



“十四五”时期国家重点出版物出版专项规划项目

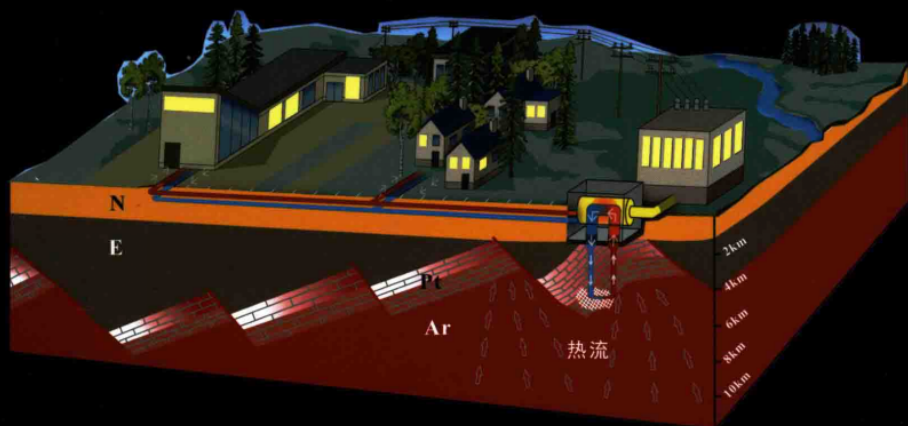
新时代地热能高效开发与利用研究丛书

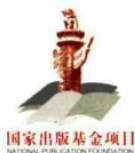
总主编 庞忠和

砂岩热储工程技术与应用

Sandstone Geothermal Reservoir Engineering Technology and Utilization

康凤新 等著





“十四五”时期国家重点出版物出版专项规划项目

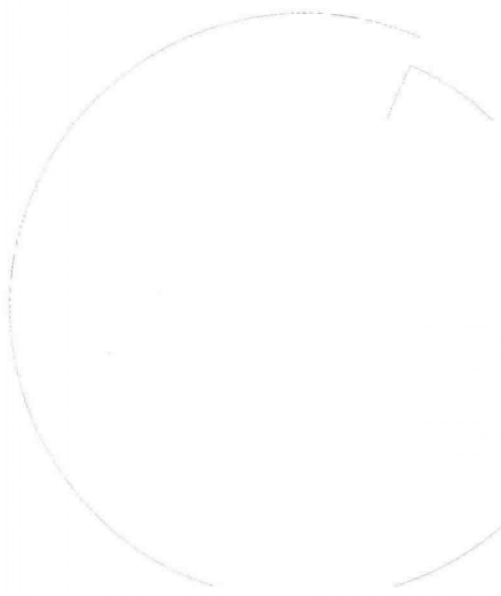
新时代地热能高效开发与利用研究丛书

总主编 庞忠和

砂岩热储工程技术与应用

**Sandstone Geothermal Reservoir Engineering Technology
and Utilization**

康凤新 等 著



 华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

图书在版编目(CIP)数据

砂岩热储工程技术与应用 / 康凤新等著. —上海:
华东理工大学出版社, 2022.7

(新时代地热能高效开发与利用研究丛书 / 庞忠和
总主编)

ISBN 978-7-5628-6488-2

I. ①砂… II. ①康… III. ①砂岩-热储-工程技术
IV. ①P314

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 008250 号

审图号: GS(2021)8306 号

内 容 提 要

本书系统总结了 20 余年来砂岩热储勘查研究和地热尾水回灌领域的创新成果,建立了地热尾水回灌和维护保养的关键技术体系,提出了地热水可持续开采量的概念、计算原则与计算步骤,并辅以若干回灌工程和地热田可持续开采量计算实例,对实现地热田“采灌均衡、可持续开发”具有较强的参考借鉴价值。本书可供地热能勘查、开发利用与回灌领域的科学研究人员和工程技术人员使用,也可作为高等院校相关专业的参考用书。

