

清华大学学术专著

Ceramic Microbeads

陶瓷微珠

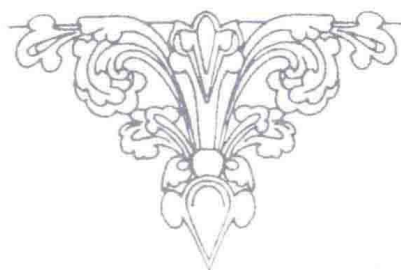
杨金龙 席小庆 黄 勇 著

YANG Jinlong, XI Xiaoqing, HUANG Yong



清华大学出版社





Ceramic Microbeads

陶瓷微珠

杨金龙 席小庆 黄 勇 著

YANG Jinlong, XI Xiaoqing, HUANG Yong



清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了作者在陶瓷微珠领域所做的工作,论述了陶瓷微珠新产品的具体应用。全书内容包括两部分:第一部分阐述毫米及亚毫米级实心陶瓷微珠的制备及在磨介、笔珠、竞技体育等领域的应用;第二部分介绍微/纳米空心陶瓷微珠的制备,包括空心陶瓷微珠的制备,微米级空心陶瓷微珠在保温材料、泡沫玻璃、吸附过滤、缓释等方面的应用等。

本书可供材料及相关学科的高校师生和科技工作者阅读参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

陶瓷微珠/杨金龙,席小庆,黄勇著. —北京:清华大学出版社,2017
ISBN 978-7-302-48534-6

I. ①陶… II. ①杨… ②席… ③黄… III. ①陶瓷—玻璃微珠—研究 IV. ①TQ174.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 241282 号

责任编辑:黎 强

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:153mm×235mm 印 张:29.75 字 数:519 千字

版 次:2017 年 10 月第 1 版 印 次:2017 年 10 月第 1 次印刷

定 价:140.00 元

产品编号:076299-01



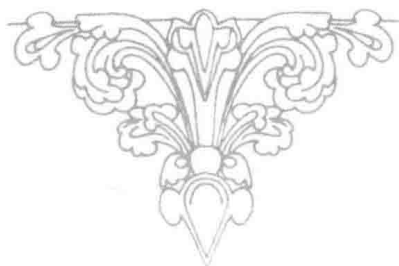
作者简介



杨金龙 男，清华大学材料学院教授、博士生导师。1966年出生于山西太原。1987年毕业于北京理工大学，获得学士学位；1990年毕业于中北大学，获得硕士学位；1996年毕业于清华大学材料系，获得博士学位，并留校工作至今。1999—2000年在瑞士联邦理工大学做博士后研究工作，师从Gauckler教授。先后任清华大学材料系讲师、副教授、教授，博士生导师。2001—2004年担任清华大学新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室常务副主任。2006年被中北大学聘为特聘教授，并担任中北大学先进陶瓷工程技术中心主任。2010年被大连交通大学聘为兼职教授。2014年被河北工程大学聘为兼职教授。2011—2016年挂职担任清华大学学科规划与建设办公室副主任。2015—2016年挂职担任河北工程大学副校长。现任传统工艺与材料研究文化部重点实验室副主任、美国陶瓷学会会员、中国硅酸盐学会溶胶凝胶分会理事、《硅酸盐学报》编委、《材料导报》编委、*International Journal of Materials Product and Technology* 特约编辑、*International Journal of Metallurgical & Materials Engineering* 编委，山西省五台县、贵州省石阡县政府顾问。主要研究领域包括：结构陶瓷、陶瓷基复合材料、陶瓷胶态成型工艺、陶瓷粉体球形化及空心化、微/纳米空心球的制备及应用、轻质新材料的制备、古陶瓷技术发展史及科技鉴定等。

荣获国家技术发明二等奖1项、河北省科技进步二等奖1项、山西省自然科学二等奖1项、其他省部级科技奖励3项，获得德国纽伦堡国际发明博览会金奖1项、国际发明展览会金奖1项、银奖1项。累计完成技术成果鉴定20项，已发表学术论文230篇，其中SCI收录140篇，EI收录50篇；申请专利102项，其中已授权专利79项；出版英文专著 *Novel Colloidal Forming of Ceramics* 1部（Springer和清华大学出版社联合出版）。

