估和实用性,实例分析,泡沫金属的供应商以及网址等。

本书简明地解答了工程师们关心的有关泡沫金属设计的关键问题,可以满足人们对这类材料在性能、使用性状和应用等方面的主要信息需求。本书既可作为直接从事泡沫金属设计人员的指导性读物,同时也可供广大材料工作者参考。

译者序

多孔材料具有体积密度小、相对质量轻、比表面积大、比力学性能高、阻尼性能好等特点，已成为一种优秀的新型功能结构材料。由于其优异的物理、力学性能，且兼具功能和结构的双重属性，多孔材料被广泛应用到航空航天、电子与通讯、交通运输、原子能、医学、环保、冶金、机械、建筑、电化学和石油化工等领域，涉及分离、过滤、布气、消声、吸振、包装、热交换、隔热阻火、电磁屏蔽、电化学过程、催化反应工程和生物工程等诸多方面的用途，在科学技术和国民经济建设中发挥着巨大的作用。

国内清华大学出版社于2003年出版的《多孔固体结构与性能》主要介绍了多孔固体/材料的结构和性能，于2004年出版的《多孔材料引论》主要介绍了多孔材料的应用和制备，冶金工业出版社于2005年出版的《多孔材料检测方法》主要介绍了多孔材料的基本指标参量检测，本书则主要介绍多孔材料的应用设计。材料研究的最终目标是对材料的利用，因此本书的出版为多孔材料走向归宿架起了顺通的桥梁，也为上述另外三本出版物建立了有机的联系。至此，我国关于多孔材料方面的书籍基本形成了一个比较完整的体系。当然，这些工作距离“完善的体系”还很遥远，只有通过同仁们的共同努力，不断挖掘，才能使我国多孔材料界的整体面貌不断翻开新的篇章，为国家的科技发展和社会进步做出新的贡献。

本书的全面翻译工作由刘培生教授统筹，全书由李言祥

教授校核。其中内容简介、序言、第 1 章至第 5 章、第 18 章、第 19 章、附录等部分由刘培生翻译，第 6 章至第 11 章由王习术翻译，第 12 章至第 17 章由李言祥负责翻译。目录和索引由三人共同完成。

本书的读者对象主要是从事多孔材料设计和涉及多孔材料领域的科研工作者和工程技术人员，也可以是高等院校材料类和相关专业（如物理、化学、生物、医学、机械、冶金、建筑等专业）的师生。由于译者水平所限，书中不妥之处，还望各位读者批评指正。

译 者

(liu996@263.net)

2006 年 3 月于北京

序

泡沫金属是一类新型的低密度材料，它具有新奇的物理性能、力学性能、热性能、电性能和光学性能。本设计指南既有助于该材料科学的发展，同时也可促进该材料的相应开发和利用。目前，泡沫金属的科学研究和加工制备正在不断取得新的进展，本书试图为材料设计者们提供该材料的有关设计资料。这有助于确立该材料的工业应用，指导加工进程，并促进相关设备装置的发展。

本工作得到 DARPA/ONR-MURI 计划（资助号为 N00014-1-96-1028 超轻金属结构）和英国工程科学委员会（授予研究项目）的支持。许多同行都以个人和集体的方式参与了本书有关内容的编写工作，其中包括哈佛大学工程与应用科学系的 B. Budiansky 教授、H. Stone 教授、R. Miller 教授、A. Bastawros 博士和 Y. Sugimura 博士，剑桥大学工程系微观力学中心的 T. J. Lu 博士、Anne-Marie Harte 博士和 V. Deshpande 博士，麻省理工学院（MIT）材料科学与工程系的 E. W. Andrews 博士和 L. Crews 博士，荷兰阿姆斯特丹大学（UVA）材料科学与工程系的 D. Elzey 教授、D. Syceck 博士和 K. Dharmasena 博士，德国不来梅市 Fraunhofer 材料与应用研究所的 John Banhart 博士，维也纳技术大学的 H. P. Degisher 教授和 Brigdt Kriszt 博士，加拿大 Mississauga-Cymat 公司的 Jeff Wood 博士，以及加利福尼亚州奥克兰市能量研发公司的 Bryan Leyda 先生。

