

“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

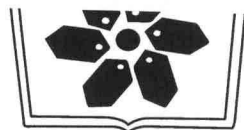
泡沫铝材料



姚广春 等◎著



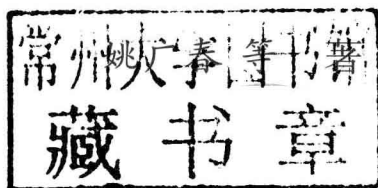
科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

泡沫铝材料



科学出版社

内 容 简 介

泡沫铝具有吸声、隔声、吸能、减震、电磁屏蔽等多种优良性能，广泛应用于国防装备、高速列车、建筑、隧道等领域。目前，泡沫铝材料制备技术已经成熟，并逐步形成一套铝金属发泡、表面处理以及深加工等系列工艺技术。作者在收集国内外研究资料的基础上，结合自己多年来承担的国家和省部级科技项目研究成果和体会撰写本书，介绍泡沫铝性能、发泡理论、制造工艺、加工工艺、后续处理技术和应用等内容。

本书可为泡沫金属材料领域的科技工作者在研究、开发、生产等方面提供有益的指导，也可作为冶金、材料、加工专业的本科生、硕士和博士研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

泡沫铝材料/姚广春等著. —北京: 科学出版社, 2013

(现代冶金与材料过程工程丛书/赫冀成主编)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-037820-0

I. 泡… II. 姚… III. 铝-多孔性材料-金属复合材料-研究 IV. TB331

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 126947 号

责任编辑: 张淑晓 张 星/责任校对: 张怡君

责任印制: 钱玉芬/封面设计: 蓝正设计

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年6月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2013年6月第一次印刷 印张: 26

字数: 495 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《现代冶金与材料过程工程丛书》编委会

顾问 陆钟武 王国栋

主编 赫冀成

副主编 (按姓氏笔画排序)

左良 何鸣鸿 姜茂发

执行副主编 张延安

编委 (按姓氏笔画排序)

王强 王磊 王恩刚 左良 史文芳

朱苗勇 朱旺喜 刘承军 刘春明 刘相华

刘常升 杨红英 吴迪 吴文远 何鸣鸿

邹宗树 张延安 张殿华 茹红强 姜茂发

姜周华 姚广春 高瑞平 崔建忠 赫冀成

蔡九菊 翟玉春 翟秀静

《现代冶金与材料过程工程丛书》序

21 世纪世界冶金与材料工业主要面临两大任务：一是开发新一代钢铁材料、高性能有色金属材料及高效低成本的生产工艺技术，以满足新时期相关产业对金属材料性能的要求；二是要最大限度地降低冶金生产过程的资源和能源消耗，减少环境负荷，实现冶金工业的可持续发展。冶金与材料工业是我国发展最迅速的基础工业，钢铁和有色金属冶金工业承载着我国节能减排的重要任务。当前，世界冶金工业正向着高效、低耗、优质和生态化的方向发展。超级钢和超级铝等更高性能的金属材料产品不断涌现，传统的工艺技术不断被完善和更新，铁水炉外处理、连铸技术已经普及，直接还原、近终形连铸、电磁冶金、高温高压溶出、新型阴极结构电解槽等已经开始在工业生产上获得不同程度的应用。工业生态化的客观要求，特别是信息和控制理论与技术的发展及其与过程工业的不断融合，促使冶金与材料过程工程的理论、技术与装备迅速发展。

《现代冶金与材料过程工程丛书》是东北大学在国家“985 工程”科技创新平台的支持下，在冶金与材料领域科学前沿探索和工程技术研发成果的积累和结晶。丛书围绕冶金过程工程，以节能减排为导向，内容涉及钢铁冶金、有色金属冶金、材料加工、冶金工业生态和冶金材料等学科和领域，提出了计算冶金、自蔓延冶金、特殊冶金、电磁冶金等新概念、新方法和新技术。丛书的大部分研究得到了科学技术部“973”、“863”项目，国家自然科学基金重点和面上项目的资助（仅国家自然科学基金项目就达近百项）。特别是在“985 工程”二期建设过程中，得到 1.3 亿元人民币的重点支持，科研经费逾 5 亿元人民币。获得省部级科技成果奖 70 多项，其中国家级奖励 9 项；获得国家发明专利 100 多项。这些科研成果成为丛书编撰和出版的学术思想之源和基本素材之库。

