

无机非金属材料手册

下

江东亮 李龙土 欧阳世翥 施剑林 主编



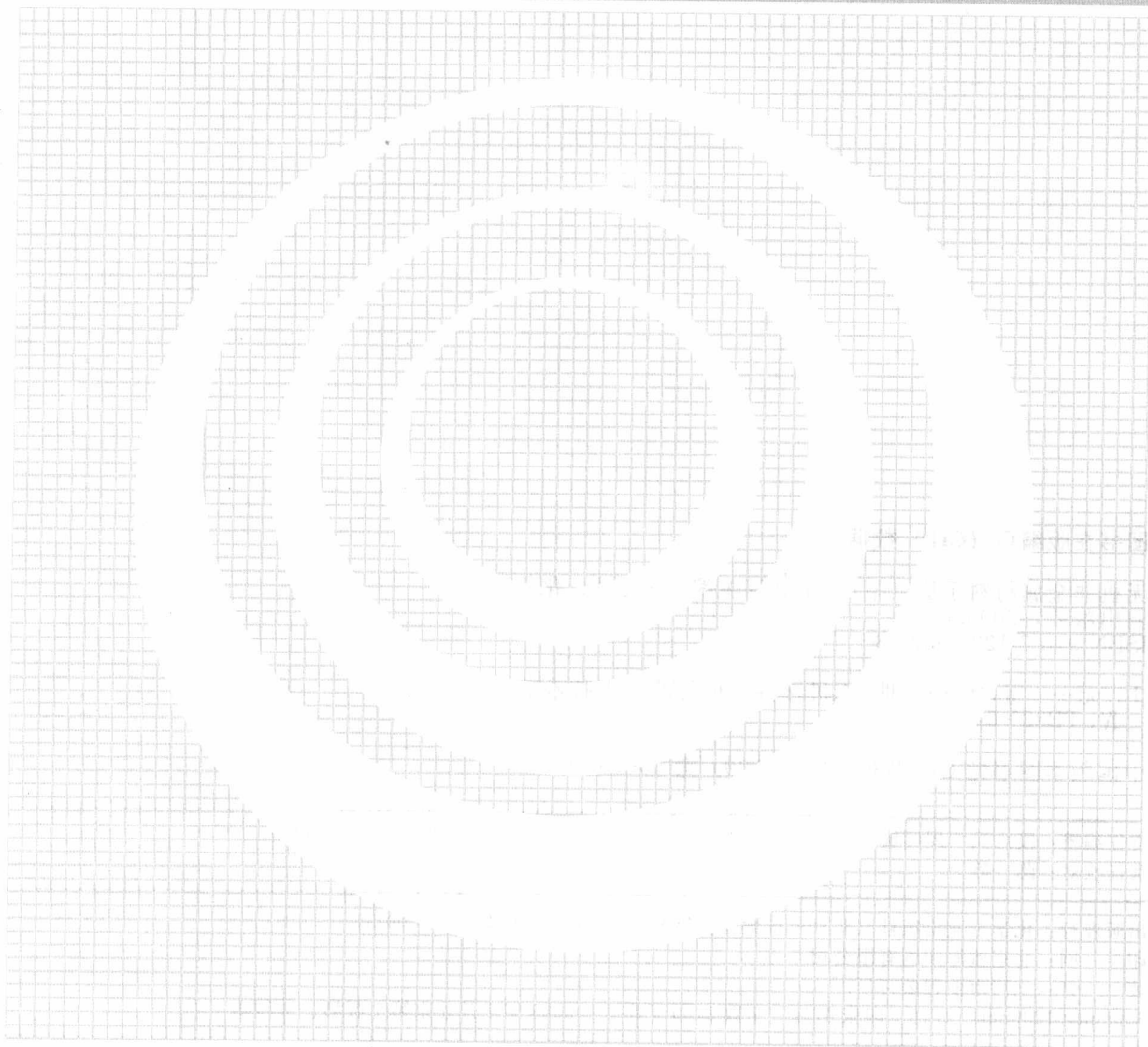
化学工业出版社



无机非金属材料手册

[下]

江东亮 李龙土 欧阳世翥 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. 下/江东亮等主编. —北京: 化学工业出版社, 2009. 6
ISBN 978-7-122-05334-3

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 057705 号

责任编辑: 段志兵 周国庆
责任校对: 陈 静

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 47 $\frac{3}{4}$ 字数 2169 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、欧阳世翕、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 潘振甦教授
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	罗豪甦教授 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 欧阳世翕 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 左铁镞

