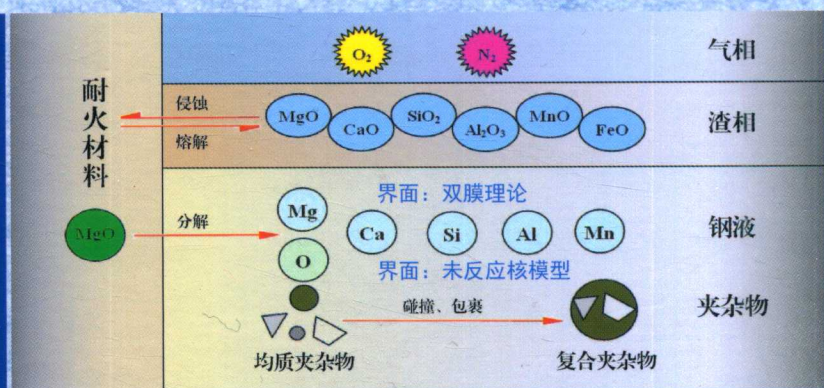


“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

炼钢过程中的夹杂物



李 阳 姜周华 李花兵 范光伟◎编著



科学出版社

“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

炼钢过程中的夹杂物

李 阳 姜周华 李花兵 范光伟 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书在介绍钢中夹杂物生成、排除等基本理论的基础上,介绍了典型钢种夹杂物控制的理论与实践及钢中夹杂物控制的发展方向。主要包括金属、合金脱氧的热力学计算方法,夹杂物产生、聚集及排除的动力学,普碳钢、冷镢钢、硬线钢、重轨钢、弹簧钢、轴承钢、不锈钢等典型钢种夹杂物控制的理论与实践以及氧化物冶金技术的研究现状及发展前景。

本书可作为高等院校冶金、材料学科相关专业本科生、研究生的教材,也可供相关企业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

炼钢过程中的夹杂物/李阳等编著. —北京:科学出版社, 2017

(现代冶金与材料过程工程丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-053229-9

I. 炼… II. 李… III. 炼钢—夹杂(金属缺陷)—研究 IV. TF704.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 120779 号

责任编辑:张淑晓 孙静惠/责任校对:贾伟娟

责任印制:肖 兴/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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 12 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2016 年 12 月第一次印刷 印张:20 3/4

字数:418 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《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(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、横臂及建筑和桥梁等结构件。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、无氯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，并通过中国有色金属工业协会鉴定，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、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；

钢焖渣水除疤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

进入 21 世纪以来,我国钢铁工业一直处于高速发展阶段,粗钢、生铁、钢材年产量增幅均超过 20%,而一些钢铁企业还在扩大产能,直接造成了目前钢铁产能严重过剩和环境污染。因此,2016 年年初,国务院印发了《关于钢铁行业化解过剩产能实现脱困发展的意见》,指出将在近年来淘汰落后钢铁产能的基础上,从 2016 年开始,用 5 年时间再压减粗钢产能 1 亿~1.5 亿 t。应该看到,我国国民经济各领域产业的快速升级和发展,对钢铁工业的要求已不是产量,而是品种、质量和性能。

钢中非金属夹杂物,是在炼钢、精炼及浇铸过程中,少量炉渣、耐火材料及冶炼过程中各种化学反应产物进入钢液而形成的。在大多数情况下,非金属夹杂物会恶化钢的机械性能,特别是降低塑性、韧性及疲劳性能,往往会使钢在加工、热处理和服役状态时产生裂纹,甚至脆断,从提高钢材的质量和性能角度出发,洁净钢冶炼成为当今钢铁冶金学科最前沿的热点研究方向之一。

东北大学特殊钢冶金研究所从“九五”期间就承担多项洁净钢领域的国家、省市和企业的合作课题,对铁水预处理、转炉/电炉、精炼和连铸的洁净钢生产的各个环节和整体优化进行了系统的理论研究和应用技术开发。本研究所的多位教师和研究生参加了洁净钢领域的科研工作,取得了一系列理论和实际应用成果。以笔者为例,自 1996 年师从姜周华教授攻读硕士学位开始接触洁净钢冶炼方面的研究,至今已超过 20 年,从最初的钢液脱硫和硫化物控制开始,陆续进行了冷镢钢、焊丝钢、硬线钢、重轨钢、弹簧钢、齿轮钢等钢种的相关质量控制研究,再到近年开展的不锈钢中夹杂物的控制,对不锈钢中夹杂物的认识不断加深。为此,我们总结了本研究所洁净钢领域的研究成果和国内外洁净钢研究的最新进展,编撰了本书。本书从金属、合金脱氧的热力学计算方法,夹杂物产生、聚集和排除动力学,到普碳钢、冷镢钢、硬线钢、重轨钢、弹簧钢、轴承钢、不锈钢等典型钢种夹杂物控制的理论与实践以及氧化物冶金技术的研究现状及发展前景进行了较全面的阐述,试图将这些内容融会贯通,使读者不仅可以了解钢中夹杂物从生成到去除的基本理论、典型钢种的夹杂物各自的特点,而且对夹杂物控制的技术有进一步的认识。