以研发新一代钢铁材料及高效低成本的生产工艺技术为中心任务，王国栋院士率领的创新团队在普碳超级钢、高等级汽车板材以及大型轧机控轧控冷技术等方面取得突破，成果令世人瞩目，为宝钢、首钢和攀钢的技术进步做出了积极的贡献。例如，在低碳铁素体/珠光体钢的超细晶强韧化与控制技术研究过程中，提出适度细晶化（ $3\sim 5\mu\text{m}$ ）与相变强化相结合的强化方式，开辟了新一代钢铁材料生产的新途径。首次在现有工业条件下用 200MPa 级普碳钢生产出 400MPa 级超级钢，在保证韧性前提下实现了屈服强度翻番。在研究奥氏体再结晶行为时，引入时间轴概念，明确提出低碳钢在变形后短时间内存在奥氏体未在结晶区的现象，为低碳钢的控制轧制提供了理论依据；建立了有关低碳钢应变诱导相变

研究的系统而严密的实验方法,解决了低碳钢高温变形后的组织固定问题。适当控制终轧温度和压下量分配,通过控制轧后冷却和卷取温度,利用普通低碳钢生产出铁素体晶粒为 $3\sim 5\mu\text{m}$ 、屈服强度大于 400MPa ,具有良好综合性能的超级钢,并成功地应用于汽车工业,该成果获得2004年国家科技进步奖一等奖。

宝钢高等级汽车板品种、生产及使用技术的研究形成了系列关键技术(例如,超低碳、氮和氧的冶炼控制等),取得专利43项(含发明专利13项)。自主开发了183个牌号的新产品,在国内首次实现高强度IF钢、各向同性钢、热镀锌双相钢和冷轧相变诱发塑性钢的生产。编制了我国汽车板标准体系框架和一批相关的技术标准,引领了我国汽车板业的发展。通过对用户使用技术的研究,与下游汽车厂形成了紧密合作和快速响应的技术链。项目运行期间,替代了至少50%的进口材料,年均创利润近15亿元人民币,年创外汇600余万美元。该技术改善了我国冶金行业的产品结构并结束了国外汽车板对国内市场的垄断,获得2005年国家科技进步奖一等奖。

提高C-Mn钢综合性能的微观组织控制与制造技术的研究以普碳钢和碳锰钢为对象,基于晶粒适度细化和复合强化的技术思路,开发出综合性能优良的 $400\sim 500\text{MPa}$ 级节约型钢材。解决了过去采用低温轧制路线生产细晶粒钢时,生产节奏慢、事故率高、产品屈强比高以及厚规格产品组织不均匀等技术难题,获得10项发明专利授权,形成工艺、设备、产品一体化的成套技术。该成果在钢铁生产企业得到大规模推广应用,采用该技术生产的节约型钢材产量到2005年底超过400万t,到2006年年底,国内采用该技术生产低成本高性能钢材累计产量超过500万t。开发的产品用于制造卡车车轮、大梁、横臂及桥梁等结构件。由于节省了合金元素、降低了成本、减少了能源资源消耗,其社会效益巨大。该成果获2007年国家技术发明奖二等奖。

首钢3500mm中厚板轧机核心轧制技术和关键设备研制,以首钢3500mm中厚板轧机工程为对象,开发和集成了中厚板生产急需的高精度厚度控制技术、TMCP技术、控制冷却技术、平面形状控制技术、板凸度和板形控制技术、组织性能预测与控制技术、人工智能应用技术、中厚板厂全厂自动化与计算机控制技术等一系列具有自主知识产权的关键技术,建立了以3500mm强力中厚板轧机和加速冷却设备为核心的整条国产化的中厚板生产线,实现了中厚板轧制技术和重大装备的集成和集成基础上的创新,从而实现了我国轧制技术各个品种之间的全面、协调、可持续发展以及我国中厚板轧机的全面现代化。该成果已经推广到国内20余家中厚板企业,为我国中厚板轧机的改造和现代化做出了贡献,创造了巨大的经济效益和社会效益。该成果获2005年国家科技进步奖二等奖。

