

干热岩热能开发技术进展与思考

曾义金

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘 要:干热岩地热资源是最具应用价值和利用潜力的清洁能源。我国干热岩资源量巨大,其高效开发对于加快我国能源结构调整、保证能源安全具有重大战略意义。在介绍干热岩地热资源分布、开发利用现状、工程技术进展的基础上,指出基础科学研究、钻井完井技术、大型压裂技术、热能提取技术等是干热岩地热高效开发的重点攻关方向。围绕干热岩地热开发利用存在的硬地层破岩、钻井围岩稳定、缝网压裂、热量交换等技术难题,开展技术攻关,通过示范工程,形成我国干热岩地热开发自主化技术体系,从而加快我国干热岩地热资源的高效开发利用,实现能源结构优化,防治大气污染,改善人民生活,促进经济社会生态环境科学、协调发展。

关键词:干热岩 资源分布 钻井完井 围岩稳定 缝网压裂 有效开发

中图分类号:P641 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2015)02-0001-07

Technical Progress and Thinking for Development of Hot Dry Rock (HDR) Geothermal Resources

Zeng Yijin

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

Abstract: Hot dry rock (HDR) is the most valuable geothermal resource with the highest potential for development. HDR resources are very rich in China, and its high-efficient development would be a strategic significance in domestic adjustment of energy structure and energy security. Through the introduction of distribution, current development and utilization as well as progress in engineering technologies for HDR resources, the paper pointed out the key research direction in basic science, drilling and completion techniques, large-scale fracturing techniques, thermal energy extraction etc. for developing HDR resources. In view of the problems that related to penetration of hard formations, stability of surrounding rocks, network fracturing, and heat exchange for HDR development, more researches should be conducted by providing sample projects to form a technical independently system of HDR resource development, so as to speed up the development and utilization of HDR geothermal resources efficiently, optimize energy structure, minimize atmosphere pollution, improve living standards of the people, and keep a scientific and coordinated development in economy, society, and ecology and environment in China.

Key words: hot dry rock; resource distribution; drilling and completion; stability of surrounding rocks; network fracturing; efficient development

随着我国经济的持续快速增长,对能源的需求量越来越大。煤、石油、天然气等常规能源都是一次性能源,不但面临剩余储量不断减少、严重枯竭的问题,还存在环境污染巨大的问题。因而,大力发展新能源势在必行,地热资源成为新能源中的佼佼者,而干热岩(Hot Dry Rock,简称 HDR)地热是其中最具应用价值和利用潜力的清洁能源。中国地质调查局等的研究表明,中国大陆地热资源量巨大,3~10 km地层深处干热岩地热资源总量为 $2.5 \times$

10^{25} J,相当于 860×10^{12} t 标准煤,若能采出 2%,就

收稿日期:2014-12-22。

作者简介:曾义金(1964—),江西吉水人,1985年毕业于江汉石油学院钻井专业,2003年获中国石油大学(北京)油气井工程专业博士学位,教授级高工,主要从事石油工程技术研究工作。系本刊编委会副主任。

联系方式:(010)84988666, zengyj. sripe@sinopec.com。

基金项目:中国石化集团科技攻关项目“地热井关键技术研究”(编号:JP13003)部分研究内容。

相当于中国 2010 年全国一次性能耗总量(32.5×10^8 t 标准煤)的 5 300 倍。这表明,我国干热岩地热开发利用具有光明前景,对改善我国能源结构、保证能源安全具有重大战略意义^[1-2]。

1 干热岩分布概况及开发进展

干热岩是指埋深 2~6 km、温度 150~650 °C、没有水或蒸汽的热岩体,可以人工直接提取出从岩体中流过的水蒸气而直接用于发电和热水利用,是可再生的“绿色能源”^[3-5]。全球的干热岩主要分布在美国墨西哥湾、南美太平洋沿岸国家、朝鲜半岛、日本北海道、菲律宾、印度、新西兰、南澳大利亚的部分地区,冰岛等欧洲西北部和俄罗斯远东地区等。全球干热岩地热资源量巨大(如美国估算为 1.67×10^{25} J,不包括黄石公园地区),比蒸汽型、热水型和地压型地热资源量大得多,比煤炭、石油、天然气的热能总和还要大^[6]。

