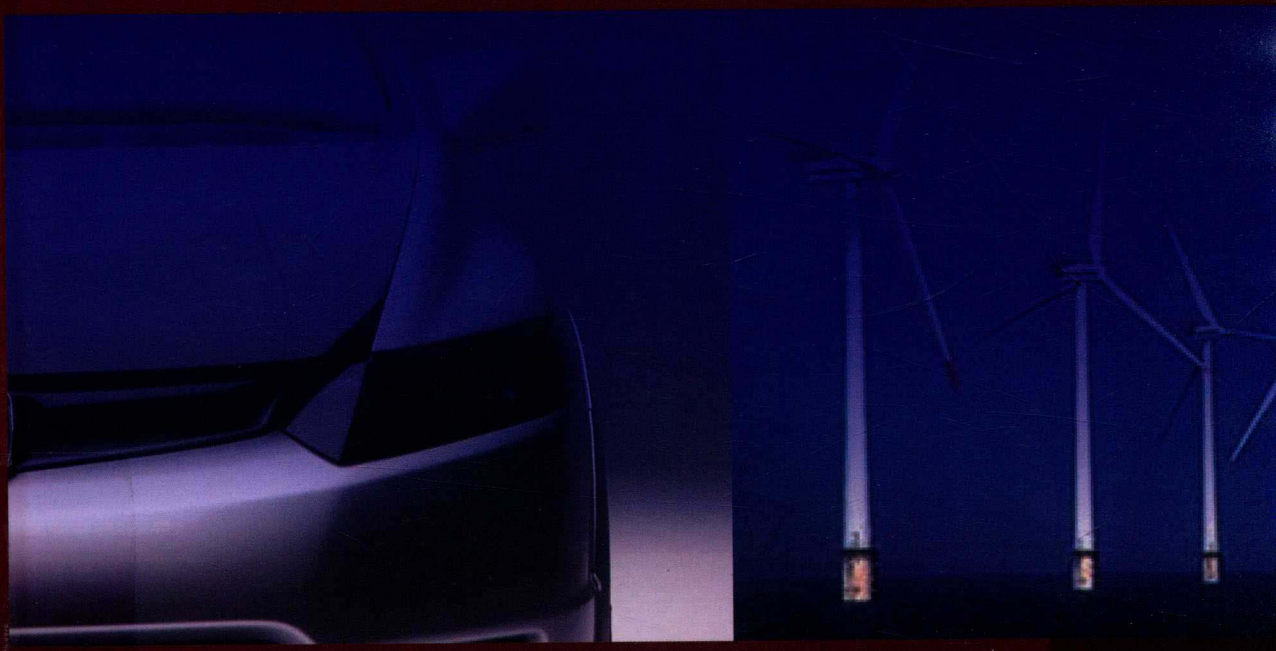
储能技术及应用

CHUNENG JISHU JI YINGYONG

中国化工学会储能工程专业委员会　组织编写
丁玉龙　来小康　陈海生　主　编



化学工业出版社

储能技术及应用

CHUNENG JISHU JI YINGYONG

中国化工学会储能工程专业委员会　组织编写
丁玉龙　来小康　陈海生　主　编

化学工业出版社
·北京·

本书重点介绍了各种储能技术的最新进展、应用范围、产业现状、技术经济性等，同时对储能技术在电网、交通、新能源等领域的应用进行了详尽分析。本书内容翔实丰富，涵盖了储能科学技术的主要方面，兼顾关键科学理论与实际工程应用，深入浅出地介绍了各种储能技术的工作原理和特性，力争反映我国储能领域的最新进展。

本书适合储能上下游企业和科研单位的研发与工程技术人员参考，也可作为高等院校相关专业师生的教学参考书。

图书在版编目（CIP）数据

储能技术及应用/中国化工学会储能工程专业委员会组织编写；丁玉龙，来小康，陈海生主编．—北京：化学工业出版社，2018.4

ISBN 978-7-122-12496-8

Ⅰ.①储… Ⅱ.①中… ②丁… ③来… ④陈… Ⅲ.①储能-技术-研究 Ⅳ.①TK02

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 036959 号

责任编辑：郁向丽　张　艳　　装帧设计：王晓宇

责任校对：王素芹

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号　邮政编码 100011）

印　　装：中煤（北京）印务有限公司

787mm×1092mm　1/16　印张 44¾　字数 1342 千字　2018 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686）　售后服务：010-64518899

