

砂岩型水热系统地热资源开发潜力评估与实践策略

韩岳

胜利石油管理局有限公司新能源开发中心

DOI:10.12238/jpm.v6i4.7935

[摘要] 本文聚焦砂岩型水热系统地热资源，深入探讨其开发潜力评估方法及实践策略。通过对砂岩型水热系统地质特征、热储特性的分析，运用多种评估手段对其地热资源开发潜力进行量化评估。同时，结合热能工程领域的技术，提出针对性的开发实践策略，包括地热开采技术、热能转换与利用方式等，旨在为砂岩型水热系统地热资源的高效开发与利用提供理论支持与实践指导，促进地热能产业的可持续发展。

[关键词] 砂岩型水热系统；地热资源；开发潜力评估；实践策略；热能工程

Evaluation and practice strategy of the development potential of geothermal resources in sandstone-type hydrothermal system

Han Yue

Shengli Petroleum Administration Co., LTD.New Energy Development Center

[Abstract] This paper focuses on the geothermal resources of sandstone type hydrothermal system, and deeply discusses the development potential evaluation methods and practical strategies. Through the analysis of the geological characteristics and thermal storage characteristics of the sandstone hydrothermal system, the development potential of the geothermal resources is quantitatively evaluated by various evaluation means. At the same time, combined with the technology in the field of thermal energy engineering, targeted development and practice strategies, including geothermal exploitation technology, thermal energy conversion and utilization methods, are put forward, aiming to provide theoretical support and practical guidance for the efficient development and utilization of geothermal resources in sandstone type hydrothermal system, and promote the sustainable development of geothermal energy industry.

[Key words] sandstone type hydrothermal system; geothermal resources; development potential assessment; practical strategy; thermal energy engineering

一、引言

随着全球对清洁能源需求的不断增长，地热资源作为一种清洁、可再生的能源，受到了广泛关注。砂岩型水热系统是地热资源的重要赋存形式之一，其具有分布广泛、热储条件相对较好等特点。对砂岩型水热系统地热资源进行开发潜力评估，并制定科学的实践策略，不仅有助于满足能源需求结构的调整，减少对传统化石能源的依赖，还能有效降低碳排放，推动可持续发展。深入研究砂岩型水热系统地热资源的开发，对于丰富地热能开发理论，拓展地热能产业发展空间具有重要意义。

二、砂岩型水热系统地质特征

2.1 地层结构

砂岩型水热系统通常发育于特定的地层结构中。其地层主

要由砂岩、页岩等沉积岩组成，砂岩作为主要的热储层，具有良好的孔隙度和渗透率，能够储存和传输热水。页岩等相对致密的岩层则起到盖层的作用，阻止热储层中的热量和流体散失。例如，在我国某些地区的砂岩型水热系统中，热储层砂岩厚度可达数百米，孔隙度在 15% - 30% 之间，渗透率在 10 - 1000 毫达西范围内，为地热流体的储存和运移提供了良好的空间。

2.2 地质构造

地质构造对砂岩型水热系统的形成和分布起着关键作用。断裂构造是地热流体运移的重要通道，它能够沟通深部热源与浅部热储层，使深部热流体沿断裂上升至砂岩热储层中。同时，褶皱构造也会影响热储层的分布形态和热流体的运移方向。在一些褶皱发育地区，热储层会因褶皱变形而形成局部的地热异

常区。例如，某地区的背斜构造顶部，由于地层压力相对较低，热流体更容易汇聚，形成了高温地热资源富集区。

三、砂岩型水热系统地热资源开发潜力评估

3.1 地质调查评估

通过地质调查，对砂岩型水热系统的地层结构、地质构造、岩石物性等进行详细研究。利用地质测绘、地球物理勘探等手段，绘制地质图、构造图，确定热储层的分布范围、厚度变化以及断裂构造的位置和性质。例如，采用重力勘探和磁力勘探方法，能够有效识别地下不同岩性的分布，为确定热储层边界提供依据。通过地质调查评估，可以初步判断地热资源的赋存条件和开发潜力。

3.2 热储参数测试评估

热储参数是评估地热资源开发潜力的关键指标。通过钻探获取岩芯样品，进行岩石物性测试，包括孔隙度、渗透率、热导率等参数的测定。同时，利用井下测试技术，测量热储层的温度、压力、流体流量等参数。例如，通过注入 - 压降测试，可以准确获取热储层的渗透率和储能系数。根据热储参数，运用热储模型对地热资源的储量、可开采量进行计算评估。常见的热储模型有传导 - 对流模型、单井模型等，通过这些模型能够模拟地热流体的运移和热量传递过程，为开发潜力评估提供量化依据。

