

“十二五”国家重点图书出版规划项目

21世纪新能源丛书

中高温蓄热技术及应用

杨晓西 丁 静 等 著



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

中高温蓄热技术及应用

杨晓西 丁 静 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

世界经济的快速发展需要更多的能源,而化石能源的短缺促使世界各国将开发可再生能源作为战略性新兴产业置于优先发展的地位。储能作为能源利用的重要环节,对工业节能和可再生能源利用具有特别重要的作用。规模化可再生能源热利用是未来我国能源的发展重点,但由于可再生能源具有间歇性和不能稳定供应的缺陷,不能满足工业化大规模连续供能的要求,而工业用能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。一次能源利用率大大低于先进国家,主要原因之一是间歇式高品质余热没有得到有效利用,因此必须发展高效蓄热技术,以提高能源利用效率。本书从可再生能源规模化利用和工业节能技术领域中选择中高温蓄热技术作为基础研究的工程背景,结合本书合著者及研究团队多年从事太阳能热利用、传递强化与节能技术研究的实践整理而成。

本书的编写对于工业生产过程以及可再生能源和新能源利用领域,例如化工、冶金、热动、核工业等领域热能储存与转换技术的工业化应用,具有较好的指导意义和实用价值,可供从事能源利用领域的科研和工程技术人员、高等学校的教师和研究生、本科生作为专业参考资料或教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

中高温蓄热技术及应用/杨晓西等著. —北京:科学出版社,2014.6

(21世纪新能源丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-040848-8

I. ①中… II. ①杨… III. ①蓄热 IV. ①TK11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 116905 号

责任编辑:钱 俊 周 涵 / 责任校对:邹慧卿

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

*

2014 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 6 月第一次印刷 印张:21 3/4

字数:407 000

定价:128.00 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

本书作者名单

杨晓西	东莞理工学院
丁 静	中山大学
尹辉斌	东莞理工学院
左远志	东莞理工学院
杨小平	东莞理工学院
杜 娟	丽水学院
秦贯丰	东莞理工学院
丁 梅	东莞理工学院

《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

能源在国民经济中具有特别重要的战略地位。工业革命以来,世界能源消费急剧增长,煤炭、石油、天然气等化石能源资源消耗迅速,生态环境不断恶化,特别是温室气体排放导致日益严峻的全球气候变化,人类社会的可持续发展受到严重威胁。倡导低碳经济运行,提高资源利用率,保护生态环境,共同推进人类社会和谐可持续发展,已成为全社会的共识和责任。为了实现低碳发展、解决能源问题,除大力开展节能、科学用能和化石燃料的清洁高效利用等研究外,还必须加快可再生能源的开发和利用。

储能作为能源利用的重要环节,对工业节能和可再生能源利用具有特别重要的作用。规模化可再生能源利用已成为世界各国的能源国策,德国立法计划到2050年可再生能源要占能源总消耗的40%,我国未来能源的发展重点也是规模化可再生能源的开发和利用。但由于可再生能源间歇性和不能稳定供应的缺陷,能源的供应和需求之间,往往存在数量上、形态上和空间上的差异,不能满足工业化大规模连续供能的要求;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,能源利用率大大低于先进国家,主要原因之一是间歇式高品质余热没有得到有效利用,因此必须发展高效蓄热技术。利用蓄热技术,可以有效地储存分散的、间歇性的能量,并可根据不同应用场合的使用温度和能量品位,灵活采用相应的蓄热材料和蓄热方法,在需要时再进行集中供能,从而提高能量品位以及能源利用效率。高效蓄热技术的开发和应用,正是遵循了吴仲华先生所提倡的“温度对口、梯级利用”理论以及徐建中院士的科学用能论点,也符合“绿色、低碳”科技发展的要求。

对众多的热转换利用方式而言,采用高温转换,尽可能提高转换与输出热能的温度,利用高温蓄热进行稳定的能量供应,是提高利用效率的根本途径,也是可再生能源低成本、规模化、连续利用的关键技术之一。中高温蓄热技术的发展思路是开发高蓄热密度、高使用温度、高蓄/放热速率、低成本、环境友好的蓄热介质材料,研究过程可控的蓄热方法及系统。由于熔融盐具有热容量大、使用温度高、低蒸汽压、低黏度、化学稳定性好等一系列优点,兼具蓄热与传热功能,将是中高温热利用及蓄热技术的发展重点。本书的撰写正是结合了能源学科的发展动向,总结了作者及研究团队多年从事太阳能热利用、传递强化与节能技术研究的实践整理而成,可为蓄热系统的工程设计和应用提供一定的参考。

