

河南省干热岩赋存地质环境及找矿方向

卢予北^{1,2}, 张 晗^{1,3}, 王攀科^{1,2}, 葛 雁^{1,2}, 申云飞^{1,2}

(1. 河南省深部探矿工程技术研究中心, 河南 郑州 450053;

2. 河南省地矿局第二地质环境调查院, 河南 郑州 450053; 3. 河南省煤炭地质勘察研究总院, 河南 郑州 450052)

摘要:干热岩是战略性清洁能源,属于固体矿产范畴,其赋存条件受控于地质环境。在河南省干热岩资源调查项目基础上,结合国内外干热岩成藏特征和钻探成果综合研究分析认为:河南省干热岩热源主要以侵入岩体热传导和地幔热传导(深部隐伏断裂对流热传导)2种模式;其成藏环境必须具备巨大的稳定的高导热性岩体、巨厚的稳定的低导热性上覆盖层和深部热源3个基本条件。针对目前干热岩资源找矿理论和钻探存在的问题,提出了河南省干热岩初步找矿方向和建议,明确了加大钻探技术和工艺研发的重大意义。

关键词:干热岩;赋存条件;地质环境;找矿方向;河南省

中图分类号:P634;P61 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)02-0001-07

Geological environment and prospecting fields of hot dry rocks in Henan province

LU Yubei^{1,2}, ZHANG Han^{1,3}, WANAG Panke^{1,2}, GE Yan^{1,2}, SHEN Yunfei^{1,2}

(1. Henan Engineering Research Center of Deep Exploration, Zhengzhou Henan 450053, China;

2. No.2 Institute of Geo-environment Survey of Henan, Zhengzhou Henan 450053, China;

3. Henan Provincial Coal Geological Exploration Research Institute, Zhengzhou Henan 450052, China)

Abstract: Hot dry rock, a strategic clean energy resource, belongs to the category of solid minerals, and its occurrence conditions are controlled by the geological environment. With the execution of the hot dry rock resource survey project in Henan Province, and the comprehensive study of hot dry rock reservoir-forming characteristics and drilling results at home and abroad, it is inferred that the heat source of hot dry rock is mainly composed of two modes: the heat transfer of intrusive rock mass and the heat transfer of mantle (convective heat transfer of deep buried faults). The reservoir-forming environment must have three basic conditions: huge and stable high thermal conductivity rock mass, thick and stable low thermal conductivity overburden and heat source. In view of the existing problems in the prospecting theory and drilling for hot dry rock resources, the preliminary prospecting direction and suggestions are put forward.

Key words: hot dry rock; occurrence condition; geological environment; prospecting fields; Henan province

0 引言

干热岩是战略性清洁能源和资源,具有分布广、埋藏深(≥ 3000 m)、岩体温度高(≥ 180 °C)等特点。主要用于发电、供暖、工业烘干等领域,其中,干热岩发电成本是太阳能的 $1/10^{[1]}$ 。

我国干热岩资源主要埋藏在3000 m以深,资源

量巨大。初步调查评价结果显示,中国陆域干热岩资源量为856万亿t标准煤,可采资源量达17万亿t标准煤。根据《河南省干热岩资源潜力调查评价报告》,在评价温度 ≥ 180 °C、深度7000 m以浅的热储层资源量的条件下,可采资源量按干热岩资源总量2%计算,估算河南省累计干热岩资源潜力

收稿日期:2020-06-10; 修回日期:2020-09-26 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.02.001

基金项目:河南省地勘基金项目“河南省干热岩资源潜力调查评价”(编号:20172215)、“河南省郑州西部岩溶地热资源调查”(编号:20192247);
河南省自然资源厅科技攻关项目“河南省隐伏干热岩资源勘查及评价技术研究”(编号:20201651)

作者简介:卢予北,男,汉族,1964年生,教授级高级工程师,地质工程专业,博士,从事深部探测及地热资源勘查技术研究工作,河南省郑州市南阳路56号,13633810500@163.com。

引用格式:卢予北,张 晗,王攀科,等.河南省干热岩赋存地质环境及找矿方向[J].钻探工程,2021,48(2):1-7.

LU Yubei, ZHANG Han, WANAG Panke, et al. Geological environment and prospecting fields of hot dry rocks in Henan province [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2): 1-7.