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
左铁镞	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	陈运远	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
郑有灶	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	姜晚霞	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	樊七一	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6篇 晶体材料	1	2 水热法生长晶体	52
第1章 晶体结构与形态	3	2.1 水热法	52
1 晶体格子构造	5	2.2 高温高压下水溶液热力学特性	52
2 晶体的对称	5	2.3 水热生长晶体动力学	53
2.1 晶体的几何形态与对称	5	2.4 水热法生长晶体缺陷	55
2.2 对称点群	5	2.5 水热法制备纳米晶	55
3 晶格结构与结晶形态	8	3 助熔剂法生长晶体	56
3.1 金属晶格与结晶的形态	8	3.1 助熔剂的选择	56
3.2 离子晶格与结晶形态	9	3.2 助熔剂生长方法	56
3.3 原子晶格与结晶形态	9	3.3 助熔剂生长晶体的溶液结构与晶体生长 习性	57
3.4 分子晶格与晶体形态	9	4 熔体提拉法	58
4 七个晶系晶体结晶形态与定向	10	5 坩埚下降法	60
4.1 等轴晶系	11	6 外延生长技术	61
4.2 六方晶系	11	7 区熔法	61
4.3 三方晶系	12	8 焰熔法	62
4.4 四方晶系	13	第4章 非线性光学晶体	63
4.5 斜方晶系	13	1 非线性光学晶体的理论基础	63
4.6 单斜晶系	14	1.1 晶体的非线性光学效应	63
4.7 三斜晶系	14	1.2 参量过程和非参量过程	63
5 晶体结晶形态的多变性	15	1.3 非线性电极化率的增强	64
6 晶体形态的结晶化学基础	16	1.4 位相匹配	64
6.1 晶体构型与化学键	16	1.5 角度位相匹配	64
6.2 负离子配位多面体在晶体中的结晶方位 与晶体结晶形态	17	1.6 温度位相匹配	65
第2章 晶体生长基础	30	1.7 光学混频	66
1 生长界面结构的动力学转换效应	30	1.8 光学参量放大和参量振荡	66
1.1 生长机理的理论研究	30	1.9 三阶非线性光学效应	66
1.2 水杨酸苯酯的新实验数据	30	1.10 光折变效应	66
1.3 晶体生长过程的光学实时观测研究	31	2 磷酸盐晶体	67
2 晶体生长中的流体运动效应	32	2.1 磷酸二氢钾晶体	67
2.1 质量传输过程	32	2.2 磷酸二氧钾晶体	68
2.2 动量传输过程	34	2.3 磷酸钛氧钾晶体	68
2.3 热量传输过程	35	3 α -磷酸锂晶体	69
2.4 流体非稳态传输过程	36	4 硼酸盐晶体	69
3 晶体形态稳定性	37	4.1 β -偏硼酸钡晶体	69
3.1 晶体形态稳定性与生长机制	38	4.2 三硼酸锂晶体	71
3.2 实时观察方法研究界面稳定性	38	4.3 四硼酸锂铯晶体	72
3.3 晶体形态的 Monte Carlo 模拟	38	5 铌酸盐晶体	73
3.4 晶体形态稳定性与扩散效应	38	5.1 铌酸盐晶体	73
3.5 对流效应对晶体界面非稳定性的影响	39	5.2 铌酸钾晶体	75
4 负离子配位多面体生长基元理论模型及其应用	40	5.3 铌酸锂晶体	75
4.1 模型的结晶化学基础	40	5.4 钽铌酸钾晶体	76
4.2 模型的结晶学基础	40	5.5 铌酸锶钡晶体	77
4.3 模型的实验基础	40	6 钛酸盐晶体	78
4.4 模型的稳定能计算	41	6.1 钛酸钡晶体	78
4.5 模型在晶体生长中的作用	43	7 准位相匹配材料	78
第3章 晶体生长方法	48	7.1 准位相匹配技术的基本原理	79
1 水溶液法生长晶体	48	7.2 准位相匹配材料的制备	79
1.1 溶液溶解度与饱和度	48	7.3 准位相匹配技术的优缺点	79
1.2 晶体生长平衡态	48	8 半导体型非线性光学晶体	79
1.3 晶体生长方法简介	48	8.1 体型半导体非线性光学晶体	79
1.4 晶体的生长形态与籽晶取向和杂质影响	50	8.2 量子阱结构材料和超晶格材料	82
1.5 水溶液法晶体生长习性机理实例	50	9 有机非线性光学晶体	82
		9.1 L-精氨酸磷酸盐晶体	83

9.2 酰胺类尿素晶体	83	3 光学晶体的分类	136
9.3 苯基衍生物晶体	84	4 光学晶体发展	139
9.4 吡啶衍生物晶体	85	第9章 热释电晶体	141
9.5 酮衍生物晶体	85	1 热释电晶体	141
10 紫外, 深紫外非线性光学晶体	86	2 晶体热释电系数及其优值因子	141
10.1 KBBF 晶体	86	3 热释电晶体材料	142
10.2 KABO 晶体	87	3.1 TGS[(NH ₂ CH ₂ COOH) ₃ H ₂ SO ₄]单晶系列	142
第5章 铁电和压电晶体	89	3.2 钽酸锂和铌酸锂晶体	143
1 压电与铁电晶体的基础	89	3.3 正方钨青铜型结构的晶体	143
1.1 晶体的物理性能与宏观对称性	89	3.4 铈镁酸铅钛酸铅 (PMNT) 弛豫铁电体单晶	143
1.2 晶体介电性的基础	90	第10章 激光晶体	145
1.3 晶体弹性的基础	90	1 固体激光工作物质概述	145
1.4 晶体的铁电性	93	2 固体激光工作物质的光谱性质	147
1.5 压电方程	95	3 固体激光工作物质的基本要求	148
2 铁电和压电晶体的介绍	96	4 氧化铝晶体为基质的激光晶体	148
2.1 PMNT 和 PZNT 晶体	96	4.1 掺铬氧化铝晶体 (红宝石)	148
2.2 BaTiO ₃ 晶体	101	4.2 掺钛氧化铝晶体 (掺钛蓝宝石)	149
2.3 LiNbO ₃ 和 LiTaO ₃ 晶体	103	5 YAG 系列晶体为基质的激光晶体	150
2.4 钨青铜结构晶体	105	5.1 掺稀土离子石榴石晶体	150
2.5 水溶性铁电晶体	106	5.2 掺稀土铝酸钪晶体	153
3 非铁电性压电晶体	108	6 氟化物晶体为基质的激光晶体	155
3.1 SiO ₂ 晶体	108	6.1 掺稀土离子氟化物晶体	155
3.2 ZnO 晶体	110	6.2 掺过渡金属离子氟化物晶体	157
3.3 α -LiIO ₃ 晶体	111	7 钒酸盐晶体为基质的激光晶体	158
3.4 LGS 晶体	112	8 色心激光晶体	159
3.5 四硼酸锂 (Li ₂ B ₄ O ₇) 晶体	113	8.1 F ₂ 色心	161
3.6 磷酸铝 (α -AlPO ₄) 和 CaPO ₄ 晶体	113	8.2 F ₂ ⁺ 色心	161
3.7 锗酸铋 (Bi ₁₂ GeO ₂₀) 晶体	114	8.3 F ₂ ⁻ 色心	161
3.8 压电晶体的结构与形成机理	115	9 其他重要的激光晶体	162
第6章 电光晶体	117	9.1 掺铈铝酸钪晶体 (BeAl ₂ O ₄ : Cr ³⁺)	162
1 电光效应的理论基础	117	9.2 氟磷酸盐晶体	162
1.1 线性电光效应	117	9.3 掺铈镁橄榄石晶体	164
1.2 二次电光效应	117	9.4 掺铈氟铝酸盐晶体	165
1.3 电光系数的测量	117	10 自倍频激光晶体	166
1.4 电光效应的应用	117	10.1 四硼酸铝钪钇晶体	166
1.5 电光晶体的一般要求	119	10.2 掺铈三硼氧酸钪钙晶体 (Ca ₄ GdO(BO ₃) ₃ :Nd ³⁺ , GdCOB:Nd ³⁺)	166
2 KDP 族晶体	119	第11章 闪烁晶体	169
3 ABO ₃ 型晶体	120	1 闪烁晶体在高能物理上的应用	169
3.1 LiNbO ₃ 和 LiTaO ₃ 晶体	120	2 闪烁晶体在医学应用领域	170
3.2 立方晶系钙钛矿型晶体	121	2.1 X 射线成像	170
3.3 钨青铜型晶体	122	2.2 γ 射线照相机	170
4 AB 型晶体	123	2.3 X 射线层面照相术	170
5 杂类晶体	124	2.4 正电子发射断层扫描 (Positron Emission Tomography, PET)	170
第7章 声光晶体	127	2.5 医学成像技术对闪烁晶体的性能要求	170
1 声光效应的理论	127	2.6 PET 用新型闪烁体的研发状况	171
1.1 两种衍射类型	127	3 闪烁晶体发光机制	171
1.2 正常和异常声光效应	127	4 闪烁晶体性能特征指标	172
1.3 声光系数的测量	127	5 钨酸铅晶体 (PWO)	173
1.4 声光效应的应用	127	5.1 PbWO ₄ 晶体结构	173
1.5 声光晶体的品质因数	129	5.2 钨酸铅晶体形态	174
2 声光晶体	129	5.3 PWO 晶体的发光中心与发光机制	174
第8章 光学晶体	131	5.4 PWO 晶体的闪烁特性	176
1 光在介质中的传播	131	5.5 PWO 晶体光学性能的各向异性效应	178
1.1 材料的折射率	131	5.6 PWO 晶体掺杂研究	181
1.2 材料对光的吸收	131	5.7 坩埚下降法生长 PWO 晶体	181
1.3 光的色散	132		
1.4 非线性折射率	132		
2 光学晶体的应用及对光学介质材料的要求	132		

