



探寻更深处的“地心之热”

阅读提示

尽管我国地热资源利用的历史悠久,地热能开发利用总量居世界首位,但仍主要以中浅层地热的直接利用为主,深部高温地热资源探测、评价、选区、钻完井、人工热储建造和开发技术起步较晚,深部地热资源勘探开发亟待培育壮大。

目前,我国埋藏深度在3000米以浅的中深层水热型地热资源总量相当于1.25万亿吨标准煤,埋藏深度在3000~10000米的深层地热资源规模相当于856万亿吨标准煤。相较中深层地热资源,深层地热资源量更大、温度更高、资源禀赋更好、应用场景更广,一旦攻克关键技术,对端牢能源饭碗、绿色低碳发展具有重要意义。

中国石化地热发展历程

1998年

- 打出第一口地热井(三普1井,2975米)

2006年

- 成立首家地热中外合资公司(绿源地热能开发公司)

2009年

- 率先进入雄县勘查开发地热

2012年

- 成立国家地热能中心
- 首个联合国地热供暖清洁发展机制(CDM)项目

2016年

- 成立地热能专委会
- 成立首个国际地热技术研发合作中心

2019年

- 首口干热岩井压裂成功
- 代表中国竞得2023年世界地热大会举办权

2023年

- 成功承办世界地热大会
- 发布首个IGA世界标准
- 实施首口5000米地热科学深井
- 牵头成立深部地热领域创新联合体



产学研用一体化协同创新 加快推进深部地热资源勘探开发

嘉宾:石油勘探开发研究院专家 张英

问:我国地热能开发利用总量居世界首位,但主要以中浅层地热的直接利用为主。有专家认为,深部地热资源虽然开发难度极大,却是地热能用于工业领域、真正替代化石能源最有前景的方向。那么,与中浅层地热资源相比,深部地热资源有什么特点?

答:地热能是赋存于地球内部岩石体、流体和岩浆体中的热能。根据埋深不同,地热资源分为浅层、中深层、深层三大类,对应深度范围为200米以浅、200~3000米和3000米以深。对于深部

的定义,业界并没有明确的概念。有专家认为,深部与浅层相对应,200米以深都可以称为深部,中深层和深层地热都属于深部地热。我个人更倾向于将深部与深层相关联,依托现在的钻井技术,目前主要指3000~10000米埋深范围的地热资源,现阶段重点关注的深度为3000~6000米。对地热资源的深度界定也有一个变化的过程。20世纪80年代认为2000米以深就是深层,现在一般认为3000米以深为深层,未来随着勘探开发技术的进步,深层的界限还可能向下延伸。

地热资源按照温度分为低温(<90摄氏度)、中温(90~150摄氏度)和高温(>150摄氏度)三大类。温度越高,可利用的方式越多、经济价值越大,品位就越高。以地热发电为例,高温地热发电效率最高,其次为中温,而低温地热发电效率很低,基本不具有经济效益。发电之后的尾水还可用于干燥、制冷,以及进一步的居室供暖、温泉洗浴和种养殖等,打造完整的地热梯级利用产业链。低温地热资源一般只能用于居室供暖、温泉洗浴和种养殖等,相对而言经济性较差。

多米;最高温的地热井位于冰岛,直接钻遇岩浆,温度超过400摄氏度。

除了深度、温度增加,深层地热资源开发的技术手段也在不断创新。随着埋深增加,深层地热资源中干热岩资源所占比例不断增大,远远超过常规的水热型地热资源,因此成为研究的重点和热点。

干热岩,顾名思义,指不含水或只含有少量水、温度大于150摄氏度甚至180摄氏度的岩石。需要通过创建开放人工水热系统,或采用封闭井筒换热方式,将其中富含的热能采出。近50年,美国、欧洲、日本等国家和地区陆续开

展深部地热资源有两种赋存形式。一种是水热型,赋存于地下水及其蒸汽中,通过开采天然地下水热水采出地热能;另一种是岩热型,赋存于固体岩石中,利用人工采热工质进行换热采出地热能。根据地热能特点和用能需求,可以采用单井换热、对井注采循环取热、多井群采群灌取热等方式。采出的地热能按照“品位对口”的思路,根据不同温度,用于发电、制冷、供热等,还可以进行梯级利用,如先发电再制冷或农业干燥,尾水还可用于居室供暖、制生活热水等。

