



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

High-alumina coal fly ash in China
Resource and Clean Utilization Techniques

中国高铝飞灰

资源与清洁利用技术

杨静 马鸿文 等著



化学工业出版社



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

High-alumina coal fly ash in China
Resource and Clean Utilization Techniques

中国高铝飞灰

资源与清洁利用技术

杨静 马鸿文 等著



化学工业出版社

· 北京 ·

2003 年以来, 著者研究团队对中国北方十余家电力、煤炭企业排放的高铝粉煤灰、高铝煤矸石等二次资源提取氧化铝关键技术进行了系统研究。本专著即是在上述研究的基础上, 对相关的学位论文、学术论文、技术报告和发明专利等进行系统总结和整理完成的; 反映了著者团队 15 年来秉承循环经济理念, 以期在煤炭、电力、冶金、化工、建材五大行业发展超级系统产业集群, 从而实现清洁生产。

本书绪论部分系统论述了中国铝资源与铝材工业可持续发展问题。上篇提铝关键技术, 论述了以内蒙古、山西、陕西、宁夏等地热电厂排放的高铝粉煤灰为原料, 采用酸碱联合法和碱法提取氧化铝与氢氧化铝的关键技术; 同时论述了利用高铝煤矸石、霞石正长岩、高硅铝土矿等非传统铝资源提取氧化铝的相关技术。下篇相关应用技术; 论述了以脱硅碱液制备无机硅化合物、针状硅灰石粉体等技术, 高铝粉煤灰提取稀有元素镓关键技术, 利用高铝粉煤灰、高铝煤矸石及其剩余硅钙渣合成 X 型分子筛及制备莫来石陶瓷、微晶玻璃、矿物聚合材料、墙体材料等技术。书中对前人的相关研究成果也作了简要介绍。

本专著内容重点反映了当前有关高铝粉煤灰资源化利用技术的研究现状和重要研究进展, 对国内本领域研究和相关技术的产业化发展方向具有重要参考价值。本书适合矿产资源、化工、冶金、材料等专业领域以及煤炭、电力、建材、矿产品加工等行业的科研人员和技术人员使用, 也可作为高等院校相关专业的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国高铝飞灰: 资源与清洁利用技术/杨静等著. —北京:
化学工业出版社, 2019.4
国家科学技术学术著作出版基金资助出版
ISBN 978-7-122-33854-9

I. ①中… II. ①杨… III. ①高铝质耐火材料-粉煤灰-
研究 IV. ①TQ175.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 025533 号

责任编辑: 窦臻
责任校对: 王素芹

文字编辑: 向东
装帧设计: 王晓宇

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 装: 北京新华印刷有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 45½ 字数 1128 千字 2019 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 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: 198.00 元

版权所有 违者必究

序

PREFACE

本书作者马鸿文教授研究团队，10余年来从事利用高铝粉煤灰等非传统铝资源提取氧化铝技术的研究，也是他们20多年来坚持从富钾岩石中提取钾盐研究工作的继续。这两类资源都是十分重要的非传统型金属、非金属矿产资源。他们团队的研究工作取得了丰硕成果。现在出版的《中国高铝飞灰：资源与清洁利用技术》一书，就是相关成果的系统总结。

这些成果的创新之处，体现在以下几方面：

第一，提供了利用非传统铝土矿型铝资源提取氧化铝的工艺路线，建立了相应的技术体系。书中详细介绍了利用高铝粉煤灰、高铝煤矸石、霞石正长岩和高硅铝矾土4种非传统型铝资源提铝的关键技术，其核心内容都是作者团队的原创性成果。基于这些研究工作，对中国铝资源与铝材工业可持续发展问题的论述，可望对上述潜在铝资源的工业化利用产生重要影响。

第二，按照发展循环经济的理念，充分利用铝、硅两种主要组分，资源利用率高，加工过程符合清洁生产要求。高铝粉煤灰等铝资源经过前期预处理，以及后续的硅、铝分离过程，除提取有用组分氧化铝外，还能够充分利用氧化硅组分，制备多种无机硅化合物产品和高值建材产品，将湿法冶金与化工过程相集成，实现了资源利用率的最大化和提铝过程的清洁化生产。

