

# 超轻多孔金属

Ultralight Porous Metals

何德坪 等 著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 超轻多孔金属

## Ultralight Porous Metals

何德坪等 著

本书研究成果获得国家自然科学基金重点、面上项目共十项、国家重点基础研究项目(2006CB601201)和十一项国家高技术项目资助

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

以高孔隙为结构特征的毫米级多样化超轻多孔金属是国际正在发展的高新技术前沿,它介于结构材料与功能材料之间。与国外已有的三本涉及闭孔泡沫铝力学设计、制备及后处理工艺专著不同,本书系统总结了作者的研究团队20年来在高技术目标牵引下超轻多孔金属领域的研究成果,抓住目标、本质及应用,是我国第一部涉及毫米级多样化超轻多孔金属自主创新的专著,力求将制备工艺上升为科学。本书主要特点是在多样化高技术目标牵引下,以多学科的视角,物理学的思想和方法,将以认识为目标的基础研究与实践为目标的高技术应用结合起来,努力将认识与实践统一起来。

全书以多样化毫米级孔从熔体中形成、凝固控制规律、性能为主线,包括:以通孔多孔铝为目标的铝熔体在多孔介质中渗流、凝固、孔结构控制规律;以闭孔泡沫铝为目标的铝熔体中泡沫形成、演变、凝固、孔结构控制规律;孔结构、基体与多功能性能的关系;与应用有关的问题;并将铸造、焊接等多种材料加工方法结合起来。本书力求在目标牵引下采用多种物理方法揭示现象、规律及应用背后的科学本质,以便把握多样化的画面。

本书介绍的毫米级多样化超轻多孔金属,涉及广泛高技术和民用领域。读者对象为具有一定物理、高技术、材料、力学、数学、化学、工程等多学科基础的各种高技术及广泛工程技术领域的科学及工程技术人员,包括航天、航空、船舶、车辆、导弹、兵器、环境、建筑、电子、化工等领域,还可以作为高等学校高年级本科生、研究生的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

超轻多孔金属=Ultralight Porous Metals/何德坪等著. —北京:科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-018689-8

I. 超… II. 何… III. 多孔性材料:金属材料 IV. TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 031525 号

责任编辑:刘宝莉/责任校对:钟 洋

责任印制:赵 博/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2008年8月第一版 开本:B5(720×1000)

2008年8月第一次印刷 印张:25

印数:1—600 字数:483 000

定价:200.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

## 序 一

超轻多孔金属，又称金属泡沫，具有多样化的孔结构和基体，是介乎结构材料与功能材料之间的一类新型材料。目前它在技术上已经获得了广泛的应用，特别是在武器装备上作为轻质、能量吸收、阻尼减振及降噪材料受到国内外广泛重视。

自然界原本就存在丰富多彩的多孔材料，诸如珊瑚、藕节、木材、竹材、骨骼等。人类发展金属材料的主流是减少被视之为缺陷和瑕疵的孔隙和裂纹。但是在 20 世纪后期，由于现代技术发展的需要重新引入了多孔金属材料，其特征为毫米级孔径高孔隙率 ( $>63\%$ )，从而实现了材料的轻质化和多功能化，其功能包括高比强度、高比刚度、能量吸收、阻尼减振、降噪（吸声、隔声、消声）、隔热、散热和电磁屏蔽等，体现了结构材料与功能材料之间的相互渗透与兼容。

近 20 年来何德坪教授所领导的科研集体在这一新材料领域进行了广泛而深入并卓具创新性的科学技术研究，从而不仅在国内享有盛誉，在国际也有相当高的知名度。他们的研究从基础物理机制的探索出发，延伸发展，遍及国防和民用的众多技术领域。在完成大量科研工作的同时，创建了以自制设备为主的实验室，还培养了一大批优秀的青年科学家与工程师。

《超轻多孔金属》一书系统总结了何德坪教授所领导的研究集体在超轻多孔金属研究中的丰富成果：它从物理机制跨越到众多的实用技术领域，充分体现了理论与实践，基础与应用、科研与育人之间辩证的统一。该书不仅可供这一领域中专家学者们参考，广大科技工作者也可以从中获得教益与启迪。

冯端

2008 年 2 月

## 序 二

材料是人类文明和社会进步的物质基础，是国民经济的重要组成部分，是高技术发展的关键因素。世界各国对先进材料技术的发展都十分注意，加速发展先进材料技术是实现国家现代化，争取和保持国家科技和军事领先的保证。