在国产1450mm热连轧关键技术及设备的研究与应用过程中,独立自主开发的热连轧自动化控制系统集成技术,实现了热连轧各子系统多种控制器的无缝

衔接。特别是在层流冷却控制方面,利用有限元素流分析方法,研发出带钢宽度方向温度均匀的层冷装置。利用自主开发的冷却过程仿真软件包,确定了多种冷却工艺制度。在终轧和卷取温度控制的基础之上,增加了冷却路径控制方法,提高了控冷能力,生产出了 $\times 75$ 管线钢和具有世界先进水平的厚规格超细晶粒钢。经过多年的潜心研究和持续不断的工程实践,将攀钢国产第一代 1450mm 热连轧机组改造成具有当代国际先进水平的热连轧生产线,经济效益极其显著,提高了国内热连轧技术与装备研发水平和能力,是传统产业技术改造的成功典范。该成果获 2006 年国家科技进步奖二等奖。

以铁水为主原料生产不锈钢的新技术的研发也是值得一提的技术闪光点。该成果建立了 K-OBM-S 冶炼不锈钢的数学模型,提出了铁素体不锈钢脱碳、脱氮的机理和方法,开发了等轴晶控制技术。同时,开发了 K-OBM-S 转炉长寿命技术、高质量超纯铁素体不锈钢的生产技术、无氩冶炼工艺技术和连铸机快速转换技术等关键技术。实现了原料结构、生产效率、品种质量和生产成本的重大突破。主要技术经济指标国际领先,整体技术达到国际先进水平。K-OBM-S 平均冶炼周期为 53min,炉龄最高达到 703 次,铬钢比例达到 58.9%,不锈钢的生产成本降低 10%~15%。该生产线成功地解决了我国不锈钢快速发展的关键问题——不锈钢废钢和镍资源短缺,开发了以碳氮含量小于 120ppm 的 409L 为代表的一系列超纯铁素体不锈钢品种,产品进入我国车辆、家电、造币领域,并打入欧美市场。该成果获得 2006 年国家科技进步奖二等奖。

以生产高性能有色金属材料和研发高效低成本生产工艺技术为中心任务,先后研发了高合金化铝合金预拉伸板技术、大尺寸泡沫铝生产技术等,并取得显著进展。高合金化铝合金预拉伸板是我国大飞机等重大发展计划的关键材料,由于合金含量高,液固相线温度宽,铸锭尺寸大,铸造内应力高,所以极易开裂,这是制约该类合金发展的瓶颈,也是世界铝合金发展的前沿问题。与发达国家采用的技术方案不同,该高合金化铝合金预拉伸板技术利用低频电磁场的强贯穿能力,改变了结晶器内熔体的流场,显著地改变了温度场,使液穴深度明显变浅,铸造内应力大幅度降低,同时凝固组织显著细化,合金元素宏观偏析得到改善,铸锭抵抗裂纹的能力显著增强。为我国高合金化大尺寸铸锭的制备提供了高效、经济的新技术,已投入工业生产,为国防某工程提供了高质量的铸锭。该成果作为“铝资源高效利用与高性能铝材制备的理论与技术”的一部分获得了 2007 年的国家科技进步奖一等奖。大尺寸泡沫铝板材制备工艺技术是以共晶铝硅合金(含硅 12.5%)为原料制造大尺寸泡沫铝材料,以 A356 铝合金(含硅 7%)为原料制造泡沫铝材料,以工业纯铝为原料制造高韧性泡沫铝材料的工艺和技术。研究了泡沫铝材料制造过程中泡沫体的凝固机制以及生产气孔均匀、孔壁完整光滑、无裂纹泡沫铝产品的工艺条件;研究了控制泡沫铝材料密度和孔径的方法;

研究了无泡层形成原因和抑制措施；研究了泡沫铝大块体中裂纹与大空腔产生原因和控制方法；研究了泡沫铝材料的性能及其影响因素等。泡沫铝材料在国防军工、轨道车辆、航空航天和城市基础建设方面具有十分重要的作用，预计国内市场年需求量在 20 万 t 以上，产值 100 亿元人民币，该成果获 2008 年辽宁省技术发明奖一等奖。

