

天津地区地热钻井中地层漏失分析及堵漏方法选择

钱洪强,王娟*,孙玉东,王震凯,袁博
(天津地热勘查开发设计院,天津,300250)

摘要:天津地区地热钻井中,井漏是常见的现象。按照地层差异,井漏可以分为孔隙型漏失和裂隙、溶洞型漏失两种,孔隙型漏失主要发生在砂岩、砂砾岩中,漏失量小,处理起来比较简单,裂隙、溶洞型漏失漏失量大,堵漏工艺复杂,且不易奏效。本文通过两种地热井漏失的成因分析,分别列举了它们各自的堵漏方法和施工中的注意事项,重点对堵漏难度大的裂隙、溶洞型漏失进行了漏层判定分析和堵漏方法介绍,并通过两项施工实例来加以佐证。此研究对地热钻井中的地层漏失及堵漏工艺有一定的借鉴作用。

关键词:地热钻井;钻井液漏失;裂隙;堵漏方法

中图分类号: P314

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2016)03-0226-05

在地热资源的开发利用过程中,钻井是必不可少的阶段^[1]。钻井属于地下工程,存在着大量的模糊性、随机性和不确定性问题^[2],井漏就是地热井钻井、完井过程中常见的井下复杂情况之一。轻微的漏失会造成材料消耗增加,钻井成本上升,严重漏失则会造成生产间断,引起井塌、卡钻等井下事故的发生,甚至导致整个地热井的报废。目前,天津地区地热钻井中对于地层漏失及堵漏方法的研究,主要基于石油钻井中遇到漏失所采用的方法,但开采石油和开采地热流体存在着很多区别。本文试图通过分析地热钻井漏失原因,针对不同类型漏失情况,归纳总结出一套对地热钻井有针对性的处理措施,并通过实例加以验证。

1 地热井漏失原因分析

地热钻井中,发生钻井液漏失的地层,必须具备两个条件:一是地层中有钻井液通行和贮存的条件,比如裂隙、断层、孔洞、溶洞等;二是地层孔隙压力小于钻井液液柱压力,在压差的作用下,发生漏失^[3]。

因此,常见的井漏原因有两种,即天然原因形成和人为因素造成。前者包括胶结差的砂岩形成的孔隙,灰岩、白云岩形成的溶蚀性裂缝,断层、不整合面形成的通道等;后者原因更多,比如施工措施不当、

钻井液密度过大等都可能把地层憋漏^[4]。因人为因素造成的井漏,一般可以通过技术的改进或完善操作来避免,而天然原因形成的井漏,处理难度较大,本文着重探讨该类井漏的堵漏方法。

天然原因形成的井漏主要区别在于地层,按照漏失形式和漏失量大小可以分为两类(表1):

表1 两种类型井漏情况对比表

Tab.1 Comparison for the two types of well leakage

项目	孔隙型漏失	裂隙、溶洞型漏失
漏失原因	地层松散	地下水溶蚀形成通道,连通性好
主要岩性	砂岩、砂砾岩	灰岩、白云岩
漏失特点	漏速较慢,漏失量较小	漏失量大,漏速快
发生地层	馆陶组、明化镇组、第四系	奥陶系、寒武系、蓟县系

(1)孔隙型漏失

这种漏失多发生在粗颗粒未胶结或胶结很差的地层,如新近系馆陶组中,岩性主要为粗砂岩、砾岩、含砾砂岩等。在钻井液液柱压力大于地层孔隙压力时,就会发生漏失,该种漏失一般漏速较慢,漏失量较小。

(2)裂隙、溶洞型漏失

奥陶系、寒武系、蓟县系的石灰岩、白云岩等沉积碳酸盐岩层在地下水溶蚀过程中形成的裂缝、溶洞等都会造成井漏,该种井漏的特点一般是漏失量大,漏速快^[5,6]。

收稿日期:2016-04-16

资助项目:天津市东丽区民和巷地热井勘探项目(2013016);青年科学基金项目“天津地区地热田热储层压力分析及研究意义(41502256)”

