



WUJI
FEIJINSHU
CAILIAO
SHOUCE

无机非金属材料手册 [上]

江东亮 李龙土 欧阳世翕 施剑林 主编



化学工业出版社



无机非金属材料手册

〔上〕

江东亮 李龙土 欧阳世翕 施剑林 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

《无机非金属材料手册》是无机非金属材料工程方面的专业工具书。分别介绍了结构陶瓷（含陶瓷基复合材料）、功能陶瓷、传统陶瓷、玻璃、晶体材料、无机涂层材料、耐火材料、碳与石墨材料、水泥与混凝土和其他新型无机材料等各种无机材料。全书从材料的基础（组成与结构）、性能、工艺过程以及应用等方面对各种材料进行综合介绍。在取材上，传统常用材料和新材料相互结合，适当介绍了一些国外相关先进材料。

本书可供无机非金属材料工程技术人员查阅使用，也可供研究人员、管理人员和高校师生参考，为无机非金属材料开发和正确选材、合理用材提供科学依据。

图书在版编目 (CIP) 数据

无机非金属材料手册. 上/江东亮等主编. —北京: 化学工业出版社, 2009. 6
ISBN 978-7-122-05335-0

I. 无… II. 江… III. 无机材料: 非金属材料-技术手册 IV. TB321-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 057706 号

责任编辑: 段志兵 周国庆
责任校对: 洪雅姝

装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京蓝海印刷有限公司

装 订: 三河市前程装订厂

880mm×1230mm 1/16 印张 47¼ 字数 2148 千字 2009 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 150.00 元

版权所有 违者必究

前言

无机非金属材料作为三大主要材料之一，不仅是国防建设，经济发展的重要支撑材料，而且是提高人们生活、生存质量休戚相关的基础材料。进入 20 世纪以来，无机非金属材料由于其独特的多种功能（电、磁、光、声、力、热、红外、超导、透波、反射等）相继发现，使其在现代高新技术中的应用得到迅猛发展。制造业从大国向强国过渡，十分依赖于高质量、多品种新材料的应用。本书的编写和出版，正是适应于这种形势的发展需要。

本手册是我国迄今为止篇幅最大，涵盖内容最新、最全的无机非金属材料工程方面的专业工具书。内容包括：概论、结构陶瓷（含陶瓷基复合材料），功能陶瓷、传统陶瓷、玻璃、晶体材料、无机涂层材料、耐火材料、碳与石墨材料、水泥与混凝土和其他新型无机材料等 11 篇共约 400 万字。参加编写的有中科院上海硅酸盐研究所、清华大学、中国建筑材料科学研究院、吉林大学、武汉科技大学、武汉理工大学、洛阳耐火材料研究院、郑州磨料磨具研究所、北京航空材料研究院等大学、研究院所和企业的专家教授共 50 余位，历时 3 年完稿。由江东亮、李龙土、欧阳世翥、施剑林任主编并负责统稿。各篇主编如下。

第 1 篇	概论	江东亮院士
第 2 篇	结构陶瓷	江东亮院士 黄校先教授 潘振魁教授
第 3 篇	功能陶瓷	李龙土院士 徐廷献教授
第 4 篇	传统陶瓷	同继锋教授
第 5 篇	玻璃	马眷荣教授
第 6 篇	晶体材料	罗豪魁教授 仲维卓教授
第 7 篇	无机涂层材料	丁传贤院士 赵金榜教授 陈杰锋教授
第 8 篇	耐火材料	李楠教授 张用宾教授 李虹霞教授
第 9 篇	碳、石墨材料	李龙土院士 沈万慈教授
第 10 篇	水泥与混凝土	隋同波教授
第 11 篇	其他新型无机材料	施剑林教授

本书在编写过程中，强调以“全而精、新而准”为特点；在整体设计上，贯彻既要立足全局，又要突出重点。从材料的基础（组成与结构）、性能、工艺过程以及应用等方面进行综合介绍。在取材上，以基础、通用、先进、实用为原则，传统常用材料和新材料相互结合。为正确选材、合理用材提供科学依据。本书还适当介绍了一些国外相关先进材料，充分体现“科学性、先进性和实用性”。本书可供无机非金属材料工程技术人员查阅使用，也可供研究人员、管理人员和高校师生参考。

感谢参与本书编写的全体作者和工作人员的辛勤劳动和努力，感谢有关单位的大力支持和帮助。由于时间仓促和编者水平所限，书中遗漏和不当之处，恳请读者批评指正。

江东亮 李龙土 欧阳世翥 施剑林

编辑委员会^①

顾问：师昌绪 严东生 李恒德 何光远 陆燕荪 徐匡迪 李学勇 栾恩杰
王淀佐 朱道本 颜鸣皋 黄培云 周 廉 左铁镛

主任：路甬祥

副主任：李成功（常务） 钟群鹏 干 勇 黄伯云 江东亮 徐滨士 王占国
潘健生 杜善义 胡正寰 柳百成 徐祖耀 陈立泉

总策划：宋天虎 黄远东

总编辑：李骏带

秘书长：黄远东（兼）

委员（按姓氏笔画排列）：

丁 辛	丁传贤	干 勇	于月光	才鸿年	马世宁	马冲先	马济民	马眷荣
马福康	王占国	王务同	王尔德	王永岩	王亚军	王至尧	王克光	王克俭
王高潮	王淀佐	王琦安	王新林	王德志	方禹之	尹志民	邓 炬	左铁钊
左铁镛	石力开	石春山	卢世刚	叶小玲	叶光斗	田志凌	田荣璋	史耀武
冯 涤	冯 稷	冯春祥	宁远涛	邢建东	师昌绪	吕 炎	吕反修	同继锋
曲文生	朱万森	朱如瑾	朱绍华	朱道本	仲维卓	任家烈	华 林	刘 明
刘正才	刘世参	刘占阳	刘邦津	刘作信	刘其贤	刘郁丽	刘治国	刘建章
刘晋春	刘清友	刘献明	齐从谦	闫 洪	江东亮	许祖泽	许祖彦	阳明书
孙 坚	孙加林	杜善义	杨 合	杨 武	杨乃宾	杨才福	杨鸣波	杨忠民
杨晓华	杨海波	杨焕文	杨德仁	李 强	李 晋	李 楠	李长久	李龙土
李成功	李光福	李志刚	李明哲	李明辉	李学勇	李虹霞	李恒德	李贺军
李海军	李骏带	李鹤林	严东生	连克仁	肖亚庆	吴 行	吴 昆	吴 诚
吴永声	吴伟仁	吴性良	吴科如	吴恩熙	吴谊群	吴智华	吴德馨	何光远
何季麟	佟晓辉	邱 勇	邱冠周	邱德仁	余金中	邹广田	汪明朴	沈 真
沈万慈	沈德忠	宋天虎	张 力	张 扬	张 华	张 杰	张 金	张 峥
张子龙	张用宾	张立同	张永俐	张吉龙	张旭初	张佐光	张晋远	张康侯
张道中	张新民	陆燕荪	陈 琦	陈文哲	陈世朴	陈立泉	陈远远	陈志良
陈国钧	陈治明	陈南宁	陈祝年	陈晓慈	陈涌海	陈祥宝	陈超志	林慧国
欧阳世翥	卓尚军	易建宏	罗祥林	罗豪甦	果世驹	周 廉	周伟斌	周国庆
郑有焯	柳玉起	柳百成	胡玉亭	胡正寰	南策文	赵万生	赵有文	赵国群
赵金榜	赵梓森	赵慕岳	钟群鹏	施东成	施剑林	姜不居	姜晓霞	祖荣祥
姚 燕	贺守华	耿 林	聂大钧	贾成厂	顾冬红	夏巨湛	夏志华	俸培宗
徐匡迪	徐廷献	徐建军	徐祖耀	徐家文	徐跃明	徐滨士	殷树言	翁宇庆
郭会光	郭景杰	高瑞萍	栾恩杰	唐仁政	唐汝钧	唐志玉	唐昌世	益小苏
涂善东	黄 勇	黄天佑	黄玉东	黄本立	黄远东	黄伯云	黄校先	黄培云
曹勇家	曹湘洪	龚七一	崔 健	康喜范	梁 齐	梁 军	梁志杰	屠海令
隋同波	韩凤麟	彭艳萍	葛子干	董 瀚	董汉山	董首山	董祖珏	董湘怀
蒋力培	蒋建平	傅绍云	储君浩	谢邦互	谢里阳	谢建新	鄢国强	雷天民
路甬祥	解应龙	解思深	雍歧龙	蔡中义	漆 玄	谭 抚	熊守美	靳常青
樊东黎	黎文献	颜永年	颜鸣皋	潘正安	潘叶金	潘振甦	潘健生	燕 瑛
戴国强								

