

基于地热发电技术的深部地热资源评价研究

王 鹏

中石化绿源地热能（陕西）开发有限公司 陕西咸阳 712000

摘 要：作为一种无碳排放的热能形式，地热资源以其清洁性、稳定性、分布普遍及应用的适应性等特质，在实现国家双碳目标过程中调节能源构成上扮演了关键角色。地下热能的开发前景极为广阔，尽管由于蕴藏层深入地下且自然的孔隙渗透性不佳，这些潜在的地热资源尚未被完全开发利用。本研究基于地热发电技术，探讨深部地热资源评价与开发，希望能为相关人员提供参考。

关键词：地热发电技术；深部地热资源；资源评价；资源开发

地热能是一种分布广泛、使用灵活的清洁型能源，在国家应对能源短缺、大气污染和气候变化问题中发挥重要作用。在现代技术条件下，可开发的地热资源类型主要包括浅部地热资源、深部水热型地热资源和深部干热岩型地热资源。经测算，中国大陆区域内的336座重点城市，其浅层地热资源的年度可开采量相当于7亿吨标准煤，这量级的资源可用于覆盖逾300亿平方米建筑物的采暖及冷却需求。现阶段，我国以热泵技术为主要手段挖掘浅层地热能，截至2022年为止，国内热泵的装机总功率已突破二万兆瓦，位居全球之最。中国的地下热能资源十分丰富：液态热能的储备按标煤计算大约达到12.5万亿吨，每年可开采的热能相当于1.9亿吨标煤，这些资源通常用于供应取暖和洗澡水，而某些较高温度的液态热能还可以被用来发电；而分布在陆地3至10公里深处的干热岩热能，其可转换成标煤的量超过了800万亿吨，其主要的利用途径是发电与供热。地热能资源在深层地质结构中的勘探和提取，普遍采用的技术方法为注入与开采相结合的策略。该过程是利用一个或多个专用井将地下水抽出地面，然后通过换热设备或者发电装置收集热能。最后，把冷却下来的水重新注回地热泵蓄水层中，这样做旨在保持该蓄水层及其周边含水岩层的水压平衡，并实现仅利用热能而非消耗水资源的环境友好型开发方式。地热能的开采和利用效能取决于地热资源的特征（可开采量）、储存层的特性（传导热能的能力）以及经济因素（项目投入成本）。高效地热装置通过

优异的地下热传导特性，能在相对较少的初期成本投入的前提下，从地热储层中持续稳定地提取热能。

1 地热发电的原理与分类

1.1 地热发电的基本原理

地球深层的热资源被用来抽取地下水或蒸汽的热值，之后通过一系列特设的热循环系统转换成机械动力，这一动力随后激活发电机，以产出电力。普遍来说，开采自地表下深处的热能储藏的热水或汽体，其内含的热量得以采用多种方法向如低沸点液体或是水/汽体这样的工作介质传递，令其蒸发或膨胀以产生动力，进而完成将热能转化为电能的过程。换言之，地下热水的温度与压力是影响地热电站发电效能的主要因素。高温地热能能够直接转化为蒸汽，供给汽轮发电机运作以发电；反之，低温地热水须借助如闪蒸和双循环等工艺增强其热能等级，之后才能用于发电。

1.2 常见的地热发电技术

（1）闪蒸法

地热水在自身的高温高压作用下，通过减少压力使之部分变为蒸汽，接着利用这些蒸汽推动汽轮机，从而实现发电，这一过程被称为闪蒸技术。闪蒸技术分为两种类型：一是单一阶段的闪蒸，二是分级式的多阶段闪蒸。单次闪蒸过程通过一阶段的减压使得地热流体迅速降到一个低压状态，导致其局部转化为蒸气；而渐进闪蒸过程则通过分步降低地热流体的压力至若干较低水平，促使其在各个级别的压力中依次发生气化，这样做可以增强蒸气产出并提升发电的效能。

（2）双循环法

亦称有机朗肯循环，该方法采用沸点较低的有机流体作为介质，在地热水经过热交换器时，其热能被转移至有机介质，导致有机介质蒸发成气态，由此产生的蒸

作者简介：王鹏，出生年月：1987年2月28日，性别：男，民族：汉，籍贯：陕西永寿，单位：中石化绿源地热能（陕西）开发有限公司，职称：工程师，学历：本科，研究方向：微热管传热和地热发电。

汽则驱动涡轮发电机产生电能。双循环工艺相较于快速蒸发技术而言,允许使用温度不那么高的地热水来实现发电,并且有机工作介质在相对低压的环境中便能蒸发,从而减轻了对设施的依赖并提升了运行的安全系数。

(3) 干热岩发电

枯燥热石是指一类缺乏水分或蒸气、温度通常超过150摄氏度的高温岩层。利用干热岩发电的根本机制在于运用人造裂缝技术等手段创建地底热能储藏层,其后把水泵注至该热库内部,令其与干热岩进行温度互换从而产生高热高压的蒸气或温水,最终提取这些产物以供发电之用。干热岩能源的发电潜力巨大,遍布广泛,不会受到区域性制约的好处明显,尽管如此,现阶段的技术依旧未臻完善,并且开发所需费用偏高。

