



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属

理论与技术前沿丛书

SERIES OF THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL FRONTIERS OF
NONFERROUS METALS

泡沫金属

METAL FOAMS

刘培生 陈祥 著

Liu Peisheng Chen Xiang

李言祥 审

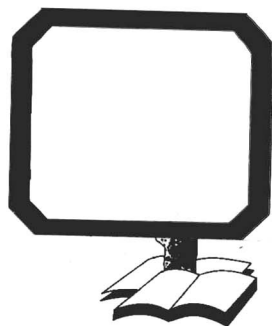
Li Yanxiang



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



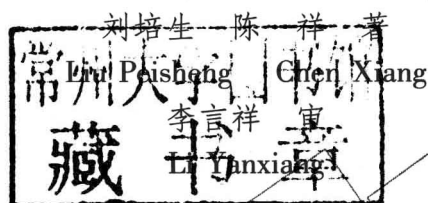
中国有色集团



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属理论与技术前沿丛书

泡沫金属



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团

图书在版编目(CIP)数据

泡沫金属/刘培生,陈祥著. —长沙:中南大学出版社,2012.5

ISBN 978-7-5487-0512-3

I. 泡... II. ①刘...②陈... III. 多孔金属—研究

IV. TF125.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 070741 号

泡沫金属

刘培生 陈 祥 著

李言祥 审

☐责任编辑 刘颖维

☐责任印制 文桂武

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙瑞和印务有限公司

☐开 本 720×1000 B5 ☐印张 22.5 ☐字数 433 千字

☐版 次 2012 年 5 月第 1 版 ☐2012 年 5 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-0512-3

☐定 价 98.00 元

图书出现印装问题,请与出版社调换

内容简介

Introduction

泡沫金属是近些年来得到迅速发展的一种新型功能结构工程材料,其性能优异,用途十分广泛,涉及航空航天、电子与通讯、原子能、电化学、石油化工、交通运输、冶金、机械、生物、医学、环保、建筑等诸多领域。本书介绍了该材料的基本概念、制备方法、用途范围以及基本参量表征和检测等内容,全书共分5章:第1章是对泡沫金属的整体概述,第2章和第3章分别论述各类泡沫金属和泡沫金属复合结构的不同制备工艺和方法,第4章介绍和说明泡沫金属的各种用途,第5章阐述泡沫金属的基本参量表征和检测方法。

本书可作为泡沫金属领域的科研人员、工程技术人员以及广大材料工作者的参考资料,同时也可用作高等院校材料、物理、化工、生物、机械、建筑和医学等相关专业的选阅读物。



作者简介

About the Authors

刘培生，北京师范大学核科学与技术学院教授，博士生导师。曾任射线束技术与材料改性教育部重点实验室学术委员会委员、北师大第一届材料物理教研室主任，原任核物理研究所（现核科学与技术学院前身）副所长。多年从事多孔材料和材料表面改性等方面的研究，作为第一作者或独立发表 SCI 论文近 60 篇，EI 收录 40 余篇；作为第一完成人或独立出版著作 6 部；作为第一发明人或独立发明获准国家发明专利授权 8 项。参加包括国家重大攻关项目、国家科技支撑计划项目在内的合作研究多项，主持承担完成国家自然科学基金、北京市自然科学基金等科研项目 6 项。中国能源学会常务理事，中国材料研讨会首届多孔材料分会发起人，第二、三、四届多孔材料分会主席。

李言祥，清华大学机械工程系教授，博士生导师，系学术委员会副主任，材料精确成形研究室主任，先进成形制造教育部重点实验室轻金属成形制造分室主任。近十年从事多孔金属研究。2004 年起连续担任中国材料研究学会多孔材料分会主席，多次参加国际多孔金属会议并作邀请报告。在我国率先开展定向凝固多孔金属研究，近年还致力于泡沫铝的产业化工作。先后主持和参与包括国家级重点基金项目、973 项目、国家基金面上基金和地方基金项目及与企业合作等科研项目 40 多个，发表论文 160 多篇，出版教材及翻译学术著作等 5 部。长期主讲《材料加工原理》，为国家精品课程“材料加工”负责人。2003 年获教育部提名国家科学技术奖技术发明一等奖。

陈 祥，清华大学机械工程系副教授，先进成形制造教育部重点实验室轻金属成形制造分室副主任。中国金属学会耐磨材料学术委员会委员。主要从事耐磨铸造合金以及泡沫金属的制备和性能研究工作，发表 SCI 收录论文 30 余篇，EI 收录论文 50 余篇，参编教材及学术著作两部。主持及参加多项国家“十五”引导计划项目、科技部重大基础研究前期研究项目、国家自然科学基金、国家自然科学基金联合资助基金重点项目及与企业合作项目。2003 年获教育部提名国家科学技术奖技术发明一等奖。