① 本书是原《中国材料工程大典》其中的一卷。《中国材料工程大典》由中国机械工程学会、中国材料研究学会组织编写，中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会及中国复合材料学会参加组织编写。本编辑委员会即为《中国材料工程大典》编委会。

目 录

第1篇 概论	1	2.3 氧化铈稳定的四方氧化锆多晶陶瓷	55
1 无机非金属材料定义和科学基础	3	2.4 部分稳定氧化锆陶瓷	58
1.1 无机非金属材料定义	3	2.5 氧化锆增韧氧化铝	65
1.2 无机非金属材料科学基础	3	3 莫来石陶瓷	72
2 无机非金属材料的制备科学与技术	3	3.1 莫来石的晶体结构和相关系	72
3 无机非金属材料工程分类	4	3.2 莫来石陶瓷的物理化学性质	73
4 无机非金属材料的应用背景	5	3.3 莫来石陶瓷的合成与烧结	74
4.1 航空航天应用	5	3.4 莫来石陶瓷的强化与增韧	75
4.2 能源材料	5	3.5 莫来石陶瓷的光学性能	77
4.3 信息功能材料	5	3.6 莫来石陶瓷的应用	77
4.4 交通运输产业	5	4 锆英石陶瓷	79
4.5 生物医用材料与工程	5	4.1 锆英石的结构和特性	79
4.6 传统基础工业和材料产业提升	5	4.2 锆英石陶瓷粉体的制备研究	80
4.7 环境保护	6	4.3 锆英石陶瓷材料的烧结研究	81
5 无机非金属材料的发展趋势	6	4.4 锆英石陶瓷基复合材料	82
参考文献	8	4.5 锆英石陶瓷的应用	83
第2篇 结构陶瓷	9	5 钛酸铝陶瓷	83
第1章 概述	11	5.1 钛酸铝陶瓷的组成和结构	83
1 结构陶瓷定义及分类	11	5.2 钛酸铝陶瓷的基本性质	84
2 结构陶瓷在国民经济中的地位和作用	11	5.3 钛酸铝的合成	84
2.1 对科学技术发展的作用	11	5.4 钛酸铝陶瓷的烧结和性能优化	85
2.2 对发展现代制造业和传统工业技术改造的作用	11	5.5 钛酸铝陶瓷的应用	85
2.3 在节约资源和节约能源技术方面的作用	12	第4章 氮化物陶瓷	87
2.4 对巩固国防、发展军用技术的作用	12	1 氮化硅(Si_3N_4)的结晶化学	87
3 结构陶瓷的发展趋势	12	1.1 氮化硅结构	87
第2章 结构陶瓷材料的制备科学	13	1.2 含氮金属硅铝酸盐化合物	88
1 制备科学的内涵及其重要性	13	1.3 氮化硅及赛隆固溶体	90
2 超微粉体的制备方法	13	2 氮化硅为基的陶瓷系统高温物理化学相平衡	97
2.1 固态法制备超微粉体	13	2.1 M-Si-O-N系统	97
2.2 液相法制备超微粉体	15	2.2 M-Si-Al-O-N系统	99
2.3 气相法制备超微粉体	20	2.3 某些 sialon 系统中的高温液-固相反应及组分设计简述	102
2.4 常见氧化物粉体的制备	21	3 氮化硅陶瓷	105
2.5 常见氮化物粉体的制备	23	3.1 氮化硅物理化学性质	106
2.6 常见碳化物粉体的制备	26	3.2 氮化硅力学性能	107
2.7 常见硼化物粉体的制备	27	3.3 氮化硅制备科学	108
3 陶瓷成形中的制备科学	27	3.4 氮化硅基复相材料	119
3.1 陶瓷成形的重要性	27	3.5 氮化硅陶瓷材料的应用	123
3.2 几种新开发的成形技术	27	4 赛隆陶瓷	125
4 烧结过程的高温物理化学	28	4.1 单相赛隆陶瓷分类及其特性	125
第3章 氧化物陶瓷	30	4.2 复相赛隆陶瓷及其性质	137
1 氧化铝陶瓷	30	4.3 赛隆陶瓷的制备	143
1.1 矿物资源和氧化铝的制备	30	4.4 赛隆陶瓷的应用	145
1.2 氧化铝结晶学	32	5 氮化铝陶瓷	146
1.3 不同品级氧化铝粉体的制备及应用	34	5.1 氮化铝结构与特性	147
1.4 氧化铝的性质	35	5.2 氮化铝陶瓷制备技术	148
1.5 与氧化铝有关的一些常用相图	38	5.3 影响氮化铝陶瓷热导率的因素及改善氮化铝热导率的途径	151
1.6 氧化铝陶瓷的制备	39	5.4 透明氮化铝陶瓷	160
1.7 氧化铝陶瓷的应用	43	5.5 氮化铝陶瓷的应用	161
2 氧化锆增韧陶瓷	45	6 氮化硼陶瓷	162
2.1 氧化锆增韧陶瓷概述	45	6.1 氮化硼的结构特性	162
2.2 Y-TZP 增韧陶瓷	49	6.2 六方氮化硼(hBN)制备科学	166
		6.3 立方氮化硼制备科学	169

