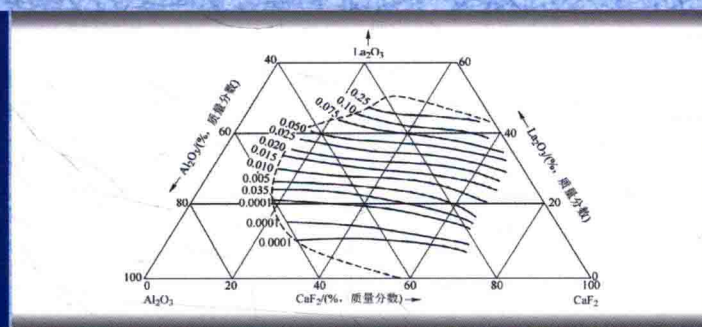


“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

稀土材料理论及应用



王常珍◎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

稀土材料理论及应用

王常珍 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

稀土为 17 种有特殊性质和作用的化学元素。本书内容包括量子化学基础和化学键；稀土元素的赋存状态和稀土资源；稀土元素的性质、化合物和配合物；含稀土 Invar 合金、稀土金属间化合物和稀土复合氧化物等研究；稀土纳米材料；稀土氧、氟离子导体和稀土离子导体；含稀土高温质子导体；稀土在钢中的作用和应用；稀土在球墨铸铁和蠕墨铸铁中的应用；稀土在有色金属及其合金中的作用；稀土在农林牧业上的应用、机制及作用；稀土催化剂和催化作用；稀土氢化物和储氢合金；超导材料的理论和应用；稀土磁性材料；稀土发光材料及激光材料；稀土功能陶瓷；宝石、玉石及稀土光学玻璃和陶瓷；钪及其材料应用；稀土研究、生产、政策及未来发展。全书给出了若干有用数据和图表。

本书可供高等院校冶金、材料、化学、化工、矿物以及相关专业的教师、研究生参考，也可供科研院所、工厂的科研和工程技术人员以及业务负责人参考。

图书在版编目(CIP)数据

稀土材料理论及应用/王常珍编著. —北京：科学出版社，2016.6

(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 978-7-03-048452-9

I. ①稀… II. ①王… III. ①稀土金属-金属材料-研究 IV. ①TG146.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 119663 号

责任编辑：张淑晓 李 洁/责任校对：何艳萍 张小霞

责任印制：赵 博/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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年6月第 一 版 开本：720×1000 1/16

2016年6月第一次印刷 印张：36 1/4

字数：730 000

定价：150.00 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，王国栋院士率队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（3~5 μm ）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及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,利用有限元紊流分析方法,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 年国家科技进步奖三等奖。

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及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;钢焖渣水除疤循环及吸收二氧化碳技术和装备,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

我于 1952 年毕业于山东大学化学系, 由国家统一分配至东北大学(原东北工学院)任教。于 1957 年由学校派至中国科学院长春应用化学研究所进修, 在钟焕邦先生指导下进行含稀土水盐体系相图的研究。这一过程使我进一步认识了我国矿产资源中稀土家族 17 种元素: 钪、钇及镧系 15 种元素。在这期间, 我到吉林大学听唐教庆、孙家钟老师讲授物理化学和物质结构课程, 这使我的知识和眼界得到了扩展, 知道物质组成-结构-性质的关系及制备过程的重要性。

1964 年我又由学校派至中国科学院上海冶金研究所进修, 在邹元熾先生指导下研究包头稀土矿高炉渣系高温下稀土氧化物的活度和等活度线, 并学习研究所内各种高温冶金物理化学研究方法, 这使我再次认识了稀土资源大家庭, 并对稀土产生了浓厚的兴趣, 对“稀土”两字备感亲切。从此, 步入稀土研究这一领域。

我曾参加了前冶金部几个五年计划中关于含稀土钢的研究。同时也在研究中开始摸索。开始时, 在厂、校、研合作中采用压入法、稀土棒吊挂法和连铸喂丝法等向钢中加入稀土, 但效果并不理想。后至日本参加中日钢铁双边会议时得知, 日本采用射弹法加稀土, 一颗颗外包铁箔或铝箔的稀土被高速射入钢水中, 立即起到脱氧、脱硫作用, 且效果好。我国至今未闻采用此法。因此, 也非常希望通过研究和实践探寻中国生产、加工、应用稀土的良好方法。