围绕最大限度地降低冶金生产过程中资源和能源的消耗，减少环境负荷，实现冶金工业的可持续发展的任务，先后研发了新型阴极结构电解槽技术、惰性阳极和低温铝电解技术和大规模低成本消纳赤泥技术。例如，冯乃祥教授的新型阴极结构电解槽的技术发明于 2008 年 9 月在重庆天泰铝业公司试验成功，并通过中国有色工业协会鉴定，节能效果显著，达到国际领先水平，被业内誉为“革命性的技术进步”。该技术已广泛应用于国内 80% 以上的电解铝厂，并获得“国家自然科学基金重点项目”和“国家高技术研究发展计划（‘863’计划）重点项目”支持，该技术作为国家发展和改革委员会“高技术产业化重大专项示范工程”已在华东铝业实施 3 年，实现了系列化生产，槽平均电压为 3.72V，直流电耗 12 082kW·h/t Al，吨铝平均节电 1123kW·h。目前，新型阴极结构电解槽的国际推广工作正在进行中。初步估计，在 4~5 年内，全国所有电解铝厂都能将现有电解槽改为新型电解槽，届时全国电解铝厂一年的节电量将超过我国大型水电站——葛洲坝一年的发电量。

在工业生态学研究方面，陆钟武院士是我国最早开始研究的著名学者之一，因其在工业生态学领域的突出贡献获得国家光华工程大奖。他的著作《穿越“环境高山”——工业生态学研究》和《工业生态学概论》，集中反映了这些年来陆钟武院士及其科研团队在工业生态学方面的研究成果。在煤与废塑料共焦化、工业物质循环理论等方面取得长足发展；在废塑料焦化处理、新型球团竖炉与煤高温气化、高温贫氧燃烧一体化系统等方面获多项国家发明专利。

依据热力学第一定律和第二定律，提出钢铁企业燃料（气）系统结构优化，以及“按质用气、热值对口、梯级利用”的科学用能策略，最大限度地提高了煤气资源的能源效率、环境效率及其对企业节能减排的贡献率；确定了宝钢焦炉、高炉、转炉三种煤气资源的最佳回收利用方式和优先使用顺序，对煤气、氧气、蒸气、水等能源介质实施无人化操作、集中管控和经济运行；研究并计算了转炉煤气回收的极限值，转炉煤气的热值、回收量和转炉工序能耗均达到国际先进水平；在国内首先利用低热值纯高炉煤气进行燃气-蒸气联合循环发电。高炉煤气、焦炉煤气实现近“零”排放，为宝钢创建国家环境友好企业做出重要贡献。作为主要参与单位开发的钢铁企业副产煤气利用与减排综合技术获得了 2008 年国家科技进步奖二等奖。

另外，围绕冶金材料和新技术的研发及节能减排两大中心任务，在电渣冶

金、电磁冶金、自蔓延冶金、新型炉外原位脱硫等方面都取得了不同程度的突破和进展。基于钙化-碳化的大规模消纳拜耳赤泥的技术,有望攻克拜耳赤泥这一世界性难题;钢焖渣水除疤循环及吸收二氧化碳技术及装备,使用钢渣循环水吸收多余二氧化碳,大大降低了钢铁工业二氧化碳的排放量。这些研究工作所取得的新方法、新工艺和新技术都会不同程度地体现在丛书中。

总体来讲,《现代冶金与材料过程工程丛书》集中展现了东北大学冶金与材料学科群体多年的学术研究成果,反映了冶金与材料工程最新的研究成果和学术思想。尤其是在“985工程”二期建设过程中,东北大学材料与冶金学院承担了国家I类“现代冶金与材料过程工程科技创新平台”的建设任务,平台依托冶金工程和材料科学与工程两个国家一级重点学科、连轧过程与控制国家重点实验室、材料电磁过程教育部重点实验室、材料微结构控制教育部重点实验室、多金属共生矿生态化利用教育部重点实验室、材料先进制备技术教育部工程研究中心、特殊钢工艺与设备教育部工程研究中心、有色金属冶金过程教育部工程研究中心、国家环境与生态工业重点实验室等国家和省部级基地,通过学科方向汇聚了学科与基地的优秀人才,同时也为丛书的编撰提供了人力资源。丛书聘请中国工程院陆钟武院士和王国栋院士担任编委会学术顾问,国内知名学者担任编委,汇聚了优秀的作者队伍,其中有中国工程院院士、国务院学科评议组成员、国家杰出青年科学基金获得者、学科学术带头人等。在此,衷心感谢丛书的编委会成员、各位作者以及所有关心、支持和帮助编辑出版的同志们。