6.4 氮化硼的应用	172	6.3 核聚变材料中的应用	225
7 氮化钛陶瓷	174	第8章 晶须增强陶瓷基复合材料与层状陶瓷复 合材料	227
7.1 氮化钛结构和特性	174	1 晶须增强陶瓷基复合材料	227
7.2 氮化钛陶瓷制备技术	174	1.1 晶须增强体	227
7.3 氮化钛应用	176	1.2 晶须增强陶瓷基复合材料的增强机制	228
第5章 碳化物陶瓷	178	1.3 晶须增强陶瓷基复合材料的性能影响因素	229
1 碳化硅陶瓷	178	1.4 晶须增强陶瓷基复合材料的制备工艺	230
1.1 碳化硅的结晶形态和晶体结构	178	1.5 晶须增强陶瓷基复合材料的应用	231
1.2 碳化硅基本特性	179	2 层状陶瓷复合材料	231
1.3 碳化硅陶瓷的制备工艺	181	2.1 层状复合材料的结构设计	231
1.4 碳化硅基复相材料	183	2.2 层状复合材料增韧机制	232
1.5 碳化硅及其复合材料的应用	190	2.3 影响层状复合材料性能的因素	232
2 碳化硼陶瓷	191	2.4 层状复合材料的制备方法	233
2.1 碳化硼的结晶形态和晶体结构	191	第9章 颗粒弥散增强陶瓷复合材料	235
2.2 碳化硼基本特性	192	1 增韧机制	235
2.3 碳化硼致密化工艺	192	1.1 裂纹尖端互相作用机制	235
2.4 碳化硼陶瓷的应用	194	1.2 过程区机制	236
3 碳化钛工程陶瓷	194	1.3 裂纹桥接机制	237
3.1 碳化钛的晶体结构	195	2 颗粒弥散增强陶瓷复合材料的实践	238
3.2 碳化钛的基本特性	196	2.1 非相变颗粒弥散增强复合陶瓷	238
3.3 碳化钛材料的致密化工艺	196	2.2 金属颗粒和金属间化合物颗粒增强陶瓷 复合材料	239
4 其他碳化物材料	196	3 几种颗粒弥散增强复合陶瓷的典型应用	240
4.1 过渡金属碳化物粉体制备技术	196	参考文献	241
4.2 过渡金属碳化物复合材料制备技术	197	第3篇 功能陶瓷	255
4.3 过渡金属碳化物复合材料的应用	197	第1章 概述	257
第6章 硼化物陶瓷	199	1 功能陶瓷的含义和分类	257
1 硼化钛陶瓷材料	199	2 功能陶瓷在电子信息领域中的应用	259
1.1 硼化钛的结晶形态和结晶结构	199	3 功能陶瓷的发展趋势	259
1.2 硼化钛的基本特性	199	第2章 绝缘和介质陶瓷	261
1.3 硼化钛陶瓷的制备	200	1 陶瓷材料的介电极化与介电性能	261
1.4 硼化钛基复相陶瓷材料的制备	201	1.1 绝缘性	261
1.5 硼化钛材料的应用	201	1.2 介质极化和介电性质	262
2 硼化锆陶瓷材料	202	2 基片与封装陶瓷	264
2.1 硼化锆陶瓷的结构与制备	202	2.1 特点和分类	264
2.2 硼化锆陶瓷的应用	203	2.2 滑石瓷	264
第7章 纤维增强陶瓷基复合材料	204	2.3 氧化铝瓷	267
1 概述	204	2.4 高热导率瓷	271
2 纤维增强陶瓷基复合材料的一般特性	204	3 高频电容器瓷	274
2.1 纤维	204	3.1 高频电容器瓷的性能特点和分类	274
2.2 陶瓷基复合材料增强体的增强形式	207	3.2 金红石瓷	275
2.3 陶瓷基体材料	209	3.3 钛酸钙瓷和钙钛硅瓷	277
2.4 纤维增强陶瓷基复合材料的界面	210	3.4 钛酸镁瓷和镁钨钛瓷	279
3 纤维增强陶瓷基复合材料的制备工艺	212	3.5 锡酸盐瓷和锆酸盐瓷	281
3.1 化学气相渗透法	212	3.6 钛铌铪瓷	283
3.2 有机先驱体浸渍与裂解法	213	4 微波介质陶瓷	283
3.3 反应烧结法	214	4.1 特点与分类	284
3.4 热压烧结法	214	4.2 BaO-TiO ₂ 系列陶瓷	285
3.5 其他制备方法	215	4.3 A (B _{1/3} B' _{2/3}) O ₃ 钙钛矿型陶瓷	287
4 纤维增强陶瓷基复合材料的结构与性能	215	4.4 (Zr, Sn) TiO ₄ 系陶瓷	288
4.1 典型的显微结构	215	4.5 BaO-Ln ₂ O ₃ -TiO ₂ 钨青铜型陶瓷 (BLT 系)	289
4.2 力学性能	216	4.6 其他系统的微波陶瓷材料	290
4.3 高温抗氧化性能	221	第3章 铁电陶瓷	292
4.4 其他性能	221	1 铁电体的基本特性	292
5 纤维增强陶瓷基复合材料的评价技术	222	1.1 自发极化与铁电体	292
5.1 界面性能评价	222	1.2 铁电体的分类	292
5.2 力学性能评价	224	1.3 铁电体的电畴结构	293
6 纤维增强陶瓷基复合材料的应用领域	224		
6.1 航空航天领域中的应用	224		
6.2 高温燃气轮机中的应用	225		

1.4 极化反转与电滞回线	294	7.1 压电驱动器	333
1.5 铁电体的电学非线性	296	7.2 压电传感器	334
1.6 铁电体的结构相变与临界现象	296	7.3 压电换能器	334
1.7 铁电体的电致疲劳特性	297	7.4 压电变压器	335
2 钛酸钡铁电陶瓷	298	7.5 压电滤波器	335
2.1 钛酸钡的晶体结构与自发极化	298	7.6 压电声表面波振荡器	335
2.2 钛酸钡的电畴结构	300	第5章 半导体及其敏感陶瓷	337
2.3 钛酸钡陶瓷的介电性能	301	1 热敏电阻陶瓷	337
2.4 钛酸钡陶瓷中的芯-壳结构	304	1.1 热敏电阻瓷的分类及命名	337
2.5 钛酸钡的缺陷结构与抗还原性	305	1.2 热敏电阻瓷的基本特性	337
2.6 钛酸钡的价控半导化及 PTC 效应	306	1.3 陶瓷热敏电阻材料	339
2.7 钛酸钡陶瓷的介电老化现象	306	1.4 热敏电阻的应用	341
2.8 钛酸钡粉体的合成工艺	307	2 压敏陶瓷	341
2.9 钛酸钡铁电陶瓷的应用	307	2.1 压敏陶瓷的基本特性	341
3 PLZT 透明铁电陶瓷	308	2.2 压敏陶瓷简介	343
3.1 铁电陶瓷的电光效应	308	3 湿敏陶瓷	348
3.2 PLZT 透明铁电陶瓷的组成和相图	309	3.1 概述	348
3.3 PLZT 透明铁电陶瓷的制备工艺	309	3.2 湿敏陶瓷的制造工艺	349
3.4 PLZT 铁电陶瓷的物理特性和应用	311	3.3 湿敏陶瓷的性能	349
4 弛豫型铁电陶瓷	313	3.4 湿敏陶瓷的检测	351
4.1 弛豫铁电体的基本特性	313	3.5 湿敏陶瓷的应用	351
4.2 弛豫铁电体的结构稳定性和制备工艺	315	4 气敏电阻陶瓷	352
4.3 弛豫铁电陶瓷的相关关系	316	4.1 概述	352
4.4 弛豫铁电陶瓷的物理性能及应用	316	4.2 典型的半导体式气敏陶瓷	352
5 非钙钛矿结构铁电陶瓷	318	4.3 半导体式气敏陶瓷元件的应用	354
5.1 铋层状结构铁电陶瓷	318	4.4 接触燃烧式可燃气体气敏陶瓷	354
5.2 铌青铜结构铁电陶瓷	319	4.5 氧敏传感器陶瓷	354
5.3 焦绿石结构铁电陶瓷	320	4.6 硫化物系传感器陶瓷	355
5.4 钛铁矿结构铁电陶瓷	320	5 力敏陶瓷	356
6 反铁电陶瓷	321	5.1 压电式力传感器的性能指标与力敏陶瓷	
6.1 反铁电体的物理特性	321	材料的性能	356
6.2 PbZrO_3 反铁电陶瓷的性能及应用	321	5.2 力敏陶瓷的工作原理	357
第4章 压电陶瓷	323	5.3 力敏陶瓷的应用	357
1 压电体及压电效应	323	6 光敏陶瓷	359
1.1 压电材料的发展	323	6.1 光敏电阻的主要参数	359
1.2 正逆压电效应	323	6.2 光敏电阻的工作原理	361
1.3 压电参数	324	6.3 光敏电阻器的应用	361
2 钛酸铅压电陶瓷	325	7 半导体晶界层电容器陶瓷	362
3 锆钛酸铅压电陶瓷	326	7.1 半导体晶界电容器陶瓷制备工艺要点	362
3.1 锆钛酸铅相图及其组成对压电性能		7.2 半导体晶界电容器的性能与用途	363
的影响	326	第6章 离子导电陶瓷	364
3.2 添加改性剂对锆钛酸铅压电性能的影响	327	1 氧化锆导电陶瓷	364
4 三元及多元系压电陶瓷	328	1.1 氧化锆的晶体结构及其离子导电性	364
4.1 $\text{PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3\text{-Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 三元系		1.2 氧化锆粉体的制备技术	365
压电陶瓷	328	1.3 氧化锆陶瓷的烧结	366
4.2 $\text{PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3\text{-Pb}(\text{Y}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$ 三元系压		1.4 氧化锆陶瓷膜	366
电陶瓷	328	1.5 氧化锆导电陶瓷的应用	366
5 无铅压电陶瓷	329	2 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 导电陶瓷	370
5.1 钛酸铋钠基无铅压电陶瓷	329	2.1 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的结构特征	370
5.2 铋层状结构无铅压电陶瓷	329	2.2 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的离子传导特性	371
5.3 铌青铜结构无铅压电陶瓷	330	2.3 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的复相陶瓷	372
5.4 铈酸盐系无铅压电陶瓷	330	2.4 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的离子交换特性	372
6 压电复合材料	330	2.5 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的制备技术	372
6.1 压电复合材料的连接方式	330	2.6 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的应用	373
6.2 0—3 型压电复合材料	331	2.7 我国的 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷产品	377
6.3 1—3 型压电复合材料	331	3 锂离子导电陶瓷	377
6.4 3—0 型压电复合材料	332	3.1 Nasicon 结构的锂离子导体	377
6.5 影响压电复合材料的因素	332	3.2 具有钙钛矿结构的钛酸镧锂及类似结构	
7 压电陶瓷及应用	333		