项目统筹 / 马夫娇 李佳慧

责任编辑 / 陈 涵

责任校对 / 石 曼

装帧设计 / 周伟伟

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地址:上海市梅陇路 130 号,200237

电话:021-64250306

网址:www.ecustpress.cn

邮箱:zongbianban@ecustpress.cn

印 刷 / 上海雅昌艺术印刷有限公司

开 本 / 710 mm×1000 mm 1/16

印 张 / 22.5

字 数 / 432 千字

版 次 / 2022 年 7 月第 1 版

印 次 / 2022 年 7 月第 1 次

定 价 / 228.00 元

版权所有 侵权必究

新时代地热能高效开发与利用研究丛书

编委会

顾 问

- 汪集暘 中国科学院院士
马永生 中国工程院院士
多 吉 中国工程院院士
贾承造 中国科学院院士
武 强 中国工程院院士

总主编 鹿忠和 中国科学院地质与地球物理研究所, 研究员

编 委(按姓氏笔画排序)

- 马静晨 北京市工程地质研究所, 正高级工程师
许天福 吉林大学, 教授
李宁波 北京市地质矿产勘查院, 教授级高级工程师
赵苏民 天津地热勘查开发设计院, 教授级高级工程师
查永进 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 教授级高级工程师
龚宇烈 中国科学院广州能源研究所, 研究员
康凤新 山东省地质矿产勘查开发局, 研究员
戴传山 天津大学, 研究员

砂岩热储工程技术与应用

编委会

主 编 康凤新 赵季初

编 委 周群道 杨询昌 冯守涛 白 通

黄 星 郑婷婷 高宗军 张平平

刘 帅 夏 璐 刘志涛 杨亚宾

本书为国家自然科学基金项目
(编号 42072331、U1906209)资助的成果

总序一

地热是地球的本土能源,它绿色、环保、可再生;同时地热能又是五大非碳基能源之一,对我国能源系统转型和“双碳”目标的实现具有举足轻重的作用,因此日益受到人们的重视。

据初步估算,我国浅层和中深层地热资源的开采资源量相当于 26 亿吨标准煤,在中东部沉积盆地中,中低温地下热水资源尤其丰富,适宜于直接的热利用。在可再生能源大家族里,与太阳能、风能、生物质能相比,地热能的能源利用效率最高,平均可达 73%,最具竞争性。


据有关部门统计,到 2020 年年底,我国地热清洁供暖面积已经达到 13.9 亿平方米,也就是说每个中国人平均享受地热清洁供暖面积约为 1 平方米。每年可替代标准煤 4100 万吨,减排二氧化碳 1.08 亿吨。近 20 年来,我国地热直接利用产业始终位居全球第一。

做出这样的业绩,是我国地热界几代人长期努力的结果。这里面有政策因素、体制机制因素,更重要的,就是有科技进步的因素。即将付印的“新时代地热能高效开发与利用研究丛书”,正是反映了技术上的进步和发展水平。在举国上下努力推动地热能产业高质量发展、扩大其对于实现“双碳”目标做出更大贡献的时候,本丛书的出版正是顺应了这样的需求,可谓恰逢其时。

丛书编委会主要由高等学校和科研机构的专家组成,作者来自国内主要的地

热研究代表性团队。各卷牵头的主编以“60后”领军专家为主体,代表了我国从事地热理论研究与生产实践的骨干群体,是地热能领域高水平的专家团队。丛书总主编庞忠和研究员是我国第二代地热学者的杰出代表,在国内外地热界享有广泛的影响力。

丛书的出版对于加强地热基础理论特别是实际应用研究具有重要意义。我向丛书各卷作者和编辑们表示感谢,并向广大读者推荐这套丛书,相信它会受到我国地热界的广泛认可与欢迎。

中国科学院院士 

2022年3月于北京

总序二

党的十八大以来,以习近平同志为核心的党中央高度重视地热能等清洁能源的发展,强调因地制宜开发利用地热能,加快发展有规模、有效益的地热能,为我国地热产业发展注入强大动力、开辟广阔前景。

在我国“双碳”目标引领下,大力发展地热产业,是支撑碳达峰碳中和、实现能源可持续发展的重要选择,是提高北方地区清洁取暖率、完成非化石能源利用目标的重要路径,对于调整能源结构、促进节能减排降碳、保障国家能源安全具有重要意义。当前,我国已明确将地热能作为可再生能源供暖的重要方式,加快营造有利于地热能开发利用的政策环境,可以预见我国地热能发展将迎来一个黄金时期。

