

# 干热岩资源高效钻采技术理论探讨

施山山<sup>1</sup>, 李宽<sup>1</sup>, 李小洋<sup>1</sup>, 马晓鹏<sup>2</sup>, 商振华<sup>2</sup>,  
张晓龙<sup>2</sup>, 王金平<sup>2</sup>, 李宽<sup>2</sup>, 张永勤<sup>\*1</sup>

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000;  
2. 山东省地质矿产勘查局第六地质大队, 山东威海 264209)

**摘要:**水力压裂开采干热岩是目前干热岩资源开发普遍优选的方法, 本文在阐述其应用现状及特点的基础上, 分析了水力压裂技术应用于干热岩资源开发存在的技术问题及诸多不确定因素。提出了注入井水平对接与压裂组合开采方案以及注采井水平对接开采方案, 分析了两种方案涉及的技术可行性。

**关键词:**干热岩; 开发应用; 井位布置; 井筒轨迹; 钻进技术; 高效低耗

**中图分类号:** P634; TE37 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)S1-0121-05

## The theory discussion of high efficient drilling and development on the hot dry rock resource

SHI Shanshan<sup>1</sup>, LI Kuan<sup>1</sup>, LI Xiaoyang<sup>1</sup>, MA Xiaopeng<sup>2</sup>, SHANG Zhenhua<sup>2</sup>,  
ZHANG Xiaolong<sup>2</sup>, WANG Jinping<sup>2</sup>, LI Kuan<sup>2</sup>, ZHANG Yongqin<sup>\*1</sup>

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. Sixth Geological Exploration Brigade, Shandong Geology and Mineral Survey, Weihai Shandong 264209, China)

**Abstract:** Hydraulic fracturing to exploit hot dry rock resources is the preferred method at present, based on its application status and characteristics, this paper analyzes the technical problems and many uncertain factors in the application of hydraulic fracturing technology to development of hot dry rock resources. The combined development scheme of horizontal docking for injection well with fracturing and horizontal docking scheme of injection-production wells are put forward, the technical feasibility of the two schemes is analyzed.

**Key words:** hot dry rock; development and application; well position arrangement; well trace; drilling technology; high efficiency and low energy-consumption

## 0 引言

地球内部存在着大量的热能, 总体上来看地层温度是随着埋深的增加而升高的。当前开发应用的地热能仍以水热型为主, 通过取水、换热等工艺方法将地下热能用于商业发电、集中供暖、商业温泉等。干热岩是地热资源的一种, 被定义为无水或含少量水且温度较高的致密岩体。其温度一般不

低于 180 °C, 埋藏深度超过 3000 m, 目前国内外已针对干热岩资源开展了大量的发电试验<sup>[1-2]</sup>。据评估, 全球干热岩远景资源量极大, 全球 3~10 km 埋深范围内的干热岩热能相当于全球已探明石油、天然气和煤炭能量的 30 倍之多。可见干热岩资源在未来实现碳中和方面可发挥极大的作用, 而这也对如何实现干热岩高效经济开发利用与规模化商业应用

收稿日期: 2023-04-13; 修回日期: 2023-08-22 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.018

第一作者: 施山山, 男, 汉族, 1993年生, 工程师, 硕士, 从事钻探工艺研究及器具研制工作, 河北省廊坊市金光道77号, 1357073168@qq.com。

通信作者: 张永勤, 男, 汉族, 1960年生, 教授级高级工程师(二级), 从事各种钻探取心技术、器具及设备的研发和施工工程管理工作, 河北省廊坊市金光道77号, zyqietlfb@sina.com。

引用格式: 施山山, 李宽, 李小洋, 等. 干热岩资源高效钻采技术理论探讨[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 121-125.

SHI Shanshan, LI Kuan, LI Xiaoyang, et al. The theory discussion of high efficient drilling and development on the hot dry rock resource[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 121-125.