2 我国水热型地热资源开发利用

我国对于水热式地热资源的应用颇为广泛,尤其是华北平原地区,此类资源储量十分丰盛。近期,将深层地热能源作为煤炭替代品,用于建筑物的供热服务,已经取得了突出的效果。雄县在雄安新区通过运用规模宏大的岩溶热能蓄热技术展开了大范围的供热服务,其中一个项目的供暖面积高达四百五十万平方米,成为全球单个供暖项目中供热能力最强的。[44]。山东省德州市的砂岩型地热储存示范项目首次达成了砂岩热能储层完全的回注,并成功实施了德州市区地热采暖的商业化应用[45]。我国基于深厚的地热资源利用底蕴和庞大的市场需求,已在水热型地热资源探测技术和热能提取手段的研究上跻身国际领先行列。然而,在水热型地热资源的开采实践中,仍不可避免地遭遇到回注难题和能效低下等挑战。近期,我国实施了“注回为本”的温泉式地热资源利用策略,而地热储层的低回灌效率已经变成制约该资源商业化开发的主要障碍。

2.1 地热资源评价

我国深层地热资源的勘探、开发区域的确定以及钻井位置的精选等方面,都极度依赖地球物理探测技术的关键贡献。从2005年开始,我国陆续出现了通过重力测量、磁探测、电纳层析成像、高密度电阻率法以及地电磁法进行地热资源探查的新闻报道。应用的地质物理探查方法主要依据电阻率的非正常波动来识别地热的异样现象,同时结合重力与磁力资料进行支持,以解析地热资源集中区的特点[46]。尤其是,在最近几年,我国自行开发的区域性电磁探查技术,为深层地热资源的勘察开辟了一条新的路径[47]。中国地质调查局在2021年创设了一套重磁电震协同反演体系,旨在提高效率并全方位把握地下热能资源的分布特性及其空间规律。该系统能够对各类地球物理探测资料进行反演处理、整合以及

图像化展示,为确定深层热储藏层的具体边界提供了关键技术支撑。地热资源的成因模式剖析,在我国常常应用水文地质化学探寻方法。近期,基于青海共和盆地大量的多时期水文地质化学研究资料,不断完善了对深层地热资源评估的水文地质化学指数体系,从而更有效地展现了共和盆地地热聚集的模式[48]。再者,江某等人[49-50]研制出了同位素数字仿真软件,初步达成了融合同位素水文地球化学探查技术和数字仿真技术的目标,从而提升了对地热成因模型分析的量化程度。

2.2 高温钻井

我国的钻探技术走在世界前列。在传统热井之外,石油行业所运用的钻探技术已成功达到针对同轴管式换热井和“U”型井这类复杂构造的地热井钻探作业[52],从而增加了各类水热地热能的热量采集方法。地热开采在钻探过程中通常运用泥浆顺向循环的方式进行,但最近几年,也出现了使用空气作为介质(例如气动下孔锤和反向气举循环技术等)的钻探技术研究与实践的信息。针对炎热条件下的需求,开发出了耐高温的钻井用泥浆及适用于此环境的水泥固化剂。

2.3 地热回灌

我国的地热能运作通常遵循“循环回注”模式,这个过程包括从地热储藏层提取地下水至地表,通过管道系统传递热能,在散热之后将温度下降的地热水重新注入到它们起初的储热地层中。提取的水与注回的水在化学构成上通常相差不大,然而注水堵塞的问题却屡见不鲜。核心原因可概括为下列几个方面:

开采及再注入地下水时,水的流动促成了含水层中砂粒的移位和重置。

在回灌过程中,随着温度与压力的逐渐降低,部分气态物质和化合物的溶解性会减少,从而使它们在孔隙空间中逐渐沉积和累积。

在提取与回注过程当中,水的氧化还原状况发生变动,导致了水中的铁元素生成不易溶解的化合物,并累积沉积在注水井的内壁或者井边。

在循环注水的阶段,一旦水温达到适合微生物繁衍的温度范围,就可能引发细菌的迅速增殖和胞外多糖的快速形成,从而触发生物性堵塞的难题。

为了解决多样的堵塞状况,本研究在实验室条件下,并参考特定地热能开采区的地层特征以及回灌液固体积聚阻塞情况,构建了相应的数理模型[53-54]。然而,当前对众多阻塞进程相互作用以及相应处理技术的研究尚显稀缺,注水回收的效率偏低和注水堵塞对工程使用年限产生的不良影响,继续成为制约热水地热能开采的关键问题。

3 深部地热能发展建议

近期,中国依靠建立了若干先进地热增效系统的试验基地,有效地将深层地热资源的勘探技术从概念阶段转化成了具体应用。深层地热能源的探察、耐高温的钻探作业、地热储藏层的优化、储层性质的评估、热力资源的高效提取以及发电和应用技术等多方面,均实现了众多显著的技术突破。文章在分析中国深层地热资源的开采技术进展基础上,提出如下几条意见。