根据我国区域地质背景,高热流区均处于板块构造带或构造活动带,我国西南部的地热活动具有南强北弱、西强东弱的规律,东部区的地热活动呈东强西弱之势。在滇藏、东南沿海、京津冀、环渤海等地区分布有较大范围的火山岩体,说明我国具备干热岩地热资源形成的区域构造条件^[5,7-8]。我国干热岩主要分布在 3 个区域:沉积盆地区(东北、华北和苏中)、近代火山活动地区(包括吉林长白山、山东蓬莱、海南琼北、台湾基隆、黑龙江五大连池、云南腾冲、新疆南部和青藏高原西南部等)和高热流花岗岩地区(福建、广东、广西)。我国干热岩所储存的热能约为已探明地热资源总量的 30%^[9-13]。

早在 1970 年,美国人莫顿和史密斯就提出利用地下干热岩发电的设想。1972 年,美国在新墨西哥州北部钻了两口深约 4 000 m 的斜井,从一口井中将冷水注入到干热岩体,从另一口井取出由岩体加热产生的蒸汽进行发电,功率达 2 300 kW,标志着干热岩地热的开发利用进入试验阶段。

通过增强型地热系统(Enhanced Geothermal Systems,简称 EGS),利用干热岩热能发电,是目前世界上开发利用该资源的主要做法。EGS 的原理是在干热岩中钻一口直井或定向井(注入井),然后用清水、盐水或压裂液进行大排量压裂,高温岩体与冷水接触后突然冷却会产生裂隙,在大排量高压作用下,干热岩形成大的裂缝并不断延伸,随着低温水的不断注

入,裂缝不断增加、扩大,并相互连通,最终形成一个人工干热岩热储构造。然后,在距注入井合理的位置处钻一口或几口井(生产井),贯通人工热储构造,用来采出高温水、汽。生产时,注入水沿着裂隙运动并与周边的岩石发生热交换,产生温度高达 150~300 °C 的高温高压水或水汽混合物,用于地热发电和综合利用。利用之后的温水又通过注入井回灌到干热岩中,从而达到循环利用的目的(如图 1 所示)^[6,11-14]。

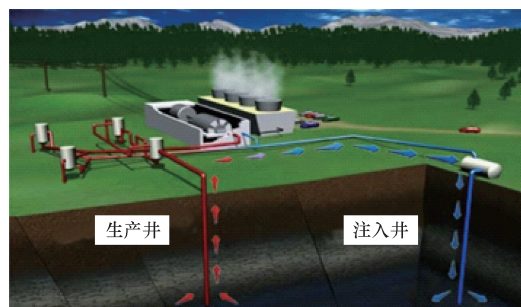


图 1 干热岩开发模式示意

Fig. 1 Development pattern of HDR

目前,全世界有 120 多个国家在开发利用地热资源,其中比较典型的有美国、日本、澳大利亚等^[14]。2001 年,美国能源部开始实施“增强地热系统”干热岩开发试验计划,预期在 2030 年实现干热岩地热发电的商业化运营,到 2050 年干热岩地热发电量计划超过 10×10^4 MW。2003 年,澳大利亚在库珀盆地开展了干热岩地热开发利用试验项目,该盆地的热能储量高达 500 亿桶油当量,井深 4 500 m 处干热岩温度高达 270 °C,并进行了水循环与发电试验。欧洲也在大力开展干热岩地热开发技术研究,如德国在法尔肯贝格(Falkenberg),对岩石的裂隙、压裂产生裂隙的机制以及水在这些裂隙中的运移机理进行了研究。

我国对地热的开发利用仍处于初级阶段,主要集中在中低温热资源的研究和利用方面;对于干热岩地热资源的开发研究尚处于起步阶段,在部分地区进行了干热岩地热资源调查,仅少数科研单位(中国科学院、中国地质科学院等)开展了初步理论研究。2012 年,我国启动了“863”计划项目“干热岩热能开发与综合利用关键技术研究”,2013 年,国土资源部在青海共和盆地中北部钻成了井深 2 230 m、井底温度达 153 °C 的干热岩井,对于干热岩地热开发进行了探索试验^[15-16]。