的锂离子电解质材料	378	4.2 常用永磁铁氧体材料及其工艺	436
3.3 硫化物及氧硫化物玻璃电解质	379	5 旋磁铁氧体材料及器件	437
3.4 氧化物玻璃电解质	379	5.1 铁磁共振与旋磁效应	437
3.5 硫化物体系玻璃及玻璃陶瓷电解质	380	5.2 旋磁铁氧体材料性能要求	438
3.6 锂离子导电的玻璃及玻璃陶瓷固体电 质的应用	380	5.3 常见旋磁铁氧体材料	439
4 准液态传导的快离子导体	381	5.4 旋磁铁氧体材料发展趋势	443
4.1 阳离子导电的蒙脱石化合物	381	6 其他铁氧体磁性材料	444
4.2 阴离子导电的层状双氢氧化物	383	6.1 矩磁铁氧体材料	444
5 高温质子导体	386	6.2 磁记录铁氧体材料	446
5.1 ABO ₃ 型高温质子导体的晶体结构	386	6.3 磁泡铁氧体材料	448
5.2 缺陷结构与质子导电性	386	6.4 磁致伸缩铁氧体材料	449
5.3 高温质子导电陶瓷的应用	387	6.5 磁敏感铁氧体材料	449
6 氧化铈导电陶瓷	388	6.6 巨磁阻材料	449
7 结束语	389	第9章 生物陶瓷	450
第7章 高温超导陶瓷	390	1 生物惰性陶瓷	450
1 超导电性和高温超导体	390	1.1 氧化物陶瓷和非氧化物陶瓷	450
1.1 超导体和超导电性简述	390	1.2 碳质材料	456
1.2 氧化物超导体	390	1.3 惰性生物玻璃陶瓷	457
1.3 铜氧化物高温超导体的发现	391	1.4 其他生物惰性医用无机材料	459
2 高温超导体的结构组装	392	2 生物活性陶瓷	459
2.1 高温超导体的结构简介	392	2.1 生物活性玻璃	459
2.2 高温超导体的基本结构特征	392	2.2 生物活性玻璃陶瓷	461
2.3 高温超导体的无限层结构外延组装	394	2.3 羟基磷灰石生物活性陶瓷	463
3 钇系氧化物高温超导系列	398	2.4 磷酸钙骨水泥	466
3.1 钇系超导体的结晶化学简介	398	3 可生物降解陶瓷	468
3.2 钇系超导体的特征	399	3.1 钙磷降解陶瓷的仿生设计	469
3.3 钇系超导体的制备工艺	399	3.2 钙磷降解陶瓷的研究现状与主要理论成就	469
4 铋系高温超导系列	402	3.3 生物降解陶瓷的发展	472
4.1 铋系超导体的基本结构	402	4 生物陶瓷复合材料	472
4.2 铋系超导体的元素替代效应	403	4.1 钙磷生物活性陶瓷涂层材料	472
4.3 铋系超导体的制备	404	4.2 生物活性陶瓷复合材料	475
5 汞系陶瓷高温超导体	408	4.3 纤维增强生物玻璃复合材料	476
5.1 汞系陶瓷超导体的结构化学	408	4.4 医用高分子生物陶瓷复合材料	476
5.2 汞系陶瓷超导材料的制备方法	409	第10章 铁电压电薄膜	480
5.3 汞系超导体的元素替代效应及其物性	412	1 铁电薄膜制备	480
6 高温超导体的应用	415	2 铁电薄膜材料	480
6.1 超导体的应用简介	415	3 铁电压电薄膜特性及其应用	481
6.2 高温超导体的电力技术应用	415	3.1 铁电薄膜的极化转向及其应用	481
6.3 高温超导体的信息产业技术应用	418	3.2 铁电薄膜的热释电效应及其应用	483
第8章 磁性陶瓷	420	3.3 铁电薄膜压电特性及其应用	484
1 材料的基本磁学性质	420	3.4 铁电薄膜的高介电性能及其应用	485
1.1 原子磁矩	420	3.5 铁电薄膜的电光特性及其应用	485
1.2 铁磁性、反铁磁性与亚铁磁性	420	4 关注和展望	485
1.3 交换作用	420	第11章 其他新型功能陶瓷材料	487
1.4 饱和磁化强度和居里温度	421	1 功能陶瓷复合材料	487
1.5 磁畴与畴结构	421	1.1 功能陶瓷复合材料的分类	487
1.6 磁化过程	421	1.2 复合材料的制备原则	487
1.7 磁晶各向异性和磁致伸缩	422	1.3 陶瓷复合材料的制备技术	488
2 铁氧体的晶体结构	422	1.4 陶瓷基体复合材料的研究开发方向	489
2.1 尖晶石结构铁氧体	423	2 梯度功能陶瓷	490
2.2 平面六角结构铁氧体	425	2.1 阶梯状孔梯度陶瓷材料性能研究	490
2.3 石榴石结构铁氧体	426	2.2 梯度陶瓷的制备方法	492
3 软磁铁氧体材料	427	2.3 梯度陶瓷的应用	493
3.1 软磁铁氧体的性能要求	427	3 光子带隙材料	493
3.2 软磁铁氧体材料	430	3.1 光子晶体的特征	494
3.3 平面六角铁氧体	434	3.2 光子带隙材料的制备方法	494
4 硬磁铁氧体材料	435	3.3 具有光子带隙结构光子晶体的应用	496
4.1 硬磁铁氧体的基本性能要求	435	3.4 光子带隙材料的发展趋势	496
		4 透明陶瓷	497

