

干热岩钻完井的挑战及技术展望

王志刚¹, 胡志兴², 李宽¹, 李鑫森¹

1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 廊坊 065000

2. 河北省煤田地质局第二地质队, 邢台 054000

摘要 干热岩是一种清洁、环保、可循环利用的再生能源, 开发潜力巨大, 是最具环保性能的未来清洁能源。概述了美国、英国、日本、法国、澳大利亚和中国干热岩工程项目, 依据干热岩岩体硬度高、可钻性差、地层温度高等特点, 指出了干热岩钻完井工程存在的技术难题, 主要包括钻井效率低、地层温度高、井壁稳定性差、井漏现象严重等问题; 针对钻完井存在的技术难题, 分析了干热岩高效破岩工具、钻井液技术、高温固井技术、控压钻井技术、膨胀套管技术、定向井技术和液氮钻井等关键技术在于热岩中应用的未来趋势。

关键词 干热岩; 钻完井; 钻井工程技术

改革开放以后, 中国经济得到了迅猛地发展, 与此同时对能源的需求量也不断攀升, 而传统能源则面临着枯竭和污染严重等问题, 所以寻找清洁可代替能源已经成为人类共同的追求。地球内部是一个巨大的热源库, 不断产生热能, 而地热资源又是一种清洁、环保、可循环利用的再生能源, 对于解决能源短缺和环境污染问题具有显著效果。因此, 地热资源未来将成为人类重要的可开发资源^[1-2]。干热岩是地热资源的一种, 从理论上讲, 其广泛分布于全球各个地方, 在任何地区随着深度的增加都可以发现干热岩, 所以干热岩被认为是一种无处不在、开发潜力巨大的资源。不过就目前的情况来看, 干热岩是指埋深在 3~10 km、温度高于 150℃、

致密不渗透的高温热岩体^[3-4]。据科学估算, 中国干热岩能量储量巨大, 约为 2.09×10^{35} J, 可利用其进行发电和供暖, 且整个开发的过程安全环保, 不会产生污染物, 因此对于中国能源结构的改善具有重要的意义^[5]。

1 干热岩工程项目钻完井现状

1.1 国外干热岩工程项目钻完井现状

美国是最先提出干热岩与增强型地热系统概念的国家, 实施了世界上第 1 口干热岩勘探井, 迄今为止已经有 40 多年历史。在美国开展干热岩能源开发研究之后, 英国、日本、法国、澳大利亚也紧

收稿日期: 2019-08-01; 修回日期: 2019-08-21

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190136)

作者简介: 王志刚, 工程师, 研究方向为水合物、页岩气、干热岩、石油钻井与开发, 电子信箱: 1036821833@qq.com

引用格式: 王志刚, 胡志兴, 李宽, 等. 干热岩钻完井的挑战及技术展望[J]. 科技导报, 2019, 37(19): 58-65; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.19.008

随后开展干热岩能源开发科技攻坚战,并取得了非常大的成果,不过到目前为止全球未有一个国家进行商业化开采^[5]。

1.1.1 美国

美国的 Fenton Hill 项目是世界上最早利用干热岩进行试验发电的项目,最初实施完成了 GT-2 和 EE-1 两口井,两口井深度在 3 km 左右,井底温度约为 200℃,但两口井之间连通性较差,因此不得不对 GT-2 井进行加深,成为 GT-2A 井。加深压裂后两井之间的连通性仍然没有太大的改观,于是在两口井之间的缝隙系统中重新钻入一口 GT-2B 井,新钻入的井与 EE-1 形成了连通。后又完成了 EE-2 和 EE-3A 井,其中 EE-2 井的井深为 4390 m,井底温度为 327℃。EE-3A 井是一口侧钻定向井,最初为直井,在水力压裂之后与 EE-2 井没有形成良好的连通性,采取定向侧钻的方式进入两口井的裂缝系统中,形成了 EE-3A。定向侧钻后,两口井之间连通性良好^[6-7],通过该项目的实施为地热能的开采开创了新方向。

1.1.2 英国

紧随美国之后,英国在 Rosemanowes 地区实施完成了 3 口干热岩勘探井,该项目 3 口井钻探深度在 2200 m 左右,钻井深度较浅,通过项目的实施为岩石力学方面的研究奠定了基础^[8-10]。