网　　址：http://www.cip.com.cn

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定　　价：268.00 元

版权所有　违者必究

京化广临字 2018——12

天齐锂业
TIANQI LITHIUM

证券代码：002466 | 股票简称：天齐锂业

Tianqi Lithium（SZ.002466）

共创锂想

CHANGING THE WORLD WITH LITHIUM

天齐锂业是全球领先的锂产品供应商，为深圳证券交易所上市企业，业务包括锂矿资源开发、锂产品加工、锂矿贸易三大板块。产业横跨亚洲、大洋洲与南美洲，在中国四川、重庆、江苏、香港和澳大利亚、智利等地设立生产、资源基地或分支机构，客户遍及全球。

天齐锂业以前瞻的眼光，抓住发展契机，不懈追求技术革新，不断提升产品品质，以丰沛的资源储备、稳定的生产能力、强大的研发实力、领先的工艺技术，满足客户需求，给股东带来长期回报并履行社会责任。

产品展示



电池级单水氢氧化锂　工业级碳酸锂　电池级碳酸锂　锂精矿

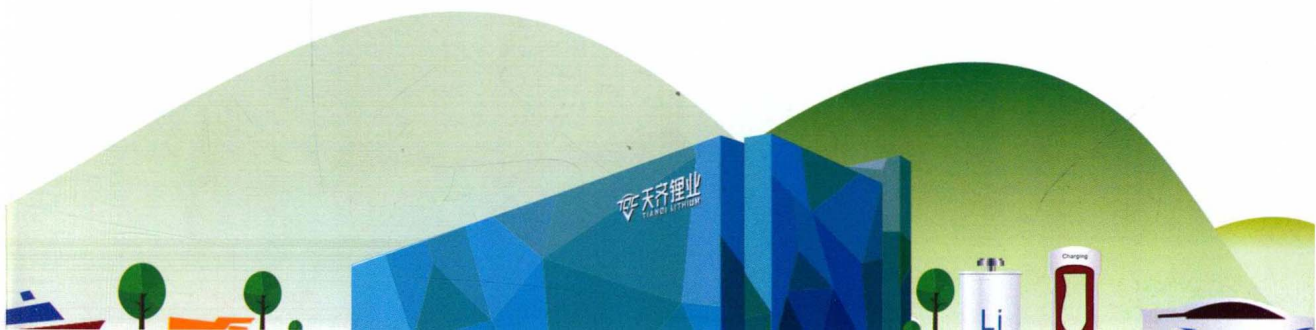
证书



天齐锂业股份有限公司

地址：中国四川省射洪县太和镇城北
中国四川省成都市高新区高朋东路10号（成都分公司）

电话：+86-28-8518 3501
官网：www.tianqilithium.com



金合能源 Jinhe Energy

全球储热专家

公司简介

南京金合能源材料有限公司（“金合能源”）是一家集高性能复合相变储热/储冷材料研发、生产和基于储热/储冷材料的单元、装置、系统产品的设计、生产、销售、服务于一体的高新技术企业。公司于2011年在千人计划（南京）化学化工研究院正式注册成立，注册资本5500万元人民币。

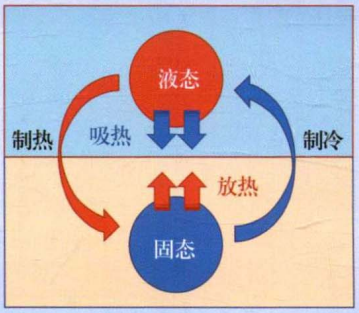
金合能源近三年申请专利20项，授权12项，获得“江苏省民营科技企业”和“江苏省科技型中小企业”称号，进入了北京新能源与可再生能源协会“减煤换煤”“煤改清洁能源”会员企业名录。同时，公司已通过ISO9001质量管理体系认证、ISO14001环境管理体系认证及ISO18001职业健康安全管理体系认证。公司自主研发的电热储能产品——蓄热式电锅炉被列为江苏省高新技术产品，并荣获国际储能创新大赛“储能创新应用典范”奖。

2016年，金合能源已完成中广核新疆阿勒泰市风电清洁供暖国家级示范项目、河北省涿州市“煤改电”等多个电热储能项目；目前，公司正建设张家口市怀来县金凤小区20万平方米、怀来县名郡新城30万平方米、长春市远达生产资料市场47万平方米、中核汇能二连浩特10万平方米等多个电热储能清洁供暖项目。

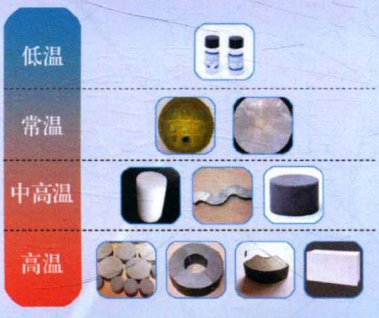
主要产品

储热/储冷材料

金合能源自主研发了系列化复合结构相变储热/储冷材料，相变温度范围可达−100～850℃，材料的有效储热密度最高达1000kJ/kg，能够满足各类热/冷能存储和利用需求。公司已经建成规模化、批量化生产复合相变材料的生产线，年产量达到数万吨。



