

控压钻井及其在高温地热勘探开发中的应用

于进洋,白占学,郑秀华,周丹,李飞跃

(中国地质大学(北京),北京 100083)

摘要:控压钻井包括管理压力钻井、欠平衡钻井和空气钻井。控压钻井可以减少非钻进时间和事故、提高机械钻速、预防漏失、消除压差卡钻、保护低压产层以提高产能。地热井具有温度高、地层硬度高、裂隙发育、地层压力低伴随浅部地层压力变化大等特点。在地热勘探开发中应用控压钻井技术有利于提高钻进速度、预防漏失、提高产能。介绍了控压钻井及其关键技术,同时阐述控压钻井在地热勘探开发中的应用。

关键词:控压钻井;平衡钻井;地热钻井

中图分类号:P634.5;TE249 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2013)01-0019-05

Controlled Pressure Drilling and the Application in High-temperature Geothermal Exploration/YU Jin-yang, BAI Zhan-xue, ZHENG Xiu-hua, ZHOU Dan, LI Fei-yue (China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Controlled pressure drilling (CPD) includes managed pressure drilling (MPD), underbalanced drilling (UBD) and air drilling (AD). CPD can be used to decrease non drilling time and drilling hazards, increase rate of penetration (ROP), prevent lost of circulation, eliminate sticking, protect reservoir with low pressure and improve productivity. Geothermal wells are of characteristics of high temperature, hard rock, fractured formation and low pore pressure along with likely high pressure of shallow formation. It is proved that CPD can increase ROP, prevent lost of circulation and improve productivity. This paper introduces CPD technology and its application in geothermal energy exploration and development.

Key words: controlled pressure drilling; balanced drilling; geothermal drilling

0 前言

高温地热田的形成一般都与地下岩浆活动、构造断裂及冷水的补给情况有关。地热田地层无论是第四系砾石层,或是底部基岩,都很硬,且孔/裂隙发育,地层复杂;地热一般都存在于开式断裂构造及浅部松散地层中,因此深部地层压力一般较低;地热一般埋藏较浅,浅至一二十米即见热储,且一直延伸数百米或千米以上。因此,其浅部地层压力梯度变化非常激烈,极易出现浅层井喷、井漏、井塌等施工问题。

控压钻井(Controlled Pressure Drilling—CPD)(Torralde et al, 2010)包括管理压力钻井(Managed Pressure Drilling—MPD)、欠平衡钻井(Underbalanced Drilling—UBD)和空气钻井(Air Drilling)。国际钻井承包商协会(IADC, 2005)对MPD和UBD做了定义:管理压力钻井(MPD)通过旋转控制装置和关闭的、可调压力的环空上返泥浆系统共同作用使井筒压力得到精确控制,达到减少非钻进时间和钻井事故的目的;欠平衡钻井(UBD)通过控制井底压力小于地层储层压力,使储层流体在钻进过程中适当地流入井内,其目的主要在于保护储层,提高产能;空气钻井包括干气、雾、泡沫和充气钻进,其主要目的是提高机械钻速、预防漏失、降低钻进成本。

在地热勘探与开发钻进中应用控压钻井技术能够安全钻进,同时提高钻进速度、预防漏失、提高产能。

1 高温地热田地层压力

高温地热通常为开式系统,地层压力低于冷水压力。但是,浅部地层压力变化大,因此高温地热田压力分布范围大。我国西藏羊八井地热田就有这样的特点。

我国高温地热勘探与开发始于20世纪70年代的西藏羊八井高温地热田。1975~1977年上半年共钻进4口井,均因严重井喷及随之而来的地面憋裂或井口爆炸,被迫中途停钻。1977年下半年起至1982年止,地矿部勘探技术研究所承担了羊八井热田的钻井与成井的研究与服务,共完成生产井和探采结合井22口,勘探井2口,最深井为1725.32 m。基本上做到了安全顺利施工,达到了地质目的。羊八井热田的钻井实践指出:地层压力(压力梯度)及其压力控制是高温地热田勘探与开发的关键。

地热多与火山岩有关,热储构造一般为开式构造。热流体是地表冷水沿裂隙进入地下,与存在于深处的热岩体发生热交换后,再沿构造裂隙上升至

收稿日期:2012-09-08;修回日期:2012-11-23

作者简介:于进洋(1986-),男(汉族),山东威海人,中国地质大学(北京)在读硕士研究生,地质工程专业,主要从事地热钻井钻井水力学流变学研究工作,北京市海淀区学院路29号,jyyu06@yahoo.com.cn。