$20.434 \times 10^{20} \text{ J}$, 可采资源潜力 $40.863 \times 10^{18} \text{ J}$, 相当于 14 亿 t 标准煤。

目前我国许多学者把干热岩资源的赋存模式分为 4 种类型: 花岗岩高放射性产热型、强烈活动构造带型、近代火山型、沉积盆地型^[2-4]。

在干热岩资源调查和勘查时基本都是按照这 4 种成矿理论来圈定靶区, 通过国内大量的干热岩和中深层水热型地热资源钻探成果来看, 除了在青海共和盆地发现沉积盆地型干热岩资源外, 花岗岩高放射性产热型、强烈活动构造带和近代火山型地质背景下干热岩找矿效果不理想, 其岩体温度远远没有达到预期。如福建漳州干热岩钻探工程(高热流花岗岩和强烈活动构造)、云南腾冲火山地热构造带科学钻探工程(火山口)、河南鹤壁黑山地热钻探工程(火山口和汤阴断陷), 均没有发现理想的干热岩。相反, 距这些钻孔 5~50 km 处的地热井温度反而较高, 说明干热岩找矿理论还需要进一步研究^[5-6]。

1 国内外研究现状

1.1 国外研究现状^[7-10]

干热岩研究最早起源于美国。美国洛斯·阿尔莫斯(Los Alamos)国家实验室于 1974 年在墨西哥的芬顿山组织了第一口干热岩钻探工程。紧随其后, 英国于 1977 年在康沃尔郡一个花岗岩采石场开展干热岩试验, 并于 1980—1988 年组织 1700~2600 m 干热岩钻探, 其井底温度 100 °C。

1985 年开始, 日本在 Hijiori 实验站开始了对干热岩发电、钻探、水力压裂等技术的研究。通过试验研究和钻探, 最终于 1991 年在 1800 m 处发现温度为 250 °C 的热水和蒸汽, 其输出的热能约 8 MW。1992 年该实验站又在 2200 m 的深度发现温度为 270 °C 的热储层, 并于 2002 年 8 月建立了干热岩发电站。日本另外一个干热岩项目(Ogachi)位于秋田县, 该项目也采取了上下双储层模式, 上部储层深约 720 m, 温度 170 °C, 下部储层深约 1030 m, 温度 230 °C。

法国 Soultz 干热岩项目位于法—德边界的上莱茵河河谷的 Soultz-sous-Forêts 地区, 该项目始于 1987 年, 在 2007 年建成一个净发电能力为 1.5 MW 的发电站。该项目实施中, 在 3900 m 处建立岩石裂隙网, 温度 > 165 °C, 生产井加深至 5000 m 时, 温度达 200 °C。

2003 年“地球动力”公司在南澳大利亚 Cooper

盆地的沙漠中钻出了 2 个深度达 4500 m 的深孔, 将深井钻到高温岩石上, 并建立了岩石与注入水之间快速的热交换。到 2008 年, 又完成了钻孔 Habanero-3 并进行流动试验, 2009 年 1 月, 该公司利用已施工的钻井建成了一座 1000 kW 的示范电站。

1.2 国内研究现状^[11-15]

1993—1995 年期间, 我国国家地震局地壳应力研究所和日本中央电力研究所开展合作, 在北京西南房山区进行了干热岩发电的研究试验工作。

2008—2010 年, 赵阳升、万志军等通过模拟分析提出了高温岩体地热资源模拟与预测方法, 并做了一系列花岗岩体在高温下力学性质变化及钻孔变形失稳临界条件研究, 提出了埋深净水应力 400~500 °C 时恒温恒压下钻孔变形的粘弹-塑性理论模型, 为我国干热岩开发与利用中钻孔稳定性问题提供了科学依据和理论指导。

2010 年, 中国地质科学院勘探技术研究所等单位建议对沉积盆地区(东北、华北、苏中)、近代火山地区(吉林长白山、云南腾冲、黑龙江五大莲池)、高热流花岗岩地区(福建、广东、江西)3 个重点干热岩发育区展开干热岩资源潜力评估, 并分析了干热岩钻探的关键技术及难点, 倡导从国家层面加强对我国干热岩资源的研究。

2014 年 4 月“青海省共和县恰卜恰镇中深层地热能勘查”钻探 2230 m 深度揭露到温度达 153 °C 的干热岩, 最终 DR3 井在 2927.2 m 终孔深度温度超 183 °C, DR4 井在 3102 m 终孔深度温度超 181 °C。2017 年 8 月, 位于青海省共和县恰卜恰镇 GR1 井完钻深度 3705.42 m, 是国内岩体温度最高的干热岩井, 井底温度高达 236 °C。

2018 年 3 月 19 日, 由中国地质大学(武汉)李德威教授主导的 4387 m 的干热岩开发实验井在海南琼北沉积岩砂砾岩为热储层中完钻, 并钻获 185 °C 的高温优质干热岩。