相变过程原理（以固一液相变为例）



相变储热/储冷材料样本图

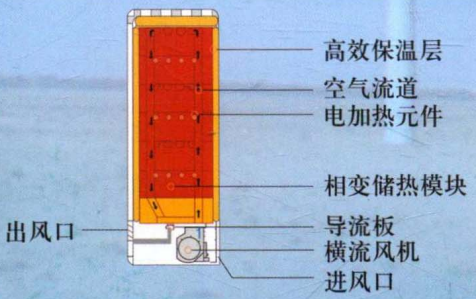
蓄热式电锅炉

通过将间歇性可再生能源或利用率较低的谷电转换成热能，并储存在复合相变储热材料中，进而连续稳定地向用户提供所需的热风、热油、蒸汽及热水。



蓄热式电暖器

利用低价谷电加热供暖，并将一部分热量存储在储热材料中，在非低谷电期间加热元件停止工作，储存的热量可继续实现稳定供暖。





我们不断创新发展高性能复合相变技术、材料与产品

始终以让**能源守衡**为使命

相变蓄冷空调系统

利用低谷电制冷并将冷量储存在相变蓄冷材料中，在用电高峰期，少开或不开制冷机，充分利用夜间储存的冷量进行供冷。



办公楼



医院



酒店



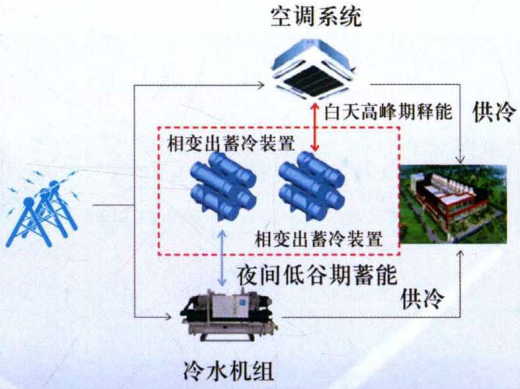
数据中心



商场



工厂



未来研究方向

在全力推动蓄热式电锅炉等成熟产品的优化迭代和积极开展相变材料蓄冷等技术示范应用的同时，金合能源密切追踪市场需求，未来将逐步完善移动储热/储冷装置、太阳能热利用系统和电动车空调系统等相变储热/储冷应用产品的开发和市场应用。



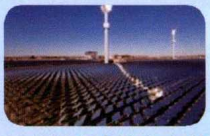
建筑物制冷



医疗制冷



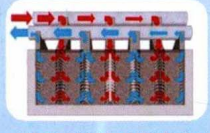
弃风电储热/冷



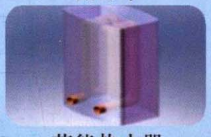
太阳能光热发电储热/冷



储冷车



热电联机组蓄热调峰系统



节能热水器



工业余热储热



移动式储热



新能源汽车的储热/冷



地址：江苏省南京市六合区宁六公路606号E栋16楼（210047）

电话：025-57795976　E-mail：info@jinhe-energy.com　网址：http://www.jinhe-energy.com

天能集团
TIANNENG GROUP

股票代码: HK00819

天能集团创立于1986年，2007年以中国动力电池第一股在香港主板成功上市(00819.HK)。31年专业专注于绿色能源领域，是一家以新能源铅炭电池、锂离子电池、储能系统解决方案、能源互联网为主,集再生铅回收、循环利用等新能源技术的研发、生产、销售为一体的实业集团。现已拥有30家国内全资子公司、3家境外公司，员工2万余名，跨浙、苏、皖、豫四省八大生产基地。



26位 全球新能源企业500强
Rank 26 Global top 500 New Energy Enterprises

29位 中国民营企业500强
Rank 29 China's top 500 Private Enterprises

1位 中国轻工业电池行业十强
Rank 1 China's top 10 Light Industrial Battery Industry

全球领先的绿色能源解决方案商
The Global Leading Green Energy Solution Provider

- **户用离网储能系统解决方案**
  HOUSEHOLD OFF-GRID ENERGY STORAGE SYSTEM SOLUTIONS
- **户用并网储能系统解决方案**
  HOUSEHOLD ON-GRID ENERGY STORAGE SYSTEM SOLUTIONS
- **户用并离网储能系统解决方案**
  HOUSEHOLD ON/OFF-GRID ENERGY STORAGE SYSTEM SOLUTIOI
- **智能微电网储能系统解决方案**
  ENERGY STORAGE SYSTEM SOLUTIONS FOR INTELLIGENT MICRO
- **复合储能系统解决方案**
  HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM SOLUTIONS