浅处某一孔隙或裂隙地层中,其中一部分还可能上窜至地表而流失。热储地层存在着不同的压力状态。其决定因素是热储的温度及其所处的深度。尤其在浅层热储,一般可出现高压。深部一般为常压或低压。根据地热井控喷防漏的特点,对地热井地层压力分类(汪仲英等,1980)见表1。

表1 地热井地层的压力分类

地层压力分类	地层压力梯度 / (MPa·m ⁻¹)	钻井施工特点
高压	0.012 ~ 0.023	加重泥浆;防喷装置;易自喷
常压	0.010 ~ 0.012	清水或非加重泥浆;防喷装置;易自喷
低压	0 ~ 0.010	泡沫或空气;或用清水边漏边钻;需气举引喷
无压	< 0	泡沫或空气;清水边漏边钻;永久性堵塞

羊八井热田的热流体是以单相液态的形式(高温水)存在于热储的压力环境下。基于单相液态这一前提,推导出羊八井地层压力和压力梯度的深度规律如下:

$$\rho_b = \rho_w + (\Delta H_0 / Z) \quad (1)$$

式中: ρ_b ——以当量密度表示的地层压力梯度, g/cm³; ρ_w ——热水的平均密度, g/cm³; ΔH_0 ——该井的压力常数,水柱高, m; Z ——计算点的深度, m。

由公式(1)可知,羊八井地层压力梯度和地层压力当量密度,以近似于双曲线函数的规律随深度而下降(见图1)。因此:

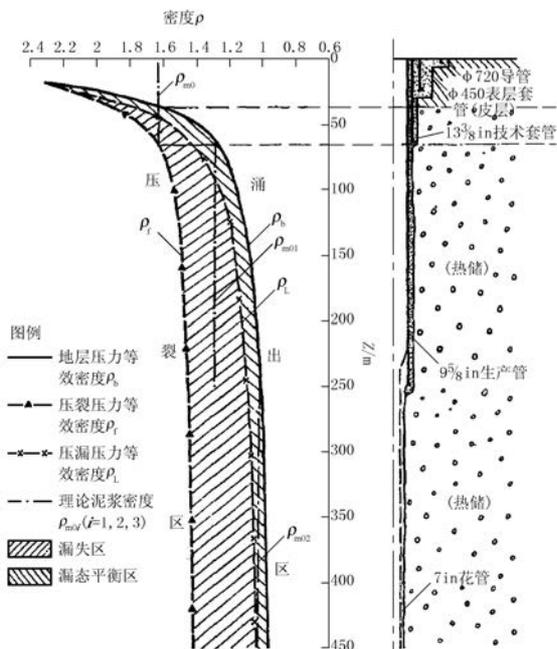


图1 羊八井地热地层压力梯度(当量密度)及套管程序

- (1)浅层压力梯度可能很高,需要采用较高的泥浆密度,才能控制井喷;
- (2)超过100 m或数百米后的较深地层,压力

梯度可能很低,接近热水密度,因而即使使用清水钻井,也可能发生井漏。

2 气基钻井液钻井(空气钻井)及其应用

空气钻井包括空气、雾、泡沫和充气钻井液钻井,也称为气基钻井液钻井。根据气体含量不同,气基钻井液包括:(1)气体,99% ~ 100%;(2)雾化,96% ~ 99%;(3)泡沫,55% ~ 99%;(4)充气钻井液, < 55%,见图2(Toralde et al,2010)。这几种气基钻井液的特征及优缺点见表2。

