

“十二五”国家重点图书出版规划项目

21世纪新能源丛书

中高温传热蓄热材料

丁 静 魏小兰 著
彭 强 杨建平



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

21 世纪新能源丛书

中高温传热蓄热材料

丁 静 魏小兰 著
彭 强 杨建平

科学出版社

北 京



内 容 简 介

研究高性能传热蓄热材料的设计制备方法及传输机理,不仅关系到蓄热系统运行的可靠性和稳定性,而且是保证工业余热回收与可再生能源利用系统实现高效低成本的重要环节。本书论述了中高温熔盐传热蓄热材料相图计算的热力学基础,建立了熔盐低共熔点和组成的理论预测方法,构建了熔盐传热蓄热材料体系,系统地介绍了熔盐传热蓄热材料的高温热物性、热稳定性和热腐蚀性理论以及实验研究方法,阐述了熔盐传热蓄热材料循环利用和环境效应,从宏观和微观两个层面,重点阐述了硝酸熔盐材料高温劣化的机理,概述了熔盐传热蓄热材料在太阳能规模化热利用、工业节能、能量传输与转换、材料加工等领域的应用。

本书可作为能源、动力、化工、冶金、石油、机械、材料等专业的研究生和相关科研工作者的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

中高温传热蓄热材料/丁静等著. —北京:科学出版社,2013

(21世纪新能源丛书)

ISBN 978-7-03-037827-9

I. ①中… II. ①丁… III. ①传热-复合材料 ②蓄热-复合材料
IV. ①TK124 ②TK11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 126971 号

责任编辑:钱俊周涵/责任校对:陈玉凤

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

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

*

2013年7月第一版 开本:B5(720×1000)

2013年7月第一次印刷 印张:18 3/4

字数:353 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《21 世纪新能源丛书》编委会

主 编 徐建中

副主编 陶文铨 匡廷云 欧阳平凯 金红光

编 委 (按姓氏笔画排序)

丁 静 马重芳 王如竹 王志峰

朱锡锋 李小森 吴创之 何雅玲

汪集旸 张明明 张寅平 陈海生

姜胜耀 骆仲泱 郭烈锦 戴松元

《21 世纪新能源丛书》序

物质、能量和信息是现代社会赖以存在的三大支柱。很难想象没有能源的世界是什么样子。每一次能源领域的重大变革都带来人类生产、生活方式的革命性变化,甚至影响着世界政治和意识形态的格局。当前,我们又处在能源生产和消费方式发生革命的时代。

从人类利用能源和动力发展的历史看,古代人类几乎完全依靠可再生能源,人工或简单机械已经能够适应农耕社会的需要。近代以来,蒸汽机的发明唤起了第一次工业革命,而能源则是以煤为主的化石能源。这之后,又出现了电和电网,从小规模的发电技术到大规模的电网,支撑了与大工业生产相适应的大规模能源使用。石油、天然气在内燃机、柴油机中的广泛使用,奠定了现代交通基础,也把另一个重要的化石能源引入了人类社会;燃气轮机的技术进步使飞机突破声障,进入了超声速航行的时代,进而开始了航空航天的新纪元。这些能源的利用和能源技术的发展,进一步适应了高度集中生产的需要。

但是化石能源的过度使用,将造成严重环境污染,而且化石能源资源终将枯竭。这就严重地威胁着人类的生存和发展,人类必然再一次使用以可再生能源为主的新能源。这预示着人类必将再次步入可再生能源时代——一个与过去完全不同的建立在当代高新技术基础上创新发展起来的崭新可再生能源时代。一方面,要满足大规模集中使用的需求;另一方面,由于可再生能源的特点,同时为了提高能源利用率,还必须大力发展分布式能源系统。这种能源系统使用的是多种新能源,采用高效、洁净的动力装置,用微电网和智能电网连接。这个时代,按照里夫金《第三次工业革命》的说法,是分布式利用可再生能源的时代,它把能源技术与信息技术紧密结合,甚至可以通过一条管道来同时输送一次能源、电能和各种信息网络。