2 河南省干热岩赋存地质环境模式

岩浆热源和地幔热源储藏在地球深处, 在不同的地质环境下, 对干热岩形成机理不同。在有新的岩浆体侵入的地方, 岩浆热是干热岩的主要热源; 在没有岩浆岩侵入的地方, 并且存在隐伏深大断裂, 则地幔热是干热岩的主要热源。所以说, 目前干热岩的主要热源是以热传导为主的岩浆热源和

以对流热传导为主的地幔热源2种模式,实际上,2种热传导方式在地壳中同时存在。无论哪种热源的干热岩其赋存地质环境必须具有较大厚度的低热传导率岩层覆盖,否则散热快,不能形成稳定的干热岩资源。表1是几种常见的干热岩体热物参数。

表1 几种常见的岩石导热系数及热扩散率

Table 1 Thermal conductivity and thermal diffusivity of several common rocks

| 岩石名称 | 密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 导热系数 $\omega/(\text{m}\cdot\text{K})$ | 热扩散率/ ($10^{-3}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$) |
|-------|--|--|---|
| 花岗岩 | 2500~2720 | 2.17~3.08 | 10.29~14.31 |
| 花岗闪长岩 | 2620~2760 | 1.64~2.33 | 5.03~9.06 |
| 玄武岩 | 2840~2890 | 1.61~1.73 | 6.38~6.83 |
| 闪长岩 | 2920 | 2.04 | 9.47 |
| 片麻岩 | 2700~2730 | 2.58~2.94 | 11.34~14.07 |
| 大理岩 | 2690 | 2.89 | |
| 石英岩 | 2680 | 6.18 | 29.52 |

从表1可以看出:几种岩体的热扩散率与导热系数成正比关系,说明导热性好的岩体,其热扩散性也快。与目前全国深部水热型地热钻探和干热岩钻探成果综合证明:没有巨厚低导热盖层地质环境下,花岗岩和火山群地区实现干热岩找矿很难实现突破。所以,目前干热岩资源调查和靶区选定必须考虑其赋存的地质环境条件。图1、图2是当前技术经济条件下干热岩资源赋存地质环境理想模式。

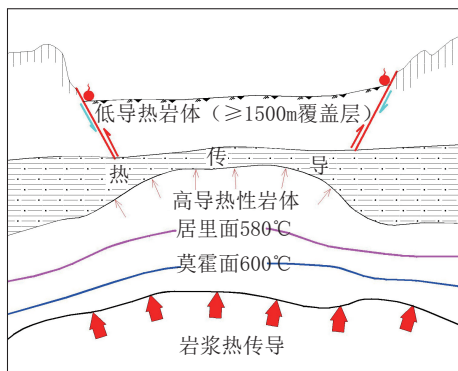


图1 岩浆热传导干热岩赋存地质环境模式

Fig.1 Geological environment model for hot dry rock occurrence with magmatic heat conduction

2017—2019年,河南省首次开展干热岩资源调查项目,据现有地震、地热地质、物化探和水文地质资料,把内黄隆起、伏牛山北麓、息县隆起、新野隆

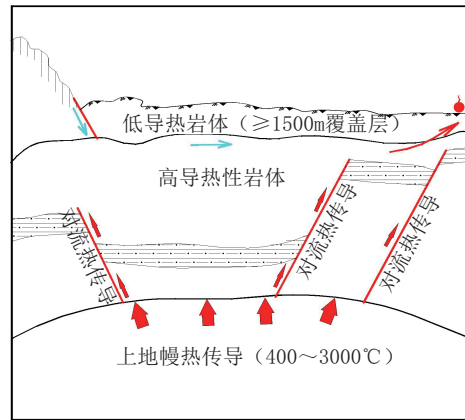


图2 地幔热对流传导干热岩赋存地质环境模式

Fig.2 Geological environment model for hot dry rock occurrence with mantle thermal convection

起4个区块作为典型地区开展干热岩资源潜力调查评价,图3是河南省干热岩资源调查区块及断裂分布图。

通过调查和研究认为,河南省干热岩热储层主要是元古宇、太古宇变质结晶岩层和花岗岩。其岩浆岩主要形成于燕山期及以前,按照中国新构造运动时间界限,其热量释放已完成。所以,河南省干热岩成藏类型只有地幔岩浆或变质岩的传导热和通过深大断裂的对流热2种,不存在新近喷发的岩浆热源和放射性元素的衰变热源。