本书是东北大学特殊钢冶金研究所师生多年科研成果的总结,既重视夹杂物控制的基本原理,又反映洁净钢冶炼技术的最新进展,具有较强的针对性和实用

性。本书可作为冶金和材料学科相关专业本科生、研究生的教材，也可供相关企业的工程技术人员参考。

本书共 11 章，第 1、2、11 章由姜周华撰写，第 3~6 章由李阳撰写，第 7~9 章由李花兵撰写，第 10 章由范光伟撰写。全书由李阳统稿，姜周华主审。

本书的出版得到了东北大学“985 工程”现代冶金与材料过程工程科技创新平台的资助。作者在撰写本书的过程中参阅了大量书籍及论文，在此谨向文献的作者表示衷心的感谢！在本书的成文过程中，得到了梁连科、战东平、龚伟、董艳伍、耿鑫和刘福斌老师的大力帮助，文献整理过程中得到了徐光、陈常勇、姚聪林、胡浩、王亚峰、梁铁杰、杨光、杜鹏飞、吕剑波、秦国清和孙萌等研究生的大力支持，在此一并感谢！

由于作者理论水平及实践经验有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正！

李 阳

2016 年 12 月于东北大学

目 录

《现代冶金与材料过程工程丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 钢中的氧及炼钢常用的脱氧方式	1
1.1.1 钢中的氧及其危害	1
1.1.2 炼钢常用的脱氧方式	1
1.1.3 钢液的复合脱氧	2
1.2 钢中夹杂物的来源与种类	4
1.2.1 钢中夹杂物的来源	4
1.2.2 夹杂物的分类	4
1.3 夹杂物对钢材性能的影响	7
1.4 夹杂物控制的发展方向——氧化物冶金	9
1.4.1 氧化物冶金概念的提出	9
1.4.2 氧化物冶金技术进展	9
参考文献	12
第 2 章 金属、合金脱氧的热力学计算方法	15
2.1 不同金属的脱氧能力和脱氧反应	15
2.2 复合脱氧剂的脱氧反应及典型热力学计算方法	17
2.2.1 Mn-Si-Al 系复合脱氧剂的脱氧反应	18
2.2.2 含碱土金属的复合脱氧剂的脱氧反应	20
2.3 脱氧产物的控制原理	34
2.4 夹杂物生成的其他计算方法	36
2.4.1 动力学与热力学计算结合	36
2.4.2 CaO-Al ₂ O ₃ -CaS 体系夹杂物的生成计算	39
参考文献	44
第 3 章 夹杂物产生、聚集及排除的动力学	45
3.1 不同脱氧元素的影响	45
3.2 复合脱氧的影响	48
3.2.1 实验研究工作	48
3.2.2 现场试验及应用	50
3.3 精炼渣成分和性质的影响	53

3.4 温度、渣量及碳含量的影响	54
3.5 环境气氛及包衬材质的影响	54
3.5.1 环境气氛的影响	54
3.5.2 包衬材质的影响	55
3.6 脱氧产物的上浮及去除	56
3.6.1 夹杂物的碰撞及长大	57
3.6.2 夹杂物的上浮和去除	64
3.6.3 脱氧产物分离速率的研究	67
3.6.4 界面张力对夹杂物上浮、排除的影响	68
参考文献	69
第4章 普碳钢中夹杂物控制的理论与实践	75
4.1 普碳钢介绍	75
4.1.1 普碳钢的定义	75
4.1.2 普碳钢的分类	75
4.1.3 普碳钢的冶炼及用途	76
4.2 普碳钢中氧化物夹杂的产生	76
4.2.1 Al 脱氧钢中 Al_2O_3 夹杂物的产生和形貌	77
4.2.2 Al 脱氧钢中网状 Al_2O_3 夹杂物的生长机制	78
4.3 普碳钢中硫化物夹杂的产生	84
4.3.1 普碳钢中硫化物形成及类型	84
4.3.2 硫化物夹杂的危害与变性处理	85
4.3.3 MnS 夹杂物的变形行为和对钢的延展性的影响	86
4.4 普碳钢中夹杂物的控制	92
4.4.1 夹杂物的控制技术	92
4.4.2 夹杂物的变性处理	95
4.4.3 夹杂物控制的新方法——超细粒子喷入	97
参考文献	100
第5章 冷镢钢中夹杂物控制的理论与实践	103
5.1 冷镢钢的定义、分类及发展趋势	103
5.1.1 冷镢钢的定义	103
5.1.2 冷镢钢的国内外发展概况	104
5.1.3 冷镢钢的分类及发展趋势	104
5.2 冷镢钢的冶炼	107
5.2.1 冷镢钢的冶炼工艺	107
5.2.2 冷镢钢的连铸保护浇铸	108