2001年加入中国民主促进会（简称民进），现为民进中央第十三届委员会委员、民进北京市第十五届委员会常委、民进清华大学委员会主委、民进中央科技医卫委员会委员。

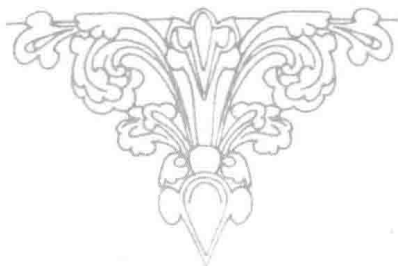


作者简介



席小庆 男，清华大学材料学院新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室高级工程师、党支部书记。1999年毕业于华东理工大学，获得学士学位；2007年获得清华大学材料科学与工程系硕士学位。1999—2001年，在中国建筑材料科学研究院石英研究所担任工程师，2002年至今在清华大学新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室工作。

长期从事无机非金属材料的研究工作，先后参加国家863、国家973、国家自然科学基金、军工和横向合作共8项课题的研究工作，通过国家教育部和河北省科技厅组织的“陶瓷胶态注射成型”等系列成果鉴定11项，达到国际领先和先进水平。获得2003年教育部科技发明一等奖1项、河北省科技进步二等奖1项、德国纽伦堡国际发明博览会金奖1项、国际发明展览会金奖1项。荣获清华大学实验技术成果奖3项、清华大学优秀技术人员表彰1次，多次被评为材料学院先进工作者与优秀党员。已发表学术论文25篇，获得国家授权专利20余项。从攻读硕士学位开始，一直参与陶瓷微珠球形化及空心化的相关研究。



作者简介



黄勇 男，清华大学材料学院教授，博士生导师。1937年出生于福建。1962年毕业于清华大学并留校工作；1986—1987年为美国密歇根大学访问学者；1992—1993年为美国麻省理工学院高级访问学者、研究科学家；1996年为瑞士联邦技术学院客座教授；2000年在澳大利亚Monash大学从事讲学与合作研究。曾任清华大学材料科学与工程系主任，清华大学材料科学与工程研究院常务副院长，第六和第七届全国自然科学基金委员会学科评审组成员，S-863计划软课题专家组成员，国家“八五”科技攻关计划陶瓷发动机专家组成员、“九五”国家高技术发展计划(863计划)专题负责人、“十五”和“十一五”国家重大基础研究计划(973计划)课题负责人，中国硅酸盐学会常务理事和特种陶瓷分会理事长等。现任中国硅酸盐学会特种陶瓷分会名誉理事长，《硅酸盐学报》国际顾问，西安交通大学、中北大学和中科院理化所兼职教授等。

长期从事无机非金属材料的教学与科研工作，在先进陶瓷的组成、结构与性能以及高性能陶瓷的制备科学、陶瓷的强化与钝化机理等方面有精深的研究。曾主持并完成国家自然科学基金重大项目与重点项目、国家863计划项目、国家973计划项目、国际间合作项目等10多项研究课题，获10多项重要研究成果，其中胶态注射成型新工艺达到国际领先水平。高强、高韧、耐高温以及超轻质多孔陶瓷等领域的多项研究成果达到国际先进水平，有些成果已获得转化和应用，获得了良好的社会效益和经济效益。培养博士、硕士、留学生、博士后、访问学者等70余人。先后荣获国家技术发明二等奖1项、教育部提名国家技术发明一等奖1项、省部级科技进步二等奖5项、三等奖3项。累计完成科技鉴定(成果)20多项，荣获国家级优秀教材1种、建设部优秀科技图书二等奖1项、国家建材优秀教材一等奖1项，申请中国发明专利50多项、实用新型专利6项。

主编、翻译或参编各种教材、专著、手册共计18册(种)，发表学术论文400多篇，其中SCI收录244篇，EI收录220篇、ISTP收录59篇。被SCI网络版引用651次，其中他引434次；在国内发表论文205篇，他引865次。曾获得北京



市优秀教师称号和国务院特殊津贴证书，1991年、1996年、2001年三次被评为国家863计划先进工作者。多次参加在美国、日本、澳大利亚、意大利、英国、德国、韩国和中国等地召开的国际学术会议；多次担任国际学术会议的学术委员会主席、分会场主席和国际顾问委员会成员；多次应邀作大会报告或宣讲学术论文等。

