

# 干热岩钻探关键技术及进展

贾军, 张德龙, 翁炜, 黄玉文, 单文军, 熊正强

北京探矿工程研究所, 北京 100083

**摘要** 干热岩资源是一种储量巨大的可再生清洁能源, 开采干热岩资源的方法是钻开储层、建立增强型地热系统(EGS)。干热岩地层通常为火成岩, 研磨性强、可钻性差, 温度高于200℃, 对钻探工艺、设备、材料要求极高。本文在分析干热岩高温钻探特点和难点的基础上, 介绍了高温钻井液、井下钻具、高温井控、火山岩压裂、分布式测温等关键技术及其进展, 提出了中国干热岩高温钻探技术研究的重点和方向。

**关键词** 干热岩钻探; 高温钻井液; 金刚石钻头; 高温井控; 测温; 火山岩压裂

**中图分类号** P634 **文献标志码** A **doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.19.005

## Key technology and development of hot dry rock drilling

JIA Jun, ZHANG Delong, WENG Wei, HUANG Yuwen, SHAN Wenjun, XIONG Zhengqiang

Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China

**Abstract** Hot dry rock resource is clean and renewable energy with abundant reserve. Exploitation of hot dry rock resource requires drilling to the reservoirs and establishing an enhanced geothermal system (EGS). Hot dry rock formations are usually igneous rock with poor drillability and high temperature, which is a huge challenge to the drilling technology, equipment and materials. Based on analysis of the characteristics of and difficulties in hot dry rock drilling, this paper introduces the key technology and development, including high-temperature drilling fluid, downhole motor, well control, igneous rock fracturing and distributed temperature measurement, and discusses the focus and direction of drilling technology research, which may provide references for managers, researchers and engineers.

**Keywords** hot dry rock drilling; high-temperature drilling fluid; diamond bit; high temperature well control; temperature measurement; igneous rock fracturing

干热岩资源是一种储量巨大、无污染、可再生的清洁能源, 初步估算中国埋深3~10 km范围内的干热岩资源量相当于860万亿t标准煤, 按2%的可开采资源量计算, 相当于中国目前能源消耗总量的5200倍<sup>[1]</sup>, 实现干热岩资源开发利用可有效改善中国能源结构, 促进经济发展。世界上很多国家都在开展干热岩资源研究工作, 部分国家已经建立增强型地热系统(EGS), 实现了干热岩资源的开发利用<sup>[2]</sup>。中国地热资源利用历史悠久, 1975年西藏羊八井钻成中国第一口湿蒸汽井, 同时建立了中国大陆上第一台兆瓦级地热发电机组, 进入了工业性发电阶段, 开创了世界中温浅层地热资源发电的先列。目前中国已经将干热岩资源开发利用提上日程, 国土

资源部、中国地质调查局也将其列为重点发展方向, 然而中国的干热岩资源开发利用工作尚属起步阶段, 相关理论、技术、方法略显不足。

国际上普遍采用建立EGS的方法开采干热岩资源, 即采用钻井的方法钻一口井作为注水井, 钻一口或多口井作为生产井, 采用水力压裂技术压通生产井和注入井形成循环系统, 从注水井注入冷水, 利用生产井开采蒸汽用于发电<sup>[3,4]</sup>。可见, 如何钻开储层形成EGS系统是干热岩资源开发的关键。与石油和浅层地热钻探不同, 干热岩地层上部通常为沉积岩盖层, 下部储层为火山岩, 地层温度高(通常高于200℃)、岩性复杂、可钻性差, 钻探、压裂难度极大。中国在干

收稿日期: 2015-08-21; 修回日期: 2015-08-31

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120114025101)

作者简介: 贾军, 教授级高级工程师, 研究方向为钻探工程, 电子信箱: jiajun@bjiee.com.cn; 张德龙(通信作者), 工程师, 研究方向为钻探工程, 电子信箱: tgszdl@126.com

引用格式: 贾军, 张德龙, 翁炜, 等. 干热岩钻探关键技术及进展[J]. 科技导报, 33(19): 40-44.