提出了考验<sup>[3-5]</sup>。国外针对干热岩开发利用已开展了40余年的研究工作,但目前仍未形成经济可靠的成熟工艺与技术,亦未实现大规模开发利用。实现干热岩资源商业化应用仍存在较多难题,例如高效低成本钻完井、热储层可控压裂改造、微地震精准监测、储层改造精细评价等方面仍需全力攻关。本文在综合考虑现有技术、装备及资源禀赋水平的前提下,提出不同于传统的钻井-完井-压裂-循环-发电的EGS模式。通过全新的钻井与完井设计减少压裂改造工作量甚至是代替压裂改造,从而减少或避免压裂作业引起的地壳活动,并省去了微地震监测与储层改造评价等工作,可极大地节省作业成本。

## 1 干热岩资源钻采原理与难题

当前干热岩的开发利用主要是利用钻完井及压裂技术使热储层与注采井连通,通过注入井向地下深部注入液态介质,与热储层进行热量交换并转换成气态,气态介质再沿开采井高速流动至地表设备进行发电。钻完井是提供可靠取热通道的必要条件,压裂则是为建立良好的换热通道的辅助手段。只有换热通道内的换热介质与热储层有效接触,才可确保换热介质吸收足够的热量用于发电。

目前压裂仍被认为是热储层建造的主流技术,通过压裂在热储层中建造大量人工裂缝作为流体流动与换热的通道,并与作为取热通道的井眼之间有效连通<sup>[6-7]</sup>。目前全球60多处在建干热岩开发试验工程都是通过压裂的方式进行储层建造,储层建造的最终目的就是增加热储层流通通道以提高换热效果。但在实际压裂过程中,干热岩体可视作一个极为完整的坚硬岩体,同时地层具有各向异性及自然裂隙的特点,地层本身及流体压力特性常常导致压裂效果达不到设计要求。通常来说,压裂施工仅能使岩体产生裂缝很难将岩体破碎,而流体的特点是向着低压方向流动,裂缝的宽度和高度参数直接影响其延展与连通效果。据初略统计,目前全球干热岩开发应用试验工程中约有5处在发电运营,真正实现商业性发电的仅有德、法两国交界处的苏尔茨干热岩开发利用工程<sup>[8-11]</sup>。

造成当前干热岩规模化开发利用受阻的主要因素是采用压裂进行储层建造时达不到设计要求,裂缝走向及与注采井之间的连通效果很难使开采过程中的流体介质高效地吸收热能,从而使得干热岩的

热能转变成电能的效率低、开发利用成本较高。另外,采用压裂技术进行干热岩开采还会引发地震等不利社会影响。针对压裂施工技术在干热岩资源开发利用中存在着的上述问题,本文就采用水平井组与压裂组合以及无压裂水平对接井钻采两种思路,用于干热岩资源开采试验及应用进行相关理论探讨。

## 2 干热岩资源开发新方案理论探讨

### 2.1 注入井水平对接与采出井压裂组合开采方案探讨

鉴于当前干热岩资源开发利用多采取钻完井及压裂技术存在上述问题,笔者认为如果采用压裂技术使注采井之间通过裂缝连通,采用油藏开发中的“三点法”井组布置可有效提高井组连通成功率与连通效率,即3口注入井呈等边三角形布置,并在三角形中心位置布置一口采出井(井位平面布置如图1所示)。而3口注入井采用水平对接井技术在热储层内相互连通,之后在采出井内进行压裂,即使裂缝沿任意方向延伸,最终均能与其周围至少任意一口水平井眼连通。根据井组布置可知,最优情况是缝网分别与3口注入井的水平井段均连通,其次是仅与其中2个水平井段连通,最差情况是仅与其中一个水平井段连通。如此井组布置,则完全避免了当前压裂时裂缝延伸方向不可控,导致注采井之间连通性差甚至不能连通的问题。

