

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2019042

## 油气钻井技术在干热岩开发中的适应性分析

思 娜<sup>1</sup>, 叶海超<sup>1</sup>, 牛新明<sup>1</sup>, 王 磊<sup>1</sup>, 冯建赞<sup>2</sup>, 靳瑞环<sup>3</sup>

(1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 中国石化中原石油勘探局培训中心, 河南濮阳 457001)

**摘 要:** 干热岩地热资源潜力巨大, 其开发技术主要依赖于油气钻井技术的移植。鉴于干热岩地热资源的特殊性, 需要分析油气钻井技术在其开发中的适应性, 以便进行改进, 从而更快、更好、更经济地开发该资源。在分析干热岩地热资源地层分布特征及其与常规油气资源异同点的基础上, 总结了干热岩地热资源开发对钻井工程方面的技术需求; 结合当前油气资源开发在安全高效快速钻井、耐高温、高效破岩、高精度表征描述、低成本开发等方面的技术特点, 分析了常规油气钻井技术在干热岩地热资源开发中的适应性, 明确了可移植于干热岩地热资源开发的油气钻井技术, 提出应重点研制耐高温井下工具和工作流体。研究表明, 部分油气钻井技术可移植于干热岩地热资源开发, 但是鉴于干热岩地热资源对钻井技术的特殊要求, 还需要开展针对性的科技攻关。

**关键词:** 油气钻井; 干热岩; 钻头; 冲击器; 测量仪器; 适应性

**中图分类号:** TK52      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-0890(2019)04-0035-06

### Analysis on the Adaptability of Oil and Gas Drilling Technologies in Development for Hot Dry Rocks

SI Na<sup>1</sup>, YE Haichao<sup>1</sup>, NIU Xinming<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, FENG Jianyun<sup>2</sup>, JIN Ruihuan<sup>3</sup>

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 2. Sinopec Exploration & Production Research Institute, Beijing, 100083, China; 3. Training Center, Sinopec Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau, Puyang, Henan, 457001, China)

**Abstract:** There is a great potential for resource development in hot dry rocks. At this point, its development technologies mainly copy the oil and gas engineering technologies. However, hot dry rock resources possess their own unique characteristics which are different from regular temperature conditions of oil and gas reservoirs, and it is necessary to analyze the adaptability of oil and gas drilling engineering technologies in the development of hot dry rock resources. Thus, one can make appropriate improvements and realize faster, better and more economical development. By analyzing the stratigraphic distribution characteristics of hot dry rock geothermal resources and their similarities/differences with the conventional oil and gas resources, the technical demands of hot dry rock geothermal resources development on drilling engineering were summarized. Considering technical features of current oil and gas resources development, such as safe and efficient drilling, high temperature-resistance/high-efficiency rock breaking, high-precision characterization, low-cost development, the adaptability of conventional oil and gas drilling engineering technologies in the development of hot dry rock resources was analyzed, and the oil/gasdrilling new technologies that could be adopted for hot dry rock resources development were clarified. Moreover, this paper proposes new areas of emphasis in the development of high temperature-resistance downhole tools and working fluids. The research showed that some oil/gas drilling technologies could be successfully applied in the development of hot dry rock resources. However, further scientific and technological research is required in view of the unique demands of hot dry rock resources on drilling engineering technologies.

**Key words:** oil/gas drilling; hot dry rock; bit; impactor; measuring instrument; adaptability

干热岩是非化石能源中最具有利用潜力的一种清洁地热资源, 在能源转型的关键时期其战略地位显得尤为重要。干热岩地热资源几乎遍及全球, 资源量比煤炭、石油、天然气的总和还要大。由我国能源行业标准《地热能术语》(NB/T 10097—2018)可知, 干热岩是指内部不存在或仅存少量流体、温度高于 180 °C 的异常高温岩体。据我国地质调查局

收稿日期: 2018-08-15; 改回日期: 2019-02-15。

**作者简介:** 思娜 (1983—), 女, 陕西榆林人, 2007 年毕业于西安石油大学油气储运专业, 2010 年获中国石油大学 (北京) 油气井工程专业硕士学位, 主要从事石油工程技术前瞻研究及战略规划方面的研究工作。E-mail: sina.sripe@sinopec.com。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目“干热岩能量获取及利用关键科学问题研究”子课题“干热岩能量获取方法与测井技术”(编号: 2018YFB1501802) 和中国石化科技攻关项目“干热岩地热勘探开发关键技术研究”(编号: P17030-4) 资助。