2013 年,我国制定了《全国干热岩勘查与开发示范实施方案》,将评价全国干热岩地热资源与潜

力,找出优先开发靶区,建立干热岩地热勘查示范基地,形成我国干热岩地热勘查开发的关键技术体系,2030 年前后,实现干热岩地热发电的商业性运营,建立起一套干热岩地热开发方法体系。

2 干热岩地热开发工程技术进展

干热岩地热开发工程技术以油气钻完井技术为基础,但针对干热岩地热开发中的一些特殊问题需要采取一些特殊措施,例如:井下仪器、工具和材料等要具有较高的抗温能力,套管要具有高温稳定性,需要研究特殊的井眼稳定技术和井口钻井液冷却设备等。

2.1 钻井工艺技术

2.1.1 井身结构设计

由于干热岩地层为花岗岩或变质岩,地层坚硬,一般采用直井,井身结构一般为“导管—表层套管—技术套管—筛管”。干热岩地热也可以采取定向井和水平开采,特别是开发井,如冰岛雷克雅未克能源投资公司地热发电项目就采用了定向井开采(见图 2)。干热岩井多采用裸眼完井或套管完井,如果注入井为定向井或水平井,随着分段压裂技术的应用,可以采用套管固井,然后采用固井滑套或射孔分层压裂方式进行压裂,增加流体通道。

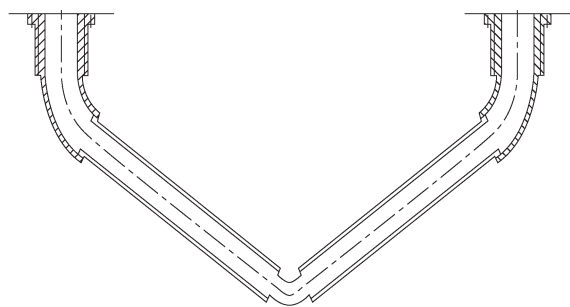


图 2 Reykjavik Energy Invest 地热发电项目井身结构设计示意

Fig. 2 Schematic diagram for casing program deployed for geothermal power generation project of Reykjavik Energy Invest

2.1.2 钻井技术

EGS 发电项目需要有多口生产井,注入井为直井,有时开发井为定向井。受压裂能力的限制,注入井与开发井的井底距离一般不超过 900 m。由于地层温度高,特别是使用空气钻井或泡沫钻井时,导向工具、动力钻具、随钻井眼轨迹测量仪器和测井设备

的抗高温性能要好。到目前为止,国际上电子仪器的最高抗温能力达到 205 °C,国内为 150 °C。

干热岩井通常在结晶岩花岗岩、火成岩或变质岩中钻进,地层相对较硬,裂缝发育,研磨性强,因此钻头优选是关键。与油气钻井相比,干热岩钻井需选用适用于更高地层硬度的钻头,如钢齿牙轮钻头,有时(特别是空气钻井时)也可选用镶齿牙轮钻头。在钻进结晶岩(如花岗岩)时,可以使用孕镶金刚石钻头。中国石化研制了刀翼式孕镶钻头,可用于花岗岩、玄武岩钻进,并研制了特种孕镶块加强型 PDC 钻头及 YSC-178 型射流冲击器。

干热岩井固井时,因地层温度很高,热膨胀会造成套管弯曲和套管挤坏,回灌井冷却也会使套管收缩使套管发生张力破裂而损害。干热岩井固井时水泥浆通常从套管鞋返到地面,以提供支持、稳定和防腐,也能在一定程度上解决套管的膨胀变形问题。

2.1.3 钻井液技术

对于干热岩井,国内外普遍采用耐高温钻井液钻进,在现有抗温能力较强的钻井液有机处理剂中,部分处理剂抗温 220~230 °C,极少数处理剂抗温达 250~280 °C。由于干热岩大都为变质岩或结晶岩类岩体,基本不涉及水敏性地层,因此,干热岩井钻井液重点考虑其抗温性能。除水基钻井液外,还可采用由抗温 230 °C 以上的处理剂、发泡剂、稳泡剂配制而成的泡沫钻井液。

中国石化优选了抗高温造浆材料和关键处理剂,研制了地热井水基钻井液体系,抗温达到 230 °C,高温高压滤失量小于 10 mL。同时,优选了高温泡沫钻井液关键处理剂,初步形成了地热井泡沫钻井液体系,密度 0.4~0.6 kg/L,其性能基本满足了干热岩钻井的要求。