作者简介:钱洪强(1982-),工程师,2005年毕业于中国地质大学(北京)水文与水资源专业,长期从事地热地质和地热钻井方面的研究工作,Email:hx0704@163.com; *通讯作者:王娟(1981-),2005年毕业于中国地质大学(北京)水文与水资源专业,从事地热地质方面的研究工作,Email:jackey0216@163.com。

2 堵漏方法选择

2.1 孔隙型漏失的堵漏方法处理

孔隙型漏失主要发生在第四系、新近系的未胶结砂层、砂砾岩中,以新近系馆陶组为主要代表。该地层属于河流相碎屑岩沉积^[7],主要岩性为粗砂岩和砂砾岩,渗透性较强(表2)。在实钻过程中,由于该种漏失漏速较慢,漏失量较小,钻井液仍能完成循环,堵漏比较简单。

表2 天津市地热开采区馆陶组物性参数简表^①
Tab.2 Physical parameters of the Guantao formation in Tianjin geothermal exploitation area

项目	热储参数值
顶板埋深(m)	806 ~ 1 996
底板埋深(m)	1 004 ~ 2 847
厚度(m)	24 ~ 1 350
砂泥层厚度比	0.21 ~ 0.64
底砾岩颗粒直径(mm)	2.0 ~ 10.0
孔隙度(%)	18 ~ 36.6
渗透系数(m/d)	0.37 ~ 1.71
弹性释水系数($\times 10^{-4}$)	0.6 ~ 2.8

2.1.1 孔隙型漏失常用堵漏方法

(1) 静止堵漏

发现漏失后,停止钻进,上提钻头进入技术套管,让下部钻井液静止一段时间(2 h以上)。因钻井液具有触变性,漏失到地层中的钻井液,随着静切力的增加,在井壁形成泥皮,起到了封堵裂缝的作用。

(2) 顶漏钻进,利用岩屑堵漏

如漏失量不大,可继续钻进,通过添加土粉,增加钻井液粘度,有可能在一段时间之后停止漏失,如果继续漏失,可提起钻头至安全位置,静止堵漏。

(3) 添加堵漏剂

在漏失量相对较大,顶漏钻进时堵漏效果较差时,可以考虑添加单向压力封堵剂等堵漏材料,起到更好的堵漏效果。

2.1.2 孔隙型漏失地层施工注意事项

(1) 在馆陶组中钻进,由于地层较疏松,易渗漏,在钻进过程中,要降低钻井液的密度,提高排量,控制钻速,每打完一根,划眼1~2次,延长钻井液携砂时间。

(2) 起下钻速度要适当,防止产生激动压力,压漏砂岩层,钻井液在井内静止时间较长时,下钻时应分段循环,破坏钻井液的胶凝结构,开泵要先小排量

后大排量,尽量别在渗透性较强的大段砂岩、砂砾岩地层开泵,防止把地层憋漏。

2.2 裂隙、溶洞型漏失的堵漏方法处理

裂隙、溶洞型漏失主要是指钻遇碳酸盐岩岩溶、连通性断层等发生漏失(图1),在天津的地热钻井中,常见的是奥陶系和寒武系的灰岩岩溶漏失,和蓟县系的白云岩漏失。由于岩溶裂隙一般连通性好,漏失量较大,钻进过程中经常间歇性不返浆或者一直漏而不返,处理比较复杂。