我国是地热大国,地热能利用连续多年位居世界首位。伴随国民经济持续快速发展,中国石化逐步成长为中国地热行业的领军企业。早在2006年,中国石化就成立了地热专业公司,经过10多年努力,目前累计建成地热供暖能力8000万平方米、占全国中深层地热供暖面积的30%以上,每年可替代标准煤185万吨,减排二氧化碳352万吨。其中在雄安新区打造的全国首个地热供暖“无烟城”,得到国家和地方充分肯定,地热清洁供暖“雄县模式”被国际可再生能源机构(IRENA)列入全球推广项目名录。

我国地热产业的健康发展,得益于党中央、国务院的正确领导,得益于产学研

的密切协作。中国科学院地质与地球物理研究所地热资源研究中心、中国地球物理学会地热专业委员会主任庞忠和同志,多年深耕地热领域,专业造诣精深,领衔编写的“新时代地热能高效开发与利用研究丛书”,是我国首次出版的地热能系列丛书。丛书作者都是来自国内主要的地热科研教学及生产单位的地热专家,展示了我国地热理论研究与生产实践的水平。丛书站在地热全产业链的宏大视角,系统阐述地热产业技术及实际应用场景,涵盖地热资源勘查评价、热储及地面利用技术、地热项目管理等多个方面,内容翔实、论证深刻、案例丰富,集合了国内外近10年来地热产业创新技术的最新成果,其出版必将进一步促进我国地热应用基础研究和关键技术进步,推动地热产业高质量发展。

特别需要指出的是,该丛书在我国首次举办的素有“地热界奥林匹克大会”之称的世界地热大会 WGC2023 召开前夕出版,也是给大会献上的一份厚礼。

中国工程院院士



2022年3月24日于北京

丛书前言

20世纪90年代初,地源热泵技术进入我国,浅层地热能的开发利用逐步兴起,地热能产业发展开始呈现资源多元化的特点。到2000年,我国地热能直接利用总量首次超过冰岛,上升到世界第一的位置。至此,中国在21世纪之初就已成为名副其实的地热大国。

2014年,以河北雄县为代表的中深层碳酸盐岩热储开发利用取得了实质性进展。地热能清洁供暖逐步替代了燃煤供暖,服务全县城10万人口,供暖面积达450万平方米,热装机容量达200MW以上。中国地热能产业在2020年实现了中深层地热能的规模化开发利用,走进了一个新阶段。到2020年年末,我国地热清洁供暖面积已达13.9亿平方米,占全球总量的40%,排名世界第一。这相当于中国人均拥有一平方米的地热能清洁供暖,体量很大。

2020年,我国向世界承诺,要逐渐实现能源转型,力争在2060年之前实现碳中和的目标。为此,大力发展低碳清洁稳定的地热能,以及水电、核电、太阳能和风能等非碳基能源,是能源产业发展的必然选择。中国地热能开发利用进入了一个高质量、规模化快速发展的新时代。

“新时代地热能高效开发与利用研究丛书”正是在这样的大背景下应时应需地出笼的。编写这套丛书的初衷,是面向地热能开发利用产业发展,给从事地热能勘查、开发和利用实际工作的工程技术人员和项目管理人员写的。丛书基于三

横四纵的知识矩阵进行布局：在横向上包括了浅层地热能、中深层地热能和深层地热能；在纵向上，从地热勘查技术，到开采技术，再到利用技术，最后到项目管理。丛书内容实现了资源类型全覆盖和全产业链条不间断。地热尾水回灌、热储示踪、数值模拟技术，钻井、井筒换热、热储工程等新技术，以及换热器、水泵、热泵和发电机组的技术，丛书都有涉足。丛书由10卷构成，在重视逻辑性的同时，兼顾各卷的独立性。在第一卷介绍地热能的基本能源属性和我国地热能形成分布、开采条件等基本特点之后，后面各卷基本上是按照地热能勘查、开采和利用技术以及项目管理策略这样的知识阵列展开的。丛书体系力求完整全面、内容力求系统深入、技术力求新颖适用、表述力求通俗易懂。