2.2 干热岩井眼稳定技术

在钻井过程中,干热岩遇到温度较低的钻井液或其他流体后,会发生物理化学变化,井壁周围温度迅速降低,导致地层弹性模量、抗压及抗拉强度随温度升高而降低,井眼围岩承载能力下降,极易出现热破裂,产生井壁坍塌、卡钻等井下复杂情况。因而,干热岩井的井眼稳定性受到温度场、渗流场及应力场的耦合影响,需要考虑钻井围岩系统的温度场、渗流场、应力位移场的变化规律。通常可以通过数值模拟对钻进过程中高温状态井眼遇低温工作液产生热破裂的稳定性问题进行分析预测。郜保平等

人^[17]给出了干热岩井眼稳定性的热-流-固耦合数学模型,辅以初始条件和边界条件,选择合理的岩石破坏准则,基于数值算法就可以对模型进行求解,预测不同时刻下干热岩的井眼稳定性。

中国石化以传热学理论和能量守恒理论为基础,结合高温地热井地温梯度特点、综合考虑钻井液流变性、井身结构及钻具组合等影响因素,建立了井筒温度分布模型,并在分析边界条件约束、径向热流的影响、钻井液流变性等方面均有新改进。

2.3 钻井液冷却技术

由于干热岩温度高,钻井液返至地面后温度可能超过 100 ℃,除水蒸发严重影响钻井液性能外,对人与设备都易造成极大伤害,因此,干热岩钻井必须采用特殊装置对钻井液进行冷却。美国、荷兰及新加坡等国的一些公司研制的钻井液冷却系统在地热和油气钻井中得到了广泛应用,其中比较典型的有荷兰 Task Environmental Services 公司、马来西亚 COE Limited 公司及新加坡 Lynsk 公司的板式换热器钻井液冷却系统,美国 Drillcool Inc 公司的淋喷式换热器钻井液冷却系统。

板式换热器钻井液冷却系统的基本结构如图 3 所示。其基本原理为:钻井液从钻井液罐中由钻井泵抽吸进板式换热器,与冷却剂进行换热,冷却剂为水或海水。荷兰 Task Environmental Services 公司研发的板式换热器钻井液冷却系统采用了 2 个板式换热器,钻井液在主换热器中,通过与乙二醇/水溶液换热冷却,乙二醇/水溶液吸收钻井液热量后返回第二个换热器中,将热量传递给海水。

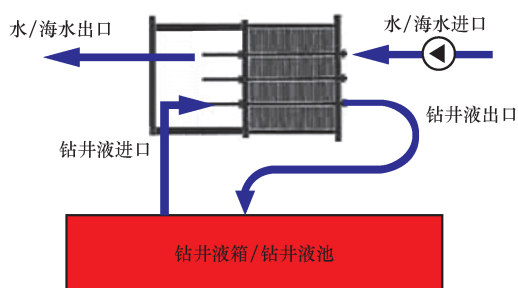


图 3 板式换热器钻井液冷却系统的基本原理

Fig. 3 Basic principle of cooling system with drilling fluids in plate heat exchanger

淋喷式换热器钻井液冷却系统的基本原理为:钻井液从钻井液罐或钻井液池中泵进淋喷式换热器,冷水(或海水)直接喷射钻井液管束,风扇不断鼓入空气,气水混合加强了钻井液的冷却效果。

我国干热岩钻井液冷却技术有了一定进展,但冷却设备还没有形成系列产品,且钻井液冷却器主要应用于天然气水合物开采,处理温度较低。

目前,中国石化经过几年来的研究与实践,初步形成了特色钻井液冷却技术:一是采用加装旋转防喷器的方式,给井筒流体一个回压,可以有效提高井筒内钻井液的沸点,减少井口高温蒸汽的产生和弥散,有利于井口施工;二是通过采用自然蒸发冷却(延长循环路径)、低温固体传导冷却(加入降温材料)、钻井液冷却装置强制冷却等对地面钻井液进行冷却,在设备允许的条件下,通过增大排量、提高钻井液导热系数、比热、密度等方式降低入口温度。