5.8 提拉法生长 PWO 晶体	182	5.4 石榴石	218
6 钨酸铋晶体 (BCO)	182	5.5 橄榄石	219
6.1 BCO 晶体的特征和主要用途	183	5.6 黄玉	220
6.2 BCO 晶体的闪烁性能	183	5.7 电气石	220
6.3 BCO 晶体发光机理	184	5.8 长石	221
6.4 BCO 晶体的辐照损伤	184	6 玉石	221
6.5 BCO 晶体掺杂研究	186	6.1 翡翠	221
6.6 BCO: La 晶体在室温下的闪烁特性	186	6.2 软玉	222
6.7 BCO 晶体的生长方法和工艺	188	6.3 蛇纹石玉	222
6.8 晶体结构与表面形貌	189	6.4 合成玉石	222
6.9 晶体缺陷	191	参考文献	224
7 碘化铯 CsI (Tl) 晶体	194	第7篇 无机涂层材料	227
7.1 CsI (Tl) 晶体光致发光	195	第1章 概述	229
7.2 CsI (Tl) 晶体光产额	195	1 涂料的定义及其特性	229
7.3 CsI (Tl) 晶体 X 射线激发的发射光谱	195	2 无机涂料的作用和地位	230
7.4 Tl 在 CsI 晶体中的分布	195	3 无机涂料国内外发展近况及趋势	230
7.5 Tl 在大尺寸 CsI (Tl) 晶体中分布与发光 均匀性的关系	197	第2章 无机涂层材料与涂层	233
7.6 晶体表面抛光对 CsI (Tl) 晶体光产额与 均匀性的影响	197	1 等离子体喷涂陶瓷涂层材料	233
7.7 晶体形状与表面处理对光产额均匀性影响	198	1.1 等离子体喷涂涂层工艺	233
7.8 晶体的包装对光产额的影响	199	1.2 热阻涂层	233
7.9 晶体表面条件优化对晶体闪烁性能的改善	199	1.3 耐磨涂层	235
7.10 CsI (Tl) 晶体的热释光研究	199	1.4 医用生物涂层	236
8 氟化铅晶体 (PbF ₂)	199	1.5 电解水电极涂层	238
8.1 PbF ₂ 晶体结构与相变	199	2 航天器热控涂层	240
8.2 氟化物晶体生长概述	200	3 电致变色涂层 (薄膜)	242
8.3 PbF ₂ 晶体的生长	201	4 太阳选择性吸收涂层	243
8.4 PbF ₂ 晶体缺陷	201	5 其他涂层	243
8.5 PbF ₂ 晶体缺陷特征	202	5.1 隐身涂层	243
8.6 PbF ₂ 晶体的光吸收	204	5.2 红外辐射涂层	244
8.7 掺杂氟化铅晶体的发光特征	205	5.3 高温抗氧化涂层	244
9 硅酸镨晶体 (LSO)	206	5.4 导电涂层	244
9.1 LSO 晶体闪烁性能	207	第3章 无机涂料分类和合成	245
9.2 LSO 晶体生长	208	1 无机涂料的分类	245
第12章 宝石晶体	209	1.1 纯无机基料及其涂料	245
1 金刚石晶体	209	1.2 有机-无机复合树脂及其涂料	251
1.1 物理化学特征	209	2 纳米组成涂料或纳米结构涂料	256
1.2 成因、产地	209	参考文献	258
1.3 经济评价标准	209	第8篇 耐火材料	259
1.4 质量改善	210	第1章 耐火材料基础	261
1.5 合成金刚石	210	1 耐火材料的分类	261
1.6 金刚石相似品	211	1.1 按化学属性分类	261
2 刚玉类晶体	212	1.2 按化学矿物组成分类	261
2.1 天然红宝石、蓝宝石	212	1.3 其他分类方法	262
2.2 人工改善	213	2 耐火材料的组成、结构与性质	262
2.3 合成刚玉	213	2.1 耐火材料的化学-矿物组成	262
3 绿柱石晶体	214	2.2 耐火材料的显微结构	262
3.1 天然绿柱石	214	2.3 耐火材料的常温物理性质	263
3.2 人工改善	215	2.4 耐火材料的热学性质和导电性质	263
3.3 合成绿柱石晶体	215	2.5 耐火材料的力学性质	264
4 金绿宝石	216	2.6 耐火材料的高温使用性质	265
4.1 天然金绿宝石	216	2.7 抗渣蚀性能	266
4.2 合成金绿宝石	216	3 耐火材料的外形尺寸准确性及外观缺陷	267
5 中档宝石	216	4 耐火材料的制造工艺概述	267
5.1 水晶	216	4.1 原材料的加工制造	267
5.2 尖晶石	217	4.2 耐火原料的破粉碎	277
5.3 锆石	217	4.3 坯料的制备	277
		4.4 成形	278

