

恶性漏失地层堵漏技术研究

李锦峰

(中石化江汉石油工程公司钻井二公司,湖北 潜江 433100)

摘要:井漏不仅是油气井勘探开发中的普遍现象,还是制约井下安全、影响钻井速度的重要因素。本文围绕恶性漏失机理、堵漏处理措施、堵漏材料和堵漏工艺进行了大量的研究,分析了国内外钻井中恶性漏失问题及其提出的处理对策,分析了它们的优势和不足,总结了国内外处理钻井恶性漏失的方法。将近期最新的处理溶洞型漏失的主要技术概括为三大类——聚合物凝胶堵漏技术、化学堵漏技术和水泥堵漏技术。本文还重点介绍了新研制的一种化学凝胶堵漏技术和一种智能凝胶堵漏技术的室内试验和现场应用情况,现场应用成功率高达 98%。

关键词:钻井;恶性漏失;溶洞型漏失;堵漏技术;化学凝胶;智能凝胶

中图分类号:P634.8;TE28 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)05-0019-09

The status and development direction of plugging technology for severe circulation loss formation

LI Jinfeng

(The Second Drilling Company, Sinopec Jiangnan Petroleum Engineering Company, Qianjiang Hubei 433100, China)

Abstract: Drilling leakage is not only a common phenomenon, but also one of the important factors that affect drilling safety and penetration rates. This paper studies the mechanism of severe leakage, plugging measures, plugging materials and technology, and analyzes the severe leakage problems and countermeasures in drilling at home and abroad. Meanwhile, the methods to treat the severe drilling leakage at home and abroad are summarized, and its advantages and disadvantages are also analyzed. The new technologies to solve the karst cave leakage can be summarized into three major categories: the polymer gel plugging, chemical plugging and cement plugging. Moreover, this paper emphatically introduces the lab testing and field application results of a new chemical gel plugging technique and an intelligent gel plugging technique, with the success rate of field application up to 98%.

Key words: drilling; severe leakage; karst cave leakage; plugging technology; chemical gels; intelligent gel

0 引言

在油气井勘探与开发中,井漏问题是困扰世界的技术性难题^[1]。全球发生井漏的数量占总量的 20%~25%,恶性漏失导致的损失更是占据了 50%^[2]。全世界每年因为井漏造成的损失高达数亿美元,给油气井开发带来了不可估量的损失^[3]。各种油气井中漏失类型各种各样,主要分为窄安全密度窗口问题、裂缝型漏失问题、失返型漏失问题、溶洞型漏失问题。因为溶洞性漏失造成的恶性漏失问题,更是制约了油气井的勘探开发;目前国内外仍旧没有很好的封堵技术。最终可能导致的结果是埋

钻,井塌等问题,甚至成为报废井^[4-8]。

国内外学者围绕恶性漏失堵漏问题研发了多种堵漏材料,主要包括聚合物凝胶堵漏材料、聚合物膨胀树脂堵漏材料、化学堵漏材料、复合堵漏材料、速凝水泥堵漏材料等钻井液堵漏材料^[9-12],同时开展了一系列相关现场试验,但尚未形成有效的堵漏配套技术措施,一次堵漏成功率低,只有部分恶性漏失井可以见到成效^[13-16]。针对上述问题,应围绕提高恶性漏失堵漏成功率,从漏失机理、堵漏机理、溶洞型恶性漏失堵漏材料、堵漏工艺等方面开展研究。

收稿日期:2018-07-08; **修回日期:**2019-03-16 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2019.05.004

作者简介:李锦峰,男,汉族,1985 年生,工程师,从事钻井技术及钻井液方面的研究工作,湖北省潜江市广华办事处向阳建设路 1 号,2506263847@qq.com。

引用格式:李锦峰.恶性漏失地层堵漏技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(5):19-27.

LI Jinfeng. The status and development direction of plugging technology for severe circulation loss formation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(5):19-27.