传统的材料分为结构材料和功能材料。高技术的发展要求材料不是单一的结构材料或功能材料，而是达到“多功能化”，亦即实现“多功能材料”。例如国防高技术的发展要求新材料不但具有很好的力学性能，而且同时具备“阻尼”、“减震”、“降噪”、“隐身”、“防热”、“隔热”、“抗核”、“吸能”……等两种或两种以上的性能，如结构/阻尼、结构/隐身、结构/吸能、防热/结构、防热/抗核/结构、防热/抗核/隐身、结构/隐身/抗核等。先进材料技术的发展可简要归纳为“结构材料功能化和功能材料结构化”。

以毫米级孔径和高孔隙率为结构特征的超轻多孔材料是一种轻质结构材料。通过对孔结构的调节和基体金属的选择还可以达到“阻尼减振”、“降噪吸声”、“隔热吸能”、“电磁屏蔽”等“多功能化”的目的，是先进材料技术实现“结构材料功能化和功能材料结构化”发展的一种典型的多功能材料。因此，超轻多孔材料的研究受到国内外材料界的广泛关注，是当前材料科学与工程研究与发展的重点领域之一。

何德坪教授领导的研究团队通过 20 年的研究发展，经历了探索研究、基础研究和应用研究等不同阶段，在国家任务和高技术目标牵引下，把握住科技发展方向，基础研究和应用研究紧密结合，既解决了国防建设和国民经济的关键问题，又在学术上从物理学高度深入研究超轻多孔材料的一些科学问题，为技术创新奠定了基础，为超轻多孔材料在我国的发展和应作出重要贡献。

超轻多孔材料是正在发展中的先进材料，是一门多学科综合交叉领域，相信《超轻多孔金属》一书的出版将进一步促进超轻多孔材料的发展，并使超轻多孔材料为我国国民经济和国防建设的发展作出更大的贡献。

何德坪

2008 年 2 月于北京

# 前 言

## 1. 自然界美妙的多孔材料世界与超轻多孔金属的发展

人们对金属的传统认识都力求避免孔隙的产生和存在，然而在自然界中，却广泛存在具有通孔结构的珊瑚、藕节，还有闭孔结构的树木、骨骼、油面筋等物质现象。现存的总有其合理性，这其中必然有着许多科学奥妙。经过长时间观察、思考和积累后，我们对超轻多孔金属材料的研究经历了三个相互联系的发展阶段：①1988年开始在好奇心驱动下，从通孔多孔金属入手，发展为闭孔多孔金属以制备为主的科学探索。②1993~1994年在引起了多种高技术领域高度重视及需求的拉动下，进入在可能高技术应用目标牵引下以物理直觉、洞察力为特征的认识研究阶段，目标在于应用。③1999年至今，在具体、多样化的国家高技术目标牵引下将深入的认识研究与高技术应用之间形成必要的张力，力求将认识与实践结合起来，两者相得益彰，从而迈入快速发展阶段，所取得的成果引起了多方面及先进国家的关注。我们20年的实践表明：将国家目标需求与科学技术前沿结合的顶天立地科技发展方针完全正确，并是可实现的。

## 2. 高技术需求拉动与超轻多孔金属在多样化非共识前沿领域的发展

与其他多孔金属不同，以毫米级孔径、高孔隙率( $>63\%$ )为结构特征的超轻多孔金属，随需求性能不同可调节孔结构(孔径 $d$ 、孔隙率 $P$ 、通孔、闭孔)及基体金属。由于实现了结构材料的轻质( $\rho < 1$ )多功能化，包括轻质、高比强、高比刚、能量吸收、阻尼减震、降噪(吸声、隔声、消声)、热(隔热、散热)、电磁屏蔽及其多功能兼容。由于性能的物理的本质为各种物理场在多孔介质中的衰减，因而它用作轻质结构材料具有功能性；用作功能材料又具有结构性；用作上述各种不同功能材料时，又是互相渗透的。从而展示出结构材料与功能材料及不同功能材料之间不可逾越的分界线正在日益消失的科学和哲学原理。

随需求不同目前已先后发展出空气轻质吸声、隔声材料、轻质消声材料、轻质阻尼减震材料、轻质能量吸收材料、特大冲击能量吸收、防爆材料及异型件等多样化孔结构、基体、尺寸和形状的新型材料，并发展了铸、焊等多种材料加工结合的方法，展示了多样化的应用发展前景。