地球的地表向深部延伸是一个逐渐增温的过程,一般地温梯度为3摄氏度/100米左右,即每向下100米左右,温度增加3摄氏度。按此地温梯度推算,3000米以深岩石地层温度一般都超过90摄氏度,有些存在地下高温热异常的地区,甚至可以超过150摄氏度,形成高温地热资源,再向下延伸,温度会更高。前期研究认为,我国陆区3000~10000米埋深蕴藏地热折合标准煤715万亿~856万亿吨。即使只有一部分获得有效开发,都可以获得显著的经济和社会效益。

展增强型地热系统(Enhanced Geothermal System,或Engineered Geothermal System,简称为EGS)研究和现场试验,希望解锁干热岩地热资源的规模化经济开发。目前,欧洲、美国的少量项目实现了商业化或准商业化运行,但距规模化推广还有较大差距。

我国地热资源直接利用规模连续多年居世界首位,其中,中深层地热供暖面积达到5.9亿平方米,也位列全球第一。近年来,我国也从国家和地方等多个层面设立现场试验项目,探索深部地热,尤其是干热岩资源开发利用,但尚未实现商业化突破。

用重点实验室,攻关形成了中深层水热型地热资源开发“两项基础理论、六大核心技术”,促进了地热产业快速高质量发展。

依托牵头承担的国家深地重点研发项目,中国石化布局深部地热资源探测评价,在海南省海口市部署了国内最深的地热科学深井——福深热1井。目前该井钻进深度超过5100米,井底温度超过180摄氏度,发现了以花岗岩为热储的深部高温地热资源,实现了我国华南地区深层找热突破,为开展干热岩资源开发利用研究和现场试验提供了平台。

断推进,深部地热资源勘探开发理论与技术将取得快速进步,有望实现“方向准、找得到、采得出、用得好”,使深层地热资源成为社会用能供给的重要组成部分。

在开发地热的过程中,还可以耦合锂等多种矿产资源开发,CCUS、储能等,形成多种能源资源协同勘探开发利用模式,为我国能源绿色低碳转型和新型能源体系建设提供更有利支撑。

问:当前,我国能源体系面临稳定供应与清洁低碳转型的双重挑战和节能减排、新能源替代的重大需求。在此背景下,加强我国深部地热资源勘探开发有何积极意义?

答:地热资源作为五大非碳基能源之一,具备资源量大、可再生、运行稳定持续、碳排放量低、利用方式多样等优势,近年来受到国家及能源行业的高度重视。规模有效开发地热资源,可在碳减排与清洁能源替代领域发挥重要作用。

问:地热能的开发利用不会直接排放二氧化碳,已经并必将在世界新能源版图中稳占一席之地。目前,国内外深部地热资源的勘探开发状况如何?

答:受全球大地构造的影响,深部地热资源分布并不均匀。同样3000米埋深下,位于板块边缘的冰岛、美国西海岸等地区温度可能超过300摄氏度,而地处板块内部的我国准噶尔盆地可能不足80摄氏度,但向深部进军是一致的。在全球范围内,地热资源开发正不断向更深层、更高温度挺进。目前,最深的地热井位于丹麦,达到6000

问:多年来,中国石化积极顺应全球能源绿色低碳发展趋势,持续深耕地热领域,目前总体发展情况如何,取得了哪些成效?

答:作为我国地热产业发展的领军企业,中国石化多年来不断推动地热能规模化、效益化发展,已成为国内最大的地热能开发利用企业。2023年9月,中国石化代表中国承办第七届世界地热能大会,引领我国逐渐形成以供暖(制冷)为主的地热发展路径,为国际地热发展提供了新思路。

自1998年介入地热产业,中国石化

问:受基础理论研究欠缺、勘探开发技术不足等限制,我国在深部地热取热发电和梯级综合利用等方面与发达国家仍存在差距。未来,应如何立足现实加快推进深部地热资源开发利用?

答:实现深部地热产业高质量发展,离不开科技创新的有力支撑,离不开全产业链的整体联动。今年1月23日,经国务院国资委批准,中国石化牵

专家视点

聚焦核心需求 打造深层地热开发关键技术链

□王磊

深层地热能储量大、分布广、稳定性强、清洁可再生,是地热资源开发领域的“重头戏”。我国地热开发利用规模已处于世界领先地位,但受勘探开发基础理论与关键技术制约,深层地热资源的规模开发和经济利用仍是难点。

由于自身赋存特性,深层地热资源的开发面临着“二复杂(地热系统复杂、地质工程复杂)、四高(高温、高硬度、高应力、高致密)”的特征。这些特征带来了一系列开发难题,其中成井效率低和压裂改造难是世界公认的核心技术难题。