第三，重点研究提铝过程的关键科学问题——铝硅酸盐体系的化学平衡，如反应原理、工艺能耗、物料平衡及硅铝分离效率等。这些关键科学问题的突破，也就是关键技术原理的突破。这些成果对于在矿产品加工、冶金、化工、建材等领域，实现矿产资源的跨行业集约化利用和加工过程的清洁化生产，无疑具有普遍适用性，因而可望对相关行业的技术进步提供相应的理论指导。

《中国高铝飞灰：资源与清洁利用技术》这部专著出版的意义，在于它系统反映了高铝粉煤灰、高铝煤矸石等潜在铝资源及其工程化应用技术的研究现状和重要研究进展，为我国的氧化铝工业提供了新的技术路线和工艺，而且是绿色的湿法冶金与化工集成技术，符合当前发展循环经济的产业政策。因此，这些成果的系统整理与公开出版，对于引领国内本领域研究和氧化铝行业相关技术的产业化发展方向，可望具有重要参考价值。

这部专著出版的意义，还在于它是一部系统的非传统型铝资源加工技术的学术著作，也是一部矿物资源绿色加工科学的优秀著作。本书中有关铝硅酸盐体系化学平衡和反应过程的物理化学分析方面的特点，正是作者团队的专长所在。因此，这部著作可以作为湿法冶金、无机化工和矿物材料科学的教学参考书。

中国科学院院士，中国地质大学教授



前言

FORWORD

2003年以来,著者团队对中国北方十余家电力、煤炭企业排放的高铝粉煤灰、煤矸石等二次资源提取氧化铝关键技术进行了系统研究。本专著即是在上述研究基础上,对相关的10余份技术研究报告、发明专利、10余份博士学位论文、1份博士后研究报告、20余份硕士学位论文、公开发表的90余篇学术论文等进行系统总结和整理而完成的;反映了著者团队15年来秉承循环经济理念,对相关关键技术的最新研究成果,以期在煤炭、电力、冶金、化工、建材五大行业发展超级系统产业集群,从而实现跨行业清洁生产。专著内容分为绪论和上、下篇三部分。

绪论是全书的总纲,概述了中国铝土矿资源状况及工业利用技术现状,分析了潜在的非传统铝资源及其分类,对迄今见诸于文献的利用高铝粉煤灰提取氧化铝的关键反应进行了热力学分析与过程评价,提出了新的提取氧化铝高效清洁生产技术路线。在此基础上,分析提出了中国铝材工业可持续发展的可能技术途径。

上篇提铝关键技术,系统论述了以内蒙古、山西、陕西、宁夏等地热电厂排放的高铝粉煤灰为主要原料,采用酸碱联合法、碱法提取氧化铝(氢氧化铝)的关键技术;同时论述了利用高铝煤矸石、霞石正长岩、高硅铝土矿等非传统铝资源提取氧化铝的相关技术。其中有关预脱硅-低钙烧结法关键技术的内容,为著者团队近年来最新研发且最具工业化利用价值的技术成果。

下篇相关应用技术,主要论述了以脱硅碱液制备无机硅化合物、针状硅灰石粉体等技术;高铝粉煤灰提取稀有元素镓关键技术。利用以上这些技术,除提取有用组分氧化铝外,还能够充分利用氧化硅组分,制备多种无机硅化合物和高附加值建材产品,从而实现提铝过程的高效清洁生产。还包括直接用高铝粉煤灰、煤矸石合成X型分子筛,以及制备莫来石陶瓷、微晶玻璃、矿物聚合材料、墙体材料等综合利用煤炭固废制备材料的技术。

本书适于矿产资源、冶金、化工、材料等领域以及煤炭、电力、建材、矿产品加工等行业的科技人员使用或教学人员作为参考书。

本专著所反映研究成果,先后获得如下研究项目经费资助:

教育部留学回国人员科研启动基金项目(2003)

“十一五”国家科技支撑计划课题(2006BAD10B04)(部分)(2006—2010)

国家自然科学基金青年科学基金项目(40602008)(2007—2009)

清华同方环境有限责任公司资助项目(2004—2005)

理想华夏国际投资(北京)有限公司资助项目(2007—2008)

吉林省白山市政府资助项目(2007—2008)

内蒙古万宇新凯科技有限公司资助项目(2009—2010)

国电宁夏太阳能有限公司资助项目(2010—2011)