热岩钻探和水力压裂方面经验不足,开展干热岩钻探和相关关键技术研究对推动中国干热岩资源开发利用具有重要意义。

## 1 高温钻井液技术

干热岩地层特点是埋藏深,温度为150~650℃。在开发干热岩过程中,钻井液起着至关重要的作用,井内钻井液将长期处于高温环境。恶劣环境对钻井液性能造成极其严重的破坏,直接影响孔壁稳定、携岩能力、施工安全及施工成本等;干热岩钻井过程中还可能遇到大量低压地层,钻井液漏失严重。因此如何保证高温环境下钻井液性能的稳定是干热岩钻探必需解决的问题,也是国内外钻井液技术研究的热点和重点。

### 1.1 高温钻井液关键问题

1) 抗高温问题。高温作用下,钻井液的黏土颗粒(膨润土)分散度增强,温度越高,分散性越强,而引起钻井液增稠,流动性较差,高温高压(HTHP)失水量增加。高温一方面会使有机处理剂分子链发生断裂,降低高分子处理剂的相对分子质量,使其失去原有的特性,同时降低处理剂的亲水性,减弱其抗污染能力,可能会导致泥浆性能恶化;另一方面会使处理剂分子中不饱和键和活性基团之间发生各种反应,发生高温交联,使得整个泥浆体系变成凝胶,失去流动性<sup>[5]</sup>。

2) 低压地层井壁稳定。干热岩体钻遇变质岩或结晶岩,会有大量破碎地层,易发生坍塌、掉块等孔壁不稳定现象。

3) 堵漏问题。钻井液漏失问题在国外干热岩钻探施工中比较常见,国内针对高温堵漏材料的研究较少。

目前国内研究的高温钻井液抗温性能不超过250℃,对抗高温的处理剂及体系研究还很少,干热岩预计孔底温度会达150~650℃,面临着超高温问题,有待开展耐高温钻井液技术研究,主要有以下几个方面:1) 高温处理剂的研制,包括抗高温降滤失剂、高温增黏剂、高温润滑剂、高温堵漏剂及高温保护剂;2) 高温钻井液体系的研究,包括高温高密度钻井液体系、高温泡沫钻井液体系、高温油基钻井液体系等;3) 高温检测仪器的研究,包括高温高压流变仪、高温高压失水仪、高温高压页岩膨胀量测定仪、高温堵漏仪、高温润滑仪等;4) 高温钻井液地表冷却系统研究,例如冷却塔、冷冻房等。

### 1.2 干热岩耐高温钻井液体系室内研究

通过室内实验在优选大量的高温造浆材料及高温处理剂的基础上,重点针对抗高温钻井液体系——高温保护剂进行研究,形成了由抗高温复合造浆材料、高温降滤失剂、高温增黏剂、高温保护剂等组成的抗260℃高温的钻井液配方(质量分数):3% 钠基膨润土+2% 抗盐黏土+4% 磺化褐煤+4% 磺化褐煤树脂+4% 高温降失水剂1型+4% 高温降失水剂2型+1.5% 高温降黏剂+1% 高温增黏剂+1% 高温保护剂,性能如表1所示。

由实验结果(表1)可以看出,该耐高温钻井液体系抗260℃高温,流变性能好,可以满足钻井液长时间高温循环的要求。

表1 高温钻井液性能

Table 1 Parameters of high-temperature drilling fluid

条件	表观黏度/ (mPa·s)	塑性黏度/ (mPa·s)	动切力/Pa	API滤失量		高温高压滤失量	
				滤失量/mL	泥皮厚度/mm	滤失量/(2mL·h <sup>-1</sup> )	泥皮厚度/mm
常温,16 h	85.0	64.0	23.0	2.6	0.2	—	—
240℃,16 h	75.5	52.0	22.5	3.4	0.3	15	0.5
240℃,32 h	70.0	47.0	23.0	4.4	0.3	17	0.5
240℃,48 h	65.0	42.0	21.0	5.6	0.3	18	0.5
240℃,56 h	57.0	38.0	26.0	5.8	0.4	23	1.0
240℃,72 h	68.5	41.5	22.5	6.8	0.4	25	1.5

