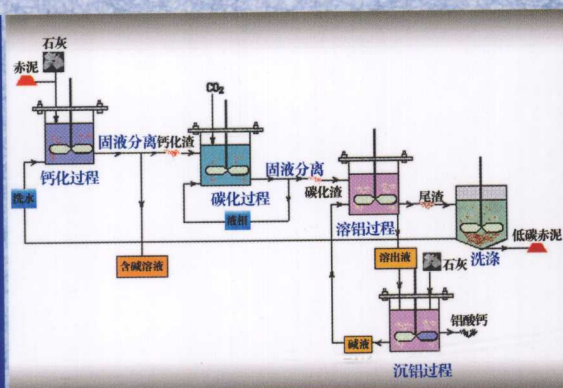


“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

铝冶金技术



张延安 朱旺喜 吕国志 等◎编著



科学出版社

014033216

TF821
25



中国科学院科学出版基金资助出版

“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

铝 冶 金 技 术

张延安 朱旺喜 吕国志 等 编著



TF821
25

科 学 出 版 社

北 京



北航

C1721977

015820410

内 容 简 介

本书围绕铝冶金产业链的氧化铝、电解铝及铝加工等各主要环节,结合我国铝资源和铝工业技术特点,基于大量文献资料,客观地评价了我国氧化铝、电解铝和铝加工工业技术的发展过程、方向及对策,分析了我国铝工业技术发展中存在的问题,揭示了铝产业链各主要环节的主要生产方法,创新性技术的演变、移植和再创新过程及规律,列举了部分典型工艺流程及技术参数。

本书既可以作为国家及地方政府制定铝工业发展战略规划以及进行宏观政策调控的理论基础,也可以作为我国相关企业、厂家制定铝工业发展战略规划的重要参考。本书适合从事铝工业技术研究和管理的工程技术人员、高校以及研究所研究人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

铝冶金技术/张延安等编著. —北京:科学出版社,2014

(现代冶金与材料过程工程丛书/赫冀成主编)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-040072-7

I. 铝… II. 张… III. 炼铝 IV. TF821

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 043149 号

责任编辑:张淑晓 张 星 / 责任校对:张小霞

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 3 月第一次印刷 印张:23 1/4

字数:468 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“985 工程”

现代冶金与材料过程工程科技创新平台资助

《现代冶金与材料过程工程丛书》编委会

顾问 陆钟武 王国栋

主编 赫冀成

副主编 (按姓氏笔画排序)

左良 何鸣鸿 姜茂发

执行副主编 张延安

编委 (按姓氏笔画排序)

王强	王磊	王恩刚	左良	史文芳
朱苗勇	朱旺喜	刘承军	刘春明	刘相华
刘常升	杨洪英	吴迪	吴文远	何鸣鸿
邹宗树	张延安	张殿华	茹红强	姜茂发
姜周华	姚广春	高瑞平	崔建忠	赫冀成
蔡九菊	翟玉春	翟秀静		

《现代冶金与材料过程工程丛书》序

21 世纪世界冶金与材料工业主要面临两大任务:一是开发新一代钢铁材料、高性能有色金属材料及高效低成本的生产工艺技术,以满足新时期相关产业对金属材料性能的要求;二是要最大限度地降低冶金生产过程的资源和能源消耗,减少环境负荷,实现冶金工业的可持续发展。冶金与材料工业是我国发展最迅速的基础工业,钢铁和有色金属冶金工业承载着我国节能减排的重要任务。当前,世界冶金工业正向着高效、低耗、优质和生态化的方向发展。超级钢和超级铝等更高性能的金属材料产品不断涌现,传统的工艺技术不断被完善和更新,铁水炉外处理、连铸技术已经普及,直接还原、近终形连铸、电磁冶金、高温高压溶出、新型阴极结构电解槽等已经开始在工业生产上获得不同程度的应用。工业生态化的客观要求,特别是信息和控制理论与技术的发展及其与过程工业的不断融合,促使冶金与材料过程工程的理论、技术与装备迅速发展。

