



中国矿业大学
CHINA UNIVERSITY OF MINING AND TECHNOLOGY

本科生毕业设计（论文）

复杂地层地热井旋流除砂装置设计
Design of Cyclone Desander for Geothermal
Wells in Complex Formations

作者：李想
指导教师：严红 副教授

中国矿业大学
2025 年 6 月

中国矿业大学

本科生毕业设计（论文）

复杂地层地热井旋流除砂装置设计

Design of Cyclone Desander for Geothermal Wells
in Complex Formations

作者 李想

学号 01210149

导师 严红

职称 副教授

学院 矿业工程学院

专业 新能源科学与工程

二〇二五年六月

毕业设计（论文）原创性声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文）《复杂地层地热井旋流除砂装置设计》，是本人在指导教师指导下，在中国矿业大学攻读学位期间进行的研究工作所取得的成果。据我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

年 月 日

中国矿业大学

本科毕业设计（论文）诚信承诺书

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文）是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的内容外，本设计（论文）不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本设计（论文）所涉及的研究工作作出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

作者签名：

年 月 日

中国矿业大学

毕业设计（论文）使用授权声明

本人完全了解中国矿业大学有关收集、保留和使用本人所送交的毕业设计（论文）的规定，即：本科生在校攻读学位期间毕业设计（论文）工作的知识产权单位属中国矿业大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交毕业设计（论文）的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅，可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编论文。保密的论文在解密后适用本声明。

论文涉密情况：

☐ 不保密

☐ 保密，保密期（起讫日期：_____）

作者签名：

年 月 日

导师签名：

年 月 日

致谢

在本论文完成之际，我衷心感谢所有支持、鼓励和帮助我走过这段精彩历程的人们。在此我向你们表示最诚挚的感谢和最崇高的敬意。

首先，我要向严红导师表示最诚挚的感激之情。从毕业论文任务下达之日起，严老师就组织我们进行选题和开题前的准备工作，并安排每周两次组会进行进度汇报，一直延续到论文定稿。在整个论文写作过程中，严老师始终以严谨求实的治学态度和精益求精的要求对我进行悉心指导，在组会中，无论是研究方向的确立，文献的查阅还是论文的写作与修改，严老师总是耐心倾听我的想法，并给予我们宝贵的意见。在确定毕业论文题目时，我对研究目标旋流除砂器一知半解，也对论文写作内容感到迷茫，是严老师耐心细致为我指点迷津，在毕业实习的时候，在赵立明老师的安排下我有幸现场参与了旋流除砂器的运行，并在严老师悉心指导下理论联系实际，总结了许多旋流除砂器的经验，将文献与现场融会贯通，为论文的撰写打下了坚实的基础。在这里我要特别感谢严红老师、赵立明老师、吴永辉老师、任伊苏老师和中石化绿源地热能公司为我提供的学术环境和研究现场条件，使我能够脚踏实地落实论文研究。

感谢新能源科学与工程系各位导师，作为第一届新能源学子的我，深深感受到新能源系导师们的殷切关心，谢谢你们对矿大新能源事业的开拓，谢谢你们对我的悉心培养，我定砥砺前行，不负新能源期许；同样我也要感谢赵帅老师，我多次打搅向您请教时，您都给了我耐心细致的解答，谢谢您！

感谢我的家人。无论是经济上的支持，还是生活上的关怀，家人都是我最坚强的后盾。在论文写作的紧张时期，家人的理解与陪伴让我能够全身心投入到研究工作中。感谢他们多年来对我无条件的支持和深深的爱。

感谢柏人午、刘博律、刘永兴等室友这几年的照顾和包容。虽然我们来自五湖四海，但这些年我们一起学习，鼓励和支持，共同进步，岁月沉淀下的无价之宝是我们之间的情谊。感谢我大一到大四的同学、朋友黄志会，在迷茫时的交谈，惆怅时的倾诉和四年的陪伴。一路走来坎坷颇多，难遇知己，大学四年友谊终将陪伴我们一辈子。感谢新能源科学与工程系 2021 级各位同学们，在大学即将画上句号的日子里，我们都将各自奔赴前程，愿我们在不相见的日子里都熠熠生辉！

再次感谢鼓励帮助我的严老师，感谢含辛茹苦养育我的父母，感谢与我并肩作战的室友与同学们，感谢关心支持我的朋友们，感谢学校领导、老师们，感谢你们给予我的帮助与关怀，感谢矿业工程学院四年来为我提供的良好学习环境！

最后，衷心地感谢各位教授在百忙之中评审本文，由于作者水平有限，文中定有许多疏漏和不足之处，热切希望得到批评、指正！

中国矿业大学本科毕业设计（论文）任务书

设计（论文）题目：复杂地层地热井旋流除砂装置设计			
学院	矿业工程学院	专业年级	新能源科学与工程 2021 级
学生姓名	李想	学号	01210149
1、设计（论文）的主要内容 毕业论文由论文和翻译两部分组成。 论文题目为：复杂地层地热井旋流除砂装置设计 内容包括： （1）研究贵州省岩溶破碎地层基本特征，分析典型地热除砂工艺特点，总结岩溶破碎地层旋流除砂难点等； （2）研究贵州省破碎地层地热采出液除砂工艺，旋流分离器的旋流筒结构及旋流腔直径合理优化； （3）CFD 仿真技术建立旋流分离器优化模型，通过 Fluent 研究模型分离轨迹与粒级效率，评价装置优化结果； （4）新型旋流分离器下除砂工艺优化：岩溶破碎地层稳层滤砂，回灌尾水微小粒径颗粒、悬浮物、微生物气体处理，分析尾水回灌对岩溶破碎地层影响。 翻译题目为：An assessment of prospects of geothermal energy in India for energy sustainability.			
2、设计（论文）的基本要求 （1）学生在指导教师指导下独立完成论文，正文字数一般不少于 15000 字，英语翻译不少于 7000 词，翻译成中文后不少于 3000 字； （2）学生注重分析问题、解决问题和创新思维能力的培养； （3）学生恪守学术道德和学术规范。 指导教师签字：			

中国矿业大学毕业设计（论文）指导教师评阅书

学生姓名	李想	学号	01210149
设计（论文）题目	复杂地层地热井旋流除砂装置设计		
指导教师评语（①基础理论及基本技能的掌握；②独立解决实际问题的能力；③研究内容的理论依据和技术方法；④取得的主要成果及创新点；⑤工作态度及工作量；⑥总体评价及建议成绩；⑦存在问题；⑧是否同意答辩等）： 该论文选题来源于复杂地层地热能开发利用过程中的地热井高效除砂问题，侧重于解决传统除砂精度低、速度慢、保温效果差等难题，研究包括破碎地层地热采出液除砂工艺综述，新型旋流分离器结构参数和工艺优化、优化结果评价等内容。该论文对旋流分离器结构和旋流分离器内部流场研究方面国内外研究现状进行了总结。通过数值模拟和理论分析，综合比较了典型地热除砂工艺特征，设计了贵州省岩溶破碎地层地热井旋流除砂装置，分析了复杂地层条件下旋流除砂装置分离特征并优化了除砂工艺等，在复杂地层地热井高效除砂方面有一定的指导意义，说明书写作规范。该论文对“An assessment of prospects of geothermal energy in India for energy sustainability”论文进行了翻译，翻译较准确。该生认真独立完成。整个论文表明作者具有扎实的专业知识和解决问题的能力，建议进行答辩。			
成绩：		指导教师签字： 年 月 日	

中国矿业大学毕业设计（论文）评阅教师评阅书

学生姓名	李想	学号	01210149
设计（论文）题目	复杂地层地热井旋流除砂装置设计		
评阅教师评语（①选题的意义；②基础理论及基本技能的掌握；③综合运用所学知识解决实际问题的能力；④工作量的大小；⑤取得的主要成果及创新点；⑥写作的规范程度；⑦总体评价及建议成绩；⑧存在问题；⑨是否同意答辩等）： 评阅人 1 评阅意见： 除砂是地热水开发的重要工艺之一，设计以贵州岩溶热水开发为工程背景，设计了旋流除砂装置，选题有意义。作者查阅了相关文献，基本掌握了该领域的研究现状。设计撰写规范，表述清楚，工作量饱满，主要技术方案合理。翻译准确。作者基础理论扎实，能用运用所学专业知 识解决复杂工程问题。存在问题：部分数值的单位应尽可能使用符号，不使用中文。设计总体质量优秀，成绩 92 分，同意参加答辩。			
成 绩：92		评阅教师签字：张源	
		2025 年 05 月 19 日	

中国矿业大学毕业设计（论文）评阅教师评阅书

学生姓名	李想	学号	01210149
设计（论文）题目	复杂地层地热井旋流除砂装置设计		
评阅教师评语（①选题的意义；②基础理论及基本技能的掌握；③综合运用所学知识解决实际问题的能力；④工作量的大小；⑤取得的主要成果及创新点；⑥写作的规范程度；⑦总体评价及建议成绩；⑧存在问题；⑨是否同意答辩等）： 评阅人 2 评阅意见： 基于贵州省岩溶破碎地层地热井出砂特征，论文设计了一种新型旋流除砂装置，并通过 CFD 仿真模拟验证旋流除砂装置的正确性，并对岩溶破碎地层除砂工艺优化，可为复杂地层地热井高效旋流除砂装置设计提供应用价值。论文逻辑清晰，章节衔接合理，图文丰富，具有一定的研究价值和工程意义。			
成 绩：88		评阅教师签字：高雪峰	
2025 年 05 月 21 日			

中国矿业大学毕业设计（论文）答辩及综合成绩

答 辩 情 况					
提 出 问 题	回 答 问 题				
	正 确	基 本 正 确	有 一 般 性 错 误	有 原 则 性 错 误	没 有 回 答
1、论文设计的旋流除砂装置与已有的除砂装置有哪些不同？	√				
2、参考文献格式需要统一；第二章题目需要修改；摘要的英文翻译不正确；	√				
3、如何考虑装置的结垢问题？注意文中“沙”和“砂”的使用；	√				
4、题目中的复杂地层条件需要具体表明，进一步优化论文题目。	√				
答辩委员会评语及建议成绩： 该生完成了《复杂地层地热井旋流除砂装置设计》毕业设计，选题具有较好的实际意义，汇报思路清晰、回答问题正确、说明书符合规范，翻译了《An assessment of prospects of geothermal energy in India for energy sustainability》，译文准确。答辩委员会委员一致认为，该设计达到了新能源科学与工程专业毕业设计（论文）的要求，说明作者具有良好的专业知识和解决复杂性问题的能力。 成绩：92.00 答辩委员会主任签字：_____ 年 月 日					
成绩评定：					
成绩组成	指导教师	评阅教师	答辩成绩	其他	总评
成绩比例	0.13	0.27	0.60	0.00	优秀
评分	95.00	90.00	92.00	0	
学院领导签字：_____ 年 月 日					

摘 要

复杂地层地热井高效除砂问题一直是制约地热开发利用的关键难题之一，传统的除砂工艺在砂-水分离时存在除砂精度低、速度慢、保温效果差等问题，而旋流除砂器除砂精度高，处理流量大，在地热除砂领域得到了广泛应用。旋流除砂器是通过离心力进行砂-水分离设备，能够高效处理传统地层地热井地热采出液，然而面对复杂岩溶破碎地层出砂粒径小、砂量大、采出量周期变化等特点会存在除砂效果差等问题。本文基于贵州省岩溶破碎地层地热井出砂特征，设计新型旋流除砂装置，并通过 CFD 仿真模拟验证旋流除砂装置的正确性，并对岩溶破碎地层除砂工艺优化，为复杂地层地热井高效旋流除砂装置设计提供应用价值。

(1) 归纳总结典型地热除砂工艺优缺点，明确复杂地层定义即岩溶破碎地层，分析影响岩溶破碎地层地热采出液含砂量因素：碳酸盐岩类地质、季节性水量和生产设备残渣，确定除砂难点在于出砂量大，砂粒径小。

(2) 通过贵州省铜仁市某岩溶破碎地层地热井的地质环境分析和地热采出液特征调研，明确了旋流除砂装置的优化方向，初步设计旋流除砂装置的结构参数，确定了数值模拟基本参数。

(3) 应用 ANSYS 系列软件，Space Claim 创建旋流除砂器模型，Workbench 对模型定义进出口条件同时网格化处理，最后通过 Fluent 对旋流除砂器内部流动过程进行数值模拟，得到了旋流除砂器的颗粒分离轨迹与迹线轨迹，初步验证模型的正确性。

(4) 通过 DPM 颗粒模型研究了不同流量下不同粒径颗粒的分离效率，旋流除砂器的粒级效率随着颗粒粒径增大而增大。当颗粒粒径大于 0.3mm 时，旋流除砂器能够实现基本分离，远远大于岩溶破碎地层出砂粒径分布 0.5-1mm。入口流速为 1m/s（流量：36m³/h）时，总分离效率最高，颗粒分离效果最好。再次验证模型的设计合理性。

(5) 探讨了新型旋流除砂器下，岩溶破碎地层地热井开发利用过程中的源、采和灌三阶段的稳层滤砂、旋流除砂和尾水回灌工艺优化方向。

该论文有图 32 幅，表 6 个，参考文献 56 篇。

关键词：旋流除砂；岩溶破碎地层；CFD；粒级效率

Abstract

The problem of efficient sand removal from geothermal Wells in complex formations has always been one of the key challenges restricting the development and utilization of geothermal energy. Traditional sand removal processes have problems such as low sand removal accuracy, slow speed, and poor insulation effect during sand-water separation. However, the cyclone sand remover has high sand removal accuracy and a large processing flow rate, and has been widely used in the field of geothermal sand removal. The cyclone desander is a sand-water separation device through centrifugal force, which can efficiently treat the geothermal production fluid from traditional geothermal Wells in formations. However, in the face of the characteristics of complex karst fractured formations, such as small sand particle size, large sand volume, and periodic changes in production volume, there may be problems such as poor desander effect. Based on the sand production characteristics of geothermal Wells in karst fractured formations in Guizhou Province, this paper designs a new type of cyclone desander. The correctness of the cyclone desander is verified through CFD simulation, and the sand removal process in karst fractured formations is optimized, providing application value for the design of efficient cyclone desanders for geothermal Wells in complex formations.

(1) Summarize the advantages and disadvantages of typical geothermal sand removal processes, clarify the definition of complex formations, namely karst fractured formations, analyze the factors affecting the sand content in the geothermal production fluid of karst fractured formations: carbonate rock geology, seasonal water volume and residue from production equipment, and determine that the difficulty in sand removal lies in the large amount of sand produced and the small particle size of sand.

(2) Through the geological environment analysis of a geothermal well in a karst fractured stratum in Tongren City, Guizhou Province and the investigation of the characteristics of geothermal produced fluid, the optimization direction of the cyclone sand removal device was clarified. The structural parameters of the cyclone sand removal device were preliminarily designed, and the basic parameters of the numerical simulation were determined.

(3) By applying the ANSYS series software and Space Claim to create the cyclone desander model, Workbench defined the inlet and outlet conditions of the

model and conducted grid processing simultaneously. Finally, the internal flow process of the cyclone desander was numerically simulated through Fluent, and the particle separation trajectories and trace trajectories of the cyclone desander were obtained. Preliminarily verify the correctness of the model.

(4) The separation efficiency of particles with different particle sizes at different flow rates was studied through the Discrete Phase Model (DPM). The particle size efficiency of the cyclone desander increases with the increase of particle size. When the particle size is greater than 0.3mm, the cyclone desander can achieve basic separation, which is much larger than the particle size distribution of the sand produced in karst fractured formations by 0.5-1mm. When the inlet flow velocity is 1m/s (flow rate: 36m³/h), the total separation efficiency is the highest and the particle separation effect is the best. Verify the rationality of the model design again.

(5) The optimization directions of layer stabilization and sand filtration, cyclone sand removal and tail water reinjection processes in the three stages of source, production and injection during the development and utilization of geothermal Wells in karst fractured formations under the new type of cyclone desander were discussed.

This paper has 32 figures, 6 tables and 56 references.

Keywords: Cyclone sand removal; Karst fractured formations; CFD; Particle size efficiency

目 录

摘要.....	I
目录.....	IV
1 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	4
1.3 研究内容与技术路线.....	6
2 地热井典型除砂工艺特征比较.....	8
2.1 传统除砂工艺.....	8
2.2 旋流除砂工艺.....	10
2.3 复杂地层地热井旋流除砂工艺.....	12
2.4 本章小结.....	14
3 贵州省岩溶破碎地层地热井旋流除砂装置设计.....	15
3.1 工程地质条件分析.....	15
3.2 新型旋流除砂装置结构优化.....	17
3.3 新型旋流除砂装置关键参数模拟分析.....	19
3.4 本章小结.....	25
4 复杂地层条件下旋流除砂装置分离特征及除砂工艺优化.....	26
4.1 旋流除砂装置分离轨迹.....	26
4.2 旋流除砂装置粒级效率.....	29
4.3 入口流量和颗粒粒径参数变化下旋流过程中水-砂分离特征.....	30
4.4 旋流除砂装置下除砂工艺优化.....	36
4.5 本章小结.....	38
5 结论与展望.....	39
5.1 主要结论.....	39
5.2 不足与展望.....	40
参考文献.....	41
翻译部分.....	45

Contents

Abstract	I
Contents	IV
1 Introduction	1
1.1 Research Background and Significance	1
1.2 Research Status at Home and Abroad	4
1.3 Research Contents and Technical Methodologies	6
2 Comparison of Typical Sand Removal Process Characteristics of Geothermal Wells	8
2.1 Traditional Sand Removal Process	8
2.2 Cyclone Sand Removal Process	10
2.3 Cyclone Sand Removal Process of Geothermal Well in Complex Formations ...	12
2.4 Chapter Summary	14
3 Design of Cyclone Desander for Geothermal Wells in Karst Fractured Formations in Guizhou Province	15
3.1 Analysis of Engineering Geological Conditions	15
3.2 The Structure of the New Cyclone Desander is Optimized	17
3.3 Simulation Analysis of Key Parameters of the New Cyclone Desander	19
3.4 Chapter Summary	25
4 Separation Characteristics of Cyclone Desander and Optimization of Sand Removal Process under Complex Formations Conditions	26
4.1 Separation Trajectory of the Cyclone Desander	26
4.2 Particle Size Efficiency of the Cyclone Desander	29
4.3 The Characteristics of Water-sand Separation during the Cyclone Process under the Changes of Particle Size and Inlet Flow Parameters	30
4.4 Optimization of the Sand Removal Process under the New Cyclone Desander	36
4.5 Chapter Summary	38
5 Conclusions and Prospects	39
5.1 Main Conclusions	39
5.2 Deficiencies and Prospects	40
References	41

1 绪论

1 Introduction

1.1 研究背景与意义 (Research Background and Significance)

1.1.1 研究背景

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，近年来各国都十分注重开发利用地热资源，高效地开发利用能有效保持生态环境，降低碳排放。随着我国城市建设规模和范围的不断扩大，对于新能源的需求量剧增，政府从资源国情出发，传统能源与新能源并举，要求清洁能源利用需加速发展，传统矿物原料与新材料兼顾，节约集约与开发创新并行^[1]。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^[2]。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^[3]，是提高地区清洁取暖率、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。

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^[4]，在中东部沉积盆地中，中低温地下热水资源尤其丰富，适宜于直接供暖制冷利用。利用浅层地热能供暖制冷区域主要位于我国东部地区，从南向北主要是鄂、沪、苏、鲁、冀、津、京、辽等省区的城市区，其中京、津、冀三省浅层地热能开发利用规模最大，约占全国浅层地热能供暖制冷量的 1/5^[5]。中深层的地热资源开发主要分为传统水热型地热系统和增强型地热系统（EGS）。传统水热型地热系统发展历史悠久，技术成熟；而 EGS 发展较晚但蕴藏的深部高温地热资源量丰富。据估计全球陆区 3~10 km 蕴藏的深部地热能资源总量约为 4.95×10^{15} t 标准煤，相当于全球所有化石能源所蕴藏能量的 30 倍^[6]。但是 EGS 由于深部高温热储层的三高特征，存在理论、技术和成本等难题。因此，浅层地热能供暖制冷将会是目前地热能开发的主流，中深层地热能由于其技术壁垒，成本等局限性，距离大规模商业化应用还有很多难题需要克服。

我国在 2023 年世界地热大会首次发布的地热能国家主旨报告——《中国地热产业高质量发展报告》指出我国对清洁能源供暖制冷的需求激增，目前主要形成了以供暖（制冷）为主的地热发展路径。截至 2021 年底，我国地热供暖（制冷）能力达 13.3 亿平方米^[7]。根据世界地热大会数据可初步核算 2023 年地热清洁供暖面积可达 16.5 亿平方米，远超世界各国，地热能利用连续多年位居世界

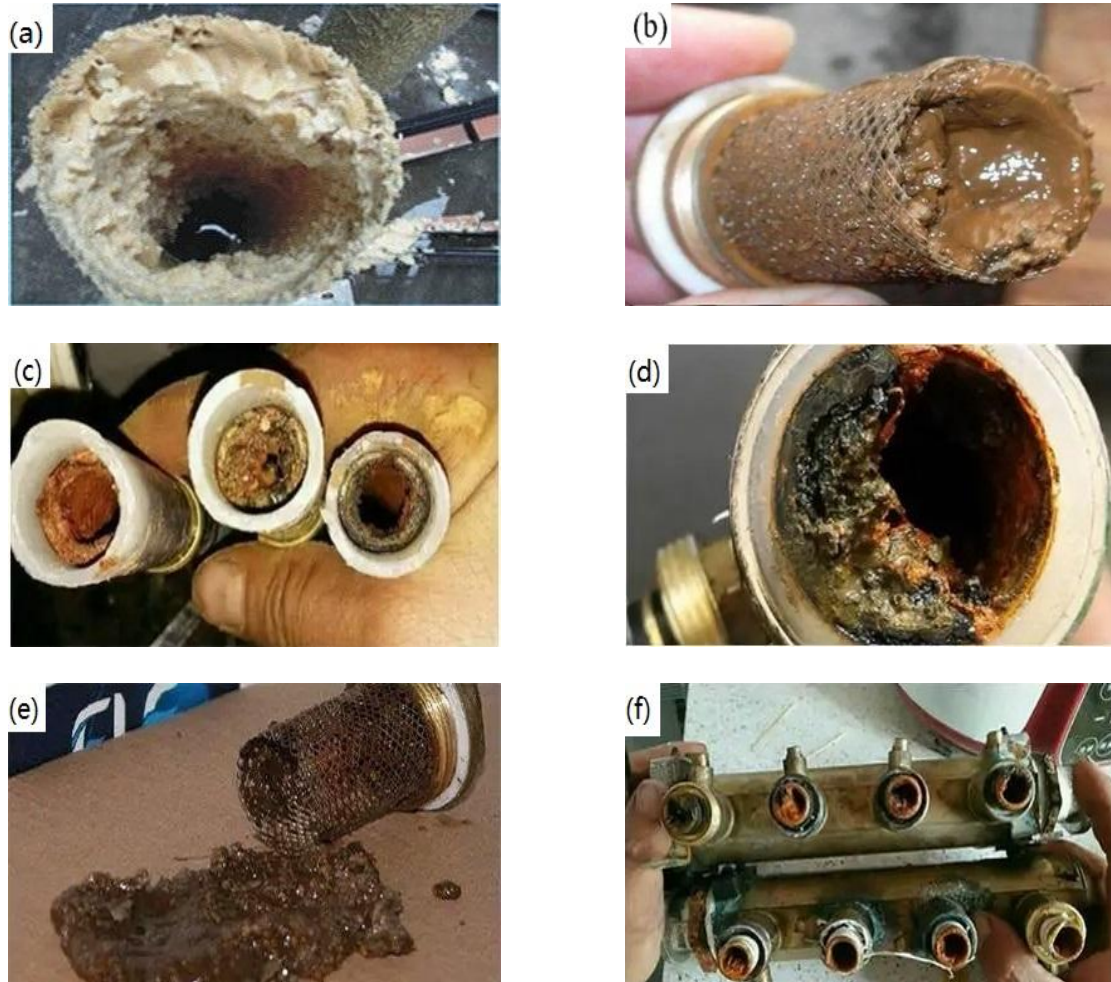
首位。作为中国地热行业的领军企业中的中国石化,截至 2024 年,超 1000 座换热站陆续投入运行,累计供暖能力超 1.1 亿平方米,同比增加 16%,年减排二氧化碳约 590 万吨^[8]。在中深层地热利用方面,目前累计建成地热供暖能力 8000 万平方米、占全国中深层地热供暖面积的 30%以上,每年可替代标准煤 185 万吨,减排二氧化碳 352 万吨^[9]。其中在雄安新区第一次采用深层地热供暖技术,打造全国首个地热供暖“无烟城”,得到国家和地方充分肯定,地热清洁供暖“雄县模式”被国际可再生能源机构(IRNEA)列入全球推广项目名录^[10]。得益于中国石化等企业的鼎力开发,近 20 年我国地热直接利用产业始终位居全球第一。

地热开发取得的巨大成功离不开我国分布广泛的地热资源,例如藏滇地热带、川滇地热带、郯庐断裂地热带、祁吕弧形地热带以及东南沿海地热带等。据统计,我国发现的地热资源已经达到了 3000 处以上,其中西南地区占比一半以上,西藏地区地热资源达到了 600 处以上,云贵川地区地热资源分布已经达到了 1000 处以上^[11]。这些地区由于其独特板块挤压构造以及丰富的水资源,成为我国中深层地热资源以及水热型地热资源典型区域。