为了反映我国新能源领域的最高科研水平及最新研究成果,为我国能源科学技术的发展和人才培养提供必要的资源支撑,中国工程热物理学会联合科学出版社共同策划出版了这套《21 世纪新能源丛书》。丛书邀请了一批工作在新能源科研一线的专家及学者,为读者展现国内外相关科研方向的最高水平,并力求在太阳能热利用、光伏、风能、氢能、海洋能、地热、生物质能和核能等新能源领域,反映我国当前的科研成果、产业成就及国家相关政策,展望我国新能源领域未来发展的趋

势。本丛书可以为我国在新能源领域从事科研、教学和学习的学者、教师、研究生提供实用系统的参考资料,也可为从事新能源相关行业的企业管理者和技术人员提供有益的帮助。

中国科学院院士

2013 年 6 月

前 言

能源是社会经济发展的重要物质基础,是我国 21 世纪经济发展的战略重点。为了解决能源问题,必须大力开展节能、科学用能和化石燃料的清洁高效利用,同时加速可再生能源的低成本规模化利用。高效蓄热技术作为能源利用的重要环节,在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》和《可再生能源中长期发展规划》中是重点优先发展的战略性能源技术,发展高效蓄热材料与装置是节能减排技术与可再生能源低成本规模化利用技术提出的重大需求。

工业是我国最大的终端用能消费部门,占全国能源消费总量的比重一直维持在 70%左右,是当前节能潜力最大的领域。目前,我国在电力、钢铁、建材和化工等大规模工业的整个工艺过程中余热平均回收利用率远低于国际先进水平,直接导致工业能源利用效率低。例如钢铁工业,按照我国高炉-炼钢-轧钢的工业流程测算,生产过程能源利用率为 27%,其余 73%的热能表现为生产过程的余热,我国钢铁工业各种余热的平均回收利用率仅为 25.8%,而国外先进水平高达 50%以上,主要原因之一是间歇式高品质余热没有得到有效利用。工业流程过程间歇高温余能目前尚无成熟技术手段加以利用的原因是其间歇式排放的特点导致回收利用难度较大,因此亟需采用高温蓄热材料存储间歇高温余能并稳定使用,以有效提高能源使用效率。

太阳能热发电技术以其生命周期排碳低、电价低和对电网冲击小等优势,近十年发展迅猛。由于太阳能具有能流密度低、昼夜间歇性、白天随地球自转辐照强度不断变化的基本特性,不能满足工业化大规模连续供能的要求,因此必须开发低成本传热蓄热材料和发展高效蓄热技术,以有效地解决可再生能源的储存与运输问题。

高温蓄热系统的性能和成本,取决于蓄热材料与系统设计控制两方面。研究高性能传热蓄热材料的设计制备方法及传输机理,不仅关系到蓄热系统运行的可靠性和稳定性,而且是保证余热回收与可再生能源利用系统实现高效低成本的重要环节。在众多中高温蓄热材料中,熔融盐以其宽广的工作温度范围、高的导热性、低的蒸气压和高的热稳定性和化学稳定性,成为低成本规模化中高温传热蓄热材料发展的重点。

在实际应用中,蓄热过程为一个多相多场驱动的复杂热流体体系的非稳态耦合传递与反应过程,其中紧密结合的传递现象包括相与相之间的扩散、弥散,质量、热量和动量传递,传递过程中的相界面迁移机制非常复杂。多元混合熔盐体系的相