统计,我国埋深3~10 km干热岩地热资源的总量达到了 $2.5 \times 10^{25}$  J,仅青海省共和盆地干热岩理论资源总量按2%的开采率计算,即可达到2016年全国能源总消耗量的3倍<sup>[1]</sup>。迄今,美国、英国和德国等国家均开展了干热岩开发试验,共建立了14座干热岩试验发电站,总装机容量为12.2 MW,初步具备商业开发规模。我国对于干热岩的勘探目前尚处于起步阶段,近两年先后在青海、河北、山东和东南沿海地区完成了10余口干热岩勘探井<sup>[2]</sup>。2017年8月,我国在青海共和盆地3 705.00 m深处钻遇236 ℃的高温干热岩体,取得重大勘探突破,并进行了大量的基础研究工作。

作为深部地热资源勘探开发关键技术之一的钻井技术,目前主要移植油气钻井技术。鉴于干热岩地热资源的特殊性,需要探讨油气钻井技术的适应性。为此,笔者在分析干热岩地热资源埋藏特性及钻井技术需求的基础上,分析了油气钻井技术在干热岩地热资源开发中的适应性,以期为我国干热岩钻井技术的研究提供参考。

## 1 干热岩地热资源特征及钻井技术需求

尽管国外对干热岩开发的研究较早,但受资源

特性、开发难度和成本等的限制,目前还没有干热岩项目实现规模化、商业化开发。在众多限制条件中,钻井技术为主要的制约因素之一。

### 1.1 干热岩地热资源特征

干热岩地热资源主要分布在地壳减薄区的盆地、构造剧烈运动板块的边缘、高放射性区和近现代火山,一般位于火山岩体深部,储层岩性以花岗岩为主,岩体致密、渗透性低且不含水;同时,沉积岩、火山岩和变质岩也是干热岩储层岩体。青海共和盆地为典型的干热岩地层,储层岩性为花岗岩。

干热岩地热资源赋存的形式与油气资源有较大差异。石油以液态形式赋存于地下孔隙、裂缝或溶洞中。天然气以游离、吸附形式主要赋存于沉积岩中,如砂岩、砾岩、碳酸盐岩等。干热岩地热资源以高温、超高温热流形态赋存于地下岩体中,开发时需建立人工热储,采用工质进行热交换,循环取热,发电利用。

由于干热岩地热资源赋存的深度、地层以及特性与油气资源不同(见表1),导致干热岩地热资源开发对钻井技术的需求也与油气资源有诸多不同<sup>[1-4]</sup>。

### 1.2 干热岩地热资源开发对钻井技术的需求

干热岩地热资源通常具有埋藏深、温度高、硬

表1 干热岩地热资源与油气资源的不同

Table 1 Differences between hot dry rock resources and oil/gas resources

资源特征	油气资源	干热岩地热资源
赋存位置	板内或板缘盆地	板块边缘、裂谷、“热点”、深的大断裂带
赋存机理	生储盖,形成油气资源	地热由热源传输至热储体后,盖层成岩性及导热性差,保存聚集地热能,形成干热岩地热资源
储集类型	以天然的孔隙型、缝洞型、裂隙型储层为主,孔渗条件较好,连通性好	以人工造储为主,孔渗条件较差,连通性差
岩性	沉积岩为主,火山岩及少量变质岩和侵入岩等	火山岩、变质岩及沉积岩
地温梯度	小于等于或略大于3 ℃/100m	通常大于4 ℃/100m
非均质性	孔隙型油藏非均质性较差,缝洞型裂隙型油藏非均质性较强	非均质性整体较强
埋深	3 500~4 500 m(深层),大于4 500 m(超深层)	3 000~10 000 m
岩石压缩强度	抗压强度1~10级	花岗岩抗压强度最高可达10级
地层温度	最高钻遇温度<250 ℃	通常>180 ℃,最高>400 ℃