4.1 几种重要透明陶瓷及其性能性质	497	5.5 阴干	567
4.2 透明陶瓷的制备工艺	498	5.6 成形	567
4.3 影响透明陶瓷性能的主要因素	500	5.7 干燥	568
4.4 透明陶瓷的应用	500	5.8 上砂上釉	568
4.5 未来透明陶瓷的研究发展趋势	500	5.9 烧成	568
4.6 透明陶瓷的典型成果和产品	501	5.10 瓷件的加工与胶装	569
参考文献	502	6 电瓷产品的类型	569
第4篇 传统陶瓷	507	6.1 绝缘子的基本类型和用途	569
第1章 概述	509	6.2 绝缘子的基本性能	570
1 传统陶瓷的分类和使用	509	7 玻璃绝缘材料和玻璃绝缘子	570
1.1 建筑卫生陶瓷	509	7.1 玻璃绝缘材料	570
1.2 电工陶瓷	509	7.2 钢化盘形悬式玻璃绝缘子	572
1.3 化工陶瓷	509	第4章 化工陶瓷	573
2 原材料	509	1 化工陶瓷的分类及使用	573
2.1 矿物原料	509	1.1 按品种分类	573
2.2 化工原料	516	1.2 按使用状况分类	573
2.3 辅助材料	517	2 化工陶瓷的性能	573
3 机械装备	519	2.1 化工陶瓷的物理力学性能	573
3.1 原料加工设备	519	2.2 耐酸陶瓷管的性能	573
3.2 成形设备	523	2.3 陶瓷过滤器的性能	574
3.3 干燥设备	524	2.4 陶瓷填料的性能	574
3.4 施釉与装饰设备	524	3 化工陶瓷的生产工艺	574
3.5 烧成设备	525	3.1 化工陶瓷的生产工艺流程	574
3.6 成品冷加工设备	526	3.2 化工陶瓷的制作特点	574
3.7 其他设备	526	4 化工陶瓷的发展趋向	580
第2章 建筑卫生陶瓷	527	4.1 金属铠装和玻璃钢复合增强	580
1 建筑陶瓷	527	4.2 材质选用	581
1.1 陶瓷墙地砖	527	4.3 新型化工陶瓷的技术动态	581
1.2 饰面瓦和琉璃制品	536	4.4 新型化工陶瓷材料的应用领域	581
1.3 特殊功能陶瓷砖和环保型陶瓷砖	538	5 化工陶瓷产品标准	582
1.4 如何选择陶瓷墙地砖	539	5.1 化工陶管及配件	582
2 卫生陶瓷	539	5.2 耐酸耐温砖	583
2.1 卫生陶瓷的分类	539	5.3 耐酸砖	584
2.2 卫生陶瓷的结构与组成	540	参考文献	585
2.3 卫生陶瓷的技术要求与测试方法	542	第5篇 玻璃	587
2.4 卫生陶瓷制备	548	第1章 概述	589
2.5 卫生陶瓷的选用	551	1 玻璃的结构及其表征方法	589
2.6 节水型卫生陶瓷	552	1.1 玻璃态的特性	589
2.7 卫生陶瓷配件	552	1.2 玻璃的结构	589
2.8 卫生陶瓷配套产品	555	1.3 玻璃结构的表征方法	590
第3章 电工陶瓷	556	2 玻璃的制造工艺	591
1 电瓷材料的分类和性能	557	2.1 浮法玻璃成形工艺	592
2 电瓷材料配方与显微结构	558	2.2 溶胶-凝胶低温合成法	592
2.1 普通硅质瓷	558	2.3 高频熔炼法	592
2.2 高硅瓷	559	2.4 化学气相沉积法	593
2.3 铝质瓷	560	3 玻璃的性质及其检测方法	593
2.4 高压直流系统用电瓷材料	561	3.1 玻璃的物理性质	593
2.5 电瓷显微结构与力学性能	561	3.2 玻璃的化学性质	595
3 电瓷釉和瓷砂	562	4 玻璃的品种	596
3.1 电瓷釉的分类	562	4.1 高纯石英玻璃	596
3.2 电瓷釉的组成和性能	562	4.2 激光玻璃	596
3.3 电瓷用瓷砂	563	4.3 卤化物玻璃	597
4 电瓷胶合剂	564	4.4 防辐射玻璃和耐辐射玻璃	597
5 电瓷工艺和主要设备	565	第2章 玻璃工艺	599
5.1 球磨	566	1 玻璃原料	599
5.2 过筛除铁	566	1.1 二氧化硅	599
5.3 压滤与陈腐	566	1.2 氧化铝	600
5.4 真空炼泥	567	1.3 纯碱	600

1.4 其他玻璃原料	600	1.4 浮法玻璃的产品规格	662
2 成分配制	607	1.5 浮法玻璃的用途	662
2.1 配合料的计算	607	2 深加工玻璃	662
2.2 纯度	609	2.1 中空玻璃	662
2.3 自动配料	609	2.2 钢化玻璃	664
3 玻璃窑炉与熔化	610	2.3 装饰玻璃	668
3.1 玻璃池窑	610	2.4 真空玻璃	671
3.2 其他玻璃熔窑	612	2.5 夹层玻璃	673
3.3 玻璃熔窑用耐火材料	614	2.6 镀膜玻璃	674
3.4 燃料与燃烧	617	2.7 热弯玻璃	678
3.5 玻璃生成反应	618	3 其他建筑玻璃	679
3.6 澄清和均化	619	3.1 槽形玻璃	679
3.7 富氧燃烧与全氧燃烧	621	3.2 玻璃空心砖	680
4 玻璃成形	622	3.3 玻璃马赛克	681
4.1 成形理论、黏度	623	4 特种玻璃	682
4.2 平板玻璃成形	627	4.1 光学玻璃	682
4.3 器皿玻璃成形	635	4.2 器皿玻璃	685
4.4 瓶罐玻璃成形	637	4.3 医药玻璃	689
4.5 显像管成形	640	4.4 电气玻璃	690
4.6 球、管、泡成形	640	4.5 电子玻璃	693
5 退火	641	4.6 颜色玻璃	694
5.1 退火点	641	4.7 泡沫玻璃	699
5.2 应变点	641	4.8 微晶玻璃	700
5.3 残余应力	641	4.9 艺术玻璃	704
5.4 退火	644	4.10 玻璃纤维及制品	705
6 玻璃加工	648	4.11 玻璃微珠	708
6.1 切割	648	4.12 其他氧化物玻璃	709
6.2 研磨与抛光	649	4.13 非氧化物玻璃	711
6.3 表面处理	651	5 新型玻璃	712
6.4 玻璃的强化	654	5.1 光纤	712
6.5 热加工	657	5.2 石英玻璃	714
第3章 玻璃品种	660	5.3 剂量玻璃	723
1 平板玻璃	660	5.4 激光玻璃	725
1.1 生产方法	660	5.5 凝胶玻璃	730
1.2 产品的性能	660	参考文献	733
1.3 产品质量要求	660		

第 1 篇

概 论

1 无机非金属材料的定义和科学基础

1.1 无机非金属材料的定义

传统的无机非金属材料又称为硅酸盐材料。它主要包括陶瓷、玻璃、水泥和耐火材料四大类，而这几大类材料就其化学组成和结构来观察均属硅酸盐类。同时从此类材料的发展历史和应用面广泛程度看，其中陶瓷材料又最具有代表性。因此又简称为陶瓷材料。当前各国无机非金属材料领域出版的主要学术刊物和相应学会均称为陶瓷学报或通报（如美国陶学报 J. Am. Ceram. Soc.，欧洲陶瓷学报 J. Euro. Ceram. Soc.、日本陶瓷学报 J. Japan Ceram. Soc. 等）与陶瓷学会（如美国陶瓷学会、欧洲陶瓷学会、日本陶瓷学会等）。中国目前仍沿用硅酸盐学报和硅酸盐学会，但其英文名称均已采用 ceramics 来代替 silicates。现今陶瓷 ceramics 一词已赋予新涵义，它覆盖了整个无机非金属材料领域。随着第二次世界大战的结束，世界范围内经济恢复和科学技术的高速发展，在传统硅酸盐材料技术的基础上，一大批具有各种功能（机、电、声、光、热、磁、铁电、压电和超导等）和特性的材料相继出现，突破了传统意义上的四大类材料。一些新领域如人工晶体材料、非晶态材料、先进陶瓷材料（包括功能和结构）、无机涂层材料、碳材料、超硬材料和无机复合材料的相继涌现，逐步发展成为现今在材料科学研究前沿领域中处于最活跃、最具活力的新型无机非金属材料科学与工程，从而赋予无机非金属材料与工程以新的、更广泛的科学涵义和内容。

1.2 无机非金属材料的科学基础

无机非金属材料从其化学组成上除传统硅酸盐类以外，还包含各种含氧酸盐、氧化物、氮化物、碳与碳化物、硼化物、氟化物、硫化物、硅、锗Ⅲ-V 族化合物以及Ⅱ-VI 族化合物。

无机非金属材料从结构形态上已经从传统硅酸盐类多晶体和玻璃态逐步发展成为单晶、多晶、非晶态、无定形等构形。从形貌上则包含零维粉末、一维晶须、纤维、二维薄膜到三维块体材料。从尺度上讲则从微米、亚微米发展到纳米层次。

无机非金属材料从其化学键本质来看，主要是由离子键、共价键和混合键（离子+共价）构成。由化学键的本质和特点构成了这一大类材料特有的高强度、高熔点、高硬度、耐磨和抗氧化等基本热物理和力学特性。同时又具有从绝缘到半导、导体和超导体的宽范围导电性能。此外还具有光性、磁性、铁电和压电性能，从而为材料的各种应用进行组合设计提供了无限遐想。通过材料的组成、结构可以设计和组合出具有各类功能和多功能的新材料和新体系。