2.4 干热岩压裂技术

干热岩压裂技术可以实现对干热岩体的有效改造,为注入低温流体和吸热提供顺畅的途径,将极大地提高 EGS 效率和工业应用的经济性。

2.4.1 国外主要进展

国外基于干热岩的力学性质,进行了干热岩压裂技术研究,包括干热岩裂缝扩展的微观力学、水力压裂室内物理模拟、热-力-水耦合的数值模拟和 EGS 油藏的热能开采研究以及现场压裂试验与裂缝监测^[18]。

1) 干热岩裂缝扩展的微观力学数值模拟研究。采用微观力学离散单元法(DEM)研究了 EGS 压裂裂缝的起裂和延伸,结果表明:热感应力对裂缝的起裂和延伸具有很重要的作用,而且也会诱导随机裂缝出现;出现于流体与岩石接触时的热应力会导致额外的变形,这可能会引起微破裂。图 4 中裂缝起裂的尖角显示了从热岩石到冷流体的热通量(蓝绿色的环表示流体压力,红色的环表示流体渗入到岩石的基质)。可以得出结论:微破裂是由温度差异引起的,微破裂基本存在于沿着裂缝面的位置,有着向垂直于裂缝面扩展的趋势。

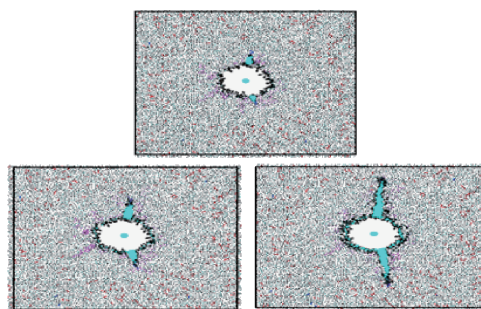


图 4 裂缝的扩展形态

Fig. 4 Extension form of fractures

2) 水力压裂室内物理模拟研究。2013 年,美国科罗拉多矿业大学采用科罗拉多玫瑰红花岗岩进行了裂缝启裂的室内物理模拟研究,岩块尺寸为 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$,压裂液使用了水、盐水等几种流体。研究表明,岩石压裂后形成了主裂缝和一些微裂缝,破裂压力随时间的变化曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出:岩石破裂需要排量达到一定的数值和较长的压裂时间,破裂压力对排量非常敏感;压裂过程中岩石塑性特征表现明显;岩石破裂压力远远高于最大水平主应力。

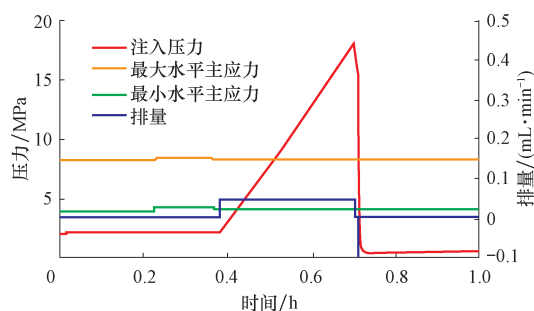


图 5 破裂压力与时间和注入排量的关系曲线

Fig. 5 Relationship among fracturing pressures, time and injection flow rates

3) 热-力-水耦合的数值模拟和 EGS 油藏的热能开采数值模拟研究。通过模拟地层应力状况(至少为最大水平主应力的一半),研究注入液体和采出热能过程中,裂缝尺寸分布对能量的响应特征。地层通过预置裂缝网络的岩块集合来表示,液体只在裂缝中流动,视岩石不渗透且具有弹性。模拟结果为^[19]:

a. 裂缝尺寸分布的影响。潜在的剪切改造体积随着大裂缝的增加而减少,这种情况将影响改造体积和热能的产量。

b. 膨胀角的影响。在相同的注入体积下,高膨胀角会导致较小的剪切改造体积,但可获得更好的连通性和更大的缝隙。

c. 注入排量的影响。对于相同的注入体积,更大的注入排量会产生更大的剪切改造体积和更大的缝隙。

d. 岩石硬度的影响。在相同注入量条件下,较软的岩石渗透率上升更快,因此对于较软的地层,增产措施并没有什么实际用处。

2.4.2 国内主要进展

在干热岩压裂技术方面,国内主要在高温物理模拟装置、THCM 耦合模拟研究以及高温压裂流体等方面进行了研究。

为了模拟高温及三轴应力下花岗岩的力学特性、热破裂和渗流规律等,中国矿业大学(北京)建立了耐温 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 20 MN 高温高压岩体三轴试验机^[19],主要开展了固-流-热三维数值模拟,研究了地热开发过程中应力、温度变化以及裂缝宽度的变化规律。破裂试验结果表明^[20]:

1) 花岗岩在常温至 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间内,其破裂压力存在一个清晰的阈值。岩石破裂压力达阈值之后,随着温度升高,热破裂呈间断性和多期性变化,岩石的渗透率也呈现出同步的变化。

2) 在三向应力条件下,花岗岩在热破裂升温过程中,其渗透率随温度的升高呈正指数增大。热破裂初期,花岗岩岩样渗透率随温度的增加而缓慢增加,随着热破裂的进行,渗透率随温度的升高而急剧升高。

为了分析压裂过程中地层高温热能、流体流动、岩石应力应变与化学多场耦合及其相互作用机制,吉林大学等高等院校用数值模拟方法从不同角度研究了热-流-固-化多场耦合。此外,2013 年吉林大学开发了 EGS 领域多相多场耦合数值分析软件,研究了 EGS 地热能开发过程中水岩作用对热储层特征的影响,结果发现:

1) 注入冷水到花岗岩热储层中导致石英矿物沉淀,其相对质量分数增大 13% ,碱性长石、斜长石、黑云母矿物溶解,储层孔隙度、渗透率均随时间逐渐增大。

2) CO_2 作为载热流体时,可降低地层水的 pH 值,导致裂隙通道中方解石发生微溶解,石英发生沉淀。水岩作用对裂隙孔渗影响小,裂隙特征变化也较小。

2.5 干热岩热交换技术

水通过井筒注入地下干热岩体,渗透进入岩层的裂缝并吸收地热能量,即在干热岩体内形成热交换。目前,地下热交换系统有 3 种模式。

1) 人工压裂裂隙模式。该模式最早由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室提出,即通过人工压裂注水到井底,干热岩遇冷水体积收缩而形成很多裂隙,水通过裂隙系统穿过干热岩,即可完成注水井和出水井所组成的水循环系统热交换过程。

2) 天然裂隙模式。该模式由英国卡门波矿产学校提出,即充分利用地下已有的裂隙网络,通过压裂技术,使原场的裂隙发生扩展,缝宽变大或错位更大,增强了裂隙间的透水性。在这种模式下,可进行热交换的水量更大,而且热量交换得更充分。

3) 天然裂隙-断层模式。该模式由欧洲 Soultz 干热岩工程中的研究人员提出,除了利用地下天然的裂隙,还利用天然的断层系统,这两者的叠加使得热交换系统的渗透性更好。该模式的最大的优势也是最大的挑战,即不需通过人工压裂作业连接进水井和出水井,而是通过已经存在的断层来连接位于注水井和出水井之间的裂隙系统。

3种模式中,研究最多的是人工压裂裂隙模式。压裂作业到生产后的热交换是个复杂而庞大的过程,需要考虑地层和作业流体多场耦合作用及影响规律,而裂隙渗流与热交换机制、热交换效率模型是热交换技术的核心基础问题。

3 干热岩地热开发技术研究方向

3.1 主要技术难点

成井(包括钻井完井、压裂与热交换)是高效开发干热岩地热资源的关键环节和手段,由于干热岩具有强度大、温度高等特性,高效安全成井已成为干热岩高效开发的技术瓶颈。其主要有三大难题:硬地层破岩与钻井围岩稳定问题、缝网压裂与连通问题、热量交换与稳定提取问题,具体表现为:

1) 干热岩力学表征可知性差,岩体非线性变形、破裂与损伤规律复杂;

2) 井下流体、岩石应变、热力等相互作用机理复杂,多场耦合机理不清楚;

3) 地层异常高温,岩石坚硬,破岩、钻完井安全风险和硬地层钻井轨迹控制困难,材料、工具抗温要求高;

4) 大尺度、多裂缝、高强度压裂裂缝形成规律、注入井与开采井连通性评价难度大;