中深层(800~3000 m)水热型地热资源均分布在新近系和古生界奥陶系、寒武系。古近系、白垩系、侏罗系、三叠系、泥盆系、志留系地层以泥岩、泥质砂岩、砂岩和页岩为主,并且厚度较大,是良好的隔水层和保温层。

信阳新县和南阳新野区块,由于花岗岩分布面积小,变质岩埋藏深,并且周边没有水热型地热资源和地热异常显示。所以,按照经济性干热岩资源评价,这2个区块暂不具备勘查开发条件。

伏牛山北麓(鲁山-栾川)大量分布着花岗岩和变质岩,具有良好的导热性和地热出露,自流地面温度高达60~79℃。由于岩石裸露没有盖层和区内构造发育,具有良好的散热条件。所以,该区域不能形成稳定和高温的干热岩资源。如:从2017—2020年在栾川九龙山和栾川县城组织实施的6个水热型-干热岩钻探试验,钻孔深度分别为600 m(1口)、1200 m(2口)、1800 m(1口)、2000 m(1口)、2500 m(1口),钻遇地层均为导热性较好的花岗岩、

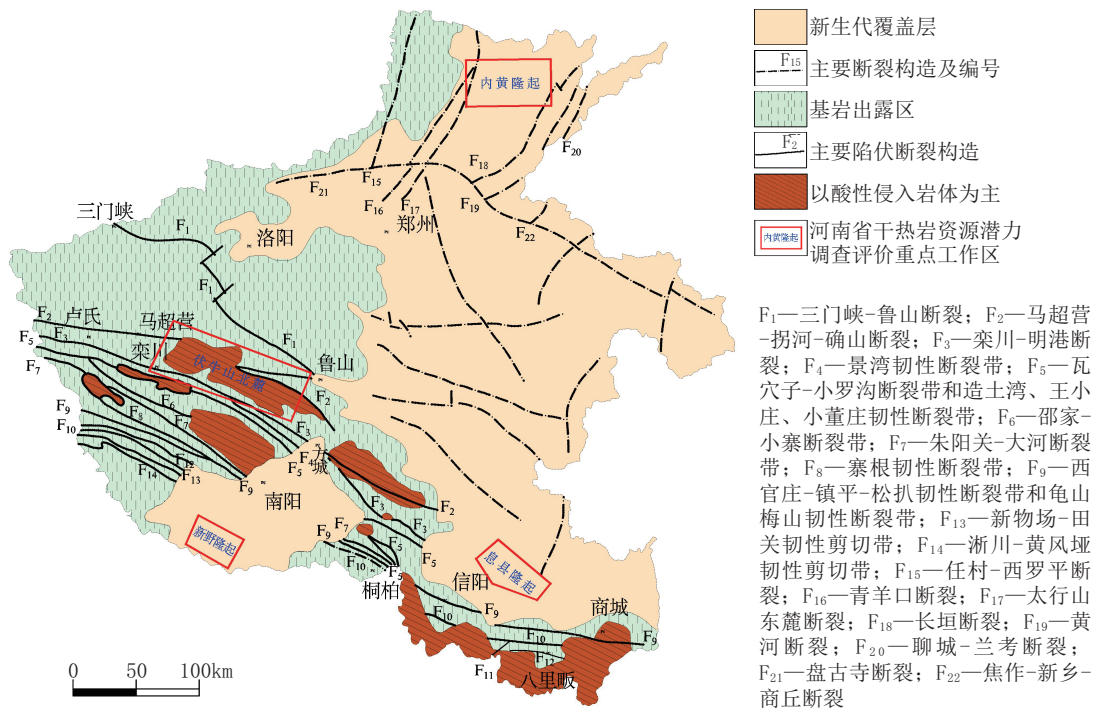


图3 河南省干热岩资源调查区块和断裂分布

Fig.3 Investigation blocks of dry hot rock resources and fault distribution in Henan Province

安山岩和大理岩,其井底温度最大仅 65°C ,出口温度只有 $40\sim 57^{\circ}\text{C}$ 。说明该区域具有一定规模的热源,在地面降水和渗入过程中,深部的热以地热水的方式连续不断携带而出,从而导致深部地热温度逐步下降。实践证明:构造埋藏越浅和越发育、地表水丰富或降雨强度大、开发强度越高,地下热岩体温度下降速率越快。