5.3 冷镢钢中夹杂物的产生	109
5.3.1 冷镢钢中夹杂物产生的热力学计算	109
5.3.2 冷镢钢冶炼过程中夹杂物的变化	112
5.3.3 夹杂物对冷镢钢性能的影响	113
5.4 冷镢钢中夹杂物的去除与控制	116
5.4.1 冷镢钢中夹杂物的热力学分析	116
5.4.2 冷镢钢中夹杂物控制的实验研究	121
5.4.3 冷镢钢中夹杂物控制的工业试验	127
参考文献	131
第6章 硬线钢中夹杂物控制的理论与实践	133
6.1 硬线钢的用途、分类及发展趋势	133
6.2 硬线钢的冶炼	134
6.2.1 国内硬线钢冶炼工艺	135
6.2.2 国外硬线钢冶炼工艺	137
6.2.3 国内外硬线盘条的生产	138
6.3 硬线钢中夹杂物的产生、类型及危害	139
6.3.1 硬线钢中夹杂物的来源	139
6.3.2 硬线钢中夹杂物的类型	140
6.3.3 硬线钢中夹杂物的危害	143
6.4 硬线钢中夹杂物的去除与控制	143
6.4.1 脱氧方式及变性处理对硬线钢中夹杂物的影响	144
6.4.2 精炼渣对硬线钢中夹杂物的影响	151
6.4.3 实际生产中硬线钢中夹杂物的去除与控制	158
参考文献	160
第7章 重轨钢中夹杂物控制的理论与实践	163
7.1 重轨钢的用途、分类及发展趋势	163
7.1.1 重轨钢的用途及分类	163
7.1.2 重轨钢的发展趋势	164
7.1.3 高速重轨与耐蚀重轨的研究	166
7.2 重轨钢的冶炼	169
7.2.1 重轨钢的冶炼现状	169
7.2.2 国外重轨钢的冶炼	169
7.2.3 国内重轨钢的冶炼	171
7.3 重轨钢中夹杂物的产生	174
7.3.1 重轨钢中夹杂物的来源、相关计算	174

7.3.2 精炼渣对重轨钢中夹杂物的影响	177
7.3.3 夹杂物对重轨钢性能的影响	180
7.4 重轨钢中夹杂物的去除与控制	182
7.4.1 脱氧剂对重轨钢中夹杂物的影响	182
7.4.2 碱度和氧化铝对重轨钢中夹杂物的影响	189
7.4.3 重轨钢中夹杂物的控制措施	192
参考文献	195
第 8 章 弹簧钢中夹杂物控制的理论与实践	197
8.1 弹簧钢的定义、分类及发展趋势	197
8.1.1 弹簧钢的定义	197
8.1.2 弹簧钢的分类	198
8.1.3 弹簧钢的发展趋势	199
8.2 弹簧钢的冶炼	200
8.2.1 国内弹簧钢的冶炼	200
8.2.2 国外弹簧钢的冶炼	201
8.3 弹簧钢中夹杂物的产生	203
8.3.1 钢液中 Al_2O_3 夹杂物变性的热力学计算	203
8.3.2 CaS 生成的热力学分析	205
8.3.3 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaS}$ 类夹杂物析出热力学分析	208
8.4 弹簧钢中夹杂物的去除与控制	209
8.4.1 弹簧钢中氧含量的控制	210
8.4.2 弹簧钢中硫含量的控制	212
8.4.3 弹簧钢中非金属夹杂物及其控制	213
8.5 弹簧钢发展展望	215
参考文献	217
第 9 章 轴承钢中夹杂物控制的理论与实践	218
9.1 轴承钢的用途、分类及发展趋势	218
9.1.1 轴承钢的用途	218
9.1.2 轴承钢的分类	219
9.1.3 轴承钢的发展趋势	221
9.2 轴承钢的冶炼	222
9.2.1 国外轴承钢的冶炼工艺	222
9.2.2 国内轴承钢的冶炼工艺及其发展现状	226
9.3 轴承钢中夹杂物的产生	232
9.3.1 轴承钢中夹杂物产生的热力学计算	232