图特征、相界面形态与界面传递、传递过程凝结/解凝相变问题,由于涉及能源科学、计算化学、量子化学和材料科学等学科的相互渗透,理论研究难度很大。开展低成本熔盐传热蓄热材料体系构建与性能控制的关键科学问题包括:①低温段熔盐相图计算的热力学模型,预测熔盐低共熔点及组成,深入认识高效蓄热材料可控设计的科学内涵,构建熔盐传热蓄热材料体系;②最佳工作温度范围液态熔盐热物性理论与实验研究方法;③熔盐长期循环高热载荷和循环交变热应力工况下的热稳定性;④从微观和宏观两个层面,探悉熔盐劣化反应热力学与动力学特征,揭示熔盐高温热稳定性机理;⑤熔盐高温热腐蚀性测试方法和机理;⑥高温熔盐材料循环利用与环境效应,形成熔盐传热蓄热材料高温非稳态工况下的可靠性与耐久性评价,为低成本高性能熔盐传热蓄热材料制备技术及规模化应用提供科学基础。

围绕中高温传热蓄热介质——熔融盐材料研究中的关键科学问题,作者及其研究团队进行了八年的研究,取得了一些探索性的研究成果,构建了中高温熔融盐传热蓄热材料的设计方法和理论体系。本书是在归纳、整理、总结作者研究团队研究工作基础上完成的一本学术专著。同时为了尽可能全面地体现中高温熔融盐传热蓄热材料的研究进展,书中也介绍了其他熔融盐传热蓄热材料研究团队的研究成果。

本书共分为 12 章。第 1 章概述了中高温传热蓄热材料的分类、基本属性、热物性强化途径、相图计算的热力学模型;第 2 章阐述中高温熔盐传热蓄热材料的相图基础、相图的实验测定方法,建立了相加三元熔盐体系、交互三元熔盐体系和交互四元熔盐体系的热力学模型;第 3 章介绍了采用共形离子溶液理论(CIS)模型模拟计算硝酸熔盐体系的相图,分别计算了相加三元体系、交互三元体系和交互四元硝酸熔盐体系相图,并采用实验结果对计算模型进行了修正,建立了熔盐低共熔点和共熔物组成的理论预测方法;第 4 章阐述了熔盐高温热物性、热稳定性和腐蚀性研究方法,分析了熔盐在工作温度范围内密度、黏度、热膨胀系数、导热系数随温度的变化规律,建立了熔盐高温静态热稳定性和动态热稳定性的测试方法,介绍了熔盐高温热腐蚀性的测试方法;第 5 章介绍多元硝酸熔盐的设计和制备方法,分别从高温静态和动态工况、短期和长期、微量和大容器量,研究了熔盐的热稳定性,从金属接触高温硝酸盐后的质量变化、表面氧化膜的物相组成以及熔盐内部关键组分变化,探讨了硝酸熔盐对金属的高温腐蚀性;第 6 章介绍交互三元碳酸熔盐和相加三元碳酸熔盐的制备方法,阐述了熔盐 SYSU-C1 和 SYSU-C2 热物性的实验测定方法,获得了碳酸熔盐比热容、密度、黏度随温度的变化规律,从高温静态和动态工况下对碳酸熔盐的热稳定性进行研究,包括质量、组成和物相变化,从金属接触高温碳酸熔盐后的质量变化,探讨碳酸熔盐对金属的高温腐蚀性;第 7 章介绍氯化物熔盐的制备方法,阐述了熔盐 SYSU-C3 热物性的实验测定方法,获得了氯化物

熔盐比热容、密度、黏度随温度的变化规律,分别从高温静态和动态工况,研究熔盐的热稳定性,从金属接触高温氯化物熔盐后的质量变化、腐蚀层微观形貌和组成,探讨氯化物熔盐对金属的高温腐蚀性;第8章介绍硝酸熔盐热物性的计算方法;第9章从化学反应热力学和动力学理论,提出了熔盐劣化反应发生的判据,获得了劣化反应速率和劣化反应最小能量路径,阐述了硝酸熔盐材料高温热稳定性的机理;第10章介绍硝酸熔盐的环境效应,阐述了高浓度硝酸熔盐溶液在土壤和水体中扩散系数的测量方法,提出了土壤和水体硝酸盐常规治理方法,分析了硝酸熔盐传热蓄热过程中 NO_x 排放,提出了硝酸熔盐高温工况下 NO_x 排放监测和控制方法;第11章介绍了硝酸熔盐的安全使用问题及循环再生利用方法;第12章介绍熔盐在太阳能规模化热利用、工业节能、能量转换与储存、材料加工等领域的应用。