全书共分为7章。第1章概述了常见的中高温蓄热方式以及传热蓄热材料,

重点介绍了熔融盐传热蓄热材料及其应用;以单罐斜温层蓄热方式为代表,建立了蓄热系统的评价准则。

第2章阐述了熔融盐显热蓄热过程传热特性,建立了熔融盐球形填充床显热蓄热系统的理论计算模型,并通过数值分析和实验研究确定影响蓄热性能的主要影响参数。

第3章介绍了相变蓄热基本原理与传热分析,建立了熔融盐球形填充床潜热蓄热的传热模型,采用数值计算方法分析相变蓄热过程中的传热特性,对蓄热系统进行整体性能测试。

第4章介绍了熔融盐中高温斜温层混合蓄热方法及系统。基于多孔介质局部热平衡理论,建立了多孔介质中熔融盐单相流体斜温层蓄热的局部热平衡数值模型,阐述了熔融盐、多孔介质孔隙结构以及工况参数对多孔介质中熔融盐传热与流动的影响规律;针对蓄热过程建立熔融盐传热-蓄热实验装置,开展了熔融盐单相流体斜温层蓄热特性、多孔介质中熔融盐单相流体斜温层蓄热特性以及熔融盐壳管式相变换热器传热蓄热特性的实验研究,分析了斜温层蓄热单罐的轴向温度分布与相变换热器壳侧的温度变化。

第5章阐述了 CO_2/CH_4 重整热化学储能过程催化反应及传输特性,探讨了 CO_2/CH_4 重整热化学储能过程的反应原理,着重分析由太阳能向稳定燃烧化学能转化的过程,通过研究 CO_2/CH_4 重整热化学储能过程的反应工况,制备重整储能过程催化剂并探讨了影响催化稳定活性的相关因素及机理;以碳酸熔融盐高温传热-蓄热平台为原型,构建模拟太阳能塔式热发电站的 CO_2/CH_4 重整储能的管壳式重整反应器的数值模型;建立了有序堆积填充床反应器数值模型,通过探讨反应器内部的热质传递规律,分析影响反应器管内热质传递规律的因素。

第6章介绍了蓄热系统设计、测试与控制,包括熔融盐中高温蓄热系统的构成、回路连接、加热伴热、故障工况的预防与处理等工程问题,总结了适用于中高温场合的温度、压力、流量、液位等参数测试与控制技术。

第7章阐述了中高温蓄热技术在可再生能源领域(重点是太阳能热发电)、工业过程的余热利用中的应用,综述了新型的中高温蓄热技术、理念及其发展趋势。

本书的第1章由杨晓西、秦贯丰撰写,第2、3章由杨小平撰写,第4章由左远志撰写,第5章由杜娟撰写,第6章由丁梅、秦贯丰撰写,第7章由丁静、尹辉斌撰写,全书最后由杨晓西、丁静统合定稿,尹辉斌协助完成全书的校正工作。

作者及研究团队在中高温蓄热技术方面的研究工作,多年来得到了国家科技部、国家自然科学基金委员会等有关部门的大力支持,先后获得国家973计划课题(2010CB227306、2010CB227103、2012CB720404)、国家863计划课题(SS2013AA050503)、国家自然科学基金优先资助领域重点项目(61236008)、国家自然科学基金项目(51106187、51306039、51176036)的资助。本书的研究成果还得到了中国

科学院工程热物理研究所蔡睿贤院士、徐建中院士、金红光院士以及国内高校知名教授、专家、学者的大力支持,在此表示衷心的感谢。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,书中难免有不足和不当之处,恳请广大读者和同行专家予以斧正指导。

杨晓西 丁 静

2013 年 12 月于广州

主要符号表

符 号	名 称	单 位
a	热扩散率	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
a_{sf}	面积体积比	m^{-1}
A	面积	m^2
c	比热容	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
c_p	定压比热容	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
d	直径	m
Ex	烟	J
g	重力加速度	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
G	自由能	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
h	对流换热表面传热系数	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
	流体的比焓	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
h_{sf}	两相间面积对流换热系数	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
h_v	两相间体积对流换热系数	$\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
H	热焓	J
k	传热系数	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
K	渗透率	
l	特征尺寸	m
l'	入口段长度	m
L	长度	m
m	质量	kg
$\dot{m}$	质量流量	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
p	压强	Pa
q	热流密度	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
Q	热量	J
r	径向坐标	m
R	理想气体常数	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
t	温度	$^{\circ}\text{C}$
	时间	s
T	热力学温度	K
$\bar{T}$	平均温度	K
ΔT	温差	K