天能集团
Tianneng Battery Group Co., Ltd. (HQ)
地址：中国浙江省长兴县画溪工业功能区包桥路18号　　邮编:313100
Address:18 Baoqiao Road, Huaxi Industrial Function Zone, Zhejiang,China　　Pc : 313100
电话TEL:400-8788188/0572-6058079　　传真Fax：0572-6176988
Http://www.cn-tn.com/

BYD

Build Your Dreams

右图：美国西弗吉尼亚州

31.5MW

调频储能项目

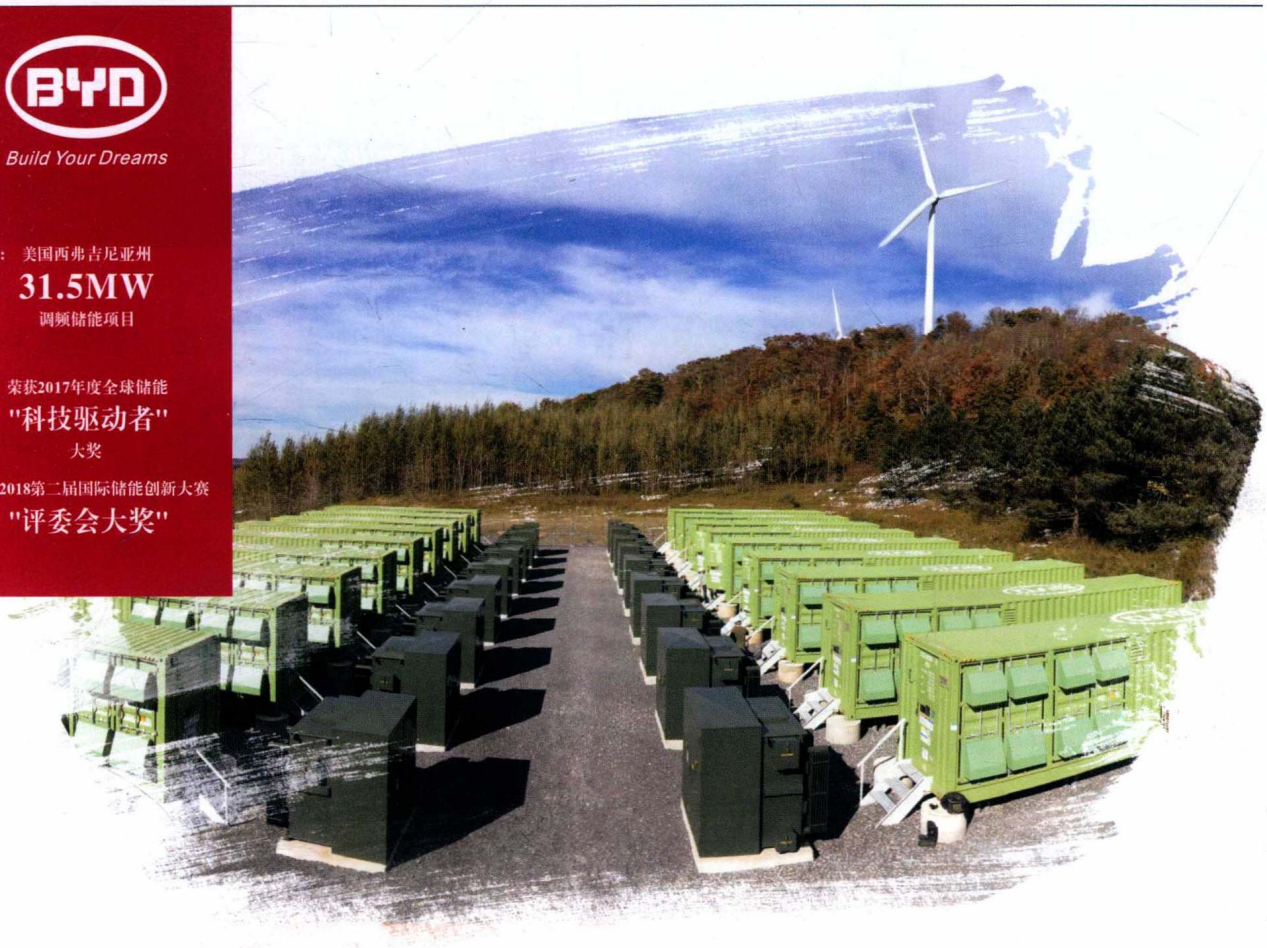
荣获2017年度全球储能

"科技驱动者"

大奖

荣获2018第二届国际储能创新大赛

"评委会大奖"