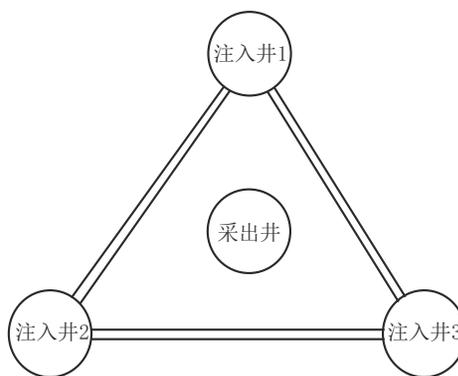


图1 水力压裂井位平面布局

根据干热岩开发所采用的常规石油钻完井及压裂技术与设备能力及微震裂缝评估技术,可以确定上述3口注入井之间的井位布置距离及中间采出井与3条水平连通井之间的极限垂直间距,即从采出

井压裂时裂缝的极限长度。虽然上述井位布置在压裂时,因地层各向异性无法控制裂缝的延伸方向并确保裂缝同时与3条水平井连通,但至少可与其中一口水平井较好的连通。如果要想实现裂缝与3条水平井均能连通,可采用在3条注入井热储层以上使用封隔器或水泥临时封固的方法,避免压裂液沿其中一条水平井流向注入井而无法憋压造缝。

按照“三注一采”的井组布局方案,假设热储层中水平井段长度为500 m,井径为钻头直径216 mm。根据定向钻井时较容易实现造斜和方位控制的有关参数与经验,热储层内水平井段有效长度500 m时,则3口注入井地表直线距离约800 m。计算可知,采出井井底距离注入井水平井段直线距离约231 m,注入井井底距离采出井井底最远距离约462 m。随着压裂装备与工艺技术的发展,今后也可增加注入井组的井口间距,从而增加采出井井底距离注入井水平井段的长度,以增加换热介质在热储层中的换热面积。为了便于对比,下面再作如下假设以方便相关数据计算。假设干热岩体是均质的完整体,压裂时裂缝将从采出井井底中心向四周均匀延伸,此时则可将采出井与注入井水平井段之间的裂缝网简化为一半径为231 m的圆。按照以上假设,当裂缝与3口井的水平井段均完全连通时,有效换热面积可按圆的完整面积计算为约 $167553 \text{ m}^2$ ;当裂缝与2口井的水平井段完全连通时,有效换热面积可按圆面积的 $2/3$ 计算为约 $111702 \text{ m}^2$ ;而当裂缝仅与一口井的水平井段连通时,有效换热面积可按圆面积的 $1/3$ 计算为约 $55851 \text{ m}^2$ 。根据以上假设与理论计算可知,考虑地层均质的情况下,裂缝同时与3个水平井段连通时的换热效果是最好的。需要特别指出的是,在实际压裂过程中,裂缝可能会出现不能按照我们所期望的从采出井井底中心向四周均匀延伸的情况。但如前所述,按照目前常规石油钻井压裂设备及技术能力,至少有一个方向的裂缝能与一条水平井连通,即使按照这个最低压裂连通效果,那么从3口注入井注入采热介质时,可以使采热介质流经3个500 m长的热储层段和一个231 m长的裂缝长度,并从这4个流经段的接触面积获取一定的热能,这比仅靠压裂使注采井之间连通要可靠和有效得多。

## 2.2 注采井水平对接与无压裂开采方案探讨

前述提及的注入井水平对接与压裂组合方案,

其综合效果从理论分析上是优于当前干热岩资源开采“一注一采”或“两注一采”井组并通过压裂使储层连通方案的,但该方案依旧采用了压裂措施来实现热储层与注采井之间的连通,所以它还存在着效果达不到预期设计及可能诱发地震等问题。鉴于此,笔者又提出了无需压裂作业的注采井水平对接开采方案。