内蒙古中地煤矸石科技有限责任公司资助项目(2011—2012)

中国地质调查项目(12120113087700)(部分)(2013—2015)

中央高校基本科研业务费项目(2652015016)(2015—2016)

本专著主要由杨静和马鸿文整理编写。其中,第2、22章,分别由蒋周青、李金洪撰写;绪论、第10~13、17、26章由马鸿文整理编写;其余各章由杨静编写整理。全书内容由杨静统稿后,马鸿文再次核校。其他参与前期相关研究并提供论文素材者有:张晓云、章西焕、聂铁苗、蒋帆、苏双青、王明玮、马世林、张鑫、耿学文、王乐、谭丹君、陈小鑫、王霞、李歌、王蕾、曾青云、王晓艳、陈建、刘浩、李如臣、高飞、卫勇勇和魏存弟等。图片清绘整理和内容核校由姚文贵、蒋周青、陈建、张鑫、田力男、林斐、郭若禹、张少刚、时浩和温得成等完成。专著中所列化学成分分析数据,由中国地质大学(北京)化学分析室龙梅、王军玲和梁树平完成。在此,著者对上述所有参与专著相关工作的人员表示诚挚感谢!

本专著不仅汇集了课题组长达15年的关于高铝粉煤灰和煤矸石等的科学研究工作,而且自出版合同签订开始,又花费了6年时间进行编写整理以及申报并成功获得国家科学技术学术著作出版基金资助,此专著才得以面世,成果的取得均离不开中国地质大学(北京)材料科学与工程学院矿物资源绿色加工课题组30余位师生的艰苦奋斗、艰辛付出和创新!在此对课题组的马鸿文教授和其他所有成员表示由衷的感谢!中国地质大学(北京)材料类学科的发展和与本校地质矿产系的工艺岩石学密不可分,工艺岩石学方向是我校前辈、知名岩石学家池际尚院士在世时曾经指出的岩浆岩岩石学发展方向之一。她曾指出“今后岩浆岩岩石学发展的几个方向,即地质研究方向、化学研究方向、矿物研究方向、物理化学和实验方向,以及工艺岩石学方向”。任何事业的发展壮大都离不开甘为基石的前辈和一代又一代专业人员的努力,笔者作为中国地质大学(北京)地质矿产系岩石学专业的1991级硕士生和材料系1994级博士生,在此对池际尚这样的前辈表示无比敬重和深切怀念!

本专著出版获得“国家科学技术学术著作出版基金(2015-E-073)”资助,感谢化学工业出版社推荐此书申报国家科技出版基金,也特别感谢中国科学院院士矿床学家赵鹏大先生、矿物学家叶大年先生以及中国地质大学(北京)矿床学专家邓军教授为之推荐!承蒙赵鹏大院士并为作序,谨致谢忱!

最后,谨此专著出版之际,以赵鹏大先生2017年10月9日在北京大学的一段讲话与大家共勉:“我烧水就研究如何节约煤,当炊事员就研究如何做馒头,我烧开水、当炊事员也得到了成就感……不管大事小事,都要努力做好,做到极致完美……做平凡人,做出彩事。”赵先生的上述理念令我想起了中国春秋时代的哲学家和思想家老子在《道德经》中的名言警句:“图难于其易,为大于其细;天下难事,必作于易,天下大事,必作于细。是以圣人终不为大,故能成其大。”“合抱之木,生于毫末;九层之台,起于累土;千里之行,始于足下。”