4.5 砖坯干燥	278	1.2 石墨	335
4.6 耐火制品的烧成	279	1.3 焦炭	335
第2章 硅质耐火材料	281	1.4 炭黑	336
1 硅质原料	281	1.5 抗氧化剂	336
1.1 硅质原料的分类及其特征	281	2 碳复合耐火材料结合剂	337
1.2 硅质原料的特性	282	2.1 结合碳结构	337
2 制品	282	2.2 沥青类结合剂	337
2.1 硅坯	282	2.3 酚醛树脂	339
2.2 硅质绝热板	286	2.4 沥青-树脂复合结合剂	340
2.3 熔融石英制品	286	3 镁碳耐火材料	340
第3章 硅酸铝质耐火材料	288	3.1 MgO-C 砖的性能及影响因素	340
1 概述	288	3.2 MgO-C 砖的应用	341
1.1 硅酸铝质耐火材料的分类	288	4 铝碳耐火材料	344
1.2 与硅酸铝系耐火材料有关的相图	288	4.1 铝碳质滑动水口	344
2 硅铝系耐火原料	290	4.2 铝碳质长水口、整体塞棒和浸入式水口	346
2.1 蜡石原料	290	5 铝镁碳耐火材料	348
2.2 黏土原料	291	5.1 主原料的选择	348
2.3 高铝矾土原料	293	5.2 基质组成的确定	348
2.4 蓝晶石族矿物原料	296	5.3 石墨的影响	349
2.5 合成莫来石原料	299	5.4 树脂结合铝镁碳砖的性能与应用	349
3 硅铝系耐火制品	300	6 镁钙碳耐火材料	350
3.1 黏土质耐火制品	300	6.1 含游离 CaO 的碱性耐火材料	350
3.2 半硅质耐火制品	303	6.2 MgO-CaO-C 砖组成与性能的关系	351
3.3 高铝质耐火制品	304	6.3 MgO-CaO-C 砖的应用	352
3.4 硅线石质耐火制品	306	7 Al ₂ O ₃ -SiC-C 砖	353
3.5 莫来石质耐火制品	308	7.1 铁水预处理对耐火材料性能的要求	353
第4章 碱性耐火材料制品	310	7.2 Al ₂ O ₃ -SiC-C 砖的组成对性能的影响	353
1 概述	310	7.3 Al ₂ O ₃ -SiC-C 砖的生产与应用	354
1.1 碱性耐火材料发展历史和特性	310	8 炭砖	355
1.2 碱性耐火材料制品分类	312	8.1 高炉用炭砖	355
2 碱性耐火原料	312	8.2 电炉用炭块	357
2.1 我国菱镁矿的化学成分、物理性能、分布及储量	312	8.3 铝电解用阴极炭块	358
2.2 镁砂	313	8.4 炭质糊类制品	358
2.3 镁铝尖晶石	315	第6章 碳化硅质耐火材料	360
2.4 镁铬尖晶石	316	1 氧化物结合 SiC 制品	360
2.5 镁钙砂	316	1.1 黏土结合 SiC 制品	360
2.6 其他碱性耐火原料简介	317	1.2 莫来石结合 SiC 制品	360
3 镁质耐火制品	317	1.3 SiO ₂ 结合 SiC 制品	360
3.1 镁质制品的生产工艺	318	2 氮化物结合 SiC 制品	361
3.2 镁质制品的化学组成对性能的影响	318	2.1 氮化硅结合 SiC 制品	362
3.3 与镁质耐火材料有关的物系	319	2.2 赛隆结合碳化硅制品	365
3.4 镁质制品的显微结构	321	2.3 氧氮化硅和复相氮化物结合 SiC 制品	368
3.5 提高镁质制品质量的途径	322	3 自结合 SiC 制品	368
3.6 镁砖及镁硅砖	322	3.1 β-SiC 结合 SiC 制品	368
4 镁钙耐火材料制品	323	3.2 重结晶 SiC 制品	369
4.1 镁钙系耐火材料抗水化方法	323	4 渗硅反应烧结 SiC 制品	370
4.2 镁钙砖	325	5 SiC 复合制品	370
4.3 与白云石质耐火材料有关的物系	325	6 SiC 制品的用途	371
4.4 白云石砖	326	第7章 不定形耐火材料	372
5 镁铬耐火材料制品	327	1 不定形耐火材料概念	372
5.1 MgO-Cr ₂ O ₃ 系耐火材料相关相图	327	1.1 不定形耐火材料分类	372
5.2 镁铬耐火材料制品	330	1.2 不定形耐火材料的制备	372
6 镁铝耐火材料制品	331	1.3 不定形耐火材料的应用	373
6.1 尖晶石合成及相平衡关系	332	2 不定形耐火材料用结合剂	373
6.2 镁铝砖中 Al ₂ O ₃ 含量对其性能的影响	333	2.1 结合剂的分类	373
第5章 碳复合耐火材料	334	2.2 结合剂的结合机理	373
1 碳复合耐火材料原料	334	2.3 结合剂的选用原则	374
1.1 碳素原料的结构及特点	334	3 不定形耐火材料用外加剂	375
		3.1 外加剂的分类	375