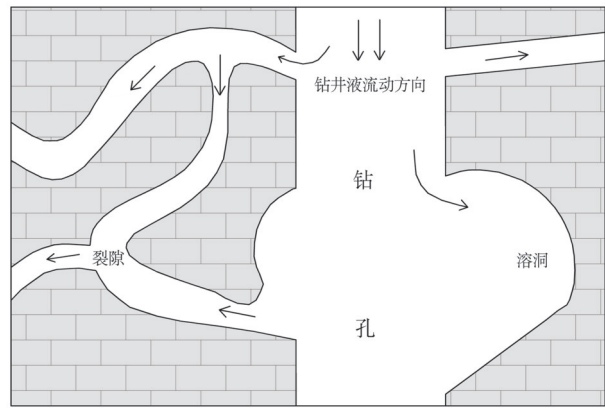


图1 裂隙、溶洞型漏失示意图
Fig.1 A diagram of fissured-cavern leakage

2.2.1 漏失层位测定

灰岩地层漏失一般表现为钻井液性能没有发生变化,在正常钻进中发生了井漏,则漏失层即钻头刚钻达的位置,如果钻进中有放空现象,放空后发生井漏,则漏失层为放空井段。

有时候发生井漏的井段较长,需要分别测定漏层,则可以通过电测法来确定。由于碳酸盐岩均质性强,自然电位无法有效地区分裂隙,一般用声波测井和双侧向测井来找出漏失段。致密的石灰岩声波时差很低,有裂隙发育则会时差明显增大,甚至出现“周波跳跃”现象;而双侧向测井中,有裂隙发育时,浅侧向视电阻率要小于深侧向视电阻率,即出现“减阻侵入”^[8](图2)。

图2中,电测综合解释圈定的1、2层均表现为声波时差值有不同程度的升高,浅侧向视电阻率要远小于深侧向视电阻率,根据该现象,判定其为裂缝层,综合解释见表3。

2.2.2 裂隙、溶洞型漏失堵漏方法

(1) 复合堵漏剂堵漏

即将不同粒径的刚性颗粒、柔性颗粒、纤维物

^①王连成,林黎,沈健,等.天津市滨海新区馆陶组热储回灌技术集成及示范研究报告,天津地热勘查开发设计院,2012.

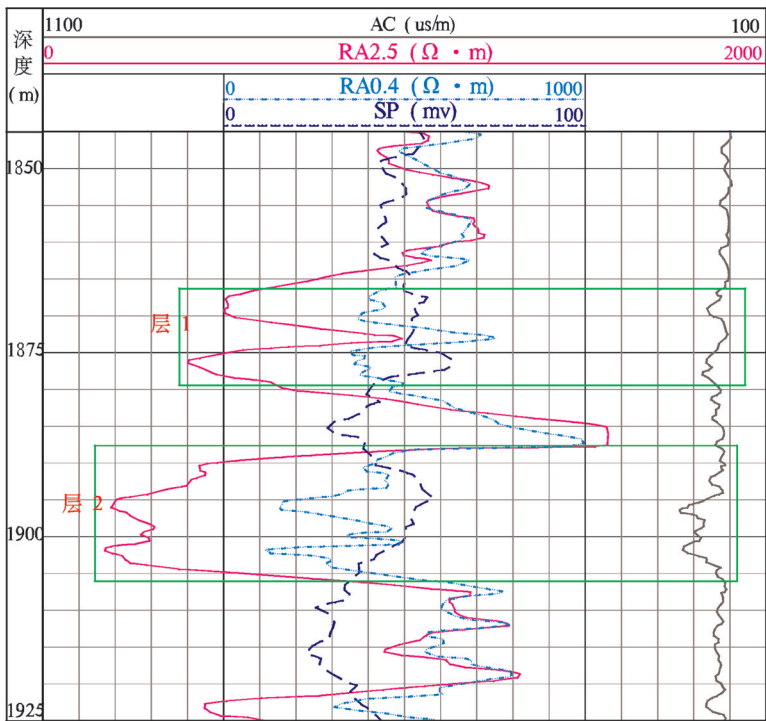


图2 电测法确定漏层主要曲线变化图

Fig.2 Curve diagram for measuring leak layers by electromotive method
AC.补偿声波曲线(单位: μ s/m,数值从左至右依次递减);RA25.浅侧向电阻率曲线(单位: $\Omega \cdot$ m,数值从左至右依次递增);RA04.深侧向电阻率曲线;SP.自然电位曲线

表3 裂隙段的综合解释表^②

Tab.3 Comprehensive interpretation table of the fracture segments

层号	起始深度(m)	终止深度(m)	厚度(m)	电阻率($\Omega \cdot$ m)	声波时差(μ s/m)	孔隙度(%)	渗透率($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	解释结论
1	1 865.3	1 879.5	14.2	1 285.9	172.95	2.77	0.17	二类裂隙
2	1 889.2	1 903.7	14.5	945.00	240.07	5.65	2.28	一类裂隙

