

奥陶系灰岩地层放空段堵漏技术

王伟志¹, 刘金华², 李大奇², 王西江², 汪露¹

(1. 中国石化西北油田分公司石油工程监督中心, 新疆 轮台 841600; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘要:奥陶系灰岩放空段漏失封堵一直是堵漏中的难题, 针对漏失通道尺寸大、堵漏浆难以滞留的问题, 利用带正电强滞留、强度高、微膨胀的化学固结堵漏浆可对此类漏失进行有效封堵。化学固结材料成分中含有正电荷, 可与漏失通道壁面上的负电荷产生电性吸附, 提高滞留能力; 化学固结浆固化后形成的固结物强度48 h可达17 MPa以上, 具有较高的强度; 固结物具有微膨胀功能, 膨胀能力可达3.33%, 可完全填充并封堵漏失通道; 稠化时间可根据井下施工情况进行调整, 满足安全施工的要求。化学固结堵漏技术在托普187井奥陶系灰岩放空漏失层进行了应用, 通过3次封堵, 漏失速度由失返降至0.1~0.2 m³/min, 满足了继续强钻的要求。化学固结堵漏技术是一种可有效封堵放空段漏失层的堵漏技术。

关键词: 钻井; 灰岩放空段; 漏失; 化学固结; 堵漏

中图分类号: TE28; P634.8 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-7428(2018)01-0048-04

Plugging Technology for Limestone Cave of Ordovician Strata/WANG Wei-zhi¹, LIU Jin-hua², LI Da-qi², WANG Xi-jiang², WANG Lu¹ (1. Sinopec Northwest Oilfield Engineering Supervision Center, Luntai Xinjiang 841600, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China)

Abstract: Leakage plugging in Ordovician limestone cave has been difficult, as for the large leakage channel dimension and the slurry retention difficulty, the plugging technology of chemical consolidation with positive charges has excellent properties such as good retention, high strength and micro expansion. The chemical consolidation plugging agent contains positive charges, which can produce electric adsorption with the negative charges on the surface of leakage channel to increase retention ability; the strength of cured consolidating material can reach up to 17MPa in 48h, and the consolidating material has micro expansive function, the expansive ability can reach 3.33%, the leakage channel can be completely filled and plugged. The thickening time can be adjusted according to the underground construction situation. The chemical consolidation plugging technology was applied in well TP187 in Ordovician limestone cave, where the leakage rate was reduced from total loss to 1~2m³/10min in 3 times of plugging, which met the requirements of continuous drilling. Chemical consolidation plugging technology is effective in cave section leakage.

Key words: drilling; limestone cave; lost circulation; chemical consolidation; plugging

漏失是影响钻井安全和钻进速度的一个重要因素, 处理不当会造成巨大的损失。奥陶系灰岩地层溶洞发育, 钻进过程中发生放空性漏失的可能性较大。由于放空井段长, 漏失通道尺寸大, 单独的桥接堵漏材料难以在漏失通道内架桥, 不能有效封堵该类漏失层。最有效的办法就是利用固结类堵漏方法或者利用工具类堵漏方法^[1-6]。目前, 适用于深部高温漏失层的堵漏工具少, 也鲜有应用报道; 利用固结类方法封堵深部奥陶系灰岩地层放空段的成功案例也不多, 需要进一步深入研究。

1 托普187井奥陶系灰岩地层漏失情况

1.1 井况介绍

该井为五开制水平井, 漏失井段为五开井段, 岩性为奥陶系灰岩, 漏失时井身结构如下: 二开9 $\frac{5}{8}$ in (1 in = 25.4 mm, 下同) 套管下深0~5529.8 m, 三开8 $\frac{1}{2}$ in 套管下深5529.8~5665.59 m, 四开5 $\frac{1}{2}$ in 套管下深5665.59~6252.76 m, 五开钻头尺寸为4 $\frac{3}{4}$ in。