物理常量和单位换算表

物理常量表 (SI 单位制)

物理常量名称与符号	物理常量值
绝对零度温度	-273.2℃
重力加速度、 g	9.807m/s ²
阿伏加德罗常数, N_A	6.022 × 10 ²³
自然对数的基底, e	2.718
玻耳兹曼常数, k	1.381 × 10 ⁻²³ J/K
法拉第常数, k	9.648 × 10 ⁴ C/mol
气体常数, R	8.314 J/ (mol · K)
真空磁导率, μ_0	1.257 × 10 ⁻⁶ H/m
真空介电常数, ϵ_0	8.854 × 10 ⁻¹² F/m
普朗克常数, h	6.626 × 10 ⁻³⁴ J/s
真空中的光速, c	2.998 × 10 ⁸ m/s
理想气体标态体积	22.41 × 10 ⁻³ m ³ /mol

单位换算表

物理常量名称与符号	非法定单位符号	法定计量单位及换算系数
角度, θ	1 rad	57.30°
密度, ρ	1 lb/ft ³	16.03 kg/m ³
扩散系数, D	1 cm ² /s	1.0 × 10 ⁻⁴ m ² /s
力, F	1 kgf	9.807N
	1 lbf	4.448N
	1 dyn	1.0 × 10 ⁻⁵ N
长度, l	1 ft	304.8mm
	1 inch	25.40mm
	1 Å	0.1 nm

续上表

物理常量名称与符号	非法定单位符号	法定计量单位及换算系数
质量, M	1 ton	1000 kg
	1 short ton	908 kg
	1 long ton	1107 kg
	1 lb mass	0.454 kg
比热容, c_p	1 cal/(g · °C)	4.188 kJ/(kg · °C)
	1 Btu/(lb · °F)	4.187 kJ/(kg · °C)
断裂韧性(临界应力强度因子), K_{IC}	1 ksi $\sqrt{\text{in}}$	1.10 MN/m ^{3/2}
表面能, γ	1 erg/cm ²	1 mJ/m ²
温度, T	1 °F	0.556 K
热导率, λ	1 cal/(s · cm · °C)	418.8 W/(m · °C)
	1 Btu/(h · ft · °F)	1.731 W/(m · °C)
体积, V	1 UK gal	4.546 × 10 ⁻³ m ³
	1 US gal	3.785 × 10 ⁻³ m ³
黏度, η	1 poise	0.1 N · s/m ²
	1 lb ft · s	0.1517 N · s/m ²

应力和压力^①单位换算表

单 位	MN/m ²	dyn/cm ²	lb/in ²	kgf/mm ²	bar	long ton/in ²
MN/m ²	1	10 ⁷	1.45 × 10 ²	0.102	10	6.48 × 10 ⁻²
dyn/cm ²	10 ⁻⁷	1	1.45 × 10 ⁻⁵	1.02 × 10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	6.48 × 10 ⁻⁹
lb/in ²	6.89 × 10 ⁻³	6.89 × 10 ⁴	1	703 × 10 ⁻⁴	6.89 × 10 ⁻²	6.46 × 10 ⁻⁴
kgf/mm ²	9.81	9.81 × 10 ⁷	1.42 × 10 ³	1	98.1	63.5 × 10 ⁻²
bar	0.10	10 ⁶	14.48	1.02 × 10 ⁻²	1	6.48 × 10 ⁻³
long ton/in ²	15.44	1.54 × 10 ⁸	2.24 × 10 ³	1.54	1.54 × 10 ²	1

能量^①单位换算表

单 位	J	erg	cal	eV	Btu	ft lbf
J	1	10 ⁷	0.239	6.24 × 10 ¹⁸	9.48 × 10 ⁻⁴	0.738

续上表

单 位	J	erg	cal	eV	Btu	ft lbf
erg	10^{-7}	1	2.39×10^{-8}	6.24×10^{11}	9.48×10^{-11}	7.38×10^{-8}
cal	4.19	4.19×10^7	1	2.61×10^{19}	3.97×10^{-3}	3.09
eV	1.60×10^{-19}	1.60×10^{-12}	3.38×10^{-20}	1	1.52×10^{-22}	1.18×10^{-19}
Btu	1.06×10^3	1.06×10^{10}	2.52×10^2	6.59×10^{21}	1	7.78×10^2
ft lbf	1.36	1.36×10^7	0.324	8.46×10^{18}	1.29×10^{-3}	1