1.1.3 日本

目前为止,日本共实施两个干热岩项目,第一个是 1989 年开展的 Hijiori 项目,第二个是 1990 年开展的 Ogachi 项目。Hijiori 项目共完成 4 口井,3 口井为生产井,1 口井为注水井^[11-13]。Ogachi 项目共包含 2 口井,注入井设计井深为 1000 m,井底温度 230℃。生产井设计井深 900 m,井底温度 240℃^[14-16]。日本实施的这两个干热岩项目,钻井深度较浅,难度较小,但也为日本干热岩钻探积累了丰富的经验。

1.1.4 法国

法国于 1984 年开展了 Le Mayet 干热岩项目,并与德国、英国合作共同开展了 Soultz 干热岩项目,该项目到目前为止共完成 4 口井。第 1 口 GPK1 井于 1992 年完成,井深为 3590 m。第 2 口 GPK2 井于

1995 年完成,井深为 3876 m。两口井的间距为 650 m,经过压裂后两口井连通性良好。随后在 2001 年和 2003 年又新钻两口井深分别为 5093 m、5105 m 的 GPK3 和 GPK4 井,但未取得理想效果^[17-18]。

1.1.5 澳大利亚

2003 年,澳大利亚的 Cooper Basin 项目完成了第 1 口井深为 4421 m 的注入井,生产井以 4310 m 的深度完钻与裂缝系统中,通过该项目的实施证明了花岗岩体是非常有价值的干热岩资源^[19-21]。

1.2 中国干热岩工程项目钻完井现状

1.2.1 青海共和-贵德地区

共和盆地是中国重要的干热岩资源开发区,最近几年已经有多家单位在此进行了勘探研究工作。2014 年,由中国地质大学(武汉)和青海水文地质工程地质调查院共同施工的干热岩勘探井在 2230 m 处钻获干热岩,井底温度为 153℃,地温梯度为 6.8℃/100 m。依据在共和恰卜恰地区布置的 DR1、DR2、DR3、DR4 等 4 口 2000 m 以上的井所获取的资料,发现盆地地温梯度较高,井深在 2200 m 时温度已经达到了 150℃,其中 DR4 号井完井于 2014 年,完井深度 3085 m,井底温度为 178℃。截至 2019 年,青海共和盆地实施的干热岩勘探项目 GR1 井,完井深度为 3705 m,井底温度达 236℃。按照国际标准,它属于高品质干热岩,这是中国首次钻获埋藏最浅、温度最高的干热岩体,是中国干热岩资源勘查的重大突破^[22-23]。

1999—2012 年,贵德地区共施工 7 口井,井深在 969~2700 m,通过地质钻探结果发现贵德盆地地温梯度超过了 5.6℃/100 m。2013 年,青海省环境地质勘查局在贵德热水沟实施了 ZR1 井,井底温度为 151.34℃,通过这次钻探确认了 NNW 向深大断裂导向通道的存在。随后,吉林大学也开展对贵德地区地热资源的调查工作,并对 ZR1 井所获取的岩心进行了岩性分析,为该地区后续干热岩资源的开发利用打下了基础^[24]。

1.2.2 福建漳州地区

在福建漳州地区施工的钻探井发现从 1700 m 开始地温梯度逐渐升高,到 3000 m 深度时井底温

度为 82℃,地温梯度在 2.8℃/100 m。2015 年,由中国地质调查局组织在福建漳州龙海地区实施了干热岩科学钻探,完井深度为 4000 m。通过此次干热岩科学钻探工程揭示了该地区干热岩的形成机制和资源潜力,为中国干热岩的开发利用提供了有力的支撑^[25]。

1.2.3 松辽盆地

松辽盆地是中国重要的油气开采区,油田勘探队在钻探油气井时发现了温泉,随后陆续发现了多处高温干热岩体^[26]。大陆科学钻探松科二井在钻探施工的过程中也发现了干热岩的踪迹。