几十年来我幸得国家自然科学基金的多次资助, 率先开展了稀土传感器研究工作。实验证明了钢中固溶稀土的存在, 直至室温; 研究了多种稀土复合化合物、含稀土 Invar 合金、稀土铝合金熔体等热力学性质、含稀土氧离子导体、氢离子导体及相应的化学传感器等。

我通过多次参加稀土会议和查阅文章资料得知, 稀土在农、林及磁、光、电、超导以及军工等多种领域有广泛应用; 亲眼看到了在包头白云鄂博稀土露天矿, 大吊车在一层层剥离含稀土矿石; 知道日本廉价购入包头稀土矿石和江西离子交换法生产的 Y_2O_3 , 却再以高价卖给中国含稀土的高科技产品等诸多事例, 虽开采辛苦, 但日本廉价买入再高价卖给中国的现实, 让我为此痛心。

多年来, 我一直想写一本较全面的关于稀土材料的理论和应用的书, 以能有机会和读者为我国稀土资源的有效开发利用多做些工作。现幸得东北大学和科学出版社的资助及支持, 得以实现愿望, 在此表示衷心的感谢。

全书共分 20 章: 第 1 章, 量子化学基础和化学键; 第 2 章, 稀土元素的赋存状态和稀土资源; 第 3 章, 稀土元素的性质、化合物和配合物; 第 4 章, 含稀土

Invar 合金、稀土金属间化合物和稀土复合氧化物等研究;第 5 章,稀土纳米材料;第 6 章,稀土氧、氟离子导体和稀土离子导体;第 7 章,含稀土高温质子导体;第 8 章,稀土在钢中的作用和应用;第 9 章,稀土在球墨铸铁和蠕墨铸铁中的应用;第 10 章,稀土在有色金属及其合金中的作用;第 11 章,稀土在农林牧业上的应用、机制及作用;第 12 章,稀土催化剂和催化作用;第 13 章,稀土氢化物和储氢合金;第 14 章,超导材料的理论和应用;第 15 章,稀土磁性材料;第 16 章,稀土发光材料及激光材料;第 17 章,稀土功能陶瓷;第 18 章,宝石、玉石及稀土光学玻璃和陶瓷;第 19 章,钪及其材料应用;第 20 章,稀土研究、生产、政策及未来发展。

全书包括基础理论和生产及实践中的应用等内容。力求阐述清晰,逻辑严密,图文并茂,但受本人水平所限,定有很多不足之处,敬请读者指正。

王常珍

2015 年 10 月 25 日

目 录

《现代冶金与材料过程工程丛书》序

前言

第 1 章 量子化学基础和化学键	1
1.1 简述	1
1.2 量子化学基础	1
1.3 薛定谔(Schrödinger)方程	2
1.4 原子的电子构型	6
1.5 稀土原子和离子的大小和价态	7
1.6 镧系元素是具有特异性能的家族	8
1.7 价键理论	9
1.8 多原子分子的结构	14
1.9 杂化轨道	16
1.10 原子簇化合物	21
1.11 分子光谱	22
参考文献	31
第 2 章 稀土元素的赋存状态和稀土资源	32
2.1 稀土元素在周期表中的位置和外层电子排布	32
2.2 稀土元素的发现及名称的由来	33
2.3 稀土元素的赋存状态和稀土矿物	34
2.4 中国稀土资源	35
2.5 调整优化中国稀土国家战略	37
2.6 国外稀土资源情况	38
2.7 非矿物稀土赋存状态的地球化学	39
2.8 北海半岛水体混合过程的稀土元素分布特征	39
2.9 厦门西海域表层沉积物中稀土元素分布特征	40
2.10 利用稀土元素示踪鄂西北一带古代绿松石产地	41
2.11 黄土高原表层土壤中稀土元素含量研究	41
2.12 稀土在土壤中积累、分配及迁移效应研究	42
参考文献	42
第 3 章 稀土元素的性质、化合物和配合物	44