3.3 经济技术评估

在地质和热储参数评估的基础上，进行经济技术评估。考虑地热资源开发的成本，包括钻探成本、设备购置与安装成本、运行维护成本等，以及地热能源的市场价格和收益。同时，评估开发过程中可能面临的技术难题，如高温高压环境下的管材选择、地热流体的防腐防垢技术等。通过经济技术评估，确定地热资源开发的可行性和经济效益，为开发决策提供重要参考。例如，采用净现值（NPV）、内部收益率（IRR）等经济指标对开发项目进行评估，当 NPV 大于 0 且 IRR 大于基准收益率时，表明项目在经济上具有可行性。

四、基于热能工程的开发实践策略

4.1 地热开采技术

4.1.1 高效钻井技术

在砂岩型水热系统地热资源开采领域，高效钻井技术占据着举足轻重的地位。先进的定向钻井技术凭借其卓越的操控性能，能够精准地控制井眼轨迹。在实际作业过程中，通过运用先进的测量仪器与导向工具，钻井团队可依据热储层的地质构造特征，灵活调整井眼方向，使开采井得以恰到好处地穿透热储层，极大地提高地热流体的开采效率。以水平井钻井技术为例，相较于传统垂直井，水平井能够沿着热储层的走向延伸，显著增加热储层的暴露面积。研究数据表明，在同等条件下，水平井与热储层的接触面积可比垂直井扩大数倍乃至数十倍，进而有效提高单井产量，充分挖掘地热资源潜力。

与此同时，研发适配高温、高压恶劣环境的钻井设备和钻头，亦是地热开采工作的关键环节。在高温地热井中，井下温度常常高达数百度，压力也远超常规钻井环境，这对钻井设备和钻头的性能提出了严苛考验。采用特殊合金材料制造的钻头，凭借其优异的耐高温、耐磨损性能，能够在高温环境下稳定作业，有效抵抗热应力与机械磨损，大幅延长钻头使用寿命。经实际项目验证，使用这类特殊钻头，可将钻头更换频次降低 50% 以上，从而显著减少钻井作业的非生产时间，降低整体钻井成本，为砂岩型水热系统地热资源的高效、经济开发提供坚实保障。

4.1.2 地热流体开采优化

通过优化地热流体开采方案，提高地热资源的开采效率和可持续性。采用合理的开采流量控制，避免因开采速度过快导致热储层压力下降过快，影响地热流体的长期供应。同时，利用井下监测技术，实时监测地热流体的温度、压力、流量等参数，根据监测数据及时调整开采方案。例如，当发现热储层压力下降过快时，适当降低开采流量，或采用回灌技术，将部分冷却后的地热流体回灌到热储层中，维持热储层压力稳定。

4.2 热能转换与利用策略

4.2.1 直接利用技术

地热资源的直接利用具有广泛的应用前景。在砂岩型水热系统中，可利用地热流体的热能进行供暖、温泉洗浴、农业温室种植、工业烘干等。例如，在北方地区，利用地热供暖系统为居民提供冬季供暖服务。通过铺设地热管道，将地热流体的热量传递到用户家中，实现高效、清洁的供暖。在农业领域，利用地热温室种植蔬菜、花卉等作物，能够调节温室温度，促进作物生长，提高农产品产量和质量。

4.2.2 地热发电技术

对于高温砂岩型水热系统地热资源，可采用地热发电技术进行利用。常见的地热发电方式有闪蒸发电、双循环发电等。闪蒸发电是将高温地热流体引入闪蒸器，使其部分汽化产生蒸汽，驱动汽轮机发电。双循环发电则是利用低沸点工质，通过换热器吸收地热流体的热量后汽化，驱动汽轮机发电。在实际应用中，根据地热流体的温度、压力等参数选择合适的发电技术。例如，对于温度在 150 - 200℃ 的地热流体，采用双循环发电技术更为合适，能够提高发电效率，降低设备投资成本。

4.2.3 压缩式热泵技术应用

压缩式热泵技术在砂岩型水热系统地热资源利用中具有独特优势。通过压缩式热泵，可以将低品位的地热热能提升为高品位热能，扩大地热资源的应用范围。例如，在一些地热流体温度较低的地区，利用压缩式热泵将地热流体的热量提升后，用于供暖或工业生产过程中的加热需求。压缩式热泵系统主要由压缩机、冷凝器、节流阀和蒸发器组成，通过工质的循环相变，实现热量的提升和传递。在实际应用中，优化压缩式

热泵的系统参数，如选择合适的工质、优化压缩机的运行频率等，能够提高热泵的性能系数（COP），降低能耗，提高地热资源的利用效率。

五、开发实践案例分析

以某地区的砂岩型水热系统地热资源开发项目为例。通过前期地质调查和热储参数测试，确定该地区热储层砂岩厚度平均为 250 米，孔隙度 20%，渗透率 300 毫达西，热储层温度在 120 - 150℃之间。采用经济技术评估方法，计算出该项目的净现值为正，内部收益率高于基准收益率，表明项目具有经济可行性。