## 3. 为满足多样化高技术的需求，超轻多孔金属从材料制备范畴发展为物理为主多学科交叉的范畴

由于不同高技术需求的性能主要为不同物理性能，包括吸声、消声、阻尼减震和能量吸收。闭孔结构的形成过程为不同铝熔体的泡沫化和凝固过程；通孔

孔结构的形成过程为不同铝熔体在多孔介质间渗流和凝固过程，这些都是物理过程。为精确控制两类超轻多孔金属的孔结构及其孔结构的一致性，必须深入揭示上述两类超轻多孔金属形成过程的物理本质。所采用的方法包括假设模型、数学演绎法、物理归纳法、物理模拟法、数值模拟法、正演反演法及多种方法的结合，这些方法本质上都是以物理为主的方法。与国外的研究工作相比，作者的研究特色是在各种高技术需求拉动下，较为深入地揭示了从熔体制备、控制两类超轻多孔金属不同孔结构现象及规律背后的物理本质，并在不同高技术中获得成功应用，从而在实践中检验认识，在认识与实践中紧紧抓住目标、本质、应用三个重要环节。

4. 为适应多种高技术领域应用，关于超轻多孔金属，国内亟须一本简明的专著

全书以何德坪教授为首的研究团队已发表的 140 多篇论文的主要内容为基础形成，仅在高技术领域有限范围发行本书。笔者力求展示在目标牵引下，揭示科学本质的认识研究与高技术应用相结合的研究特色，将熟知的光线透过哲学、物理学的多棱镜展现多彩的画面及其本质，同时也力求回答如下几个问题，即从国家需求还是书本出发；认识与实践分离还是两者结合；检验认识的标准是什么；前沿领域研究是引进国外设备还是自制设备等。

以往的文献（见第一章参考文献），[1]、[2] 为围绕力学性能设计的著作，[3] 为在会议论文集基础上形成的著作，主要涉及闭孔泡沫铝的制备及后处理工艺等，[4] ~ [7] 为 4 次国际专业会议论文集。

本书则在目标牵引下，以多学科的视角，采用物理学的思想及方法，以不同熔体中，毫米级孔结构的通孔、闭孔两大类高孔隙率超轻多孔金属多样化孔结构的形成过程及控制为主线，也涉及多孔金属有关其他材料加工的新进展，研究了孔结构与性能的关系，并提出了高技术领域应用中应注意的问题。全书包含如下内容：

- 第 1 章 毫米级孔多样化超轻多孔金属的发展
- 第 2 章 超轻多孔金属的孔结构
- 第 3 章 多样化通孔多孔铝合金的制备及孔结构控制
- 第 4 章 铝熔体在多孔介质中渗流过程
- 第 5 章 多孔铝合金的性能及应用
- 第 6 章 熔体中泡沫纯铝的形成及一致性控制孔隙率泡沫纯铝
- 第 7 章 铝合金熔体多样化泡沫铝合金的形成过程、控制及性能
- 第 8 章 泡沫铝合金异型件的二次泡沫化形成过程及应用
- 第 9 章 三明治结构
- 第 10 章 超轻多孔金属的其他形成、加工方法及使用性能

本书是作者历经 20 年对超轻多孔金属这一敏感新材料进行持续研究的成果总结，概括了研究团队已取得的主要认识和研究进展，但对今后这一领域的发展而言，由于高技术领域不断增长的迫切需求，本书仅是超轻多孔金属研究的冰山一角。

对于非专业读者，希望通过本书能对超轻多孔金属有所了解，如果通过本书所展示的研究过程能认识到在今后可能的工作或研究中应以国家目标为需求，将理性的眼光透过哲学这一多棱镜正确理解认识与实践，现象与本质，本质与应用，检验认识的标准，共性与差异，自主与借鉴等一系列相关的科学观点，那么对于前沿科技领域的发展将受益匪浅，这也将是本书的意外收获。

本书的读者应具备一定的知识基础，包括物理学（熔体中泡沫稳定性及熔体在多孔介质间渗流过程、能量吸收、阻尼、声、热和电磁等）、高技术、材料学、力学、化学及哲学的基本概念，因为作者尝试以目标为牵引，试图以多学科的视角展示超轻多孔金属多样化的画面。