3.2 减水剂 (分散剂)	375	12.3 碱性耐火泥浆	404
3.3 增塑剂 (塑化剂)	375	12.4 碳化硅和炭质耐火泥浆	404
3.4 促凝剂 (促硬剂)	375	13 耐火涂料 (涂料)	405
3.5 缓凝剂	375	13.1 钢液“洁净化”涂料	405
3.6 保存剂	375	13.2 热辐射涂料	405
3.7 防缩剂	376	13.3 抗氧化耐火涂料	406
4 不定形耐火材料的粒度组成	376	13.4 耐酸耐火涂料	406
4.1 颗粒级配理论简介	376	13.5 碱性耐火涂料	406
4.2 粒度组成的控制	376	13.6 耐热和耐火保温涂料	407
5 不定形耐火材料的作业性能	377	第8章 隔热耐火材料	408
5.1 和易性	377	1 隔热耐火制品	408
5.2 稠度	377	1.1 氧化铝质隔热耐火砖	408
5.3 流动性 (流动值)	377	1.2 高铝质隔热耐火砖	408
5.4 铺展性	377	1.3 黏土质隔热耐火砖	409
5.5 可塑性	378	1.4 硅质隔热耐火砖	410
5.6 附着率	378	1.5 硅藻土隔热砖	410
5.7 马夏值	378	1.6 膨胀珍珠岩制品	411
5.8 触变性	379	1.7 膨胀蛭石制品	412
5.9 凝结性	379	1.8 硅酸钙板	412
5.10 硬化性	379	1.9 漂珠砖	412
6 耐火浇注料	379	1.10 空心球制品	413
6.1 铝酸钙水泥结合浇注料	380	2 耐火纤维	413
6.2 低、超低水泥耐火浇注料	381	2.1 耐火纤维的制备工艺	414
6.3 无水泥耐火浇注料	382	2.2 耐火纤维的性质	415
6.4 磷酸盐结合浇注料	383	2.3 耐火纤维品种	417
6.5 水玻璃结合浇注料	384	3 耐火纤维制品	420
6.6 铝-镁质浇注料	384	3.1 硅酸铝耐火纤维毯	421
6.7 氧化铝-碳化硅-碳质浇注料	386	3.2 硅酸铝耐火纤维毡	421
6.8 耐酸耐火浇注料	386	3.3 耐火纤维板	422
6.9 耐碱耐火浇注料	387	3.4 耐火纤维纸	422
6.10 耐磨耐火浇注料	387	3.5 耐火纤维绳	422
6.11 钢纤维增强耐火浇注料	387	3.6 耐火纤维制品的施工技术	423
6.12 轻质 (隔热) 耐火浇注料	389	第9章 建材工业用耐火材料	424
7 耐火可塑料	390	1 建材工业用耐火材料的作业性质	424
7.1 黏土结合可塑料	390	1.1 耐侵蚀性能	424
7.2 磷酸结合可塑料	390	1.2 玻璃窑用耐火材料气泡析出率	424
7.3 硫酸铝结合可塑料	391	1.3 熔铸耐火制品玻璃相渗出温度	425
8 耐火捣打料	391	1.4 水泥窑烧成带用砖的黏挂窑皮性能	426
8.1 铝-镁质捣打料	391	1.5 氢扩散度	428
8.2 高铝-碳化硅-碳质捣打料	392	2 熔铸耐火制品	428
8.3 碱性耐火捣打料	392	2.1 熔铸锆刚玉耐火制品生产工艺	428
8.4 锆英石质耐火捣打料	392	2.2 熔铸氧化铝耐火制品	430
9 喷射耐火材料	393	3 建材工业窑炉耐火材料的应用	430
9.1 喷射耐火材料施工装备	393	3.1 水泥窑用耐火材料	431
9.2 硅酸铝质喷射耐火材料	394	3.2 玻璃窑用耐火材料	438
9.3 碱性喷射耐火材料	395	4 陶瓷窑用耐火材料	446
9.4 高铝-碳化硅-碳质喷射料	396	4.1 窑体材料	446
9.5 火焰喷补料	396	4.2 窑具材料	447
10 干式耐火振捣料	398	4.3 窑车材料	447
10.1 硅质干式振捣料	398	第10章 耐火材料的回收利用	449
10.2 硅酸铝质干式振捣料	398	1 基本概况	449
10.3 刚玉质干式振捣料	399	2 用后耐火材料的回收	450
10.4 碱性干式振捣料	399	2.1 用后耐火材料的拆除	450
11 耐火挤压料与压注料	401	2.2 用后耐火材料的分类拣选	450
11.1 $Al_2O_3-SiO_2-SiC-C$ 质炮泥	401	3 用后耐火材料的处理方法	450
11.2 耐火压注料	402	3.1 去除用后耐火材料内的泥土、灰尘和 掺杂物	450
12 耐火泥浆	403	3.2 除去用后耐火材料渣层和渗透层	451
12.1 硅质耐火泥浆	403	3.3 破粉碎加工	451
12.2 硅酸铝质耐火泥浆	403		

3.4 用后耐火材料除铁	451	3.4 固相炭化	482
3.5 均化技术	451	4 石墨化	483
3.6 分离技术	451	5 石墨层间化合物反应	483
4 用后耐火材料再生的方法	452	5.1 石墨层间化合物 (GICs)	483
4.1 直接使用法	452	5.2 氟化石墨	484
4.2 初级使用法及降级使用法	452	5.3 柔性石墨和膨胀石墨	485
4.3 中级使用法	453	第4章 工程应用的碳、石墨材料	487
4.4 高级使用法	454	1 冶金用碳、石墨材料	487
5 耐火材料修复再利用	454	1.1 石墨电极	487
5.1 损坏原因分析	454	1.2 阳极	488
5.2 滑板修补工艺概述	454	1.3 炭块及炭糊	488
6 展望	455	1.4 连续铸造用石墨	490
参考文献	456	1.5 冶金中的其他应用	490
第9篇 碳、石墨材料	461	2 电工及电子用碳、石墨材料	490
第1章 碳的晶体结构及碳材料分类	463	2.1 电刷	490
1 碳的晶体结构	463	2.2 半导体材料生产用高纯石墨	491
1.1 sp^3 杂化轨道键合与金刚石结构	463	2.3 电子器件用碳、石墨材料	491
1.2 sp^2 杂化轨道键合与石墨结构	463	3 机械及仪器用碳、石墨材料	492
1.3 sp 杂化轨道键合与卡宾 (carbyne)	464	3.1 机械装备中的轴承、密封及制动用碳、石墨材料	492
1.4 富勒烯 (fullerene) 和碳纳米管	464	3.2 润滑用碳、石墨材料	494
1.5 无定形碳	465	3.3 电加工用碳、石墨材料	495
2 碳相图	466	3.4 仪器用碳、石墨材料	495
3 碳材料的分类	467	4 化工用碳、石墨材料	496
3.1 不同键合状态的碳材料	467	5 电池用碳、石墨材料	497
3.2 天然碳材料和人工碳材料	467	5.1 一次电池中的应用	497
3.3 碳材料按应用分类	467	5.2 二次电池中的应用	498
第2章 碳、石墨材料的组织结构与性能	468	5.3 燃料电池	498
1 石墨微晶与乱层结构	468	6 环保用碳、石墨材料	498
2 碳、石墨材料的结构缺陷	468	6.1 活性炭的结构与性能	499
3 碳、石墨材料的力学性能	469	6.2 活性炭的制备	500
3.1 金刚石与类金刚石薄膜	469	6.3 活性炭及活性炭纤维的应用	500
3.2 石墨结构碳材料	469	7 核能用碳、石墨材料	500
4 碳、石墨材料的热学性能	470	8 航空航天用碳、石墨材料	501
4.1 比热容及蒸汽压	470	8.1 结构材料	501
4.2 热导率	471	8.2 抗氧化、烧蚀材料	501
4.3 热膨胀系数	471	9 生物医学用碳、石墨材料	501
4.4 抗热振性	471	9.1 作为生物医学材料的碳材料	502
5 碳、石墨材料的电磁性能	472	9.2 碳质人造器官的现状	502
5.1 导电性	472	第5章 碳纤维及其复合材料	503
5.2 磁性	473	1 碳纤维	503
6 碳、石墨材料的核物理性能	473	1.1 碳纤维的生产工艺	503
7 碳、石墨材料的化学性能	474	1.2 碳纤维的结构	503
7.1 氧化反应	474	1.3 碳纤维的性能	504
7.2 碳的高温固相反应	474	1.4 碳纤维的应用	504
7.3 石墨的插层反应	475	2 碳纤维复合材料	505
第3章 碳、石墨材料工程基础	476	2.1 碳纤维增强树脂基复合材料	505
1 碳、石墨材料的原料及其处理	476	2.2 碳纤维增强陶瓷基复合材料	507
1.1 固体原料的煅烧	476	2.3 碳纤维增强金属基复合材料	508
1.2 沥青的调制	476	2.4 碳/碳复合材料	510
1.3 原料的其他处理	476	第6章 人工金刚石及金刚石薄膜	513
1.4 传统碳材料的制备工艺	476	1 金刚石和人工合成金刚石	513
2 天然石墨的加工	477	1.1 金刚石的分类	513
2.1 鳞片石墨	477	1.2 金刚石的形态及结构	513
2.2 微晶石墨	477	1.3 金刚石的基本性质	513
3 炭化工程基础	477	1.4 人工金刚石	514
3.1 炭化过程的基本反应	477	1.5 金刚石的应用	515
3.2 气相炭化	478	2 人工合成金刚石薄膜	515
3.3 液相炭化	481	2.1 低压化学气相沉积 (CVD) 法	515

