



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属 工程与材料科学
SERIES OF FERROUS AND NON-FERROUS METALS
NON-FERROUS METALS

氧化铝生产理论与工艺

李旺兴 编著
Li Wangxing



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中国有色矿业集团有限公司
中南大学出版社有色金属出版中心

登陆有色金属在线网 (www.cnnmol.com), 查看“电子书激活
使用流程”, 输入序列号和密码即可拥有本书的电子书及100有
色币, 同时更多免费专业资源与服务供您使用。



序列号: HRZMCOL81VSD3QHT

密 码:

ISBN 978-7-5487-0156-9



9 787548 701569 >

定价: 118.00元



国家出版基金项目

NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属理论与技术前沿丛书

氧化铝生产理论与工艺

THEORY AND TECHNICS OF ALUMINA PRODUCTION

李旺兴 编著

Li Wangxing



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团

图书在版编目(CIP)数据

氧化铝生产理论与工艺/李旺兴编著. —长沙:中南大学出版社,
2010.12

ISBN 978 - 7 - 5487 - 0156 - 9

I. ①氧... II. ①李... III. ①氧化铝—生产工艺 IV. ①TF821

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 256823 号

氧化铝生产理论与工艺

李旺兴 编著

☐责任编辑 胡业民

☐责任印制 文桂武

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙瑞和印务有限公司

☐开 本 720 × 1000 B5 ☐印张 27 ☐字数 525 千字

☐版 次 2010 年 12 月第 1 版 ☐2010 年 12 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 0156 - 9

☐定 价 118.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

Introduction

本书从铝土矿资源特点及氧化铝生产的基础理论知识出发,系统阐述了氧化铝生产各环节的基本原理和工艺特点,详细论述了近年来氧化铝工业所取得的技术成果和产业化应用现状,全面介绍了当前国内外氧化铝生产工艺流程及采用的先进技术与设备。全书共分9个章节,分别为:氧化铝工业及技术进展、铝土矿选矿脱硅、铝酸钠溶液的性质、拜耳法氧化铝生产、烧结法氧化铝生产、联合法氧化铝生产、化学品氧化铝生产、氧化铝生产过程金属镓的回收、赤泥综合利用与环境保护。

本书适合于科研人员、高校师生和氧化铝生产技术人员阅读。



作者简介

About the Author

李旺兴，1962年8月生，有色金属冶金工学博士，教授级高级工程师，中南大学博士研究生导师。现为中国铝业郑州研究院院长，中国铝业公司首席工程师，国际铝土矿与铝业学术委员会(ICSOPA)副主席，国家铝冶炼工程技术研究中心主任，中国有色金属学会常务理事，轻金属学术委员会副主任委员兼氧化铝专业委员会主任委员。

一直从事铝冶炼生产及工艺技术研究工作，先后主持多项国家重点科技课题，获国家科技进步奖一等奖1项、二等奖4项，获省部级科技进步奖30余项。享受国务院政府特殊津贴专家、新世纪百千万人才工程国家级人选、河南省优秀青年科技专家，获第七届中国青年科技奖、第四届中国工程科技光华青年奖、全国五一劳动奖章等奖项。

学术委员会

Academic Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

王淀佐 中国科学院院士 中国工程院院士

委 员 (按姓氏笔画排序)

于润沧	中国工程院院士	古德生	中国工程院院士
左铁镛	中国工程院院士	刘业翔	中国工程院院士
刘宝琛	中国工程院院士	孙传尧	中国工程院院士
李东英	中国工程院院士	邱定蕃	中国工程院院士
何季麟	中国工程院院士	何继善	中国工程院院士
余永富	中国工程院院士	汪旭光	中国工程院院士
张文海	中国工程院院士	张国成	中国工程院院士
张 懿	中国工程院院士	陈 景	中国工程院院士
金展鹏	中国科学院院士	周克崧	中国工程院院士
周 廉	中国工程院院士	钟 掘	中国工程院院士
黄伯云	中国工程院院士	黄培云	中国工程院院士
屠海令	中国工程院院士	曾苏民	中国工程院院士
戴永年	中国工程院院士		

编辑出版委员会

Editorial and Publishing Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

罗 涛(教授级高工 中国有色矿业集团有限公司总经理)

副主任

邱冠周(教授 国家“973”项目首席科学家)

田红旗(教授 中南大学副校长)

尹飞舟(编审 湖南省新闻出版局副局长)

张 麟(教授级高工 大冶有色金属集团控股有限公司董事长)

执行副主任

王海东(教授 中南大学出版社社长)