1.2.4 山东利津县

2014 年,山东省鲁北地质工程勘察院在利津县顺利实施一口干热岩勘探井 GRY1,根据所取岩心发现在 4000 m 深度处有花岗岩分布。在陈庄浅凸起区 3000~5000 m 范围内干热岩资源量为 4.39×10^{20} J,可利用能量约为 1.62×10^{20} J^[24]。

从国内外干热岩项目钻完井现状可以得出,世界各国都已经陆续开展了干热岩试采工作,但取得效果都不明显,中国对干热岩的勘探处于摸索起步阶段,面临着许多挑战。

2 干热岩钻完井面临的挑战

2.1 钻井效率低

国外认为干热岩温度达到 350℃ 以上才具备开采价值,为了获得较高的井底温度用于发电,通常干热岩钻井深度要达到 4000 m 以上才能满足要求,而在中国青海共和地区实施的 GR1 井在 3705 m,仅钻获了 236℃ 干热岩体就是最好的证明。钻井深度深、构造复杂,地层为片麻岩或花岗岩,硬度高,研磨性强,可钻性差,岩石单轴抗压强度在 200 MPa 以上,这些是干热岩钻探显著的特点。中国干热岩勘探处于起步阶段,在钻探技术上主要是依靠油气钻井技术,在钻头使用上主要包括 PDC 钻头、牙轮钻头和金刚石钻头 3 种类型。常规 PDC 钻头对地层的适应性非常敏感,主要适用于中硬地层,碎岩机理是切削和剪切破坏为主,在花岗岩和片麻岩地层中使用常规 PDC 钻头,钻头的保径面和钻

头体磨损非常快。常规牙轮钻头的碎岩机理是冲击、压碎和剪切破碎,在沉积岩钻井过程中依靠高钻压将牙轮齿“吃入”地层中进行快速钻进,但干热岩地层硬度高,牙轮齿很难“吃入”地层,牙轮钻头只能依靠硬磨来钻进,工作寿命短,无法发挥其优势。金刚石钻头配合涡轮钻具使用是增效提速的一种方法,但涡轮钻具扭矩小、轴承寿命短、易损件多,在现场实际应用少,不能长时间使用。且金刚石钻头造价高,在干热岩钻探中使用投入和产出能否成正比还需要研究。钻头是最直接的碎岩工具,但是目前常用的几种钻头破岩效率低、磨损快、花费高,这给干热岩钻探施工带来了极大挑战。

2.2 地层温度高

干热岩地层温度最高可达 650℃,地温梯度超过 4℃/100 m,尤其是中国青海共和地区地温梯度达到了 6.4℃/100 m。高温使得油气井钻井工具不再完全满足干热岩钻井的需求,在高温环境下钻头、井下动力工具、随钻测量系统、钻井液的稳定性和寿命都会受到很大影响。高温使得牙轮钻头、冲击钻头和井下动力工具的橡胶密封件失效,限制了井下动力工具的使用,增加了钻头更换的频率,提高了钻井成本;随钻测量系统受高温的影响其精度和可靠性会发生很大变化,将无法有效控制钻井轨迹;受高温影响,钻井液体系的密度、流变性和稳定性将会发生很大改变,护壁和携岩能力将降低,容易诱发井下安全事故;高温对固井质量的影响也不容忽视,可能发生套管挤毁等问题,难以满足后期的压裂施工。

2.3 井壁稳定性差

干热岩资源埋深大、地层条件复杂,容易发生钻井事故,尤其是在钻井过程中由于温度和压力的变化,容易使井壁产生破裂,形成裂缝,严重时会发生坍塌掉块卡钻和憋钻事故。根据相关学者的研究,发现同等深度条件下,温度对花岗岩蠕变性的影响非常显著。如在共和地区实施的 GR1 井由于坍塌掉块严重,造成井下事故不得不提前完钻。