3.1 稀土元素的物理性质	44
3.2 稀土金属的化学性质概述	55
3.3 稀土金属与非金属作用	58
3.4 稀土元素的配合物	65
参考文献	72
第4章 含稀土 Invar 合金、稀土金属间化合物和稀土复合氧化物等研究	74
4.1 Invar 合金	74
4.2 稀土金属间化合物热力学研究	78
4.3 利用 Gibbs-Duhem 方程计算活度	80
4.4 金属间化合物的热力学研究	83
4.5 含稀土化合物热力学研究	85
4.6 单一氧化物热力学研究	89
4.7 复合氧化物热力学研究	90
4.8 非化学计量化合物热力学研究	96
4.9 非氧化物体系热力学研究	100
参考文献	103
第5章 稀土纳米材料	106
5.1 简述	106
5.2 纳米微粒的基本特征	106
5.3 纳米微粒的特性	107
5.4 纳米微粒的结构	109
5.5 纳米块体材料	109
5.6 纳米复合材料	110
5.7 稀土纳米氧化物材料的制备方法	111
5.8 多维稀土材料的制备与组装及有关问题	114
5.9 稀土纳米材料的复合与组装	116
5.10 CeO ₂ 纳米纤维	117
5.11 Gd ₂ O ₃ 低维纳米结构的形貌可控合成研究	119
5.12 采用树状高分子与无机纳米粒子复合	120
5.13 稀土纳米探针荧光免疫分析	121
5.14 稀土纳米量子记忆体	121
5.15 小涂料的大作用	122
参考文献	122
第6章 稀土氧、氟离子导体和稀土离子导体	123
6.1 简述	123

6.2	$\text{ZrO}_2(+\text{Y}_2\text{O}_3)$ 稳定的固体电解质 (YSZ)	123
6.3	$\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$ 固体电解质	126
6.4	稀土氟离子导体	127
6.5	高温用稀土固体电解质	127
6.6	金属熔体中元素原子之间的相互作用, Taylor 展开式	136
	参考文献	139
第 7 章	含稀土高温质子导体	142
7.1	简述	142
7.2	高温质子导体的制备及研究方法概述	142
7.3	钙钛矿型材料产生质子导电的原因	143
7.4	对某些钙钛矿型质子导体的讨论	145
7.5	红外光谱法	149
7.6	钙钛矿型质子导体的应用	151
	参考文献	155
第 8 章	稀土在钢中的作用和应用	157
8.1	早期对稀土在钢中应用的认识	157
8.2	稀土氧化物、硫化物、碳化物、氮化物的热力学稳定性	158
8.3	稀土加入钢液后的脱氧、脱硫物理化学	165
8.4	Vahed 和 Kay 的工作	169
8.5	钢铁液中生成稀土化合物的热力学实验研究	172
8.6	铁液中稀土化合物形核反应热力学研究	177
8.7	稀土与 Sn、Pb、As、Tb、Bi 等元素的作用	180
8.8	钢铁中的固溶稀土与合金化作用	183
8.9	含稀土渣电渣重熔消除或减弱界面碳化物或氮化物聚集的影响	186
8.10	电渣重熔用渣的透气性	188
8.11	稀土在某些钢种中的应用效果	189
8.12	钢的稀土表面渗	190
8.13	近期国内含稀土钢生产	191
	参考文献	192
第 9 章	稀土在球墨铸铁和蠕墨铸铁中的应用	195
9.1	对球墨铸铁和蠕墨铸铁的认识和研究	195
9.2	双峰效应的 Taylor 展开式	199
9.3	稳定生产稀土蠕墨铸铁的工艺条件	200
9.4	影响冲天炉铁水生产蠕墨铸铁的冶金因素	200
9.5	稀土抑制铸铁中砷、锑、铋的热力学探讨	202