委 员

苏仁进 文援朝 李昌佳 彭超群 陈灿华

胡业民 刘 辉 谭 平 张 曦 周 颖

汪宜晔 易建国 李海亮



总序

Preface

当今有色金属已成为决定一个国家经济、科学技术、国防建设等发展的重要物质基础,是提升国家综合实力和保障国家安全的关键性战略资源。作为有色金属生产第一大国,我国在有色金属研究领域,特别是在复杂低品位有色金属资源的开发与利用上取得了长足进展。

我国有色金属工业近 30 年来发展迅速,产量连年来居世界首位,有色金属科技在国民经济建设和现代化国防建设中发挥着越来越重要的作用。与此同时,有色金属资源短缺与国民经济发展需求之间的矛盾也日益突出,对国外资源的依赖程度逐年增加,严重影响我国国民经济的健康发展。

随着经济的发展,已探明的优质矿产资源接近枯竭,不仅使我国面临有色金属材料总量供应严重短缺的危机,而且因为“难探、难采、难选、难冶”的复杂低品位矿石资源或二次资源逐步成为主体原料后,对传统的地质、采矿、选矿、冶金、材料、加工、环境等科学技术提出了巨大挑战。资源的低质化将会使我国有色金属工业及相关产业面临生存竞争的危机。我国有色金属工业的发展迫切需要适应我国资源特点的新理论、新技术。系统完整、水平领先和相互融合的金属科技图书的出版,对于提高我国有色金属工业的自主创新能力,促进高效、低耗、无污染、综合利用有色金属资源的新理论与新技术的应用,确保我国有色金属产业的可持续发展,具有重大的推动作用。

作为国家出版基金资助的国家重大出版项目,《有色金属理论与技术前沿丛书》计划出版 100 种图书,涵盖材料、冶金、矿业、地学和机电等学科。丛书的作者荟萃了有色金属研究领域的院士、国家重大科研计划项目的首席科学家、长江学者特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、全国优秀博士论文奖获得者、国家重大人才计划入选者、有色金属大型研究院所及骨干企

业的顶尖专家。

国家出版基金由国家设立，用于鼓励和支持优秀公益性出版项目，代表我国学术出版的最高水平。《有色金属理论与技术前沿丛书》瞄准有色金属研究发展前沿，把握国内外有色金属学科的最新动态，全面、及时、准确地反映有色金属科学与工程方面的新理论、新技术和新应用，发掘与采集极富价值的研究成果，具有很高的学术价值。

中南大学出版社长期倾力服务有色金属的图书出版，在《有色金属理论与技术前沿丛书》的策划与出版过程中做了大量极富成效的工作，大力推动了我国有色金属行业优秀科技著作的出版，对高等院校、研究院所及大中型企业的有色金属学科人才培养具有直接而重大的促进作用。

王 注 佑

2010 年 12 月



前言

Foreword

近年来,我国氧化铝工业在科学发展观的指引下得到了迅速发展。我国已成为世界最大的氧化铝生产国,其中2009年氧化铝产量已超过2370万吨。随着生产规模的不断扩大,工艺技术朝着短流程和低能耗的方向发展,装备技术朝着大型化、高效化和自动化的方向发展。由于新工艺、新技术及新装备的工业化应用,对氧化铝科技工作者的综合素质提出了更高的要求,更新知识、加强技术交流已成为氧化铝行业可持续发展的共识。紧密结合现代氧化铝工业实际,全面系统地总结氧化铝生产各环节的基本原理和工艺特点,客观真实地反映氧化铝工业的科技进步成果,具有重要的现实意义。

本书专业知识覆盖面广。从氧化铝生产的基础理论知识出发,结合氧化铝工业近年来所取得的技术成就,系统阐述了氧化铝生产的物理化学原理,详细论述了近年来氧化铝工业所取得的技术成果和产业化应用现状,全面介绍了当前国内外氧化铝生产工艺流程及采用的先进技术与装备。涵盖了从冶金级氧化铝到化学品氧化铝生产、从铝土矿中有价元素的综合利用到尾矿的安全堆存及环境保护等相关内容。本书还具有适用性强的特点,适用于高等学校的大学生、研究生及教师阅读,也可作为氧化铝行业工程人员和生产技术人员的工作指导用书。

本书的编著得到了中国铝业郑州研究院的大力支持,尹中林、杨巧芳、陈湘清、刘汝兴、王建立、吴红应、王庆伟、路培乾、赵卓、苏兆辉、胡秋云和齐利娟等参加了本书资料的收集和部分章节的编写工作,在此一并致谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者给予批评指正。