在本丛书即将付梓之际，国家对“十四五”期间地热能的发展纲领已经明确，2023年第七届世界地热大会即将在北京召开，中国地热能产业正在大步迈向新的发展阶段，其必将推动中国从地热大国走向地热强国。如果本丛书的出版能够为我国新时代的地热能产业高质量发展以及国家能源转型、应对气候变化和建设生态文明战略目标的实现做出微薄贡献，编者就甚感欣慰了。

丛书总主编对丛书体系的构建、知识框架的设计、各卷主题和核心内容的确定，发挥了影响和引导作用，但是，具体学术与技术内容则留给了各卷的主编自主掌握。因此，本丛书的作者对书中内容文责自负。

丛书的策划和实施，得益于顾问组和广大业界前辈们的热情鼓励与大力支持，特别是众多的同行专家学者们的积极参与。丛书获得国家出版基金的资助，华东理工大学出版社的领导和编辑们付出了艰辛的努力，笔者在此一并致谢！



2022年5月12日于北京

前 言

地热能源作为一种绿色清洁环保的可再生能源,具有储量大、分布广、稳定可靠等特点,是当前极有前景的清洁能源。2017年12月,国家发展改革委、国家能源局等十部委共同发布《北方地区冬季清洁取暖规划(2017—2021年)》,对北方地区冬季清洁供暖方案做出了具体安排,将地热列为可再生能源清洁供暖热源的第一位。2021年9月10日,国家发展改革委、国家能源局等八部委共同发布的《关于促进地热能开发利用的若干意见》提出:到2025年,地热能供暖(制冷)面积比2020年增加50%;到2035年,地热能供暖(制冷)面积及地热能发电装机容量力争比2025年翻一番。

我国地热资源十分丰富,按热储类型可分为隆起山地对流型与沉积盆地传导型两大类,其中北方的大型沉积盆地如华北平原、汾渭盆地、松辽平原、河套平原及准噶尔盆地等地区蕴藏丰富的中低温地热资源已被广泛用于冬季供暖。据不完全统计,中国北方现有地热井约3000眼,采用地热水供暖的建筑面积约 $1.3 \times 10^8 \text{ m}^2$,地热水资源开采量为 $4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,替代燃煤 $3 \times 10^6 \text{ t}/\text{a}$,减排 CO_2 $6.7 \times 10^6 \text{ t}/\text{a}$ 、减排 SO_2 $5 \times 10^4 \text{ t}/\text{a}$,对减轻北方冬季雾霾发挥了积极作用。

沉积盆地中的地热水具有补给条件极差、含盐量高等特点,目前各主要地热田均发生了显著的热储压力下降情况,如西安市地热水水位下降幅度一般为65~200 m,最大降幅达224.6 m。天津市明化镇组热储最大水位埋深达94 m,

馆陶组热储中心水位埋深为 102~106 m, 每年下降 3~4 m。山东省德州市城区馆陶组热储水位埋深达 93 m, 2010 年 3 月至 2017 年 3 月下降速度达 8.2 m/a。为实现地热资源的绿色可持续开发利用, 必须对地热供暖尾水进行回灌处理, 从而避免因地热尾水直接排放引起的热污染和化学污染, 并维持热储压力、缓解地热水水位的大幅持续下降, 保证地热田的可持续开采。

本书取名为《砂岩热储工程技术与应用》, 总结了 20 余年来砂岩热储勘查研究和地热尾水回灌领域的创新成果, 建立了地热尾水回灌和维护保养的关键技术体系, 提出了地热水可持续开采量的概念、计算原则与计算步骤, 并辅以若干回灌工程和地热田可持续开采量计算实例, 对实现地热田“采灌均衡、可持续开发”具有较强的参考借鉴价值。