《现代冶金与材料过程工程丛书》是东北大学在国家“985 工程”科技创新平台的支持下,在冶金与材料领域科学前沿探索和工程技术研发成果的积累和结晶。丛书围绕冶金过程工程,以节能减排为导向,内容涉及钢铁冶金、有色金属冶金、材料加工、冶金工业生态和冶金材料等学科和领域,提出了计算冶金、自蔓延冶金、特殊冶金、电磁冶金等新概念、新方法和新技术。丛书的大部分研究得到了科学技术部“973”、“863”项目,国家自然科学基金重点和面上项目的资助(仅国家自然科学基金项目就达近百项)。特别是在“985 工程”二期建设过程中,得到 1.3 亿元人民币的重点支持,科研经费逾 5 亿元人民币。获得省部级科技成果奖 70 多项,其中国家级奖励 9 项;取得国家发明专利 100 多项。这些科研成果成为丛书编撰和出版的学术思想之源和基本素材之库。

以研发新一代钢铁材料及高效低成本的生产工艺技术为中心任务,王国栋院士率领的创新团队在普碳超级钢、高等级汽车板材以及大型轧机控轧控冷技术等方面取得突破,成果令世人瞩目,为宝钢、首钢和攀钢的技术进步做出了积极的贡献。例如,在低碳铁素体/珠光体钢的超细晶强韧化与控制技术研究过程中,提出适度细晶化($3\sim 5\mu\text{m}$)与相变强化相结合的强化方式,开辟了新一代钢铁材料生产的新途径。首次在现有工业条件下用 200MPa 级普碳钢生产出 400MPa 级超级钢,在保证韧性前提下实现了屈服强度翻番。在研究奥氏体再结晶行为时,引入时间轴概念,明确提出低碳钢在变形后短时间内存在奥氏体未在结晶区的现象,为低碳钢的控制轧制提供了理论依据;建立了有关低碳钢应变诱导相变研究的系统而

严密的实验方法,解决了低碳钢高温变形后的组织固定问题。适当控制终轧温度和压下量分配,通过控制轧后冷却和卷取温度,利用普通低碳钢生产出铁素体晶粒为 $3\sim 5\mu\text{m}$ 、屈服强度大于 400MPa ,具有良好综合性能的超级钢,并成功地应用于汽车工业,该成果获得 2004 年国家科技进步奖一等奖。

宝钢高等级汽车板品种、生产及使用技术的研究形成了系列关键技术(例如,超低碳、氮和氧的冶炼控制等),取得专利 43 项(含发明专利 13 项)。自主开发了 183 个牌号的新产品,在国内首次实现高强度 IF 钢、各向同性钢、热镀锌双相钢和冷轧相变诱发塑性钢的生产。编制了我国汽车板标准体系框架和一批相关的技术标准,引领了我国汽车板业的发展。通过对用户使用技术的研究,与下游汽车厂形成了紧密合作和快速响应的技术链。项目运行期间,替代了至少 50% 的进口材料,年均创利润近 15 亿元人民币,年创外汇 600 余万美元。该技术改善了我国冶金行业的产品结构并结束了国外汽车板对国内市场的垄断,获得 2005 年国家科技进步奖一等奖。

提高 C-Mn 钢综合性能的微观组织控制与制造技术的研究以普碳钢和碳锰钢为对象,基于晶粒适度细化和复合强化的技术思路,开发出综合性能优良的 $400\sim 500\text{MPa}$ 级节约型钢材。解决了过去采用低温轧制路线生产细晶粒钢时,生产节奏慢、事故率高、产品屈强比高以及厚规格产品组织不均匀等技术难题,获得 10 项发明专利授权,形成工艺、设备、产品一体化的成套技术。该成果在钢铁生产企业得到大规模推广应用,采用该技术生产的节约型钢材产量到 2005 年底超过 400 万 t,到 2006 年年底,国内采用该技术生产低成本高性能钢材累计产量超过 500 万 t。开发的产品用于制造卡车车轮、大梁、横臂及桥梁等结构件。由于节省了合金元素、降低了成本、减少了能源资源消耗,其社会效益巨大。该成果获 2007 年国家技术发明奖二等奖。