注:一、二类裂隙是地热钻井中的常用分类,表示连通性好、岩溶裂隙发育的裂缝层位,一类裂隙优于二类裂隙

间,该方法可以封堵较大裂缝。

(4)清水强钻,下套管封隔

对于大的溶洞和裂缝,比如钻进过程中有放空现象,采用堵漏的办法往往难以奏效,为了钻至目的层,就应该顶漏持续钻进,在电测确定已经通过漏失段的情况下,下套管封堵漏失段。该种情况适用于水源充足,裸眼段稳定,没有井壁坍塌危险的情况。

2.2.3 堵漏施工注意事项

(1)起钻时井口应持续灌浆,主要是为了防止井塌。

(2)如果发生井塌,塌块可以封住漏层,因此漏层通开以前,可以循环钻井液,但不能盲目通开漏层,要留一段砂塞,待堵漏工作准备就绪后,将堵漏浆液注入钻柱下部,再划眼下放,通开漏层,堵漏浆液随即进入漏层,才能起到堵漏的作用。

(3)堵漏施工时,尽量简化钻具结构。

^②天津地热勘查开发设计院钻井一公司,东丽区华明金泰丽湾DL-53D井完井资料汇总,2013.

质、片状物质按一定比例混合^[9],加入高粘切高失水的钻井液中,泵送至漏层位置堵漏。比如地热钻井中常用的FD复合堵漏剂,就是用硬质果壳,云母和其它植物纤维配成。复合堵漏剂的适用范围比较广泛,渗漏和大漏均可采用。

(2)水泥浆堵漏

如果遇到大漏失,钻井液无法建立循环,可以采用水泥浆堵漏^[10]。通过观测液面高度,计算漏层压力 and 水泥浆用量,把水泥浆泵送至漏层,水泥浆自然流入,使井筒液柱压力和漏层压力达到平衡,在平衡状态下候凝,以实现堵漏。水泥可以采用普通水泥如32.5R、42.5等型号矿渣硅酸盐水泥,也可采用抗硫型油井水泥。

(3)石膏水泥浆堵漏

由建筑石膏、油井水泥配成,按照一定比例混合成浆液堵漏,施工前应进行实验,测试浆液的凝固时间,凝固时间需大于把石膏水泥浆液泵送至漏层所需时

(4)不能把堵漏浆液全部挤入漏层,应留1/3~1/4在井筒。

2.2.4 施工实例

(1)DL-76井昌平组堵漏

2015年在东丽区华明镇DL-76井的施工中,三开钻至寒武系昌平组,发生严重漏失,起钻。此前钻进过程中一直正常,钻井液性能保持不变,钻至井深1 645 m,钻井液漏而不返,泵压降为0 MPa,最后返上来的岩屑岩性为白色白云质灰岩,由此判断漏点即在1 645 m处。根据该区昌平组的岩性特征^[11](表4)和邻井的漏失特点,准备堵漏材料。堵漏施工过程如下:

第一次搅稠浆120 m³,粘度50 s,比重1.15 g/m³,添加复合堵漏剂2T,用搅拌器混合后泵送至井底。泥浆泵排量由正常钻进时的2 000 L/min降为1 100 L/min,到井底后开泵钻进,漏速66 m³/h,漏而不返,2 h

表4 东丽区昌平组灰岩主要物性参数表
Tab.4 Physical parameters of limestone of Changping formation in Dongli District

项目	参数
岩性	暗灰色厚层细晶灰岩,白色、肉红色白云质灰岩
顶板埋深(m)	1445~2381
底板埋深(m)	1491~2415
厚度(m)	34~92
孔隙度(%)	2.08~10.56
渗透率($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	0.16~10.28
泥质含量(%)	2.64~10.94

后顶漏钻至1 655 m,钻井液漏完,堵漏失败,起钻。
第二次用固井车在漏失层打入油井水泥10 T,

表5 DL-76井昌平组测井综合解释表^③
Tab.5 Well logging interpretation for the Changping formation of Well DL-76