度大、岩性致密、地应力差异大等地质特征,对于这类地层,油气钻井技术适应性较差,安全快速成井困难。因此,干热岩地热资源的开发对钻井技术、工具和工作流体提出了更高的要求<sup>[2-6]</sup>。

1)干热岩地热资源埋藏深、地层复杂、井下故障

多,需要安全高效快速钻井技术。干热岩地热资源埋深一般大于3 000.00 m,构造复杂,地层局部裂隙发育,钻井过程中热破裂、井漏、井塌、卡钻等问题突出,钻井风险不易预测。因此,需开展干热岩井身结构优化设计、地层压力预测、防漏堵漏技术、耐高

温低密度钻井液等方面的研究,形成干热岩井安全快速钻井技术,实现高温硬地层安全快速成井的目的。

2)地层温度高,需要耐高温钻井工具及工作流体。在高温环境下钻头、井下动力钻具、随钻测量仪器等井下工具,性能不稳定、使用寿命短;钻井液添加剂在高温环境下性能会降低甚至失效,造成钻井液性能无法满足正常携岩需求。油气钻井工具的耐温性能难以满足钻进干热岩储层的要求。因此,需要研发耐高温钻井工具和钻井工作流体。

3)岩石强度大、硬度高,需要高效破岩工具。干热岩主要以黑云母片麻岩、花岗岩、花岗闪长岩为主,单轴抗压强度大于 200 MPa,研磨性强、硬度大,钻头磨损快,常规钻头及辅助破岩工具的破岩效率低,机械钻速低,钻井成本高。因此,需要研发高性能钻头及高效的辅助破岩工具。

4)储层非均质性强,需要高精度地层描述技术。与油气储层相比,热储层的岩性、物性等变化较大,非均质性强,因此需要高精度随钻描述技术。通过高精度测录井资料能获得地层的岩性、物性及裂缝分布特性,以更好地指导干热岩钻井。

5)换热流体能量密度低,实现经济有效开发,需要低成本钻井技术。由于干热岩地层非均质性强,加之换热流体(水)能量密度低,循环换热流量大,要求井筒直径大,与油气资源开发相比,相同井深需要用更多大直径的套管,造成钻井成本占整个干热岩井开发成本的 50% 左右。所以,提高钻井效率,降低钻井成本至关重要。最大限度地接触干热岩是高效开发干热岩地热资源的主要手段,因此,需采用定向井、水平井、分支井等复杂结构井进行开发,以降低干热岩地热资源的开发成本。

## 2 油气钻井技术适应性分析

目前,我国油气钻井技术已经十分成熟,因此利用油气钻井技术进行干热岩钻井被认为是推进干热岩地热资源勘探开发的有效途径,但需要分析油气钻井技术在该类资源开发中的适应性,对存在的技术瓶颈进行攻关研究。

### 2.1 安全高效快速钻井技术

安全是钻井的第一原则,利用区域地质特征、地层信息以及从邻井获取的地球物理资料(地质、钻井液、录井、地球物理测井等资料)预判钻井风险,指导安全快速钻井,以避免发生井下故障,提高钻

井效率。目前,已形成了一系列安全高效快速的油气钻井技术。

控压钻井技术能够精确控制井底压力,增强井控能力,减少钻井液密度调整次数,降低发生井塌、井漏等井下故障的概率<sup>[7]</sup>。Schlumberger、Halliburton、Weatherford 和 Shell 等各大油服公司均有成熟的控压钻井系统,井底压力控制精度达到 0.30 MPa。国内中国石化石油工程技术研究院、中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院和中国石油集团工程技术研究院有限公司均研发了精细控压钻井系统,井底压力控制精度与国际先进水平相当。

通过在钻井液及水泥浆添加减轻剂以降低其密度,形成低密度钻井液及水泥浆,从而降低钻井、固井过程中的液柱压力,避免压漏脆弱地层而造成恶性漏失。Schlumberger 公司微泡钻井液的最低密度为 0.9 kg/L,中国石化石油工程技术研究院研发的中空微珠低密度钻井液的密度最低可达到 0.8 kg/L。

通过增大水灰比可以将水泥浆密度最低降至 1.50 kg/L,通过添加空心微颗粒、气体等可以将其密度最低降至 1.0 kg/L, Halliburton 公司、中国石化石油工程技术研究院均研发出此类水泥浆<sup>[8]</sup>。