首钢 3500mm 中厚板轧机核心轧制技术和关键设备研制,以首钢 3500mm 中厚板轧机工程为对象,开发和集成了中厚板生产急需的高精度厚度控制技术、TMCP 技术、控制冷却技术、平面形状控制技术、板凸度和板形控制技术、组织性能预测与控制技术、人工智能应用技术、中厚板厂全厂自动化与计算机控制技术等一系列具有自主知识产权的关键技术,建立了以 3500mm 强力中厚板轧机和加速冷却设备为核心的整条国产化的中厚板生产线,实现了中厚板轧制技术和重大装备的集成和集成基础上的创新,从而实现了我国轧制技术各个品种之间的全面、协调、可持续发展以及我国中厚板轧机的全面现代化。该成果已经推广到国内 20 余家中厚板企业,为我国中厚板轧机的改造和现代化做出了贡献,创造了巨大的经济效益和社会效益。该成果获 2005 年国家科技进步奖二等奖。

在国产 1450mm 热连轧关键技术及设备的研究与应用过程中,独立自主开发的热连轧自动化控制系统集成技术,实现了热连轧各子系统多种控制器的无缝衔

接。特别是在层流冷却控制方面,利用有限元素流分析方法,研发出带钢宽度方向温度均匀的层冷装置。利用自主开发的冷却过程仿真软件包,确定了多种冷却工艺制度。在终轧和卷取温度控制的基础之上,增加了冷却路径控制方法,提高了控冷能力,生产出了 $\times 75$ 管线钢和具有世界先进水平的厚规格超细晶粒钢。经过多年的潜心研究和持续不断的工程实践,将攀钢国产第一代 1450mm 热连轧机组改造成具有当代国际先进水平的热连轧生产线,经济效益极其显著,提高了国内热连轧技术与装备研发水平和能力,是传统产业技术改造的成功典范。该成果获 2006 年国家科技进步奖二等奖。

以铁水为主原料生产不锈钢的新技术的研发也是值得一提的技术闪光点。该成果建立了 K-OBM-S 冶炼不锈钢的数学模型,提出了铁素体不锈钢脱碳、脱氮的机理和方法,开发了等轴晶控制技术。同时,开发了 K-OBM-S 转炉长寿命技术、高质量超纯铁素体不锈钢的生产技术、无氩冶炼工艺技术和连铸机快速转换技术等关键技术。实现了原料结构、生产效率、品种质量和生产成本的重大突破。主要技术经济指标国际领先,整体技术达到国际先进水平。K-OBM-S 平均冶炼周期为 53min,炉龄最高达到 703 次,铬钢比例达到 58.9%,不锈钢的生产成本降低 10%~15%。该生产线成功地解决了我国不锈钢快速发展的关键问题——不锈钢废钢和镍资源短缺,开发了以碳氮含量小于 120ppm 的 409L 为代表的一系列超纯铁素体不锈钢品种,产品进入我国车辆、家电、造币领域,并打入欧美市场。该成果获得 2006 年国家科技进步奖二等奖。

以生产高性能有色金属材料和研发高效低成本生产工艺技术为中心任务,先后研发了高合金化铝合金预拉伸板技术、大尺寸泡沫铝生产技术等,并取得显著进展。高合金化铝合金预拉伸板是我国大飞机等重大发展计划的关键材料,由于合金含量高,液固相线温度宽,铸锭尺寸大,铸造内应力高,所以极易开裂,这是制约该类合金发展的瓶颈,也是世界铝合金发展的前沿问题。与发达国家采用的技术方案不同,该高合金化铝合金预拉伸板技术利用低频电磁场的强贯穿能力,改变了结晶器内熔体的流场,显著地改变了温度场,使液穴深度明显变浅,铸造内应力大幅度降低,同时凝固组织显著细化,合金元素宏观偏析得到改善,铸锭抵抗裂纹的能力显著增强。为我国高合金化大尺寸铸锭的制备提供了高效、经济的新技术,已投入工业生产,为国防某工程提供了高质量的铸锭。该成果作为“铝资源高效利用与高性能铝材制备的理论与技术”的一部分获得了 2007 年的国家科技进步奖一等奖。大尺寸泡沫铝板材制备工艺技术是以共晶铝硅合金(含硅 12.5%)为原料制造大尺寸泡沫铝材料,以 A356 铝合金(含硅 7%)为原料制造泡沫铝材料,以工业纯铝为原料制造高韧性泡沫铝材料的工艺和技术。研究了泡沫铝材料制造过程中泡沫体的凝固机制以及生产气孔均匀、孔壁完整光滑、无裂纹泡沫铝产品的工艺条件;研究了控制泡沫铝材料密度和孔径的方法;研究了无泡层形成原因和抑制措