前 言

材料是人类赖以生存和发展的物质基础,是推动社会发展的直接动力。新材料是发展战略性新兴产业的基石,人类的每次重大发展都伴随着材料的进步,而技术的发展和产业的升级更离不开材料的创新。陶瓷是最古老的一种材料,是人类在征服自然的过程中获得的第一种经化学变化而制成的产品。由于陶瓷具有优良的耐热性、耐磨性、耐腐蚀性,以及高强度、高硬度等特点,在国防、机械、冶金、化工、建筑、电子、生物等领域得到了广泛应用。

粉体是由许许多多小颗粒物质组成的集合体。把粉体变成球形或者空心的物体,将会为各行各业的技术创新和产品创新带来机遇,可以获得更好的产品性能,满足更大的市场需求。把粉体原始颗粒变成球形和空心的物体,技术难度很大,但是如果把原始颗粒聚集成为球形和空心粉体,比较容易实现,同样也可以起到球形和空心粉体的作用。因此,本书将围绕陶瓷粉体的球形化和空心化研究思路,就其理论、技术和工程实践详尽阐述。通过陶瓷粉体球形化和空心化技术获得的产品统称为陶瓷微珠。陶瓷微珠(亦称陶瓷微球)是一种直径在毫米级及以下的球状无机非金属材料。根据制备原料的不同,可分为氧化物陶瓷微珠和非氧化物陶瓷微珠;根据产品的结构,可分为实心陶瓷微珠和空心陶瓷微珠;空心陶瓷微珠(也称陶瓷空心微珠)又可分为闭孔陶瓷微珠和开孔陶瓷微珠;同时,空心陶瓷微珠又分为单壁空心微珠和聚空心微珠(内部由多个空心微珠组成,亦可称为多孔微珠,为了与单壁空心微珠比较,本书统称为聚空心微珠);开孔空心微珠又根据开孔率的不同,分为高、中和低开孔率的开孔空心微珠。根据尺寸大小,陶瓷微珠可分为毫米级、微米级和纳米级陶瓷微珠等。目前,毫米级、亚毫米级、微米级和纳米级实心 and 空心陶瓷微珠市场发展迅速,其产品在超细粉高效分散、金属零部件光整光饰、吸附过滤、药物靶向治疗、电池、缓释载体、耐火材料、节能保温、化妆品、医疗健康、环境保护等行业广泛应用,对国民经

济各行各业的技术创新起着重要的基础和关键性作用。据美国一家公司预测,未来 20 年陶瓷微珠(含实心 and 空心微珠)每年以 16.7% 的速度增长,这样的增长速度在工业领域是罕见的!

自 20 世纪 90 年代以来,本人一直致力于陶瓷胶态成型工艺的研究。课题组先后发明了陶瓷瘠性料浆的胶态注射成型新工艺,研制成功胶态注射成型机和工业化原机;发明了陶瓷悬浮体快速均匀混合可控固化新工艺,提出胶态成型制备避免应力坯体的学术思想和方法,揭示了陶瓷浓悬浮体液固转变过程中裂纹形成的机制,并提出了避免裂纹产生的两种方法;发明了无毒材料体系凝胶注模成型、凝胶流延成型新工艺,以及冷冻-凝胶成型新工艺和超轻、高强多孔陶瓷的胶态成型新工艺,提出了通过释放高价反离子的直接凝固注模成型新工艺(DCC-HVCI),以及利用分散剂失效直接凝固陶瓷浓悬浮体的新方法,使得陶瓷胶态成型工艺理论和技术得到进一步完善和发展,在国际上产生了较大影响。其中“陶瓷胶态成型新工艺”项目 2003 年获得教育部科技发明一等奖,2004 年获得国家技术发明二等奖,并获得德国纽伦堡国际发明与新产品博览会金奖。课题组在该领域发表高水平文章 200 余篇,由 Springer 出版社和清华大学出版社联合出版了英文专著“*Novel Colloidal Forming of Ceramics*”。

近年来,课题组又结合国家科技部“863 计划”、国家自然科学基金、北京市科技计划、科技部创新方法工作专项等研究任务,对陶瓷粉体球形化和空心化开展了深入研究,特别是在陶瓷微珠的制备和应用方面花了大量的时间和精力,取得了一系列丰硕的科研成果。