2.4 井漏现象严重

干热岩深井钻探井下压力复杂,钻井液密度难以选择和控制在,井漏问题突出,再加上干热岩地层

局部裂隙发育,在钻井过程中更容易产生井底漏失问题。如西藏的羊八井在钻井过程中,从几十米就开始漏失,一直持续到完钻。

3 干热岩钻完井关键技术展望

3.1 高效破岩工具

受到高温、高硬度的影响,钻头在干热岩钻探中破岩效率低是一个共性认识,而钻头又是直接的碎岩工具,因此加快研发高适应性、超硬、热稳定钻头已经势在必行。国外一些公司已经研发出了几款针对干热岩钻探的钻头,比如贝克休斯公司(BHGE)公司研发的Kymera Mach 4 钻头和Dynamus 钻头,以及ReedHycalog推出的超硬热稳定性钻头。同时许多公司将新材料应用到了钻头设计中以提高钻头性能,比如通过陶瓷涂层来提高钻头的耐温性、采用纳米纤维材料来提高钻头的耐冲击性^[27-30]。

在钻头性能提高的基础上,井下动力钻具的性能也需要提高。井下动力钻具是定向必备的工具,也是提高钻井效率的必要手段。目前最常用的井下动力钻具包含螺杆钻具、旋转导向钻具和涡轮钻具,螺杆钻具耐温不超过180℃,旋转导向钻具耐温不超

过175℃,涡轮钻具耐温不超过250℃。考虑到井下轨迹控制所需的随钻测量系统耐温不超过175℃,在未来开发“高温钻头+高温随钻测量系统+高温井下动力钻具”来提高钻井效率成为必然趋势。

冲击回转钻进是一种以高压气体(钻井液)为带动介质,具有低钻压、高频率、高能量特点的钻井方式,根据以往的施工经验可知,在坚硬地层,机械钻速可以提高50%以上。在干热岩钻探中,配合耐高温、耐冲击、长寿命钻头使用将是一项重要的提速增效措施。

3.2 钻井液技术

钻井液是钻井工程的“血液”,目前国内外水基钻井液耐温能力在240~260℃,油基钻井液耐温能力在265℃。在干热岩钻探中受高温的影响,钻井液性能可能发生改变,为了维持钻井液性能,可从两个不同的角度开展深入研究:第一是研发耐温能力更强的高温钻井液体系,在高温、高压环境下依然能够保持良好的流变性、滤失性,从而满足干热岩钻井的需求;第二是采用“自然冷却+强制冷却”的方式(图1)来控制环空中循环的钻井液温度,这样不仅维持了钻井液性能,同时降低了对井下动力钻具和钻头的耐温要求。