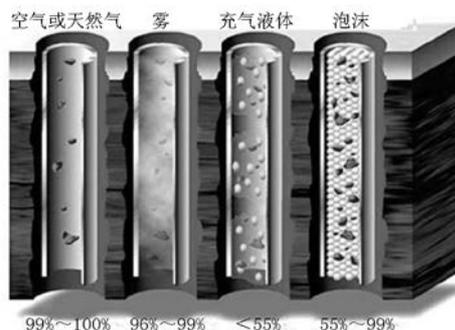


图2 4种气基流体及其气体比例

表2 气基流体钻井方式比较

类型	特征	优缺点
空气钻井	密度为 0.0012 ~ 0.012 g/cm ³ , 环空流态为紊流	优点:无循环漏失,无地层伤害;机械钻速最快 缺点:地层流体控制能力低;地层水携带能力低;弱胶结地层垮塌风险高;遇天然气易爆燃
雾化钻井	密度为 0.012 ~ 0.36 g/cm ³ , 环空流态为环雾流、雾状流	优点:能处理少量地层水;遇天然气不易爆燃 缺点:钻柱易腐蚀;气体流量最高,动力设备最多
泡沫钻井	密度为 0.36 ~ 0.6 g/cm ³ , 环空流态为层流	优点:气体流量小,动力设备少;地层水处理能力强;遇天然气不爆燃 缺点:化工原料消耗量大;基液易引发泥页岩水化膨胀
充气钻井	密度为 0.48 ~ 0.84 g/cm ³ , 环空流态为泡状流、弹状流、泡沫状流等	优点:欠平衡钻井地层适用范围广;地层流体控制能力强 缺点:应用井深、有效密度受限;空气动力设备压力较高

美国和加拿大是应用气体钻井技术比较成功的国家。飞利浦石油公司1941年最先在犹他州向泥浆中充入空气以减少漏失。目前,国外已成功采用气态型流体为循环介质来解决易漏、钻井速度低的地层面临的钻井技术难题。美国和加拿大应用这方面技术比较普遍,除了使用空气外,它们还用氮气、天然气等轻质流体为循环介质,成功地解决了地层漏失特别严重、地层比较坚硬、地层渗透率特别低的区块的钻井问题,其设备趋于完善,技术趋于成熟。据美国能源部统计,截至2000年,30%左右的油气

井钻井作业采用了空气钻井技术。

我国对空气钻井的研究与应用始于 20 世纪 80 年代末。目前,国内部分油气田已经先后尝试过空气钻井的现场试验,有些效果十分不错,主要应用在提高非储层段的机械钻速和对付非储集层段井漏上。

20 世纪 70 年代早期,美国加州的盖瑟尔斯引进了空气进行“粉尘钻进”。1978~1982 年新西兰地热能在肯尼亚的奥卡瑞和日本本州岛的葛根田地热井中使用了充气钻进。后来在肯尼亚、埃塞俄比亚、日本、印尼、肯尼亚和墨西哥、新西兰和冰岛使用了充气钻井液钻进(Birkisson, et al,2007)。

地热钻进采用充气钻井液是克服钻井问题和提高产能的最成功方法之一,其主要目的是降低钻井液密度以减少钻进过程中环空压力,平衡漏失层的地层压力,达到控压钻井的要求。气基流体欠平衡钻井作为控压钻井的重要方面,其流体的当量密度相对较低,如表 3 所示。

表 3 气基欠平衡钻井流体的当量密度

分类	当量密度/(g·cm ⁻³)	分类	当量密度/(g·cm ⁻³)
干气	0.001~0.01	泡沫	0.03~0.46(有回压时更高)
雾化	0.01~0.03	充气液	0.60~0.90

采用气基钻井是实现欠平衡控压钻井手段之一(图 3)。通过低密度钻井流体,保持井底压力低于地层压力,使地层流体适当地流入井筒。对于热储,欠平衡钻进可有效地增加地热流体的流量。肯尼亚地热钻井证明了充气钻井液对地热产能的提高(表 4)。

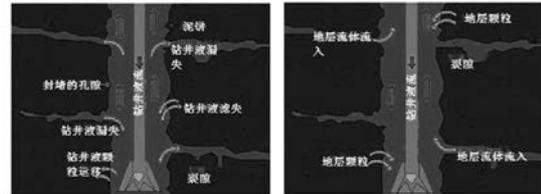


图 3 常规(过压)钻井与欠平衡(欠压)钻井

表 4 肯尼亚 Olkaria 使用与未使用充气钻井液热能产出对比

清水顶漏钻进		充气钻井液钻进	
井号	热能/MWt	井号	热能/MWt
1	43.31	A-1	37.05
2	12.75	A-2	98.73
4	22.15	A-4	58.86
5(泥浆钻进)	14.76	A-5	105.49
6	21.38	B-1	27.59
		B-3	36.26
		B-7	32.72
		B-9	67.63
平均	22.87		58.04