受裂缝尺寸、溶洞大小、地层温度、水质的影响,现有化学堵漏材料还不能完全解决裂缝和溶洞型恶性漏失堵漏的难题。采用管材封隔漏失层效果较好,如膨胀管可克服常规堵漏材料耐温性能低的问题,但施工周期较长,需简化膨胀管的膨胀过程,提高经济效益<sup>[8]</sup>。Weatherford 公司拥有世界领先的实体膨胀管技术。中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院及中国石油集团工程技术研究院有限公司研发了实体膨胀管,中国石化石油工程技术研究院研发了膨胀波纹管,均已达到国外先进水平。

反循环钻井技术是将钻井液从井筒环空泵入,经钻头、钻具内眼返出地面,对于恶性漏失地层非常有效,已经应用于地热井,单位进尺成本降低幅度超过了 33%。缺点是无法应用传统井控技术,面临安全问题。Reelwell 公司的双壁钻杆反循环钻井技术(见图 1)利用同心双壁钻杆实现反循环,与 Shell、Total 等油服公司合作实施了“20 km 大位移井”项目,成功解决了深井井下故障多发的问题。

干热岩地层非均质性强,钻井数量少,缺乏详细可靠的地质资料、地层信息,无法进行精确的钻井设计、准确预测风险;其次,在预防和处理恶性漏失等井下故障中,为降低钻井成本,通常采用清水边漏边钻,井身质量和固井质量很难保证。



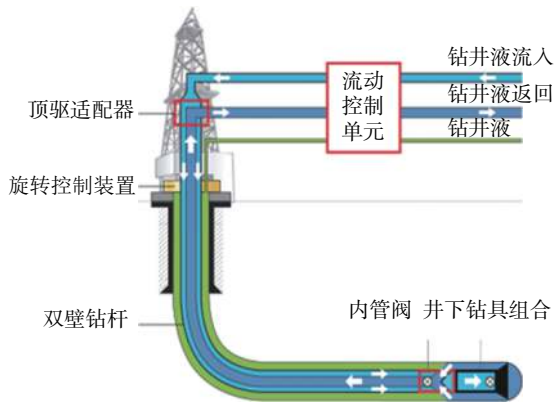


图1 Reelwell 双壁钻杆反循环钻井技术

Fig.1 Reelwell double wall drill pipe reverse circulation drilling technology

油气安全高效快速钻井技术虽然对于干热岩地热资源开发具有一定的适应性,但不能完全满足干热岩安全快速高效钻井的要求,还需要进一步研究高精度钻井风险预测技术,研究低成本低密度耐高温的钻井液和水泥浆。

## 2.2 耐高温技术

干热岩地热资源的高温特性对钻井流体、钻井工具、测量仪器及测录井仪器的耐高温性能提出了更高的要求,当前油气井钻井所用工作流体、钻井工具、测量仪器及测录井仪器的耐温性能基本满足一般干热岩地热资源开发的要求。

钻井液方面,目前,国外水基钻井液最高耐温可以达到 260 ℃,油基钻井液最高耐温可达 265 ℃。水泥浆方面, Schlumberger 公司的 ThermaSTONE 水泥浆可耐 350 ℃ 高温,国内的水泥浆也可耐 236 ℃ 高温<sup>[9-11]</sup>。国内钻井液和水泥浆的耐温性能与国际先进水平相当,但是需强化其稳定性。

国外油气井高温高压测井仪器可以耐 260 ℃ 高温、抗 207 MPa 高压,国内中国石油 Eilog 和 LEAP800 测井仪器的耐温、抗压能力分别达到了 175 ℃、140 MPa。目前,完井测试工具的耐温、抗压能力分别达到了 240 ℃、159 MPa。

钻头方面, BHGE 公司研发了 StayCool 切削齿,提高了钻头切削齿的热稳定性,解决了高温对钻头造成破坏的问题,相比标准 PDC 切削齿产生的热量减少了 50%;目前通过采用金属轴承密封系统、耐高温润滑介质,强化顶齿和掌背使牙轮钻头的耐温能力达到了 288 ℃<sup>[8-11]</sup>。