贵州省位于全球性古特提斯—喜马拉雅与滨太平洋两大地质构造域之间,长期被太平洋板块、印度洋板块和菲律宾海板块挤压,发生了洋陆转换、俯冲增生、碰撞造山、裂谷事件、陆内造山、板内作用等一系列活动,局部挤压和扩张作用明显,形成了扬子陆块、江南造山带、右江造山带 3 大地质构造单元^[12]。构造地层中广泛分布的碳酸盐岩石,如石灰岩、白云岩等,这些岩石易于溶解,在雨水和地下水的溶蚀、侵蚀和沉积等长期地质作用下,逐渐形成了溶洞、地下河、石芽、石笋、峰林等独特的喀斯特地貌形态,因此岩溶裂隙密集,破碎地层广布,独特的地质背景和复杂的地质构造造就了贵州省较为丰富的地热资源,属板内地热。全省地热资源主要分布于黔北、黔东北、黔中和黔西南地区^[13],地热资源主要以低温及中低温水热型地热为主,当地的温泉以及热水井主要处在 30 到 50℃之间,温度最高的能够达到 65℃,最低温度在 21℃左右。黔南,黔东北以及黔中和黔北地区温泉以及热水井温度相对较高,区内北东向断裂带对这些温泉和热水井起着明显的控制作用^[14]。贵州省有着丰富的地热水资源,主要为循环型热矿水(受深断裂控制),还有的热卤水为沉积盆地深埋型,贵州习水以及赤水地区主要分布沉积盆地深埋型热卤水,而其他地区都是循环型热矿水^[15]。依照热矿水储存地质构造条件,贵州省当地热储层主要包括层状、带状以及组合状几种类型,特别是组合特征热储,是贵州省最具开发潜力的热储层^[16]。

贵州省地质构造结构复杂,多为碳酸盐岩与碎屑岩相互重叠,褶皱断裂分布广泛,喀斯特地貌发育,岩溶裂隙密集,且地热井多位于泥盆纪地层,在完井后,由于地层稳定性差及涌水量大等原因,导致清渣不良、井壁掉渣等问题,使得地

热采出液含砂量增加。地热回灌尾水中携带的悬浮物、泥砂、气体和微生物粒径较小，常规的沉降除砂工艺不能将微米级固相悬浮物去除，而地热水中固相悬浮物的存在会导致热储层堵塞、管道沉积、滤网堵塞等^[17]。如图 1-1 所示，地热采出液高效除砂问题一直是制约地热开发利用的关键难题之一。因此，设计高效的地热采出液旋流除砂装置和进行尾水回灌探究，其中除去采出液中的颗粒是必不可少的工艺过程^[18]。



(a) 输水管路沉积物；(b) 阀芯堵塞；(c) 管路堵塞；(d) 管道弯头（三通）堵塞；(e) 滤网沉积物；(f) 分水器堵塞

图 1-1 地热水含砂对管道的影响

Figure 1-1 Influence of sand in geothermal water on pipelines

1.1.2 研究意义

贵州省由于地质及工程施工因素的影响，许多地热井中呈现较高的含砂量，多数砂砾的粒径在 0.1~0.5mm 之间，部分甚至能达到 1.5mm。这些地热井的地热采出液会含有一定的砂石颗粒、悬浮物、气体和微生物，当水中的含砂量超过国家规定的工业用水含砂量标准(含砂量应低于 1/200 万)，会影响热水的正常使用。若使用含砂量较高的地热采出液用于供暖制冷，会加剧设备磨损，引起管网

结垢堵塞,造成热资源浪费。在当用于地热发电时,容易引起设备的腐蚀和结垢,提高地热发电厂维护成本^[19]。此外回灌尾水含砂严重的情况下还会导致存在的裂缝闭合,影响地热储层对流传热效果,降低地热能的开采效益。因此,在回灌之前降低地热水的含砂量,是有效避免地热储层裂隙封堵的重要途径。旋流除砂工艺是通过固液两相流的密度差异,在地面针对含砂地热采出液快速、连续除砂的重要方法,可以解决地面沉降装置占地面积大,处理周期长并且沉降效率低的特点。针对贵州省复杂地层地热井旋流除砂的装置设计能够对地热采出液有效去除泥砂,保障地热井的稳定运行,从而提高地热资源的利用率,对井壁、泵、管网等设备减少颗粒磨损、堵塞、腐蚀,延长设备的使用寿命,降低运行成本,对回灌尾水的处理有助于实现清洁生产,减少环境污染。

1.2 国内外研究现状 (Research Status at Home and Abroad)

1.2.1 旋流分离器结构

旋流除砂器虽然结构简单,但结构参数优化一直是旋流除砂器研究重点。王胜等^[20]设计了一种集重力及旋流原理一体化旋流重力式井下气液分离器,采用 CFD 仿真模拟对分离器的结构进行了优化,并通过地面带压试验得到了带压条件下的分离规律。林子莎^[21]对微型旋流分离器结构形式与结构参数进行优化,确定适合模拟油水相分离下的旋流腔结构,得到分离要求下的最优微型旋流器结构参数,同时也为微型旋流器提供一套基于几何相似原理与响应面分析法的模拟研究路径。任向海等^[22]通过 LMS 测试分析系统对旋流分离器进行模态测试和分析。采用最小二乘复频域法识别旋流分离器各阶模态参数,发现锥形段与尾管的汇合处结构变形最大,说明此处结构比较脆弱,考虑影响旋流器分离性能因素时应当着重注意。王烨堃等^[23]通过正交试验设计方法研究旋流器结构对分离效率的影响,发现排砂口直径,预分离区域高度和溢流管壁厚三种结构因素中,排砂口直径影响最大。姜兰越^[24]基于松散分级理论,提出一种 W 型结构旋流器,该结构的旋流分离器为全柱段结构,并将底流口倒插入旋流器内部形成一种“W”型的内腔,通过调控旋流器内部旋流场,对颗粒群进行松散分级及传质,达到降低底流夹细的目的。刘志涛等^[18]基于响应面法研究旋流器结构与处理流量的联系,建立了旋流器处理流量、含砂质量分数和旋流筒直径与分离效率之间关系的经验公式。Zhao 等^[25]研究空气动力旋风分离器的粒度切割性能,提出的模型将外部几何尺寸(旋风分离器入口面积和涡流探测器直径)整合为环形雷诺数,并使用从等效体积法导出的无量纲参数来表征旋风器体尺寸的影响,基于所提出的模型,定量研究了旋风分离器尺寸和操作参数对颗粒截留尺寸的影响。Azadi M 等^[26]研究了旋风分离器结构尺寸和入口速度对流体力学和性能参数(包括截止直径和压降)

的影响,发现随着旋风分离器尺寸的增大,截止尺寸和压降也表现出增大的趋势。Lamskova Mariya 等^[27]研究表明在评估具有相同直径的主体和可更换直径的管道的水力旋流器组中悬浮液的整体净化程度时,不仅需要考虑分离系数,还需要考虑液体在分离区的平均停留时间。Li 等^[28]发现水力旋流器的锥形段在较高的压力下,细颗粒更容易向中心移动,从而导致错位颗粒的数量减少。与传统直线锥形段相比,组合式锥形段轴向速度更小,延长了颗粒在旋流分离器中的滞留时间,有利于完全分离颗粒。Tian 等^[29]通过对旋流分离器回流装置底流管径的研究发现增加底流管直径可能会削弱旋流分离器的分离效果、降低分流比、增加底流管中的压力以及可能导致底流中的循环涡流,其中最佳底流管直径与粒径密切相关。Ni 等^[30]为了解决和缓解污水源换热器堵塞和结垢问题,提出了一种具有连续底流和回流功能的新型除垢旋流分离器。通过砂水实验和生活污水实验,研究了新型除垢旋流分离器的底流管径对分离性能的影响,发现随着底流管直径的增加,分离效率会提高。Ni 等^[31]还对旋流分离器强化分离技术进行了全面的最新综述。强化分离技术分为十组:圆柱形段、入口、涡流探测器、底流管、锥形段、旋流分离器倾角、旋流分离器插入、锥形段/顶点注水、回流装置和多旋流分离器布置。归纳了影响分离性能的关键因素,如分离效率、切割尺寸、分流比、能耗和容量。Yang 等^[32]针对目前机制砂工艺分级性能差的问题,研制了一种新型的圆柱形旋流器和锥形旋流器串联的水力旋流器洗砂机。通过圆柱形旋流器提高离心力,对细颗粒和粗颗粒进行预分级,保证细颗粒从溢流管中排出。锥形水力旋流器的作用是二次精细分离,减少细颗粒在底流成品的含量。

1.2.2 旋流分离器内部流场研究

赵立新等^[33]基于 CFD 仿真软件模拟了柱状气-液-固三相旋流分离器 (GLSC) 内部复杂的旋流场分布,得到了溢流口气相分布和侧向出口固相分布特点,研究了气-液-固三相旋流时的流场特点。张彩娥^[34]对旋流分离器内流场进行的模拟试验结果表明,切向速度分布遵循组合涡运动规律,由于溢流管底端的湍流强度较高,使得自由涡区域切向速度随着旋转半径的减小而减小;在旋流器的柱段和锥段上部存在轴向循环流;在溢流管尾端存在短路流。赵盼婷^[35]采用 Mixture 模型分析了气液相流场分布规律,对比了超高压与常压两种不同工况下流场关键物理参数的差异。发现在超高压工况下,旋流分离器内的流体加速更快,静压梯度更显著,分离效率更高。Azadi M 等^[36]提出了一种新的研究入口速度对旋风分离器性能参数影响的分析方法。指出旋风收集效率是根据旋风压降得出的,将入口速度增加到特定值以上不一定会导致更细颗粒的分离效率提高,也可能导致更高的压降。Wu 等^[37]研究了不同锥角深度旋流分离器的流场特点和分离性能。发现随着锥角角度的增大,切向速度、轴向速度和空心直径都增大。锥角过大或过

小，都会使得内部流场不稳定，导致错位颗粒数量增加，降低颗粒分离精度。Khasani 等^[38]研究提出了一种通过使用旋流分离器在液体和固体之间进行分离来处理结垢问题的技术，使用 ANSYS 仿真软件 RSM 模型和 DPM 模型对地热发电厂旋流分离器液固两相流分离过程进行数值模拟，通过改变盐水的质量流速和颗粒尺寸，评估这些参数对旋流分离器流场的影响。结果表明，随着流体质量流量的增大，旋流分离器的效率也随之提高。

综上所述，国内外学者围绕旋流分离器结构和旋流特征开展了大量研究，对其进出口锥角、腔体等结构不断优化，内部流场特征不断清晰，旋流介质不断改变，但针对特定环境复杂地层地热井的旋流除砂相关性研究仍然较少。复杂地层地热井的旋流除砂环境面临着多种难题，如地层压力不稳定、井壁稳定性差、出砂量大和出砂粒径小等问题，如何解决这些难题是复杂地层地热井旋流除砂装置设计的关键。同时，开展复杂地层地热井旋流除砂装置设计是贵州省独特地热资源稳定开发的保障之一，具有重要实际利用价值。

1.3 研究内容与技术路线（Research Contents and Technical Methodologies）

1.3.1 主要内容

（1）研究贵州省岩溶破碎地层基本特征，分析典型地热除砂工艺特点，总结岩溶破碎地层旋流除砂难点等；

（2）研究贵州省破碎地层地热采出液除砂工艺，旋流分离器的旋流筒结构及旋流腔直径合理优化；

（3）CFD 仿真技术建立旋流分离器优化模型，通过 Fluent 研究模型分离轨迹与粒级效率，评价装置优化结果；

（4）新型旋流分离器下除砂工艺优化：岩溶破碎地层稳层滤砂，回灌尾水微小粒径颗粒、悬浮物、微生物气体处理，分析尾水回灌对岩溶破碎地层影响。

1.3.2 研究方法

复杂地层地热井旋流除砂设计研究处理主体分为两类。破碎地层地热采出液主要优化方向旋流除砂器选型、旋流筒结构和旋流腔直径，优化效果通过除砂精度、颗粒分布、迹线分布和粒级效率等性能参数体现。破碎地层地热回灌尾水主要处理固相悬浮物、微米级颗粒、微生物和气体，实现地热流体稳定循环。围绕稳层滤砂、旋流除砂和尾水回灌三个关键词，研究内容与研究关键采用文献检索归纳岩溶破碎地层特征和典型地热除砂工艺等，理论分析旋流除砂器结构与工艺优化方向等，数值模拟验证新型旋流除砂装置除砂效果等。本文研究技术路线图

2 地热井典型除砂工艺特征比较

2 Comparison of Typical Sand Removal Process Characteristics of Geothermal Wells

2.1 传统除砂工艺 (Traditional Sand Removal Process)

2.1.1 沉降除砂工艺

沉降除砂工艺核心原理在于利用固体颗粒与流体的密度差异,通过重力使砂砾在平流或静流中自然下沉,从而达到液固分离目的,适合出砂颗粒大、含砂量高的地热井采出液预处理。在地热井的沉降除砂工艺中,通常分为平流式沉降、竖流式沉降、辐流式沉降和斜流式沉降,其中平流式沉降与竖流式沉降应用广泛。平流式沉降池一般分为进水区、沉淀区、出水区和砂区。如图所示,地热采出液从进水区流入,通过穿孔整流墙均匀分配流量后沿水平方向缓慢流动进入沉淀区,流动一段时间后,砂砾因密度较大沉积于池底,上层清地热采出液则被收集利用。庞大的处理量、稳定的沉淀效果以及强大的抗冲击负荷能力使得平流式沉降成为早期地热行业除砂首要选择之一^[39]。竖流式沉降池的地热采出液一般由池顶中心管向下进入沉淀池内,通过底部反射板作用均匀分布于沉淀区水平段面上,采出液缓慢向上流动,通过顶部出水堰溢出,砂砾则在重力作用下反向沉淀,在底部沉砂口堆积通过静水压力从排砂管排出。竖流式沉降占地面积小、颗粒沉淀快、排砂便利、液固相分离显著等优点针对中小型流量处理得到广泛应用^[40]。

沉降除砂工艺设备简单,仅需沉降池即可完成除砂操作,且不依赖化学药剂,在运行与维护成本和环境保护具有很大的优势,但局限性在于地热采出液保温效果不佳,池内地热采出液容易受到外界温度干扰或沉降时间过长导致热量损失,悬浮物的沉降效果因此下降。传统沉砂池主要针对去除 200 微米以上粒径、相对密度为 2.65 的砂砾而设计^[41],当进行微小颗粒沉降时,会存在颗粒沉降时间短、除砂效率低、微粒沉降率更低等问题,该类地热采出液一旦进入换热器将严重影响换热效率。在早期的地热井沉降除砂流程中,由于缺乏技术规范,部分企业为了节约成本甚至不使用沉降除砂工艺直接利用地热采出液,对地热井可持续利用造成巨大破坏,部分企业则将沉砂池直接修建裸露在地表,地热采出液直接与空气接触引发化学反应结垢,进一步降低除砂效果。因此在地热井开发利用中,已经基本舍弃沉降除砂工艺,而在污水处理行业该工艺应用范围广泛^[42]。当面对贵州省岩溶破碎地层地热采出液砂多粒细的特点,沉降除砂工艺极难应用。

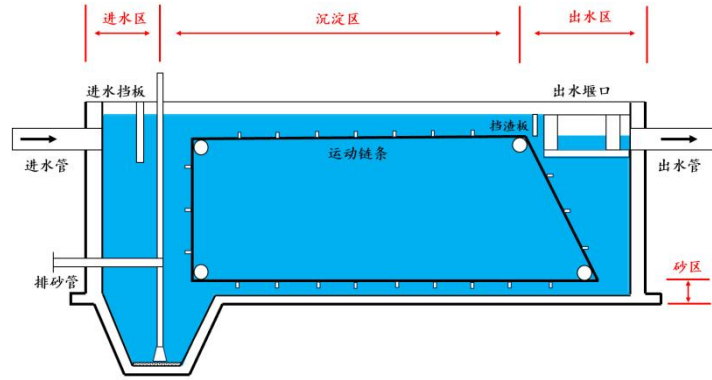


图 2-1 平流式沉降除砂池

Figure 2-1 Horizontal flow sedimentation sand removal tank

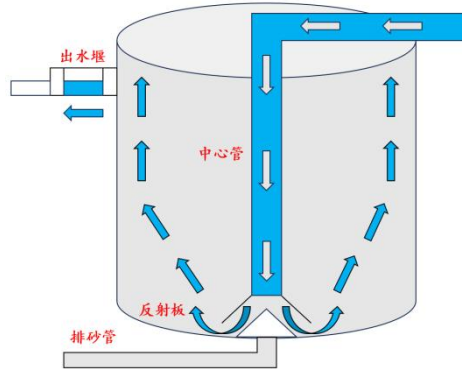


图 2-2 竖流式沉降除砂池

Figure 2-2 Vertical flow sedimentation sand removal tank

2.1.2 筛网过滤除砂工艺

筛网过滤除砂工艺是一种通过物理筛选的方式实现砂砾与地热采出液分离的技术。筛网过滤除砂工艺基本原理在于利用筛网对地热采出液进行筛选，采出液通过筛网时，较大的砂砾被拦截，小颗粒及采出液通过筛网。该类除砂工艺主要包含预处理、过滤和清洗三个步骤。预处理阶段中采出液被引进筛网过滤系统，筛网根据地层产砂砂砾粒径的中位值选择合适孔径。过滤阶段采出液流过筛网，砂砾被截留在筛网中。清洗阶段则通过反冲或加压冲洗清理筛网上砂砾积累形成的滤饼，保证过滤效率。随着筛网过滤工艺的不断改进，从早期仅简单在管道中安装筛网到如今绕丝筛管应用，筛网过滤工艺已经成为地热除砂系统重要组成。



图 2-3 圆形滤网与绕丝筛管

Figure 2-3 Round strainer with wire-wrapped screen pipe

筛网过滤除砂工艺虽然能弥补沉降除砂工艺除砂精度不高，沉降时间长和保温效果差的缺陷，但在面对复杂地层如贵州省岩溶破碎地层将存在一系列问题。

例如筛网过滤过度依赖物理筛分技术,通过孔径较小的筛网拦截砂砾,然而筛网在面对含砂量高的采出液过滤中很容易产生堵塞,研究发现在 20%岩屑含量下,即使是网眼最大的 40 目筛网,在实验中网面上也会迅速形成滤饼,堵塞筛网网眼,严重降低处理效率和过滤效率^[43]。岩溶破碎地层地热采出液砂砾含量大,对筛网的反复冲击作用会使得筛网的孔径发生形变等局部破坏,最终筛网防砂失效,且筛网的磨损腐蚀与频繁更换,增加地热利用系统的维护成本。当面临岩溶破碎地层地热采出液大流量输出时,筛网流量限制效果会阻碍地热井出水量,如果过度注重防砂挡砂,地热井无法得到充分开采^[44]。更为关键的是筛网面对细小砂砾悬浮物的过滤效果差,这些微小颗粒往往流过滤孔进入换热器中,长期积累将引起换热器磨损或堵塞影响整个换热系统的换热效率和稳定性。



图 2-4 筛网上附着的颗粒

Figure 2-4 Particles attached to the screen

传统除砂工艺存在保温效果差、颗粒过滤不净和易堵塞等不足之处,但是这些工艺也曾为我国地热采出液处理行业提供基础保障,像沉降除砂法的低成本和简易施工的特点,在地热利用起步阶段得到大范围应用。为了弥补沉降除砂工艺不足,提出筛网过滤工艺,筛网过滤除砂虽然面对复杂地层存在易堵易漏等问题但在处理大粒径砂砾等方面仍具有优势。

2.2 旋流除砂工艺 (Cyclone Sand Removal Process)

2.2.1 旋流除砂工艺原理

如图 2-5 所示,旋流除砂工艺是利用固液两相介质流经旋流分离器时受到的离心力差异为主要分选力实现的^[45]。根据离心沉降和密度差的原理,流体以一定速度从进水口以切向流的形式流入旋流腔内,会沿着壁面做旋转运动,由于砂-水的密度存在差异,在离心力、向心力、流体曳力和浮力的作用下,密度不同的固液两相介质受力差异增大,从而使密度低的地热水上升,由溢流口排出,密度大的砂则由底部排砂口排出,从而达到砂-水分离的目的。流体所含颗粒粒径越大,旋流除砂器除砂率越高,并可多台并联使用,达到增加处理量、强化工作效率的目的。旋流除砂器具有以下优点:除砂工艺耗时较少,分离精度高,保温效

果好；结构简单，节约空间；管理便捷安全，维护成本低；通过旋流除砂器的串并联连接还能实现除砂精度的提高和处理量的增大，普适性高。

针对贵州省岩溶破碎地层的地热采出液，在完成对流换热后，一方面可将其处理后重新注入地层补充减少的地层水，另一方面也可以分离回收用于储砂罐冲砂^[35]。

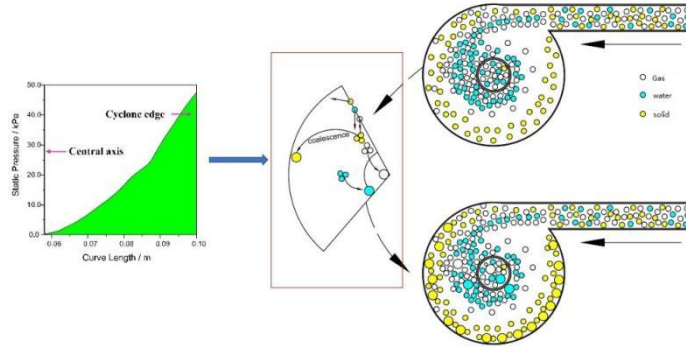


图 2-5 旋流除砂工艺基本原理图

Figure 2-5 Schematic diagram of the basic principle of cyclone sand removal process

2.2.2 复杂采出液旋流除砂工艺

由于地热资源分布的广泛性以及地质结构的复杂性，导致不同地貌下地热流体开采过程中携带相介质含量也不相同，针对地热采出液成分复杂的情况，如图 2-6 所示，多相旋流分离器可以将采出液从其中分离开来。多相旋流分离是多相流体以特定的流速或能量进入旋流分离器，由于各相密度差异，作用在各相的离心力不同，导致相被迫分离，形成组合涡流，旋流分离器内部流场的中心为内旋流，靠近壁面为外旋流。其中低密度相沿着向上内旋流轨迹运动，最后从溢流口流出。高密度相则沿着向下外旋流轨迹被甩向壁面，该相由于受到壁面摩擦力作用，其能量显著降低，最后沉降到底流口处分离，不需要配备生产面积大、工艺流程冗杂、安装复杂而且成本高的脱水器、沉降罐、稳定器等多台综合处理设备。

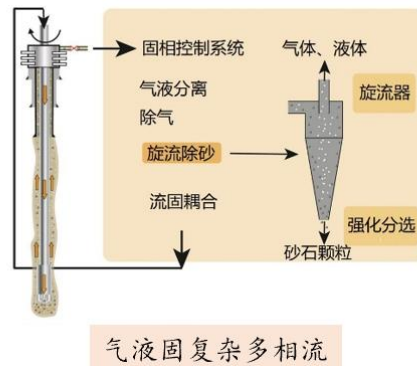


图 2-6 复杂采出液旋流除砂基本原理

Figure 2-6 Basic principle of complex production fluid cyclone sand removal

2.3 复杂地层地热井旋流除砂工艺 (Cyclone Sand Removal Process of Geothermal Well in Complex Formations)

2.3.1 影响复杂地层地热采出液含砂量的主要因素

复杂地层的定义涵盖地层、岩层、岩相、岩性、构造、矿产、水文等地质属性，通常指地质构造（褶皱、断层和节理等）交错分布，岩性变化多样的地层，往往给地质勘探与地热资源开采带来极大的挑战。在本篇论文中，将复杂地层定位于贵州省，独特的喀斯特地貌孕育一种典型复杂地层—岩溶破碎地层。该类地层在长期地下水的侵蚀作用下，石灰岩等碳酸盐类岩石发生溶解和侵蚀，形成溶洞、裂隙和破碎的岩石结构。在研究该类复杂地层时首先分析区域内独特的喀斯特地貌，该地貌其鲜明特点在于地表与地下地质形态对比，地表以上常见的地质现象是峰林、天坑和溶洞，而地下则是蜿蜒曲折的溶洞系统与破碎侵蚀的岩层，岩溶破碎地层本质上是喀斯特地貌一种典型地质表现。

通过大量文献调研分析以及贵州省岩溶破碎复杂地层实地考察，得出在地热井的开采中，影响采出液的含砂量主要包括地质、水量、生产等因素。

（1）碳酸盐岩类地质。贵州省的地层主要为碳酸盐岩类地层，碳酸盐岩与碎屑岩相互重叠，这类地层在雨水和地下水的溶蚀、侵蚀、沉积等长期地质作用下，逐渐在地层中形成了溶洞、暗河、伏流、石笋、峰林等独特的喀斯特地貌形态，因此岩溶裂隙密集，破碎地层广布。破碎岩层中黏结力较弱，地层胶结作用差，整体地层强度偏低，在地下水的冲刷、侵蚀等作用下容易出现碳酸盐岩类地层破坏，且地层破坏产出的砂砾具有粒径小，富含钙质等化学元素区别于普通砂岩等传统地层的产砂特征。在地热井的生产过程中岩溶破碎地层由于钻井的扰动导致井壁周围地层的应力发生变化，破坏地层的应力平衡，使得井壁附近出现应力集中，导致脆弱的破碎岩层无法承受应力而出现形变等问题，极易发生井壁垮塌掉渣^[46]，成为地层产砂重要来源之一。破碎性地层是贵州省地热井出砂关键因素，因此确定合适稳层滤砂技术是旋流除砂的必要前提。

（2）季节性水量。该区域内地下水根据赋存状态和水力特征划分为溶洞水、岩溶裂隙水、基岩裂隙水和松散岩类孔隙水，主要补给来源为大气降水的垂直入渗，溶洞水和岩溶裂隙水是区域内水热型地热的储热载体。传统地热储层由于埋藏深、压力大、上覆地层屏障作用和地表水水循环路径原因很难受到地表水的影响，一般为地下水自循环，流量稳定。贵州省的喀斯特地貌使得岩层中裂隙、孔隙和断裂带密集，松散的地层使得地下水与地表水循环加速，旱雨两季地下水流量形成明显差异，对破碎地层破坏强度不同，产砂量与产砂粒径产生季节性特征，主要表现为“两高一低”，即旱季时进水含砂总量高，雨季时进水含砂量增幅高且进水粗砂含量高，砂有机物含量总体偏低^[48]。因此针对不同季节地热采出液特征