3 空气钻井设备

空气钻进设备是在采用液体循环钻进设备的基础上,将原有的泥浆循环设备换为空气循环设备,即可进行空气钻进。除使用常规的设备(钻机)外,专用的设备有空压机、增压机、井口控制装置、除尘设备、管汇连接系统等。比较典型的空气钻井设备连接见图 4。

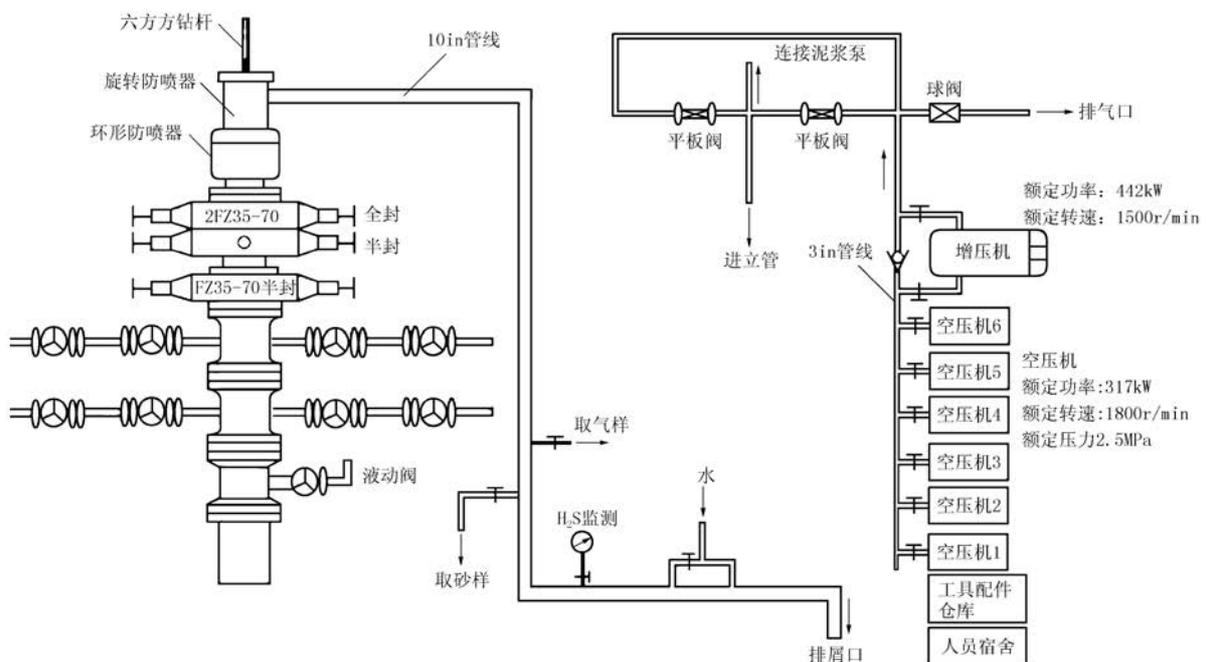


图 4 空气钻井用设备连接图

3.1 空压机

空气压缩机是空气钻进的最主要设备。空气钻进方法对空压机的基本要求是:风量大、风压相当、外形小、质量轻。目前有多种空气压缩机,如旋转叶片式、直瓣式、往复式和旋转螺杆式,其中螺杆式空气压缩机是油田钻井作业应用最多的一种。空气压缩机有多种压力级别,其输出的最大工作压力一般为1.75~2.45 MPa。在正常情况下,这种工作压力能够满足空气钻井的需要,但在井较深时,或预计井内有出水时,所要求输送的空气压力可能超过空气压缩机额定的压力值,这时就要使用增压机。单台空气压缩机的输出气量一般为25.5~42.5 m³/min,不能满足空气钻井所需要的空气量。空气钻井作业时,根据不同的井眼尺寸、井下出水等情况,配备多台空气压缩机,以机组形式并联使用提供压缩空气,满足空气钻井需要的空气量。

3.2 增压机

增压机是一种容积式空气压缩机,可提供表压为4~10 MPa的高压空气,主要用于增压。如果一个增压器处理不了几个压缩机的压缩空气,可将辅助增压器并联到增压系统中。一般情况下,一台增压机能处理2台或多台空气压缩机提供的空气。空气钻井时,应根据所需的空气量配备与空气压缩机相对应的增压机数量,且并联使用,满足空气钻井作业需要。