在实心陶瓷微珠制备方面,课题组开发了一种新型陶瓷胶态成球新工艺和装置,该工艺采用悬浮聚合的方法,在胶态原位快速固化成型的基础上,可无模具制备高性能毫米及亚毫米级(0.1~3mm)实心陶瓷微珠,该工艺制备成本低、效率高,对陶瓷粉体具有普适性。课题组还自行设计并制造了工业化胶态成球装备,采用该装备已成功制备了 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 Si_3N_4 、莫来石,以及硅酸锆等实心陶瓷微珠,并作为磨介、笔珠、远红外陶瓷微珠等产品在超细粉研磨、陶瓷球珠笔及竞技体育等领域进行了广泛应用。2004 年,在河北邯郸建立了国际上第一条胶态注射成型陶瓷微珠生产线,年产高性能陶瓷微珠 5000t,整条生产线拥有全部自主知识产权。由于该技术和设备的先进性,2005 年该项目被世界 500 强法国圣戈班集团收购,为邯郸市引进了第一家世界 500 强企业,为河北邯郸地方经济的发展做出了重要

贡献。

在空心陶瓷微珠制备方面,课题组发明了一种陶瓷空心微珠普适性制备方法,该方法不仅可以制备先进陶瓷粉体空心微珠(如氮化硅、碳化硅、氧化铝和氧化锆等),也可用于煤矸石、粉煤灰、废玻璃、赤泥、矿渣等固体废弃物。所制备的空心陶瓷微珠具有质轻、低导热、隔音、高分散、电绝缘性和热稳定性好、制备成本低等特点,可广泛应用在保温、防火、建筑材料、耐火材料、填料、轻质材料、吸声材料、沙漠治理、土壤改良、药物缓释、污水处理等领域,是一种用途广泛的新型轻质空心微珠材料。该发明专利在我国已获得授权,并在其他 50 多个国家申请专利,目前已在欧洲、亚洲、美国、加拿大、澳大利亚和南非等国家和地区获得授权。该发明还获得第 44 届日内瓦国际发明展览会银奖,同时获得罗马尼亚代表团的特别嘉许奖。为了使研究更为系统,课题组还对纳米空心微珠的制备技术及在药物缓释等方面的应用进行了深入研究。课题组在陶瓷微珠研究领域已培养硕士、博士、博士后和访问学者近 30 名,取得科技鉴定成果 10 余项,获各种奖励 6 项,授权国家专利 30 余项,开发相关产品数十种,并具有很好的市场前景。

为了总结课题组 20 余年来的科研成果,与更多的科研及技术人员分享陶瓷微珠领域的新技术、新设备及新产品,决定出版此专著。本书内容主要包括两大部分:第一部分介绍毫米级及亚毫米级实心陶瓷微珠的制备及应用,包括在磨介、笔珠、远红外陶瓷微珠方面的应用;第二部分介绍微/纳米空心陶瓷微珠的制备及应用,包括空心陶瓷微珠的制备,微米级空心陶瓷微珠在保温材料、泡沫玻璃、吸附过滤、缓释和吸声降噪等方面的应用,以及纳米空心微珠的制备工艺及在药物缓释方面的应用等。

黄勇教授对于此专著的出版非常支持,并参与了相关章节的撰写和校对。衷心感谢恩师黄勇教授多年来给予的培养、关心、照顾和支持!同时今年也是黄勇教授 80 寿辰,谨借此书的出版祝愿黄勇教授健康长寿!

席小庆高级工程师参与编写了第 2、3、4 章,曹庆雷博士和何建伟博士参与编写了第 5 章,苏振国博士和渠亚男博士参与编写了第 7、8、9 章,李志君硕士参与编写了第 10 章,吴甲民博士参与编写了第 11 章,李阳硕士参与编写了第 12 章,马宁博士参与编写了第 6、13 章。王亚利工程师协助完成全书的统稿校对。课题组的很多同事、硕士和博士研究生以及在课题组从事博士后研究的合作者在此书的撰写过程中都给予了很大支持和帮助,在此一并表示致谢!

2016年5月30日,中共中央总书记习近平在全国科技创新大会上提出:“广大科技工作者要把论文写在祖国的大地上,把科技成果应用在实现现代化的伟大事业中。”本书所述及的陶瓷微珠及采用陶瓷微珠开发的产品,都已经实现了产业化或者正在产业化推广之中,实现了巨大的经济和社会效益。因为这是一本理论和实践结合的专业书籍,作者希望本着开放、交流、学习的心态,与国内外同行不断切磋、共勉。

由于作者水平有限,书中错误在所难免,还望广大读者批评指正!