S	熵	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
S_{CO}	一氧化碳的选择性	%
S_{H_2}	氢气的选择性	%
u	速度	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
u_{D}	达西速度	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
u_{P}	固有平均速度	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v	速度	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
V	体积	m^3
$\mathbf{V}$	速度矢量	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
w	质量流量	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
x	轴向高度位置	m
x_{CH_4}	甲烷的转化率	%
x_{CO_2}	二氧化碳的转化率	%
y_{C}	理论积炭量	
$y_{\text{CO}_2 \text{ in}}$	进气口二氧化碳的摩尔分率	
$y_{\text{CO}_2 \text{ out}}$	出气口二氧化碳的摩尔分率	
$y_{\text{CH}_4 \text{ in}}$	进气口甲烷的摩尔分率	
$y_{\text{CH}_4 \text{ out}}$	出气口甲烷的摩尔分率	
y_{CO}	出气口一氧化碳的摩尔分率	
y_{H_2}	出气口氢气的摩尔分率	
β	液相率	
τ	时间	s
δ	厚度	m
δ_{t}	斜温层厚度	m
Φ	直径	m
	热损失	J
θ	误差	
η	效率	
η_{ex}	炯效率	
η_{th}	热效率	
ε	孔隙率/空隙率	
λ	导热系数	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\bar{\lambda}$	平均导热系数	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
λ_{d}	热弥散导热系数	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
ν	运动黏度	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
ρ	密度	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
μ	动力黏度	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
Bi	毕渥数 hl/λ (λ 为固体的导热系数)	

Nu	努塞尔数 hl/λ (λ 为液体的导热系数)
Pr	普朗特数 ν/a
Re	雷诺数 $\rho u d/\mu$
下标	
f	流体
l	液体
in	进口
ini	初始
i	里面
m	平均
o	外面
s	固体

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 蓄热技术概述	1
1.1.1 蓄热方式	2
1.1.2 传热蓄热材料	5
1.2 蓄热性能的评价方法	13
1.2.1 蓄热系统的蓄热量	13
1.2.2 蓄热系统的熵产	14
1.2.3 基于斜温层厚度定义的蓄热效率	15
1.2.4 斜温层稳定性判据	15
参考文献	21
第 2 章 熔融盐显热蓄热过程传热特性	25
2.1 基本原理	25
2.2 熔融盐球形填充床显热蓄热过程数值分析	27
2.2.1 蓄热模型	27
2.2.2 蓄热材料密度的影响	29
2.2.3 蓄热材料导热系数的影响	31
2.2.4 空隙率对蓄热性能的影响	34
2.2.5 颗粒直径对蓄热性能的影响	37
2.2.6 熔盐密度对蓄热性能的影响	39
2.2.7 熔盐进口流速对蓄热性能的影响	42
2.2.8 熔盐进口温度对蓄热性能的影响	45
2.3 熔融盐球形填充床显热蓄热过程实验分析	47
2.3.1 实验装置	47
2.3.2 蓄热罐预热温度	49
2.3.3 熔盐的温度分布	50
参考文献	52
第 3 章 熔融盐相变蓄热过程流动与传递规律	54

3.1	基本原理	54
3.2	相变蓄热传热分析	58
3.2.1	精确解分析	59
3.2.2	数值求解分析	61
3.2.3	相变蓄热过程传热强化理论与途径	63
3.3	熔融盐球形填充床潜热蓄热过程数值模拟	64
3.3.1	蓄热模型	64
3.3.2	相变蓄热罐的蓄热性能	68
3.3.3	初始温度对蓄热性能的影响	69
3.3.4	导热油进口温度对蓄热性能的影响	71
3.3.5	导热油进口流速的影响	73
3.3.6	不同导热油比热的影响	75
3.3.7	相变球颗粒直径的影响	77
3.3.8	熔融盐相变材料潜热的影响	78
3.4	熔融盐球形填充床相变蓄热实验研究	80
3.4.1	熔盐球形填充床相变蓄热罐	80
3.4.2	相变蓄热罐预热温度	81
3.4.3	熔盐的进口温度	81
3.4.4	相变温度的影响	81
3.4.5	熔盐温度变化	82
3.4.6	球内相变材料自然冷却降温	83
	参考文献	84
第4章	熔融盐高温斜温层混合蓄热的热过程特性	88
4.1	熔融盐高温斜温层混合蓄热方法	88
4.1.1	系统组成	88
4.1.2	工作原理	90
4.2	熔融盐单相流体斜温层蓄热的数值模拟	92
4.2.1	计算模型	92
4.2.2	控制方程	95
4.2.3	数值计算方法	95
4.2.4	瞬态传热与流动特性	96
4.2.5	斜温层厚度随熔融盐流体进口速度的变化	99
4.2.6	斜温层厚度随长径比的变化	99
4.3	多孔介质中熔融盐流体斜温层蓄热的热特性	100
4.3.1	局部热平衡模型与局部非热平衡模型的适用性	100