学术委员会

Academic Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

王淀佐 中国科学院院士 中国工程院院士

委 员 (按姓氏笔画排序)

于润沧	中国工程院院士	古德生	中国工程院院士
左铁镛	中国工程院院士	刘业翔	中国工程院院士
刘宝琛	中国工程院院士	孙传尧	中国工程院院士
李东英	中国工程院院士	邱定蕃	中国工程院院士
何季麟	中国工程院院士	何继善	中国工程院院士
余永富	中国工程院院士	汪旭光	中国工程院院士
张文海	中国工程院院士	张国成	中国工程院院士
张 懿	中国工程院院士	陈 景	中国工程院院士
金展鹏	中国科学院院士	周克崧	中国工程院院士
周 廉	中国工程院院士	钟 掘	中国工程院院士
黄伯云	中国工程院院士	黄培云	中国工程院院士
屠海令	中国工程院院士	曾苏民	中国工程院院士
戴永年	中国工程院院士		

编辑出版委员会

Editorial and Publishing Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主任

罗 涛(教授级高工 中国有色矿业集团有限公司总经理)

副主任

邱冠周(教授 国家“973”项目首席科学家)

田红旗(教授 中南大学副校长)

尹飞舟(编审 湖南省新闻出版局副局长)

张 麟(教授级高工 大冶有色金属集团控股有限公司董事长)

执行副主任

王海东(教授 中南大学出版社社长)

委员

苏仁进 文援朝 李昌佳 彭超群 陈灿华

胡业民 刘 辉 谭 平 张 曦 周 颖

汪宜晔 易建国 李海亮

总序

Preface

当今有色金属已成为决定一个国家经济、科学技术、国防建设等发展的重要物质基础,是提升国家综合实力和保障国家安全的关键性战略资源。作为有色金属生产第一大国,我国在有色金属研究领域,特别是在复杂低品位有色金属资源的开发与利用上取得了长足进展。

我国有色金属工业近 30 年来发展迅速,产量连年来居世界首位,有色金属科技在国民经济建设和现代化国防建设中发挥着越来越重要的作用。与此同时,有色金属资源短缺与国民经济发展需求之间的矛盾也日益突出,对国外资源的依赖程度逐年增加,严重影响我国国民经济的健康发展。

随着经济的发展,已探明的优质矿产资源接近枯竭,不仅使我国面临有色金属材料总量供应严重短缺的危机,而且因为“难探、难采、难选、难冶”的复杂低品位矿石资源或二次资源逐步成为主体原料后,对传统的地质、采矿、选矿、冶金、材料、加工、环境等科学技术提出了巨大挑战。资源的低质化将会使我国有色金属工业及相关产业面临生存竞争的危机。我国有色金属工业的发展迫切需要适应我国资源特点的新理论、新技术。系统完整、水平领先和相互融合有色金属科技图书的出版,对于提高我国有色金属工业的自主创新能力,促进高效、低耗、无污染、综合利用有色金属资源的新理论与新技术的应用,确保我国有色金属产业的可持续发展,具有重大的推动作用。

作为国家出版基金资助的国家重大出版项目,《有色金属理论与技术前沿丛书》计划出版 100 种图书,涵盖材料、冶金、矿业、地学和机电等学科。丛书的作者荟萃了有色金属研究领域的院士、国家重大科研计划项目的首席科学家、长江学者特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、全国优秀博士论文奖获得者、国家重大人才计划入选者、有色金属大型研究院所及骨干企

业的顶尖专家。

国家出版基金由国家设立，用于鼓励和支持优秀公益性出版项目，代表我国学术出版的最高水平。《有色金属理论与技术前沿丛书》瞄准有色金属研究发展前沿，把握国内外有色金属学科的最新动态，全面、及时、准确地反映有色金属科学与工程方面的新理论、新技术和新应用，发掘与采集极富价值的研究成果，具有很高的学术价值。

中南大学出版社长期倾力服务有色金属的图书出版，在《有色金属理论与技术前沿丛书》的策划与出版过程中做了大量极富成效的工作，大力推动了我国有色金属行业优秀科技著作的出版，对高等院校、研究院所及大中型企业的有色金属学科人才培养具有直接而重大的促进作用。

王 注 佑

2010 年 12 月

前言

Foreword

泡沫金属是一类优秀的工程材料,兼具金属和多孔材料两者的结构特点和优异性能。其不但具有良好的传导性、冲击韧性、抗热振性、可焊性以及便于加工和安装等金属的特性,同时具有体积密度小、相对质量轻、比表面积大、比力学性能高、阻尼性能好等多孔材料的特性。可广泛用于航空航天、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、消音、吸震、热交换、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。