1.2 漏失及前期堵漏过程

托普187井钻进至6328.88 m发现漏失, 漏速2.1 m³/h, 钻井液密度1.32 g/cm³, 定向钻至井深6332.43 m, 放空0.98 m, 井内失返, 环空液面825 m。起钻更换常规钻具强钻至6334.51 m。强钻前下钻至3300 m井口开始返浆, 静止观察30 min, 液面在井口, 循环一周, 漏速2.8 m³/h; 下钻至6323

m,循环,漏速 $3.12\text{ m}^3/\text{h}$;冲划至井深 6329.45 m ,失返,泵压由 14 MPa 降至 8 MPa ,继续冲划至井深 6333.41 m ,期间井口不返浆,且扭矩逐渐增大,冲划到底后,上提悬重增加 20 t 。

冲划到底充分循环后,起钻,下光钻杆进行桥接堵漏。配制桥接堵漏浆 45 m^3 ,配方:钻井液+4%超细碳酸钙(填充)+1%坂土粉(悬浮)+4%SQD-98(细)(纤维拉筋、填充)+2%SQD-98(中)(纤维拉筋、填充)+2%SQD-98(粗)(纤维拉筋、填充)+4%CXD(细)(纤维拉筋、填充)+3%随钻(填充)+3%核桃壳(细)(架桥)+2%核桃壳(中)(架桥)+2%核桃壳(粗)(架桥)+1%云母(细)(填充)。下钻期间,环空液面最深 1145 m ,在 6030 m 泵入堵漏浆 34.3 m^3 ,替浆 48 m^3 ,井口未返浆,堵漏施工期间泵压为 0 MPa ;继续配制堵漏浆 45 m^3 ,堵漏施工前井内环空液面 806 m ,泵入堵漏浆 31 m^3 ,替浆 33.3 m ,井口返浆,关封井器,泵入钻井液 13 m^3 ,立压由 0 上升至 11 MPa ,继续泵入钻井液 21 m^3 ,最高立压 15 MPa ,停泵后降至 6.1 MPa ,稳压 30 min ,压力未降,开井泄压返吐 0.7 m^3 ,再次关井,环空泵入 2.5 m^3 ,憋压至 6.2 MPa ,稳压 1 h ,压力未降,泄压,返吐 0.7 m^3 。下钻至 6149 m ,循环,无漏失。下钻至 6320 m ,后冲划至 6331 m ,井口失返。

2 堵漏难点及思路

根据漏失层岩性及前期堵漏经过,认为该井堵漏存在如下难点。

(1)承压要求高。漏失后环空液面最深 1145 m ,按钻井液密度 $1.32\text{ g}/\text{cm}^3$ 计算,漏失压差达 14.8 MPa ,普通桥接材料抗压差难以满足要求。

(2)对堵漏材料抗温要求高。按地表温度 $10.5\text{ }^\circ\text{C}$ 、地温梯度 $1.95\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$ 计算,漏层处温度在 $133\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,核桃壳等普通桥堵材料抗温难以满足要求,高温下会炭化,强度下降,影响封堵效果。

(3)堵漏材料易沉积堵住小井眼。井眼尺寸较小($\text{Ø}120.65\text{ mm}$),井斜 30° 左右,堵漏材料易在斜井段堆积堵塞井眼,导致堵漏材料无法进入地层,造成封堵成功的假象。

(4)井底有沉砂,处理不当,堵漏材料无法进入地层,难以成功封堵住漏失层。漏失后,强钻施工前井内液面可达井口,说明井底沉砂已经将漏失通道封堵住,造成不漏的假象,冲划至井底后,漏层再次

暴露,井内再次失返。

针对该井存在的上述堵漏难点,提出了针对性的堵漏思路:(1)利用强滞留、高强度、抗高温的堵漏材料封堵漏失通道,提高高温下形成的封堵层的持续承压能力,保证堵漏成功;(2)由于井眼小,并且已经进入造斜段,为防止堵漏材料沉积架桥,采用固结类堵漏方法封堵漏失层,避免颗粒在斜井眼内堆积,堵漏材料不能进入漏失层进行有效封堵;(3)为避免沉砂封堵漏失通道,影响堵漏浆的封堵效果,再强钻 $5\sim 10\text{ m}$,留足沉砂口袋,保证堵漏浆进入漏失通道,提高堵漏成功率。