作者及其研究团队在中高温蓄热技术方面的研究工作先后得到国家重点基础研究发展规划项目(973课题)“高温传热蓄热过程多尺度结构中流动与传递规律”(2010CB227103)和“气相余热高效梯级储存与转换的理论与方法”(2010CB227306)、国家自然科学基金重点项目“太阳能聚集、高温热转换与蓄热的关键热科学问题研究”(50930007)、国家高技术研究发展计划(863计划)“高可靠性吸热传热蓄热方式的研究和系统建立”(2006AA050103)和“太阳能热与常规燃料互补发电技术”(2012AA050604)等项目的资助。德国耐驰热仪器制造有限公司上海应用实验室无偿帮助测试了本书所发明的熔融盐传热蓄热材料的部分热物性。本书的出版得到清华大学教授张兴博士、北京科技大学教授张欣欣博士、哈尔滨工业大学教授谈和平博士的热情推荐。作者研究团队的陆建峰副教授、博士后尹辉斌、研究生廖敏、胡宝华、龙兵、周茗蕙、王艳、本科生黄晓斐等也参与了本书部分内容的研究工作,周茗蕙同时承担了本书图表的修改和文字的校对工作,作者在此一并对他们的大力支持和热诚帮忙表示衷心的感谢!感谢本书所引用的文献资料和图片的作者!

由于作者的水平有限,书中难免有不足之处,作者热切希望广大读者和同行专家予以斧正指导!

丁 静 魏小兰 彭 强 杨建平

2012年12月于广州

主要符号表

符号	名称	单位
A	亥姆霍兹自由能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
A_{m}	混合亥姆霍兹自由能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\Delta A_{\text{m}}^{\text{E}}$	过剩亥姆霍兹自由能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
ΔA_{ij}^{E}	ij 组分过剩混合亥姆霍兹自由能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
C_p	定压比热容	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
C_V	定容比热容	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\Delta C_{p(\text{A})}$	组分 A 固液态的热容差	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
d_{IX}	阴阳离子半径之和	nm
D	阴阳离子间距	nm
E	溶液中原子对的生成能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
ΔE	相对能量	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
F	自由度	
G	吉布斯自由能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
G_{m}	摩尔吉布斯自由能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
ΔG^{E}	过剩混合吉布斯自由能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$G_{\text{r,m}}$	偏摩尔吉布斯自由能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
G_{m}^{E}	摩尔过剩自由能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
G_i^*	理想摩尔过剩自由能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
ΔG_{ij}^{E}	ij 组分过剩混合吉布斯自由能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\Delta G^{\ominus}$	标准反应吉布斯自由能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\Delta_{\text{f}} G_{\text{m}}^{\ominus}(T)$	标准摩尔生成吉布斯自由能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\Delta_{\text{r}} G_{\text{m}}^{\ominus}(T)$	标准摩尔反应吉布斯自由能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
g_i	无量纲的微扰参数	
H	焓	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
ΔH_{f}	熔化热	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
$\Delta_{\text{mix}} H$	混合焓	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\Delta H_{\text{f}(\text{A})}$	A 组分熔化焓	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
m	质量	kg
N_{A}	阿伏伽德罗常量	
r	阴、阳离子中心间的距离, 离子半径	nm