施;研究了泡沫铝大块体中裂纹与大空腔产生原因和控制方法;研究了泡沫铝材料的性能及其影响因素等。泡沫铝材料在国防军工、轨道车辆、航空航天和城市基础设施建设方面具有十分重要的作用,预计国内市场年需求量在 20 万 t 以上,产值 100 亿元人民币,该成果获 2008 年辽宁省技术发明奖一等奖。

围绕最大限度地降低冶金生产过程中资源和能源的消耗,减少环境负荷,实现冶金工业的可持续发展的任务,先后研发了新型阴极结构电解槽技术、惰性阳极和低温铝电解技术和大规模低成本消纳赤泥技术。例如,冯乃祥教授的新型阴极结构电解槽的技术发明于 2008 年 9 月在重庆天泰铝业公司试验成功,并通过中国有色工业协会鉴定,节能效果显著,达到国际领先水平,被业内誉为“革命性的技术进步”。该技术已广泛应用于国内 80% 以上的电解铝厂,并获得“国家自然科学基金重点项目”和“国家高技术研究发展计划(‘863’计划)重点项目”支持,该技术作为国家发展和改革委员会“高技术产业化重大专项示范工程”已在华东铝业实施 3 年,实现了系列化生产,槽平均电压为 3.72V,直流电耗 12 082kW·h/t Al,吨铝平均节电 1123kW·h。目前,新型阴极结构电解槽的国际推广工作正在进行中。初步估计,在 4~5 年内,全国所有电解铝厂都能将现有电解槽改为新型电解槽,届时全国电解铝厂一年的节电量将超过我国大型水电站——葛洲坝一年的发电量。

在工业生态学研究方面,陆钟武院士是我国最早开始研究的著名学者之一,因其在工业生态学领域的突出贡献获得国家光华工程大奖。他的著作《穿越“环境高山”——工业生态学研究》和《工业生态学概论》,集中反映了这些年来陆钟武院士及其科研团队在工业生态学方面的研究成果。在煤与废塑料共焦化、工业物质循环理论等方面取得长足发展;在废塑料焦化处理、新型球团竖炉与煤高温气化、高温贫氧燃烧一体化系统等方面获多项国家发明专利。

依据热力学第一定律和第二定律,提出钢铁企业燃料(气)系统结构优化,以及“按质用气、热值对口、梯级利用”的科学用能策略,最大限度地提高了煤气资源的能源效率、环境效率及其对企业节能减排的贡献率;确定了宝钢焦炉、高炉、转炉三种煤气资源的最佳回收利用方式和优先使用顺序,对煤气、氧气、蒸气、水等能源介质实施无人化操作、集中管控和经济运行;研究并计算了转炉煤气回收的极限值,转炉煤气的热值、回收量和转炉工序能耗均达到国际先进水平;在国内首先利用低热值纯高炉煤气进行燃气-蒸气联合循环发电。高炉煤气、焦炉煤气实现近“零”排放,为宝钢创建国家环境友好企业做出重要贡献。作为主要参与单位开发的钢铁企业副产煤气利用与减排综合技术获得了 2008 年国家科技进步奖二等奖。