书中尚存的疏漏或不当之处,敬请指正。

中国地质大学(北京)材料科学与工程学院

杨 静

目 录

绪论 中国铝资源与铝材工业可持续发展	1
0.1 中国铝土矿资源产业概况	1
0.1.1 铝土矿资源与储量	1
0.1.2 铝土矿生产与消费	4
0.1.3 铝土矿贸易与展望	5
0.2 铝土矿工业利用技术现状	6
0.3 非传统铝资源研究概述	10
0.3.1 高铝粉煤灰	10
0.3.2 高铝煤矸石	13
0.3.3 高硅铝土矿	15
0.3.4 霞石正长岩	17
0.4 提取氧化铝关键反应与过程评价	19
0.4.1 石灰石烧结法技术	19
0.4.2 碱石灰烧结法技术	20
0.4.3 两步碱溶法技术	20
0.4.4 碱溶-烧结联合法技术	21
0.4.5 酸浸溶出技术	22
0.4.6 纯碱烧结-酸浸技术	22
0.5 提取氧化铝新技术：预脱硅-低钙烧结法	23
0.5.1 基本工艺流程	23
0.5.2 碱法工艺综合对比评价	24
0.5.3 提铝技术关联产业效应	27
0.6 中国铝材工业可持续发展	29
0.6.1 中国原铝工业发展史	29
0.6.2 中国铝材消费与展望	30
0.6.3 中国铝材工业发展瓶颈	32
0.6.4 中国铝材工业可持续发展	33
参考文献	34

上篇

提铝关键技术

039

第 1 章 中国高铝粉煤灰资源概述	40
1.1 粉煤灰概述	40
1.2 粉煤灰组成及物理性质	41
1.2.1 化学成分	41
1.2.2 物相组成	42
1.2.3 物理性质	42
1.3 粉煤灰的危害	43
1.4 粉煤灰资源化利用现状	43
1.4.1 生产建筑材料	43
1.4.2 提取空心微珠、漂珠、磁珠	45
1.4.3 生产多孔陶瓷滤料	45
1.4.4 制备莫来石陶瓷	46
1.4.5 制备赛隆陶瓷	46
1.4.6 制备微晶玻璃	46
1.4.7 合成分子筛	47
1.4.8 制取氧化铝	48
第 2 章 预脱硅-低钙烧结法提取氧化铝技术	50
2.1 实验原料及工艺流程	50
2.1.1 粉煤灰物相及化学成分	50
2.1.2 粉煤灰颗粒形态学	52
2.1.3 工艺流程	54
2.2 脱硅反应模拟及实验	55
2.2.1 实验原理	55
2.2.2 热力学模拟	56
2.2.3 实验方法	57
2.2.4 结果与讨论	57
2.2.5 脱硅反应机理	63
2.2.6 微量元素丰度变化	64
2.3 滤饼烧结及溶出铝	65
2.3.1 低钙烧结法原理	65
2.3.2 烧结反应 Gibbs 自由能	66

2.3.3	烧结实验方法	68
2.3.4	实验结果与讨论	69
2.3.5	烧结反应机理	73
2.4	烧结过程能耗计算	74
2.4.1	DSC 法测定能耗基本原理	75
2.4.2	两种烧结反应能耗测定	75
2.4.3	烧结能耗热力学计算	77
2.4.4	DSC 测定与热力学计算值对比	79
2.5	硅钙碱渣回收碱	80
2.5.1	实验原理	80
2.5.2	热力学模拟	81
2.5.3	实验过程	82
2.5.4	结果与讨论	83
2.5.5	硅钙渣产物表征	86
2.6	工艺过程对比及环境影响评价	87
2.6.1	技术可行性分析	87
2.6.2	工艺过程对比评价	88
第 3 章	纯碱烧结-盐酸浸出提取氧化铝技术	91
3.1	原料分析与工艺流程	91
3.1.1	原料分析	91
3.1.2	工艺流程	93
3.2	原料烧结	93
3.3	硅铝分离	96
3.3.1	pH 值	96
3.3.2	盐酸加入量	97
3.3.3	酸浸温度	102
3.4	氧化铝溶液除杂	103
3.4.1	碱浸溶出	105
3.4.2	深度脱硅	109
3.4.3	除钙实验	111
3.5	氧化铝制备	112
3.6	技术可行性及环境影响评价	118
3.6.1	工艺流程特点	118
3.6.2	环境影响评价	119
第 4 章	石灰石烧结法提取氧化铝技术	120
4.1	工艺原理	120
4.2	氧化铝溶出	122
4.3	超细氢氧化铝制备	127
4.3.1	熟料自粉化与溶出氧化铝	127