杨金龙

2017年4月

目 录

第 I 部分 实心陶瓷微珠制备及应用

第 1 章 绪论	3
1.1 陶瓷微珠的概念及分类	3
1.2 陶瓷微珠的应用概况	3
1.3 实心陶瓷微珠的成型方法	6
1.3.1 滚动成型法	6
1.3.2 等静压成型	7
1.3.3 喷雾造粒法	8
1.3.4 直接热解法	9
1.3.5 反相悬浮聚合法	9
1.3.6 溶胶-凝胶法	10
1.3.7 油乳法	11
1.3.8 在液体介质中依靠界面张力成型	11
1.4 国内外实心陶瓷微珠的生产现状和发展	14
参考文献	16
第 2 章 实心陶瓷微珠制备新工艺及装备	19
2.1 概述	19
2.2 胶态成球新工艺的提出	20
2.2.1 悬浮聚合	20
2.2.2 工艺的提出	21
2.3 胶态成球新工艺成型原理及特点	21
2.3.1 成型原理	21
2.3.2 主要特点	22

2.4	胶态成球新工艺的流程及成型难点	23
2.4.1	胶态成球新工艺工艺流程	23
2.4.2	成型主要难点	23
2.5	成型介质的选择及清洗	24
2.5.1	成型介质的选择依据	24
2.5.2	硅油介质的确定	25
2.5.3	介质的黏度与微珠球形度及球径的关系	27
2.5.4	硅油的清洗	29
2.6	陶瓷微珠成型装备的研制	31
2.6.1	实验室用陶瓷微珠成型装置	31
2.6.2	工业化生产陶瓷微珠成型装置	32
2.6.3	浆料滴注装置的设计	36
2.6.4	微珠坯体的清洗装置	40
2.6.5	陶瓷微珠的高效挑选装置	41
2.7	陶瓷微珠工业化生产中成型工艺参数的调控	44
2.7.1	浆料固化速率的控制	45
2.7.2	成型介质参数的调控	50
2.7.3	工业化生产中微珠球径的控制	51
2.8	陶瓷微珠工业化烧结技术	55
2.8.1	工业化烧结窑炉的特点	55
2.8.2	微珠材料的热分析测定	58
2.8.3	陶瓷微珠烧结工艺的适应性测试	61
2.8.4	优化窑炉烧结工艺	65
	参考文献	69

第3章	陶瓷微珠磨介	71
3.1	概述	71
3.2	陶瓷微珠磨介的应用领域	71
3.2.1	非金属矿超细研磨行业	71
3.2.2	油墨、油漆、涂料行业	72
3.2.3	光整光饰行业	73
3.3	陶瓷微珠磨介的性能要求	73
3.4	陶瓷微珠磨介的研究现状	74

3.5 陶瓷微珠磨介的耐磨性能	76
3.5.1 陶瓷磨介的磨损机理	76
3.5.2 磨耗的测试标准与方法	77
3.5.3 陶瓷磨介耐磨性的影响因素	78
3.5.4 陶瓷微珠力学性能测试	89
参考文献	94
 第4章 陶瓷笔珠	 96
4.1 概述	96
4.2 陶瓷笔珠的制备工艺	97
4.3 陶瓷笔珠的研磨加工	98
4.3.1 研磨加工工艺流程	98
4.3.2 磨料及研磨剂	100
4.4 陶瓷笔珠的质量要求及检验方法	100
4.4.1 陶瓷笔珠的质量要求	100
4.4.2 陶瓷笔珠的检验方法	101
4.5 陶瓷笔珠的书写性能及其影响因素	103
4.5.1 陶瓷笔珠的书写性能	103
4.5.2 陶瓷笔珠书写性能的影响因素	105
4.6 氧化锆陶瓷笔珠的性能特点	108
4.7 氧化锆陶瓷球珠笔	110
4.7.1 墨水、笔头的分类及与陶瓷球珠的配合特点	111
4.7.2 氧化锆陶瓷球珠笔	113
4.8 科学计算与数学建模	116
4.8.1 科学计算	116
4.8.2 数学建模	120
参考文献	125
 第5章 远红外陶瓷微珠	 127
5.1 概述	127
5.2 红外线的医疗保健作用	127

5.3	远红外陶瓷材料及其辐射机理	129
5.4	远红外陶瓷材料的应用现状	130
5.5	远红外陶瓷微珠的制备	131
5.6	远红外陶瓷微珠的辐射特性	132
5.7	远红外陶瓷微珠和其他红外材料的热像图	132
5.8	远红外陶瓷微珠的应用	134
5.8.1	民用方面	134
5.8.2	竞技体育方面	136
5.9	本项目取得的成果	138
	参考文献	141