另外,围绕冶金材料和新技术的研发及节能减排两大中心任务,在电渣冶金、电磁冶金、自蔓延冶金、新型炉外原位脱硫等方面都取得了不同程度的突破和进展。基于钙化-碳化的大规模消纳拜耳赤泥的技术,有望攻克拜耳赤泥这一世界性难题;钢渣水除杂循环及吸收二氧化碳技术及装备,使用钢渣循环水吸收多余二

氧化碳,大大降低了钢铁工业二氧化碳的排放量。这些研究工作所取得的新方法、新工艺和新技术都会不同程度地体现在丛书中。

总体来讲,《现代冶金与材料过程工程丛书》集中展现了东北大学冶金与材料学科群体多年的学术研究成果,反映了冶金与材料工程最新的研究成果和学术思想。尤其是在“985 工程”二期建设过程中,东北大学材料与冶金学院承担了国家 I 类“现代冶金与材料过程工程科技创新平台”的建设任务,平台依托冶金工程和材料科学与工程两个国家一级重点学科、连轧过程与控制国家重点实验室、材料电磁过程教育部重点实验室、材料微结构控制教育部重点实验室、多金属共生矿生态化利用教育部重点实验室、材料先进制备技术教育部工程研究中心、特殊钢工艺与设备教育部工程研究中心、有色金属冶金过程教育部工程研究中心、国家环境与生态工业重点实验室等国家和省部级基地,通过学科方向汇聚了学科与基地的优秀人才,同时也为丛书的编撰提供了人力资源。丛书聘请中国工程院陆钟武院士和王国栋院士担任编委会学术顾问,国内知名学者担任编委,汇聚了优秀的作者队伍,其中有中国工程院院士、国务院学科评议组成员、国家杰出青年科学基金获得者、学科学术带头人等。在此,衷心感谢丛书的编委会成员、各位作者以及所有关心、支持和帮助编辑出版的同志们。

希望丛书的出版能起到积极的交流作用,能为广大冶金和材料科技工作者提供帮助。欢迎读者对丛书提出宝贵的意见和建议。

赫冀成 张延安

2011 年 5 月

前 言

中国铝工业经过 60 多年的发展,氧化铝和电解铝产量均居世界首位,已成为世界铝工业大国。氧化铝工业在引进和消化吸收的基础上,取得了长足的进步,电解铝大型槽技术居世界先进水平,铝加工得到迅猛的发展。在国内外铝市场、尤其是氧化铝市场竞争更加激烈的今天,正确认识我国铝工业技术的发展历程、我国铝土矿资源特点、这种资源对我国氧化铝工业技术发展的影响,以及在这种资源条件下我国氧化铝、电解铝和铝加工工业的发展前景,对保持我国铝工业的持续、稳定和健康发展是很有必要的。

本书在《中国铝工业技术发展研究》书稿的基础上修订而成,共分 9 章。第 1~4 章主要介绍氧化铝生产工艺、技术进展及发展战略。第 1 章评述我国铝土矿高铝、高硅、低硫、低铁、中低铝硅比和含硅矿物形式复杂的资源特点。第 2 章介绍氧化铝生产工艺,并针对拜耳法、选矿-拜耳法、石灰-拜耳法等技术存在的氧化铝回收率不高等问题,提出钙化-碳化法处理低品位铝资源这一新技术。该技术通过赤泥结构的转型理论可得到既不含铝又不含碱的新型结构的赤泥,实现氧化铝生产过程的高效和清洁。第 3 章客观、系统地评述我国中低品位铝土矿生产氧化铝的技术进展,以及我国氧化铝工业在磨矿分级技术、强化溶出技术、降膜蒸发技术、高效沉降槽技术、后加矿增溶溶出技术、高固含高浓度分解生产砂状氧化铝技术、流态化焙烧技术上所取得的进展,并指明这些技术的形成过程。第 4 章提出氧化铝工业技术发展对策,指出我国氧化铝工业通过引进国外技术在消化吸收和再创新等方面均取得了较大的进步,生产技术上也取得了一系列重要成果,各项技术经济指标不断改善,主要表现在选矿技术的进步、能耗的降低、产品质量的提高、品种的增多以及原料与赤泥的综合利用上。第 5~7 章介绍电解铝生产过程的技术进步及战略。第 5 章电解铝工艺进展部分主要包括该过程的技术原理、铝循环及再生工艺技术及发展前景。第 6 章主要围绕新型阴极结构电解槽、惰性阳极以及低温电解等热点技术进行原理分析与技术对比,其中新型阴极结构电解槽技术可以在仅通过改变铝电解槽阴极结构的情况下实现吨电解铝节电 $1000\text{kW}\cdot\text{h}$ 以上,若全国的电解铝企业均采用该技术,则年节电量等于葛洲坝发电厂一年的发电量。第 7 章介绍电解铝工业的宏观政策及发展战略。第 8 章介绍我国比较典型的铝加工技术的现状、进展及其发展对策。第 9 章展望我国铝冶金技术的发展未来。