希望丛书的出版能起到积极的交流作用,能为广大冶金和材料科技工作者提供帮助。欢迎读者对丛书提出宝贵的意见和建议。

赫冀成 张延安

2011年5月

前 言

泡沫铝材料具有轻质、吸声、隔声、吸能、减震、电磁屏蔽等多种优良性能，在制造舰船防爆甲板、坦克复合装甲和防地雷底板、列车底板和侧衬、汽车盖板及保险杠、隧道降噪及各种设备降噪等方面潜在需求量大，应用面广，成为当今世界材料科学与高技术领域的重要研究、开发对象之一。

近十多年来，各国科学家对泡沫铝材料开展了大量的研究工作。例如，1996年美国国防部高级研究计划署（DARPA）和美国海军研究局（ONR）共同资助哈佛大学、麻省理工学院、弗吉尼亚大学、剑桥大学等学校的著名学者联合进行的“超轻金属结构（ultra-light metal structures）”大型研究项目，1999年德意志研究联合会（DFG）资助的由20多所大学和国立研究所参加的“胞状金属材料（cellular metallic material）”优先研究计划项目，2001年欧洲启动的LISA（light-weight structural applications based on metallic and organic foams）研究项目，我国科技部在“九五”和“十五”期间设立科技攻关项目和“863”计划资助的泡沫铝材料研究。这些项目的设立极大地推动了泡沫铝材料的研究。

目前，泡沫铝材料的制备技术已经成熟，并逐步形成了一套泡沫铝金属发泡、表面处理、深加工等系列工艺技术。泡沫铝材料的应用市场逐渐拓展，目前已用于制作吸声板、声屏障、列车地板、轿车保险杠、坦克与防暴车复合装甲、建筑幕墙，并在潜艇与军舰降噪、建筑降噪、隧道降噪等方面得到应用，对升高装备性能、提高工程质量发挥着重要作用。

本书收集了国内外相关研究资料，结合作者多年来承担的国家“863”计划、国家科技攻关计划、国家自然科学基金项目等国家以及省部级科技项目研究成果及体会撰写而成。

参加本书撰写的人员有：姚广春（第1、2、3、11章）、罗洪杰（第4、5章）、祖国胤（第6、7章）、吴林丽（第8、10章）、张晓明（第9章）。全书由姚广春统审和修改，吴林丽协助文字整理。

由于作者水平有限，书中疏漏和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2013年2月

目 录

《现代冶金与材料过程工程丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 泡沫铝材料发展史	1
1.2 泡沫铝材料发展趋势	4
1.2.1 泡沫铝材料应用领域扩展	4
1.2.2 开发高性能泡沫铝材料	4
1.2.3 现有泡沫铝制备方法的改进	5
1.2.4 开发泡沫铝材料后加工技术	5
1.3 泡沫铝材料的市场需求	6
参考文献	7
第 2 章 泡沫铝材料的性能	11
2.1 泡沫铝材料的结构特点	11
2.2 泡沫铝材料的吸声性能	11
2.3 泡沫铝材料的隔声性能	13
2.4 泡沫铝材料的压缩强度	17
2.4.1 闭孔泡沫铝材料静态压缩性能	19
2.4.2 闭孔泡沫铝材料动态压缩性能	19
2.4.3 不同基体材料泡沫铝的压缩性能	21
2.5 泡沫铝材料的吸能性能	23
2.5.1 泡沫铝吸能量	23
2.5.2 泡沫铝能量吸收效率	25
2.5.3 不同基体材料泡沫铝的吸能性能	27
2.6 泡沫铝材料的电磁屏蔽性能	28
2.7 泡沫铝材料的传热性能	30
2.8 泡沫铝材料的抗弯强度	31
2.9 泡沫铝材料的阻尼性能	32
参考文献	34
第 3 章 泡沫铝材料制备基础理论	35
3.1 制备闭孔泡沫铝材料的发泡机理	35