内黄隆起区块属于汤阴断陷,为北北东向新生代断陷盆地,汤阴断陷带西部边界有青羊口断裂控制,东部边界有汤东断裂控制,两断裂均为深大断裂,有明显重力异常和地热异常显示(西部太行山前安阳、鹤壁地热水出口温度 $50\sim 74^{\circ}\text{C}$),隆起岩性主要由变质岩、岩浆岩组成,据调查推测在 $3800\sim 5000\text{m}$ 存在温度 200°C 的干热岩。

洛阳盆地虽然没在本次干热岩调查区域,但在项目调查过程中,结合现有深部地热钻探资料经河南省国土资源厅和洛阳市国土资源局协商,在盆地西南边缘凤翔山庄(洛阳张沟村)进行了 1800m 干热岩钻探,最终发现洛阳深部存在二长花岗岩,其地热水出口温度达 110°C 。

洛阳盆地处在北西向断裂新安-伊川半坡镇断裂和北东向断裂宜阳-回郭镇大断裂交汇处,两断

裂控制着嵩山隆起与洛阳盆地南部和西部的边界,嵩山隆起使元古宇、太古宇变质岩埋深上抬。下部存在元古宇变质岩或花岗岩侵入体,上部有厚度适宜的盖层。

根据地质环境分析,河南省洛阳盆地和内黄隆起区块周边地下深部都有隐伏的大断裂或构造,变质岩和侵入岩上部覆盖着较厚的低导热性泥岩、砂岩等(厚度 $2000\sim 3000\text{m}$),并且山前均有较高温度($45\sim 106^{\circ}\text{C}$)的水热型地热分布,是下一步进行干热岩钻探的最优靶区。

3 干热岩形成条件及找矿思路

当前技术经济条件下,形成干热岩资源的条件和地质背景必须具备:巨大的稳定的导热系数高的岩体、较厚且稳定的导热系数低的上覆盖层、持续稳定的深部热源3大基本条件。在此成矿模式和理论基础通过地震、地质、水文地质、物化探等手段确定干热岩埋深和成藏地质环境,最终以钻探工程和岩矿测试等方法确定干热岩温度及资源量。

3.1 选择巨大的稳定的高导热系数的岩体

选择巨大的稳定的高导热系数的岩体是进行干热岩资源勘查和开发的前提和基础。在花岗岩

丰富地区可以优先选择具有一定埋深和规模的燕山期、印支期产出的酸性、中性花岗岩和闪长岩岩体。通过国内外干热岩研究现状来看,在一些变质岩(如片麻岩、大理岩)和沉积岩中也存在着干热岩资源,所以,在成藏环境条件好的地区,也可把导热系数高的变质岩或沉积岩岩体作为干热岩。研究发现:岩浆侵入体冷却速率与其半径平方成反比,冷却持续时间与岩体半径平方成正比。所以,岩体的规模决定着干热岩资源的开发时间和质量。同时,值得注意的是,不能在岩体断裂或构造发育区域圈定干热岩靶区,因为附近有大的断裂或构造容易散热,岩体温度将持续下降。

3.2 选择较厚的稳定的低导热系数的上覆盖层

通过福建漳州干热岩钻探、河南鲁山上汤和下汤钻探、云南腾冲火山构造地热钻探来看:虽然区域内地热异常、水热型地热资源丰富、岩体都具有很好的导热性,但是,这些区域都不具备干热岩特征。其共同特征都是没有上覆盖层,并且靶区内构造发育。所以,选择稳定、低导热性的上覆盖层,维持一个相对封闭的热库,保持深部热岩体缓慢散热同样重要。目前进行的干热岩项目绝大部分都选址于盆地中。如欧洲设在法国的干热岩项目就选址于莱茵地堑盆地中,而澳大利亚的第一个干热岩项目选址于库珀盆地中。从国内比较成功的干热岩勘查成果来看:只有青海共和盆地钻遇到了理想