本书在国家自然科学基金委员会工程与材料科学部“材料与冶金领域发展战略研究”中铝专项的框架下撰写而成,由东北大学张延安教授和国家自然科学基金

委员会工程与材料科学部工程科学一处朱旺喜主任共同负责。本书成稿之初还专门组织专家对书稿进行了审议。中国铝业公司郑州轻金属研究院原总工程师陈万坤教授、中国铝业公司山东分公司原总工程师罗安教授、中南大学冶金与环境学院院长李劫教授、东北大学王延明教授、中国国际工程咨询公司陈学森博士、冶金工业出版社谭学余总编等专家学者与会对书稿进行审议。专家们一致认为:本书在大量公开文献资料的基础上,客观地评价了我国氧化铝和电解铝工业技术的发展过程,揭示了我国氧化铝工业技术发展中的问题,指出了氧化铝和电解铝技术的发展方向 and 对策。本书中列举的工艺流程的技术参数,对从事氧化铝、电解铝和铝加工生产技术研究和管理的人员具有参考和借鉴价值。本书内容系统翔实,分析有理有据,具有较高的学术价值。本书既可以作为国家及地方政府制定铝工业发展战略规划以及进行宏观政策调控的理论依据,也可以作为我国企业厂家制定铝工业发展战略规划的重要参考,同时对从事铝工业技术研究和管理的工程技术人员、高校以及研究所的研究人员具有重要的参考价值。

本书第 1、2、3、4、9 章由东北大学张延安、辽宁科技大学王一雍和恩菲信息技术有限公司陈霞撰写;第 5、6、7 章由国家自然科学基金委员会朱旺喜、东北大学吕国志撰写;第 8 章由东北大学班春燕和豆志河撰写,全书由张延安教授和朱旺喜教授定稿。本课题组赵秋月博士、王健硕士、于海恩硕士、张国权博士也承担了大量的编辑工作。

感谢国家自然科学基金项目(U1202274、51004033、51204040),教育部博士点基金项目(20120042110011),国家“863”计划项目(2009AA063701),辽宁省优秀青年人才基金和东北大学设计研究院合作项目给予本书工作的支持。

书中许多新技术的描述仅仅是点到为止,目的是抛砖引玉。鉴于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,望广大读者不吝指正。

作 者

2014 年 2 月

目 录

《现代冶金与材料过程工程丛书》序

前言

第 1 章 我国铝土矿资源	1
1.1 概述	1
1.1.1 我国铝土矿资源分布	1
1.1.2 我国铝土矿资源的特点	1
1.1.3 我国铝土矿资源与世界铝土矿资源的比较	3
1.2 我国铝土矿资源存在的主要问题	4
1.2.1 市场竞争日趋激烈,资源保证程度降低	4
1.2.2 地质勘查投入严重不足,后备资源储量严重短缺	5
1.2.3 我国铝土矿溶出技术条件苛刻	6
1.3 我国铝土矿资源发展对策	6
参考文献	7
第 2 章 氧化铝生产工艺进展	8
2.1 概述	8
2.2 拜耳法	9
2.2.1 拜耳法原理及应用	9
2.2.2 选矿-拜耳法	11
2.2.3 石灰-拜耳法	13
2.3 烧结法	15
2.3.1 烧结法原理及发展历史	15
2.3.2 烧结法的研究进展	17
2.3.3 我国烧结法生产新工艺	18
2.4 高压水化学法	21
2.5 拜耳-烧结并联法	22
2.6 拜耳-烧结混联法	24
2.7 拜耳-烧结串联法	25
2.7.1 拜耳-烧结串联法原理	26
2.7.2 拜耳-烧结串联法发展历史	27
2.7.3 拜耳-烧结串联法在我国氧化铝工业中的应用	27