我们很荣幸受到中南大学出版社的邀请,参加黄伯云先生担任总主编的首届国家出版基金项目《有色金属理论与技术前沿丛书》,主持其中《泡沫金属》一书的编著。

本书基于近些年来国内外研究者在泡沫金属研究工作中取得的成果,对泡沫金属的有关内容进行了系统的介绍。全书共分5章:第1章是对泡沫金属的概述,本章内容可使对泡沫金属还比较陌生的读者获得对该材料的初步了解;第2章和第3章分别论述泡沫金属及其复合结构的制备方法,这些内容可使读者获悉泡沫金属和泡沫金属复合结构的获取方式;第4章介绍泡沫金属的用途,从而使读者认识到泡沫金属的研究意义和价值所在;第5章阐述泡沫金属若干基本参量、基本性能的特征和检测,为该材料的实际应用提供依据。

在本书的写作过程中,主要参考了本领域近些年来发表的大量论文和一些著作,特别是近8年来学术刊物上发表的综述性文

章和出版的专著，在此对这些文献的作者表示衷心的感谢。由于资料收集和写作时间都比较紧迫，很多本领域的优秀研究论文没有充分地阅读，甚至在查阅时就有很多的遗漏，在此深表歉意。

本书的编写工作由刘培生教授和李言祥教授共同负责，其中第1章、第4章和第5章由刘培生编写，第2章和第3章由陈祥著述，全书由李言祥审阅。

由于作者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，恳请各位读者予以批评指正。

著 者

2011年9月

目录

Contents

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 泡沫金属获取方式举例	2
1.3 非晶态泡沫金属	7
1.4 梯度结构泡沫金属	10
1.5 格子结构多孔金属	13
1.6 纳米孔隙泡沫金属	17
1.7 多孔金属膜与泡沫金属负载膜	27
1.8 泡沫金属夹层结构	30
1.9 泡沫金属特种加工工艺	33
1.10 结束语	35
参考文献	35
第2章 泡沫金属的制备方法	42
2.1 引言	42
2.2 基于液相的泡沫金属制备方法	44
2.2.1 液态金属直接发泡法	44
2.2.2 固-气共晶凝固法	82
2.2.3 粉末冶金法	102
2.2.4 渗流铸造法	110
2.2.5 烧结溶解法	116
2.2.6 熔模铸造法	118
2.2.7 喷射沉积法	119
2.3 基于固相的泡沫金属制备方法	120
2.3.1 金属粉末烧结法	120
2.3.2 中空球烧结法	120

2 / 泡沫金属

2.3.3 粉末成形法	125
2.3.4 浆料发泡法	125
2.4 离子法	126
2.5 气相法	127
2.6 金属泡沫材料的制备方法及物理特性比较	127
2.7 结束语	128
参考文献	128

第3章 泡沫金属复合结构的制备方法 140

3.1 引言	140
3.2 黏结剂法	142
3.3 焊接法	144
3.3.1 钎焊	144
3.3.2 激光焊	146
3.3.3 钨极惰性气体保护焊	149
3.3.4 搅拌摩擦焊	149
3.3.5 超声波焊接	152
3.3.6 扩散焊	153
3.4 粉末冶金法	154
3.4.1 直接压制成形制备泡沫铝夹芯板	155
3.4.2 粉末致密化发泡工艺	157
3.4.3 轧制复合-粉末冶金发泡工艺	160
3.5 热喷涂法	162
3.6 熔体二次泡沫化工艺	163
3.7 铸造法	167
3.7.1 泡沫型芯的制备	167
3.7.2 壳体铸造工艺	169
3.8 吹气发泡法	171
3.9 高温成形	171
3.10 固态发泡法	173
3.11 结束语	174
参考文献	175

第4章 泡沫金属的用途 178

4.1 引言	178
--------	-----

4.2 功能用途	178
4.2.1 过滤与分离	179
4.2.2 热交换	183
4.2.3 多孔电极	191
4.2.4 催化反应	196
4.2.5 吸能减震	199
4.2.6 消音降噪	202
4.2.7 其他应用	212
4.2.8 难熔金属制品举例	215
4.3 结构用途	219
4.3.1 汽车工业	220
4.3.2 建筑业	224
4.3.3 机械部件	225
4.3.4 夹层结构	226
4.4 生物医学用途	226
4.5 应用与贸易	238
4.6 结束语	240
参考文献	241
第5章 泡沫金属基本参量表征和检测	250
5.1 引言	250
5.2 孔率的表征和检测	250
5.2.1 基本数学关系	251
5.2.2 显微分析法	251
5.2.3 质量 - 体积直接计算法	252
5.2.4 浸泡介质法	253
5.2.5 真空浸渍法	255
5.2.6 漂浮法	256
5.3 孔径及其分布的表征和检测	257
5.3.1 显微分析法	258
5.3.2 气泡法	258
5.3.3 透过法	267
5.3.4 气体渗透法	268
5.3.5 液 - 液法	271
5.3.6 气体吸附法	274