进行旋流除砂设计是贵州省复杂地层地热井重要特征。

(3) 生产设备残渣。在地热井的生产中, 设备以及管路内部因为长期腐蚀或磨损而导致金属残渣的产生, 同时富含钙类等化学元素接触壁面后结垢, 在采出液冲击作用下易形成悬浮物, 加大地热流体旋流除砂难度。在旋流除砂装置的设计中, 针对地热采出液的化学特征对装置材质进行优化能够延长设备使用寿命, 提高复杂地层地热井开采效率。

2.3.2 复杂地层地热采出液旋流除砂难点

复杂地层与传统地层最大区别体现在地热井开发利用中, 热储层一般为灰岩地层或砂岩地层, 地热采出液含砂粒径大易分离, 粒径通常在 5-10mm 左右。与该类传统地层的均匀性与稳定性相比, 岩溶破碎地层岩性变化更为剧烈, 孔隙度和渗透性差异显著。多孔性、裂隙发育的特点使得岩溶破碎地层中的地热流体的流体动力学难以预测, 且裂隙中含有更多地热流体, 砂石等固体颗粒携带能力更强, 其采出液含砂特征表现为砂量大, 粒径小, 通常为 1-5mm 以下。如图 2-7, 两种地层出砂粒径大小对比显著。



图 2-7 传统地层（左）与岩溶破碎地层（右）出砂粒径对比

Figure 2-7 Comparison of sand particle size between traditional formation (left) and karst fractured formation (right)

贵州省地热井旋流除砂难点根本原因在于喀斯特地貌下不稳定岩溶破碎地层, 岩溶破碎地层出砂粒径小和产砂量季节性不均等是传统除砂工艺难以解决的巨大问题, 因此在旋流除砂的装置设计及工艺优化中应聚焦于除砂粒径以及除砂精度。常见的旋流除砂器有 TSXL 型号、DN 型号等, 以 DN 200 型旋流除砂器为例, 该类的旋流除砂器除砂过滤精度为 1mm 以上, 岩溶破碎地层地热井多数产砂粒径在 0.1~1mm 之间, 若采用该类旋流除砂器, 地热采出液除砂效率明显不足。且该地层情况下热储层中地热流体丰富, 仅一口小型地热井采出液流量可达 300-700m³/d, DN 200 型旋流除砂器处理量为 200m³/h, 无法快速有效过滤大流量地热采出液。因此在明确岩溶破碎地层地质产砂特征以及旋流除砂器不足之处, 结合现有的旋流除砂工艺, 设计一种能解决出砂粒径小, 产砂量不均的新型

旋流除砂器。

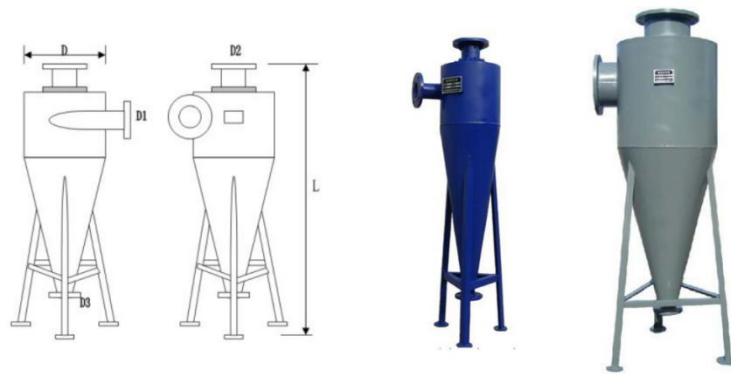


图 2-8 DN 系列旋流除砂器

Figure 2-8 Cyclone desander of the DN series

2.4 本章小结 (Chapter Summary)

通过地热井除砂工艺归纳总结，对比分析了沉降除砂工艺、筛网过滤工艺和旋流除砂工艺的优缺点，拓展了复杂地层旋流除砂工艺，明确复杂地层定义为岩溶破碎地层，总结了岩溶破碎地层除砂三大难点：碳酸盐岩类岩层、季节性水量和生产设备残渣，简要分析了常见的旋流除砂器型号与特征，为下一阶段装置设计提供思路。

3 贵州省岩溶破碎地层地热井旋流除砂装置设计

3 Design of Cyclone Desander for Geothermal Wells in Karst Fractured Formations in Guizhou Province

3.1 工程地质条件分析 (Analysis of Engineering Geological Conditions)

3.1.1 区域地质条件

在本次的旋流除砂装置设计中,选择贵州省铜仁市某区域,该复杂地层区域位处铜仁复式褶皱造变形区,区内主要褶皱为梅子坳背斜,梅子坳背斜轴线和松桃碧痕营走滑断裂重合,其转折端多被破坏。由于构造运动频繁影响和大规模深度地层静压力作用,深部构造裂隙及隐伏断层为地热资源提供了充足的储集空间和便捷的运移通道。

区域发育的耙耙坳断层(F1),为区内导热、导水通道,使该地成为地热流体集中运移构造带。从区域地质、构造条件综合分析,认为本区地热热储类型为带状热储(II-2型)。根据区内地质、结构条件,认为区内南华系富禄组(Pt_3^{2bf})砂岩中的构造裂隙、破碎带为区内地热流体提供了较好的存储空间。

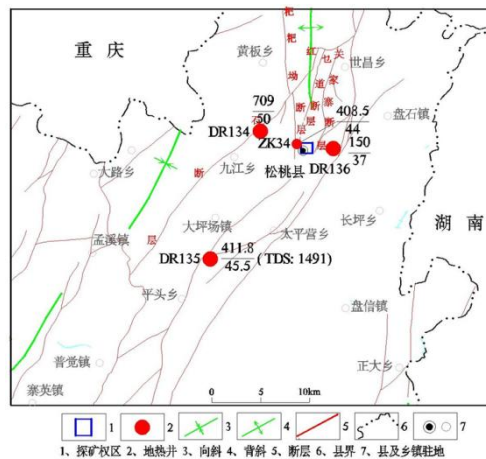


图 3-1 区域地热异常区分布图

Figure 3-1 Distribution map of regional geothermal anomalies

该岩溶破碎地层区域内地下热水资源出露主要为断裂型,受构造控制的深循环地下热水。区内地下热水出露及分布特征主要表现为 DR134、DR136、ZK34 地热井,其中 DR134 地热井孔深 2400m,水量 $709m^3/d$,井口水温 $50^{\circ}C$; DR136 地热井孔深 2750m,水量 $150m^3/d$,井口水温 $37^{\circ}C$; ZK34 号地热井该井水温 $44^{\circ}C$ 、水量 $408.5m^3/d$ 。上述地热井主要受断层和裂隙控制,其中本次旋流除砂装置设计井位选择与 ZK34 地热井位于同一构造带。

该地热井为新钻地热井，采用空气潜孔锤钻进技术，采用三开井身结构设计，设计井深 2000m 左右，井口水温约 40~45℃，单井涌水量 300~500m³/d，井底所属地层为南华系中统富绿组（Pt₃^{2bf}），灰色厚层至块状含砾砂岩、石英砂岩，局部见灰色白云岩透镜体。上部地层为南华系中统大塘坡组（Pt₃^{2bd}），上段为灰色、深灰色纹层状、粉砂质页岩夹少量粉砂岩，下段为黑色、深灰色炭质页岩夹炭质页岩。下部底层为青白口系清水江组（Pt₃^{1dq}），上部灰色、灰绿色中至厚层状变余粉砂岩、粉砂质板岩夹少许凝灰质砂岩，中部浅灰色、灰白色厚层至块状石英砂岩，下部为灰绿色薄至中厚层板岩夹少许变余粉砂岩。如图 3-2 所示为 2024 年钻井施工时不同深度地层出砂情况。

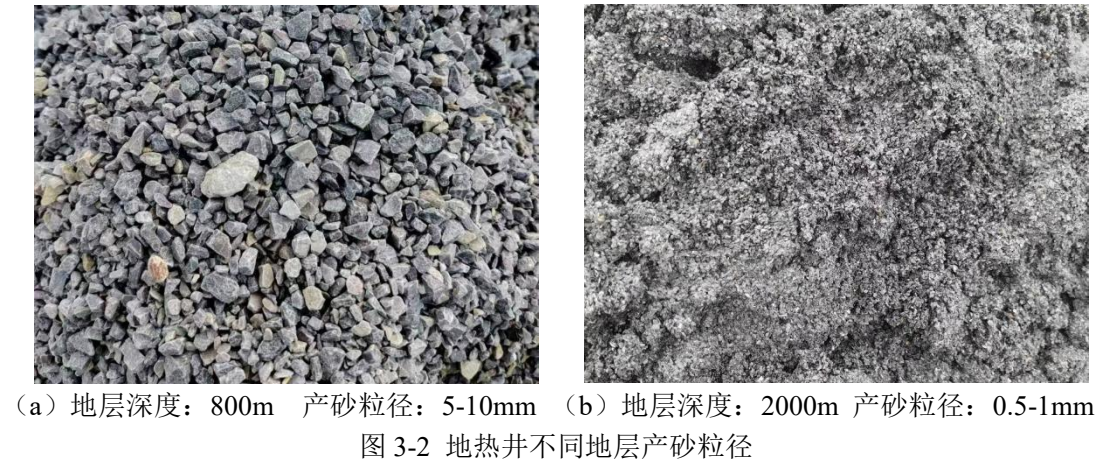


Figure 3-2 The particle size of sand produced in different formations of geothermal wells

3.1.2 地热采出液成分分析

通过对该岩溶破碎地层区域内地热井的采出液检测分析，得到表 3-1 结果：
表 3-1 地热采出液检测报告

Table 3-1 Test report of geothermal produced liquid					
项目		ρ (B)	c (1/zB ^{z±})	项目	ρ (B)
		(mg/L)	(mmol/L)		(mg/L)
阳离子	K ⁺	4.90	0.13	总硬度（以 CaCO ₃ 计）	278.11
	Na ⁺	27.26	1.19	总碱度（以 CaCO ₃ 计）	255.73
	Ca ²⁺	59.56	2.97	总酸度（以 CaCO ₃ 计）	6.23
	Mg ²⁺	31.42	2.58	游离二氧化碳	11.11
	总计	123.14	6.87	耗氧量（O ₂ ）	1.04
阴离子	Cl ⁻	54.82	1.55	溶解总固体	508.4
	SO ₄ ²⁻	17.29	0.36		
	HCO ₃ ⁻	311.85	5.11		
	总计	383.96	7.02		

该地热采出液色度小于 5 度，浑浊度为 3.56NTU，pH 为 7.51，肉眼可见少量颗粒物。成分检测发现，地热采出液中蕴含丰富化学元素，以主要以 Ca、Mg 和 Na 为主，阴离子主要以 HCO_3^- 为主，地层表现为碳酸盐岩类地层。主要溶解性气体为二氧化碳，溶解总固体含量高，除砂难度大。通过对采出液的成分分析，得出结论地层出砂的主要构成为 CaCO_3 ，因此在旋流除砂器模拟工作中将选用 CaCO_3 作为颗粒主要介质。

3.2 新型旋流除砂装置结构优化 (The Structure of the New Cyclone Desander is Optimized)

3.2.1 结构选型

旋流除砂器工作时，地热采出液沿着进水口切向进入旋流除砂器内部，在旋流除砂器内部的地热采出液高速旋转形成旋流场。然而旋流除砂器里面流场不容易简化，对旋流场机理研究难度很大。在旋流场这方面一直是世界各国技术人员重点研究方向，因此针对旋流除砂器流场分析和颗粒轨迹分析十分必要。本章节将主要从旋流除砂器的内部流场状态，颗粒轨迹，速度场分布及旋流装置分离性能等方面进行分析。

本文所选用的旋流除砂器采用单入口式旋流器，下图是本次旋流除砂装置设计选择旋流除砂器结构图。旋流除砂器主要由圆柱段、锥形段、进水管和溢流管四个组件构成，分为进水口，溢流口与出砂口。旋流除砂器结构如图 3-3 所示。（注：溢流口到出砂口的方向为 Z 正方向）

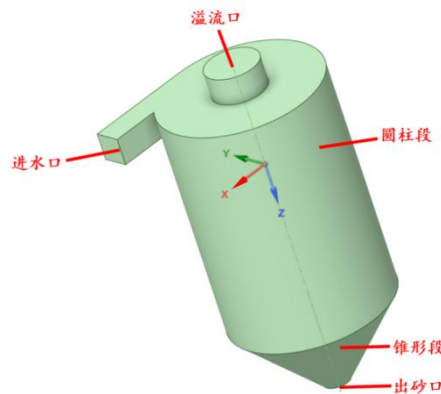


图 3-3 旋流除砂器结构

Figure 3-3 Structure of the cyclone desander

3.2.2 结构优化

在旋流除砂器的研发设计和生产中，需要对旋流除砂器不同型号的除砂效率和处理量进行评估，以及如何选择高效的旋流除砂器等是需要考虑的问题。这些问题都需要根据旋流除砂器的主要性能指标来判断评估。首先确定本次旋流除砂器优化的基础型号选择 DN 系列，在确定其他外界条件不变情况下仅改变旋流除

砂器筒径,通过对 DN 系列的旋流除砂器旋流除砂结果分析发现筒径是影响除砂粒径关键因素之一,旋流筒的直径主要影响旋流除砂器的分离粒度和处理量,随着旋流筒直径减小,除砂粒径降低,同时降低旋流除砂器的处理能力以及内部流场的稳定性。因此,在旋流除砂器的设计和优化中,在保证除砂精度的前提下应选择较大直径旋流除砂器以保证地热采出液的处理流量。

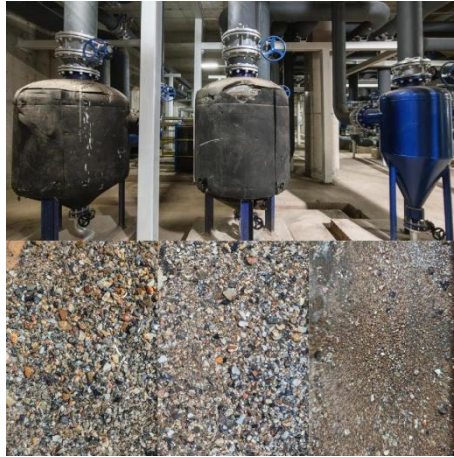


图 3-4 旋流除砂器 DN 系列除砂粒径比较 (5mm-3mm-1mm)

Figure 3-4 Comparison of the sand removal particle size of the DN series cyclone desander (5mm-3mm-1mm)

通过现场实地实验,我们可以发现三号旋流除砂器(从左至右分别为一号、二号和三号)除砂精度与该复杂地层产砂粒径最为接近,因此在装置设计中基础型号选择三号旋流除砂器 DN200,在结构优化中,针对该复杂地层区域出砂粒径 0.5-1mm,在 DN200 旋流除砂器基础上采用小型旋流筒以提高除砂精度,在流量处理方面该复杂地层地热井采出量 300~500m³/d,因此在进水口尺寸设计中应与采出量匹配。

本文所选用的旋流除砂器为在 DN200 型号旋流除砂器基础上结合复杂地层地热井产砂特点与采出量进行优化设计,旋流器由溢流管、进水管、圆柱段和锥形段组成,模型相关结构尺寸如图 3-5 和表 3-2 所示。

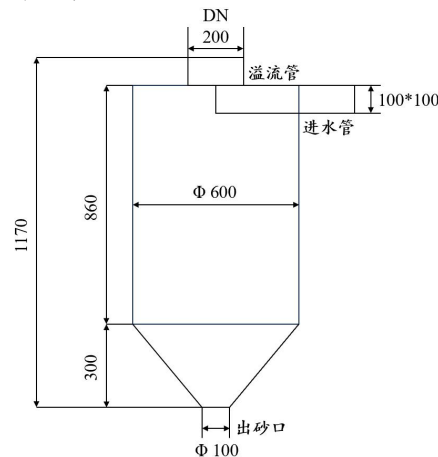


图 3-5 旋流除砂器结构 (单位: mm)

Figure 3-5 Structure of the cyclone desander (Unit: mm)

表 3-2 旋流除砂器结构参数 (单位: mm)

Table 3-2 Structural parameters of the cyclone desander (Unit: mm)

进水管	溢流管	溢流管	圆柱段	圆柱段	锥形段	出砂口	旋流器
径口	直径	高度	直径	高度	高度	直径	总高度
100*100	200	100	600	860	300	100	1170

3.3 新型旋流除砂装置关键参数模拟分析 (Simulation Analysis of Key Parameters of the New Cyclone Desander)

计算流体动力学 (CFD) 是流体力学领域的重要组成, 传统计算流体动力学的求解一般为理论计算, 随着计算机技术的不断发展, 一种全新计算流体动力学的 CFD 仿真高新技术逐渐兴起。CFD 仿真技术源于流体力学、数值数学以及计算机科学三种领域的交叉融合, 展现出了广阔的应用前景与强劲的发展生命力。在高性能计算机的应用下, 使用数学公式对流体运动问题进行离散处理, CFD 能够实现对各类流体问题的数值实验和模拟流动, 从而为实际流体问题的求解提供思路与验证。

在传统的计算流体动力学理论求解过程中, 公式所得计算结果通常具有一定的普遍性, 能够为实验和数值模拟研究的结果提供参考。然而在理论分析过程中我们需要简化处理实际流体问题, 才能计算理论解。在处理大型复杂湍流问题时, 理论分析往往难以得出精准的公式结果。实验测试能够探讨大多数实际流体问题, 并提供真实可靠的数据支持, 但它受到实际条件的限制, 需要投入大量人力和物力, 且实验周期较长。相较于理论分析与实验测试, CFD 仿真计算克服了传统计算流体动力学数学简化困难、多流场耦合等局限性, 通过计算机仿真模拟技术, CFD 能够真实地还原流体流动特性, 同时大幅减少实验周期与实验成本, 提供高效的流体求解方案。

除此之外, CFD 仿真技术还具有应对各类复杂流况多种模型与广泛的实际应用领域, 主要体现在三个方面: 一是对于难以应用公式求解的复杂湍流问题, 以及受实验周期限制的研究场景, CFD 技术能够通过参数确定进行实际模拟求解; 二是通过计算机模拟不同工作条件下的各种情况, 能够便捷地进行方案比较, 确定最优解决方案; 最后是 CFD 技术突破了实验研究的时空限制, 展现出省时降本优势, 同时能够灵活应对复杂流动场景的模拟需求。

CFD 仿真技术亦存在其局限性: 其一, 作为一种基于数学离散的计算手段, CFD 的精度和准确性依赖于求解流体模型和边界条件, 这需要通过大量实际实验来确定相关参数, 并对仿真结果进行必要的验证。

目前在 CFD 仿真软件中, Fluent 软件因其丰富的模型, 精确的数值模拟与连续性功能, 在流体力学、传热学、航空航天学和化学等领域广泛应用。为了准

确描述旋流除砂器其流体运动特征、颗粒分离特征以及速度特征, 本文将利用基于有限体积法的 ANSYS 软件进行分析, 通过 Space Claim 进行旋流除砂器模型建立, Workbench 对模型进行进出口定义同时网格化处理, 最后通过 Fluent 对旋流除砂器内部旋流除砂过程进行数值模拟。

3.3.1 流体微分控制方程

本次模型建立选择在笛卡尔坐标系中描述旋流除砂器内部流体运动的微分控制方程, 对于旋流除砂器模型, 需要同时满足质量、动量和能量守恒定律^[49]。针对流体动力学质量守恒方程, 单位时间内进入旋流分离器的地热流体微元体质量等于地热流体单元体质量流的增加量, 质量守恒定律在流体力学领域采用流体连续性方程表示:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = S_m \quad (3-1)$$

其中, S_m 表示地热流体质量源流, 速度 u_j 为 j 方向的速度分量, 下标表示空间坐标系中 x, y, z 方向, ρ 表示地热流体的密度。

对于动量守恒定律, 作用在地热流体微元体上的合力等于地热流体微元体动量随时间的变化率, 动量守恒定律在流体力学领域采用纳维-斯托克斯方程表示:

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) + (\rho - \rho_a) g_j \quad (3-2)$$

能量守恒定律中, 合力对地热流体微元体所做的功和进入地热流体微元体的净热量的能量之和等于地热流体微元体中增加的能量, 在流体力学领域中一般采用伯努利方程表示:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j T) = \frac{1}{C_p} \frac{\partial}{\partial x_j}(k_t \frac{\partial T}{\partial x_j}) + \frac{C_{pv} - C_{pa}}{C_p} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (3-3)$$

该能量守恒方程中 k_t 表示湍流流动导热系数, 假设旋流除砂器外覆保温层, 且处于恒温环境下工作, 能量损失忽略不计, 因此忽略能量守恒定律的影响。

3.3.2 计算模型选择

旋流除砂器内部湍流模拟需要选择适合湍流模型以提高模拟精度, 本次论文采用的 ANSYS 旗下 Fluent 软件中主要包括的湍流模型有 Spalart-Allmaras 模型、k-epsilon 模型 (k- ϵ 模型)、k-omega 模型 (k- ω 模型)、雷诺应力模型 (RSM)、大涡模拟模型 (LES) 和分离涡模拟模型 (DES) 等模型。在旋流除砂器模型的模拟流动过程前选择这些模型时应当注意流体是否可以压缩、模型建立的准确性、边界条件的要求以及计算机计算精度及时间等问题。

Spalart-Allmaras 模型是单一方程湍流模型,通过求解一个输运方程即可描述湍流模型,专为壁面有界流动设计尤其是在逆压力梯度下边界层流动,计算效率与稳定性十分卓越,广泛应用于叶轮、航天航空等领域^[50]。但因其单一方程模型,无法完全捕捉湍流流动时各向异性特征,对于强压力梯度与复杂湍流结构的模拟精确度受限。

k-epsilon 模型 (k- ϵ 模型) 是基于雷诺时均化纳维-斯托克斯 (RANS) 方法的双方程湍流模型,适用于高雷诺数,完全发展的湍流流动计算,如管道流、外部流等等,因其仅需求解双方程,计算效率高于雷诺应力模型 (RSM),在工程模拟中常作为首要模型利用,不足在于模型假设忽略近壁面分子粘性,依赖壁面函数处理低雷诺数区域,且在强压力梯度或非圆截面管流中模型精度下降。

k-omega 模型 (k- ω 模型) 是通过求解湍流动能和比耗散率描述湍流的双方程模型,与 k- ϵ 模型不同,该模型在近壁面求解精度更高,适用于低雷诺数流动场景,对于复杂流动求解更准确。但 k- ω 模型对于流体初始条件敏感,计算时困难存在收敛困难,且在远壁面流动时精度较低。随着该模型的研究不断深入改进,目前 k- ω 模型主要分为标准模型,BSL 模型和 SST 模型等,后两类模型改进了 k- ω 模型的缺陷,其中 SST 模型是当前应用在复杂流动和高精度需求场景最广泛的模型之一^[51]。

雷诺应力模型 (RSM) 是 Fluent 软件中求解精度最高,最复杂的高级湍流模型,通过直接求解六个独立雷诺应力输运方程及一个尺度方程得到模拟结果,能够精确描述湍流各向异性特征,适用于强旋转和高各向异性流动以及精确湍流分布应力场景,对于一般工程模拟成本高时间长,不宜采用。

大涡模拟模型 (LES) 基于直接数值模拟 (DNS) 与雷诺均化纳维-斯托克斯 (RANS) 方法之间的湍流模拟技术,中心思想是显式求解大尺度涡旋的流动方程,小尺度涡旋进行模型化,通过空间滤波技术分离大小涡旋尺度,防止平均化处理尺度,捕捉细微流动,提供更高精度的湍流流动结果,一般用于预测复杂流动现象,但由于计算成本过高,工程问题求解中一般不与采用。

分离涡模拟模型 (DES) 是一种结合雷诺均化纳维-斯托克斯 (RANS) 与大涡模拟模型 (LES) 解决湍流流动工程计算的混合湍流模拟方法,采用在近壁面或分离流动区域使用 RANS 模型求解,远壁面的自由流动区域则切换为 LES 模型,平衡计算效率与流动细节捕捉能力^[52]。但与 RANS 模型对比,DES 方法控制参数精度要求高,且在求解大型工程湍流流动问题时并未体现出其速度优势,应用场景较少。

在 Fluent 软件中上述模型中,一般选择 k- ϵ 模型、k- ω 模型和雷诺应力模型 (RSM) 进行旋流分离器的湍流数值模拟。k- ϵ 模型作为工程问题首选的湍流模

型，精度高，求解准确性高，速度快等优点，因此，本次论文采用 $k-\varepsilon$ 模型进行旋流分离器的湍流流动描述。

在 $k-\varepsilon$ 模型的迭代过程中，工程师将该模型分为三类：标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型和 Realizable $k-\varepsilon$ 模型。其中标准 $k-\varepsilon$ 模型由于将旋流分离器流动模拟视为完全湍流，忽略分子粘性对实际旋流的影响，在强旋流场与迹线曲率剧变的模拟中存在缺陷，为了改进标准 $k-\varepsilon$ 模型不足，结合统计涡旋学理论，提出新的重整化群 RNG $k-\varepsilon$ 模型。该模型在 ε 方程中增加一项关键参数，同时考虑不完全湍流的实际情况，通过引入两个额外解析公式求解湍流模型，拥有更高精度与准确度，在工程流动问题中得到广泛的应用。Realizable $k-\varepsilon$ 模型主要针对各向异性流动模拟中，虽然计算精度有所升高，但提高范围有限且成本大大增加，相较于 RNG $k-\varepsilon$ 模型计算复杂，收敛敏感。因此，本次旋流分离器湍流模型选择 RNG $k-\varepsilon$ 模型。

由旋流分离器的旋流特征得到恒温环境下动量与质量湍流模型基本方程^[53]：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3-4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial t} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i + F_i \quad (3-5)$$

其中 p 表示静压力， g_i 表示重力作用体积力， F_i 表示 i 方向上外部作用体积力。

RNG $k-\varepsilon$ 双方程模型在满足上述基本方程前提下，在 k 方程与 ε 方程计算中，特殊项 c_l 引入主流时均应变功率 S_{ij} 。 k 方程与 ε 方程为：