比亚迪

储能

比亚迪是全球领先的储能解决方案供应商。

储能产品已经出口至美国、德国、法国、日本、瑞士、意大利、加拿大、澳大利亚、南非、英国等多个国家和地区，为全球各大客户提供超过400MW的储能产品。

主要客户包括中国国家电网、南方电网、美国-RES、美国雪佛龙、中广核、德国Fenecon、日本A-style、英国Anesco等。

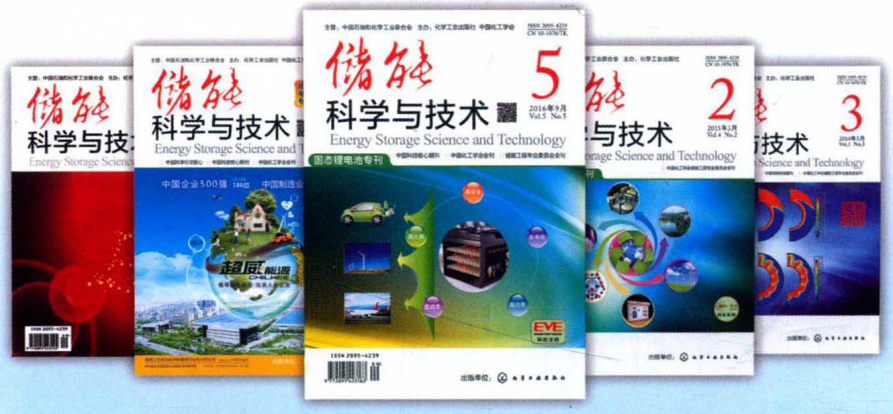
截止到目前，比亚迪储能销售量已达570MW；其中英国储能出货量超过150MW，在英国储能市场排首位！

更多了解请登陆比亚迪储能官方网站：http://www.bydenergy.com

·中国科学引文核心期刊 ·中国科技核心期刊

- 刊　　号：CN 10-1076/TK，ISSN 2095-4239
- 主管/主办：中国石油和化学工业联合会/化学工业出版社和中国化工学会
- 中国化工学会会刊/储能工程专业委员会会刊
- 邮发代号：80-732

储能领域权威的科技期刊 ·学术性 前瞻性 实用性 导向性·



主编/常务副主编

丁玉龙　黄学杰

副　主　编

陈海生　来小康　李　泓　马紫峰　阮殿波　王保国　王志峰　魏　飞　温兆银　张华民
张子峰　周伟斌

主　要　栏　目

特约评述　热点点评　研究及进展　应用技术　专家讲座　示范工程　人物访谈
产经动态　储能专利

刊　登　内　容

重点报道抽水储能、压缩空气储能、深冷储能、储热（冷）和化学储能（各类电池如铅酸电池、锂电池、液流电池、钠硫电池等）、超导储能、燃料电池、飞轮储能及超级电容器等的最新科研及技术成果、示范项目及储能业界经济动态。

国内外公开发行，标准大16开
全国各地邮局均可订阅，邮发代号80-732
国内定价48元/期、288元/年（含邮政邮资），国外定价48美元/期、288美元/年

网　　址：http://www.energystorage-journal.com
通讯地址：北京市东城区青年湖南街13号化学工业出版社《储能科学与技术》编辑部
邮政编码：100011
电　　话：010-64519601/9602/9643
E-mail：esst_edit@126.com energystorage_cip@163.com
开户银行：中国工商银行北京和平里支行
账户名称：北京进展期刊社
账　　号：0200004219200176319

《储能技术及应用》 编委会

主　任：丁玉龙　来小康

委　员（按姓名汉语拼音排序）：

陈海生　戴兴建　丁玉龙　来小康　李　泓　李永亮

刘传平　阮殿波　佟玉琦　童莉葛　王保国　王子冬

温兆银　吴玉庭　张华民　张建成　张子峰　赵长颖

本书编写人员名单

主　　编：丁玉龙　来小康　陈海生

副 主 编：李　泓　王子冬

参编人员（按姓名汉语拼音排序）：

陈　芬　陈海生　陈雪丹　丛　琳　戴兴建　丁玉龙
高　健　桂　勋　贺凤娟　胡英瑛　黄　益　黄　云
黄珍梅　金　翼　匡德志　来小康　赖勤志　李　泓
李林艳　李　楠　李先峰　李永亮　刘　涛　刘传平
刘新昊　刘永旭　鹿院卫　聂彬剑　欧腾蛟　潘智豪
彭笑东　乔志军　樵　耕　秦　伟　阮殿波　芮　琨
折晓会　宋　洁　宋鹏翔　孙佳伟　田崔钧　田立亭
佟　蕾　佟玉琦　童莉葛　王保国　王德宇　王　乐
王　倩　王松岑　王一乔　王子冬　温兆银　吴家貌
吴相伟　吴玉庭　谢春萍　刑　枫　徐玉杰　徐治国
闫　君　杨　斌　杨先锋　衣　进　于学文　杨岑玉
袁　峻　张洪章　张华民　张建成　张三佩　张盛强
张新敬　张跃强　张子峰　赵　波　赵长颖　赵　耀
郑　超　钟发平