## 2 高温井下钻具

干热岩地层通常为火山岩,温度通常高于200℃,地层岩石研磨性强、可钻性差,对井下钻具的耐高温能力、工作性能要求较高。

### 2.1 耐高温涡轮钻具

井下动力钻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、液动冲击器等。螺杆钻具耐高温能力通常不高于150℃,高温螺杆钻具耐高温能力通常不高于180℃,且在高温环境下螺杆钻具表现出性能不稳定、工作寿命短等问题。液动冲击器可以有效提高钻速,然而现有的液动冲击器工作寿命普遍较短,且受钻井液性能和固相含量影响较大。

涡轮钻具具有耐高温、转速高、工作寿命长等优点,适合火山岩地层钻进<sup>[6]</sup>。国外干热岩高温钻探通常采用高温涡轮钻具配合金刚石钻头进行复合钻进,钻探效率明显提高<sup>[7]</sup>。北京探矿工程研究所研制了Φ127规格涡轮钻具,涡轮节采用独立悬挂结构,涡轮叶片为不锈钢精密铸造(图1),可以有效提高涡轮叶片寿命和水力效率;采用独立轴承节结构,轴承为金刚石止推轴承(图2);整套钻具采用全金属结构,无橡胶元件,钻具耐高温性能大幅提高。该规格涡轮钻具外径为127 mm,匹配孔径为152 mm,工作转速为1000~1400 r/min,工作压降为7.5~10.0 MPa,制动扭矩为1300~1740 N·m,工作排量为14~16 L/s。

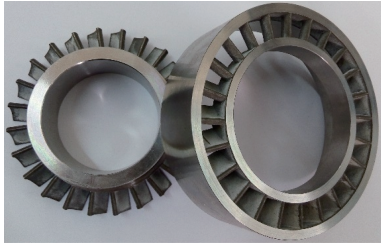


图1 127规格涡轮叶片  
Fig. 1 127 turbine



图2 PDC轴承  
Fig. 2 PDC bearing

## 2.2 钻头优选及设计

1) 钻头选型技术。钻头选型技术目前已广泛应用于石油钻井过程中,目前常用的钻头选型方法是通过声波测井曲线预测地层的岩性特征和可钻性,通过对国内各区块钻头使用情况的调研,建立钻头参数数据库,从而进行地层与钻头的匹配和选型。应用计算机软件建立地层岩性预测模型和钻头数据库系统,应用该系统可以对地层岩石的岩性和可钻性进行预测,从而进行钻头优选<sup>[8,9]</sup>。

2) 金刚石钻头。目前在火山岩地层钻进过程中通常采用高速牙轮钻头或金刚石钻头钻进。牙轮钻头具有低转速、可承受高钻压的特点,可适应软到坚硬等各种地层。但牙轮钻头钻头牙掌与钻头主体间采用轴承连接,在高温、高钻压情况下,其轴承寿命相对较短。金刚石钻头具有耐高温、高转速的特点,其中孕镶金刚石钻头适合在高温硬岩环境中使用,配合井下动力钻具进行复合钻进可大幅提高钻探效率<sup>[6]</sup>。

为解决硬岩钻进难的问题,史密斯公司研制了一种GHI热压镶嵌齿,将该GHI齿二次镶焊于胎体中,形成超高工作层、多种切削机理的Kinetic孕镶金刚石钻头(图3)。该类钻头在刀翼上镶嵌了特殊工艺材料的热压镶嵌齿,这种凸起在孕镶钻头胎体外部的GHI热压镶嵌齿较PDC更加坚硬耐磨,钻进过程中,由于其降低了钻头表面与岩石的接触面积,增加了单颗金刚石的工作压力,故在硬岩钻进中,金刚石产生新陈代谢加快,提高了钻头的钻进效率。该钻头配备涡轮钻具更能体现出在硬岩钻进中的优势<sup>[10]</sup>。