2010年9月

第1章 氧化铝工业及技术进展	1
1.1 铝土矿资源及分布	1
1.1.1 铝土矿的化学组成与矿物组成	1
1.1.2 铝土矿矿石结构特点	2
1.1.3 世界铝土矿资源及分布	3
1.1.4 中国铝土矿资源及分布	6
1.2 氧化铝的性质	10
1.2.1 氧化铝水合物的命名	10
1.2.2 氧化铝水合物的性质	10
1.2.3 氧化铝的分类	12
1.2.4 氧化铝的性质	12
1.2.5 电解铝工业对氧化铝的质量要求	13
1.3 氧化铝产量及分布	14
1.3.1 世界氧化铝产量及分布	14
1.3.2 中国氧化铝工业发展历程	16
1.3.3 中国氧化铝产量	17
1.3.4 中国氧化铝生产的区域分布	18
1.4 氧化铝生产技术进展	20
1.4.1 国外氧化铝生产技术进展	20
1.4.2 中国氧化铝生产技术进展	23
参考文献	29
第2章 铝土矿选矿脱硅	30
2.1 概述	30
2.1.1 选矿的基本作业	31
2.1.2 选矿的基本概念	32

2 / 氧化铝生产理论与工艺

2.1.3 铝土矿资源的种类	33
2.1.4 中国铝土矿资源特征	37
2.2 铝土矿工艺矿物学	38
2.2.1 铝土矿内部显微特性	38
2.2.2 铝土矿的外部物理特性	45
2.3 铝土矿主要矿物的晶体结构	46
2.3.1 一水软铝石	46
2.3.2 三水铝石	46
2.3.3 一水硬铝石	46
2.3.4 高岭石	47
2.3.5 伊利石	47
2.3.6 叶蜡石	48
2.4 铝-硅矿物的溶液特性	49
2.4.1 表面荷电机理	49
2.4.2 矿物零电点(PZC)	50
2.5 破碎筛分与磨矿分级	54
2.5.1 破碎筛分	55
2.5.2 磨矿分级	57
2.5.3 铝土矿碎磨理论及其产品特征	61
2.6 铝土矿洗矿	64
2.6.1 洗矿的定义	64
2.6.2 洗矿参数	64
2.6.3 铝土矿洗矿工艺	65
2.7 铝土矿浮选脱硅	67
2.7.1 浮选的基本原理	67
2.7.2 铝土矿的浮选脱硅药剂	69
2.7.3 铝土矿的浮选脱硅工艺	73
2.7.4 铝土矿浮选脱硅设备	77
2.7.5 铝土矿浮选脱硅影响因素	80
2.8 铝土矿化学选矿脱硅	81
2.8.1 原料预脱硅	82
2.8.2 焙烧预脱硅	82
2.8.3 铝土矿化学选矿的应用前景	84
2.9 铝土矿生物选矿脱硅	84
2.9.1 硅酸盐细菌分解矿物机理	85

2.9.2 铝土矿生物选矿研究的内容	85
2.9.3 存在的问题及下一步研究方向	85
2.10 铝土矿选矿产品处理	86
2.10.1 产品脱水	86
2.10.2 尾矿综合利用	87
参考文献	88

第3章 铝酸钠溶液的性质 90

3.1 $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$ 系相图	90
3.1.1 30°C 下的 $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$ 相图	91
3.1.2 铝酸钠溶液浓度及 Na_2O 与 Al_2O_3 浓度的比值	93
3.1.3 各种温度下的 $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$ 相图	94
3.2 工业铝酸钠溶液的稳定性及其主要影响因素	95
3.2.1 铝酸钠溶液的分子比	96
3.2.2 温度	96
3.2.3 铝酸钠溶液的浓度	96
3.2.4 溶液中所含的杂质	97
3.2.5 添加晶种	97
3.2.6 搅拌	98
3.3 铝酸钠溶液的物理、化学性质	98
3.3.1 铝酸钠溶液的密度	98
3.3.2 铝酸钠溶液的粘度	99
3.3.3 铝酸钠溶液的电导率	101
3.3.4 铝酸钠溶液的饱和蒸气压	102
3.3.5 铝酸钠溶液的热容及热焓	103
3.3.6 铝酸钠溶液的表面张力	104
3.3.7 氧化铝水合物在碱溶液中的溶解热	104
参考文献	105

第4章 拜耳法氧化铝生产 106

4.1 拜耳法氧化铝生产基础理论	106
4.2 拜耳法氧化铝生产工艺	108
4.3 原料制备技术	111
4.3.1 铝土矿的破碎	112
4.3.2 配矿	115