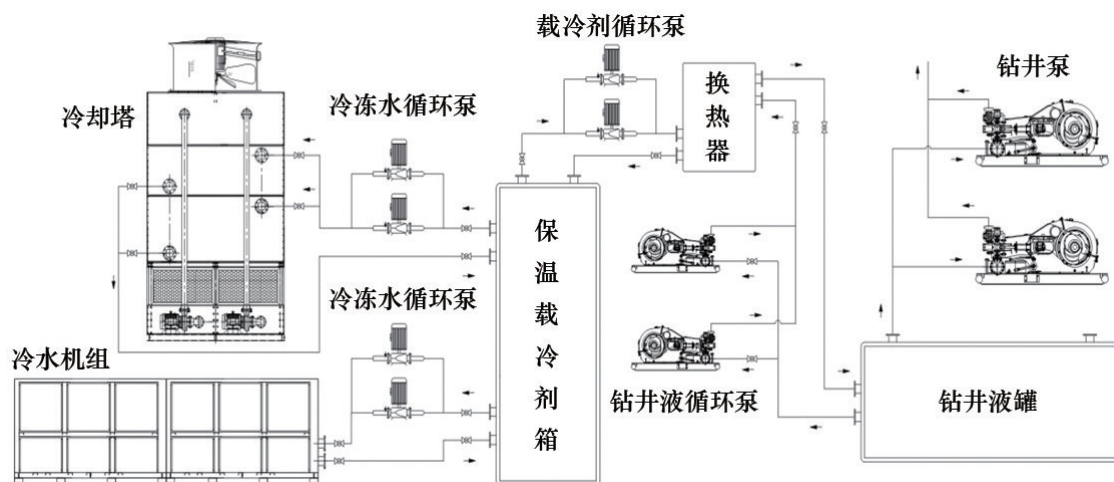


图1 钻井液冷却原理

Fig. 1 Drilling fluid cooling schematic

3.3 高温固井技术

高温固井也是干热岩钻探需要解决的一个重要难题,受到温度的影响,水泥和套管的性能将会出现一定程度的改变,进而影响固井质量。研发抗高温固井水泥浆体系成为必由之路。目前斯伦贝谢公司、哈里伯伦公司已经研发出抗温能力达到260℃的水泥浆体系,国内虽然也研发出了抗温能力为230℃的水泥浆体系,但主体仍然以抗温能力200℃的水泥浆为主,还需要加大科技攻关力度。在提高固井水泥耐温能力的同时,还需要加强固井工艺的研究,其中将预应力固井技术、预压固井技术和震动固井技术应用到干热岩固井中将是较好的选择,可在一定程度上提高高温固井质量。

3.4 控压钻井技术

控压钻井技术是通过井口的密封设备来控制套管压力、流体密度和水力摩阻,从而达到精确控制整个井筒环空压力的目的,属于一种欠平衡钻进技术,可以有效降低井壁坍塌掉块、井漏等问题,在一定程度上还可以提高机械钻井速度,控制钻井成本。根据控压钻井技术的优点,将其应用到干热岩钻井中应该是一个重要的技术措施,当前国内外对于控压钻井技术的研究已经比较成熟,并在现场施工中得到了有效的应用,目前所拥有的技术可以将压力控制精度保持在0.3 MPa^[11]。

3.5 膨胀套管技术

井壁坍塌掉块,地层裂缝性漏失是干热岩钻探所要面临的技术难点,由于受到地层温度、裂缝大小、地下水特性的影响,采用泥浆进行护壁堵漏很难解决井壁坍塌掉块和恶性漏失。采用套管进行护壁堵漏虽然可以取得不错的效果,但受到设计井身结构的影响,常规套管不能广泛应用于护壁堵漏。膨胀套管成为最好的选择,膨胀套管不仅解决了泥浆堵漏耐温的问题,同时实现了不用换径继续钻进的目的,缩短了施工的周期,减少了成本。膨胀套管技术已经成为一项成熟的技术,国外Weatherford公司,国内中国石化胜利钻井工艺研究院、中国石油石油工程技术研究院、中国石化石油工程技术研究院以及中国地质科学院勘探技术研究所都研发了实体的膨胀套管,并积累了丰富的施工经

验,取得了良好的效果。

3.6 定向井技术

定向井包含开窗侧钻井、水平井和多分支井。采用定向井技术可以大幅度提高可控开采面积,提高干热岩能量利用率。并且与直井相比,定向井生产压差小,更有利于实施控压钻井技术,还可以将天然裂缝和压裂裂缝连接起来。目前干热岩勘探开发采用的都是一注两采(图2)的直井模式,但是受到压裂能力的限制,3口井之间很难形成有效连通。为了提高干热岩能量利用率,可采取两种解决方案:一种是以3口直井为基础,对其中的两口生产井进行开窗侧钻(图3),并根据注入井的裂缝方向来确定侧钻方向,侧钻完成后再次进行压裂,提高注入井和开采井井下连通程度,提高对干热岩储层的取热程度;另外一种是采用一注一采的水平井模式(图4)来提高注入流通与干热岩体的换热面