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \eta_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial_i}{\partial_j} + \frac{\partial_j}{\partial_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (3-6)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{c_1 \varepsilon}{k} \eta_t \frac{\partial u_i}{\partial u_j} \left(\frac{\partial_i}{\partial_j} + \frac{\partial_j}{\partial_i} \right) - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3-7)$$

旋流分离器 RNG $k-\varepsilon$ 模型的湍流应力计算公式：

$$(\tau_{i,j})_t = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{i,j} + \eta_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3-8)$$

$$\eta_t = c_\mu \rho k^2 / \varepsilon \quad (3-9)$$

3.3.3 计算模型与仿真设置

通过旋流除砂器选型结构图 3-5 与结构参数表 3-2 在 Space Claim 软件中建立 CFD 仿真模型，如图所示 3-6 所示。

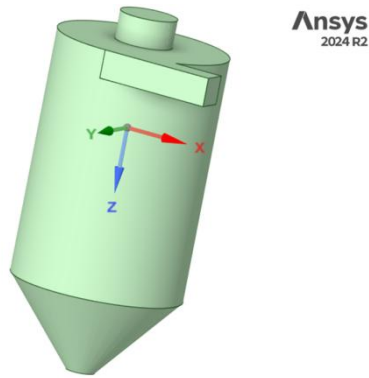


图 3-6 旋流除砂器模型

Figure 3-6 Model of the the cyclone desander

模型建立后将其导入 Workbench 进行边界创建与网格化生成，在旋流除砂器模型中定义进水口，溢流口和出砂口，创建模型边界。通过 CFD 生成流体网格，网格的质量与数量对旋流除砂器数值模拟的准确性不可或缺。本次旋流除砂器模型采用全等边三角形网格划分，等边三角形网格化越规整，模型求解精度与计算效率越高。

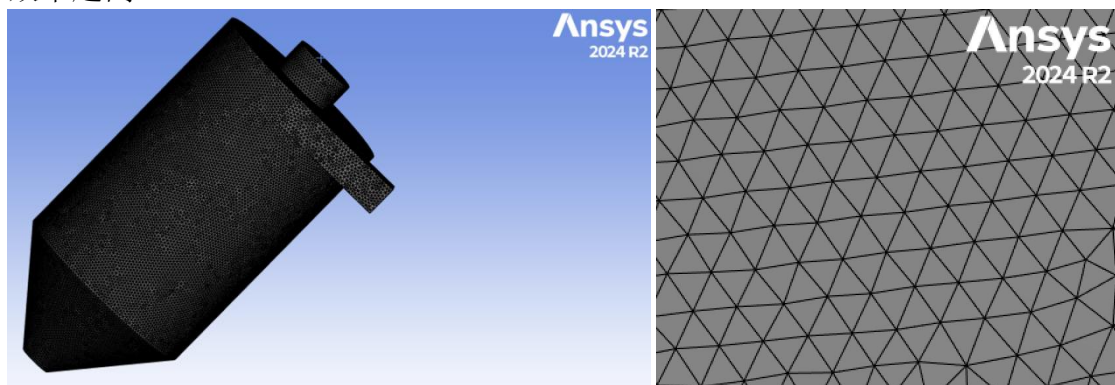


图 3-7 模型网格划分及表面网格分布

Figure 3-7 Model mesh division and surface mesh distribution

为了保证旋流模拟结果的精度与计算效率，需要对模型网格进行无关性验证，从而确定计算网格规模。从张俊^[54]和尚江涛等^[55]在水力旋流器网格化处理中得出网格数量与计算结果无关，不同网格数量下水力旋流器压强分布，切向速度等基本相近。考虑到模拟精度与计算效率的影响，本次旋流除砂器采用的网格数量规模为 7×10^5 ，网格数量确定后在 Workbench 中导入 Fluent 软件求解计算。

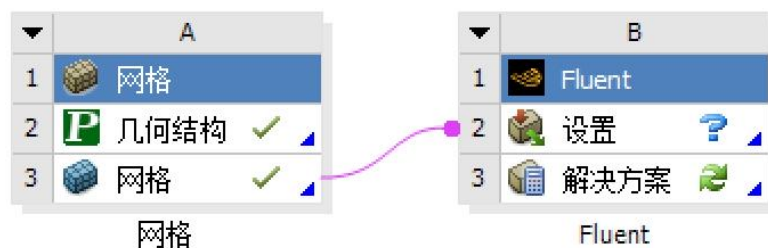


图 3-8 网格化从 Workbench 导入 Fluent 软件

Figure 3-8 Grid import of Fluent software from Workbench

3.3.4 设置 Fluent 模型参数

(1) 旋流除砂器是用于分离固体与液体的一种设备，所以需要设置重力加速度方向为 z 轴，大小 9.81m/s^2 。求解器类型选择基于压力求解。



图 3-9 Fluent 模型参数设置

Figure 3-9 Fluent model parameter settings

(2) 离散相中创建喷射源，选择喷射源入口类型为面，通过对复杂地层以及地热采出液成分分析，本次固体颗粒相选择为砂，其主要成分为 CaCO_3 ，颗粒相密度参数为： $\rho = 2800\text{kg/m}^3$ 。液相选择水，密度为： $\rho = 998\text{kg/m}^3$ 。

(3) 颗粒入口流速为 3m/s ，方向为 x 轴负方向，粒径为 1mm 。

(4) 本次湍流模型选择 RNG k- ϵ 模型，涡流主导流求解。模拟边界条件设置四项，旋流除砂器进水口设置为速度入口，通过 DPM 模型将颗粒离散相类型为 reflect，出砂口设置为压力出口，离散相类型为 trap，溢流口设置为压力出口，离散相类型为 escape。

(5) 空间离散方案选择二阶迎风格式，提高计算精度与准确性，压力与速度默认耦合。初始化方法选择混合初始化。



图 3-10 模型求解方案设置

Figure 3-10 Settings of the model solution scheme

(6) 假设简化：地热采出液为不可压缩流体，入口流速稳定均匀且含砂颗粒密度相同，含砂体积分含量低，不考虑颗粒碰撞以及能量损失，不考虑温度。

3.4 本章小结 (Chapter Summary)

本章分析贵州省岩溶破碎地层工程地质条件，在此基础上对旋流除砂器进行结构选型与优化。基于结构进行 CFD 仿真分析，以及网格无关性验证确定模拟关键参数。

(1) 根据旋流除砂器优化结构，通过 Space Claim 对旋流除砂器建立模型。

(2) 基于 Workbench 对模型进行进出口定义同时网格化处理和网格无关性验证，确定网格数量与网格规则性，为仿真结果的精度提供了保证。

(3) 通过 Fluent 对旋流除砂器内部旋流除砂过程进行数值模拟，建立了旋流除砂器 CFD 模拟算法，以 CFD 模型的控制方程为基础，采用 RNG k- ϵ 模型建立了旋流除砂器内部液固流场的计算模型，根据工程地质环境设置合理的边界条件。

4 复杂地层条件下旋流除砂装置分离特征及除砂工艺优化

4 Separation Characteristics of Cyclone Desander and Optimization of Sand Removal Process under Complex Formations Conditions

4.1 旋流除砂装置分离轨迹 (Separation Trajectory of the Cyclone Desander)

旋流除砂器模拟运行时,水砂混合地热采出液在动力源的作用下,从进水口沿切向以一定速度进入旋流除砂器,流体在压强梯度及离心力和斯托克斯阻力作用下,流体围绕壁面形成旋转流场同时发生径向位移,固相颗粒密度大下沉堆积,液相上升从溢流口溢出达到液固分离的效果。

根据第3章模型关键参数设置,流体入口流速为3m/s(流量:108m³/h),颗粒粒径1mm,对流体进行模拟计算,研究颗粒轨迹与迹线轨迹。

在旋流除砂模拟结束后,首先应对旋流除砂器进出口质量流率通量进行监测。质量流率表示单位时间内通过界面的流体质量,用于判断进出口流量是否满足质量守恒定律,检验装置设计及模拟的合理性。通过图4-1得出,在旋流除砂器初模拟时存在溢流口和出砂口质量流率小波动情况,可能源于初始旋流筒内部空腔影响,稳定后质量流率趋于不变。整体分析出砂口和溢流口的质量流率平稳,波动性较少,说明内部旋流基本稳定,模型参数设置合理。

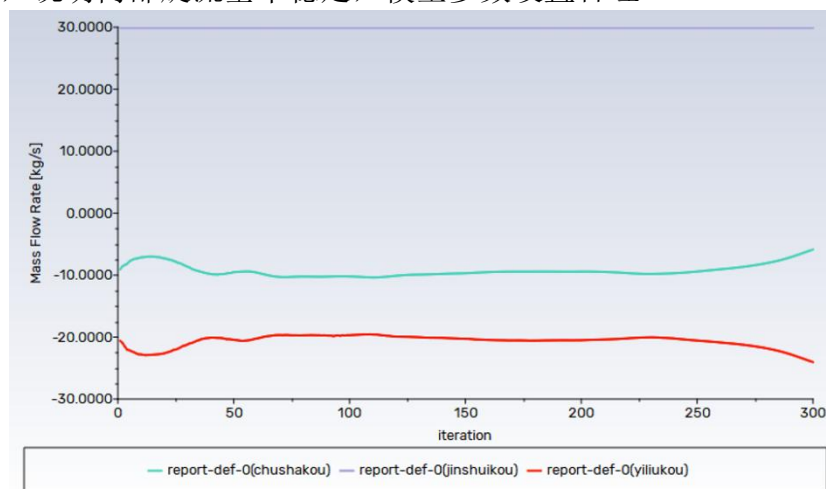


图 4-1 旋流除砂器进出口质量流率分析

Figure 4-1 Analysis of the mass flow rate at the inlet and outlet of the cyclone desander

根据旋流除砂器进出口质量流率图使用 Fluent 计算溢流口与出砂口质量流

率通量。溢流口与出砂口质量流率之和等于进水口的质量流率，满足质量守恒定律，验证了模型的正确性。



图 4-2 进出口质量流率计算

Figure 4-2 Calculation of inlet and outlet mass flow rate

4.1.1 颗粒轨迹

如图 4-3 为直径 1mm 颗粒逃逸和捕获的运动轨迹。颗粒沿进水管进入旋流除砂器旋流筒中，沿着壁面做旋转运动，到达旋流除砂器底部，在锥形段慢慢沉降，最后被出砂口捕获除去。图 4-3 清晰的模拟颗粒旋流运动全轨迹，从轨迹图中分析固体颗粒基本沉降在锥形区，被出砂口捕获，不存在颗粒从溢流口逃逸。

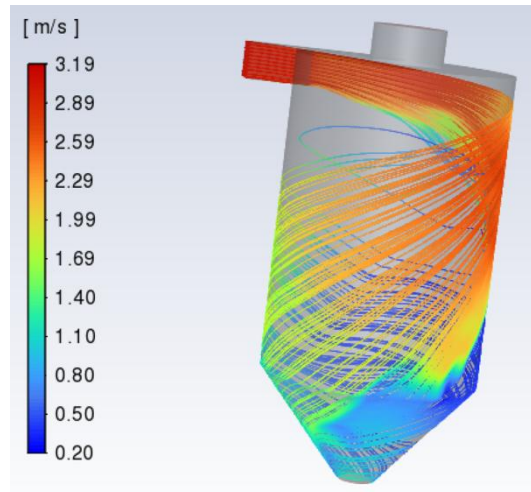


图 4-3 粒径 1mm 颗粒逃逸及捕获轨迹

Figure 4-3 shows the escape and capture trajectories of particles with a diameter of 1mm

在旋流除砂过程中，颗粒的速度发生明显的变化。颗粒流入进水口管后因入口结构设计会存在局部流速提高，进入旋流筒后，颗粒沿壁面发散做回转运动，颗粒回转路径增加，壁面的粘性作用会使得流速降低，进入锥形段后，随着半径的逐渐减小，颗粒流速呈现先增加后减小的趋势。

4.1.2 迹线轨迹

根据密度差的原理，当液相流体在一定的压强作用下，沿旋流除砂器进水口

以切向流的形式进入旋流筒，入射特征为一定曲线斜率漫射，筒内产生强烈的旋转运动，由于水的密度较小，通过离心力、重力等力的作用，表现为旋流过程中上升，由溢流口排出。如图 4-4 为旋流除砂器的迹线轨迹图，从图中可以清晰的表现出流体在旋流器内部做旋转运动，充斥旋流除砂器整体。在进水口管处流体存在局部加速，进入旋流筒内由于壁面粘性等作用旋转速度显著降低，至锥形段时存在旋流加速上升使得流体溢流流出。由于入射高度、角度等原因，存在部分流体会在旋流壁面阻力作用下，旋流次数少，会形成直接流向锥形段排出的短路流。如图 4-4 所示，进水管口上部流体呈现完整旋转运动，随着管口高度下降，流体轨迹斜率越大。

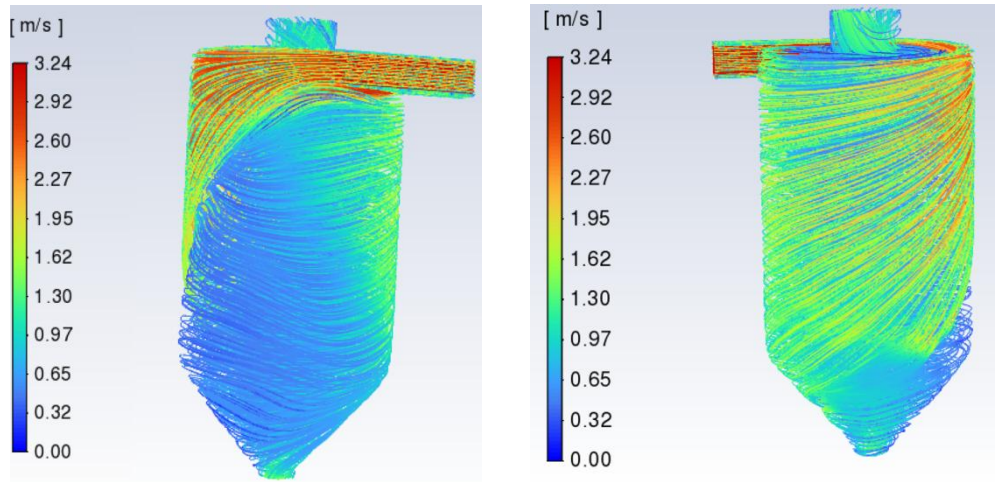


图 4-4 液相流体迹线轨迹

Figure 4-4 Flow line trajectory of liquid phase fluid

液相流体的旋流场在模拟中主要分为两部分，流体以一定曲线斜率漫射进旋流筒中，由于压强作用会首先沿壁面做旋转运动，形成外旋流场。外旋流场主要为外层流体携带颗粒做旋流运动使液固两相分离，流场流速较高。随着旋流加剧，内层流体旋流半径减小，在中心负压的作用下，内层流体受迫旋流上升溢流，形成内旋流场。内旋流场主要为流体受迫上升溢流，流场流速较低，但在溢流口结构时由于缩脉作用存在局部流速增加。如图 4-5 为旋流除砂器截面图，流场被分割为两部分，靠近壁面近端为高速外旋流场，中间为低速内旋流场，中心溢流管处出现速度聚集。

通过颗粒轨迹图与迹线轨迹图的对比，我们可以发现颗粒轨迹被包含于流场外旋迹线中，说明颗粒的分离主要依靠外旋流场作用抵达旋流除砂器底部，渐渐沉降在锥形段区域，最终被出砂口捕获达到分离的目的。

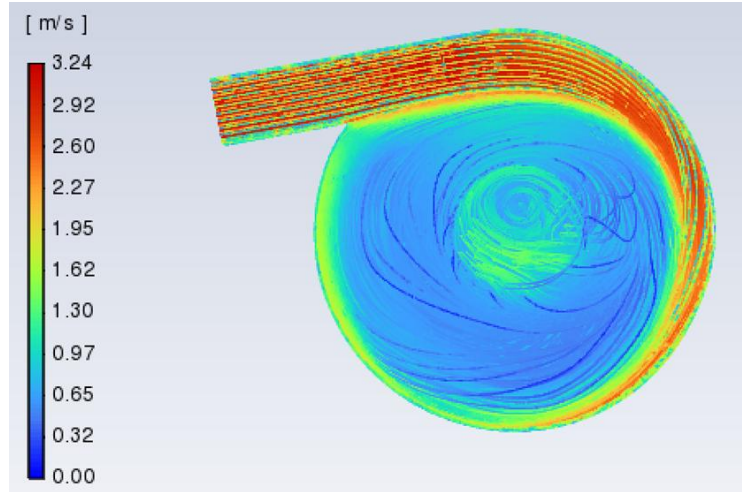


图 4-5 液相流体迹线轨迹截面

Figure 4-5 Cross-section of the flow line trajectory of the liquid phase fluid

4.2 旋流除砂装置粒级效率 (Particle Size Efficiency of the Cyclone Desander)

4.2.1 DPM 颗粒模型

DPM 颗粒模型是 ANSYS Fluent 软件中应用模拟颗粒、液泡及液滴等离散相在连续介质流体中运动的数值方法，基于欧拉-拉格朗日法追踪颗粒轨迹并计算轨迹方程。颗粒模型主要分为五类，无质量颗粒，该类型主要应用于仅跟随流体运动颗粒，广泛用于追踪气流路径；惰性颗粒，该类型考虑重力、阻力和粘性力等力的作用，常用于常规普通颗粒流动；燃烧颗粒，模拟颗粒燃烧过程中热量或质量传递路径；蒸发颗粒，追踪液滴蒸发过程；破裂颗粒，模拟颗粒分裂或液滴破碎流程。本次旋流除砂模拟中颗粒类型为砂，主要成分为 CaCO_3 ，属于二类惰性颗粒。运用 DPM 随机轨道理论^[56]，将地热采出液中的砂砾简化为球状颗粒，采出液中颗粒浓度较小，小于 10%，在模拟过程中离散相分布，忽略对流体水的影响。颗粒均匀饱满，在旋流过程中不产生变形与破碎，针对颗粒分离与未分离现象对旋流除砂器出砂口定义 DPM 模型中 Trap（捕获），对溢流口定义 Escape（逃逸），追踪旋流除砂过程中颗粒被出砂口捕获和从溢流口逃逸的数量，计算旋流除砂器的除砂效率。

4.2.2 粒级效率

评估旋流除砂器工作标准之一为分离效率，分离效率反映了所有粒径颗粒被分离数量占总颗粒数量百分比，体现旋流除砂器对总颗粒的去除能力。通过分析旋流除砂器，我们发现影响分离效率的关键因素主要为操作参数、结构参数、颗粒粒径与密度等。在实际的旋流除砂颗粒分离过程中，操作与结构参数恒定，而流体中含有大量不同粒径的颗粒，仅仅采用单一分离效率不能清楚表现不同粒径

颗粒的分离特征,因此我们通过先选择恒定粒径范围颗粒作为流体所含颗粒,计算该粒径下颗粒的分离效率即为粒级效率。通过改变颗粒粒径大小,得到不同粒径颗粒的分离轨迹,计算不同粒径颗粒的粒级效率,绘制粒级效率折线图,反映出旋流除砂器对不同粒径颗粒处理效果。

粒级效率计算公式:

$$\eta = \frac{M_{di}}{M_d} \times 100\% \quad (4-1)$$

其中, M_{di} 表示该颗粒粒径下颗粒被出砂口捕获的数量, M_d 为相同颗粒粒径下进入旋流除砂器内的颗粒数量。

旋流除砂器在旋流中针对小粒径的砂颗粒粒径粒级效率越高,证明该装置除砂能力优秀,分离性能高效。

通过 Fluent 对颗粒分离参数提取,如表 4-1 为颗粒数量追踪结果,对 1mm 粒径颗粒追踪总数量为 206,被出砂口捕获颗粒数量为 206,粒级效率达到 100%,颗粒被完全分离,验证旋流除砂器模型的正确性。

表 4-1 颗粒数量追踪结果

Table 4-1 Tracking results of particle quantity

颗粒粒径	Track (踪迹)	Escape (逃逸)	Trap (捕获)	粒级效率/%
1mm	206	0	206	100

4.3 颗粒粒径和入口流量参数变化下旋流过程中水-砂分离特征 (The Characteristics of Water-sand Separation during the Cyclone Process under the Changes of Particle Size and Inlet Flow Parameters)

在岩溶破碎地层地热井实际的地热采出液中,地层由于岩溶裂隙发育和冲蚀作用等原因产砂粒径并不均一,采出液属于含有不同粒径的颗粒混合物。因此在确定地层出砂粒径中位值后,对该中位值粒径下颗粒进行旋流除砂模拟后,还应针对不同颗粒粒径砂进行旋流模拟分析,研究模型在不同粒径下除砂特征来表示旋流除砂器的分离性能,最后通过粒级效率曲线反映旋流除砂装置设计的合理性。

不仅仅只是颗粒粒径会影响旋流除砂器分离性能,区别于传统地热储层埋藏深、压力大、地下水自循环等储热特征,贵州省岩溶破碎地层中裂隙、孔隙和断裂带密集,松散的地层使得地下水与地表水循环加速,旱雨两季地下水流量形成明显差异,对破碎地层破坏强度不同,产砂量与产砂粒径产生季节性特征,因此不同季节中地热井采出量也会产生差异,其表现于旋流除砂器入口流量存在季节性变化特征,实质是入口流速改变。

由此可见,在评价旋流除砂器分离性能指标时,还应分析颗粒粒径与入口流

量参数变化下旋流过程中水-砂分离特征，验证设计装置在实际环境的适用性。

4.3.1 颗粒粒径参数变化下旋流过程中水-砂分离特征

设置流体入口流速为 3m/s（流量：108m³/h）等其它参数不变情况下，改变颗粒粒径进行模拟。通过对贵州省岩溶破碎地层地热井实地调研，地热井出砂粒径主要分布于 0.5mm-1mm 之间，极少部分颗粒粒径为 0.5mm 以下，少部分颗粒粒径大于 1mm，颗粒粒径中位值为 1mm。经模拟粒径为 1mm 颗粒的粒级效率为 100%，颗粒粒径越大，旋流中所受离心力越大，颗粒越容易被出砂口捕获除去，因此粒径大于 1mm 颗粒粒级效率必然也等于 100%，考虑到旋流除砂器所能分离的颗粒粒径越小，分离性能越好以及实地出砂粒径分布的原因，颗粒粒径选择 0.1mm、0.2mm、0.3mm、0.4mm、0.5mm、0.6mm、0.7mm、0.8mm、0.9mm 和 1mm。0.1mm 以下颗粒存在但是含量极少不予考虑。确定颗粒粒径变化范围，保证其它参数恒定，通过 DPM 颗粒模型研究颗粒旋流轨迹和分离效率。

从图 4-6 不同粒径下颗粒旋流轨迹图我们可以发现当颗粒粒径为 0.1mm，颗粒轨迹与迹线轨迹相似，存在颗粒从溢流口逃逸轨迹，轨迹密度较高，说明旋流除砂器对 0.1mm 粒径颗粒除砂效果较差。分析 0.2mm 粒径颗粒的旋流轨迹时，溢流口的颗粒逃逸轨迹明显减少，说明随着颗粒粒径的增加，旋流分离器的粒级效率提高。当颗粒粒径为 0.3mm 时，通过分析颗粒轨迹图，溢流口处仅存在极少数颗粒逃逸，说明旋流除砂器对 0.3mm 颗粒旋流分离作用显著，初步得出结论旋流除砂器针对 0.3mm 以上粒径的颗粒能够实现基本完全分离。当对 0.4mm 粒径的颗粒验证时，溢流口不存在颗粒轨迹，颗粒逃逸数量为零，验证结论正确性。当对 0.5mm-0.6mm 粒径的颗粒进行旋流模拟时，溢流口虽然存在极少数颗粒逃逸轨迹，但基本满足旋流除砂器的分离需求，可能原因溢流口位置与尺寸恰好处于该粒径下颗粒运动轨迹附近，从而逃逸。0.7mm 以上粒径的颗粒逃逸数量为零，完全分离。整体分析不同粒径颗粒轨迹图中，旋流分离器能够有效分离 0.3mm 及以上颗粒。

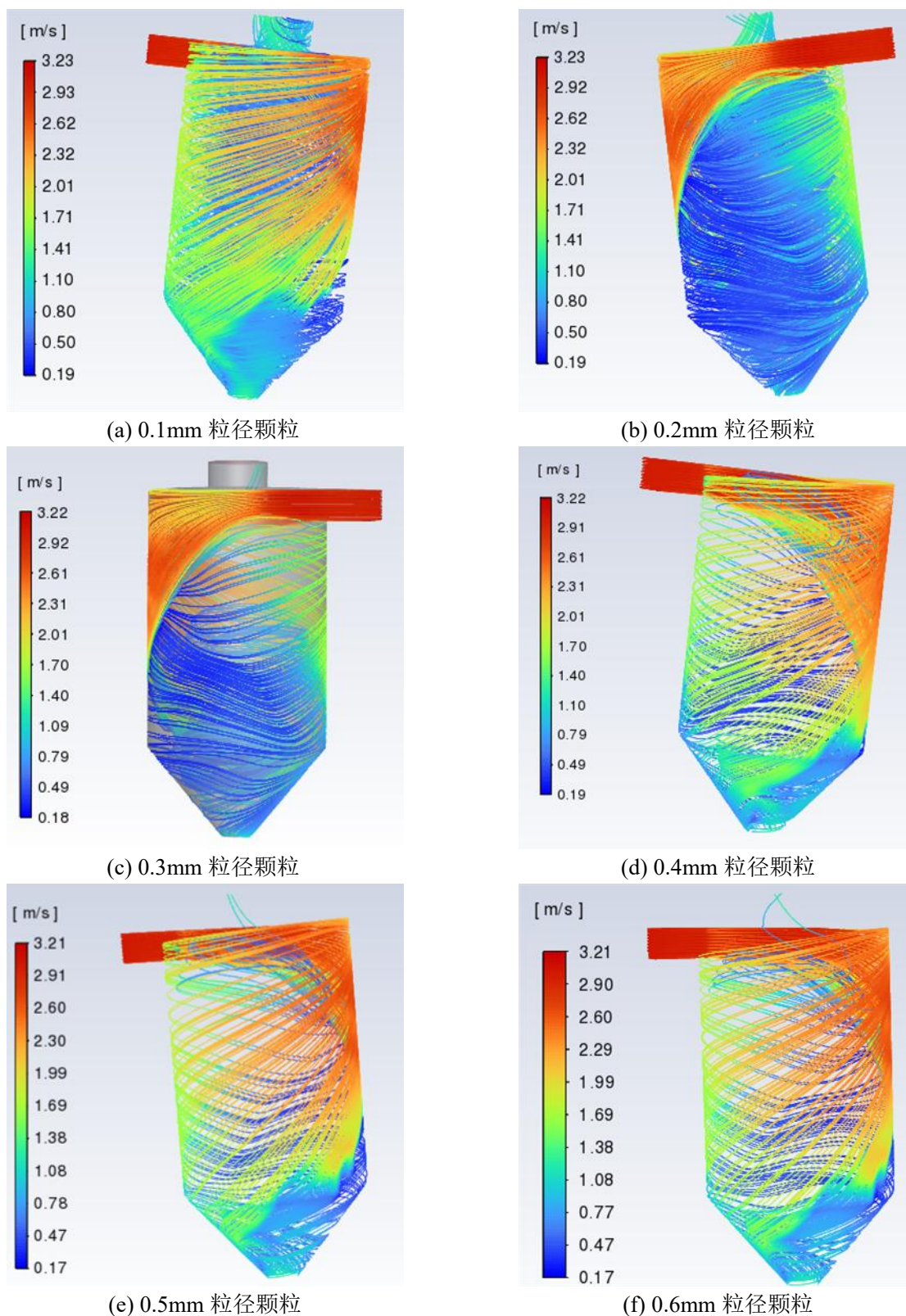


图 4-6 不同粒径颗粒旋流轨迹图（部分）

Figure 4-6 cyclone trajectory diagrams of particles with different particle sizes (Partial)