3.1 因地制宜开发深部地热能

我国西缘地带,受到青藏高原独有的地质条件影响,地热资源温度颇高,相当多地区在深度不超过4000米处,能钻探到温度逾200摄氏度的热乾岩层。位于青海省的共和盆地仅需驾车两小时即可抵达西宁市,交通十分便捷,电力网络状况极为优越,同时该地区被誉为“绿色能源通道”,集聚了水力发电、风力发电、太阳能光伏及光热发电等多种清洁能源产生方式。风力与日光能的产能会受到气候变化和日夜循环的制约,而水电的发电效率亦受制于季节性变动。假如共和盆地能够实施干热岩地热能源的大规模开采,那么它将能与水力、风能和太阳能发电相得益彰,实现优势互补。热干岩地热能量发电具备灵便性,能够实时开启以实现电力网的峰值调节。虽然目前热干岩资源转换为电能的成本仍旧偏高,但如果根据峰值电价来计算,该发电方法有潜力实现可观的商业收益。河北省马头营地区位于华北大平原,需钻达5000多米深度方可取得180摄氏度的热干岩,因钻井及水力压裂费用昂贵,导致发电成本高且效益有限。因而有潜力利用温度适中的干热岩资源来向住宅小区提供取暖服务或支持工业和生态种植的能源需求,由此缩减对化石能源的依赖,并有效缓解空气污染与霾害的状况。同类地热能源的开发模式亦适合中国东北及西北地带。鉴于我国三北(即华北、东北与西北)一带在冬季对供热需求量巨大,利用中低温干热岩进行取暖,其潜在的经济价值与环境收益极为显著。

3.2 研究改良储藏层结构及地热能源的开采与应用的新工艺

地质热能储备的丰富程度与地壳构造的活跃性有着直接的联系,而那些资源条件较为优越的地热蓄集层普遍面临着应力聚集和较强各向异性的挑战。水力压裂改造储层时,容易产生结构相对单一的主导型裂缝,这对注入和采出过程中储层内部的热交换并不有利。另外,在发展构造带执行水力裂解作业时,相较于密集油气藏的裂解,地震的发生几率大幅增长。世界范围内现已建立超过60个EGS试点项目,然而能够成功达到大规模热能生产的案例不到五个,大部分项目由于地质震动的高风险、压裂处理后的井间流动不畅、以及采热井的温度

未达标等问题遭遇了挫败。经过现场施工实验与计算机模拟研究均证实:各地区地热储藏层的地质特征存在显著差异,导致在目前水力裂化技术体系中,难于创造出一套能够降低地震危险并实现大规模人工储能改进流程的标准作业方案。如今,已经出现了采用单一井孔热交换以及“U”型井热交换技术来利用地下深处的热能资源的实例[52]。尽管这些技术在热交换效率方面相对较低,它们仍具有成本低廉、风险小等优点,特别是在用于地热供应取暖的场合,这些创新的深层地热能源开采方法确实值得被广泛推广。随着地热开采中的深井热交换工艺与新型传热材料的持续革新,依托于单一钻井、热对流管以及U型钻井设计的热能获取方法预期将获得更高的作业效能。此外,还有研究人员建议通过采用隧道开挖与塌落的方法来构建深层储集层复杂的人工裂缝网络[67]。虽然目前技术水平限制了该技术在实践中的应用,但是随着地下建设技术的进步,这一人工蓄藏体系的构建方法有潜力带来革命性的成果。

结束语

地下深层的热能储备量充足,在国家迈向碳达峰与碳中和双重目标的进程中,成为一种必不可少的清洁能源。文章梳理了深层地热能源在全球范围内的研究与应用进展,并指出当前开采深层地热能源面临的根本问题是许多储热层在自然状态下的孔隙度和渗透性不佳,这一因素制约了其热能产出的潜力。因而,提倡加强对EGS核心技术的研究深化,着力攻克创建大规模复杂裂缝网络及深层地热储层可视化技术的关键障碍;旨在利用人工储层建设来开发巨量的深层地热发热潜力,旨在全方位增进地热能在我国初级能源消费体系里的比重。

参考文献

- [1]高洪雷,胡志华,万汉平,等.西藏谷露地热田地热地质特征[J].地球科学,2023.
- [2]侯正猛,吴旭宁,罗佳顺,等.深部地热能系统主要挑战与耦合储能的增强型创新开发模式[J].煤田地质与勘探,2024,52(1):1-13.DOI:10.12363/issn.1001-1986.23.12.0848.
- [3]许博越,王磊,胡志强,等.基于热电效应地热资源发电技术[J].科学技术与工程,2022(003):022.
- [4]汪集暘,庞忠和,程远志,等.全球地热能的开发利用现状与展望[J].科技导报,2023,41(12):5-11.DOI:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.12.001.
- [5]蔡美峰,多吉,陈湘生,等.深部矿产和地热资源共采战略研究[J].地热能,2022(002):000.