前 言

FOREWORD

储能技术是第三次工业革命的关键技术之一，紧紧牵动着新能源的发展。储能具有消除昼夜峰谷差，实现平滑输出、调峰调频和备用容量的作用，满足了新能源发电平稳、安全接入电网的要求，可有效减少弃风、弃光现象。

我国储能技术仍处于产业化的初始阶段，尚未大规模投入应用的原因在于：一是各种储能技术繁多，储能技术路线竞相亮相，造成用户不知如何使用和选择；二是相关技术及真实性能成熟度有待提高；三是价格偏高。我国储能市场还未建立起相关产业链和成熟的商业模式。从国家政策层面而言，在储能方面的政策支持及投入仍显不足。

经济性方面，目前的成本居高不下是影响储能技术大规模发展的一个主要因素。当前大多数储能工程都是示范工程，推广难，其关键材料、制造工艺和能量转化效率也是各种技术面临的共同挑战。应用性方面，大多数储能技术在能源，特别是电力系统的应用时间短，尤其目前尚未在电网系统大规模应用。据了解，电力行业对产品可靠性要求高，传统上至少需要5年以上的实地可靠性测试和试用才能通过电力用户的最低标准，导致产品规模生产前定型周期长。目前，发展智能电网急需解决储能这一关键难题。政策性方面，专家表示，由于储能的经济价值难以估算，由政府主导的话，实施企业难免出现积极性不高等问题。因此，如何选择适用的储能技术，如何在能源，特别是电力系统中进行规模应用，如何建立行业机制，都应是考虑的核心问题。储能科学技术面临巨大挑战，抓住机遇，突破瓶颈，储能技术便能助推新能源领域突破瓶颈。

“储能技术”在1992年颁布实施的中华人民共和国学科分类与代码国家标准（GB/T 13745—1992）中被首次列为“能源科学技术”二级学科。最近的十多年来，多种储能技术，包括中高温储热技术、深冷储能、锂离子电池、压缩空气储能、飞轮储能、超级电容、钠硫电池、全钒液流电池、镍氢电池等，在全球范围内得到了长足发展，这些储能技术在使用寿命、功率和容量的规模化、运行可靠性、系统制造成本等方面已经获得了突破，有些已经具备了进入新能源、电动汽车、热力系统及电力行业应用的基础条件。在储能领域，各国都处于产业应用的初级阶段，我国与国际先进水平在一些方面差别不大，加大储能技术的研发力度有助于我国在未来的国际竞争中占据有利地位。

基于此，中国化工学会储能工程专业委员会牵头组织我国储能领域的专家和学者撰写了本书，重点介绍了各种储能技术的最新进展、应用范围、产业现状、技术经济性等，同时对储能技术在电网、交通、新能源等领域的应用进行了详尽分析。本书共21章，其中第1章为绪论。第2至第14章介绍几种主要储能技术的概念、发展历史、应用和研究现状、未来发展趋势，包括锂离子电池技术（第2章）、液流电池技术（第3章）、全钒液流电池技术（第4章）、钠电池技术（第5章）、抽水蓄能技术（第6章）、压缩空气储能技术（第7章）、低品位热和冷存储技术（第8章）、中高温储热技术（第9章）、液态空气储能技术（第10章）、镍氢电池技术（第11章）、飞轮储能技术（第12章）、电容和超级电容器储能技术（第13章）、化学热泵系统及其在储能技术中的应用（第14章）。第15至第20章概述储能技术的集成应用，包括储能技术在电力系统中的应用（第15章）、储能技术在核电系统中的应用（第16章）、储能技术在风力和光伏发电系统中的应用（第17章）、储能技术在太阳能热发电系统中的应用（第18章）、储能技术在工业余热回收中的应用（第19章）、储能技术在交通运输系统中的应用（第20章）。第21章为储能应用的经济性分析。

本书内容翔实丰富，涵盖了储能科学技术的主要方面，兼顾关键科学理论与实际工程应用，深入浅出地介绍了各种储能技术的工作原理和特性，力争反映我国储能领域的最新进展。本书适