限于作者学识和水平，书中难免存在不妥之处，希望读者不吝指正。

何德坪

2008 年 6 月



# 目 录

序一

序二

前言

第 1 章 毫米级孔多样化超轻多孔金属的发展	1
参考文献	7
第 2 章 超轻多孔金属的孔结构	10
2.1 孔隙率 $P$ 的度量	10
2.2 孔径 $d$ 及其分布	10
2.3 泡沫铝孔结构的分形特性研究	21
2.4 XCT 超轻多孔结构断层扫描检测	24
参考文献	30
第 3 章 多样化通孔多孔铝合金的制备及孔结构控制	32
3.1 高压渗流制备通孔多孔铝合金及孔结构控制	32
3.2 低压渗流制备及孔结构控制	38
3.3 负压渗流制备通孔多孔铝合金及孔结构控制	43
3.4 多孔铝合金的孔隙率控制的物理数学模型	47
3.5 多孔铝合金的孔隙率梯度及控制	55
3.6 多孔铝合金的孔径调制	63
3.7 宽范围孔径、孔隙率多孔铝合金的制备及孔结构控制	69
3.8 海绵铝的形成及其孔结构	74
参考文献	81
第 4 章 铝熔体在多孔介质中渗流过程	83
4.1 铝熔体在多孔介质中的渗流过程	83
4.2 负压渗流制备多孔铝合金的渗流过程模拟	89
4.3 铝合金熔体在多孔介质中的二维微管渗流模型	93
4.4 铝熔体在多孔介质中渗流过程的数值模拟	100
4.5 铝熔体在多孔介质中渗流能力的数值模拟	110
参考文献	121
第 5 章 多孔铝合金的性能及应用	123
5.1 多孔铝合金的阻尼性能及影响因素	123

5.2	多孔铝合金的机械与吸能性能 .....	129
5.3	多孔铝合金的流通性能及影响因素 .....	144
5.4	多孔铝合金空气和水下吸声性能及影响因素 .....	146
5.5	多孔铝合金的热性能及影响因素 .....	149
	参考文献 .....	159
<b>第6章</b>	<b>熔体中泡沫纯铝的形成及一致性控制孔隙率泡沫纯铝</b> .....	<b>161</b>
6.1	铝熔体的搅拌和混匀 .....	161
6.2	铝熔体的黏度检测及黏度对孔结构影响 .....	168
6.3	氢化钛热分解反应动力学及与泡沫化过程的关系 .....	180
6.4	泡沫铝凝固过程中孔隙率的变化 .....	188
6.5	位移传感计算机测量系统一致性控制熔体泡沫纯铝孔隙率 .....	194
6.6	泡沫铝的压缩形变和吸能性能 .....	198
6.7	一致性控制孔隙率泡沫纯铝的应用 .....	205
	参考文献 .....	209
<b>第7章</b>	<b>铝合金熔体多样化泡沫铝合金的形成过程、控制及性能</b> .....	<b>212</b>
7.1	合适铝合金熔体的增黏及泡沫化特性 .....	212
7.2	泡沫铝合金固-液两相区的附加力场及解决收缩缺陷的新凝固方法 .....	219
7.3	球形孔泡沫铝合金的形成 .....	228
7.4	小孔径球形孔泡沫铝合金的形成与氢化钛热分解特性 .....	234
7.5	新型高强度泡沫铝合金的压缩及能量吸收性能 .....	243
7.6	高应变速度冲击下泡沫铝合金的吸能性能 .....	248
7.7	弹性变形范围内泡沫铝合金的超声衰减性能 .....	254
7.8	球形孔泡沫铝合金压缩性能与理论模型 .....	259
7.9	结语 .....	265
	参考文献 .....	266
<b>第8章</b>	<b>泡沫铝合金异型件的二次泡沫化形成过程及应用</b> .....	<b>269</b>
8.1	氢化钛的二次热分解 .....	269
8.2	铝合金二次泡沫化过程实验 .....	274
8.3	泡沫铝合金二次泡沫化过程关键因素控制 .....	279
8.4	预处理对于二次泡沫化过程的影响 .....	286
8.5	二次泡沫化与其他方法的比较 .....	291
8.6	二次泡沫化制备泡沫铝合金异型件的应用 .....	292
	参考文献 .....	295

<b>第 9 章 三明治结构</b> .....	297
9.1 泡沫铝层合梁的三点弯曲变形 .....	297
9.2 高比强多面体泡沫铝合金三明治梁 .....	304
9.3 高比强球形孔泡沫铝合金的三点弯曲变形 .....	312
9.4 格栅三明治板的动力性能 .....	319
9.5 高比强泡沫铝合金中空层合圆管的性能 .....	328
9.6 高比强多孔铝合金中空层合圆管的压缩性能 .....	333
参考文献.....	340
<b>第 10 章 超轻多孔金属的其他形成、加工方法及使用性能</b> .....	343
10.1 塑性加工形成新型球形孔多孔金属.....	343
10.2 超轻多孔金属的焊接方法.....	348
10.3 超轻多孔金属的加工与连接技术.....	353
10.4 超轻多孔金属的耐腐蚀性能.....	361
10.5 超轻多孔金属的循环利用.....	368
参考文献.....	373
<b>附录 I 东南大学已取得的有关知识产权成果</b> .....	376
<b>附录 II 东南大学在超轻多孔金属领域公开发表的主要文章目录</b> .....	378
<b>后记</b> .....	382