2.2 金刚石薄膜的性质与应用	517	3.2 铝酸盐、硫铝酸盐体系膨胀水泥	548
2.3 金刚石薄膜的缺陷及研究进展	517	4 自应力水泥	549
3 类金刚石碳膜	517	4.1 硅酸盐体系自应力水泥	550
3.1 类金刚石碳膜的结构	517	4.2 铝酸盐、硫铝酸盐体系自应力水泥	550
3.2 类金刚石碳膜的合成原理与方法	518	5 水工水泥	552
3.3 等离子体法制备 DLC 膜的原理和特点	518	5.1 中热硅酸盐水泥	552
3.4 类金刚石碳膜的性能与应用	518	5.2 低热硅酸盐水泥	553
3.5 发展前景与存在的问题	519	5.3 低热矿渣硅酸盐水泥	553
第 7 章 C ₆₀ 和碳纳米管	520	5.4 低热粉煤灰硅酸盐水泥	554
1 C ₆₀	520	5.5 低热微膨胀水泥	554
1.1 C ₆₀ 的制备与纯化	520	5.6 粉煤灰低热微膨胀水泥	555
1.2 C ₆₀ 的性能与应用前景	520	5.7 抗硫酸盐硅酸盐水泥	555
2 碳纳米管 (CNT)	521	6 油井水泥	556
2.1 碳纳米管的制备及纯化	521	6.1 API 通用油井水泥	556
2.2 碳纳米管的性能及应用前景	522	6.2 特种油井水泥	557
参考文献	524	7 装饰水泥	558
第 10 篇 水泥与混凝土	527	7.1 白色水泥	559
第 1 章 硅酸盐系列通用水泥	529	7.2 彩色水泥	559
1 概述	529	7.3 无熟料装饰水泥	560
2 硅酸盐水泥	530	8 耐高温水泥及胶凝材料	560
2.1 组成与定义	530	8.1 水硬性耐高温水泥体系	561
2.2 技术要求	530	8.2 非水硬性耐高温胶凝材料	562
2.3 性能特点	530	9 其他特种水泥	562
2.4 适用范围	531	9.1 砌筑水泥	562
3 普通硅酸盐水泥	531	9.2 低碱度水泥	562
3.1 组成与定义	531	9.3 石膏矿渣水泥	563
3.2 技术要求	531	9.4 碱矿渣水泥	564
3.3 性能特点	531	9.5 防辐射水泥	564
3.4 适用范围	531	9.6 氯氧镁水泥	566
4 矿渣硅酸盐水泥	531	9.7 耐酸水泥	567
4.1 组成与定义	531	第 3 章 混凝土	570
4.2 技术要求	531	1 混凝土原材料	570
4.3 性能特点	532	1.1 水泥	570
5 火山灰质硅酸盐水泥	532	1.2 集料	571
5.1 组成与定义	532	1.3 化学外加剂	574
5.2 技术要求	533	1.4 矿物掺合料和矿物外加剂	582
5.3 性能特点	533	1.5 混凝土拌合用水	584
5.4 适用范围	533	2 混凝土配合比设计及制备	584
6 粉煤灰硅酸盐水泥	533	2.1 混凝土配合比的设计	584
6.1 组成与定义	533	2.2 混凝土的拌制	586
6.2 技术要求	533	2.3 混凝土的运输	586
6.3 性能特点	533	2.4 混凝土的浇筑	586
6.4 适用范围	533	2.5 混凝土的养护	587
7 复合硅酸盐水泥	533	2.6 其他特殊措施	587
7.1 组成与定义	533	3 新拌混凝土的性能	587
7.2 技术要求	534	3.1 工作性	587
7.3 性能特点	534	3.2 含气量	590
7.4 使用范围	534	3.3 凝结时间	593
第 2 章 特种及新品种水泥	535	4 混凝土性能	594
1 概述	535	4.1 强度	594
2 快硬高强水泥	536	4.2 混凝土的变形性能	598
2.1 硅酸盐体系水泥	536	4.3 混凝土的耐久性	601
2.2 铝酸盐体系水泥	540	5 特种混凝土	616
2.3 氟铝酸盐体系水泥	541	5.1 高性能混凝土	616
2.4 硫铝酸盐体系水泥	544	5.2 防辐射混凝土	618
2.5 其他	545	5.3 聚合物混凝土	620
3 膨胀水泥	547	5.4 纤维增强混凝土	624
3.1 硅酸盐体系膨胀水泥	547	5.5 沥青混凝土	629
		5.6 耐腐蚀混凝土	632