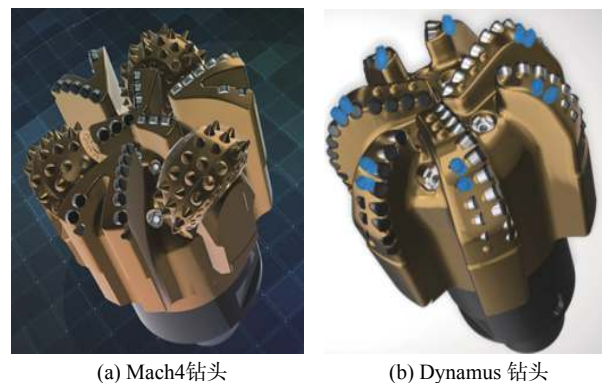
有效开发利用干热岩地热资源的关键是找到更高温度的热储层并形成高效取热通道,当前油气钻

井所用工具、仪器、工作流体仅适用于较低温度干热岩地热资源的勘探开发,还不能满足 260 ℃ 以上超高温干热岩地热资源勘探开发安全高效快速成井的需求。因此,需要开发配套的耐超高温的钻井工具、测井仪器及低成本工作流体,形成超高温钻头、钻井工具、流体一体化解决方案,以满足更多类型干热岩地热资源开发的需求,提高钻井速度,缩短钻井周期,降低钻井成本。

## 2.3 高效破岩工具

干热岩地热资源 90% 赋存于火山岩-花岗岩、流纹岩中,其抗压强度可达 240 MPa,磨蚀性强(石英含量>50%)。因此,造成钻头破岩效率低,加之高温会加速钻头的热损。

钻头是直接破碎岩石的工具。随着钻头技术的不断发展,油气行业钻头技术的发展越来越趋于高性能、多功能、宽适应,以实现“一趟钻”钻进和提速提效。为此,各大型油服公司不断推出新型钻头,如 BHGE 公司 2017 年和 2018 年分别推出了混合钻头 Kymera Mach 4 钻头和 Dynamus 钻头(见图 2)<sup>[9-15]</sup>,以提高钻头的适应性,延长钻头的使用寿命。针对超高抗压强度地层, ReedHycalog 研制出了超硬热稳定 PDC 钻头,可钻穿抗压强度达到 280 MPa 的硬地层,并具有很强的耐磨性和抗冲击性。同时,很多公司推出了多种自适应钻齿(锥形齿、脊形齿、双倒角等),并采用新材料增强钻头的性能<sup>[12-13]</sup>,如采用陶瓷涂层增强钻头的耐温性能,采用纳米纤维材料增强钻头的抗冲击性能。



(a) Mach4钻头

(b) Dynamus 钻头

图2 Mach 4 钻头和 Dynamus 钻头

Fig.2 Mach 4 drill bit and Dynamus drill bit

冲击器是辅助钻头破岩的有效工具。为提高机械钻速,国内外研制了多种冲击器<sup>[16-20]</sup>,国外主要有 Ander-gauge 公司的液动冲击器、Cubex 和 Gerald 公司的空气锤,国内对液动冲击器的研究较多,中国

石化、吉林大学等均进行了液动冲击器的研究。

井下动力钻具是定向井钻井的必备工具,是提高钻井效率的重要工具之一。目前最常用的井下动力钻具有涡轮钻具、螺杆钻具。高温螺杆钻具的耐温能力通常不高于 180 ℃,且在高温环境下性能不稳定、使用寿命短。涡轮钻具有耐高温、转速高等优点,适用于火山岩地层。

由于干热岩储层岩石硬度极大,国内外主要采用低转速、可承受高钻压的牙轮钻头钻进,但在高温、高钻压情况下,牙轮钻头轴承的使用寿命相对较短,造成起下钻频繁,导致钻井成本升高。冲击器在油气井钻井中被广泛应用,但对于超硬地层需要优化钻进参数。井下动力钻具因耐温性能低限制了其在高温干热岩地热资源开发中的应用。因此,需要开展钻井参数优化研究,开发与“超高温钻头+井下动力钻具”配套的提速提效工具。