1 国内外堵漏技术的发展现状

1.1 20世纪70年代国内外堵漏技术现状

基于传统堵漏技术,在扔煤球、扔砖块等处理恶性漏失堵漏技术的基础上,国内学者开展了大量的研究。最早具有化学堵漏概念的,当属于1973年四川省地质局科学研究所等单位提出的脲醛树脂堵漏技术^[17]。下面就国内的几种堵漏技术进行介绍。

(1)脲醛树脂堵漏技术。脲醛树脂呈胶液状,能溶于水,在常温下以酸作固化剂能进一步发生缩聚反应而成凝胶,最后固化成不溶的固体物质(塑料),其抗压强度可达2~3 MPa。调节固化剂的加入量和浓度,可人为地控制树脂的胶凝时间,从几秒钟至数小时,在水和泥浆介质中仍可实现胶凝作用。但是酸容易腐蚀套管,同时对施工人员带来安全威胁。

(2)速凝水泥堵漏技术。“711”型水泥速凝剂中“711”是由矾土、纯碱、石灰等材料,经煅烧、磨细而成的一种灰白色粉状物。“711”作为一种外加剂,适量加入水泥中,可以调节水泥的凝结硬化时间。“711”加得多,初凝时间缩短,凝结物强度低。反之,“711”加得少,凝结时间变长,但凝结物强度提高。分别在两个矿区对20多个漏失钻孔用“711”水泥进行了堵漏。除了ZK26号孔因水泥部分失效而堵漏失败外,其余都获得成功。但是速凝水泥也存在凝固时间短,容易卡钻杆等问题,导致施工风险增加^[18]。

(3)聚酯护壁堵漏技术。301聚酯固化前系半透明液体,无毒,可长期存放,它主要有以下优点:凝固时间可控,粘结性较好,强度高,渗透性可控,凝固物体无变形。但是凝固后,可钻性较低,与2级页岩相仿,高强度将导致钻出新井眼等系列问题^[19]。其主要分子式如图1所示。

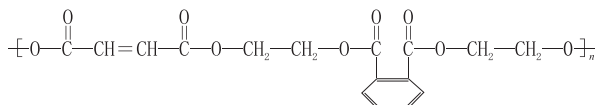


图1 301聚酯的结构式

Fig.1 Structure of 301 polyester

(4)聚丙烯酰胺泥浆护孔堵漏技术。用PAM配制低固相泥浆,必须使用部份水解的聚丙烯酰胺即PAM与NaOH起水解反应得PHPA。聚丙烯酰胺泥浆护孔堵漏技术在小至中等漏失层中效果较明显,在全孔漏失时效果差。分析其主要原因是:堵漏物强度不够,大裂隙易流失^[20]。但是该技术首次

将聚丙烯酰胺应用到堵漏技术中,后期很多学者也是在此技术的基础上不断研究创新。

20世纪70年代各堵漏技术的优缺点:(1)脲醛树脂成胶液状,在水和泥浆介质中胶凝作用仍可实现,同时固化成不溶的固体物质,抗压强度较高。但是脲醛树脂以酸做固化剂,酸会腐蚀套管。(2)速凝水泥,施工工艺简单,见效快,但是凝固时间短施工风险高。(3)聚酯粘结性好,强度高,但是凝固后可钻性差。(4)聚丙烯酰胺在中小型漏失中效果好,但是强度不够,所以大裂隙漏失效果不好。

1.2 20世纪80年代国内外堵漏技术现状

(1)PMN凝胶堵漏技术。PMN凝胶堵漏技术由PMN、CMC、初凝交联剂和终凝交联剂等组成,优点是成胶时间可控,成胶强度可调;缺点是没有进行中试生产,应用较少^[21]。但是在现场应用中采用PAN代替PMM取得了很好地应用效果,同时PMN抗污染效果好,特别是抗盐污染达到20%。