的干热岩资源,其盖层厚度 1500 m 左右,岩性以低导热性泥岩和砂岩为主的沉积地层^[16-19]。

所以,为了干热岩体“保温”上覆盖地层应选择在稳定性和低渗透性的粘土岩、泥质砂岩、砂岩和页岩等,并且要有一定的厚度(≥ 1500 m)。

3.3 选择合适的深部热源

众所周知,在恒温带以深的地层温度随深度增加而增加,内地核温度高达 5000 °C,接近岩石圈的软流圈温度接近 800 °C,所以,地球是一个巨大的热库。前面所述,地球深部热源主要以新侵入岩浆岩热传导和深部大断裂对流热传导为主。综合考虑目前的技术水平和钻探能力,寻找 3000~8000 m 热源相对经济和可行。在此条件下,利用地震、地质和物探方法确定导热系数高的侵入岩体的隆起区块和隐伏深部断裂。目的是寻找相对较浅的热岩体和深部的传热通道。通过理论研究和钻探事实证明:把地热异常区或水热型地热资源富集的地方圈定为干热岩靶区是错误的!这些表象只能说明该区域具有热源和通道,是干热岩找矿标志,而不是干热岩资源靶区。图 4 为青海共和盆地干热岩靶区周边地质环境条件,从图中可以看出:盆地东西均为山脉,且有水热型地热。盆地盖层厚度达 1341 m,分别是第四系(0~697 m)、新近系、古近系(697~1341 m)。上部主要为粘土、泥岩、砂岩等属于低导热性盖层,下部为高导热性花岗岩,是典型

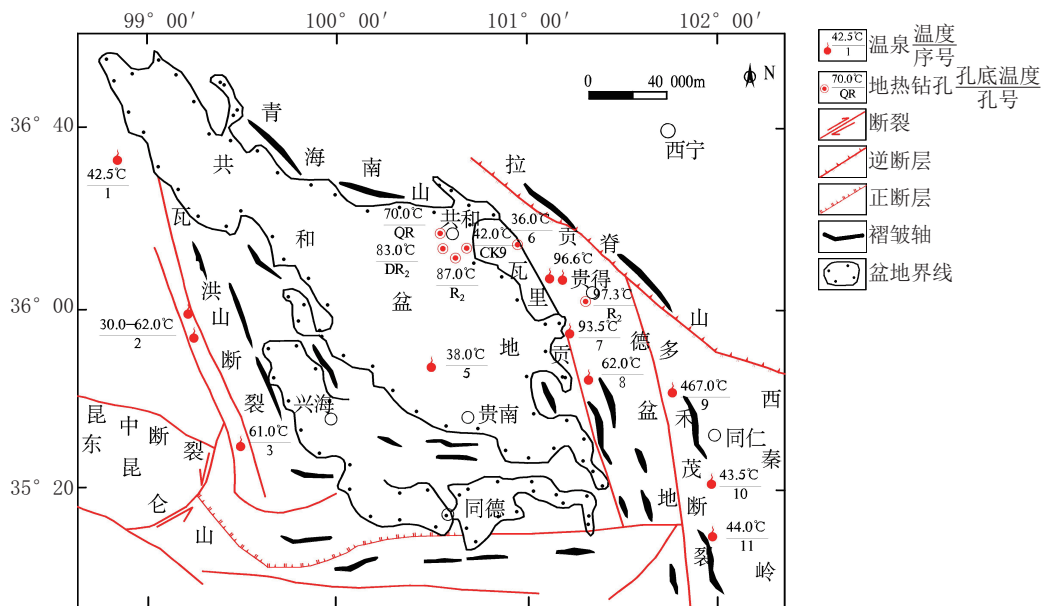


图 4 青海共和盆地干热岩地质环境条件

Fig.4 Geological environment conditions of hot dry rocks in Gonghe Basin, Qinghai Province

的沉积盆地型干热岩。

3.4 干热岩找矿思路及钻探方法建议

3.4.1 干热岩找矿思路

通过上述理论研究分析和钻探成果可知:首先解决学科和技术理论问题,应该明确干热岩属于固体矿产范畴,是寻找热岩体,不是寻找水热型地热资源。水热型地热资源勘查需要以水文地质学为理论基础,其目的层或岩体是构造、破碎发育的地区。而这些地区则不可能形成干热岩资源,水热型地热只是干热岩的找矿标志,所以,干热岩资源勘查需要以地质学为主要理论支撑。其次是以地质学理论,通过物化探和钻探技术手段确定热岩体参数(分布面积、埋深、稳定性及热物性)、盖层参数(厚度、地热地质条件、水文地质特征)、热源类型(传导型、对流型)。最后是重视钻探工程学科的发展和技术创新,使干热岩资源勘查达到“智能、高效、高质、绿色、安全”的目的^[20]。大量的实践证明:无论怎样的方法和手段进行勘查,最终都必须经过钻探来精确定矿藏的规模、环境及热物性指标。所以,钻探工程技术水平决定着我国干热岩资源勘查开发的成败。