4 / 氧化铝生产理论与工艺

4.3.3 磨矿	116
4.3.4 石灰煅烧	125
4.4 拜耳法溶出技术	127
4.4.1 概述	127
4.4.2 拜耳法溶出工艺	129
4.4.3 拜耳法矿浆预热及溶出装备的类型	130
4.4.4 管道化溶出技术	131
4.4.5 其他溶出技术	138
4.4.6 影响铝土矿溶出的主要因素	144
4.4.7 杂质矿物在矿浆预热及溶出过程中的行为	150
4.4.8 拜耳法溶出过程中的添加剂	152
4.4.9 拜耳法矿浆预热及溶出过程中的结疤问题	153
4.5 赤泥沉降分离技术	155
4.5.1 概述	155
4.5.2 溶出矿浆的稀释	155
4.5.3 赤泥沉降分离	156
4.5.4 沉降设备	158
4.5.5 赤泥的反向洗涤及过滤	163
4.5.6 粗液控制过滤——溶液精制	166
4.6 晶种分解技术	167
4.6.1 概述	167
4.6.2 晶种分解的机理	169
4.6.3 影响分解过程的主要因素	170
4.6.4 强化分解的途径	175
4.6.5 砂状氧化铝分解工艺	176
4.6.6 分解设备	217
4.6.7 氢氧化铝分离与洗涤	222
4.7 种分母液蒸发	224
4.7.1 概述	224
4.7.2 作业流程	226
4.7.3 蒸发设备	229
4.7.4 蒸发器结垢的预防及清理	232
4.8 有机物的清除	234
4.8.1 概述	234
4.8.2 有机物的危害	235

4.8.3 有机物的清除	235
4.9 氢氧化铝焙烧	237
4.9.1 概述	237
4.9.2 氢氧化铝焙烧原理及相变过程	238
4.9.3 氢氧化铝焙烧工艺流程	238
4.9.4 焙烧工艺技术的发展过程	238
参考文献	242

第5章 烧结法氧化铝生产 245

5.1 烧结法氧化铝生产的基础理论	245
5.1.1 概述	245
5.1.2 碱石灰烧结法的炉料配方	246
5.1.3 炉料烧结过程中的物理化学反应	247
5.1.4 熟料溶出过程的主要反应	256
5.1.5 铝酸钠溶液的脱硅	258
5.1.6 铝酸钠溶液的碳酸化分解	260
5.2 烧结法氧化铝生产工艺	261
5.2.1 碱石灰烧结法的基本流程	261
5.2.2 碱石灰烧结法的优缺点	264
5.3 生料制备技术	264
5.3.1 概述	264
5.3.2 生料浆的“三段配料”技术	265
5.3.3 生料浆的二段配料技术	266
5.3.4 烧结法生料浆配料自动控制技术	267
5.3.5 制备烧结法生料常用的磨矿设备	268
5.4 熟料烧结技术	269
5.4.1 概述	269
5.4.2 炉料的烧成温度	270
5.4.3 熟料的烧结温度范围	271
5.4.4 硫在烧结过程中的行为和脱硫措施	272
5.4.5 熟料烧结设备	274
5.4.6 熟料烧结过程的能量消耗	278
5.5 熟料溶出技术	279
5.5.1 概述	279
5.5.2 溶出过程中的二次反应与二次反应损失	280

5.5.3	二次反应的影响因素和抑制措施	280
5.5.4	熟料溶出工艺流程	284
5.5.5	常用的熟料溶出设备	286
5.6	赤泥分离洗涤技术	287
5.6.1	概述	287
5.6.2	沉降过滤器	288
5.6.3	自卸式大型板框压滤机	289
5.6.4	烧结法赤泥的沉降分离和洗涤	290
5.7	粗液脱硅技术	291
5.7.1	概述	291
5.7.2	铝酸钠溶液中含水铝硅酸钠的析出	292
5.7.3	铝酸钠溶液添加石灰脱硅过程	296
5.7.4	铝酸钠溶液脱硅的工艺流程	299
5.7.5	铝酸钠溶液脱硅工艺技术的进步	300
5.7.6	脱硅机和套管加热器	303
5.8	碳酸化分解技术	304
5.8.1	概述	304
5.8.2	溶液中 SiO_2 在碳酸化分解过程中的行为	304
5.8.3	碳酸化分解过程分解率的确定	306
5.8.4	影响碳酸化分解过程的主要因素	309
5.8.5	碳酸化分解生产砂状氧化铝技术	316
5.8.6	碳酸化分解的设备和流程	316
5.9	碳酸化分解母液蒸发技术	318
5.9.1	概述	318
5.9.2	碳酸化分解母液蒸发的基本原理	318
5.9.3	碳酸化分解母液蒸发设备和工艺流程	319
	参考文献	320

第6章 联合法氧化铝生产

		321
6.1	概述	321
6.2	并联法生产氧化铝	321
6.2.1	概述	321
6.2.2	并联法生产氧化铝的特点	323
6.2.3	并联法两部分产能的比例计算	323
6.3	串联法氧化铝生产	325