但是要实现功能的优化和对应的预想结构并非易事，必须要具有相应的制备科学基础才能最终实现。

2 无机非金属材料的制备科学与技术

材料科学的发展与材料的制备科学技术的不断改进和创新休戚相关。无机非金属材料的发展同样依赖于制备科学技术的不断改进和升华。传统无机非金属材料以陶瓷为例，尽管有几千年的发展史，而且它是中华文明和世界文明历史的一个重要标记，但是从 19 世纪下半叶开始，由于传统陶瓷是以硅酸盐类为基础，其结构、组成的复杂性以及缺少对其科学基础的了解，尤其是落后的制备工艺使其发展长期停滞。随着其他学科的发展，特别是金属、高分子材料的迅猛发展，制备科学与技术的发展首先对原料的要求已经从过去

单纯依赖复杂的天然矿物走向高纯、超细的人工合成料。相应的添加剂选择、配料混合、成形方式方法以及黏结剂选择，直至烧结方法和烧结过程的温度、气氛的控制，最终获得所需的制品，也就是制备过程从传统意义上的作坊式（手工艺）上升到制备科学与技术。

当然不同种类的材料均有其自身发展规律可循，其相应的制备科学与技术发展既有其共同点也有各自特点。但是可以明确指出无机非金属材料也同样遵循材料科学发展的基本规律，是建立在科学意义上对材料组成、结构、性能和制备科学相互关系四面体的全面了解和掌握（见图 1.0-1），从预定性能和应用目标到进入材料设计和最终实现，在很大程度上依赖于制备科学与技术的选择和实施，因此制备科学的重要性也就不言而喻了。

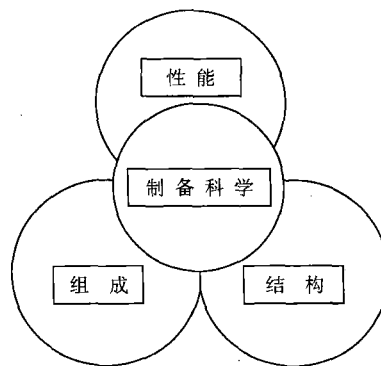


图 1.0-1 材料科学的组成、结构、性能和制备科学之间的关系

当前制备科学与技术的发展重点与材料本身发展必须相呼应、相协调。同时它又必须遵循低成本、节能、环保无公害、少加工甚至无加工，以及复杂形状、异形个性化部件的精密制造等要求。下面列举一些不同领域的例子作一说明。

例如，在功能陶瓷材料制备中，采用了一系列新工艺如低温共烧技术、无铅技术、水基流延技术与工艺的开拓。

又如在结构陶瓷和陶瓷基复合材料领域中为满足大型、复杂部件的精密加工而发展起来的一系列湿法成型、凝胶注等工艺技术。生物陶瓷（人工骨、齿等）的个性化特点，采用计算机辅助设计和计算机辅助加工（CAD/CAM）技术进行精密加工等快速原型技术（rapid prototype），已经是当前无机非金属材料制备科学与技术发展的主要方向之一。

而在耐火材料领域，材料的再生循环利用技术以及为了降低能耗、现场浇灌不定形制品的发展，已经在各种冶金、化工窑炉中得到广泛应用。以日本为例，耐火材料品质的不断改善，使窑炉寿命延长。目前每吨钢消耗的耐火材料已下降到 16 kg 左右，且不烧非定形制品比例已超过定形制品，达到 60% 以上（国内目前只有 20% 左右）。从上述二项指标看，我国耐火材料业还需迎头赶上。

我国是世界上最大的水泥生产国和消费国。传统水泥生产不仅能耗大，而且对环境污染十分严重，因此发展环境协调制备技术尤为迫切。20 世纪 80 年代以来国际上以悬浮预热和预分解技术为核心的现代“新型干法水泥生产”方法取得了进展。此外在发展高质量混凝土的前提下，采用低水胶比、掺加细矿物料（粉煤灰、矿渣等）等技术也是发展的主要方向。

图 1.0-2 ~ 图 1.0-6 列出了几类主要无机非金属材料制备科学的基本示意图。

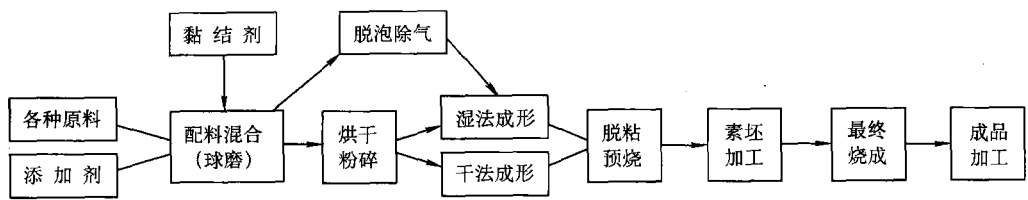


图 1.0-2 结构和功能陶瓷基本制备工艺示意图

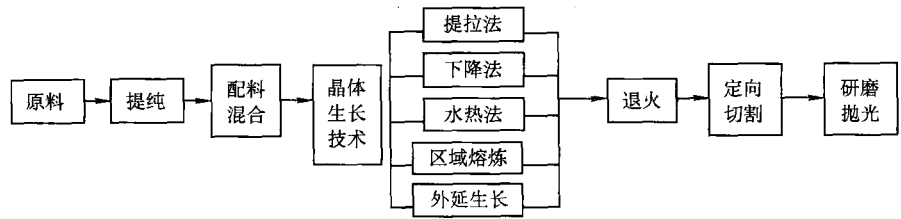


图 1.0-3 人工晶体生长工艺过程示意图

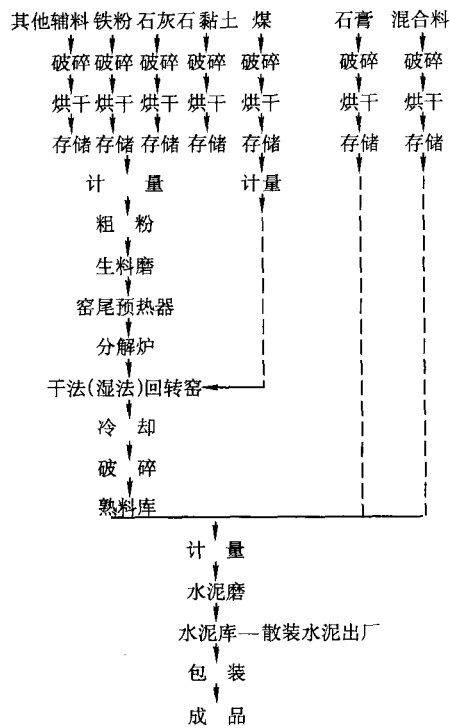


图 1.0-4 水泥干法（湿法）回转窑生产流程

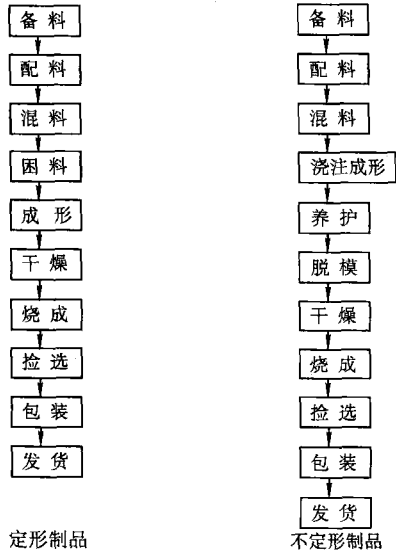


图 1.0-5 耐火材料基本生产工艺过程示意图

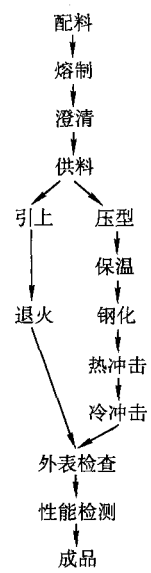


图 1.0-6 玻璃基本生产工艺流程示意图

3 无机非金属材料工程分类

随着无机非金属材料与工程的迅猛发展，原先以传统硅酸盐分类的标志已经不能充分表达其广泛涵义。从其应用面来看除了作为传统材料应用的陶瓷、玻璃、耐火材料 and 水泥四大类之外，大量新材料的出现使得原有分类已经不能涵盖这一类材料的全部，更重要的是无法突出其在高新技术发展中作为支撑材料之一的重要性。为此在原有材料的基础上进行扩展，增加其新内涵。除此之外对于目前正处于快速发展的一大类新材料如纳米材料、介孔材料、多孔和保温材料等均列入其他新型无机材料作为独立一篇列出。而目前与国防军工与人民生活休戚相关的陶瓷基复合材料和生物陶瓷材料则因避免与其他篇重复而均归入到结构陶瓷材料篇作为独立一章、节加以介绍。