(2)高吸水性树脂(PAN-HAK)堵漏技术。高吸水性树脂(PAN-HAK)堵漏剂的优点是:①具有很强的吸水能力;②有适应钻井泥浆要求的PH值;③物理和化学性能较稳定。PAN-HAK在结构上是由一定交联度的聚丙烯腈、腐植酸所组成的。其大分子结构中含有羧基、羟基、酰胺基、次甲磺酸基等亲水基团,聚合物是按一个聚丙烯腈单元与一分子腐植酸的比例形成氢键并沿聚丙烯腈共聚物主键构成侧键,或两者以离子吸附产生分子交联。结构式如图2所示^[22]。

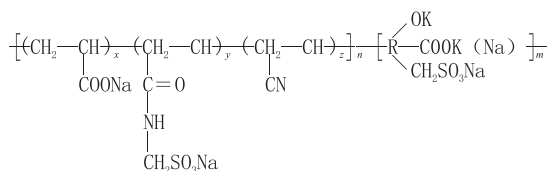


图2 PAN-HAK的结构式

Fig.2 Structure of PAN-HAK

20世纪80年代堵漏技术取得一定进展,主要是高吸水性树脂堵漏技术,吸水性树脂堵漏技术为膨胀性堵漏技术提供了研究方向。同时他们不再是简单的几种产品的复配,而是通过合成来制备新的产品。

1.3 20世纪90年代国内外堵漏技术现状

(1)清水强钻解决恶性漏失技术。清水强钻法既经济又高效,但是清水强钻过程中需要具备3个条件:其一,井眼必须稳定;其二,已钻和需钻井段无

油气进入井内;其三,钻头破碎的岩屑能全部进入漏层^[23]。同时钻井过程中要注意2个问题:首先要具有提高井壁稳定性的方法和措施;其次要做好预防工作,防止沉砂卡钻。

(2)DTR堵漏技术。DTR主要由硅藻土、软质悬浮纤维、助滤剂及酸溶性材料等粉状材料组成。DTR通过与其他堵漏材料按比例复配均匀后,便会形成一种具有良好流变性、悬浮性、快失水性、聚缩性和可泵性的堵漏浆液。通过在漏失通道形成机械强度高的堵塞物进行堵漏^[24-26]。与当今使用的复合堵漏剂有异曲同工之妙。DTR堵漏技术优点是工艺简单,施工见效快,对工期影响不大,但是该技术具有局限性,与裂缝匹配度要求较高。

(3)波纹管堵漏技术。该技术是在漏层井段下入壁厚为3 mm的波纹管,通过打压胀管,使波纹管胀圆贴合在井壁上,以达到封堵漏层的目的^[27]。该技术对于处理恶性井漏效果显著,不会出现二次复漏,但是该技术成本较高,如果恶性漏失地层溶洞较多时处理起来十分复杂。

20世纪90年代恶性漏失堵漏技术,不再单纯的停留在产品的研发,而是从工艺上完善了恶性漏失的处理措施,提出了清水强钻工艺,该方法解决了部分恶性漏失问题,但是清水强钻技术对地层的要求较高,具有一定的局限性。波纹管堵漏技术解决恶性漏失效果显著,但是成本较高。

1.4 21世纪初期(2000—2010年)国内外堵漏技术现状

(1)泡沫钻井液处理恶性漏失技术。泡沫钻井液处理恶性漏失可谓是清水强钻的升级版,并且取得了良好的应用效果。泡沫钻井液的基本组成包括:含膨润土4%~6%的原浆+0.1%~0.2%CMC+0.1%~0.2%KPAM+0.1%~0.2%CD-1等成分。从实际应用的情况来看,泡沫钻井液安全,能满足大井眼漏失层段的钻进,同时具有下列优点:①泡沫钻井液钻进能充分地降低液柱压力,减少井漏;②泡沫钻井液携砂能力强,漏速相对较小,即使不能把钻屑带出井筒,也可能把它带到漏砂层漏掉;③泡沫钻井液钻进速度快,能减少钻进时间^[28]。相比于清水钻井液,泡沫钻井液更加安全高效。