4.3.2	表面活性剂对制备氢氧化铝的影响	128
4.3.3	碳化速率对制备氢氧化铝的影响	128
4.3.4	溶液 pH 值对制备氢氧化铝的影响	129
4.3.5	超细氢氧化铝粉体表征	129
第 5 章	碱石灰烧结法提取氧化铝技术	130
5.1	研究现状	130
5.2	工艺过程和原理	131
5.2.1	碱石灰烧结法基本流程	131
5.2.2	反应原理	132
5.3	结果分析与讨论	135
5.3.1	烧结过程	135
5.3.2	溶出过程	137
5.3.3	铝酸钠粗液脱硅	138
5.3.4	铝酸钠溶液碳分	141
5.4	工艺过程评价	145
第 6 章	纯碱烧结-碱石灰溶出提取氧化铝技术	146
6.1	实验原料与工艺路线	146
6.1.1	高铝粉煤灰原料	146
6.1.2	拟采取工艺路线	148
6.2	硅铝分离及铝酸钠溶液制备	149
6.2.1	原料烧结	149
6.2.2	硅铝分离	153
6.2.3	铝酸钠溶液制备	159
6.3	碳化分解制备超细氢氧化铝	160
6.3.1	实验原理	160
6.3.2	实验方法	163
6.3.3	单因素实验	163
6.3.4	正交实验	169
6.4	超细 α - Al_2O_3 粉体制备	172
6.4.1	实验部分	172
6.4.2	结果分析与讨论	173
第 7 章	两步碱溶法提取氧化铝技术	176
7.1	实验原料与工艺流程	176
7.1.1	原料分析	176
7.1.2	原料预处理	178
7.1.3	实验工艺流程	178
7.2	高铝粉煤灰碱溶脱硅	179
7.2.1	正交实验	179

7.2.2	单因素实验	181
7.2.3	脱硅前后物料的理化性质	183
7.3	制备铝酸钠粗液	185
7.3.1	碱液溶出氧化铝	185
7.3.2	碱溶滤液初步脱硅	189
7.3.3	水合铝酸钙沉淀	191
7.3.4	铝酸钠粗液制备	193
7.4	氧化铝制备	195
7.4.1	铝酸钠粗液深度脱硅	195
7.4.2	碳分法制备氢氧化铝	197
7.4.3	煅烧制备氧化铝	200
7.5	与石灰石烧结法对比	201
7.5.1	工艺过程对比	202
7.5.2	资源消耗量对比	203
7.5.3	“三废”排放量对比	203
7.5.4	产品方案对比	203
第 8 章	预脱硅-改良碱石灰烧结法提取氧化铝技术	204
8.1	高铝粉煤灰原料	204
8.1.1	化学成分	204
8.1.2	物相组成	204
8.1.3	粒度分布	204
8.2	磁选除铁实验	205
8.2.1	磁选实验条件	205
8.2.2	磁选结果分析	205
8.3	高铝粉煤灰碱溶脱硅	207
8.3.1	反应原理	207
8.3.2	实验过程	207
8.3.3	结果分析	208
8.4	生料烧结及氧化铝溶出	209
8.4.1	反应原理	209
8.4.2	生料烧结	210
8.4.3	氧化铝溶出	212
8.5	铝酸钠粗液脱硅及制备氢氧化铝	213
8.5.1	一段脱硅	214
8.5.2	二段脱硅	214
8.5.3	碳化分解	214
8.5.4	氢氧化铝制品表征	215
8.6	硅钙碱渣回收碱	216
8.6.1	反应原理	216

8.6.2	实验过程	217
8.6.3	结果分析	217
8.7	硅钙渣制备轻质墙体材料	218
8.7.1	反应原理	218
8.7.2	实验过程	218
8.7.3	结果分析	219
第 9 章	高铝煤矸石提取氧化铝技术	222
9.1	煤矸石资源概述	222
9.2	煤矸石制备氢氧化铝研究现状	224
9.3	实验流程	224
9.4	原料预处理	225
9.4.1	原料分析	225
9.4.2	原料煅烧	225
9.4.3	碱液预脱硅	226
9.5	脱硅滤饼烧结	228
9.5.1	反应原理和实验过程	229
9.5.2	结果分析与讨论	230
9.6	烧结熟料溶出	234
9.6.1	反应原理和实验过程	234
9.6.2	结果分析与讨论	235
9.7	铝酸钠溶液分解	237
9.7.1	反应原理和实验过程	237
9.7.2	结果分析与讨论	238
9.8	工艺过程环境影响评价	248
9.8.1	烧结反应能耗	248
9.8.2	氢氧化铝煅烧能耗	249
9.8.3	资源消耗量	251
9.8.4	工艺能耗	251
第 10 章	高硅铝土矿提取氧化铝技术	253
10.1	脱硅预处理技术	253
10.1.1	物理选矿	253
10.1.2	化学选矿	254
10.1.3	生物选矿	255
10.2	基本工艺流程	255
10.3	高硅铝土矿物相分析	256
10.3.1	原矿物相分析	256
10.3.2	矿物嵌布特征	257
10.4	脱硅选矿实验	258
10.4.1	不同磨矿粒度的重选	259