总之，这一分类方案基本上遵循本大典编写宗旨——希望做到新而全，即向广大工程技术人员提供当今国内外最新、最实用的技术资料和数据，提供最先进、最权威的技术工具书。

整个无机非金属材料工程由结构陶瓷材料、功能陶瓷材料、传统陶瓷材料、玻璃材料、晶体材料、无机涂层材料、耐火材料、超硬与耐磨材料、碳和石墨材料、水泥与混凝土材料、其他新型无机材料等构成。

4 无机非金属材料的应用背景

无机非金属材料作为三大材料之一,半个多世纪以来,随着对材料基础知识的深入了解,学科的交叉渗透,以及研究工作的迅猛发展,各种新材料及其特性能的相继出现以及传统材料性能的不断提高,它的应用范围也从传统领域向高新技术领域发展。同时随着全球经济发展尤其是我国经济高速发展,又对材料提出了新的需求。无机非金属材料正日益成为国民经济、国防安全和高新技术发展的基础,其主要应用领域分别阐述如下。

4.1 航空航天应用

随着世界范围内开发空间和各国国防安全的需要,对于空天材料的需求日益迫切。例如为进行空间科学探测而建立的空间观察站,它对材料的需求就是五花八门,既涉及空间站长期运作所需要的一系列高性能探测、接收、返回仪器及相关材料,又涉及发射、空天运输并能反复使用的航天飞机。它们对材料需求的共同点即是在满足性能前提下要求材料愈轻愈好。作为结构件要求材料具有优异的比刚度、比强度,作为往返大气层的航天飞机要求其外层蒙皮材料为能忍受热烧蚀的耐热、隔热材料以保护空间飞行器内部仪器能够长期在剧变温差条件下可靠运行以及空间宇航员的安全返回。述及到无机非金属材料,有各种耐高温烧蚀材料,热保护材料,卫星表面温控涂层,火箭喉衬材料,透波、吸波材料,反射镜材料,抗氧化材料等。无机非金属材料由于其本身固有的特点在耐高温、高强度、比刚度大以及各种特异的光、电、磁、红外等性能方面具有其他材料所不能替代的一面,将在我国航天材料中发挥重大作用。

4.2 能源材料

能源是国民经济发展的基础。传统以矿物燃料(煤、石油、天然气)为主的能源,不仅受到地球资源的限制,又受到日益严重的环境负荷影响(大量二氧化碳排放对大气层的破坏),发展清洁、环保、无污染少污染的新型能源正日益受到各国政府和研究部门的重视。同样新能源的开发利用也是与材料密不可分的。首先各国从节能、提高能源效率角度出发,根据卡诺循环基本原理,燃烧效率与进入热机的燃气温度和排气温度差成4次方关系,因此提高燃气温度是提高热效率的关键。然而提高温度带来的第一个问题就是材料的耐热、抗氧化和长时间寿命问题。尾气排放、净化处理再生同样也是一个问题。大型水力发电站大坝建设涉及大量高强度水泥、混凝土问题,核电站则涉及抗辐照损伤材料和核泄漏检测防护以及核废料的处理等一系列问题。除了上述常规能源和核能外,发展新能源将是各国科学家关注的最重要的问题。目前燃料电池、氢能、太阳能、风能、潮汐能、热电转换材料等等是研究热点,在中、高温燃料电池的开发中,储氢材料、热电材料等都属于无机非金属材料范畴。此外,从照明节能角度看,世界各国发展半导体Led发光材料来替代能耗较大的白炽灯(<5%效率),同样是当前材料研究的重大课题,尤其是以氮化镓和掺铟的氮化镓半导体材料为研究热点。

4.3 信息功能材料

21世纪是人类进入信息社会的重要时期,信息社会依赖于信息产业的高速发展,而信息产业发展的基础则是以微电子和光电通信产业为基石,而这块基石又是由各种各样的信息功能材料所构成的。众所周知,硅单晶的出现,GaAs等一大类Ⅲ-V族半导体材料的研发成功,使微电子产业获得了蓬勃发展,同样石英光导纤维的成功开发,促进了光通

信产业的兴起,它们都属于无机非金属材料范畴。除此之外,大量功能陶瓷材料和人工晶体的出现,更使信息产业发展获得了更多的新材料。例如作为第3代半导体宽带隙高温半导体SiC、GaN等单晶的商业化,大功率激光陶瓷,红外陶瓷,透波、吸波材料等陆续问世,将为信息产业的发展注入新的活力。

新一代功能陶瓷-智能陶瓷,利用陶瓷原有各种功能的组合,通过传感-反馈-驱动系统的集成效应,对外界感知做出判断和相应反应,从而研制成一类具有一定智慧的应用系统。目前这一类智能材料和系统尚处于发展阶段,距人工智能尚有不少距离。

4.4 交通运输产业

随着我国经济高速持续发展以及经济全球化加速,交通运输日趋紧张。民航、铁路、高速公路大发展,不仅带动了农村和边缘地区发展,又加速了城乡一体化进程。交通运输发展不仅促进了传统产业中基础材料,如钢、水泥建材等高速增长,同时也带动了一大批新兴材料的发展,如面向航空的一系列新型轻量化结构材料、高强铝合金和钛合金、耐高温复合材料、碳材料和碳/碳复合材料、火车和飞机的刹车片制品材料、直升飞机用陶瓷轴承材料。此外,各种功能材料如发光材料、红外材料以及各种敏感材料均有大量需求。例如近代汽车制造业,车用传感器涉及的敏感元件多达百余种。此外结构件的轻量化,也使有机、无机复合材料得到进一步广泛应用。同时在控制汽车尾气排放上,大量采用无机非金属多孔材料如堇青石、莫来石、碳化硅质多孔泡沫材料以及各种催化剂材料。此外车船用轴密封、泵密封也大量使用氧化铝、碳化硅和石墨等无机非金属耐磨材料。还应提及的是交通运输业中大量使用各种玻璃材料,包括舷窗玻璃,防辐射、紫外、红外、吸收、反射等各种功能玻璃,以及作为信号反光用玻璃微珠材料的需求,不仅促进了传统玻璃行业升级换代,也加快了新型功能玻璃的研究探索。

总之,无机非金属材料将为我国交通运输业的发展提供各种优质的基础材料和新功能材料。

4.5 生物医用材料与工程

随着人类社会逐步进入老龄化,例如日本到2020年老龄人口将超过总人口的25%,我国60岁以上人口2000年已达总人口的15%,预测2020年将达25%以上,由此产生的器官老化、功能日益减退与人们对生活质量的要求愈来愈高相矛盾。随着城市化加速进行,大量交通事故诱发伤人致残,从而导致生活质量下降也已在社会占有相当比例。此外先天性缺陷和一些疾病造成致残人群,同样期待着改善自身的生活质量。据不完全统计我国骨缺损患者高达300万,牙缺损患者约为总人数的1/3。目前每年需要置换的人工髋关节和种植牙齿就分别高达80 000例和40万~50万例。我国作为发展中人口大国,这种需求随着人民生活水平的提高正以每年15%~20%的速度在增长。这部分硬组织置换材料和人工齿均是无机非金属材料中需要特别关注的一大类材料(生物陶瓷)。由于这一类陶瓷、玻璃、水泥或涂层具有与人体组织在组成上接近,生物相容性好,无毒等优点,正成为一项在世界范围内的重要产业。