4.3.2	多孔介质局部热平衡模型	101
4.3.3	多孔介质特性参数对传热与流动性能的影响	103
4.3.4	瞬态传热与流动特性	108
4.3.5	操作参数对熔融盐高温斜温层蓄热性能的影响	109
4.4	基于局部非热平衡的熔融盐斜温层蓄热的数值模拟	113
4.4.1	计算模型	113
4.4.2	数值计算方法	114
4.4.3	局部非热平衡模型的模拟结果	114
4.5	高温熔融盐壳管式相变换热器的传热特性	118
4.5.1	研究装置	118
4.5.2	数值模型	119
4.5.3	数值计算方法	119
4.5.4	自然对流对液相率分布的影响	120
4.5.5	液相率随熔化时间的变化	120
4.5.6	管内流体的流动方向对液相率的影响	122
4.5.7	壳管式相变换热器完全熔化的判据	122
4.6	高温熔融盐蓄热器的实验测试	123
4.6.1	蓄热单罐实验件的结构设计	123
4.6.2	实验研究内容与方法	126
4.6.3	熔融盐单相流体斜温层蓄热单罐的蓄热特性	127
4.6.4	多孔介质中熔融盐流体斜温层蓄热单罐的蓄热特性	129
4.6.5	熔融盐壳管式相变换热器的蓄热特性	131
	参考文献	134
第5章	甲烷重整热化学储能过程特性	137
5.1	热化学储能技术	137
5.1.1	热化学储能体系	137
5.1.2	常见热化学反应储能体系	138
5.1.3	甲烷重整体系	140
5.2	二氧化碳甲烷重整反应热力学分析	143
5.3	铂-钨双金属催化剂制备及稳定性和积炭分析	145
5.3.1	二氧化碳甲烷重整催化剂	145
5.3.2	催化剂制备	147
5.3.3	催化剂性能评价	148
5.3.4	催化剂的性能和稳定性	149
5.3.5	催化剂稳定性的机理分析	153

5.3.6	表面积炭的理论分析	158
5.3.7	表面积炭实验分析	160
5.4	管壳式催化重整反应器的数值模拟	165
5.4.1	催化重整反应的数值模拟	165
5.4.2	数理模型及数值方法	166
5.4.3	化学动力学模型	169
5.4.4	动力学结果与讨论	170
5.4.5	模型验证	172
5.4.6	反应器结构对 CO_2/CH_4 催化重整反应的影响	176
5.4.7	重整反应条件对 CO_2/CH_4 催化重整反应的影响	178
5.5	管内有序堆积填充床重整反应的数值模拟	183
5.5.1	数理模型及数值方法	184
5.5.2	模型验证	187
5.5.3	模拟结果与讨论	190
	参考文献	197
第 6 章	蓄热系统设计与控制	203
6.1	熔融盐蓄热系统设计	203
6.1.1	蓄热系统构成	203
6.1.2	熔盐流体传递回路与吸热器、蓄热容器之间的连接	205
6.1.3	传热蓄热回路的加热和保温	205
6.1.4	熔盐长轴泵	219
6.1.5	故障工况的研究与预防	221
6.2	蓄热系统测试与控制	223
6.2.1	测试与控制环节	224
6.2.2	温度测试	226
6.2.3	压力测试	244
6.2.4	流量测量	254
6.2.5	液位测量	262
6.2.6	流量控制(高温阀门)	270
6.2.7	蓄热系统的自动控制	281
6.2.8	测试和控制案例	285
	参考文献	287
第 7 章	中高温蓄热技术的应用	289
7.1	可再生能源领域	289
7.1.1	高温显热蓄热系统	292