(2)MTC复合堵漏技术。MTC典型配方:钻井液+矿渣+40%铁矿粉+6%MDH+2%G205+0.5%MDC。特点是快速封堵,MTC桥浆稠化时间

易调,有一定的触变性,浆体凝结快,这有利于快速封堵漏失通道,阻止继续漏失,减少了钻出新井眼的可能性。MTC桥浆有适中的抗压强度,不会形成高强度的水泥塞^[29]。

(3)可膨胀高效承压剂堵漏技术。2006年黄达全等^[30]制备了可膨胀高效承压剂。该剂包含大量带有一COO⁻、—NH₂吸水基团的有机物,进入孔喉或微裂隙中1~5 h后,能够吸水膨胀到自身体积的3~25倍。复合材料中包含大量有机物,有机物中含有大量的一COO⁻、—NH₂吸水基团,此基团的比例不同,其膨胀的倍数和速度不同。由于一COO⁻、—NH₂基团的氢键力、范德华力远远大于泥砂对水的氢键力、范德华力,当水进入地层时,水首先被这些基团吸收。它吸水后变成粘弹性膨胀体而充满孔喉,阻止钻井液进一步漏向地层内。该剂和可膨胀型树脂最大的不同就是该剂从微观上研究了吸水原理,可膨胀型树脂从宏观上研究了吸水原理。

(4)化学堵漏剂堵漏技术。化学堵漏剂堵漏技术解决了现场超复杂漏失问题。化学堵漏剂是一种由多种功能材料加工而成的产品。在配制堵漏剂时,以水和化学填充物为连续相,化学交联剂为分散相,在搅拌或流动状态下,化学交联剂均匀地分散于连续相中,具有较好的流动性能;当静止后,化学交联剂快速形成立体网状结构,具有很好的滞流作用,对封堵漏层极为有利。化学交联剂形成网状结构的过程中,大量无机活性剂与有机高分子量聚合物中的离子基团结合,充分充填网状结构空间,在一定时间内,无机活性物质相互间产生离子化学反应,形成较坚硬的骨架结构,增强了有机高分子交联体的整体强度。化学堵漏剂施工需要满足堵漏三要素,即:①堵漏剂能顺利进入漏层;②能在漏层保持滞流,有效隔断漏层通道;③在一定条件下发生化学固结,提高强度,有效封堵漏层,提高地层承压能力^[31]。

自新中国成立以来,国内的堵漏技术取得了很大的进步,但是很多技术大同小异,将前期的堵漏技术进行概括,大致可以分为以下几种方式:(1)水泥堵漏技术(包括各种不同的水泥堵漏技术,但是总体以水泥为主剂)。(2)聚合物堵漏技术,主要指有机物类的材料制成,通过对单体缩聚或者改性等一系列方式进行制备得来。(3)化学堵漏技术,无机材料作为主剂制备的,但是和水泥又有很大的区别,施工

安全,效果好。(4)清水强钻,使用清水进行强行钻探。(5)泡沫钻井液处理恶性漏失技术。(6)MTC复合堵漏技术(复合堵漏技术,即将各种堵漏材料复配到一起)。

1.5 21世纪初期(2010—2017年)国内外溶洞型漏失堵漏技术现状汇总

前期虽然出现了很多堵漏技术,但是处理溶洞型漏失主要技术还是可以概括为三大类:其一是聚合物凝胶堵漏剂的研究,习称为聚合物凝胶或吸水膨胀聚合物堵漏剂,包括地下交联聚合物凝胶和吸水性交联聚合物凝胶(吸水树脂)。聚合物凝胶和其他材料配合,能够很好的解决钻井过程中的恶性漏失问题^[32]。其二是化学堵漏技术的研究,主要是一些有机成份和无机成份的合成,也有其他成份。其三是水泥堵漏技术,该技术最初钻探的时候就已经在使用,最近几十年得到了长足的发展,主要还是处理剂方面的改进。