10.4.2	重选中矿的浮选	259
10.4.3	重选尾矿的浮选	260
10.4.4	全流程闭路实验	261
10.5	铝土尾矿烧结	262
10.5.1	实验原料	263
10.5.2	实验原理	264
10.5.3	烧结反应热力学分析	264
10.5.4	实验方法	266
10.5.5	结果与讨论	267
10.6	烧结熟料溶出	270
10.6.1	实验原理	270
10.6.2	实验方法	271
10.6.3	结果与讨论	271
10.7	工艺过程环境影响评价	273
第 11 章	假榴正长岩提取氧化铝技术	277
11.1	原料烧结及水热浸出	277
11.1.1	原料物相分析	277
11.1.2	原料烧结实验	278
11.1.3	烧结产物水浸	280
11.2	水化铝硅酸盐溶出铝	282
11.2.1	基本反应原理	282
11.2.2	实验方法	283
11.2.3	结果与讨论	284
11.2.4	硅钙碱渣回收碱	288
11.3	降低铝酸钠溶液苛性比	289
11.3.1	高苛性比铝酸钠溶液预脱硅	289
11.3.2	铝的沉淀实验	290
11.3.3	铝酸钠粗液制备	292
11.4	铝酸钠粗液纯化	294
11.4.1	深度脱硅实验	294
11.4.2	除钙实验	298
11.5	氧化铝制备	298
11.5.1	铝酸钠溶液碳化分解	298
11.5.2	氢氧化铝煅烧	304
11.6	工艺过程环境影响评价	307
11.6.1	烧结反应能耗计算	307
11.6.2	资源消耗对比	310
11.6.3	能源消耗对比	311
11.6.4	三废排放量对比	312

11.6.5	产品方案对比	313
第 12 章	霞石正长岩提取氧化铝技术	314
12.1	实验原料与实验流程	314
12.1.1	实验原料	314
12.1.2	实验流程	315
12.2	精矿生料烧结	317
12.2.1	反应原理	317
12.2.2	实验方法	317
12.2.3	结果与讨论	318
12.3	烧结熟料溶出铝	323
12.3.1	反应原理	323
12.3.2	实验方法	324
12.3.3	结果与讨论	324
12.4	氢氧化铝制备	325
12.4.1	铝酸钠(钾)粗液脱硅	325
12.4.2	碳化分解法制备氢氧化铝	329
12.5	硅钙碱渣回收碱	332
12.5.1	反应原理	333
12.5.2	实验方法	334
12.5.3	结果与讨论	334
12.6	资源消耗量对比	337
第 13 章	霞辉正长岩提取氧化铝技术	339
13.1	原料烧结及水浸	339
13.1.1	原料物相分析	339
13.1.2	原矿生料烧结	340
13.1.3	烧结物料水浸	341
13.2	水浸滤饼碱液溶出铝	343
13.2.1	碱液溶出铝	343
13.2.2	碱浸渣回收碱	345
13.3	铝酸钠粗液制备	347
13.3.1	碱浸滤液预脱硅	348
13.3.2	铝酸钙沉淀	354
13.3.3	铝酸钙溶解	357
13.4	铝酸钠粗液纯化	358
13.5	氧化铝制备	359
13.5.1	碳分法制备氢氧化铝	359
13.5.2	氢氧化铝制品性能表征	364
13.5.3	氢氧化铝煅烧	365
13.5.4	氧化铝制品性能表征	366