3.2	TiH ₂ 分解过程	35
3.2.1	氢化钛的物理性质	36
3.2.2	氢化钛分解动力学分析	36
3.3	铝熔体的黏度	38
3.4	铝熔体的表面张力	39
3.4.1	表面张力概念	39
3.4.2	表面张力影响因素	40
3.5	铝熔体对固相颗粒表面的润湿性	40
3.6	铝熔体中气泡的形成	41
3.7	泡沫组织的形成	42
3.8	气泡的稳定性	43
3.9	气泡的均匀性	44
3.10	泡沫体的凝固	45
	参考文献	46
第4章	熔体直接发泡法制备泡沫铝材料工程化研究	48
4.1	熔体直接发泡法制备泡沫铝材料的工艺基础	48
4.1.1	铝基合金的性质	48
4.1.2	铝熔体的增黏方法	58
4.1.3	发泡剂的选择及改性	88
4.1.4	熔体的搅拌方法	115
4.1.5	保温发泡的方式	118
4.1.6	泡沫体的冷却	121
4.2	熔体直接发泡法制备泡沫铝材料的工程化	122
4.2.1	工程化研究方法	123
4.2.2	工艺条件的调整	124
4.2.3	工程化试验中存在的问题及解决方法	127
4.2.4	工业化生产流程初步设计	131
4.3	熔体直接发泡法的后续发展	133
4.3.1	两步法制备泡沫铝材料	133
4.3.2	熔体法制备泡沫铝夹芯板	133
	参考文献	134
第5章	熔体直接发泡法生产泡沫铝材料工艺与设备	139
5.1	引言	139
5.1.1	熔体直接发泡法的生产情况	140
5.1.2	注气发泡法的生产情况	143

5.2 熔体直接发泡法生产泡沫铝材料工艺和设备	147
5.2.1 泡沫铝生产工艺流程	147
5.2.2 铝锭(铝合金)熔化	147
5.2.3 返回料熔化	149
5.2.4 铝液增黏	150
5.2.5 添加发泡剂	150
5.2.6 发泡	151
5.2.7 冷却凝固	151
5.2.8 切割作业	151
5.3 产品质量标准与技术经济指标	152
5.3.1 泡沫铝质量标准	152
5.3.2 技术经济指标	152
5.4 产品成材率	152
5.4.1 泡沫铝成材率的计算	152
5.4.2 影响泡沫铝成材率的因素	153
5.5 废料回收利用	154
5.5.1 废料的来源	154
5.5.2 废料回收的困难	155
5.5.3 废料回收方式	155
5.6 泡沫铝生产设备的安装与布置	156
5.6.1 泡沫体生产车间	156
5.6.2 切割车间的布置	156
参考文献	157
第6章 粉末冶金法制备泡沫铝材料工艺	158
6.1 粉末冶金法制备泡沫铝概况	158
6.1.1 粉末冶金法制备泡沫铝材料的基本原理	158
6.1.2 粉末冶金法制备泡沫铝材料的优缺点	158
6.1.3 粉末冶金法制备泡沫铝材料的工艺参数	160
6.2 坯体的制备	160
6.2.1 制坯压强	160
6.2.2 制坯温度	162
6.2.3 铝粉粒度对发泡剂分散性的影响	165
6.3 发泡过程	166
6.3.1 发泡温度对发泡的影响	166
6.3.2 发泡剂量对发泡的影响	169

6.3.3 发泡时间的影响	170
6.4 添加 Mg 粉对泡沫铝发泡行为的影响	172
6.4.1 Mg 粉添加量对膨胀率的影响	172
6.4.2 Mg 粉添加量对泡孔结构的影响	172
6.5 加热技术及原理	177
6.5.1 红外加热	177
6.5.2 感应加热技术	178
6.5.3 电阻炉的加热技术	179
6.5.4 可行的快速加热技术	179
6.6 钢面板泡沫铝夹芯板制备方法	180
6.6.1 钢板表面处理	181
6.6.2 铝基前驱体制备	185
6.6.3 钢面板泡沫铝夹芯板发泡工艺	187
6.7 钢壳泡沫铝芯部件制备方法	190
6.7.1 钢壳的制备与处理	191
6.7.2 泡沫铝半成品的制备	191
6.7.3 泡沫铝半成品在钢壳内发泡	192
参考文献	192
第 7 章 泡沫铝夹芯板制备工艺	194
7.1 泡沫铝夹芯板材料简介	194
7.1.1 泡沫铝夹芯结构材料的特点	194
7.1.2 泡沫铝夹芯板材料的主要应用领域	195
7.1.3 泡沫铝夹芯板的主要制备方法	198
7.1.4 泡沫铝夹芯板制备工艺存在的主要问题	203
7.1.5 泡沫铝夹芯板材料的主要研究成果	204
7.1.6 泡沫铝夹芯板制备技术研究进展	209
7.2 泡沫铝夹芯板制备工艺	210
7.2.1 泡沫铝夹芯板材料制备工艺流程	210
7.2.2 原料	211
7.2.3 泡沫铝夹芯板的制备过程	214
7.2.4 实验检测手段及设备	215
7.3 轧制复合工艺制备发泡预制坯工艺	218
7.3.1 轧制复合对预制坯结合效果的影响	220
7.3.2 轧制复合对芯层粉末致密度的影响	221
7.3.3 板/芯界面的变形研究	229