3.3 井口控制装置

在空气钻进中,有大量岩粉成尘埃状或小泥球状涌出孔口,为了环保和安全的要求,必须有专门的井口设备。井口装置一般要求是:有一定的密封性能,钻机附近不得有尘埃和粉团飞扬,钻杆通过和回转时要灵活自如,结构简单,安全方便,外形规格小巧,使用寿命长,在必要时能迅速换用其它钻进方法等。

无论是空气钻井还是其它气体型流体钻井(雾化、泡沫或充气),井口返出的流体均有一定的压力,为了确保钻井的安全、顺利,井口除装有常规防喷器组外,还必须安装旋转防喷器。旋转防喷器一般由空气钻进服务队提供,作业完毕以后拆掉并换装防溢管转换钻井液钻进。

3.4 管汇连接系统

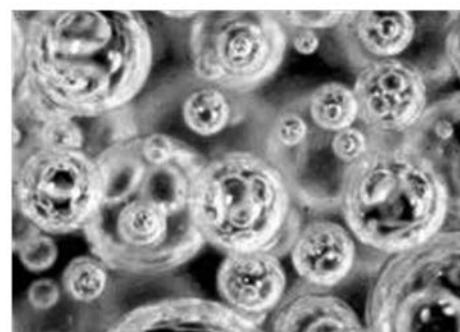
现有的压缩机系统中,压缩机之间,压缩机与增压机之间以及进气管线(与立管相连的高压管线)均采用 $\varnothing 76.2$ mm高压管连接,主要以球阀或平板阀实现压缩空气按照需要进行分配;排屑(排气)管

线采用 $\varnothing 254$ 或273 mm管线,为了保证安全及录井工作需要,管线上应考虑配备各种接口如气样采集、H₂S监测、取砂样、抑尘管等。

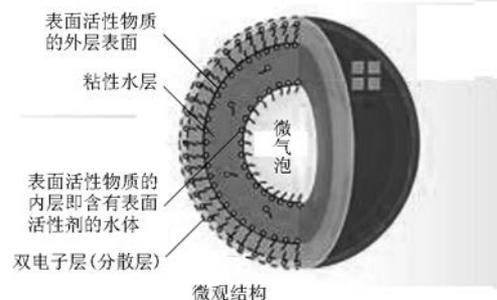
4 微泡钻井液性能

与普通空气或泡沫钻进不同,微泡钻进不需要增加任何额外设备,如空压机、泡沫发生器、高压管汇和接头。微泡的优越性能得到了广泛应用(郑秀华,2009),在地热中也已经开始应用(TIBOR,2012)。

微泡(Micro-bubbles或Aphrons)也称为胶质气泡(Colloidal Gas Aphrons),粒径通常在15~100 μm ,外壳有3层表面活性剂膜组成。内层表面活性剂膜被一层增粘了的水和双表面活性剂层覆盖,使微泡具有亲水特性并与泥浆中的连续相相容。然而,表面活性剂的双层结合的并不紧密,静止时,最外层表面活性剂与内层结合在一起,使微泡具有亲水性,与液相相容;在足够的剪力或压力作用下,最外层表面活性剂层脱落,使微泡具有亲油特性。微泡的这种特殊结构使微泡具有许多的特殊性能,如在水溶液中微泡可以聚集但不发生合并;微泡极易流动,具有胶体性质,易于输送。图5为微泡钻井液体系和微泡的微观结构,图6为微泡钻井液蓄能架桥堵漏原理。



微泡沫钻井液体系



微观结构

图5 微泡结构

(1)泡沫钻井液的性能稳定,携岩携砂能力强,润滑性能好,抗污染性和对岩屑清洁能力好,防塌和

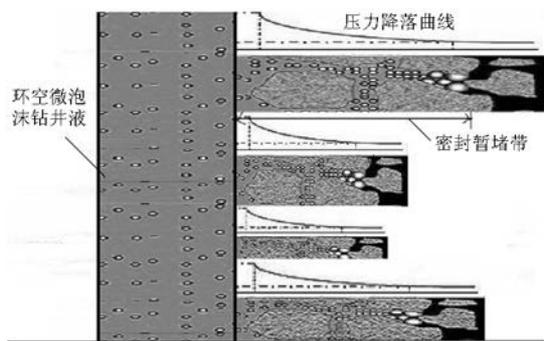


图6 微泡沫钻井液的蓄能、架桥堵漏机理

防漏能力强。

(2)可循环微泡钻井液密度通常大于 0.65 g/cm^3 ,根据地层压力、坍塌压力可调。可循环微泡沫钻井液配制方便,性能维护容易。

(3)可以用于欠平衡钻井;对于低压水层,可以提高产能;可以用于裂缝发育、漏失严重和低压地层;