# 第 1 章 毫米级孔多样化超轻多孔金属的发展

以毫米级孔隙为结构特征的超轻多孔金属,由于实现了结构材料轻质多功能化<sup>[1~8]</sup>及众多高技术的需求拉动,历经多年的发展,已经成为非共识、多样化的国际前沿领域。当我们将其发展过程通过物理学的多棱镜就会获得新视觉:这一大类多样化的新材料,本质上是属于物理学范畴为主的多学科综合交叉领域。以往以材料科学的视角看待这一属于物理学范畴的新材料,延缓了这一领域的发展<sup>[9]</sup>。

## 1. 毫米级超轻多孔金属的一般结构、性能特点

### 1) 结构特点

①较大的毫米级孔径: $d=0.5\sim 6\text{mm}$ ;②较高的孔隙率: $P=52\%\sim 92\%$ ;③有通孔、闭孔两大类,孔形状为球形、类球形、多边形及不同孔结构(不同孔径  $d$ 、不同孔隙率  $P$ );④低的比重:当  $P=63\%$  时,  $\rho=1$ ,通常  $\rho\leq 1$ ;⑤大的比表面;⑥金属骨架可以为纯铝、铝合金及其他金属。

### 2) 性能特点

①轻质高比强度、高比刚度;②弹性变形范围内具有高的阻尼减振的性能;③塑性变形范围内具有高能量吸收性能;④优异的降噪性能(吸声、隔声、消声);⑤隔热及散热性能;⑥电磁屏蔽;⑦多功能兼容。性能的物理本质为:不同物理场与多孔介质相互作用。

在本书后面的章节中将进一步展开多样化毫米级超轻多孔金属各自的特殊结构和性能。

## 2. 结构材料与功能材料界限及新材料发展的新趋势

(1)人们总是将结构材料与功能材料形而上学地视为两类互不相容的材料,而超轻型多孔金属实际上是在结构材料中引入了各种受控的孔洞(球形,多边形,不同孔径、孔隙率),并调节其基体金属,实现了结构材料轻质多功能化。当用作结构材料时又具有功能性,而用作不同功能材料时又具有结构性,从而反映了结构材料与功能材料互相渗透的新趋势。

(2)传统上将能量吸收材料、阻尼减振材料、降噪(隔声、吸声、消声)材料、隔热材料、散热材料、电磁屏蔽材料视为不同的功能材料。但这一类别材料性能的物理本质为各种物理场在多孔介质中的衰减行为,因而各种功能材料又是互相渗透的。例如,当用作能量吸收材料时,通常在进入塑性范围形变时吸收能量,但当在弹性

范围内应力波在多孔介质界面传递过程的衰减又成为阻尼减振材料。对于通孔多孔材料,在强迫对流条件下表现出散热性能,反之它是一种隔热材料。当用作消声材料时又具有能量吸收性能。因而作为各种功能材料使用时,各种功能是互相渗透而兼容的。当将这些熟知的结构材料与功能材料之间及各种功能材料之间的关系透过哲学的多棱镜,又可以看到两者之间没有明确的分界线,这展示了结构材料与功能材料之间、各种功能材料之间不可逾越的分界线正在日渐消失的哲学原理。

(3)新材料发展的趋势。著名物理学家冯端和朱光亚教授分别预言了新材料发展的趋势:“近年来表面与界面起突出作用的新型材料受到广泛重视,在各种外界条件下,常常可以发现多种多样的物理现象和效应,揭示出新的规律,形成新的概念,而在应用上又很有潜力,具有广泛的发展前景”<sup>[10]</sup>,“材料发展中的一种新趋势是结构材料和功能材料互相渗透,即结构材料多功能化和功能材料结构化,这正是材料发展中的综合集成”<sup>[11]</sup>。

我们从 1988 年至今在超轻多孔金属这一多样化领域发展的经历表明上述预言是完全正确的,也与恩格斯在《反杜林论》中的预言“严格的不可逾越的分界线正在日益消失<sup>[12]</sup>”相吻合。

### 3. 毫米级超轻多孔金属的发展过程

在早已发展的用以过滤为主的微米级通孔粉末冶金多孔金属,根据需求提出了制备高孔隙率( $P=40\% \sim 50\%$ )的发展方向<sup>[13]</sup>(文献[13]是国内最早提出这一新方向的文献,由于粉末冶金制备方法的局限性难以获得高孔隙率,因而未能获得发展)。