功率^① 单位换算表

单 位	kW (kJ/s)	erg/s	hp	ft lbf/s
kW (kJ/s)	1	10^{-10}	1.34	7.38×10^2
erg/s	10^{-10}	1	1.34×10^{-10}	7.38×10^{-8}
hp	7.46×10^{-1}	7.46×10^9	1	5.50×10^2
ft lbf/s	1.36×10^{-3}	1.36×10^7	1.82×10^{-3}	1

①倍乘以行列交叉处的数字,即可将行单位转换成列单位,如 $1\text{MN/m}^2 = 10\text{ bar}$ 。

目 录

1 绪论	1
1.1 本设计指南概述	1
1.2 泡沫金属的潜在用途	3
1.3 有关泡沫金属的文献	4
2 泡沫金属的制备	6
2.1 泡沫金属制备概述	6
2.2 熔体中注入气体（空气发泡）	8
2.3 熔体中释气粒子分解	9
2.4 半固态中释气粒子分解	11
2.5 使用聚合物或石蜡前体作为型板进行铸造	12
2.6 在开口多孔塑料块上进行金属沉积	14
2.7 捕获气体发生膨胀	15
2.8 中空球结构	17
2.9 两种材料共密实或共铸造而其中一种材料可滤除	18
2.10 气体-金属共晶凝固	19
2.11 泡沫金属制备方面的文献	21
3 性能表征和测试方法	25
3.1 结构表征	25
3.2 表面制备和试样尺寸	27
3.3 单向压缩试验	28
3.4 单向拉伸试验	29

3.5	剪切试验	30
3.6	泡沫金属的多轴（多向）试验	32
3.7	疲劳试验	35
3.8	蠕变试验	36
3.9	压痕试验和硬度测试	36
3.10	表面应变图的测绘	37
3.11	泡沫金属测试方面的文献	39
4	泡沫金属的性能	41
4.1	泡沫金属结构	41
4.2	泡沫金属性能总揽	43
4.3	泡沫金属性能图	49
4.4	量值关系	53
	参考文献	55
5	选材设计分析	57
5.1	背景	57
5.2	性能分布的公式化	58
5.3	单目标优化的两个例子	60
5.4	泡沫金属可能表现优越之处	62
	参考文献	63
6	简单结构设计公式	64
6.1	本构方程	64
6.2	截面惯性矩	66
6.3	梁和镶板的弹性挠曲	68
6.4	梁和镶板的破坏模式	70
6.5	柱、镶板和薄壳的屈曲	71
6.6	扭转轴	73
6.7	接触应力	75

6.8 梁、管及圆盘的振动·····	77
6.9 蠕变·····	79
参考文献·····	81
7 泡沫金属的本构模型·····	82
7.1 完全密实金属的屈服行为·····	82
7.2 泡沫金属的屈服行为·····	84
7.3 结束语·····	88
参考文献·····	89
8 泡沫金属的疲劳设计·····	90
8.1 疲劳概念·····	90
8.2 泡沫金属中的疲劳现象·····	93
8.3 泡沫金属的 S-N 曲线数据·····	96
8.4 单向拉伸与疲劳载荷的缺口敏感性·····	98
参考文献·····	102
9 泡沫金属的蠕变设计·····	104
9.1 实体金属蠕变简介·····	104
9.2 泡沫金属的蠕变·····	106
9.3 泡沫金属的稳态蠕变模型·····	107
9.4 泡沫金属的蠕变数据·····	108
9.5 多轴(多向)应力状态下的蠕变特性·····	109
9.6 泡沫金属芯体的“三明治”夹层结构梁蠕变特性·····	110
参考文献·····	113
10 “三明治”夹层结构·····	114
10.1 “三明治”夹层结构梁的刚度·····	114
10.2 “三明治”夹层结构梁的强度·····	117
10.3 “三明治”夹层结构镶板梁塌陷机制图·····	122