3 放空段漏失层堵漏技术

3.1 放空段漏失及封堵机理

根据漏失发生的三要素(压差、漏失通道和储集空间),对放空段漏失层的漏失机理进行分析。放空段本身既是漏失通道,为井筒流体向地层漏失提供漏失途径,又是储集空间,可以容纳足够量的井筒流体。在这种情况下,只要井筒液柱压力大于地层压力,即 $P_{\text{井}} > P_{\text{地}}$,就会发生漏失,如果井筒流体不能填满放空段连通的空间,就会一直发生漏失;即使井筒内流体填满放空段连通的空间,还需要储集空间内的压力足以支撑井筒液柱压力和循环压耗之和,漏失才会消除,如果储集空间在较高压力下继续扩大或连通更大的储集空间,则漏失还会继续发生(如图1所示)。针对放空段漏失层,需要通过堵漏在近井壁的漏失通道内建立起封堵层,封堵层的承压能力能够大于井筒压力和地层压力之差,才能满足正常钻进的要求,即 $P_{\text{封}} > P_{\text{井}} - P_{\text{地}}$,封堵层能够承受井筒压力和地层压力的差值,隔断井筒和地层,保证钻井液不会继续向地层漏失(如图2所示)。

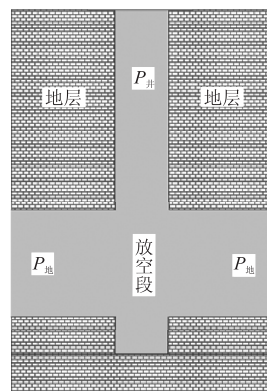


图1 放空段漏失示意图

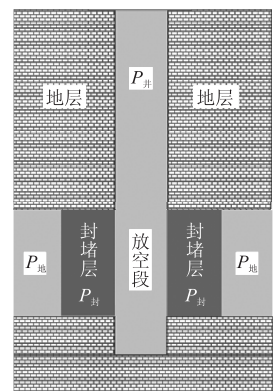


图2 放空段封堵示意图

针对放空段漏失层,由于放空段空间尺寸远大于桥接堵漏颗粒材料的粒径,利用颗粒架桥在放空段漏失通道内架桥封堵漏失层可能性较小。桥接堵漏技术需要颗粒材料在漏失通道内“架桥”后才能达到理想的堵漏效果。Abrams 提出的“1/3 架桥规则”认为:桥堵颗粒的平均粒径应等于或略大于地层平均孔喉尺寸的 1/3。罗平亚、罗向东等人在“1/3 架桥规则”基础上提出的“2/3 架桥规则”认为:桥堵颗粒的平均粒径应为地层平均孔喉尺寸的 1/2 ~ 2/3^[7-8]。由于放空井段一般较长,可能在 1 m 以上,按照现行的“1/3 架桥规则”或“2/3 架桥规则”,最大颗粒材料的粒径需要达到 0.33 或 0.66 m 才能形成“架桥”进而封堵住漏失层,受井筒和井内钻具水眼尺寸的限制,这么大粒径的材料是不可能输送至井下漏失层,因此,桥接材料封堵放空段漏失层是不现实的。

针对大的放空段漏失层,最有效的办法就是利用固结类堵漏材料或者利用工具类堵漏方法。固结类材料不受漏失通道尺寸的限制,可以封堵任意尺寸的漏失通道,前提是固结堵漏浆必须在漏失通道内滞留,在不被地层流体稀释或被稀释但不明显影响固结浆性能的情况下,失去流动能力、稠化,最后固结成封堵层。利用工具类堵漏工具时,需要强钻一定的深度,将漏失层完全暴露,然后下入膨胀管或者提前下入技术套管等工具,封隔漏失层后继续钻进。利用固结类方法封堵漏失层时,只要封堵成功,钻井施工会按原计划继续执行。利用工具类方法封堵漏失层时,如果用膨胀管,需要扩孔来满足堵漏施工要求,增加额外的工作量;如果提前下去技术套管,得重新调整井身结构,相应的钻具组合、套管等都要重新调整,钻井施工不能按原计划执行。对于放空段漏失层的封堵,现场还是尽量采用堵漏手段来解决,以满足继续钻进的要求,堵漏无效的情况下才会考虑工具手段。