第Ⅱ部分 空心陶瓷微珠制备及应用

第6章	微纳米空心微珠	145
6.1	微米空心微珠	145
6.1.1	微米空心微珠制备方法	145
6.1.2	多孔陶瓷的制备方法的研究现状	146
6.1.3	空心微珠制备多孔陶瓷新工艺	154
6.1.4	空心微珠制备泡沫玻璃新工艺	168
6.2	纳米空心微珠	169
6.2.1	纳米空心微珠的制备方法	170
6.2.2	研究进展与应用	181
6.2.3	介孔材料	184
	参考文献	187
第7章	微米级陶瓷空心微珠的制备	195
7.1	概述	195
7.2	粉煤灰空心微珠	197
7.2.1	粉煤灰应用现状	198
7.2.2	粉煤灰空心微珠	199
7.3	煤矸石空心微珠	201
7.3.1	煤矸石应用现状	202
7.3.2	煤矸石空心微珠	203

7.4 玻璃空心微珠	205
7.4.1 废玻璃简介	205
7.4.2 玻璃空心微珠的制备	208
7.4.3 玻璃空心微珠的性质	212
参考文献	215
第8章 煤矸石空心微珠保温材料	218
8.1 概述	218
8.2 水泥基煤矸石空心微珠保温板	219
8.2.1 水泥基煤矸石空心微珠保温板制备	219
8.2.2 微观结构与发泡机理	220
8.2.3 浆料凝固过程机理	232
8.2.4 影响性能的因素	234
8.2.5 大尺寸样品的制备	241
8.3 玻璃粉基煤矸石空心微珠保温板	244
8.3.1 玻璃粉基煤矸石空心微珠保温板制备	244
8.3.2 室温发泡制备玻璃粉基空心微珠保温材料	245
8.3.3 高温发泡制备玻璃粉基空心微珠保温材料	264
参考文献	272
第9章 利用空心微珠制备泡沫玻璃	275
9.1 概述	275
9.2 泡沫玻璃的制备	276
9.2.1 发泡过程及机理	278
9.2.2 利用空心微珠制备泡沫玻璃的优势	285
9.3 泡沫玻璃制备及性能的影响因素	287
9.3.1 空心微珠	287
9.3.2 升温速率	289
9.3.3 保温时间	293
9.4 辅助发泡剂对泡沫玻璃制备及性能的影响	296
9.4.1 白云石对泡沫玻璃制备及性能的影响	296
9.4.2 高硅菱镁矿对泡沫玻璃制备及性能的影响	299
9.5 负压辅助发泡法制备超轻泡沫玻璃	303

9.5.1	负压辅助发泡法的装置与工艺	304
9.5.2	烧成工艺参数影响	305
9.6	新型泡沫玻璃的综合性能	309
9.6.1	显微结构	309
9.6.2	物相组成	310
9.6.3	抗压强度	311
9.6.4	导热系数	313
9.6.5	燃烧性能	315
9.6.6	成本	315
	参考文献	316
第 10 章	煤矸石空心微珠的吸附过滤性能	319
10.1	概述	319
10.2	煤矸石空心微珠对染料的吸附	320
10.2.1	概述	320
10.2.2	煤矸石空心微珠对染料废水的吸附	324
10.2.3	煤矸石空心微珠对 PM2.5 的过滤吸附	331
	参考文献	335
第 11 章	聚空心微珠陶瓷的制备及其性能	336
11.1	概述	336
11.2	Si_3N_4 聚空心微珠陶瓷的制备及其性能	337
11.2.1	实验原料	337
11.2.2	样品制备	338
11.2.3	性能测试	339
11.2.4	Si_3N_4 聚空心微珠陶瓷	339
11.2.5	制备工艺参数对 Si_3N_4 聚空心微珠陶瓷性能的影响	346
11.3	Si_3N_4 基和 Al_2O_3 基聚空心微珠陶瓷的制备及其性能	363
11.3.1	实验原料	363
11.3.2	样品制备	363
11.3.3	性能测试	364
11.3.4	Si_3N_4 基聚空心微珠陶瓷	364
11.3.5	Al_2O_3 基聚空心微珠陶瓷	372
	参考文献	378