(4)微泡沫有较好的蓄能作用,因此适用于多压力体系的钻井。

(5)与其它处理剂配伍性良好;不影响钻进、取心、电测等施工的正常进行。

5 控压钻井的关键技术

5.1 压力预测

控压钻井技术是当今世界钻井工程前沿技术之一,主要是通过随钻环空压力测量、地面自动节流调整回压以及压力补偿等手段,实现对井筒环空压力的闭环实时监测与精确控制,有效控制地层流体侵入井筒,减少井涌、井漏等钻井复杂情况,是当前解决窄密度窗口钻井难题的最有效手段。

气体体积流量、井底压力是保证控压钻井施工的关键,由于采用具有压缩性的气基作为循环介质,循环系统的体积流量与压力变化密切相关,因此气体钻井压力计算成为研究重点。气体钻井压力预测包括以下几个方面。

(1)气基钻井流体(气体、雾、泡沫和充气泥浆)特性及流变学性能研究,优化充气钻井液气体和液体用量。包括:气体、雾、泡沫和充气钻井液的流变模型;气体、雾、泡沫和充气钻井液携带岩屑和清洗孔底机理。

(2)地层温度预测,气基钻井液(气体、雾、泡沫

和充气泥浆)温度传导模型,计算其在井筒内分布温度,为计算气基钻井液在井筒压力分布、循环压力、上返速度等提供温度数据,同时预测地层流体产出和汽化程度。

(3)气基钻井液水力学的研究,研究多相流体流动规律,对井筒温度、压力耦合性分析,建立气基钻井液的摩擦压力及压力传递模型,并进行实用软件开发。计算井底压力以平衡地层压力,减少漏失,为精确控压钻井提供压力数据。

5.2 高温泡沫和微泡钻井液

在高温条件下,钻井液的组分会发生化学反应,使钻井液性能发生变化(Rand, et al, 1979)。在高温条件下选择合适的发泡剂和稳泡剂保持泡沫和微泡钻井液性能稳定是关键技术之一。

6 结语

针对地热勘探开发井的特点,以空气钻井为代表的控压钻井技术可以增加机械钻速、预防漏失、提高产能,对地热勘探开发有重要意义。

参考文献:

- [1] Biriksson Sturla F, Hole Hagen. Aerated Fluids for Drilling of Geothermal Wells[C]. Proceedings European Geothermal Congress 2007. Unterhaching, Germany; 2007. 5. 30 - 6. 1.
- [2] International Association of Drilling Contractors (IADC) Underbalanced Operations & Managed Pressure Drilling Committee (2005). IADC Well Classification System for Underbalanced Operations and Managed Pressure Drilling[C]. 2005.
- [3] Rand P. B., Montoya O. J. Aqueous Foam Surfactants for Geothermal[A]. Drilling Fluids; 1. Screening. Sand 79 - 2036.
- [4] TIBOR. SZABó. Application of Aphron Based Drilling Fluid for Geothermal Drilling Operations [J]. Műszaki Földtudományi Közlemények, 2012, 83(1): 199 - 210.
- [5] Toralde J. S. S and Nas S. Controlled Pressure Drilling Applications for Enhanced Geothermal Systems[C]. Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia; 2010. 4. 25 - 29.
- [6] Toralde J. S. S and Nas S. Geothermal Aerated Fluids Drilling Operations in Asia Pacific[C]. Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia; 2010. 4. 25 - 29.
- [7] 汪仲英,周绍光,汤松然. 关于地热田地层压力梯度分类问题及羊八井地热田地层压力梯度规律[J]. 探矿工程, 1980, (2): 1 - 8.
- [8] 汪仲英. 高温蒸汽地热田钻井与成井主要技术问题[J]. 探矿工程, 1979, (5): 57 - 61.
- [9] 郑秀华,王军,詹美萍,等. 微泡钻井液在岩芯钻探中的多重功效[J]. 地质与勘探, 2009, 45(3): 321 - 324.