旋流轨迹图只能简单描述颗粒分离路径，并不能定量表现颗粒分离数量。通过 DPM 颗粒模型 Trap（捕获）和 Escape（逃逸）对颗粒分离特征进行定量分析。如表 4-2 所示，根据捕获与逃逸颗粒数量，计算粒级效率，绘制粒级效率折线图。

表 4-2 不同粒径颗粒的粒级效率

Table 4-2 Particle size efficiency of Particles with different particle sizes

颗粒粒径	Track (踪迹)	Escape (逃逸)	Trap (捕获)	粒级效率/%
0.1mm	206	84	122	59.22
0.2mm	206	43	163	79.13
0.3mm	206	4	202	98.06
0.4mm	206	0	206	100
0.5mm	206	2	204	99.03
0.6mm	206	2	204	99.03
0.7-1mm	206	0	206	100

根据表 4-2 绘制粒级效率折线图, 如图 4-7 所示。入口流速为 3m/s (流量: 108m³/h), 旋流除砂器的粒级效率随颗粒粒径的增大而增大, 当粒径大于 0.3mm 时, 分离效率大于 98%, 当粒径大于 0.4mm 时, 粒级效率可达 99% 以上, 除砂效果明显。根据模拟结果分析, 入口流速为 3m/s (流量: 108m³/h), 针对岩溶破碎地层地热井主要出砂粒径 0.5mm-1mm, 能够基本达到除砂效果, 验证设计装置在实际出砂粒径多变情况下的适用性。

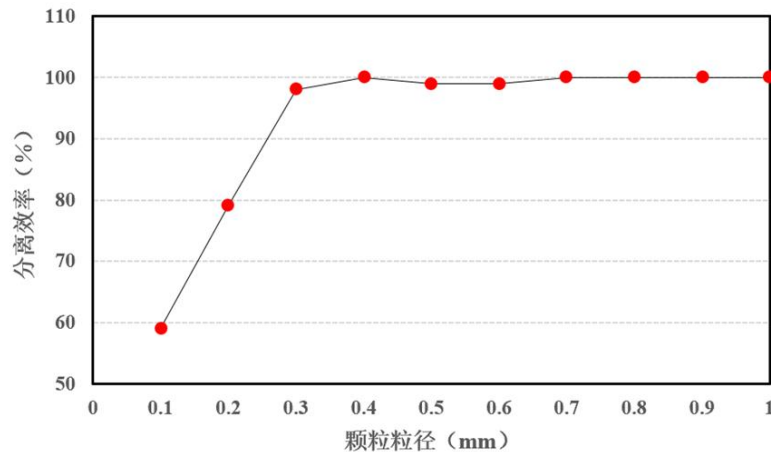


图 4-7 粒级效率折线图

Figure 4-7 Line graph of particle size efficiency

4.3.2 入口流量参数变化下旋流过程中水-砂分离特征

通过对贵州省岩溶破碎地层地热井实地调研, 该区域内单井涌水量 300~500m³/d, 单井流量变化大。在地热生产中, 为了降低成本, 采用多井集成采出液汇流于中转站模式, 采出液经中转站统一处理后利用。因此, 旋流除砂器不单单仅处理单一地热井流量, 而是对总流量进行旋流除砂。基于地热井流量设置流体入口流速分别为 1m/s (流量: 36m³/h)、2m/s (流量: 72m³/h)、3m/s (流量: 108m³/h), 进行不同粒径颗粒旋流除砂模拟, 计算各入口流量下的粒级效率, 绘制粒级效率折线图。

设置入口流速为 1m/s（流量：36m³/h），通过旋流轨迹图 4-8 和粒级效率表 4-3 得出随着粒径的增大，溢流口颗粒轨迹减少，颗粒逃逸数量锐减，粒级效率不断提高，当粒径为 0.2mm 时，分离效率达到 90%以上，粒径为 0.3mm 时，分离效率达到 98%以上，粒径为 0.4mm 及以上时，分离效率达到最佳。即使是在采出液流量较少时，针对该岩溶破碎地层产砂粒径 0.5-1mm 也能有效除去。

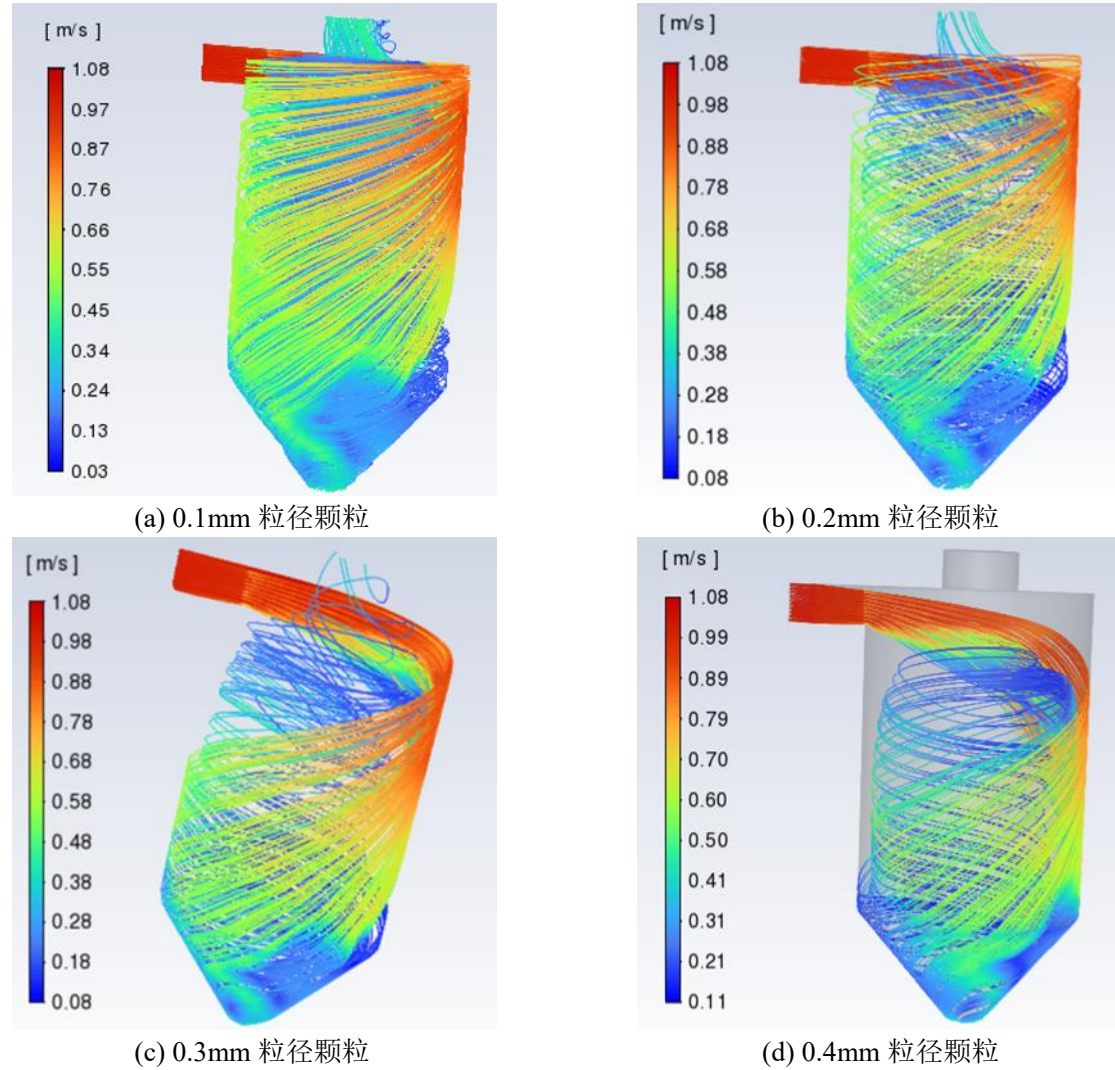


图 4-8 不同粒径颗粒旋流轨迹图（部分）

Figure 4-8 cyclone trajectory diagrams of particles with different particle sizes (Partial)

表 4-3 入口流量 36m³/h 下颗粒的粒级效率

Table 4-3 Particle size efficiency of particles at an inlet flow rate of 36m³/h

颗粒粒径	Track（踪迹）	Escape（逃逸）	Trap（捕获）	粒级效率/%
0.1mm	206	71	135	65.53
0.2mm	206	18	188	91.26
0.3mm	206	4	202	98.06
0.4-1mm	206	0	206	100

当入口流速为 2m/s（流量：72m³/h），模拟所得结果如图 4-9 和表 4-4。当粒径为 0.3mm 及以上时，溢流口处仅有少数颗粒轨迹，通过计算粒级效率，分离效率达到 98%以上，基本能够完全分离颗粒。

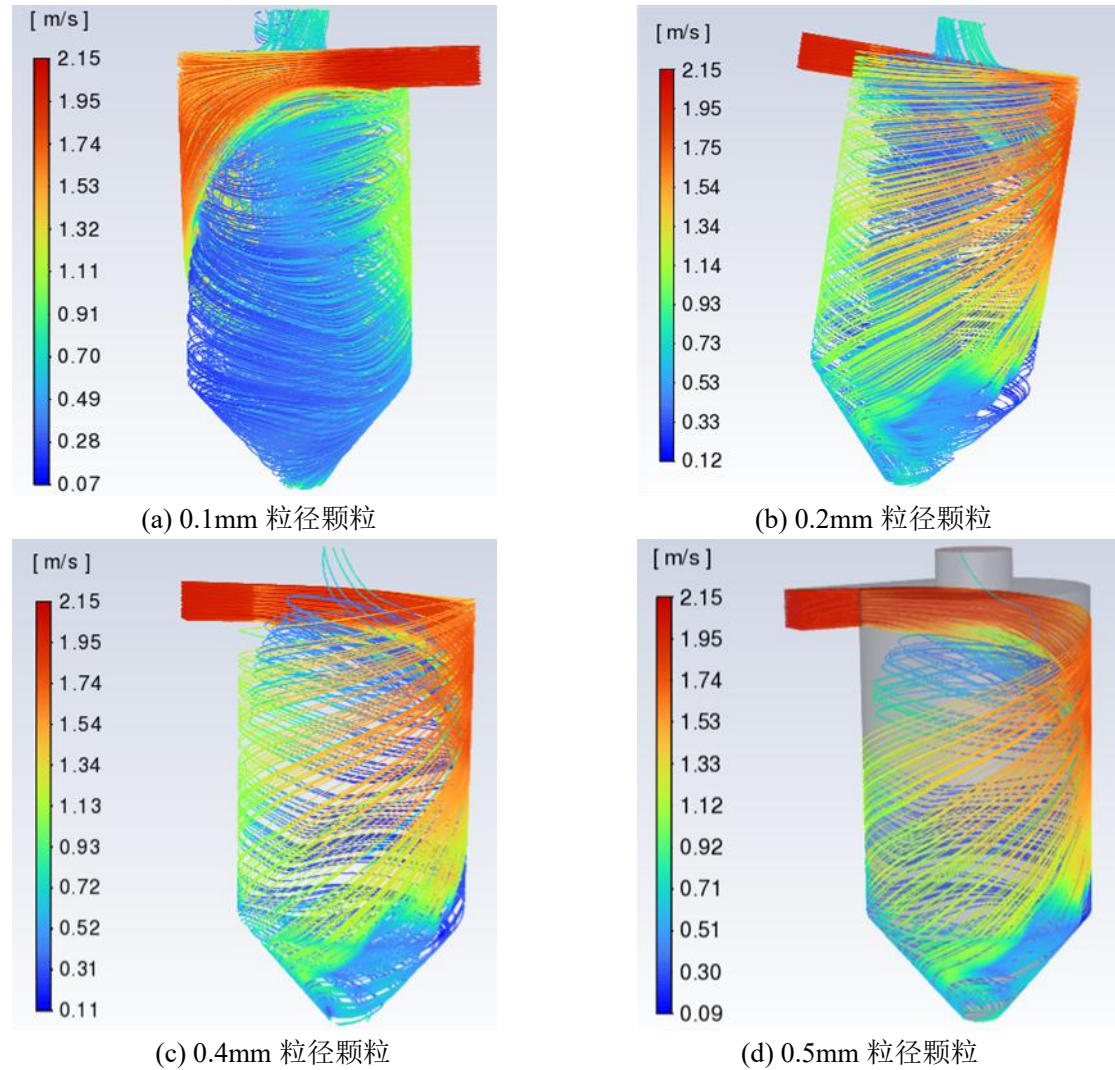


图 4-9 不同粒径颗粒旋流轨迹图（部分）

Figure 4-9 cyclone trajectory diagrams of particles with different particle sizes (Partial)

表 4-4 入口流量 72m³/h 下颗粒的粒级效率

Table 4-4 Particle size efficiency of particles at an inlet flow rate of 72m³/h

颗粒粒径	Track（踪迹）	Escape（逃逸）	Trap（捕获）	粒级效率/%
0.1mm	206	86	120	58.25
0.2mm	206	68	138	66.99
0.3mm	206	3	203	98.54
0.4mm	206	4	202	98.06
0.5mm	206	1	205	99.51
0.6-1mm	206	0	206	100

根据不同入口流速的粒级效率，绘制 1m/s（流量：36m³/h）、2m/s（流量：72m³/h）、3m/s（流量：108m³/h）下的粒级效率折线图。

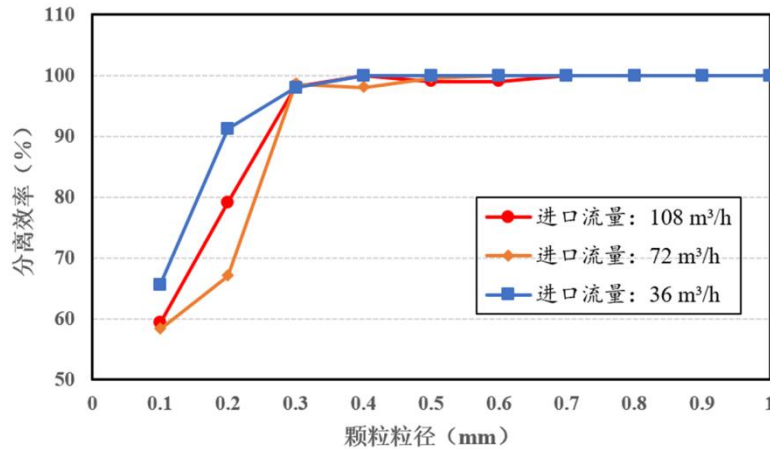


图 4-10 不同入口流量下的粒级效率

Figure 4-10 Particle size efficiency under different inlet flow rates

如图 4-10 所示为不同入口流量下旋流除砂器的粒级效率，随着颗粒粒径的增大，粒级效率也不断提高。当颗粒粒径大于 0.3mm 时，从图中可以明显看出旋流除砂器的除砂效果达到最佳，基本能够完全分离颗粒。整体分析我们可以发现当入口流量为 36m³/h 时，颗粒的总分离效率最高，尤其是在颗粒粒径小于 0.3mm 时。这是因为随着入口流量的增大，旋流除砂器内部旋流场产生的湍流增加，粒径较小的颗粒易被卷入内旋流场被携带至溢流口逃逸。当粒径为 0.2mm 时，入口流量越大，颗粒所受离心力越大，此时对颗粒离心力作用大于内部湍流作用，因此分离效率会出现提高。地热采出液的含砂粒径分布为 0.5-1mm，旋流除砂器模型能够有效除去 0.3mm 及以上的颗粒，即使面对采出液流量周期性变化问题，该装置也能较好应对，再次验证设计装置的正确性。

4.4 新型旋流除砂装置下除砂工艺优化 (Optimization of the Sand Removal Process under the New Cyclone Desander)

常规地热除砂工艺在处理岩溶破碎地层地热井会面临除砂效果差，易结垢堵塞等问题，因此在设计新型的旋流除砂装置后，还需优化除砂工艺。在工艺优化中，主要从源、采和灌三阶段分别进行稳层滤砂、旋流除砂和尾水回灌处理。

岩溶破碎地层是导致地热采出液含砂丰富的主要原因，如果能在地层中有效遏制砂砾的产生，将极大提高除砂效率，因此我们需要对地层进行稳层滤砂，即稳定岩溶破碎地层，减少颗粒产生同时过滤砂砾。如图 4-11 所示，首先是体现在地热钻井施工过程中的固井工艺，针对岩溶破碎地层段进行全井段固井，井壁垮塌掉渣的产砂来源，其次是在完井时采用绕丝筛管、桥式率水管和测流保护套筛管等结构（筛管顶部注水泥），在储热层抽采地热水时进行初步滤砂，减少地热原液中含砂量。通过钻完井工艺的优化进行稳层滤砂，不仅降低岩溶破碎地层

产砂量，还能减少因除砂工艺冗余导致的热量损失。

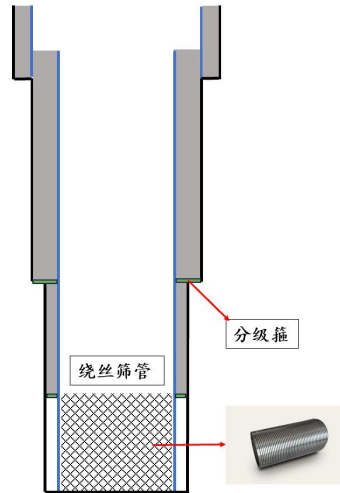


图 4-11 钻完井工艺系统优化

Figure 4-11 Optimization of the drilling and completion process system

在地热原液采出进行旋流除砂阶段，由于岩溶破碎地层中裂隙、孔隙和断裂带密集，渗透性强，不同季节采出流量形成明显差异，含砂规律也发生变化，旱季时地热采出液含砂量高，雨季时所含颗粒粒径大且含砂量增长率高，因此当流量不同时，需要合理规划旋流除砂设备运行以提高除砂精度，防止设备限流导致热资源浪费或因流量少导致旋流离心力较小的除砂效率低。针对这一难题我们可以采用循环旋流除砂工艺或者梯级旋流除砂工艺，同时在旋流除砂过程中应当对设备进行保温处理，如外附泡沫层保温。如图 4-12，当处理流量不足但含砂量高的地热采出液时，循环旋流除砂工艺通过小筒径旋流除砂器提高除砂精度，采用串联连接多次旋流除砂减少采出液中的颗粒。当处理流量大且颗粒粒径范围大的地热采出液时，可优先采用处理量大的大筒径旋流除砂器快速分离大颗粒，再将预处理采出液分流导入除砂精度更高的旋流除砂器进行小颗粒旋流分离，既满足处理流量的需要，又能高效分离小粒径颗粒。

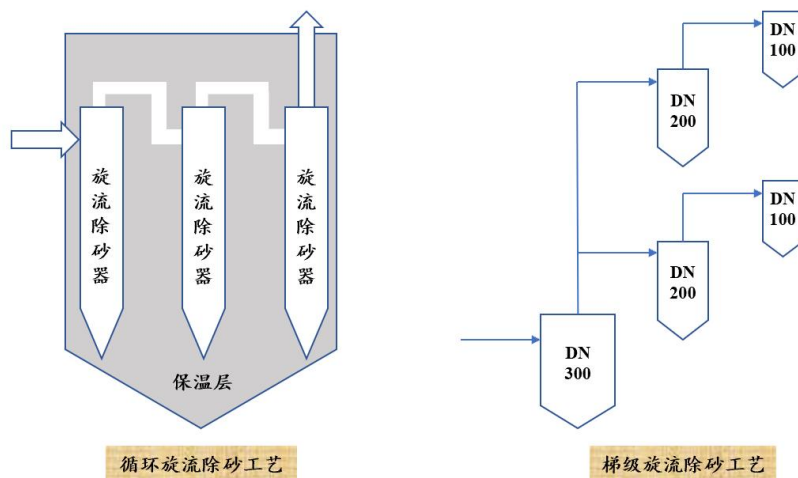


图 4-12 旋流除砂工艺优化

Figure 4-12 Optimization of cyclone sand removal process

尾水回灌既是维持储热层压力和维持储热层中能量质量守恒的必要手段,也是地热资源开发和利用过程中关键环节之一,尾水回灌的水平越高,其能利用的热资源越多。常规的地热井开发中,需要对地热尾水中的悬浮物、泥砂、气体和微生物进行处理,防止回灌热储层堵塞、管道沉积、滤网堵塞等问题,具有较高处理成本。而岩溶破碎地层在尾水回灌则具有得天独厚的优势,地层中岩溶裂隙、孔隙和断裂带密集,破碎地层广布,因此回灌过程中尾水中的颗粒堵塞作用基本可以忽略不计,能够缩减尾水回灌工艺步骤,显著降低成本。在整个地热利用流程中,采用封闭性处理,减少原液与外界接触,在循环换热后可通过初效过滤除去气体及残渣即可进行尾水回灌。

4.5 本章小结 (Chapter Summary)

通过对旋流除砂器模拟结果颗粒旋流轨迹和迹线轨迹分析,对旋流除砂器的分离性能进行了探究,研究了不同流量下粒级分离效率,最后基于岩溶破碎地层条件下新型旋流除砂器的运行对旋流除砂工艺进行优化。

(1) 通过质量流率的分析,初步验证了模型设计的合理性,为接下来不同颗粒粒径与入口流量的仿真模拟提供指导。

(2) 入口流速为 3m/s (流量: 108m³/h) 时,当颗粒粒径大于 0.3mm 时,旋流除砂器能够实现基本分离,地层产砂分布为 0.5-1mm,位于除砂粒径范围之内,验证模型的正确性。

(3) 在不同流量下 1m/s (流量: 36m³/h)、2m/s (流量: 72m³/h)、3m/s (流量: 108m³/h),进行不同粒径颗粒旋流除砂模拟。当颗粒粒径大于 0.3mm 时,即使流量不同,颗粒的整体分离效率都接近 100%,除砂效果最佳。其中入口流速为 1m/s (流量: 36m³/h) 时,在小粒径颗粒的旋流除砂过程中总分离效率最高,针对小粒径颗粒分离效果最好。

(4) 针对岩溶破碎地层地热井,对开发利用过程中的源、采和灌三阶段进行了稳层滤砂、旋流除砂和尾水回灌工艺优化。

5 结论与展望

5 Conclusions and Prospects

5.1 主要结论 (Main Conclusions)

复杂地层地热井除砂是地热开发利用领域的主要难题。本文基于贵州省岩溶破碎地层工程地质条件,对旋流除砂装置进行结构参数设计与除砂工艺优化。采用 ANSYS 系列软件进行 CFD 仿真模拟, Space Claim 对旋流除砂器进行建模, Workbench 创建模型进出口定义并网格化处理,最后通过 Fluent 对旋流除砂器旋流除砂过程进行数值模拟,得到了不同粒径与入口流量下旋流除砂器的性能特征及规律。

(1) 明确岩溶破碎地层在地热旋流除砂开发中的难点,即碳酸盐岩类地质、季节性水量和生产设备残渣,导致地层出砂量大,粒径小,采出液流量变化大等,对旋流除砂器除砂精度及处理量要求高。

(2) 基于传统地层与岩溶破碎地层出砂特征,对旋流除砂器结构参数进行优化,设计完成后通过 Space Claim 建立旋流除砂器模型, Workbench 创建模型进出口定义并网格化处理,建立了旋流除砂器 CFD 模拟算法,以 CFD 模型的控制方程为基础,在 Fluent 采用 RNG k- ϵ 模型建立了旋流除砂器内部液固流场的计算模型,使用 DPM 颗粒模型追踪颗粒运动轨迹与数量。

(3) 通过模拟研究了岩溶破碎地层条件下旋流除砂装置分离特征。旋流除砂器的粒级效率随着颗粒粒径的增大而增大,当颗粒粒径大于 0.3mm 以上时,旋流除砂器能够基本达到分离效果,面对地层出砂 0.5-1mm 的除砂特征,能够达到很好的分离效果,验证了模型设计的正确性。

(4) 在旋流除砂器的模拟中,当入口流量为 36m³/h 时,颗粒的总分离效率最高,尤其是在颗粒粒径小于 0.3mm 时。随着入口流量的增大,旋流除砂器内部旋流场产生的湍流增加,粒径较小的颗粒易被卷入内旋流场被携带至溢流口逃逸。当粒径为 0.2mm 时,入口流量越大,颗粒所受离心力越大,此时对颗粒离心力作用大于内部湍流作用,因此分离效率会出现提高,进而验证了旋流除砂器在流量变化下的分离性能,能够处理流量波动难题。

(5) 在新型旋流除砂装置的应用下,针对岩溶破碎地层地热井出砂特征,对开发利用过程中的源、采和灌阶段进行了稳层滤砂、旋流除砂和尾水回灌工艺优化。

5.2 不足与展望 (Deficiencies and Prospects)

(1) 本次旋流除砂模拟中颗粒介质为 CaCO_3 ，在实际除砂中，该类颗粒只是地热采出液含砂主要颗粒，还存在其他物性颗粒，需要对不同类型颗粒混合后旋流除砂效果进行研究。

(2) 由于时间关系，旋流除砂器的优化仅改变结构参数，后续还需研究旋流筒内增加螺旋膛线对内部旋流场的影响特征。

(3) 未考虑地热采出液中气体和气泡对旋流除砂器的分离性能影响，后续可以增加气体参数条件，研究气液固三相流的旋流除砂效果。

参考文献

- [1] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 1-9.
- [2] 郭旭升, 计红梅. “双碳”目标引领地热产业发展[N]. 中国科学报, 2023-09-20(003).
- [3] 高华. 技术创新与我国新能源产业发展研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2023.
- [4] 乔思伟, 郭锋, 张舰. 推进地热开发利用助力实现“双碳”目标[N]. 中国自然资源报, 2022-11-14(003).
- [5] 崔静云. 我国地热资源开发利用现状与发展建议[J]. 内蒙古科技与经济, 2022, (22): 90-91.
- [6] 曹锐, 多吉, 李玉彬, 等. 我国中深层地热资源赋存特征、发展现状及展望[J]. 工程科学学报, 2022, 44(10): 1623-1631.
- [7] 刘晓慧. 高质量开发利用地热能助力美丽中国建设[N]. 中国矿业报, 2024-01-18(001).
- [8] 王希, 戴小河. 发力供暖保供, 国资央企在行动[N]. 新华每日电讯, 2024-11-22(005).
- [9] 高小荣. 做地热能开发利用的领军企业[J]. 中国石化, 2018, (11): 54-55.
- [10] 高小荣. 打造“地热+清洁能源集成”样板[J]. 中国石化, 2021, (08): 47-48.
- [11] 王思维. 地热资源的地理分布与勘探[J]. 内江科技, 2021, 42(09): 20+18.
- [12] 王亮, 张嘉玮, 陈国勇, 等. 贵州中酸性隐伏岩体圈定与找矿意义[J]. 地质与勘探, 2020, 56(02): 387-402.
- [13] 胥越阳, 徐亚田, 蒋来. 贵州中低温地热发电可行性研究[J]. 山西电子技术, 2017, (01): 93-96.
- [14] 易世友, 李强, 陈刚, 等. 贵州省地热流体资源可开采资源量研究[J]. 地下水, 2024, 46(01): 85-88.
- [15] 陈正山. 贵州理疗热矿水(温泉)形成机理及其对人群健康的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [16] 曹卫刚, 陈治, 方永坤, 等. 贵州省地热资源特征及勘查开发探讨[J]. 冶金管理, 2020, (09): 100-101.
- [17] 赵华宣, 王玉军, 陈涛, 等. 贵州碎屑岩层地热深井空气潜孔锤钻进技术应用研究[J]. 地质与勘探, 2016, 52(05): 942-949.
- [18] 刘志涛, 田洋阳, 宋伟, 等. 基于响应面法的旋流器直径与处理量关系研究[J]. 石油机械, 2021, 49(12): 89-97.
- [19] N. Mundhenk, P. Huttenloch, B. Sanjuan, T. Kohl, H. Steger, R. Zorn. Corrosion and scaling as interrelated phenomena in an operating geothermal power plant[J]. Corrosion Science, 2013, 70: 17-28.