深层地热资源地热系统复杂主要表现为应力场、化学场、渗流场和传热场多场耦合,地质系统的演化机制难以明确,系统的描述和预测较为困难;地质工程复杂主要表现为地层属性多解性强,储层参数预测误差大,钻完井优化设计困难,热储改造成功率低。此外,深层地热储层还具有超过200摄氏度高温、可钻性达到10级的高硬度,以及两倍以上泥页岩地层高应力和高致密的特性。

多重问题叠加对实际工程实施的每一个环节都带来严峻考验,也给钻井施工造成钻速低、周期长、高温不适应、成本高等问题。同时,深地条件下地应力场、岩石力学参数、天然裂缝展布状态预测困难,复杂缝网扩展与有效连通难以控制,使得大体积热储改造的难度直线上升。如果无法在此极端条件下高效构建大流量的换热通道,就难以实现深层地热能规模化开发。

面对深层地热开发各个环节严峻的技术考验,中国石化工程院在研究初期便制定了“聚焦关键节点,各个精准击破”的思路,针对核心难题,先分析“病因症结”,再“对症下药”。

为提升深部地热能成井效率,工程院技术团队首先从机理研究入手,开展了高温岩体物性特性基础研究,搭建了高温岩体力学参数测试系统和试验方法,获取了深部热储岩石力学和热物性参数特性,揭示了高温硬岩在成井过程中的抗钻特性、围岩稳定、热破裂特征等演化规律。在此基础上,工程院建立了深层地热钻井钻具动力学动态模拟分析方法,揭示了深层地热井斜变化规律和钻具磨损机理,研发了耐温200摄氏度的全金属结构冲击破岩工具和抗温230摄氏度防衰退水泥浆体系,形成了高温硬地层高效协同破岩工艺方法。

针对复杂缝网扩展与有效连通难以控制、大体积改造目标难以实现的问题,技术团队从复杂缝网扩展的主控因素入手,物模数模“两手抓”,搭建了高温环境的大尺寸真三轴水力压裂物理模拟实验系统,开展了模拟深层地热储层条件下的裂缝扩展物模实验;建立了深层地热压裂裂缝扩展数学模型,揭示了深层地应力场、高温导致的岩石力学参数改变、天然裂缝强度等因素对水力裂缝扩展的影响。经过大量理论和实验研究,工程院提出了一套深层地热热储改造工艺,研制了高温水力喷射压裂工具、分段压裂工具管柱与工作液,形成了改造前岩性识别与裂缝描述技术,改造过程中裂缝监测技术、改造后评估方法。

针对深层地热流体温度高、采出井沿程温度损失大的问题,工程院自主研发了保温泡沫固井水泥体系和真空隔热油套管等适用性技术,提出了地热井井筒保温工艺和保温段长度优化设计方法。通过模拟计算,技术团队找准井筒温度高于地层温度的临界深度点,在临界深度点以上采取综合保温措施,为地热井穿上最有效的保温“马甲”。

科研有了成果,更要在现场落地,才能为深层地热资源勘探开发提供可靠支撑。

基于自主研发的技术科研成果,工程院积极主导和支撑了多个深层地热勘探开发先导试验,在青海共和盆地、苏北盆地、海南福山凹陷、河北崇礼等地区的深部地热探测工程中进行了成功应用,创造了多项工程新纪录。在青海共和盆地成功实施的GR1井热储压裂改造,取得了国内首口干热岩井压裂试验的突破,完成了GH01井钻井提速、高温固井和测井任务,实现了我国首次200摄氏度以上干热岩热储高温固井和测井施工,后续部分关键技术又支撑了02-05井的钻井施工。工程院还设计了中国石化首口地热科学探井福深热1井的钻井和热储改造方案,目前该井钻进深度已超过5100米。

随着中国石化承办的第七届世界地热能大会成功召开与《北京宣言》的签署,全世界范围地热能和清洁能源发展将再上新台阶,也将为应对全球气候变化、维护能源安全、造福各国人民作出积极贡献。地热开发必然会向更深、更热、利用范围更广的资源领域迈进,必将为深层地热工程技术提出更高、更严苛的要求。中国石化作为地热行业领军者,推动行业健康发展义不容辞。工程院将始终以端牢能源饭碗、保障能源安全为己任,为巩固中国石化地热行业领先地位、构建“一基两翼三新”产业格局提供有力支撑,为推动深部地热资源高质量勘探开发贡献更大力量。

(作者单位:中国石化石油工程技术研究院)