## 2.4 高精度描述技术

高精度描述技术主要通过分析测录井资料获得储层物性参数、力学参数及地质特征,以指导钻井作业、评价热储层特性。

利用测井资料可以获得油气层孔隙结构及物性、岩石力学参数、裂缝发育程度以及地应力特性等。目前,国外已用随钻成像测井取代了全部电缆测井项目,实现了多参数测井(电阻率、伽马、密度、中子、声波、井斜、方位、振动、地震和远探测电阻率等)和地层评价,且随钻成像测井仪的最高额定工作温度已达到 200 ℃。

录井是油气开发过程中获取地层原始资料最直接的方式,可指导钻井作业,判定地层特性,但资料的质量会影响判断结果。Schlumberger 和 Geolog 等公司利用高精度流量计和监测软件监测井涌井漏,指导钻井作业,降低钻井风险。Schlumberger 和 Halliburton 等公司开发了随钻地下实验室,其额定工作温度为 204 ℃,能够在井下采样、识别评价地层特性和流体性质,实现地层流体的随钻分析。

开发干热岩地热资源需要分析评价储层的地质特征、岩石力学参数、岩石热力学参数以及储层的热容、导热系数等,现有石油测录井仪器可满足干热岩储层特性描述和评价需要,但在超高温环境下大多数测录井仪器的耐温性能不足。

## 2.5 低成本钻井技术

增大储层接触面积是提高油气资源开发效率的

一种重要技术手段,水平井、分支井等复杂结构井较直井在高效低成本开发油气资源方面具有更大的优势。目前,水平井钻井技术在油气开发中广泛应用,最大水垂比可达 10.5,最大测深 15 000.00 m,最长水平位移 11 569.00 m,水平段最长 11 475.00 m,最大垂深为 7 971.40 m;分支井技术的关键在于完井工具,目前可实现 1~6 级完井,且配套工具实现了模块化。

目前,干热岩开发案例中多采用直井或定向井,由于受随钻测量仪器额定工作温度的限制,通常使用单点测斜仪进行定向,限制了钻井效率,加之干热岩储层岩石硬度超高,进一步增大了定向难度,限制了定向井、水平井及分支井在干热岩地热资源开发中的应用。因此,需要进行高温硬地层井眼轨迹控制技术研究。

通过适应性分析得知,油气钻井技术在干热岩地热资源开发中应用受限的主要因素为地层超硬、井下温度超高以及低成本钻井工具及工作流体。因此,需要研发耐超高温的低成本钻井工具、随钻测量仪器及耐高温低密度钻井液及水泥浆,同时提高井下钻具组合的配套性能,主要研究耐 300 ℃ 以上高温的长寿命高效钻头、钻井提速工具、井下随钻测量仪器以及钻井液和水泥浆,为干热岩地热资源规模高效开发做好技术储备。

## 3 结论及建议

1) 鉴于干热岩地热资源储藏具有温度超高、硬度高、非均质性强和能量密度低的特点,勘探开发干热岩地热资源时,在移植常规油气钻井技术的基础上,需重点研发耐 300 ℃ 以上高温的长寿命高效钻头、钻井提速工具、井下随钻测量仪器以及钻井液和水泥浆,同时提高井下钻具组合的配套性能,为干热岩地热资源规模高效开发提供技术支撑。

2) 针对干热岩钻井实践中出现的复杂情况,加大反循环钻井和膨胀管技术的移植实践力度,研究干热岩钻井地质环境精细描述技术,配套干热岩地热钻井井控技术,优化干热岩地层恶性漏失堵漏技术,研发干热岩井安全高效快速成井技术,降低干热岩井钻井复杂故障的发生概率,提高干热岩井成井效率,降低其开发成本。

3) 积极拥抱“数字革命”,按照“高起点、高标准”的原则,促进智能化干热岩井钻井技术的发展,取准取全各干热岩地热区块的地层特性数据、钻井作业数据、井下故障数据、测录井数据和热储

评价数据等,建立完善的干热岩地热数据库,利用“学习曲线”“人工学习”等大数据、人工智能技术提高成井效率,为后期高效改造储层提供依据,实现干热岩地热资源的高效经济开采。