R	共价金属半径;金属元素共价半径;离子间的距离	nm
r_{O}	氧的共价单键半径	nm
S	熵	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
S^{E}	过剩熵	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
ΔS^{E}	过剩混合熵	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
T	温度	K
T_{f}	熔点	K
T_{tr}	转变温度	K
$u(r)$	对势	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
U	离子对势能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
U_{i}^{l}	准晶格库仑能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
U_{m}	混合物势能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
V	体积	m^{-3}
Z_{-}, Z_{+}	阴、阳离子电荷数	
Z	有效核电荷数,位形积分	
Z^{*}	中心原子有效电荷	
β	线膨胀系数	K^{-1}
γ	体膨胀系数	K^{-1}
r_{-}, r_{+}	阴、阳离子半径	nm
γ_i	各组分的活度系数	
κ	玻尔兹曼(Boltzmann)常量	
λ	导热系数	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
λ_{ij}	相互作用系数	
ρ	密度	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
μ	黏度	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\mu_{\text{aa}}, \mu_{\text{aa}}', \mu_{\text{aa}}''$	离子对势	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
μ_i^{E}	i 组分过剩化学势	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
ν_{l}	液体材料的比容	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
ν	运动黏度	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
ϕ	相数	
φ'	阳离子和氧之间的相互作用能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
α	热扩散系数	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

目 录

《21 世纪新能源丛书》序

前言

主要符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 传热蓄热材料分类	1
1.1.1 按蓄热材料化学组成分类	1
1.1.2 按蓄热方式分类	2
1.1.3 按蓄热温度范围分类	3
1.2 中高温传热蓄热材料的基本属性	3
1.2.1 熔点	3
1.2.2 熔化热	3
1.2.3 熔化时的体积变化	3
1.2.4 比热容	4
1.2.5 密度	4
1.2.6 黏度	4
1.2.7 导热系数	4
1.2.8 热膨胀系数	5
1.2.9 凝固点	5
1.2.10 劣化温度	5
1.2.11 工作温度范围	5
1.3 常见中高温传热蓄热材料	5
1.3.1 导热油	6
1.3.2 液态金属	7
1.3.3 熔融盐	8
1.3.4 离子液体	12
1.4 相图计算模型	13
参考文献	14
第 2 章 相图计算的热力学模型	16
2.1 相图概述	16
2.1.1 相图与相律	16
2.1.2 相图表示方法	17

2.1.3 相图的实验验证方法	18
2.2 相图计算	20
2.2.1 相图计算的基本原理和方法	21
2.2.2 熔盐体系的热力学模型	22
2.2.3 过剩摩尔吉布斯自由能的计算方法	23
2.3 相加三元熔盐体系的热力学模型	24
2.4 交互三元熔盐体系的热力学模型	27
2.5 交互四元熔盐体系的热力学模型	28
参考文献	30
第3章 硝酸熔盐的计算相图	33
3.1 二元硝酸熔盐体系的计算相图	33
3.1.1 计算方法	33
3.1.2 基础数据	34
3.1.3 结果分析	35
3.2 交互三元硝酸熔盐体系的计算相图	44
3.2.1 计算方法	44
3.2.2 结果分析	48
3.3 相加三元硝酸熔盐体系的计算相图	53
3.3.1 计算方法	53
3.3.2 结果分析	56
3.4 交互四元硝酸熔盐体系的计算相图	57
3.4.1 体系组成	57
3.4.2 计算方法	58
3.4.3 结果分析	62
参考文献	65
第4章 熔盐高温性能研究方法	68
4.1 高温热物性测定方法	68
4.1.1 熔点和熔化热	68
4.1.2 比热容	75
4.1.3 凝固点	78
4.1.4 密度	80
4.1.5 黏度	82
4.1.6 导热系数	85
4.1.7 膨胀系数	89
4.2 高温热稳定性研究方法	92
4.2.1 高温静态工况下热稳定性	92