2.8	钙化-碳化新工艺处理低品位铝土矿	29
2.9	酸法处理铝土矿新工艺	31
2.9.1	酸法处理铝土矿的研究进展	31
2.9.2	粉煤灰的酸法处理工艺	34
2.10	高铁铝土矿生产氧化铝双循环新工艺	38
2.10.1	高铁铝土矿处理现状	38
2.10.2	双循环新工艺处理高铁铝土矿	38
2.11	适合铝土矿特点的生产工艺技术探讨	42
	参考文献	43
第3章	我国氧化铝生产技术进展	46
3.1	概述	46
3.2	水力旋流器磨矿分级技术	47
3.2.1	水力旋流器的原理	47
3.2.2	水力旋流器磨矿分级技术在国内外的应用现状	48
3.2.3	水力旋流器磨矿分级技术在我国氧化铝工业上的应用	49
3.3	强化溶出技术	53
3.3.1	强化溶出技术发展概况	53
3.3.2	管道化溶出技术	55
3.3.3	单管预热-高压釜溶出技术	61
3.3.4	管道-停留罐溶出技术	63
3.3.5	机械活化强化溶出技术	66
3.3.6	焙烧预处理强化铝土矿溶出技术	71
3.4	后加矿增溶溶出技术	80
3.4.1	后加矿增溶溶出技术的原理及应用	80
3.4.2	后加矿增溶溶出技术的应用前景及技术改造	81
3.5	降膜蒸发技术	83
3.5.1	降膜蒸发技术的原理及应用	84
3.5.2	广西分公司降膜蒸发新技术	85
3.5.3	广西分公司五效降膜蒸发工艺的技术改造	86
3.5.4	降膜蒸发应用的经济效益	87
3.6	高效沉降槽技术	88
3.6.1	高效沉降槽技术的原理及应用现状	89
3.6.2	我国高效沉降槽的工艺特点	91
3.7	高固含铝酸钠溶液生产砂状氧化铝技术	92
3.7.1	高固含铝酸钠溶液生产砂状氧化铝技术的原理及应用	92

3.7.2 希腊圣·尼古拉厂一段法生产砂状氧化铝工艺	94
3.7.3 广西分公司一段法生产砂状氧化铝工艺	96
3.8 流态化焙烧炉生产技术	100
3.8.1 流态化技术的原理及发展概况	100
3.8.2 流态化技术在我国氧化铝工业上的应用及发展	101
3.8.3 流态化焙烧炉及气态悬浮焙烧炉的工艺性能	102
3.9 赤泥的综合处理技术	106
3.9.1 赤泥综合利用的重要性及紧迫性	106
3.9.2 赤泥国内外综合利用现状	108
3.9.3 赤泥综合利用技术发展趋势	124
参考文献	126
第4章 我国氧化铝工业技术发展对策	134
4.1 概述	134
4.2 合理利用我国铝土矿资源,走可持续发展之路	134
4.3 加强基础研究,提高自主创新能力	135
4.4 节能降耗,提高产品的市场竞争力	136
4.5 加强氧化铝生产过程的环境治理	137
第5章 电解铝工艺进展	138
5.1 铝的性质和用途	138
5.2 现代电解铝工业进展	140
5.2.1 铝的冶炼历史	140
5.2.2 铝工业发展现状	141
5.3 电解铝工艺	145
5.3.1 电解铝工艺过程	145
5.3.2 铝电解用原材料	147
5.4 氯化铝熔盐电解工艺	156
5.4.1 氯化铝熔盐电解法原理及工艺	156
5.4.2 氯化铝-碱金属熔盐体系的选择	159
5.4.3 氯化铝熔盐电解法的技术优势	159
5.5 碳热还原炼铝工艺	161
5.5.1 高炉炼铝	161
5.5.2 电热法炼铝硅合金	163
5.5.3 碳热还原法制备金属铝	165
5.6 原铝精炼	173
5.6.1 铝的纯度对铝的性质的影响	173