- [20] 王胜, 郑春峰, 张曜之, 等. 旋流式气液分离器结构优化及试验研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(03): 61-63+70.
- [21] 林子莎. 微型旋流器分离性能数值模拟和试验研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
- [22] 任向海, 彭振华, 张园, 等. 水力旋流器模态测试与振动特性分析[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(2): 222-225.
- [23] 王烨堃, 杨金堂, 于普良, 等. 针对极群组破碎分离水力旋流器参数化研究[J]. 机械设计与制造, 2020, 9: 140-143.
- [24] 姜兰越. W 型结构旋流器内多相流流动特性研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
- [25] Zhao B, Su Y. Particle size cut performance of aerodynamic cyclone separators: Generalized modeling and characterization by correlating global cyclone dimensions[J]. Journal of Aerosol Science, 2018, 120.
- [26] Azadi M, Azadi M, Mohebbi A. A CFD study of the effect of cyclone size on its performance parameters[J]. Journal of hazardous materials, 2010, 182 (1-3): 835-841.
- [27] Lamskova Mariya, Filimonov Maksim, Novikov A. E., Samofalova, L., Pavlova, S. Modeling of the separation for system the liquid-solid in the battery of hydrocyclones[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1278(1): 012011.
- [28] Li F, Liu P, Yang X, et al. Numerical analysis on the effect of combined curve tapered segment on the flow field and separation performance of hydrocyclones[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, (5): 47.
- [29] Tian Jinyi, Ni Long, Song Tao, Shen Chao, Yao Yang, Zhao Jianing. Numerical study of foulant-water separation using hydrocyclones enhanced by reflux device: Effect of underflow pipe diameter[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 215(15): 10-24.
- [30] Ni Long, Tian Jinyi, Zhao Jianing. Experimental study of the effect of underflow pipe diameter on separation performance of a novel de-foulant hydrocyclone with continuous underflow and reflux function[J]. Separation and Purification Technology, 2016, 171(17): 270-279.
- [31] Ni Long, Tian Jinyi, Song Tao, et al. Optimizing geometric parameters in hydrocyclones for enhanced separations: a review and perspective[J]. Separation & Purification Reviews, 2019, 48(1): 30-51.
- [32] Yang Xinghua, Yang Guanghui, Liu Peikun, Li Xiaoyu, Jiang Lanyue, Zhang Jiashun. Study on the desliming performance of a novel hydrocyclone sand washer[J]. Separations, 2022, 9(3): 74.
- [33] 赵立新, 王兼, 罗雅君, 等. 溢流管结构对三相分离器分离效率的影响[J]. 流体机械, 2014, 3: 5-9.

- [34] 张彩娥. 基于流场特性的水力旋流器参数优化研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
- [35] 赵盼婷. 超高压除砂器旋流筒结构对除砂性能的影响[D]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- [36] Azadi M, Azadi M. An analytical study of the effect of inlet velocity on the cyclone performance using mathematical models[J]. Powder Technology, 2012, 217: 121-127.
- [37] Wu Zaihai, Qi Zhaojun, Yu Lu, Kou Yunpeng, Luan Liming, Yang Jiguang, etc. Influence of taper angle on the inner field and separation performance of a hydrocyclone[J]. International Journal of Coal Preparation & Utilization, 2022, 1: 1-17.
- [38] Khasani, Febiatmoko, Albertus Whisnu Luky, Indarto, et al. Numerical simulation on the separation process of liquid-solid two-phase flow in the hydrocyclone separator applicable in geothermal power plant[C]. AIP Conference Proceedings, 2020, 2248(1): 1-12.
- [39] 陈帅朋. 老旧水厂平流池强化沉淀技术的开发及应用[J]. 净水技术, 2024, 43(S2): 35-42+49.
- [40] 王兴旺, 徐孝轩, 党伟, 等. 竖流式沉淀池内流动与污泥沉积特性模拟[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(14): 5963-5968.
- [41] 储昭亮, 刘莹, 侯锋, 等. 100 μm 砂粒在精细除砂一体化设备中的沉降模拟[J]. 宿州学院学报, 2024, 39(03): 22-27.
- [42] 刘梁, 刘伟华, 刘智晓. 城市污水含砂特征及不同沉砂池除砂效率研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39(21): 61-66.
- [43] 焦金刚, 杨向前, 郭华. 钻井液负压过滤装置筛网运移速度研究[J]. 化工管理, 2021, (06): 7-8.
- [44] 任小庆, 高小荣. 地热井滤水管筛网挡砂效果研究[J]. 天然气与石油, 2018, 36(05): 69-74.
- [46] 邢雷, 赵立新, 蔡萌. 旋流分离及同井注采技术[M]. 北京: 化学工业出版社.
- [47] 蔡云. 油井出砂机理分析及防砂措施研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(01): 184-185.
- [48] 侯锋, 周晓, 王洪臣, 等. 喀斯特地区污水含砂特征及除砂工艺优化研究[J]. 给水排水, 2023, 59(05): 25-31.
- [49] 刘道银, 王利民. 计算流体力学基础与应用[M]. 南京: 东南大学出版社.
- [50] 孙召政. 不同湍流模型在跨声速压气机数值模拟中的应用研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2024.
- [51] 范福强, 邢素霞, 张俊举. 基于湍流模型的飞行器温度场数值仿真研究[J]. 激光与红外, 2024, 54(05): 766-773.
- [52] 陈俊宝, 李伟, 胡敬宁, 等. WA-DES 湍流模型在喷水推进泵数值预测中的适用性研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2025, 56(02): 756-770.

- [53] 王爽. 水-砂旋流器液固分离数值模拟及结构优化[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2017.
- [54] 张俊, 刘浩伟, 程果锋, 等. 水力旋流器液固两相流场特征及结构优化[J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(06): 1418-1428.
- [55] 尚江涛, 马淑花, 欧彦君, 等. 旋流器底流口直径对特殊矿浆体系分离影响研究[J/OL]. 过程工程学报, 1-11[2025-04-17].
- [56] Mahdavi M, Sharifpur M, Meyer J P. Simulation study of convective and hydrodynamic turbulent nanofluids by turbulence models[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 110: 36-51.

翻译部分

英文原文

An assessment of prospects of geothermal energy in India for energy sustainability

Susmita Goswami , Abhishek Kumar Rai

Centre for Ocean, River, Atmosphere and Land Sciences,

Indian Institute of Technology Kharagpur, Kharagpur, 721302, WB, India.

Abstract: The search for indigenous, renewable, environment-friendly, and sustainable energy resources has increased globally during the past few decades. Geothermal energy is one such ubiquitous source of energy, having the potential to become an alternate energy resource with a reduced carbon footprint. In this study, eight crucial characteristic parameters, i.e., heat flow, thermal gradient, Curie point depth, lithology, basement depth, crustal thickness, and seismicity, were integrated into a multi-criteria decision model framework to identify areas that may have the potential for geothermal energy in India. The weights of various parameters estimated using AHP are in the order of heat flow (~ 0.252), followed by the Curie point depth (~ 0.195), thermal gradient (~ 0.173), and crustal thickness. Our analysis indicates that the geothermal province in the Himalayas (including the NW and NE regions), SONATA lineaments, central parts, and some parts of the west coasts and Mahanadi graben may have better prospects of geothermal energy compared to other tectonic provinces. We find that $\sim 14.86\%$, and $\sim 21.98\%$ of the study region have extremely high to high geothermal potential. About $\sim 27.18\%$ of the region have medium geothermal prospects, whereas $\sim 11.78\%$ and 24.20% of the region have very low to low potential for geothermal energy.

Keywords: Geothermal energy; Hot-springs; AHP; MCDM; India

1. Introduction

Energy is a basic necessity for developing countries and serves as a major driver of macroeconomic growth and overall development. However, various types of energy resources, their exploration and production process, and usages have varied impact on the environment. Recent studies indicate that fossil fuels such as petroleum, coal, and gas are depleting at a faster pace, besides polluting the atmosphere, causing climate change, and regional acidification of rainfall. Similarly, in case of nuclear energy, storage, and disposal of high-level radioactive waste is a matter of great concern. Therefore, during the past few decades, there has been a lot of interest in exploration and exploitation of environmentally friendly, relatively green, and sustainable energy resources such as geothermal, ocean wave energy, wind and solar energy, etc. Geothermal energy extraction is becoming more and more popular as an unconventional alternate energy resource, primarily because it is clean and relatively pollution-free, ubiquitous, and inexhaustible energy resource.

Geothermal energy accounted for only 0.1 % of the world's primary energy supply in 2008, but projections suggest that it might meet ~ 3 % of global power demand in the future, and ~ 5 % of global heating demand by 2050. By 2050, geothermal energy is likely to supply 13 GW of electrical power, and 70 GW of thermal power to worldwide grids, meeting ~ 3-5 % of the world's energy needs. During 2021, geothermal electric generation totalled 96552 GWh, or 0.34 % of global electric output, and 0.87 % of global clean energy generated. Continuous efforts are being made to harness geothermal energy due to its abundant availability at optimal, economically feasible subsurface depths at various locations. The latest pattern shows impressive growth in yearly energy usage primarily due to improvements in geothermal heat pump installations globally, even though they have a low capacity of 0.245. The government in India has also set an ambitious target of generating 500 GW of renewable energy by 2030, which is one of the largest expansion plans for renewable energy in the world, and represents ~ 40 % of the country's entire installed power capacity. Although the government's efforts have reduced energy shortages and electrified over 99 % of households, India's power grids are still stressed and lag behind many industrialized countries in reliability and per capita usages.

Although geothermal energy is being seen as a promising renewable energy resource, its exploration, exploitation, and applications have multi-dimensional sustainability considerations. Traditionally, geothermal heat sources are detected by surface indicators such as surface hot steams, hot springs, geysers, fumaroles, etc. Such surface manifestations of geothermal energy are numerous and are scattered on every continent. Various mechanisms may be responsible for

geothermal activity in any region depending on the tectonics of the region. In general, the presence of a magma chamber heats the rocks in the subsurface, and the heat flows out through the deep-seated faults, besides elevating the temperature of the groundwater in its contact, which is in turn manifested as hot springs at the surface. Apart from volcanic-originated hot springs, there are numerous non-volcanic hot springs distributed in tectonically stable regions, such as West Malaysia, South Australia, Thailand, Japan, Indonesia, Zambia, and India. The average heat flow in the continental crust is about $65 \pm 1.6 \text{ mW/m}^2$. The main source of subsurface heat in the continental part is the decay of radioactive isotopes such as U, TH, and K. Although a lot of geothermal reservoirs are buried deep underground with no surface manifestation, geothermal heat energy can rise to the surface in the form of hot springs in areas where deep fluids percolate deeper in the subsurface and gets heated under normal geothermal gradient. In areas without volcanism or magmatic activity, the spring waters are relatively low temperatures ($<100^\circ\text{C}$), where the deep penetrating groundwater through fractures is heated at depths under the normal geothermal gradient (i.e., 30°C/km), or rise in temperature of the aquifer due to disintegration of radioactive decay in the basement rocks. The rising water also interacts with surrounding rocks, thus its hydrogeochemical characteristics may be different from hot springs originating in volcanic areas. The region is affected by deep-seated faults that carry the hot water to the surface.

India is the third-largest energy consumer in the world, relying on fossil fuels for 80 % of its energy. Rapid industrialization and population growth have surpassed India's energy production, causing an energy crisis. The outflow of foreign currency for imports of fossil fuel is slowly becoming difficult to handle by the exchequer. Therefore, finding an alternate energy source that may be used locally, may be advantageous for local economic activities. Due to the abundant availability of hydro and thermal power, India's geothermal resources have been largely underexplored and underdeveloped. However, due to growing interest in alternative resources, pilot projects for exploitation of subsurface geothermal energy have been installed at several places such as the Cambay, Puga Valley of Ladakh, and Tatapani (Chhattisgarh). Additionally, a trial project is running at Manuguru, Andhra Pradesh, and Ladakh for the production of commercial geothermal energy. According to some estimates, India has a total geothermal energy potential of over 10000 MW, with the Himalayan zone alone having a potential for more than 134 MW.

Reduced fossil fuel usage in the energy industry is required to achieve the least amount of environmental damage, economic savings, and energy independence. The multi-criteria decision models (MCDM) have been used for finding the best answer for academics, decision-makers, stakeholders, banks, businesses, and local communities. In solving energy-related

decision-making issues involving various competing criteria and objectives, MCDM techniques can be helpful. Over the past few years, MCDM has been widely used for various purposes such as resource allocation, planning, policymaking, and management. Several studies have used different types of MCDM techniques such as the fuzzy TOPSIS methods in a variety of problems. Several renewable and non-renewable energy generation systems were evaluated and ranked using various other MCDM techniques. Furthermore, the AHP and GIS methods have been used to detect the shallow subsurface reservoir condition and identify the most dominant factors that influence the geothermal system in Europe.

The occurrence of geothermal activity at various locations affect various subsurface geophysical parameters such as change in geothermal gradient, heat flow values etc. Furthermore, the presence of geothermal energy is further facilitated by the shallow depth of the basement, curie point depth, network of faults and fractures, etc. This makes the problem of identifying geothermal prospects at any location, a multi-criteria decision model problem. The Analytic Hierarchy Process (AHP) is one of the most popular multi-criteria decision-making techniques for organizing and analyzing such challenging problems.

The current study aims to identify potential geothermal locations in India using multi-criteria decision method (MCDM). In this study, we use the multi-criteria decision model and GIS technique to study and map India's geothermal potential zones. This novel strategy uses GIS data to analyse geothermal potential over wide geographic areas, unlike costly and spatially-constrained borehole-centric methods. The results of this study might be helpful in searching geothermal energy, exploration, and exploitation activity in the study region, and also in other parts of the world. The details of the methodology, analysis, and results are discussed in the following sections.

2. Study area

The hot springs in India are distributed in various geologic provinces (Figs. 1 and 2). Recent studies have identified more than 400 geothermal springs with surface temperatures varying between 25 °C and 100 °C, located between longitudes of 8°4' - 37°6' north and latitude 68°7' - 97°25' east respectively (Fig. 1). In India, majority of geothermal springs are medium to high temperature (125 °C - 200 °C), and lowenthalpy fields (less than 100 °C). The estimated total geothermal energy potential in India is more than 10000 MW, out of which the Himalayan province has a capacity of more than 134 MW. In India, most of the geothermal sites can be placed into a few main tectonic settings i.e., a) the Himalayan zone which is a continental collision zone, b) the Himalayan foredeep area or the Siwaliks, and c) the peninsular India region

particularly near the SONATA region and Gondwana provinces besides hot-springs located in the east and west-coasts. Furthermore, based on the heat flow, geothermal gradient, and tectonic settings seven major geothermal provinces were identified, i.e., a) Himalaya Geothermal Province, b) West Coast Geothermal Province, c) Gujarat-Rajasthan Geothermal Province, d) Sohana Geothermal Province, e) Godavari Geothermal Province, f) Mahanadi Geothermal Province, and g) SONATA Geothermal Province, which are briefly discussed below.

The Indo-Tsangpo collision suture zone (ITSZ) in the northwest Himalayas (Fig. 2) has deep-seated fractures of Precambrian crystalline rocks bounded by the crystalline axis and Central thrust, and sedimentary-metasedimentary sequences are intruded by Ladakh granite and Chumathang granite. More than 100 geothermal sites located in Himalaya Geothermal Province exhibit high-temperature gradients ($> 100 - 200$ °C/km) and high heat flow of more than $150 - 200$ mW/m² associated with Tertiary magmatism and metamorphism. The inter-plate tectonics along the western coast and the West Coast fault may be the reason for aligned geothermal activity. This region belongs to a failed rift and was also related to one of the largest flood volcanic eruptions (~ 66.25 ma) in the world. Most of the springs in the western Indian region appear to be controlled mostly by fault and fracture NNW-SSE lineaments of post-Trappean dykes. The region encompasses a broad high-heat flow area, known as the West Coast thermal anomaly. The Cambay Graben province (Fig. 2) is a $200 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ area with moderate temperature gradients of 40 ± 15 °C and heat flow of 75 ± 18 mW/m², extending northward. The Aravalli province lies towards the eastern parts of Rajasthan (including North Cambay and Sohana) where the lithological age ranges from Archean to Recent.

The Son-Narmada-Tapti lineament (SONATA) zone (Fig. 2) is characterized by a basement depth of more than 2.5 km and a thinner crust (33 - 38 km). Bakreswar geothermal springs are in the extreme eastern parts of SONATA in peninsular India. The presence of deep-insulated granitic igneous bodies under Gondwana makes SONATA one of the best-enhanced geothermal systems in the country, and temperature gradient ranging from 40 °C/km to 120 °C/km, and heat flow values varying from 70 to 139 mW/m². On the other hand, both the Godavari and Mahanadi geothermal provinces (Fig. 2) belong to the late Tertiary to Quaternary periods or in the post-Gondwana stages. The faults are oriented in the NW-SE direction along the Gondwana graben. The spring temperature of the Godavari geothermal province (Fig. 2) varies from 30 to 67 °C and the geothermal gradient is 45 °C/km and heat flows are about 70 - 100 mW/m². The springs in Odisha belong to Mahanadi Geothermal Province, where the spring orientation trend is along the NNE-SSW lineaments in the Precambrian terrain. Compared to other geothermal provinces Mahanadi geothermal province is one of the least explored.

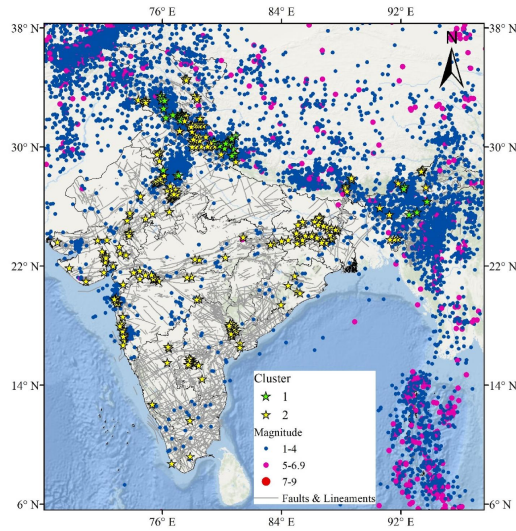


Fig. 1. Map of the study area.

Major lineaments are shown by thin gray lines. Geothermal hot springs, clustered in 2 groups (based on hydrogeochemical characteristics), are shown by green and yellow stars.

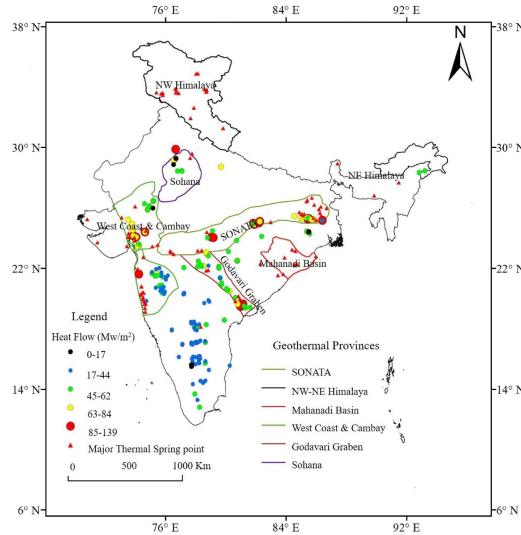


Fig. 2. Map of major Geothermal province of India.

3. Methodology

The mathematical approach which is used for evaluating multi-parametric problems is widely known as the Multi-Criteria Decision Model (MCDM) technique. This approach helps in analyzing a problem's complexity and evaluating various solutions based on the appropriate choice of options. The various criteria are typically normalized and weighted according to their relative significance. The alternatives are then assessed and ranked based on how well they meet the criteria, allowing decision-makers to make optimal decisions. MCDM has become an indispensable instrument for addressing complex decision problems by considering multiple, frequently conflicting objectives and criteria and ultimately aiding in selecting the most appropriate alternative. Depending on whether criteria trade-offs are permitted, MCDM methods

can be categorized as compensatory or non-compensatory. The sensitivity analysis strengthens the robustness of the effectiveness of a decision. Understanding the relative importance of various parameters necessitates an expert's view, which might occasionally result in some uncertainties. The impact of various parameters on the result can be easily analyzed using the MCDM. Furthermore, the geographic information system (GIS) provides a platform for the decision-maker to examine and assess the desirability of various choices.

The Analytic Hierarchy Process (AHP) method is a weight estimation method, that has been used in this study for finding the geothermal prospects in India. The eight thematic parameters such as heat flow, thermal gradient, sediment thickness, crustal thickness, structural density, earthquake density, lithology, and Currie point depth (CPD), which are the main parameters and are likely to have a major impact on geothermal prospects have been used. This approach assesses the priority of the criteria included in a challenging decision-making problem using a set of pairwise comparison matrices and a hierarchical framework. The pairwise comparison matrix is built using the criterion scores and is one of the processes in this methodology (Table 1). The criteria score is based on expert knowledge and/or published literature, and it goes from 1 to 9. Major influencing elements have a direct impact on groundwater potentiality, whereas minor influencing factors have an indirect impact. Then the normalized matrix is used to evaluate the criteria weights ($w_1 \dots w_n$) under the constraint that $\sum_{j=1}^n W_j = 1$; and $W_i = \sum X_{ij} W_j$ where X_{ij} represents the i th class rank for the j th layer, and W_j represents the weight of the j th layer.

Various thematic layers as discussed earlier have been taken into consideration to evaluate the geothermal prospects of India, e.g. a high geothermal heat flow suggests the greater possibility of the occurrence of a subsurface geothermal energy source. Similarly, high geothermal gradient, low curie point depth, low basement depth, etc. have impacts on the availability of geothermal energy in the subsurface. Consequently, an 8x8 matrix with a diagonal element of 1 must be used for comparison pair-wise (Table 1). The weight of each thematic layer has evolved based on the variables impacting the geothermal system and it computes the normalized weight or priority vector and their sum must be 1. Using the rating scale, where 1 to 9 corresponds to equal importance to excessive importance, the estimated primary eigenvalue was discovered to be 9.092 ranging from 1 to 9 means equal importance to extreme importance. The consistency index i.e. can be evaluated by the following equation;

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Where $\lambda_{\max}$ indicates the major eigenvalue and n is the matrix's order.

$$CI = (9.09 - 8) / (8 - 1) = 0.15$$

Table 1 Assessment of the selected criteria based on the decision matrix, classes, and priority for estimating the geothermal prospects.