3.4.2 干热岩钻探方法建议

干热岩钻遇地层主要有沉积岩(泥岩、砂岩、石灰岩、白云岩、砾岩、页岩、硅质岩等)和变质岩(片麻岩、石英岩、斜长角闪岩、大理岩等)、岩浆岩(花岗岩、正长岩、闪长岩、橄榄岩、玄武岩、安山岩、辉绿岩等)。目前干热岩钻探方法主要采用石油正循环钻井工艺,存在的主要问题是:钻孔失稳(崩塌、掉块、缩径)、孔底温度高、压力异常、岩石强度大、钻井液性能不稳、生态环境污染等,严重影响着钻探效率和钻孔质量^[21-22]。所以,根据干热岩温度高和钻遇地层特征,可将干热岩钻探分为2个阶段,第1阶段为进入高温热岩体前,采用目前的深部钻探方法;第2阶段进入热岩体后,采用耐高温钻井液体系的钻井工艺或其它新技术方法。具体建议:

(1)加大干热岩钻探技术研发和新工艺推广应用力度,成立干热岩钻探技术创新团队。

(2)加速适合干热岩钻探用的耐高温钻井液技术的研究。

(3)组织实施干热岩空气钻进试验研究和多工艺复合钻进试验。如:潜孔锤、气举反循环、空气正循环取心等“二合一”或“三合一”钻探工艺。通过

腾冲火山地热构造带科学钻探工程、栾川地热-干热岩深部钻探工程等实际效果看,空气钻进在破碎和坚硬地层可以有效解决严重漏失、泥浆污染和钻探效率低等问题。

4 结论

(1)干热岩资源是战略性清洁能源,具有分布广、埋藏深(≥ 3000 m)、岩体温度高(≥ 180 °C)等特点,其成藏受控于地质环境。

(2)目前干热岩的主要热源是以热传导为主的岩浆热源和以对流热传导为主的地幔热源2种模式,实际上,2种热传导方式在地壳中同时存在。

(3)岩体的热扩散率与导热系数成正比关系,说明导热性好的岩体,热扩散性也快。目前全国深部水热型地热钻探和干热岩钻探成果综合证明:没有巨厚低导热盖层地质环境下,花岗岩和火山群地区实现干热岩找矿很难实现突破。所以,目前干热岩资源调查和靶区选定必须考虑其赋存的地质环境条件。

(4)形成干热岩资源的条件和地质背景必须具备3大基本条件:巨大的稳定的导热系数高的岩体;较厚且稳定、导热系数低的上覆盖层;持续稳定的深部热源。

(5)温泉出露或构造水热型地热资源丰富地区不是干热岩资源靶区而是干热岩资源找矿标志。

(6)根据河南省干热岩资源潜力调查、中深层水热型地热钻探成果显示和区域深大断裂分布,洛阳-伊川盆地和内黄隆起可能具有大于180 °C的干热岩资源。

(7)钻探工程技术水平决定着我国干热岩资源勘查开发的成败。所以,加大钻探技术和工艺研发对干热岩资源勘查开发具有重大意义。

参考文献(References):

- [1] 卢予北,李艺,卢玮,等.新时代地热资源勘查开发问题研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(3):1-8.
LU Yubei, LI Yi, LU Wei, et al. Research on the exploration and development of geothermal resources in the New Era[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(3): 1-8.
- [2] 甘浩男,王贵玲,蔺文静,等.中国干热岩资源主要赋存类型与成因模式[J].科技导报,2015,33(19):22-27.
GAN Haonan, WANG Guiling, LIN Wenjing, et al. Research on the occurrence types and genetic models of hot dry rock resources in China[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19): 22-27.