5) 对多渗流与热交换机制、热交换效率的变化规律尚未掌握。

3.2 重点攻关方向

目前干热岩高效成井及开发基础研究严重缺乏,国外也没有成熟理论可供借鉴,因此,亟需多学科联合攻关,对干热岩地热开发中的关键技术与基础科学问题开展研究,为我国干热岩地热高效开发安全快速成井提供理论基础和科学依据。

1) 基础科学研究。在 EGS 运行过程中,高温岩体的赋存环境和工程作用组成了一个有机系统,高温岩体裂隙在多场耦合作用下,渗透率、孔隙度、

连通性等随空间和时间发生动态变化,进而影响到整个 EGS 设计和运行中的各项关键参数。要形成系统的 EGS 干热岩开发技术,需要对一些基础问题和科学问题开展研究,主要有干热岩多场耦合理论,高温岩体的破岩机理,热-流-固多场耦合作用下井眼围岩系统的稳定性机理,多场耦合下干热岩的变形、破裂与裂隙延伸机理及热交换机理与效率模型等。

2) 钻井完井技术。干热岩主要是花岗岩、变质岩等,岩石抗压强度一般在 200 MPa 以上,温度在 150 °C 以上,岩石可钻性差、研磨性强。同时,井眼围岩在高温高压下产生流动、岩石产生热破裂,井壁容易坍塌。干热岩钻井完井除了需应用目前成熟的石油工程技术及设备、材料外,还需要进行以下攻关:干热岩热布井、井身结构,干热岩破岩技术及井眼轨迹控制技术,高温岩体钻井围岩稳定性控制技术,高温钻井液、水泥浆体系及套管热稳定性技术,高温测量仪器、地面钻井液冷却及防喷装备等。

3) 大型压裂技术。人工热储的形成和储层中裂缝的发育连通情况是影响干热岩热能提取的关键。人工热储的建造要满足下列要求:一是产生大尺度体积压裂,以保证热量的提取与热系统的寿命;二是形成大的裂隙,保证流体的提取温度和效率;三是复杂缝中较小的流动阻力,可以降低能耗和循环损失。主要研究方向为:裂缝起裂与延伸控制技术,干热岩生产后期温度变化特征与缝网变化预测技术,温度和地应力场变化下垂直裂缝压裂设计方法,抗高温压裂液及裂缝分布监测等。

4) 热能提取技术。高温岩体在地热开采过程中,最大目的是提取最高的能量,获得最好的热效率和形成最好的经济效率。由于 EGS 的“人造”储层主要是由被裂隙切割成的大型非渗透基质岩块和渗透性好的裂隙组成,EGS 更注重在温度场作用下的渗流问题以及流体与岩石之间发生的热能交换问题。同时,由于不断提取高温岩体的热量,岩石的应力、裂隙会发生动态变化等,导致热能分布及交换效率也发生了变化。因此,为了保证干热岩的裂缝长期有效,需开展的研究主要有:干热岩的裂缝导流能力作用机制及主控因素研究,流体在复杂裂隙中的流动规律研究,热交换流体选择及交换效率等研究。

4 结束语

近年来,我国将绿色发展提升到前所未有的高度,地热资源的开发利用面临历史性的发展机遇,发

展潜力巨大。干热岩地热作为最具应用价值和利用潜力的清洁能源,必将在优化能源结构,防治大气污染,改善人民生活,促进经济社会生态环境科学、协调发展等方面发挥更加重要的作用。但目前我国干热岩地热的开发处于起步阶段,技术基础和理论尚未突破,面临的困难很多,需要加大理论研究和攻关,通过示范工程,不断完善,形成我国干热岩地热开发自主化技术体系。