5.7 补偿收缩混凝土	637	3.1 干法成形	681
5.8 装饰混凝土	638	3.2 湿法成形	683
5.9 轻集料混凝土	641	4 纳米无机材料的烧结	685
参考文献	651	4.1 烧结过程概述	685
第 11 篇 其他新型无机材料	653	4.2 影响烧结的因素	686
第 1 章 绝热材料	655	4.3 纳米无机材料的烧结	686
1 概述	655	5 纳米无机材料的结构、性能及应用前景	690
2 绝热材料的分类及其形态	655	5.1 纳米材料的结构	690
3 绝热材料的微观传热理论基础	656	5.2 纳米无机材料的性能	691
3.1 物质导热机制概述	656	5.3 纳米无机材料的应用前景	694
3.2 致密材料的热导率及其变化规律	657	第 3 章 介孔材料	696
3.3 绝热材料的传热机制	657	1 概述	696
3.4 绝热材料的导热因子分析	658	1.1 介孔材料种类及其结构特点	696
4 影响绝热材料绝热性能的物理和化学因素	658	1.2 孔道连接方式	698
4.1 温度对热导率的影响	659	2 介孔材料的合成机制	698
4.2 体积密度对热导率的影响	659	2.1 晶模板机理	698
4.3 气孔尺度、形态和分布对热导率的影响	660	2.2 棒状自组装模型	698
4.4 气压对热导率的影响	661	2.3 电荷密度匹配机理	699
4.5 晶体结构对热导率的影响	662	2.4 协同作用机制	699
4.6 化学成分对热导率的影响	662	3 介孔材料合成技术	700
4.7 纤维直径和渣球率对热导率的影响	663	3.1 “水热”合成	700
4.8 含水率对热导率的影响	663	3.2 非水合成技术	700
5 绝热材料性能优化和热设计	665	3.3 二次合成	701
5.1 绝热材料的固相(纤维和颗粒)成分以及结构的优化和热设计	665	4 介孔材料的形貌控制	701
5.2 绝热材料显微组织的优化和设计	665	4.1 介孔薄膜	701
5.3 绝热材料抗辐射导热的组分设计	665	4.2 介孔纤维或管状材料	701
5.4 绝热材料体积密度的优化	665	4.3 球形介孔材料	702
5.5 绝热材料性能的优化实例	665	4.4 晶体或多面体介孔材料	703
6 绝热材料的综合技术要求	666	4.5 单片介孔材料	703
7 绝热材料的主要性能指标	667	4.6 其他形貌	703
7.1 热导率	667	5 介孔材料稳定性改善	704
7.2 比热容	668	5.1 无机盐或有机胺的加入	704
7.3 蓄热系数	668	5.2 后处理工艺	705
7.4 耐热性和使用温度	668	5.3 提高墙体厚度	705
7.5 容重	668	5.4 提高晶化度	705
7.6 强度	669	6 介孔主客体材料的合成	706
7.7 含水率和含湿率	669	6.1 离子交换法	706
7.8 化学惰性	669	6.2 共价键移植法	706
8 绝热材料的正确选用和合理应用	669	6.3 有机硅偶联剂法	707
8.1 绝热材料正确选用的原则	669	6.4 几种典型介孔主客体材料	708
8.2 绝热材料的最佳绝热厚度计算	670	7 介孔与介孔主客体材料的性能	710
8.3 绝热材料的合理应用——复合结构及其实例	670	7.1 化学与物理吸附	710
9 绝热材料的新突破——超级绝热材料的研发现状及应用	671	7.2 催化	710
9.1 纳米孔硅质超级绝热材料	671	7.3 光学性能	712
9.2 VIP 超级绝热材料	672	7.4 敏感特性	713
9.3 超级绝热材料的绝热原理	673	7.5 电学、磁学性能	713
9.4 超级绝热材料的应用	673	7.6 药物控制释放	713
第 2 章 纳米无机材料	674	8 非硅体系介孔材料	715
1 概述	674	8.1 合成技术	715
2 纳米粉体的制备	675	8.2 非硅介孔材料的研究现状	718
2.1 纳米粉体的制备方法及原理概述	675	9 介孔碳分子筛材料	719
2.2 气相法	675	10 介孔与介孔主客体材料的表征手段	720
2.3 液相法	677	10.1 X 射线粉末衍射(XRD)分析	720
2.4 固相法	680	10.2 电镜分析	720
3 纳米无机材料的成形	681	10.3 N_2 等温吸附-脱附分析	721
		10.4 固体核磁共振	721
		10.5 傅里叶变换红外(FT-IR)和激光拉曼(Raman)光谱分析	721
		10.6 反射紫外-可见吸收光谱(DRUV-Vis)	721

分析	721	4.2 烧蚀型石英/石英复合材料	728
10.7 电子能谱 (XPS) 分析	721	5 烧蚀材料的应用	728
10.8 电子顺磁共振图谱 (EPR) 分析	721	5.1 烧蚀材料在导弹上的应用	728
第4章 烧蚀材料	722	5.2 烧蚀材料在固体火箭发动机上的应用	730
1 概述	722	5.3 烧蚀材料在返回式卫星中的应用	730
2 烧蚀材料的分类及烧蚀机理	722	5.4 烧蚀材料在天地运输往返系统中的应用	730
2.1 烧蚀材料的分类	722	6 烧蚀材料的选择	731
2.2 烧蚀机理	723	6.1 烧蚀材料防热性能的选择	731
2.3 典型的烧蚀防热结构	724	6.2 烧蚀材料的结构工艺性能	731
3 典型的烧蚀材料	724	6.3 烧蚀防热结构设计	732
3.1 树脂基烧蚀材料	724	6.4 烧蚀防热结构测试	732
3.2 高硅氧布/聚四氟乙烯基烧蚀材料	725	6.5 燃气流风洞试验	732
3.3 升华型碳基烧蚀材料	725	6.6 等离子电弧风洞	733
4 陶瓷基防热烧蚀材料	727	7 烧蚀材料的新近研究和展望	733
4.1 碳/石英材料	727	参考文献	734

第 6 篇

晶 体 材 料

人工晶体材料处于新材料科学发展的前沿,功能晶体材料贯穿高技术的许多领域,已经成为微电子、光学、激光、遥感、通讯、航天、宇航等高科技发展的重要物质基础。晶体生长作为自然界的一种普遍现象早已备受人们的关注,例如,遥远宇宙中的粒子与天体的聚集,我们居住地球上的地质运动,以及生物体内代谢过程都包含着各种晶体生长的过程。人们最初从感性出发,首先是注意到了自然界中各种晶莹剔透、千姿百态晶体的各种有趣形态,继而想要弄清楚实际晶体是如何生长的,对晶体生长的认识过程经历了一个漫长的历史阶段。