文献[14]、[15]是 1983 年国外最早涉及毫米级超轻多孔金属的文献。它们是英国 Davies 和 Shu Zhen 关于金属泡沫制备、性能和应用的评述<sup>[14]</sup>和 Ashby 和 Medalist 的胞状固体力学方面性能的评述<sup>[15]</sup>。

美国为适应高技术的需求 1985 年在国际上最早秘密采用熔模法制备通孔多孔金属(ERG 方法),作为三明治夹心材料用于航天器上,该方法于 2000 年解密。1987~2000 年共有 9 家小型车间小规模以不同方法制备生产各种毫米级多孔金属(包括熔模法、发泡法、粉末冶金法、吹气法)。

毫米级超轻多孔金属结构这一非共识多学科高技术前沿领域经历了两个发展阶段:

#### 1) 20 世纪 50~90 年代技艺式探索发展阶段

20 世纪 50~70 年代在美、苏争夺高技术前沿领域制高点的形势下,比重小于 1 以孔隙为特征的超轻多孔金属得到高度重视,各国竞相秘密发展。

从铝熔体中采用泡沫化方法制备泡沫铝一直作为重点发展领域,美国 Elliot 从 1951 年开始探索直至 20 世纪 70 年代,由于种种原因,在地面和空间实验都未

获成功。1987 年日本学者秋山茂等历经 24 年技艺式研究,取得了不控制孔隙率泡沫纯铝制备成功,以声学应用为目标。

1988 年后,在互不了解各国发展趋势状况下,中国分别对通孔多孔铝及闭孔泡沫铝进行了好奇心的探索,以直觉在可能高技术目标牵引下,进行认识研究,目标为高技术应用;德国及欧洲发展了粉末冶金发泡法制备闭孔泡沫铝,逐步以汽车为需求;加拿大和瑞典则以建筑为对象发展了通气法制备闭孔泡沫铝。20 世纪 50~90 年代,这一领域处于各自发展、互不交流的技艺式探索研究阶段。在这阶段尽管未召开过国际会议,但零星进展引起了拥有高技术的国家的高度重视。

这一早期发展阶段的特点为采用技艺式制备的研究,尚未揭示其科学本质;尚未认识其多样化的结构与性能;应用探索多为民用领域;并将闭孔泡沫铝与通孔多孔铝混称泡沫金属。

#### 2) 1995~2006 年进入科学快速发展阶段

1995 年开始,美国国防高等研究署(DARPA)和海军研究局(ONR)共同资助哈佛大学、剑桥大学和麻省理工学院主持的有关超轻金属结构的大型项目,主要研究泡沫铝的设计、性能及应用。以设计为中心,材料制备为辅,以闭孔泡沫铝设计作为发展重点,但没有明确的多样化目标牵引,因而并未发展与需求相适应的多样化的超轻多孔金属的制备,以力学为主的研究者还不具备发展多样化超轻多孔金属的基础。美军方各个军种都投入经费进行应用研究,如波音获 600 万美元资助。在此基础上,近年来又对点阵材料(lattice material)的研发提供强力资助。此外,美国能源部依托橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory)在 2000 年启动了 Freedom car 项目,确定了 2006 年和 2012 年分别达到汽车自重减轻 40%和 60%的目标,而实现该目标的主要技术手段就是开发轻质结构材料<sup>[16]</sup>。德国在 1999 年也启动了一个在政府和汽车制造商支持下的由几十所大学、研究所参加的有关泡沫金属材料大型研究项目 Brite Euram,侧重于该材料在汽车工业中的应用前景,从而使超轻多孔金属成为 21 世纪美、英、中、德、日、俄竞相发展的前沿领域之一。

在这个阶段加强了国际交流,连续召开了六次国际会议,作为中国唯一的代表,东南大学应邀参加了 1999~2003 年间的四次国际会议,见表 1.1。在六次国际会议中,除美、英、日各主持一次外,其余三次都为德国主持,可见德国的高度重视。

表 1.1 金属泡沫国际会议规模

时间	1997-10	1999-06	2000-06	2001-06	2003-06	2005-09
地点	美国德拉维尔	德国布莱梅	英国剑桥大学	德国布莱梅	德国柏林	日本京都
文章数	8	66	14 篇报告	110	142	154
参加人数	80	140	61	180	210	230