5.4 孔隙形貌的表征和检测	277
5.4.1 显微观测法	277
5.4.2 X 射线断层扫描法	278
5.4.3 直流电位法检测孔隙缺陷	287
5.4.4 其他方法	290
5.5 比表面积(比表面)的表征和检测	290
5.5.1 气体吸附法	291
5.5.2 流体透过法	297
5.6 孔隙因素的综合检测法: 压汞法	298
5.6.1 压汞法的基本原理	299
5.6.2 孔径及其分布的测定	299
5.6.3 比表面积的测定	301
5.6.4 表观密度和孔率的测定	302
5.6.5 压汞法的实验装置	303
5.6.6 测试误差分析和处理	304
5.6.7 适用范围	307
5.6.8 几种测定方法的比较	308
5.7 热导率的表征和检测	309
5.7.1 热导率和热扩散率的表征	310
5.7.2 热导率的测量方法	311
5.7.3 泡沫金属热导率的测试	314
5.7.4 性能评析	319
5.8 吸声系数的表征和检测	320
5.8.1 吸声性能的表征	321
5.8.2 吸声系数的检测	322
5.8.3 分析和讨论	329
5.9 电阻率/电导率的表征和检测	330
5.9.1 四电极法	331
5.9.2 双电桥法	331
5.9.3 电位差计法	334
5.9.4 涡流法	335
5.10 结束语	336
参考文献	337

第1章 绪论

1.1 引言

泡沫金属是多孔金属材料中的重要一类。之所以称为“泡沫金属”，主要是因为其具有“泡沫”状的结构形态。泡沫金属的主体结构形态有两类，一是孔隙分布类似于液泡聚集结构的胞状泡沫金属(图1-1)，二是孔棱相互连接呈框架结构的三维网状泡沫金属(图1-2)。胞状泡沫金属视胞状孔隙的打开程度而具备闭孔[图1-1(a)]和开孔的方式，其中开孔方式又有通孔[图1-1(b)]和半通孔[图1-1(c)]等两种可能的结构；三维网状泡沫金属则全为孔隙相互连通的开孔结构(图1-2)，即全为通孔结构。当胞状泡沫金属的孔隙相互隔离而孤立存在时即为闭孔结构，当其孔隙在三维方向上均全部打开时即为通孔结构，当其孔隙仅在三维方向上部分打开或者只有其中某些孔隙打开时即为半通孔结构。在三维网状泡沫金属材料中的固体结构只存在孔棱，而胞状泡沫金属材料则存在孔壁。因此，通孔胞状泡沫金属与通孔网状泡沫金属在结构形态上最显著的区别就是前者存在孔壁，只是孔壁被打通了，打通之处往往发生在孔壁最薄的地方。可见，三维网状泡沫金属和胞状泡沫金属在结构上可以相互演化。三维网状泡沫金属的孔棱逐渐扩展成孔壁，这使孔隙空间逐渐分割，最后就演化成胞状泡沫金属，而胞状泡沫金属的孔壁逐渐收缩最后聚拢到孔棱时即演化成三维网状泡沫金属。

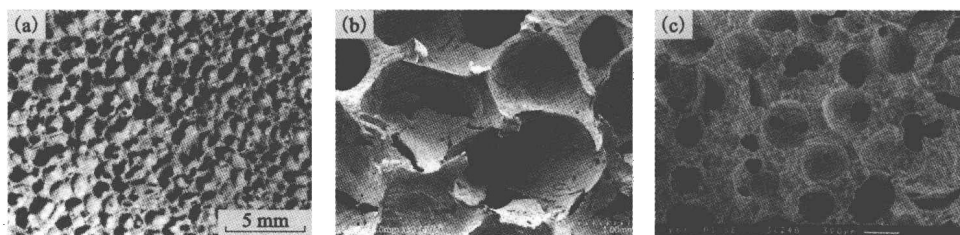


图1-1 胞状泡沫金属形貌

(a)闭孔胞状泡沫铅^[1]；(b)通孔胞状泡沫铁*；(c)半通孔胞状泡沫铝^[1]

(注：标*照片为取自本章作者或其指导研究生所制备的制品，下同)

在获得泡沫金属之初，其制备方法均与“泡”字有关，这与其得名有着直接的