从17世纪中叶开始,人们开始关注自然界各种不同晶体形成的原因。1669年丹麦学者 Nicolaus Steno 发现了晶面角守恒定律,在千变万化的晶体外形中找到了晶体形态与晶体结构的内在联系,奠定了几何结晶学的基础。1801年法国结晶学者 René Just Haüy 总结出了晶体学的基本定律之一——有理数定律,比较好地解释了晶体外形与其内部结构之间的联系,推动了结晶学的发展。1830年德国的学者 L.F.Ch.-Hessel 推导出描述晶体宏观对称性的32种点群。1885~1890年间,俄国晶体学家费多罗夫(E.C. Федоров)首先推导出了描述晶体微观对称性的230种空间群,德国数学家熊夫利斯(A.M.Schönflies)和英国学者巴罗(William Barlow)相继从不同的途径推导出了所有的空间群,确立了晶体结构的点阵理论,为以后的晶体结构分析奠定了理论基础。

然而,具有悠久历史的结晶学真正被确定为一门科学还是进入20世纪以后的事情。1912年德国科学家劳厄(Max. Van. Lane)发现了X射线对晶体的衍射现象,证实了晶体结构的点阵理论,发展了用X射线来分析晶体微观结构的近代晶体学方法。1949年 Frank 提出了晶体螺旋位错生长的概念,1951年 Burton、Cabrera、Frank 在著名的“晶体生长及其界面的平衡结构”论文中,用理论物理的方法分析了晶体生长的界面过程,开创了从原子层面上来理解晶体生长过程的先河,BCF理论成为晶体生长理论发展的重要里程碑。1960年以后人们才开始大规模制备出具有独特性能的大尺寸高质量水晶和红宝石等人工晶体,并实现了外延生长人工晶体材料。到目前为止,晶体生长还被认为是一门发展中的新兴学科,有关研究晶体生长过程的新方法、新技术正在不断涌现,有关晶体生长的理论正在不断发展和完善之中。目前,有关晶体生长基元究竟是原子(离子)和分子尚未得到破解,对晶体生长溶液、熔体结构的研究仍显得薄弱。20世纪90年代我国学者提出了负离子配位多面体生长基元理论模型,通过对晶体生长溶液、熔体拉曼光谱测试得到了证实。晶体生长,除了研究生长过程赖以发生的场所——晶体生长界面外,还要注意晶体生长的主体、熔体、溶液结构,应该加强对晶体生长基础理论的投入,更好地掌握晶体生长的规律,以便早日实现对晶体生长形态和性能的人工调控。

近代的一些尖端科学技术,如自动化技术、激光技术、红外遥感技术、电子计算机以及空间技术等发展都离不开人工晶体材料,并且晶体的生长技术、质量和性能等与这些高科技领域的发展密切相关。高新技术不断对人工晶体材料提出的新要求,同时也促进了对人工晶体的生长技术、结构缺陷以及物理性能的研究,这不仅丰富了和充实了近代晶体学的内容,而且也推动了现代高技术的迅速发展。其中,最典型一例就是硅单晶生长技术的发展大大促进了现代信息社会

高速发展。可以认为现代信息社会的支柱就是建立在有关硅单晶生长和与此相关的晶体研究基础之上的。美国半导体工业协会称“美国半导体工业是美国经济的倍增器”,并指出半导体的发展可以说是一种使其他所有工业黯然失色,同时又使其他工业得以繁荣发展的技术,半导体在本质上驱动着所有电子产品的进步,而半导体工业正是建立在硅单晶大规模生长的科学和技术基础之上的。此外,对讲机、移动电话、彩电、电子手表和计算机等的问世,对水晶、铌酸锂晶体的研发和产业化带来了机遇。

综观晶体的生长基础以及应用研究的历史,在第二次世界大战以后不久,就召开了有关晶体生长的国际会议,Discussion of Faraday Society, No.5 (1949),这次会上 Frank 发表了著名的晶体螺旋位错生长理论。1958年在美国 Cooperstown 召开了晶体生长与晶体完整性的研讨会, Growth and Perfection of Crystals (1958),讨论了 Frank 提出的台阶串理论,以及晶须生长及其晶体完整性方面的内容。1965年在法国的 Nancy 召开晶体生长会议上,主要讨论了晶体生长中吸附杂质及其相关事宜的国际会议,晶体生长领域中许多国际杰出科学家都参加了由法国著名学者 R. Kern 组织的这次会议,如 Frank, P. Hartman, Stranski, A. A. Chernov, P. Bennema 等著名学者。1966年在美国 Boston 召开了第一届国际晶体生长会议 (ICCG-1),这是有关晶体生长的基础理论和应用的国际会议,以这次会议为契机成立了晶体生长的国际组织 (International Organization for Crystal growth, IOCG),各国的晶体生长学会 (National Association for Crystal Growth),以及晶体生长的国际学术期刊 Journal of Crystal Growth。国际晶体生长会议每三年举行一次,最近的一次是2004年在法国 Grenoble 召开的 (ICCG-14 会议),在这次会议期间,我国学者争取到了2010年 ICCG-16 国际晶体生长会议在北京举行。此外,2000年在日本仙台召开了第一次亚洲晶体生长与晶体技术会议 (CGCT-1),2005年在北京召开第三届亚洲晶体生长与晶体技术会议 (CGCT-3)。

国内晶体生长的研究起步比较晚,在1960年全国固体物理会议期间成立了一个晶体生长小组,开始了我国晶体生长组织的最初形式。在20世纪60年代,不定期地由少数单位组织进行了火焰法、水热法和水溶液法等晶体生长技术方面的交流。形成一定规模是在1974年12月有数百人参加了在福州召开的全国晶体生长会议,这次会议不仅对晶体生长技术进行了充分的交流,而且在促进我国的新晶体材料探索和晶体生长基础研究的研究。目前,国内晶体生长会议每三年举行一次,这是国内晶体材料研究人员的一个很好的交流平台。

半个世纪以来,我国人工晶体学科迅速发展,人工晶体材料已经成为国内为数不多的,在国际上具有一定影响的学科。新技术发展对人工晶体材料不断提出了新的要求,大大促进了功能晶体的研究与开发,目前,我国在人工晶体材料方面已具备了良好的产业化基础,许多人工晶体已经远销国外,中国人工晶体在国际上具有良好的声誉。与此同时,我国也培养了大量的专业人才,逐步形成了一门具有我们国家自己特色的人工晶体材料学科。同时也应该看到,虽然我国晶体材料的研发取得了一定的国际地位,但与先进国家相比在某些方面还存在一定差距。晶体生长设备与自动化控制技术水平、晶体缺陷和性能表征条件等硬件设备方面急需进一步充实完善和提高。

第1章 晶体结构与形态

人们对晶体结晶形态的研究是从对自然界矿物开始的。

几何结晶学是研究晶体形态的理论基础。结晶学作为一门科