图3 Smith KGR50CTPXX 钻头  
Fig. 3 Smith KGR50CTPXX bit

3) 个性化钻头设计。个性化钻头设计是指针对地层岩性及可钻性特点对钻头进行优化设计,从而达到提高机械钻速和钻头寿命的目的。对于金刚石而言,在个性化设计时金刚石的粒度设计应重点考虑岩层的完整度、硬度、钻进参数、金刚石参数等因素<sup>[11]</sup>,钻头结构设计应重点考虑地层结构、岩性、压力、钻头稳定性等因素,根据地层岩性及钻进工况合理设计钻头胎体硬度和强度,针对地层研磨性合理设计钻头保径形式及长度等。此外,在钻头设计过程中还应考虑复合钻进条件下工作转速、钻压、压降等钻进参数的要求。

北京探矿工程研究所根据干热岩地层特点研制了高温硬岩金刚石钻头,采用双圆弧冠部曲线设计,热压镶嵌天然金刚石和孕镶金刚石,具有长方体聚晶及复合片保径,该钻头具有寿命长、钻探效率高的特点(图4)。

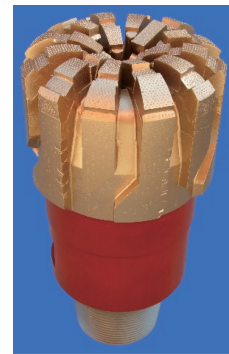


图4 孕镶金刚石钻头  
Fig. 4 TGS impregnated diamond bit

## 3 高温井控技术

### 3.1 干热岩钻探井喷发生机理

在干热岩钻探过程中,地层孔隙压力通常低于环空液柱压力,容易引发井喷。井喷原因主要有以下两种<sup>[7]</sup>:一是在钻井液上返过程中,压力降低导致钻井液瞬间汽化,汽化后钻井液液柱压力进一步降低,进而引发更深层次的钻井液汽化和压力下降,从而引发井喷;二是钻井液大量漏失导致环空压力瞬间下降,引发井喷。在发生井涌时必须迅速采取井控措施,一旦失去控制,大量流体瞬间涌入井筒将会引发井喷,大量的高温钻井液、地层流体和高温气体(有时含有有毒气体)喷出,轻则造成一定的经济损失,重则导致设备损坏、环境污染乃至人员伤亡。在美国的内华达州、夏威夷的干热岩钻探施工过程中均发生过重大井喷事故<sup>[12]</sup>。

### 3.2 干热岩钻探井控技术研究

国外干热岩钻探井控设备通常选用闸板防喷器,部分选用了安全高效的旋转防喷器。中国干热岩钻探工作处于起步阶段,旋转防喷器在中国干热岩钻探施工过程中没有应用,一般选用闸板防喷器作为井控设备,部分钻井施工现场甚至没有配备井控设备。主要原因有:旋转防喷器价格昂贵;现有旋转防喷器主要针对石油钻井,规格尺寸大,无法满足干热岩钻探需要;国内干热岩钻探通常选用水文水井钻

机,工作转速通常高于200 r/min,而现有旋转防喷器最大工作转速不高于200 r/min。对比分析可以发现,国内相关技术及设备明显落后,且对井控重要性认识明显不足。

### 3.3 高温高速旋转防喷器研制

中国目前实施的干热岩钻探井均采用水井钻机,其特点是钻进转速高、机台结构紧凑、平台高度较低,而现有的旋转防喷器的特点是尺寸高、重量大、成本高,不适合现场应用。北京探矿工程研究所针对中国干热岩钻探特点研制了一套结构简单、转速高、尺寸小、成本低、耐高温能力高的旋转防喷器(图5)。该旋转防喷器配备液压控制系统,可实现远程控制,操作简单方便,适合中国干热岩钻探现场使用。此外,防喷器的底法兰和侧出口法兰均采用API标准,通用性强,可应用于煤层气、页岩气等浅井钻探。