4.2.2 高温动态工况下热稳定性	97
4.3 高温腐蚀性研究方法	98
4.3.1 腐蚀层宏观检查	99
4.3.2 腐蚀前后质量和尺寸的变化	100
4.3.3 腐蚀层物相分析	101
4.3.4 腐蚀层厚度、微观形貌及微区元素分析	101
4.4 熔盐使用过程中对环境影响的研究方法	102
4.4.1 NO _x 排放监测	102
4.4.2 硝酸熔盐在土壤中迁移预测	102
参考文献	103
第5章 硝酸熔盐的制备及性能	105
5.1 硝酸盐的基本性质	105
5.1.1 硝酸盐的基本化学性质	105
5.1.2 硝酸盐的基本物理性质	106
5.2 硝酸熔盐基础组分的筛选原则	109
5.2.1 硝酸盐的稳定性	109
5.2.2 硝酸盐的熔点	110
5.2.3 硝酸盐的易得性、成本和安全性	111
5.2.4 硝酸盐的分解温度	111
5.2.5 硝酸盐的其他热物理性质	112
5.3 混合硝酸熔盐的分类	113
5.3.1 二元和三元硝酸熔盐	113
5.3.2 常用硝酸熔盐及其热物性	114
5.4 多元硝酸熔盐的制备及其高温热物性	115
5.4.1 多元硝酸熔盐的制备	115
5.4.2 熔盐 SYSU-N1 的热物性测定	117
5.5 熔盐 SYSU-N1 的高温热稳定性	122
5.5.1 高温静态工况下的热稳定性	122
5.5.2 动态工况下的热稳定性	123
5.5.3 大容器量熔盐长期热稳定性	125
5.6 熔盐 SYSU-N1 的高温腐蚀性	127
5.6.1 熔盐回路系统常用金属材料	127
5.6.2 高温腐蚀后不锈钢材料的外观变化	127
5.6.3 长期高温腐蚀后不锈钢材料的质量变化	128
5.6.4 不锈钢在熔盐 SYSU-N1 中的腐蚀机理	129
5.7 其他多元硝酸熔盐	129

5.7.1	相加四元硝酸熔盐的制备	130
5.7.2	熔盐 SYSU-N2 加热过程的物态变化	130
5.7.3	熔盐 SYSU-N2 的高温热稳定性	132
5.7.4	熔盐 SYSU-N2 的高温腐蚀性	134
	参考文献	136
第 6 章	碳酸熔盐的制备及性能	138
6.1	碳酸盐的基本性质	138
6.1.1	碳酸盐的基本化学性质	138
6.1.2	碳酸盐的基本物理性质	140
6.2	碳酸熔盐基础组分的筛选原则	141
6.2.1	碳酸盐的热稳定性和分解温度	141
6.2.2	碳酸盐的易得性、成本和安全性	142
6.2.3	碳酸盐的其他热物理性质	142
6.3	混合碳酸熔盐的分类	142
6.4	交互三元碳酸熔盐的制备及性能	143
6.4.1	交互三元碳酸熔盐的制备	143
6.4.2	熔盐 SYSU-C1 的热物性	143
6.4.3	熔盐 SYSU-C1 的高温热稳定性	146
6.4.4	熔盐 SYSU-C1 的高温腐蚀性	149
6.5	相加三元碳酸熔盐的制备及性能	151
6.5.1	相加三元碳酸熔盐的制备	151
6.5.2	熔盐 SYSU-C2 的热物性	152
6.5.3	熔盐 SYSU-C2 的高温热稳定性	154
6.5.4	大容器量熔盐长期热稳定性	157
6.5.5	熔盐 SYSU-C2 的高温腐蚀性	158
	参考文献	160
第 7 章	氯化物熔盐的制备及性能	161
7.1	氯化物的基本性质	161
7.1.1	氯化物的基本化学性质	161
7.1.2	氯化物的基本物理性质	163
7.2	氯化物熔盐基础组分的筛选原则	164
7.2.1	氯化物的热稳定性	164
7.2.2	氯化物的特点	165
7.2.3	氯化物的其他热物理性质	165
7.3	混合氯化物熔盐的分类	165
7.4	二元氯化物熔盐的制备及其高温热物性	166