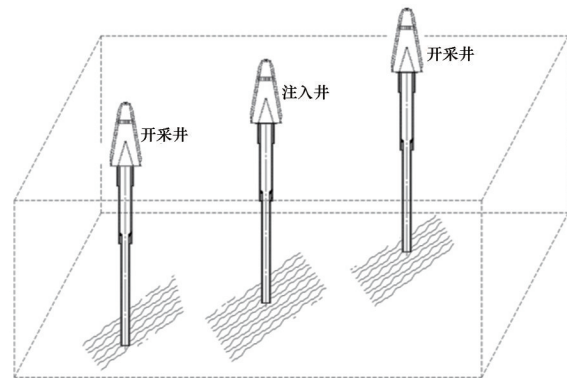


图2 一注两采连通不佳的情况

Fig. 2 Poor connection between one injection and two production

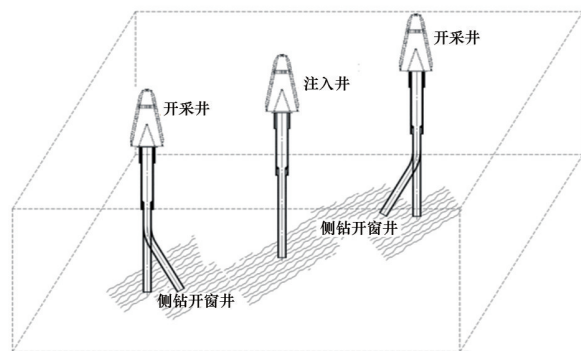


图3 侧钻开窗连通方案

Fig. 3 Connecting scheme of side drilling window opening

积。但受到高温的影响,采用定向井技术需要加大高温硬地定向工具和井眼轨迹控制系统的研究。

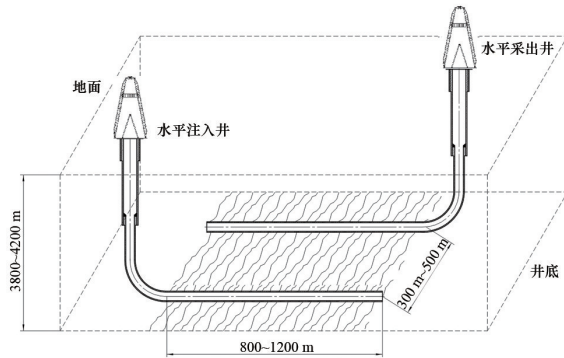


图4 一注一采水平井开采方案

Fig. 4 One injection and one production horizontal well mining scheme

3.7 液氮钻井技术

液氮是一种性能稳定、无色无味的不可燃液体,其物理性质如表1所示。它具有非常好的传热能力,由于表面张力小,很容易进入大分子体积空间。通常情况下干热岩温度为150~650℃,液氮的临界温度为-146.96℃。两者接触以后的温差可造成干热岩温度快速降低,在岩石内部产生较大的热应力,使得干热岩岩体塑性强度降低,脆性增大,岩体将发生崩裂,并产网状裂缝体系^[32]。徐红芳^[33]通过计算发现液氮在岩石内部所生产的热应力要远远高于常规液体。因此将液氮应用于干热岩钻探中并结合喷嘴的高速射流作用,会显著提高破岩效率。但由于液氮的低温作用,钻井液和井下工具的耐低温问题成为了难点。

表1 液氮物理性质

Table 1 Physical properties of liquid nitrogen

物理性质	条件	参数
密度	0.101 MPa	808.5 kg/m ³
黏度	临界温度-146.96℃	28.5×10 ⁻⁶ mPa·s
表面张力	温度-153℃	0.65×10 ⁻³ N/m
导热系数	临界温度-146.96℃; 临界压力3.39 MPa	0.0356 W/(m·K)

4 结论

1) 干热岩是一种清洁地热能源,开发潜力巨大,但是干热岩岩体埋深深、致密、硬度高、研磨性强、地层温度高。目前在钻井技术上主要是移植油气钻井技术,但是却面临岩体硬度高、研磨性强及钻井效率低的问题;面临着地层温度高,钻头、井下动力工具、钻井液体系、固井耐温能力不够,寿命短的问题;面临着井壁稳定性差,容易出现坍塌掉块和井漏的问题。

2) 针对干热岩钻完井存在的问题,应加快研发高效破岩工具、耐高温钻井液体系、耐高温水泥浆体系的步伐,并配套干热岩控压钻井技术、钻井液强制冷却技术、膨胀套管技术、定向井技术和液氮钻井技术,提高干热岩钻完井效率,降低干热岩

井壁坍塌掉块和漏失事故的发生概率,提高干热岩钻井能量利用率,努力降低开发成本。

3) 中国干热岩钻完井技术目前处于探索实践阶段,在摸索前进的过程中步伐一定要稳,应根据实际情况出发,做好干热岩钻井的靶区优选,加大科技攻关力度做好干热岩钻完井装备体系的研究,在靶区优选、钻完井装备体系得到突破的基础上,尽快开展干热岩钻探示范工程建设,早日开发出地下清洁能源。

参考文献(References)