3.2 化学固结堵漏技术

利用固结类堵漏技术封堵放空段漏失层时,封堵成功的关键因素之一就是滞留,堵漏浆只有滞留在放空段的近井壁处,才有可能在漏失通道内有效稠化、固结,进而形成封堵层。提高堵漏浆滞留能力可以通过以下 4 种方法实现:(1)利用堵漏浆与地层之间的相互作用,如电性吸附、极性吸附等,提高流动阻力;(2)调整堵漏浆密度,使之更接近地层压

力,减少堵漏浆向漏失层内部流动;(3)控制堵漏浆稠化时间,堵漏浆进入堵漏通道后能够立刻固结并形成封堵层;(4)调整堵漏浆的粘度,加大流动阻力,堵漏浆进入漏失通道后,很高的粘度能够克服重力、密度差等因素引起的流动惯性,阻止堵漏浆持续向漏失通道深部流动,使堵漏浆滞留在近井壁地带。第一种方法可以通过调整堵漏浆的组分来实现,第二种方法可以通过控制密度来实现,这两种方法相对比较容易实现。第三种方法需要严格控制堵漏浆的稠化时间来达到较好的封堵效果,稠化时间控制短了,在未进入漏失通道之前就稠化,导致后面的堵漏浆不能进入漏失通道,堵漏效果不好,如果在泵送过程中未出钻具就稠化,则会造成“灌香肠”事故;如果控制的稠化时间长了,会流向地层深处,不能在近井壁附近稠化,形不成有效封堵层,堵漏效果也不好。第四种方法可以通过调整堵漏浆的性能来实现,堵漏浆粘度高有利于滞留,但是过高的粘度会影响泵送,现场施工难度大。

化学固结堵漏技术具有滞留能力强、密度可调的特点,所用的化学固结堵漏浆由复合材料化学固结堵漏剂配制而成,化学固结堵漏浆配方为:水 + 150% ~ 230% 化学固结堵漏剂。化学固结堵漏剂是一种可固结的堵漏材料,由带正电的粘结剂、控制流型的调控剂、提高强度的凝固剂、控制稠化时间的引发剂和控制密度的调节剂组成。粘结剂能够与漏失通道表面的负电荷产生电性吸附,便于堵漏浆在漏失通道内的滞留;流型调控剂可提高堵漏浆的触变性能,流动状态下粘度较低,静止状态下能够快速形成结构,很快失去流动能力,滞留在漏失通道内;凝固剂在发生反应后可形成高强度结构体,提高固结物的强度;引发剂用于控制凝固剂反应时间,防止提前固化,保证施工安全;密度调节剂控制堵漏浆的密度接近于井筒内钻井液的密度,防止发生严重“窜槽”现象,影响封堵效果。

模拟漏失地层温度、压力条件,利用相关仪器,评价了化学固结堵漏浆的稠化、强度和膨胀等三方面的性能,以指导现场施工。

3.2.1 稠化时间

堵漏浆在泵送过程中或泵送到位后未被憋挤到漏失层前发生稠化,就会发生“灌香肠”或“插旗杆”的事故。利用增压稠化仪,模拟不同井深条件下漏失地层的压力、温度及堵漏浆泵送时间,测试了不同

密度条件下的化学固结堵漏浆的稠化时间,测试结果如表1所示。由表1可以看出,稠化时间在1~8 h,能够满足不同深度漏失地层安全堵漏施工的要求。

表1 化学固结堵漏浆稠化时间

试验条件	密度/($g \cdot cm^{-3}$)	稠化时间/h
90 °C × 65 MPa	1.42	8.0
100 °C × 65 MPa	1.62	5.0
120 °C × 73 MPa	1.70	3.3
140 °C × 73 MPa	1.76	1.0

3.2.2 强度

化学固结堵漏浆固化后形成的封堵层强度足够高,才能承受井筒液柱压力和漏失地层压力两者之差,达到封堵漏失层的要求。将化学固结堵漏浆放入增压养护釜,在100 °C × 25 MPa条件下养护,取出后测试形成的固结物强度,强度变化如图3所示。从图3可以看出,固化物强度达到10 MPa只需要24 h,强度达到14 MPa需要36 h,强度达到17 MPa需要48 h,强度达到19 MPa需要72 h,强度达到20 MPa需要96 h,完全可以满足高强度堵漏的要求。