Matrix	Heat Flow	Thermal Gradient	Lithology	Crustal Thickness	Sediment Thickness	Earthquake Density	Structural Density	CPD	Priority
Heat Flow	1.00	1.00	3.00	5.00	5.00	5.00	5.00	1.00	25.2 %
Thermal Gradient	1.00	1.00	3.00	1.00	5.00	3.00	3.00	1.00	17.3 %
Lithology	0.33	0.33	1.00	3.00	3.00	3.00	1.00	0.33	11.3 %
Crustal Thickness	0.20	1.00	0.33	1.00	3.00	5.00	5.00	1.00	13.01 %
Sediment Thickness	0.20	0.20	0.33	0.33	1.00	1.00	1.00	0.20	5.6 %
Earthquake Density	0.20	0.33	0.33	0.20	1.00	1.00	5.00	0.20	3.8 %
Structural Density	0.20	0.33	1.00	0.20	1.00	0.20	1.00	0.20	4.2 %
CPD	1.00	1.00	3.00	1.00	5.00	5.00	5.00	1.00	19.5 %

Consistency Ratio (CR) = 0.9 %.

After commutating the consistency index, the next step is to find the consistency ratio. The ratio between the consistency index (CI) and random index (RI) is known as the consistency ratio (CR). Saaty revealed that a consistency ratio (CR) of 0.10 or lower is sufficient to continue the AHP analysis. If the consistency ratio exceeds 0.10, the results must be revisited to identify and address the source of the inconsistency. The Consistency Ratio (CR) = 0.096 %. According to the findings, the consistency ratio had a value of 0.096, which is less than 0.1. As a result of CI, it is possible to conclude that this CR can be used to evaluate the geothermal prospects of India.

Additionally, the data samples were grouped into clusters based on their characteristics or composition to identify general similarities and differences in the hydrogeochemical composition of the water samples. A cluster is a group of items that have been grouped due to particular commonalities. The primary goal of spatial clustering is to divide geographical data into meaningful subclasses, or clusters, where items within a cluster share a great deal of similarities and differ from those in other clusters. Several spatial clustering techniques based on attributes have been developed for geo-referenced 2 - D spatial data. For example, partitioning algorithms like k-means have been used to handle spatial clustering problems. One of the most straightforward and well-established unsupervised machine learning algorithms is K-means clustering. To cluster the hydrogeochemical compositions based on several variables, such as heat flow, thermal gradient, CPD, sediment thickness, crustal thickness, and structural density, we employ k-means algorithms. We then divided the data into two general categories as shown in Fig. 1.

4. Results and discussions

The eight major thematic layers were selected based on the literature review, importance, and geothermal flow conditions that directly influence the availability of geothermal provinces in India. The primary datasets were compiled from various publicly available sources and publications. The heat flow and thermal gradient data were taken from the IHFC or International Heat Flow Commission world database. The lithology, and structural density including the fault, fracture, and lineament data were collected from the global lithological map, Geological Survey of

India (GSI) and Bhukosh service. Basement depth and crustal thickness data were collected from the crust 1.0 model, whereas the seismicity data were obtained from the Indian seismological center. The Currie point data available from published literature were used.

Heat flow and thermal Gradient (Fig. 3a and b) are important parameters and are influenced by potential subsurface availability of geothermal fields, and therefore can be used for identifying Geothermal energy resources underneath the subsurface. Identified geothermal provinces typically show greater heat flow values, which can be attributed to a variety of factors, including the disintegration of lithophilic radioactive minerals, increased mobilization of deep hydrothermal fluids, and presence of shallow magmatic intrusive bodies. Old volcanic and intrusive rocks are known to be present where geothermal energy sources are found. The other main factors influencing hot springs' presence are heat flow and faults or fracture planes that have reached great depths, causing circulations and movement of thermal water upraised direction by buoyancy force. The source of heat supply is often controlled by strongly joined deep faults, lineaments, fractures, geothermal gradients, and disintegrating lithophilic materials by exothermic processes. As a result, the distance from faults and the fault density also assist in the rising of geothermally heated fluid from the deeper depths.

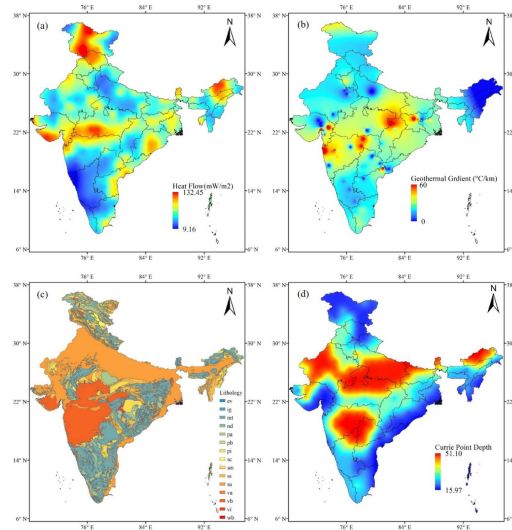


Fig. 3. Thematic layers of various parameters: a) heat flow, b) geothermal gradient, c) lithology, d) Currie Point Depth.

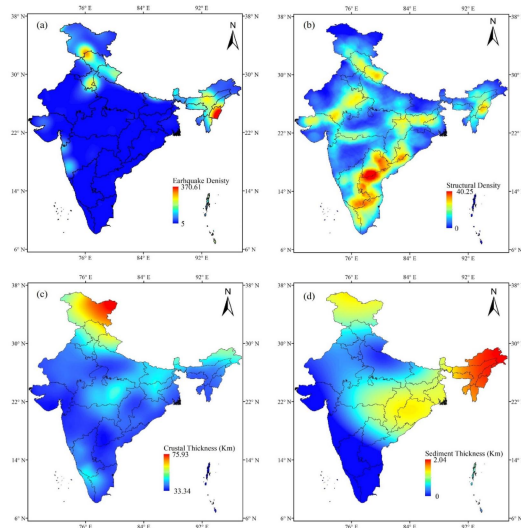


Fig. 4. Thematic layers of various parameters: a) earthquake density, b) structural density, c) crustal thickness, d) sediment thickness.

4.1. Thematic parameters layers

The selected crucial variables (Figs. 3 and 4) used for estimating geothermal potential mapping are discussed briefly in the following sections.

(a) Heat Flow and Thermal Gradient

The presence of the high heat-producing Ladakh and Chumathang granites may be the cause of the maximum heat flow seen in the Himalayas. Another good potential heat source in the west coast provinces may have been formed by rifting, inter-plate tectonics, and flood volcanic eruptions (66.25 Ma). On the other hand, the majority of hot springs in Peninsular India are probably connected to Graben, where deep-seated faults may operate as active channels for high heat flow and geothermal fluid circulation. The typical average heat flow is between 50 and 70 mW/m², indicating good potential in the geothermal provinces (Fig. 3a and b). For analysis the heat flow data was divided into five different categories such as 9.15 - 36.01 (class 1); 36.01 - 52.79 (class 2); 19252.79 - 70.97 (class 3); 70.97 - 93.44 (class 4); 93.44 - 132.44 (class 5).

Furthermore, the average thermal gradient values observed in the Himalaya (50 ± 20 °C/km), west coast (44 ± 20 °C/km), West Bengal (40 ± 10 °C/km), and Odisha (45 ± 20 °C/km) are shown in Fig. 3a and b. In this study, the data were classified into five classes: 0 - 7.0195 (class 1); 7.0 - 14.20 (class 2); 14.20 - 19.08 (class 3); 19.08 - 26.18 (class 4); 26.18 - 59.65 (class 5). Most areas with high heat flow show high geothermal energy prospects (Fig. 4).

(b) Lithology and Currie Point Depth (CPD)

Various types of rocks in the crust can contribute differently to the crustal heat flow primarily because of varying concentration of radioactive elements (U, Th, and K). The lithological data of India were collected from the global lithological map. The major rock types in the region were

mainly evaporites, metamorphic, plutonic, and volcanic rocks (i.e., acid, basic, and intermediate), sedimentary rocks (i.e., carbonate, mixed, unconsolidated, and siliciclastic) (Fig. 3c).

The depth at which the earth's magnetic material transitions from a ferromagnetic to a paramagnetic state, as a result of temperature increase is known as the Curie point depth (CPD), and is regarded as the bottom depth of a magnetic source. The CPD (Fig. 3d) can be easily derived from land or aeromagnetic data, and may be influenced by seismic activity. Tectonically active and geothermal areas are likely to have a shallower CPD depth. The CPD in the study area has been classified into five classes 15.97 - 27.29 (class 1); 27.29 - 32.36 (class 2); 32.36 - 38.44 (class 3); 38.44 - 45.61 (class 4); 45.61 - 51.10 (class 5).

(c) seismicity and lineament density

Fault and lineaments are essential for heat transfer from deeper depths as discussed earlier. Intense seismic activity in a region suggests the presence of highly fractured subsurface rocks which can act as pathway for rising heated fluid from deeper depths. The faults are probably very permeable, which contributed to the formation of the hot springs. The fractures may remain open or reopen in the affected zones due to seismic activity (Fig. 4a) and can contribute significantly to fluid circulation in general, and geothermal activity. The seismicity density has been classified into five main domains based on the data such as 0.0 - 15.39 (class 1); 15.39 - 43.26 (class 2); 43.26 - 83.74 (class 3); 83.74 - 139.25 (class 4); 139.25 - 229.84 (class 5).

Some of the identified geothermal areas such as those on the east coast of India are likely to have connected deep-seated faults, e.g. the north Khurda faults with an orientation of NW-SE are likely to play a vital role in enhancing the circulation of water in east-coast geothermal provinces. The NNW-SSE lineaments of post-Trappean dykes' fault and fracture surfaces appear to be primarily responsible for controlling the majority of the springs in the western region. The NE-SW trending faults in the Aravalli provinces may have played an active role in fluid migration in the high-heat flow regions. Similarly, the Sonata lineament is made up of various EWE-WSW trending series of echelon faults and tectonic lineaments that are oriented in the directions of E-W (Narmada) to ENW-WSW (Tapti). The ratio of fault length and area of a specific province is known as fault density (Fig. 4b). A high fault density is likely to boost region's geothermal potential. For the purpose of analysis, the lineament density has been classified into five divisions, and their ranks were estimated as: 0 - 5.8 (class 1); 5.8 - 11.23 (class 2); 11.23 - 17.425 (class 3); 17.42 - 24.79 (class 4); 24.79 - 40.22 (class 5).

(d) crustal and sediment thickness variations

The crustal thickness is another crucial parameter that can affect the heat transfer from the mantle depths and impact the geothermal potential in a region (Fig. 4c). Global data indicate that

the crustal thickness widely varies across the tectonic zones, i.e. on an average crustal thickness of ~ 35 km is seen for the continents, which can be much lesser (~ 7 km) in the oceanic crust, with an exception for the active tectonic regions where crustal thickness may be double to that of the normal crustal thickness. In this study area, maximum crustal thickness is observed in the upper Himalayas (Fig. 4c). However, in general, the thinner crust is likely to transmit more heat from the mantle. The crustal thickness data was classified into five different groups and the estimated ranks are obtained as: 33.34 - 38.43 km (class 1); 38.43 - 42.99 km (class 2); 42.99 - 25650.91 km (class 3); 50.91 - 62.60 km (class 4); 62.60 - 75.93 km (class 5).

Similarly, the sediment thickness varies from region to region, with highest sediment thickness observed along the NE-Himalayas. The upper Himalayas, central India, West Bengal, and Odisha have relatively less sediment thickness (Fig. 4d). The continental margins show highest variations in sediment thickness due to varying degrees of tectonic extension and subsidence. Less sediment thickness indicates shallow basement depths, which is likely to have a positive impact on geothermal prospects in a region. The sediment thickness data (Fig. 4d), were classified into five categories by using Quantile breaks methods and their estimated ranks are: 0 - 0.24 (class 1); 0.24 - 0.63 (class 2); 0.63 - 2691.04 (class 3); 1.04 - 1.56 (class 4); 1.56 - 2.04 (class 5).

4.2. Sensitivity analysis

The evaluation criteria, as well as the weights assigned to each criterion, have a significant impact on the rankings derived from the MCDM approach. Criteria weights are often assigned by the decision maker or a group of experts, this introduces subjectivity and risk of bias. To effectively use and execute quantitative decision, sensitivity analysis of individual parameters is vital. Its goal is to evaluate the stability of an optimal solution when small changes are applied to the parameters. In this study, sensitivity analysis was employed to ascertain the relationship between the criteria weights and the ranking, and to assess their impacts on final results. The one-at-a-time (OAT) technique was used, which involves changing one input element at a time while leaving all other parameters unchanged. The weight of other criteria, w_j , alters if weight of the criteria were changed from w_i^0 to w_j ,

$$w_j = \left(\frac{1 - w_i}{1 - w_i^0} \right) \times w_j^0$$

Where w_j is the new weight value of the other attribute (criterion) to be changed; w_i^0 and w_j^0 are the initial weight values of the criteria before being subjected to sensitivity analysis, e.g., for the heat flow (Table 2) criteria at cut-off weight values of 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, and 80 % for each criterion. Except for the 20 % weight, the remaining weights ranging from 0 %, 40 %, 60 %, 80 %

and 80 % show a comparable ranking for the AHP model. Similarly, altering different input variables one at a time during the sensitivity analysis can be done to examine the impact on model outputs.

Table 2 Sensitivity analysis for AHP-weights parameters ranging from 0 % to 80 %; Where Heat Flow is used as a cut-off criterion.

Criteria	Initial		0 %		20 %		40 %		60 %		80 %	
	Weight	Rank	Weight	Rank	Weight	Rank	Weight	Rank	Weight	Rank	Weight	Rank
Heat Flow	0.252	8	0.000	8	0.200	7	0.400	8	0.600	8	0.800	8
Thermal Gradient	0.173	6	0.231	6	0.185	6	0.139	6	0.093	6	0.046	6
Geology Age	0.113	4	0.152	4	0.122	5	0.091	4	0.061	4	0.030	4
Crustal Thickness	0.131	5	0.175	5	0.140	4	0.105	5	0.070	5	0.035	5
Sediment thickness	0.038	1	0.051	1	0.041	1	0.030	1	0.020	1	0.010	1
Earthquake Density	0.056	3	0.075	3	0.060	3	0.045	3	0.030	3	0.015	3
Structural Density	0.042	2	0.056	2	0.045	2	0.034	2	0.022	2	0.011	2
CPD	0.195	7	0.261	7	0.209	8	0.156	7	0.104	7	0.052	7

Note: Highest Rank is indicated by 8, and the lowest rank by 1.

4.3. Geothermal prospects map zonation

All the parameters were integrated, by AHP weighted MCDM methods. The final geothermal prospect map of India is shown in Fig. 5. The study area can be categorized into very low (11.78 %), low (24.20 %), moderate (27.18 %), high (21.98 %), and very high (14.86 %) geothermal prospect regions as per area. Our analysis indicates that the Himalayan geothermal province (including NW and NE parts), the SONATA lineaments, central parts, and some parts of the west coasts Mahanadi Graben show the highest probability of geothermal energy compared to other areas. The results are consistent with recent findings suggesting that the Himalayan region and West Coast geothermal provinces have higher reservoir depth and temperature compared to West Bengal and Odisha. Most of the well-known hot springs are located in the high prospect regions.

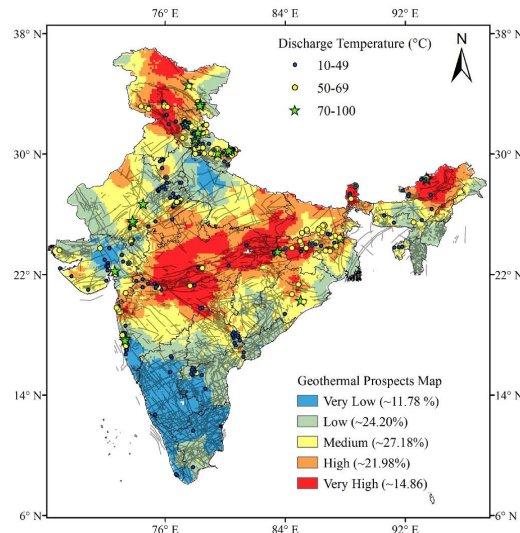


Fig. 5. Map showing estimated geothermal prospect.

High and low prospect regions are shown in red and blue colors, respectively. Green stars are locations of geothermal springs with relatively high discharge temperatures.

The model parameters, implementation and model data determine the strengths, and

drawbacks of the results derived by the MCDM techniques. Individual parameters have limited impact on a multicriteria evaluation problem. However, considering several parameters simultaneously reduces the impact of bias on final results due to individual parameters. Other methods such as machine learning models can also be used for an independent assessment of geothermal prospects. Finally, the estimated results are verified by field observations of already established locations of hot springs in the study region.

5. Conclusions

Table 3 Correlation Matrix of thematic parameters.

Parameters	Currie Point Depth	Earthquake Depth	Geothermal Gradient	Heat Flow	Sediment Thickness	Structural Density	Crustal Thickness	Lithology
Currie Point Depth	1.00	0.32	0.32	0.45	0.30	0.11	0.40	0.40
Earthquake Depth	0.32	1.00	0.31	0.30	0.31	0.20	0.31	0.32
Geothermal Gradient	0.32	0.31	1.00	0.44	0.31	0.24	0.41	0.36
Heat Flow	0.35	0.30	0.44	1.00	0.38	0.09	0.44	0.42
Sediment Thickness	0.30	0.31	0.31	0.38	1.00	0.15	0.39	0.37
Structural Density	0.11	0.20	0.24	0.09	0.15	1.00	0.15	0.14
Crustal Thickness	0.40	0.31	0.41	0.44	0.39	0.15	1.00	0.37
Lithology	0.37	0.32	0.36	0.42	0.37	0.14	0.37	1.00

The eight main parameters that are directly or indirectly related to the geothermal energy prospects in the subsurface, i.e., heat flow, thermal gradient, Curie Point Depth (CPD), sediment thickness, crustal thickness, fault, earthquake density and lithology, were used to estimate the prospects of geothermal energy. Except for the 20 % weight, the remaining weights of 0 %, 40 %, 60 %, and 80 % resulted in a similar classification using the AHP model. The highest AHP weights were in the order of heat flow (~ 0.252), followed by curried point depth (~ 0.195), thermal gradient (~ 0.173), crustal thickness, (0.131), and lithology (~ 0.114), , which are the most important parameters contributing to the geothermal prospect. Heat flow is strongly correlated with the geothermal gradient, crustal thickness, and lithology (Table 3). We find that ~ 11.78 % and ~ 24.20 of the study area can be classified as having very low to low geothermal prospects. Whereas, ~ 27.18 % of areas show medium prospects, ~ 21.98 % as high, and 14.86 % as having very high geothermal prospects. The locations of geothermal springs, identified in various studies validate our estimates. Furthermore, most of the identified geothermal springs with high discharge temperatures (50 - 69°C and 70 - 100°C) are located in the high to medium geothermal prospect areas. Exploration and exploitation of renewable energy can boost the efforts of developing countries to fulfill their economic, environmental, social and energy goals. The results obtained in this study may be useful in the efficient search and development of sustainable, renewable, and clean energy.

中文译文

对印度地热能在能源可持续发展方面的前景评估

Susmita Goswami , Abhishek Kumar Rai

Centre for Ocean, River, Atmosphere and Land Sciences,

Indian Institute of Technology Kharagpur, Kharagpur, 721302, WB, India.

摘要：在过去的几十年里，全球范围内对本土的、可再生的、环保的和可持续发展的能源资源的需求不断增加。地热能就是这样一种普遍的能源来源之一，具有成为具有减少碳足迹的替代能源资源的潜力。在本研究中，将八个关键特征参数，即热流量、热梯度、居里点深度、岩性、基底深度、地壳厚度和地震活动性，整合到一个多标准决策模型框架中，以确定印度可能具有地热能潜力的地区。使用层次分析法（AHP）估计的各个参数的权重顺序为热流量（0.252），其次是居里点深度（0.195）、热梯度（0.173）和地壳厚度。我们的分析表明，喜马拉雅山脉地热区（包括西北和东北地区）、SONATA 线形构造、中部地区以及西海岸和马哈纳迪断陷的一些地区，与其它构造区相比，具有更好的地热能前景。我们发现研究区域的 14.86%和 21.98%具有极高到高的地热潜力，大约 27.18%的区域具有中等地热潜力，而 11.78%和 24.20%的区域具有极低到低的地热潜力。

关键词：地热能；温泉；层次分析法；多准则决策方法；印度

1. 简介

能源是发展中国家的基本需求，是宏观经济增长和整体发展的主要推动力。然而，各种类型的能源资源、它们的勘探和生产过程以及使用对环境的影响各不相同。最近的研究成果表明，除了污染大气、导致气候变化和区域酸雨外，石油、煤炭和天然气等化石燃料也正在以更快的速度枯竭。同样，在核能方面，高放射性废物的储存和处理是一个令人关注的问题。因此，在过去的几十年里，针对环境友好、相对绿色和可持续的能源资源，如地热能、海洋波浪能、风能和太阳能等资源的勘探和开发产生了极大的兴趣。地热能提取作为一种非常规的替代能源资源越来越受欢迎，主要是因为它清洁、相对无污染、无处不在且取之不尽。

在 2008 年地热能仅占世界一次能源供应的 0.1%，但预测表明，它在未来可能满足 3% 的全球电力需求，并在 2050 年满足 5% 的全球供热需求。到 2050 年，地热能可能为全球电网提供 13 吉瓦的电力和 70 吉瓦的热能，满足 3-5% 的世界能源需求。在 2021 年，地热发电总量达到 96552 吉瓦时，占全球电力输出的 0.34%，占全球清洁能源产出的 0.87%。由于各地地热能的丰富性以及经济可行的地下深度，因此各国正在持续努力开发地热能。据最新数据显示，由于全球地热热泵安装的改进，使年度能源使用量呈现出令人印象深刻的增长，尽管它们的容量仅为 0.245。印度政府也设定了一个雄心勃勃的目标，即到 2030 年发电 500 吉瓦的可再生能源，这是世界上最大的可再生能源扩张计划之一，代表着 40% 的国家总装机容量。尽管政府的努力减少了能源短缺并使超过 99% 的家庭通电，但印度的电网压力仍然很大，在可靠性和人均使用量方面落后于许多工业化国家。

尽管地热能被视为一种有希望的可再生能源资源，但其勘探、开发和应用涉及多方面的可持续性考虑。传统上，地热热源通过地表指标检测，如地表热蒸汽、温泉、间歇泉、喷气孔等。地热能的这种地表表现众多，遍布各大洲。地区的任何地热活动可能由该地区的构造机制负责。一般来说，岩浆房的存在会加热地下岩石，热量通过深部断层流出，同时提高所接触地下水的温度，这反过来表现为地表的热泉。除了火山成因的热泉外，还有许多非火山热泉分布在构造稳定的地区，如马来西亚西部、南澳大利亚、泰国、日本、印度尼西亚、赞比亚和印度。大陆地壳的平均地热流量约为 $65 \pm 1.6 \text{ mW/m}^2$ 。大陆部分地下热的主要来源是放射性同位素如铀、钍和钾的衰变。尽管许多地热储层深埋地下，没有地表表现，但在深层流体在地下深处渗透并受到正常地热梯度加热的地区，地热热能可以以热泉的形式上升到地表。在无火山活动或岩浆活动的地区，泉水温度相对较低（ $<100 \text{ }^\circ\text{C}$ ），深层渗透的地下水在正常地热梯度（即 $30 \text{ }^\circ\text{C/km}$ ）以下的深度加热，或者由于基岩中放射性衰变分解而使含水层温度升高。上升的水也与周围岩

石相互作用,因此其水文地球化学特性可能与火山地区起源的热泉不同。该地区受到深部断层的影响,通过断层将热水带到地表。

印度是世界上第三大能源消费国,其 80% 的能源依赖化石燃料。快速工业化和人口增长已超过印度的能源生产,导致了能源危机。用于进口化石燃料的外汇流出正逐渐使得国库难以处理。因此,寻找一种可能用于当地替代能源,可能对当地经济活动有利。虽然印度水力和热能资源丰富,但地热资源尚未得到充分开发和利用。由于对替代资源的兴趣日益增长,目前已在坎贝、拉达克普加谷和塔塔帕尼(查蒂斯加尔邦)等几个地方安装了利用地下地热能的试点项目。此外,在安得拉邦的曼努古鲁和拉达克正在进行商业地热能生产的试验项目。据估计,印度地热能总潜力超过 10000 兆瓦,仅喜马拉雅地区就有超过 134 兆瓦的潜力。

为了减少能源行业中化石燃料的使用,以实现最小的环境损害、经济节约和能源独立。多标准决策模型(MCDM)已被用于为学者、决策者、利益相关者、银行、企业和当地社区寻找最佳答案。在解决涉及各种竞争性标准和目标能源相关决策问题时,MCDM 技术可以有所帮助。在过去几年中,MCDM 已被广泛应用于资源分配、规划、政策制定和管理等各种目的。一些研究使用了不同类型的 MCDM 技术,如在多种问题中的应用的模糊 TOPSIS 方法。使用各种 MCDM 技术评估和排名了多种可再生能源和非可再生能源发电系统。此外,层次分析法(AHP)和地理信息系统(GIS)方法已被用于检测浅层地下储层状况并确定影响欧洲地热系统的主要因素。

地热活动在各个地点的发生影响各种地下地球物理参数,如地热梯度变化、热流量值等。此外,基岩浅层、居里点深度、断层和裂缝网络等的存在进一步促进了地热能的存在。这使得在任何地点识别地热前景成为一个多标准决策模型问题。层次分析法(AHP)是组织和分析此类挑战性问题的最流行的多标准决策技术之一。

当前的研究目标是利用多标准决策方法(MCDM)确定印度的潜在地热地点。在本研究中,我们采用多标准决策模型和 GIS 技术来研究和绘制印度的地热潜力区。这种新颖的策略利用 GIS 数据广泛分析地理区域的地热潜力,与成本高昂且空间受限的以钻井为中心的方法不同。本研究的成果有助于在研究区域以及世界其他地区寻找、勘探和开发地热能源。方法论、分析和结果的详细信息将在以下各章节中讨论。