7.4.1 二元氯化物熔盐的制备	166
7.4.2 熔盐 SYSU-C3 的热物性	168
7.5 熔盐 SYSU-C3 的高温热稳定性	170
7.5.1 高温静态工况下的热稳定性	170
7.5.2 高温动态工况下的热稳定性	171
7.6 熔盐 SYSU-C3 的高温腐蚀性	173
7.6.1 高温腐蚀后不锈钢材料的质量变化	173
7.6.2 腐蚀层微观形貌和组成	175
参考文献	177
第 8 章 硝酸熔盐热物性计算	179
8.1 混合规则	179
8.2 热物性计算	179
8.2.1 黏度	179
8.2.2 导热系数	182
8.2.3 比热容	185
参考文献	188
第 9 章 硝酸熔盐材料高温热稳定性机理	192
9.1 热稳定性的离子极化和参数分析	192
9.1.1 离子极化的定性分析	192
9.1.2 离子参数的定量分析	193
9.2 热稳定性的吉布斯自由能判据	196
9.2.1 所涉化学反应	196
9.2.2 反应发生判据	197
9.2.3 反应的标准吉布斯自由能	198
9.2.4 反应的吉布斯自由能	200
9.3 熔盐劣化速率	205
9.3.1 熔盐劣化实验数据分析	205
9.3.2 熔盐劣化速率方程	206
9.4 熔盐劣化的反应路径计算	206
9.4.1 NO_3^- 、 NO_2^- 、 O_2 结构参数优化	207
9.4.2 反应路径的确认	211
参考文献	213
第 10 章 硝酸熔盐材料的环境效应	215
10.1 氮污染的环境监测和排放标准	215
10.1.1 水体中氮污染物监测标准	215
10.1.2 大气 NO_x 污染物排放标准	216

10.2	硝酸盐和 NO_x 污染及其危害	217
10.2.1	水体和土壤中硝态氮的来源、污染程度和主要危害	217
10.2.2	大气中 NO_x 的主要来源、污染程度和危害	219
10.3	硝酸盐和 NO_x 污染的治理	220
10.3.1	水体和土壤中硝酸盐污染的治理	220
10.3.2	大气中 NO_x 污染的治理	224
10.4	硝酸熔盐高温工况下 NO_x 排放的监测及控制	226
10.4.1	熔盐升温过程 NO_x 排放的在线监测	226
10.4.2	熔盐恒温过程 NO_x 累积排放监测	232
10.4.3	熔盐 NO_x 排放的控制	234
10.5	高浓度硝酸盐在土壤中的迁移特性	236
	参考文献	238
第 11 章	熔盐材料使用中的若干问题	240
11.1	熔盐凝结与快速解凝	240
11.1.1	防止熔盐凝结的措施	240
11.1.2	熔盐管道快速解凝方法	244
11.2	硝酸熔盐材料的劣化与更新	245
11.2.1	熔盐劣化	245
11.2.2	熔盐再生	246
11.3	失效硝酸熔盐的再生循环利用	247
	参考文献	247
第 12 章	熔盐材料在能量转换与储存中的应用	249
12.1	太阳能规模化热利用技术中的应用	249
12.1.1	太阳能热发电	249
12.1.2	太阳能制氢	251
12.1.3	太阳能热化学储能	252
12.1.4	空间太阳能热发电	253
12.2	能量转换与储存中的应用	255
12.2.1	作为蓄热材料在工业余热回收中的应用	255
12.2.2	作为冷却剂或燃料在核能中的应用	256
12.2.3	作为冷却剂在淬火加工中的应用	258
	参考文献	258
	附录	260
	索引	275