该方案的井位布局及井身结构参照当前常规干热岩注采井组。可采用“两注一采”的井组模式,注入井设计为不同垂深的直井,但井底深度都在有效热储层之内。采出井通过2个分支水平井分别与注入井在有效储层内连通。采出井底部的分支水平井段与较深的注入井连通,其上部的分支水平井段与较浅的注入井连通(图2所示)。2口注入井的井位可布置在与采出井在地面成等腰三角形的位置上,也可将3口井布置在一条直线上。鉴于注入井为2口直井,在进行井位布置与井场建设时,可考虑将泥浆循环罐与固控设备放置于两注入井井口中间,这样在进行注入井钻进施工时只需移动钻机设备而不用移动固控及泥浆循环罐等。采出井布置于离注入井较远的位置,可确保换热介质流经足够长的热储层和获得足够大的换热面积。

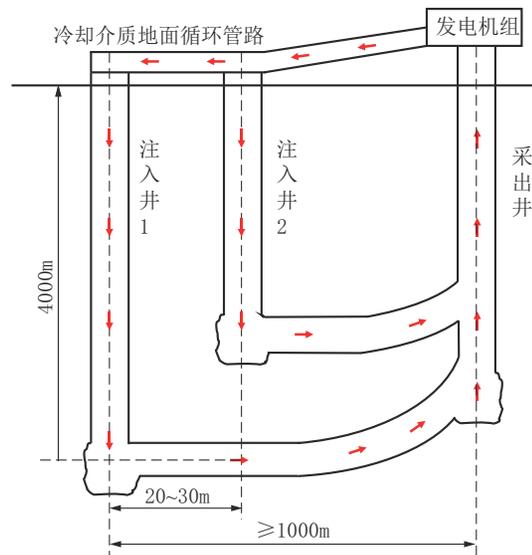


图2 无压裂多井储层连通钻井及开采示意

注入井与采出井不同的布置位置决定了从采出井向注入井进行定向对接施工的方式和2条水平井在热储层的空间位置,如果成等腰三角形布置,2条水平井可以呈一定夹角基本在一个平面上与采出井

连通,如果3口井布置在一条直线上,那么2条水平井的空间位置就在相距一定深度的垂直面上。

在进行上述施工时,首先应完成2口注入井的钻完井施工,之后实施采出井直井段钻完井施工,最后再在采出井内设计的位置分别实施2条分支水平对接井,并与2口注入井分别对接。在采出井实施2条分支水平对接井时,应先实施较深处的第一条分支水平对接井,与对应的注入井连通之后使用封隔器或水泥对第一口分支井进行临时封堵(图2所示)。然后在封固段上部一定位置实施第二条分支水平对接井,并使其与另一口注入井连通。采出井与2口注入井全部对接连通后,钻除采出井直井段底部的水泥石塞或取出封隔器,从而恢复第一口分支水平井与注入井之间的连通。

上述利用“两注一采”井组并结合水平对接井的开发方案,无论是理论上还是实践上都是可以按照设计实现并与热储层相互连通的,完全避免了水力压裂可能诱发地震以及压裂成本高、裂缝走向不可控、压裂效果难评价等问题。

### 3 干热岩开采新方案可行性分析

#### 3.1 现有定向水平对接井施工技术可行性分析

定向水平对接井施工技术已是成熟并成功应用的钻井技术,但用于干热岩资源开发钻进施工时,需要沿着热储层水平穿越,较高的地温将对动力钻具、井下测控仪器的使用寿命、可靠性及钻进效率 and 对接中靶精度等带来不利影响。目前国内井下MWD设计耐温已达到175℃并成功应用于干热岩定向井施工中,螺杆马达钻具耐温能力已满足175℃要求,全金属涡轮钻具耐温性能更佳。按国内干热岩钻采施工所测得的比较准确的井底温度高于180℃为参考依据,即储层内最高静止温度为不低于180℃,而钻进施工时因泥浆循环井底温度必定低于180℃,循环温度降低幅度与地表入井泥浆温度有着莫大关系。目前泥浆自身耐温已达240℃,所以目前高温泥浆用于干热岩水平井钻进基本不存在技术问题。根据以上地温及钻具和仪器的耐温参数,为钻具及仪器提供更理想的井底工作温度是定向水平对接井钻进技术用于高效开发利用干热岩资源的关键问题之一。实际上钻探技术人员早已研制出了泥浆制冷装备,并成功应用于陆域冻土天然气水合物钻探及干热岩注采井钻井施工中。除了保证井底动力钻具