层号	起始深度(m)	终止深度(m)	厚度(m)	电阻率($\Omega\cdot\text{m}$)	声波时差($\mu\text{s}/\text{m}$)	孔隙度(%)	渗透率($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	泥质含量(%)	解释结论
1	1 643.8	1 656.4	12.6	445.47	178.74	2.96	0.25	2.64	三类裂隙

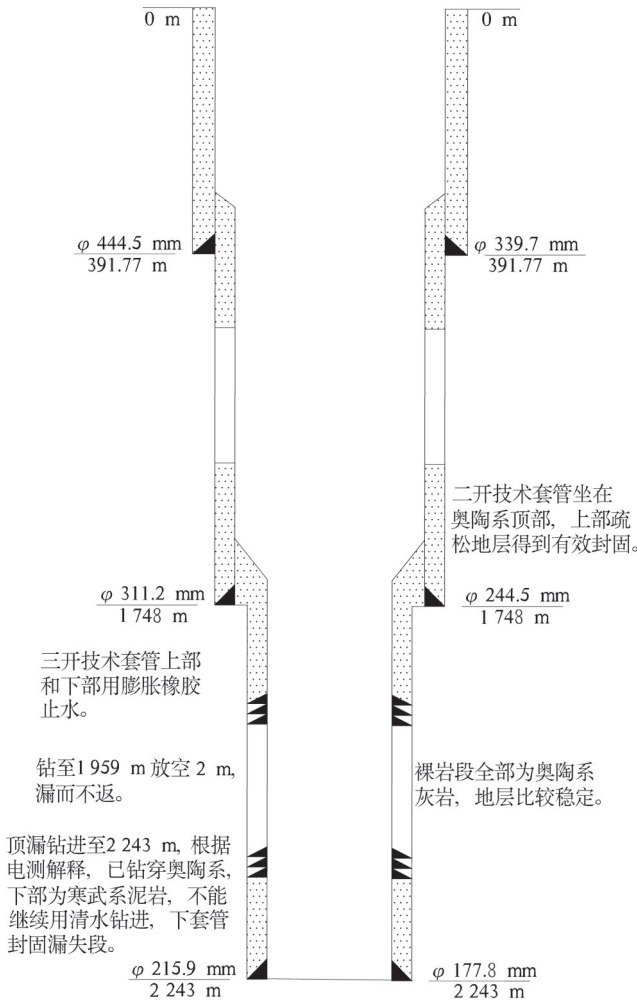


图3 DL-81井三开漏失施工示意图
Fig.3 The leakage treatment diagram of the Third Section of Well DL-81

比重1.85 g/cm³,候凝12 h,搅稠浆120 m³加复合堵漏剂3 T至漏层未见预留水泥塞,继续扫孔至井底,顶漏钻进,进尺6 m后,起钻,堵漏失败。
第三次固井用5 T油井水泥,0.5 T石膏,0.5 T锯末,混合稠浆,用泥浆泵送至漏层,20 min后建立循环,泵压升至4 MPa,堵漏初步成功,漏速20~66 m³/h,仍持续漏失,间歇性不返浆。之后每次搅浆均搅入一定量的复合堵漏剂和锯末,小排量钻至1 750 m时,已钻穿昌平组,基本无漏失,堵漏工作完成。
根据电测解释,本处昌平组裂隙发育仅有一处,厚度为12.6 m(表5)。

(2)DL-81井奥陶系堵漏施工
2015年东丽区民和巷DL-81井三开钻至1 959 m,放空2 m,钻井液漏而不返,地层为古生界奥陶系,二开技术套管下至1 748 m,裸眼段为灰岩,地层较为稳定。
因井塌可能性较小,用清水顶漏钻进,钻屑全部漏入地层,每次加钻杆时井内基本没有沉砂,供水量100 m³/h,漏失量100 m³/h,顶漏钻至2 243 m,根据电测,已钻穿奥陶系漏失段,决定下入技术套管封固(图3)。在套管底部和顶部各下入膨胀橡胶止水,采用穿鞋戴帽固井作业方法,下部挤入油井水泥12 T,上部挤入油井水泥5 T,候凝结束后进行四开作业,四开钻进开始后钻井液能正常建立循环。