本书为国家自然科学基金项目(编号 42072331、U1906209)资助的成果。第 1 章、第 4 章由周群道、康凤新编写, 第 2 章、第 3 章由赵季初、康凤新、黄星编写, 第 5 章由杨询昌、康凤新、周群道编写, 第 6 章、第 7 章由冯守涛、康凤新、周群道、高宗军、夏璐、张平平编写, 第 8 章由康凤新、郑婷婷编写, 第 9 章由白通、黄星、刘帅、刘志涛、杨亚宾编写, 结束语由康凤新、赵季初编写。全书由康凤新、赵季初统稿。在本书撰写过程中, 得到了汪集暘院士、多吉院士及丛书总主编庞忠和研究员等地热专家学者的指导帮助, 在此致以诚挚谢忱! 限于笔者水平, 加之技术的不断更新, 书中难免存在疏漏和错误之处, 恳请读者批评指正, 意见建议请发至 kangfengxin@126.com。



2021 年 6 月于济南

目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 地热资源开发利用	003
1.1.1 地热资源及利用概况	003
1.1.2 地热资源利用存在的主要问题	004
1.2 研究现状与发展趋势	005
1.2.1 地热尾水回灌研究现状	005
1.2.2 地热尾水回灌研究发展趋势	009
第 2 章 砂岩热储特征	013
2.1 砂岩热储分布	015
2.1.1 华北平原	015
2.1.2 关中平原	018
2.1.3 松辽平原	019
2.2 砂岩热储沉积环境	020
2.2.1 层序体系域划分	020
2.2.2 沉积环境沉积相	027
2.3 砂岩热储岩性特征	034
2.3.1 热储砂岩类型	035
2.3.2 热储砂岩颗粒大小	036
2.3.3 砂岩热储厚度特征	043
2.3.4 热储砂岩渗透性能	045

第3章 砂岩热储回灌井布局	049
3.1 回灌目的层可回灌性与目的层选择	051
3.1.1 回灌目的层物性参数确定	051
3.1.2 回灌目的层综合渗透性能确定	052
3.1.3 回灌渗透性能影响因素	054
3.2 采灌井距及影响因素	058
3.2.1 合理采灌井距研究现状	058
3.2.2 合理采灌井距影响因素	069
3.3 合理采灌井距确定	072
3.3.1 解析法	072
3.3.2 数值法	074
第4章 回灌井钻井技术及成井工艺	097
4.1 钻井技术与井身结构	099
4.1.1 大口径填砾工艺井身结构	100
4.1.2 固井射孔工艺井身结构	100
4.2 地质条件与成井工艺选取	103
4.2.1 地质条件	103
4.2.2 成井工艺选取	103
4.3 成井工艺与关键技术	104
4.3.1 大口径填砾工艺与关键技术	104
4.3.2 固井射孔工艺与关键技术	109
4.4 成井工艺应用及回灌效果分析	111
4.4.1 成井工艺对水文地质参数的影响	111
4.4.2 大口径填砾与滤水管裸孔回灌井回灌效果	115
4.4.3 固井射孔与大口径填砾成井工艺回灌效果	119
第5章 回灌系统设计、工艺流程与动态监测	131
5.1 回灌系统设计	133

5.1.1	管道设计	133
5.1.2	换热器设计	137
5.1.3	除砂器与过滤器设计	143
5.1.4	排气设计	146
5.1.5	加压泵与回扬泵设计	148
5.1.6	井口设计	148
5.2	回灌工艺流程	150
5.2.1	回灌工艺	150
5.2.2	回灌流程	154
5.3	回灌动态监测	155
5.3.1	水位监测	155
5.3.2	水量监测	155
5.3.3	水温监测	155
5.3.4	水质监测	156
第6章	回灌系统运行、维护与保养	157
6.1	回灌前准备	159
6.1.1	回灌操作人员准备	159
6.1.2	回灌系统装置检查	159
6.1.3	回灌水源检查	160
6.1.4	回灌井中下入潜水泵及泵管	161
6.1.5	回灌井回扬	161
6.1.6	回灌系统试运行	161
6.2	回灌运行及注意事项	161
6.2.1	回灌动态监测	162
6.2.2	回灌系统装置维护	163
6.2.3	回灌堵塞与处理	164
6.3	回灌后维护与保养	189
6.3.1	回灌井的维护与保养	189