5.6.2 精铝及高纯铝的性能与应用	178
5.6.3 原铝精炼工艺	179
5.7 铝的循环与再生工艺	191
5.7.1 再生铝的生产历史	191
5.7.2 发展再生铝的意义	194
5.7.3 再生铝资源	196
5.7.4 再生铝的利用途径	199
5.7.5 再生铝生产的熔炼设备	207
5.7.6 再生铝的精炼	213
5.7.7 再生铝的可持续发展	217
5.7.8 我国再生铝工业发展前景	218
参考文献	218
第6章 我国电解铝新技术进展	223
6.1 现行 Hall-Héroult 电解铝工艺的弊端	223
6.1.1 碳素阳极消耗及其带来的问题	223
6.1.2 碳素阴极与铝液不润湿及其带来的问题	226
6.1.3 碳素内衬材料带来的其他问题	227
6.1.4 电解槽的水平式结构及其带来的问题	227
6.2 冯氏电解槽	228
6.2.1 新型阴极结构电解槽的阴极结构及特点	228
6.2.2 技术原理	232
6.2.3 新型阴极电解槽热平衡及槽内衬保温结构设计	234
6.2.4 新型阴极结构电解槽阴极凸起的磨蚀和消耗	237
6.2.5 应用现状	237
6.3 惰性阳极	238
6.3.1 金属氧化物陶瓷惰性阳极的研究	239
6.3.2 金属合金惰性阳极的研究	243
6.3.3 金属陶瓷惰性阳极的研究	247
6.4 惰性可润湿性阴极	250
6.4.1 TiB ₂ 陶瓷可润湿性阴极材料	250
6.4.2 TiB ₂ -C 复合可润湿性阴极材料	252
6.4.3 TiB ₂ 可润湿性阴极涂层材料	253
6.5 基于惰性电极的新型铝电解槽	254
6.5.1 单独采用惰性阳极的电解槽	254
6.5.2 单独采用可润湿性阴极的电解槽	255

6.5.3 联合使用惰性阳极和可润湿性阴极的电解槽	257
6.5.4 新型铝电解槽的未来发展	262
6.6 低温电解铝技术	262
6.6.1 低温电解铝技术的发展	262
6.6.2 低温铝电解质体系	263
6.6.3 低温电解铝的研究展望	268
6.7 我国电解铝工业技术进展	269
6.7.1 大容量预焙铝电解槽技术	269
6.7.2 低极距和低槽电压电解技术	272
6.7.3 阴极棒技术(底部出电铝电解槽技术)	275
6.7.4 我国电解铝技术的发展方向	278
参考文献	281
第7章 我国电解铝工业技术发展战略	291
7.1 我国铝行业发展背景及形势	291
7.2 国家对铝行业的宏观政策	292
7.2.1 解决电解铝产能过剩问题	292
7.2.2 总量控制,限制初级产品出口	292
7.2.3 大力发展精深加工产品	293
7.2.4 发展水电铝联营模式	294
7.3 中国电解铝工业技术对策	295
7.3.1 发展低温低电压电解铝新技术	295
7.3.2 研发超大容量电解槽技术	296
7.3.3 完善大型整流机组整流技术	299
7.3.4 推广新型阴极结构铝电解槽技术	300
7.4 小结	304
参考文献	304
第8章 我国铝加工工业发展战略	306
8.1 我国铝加工工业的概况	306
8.1.1 我国铝加工工业的发展	306
8.1.2 我国铝加工材产能地区分布结构	309
8.2 我国的铝加工技术	311
8.2.1 熔铸技术	311
8.2.2 轧制技术	328
8.2.3 锻压技术	333
8.2.4 挤压技术	337