### 参 考 文 献

#### References

- [1] FINGER J, BLANKENSHIP D. Handbook of best practices for geothermal drilling[R]. California: Sandia National Laboratories, 2010.
- [2] DOE. A history of geothermal energy research and development in the United States[R]. Washington DC: US Department of Energy, 2010.
- [3] 多吉,王贵玲,郑克棣. 中国地热资源开发利用战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 31-40.  
DUO Ji, WANG Guiling, ZHENG Keyan. Strategic research on the development and utilization of geothermal resources in China[M]. Beijing: Science Press, 2017: 31-40.
- [4] 张厚福,方朝亮,高先志,等. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 101-124.  
ZHANG Houfu, FANG Chaoliang, GAO Xianzhi, et al. Petroleum geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 101-124.
- [5] 信石玉,高文金,黎爱军,等. 中低温地热钻机适应性技术方案研究[J]. 钻采工艺, 2015, 38(1): 79-82.  
XIN Shiyu, GAO Wenjin, LI Aijun, et al. Tions to drilling rig for medium-low temperature geothermal resource[J]. *Drilling & Production Technology*, 2015, 38(1): 79-82.
- [6] 王定亚,忽宝民. 提速提效石油钻机技术现状及发展思路[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(9): 45-48.  
WANG Dingya, HU Baomin. Technology status and development trend for more efficient drilling rig[J]. *Oil Field Equipment*, 2016, 45(9): 45-48.
- [7] 郭先敏,侯芳. 国外钻井装备与技术新进展[J]. 石油机械, 2016, 44(7): 20-26.  
GUO Xianmin, HOU Fang. Foreign drilling equipment and technology progress[J]. *China Petroleum Machinery*, 2016, 44(7): 20-26.
- [8] 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.
- [9] 张德龙,翁炜,贾军,等. 干热岩钻探井控技术研究[J]. 科技导报, 2015, 33(19): 45-48.  
ZHANG Delong, WENG Wei, JIA Jun, et al. Well control techniques in hot dry rock drilling[J]. *Science & Technology review*, 2015, 33(19): 45-48.
- [10] 张伟. 高温岩体热能开发及钻进技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(10): 219-224.  
ZHANG Wei. Extraction of high temperature rock mass heat energy and related drilling technologies[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(10): 219-224.
- [11] 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.
- [12] BREEDE K, DZEBISASHVILI K, LIU Xiaolei, at al. A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal sytems: past, present and future[J]. *Geothermal Energy*, 2013, 1(1): 1-27.
- [13] 张丽军,王旭,胡小燕,等. 抗 260 °C 超高温水基钻井液体系[J]. 钻井液与完井液, 2015, 32(4): 5-8.  
ZHANG Lijun, WANG Xu, HU Xiaoyan, et al. Ultra-high temperature water base drilling fluid[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2015, 32(4): 5-8.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 邓勇,陈勉,金衍,等. 冲击作用下岩石破碎的动力学特性及能耗特征研究[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(3): 27-32.  
DENG Yong, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Investigation of the dynamic characteristics and energy consumption for breaking rocks using the impact load[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, 44(3): 27-32.
- [17] DUCHANE D, BROWN D. Hot dry rock (HDR) geothermal energy research and development at Fenton Hill, New Mexico[J]. *GHC Bulletin*, 2002(12): 13-19.
- [18] 查青春,柳贡慧,李军,等. 复合冲击破岩钻井新技术提速机理研究[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(2): 20-24.  
ZHA Chunqing, LIU Gonghui, LI Jun, Li Yumei, et al. The rock breaking mechanism of the compound percussive-rotary drilling method with a PDC bit[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(2): 20-24.
- [19] 马广军,王甲昌,张海平. 螺杆驱动旋冲钻井工具设计及试验研究[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(3): 50-54.  
MA Guangjun, WANG Jiachang, ZHANG Haiping. The design and experimental study of PDM driven rotary percussion drilling tool[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, 44(3): 50-54.
- [20] 陈勇,吴仲华,聂云飞,等. 应用于螺杆钻具的轴向振动冲击装置研制[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(2): 212-217.  
CHEN Yong, WU Zhonghua, NEI Yunfei, et al. Development of axial vibration impact device used for screw drill[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2017, 39(2): 212-217.

[编辑 刘文臣]