9.3.2 现场生产条件下夹杂物的产生	235
9.4 轴承钢中夹杂物的去除和控制	237
9.4.1 轴承钢中氧含量的控制	237
9.4.2 精炼渣对轴承钢中夹杂物的影响	238
9.4.3 轴承钢中 TiN 夹杂的行为与控制	243
9.4.4 轴承钢中镁的行为和控制	249
参考文献	254
第 10 章 不锈钢中夹杂物控制的理论与实践	256
10.1 不锈钢的用途、分类及发展趋势	256
10.2 不锈钢的冶炼	257
10.3 不锈钢中夹杂物的产生	258
10.3.1 不锈钢中夹杂物的产生的理论计算	258
10.3.2 不锈钢中夹杂物产生的实验研究	265
10.3.3 工业生产中不锈钢夹杂物的产生	270
10.4 不锈钢中夹杂物的去除与控制	273
10.4.1 AOD 精炼过程中非金属夹杂物的控制	273
10.4.2 LF 炉内非金属夹杂物的控制	274
10.4.3 中间包内非金属夹杂物的控制	275
10.4.4 连铸过程水口结瘤成因及控制	277
10.4.5 不锈钢中非金属夹杂物的有效利用	279
参考文献	288
第 11 章 氧化物冶金的研究现状及发展前景	291
11.1 氧化物冶金技术的产生	291
11.1.1 晶内铁素体的形核机理	292
11.1.2 氧化物冶金技术对改善钢焊接性的作用	294
11.1.3 氧化物的选择对夹杂物冶金技术的影响	295
11.1.4 氧化物冶金型钢的显微组织特征	301
11.1.5 晶内铁素体组织控制技术	302
11.2 氧化物冶金技术的发展	303
11.3 氧化物冶金技术的应用实践	305
11.3.1 氧化物冶金技术在焊接领域的应用和发展	305
11.3.2 机械结构用高韧性热锻微合金钢	307
11.4 氧化物冶金技术的工业前景和发展趋势	308
参考文献	310

第1章 绪 论

1.1 钢中的氧及炼钢常用的脱氧方式

1.1.1 钢中的氧及其危害

氧在铁液中有较大的溶解度，在 1800K 时氧的最大溶解度为 0.16%^[1]。氧能与铁形成各种氧化物：浮氏体 (Fe_xO)、磁铁矿 (Fe_3O_4) 和赤铁矿 (Fe_2O_3)。氧溶解于铁中的形态虽然尚未完全确定，但一般认为最可能的是氧化亚铁 (FeO)， FeO 在 843K 以上才是稳定的，在该温度以下将按下式分解为 Fe_3O_4 和 Fe 。



在 1868~1973K 范围内，随着温度升高，氧的溶解度与温度按近似直线关系增大。其溶解度随温度变化可由下式表示^[2]：

$$\lg[\%O] = -\frac{6320}{T} + 2.734 \quad (1-2)$$

不论何种炼钢方法，在操作过程中初期熔池含硅、锰和碳等元素相当高时，氧的含量是不高的，但随着这些元素被氧化，氧含量逐步升高，至碳含量最低时，氧含量达到最大值。

在所有炼钢方法中，在将含碳量降到钢种要求的规格时，钢液必须经过脱氧，否则会产生下列问题：

(1) 在钢液冷凝过程中，碳和氧偏析浓聚，将使碳再次发生氧化，使钢中产生气泡，从而影响钢材的质量；

(2) 在钢液冷凝过程中，氧以 FeO 、 Fe_3O_4 形式析出，分布于晶界表面上，使钢的塑性、机械性能下降，并产生热脆、冷脆，对特殊用途钢的产品质量带来极其不利的影响。

1.1.2 炼钢常用的脱氧方式

现代炼钢生产中，脱氧方法可大体分为沉淀脱氧、扩散脱氧和真空脱氧。

1) 沉淀脱氧法

沉淀脱氧法的原理是，向钢液中加入与氧的亲合力比铁大的元素，使溶解于钢液中的氧化亚铁还原，用公式表示如下：