- [3] 陆川,王贵玲.干热岩研究现状与展望[J].科技导报,2015,33(19):13-21.
LU Chuan, WANG Guiling. Current status and prospect of hot dry rock research[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19):13-21.
- [4] 李德威,王焰新.干热岩地热能研究与开发的若干重大问题[J].地球科学—中国地质大学学报,2015,40(11):1858-1869.
LI Dewei, WANG Yanxin. Major issues of research and development of hot dry rock geothermal energy[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2015, 40(11): 1858-1869.
- [5] 卢予北,吴焯,侯怀仁,等.河南干热岩资源成因模式与科学问题[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会.第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集.北京:地质出版社,2019:20-30.
LU Yubei, WU Ye, HOU Huairan, et al. Formation mechanism and science problems of hot dry rock resources in Henan Province[C]//Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Twentieth National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Conference. Beijing: Geological Publishing House, 2019:20-30.
- [6] 蒯文静,王凤元,甘浩男,等.福建漳州干热岩资源选址与开发前景分析[J].科技导报,2015,33(19):28-34.
LIN Wenjing, WANG Fengyuan, GAN Haonan, et al. Site selection and development prospect of a hot dry rock resource project in Zhangzhou geothermal field, Fujian province[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19):28-34.
- [7] 王文,吴纪修,施山山,等.探秘“能源新星”——干热岩[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):88-93.
WANG Wen, WU Jixiu, SHI Shanshan, et al. Probe a new energy—hot dry rock[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(3):88-93.
- [8] 杨丽,孙占学,高柏.干热岩资源特征及开发利用研究进展[J].中国矿业,2016,25(2):16-20.
YANG Li, SUN Zhanxue, GAO Bai. A review on geothermal resources characteristics and development potential for hot dry rock[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(2):16-20.
- [9] Moriya H., H.Niitsuma, et al. Estimation of critical pore pressure for shear slip of fracture at the Soultz hot dry rock geothermal reservoir using micro seismic multiplets[J]. Elsevier Geo Engineering Book Series, 2004, 2(4):691-695.
- [10] Cuenot N., J. P. Faucher, et al. The European EGS project at Soultz G sous G Forêts: From extensive exploration to power production [C]//IEEE. Power and Energy Society General Meeting G conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh PA USA: 2008.
- [11] 冉恒谦,冯起赠.我国干热岩勘查的有关技术问题[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(10):17-21.
RAN Hengqian, FENG Qizeng. Some technical issues on hot dry rock exploration in China [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(10):17-21.
- [12] CAGS. The first scientific drilling project for hot dry rock launched in China[EB/OL].[2015-03-31].http://en.cags.ac.cn/News/9794.htm.
- [13] 许天福,张延军,曾昭发,等.增强型地热系统(干热岩)开发技术进展[J].科技导报,2012,30(32):42-45.
XU Tianfu, ZHANG Yanjun, ZENG Zhaofoa, et al. Technology progress in an enhanced geothermal system (hot dry rock)
- [14] 郑宇轩,单文军,赵长亮,等.青海共和干热岩GR1井钻井工艺技术[J].地质与勘探,2018,54(5):1038-1045.
ZHENG Yuxuan, SHAN Wenjun, ZHAO Changliang, et al. The drilling technology for the GR1 well in hot-dry rock of Gonghe, Qinghai Province [J]. Geology and Exploration, 2018, 54(5):1038-1045.
- [15] 本刊编辑部.2018年探矿工程十大新闻[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):1-4.
Editorial Board of Exploration Engineering. 2018 top 10 sci-tech news in exploration engineering[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(1):1-4.
- [16] 李小林,吴国禄,雷玉德,等.青海省贵德扎仓寺地热成因机理及开发利用建议[J].吉林大学学报(地球科学版),2016,46(1):220-229.
LI Xiaolin, WU Guolu, LEI Yude, et al. Suggestions for geothermal genetic mechanism and exploitation of Zhacang Temple geothermal energy in Guide County, Qinghai province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(1):220-229.
- [17] 雷玉德,童珏,杨占梅,等.青海省干热岩资源类型及典型地热模式[J].南水北调与水利科技,2017,15(4):117-122.
LEI Yude, TONG Jue, YANG Zhanmei, et al. Resource types and typical geothermal models of hot dry rocks in Qinghai [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4):117-122.
- [18] 薛建球,甘斌,李百祥,等.青海共和-贵德盆地增强型地热系统(干热岩)地质-地球物理特征[J].物探与化探,2013,37(1):35-41.
XUE Jianqiu, GAN Bin, LI Baixiang, et al. Geological-geophysical characteristics of enhanced geothermal systems (hot dry rocks) in Gonghe-Guide Basin [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(1):35-41.
- [19] 严维德.共和盆地干热岩特征及利用前景[J].科技导报,2015,33(19):54-57.
YAN Weide. Characteristics of Gonghe Basin hot dry rock and its utilization prospects [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19):54-57.
- [20] 吴焯,王建华,卢予北.“钻探+”在民生地质工作中的作用与地位[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(11):1-5.
WU Ye, WANG Jianhua, LU Yubei. Role and position of “Drilling +” in livelihood geology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(11):1-5.
- [21] 卢予北,陈莹,申云飞.河南中牟页岩气区块地层特征及钻探问题研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(7):62-67.
LU Yubei, CHEN Ying, SHEN Yunfei. Research on formation characteristics and drilling problems in Zhongmou Shale Gas Block of Henan province [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(7):62-67.
- [22] 单文军,陶士先,蒋睿,等.干热岩用耐高温钻井液关键技术及进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):52-56.
SHAN Wenjun, TAO Shixian, JIANG Rui, et al. Key technology and progress in high temperature resistant drilling fluid for hot dry rock [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(10):52-56.

(编辑 荐华)