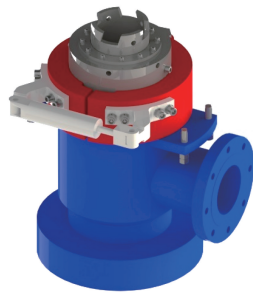


图5 高温高速旋转防喷器

Fig. 5 High-temperature high speed RBOP

## 4 火山岩地层压裂技术

干热岩地层上部为沉积岩盖层,下部为火山岩储层,采用水力压裂技术压开储层实现注入井与生产井之间的联通是建立EGS系统的一个关键环节。石油、页岩气、煤层气等地层通常为沉积岩地层,而干热岩储层为火山岩,地层岩石具有较高的力学强度和非均质性。普通沉积岩地层杨氏模量一般为20000~30000 MPa,火山岩地层杨氏模量一般为47000~80000 MPa,杨氏模量越高裂缝宽度越窄,施工难度越大<sup>[13]</sup>。在干热岩压裂过程中需要较高的压力和排量,对地面设备、井下工具、压裂工艺都有更高的要求。

### 4.1 压裂液

中国压裂技术主要应用在石油天然气开发领域,实施压裂的地层通常为含油含气沉积岩地层,而在火山岩地层水力压裂技术方面基本空白。国内致密油气藏主要为砂岩、灰岩,天然裂缝发育,大部分储层温度低于120℃,所用高压压裂液抗温集中在130~140℃,而且压裂时间较短,为2.5~3.0 h。目前,尚无针对干热岩压裂的高温压裂液研究。针对干热岩地层的特点,北京探矿工程研究所研制了一种耐150℃高温压裂液体系,配方为(质量分数):0.65% GHPG 羟丙基瓜尔胶+0.7% GJP-10 抗高温交联剂+0.4% GKW-1 pH 值调节剂+0.3% GZP-2 助排剂+0.1% GSJ-2 杀菌剂+0.1% GHTS 高温稳定剂。该耐高温压裂液具有良好的耐高温剪切性,在150℃及170 s<sup>-1</sup>剪切速率下剪切2 h后表观黏度为

184.9 mPa·s,远大于50 mPa·s。在150℃下加入0.2%胶囊破胶剂GSN-04,冻胶能在1 h内彻底破胶,破胶液外观清澈透明,破胶液黏度小于5 mPa·s,破胶后残渣含量为577 mg/L,破胶液表面张力为23.3 mN/m。

### 4.2 支撑剂优选原则

常用的支撑剂主要有石英砂、陶粒砂及树脂包覆的复合颗粒等。石英砂具有成本低及易于泵送等特点,被大量使用,但其强度低、球度差,而且降低裂缝导流能力,不适用于闭合压力高的深井。树脂包覆石英砂的复合颗粒,球度有改善,耐腐蚀性比较强,导流能力也较好,但产品保持期短,造价过高。陶粒具有球度好、耐腐蚀、耐高温高压的特点,同时成本可得到较好控制,因此越来越广泛地被油气田采用。干热岩地层坚硬致密,破裂压力高,因此,在实施该类地层压裂时应选择低密度高强度陶粒支撑剂(如耐86、103 MPa),可明显减少压裂液用量,降低压裂设备损耗,并有利于支撑剂在裂缝中运移,制造更长的裂缝。此外,受干热岩地层岩石强度的影响,压裂过程中裂缝宽度普遍低于沉积岩地层,因此宜选用粒度较小的支撑剂产品<sup>[14]</sup>。

### 4.3 压裂工具

美国在干热岩钻探过程中进行了大量的压裂实验,实验过程中发现火山岩地层压裂所需压力、排量远大于沉积岩地层压裂,并且在压裂过程中常出现封隔器无法顺利坐封、封隔器损坏等问题<sup>[15]</sup>,因此针对高温干热岩特点研制耐高温封隔器可有效提高干热岩压裂的成功概率。

## 5 分布式测温技术

干热岩钻探的关键问题在于井下温度过高,温度给钻井液、井下工具等带来重要影响。此外,一旦建成EGS系统后,实施储层、生产井温度监测对干热岩储层评价、产能预测有重要作用。