参 考 文 献

References

- [1] 刘桂英,李继江,张扬. 地热资源勘查开发工作现状及对策研究[J]. 中国国土资源经济, 2010, 23(10): 17-20.
Liu Guiying, Li Jijiang, Zhang Yang. Research on the counter-measures for the exploration and exploitation of geothermal resources[J]. Natural Resource Economics of China, 2010, 23(10): 17-20.
- [2] 周刚,李金锋,Helmut W,等. 地下闭式循环地热交换发电系统简介[J]. 地质科技情报, 2006, 25(4): 105-108.
Zhou Gang, Li Jinfeng, Helmut W, et al. Analysis of closed loop geothermal exchange power generation system[J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25(4): 105-108.
- [3] 赵阳升,杨栋,冯增朝,等. 多孔介质多场耦合作用理论及其在资源与能源工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1321-1328.
Zhao Yangsheng, Yang Dong, Feng Zengchao, et al. Multi-field coupling theory of porous media and its applications to resources and energy engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1321-1328.
- [4] 王淑玲,张炜,张桂平,等. 非常规能源开发利用现状及趋势[J]. 中国矿业, 2013, 22(2): 5-8.
Wang Shuling, Zhang Wei, Zhang Guiping, et al. Exploitation and development trend of unconventional energy[J]. China Mining Magazine, 2013, 22(2): 5-8.
- [5] 赵金昌. 高温高压条件下冲击-切削钻孔破岩实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
Zhao Jinchang. Experimental research on rock breaking by impacting-cutting drilling under high-temperature and high-pressure condition[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.
- [6] 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): 42-47.
Xu Tianfu, Zhang Yanjun, Zeng Zhaofo, et al. Technology progress in an enhanced geothermal system(hot dry rock) [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 42-47.
- [7] 邵保平,赵阳升. 高温高压下花岗岩中钻孔围岩的热物理及力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1245-1253.
Xi Baoping, Zhao Yangsheng. Experimental study of thermophysical-mechanical property of drilling surrounding rock in granite under high temperature and high pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1245-1253.
- [8] 万志军,赵阳升,康建荣. 高温岩体地热开发的技术经济评价[J]. 能源工程, 2004(4): 30-34.
Wan Zhijun, Zhao Yangsheng, Kang Jianrong. Technology assessment and economic evaluation of geothermal extraction from hot dry rock (HDR) [J]. Energy Engineering, 2004(4): 30-34.
- [9] 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.
- [10] 郭进京,周安朝. 高温岩体圈定的思路与方法探讨[J]. 能源工程, 2008(6): 1-4.
Guo Jinjing, Zhou Anchao. Discussion on the determination methods and strategy for hot dry rocks[J]. Energy Engineering, 2008(6): 1-4.
- [11] 王学忠. 利用干热岩替代原油燃烧降低稠油开发成本[J]. 油气田地面工程, 2010, 29(9): 71-72.
Wang Xuezhong. Decreasing of heavy oil production cost by substituted-oil burning of hot dry rock[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2010, 29(9): 71-72.
- [12] 中国地热能利用技术及应用[R]. 北京: 中华人民共和国科学技术部, 2013.
China's geothermal energy utilization[R]. Beijing: Ministry of Science and Technology of the P. R. China, 2013.
- [13] 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, 25.
He Jinxiang. The enhanced geothermal systems application researches of the world's major developed countries [J]. Land and Resources Information, 2011(8): 49-52, 25.
- [14] 梁松彬. 增强型地热发电技术及发展前景[J]. 能源工程, 2012(5): 30-32.
Liang Songbin. Technology of enhanced geothermal generation and its application prospect [J]. Energy Engineering, 2012(5): 30-32.
- [15] 韩国锋,王恩志,刘晓丽. 岩石损伤过程中的渗流特性[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(5): 41-50.
Han Guofeng, Wang Enzhi, Liu Xiaoli. Seepage characteristic of rock during damage process[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(5): 41-50.
- [16] 闫铁,李玮,毕雪亮. 清水压裂裂缝闭合形态的力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 3471-3476.
Yan Tie, Li Wei, Bi Xueliang. Mechanical analysis of closing shape of cracking induced by water fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 3471-3476.
- [17] 邵保平. 高温岩体地热开采中钻井围岩稳定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Xi Baoping. Wellbore stability analysis in hot dry rock geothermal drilling[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [18] Riahi A, Damjanac B, Furtney J. Stimulation and heat production of EGS reservoirs[R]. ARMA 14-7741, 2014.
- [19] Rutqvist J, Dobson P F, Jeanne, P, et al. Modeling and monitoring of deep injection at the Northwest Geysers EGS Demonstration, California[R]. ARMA 13-307, 2013.
- [20] 申林方,冯夏庭,潘鹏志,等. 单裂隙花岗岩在应力-渗流-化学耦合作用下的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1381-1388.
Shen Linfang, Feng Xiating, Pan Pengzhi, et al. Experimental research on mechano-hydro-chemical coupling of granite with single fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1381-1388.

[编辑 陈会年]