在开发实践中，采用定向钻井技术，成功钻出多口高效开采井。利用地热流体直接供暖，为周边多个小区提供了清洁供暖服务，同时建设了一座小型地热发电站，采用双循环发电技术，将部分地热资源转化为电能并入电网。此外，引入压缩式热泵技术，对部分低温地热流体进行热量提升，用于工业烘干过程，提高了地热资源的综合利用效率。该项目的成功实施，为砂岩型水热系统地热资源开发提供了宝贵的实践经验。

六、砂岩型水热系统地热资源开发的前沿研究与展望

6.1 前沿研究进展

当前，针对砂岩型水热系统地热资源的研究不断深入，在多个前沿领域取得了进展。在热储模拟方面，结合大数据与人工智能技术，构建更加精准的热储模型成为研究热点。通过收集大量的地质、热储参数以及开采数据，利用机器学习算法对热储模型进行训练和优化，能够更准确地预测地热流体的运移规律和热储层的长期性能变化。例如，有研究团队开发了基于深度学习的热储模拟模型，该模型能够快速处理复杂的地质数据，对热储层在不同开采方案下的温度、压力变化进行预测，为开发方案的优化提供了有力支持。

在材料科学领域，研发适用于地热开采和利用的新型材料取得了一定成果。针对地热流体的高温、高压以及强腐蚀性环境，研究人员正在开发新型的耐高温、耐腐蚀管材和密封材料。例如，一种新型的陶瓷基复合材料，具有优异的耐高温性能和良好的耐腐蚀性，有望应用于地热开采井，提高井管的使用寿命，降低开采成本。此外，在热能转换设备方面，新型的高效换热器和热泵组件材料的研发也在进行中，这些材料能够提高热能转换效率，降低设备的能耗。

6.2 开发过程中的环境影响及应对措施

砂岩型水热系统地热资源开发过程中可能会对环境产生一定影响。地热流体的开采可能导致地面沉降，这是由于热储层中流体的抽取使地层压力降低，引起上覆岩层的变形。为应对这一问题，需要建立完善的地面沉降监测体系，利用高精度的测量技术，如全球定位系统（GPS）和合成孔径雷达干涉测量（InSAR）技术，实时监测地面沉降情况。同时，合理控制

地热流体的开采量和开采速度，通过数值模拟等手段，优化开采方案，确保热储层压力在可控范围内，减少地面沉降的风险。

地热流体中通常含有一定量的矿物质和化学物质，如重金属、氟化物等，若处理不当，可能会对土壤和水体造成污染。因此，在开发过程中，需要建立严格的地热流体处理和排放制度。采用先进的污水处理技术，如离子交换、膜分离等方法，对地热流体进行净化处理，去除其中的有害物质，使其达到排放标准。对于处理后的地热流体，可考虑进行回灌，不仅能维持热储层压力，还能减少对环境的影响。

6.3 不同地区开发的差异化策略

不同地区的砂岩型水热系统地热资源具有不同的特点，开发策略应因地制宜。在人口密集的城市地区，由于对能源需求大且对环境要求高，地热资源开发应侧重于高效的供暖和制冷应用。利用地热热泵系统，为城市建筑提供冷暖服务，既能满足能源需求，又能减少城市的碳排放。同时，结合城市的分布式能源系统，将地热发电与其他可再生能源发电相结合，实现能源的稳定供应和高效利用。

在偏远的农村或山区，地热资源开发可与当地的农业、旅游业相结合。利用地热温室发展特色农业种植，提高农产品附加值，促进农村经济发展。同时，开发地热温泉旅游项目，打造集休闲、养生、旅游为一体的特色产业。例如，在一些山区，建设地热温泉度假村，吸引游客前来观光度假，带动当地旅游业的发展，实现地热资源的综合利用和区域经济的协同发展。

七、结论

砂岩型水热系统地热资源具有较大的开发潜力，通过科学合理的开发潜力评估方法，能够准确判断其资源储量和开发可行性。结合热能工程领域的先进技术，制定针对性的开发策略，包括高效的地热开采技术、多样化的热能转换与利用方式以及压缩式热泵技术的应用等，能够实现砂岩型水热系统地热资源的高效开发与利用。在未来的地热能开发中，应进一步加强对砂岩型水热系统地热资源的研究，不断完善开发潜力评估体系，创新开发实践技术，同时关注开发过程中的环境影响，制定差异化的开发策略，推动地热能产业的可持续发展，为全球清洁能源供应做出更大贡献。

[参考文献]

- [1]李明，等。砂岩型地热资源地质特征与开发潜力研究[J].地质学报，2022，96（5）：1567 - 1578.
- [2]王丽，等。地热资源热储参数测试与评估方法综述[J].地球科学进展，2023，38（8）：890 - 902.
- [3]张军，等。压缩式热泵在地热利用中的应用研究进展[J].热能动力工程，2024，39（3）：1 - 8.
- [4]赵强，等。砂岩型水热系统地热发电技术实践与展望[J].新能源进展，2025，13（2）：112 - 120.