参考文献	211
第 10 章 稀土在有色金属及其合金中的作用	213
10.1 稀土在 Ni、Cu、Al 液中的作用	213
10.2 稀土在 Mg 合金溶液中的作用	219
10.3 含稀土合金的性能研究	219
10.4 有色金属合金加稀土的效果	222
10.5 稀土镁合金骨接合材料的应用研究	223
10.6 利用高压生成新合金	224
参考文献	226
第 11 章 稀土在农林牧业上的应用、机制及作用	228
11.1 简述	228
11.2 稀土在农林牧业上的应用和机制	228
11.3 中国稀土生物无机化学研究进展	237
11.4 某些稀土化合物可用作药物	239
11.5 稀土复合助剂在胶粉改性路面沥青中的应用	239
11.6 稀土对藻类的生物效应	240
11.7 施用稀土的养殖业和牧草饲料中铈、钪、镧比活度水平与卫生评价	240
11.8 其他近年不同方面的稀土研究	243
参考文献	243
第 12 章 稀土催化剂和催化作用	245
12.1 简述	245
12.2 催化作用特征和定义	245
12.3 催化作用的基本特征	246
12.4 催化剂的组成功能	247
12.5 吸附作用与多相催化	251
12.6 金属氧化物催化剂及其催化作用	253
12.7 分子筛催化剂及其催化作用	261
12.8 工业催化剂的制备和使用	266
12.9 稀土催化剂的研究及应用	271
12.10 稀土催化剂近期一些工作报告	278
参考文献	278
第 13 章 稀土氢化物和储氢合金	280
13.1 简述	280
13.2 氢化物类型和储氢合金成分选择依据	280

13.3	稀土氢化物的结构	281
13.4	稀土元素氢化物的热力学性质	283
13.5	稀土元素氢化物的磁性、导电性和结构	284
13.6	金属氢化物储氢原理	285
13.7	储氢材料的特征值和应具备的条件	287
13.8	稀土类储氢合金及性能优化的主要措施	288
13.9	稀土储氢材料的制备	291
13.10	储氢材料的储存和应用	292
13.11	储氢材料的实验研究示例	294
13.12	钪氢化物作为氢传感器的参比电极	298
	参考文献	299
第 14 章	超导材料的理论和应用	301
14.1	简述	301
14.2	超导体的主要特性	301
14.3	超导电性的 BCS 理论	303
14.4	超导体的种类	304
14.5	氧化物超导材料	306
14.6	RE 123 氧化物超导材料的制备	308
14.7	第二代 (2G) 高温超导线材	310
14.8	超导材料的应用	316
14.9	关于稀土高温超导研究和应用的近年报道	319
	参考文献	320
第 15 章	稀土磁性材料	322
15.1	简述	322
15.2	物质的磁性	322
15.3	强磁性的微观机理与铁磁性的量子力学理论	328
15.4	稀土元素的磁性来源	330
15.5	稀土金属与 3d 过渡金属化合物的磁性	333
15.6	稀土永磁材料的种类	333
15.7	稀土永磁材料的相图	337
15.8	合金相变原理在稀土永磁合金高温相变中的应用	354
15.9	稀土永磁材料的制备	357
15.10	稀土永磁材料的应用	359
15.11	稀土超磁致伸缩材料	360
15.12	稀土磁致冷材料和磁蓄冷材料	363

15.13 稀土磁性材料的近期研究报道	365
参考文献	370
第 16 章 稀土发光材料及激光材料	373
16.1 简述	373
16.2 发光材料的基础知识	373
16.3 稀土离子的光谱特性	393
16.4 稀土离子的 f-f 跃迁和 f-d 跃迁	398
16.5 Eu^{2+} 的光谱	405
16.6 稀土离子的电荷迁移带	406
16.7 晶体中稀土离子间能量传递的图示	407
16.8 稀土发光材料的应用	414
16.9 稀土长余辉发光材料	417
16.10 白光 LED	421
16.11 稀土激光材料	425
参考文献	433
第 17 章 稀土功能陶瓷	436
17.1 简述	436
17.2 压电陶瓷	436
17.3 稀土透明电光铁电陶瓷	446
17.4 稀土电介质陶瓷	448
17.5 稀土半导体陶瓷	451
参考文献	456
第 18 章 宝石、玉石及稀土光学玻璃和陶瓷	457
18.1 简述	457
18.2 宝玉石的成因和分类	457
18.3 稀土光学玻璃	461
18.4 稀土抛光材料	477
18.5 稀土陶瓷釉	478
18.6 稀土发热材料	481
参考文献	484
第 19 章 钪及其材料应用	485
19.1 简述	485
19.2 钪的资源	485
19.3 钪的提取和纯制	487
19.4 氧化钪提取分离的具体方法	488