13.6 工艺过程环境影响评价	368
13.6.1 技术可行性	368
13.6.2 环境影响评价	368
上篇参考文献	370

下篇 相关应用技术

379

第 14 章 脱硅碱液制备针状硅灰石技术	380
14.1 硅灰石的性质及用途	380
14.1.1 理化性质	380
14.1.2 工业用途	381
14.2 高铝粉煤灰碱溶脱硅	382
14.2.1 反应原理与实验方法	382
14.2.2 实验结果分析	382
14.3 硅酸钠碱液制备硅灰石	385
14.3.1 反应原理	385
14.3.2 水合硅酸钙制备	386
14.3.3 硬硅钙石合成	387
14.3.4 硅灰石制备及表征	389
14.4 硅酸钾碱液制备硅灰石	391
14.4.1 实验原料与工艺流程	391
14.4.2 硅酸钾碱液苛化	392
14.4.3 针状硬硅钙石合成	395
14.4.4 硬硅钙石晶化反应动力学	400
14.4.5 硅灰石制备及表征	404
第 15 章 硅酸钠碱液制备白炭黑技术	408
15.1 研究现状概述	408
15.2 制备白炭黑实验流程	409
15.3 碳化法制备偏硅酸胶体	410
15.3.1 硅酸钠液体制备	410
15.3.2 实验原理及方法	411
15.3.3 实验结果与讨论	411

15.3.4	碳化反应机理	416
15.3.5	碳化反应动力学	420
15.4	偏硅酸胶体除杂	422
15.4.1	实验原料	422
15.4.2	反应机理	423
15.4.3	水洗除杂	423
15.4.4	干燥煅烧	425
15.5	白炭黑制品性能表征	425
15.5.1	化学成分及结构	425
15.5.2	比表面积与孔径分布	426
15.5.3	热学性质	427
15.5.4	红外光谱	429
15.5.5	微观形貌	429
15.5.6	^{29}Si 核磁共振谱	430
15.6	偏硅酸胶体表面改性	431
15.6.1	改性原理	431
15.6.2	表面活性剂	432
15.6.3	改性实验	432
15.6.4	制品性能表征	437
第 16 章	硅酸钠碱液制备氧化硅气凝胶技术	440
16.1	研究现状概述	440
16.2	实验流程	441
16.3	原料中温烧结	441
16.3.1	原料化学成分及物相分析	441
16.3.2	粉煤灰原料烧结	443
16.3.3	烧结反应动力学	447
16.4	硅铝分离	449
16.4.1	盐酸溶浸	449
16.4.2	硫酸溶浸	456
16.5	气凝胶制备与性能	457
16.5.1	实验过程	457
16.5.2	制品性能	457
16.6	硅酸溶胶制备气凝胶	462
16.6.1	制备原理	462
16.6.2	实验过程与结果分析	462
16.6.3	制品性能表征	465
第 17 章	高铝粉煤灰泡塑吸附法提取镓技术	471
17.1	研究现状概述	471
17.1.1	镓的理化性质	472

17.1.2	镓的工业用途	472
17.1.3	镓的工业生产	475
17.1.4	镓提取分离技术	476
17.2	实验仪器与试剂	478
17.2.1	仪器	478
17.2.2	试剂	478
17.3	实验方法	478
17.3.1	聚氨酯泡塑处理	478
17.3.2	静态吸附镓方法	479
17.3.3	镓的洗脱	479
17.3.4	实验原理	479
17.3.5	实验流程	479
17.3.6	原料预处理	479
17.3.7	原料中镓含量测定	480
17.4	实验结果与讨论	481
17.4.1	镓的标准曲线	481
17.4.2	提取镓正交实验	482
17.4.3	聚氨酯泡塑吸附镓单因素实验	483
17.4.4	镓吸附机理	485
17.4.5	镓解吸实验	487
17.4.6	镓提取效果	488
17.4.7	泡塑的再生	489
第 18 章	硅钙渣制备硅灰石超细粉体技术	490
18.1	研究现状概述	490
18.2	原料预处理流程	491
18.3	硅钙碱渣回收碱	493
18.3.1	反应原理	493
18.3.2	实验过程	495
18.3.3	结果分析与讨论	496
18.4	硅钙渣制备硅灰石	498
18.4.1	原料物相分析	498
18.4.2	制备工艺过程	498
18.4.3	碱回收条件对硅灰石形貌的影响	503
18.5	制备硅灰石反应动力学	506
18.5.1	理论基础	507
18.5.2	反应动力学	509
18.6	硅灰石制品表征	513
18.6.1	化学成分及物相	513
18.6.2	粒度分布	514