2. 研究区域

印度地热温泉分布在各种地质省区(图 1 和图 2)。近期研究表明已经有超过 400 个地热温泉,地表温度介于 25 °C 至 100 °C 之间,分别位于北纬 8°4' 至 37°6'

和东经 68°7'至 97°25'之间（图 1）。在印度，绝大部分地热温泉为中高温地热梯度区（125 °C-200 °C）和低温地热梯度区（低于 100 °C）。印度所估计的总地热能潜力超过 10000 兆瓦，其中喜马拉雅省的容量超过 134 兆瓦。大多数地热地点可以归纳到印度几个主要构造环境中，即：a) 喜马拉雅地区，这是一个大陆碰撞区；b) 喜马拉雅前渊区或西瓦利克地区；c) 半岛印度地区，尤其是在 SONATA 地区和冈瓦纳省附近，以及位于东西海岸的热泉。根据地热流、地热梯度和构造环境，确定了七个主要地热省，即：a) 喜马拉雅地热省；b) 西海岸地热省；c) 古吉拉特-拉贾斯坦地热省；d) 索哈纳地热省；e) 戈达瓦里地热省；f) 马哈纳迪地热省；g) SONATA 地热省，接下来将简要讨论这些省。

印度-藏南碰撞缝合带（ITSZ）位于西北喜马拉雅（图 2），该区域以深部存在前寒武纪结晶岩断裂为特征，这些断裂被结晶轴和中央逆冲断层所界定，沉积-变质岩系被拉达克花岗岩和楚玛唐花岗岩侵入。位于喜马拉雅地热省的 100 多个地热地点表现出高温梯度（>100-200 °C/km）和超过 150-200 mW/m²的高热流，这与第三纪岩浆作用和变质作用有关。沿西部海岸和西海岸断层的板块边界构造可能是地热活动一致的原因。该区域属于失败的裂谷，也与世界上最大的洪水火山喷发之一（66.25 百万年）有关。印度西部地区的多数温泉似乎主要受 Trappean 侵入体 NNW-SSE 走向的断层和裂隙控制。该区域包含一个广大的高热流区，被称为西海岸热异常。坎贝坳陷省（图 2）是一个 200 km × 50 km 的区域，具有中等的温度梯度 40 ± 15 °C 和热流 75 ± 18 mW/m²，向北延伸。阿拉瓦利省位于拉贾斯坦东部（包括北坎贝和索哈纳）地区，该地区的岩石年龄从太古宙到近现代。

SONATA 线形构造区（图 2）的特征是基底深度超过 2.5 公里和较薄的壳层（33-38 公里）。Bakreswar 地热温泉位于东部半岛印度的 SONATA 区。冈瓦纳地区下深部绝缘的花岗岩岩体使得 SONATA 成为该国最佳增强地热系统之一，温度梯度在 40 °C/km 至 120 °C/km 之间，热流值在 70 至 139 mW/m²之间。另一方面，哥达瓦里和马哈纳迪地热区（图 2）属于晚第三纪至第四纪时期或冈瓦纳后期阶段。断层沿冈瓦纳断陷带呈西北-东南方向分布。哥达瓦里地热区（图 2）的温泉温度在 30 至 67 °C 之间，地热梯度为 45 °C/km，热流约为 70-100 mW/m²。奥里萨邦的温泉属于马哈纳迪地热区，温泉的取向趋势沿着前寒武纪地形的 NNE-SSW 线。与其他地热区相比，马哈纳迪地热区是探索最少的地热区之一。

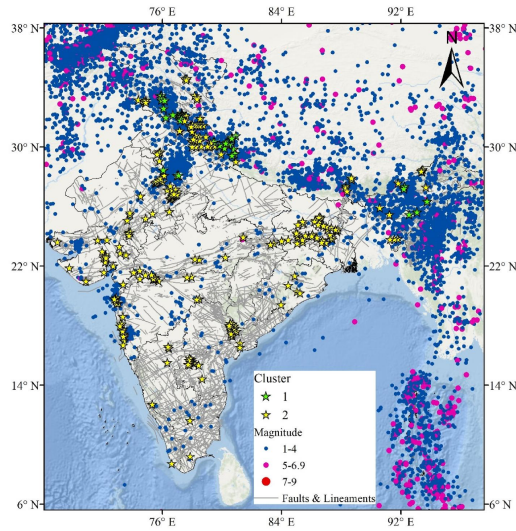


图 1 研究区域图

主要轮廓用细灰线表示。地热温泉根据水文地球化学特征分两组，用绿色和黄色的星星表示

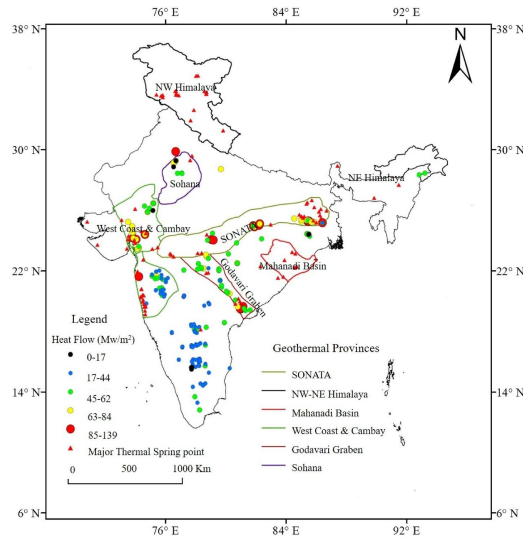


图 2 印度主要地热省图

3. 研究方法

数学上被广泛用于评估多参数问题的方法称为多准则决策模型（MCDM）技术。这种方法有助于分析问题的复杂性，并依据恰当的选择评估各种解决方案。参考各种标准的相对重要性进行标准化和加权，通过满足标准的好坏对备选方案进行评估和排名，使决策者能够做出最优决策。MCDM 通过考虑多个和经常冲突的目标和标准，成为了解决复杂决策问题不可或缺的工具，并有助于选择最合适的替代方案。根据是否允许标准权衡，MCDM 方法可以分为补偿性或非补偿性。敏感性分析增强了决策有效性的稳健性。理解各种参数的相对重要性需要专家的观点，有时会导致一些不确定性。使用 MCDM 可以轻松分析各种参数对结果的影响。此外地理信息系统（GIS）为决策者提供了一个平台，以检查和评估各种选择的可行性。

分析层次法（AHP）是一种权重估计方法，本研究中已用于在印度寻找地热前景。使用了八个主题参数，如热流量、热梯度、沉积物厚度、地壳厚度、结构密度、地震密度、岩性和居里点深度（CPD），这些是主要参数，可能对地热前景有重大影响。这种方法使用成对比较矩阵和层次框架来评估包含在具有挑战性的决策问题中的标准优先级。成对比较矩阵是使用标准分数建立的，是此方法中的一个过程（表 1）。标准分数基于专家知识或已发表的文献，范围从 1 到 9。主要影响因素对地下水潜力有直接影响，而次要影响因素有间接影响。然后使用归一化矩阵在约束条件下评估标准权重（ $w_1 \dots w_n$ ），其中 $\sum_{j=1}^n W_j = 1$ ；和 $W_i = \sum_j X_{ij} W_j$ ，其中 X_{ij} 代表第 i 类在第 j 层的排名， W_j 代表第 j 层的权重。

各种之前讨论过的主题层已被考虑在内以评估印度的地热潜力，例如，高地热热流表明地下地热能源发生的可能性更大。同样，高地热梯度、低居里点深度、低基岩深度等对地下地热能源的可用性有影响。因此，必须使用对角线元素为 1 的 8×8 矩阵进行成对比较（表 1）。每个主题层的权重基于影响地热系统变量的演变，并计算归一化权重或优先向量，它们的和必须为 1。使用评分量表，其中 1 到 9 对应于同等重要性到过度重要性，估计的主特征值被发现为 9.092，范围从 1 到 9 表示同等重要性到极端重要性。一致性指数可以通过以下方程评估：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

$\lambda_{\max}$ 表示主特征值， n 是矩阵的阶数。

$$CI = (9.09 - 8) / (8 - 1) = 0.15$$

表 1 根据决策矩阵、分类和优先级对地热前景评估所选标准的评价

Matrix	Heat Flow	Thermal Gradient	Lithology	Crustal Thickness	Sediment Thickness	Earthquake Density	Structural Density	CPD	Priority
Heat Flow	1.00	1.00	3.00	5.00	5.00	5.00	5.00	1.00	25.2 %
Thermal Gradient	1.00	1.00	3.00	1.00	5.00	3.00	3.00	1.00	17.3 %
Lithology	0.33	0.33	1.00	3.00	3.00	3.00	1.00	0.33	11.3 %
Crustal Thickness	0.20	1.00	0.33	1.00	3.00	5.00	5.00	1.00	13.01 %
Sediment Thickness	0.20	0.20	0.33	0.33	1.00	1.00	1.00	0.20	5.6 %
Earthquake Density	0.20	0.33	0.33	0.20	1.00	1.00	5.00	0.20	3.8 %
Structural Density	0.20	0.33	1.00	0.20	1.00	0.20	1.00	0.20	4.2 %
CPD	1.00	1.00	3.00	1.00	5.00	5.00	5.00	1.00	19.5 %

一致性比(CR) = 0.9%

在计算一致性指标后，下一步是找到一致性比率。一致性指标（CI）与随机指标（RI）之间的比率被称为一致性比率（CR）。Saaty 揭示一致性比率（CR）为 0.10 或以下就足以继续进行层次分析法（AHP）分析。如果一致性比率超过 0.10，必须重新审视结果以识别和解决不一致性的原因。一致性比率（CR）= 0.096 %。根据研究结果，一致性比率为 0.096，小于 0.1。由于 CI，可以得出结论，这个 CR 可以用来评估印度的地热资源前景。

另外，根据其特征或组成，数据样本被分为不同的簇，以识别水样水文地球化学组成的普遍相似性和差异性。簇是一组由于特定共性而被归为一类的项目。空间聚类的首要目标是把地理数据划分为有意义的子类，即簇，其中簇内的项目之间存在很多相似性，与其他簇的项目则不同。已经开发了基于属性的一些空间

聚类技术，用于地理相关的二维空间数据。例如，分区算法如 **k-means** 已被用于处理空间聚类问题。**K-means** 聚类是最直接且得到良好建立的无监督机器学习算法之一。为了基于几个变量，如热流、热梯度、CPD、沉积物厚度、地壳厚度和结构密度，对水文地球化学组成进行聚类，我们采用了 **k-means** 算法。然后，我们将数据分为两个一般类别，如图 1 所示。

4. 结果与讨论

八种主要主题层是根据文献综述、重要性和直接影响印度地热省可用性的地热流动条件选定的。主要数据集是从各种公开来源和出版物中汇编的。热流和热梯度数据来自国际热流委员会（IHFC）或世界数据库。岩性、以及包括断层、裂缝和线性特征在内的结构密度数据是从全球岩石圈地图、印度地质调查局（GSI）和 Bhukosh 服务收集的。地壳深度和地壳厚度数据是从地壳 1.0 模型收集的，而地震数据是从印度地震中心获得的。从已发表的文献中可获得被使用居里点数据。

热量流动和热梯度（图 3a 和 b）是重要参数，受地热田地下潜在可利用性的影响，因此可用于识别地下地热能资源。已识别的地热省通常显示出更大的热量流动值，这可以归因于多种因素，包括亲岩石放射性矿物的分解、深层水文热流体的增加流动，以及浅层岩浆侵入体的存在。已知在发现地热能源的地方存在古老的火山和侵入岩。影响温泉存在的其他主要因素是热量流动和达到很大深度的断层或裂面，导致循环和热水向上运动，由浮力作用。热源通常由强烈连接的深部断层、裂缝、节理、地热梯度以及通过放热过程分解的亲岩性物质控制。因此，断层距离和断层密度也有助于地热加热流体从更深的地层上升。

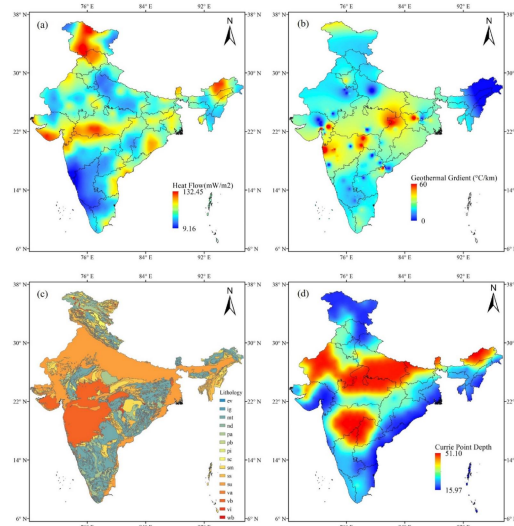


图 3 各种参数的地层：a)热流，b)地热梯度，c)岩性，d)居里点温度

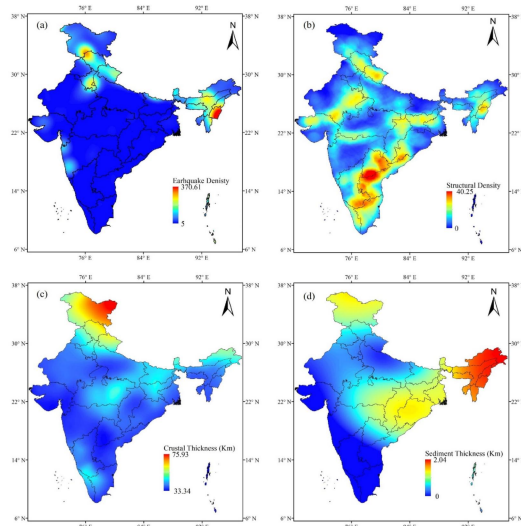


图 4 各种参数的地层：a)地震密度，b)构造密度，c)地壳厚度，d)沉积物厚度

4.1. 结果与讨论

选定关键变量（图 3 和图 4）用于估计地热潜力图，在以下章节中简要讨论。

(a) 热流量和热梯度

高热产出的 Ladakh 和 Chumathang 花岗岩的存在可能是喜马拉雅山脉观察到最大热流的原因。西海岸省份中另一个良好的潜在热源可能是由裂谷、板块间构造和洪水火山喷发形成的（66.25 Ma）。另一方面，半岛印度的多数温泉可能与地堑相连，深部断层可能作为高热流量和地热流体循环的活跃通道。典型的平均热流量介于 50 至 70 mW/m²之间，表明地热省具有良好的潜力（图 3a 和 b）。为了分析，热流量数据被分为五个不同的类别，如 9.15-36.01（类别 1）；36.01-52.79（类别 2）；52.79-70.97（类别 3）；70.97-93.44（类别 4）；93.44-132.44（类别 5）。

喜马拉雅（50 ± 20 °C/km）、西海岸（44 ± 20 °C/km）、西孟加拉（40 ± 10 °C/km）和奥里萨（45 ± 20 °C/km）观察到的平均热梯度值在图 3a 和 b 中显示。在本研究中，数据被分为五类：0-7.0195（类别 1）；7.0-14.20（类别 2）；14.20-19.08（类别 3）；19.08-26.18（类别 4）；26.18-59.65（类别 5）。大多数高热流区域显示出较高的地热能前景（图 4）。

(b) 岩性及居里点深度（CPD）

各种类型的岩石在地壳中的贡献不同，主要是因为放射性元素（铀、钍和钾）的浓度不同。印度的岩性数据来自全球岩性地图。该地区的岩石类型主要为蒸发岩、变质岩、岩浆岩和火山岩（即酸性、碱性和中性），沉积岩（即碳酸盐、混合、松散和硅质）（图 3c）。

温度增加时会导致地磁材料从铁磁状态过渡到顺磁状态时的深度被称为居里点深度（CPD），被视为磁源底部深度。CPD（图 3d）可从陆地或航空磁力

数据中轻松得出,可能受地震活动影响。构造活跃和地热区可能具有较浅的 CPD 深度。研究区域的 CPD 已分为五类: 15.97-27.29 (类别 1); 27.29-32.36 (类别 2); 32.36-38.44 (类别 3); 38.44-45.61 (类别 4); 45.61-51.10 (类别 5)。

(c) 地震活动和线性构造密度

断层和节理对于更深地层的传热至关重要,如前所述。一个地区强烈的地震活动表明存在高度破碎的地下岩石,这些岩石可以作为从更深地层上升热流体的通道。断层可能非常透水,有助于形成温泉。由于地震活动(图 4a),断层可能保持开放或重新开放,并可能对流体循环尤其是地热活动产生重大贡献。根据诸如 0.0-15.39(第 1 类); 15.39-43.26(第 2 类); 43.26-83.74(第 3 类); 83.74-139.25 (第 4 类); 139.25-229.84 (第 5 类)等数据,地震密度已被划分为五个主要区域。

一些已识别的温泉区域,如印度东海岸的区域,可能存在相连的深层断层,例如北部 Khurda 断层,其走向为西北-东南,可能对增强东海岸地质热省的水循环起到至关重要的作用。Trappean 侵入岩的断层和断裂面呈 NNW-SSE 走向,似乎主要控制着西部地区的多数温泉。Aravalli 省的东北-西南走向断层可能在高温流动区域的水流迁移中发挥了积极作用。同样,SONATA 线状构造由各种走向为 EWE-WSW 的等距断层和构造线状构造组成,这些构造线状构造的方向从东-西(纳尔马达)到 ENW-WSW(塔普提)。特定省份断层长度与面积的比率称为断层密度(图 4b)。高断层密度可能提升该地区的地热潜力。为了分析目的,线状构造密度已被划分为五个等级,其排名估计如下: 0-5.8 (第 1 类); 5.8-11.23 (第 2 类); 11.23-17.425 (第 3 类); 17.42-24.79 (第 4 类); 24.79-40.22 (第 5 类)。

(d) 地壳和沉积层厚度变化

地壳厚度是另一个关键参数,它会影响来自地幔深处的热量传递并影响该地区的地热潜力(图 4c)。全球数据表明,地壳厚度在构造区广泛变化,即大陆的平均地壳厚度为 35 公里,而在洋壳中可能要小得多(7 公里),在活跃构造区域除外,那里的地壳厚度可能是正常地壳厚度的一倍。在本研究区域内,最厚的地壳出现在喜马拉雅山脉的上部(图 4c)。然而,一般来说,较薄的地壳可能从地幔传递更多的热量。地壳厚度数据被分为五个不同的组别,估计的排名如下: 33.34-38.43 公里(第 1 类); 38.43-42.99 公里(第 2 类); 42.99-50.91 公里(第 3 类); 50.91-62.60 公里(第 4 类); 62.60-75.93 公里(第 5 类)。

同样,沉积物厚度在不同地区有所不同,在东北喜马拉雅山脉观察到最高的沉积物厚度。喜马拉雅山脉上段、印度中部、西孟加拉邦和奥里萨邦的沉积物厚度相对较少(图 4d)。大陆边缘由于构造伸展和沉降程度的不同,沉积物厚度

变化最大。沉积物厚度较小表明基底深度较浅，这可能在地区地热前景方面产生积极影响。使用分位数断点法将沉积物厚度数据（图 4d）分为五类，其估计排名如下：0-0.24（类别 1）；0.24-0.63（类别 2）；0.63-2691.04（类别 3）；1.04-1.56（类别 4）；1.56-2.04（类别 5）。

4.2. 敏感性分析

评估标准以及分配给每个标准的权重对来自多准则决策方法（MCDM）得出的排名有重大影响。标准权重通常由决策者或一组专家分配，这引入了主观性和偏见的风险。为了有效地使用和执行定量决策，对单个参数的敏感性分析至关重要。其目标是评估当参数发生微小变化时最优解的稳定性。在本研究中，敏感性分析被用来确定标准权重与排名之间的关系，并评估它们对最终结果的影响。使用了一对一（OAT）技术，这涉及每次改变一个输入元素，同时保持所有其他参数不变。如果从 w_i^0 改变到 w_i ，其他标准的权重 w_j 将发生变化：

$$w_j = \left(\frac{1 - w_i}{1 - w_i^0} \right) \times w_j^0$$

w_j 表示要更改的其他属性（标准）的新权重值； w_i^0 和 w_j^0 是敏感性分析之前的标准的初始权重值，例如，对于热流（表 2）标准的截止权重值分别为 0%、20%、40%、60% 和 80%。除了 20% 的权重外，其余的权重值从 0%、40%、60% 和 80% 范围内，对于 AHP 模型显示出可比较的排名。同样，在敏感性分析期间逐个改变不同的输入变量，可以用来检验对模型输出的影响。

表 2 范围 0~80% 内 AHP 权重参数的敏感性分析，其中热流被视为截止标准

Criteria	Initial		0 %		20 %		40 %		60 %		80 %	
	Weight	Rank	Weight	Rank	Weight	Rank	Weight	Rank	Weight	Rank	Weight	Rank
Heat Flow	0.252	8	0.000	8	0.200	7	0.400	8	0.600	8	0.800	8
Thermal Gradient	0.173	6	0.231	6	0.185	6	0.139	6	0.093	6	0.046	6
Geology Age	0.113	4	0.152	4	0.122	5	0.091	4	0.061	4	0.030	4
Crustal Thickness	0.131	5	0.175	5	0.140	4	0.105	5	0.070	5	0.035	5
Sediment thickness	0.038	1	0.051	1	0.041	1	0.030	1	0.020	1	0.010	1
Earthquake Density	0.056	3	0.075	3	0.060	3	0.045	3	0.030	3	0.015	3
Structural Density	0.042	2	0.056	2	0.045	2	0.034	2	0.022	2	0.011	2
CPD	0.195	7	0.261	7	0.209	8	0.156	7	0.104	7	0.052	7

注：最高级别用 8 表示，最低级别用 1 表示

4.3. 地热潜力分区图

所有参数都通过层次分析法（AHP）加权多准则决策方法（MCDM）进行了整合。印度的最终地热勘探图如图 5 所示。研究区域根据面积可以分为非常低（11.78%）、低（24.20%）、中等（27.18%）、高（21.98%）和非常高（14.86%）的地热勘探区域。我们的分析表明，喜马拉雅地热区（包括西北部和东北部），SONATA 线状构造，中部以及西海岸马哈纳迪地堑的部分地区，与其他地区相比，地热能的概率最高。结果与近期发现一致，表明喜马拉雅地区和西海岸地热区相比西孟加拉邦和奥里萨邦，具有更深的储层和更高的温度。大多数知名的温泉都

位于高勘探区域。

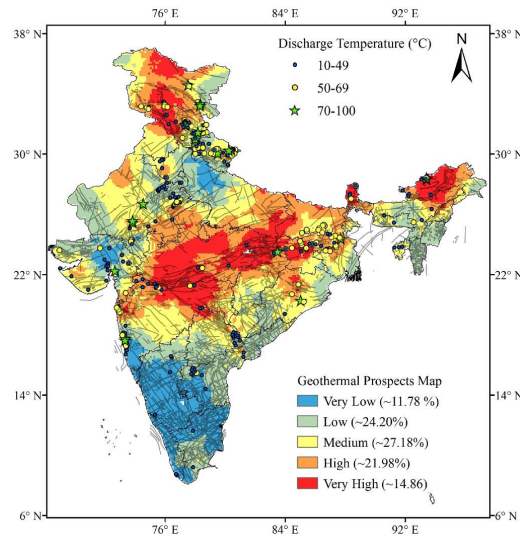


图 5 地热前景估计图

高前景区和低前景区分别用红色和蓝色表示，绿色星星是地热温泉的位置，温度较高

模型参数、实现方式和模型数据决定了由多准则决策方法（MCDM）得出的结果的优点和缺点。单个参数对多标准评价问题的影响有限。然而，同时考虑多个参数可以减少由于单个参数而产生的偏差对最终结果的影响。其他方法，如机器学习模型也可以用于对地热潜力的独立评估。最后，通过研究区域已建立的温泉地点的现场观察验证了估计结果。

5. 结论

表 3 主要参数相关矩阵

Parameters	Currie Point Depth	Earthquake Depth	Geothermal Gradient	Heat Flow	Sediment Thickness	Structural Density	Crustal Thickness	Lithology
Currie Point Depth	1.00	0.32	0.32	0.45	0.30	0.11	0.40	0.40
Earthquake Depth	0.32	1.00	0.31	0.30	0.31	0.20	0.31	0.32
Geothermal Gradient	0.32	0.31	1.00	0.44	0.31	0.24	0.41	0.36
Heat Flow	0.35	0.30	0.44	1.00	0.38	0.09	0.44	0.42
Sediment Thickness	0.30	0.31	0.31	0.38	1.00	0.15	0.39	0.37
Structural Density	0.11	0.20	0.24	0.09	0.15	1.00	0.15	0.14
Crustal Thickness	0.40	0.31	0.41	0.44	0.39	0.15	1.00	0.37
Lithology	0.37	0.32	0.36	0.42	0.37	0.14	0.37	1.00

八个主要参数直接或间接与地下地热能源前景相关，即热流量、热梯度、居里点深度（CPD）、沉积层厚度、地壳厚度、断层、地震密度和岩性，被用来估计地热能源的前景。除了 20%的权重外，其余 0%、40%、60%和 80%的权重在使用 AHP 模型时导致相似的分类。最高的 AHP 权重依次为热流量(0.252)，其次是居里点深度(0.195)，热梯度(0.173)，地壳厚度(0.131)，以及岩性(0.114)，，这是对地热勘探最有意义的参数。热流与地温梯度、地壳厚度和岩性密切相关（表 3）。我们发现，研究区域的 11.78%和 24.20%可以归类为地热前景非常低到低。而 27.18%的区域显示出中等前景，21.98%的区域显示为高，14.86%的区域显示为地热前景非常高。在各种研究中确定的地热温泉位置验证了我们的估计。此外，大多数确定的高温（50-69 °C和 70-100 °C）的地热温泉位于高到中等地热前景区

域。探索 and 开发可再生能源可以增强发展中国家实现其经济、环境、社会和能源目标的努力。希望本研究获得的成果对高效探索和开发可持续、可再生和清洁能源有所帮助。