目前常用的测温系统通常为点式测温仪器,每次只能测量一个或几个点的温度。目前国内外学者都提出了分布式测温系统<sup>[16-18]</sup>。其原理是:光纤温度传感的主要依据是光纤的光时域反射原理及光纤后向拉曼散射的温度效应。当光脉冲从光纤的一端注入并沿着光纤向前传输时,由于拉曼效应,会产生后向散射,后向散射光的光强与散射点的温度有一定的关系。散射点的温度(光纤所处的环境温度)越高,后向散射光的光强越大,后向散射光的光强可以反映出散射点的温度。利用这个现象,测量出后向散射光的光强,就可以计算出散射点的温度<sup>[19,20]</sup>。图6为分布式测温系统结构。

应用分布式光纤测温系统,可以在短时间内获得整个井筒纵向温度场分布情况。分布式光纤温度传感器利用光纤作为温度信息的传感和传输介质,可以在很短的时间内测量光纤沿线的所有温度分布情况,这是分布式光纤温度传感器相对于其他温度传感器的显著优点。

应用分布式测温系统快速测量和掌握整个井筒的温度分布,在钻探过程中可以为钻探施工提供参考和指导,在干

热岩示范工程开采过程中可以实现对整个井筒温度变化进行监测,从而预测产能,为干热岩资源开发研究提供指导。

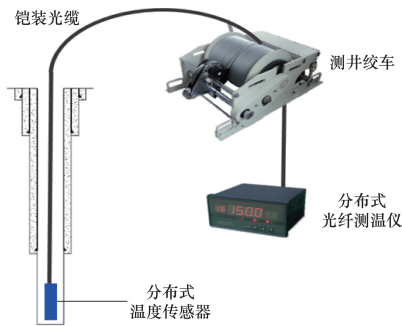


图6 分布式测温系统结构

Fig. 6 Structure of the distributed fiber optic temperature sensor system

## 6 结论

1) 介绍了干热岩钻探关键技术及研究进展,部分研究成果仍处于理论研究阶段,建议实施干热岩示范工程,结合示范工程开展相关技术的现场应用研究。

2) 中国在高温钻井液仪器、高温井测温仪器方面还存在不足,建议进一步加强相关仪器、设备的研发工作。

3) 井控是高温干热岩钻探重要工作之一,建议在旋转防喷器的基础上进一步研究高温干热岩钻探井控系统,形成高温干热岩钻探井控体系。

4) 国内涡轮钻具应用较少,相关经验不足,建议针对火山岩地层特点进一步开展高速涡轮钻具配合金刚石钻头钻进工艺及现场实验研究,提高深部火山岩地层钻进速度。

5) 火山岩地层压裂技术难度大,建议进一步开展火山岩地层压裂技术及现场实验研究,掌握火山岩压裂工艺,为建立干热岩EGS工程提供技术保障。

## 参考文献 (References)

[1] 蔺文静, 刘志明, 马峰, 等. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. 地球学报, 2012, 33(5): 807-811.  
Lin Wenjing, Liu Zhiming, Ma Feng, et al. An estimation of HDR resources in China's mainland[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(5): 807-811.

[2] 张建英. 增强型地热系统 (EGS) 资源开发利用研究[J]. 中国能源, 2011, 33(1): 29-32.  
Zhang Jianying. Research of exploitation and utilization of EGS[J]. Energy of China, 2011, 33(1): 29-32.

[3] 康玲, 王时龙, 李川. 增强型地热系统EGS的人工热储技术[J]. 机械设计与制造, 2008, 9: 141-143.  
Kang Ling, Wang Shilong, Li Chuan. Reservoir technology in enhanced geothermal systems[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008, 9: 141-143.

[4] 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.

[5] 胡继良, 陶士先, 单文军, 等. 超深井高温钻井液技术概况及研究方向的探讨[J]. 地质与勘探, 2012, 48(1): 155-159.  
Hu Jiliang, Tao Shixian, Shan Wenjun, et al. Overview of ultra-deep

well high-temperature drilling fluid technology and discussion of its research direction[J]. Geology and Exploration, 2012, 48(1): 155-159.

[6] 李瑞莹, 王峰, 陈绍云, 等. 大庆深层钻井提速技术[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(1): 38-43.  
Li Ruiying, Wang Feng, Chen Shaoyun, et al. ROP improvement in deep formations in the daqing oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(1): 38-43.