- [1] 陆川, 王贵玲. 干热岩研究现状与展望[J]. 科技导报, 2015, 33(19): 13-19.
Lu Chuan, Wang Guiling. Current status and prospect of hot dry rock research[J]. Science & Technology Review,

- 2015, 33(19): 13-19.
- [2] 曾义金. 干热岩热能开发技术进展与思考[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(2): 1-7.
Zeng Yijin. Technical progress and thinking for development of hot dry rock geothermal resources[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(2): 1-7.
- [3] Massachusetts Institute of Technology. The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century[R]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [4] Brown D. The US hot dry rock program-20 years of experience in reservoir testing[C/OL]. [2015-03-31]. <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/1995/4-Brown.pdf>.
- [5] 付亚荣, 李明磊, 王树义, 等. 干热岩勘探开发现状及前景[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(4): 526-540.
Fu Yarong, Li Minglei, Wang Shuyi, et al. Present situation and prospect of hot dry rock exploration and development[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(4): 526-540.
- [6] Tester J W, Albright J N. Hot dry rock energy extraction field test: 75 days of operation of a prototype reservoir at fenton hill, segment 2 of phase I[R]. Los Alamos: Los Alamos Scientific Laboratory, 1979.
- [7] Duchane D. Geothermal energy: Encyclopedia of chemical technology[M]. New York: Wiley, 1993: 512-539.
- [8] Batchelor A S. Brief summary of some geothermal related studies in the United Kingdom[C]//2nd NATO//CCMS Geothermal Conference. Los Alamos: NATO, 1977: 22-24.
- [9] Batchelor A S. The stimulation of a hot dry rock geothermal reservoir in the Cornubian granite, England[C]//8th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. California: Stanford University Press, 1982: 237-248.
- [10] Batchelor AS. Reservoir behavior in astimulated hot dry rock system[C]//11th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. California: Stanford University, 1986.
- [11] Hori Y, Kitano K, Kaieda H, et al. Present status of the Ogachi HDR Project, Japan, and future plans[J]. Geothermics, 1999, 28(4): 637-645.
- [12] Schroeder R, Swenson D, Shinohara N, et al. Strategies for the Hijiori long term flow test[C]//Proceeding 23rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. California: Stanford University, 1998.
- [13] Tenma N, Yamaguchi T, Tezuka K, et al. A study of the pressure-flow response of the Hijiori reservoir at the Hijiori HDR test site[C/OL]. [2015-03-31]. <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2000/R03-97.PDF>.
- [14] Kiho K. Study on surface area estimation of the Ogachi HDR reservoir by geochemical method[C]. Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, 2000.
- [15] Shin K, Ito H, Oikawa Y. Stress state at the Ogachi site [C/OL]. [2015-03-31]. <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2000/R0395.PDF>.
- [16] Kaieda H, Jones R, Moriya H, et al. Ogachi HDR reservoir evaluation by AE and geophysical methods[C/OL]. [2015-03-31]. <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2000/R0397.PDF>.
- [17] Baria R, Baumgärtner J, Gérard A, et al. European hot dry rock geothermal research programme 1996-1997[J]. European Commission Final Report, 1999, 28(4): 647-645.
- [18] Cuenot N, Dorbath L, Frogneux M, et al. Microseismic activity induced under circulation conditions at the EGS Project of Soultz-sous-Forets(France)[C/OL]. [2015-03-31]. <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/3148.pdf>.
- [19] Van Ruth P, Hillis R, Swarbrick R, et al. The origin of overpressure in the Cooper Basin[C]//ASEG 16th Geophysical Conference and Exhibition. Adelaide: ASEG, 2003: 255-260.
- [20] Quigley M C, Clark D, Sandiford M. Tectonic geomorphology of Australia[J]. Geological Society, 2010, 346(1): 243-265.
- [21] Llanos E M, Zarrouk S J, Hogarth R A. Simulation of the habanero enhanced geothermal system(EGS)[C]. Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, April 19-25, 2015.
