

“十四五”时期国家重点出版物出版专项规划项目

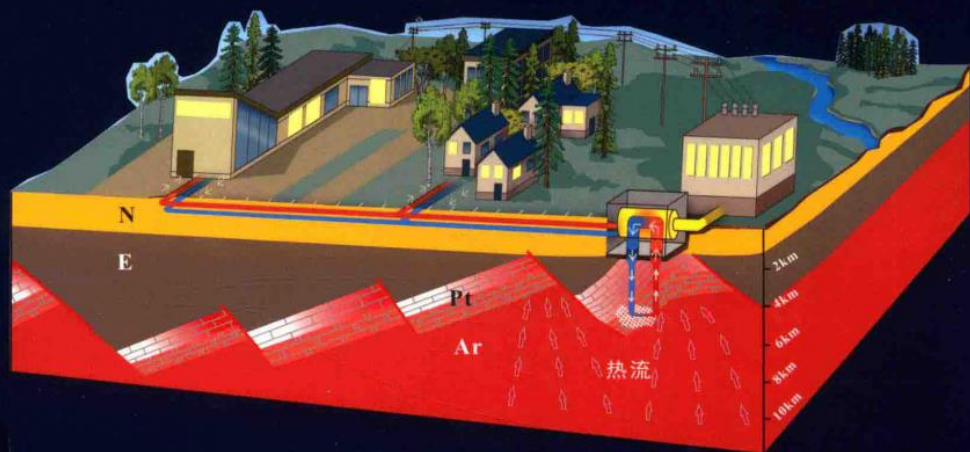
新时代地热能高效开发与利用研究丛书

总主编 庞忠和

地热钻完井工艺技术

Drilling and Completion Technology of Geothermal Well

查永进 叶宏宇 赵 彤 孙文超 等 著



图书在版编目(CIP)数据

地热钻完井工艺技术 / 查永进等著. —上海: 华东理工大学出版社, 2023.3
(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 - 6421 - 9

I. ①地… II. ①查… III. ①地热井—完井 IV. ①P314

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 205802 号

内 容 提 要

本书系统性阐述了中浅层、中深层、超高温等不同温度条件下的地热系统的钻完井技术,储层保护与增产技术,增强型地热钻完井技术,固井套管与水泥技术,超高温的轨迹测控技术,地热钻完井 HSE 技术,设计与施工管理要求,主要复杂情况与事故的预防与处理等,还给出了典型的中低温地热、超高温地热等钻完井实例。

本书可供地热钻完井相关技术人员参考使用,指导不同条件下地热钻完井施工,提高地热井钻完井技术水平,也可作为关心、热爱地热事业人员学习掌握地热钻完井技术参考书,使更多人学习、掌握地热钻完井的理论与方法。

项目统筹 / 马夫娇 李佳慧

责任编辑 / 李佳慧

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 / 22.75

字 数 / 430 千字

版 次 / 2023 年 3 月第 1 版

印 次 / 2023 年 3 月第 1 次

定 价 / 238.00 元

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 庞忠和 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 |

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。

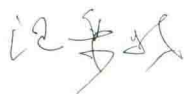
做出这样的业绩,是我国地热界几代人长期努力的结果。这里面有政策因素、体制机制因素,更重要的,就是有科技进步的因素。即将付印的“新时代地热能高效开发与利用研究丛书”,正是反映了技术上的进步和发展水平。在举国上下努力推动地热能产业高质量发展、扩大其对于实现“双碳”目标做出更大贡献的时候,本丛书的出版正是顺应了这样的需求,可谓恰逢其时。

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員写的。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 and 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

钻完井是勘探与开采地下矿产的重要技术途径,特别是对于人工挖掘难以达到的深部地下流体资源开发来说,运用钻井技术建立地下流体向地面的产出通道是唯一的技术手段。在地热开发方面,钻完井技术的进步、钻完井技术实现的开发效果也将是地热发展的最关键环节,并在一定程度上决定了地热可开发的规模与效益。水热型地热开发钻完井技术按温度高低,可以分为中低温地热钻完井技术与高温地热钻完井技术。

长期以来,地热钻完井大多数沿用地矿系统钻完井技术或油气钻完井技术,但地热开发有自身的特点,其钻完井技术与地矿系统及油气钻完井技术相比存在显著的差异。本书力图探索这些差异,突出地热钻完井的特点,介绍适用于地热开发的钻完井技术,内容涵盖钻完井不同领域,对于推进地热事业的发展,促进地热钻完井技术进步具有积极的作用。