合储能上下游企业和科研单位的研发与工程技术人员参考，也可作为高等院校相关专业师生的教学参考书。

针对本书有几点说明：(1) 本书中的每章自成一体，因而不同章节中会有少部分内容重复，这主要是为了保证选择性阅读的读者在阅读过程中的内容连贯，由于大部分储能技术仍处于发展之中，不同作者的理解不尽相同，数据有不一致的地方，书中没有对这些数据进行统一；(2) 基于本行业的国际化发展趋势和表达的需要，部分图表为英文，不再进行翻译；(3) 因图书为黑白印刷，而部分内容用彩图来诠释更好，为方便读者理解，一方面，在正文中保留相应黑白图；另一方面，读者可扫描封底二维码，直接查阅相应彩图。

本书参编者皆为储能领域一线专家、学者，详见扉页编写人员名单。感谢参与编写的全体同志！由于编者理论水平和实际经验有限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

目 录

CONTENTS

第 1 章　绪论　001

1.1　储能技术的重要性与主要功能 …… 001
1.2　储能技术的多样性 …… 001
1.3　储能技术的分类与发展程度 …… 002
1.4　储能技术应用现状和市场预测 …… 004
1.5　储能技术的研究情况 …… 004
参考文献 …… 005

第 2 章　锂离子电池技术　006

2.1　锂离子电池发展历史概述和基本原理 …… 006
2.2　锂离子电池的功率和能量应用范围 …… 008
2.3　锂离子电池关键材料发展现状 …… 010
2.3.1　正极材料 …… 010
2.3.2　负极材料 …… 013
2.3.3　电解质材料 …… 015
2.3.4　非活性材料 …… 018
2.4　能量型锂离子电池的技术发展和应用现状 …… 019
2.5　动力型锂离子电池技术发展现状 …… 020
2.6　储能型锂离子电池的发展现状 …… 022
2.7　锂离子电池的技术指标及未来发展线路图 …… 024
2.8　展望 …… 027
参考文献 …… 027

第 3 章　液流电池技术　033

3.1　液流电池的基本原理和发展历史概述 …… 033
3.1.1　液流电池的基本原理 …… 033
3.1.2　液流电池的发展历史 …… 034
3.2　几种典型的液流电池体系 …… 035
3.2.1　双液流电池体系 …… 036
3.2.2　单沉积型液流电池 …… 039
3.2.3　双沉积型液流电池 …… 039
3.2.4　金属/空气液流电池 …… 041
3.2.5　半固态双液流电池 …… 042
3.3　液流电池的效率与影响因素分析 …… 043
3.3.1　液流电池效率的定义 …… 043
3.3.2　液流电池极化曲线分析 …… 043
3.3.3　电流密度对全钒液流电池性能的影响 …… 045

3.3.4 旁路电流对全钒液流电池性能的影响 …… 046
3.4 液流电池的关键材料 …… 048
3.4.1 液流电池的电极材料 …… 048
3.4.2 液流电池的双极板材料 …… 051
3.4.3 液流电池的膜材料 …… 056
3.5 液流电池经济和技术指标及未来发展展望 …… 063
3.5.1 液流电池装备的经济性概述 …… 063
3.5.2 大规模蓄电储能技术经济性评估方法 …… 064
3.6 本章小结 …… 064
参考文献 …… 066

第4章 全钒液流电池技术 070

4.1 全钒液流电池概述 …… 070
4.2 全钒液流电池关键材料 …… 072
4.2.1 电极材料 …… 072
4.2.2 双极板 …… 078
4.2.3 电解质溶液 …… 081
4.2.4 膜材料 …… 088
4.3 全钒液流电池电堆、系统管理与控制系统 …… 098
4.3.1 电堆结构与设计 …… 098
4.3.2 全钒液流电池系统 …… 105
4.3.3 电池系统控制与管理 …… 107
4.4 全钒液流电池应用及前景分析 …… 108
4.4.1 大规模可再生能源发电并网 …… 108
4.4.2 电网削峰填谷 …… 112
4.4.3 智能微网 …… 115
4.4.4 离网供电系统 …… 117
4.5 前景与挑战 …… 119
参考文献 …… 119

第5章 钠电池技术 124

5.1 引言 …… 124
5.2 钠硫电池 …… 125
5.2.1 钠硫电池的原理与特点 …… 125
5.2.2 管型钠硫电池 …… 126
5.2.3 钠硫电池的应用 …… 134
5.2.4 新型钠硫电池的发展 …… 136
5.3 ZEBRA 电池 …… 137
5.3.1 ZEBRA 电池的结构与原理 …… 137
5.3.2 ZEBRA 电池的特性 …… 138
5.3.3 管型设计的 ZEBRA 电池 …… 139
5.3.4 平板式设计的 ZEBRA 电池 …… 143
5.3.5 ZEBRA 电池的应用 …… 143
5.4 钠-空气电池 …… 145
5.5 钠离子电池 …… 148
5.5.1 负极材料 …… 149