- [22] 严维德. 共和盆地干热岩特征及利用前景. 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.
- [23] 王敏黛, 郭清海, 严维德, 等. 青海共和盆地中低温地热流体发电[J]. 地球科学, 2014, 39(9): 1317-1322.
Wang Mindai, Guo Qinghai, Yan Weide, et al. Medium-low-enthalpy geothermal power-electricity generation at Gonghe Basin[J]. Earth Science, 2014, 39(9): 1317-1322.
- [24] 许天福, 胡子旭, 李胜涛, 等. 增强型地热系统: 国际研究进展与我国研究现状[J]. 地质学报, 2018, 92(9): 1936-1947.
Xu Tianfu, Hu Zixu, Li Shengtao, et al. Enhanced geothermal system: International progresses and research status of China[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(9): 1936-1947.
- [25] 蔺文静, 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 project in Zhangzhou geothermal field, Fujian province [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19): 28-34.
- [26] 娄洪, 闵丽霏, 黄林, 等. 松辽盆地干热岩地热资源潜力初探[J]. 矿产保护与利用, 2014, 5(1): 10-14.
Lou Hong, Min Lifei, Huang Lin, et al. Study on potential of geothermal resources of hot dry rock in Songliao Basin[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2014, 5(1): 10-14.
- [27] 张伟. 高温岩体热能开发及钻进技术[J]. 探矿工程, 2016, 43(10): 219-224.
Zhang Wei. Extraction of high temperature rock mass heat energy and related drilling technologies[J]. Exploration Engineering, 2016, 43(10): 219-224.
- [28] 颜磊, 蒋卓, 王大勇, 等. 干热岩抗高温钻井液体系研究[J]. 化学与生物工程, 2015, 32(7): 55-58.
Yan Lei, Jiang Zhuo, Wang Dayong, et al. Study on hot dry rock high temperature resistant drilling fluid system [J]. Chemistry & Bioengineering, 2015, 32(7): 55-58.
- [29] 潘军, 王敏生, 光新军. PDC 钻头新进展及发展思考 [J]. 石油机械, 2016, 44(11): 5-13.
Pan Jun, Wang Minsheng, Guang Xinjun. New progress and future development of PDC bit[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(11): 5-13.
- [30] 王红波, 刘娇鹏, 鲁鹏飞, 等. PDC 钻头发展与应用概况[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2011, 31(4): 74-78.
Wang Hongbo, Liu Jiaopeng, Lu Pengfei, et al. General situations of development and application of PDC bits [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2011, 31(4): 74-78.
- [31] 黄熠, 杨进, 施闪闪, 等. 控压钻井技术在海上超高温高压井中的应用[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(6): 699-705.
Huang Yi, Yang Jin, Shi Shanshan, et al. Applications of MPD technology in offshore ultra-HTHP wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(6): 699-705.
- [32] 黄雪琴, 孟庆昆. 液氮应用于干热岩钻探的可行性探讨[J]. 探矿工程, 2018, 45(2): 22-25.
Huang Xueqin, Meng Qingkun. Feasibility study on application of liquid nitrogen in hot dry rock drilling[J]. Exploration Engineering, 2018, 45(2): 22-25.
- [33] 徐红芳. 适用于页岩气开发的液化氮气汽化压裂技术 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
Xu Hongfang. Liquid nitrogen gasification fracturing technology applicable to shale gas development[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013.

Challenges and technical prospects of dry-hot rock drilling and completion

WANG Zhigang¹, HU Zhixing², LI Kuan¹, LI Xinmiao¹

1. The Institute of Exploration Techniques, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China

2. The Second Geological Team of Hebei Coal Geology Bureau, Xingtai 054000, China

Abstract Dry hot rock, as a clean, environment-friendly and recyclable renewable energy, will be the most environment-friendly clean energy in the future. Dry heat rock engineering projects in the United States, Britain, Japan, France, Australia and China are introduced. According to the characteristics of dry-hot rock mass, technical problems existing in dry-hot rock drilling and completion engineering are analyzed, including low drilling efficiency, high formation temperature, poor wellbore stability, and serious leakage. In view of the aforementioned technical problems, the future developments of key technologies such as efficient rock breaking tools, drilling fluid technology, high temperature cementing technology, pressure control drilling technology, expansion casing technology, directional well technology and liquid nitrogen drilling in dry and hot rock are prospected and analyzed.

Keywords dry hot rock; drilling and completion; drilling engineering technology ●



(责任编辑 刘志远)