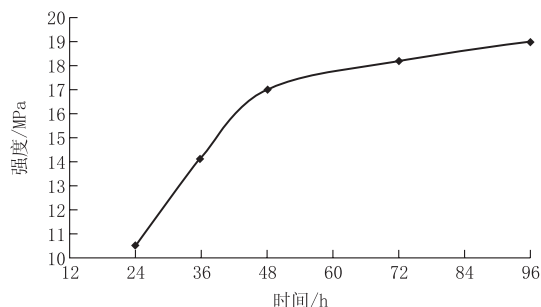


图3 固结物强度发展曲线

3.2.3 膨胀性能

固结浆有效封堵漏失层的一个控制因素是膨胀,固结浆固化后形成的封堵层具有膨胀性能,才能完全充填漏失通道,达到封堵住漏失层的目的,才能避免封堵层收缩而造成封堵不彻底、堵漏效果差的后果。用量桶量取配置好的化学固结浆150 cm³,倒入养护模块中,放入90 °C恒温水浴中养护24 h,取出后,放入已知水体积的量杯中,量出固结物体积为155 cm³。通过计算可知,固结后固结浆体积膨胀了3.33%。

4 托普187井现场堵漏施工

托普187井钻进过程中发生放空后,为配合化学固结堵漏施工,强钻了5.03 m留足沉砂口袋后进

行堵漏施工。共进行了3次化学固结堵漏施工,才满足了继续钻进的要求。

第1次化学固结堵漏施工前,井内环空液面深度768 m,下光钻杆至5682 m,采用近平衡的堵漏施工工艺进行堵漏施工,调配的化学固结堵漏浆按井底漏失层静止温度133 °C测试的稠化时间为1.92 h,共注入井内平均密度1.42 g/cm³的化学固结堵漏浆18.5 m³,候凝36 h后,环空液面深度916 m,灌满循环不漏,探得塞面6266 m,冲划至6322 m发生漏失,继续冲划至井底,漏速30 m³/h。

第2次化学固结堵漏施工采用“高举高注”的施工工艺,调整堵漏钻具下深至5538 m,堵漏施工时关闭封井器,以更好地控制化学固结堵漏浆进入漏失层的量,达到较好的封堵效果。取井底静态温度133 °C的90%,即119 °C,进行稠化实验,调整的化学固结堵漏浆稠化时间1.85 h。注入井内平均密度1.35 g/cm³的化学固结堵漏浆23 m³,替井浆52 m³,替浆期间,立压最高达到12 MPa,套压最高达到3.8 MPa,停泵后立压为0 MPa,套压为0.6 MPa,关井候凝24 h后,环空灌井浆21.1 m³,灌满,循环不漏,下钻冲划至井底,漏速20 m³/h。

第3次化学固结堵漏施工继续采用近平衡的堵漏施工工艺,调整堵漏钻具下深至5260 m,按漏失层静态温度的85%即113 °C,进行稠化实验,调配的化学固结浆稠化时间为1.7 h。共注入平均密度1.27 g/cm³的化学固结堵漏浆20 m³,返浆10.2 m³,候凝20 h后探得塞面6237 m,扫塞至原井深后,按正常排量11 L/s循环,漏速0.1~0.2 m³/min,满足了继续钻进的要求,后顺利钻至6680.5 m的目的层完钻。

5 结论

(1)对于灰岩放空段漏失层,桥接堵漏难以在漏失通道内形成有效架桥,不能有效封堵漏失层,固结类堵漏可以在漏失通道内固结充填漏失层,从而达到较好的封堵效果。化学固结堵漏浆具有滞留能力强、密度可调、稠化时间可调、强度较高的特点,适用于放空段漏失层的堵漏施工。托普187井经过3次化学固结堵漏,在放空段漏失通道内形成了有效的封堵层,漏失速度由失返减少至0.1~0.2 m³/min,满足了继续钻进的要求。

(下转第55页)