及测控仪器能够在热储层可靠工作外,水平井的轨迹按照设计轨迹准确对接连通是采用上述技术的根本目的,定向水平对接井施工技术在非干热岩地层钻进对接已经非常成功,中靶对接精度已达到了20 cm以内,在如此高温环境下应用的关键是信号发射源的信号发射及信号接收器接收信号的准确性。根据国产“慧磁”定向水平对接井信号发射与接收引导控制技术耐温极限与时间,可以设法将信号发射源在需要信号发射和接收引导时,将信号发射源放到需要的深度位置,不需要时可以将其提升到耐受温度的上部井筒内吊放。信号接收器是安放在井底钻具上,由于采用了泥浆降温技术,所以信号接收器已经不受高温的不利影响。综上所述,采用定向水平对接井钻完井技术开发干热岩资源是完全可行的<sup>[12-13]</sup>。

#### 3.2 采用定向水平对接井施工技术效能分析探讨

科学家预测我国干热岩资源量相当于1000亿t石油当量,开发利用干热岩资源不仅满足我们对能源消耗的需要,而且它对实现“双碳”目标具有积极地帮助作用,应高度重视干热岩资源的开发利用。从国内外开发利用干热岩资源的技术手段看,钻完井或压裂技术是开发利用干热岩资源的唯一技术手段。前述分析已经证明了定向水平对接钻井技术确保注采井穿过热储层相互连通的可靠性与有效性,与传统的靠压裂使注采井相互连通技术相比,定向水平对接钻井技术的施工成本及效能要优于国内外压裂连通效果。因为压裂技术施工本身要动用大型压裂设备的同时,还要消耗大量的压裂液和支撑剂,关键是压裂连通的可靠性非常低甚至无法有效连通,所以压裂技术用于干热岩资源开发利用的成本和效能难以估算。定向水平对接钻井技术就其目前的技术水平,用于干热岩资源开发利用的成本是较容易估算的,因为它可以按照人们的设计实现储层的有效连通和开采地下热能的目的。

为了使人们更好地认同定向水平对接钻井技术在干热岩开发利用的效果,现以图2井位布置及水平连通井空间位置为例,结合某干热岩矿区的储层条件,对采用定向水平对接钻井技术的开采效率或发电的经济效能进行简单分析。已知的以及某些较符合实际的假设参数如下:热储层深度3800~4000 m,储层有效稳定温度不低于185℃;水平连通井直径216 mm,水平井在热储层内长度1000 m;每小时

注入量不低于 20 t, 每吨水可产生 1240 m<sup>3</sup> 蒸汽; 注入井注水的垂直深度 3800 m, 在绝对压力 0.03 MPa 下水开始转变成水蒸气时的压力增加至 1.0332 kgf/cm<sup>2</sup> (1 kgf/cm<sup>2</sup> = 9.807 Pa, 下同), 当温度达到 185 °C 时, 压力可以达到 11.4651 kgf/cm<sup>2</sup>, 当温度达到 208 °C 时, 压力可达到 18.690 kgf/cm<sup>2</sup>。有资料介绍, 以 10 t/h 的水蒸汽排量, 水蒸汽压力为 10~11 kgf/cm<sup>2</sup> 时, 发电功率可达 95 kW。按照以上已知或假设条件, 参考相关资料及有关学者对水在绝对压力产生水蒸气的效率及每 10 t/h 的水蒸汽在 1.1~1.2 MPa 蒸汽压力下发电的理论计算, 假设推动汽轮机发电后的流体被冷却后完全变成水被回灌到注入井(如图 3 所示), 水量达到 20 t/h, 注入井底压力可达 38 MPa。按照目前高压及超高压汽轮机的工作压力为 13.5~226 MPa, 蒸汽压力可满足汽轮机工作压力, 假设热储层温度始终不低于 185 °C, 则日发电量估算值可达到 4.56 MW。按照上述理论分析和估算, 如果进一步增加注入井数量及水平井的长度, 采热效率和发电量无疑会提高。如果干热岩热储层温度保持稳定, 人类还有可能实现干热岩资源能量“永恒”输出或发电的愿望。