美国国防高等研究署当年投入最大的项目 Muri(合计 1.2 亿人民币)结束后,美、英完成了作为非连续介质的超轻多孔金属结构设计手册<sup>[2]</sup>,从而在应用与材料之间建立了桥梁。Ashby<sup>[15]</sup>和卢天健<sup>[16]</sup>概括了超轻多孔金属的 20 余种应用范围。文献[1]、[3]~[7]、[15]~[17]代表了国内外研究设计进展及应用的展望,它的公开发表也促进了我国超轻多孔金属的发展,但制备研究及应用研究的进展与其投入不相称,这是由于没有大力发展目标牵引所需的制备研究。在 1998 年 9 月美国国防高等研究署“超轻金属结构”项目会议期间,美国波音、格罗曼公司观看了我国展示的  $\phi 260\text{mm} \times 30\text{mm}$  高度均匀的泡沫纯铝时,向我们提出了制备  $\phi 25.4\text{mm} \times 20.3\text{mm}$  闭孔泡沫铝硅合金的需求;2001 年 6 月德国 Bremen 第二次国际金属泡沫会议上,会议主席 Banhart(德国高技术弗朗豪夫研究所、德国及欧共体项目领导人)向我们提出通孔多孔铝合金的需求,从而表明在中国关于超轻多孔金属的研究在国际上占有一席之地。美国某内部刊物对我们的研究工作曾作过评论,他们认为“中国有某一重点高校,正在研究超轻多孔金属,其水平已达一定规模,美国不可小视中国人的能力”。东南大学 1988 年开始发展这一领域,国家经费总投入仅为美国国防高等研究署该项目的 1/20,在认识研究及应用研究方面都取得了引起关注的新进展。比较国外发展,这一阶段发展特点为:加强基础研究、国际交流,开始认识了多样化的结构、性能。这是由于我们在高技术目标牵引下,以多学科的视角,用物理学的思想与方法将以认识为目的的基础研究与应用为目标的高技术应用密切结合起来,力求认识与实践的统一,从而获得了高的费效比。

### 3) 东南大学 2000~2005 年在这一领域发展的代表性文章

东南大学在不同的高技术目标牵引下,形成了物理新概念、新构思,自力更生研制新设备(15 套)形成了新方法,采用了多种研究方法(包括物理归纳法;数学演绎法;物理、数值模拟法;正演、反演及多种方法的结合),揭示规律及现象后的本质,形成了源头科学创新(《中国科学》论文 17 篇、《材料研究学报》论文 20 篇)、技术创新(已申报发明专利 30 项,获 16 项发明专利),形成了自主知识产权,培养了高技术应用人才,并在不同高技术领域获得了应用创新。

发表于《中国科学》、《科学通报》按不同需求牵引的主要工作如下:

- (1) 轻质能量吸收器. 中国科学 B 辑: 化学, 2005, 35(4): 265—267.
- (2) 泡沫铝凝固过程中孔隙率的变化. 科学通报, 2000, 45(8): 829—835.
- (3) 氢化钛热分解反应动力学及铝熔体泡沫化研究. 中国科学 B 辑: 化学, 2004, 34(3): 195—201.
- (4) 铝合金熔体泡沫化过程及多样化的泡沫铝合金. 中国科学 B 辑: 化学, 2009, 39(2).
- (5) 胞状铝合金凝固过程中固-液两相区的附加力场. 中国科学 B 辑: 化学, 2002, 32(5): 472—480.

(6) 新型球形孔低孔隙率高强度泡沫铝合金. 中国科学 B 辑: 化学, 2004, 34(1): 168—176.

(7) 铝合金熔体中球形泡沫的生长. 中国科学 B 辑: 化学, 2004, 35(3): 212—219.

(8) 氢化钛二次热分解与铝合金的二次泡沫化. 中国科学 B 辑: 化学, 2005, 35(4): 280—285.

(9) 铝合金熔体在多孔介质中的渗流过程及多孔铝合金. 中国科学 B 辑: 化学, 2009, 39(1): 22—30.

(10) 多孔铝合金的孔隙率. 中国科学 B 辑: 化学, 2001, 31(3): 265—271.