10.4	典型实例	124
10.5	轻质高效结构	126
10.6	均载镶板结构的实例	127
10.7	刚度极限设计方法	135
10.8	强度极限设计方法	141
10.9	“三明治”夹层结构设计建议	148
	参考文献	150
11	能量控制：包装和冲击保护	151
11.1	引言：包装	151
11.2	选择泡沫用于包装	152
11.3	泡沫金属与管状吸能材料的比较	157
11.4	应变速率对坪应力的影响	162
11.5	冲击波在泡沫金属中的传递	163
11.6	爆炸冲击与弹射保护	166
	参考文献	170
12	吸声与减振	171
12.1	背景：结构材料的吸声	171
12.2	泡沫金属的吸声	173
12.3	振动和共振抑制	175
13	热控制和换热	180
13.1	引言	180
13.2	换热系数	181
13.3	热流	183
13.4	压降	185
13.5	换热和压降的平衡	187
14	泡沫金属的电性能	188
14.1	电导率或电阻率测量	188

14.2	泡沫金属的电阻率数据	189
14.3	电导率与相对密度	190
15	切削、精加工和连接	192
15.1	泡沫金属的切削	192
15.2	泡沫金属的精加工	192
15.3	泡沫金属的连接	192
16	成本评估和实用性	198
16.1	引言：实用性	198
16.2	技术模型和性能的衡量标准	199
16.3	成本模型的建立	200
16.4	价值模型的建立	204
16.5	应用	209
17	实例分析	215
17.1	泡沫铝车体结构	215
17.2	整体模压成形的泡沫零件	217
17.3	公路隔声	218
17.4	空间应用的光学系统	219
17.5	流体-流体热交换器	220
17.6	轻质保形压力罐	220
17.7	电池电极	222
17.8	用于马达驱动集成门电路双极晶体管	222
17.9	考虑中的应用	228
18	泡沫金属的供应商	230
19	网址	237
19.1	科研院所网址	237

19.2 供应商网址	238
19.3 其他有关网址	239
附录 材料指标分类	241
索引	245

1 绪 论

泡沫金属是一类具有低密度以及新奇的物理、力学、电、声等性能的新型材料，目前还未得到充分的表征。这种材料在轻质结构、能量吸收和热控制等方面均具有应用潜力，而且其中有一些还相当廉价。本书综述了当前人们对这种材料的制备、性能、使用研究和应用的认知，描述力求简洁。第 1.1 节阐述了本书的基本想法和意图，第 1.2 节列举了泡沫金属的潜在用途，第 1.3 节简单地提供了总体性的源文献，而各章的最后部分则进一步给出了相关的文献情况。

现时的绝大多数商用泡沫金属均是基于泡沫铝和泡沫镍的产品。虽然目前也有对镁、铅、锌、铜、青铜、钛、钢甚至金等进行发泡的方法，但这些多孔制品需要定购。加大研究力度和工艺研制，预计在未来的 5 年里实用化泡沫产品的工业应用将会快速扩展。

1.1 本设计指南概述

作为一类新型材料，泡沫金属还不太被多数工程师所熟悉。这种材料由一些新奇的加工技术制备，其中许多技术还在发展之中（详见第 2 章）。目前，泡沫金属尚未得到充分的表征，其制备过程亦未得到很好的控制，因而其性能具有一定的不稳定性。然而，尽管这一代的泡沫金属已经具有诱人的性能潜势，制备工艺过程控制仍在迅速改进。泡沫金属在轻质刚性结构方面具备了重要的使用效能改进，用于能量的高效吸收、热控制、声控制以及其他更特殊的用途（第 1.2 节）。该材料可以循环利用，而且无毒。上述几个性能可以同时发挥效能，这为泡沫金属应用的市场开发提供了特别的前景。

但是，在今天这种竞争激烈的环境里，只具有前景是不够的。新材料研究与应用的发展过程如图 1.1 所示，一旦有了构想，对新