3 结论
本文介绍了两种漏失及其各自的堵漏方法。其中孔隙型漏失以馆陶组为代表,可以采取静止堵漏、岩屑堵漏、堵漏剂堵漏等三种方法;裂隙、溶洞型漏失可以采用复合堵漏剂、水泥浆、石膏水泥浆等三种方法堵漏,也可以采用清水强钻,下套管封隔的工艺。并采用了DL-76井昌平组堵漏和DL-81井奥陶系堵漏两个实例,来论述堵漏方法的选择。
对于大的漏失,堵漏施工往往不可能一次成功,要针对漏失的特点,仔细分析漏层的位置,尝试采用多种方法进行堵漏工作。同时,正确的井身结构、套管程序设计,准确的地层预测等工作,也有利于堵漏

^③天津地热勘查开发设计院钻井一公司,东丽区华明镇DL-76井完井资料汇总,2015.

施工的开展。

致谢:本文研究过程中得到了青年科学基金天津地区地热田热储层压力分析及研究意义项目的支持,堵漏施工引用的实例来自于天津地热勘查开发设计院钻井一公司2015年进行的两个市场项目。项目组和钻井公司对此研究提供了帮助和无保留的支持,笔者深表谢意。在本文撰写过程中,得到了天津地质调查中心张素凤教授的细心指点,笔者在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 刘杰,宋美钰,田光辉. 天津地热资源开发利用现状及可持续发展利用建议[J]. 地质调查与研究,2012,35(01):67-73.
- [2] 蒋希文. 钻井事故与复杂问题[M]. 北京:石油工业出版社,2002,(6):1-2.
- [3] 李伟. 裂缝性地层堵漏技术研究[D]. 西南石油大学,2013.
- [4] 陈勉,杨沛,侯冰,等. 钻井液漏失安全评价钻前预测研究[J]. 石油天然气学报,2012,(02):106-109.
- [5] 贾利春,陈勉,侯冰,等. 裂缝性地层钻井液漏失模型及漏失规律[J]. 石油勘探与开发,2014,(01):95-101.
- [6] 舒刚,孟英峰,李红涛,等. 裂缝内钻井液的漏失规律研究[J]. 石油钻采工艺,2011,(06):29-32.
- [7] 田光辉,林建旺,阮传侠,等. 天津滨海新区馆陶组地热资源水位动态浅析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2008,(02):173-176.
- [8] 罗利,陈鑫堂. 碳酸盐岩地层中水平井的测井解释[J]. 天然气工业,1995,(03):33-37.
- [9] 周华安,王德承,张敬荣,等. FDJ系列复合堵漏剂的研制与应用[J]. 油田化学,1996,(01):25-27.
- [10] 刘宇凡,刘滨,吴林龙. 水泥浆堵漏技术探讨[J]. 钻采工艺,2014,(04):110-112.
- [11] 钱洪强. 天津市东丽区寒武系热储层成井可行性及工艺研究[D]. 中国地质大学(北京),2014.

Analysis of leakage formation and selection of leaking stoppage methods in geothermal well drilling in Tianjin area

QIAN Hong-qiang, WANG Juan, SUN Yu-dong, WANG Zhen-kai, YUAN Bo

(Tianjin Geothermal Exploration and Development-Designing Institute, Tianjin 300250, China)

Abstract: Geothermal drilling in Tianjin, well leakage is a common phenomenon. According to the formation difference, well leakage can be divided into pore type leakage and fissured-cavern leakage. Pore type leakage mainly occurred in sandstone and gravel, the leakage is small, it is relatively simple to deal with. Fissured-cavern leakage often with large leakage loss, and is not easy to work. This article analyzes the causes of two kinds of leakage, Separately sets their respective plugging methods and the cautions for construction. The emphasis is on the analysis of fissured-cavern leakage, and through two examples to prove the construction. In this paper, the formation leakage and plugging technology in geothermal drilling has a certain reference.

Key words: geothermal well; drilling fluid leakage; fracture; plugging method