此外,用碳纤维编织的人造血管、无机涂层、涂覆钛合金的心脏瓣膜也是引人注目的材料。

近年来对于药物输送和缓释材料,采用多孔和纳米材料可能是一个重要方向。

4.6 传统基础工业和材料产业提升

我国是能耗大国,也是材料单耗大国,因此提升基础产

业材料(钢、铁、铜等金属材料;水泥、耐火材料、玻璃、陶瓷等无机非金属材料)对降低资源浪费、减少能源消费和环境负荷具有特别重要的意义。就无机非金属材料来说,我国目前年产水泥已达8亿吨,约占全球产量1/2左右。我国耐火材料由于品种落后,性能低下,吨钢消耗20~26 kg耐火材料,比先进发达国家要多消耗10~16 kg耐火材料,造成能源和资源的大量浪费。

陶瓷、水泥和耐火材料都是通过高温过程的物理化学变化,即通过粉末的合成、成形和烧结过程来实现的。大量低质量产品更加深了能源消费的紧张,因此开发新一代优质耐火材料和高标准水泥以及大量采用粉煤灰渗合技术将是重要一环。我国钢铁产量已居世界第一,但由于品种不全和质量低下,每年仍要进口1000多万吨优质钢材。同样在发展新型钢种、提高冶炼质量和精密铸件生产上,新型耐火材料、新型陶瓷材料和泡沫多孔陶瓷将充当重要配角。

陶瓷切削工具、金刚石制品及其他超硬耐磨材料为机械工业提供了高速高质量的加工工具。陶瓷轴承为无润滑高速装置提供了基础,不仅为机床工业,也为交通运输、化工装置提供了耐磨、耐腐蚀的重要部件。

4.7 环境保护

从20世纪下半叶开始,全球经济高速增长以及人口爆炸性急增(目前已超过60亿)带来了一系列环境问题,酸雨、地球变暖、臭氧层破坏、热带雨林减少、土地荒漠化、废气排放等直接影响到新世纪人们的生活质量和生存环境。这些问题又与各国的产业政策相关。为此联合国于1992年在巴西首都里约热内卢召开地球峰会,探讨抑制环境恶化,减少诱发臭氧层破坏的氟里昂使用等议题。在1997年日本京都召开的防止地球变暖国际会议上,初步确定发达国家在2008~2012年间,造成地球变暖的气体排放量要比1990年平均水平再减少5%,并逐年降低。各国在经济高速增长的前提下,对能源需求有增无减,而以矿物燃料为主的能源工业与环境保护要求两者之间的冲突日益加剧。中国作为世界发展中人口大国,又是能源消费大国,而从能源结构来说相当长一段时间内仍将以矿物燃料(煤、石油)为主,因此除了积极寻找清洁能源(例如煤的地下气化、净化)和发展新的无污染能源(如风力、潮汐、太阳能等)外,最重要的一条即是控制烟道气和汽车尾气排放,即进行净化、再生、回收处理。因此发展各种功能的无机膜、介孔、多孔材料以及各种类型的新型催化剂材料应该是无机非金属材料工作者的一个重要任务。

此外,陶瓷材料、玻璃、水泥均是通过高温过程来制备的,因此在制备科学上降低烧结温度、减少加工过程等节能技术同样也会在客观上起到保护环境的作用。

围绕可持续发展,发展生态环境材料,实现材料产业的可持续发展,已成为必由之路。所谓生态环境材料(ecomaterial)是指材料在满足使用性能要求的同时还应具有良好的生态环境协调性,即可循环、再生使用、与环境相协调功能,发展生态环境材料应满足以下基本特征:

- ① 无毒、无污染清洁生产工艺;
- ② 资源、能耗在整个循环过程中消耗最少;
- ③ 可再生、回收;
- ④ 材料的高利用率。

传统无机非金属功能材料中大量应用铅,工艺过程中大量使用有机溶剂,日用陶瓷釉彩中使用铅以及含重金属的釉料等,对环境和人体带来了严重危害。此类产品出口将受到国际社会封杀,因此尽快发展无铅陶瓷和采用水基工艺将对功能陶瓷的发展,满足环境友好要求应是当务之急。

生态环境材料不仅是一个具体的材料研究与开发问题,

也是一个材料科学与工程领域的问题。它的研究与开发涉及自然科学与人文、社会科学问题,涉及多学科交叉和相关技术基础。

5 无机非金属材料的发展趋势

首先21世纪是人与社会、自然环境协调发展的世纪,21世纪又是信息爆炸、人文交流的全球时代。面对新世纪各国均将研究重点集中于生命科学、信息、材料和能源等领域,因为它们代表了知识密集和经济发展的源泉。

材料科学与工程为国民经济建设、国防安全提供了大量基础材料,尤其是在推动高新技术发展方面起到了支撑作用。无机非金属材料作为三大材料之一,特别是从20世纪下半叶开始在材料研究和各种功能开发上取得了巨大进展,突破了传统材料的缺点和不足,出现了一大批性能优异的新材料和新品种,对推动我国高新技术发展和提升传统产业起到了积极作用。但是面对新世纪对材料的巨大需求,我国在性能、数量、价格、资源环境保护上仍存在较大差距。就水泥而言我国已经是世界上产量占一半的大国,但从性能、资源环保、能耗等方面均远落后于世界平均水平。同时在航空航天材料方面,我国的复合材料虽然发展迅猛,但至今一些重要纤维如碳纤维和碳化硅纤维不仅性能低下,且品种有限,直接影响到我国复合材料事业的发展,也极大地抑制了我国空天技术的国际竞争能力。再如高性能陶瓷,尽管材料性能与国际水平基本同步,但是其产业化程度相对较低,主要是相应制备科学技术远落后于先进发达国家。又如我国人工晶体在国际上享有崇高声誉,有自主知识产权,有自己的先进制备工艺技术,一些晶体处于国际领先地位,但是由于国内器件化能力差,大部分功能晶体只能作为原材料输出,制成产品后再返销中国,造成大量外汇流失。凡此种种不胜枚举,面对以上材料发展上的种种问题,结合我国经济发展、国防安全需求,以及高新技术各个领域需求,对无机非金属材料与工程的发展总趋势提出以下几个方面供参考:

- ① 低成本、环境友好制备科学与技术;
- ② 多功能化;
- ③ 复合化;
- ④ 微型化;
- ⑤ 特异性和个性化。

先进的制备科学与技术是发展新材料的关键,一种新制备技术的出现可以为新材料的发展开辟出一片全新空间。制备科学与技术也是材料走向生产和实际应用的关键。对于无机非金属材料来说,合成制备、成形、加工技术更为重要,它们对材料的组织结构和性能有极大的影响。为加速新材料由研究到应用的进程,必须加强材料的先进制备科学与工艺技术的研究。

20世纪末在全球范围内兴起了纳米材料。由于材料在尺度上远小于传统微米、亚微米材料,同样体积的材料,当其尺度下降一个量级时其比表面将增大一个量级,材料表面的结构往往有别于内部结构,具有较大的表面能。因此当材料尺度下降到纳米级(100 nm以下)时,巨大的比表面能使材料具有常规颗粒所不具备的特性。“小尺寸效应”、“界面效应”、“量子尺寸效应”和“宏观量子隧道效应”使纳米材料在结构、磁、光、电学和化学性质等方面均表现出特异性,已经成为21世纪全球科学研究的一大热点。在2002年10月由Business Communications Co. Inc (BCC)组织的第五届纳米粒子年会上,一位专家指出陶瓷材料可能构成整个纳米材料市场的80%,最重要的纳米粒子形式是简单的氧化物,特别是SiO₂、Al₂O₃和TiO₂以及部分正在拓展用途的金属纳米粒子。2001年纳米粒子总市场估计为5.5亿美元,并预测