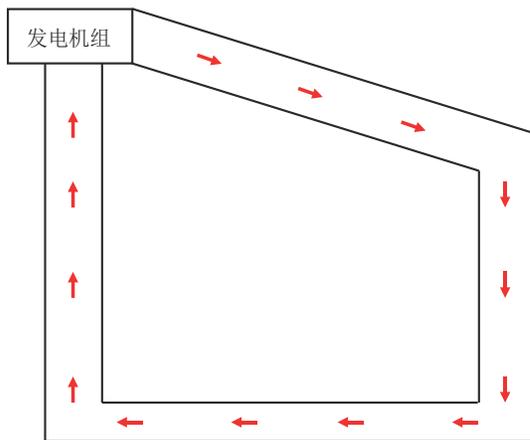


图3 地表蒸汽及水流循环示意

#### 4 认识及建议

基于当前国内外开采干热岩资源采用压裂方式难以达到理想效果的现状, 笔者对采用定向水平对接井钻进技术用于干热岩资源开发利用的可行性进行了分析探讨, 从该技术水平、钻具、仪器的性能等方面论证了其用于干热岩资源开发利用的可能性,

以及其具有明显优于靠压裂连通储层的优势, 同时也探讨了因储层高温对水平井钻进过程中井底动力钻具、测控仪器、中靶信号源发射及接受仪器的不利影响。虽然高温环境下采用定向水平对接井钻进技术会增加钻井施工成本, 但其可以按照人们的设计实现开发干热岩资源的目的。所以, 相对压裂方式, 笔者建议未来干热岩资源开发利用可优先考虑采用定向水平对接井钻进技术。随着技术的进步, 上述问题会逐步解决, 使得定向水平对接井钻进技术在干热岩储层连通钻进的施工效率大幅提高, 成本进一步降低, 愿其在未来成为干热岩资源开发利用中被人们普遍接受的最有效的技术手段。

#### 参考文献:

- [1] 刘伟莉, 马庆涛, 付怀刚. 干热岩地热开发钻井技术难点与对策[J]. 石油机械, 2015, 43(8): 11-15.
- [2] 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.
- [3] 汪集旻, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 25-31.
- [4] 刘畅, 冉恒谦, 许洁. 干热岩耐高温钻井液的研究进展与发展趋势[J]. 钻探工程, 2021, 48(2): 8-15.
- [5] 赵远刚. 5000 m 深部干热岩钻井方案的技术经济评价[J]. 中国地质调查, 2018, 5(2): 73-77.
- [6] 罗天雨, 刘全稳, 刘元爽. 干热岩压裂开发技术现状及展望[J]. 中外能源, 2017, 22(10): 23-27.
- [7] 何跃文, 杨雄文, 高雁, 等. 北美地热井高温硬岩钻井技术[J]. 钻探工程, 2022, 49(1): 79-87.
- [8] 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.
- [9] 何金祥. 世界主要发达国家增强型地热系统应用研究[J]. 国土资源情报, 2011(8): 49-52.
- [10] 翟海珍, 苏正, 吴能友. 苏尔士增强型地热系统的开发经验及对我国地热开发的启示[J]. 新能源进展, 2014, 2(4): 286-294.
- [11] 查永进, 冯晓炜, 葛云华, 等. 高温地热发电钻井技术进展[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 51-54.
- [12] 涂运中, 陈剑森, 刘春生, 等. “慧磁”定向钻井中靶系统超高精度中靶技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(10): 1-6.
- [13] 刘海翔, 刘春生, 胡汉月, 等. 土耳其天然碱矿水平对接井水溶开采技术回顾[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(8): 7-13.

(编辑 荐华)