本书内容包括各种不同温度、不同类型的地热钻井技术,套管与固井技术,储层保护技术,钻完井 HSE 技术,设计与施工管理要求,主要复杂情况与事故预防与处理,以及应用实例等。其中,绪论由查永进、叶宏宇编写;第 1 章为中低温地热钻完井装备与工艺,由叶宏宇、张海林编写;第 2 章为超高温地热钻完井技术,由查永进、宋先知、杨迎新、查斐等编写;第 3 章为热储层保护与增产技术,由孙文超、张彦龙、卓鲁斌等编写;第 4 章为增强型地热钻完井技术,由查永进、祝效华、叶宏宇、查斐等编写;

第5章为地热井固井技术,由孙文超、王兆会、叶宏宇、张兴国等编写;第6章为高温钻井轨迹测控,由赵彤、邹灵战、查斐、卓鲁斌等编写;第7章为设计、施工管理与HSE,由赵彤、查永进等编写;第8章为地热井主要复杂情况与事故,由查永进、叶宏宇、赵彤等编写;第9章为钻完井实例,由叶宏宇、查永进、苏园、张海林编写。查永进、叶宏宇、赵彤、张培丰、杨忠彦对全书进行了统稿与审稿,庞忠和研究员对全书进行了审定。

在本书撰写过程中,中国石油集团工程技术研究院有限公司、北京泰利新能源科技发展有限公司、长城钻探工程公司提供了大量的资料,对编写工作给予了大量的支持,在此向他们表示衷心的感谢!本书编写过程中大量参考了西南石油大学、中国石油大学(北京)的学位论文,在此也向论文作者及其指导教师表示感谢!

由于本书是首次编写地热方面钻完井技术的专著,而目前地热钻完井技术在我国也正处于从中低温、中深与浅层向高温、深层发展的前期,因此技术成熟度相对较低,同时限于作者的知识、能力,书中难免存在疏漏与不足之处,敬请同行与读者批评指正。

查永进

2022年7月于北京

目 录

绪论	001
第 1 章 中低温地热钻完井装备与工艺	009
1.1 浅层、中低温钻井装备	011
1.1.1 常用钻机类型	011
1.1.2 钻机选型	015
1.2 浅层中低温地热井钻井工艺	016
1.2.1 “地面动力驱动”钻井液正循环回转钻井工艺	016
1.2.2 “井下动力驱动”钻井液正循环回转钻井工艺	028
1.2.3 气举反循环回转钻井工艺	033
1.2.4 空气潜孔锤正循环冲击回转钻井工艺	039
1.2.5 其他钻井工艺介绍	052
1.2.6 钻井工艺选择	053
1.3 浅层中低温地热井完井工艺	053
1.3.1 完井工艺设计	053
1.3.2 测井	057
1.3.3 套管下入	057
1.3.4 固井与储层保护	058
1.4 中深层中高温地热钻完井技术	060
1.4.1 钻井装备	060
1.4.2 钻井工艺技术	062

1.4.3	完井工艺设计	066
第2章	超高温地热钻完井技术	071
2.1	超高温地层钻井难点	073
2.2	钻井工艺	075
2.2.1	井身结构设计	075
2.2.2	循环液体设计	076
2.2.3	提速工艺设计	081
2.3	完井工艺	081
2.4	钻井安全控制	084
2.4.1	正常钻进状态下温度控制	084
2.4.2	井漏情况下温度控制	085
2.4.3	地层出水情况下温度控制	089
2.4.4	泡沫与充气钻井技术	092
2.4.5	装备与工具要求	094
2.5	超高温地层破岩新技术	096
2.5.1	超高温地层破岩钻头	096
2.5.2	提速新技术	098
第3章	热储层保护与增产技术	101
3.1	热储特点与损害因素	103
3.1.1	中浅层高孔渗储层损害因素分析	103
3.1.2	中深层碳酸盐岩储层损害因素分析	104
3.1.3	超高温地热储层损害因素分析	105
3.2	储层保护技术	106
3.2.1	碎屑岩储层保护技术	106
3.2.2	碳酸盐储层保护技术	109
3.2.3	超高温地热储层保护技术	112