[7] Finger J, Blankenship D. Handbook of best practices for geothermal drilling[M]. New Mexico: Sandia National Laboratories, 2010.

[8] 滕学清, 文志明, 王克雄, 等. 塔中岩石可钻性剖面建立和钻头选型研究[J]. 西部探矿工程, 2010(11): 43-45.  
Teng Xueqing, Wen Zhiming, Wang Kexiong, et al. Research on drillability sections of rocks and bit selection in Tazhong area[J]. West-China Exploration Engineering, 2010(11): 43-45.

[9] 王克雄, 魏凤奇. 测井资料在地层抗钻特性参数预测中的应用研究[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(5): 61-62.  
Wang Kexiong, Wei Fengqi. Applications of logging information in predicting formation anti-drilling parameters[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(5): 61-62.

[10] 沈丽娜, 阮海龙. 国内外金刚石钻头的部分技术进展[J]. 探矿工程: 岩土钻掘工程, 2010, 38(5): 78-80.  
Shen Lina, Ruan Hailong. Some technical development of diamond bit both in China and abroad[J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2010, 38(5): 78-80.

[11] 阮海龙, 纪卫军, 沈丽娜, 等. 针对复杂地层金刚石钻头的改进与应用[J]. 探矿工程: 岩土钻掘工程, 2010, 37(1): 67-69.  
Ruan Hailong, Ji Weijun, Shen Lina, et al. Improvement and application of diamond bit for drilling in complex formation[J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2010, 37(1): 67-69.

[12] Meier U do, Ernst D I, Peter L. Drilling and completion of the Urach III HDR test well[C]. The International Conference on Geothermal Drilling and Completion Technology, Albuquerque, January 21-23, 1981.

[13] 刘合. 深层火山岩气藏增产改造技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.  
Liu He. Deep volcanic gas reservoirs production increasing technology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.

[14] 朱国文. 压裂施工技术能手[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.  
Zhu Guowen. Fracturing operation technical experts[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.

[15] Brown D W, Duchane D V, Heiken G, et al. Mining the earth's heat: Hot dry rock geothermal energy[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2012.

[16] 史晓锋, 蔡志权, 李铮. 分布式光纤测温系统及其在石油测井中的应用[J]. 石油仪器, 2002, 16(2): 20-23.  
Shi Xiaofeng, Cai Zhiquan, Li Zheng. The optical fiber distributed temperature measurement system and its application in petroleum well logging[J]. Petroleum Instruments, 2002, 16(2): 20-23.

[17] 史晓锋, 李铮, 蔡志权. 分布式光纤测温系统及其测温精度分析[J]. 测控技术, 2002, 21(1): 9-12.  
Shi Xiaofeng, Li Zheng, Cai Zhiquan. Optical fiber distributed temperature measurement system and precision analysis[J]. Measurement & Control Technology, 2002, 21(1): 9-12.

[18] 和志明, 陈智雍. 分布式光纤温度测井及其信号滤波法的改进[J]. 石油仪器, 2010, 24(5): 4-7.  
He Zhiming, Chen Zhiyong. The distributed optical fiber temperature log and its improved method of signal filtering[J]. Petroleum Instruments, 2010, 24(5): 4-7.

[19] 姜明顺, 隋青美, 林宗强. 分布式光纤测温系统在石油测井中的应用[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2007(2): 29-31.  
Jiang Mingshun, Sui Qingmei, Lin Zongqiang. Application of distributed fiber optic temperature sensor system in oil field logging [J]. Optical Fiber & Electric Cable, 2007(2): 29-31.

[20] 刘媛, 雷涛, 张勇, 等. 油井分布式光纤测温及高温标定实验[J]. 山东科学, 2008, 21(6): 40-44.  
Liu Yuan, Lei Tao, Zhang Yong, et al. A distributed oil wells optical fiber temperature measurement and high temperature calibration experiment[J]. Shandong Science, 2008, 21(6): 40-44.

(责任编辑 王媛媛)