5.5.2 正极材料 …… 154
5.5.3 电解质 …… 159
5.5.4 水系钠离子电池 …… 160
5.5.5 钠离子电池的价格因素 …… 162
5.6 本章小结 …… 162
参考文献 …… 163

第6章 抽水蓄能技术 169

6.1 抽水蓄能技术的基本原理和发展历史概述 …… 169
6.1.1 抽水蓄能技术的基本原理 …… 169
6.1.2 抽水蓄能的功率和容量 …… 170
6.1.3 抽水蓄能电站的种类 …… 171
6.1.4 抽水蓄能技术的发展历史概述 …… 171
6.2 抽水蓄能技术的功能和能量应用范围 …… 173
6.2.1 抽水蓄能技术的运行特性 …… 173
6.2.2 抽水蓄能技术的功能 …… 174
6.2.3 抽水蓄能技术的应用场合 …… 175
6.2.4 抽水蓄能技术在核电中的应用 …… 175
6.2.5 抽水蓄能技术在风电中的应用 …… 176
6.2.6 抽水蓄能技术在水电中的应用 …… 176
6.3 抽水蓄能技术的应用现状 …… 177
6.3.1 抽水蓄能技术在日本的发展和应用 …… 177
6.3.2 抽水蓄能技术在美国的发展和应用 …… 178
6.3.3 抽水蓄能技术在欧洲的发展和应用 …… 179
6.3.4 抽水蓄能技术在中国的发展和应用 …… 180
6.4 抽水蓄能的发展方向及新技术 …… 181
6.4.1 常规抽水蓄能技术发展动向 …… 181
6.4.2 地下抽水蓄能电站的发展 …… 182
6.4.3 海水抽水蓄能电站的发展 …… 182
6.4.4 可调速抽水蓄能发电机组的发展 …… 183
6.4.5 抽水蓄能电站未来发展路线 …… 185
6.5 抽水蓄能技术的经济性 …… 186
6.5.1 抽水蓄能电站主要技术经济指标 …… 186
6.5.2 抽水蓄能电站环保效益 …… 194
6.5.3 各国抽水蓄能电站的投资、 运营、 管理模式 …… 196
6.6 本章小结 …… 199
参考文献 …… 200

第7章 压缩空气储能技术 203

7.1 概述 …… 203
7.2 技术原理与特点 …… 204
7.2.1 技术原理 …… 204
7.2.2 技术特点 …… 205
7.2.3 应用领域 …… 207
7.3 发展现状 …… 207
7.3.1 应用现状 …… 207

7.3.2 研发现状 …… 208
7.3.3 技术分类 …… 211
7.4 关键技术 …… 218
7.4.1 压缩机 …… 218
7.4.2 膨胀机 …… 219
7.4.3 储气设备 …… 220
7.4.4 燃烧室 …… 220
7.4.5 储热装置 …… 221
7.5 发展趋势 …… 222
7.5.1 新型蓄热式压缩空气储能系统 …… 223
7.5.2 超临界空气储能系统 …… 223
7.6 本章小结 …… 224
致谢 …… 224
参考文献 …… 225

第 8 章 低品位热和冷存储技术 228

8.1 低品位热和冷存储技术发展概述 …… 228
8.1.1 低品位热能现状 …… 228
8.1.2 低品位热和冷存储技术现状 …… 228
8.2 低品位热和冷存储材料 …… 229
8.2.1 热能存储方式 …… 229
8.2.2 储热材料分类及性能要求 …… 230
8.2.3 典型储热(冷)材料 …… 238
8.3 相变材料复合技术 …… 241
8.3.1 相变材料封装与成型 …… 241
8.3.2 相变材料导热强化 …… 243
8.3.3 复合材料热导率计算方法 …… 245
8.3.4 复合材料热导率计算模型 …… 246
8.3.5 复合材料储热 …… 249
8.4 储热(冷)技术中的传热问题 …… 250
8.4.1 相变材料的熔化与凝固 …… 250
8.4.2 储热系统散热削弱 …… 255
8.4.3 储热系统传热强化 …… 256
8.5 低品位热和冷存储技术应用 …… 256
8.5.1 太阳能利用 …… 256
8.5.2 建筑节能 …… 257
8.5.3 纺织工业 …… 258
8.6 低品位热和冷存储技术发展趋势 …… 258
参考文献 …… 259

第 9 章 中高温储热技术 263

9.1 中高温储热技术的基本原理和发展历史概述 …… 263
9.1.1 基本原理 …… 263
9.1.2 发展历史概述 …… 264
9.2 中高温储热技术的功率和能量应用范围 …… 269