第 4 章 增强型地热钻完井技术	113
4.1 水平井、分支井技术	115
4.1.1 水平井技术	115
4.1.2 分支井技术	117
4.2 增强型地热系统完井方式	118
4.2.1 两井系统	118
4.2.2 单井系统	121
4.2.3 完井结构	121
4.3 增强型地热系统改造工艺	122
4.3.1 直井压裂连通技术	122
4.3.2 水平井多级压裂技术	124
4.3.3 降温压裂技术	125
4.4 气体钻井提速技术	128
4.4.1 气体钻井提速适应性评价技术	129
4.4.2 气体钻井提速工艺技术	130
4.4.3 贵州铜仁松桃苗王城地热井气体钻井工程实例	136
第 5 章 地热井固井技术	141
5.1 地热井井身结构与套管	143
5.1.1 地热井井身结构	143
5.1.2 高温情况下套管强度设计	143
5.1.3 套管材质与扣型选择	144
5.2 地热井水泥技术	146
5.2.1 水泥石性能	146
5.2.2 抗高温水泥浆	148
5.3 高温地热井固井工艺	152
5.3.1 地热井封固要求	152
5.3.2 固井工艺	153

第 6 章 高温钻井轨迹测控	159
6.1 定向井、水平井轨迹设计	161
6.1.1 平台井组设计	162
6.1.2 水平井井眼方向选择	165
6.1.3 超高温定向井、水平井轨迹设计要求	167
6.2 轨迹测量方法与仪器	169
6.2.1 不同热储测量参数要求	169
6.2.2 轨迹监测要求	170
6.3 定向井轨迹控制技术	171
6.3.1 直井防斜技术	171
6.3.2 中高温时轨迹控制技术	172
6.3.3 超高温井段轨迹控制	175
6.4 地热井资料录取	176
6.4.1 地热井录井	176
6.4.2 地热井测井	179
第 7 章 设计、施工管理与 HSE	185
7.1 设计要求	187
7.1.1 钻井设计要求	187
7.1.2 完井设计要求	190
7.2 施工管理要求	192
7.2.1 环境管理	192
7.2.2 技术管理	193
7.2.3 质量控制	193
7.3 政府监管	194
7.4 地热钻完井 HSE 管理特点与要求	195
7.4.1 地热钻完井 HSE 管理概念	195
7.4.2 地热钻井作业 HSE 风险特征	196

7.4.3	地热钻完井安全生产	210
7.4.4	地热钻完井劳动保护与医疗保健	220
7.4.5	地热钻完井环境保护	221
7.5	地热钻完井 HSE 过程控制	223
7.5.1	建设单位 HSE 职责	223
7.5.2	施工单位 HSE 职责	225
7.5.3	HSE 管理方法与要求	226
第 8 章	地热井主要复杂情况与事故	229
8.1	井漏的预防与处理	231
8.1.1	井漏的原因	231
8.1.2	井漏的分类	232
8.1.3	井漏的预防	233
8.1.4	井漏的处理	234
8.2	阻卡预防与处理	240
8.2.1	遇阻	241
8.2.2	粘吸卡钻	242
8.2.3	坍塌卡钻	247
8.2.4	砂桥卡钻	250
8.2.5	缩径卡钻	252
8.2.6	键槽卡钻	256
8.2.7	泥包卡钻	257
8.2.8	落物卡钻	259
8.3	钻具事故的预防与处理	261
第 9 章	钻完井实例	265
9.1	中浅层低温地热井实例	267
9.1.1	河北沧州肃宁县金恩供热站地热供暖回灌井	267

9.1.2	湖南永州舜皇山国家森林公园地热温泉井	277
9.1.3	贵州梵净山旅游景区地热温泉井	286
9.2	中深层中高温地热井实例	295
9.2.1	北京凤河营地热田首眼深层地热井	295
9.2.2	西藏阿里朗久地热供暖项目首眼深层地热井	304
9.3	西藏羊易地热发电项目首眼深层高温地热井实例	310
9.3.1	项目简介	310
9.3.2	钻井地质条件	311
9.3.3	钻井工艺	313
9.3.4	完井工艺	316
9.3.5	放喷试验	323
9.3.6	成井参数	325
9.3.7	经验教训总结	326
9.4	某超高温地热井设计	327
9.4.1	基本情况	327
9.4.2	井身结构与井控设计	328
9.4.3	钻井程序	329
9.4.4	附录 A: 泡沫和充气水钻进	334
9.4.5	附录 B: 定向井井身轨迹	336
9.4.6	附录 C: 井的测试与环境保护	336
	参考文献	338
	索引	340