上述工作都以国家高技术目标为牵引, 采用物理学为主多学科渗透的思想和方法, 揭示了不同高技术需求的若干源头科学问题, 为技术创新及应用创新奠定了基础。

#### 4. 多样化的超轻多孔金属

超轻多孔金属的已有专著<sup>[1,3]</sup>较多关注闭孔胞状金属, 很少论及通孔多孔金属的形成孔结构及性能的多样性。实际上, 不论闭孔胞状金属还是通孔多孔金属都具有多样化的结构和性能以满足高技术多样化的性能需求。实践研究表明: 不同的高技术需求不同的性能, 为此要发展多样化的闭孔泡沫金属和通孔多孔金属结构。

##### 1) 多样化超轻多孔金属的孔结构及基体骨架

(1) 根据孔连通与否分为通孔多孔铝合金及闭孔泡沫纯铝及铝合金。

(2) 根据孔形状分为球形孔、类球形孔及多面体孔。

(3) 根据基体骨架分为纯铝、铝合金及其他金属。

(4) 宽范围变化的孔结构参数。孔径  $d$  及孔隙率  $P$ : 对通孔多孔铝合金就孔结构参数: 孔径  $d$  可为 0.5~6mm, 孔隙率  $P$  可为 50%~92%; 当  $P=63\%$  时,  $\rho=1$ ; 对闭孔泡沫铝及铝合金孔结构参数: 孔径  $d$  可为 0.5~6mm, 孔隙率  $P$  可为 42%~92%。

(5) 大的比表面积及无序结构。

(6) 可以制备成圆柱形、长方体形, 也可容易的加工为各种所需形状。最近在异型件制备进展中表明可以制备成无需加工、保留外面表皮的各种异型件, 如球形、枪托等, 从而拓展了应用范围。

##### 2) 多样化超轻多孔金属的控制、简要的物理原理与研究方法

(1) 采用铝或铝合金熔体在可除去多孔介质间渗流凝固的方法制备通孔多孔铝合金, 采用控制可除去的多孔介质大小、形状控制通孔孔径  $d$  及形状; 由渗流驱动力控制通孔程度, 采用多种方法控制孔隙率范围, 为此必须深入揭示铝熔体在多



孔介质间渗流凝固及孔隙率控制的规律,研究孔结构、基体与性能的关系。

(2)采用铝或铝合金熔体泡沫化的方法制备多样化的闭孔泡沫铝及铝合金,首先要揭示熔体混匀、黏度、泡沫在凝固过程中孔隙率变化规律及熔体发泡剂热分解动力学与泡沫化之间的关系;揭示熔体泡沫中球形孔、类球形孔及多面体孔演变及凝固过程附加力场的规律,从而获得精确控制各种泡沫铝及铝合金的孔径、孔隙率、孔形状。在揭示氢化钛二次热分解动力学及球形孔泡沫形成规律的基础上采用二次泡沫化方法获得异型件。揭示各种孔结构、基体及三明治结构与各种性能的关系,为应用奠定基础。

(3)从目标牵引及需求拉动中形成新概念、新构思,运用多种物理方法及自制多种新设备以形成铸、焊等材料加工相结合的多种新方法,揭示其过程的科学本质,制备满足多样化需求的超轻多孔金属。在应用实践中检验及发展认识,从而获得创新的应用结果。

## 5. 国家目标需求及科学技术前沿

从毫米级超轻多孔金属的发展历程及其多样化特征,我们不难看出,新材料的发展从开始探索进入科学快速发展阶段经历了长期的发展过程;中国在这一领域的某些方面形成了中国的特色,有若干值得总结的经验;这一类非共识多样化本质上属于物理学领域的新材料,最早认识到这一点的是物理学家及高技术专家,而不是材料工作者;最早支持这一领域的是国家自然科学基金会有眼光的专家。在好奇心驱动下引起的探索过程,由物理的洞察能力及直觉,发现可能高技术应用目标,并在可能目标牵引下进行的认识研究,发展为在具体目标牵引下,在认识研究及应用之间形成必要的张力,两者相得益彰。洞察力、耐心、毅力是获得成功的必要条件。在目标牵引下,深入揭示物理本质,坚持认识与实践相统一,在应用实践中检验及发展认识。我们 20 年的实践表明:中共中央提出的“自主创新,重点跨越,支撑发展,引领未来”及“顶天立地”,将国家目标需求与科学技术前沿相结合的方针完全正确,是可以实现的,可以获得高的费效比。

## 6. 毫米级超轻多孔金属应用时考虑的若干问题

### 1) 毫米级超轻多孔金属的主要应用范围

文献[2]、[6]概述了毫米级超轻多孔金属的应用范围,并根据我们在五个不同高技术领域的基础研究及应用实践<sup>[17~46]</sup>,将应用范围进行概括,见表 1.2。

### 2) 毫米级超轻多孔金属应用时需考虑的问题

- (1)明确目标牵引的主要性能及次要性能。
- (2)采用通孔多孔铝合金还是闭孔泡沫铝合金。