7.4 预制坯粉末冶金发泡工艺	236
7.4.1 引言	236
7.4.2 预制坯发泡工艺	237
7.4.3 主要工艺参数对预制坯发泡效果的影响	250
7.5 面板/泡沫铝芯界面结合机制	255
7.5.1 发泡预制坯的板/芯界面结合机制	255
7.5.2 泡沫铝夹芯板的板/芯结合机制	255
7.5.3 板/芯界面元素扩散行为分析	258
7.5.4 芯层粉末的变形机制	265
7.6 泡沫铝夹芯板的力学性能	268
7.6.1 引言	268
7.6.2 泡沫铝夹芯板弯曲性能	268
7.6.3 泡沫铝夹芯板冲击性能	274
参考文献	277
第8章 泡沫铝材料的其他制备工艺	281
8.1 闭孔泡沫铝材料制备工艺	281
8.1.1 注气发泡法	282
8.1.2 溅射喷镀法	285
8.1.3 加中空球料法	285
8.2 开孔泡沫铝材料制备工艺	285
8.2.1 渗流铸造法	285
8.2.2 熔模铸造法	296
8.2.3 电镀法	300
8.2.4 电火花烧结法	301
8.2.5 烧结溶解法	301
8.2.6 共晶凝固法	302
8.2.7 同轴喷嘴空心球形铝泡制造法	302
8.2.8 软陶瓷球占位法	303
参考文献	303
第9章 泡沫铝材料后处理	305
9.1 切割	305
9.1.1 锯切	305
9.1.2 线切割	309
9.1.3 激光切割	310
9.1.4 水射流切割	310

9.2 成型	311
9.2.1 泡沫铝材料在固相线下的成型	311
9.2.2 高温下泡沫铝材料的成型	311
9.3 穿孔	312
9.3.1 穿孔对声学性能的影响	312
9.3.2 穿孔的方法	313
9.4 轧制	314
9.5 泡沫铝结构的机械连接	315
9.5.1 机械连接元件	315
9.5.2 连接方法	315
9.5.3 不同连接方式的比较	317
9.5.4 影响连接强度的因素	317
9.6 泡沫铝的焊接	320
9.6.1 激光焊接	320
9.6.2 钎焊	320
参考文献	321
第 10 章 泡沫铝材料性能检测方法	322
10.1 泡沫铝材料表征	322
10.1.1 孔隙率	322
10.1.2 孔径	323
10.1.3 孔形状	323
10.1.4 孔的分布	323
10.2 泡沫铝材料力学性能检测方法	324
10.2.1 压缩强度测试方法	324
10.2.2 拉伸强度测试方法	327
10.2.3 吸能性能测试方法	330
10.2.4 泡沫铝夹芯板抗弯强度测试方法	336
10.3 泡沫铝材料声学性能检测方法	341
10.3.1 吸声系数测量方法	341
10.3.2 隔声性能测试方法	346
10.4 泡沫铝材料电磁屏蔽性能检测方法	361
10.4.1 电磁屏蔽测试规范	361
10.4.2 电磁屏蔽测试实验	361
10.5 泡沫铝材料导热系数检测方法	363
10.5.1 导热系数测量规范	363

10.5.2 导热系数测量实验	364
参考文献	366
第 11 章 泡沫铝材料的应用	368
11.1 泡沫铝吸声板	368
11.2 公路声屏障	370
11.3 潜艇降噪	372
11.4 地铁隧道通风口消声器	375
11.5 汽车消声器	375
11.6 隧道降噪围壁	377
11.6.1 隧道内噪声频率与强度	378
11.6.2 公路与河底隧道降噪围壁	378
11.6.3 海底隧道降噪围壁	379
11.7 制造高速铁路声屏障	379
11.8 游泳馆降噪	380
11.9 制造轻型复合装甲	382
11.10 制造舰船防爆甲板	383
11.11 制造军用空投包装箱	384
11.12 制造军车防地雷底板	385
11.13 制造电器柜	386
11.14 制造列车地板	387
11.15 制造列车侧衬	388
11.16 制造列车防撞装置	389
11.17 制造轿车保险杠	390
11.18 造船	390
参考文献	391