1.5.1 聚合物凝胶堵漏技术发展现状

(1)聚合物凝胶堵漏剂堵漏技术。聚合物凝胶堵漏剂主要配方为:聚丙烯酰胺+红矾钠+ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ +SDS。聚合物凝胶堵漏剂的堵漏原理主要是以聚合物为体系内主材料,经水溶解后,向所得混合物中添加交联剂,经成胶后的堵漏剂各性能十分良好,尤其会具有较高的粘弹性,增大裂缝在运移过程中产生的阻力,从而对漏层进行封堵^[33-34]。

(2)GCY-X体膨型堵漏剂堵漏技术。该技术虽然没有现场应用,但是同类技术已经在现场进行了应用。该剂的研制以丙烯酸(AA)和丙烯酰胺(AM)为主要反应单体,在其中加入交联剂,采用水溶液聚合法制备出一种凝胶状聚合产物。将凝胶聚合产物在105℃下烘干,粉碎后即得到GCY-X体膨型堵漏剂产品。GCY-X的吸液性能良好,GCY-X与钻井液的配伍性好,形成的GCY-X产品封堵性能评价实验方法可行有效,弥补了目前针对体膨型堵漏剂封堵性能评价方法存在的不足^[35-38]。

(3)特种凝胶堵漏技术。特种凝胶是一种处理钻井恶性漏失的堵漏剂,它必须不与(或难与)地层水混合而被冲稀才能满足解决裂缝性及破碎性地层恶性漏失的要求。通过实验考察少量凝胶混入聚合物、聚磺和KCl钻井液体系后,钻井液体系的流变性、失水量造壁性的变化情况,凝胶与这3种钻井液的配伍性良好,凝胶具有改善失水造壁性,提高钻井

液粘度切力的作用。同时该凝胶抗温达150℃^[39-40]。

通过前期不断的研究发展,目前国内聚合物凝胶堵漏技术大体分为3类:其一是具有高粘弹性但是强度不是特别高的聚合物凝胶;其二是吸水膨胀性凝胶;其三是成胶后粘弹性不高但是强度较高的聚合物凝胶。这三种凝胶是目前国内在堵漏方向研究较多的堵漏技术。

1.5.2 化学堵漏技术发展现状

(1)可固化堵漏工作液堵漏技术。该技术对解决恶性漏失具有一定的作用。固化堵漏工作液主要组成为悬浮稳定剂GYW-301、羟乙基纤维素类降失水剂GYW-401、提高触变性能的粘土类物质TRT、激活剂JHQ、激活剂JHT、促凝剂GYW-601、固化剂GHJ、密度调节剂(漂珠和重晶石)、缓凝剂GYW-701、惰性堵漏材料WTD-300。堵漏液的作用原理为:堵漏浆体进入漏失地层后,由于其具有较强的触变性能,所以浆体在漏层流动的阻力增大;同时惰性堵漏材料在漏失位置的缝口起到了充填堆积的作用,将裂缝进行了暂堵,阻止了裸眼内浆体进一步向漏层的流失,也阻止了进入漏层的堵漏液进一步向地层深处流失,根据实际情况进行候凝,进入漏层的堵漏液在一定时间内固化产生强度,将地层很好地胶结在一起,提高了地层的承压能力,钻开环空固化塞后再进行钻井液循环时,在井筒堆积的堵漏材料可能会被循环带走,但是漏层已被堵漏液完全充填固化,封堵住漏失地层^[41]。

(2)化学触变堵漏技术。化学触变堵漏技术主要由HSN-1凝胶和膨胀化学固结堵漏浆HDL-1组成。其中,HSN-1是由 β -D-甘露糖醛酸盐(M)和 α -L-古洛糖醛酸盐(G)连接而成的高分子,既存在GG本身连接形成的线性结构,也存在GM和MM连接形成的网状结构。化学触变堵漏技术最高抗压强度可达18 MPa;HSN-1和HDL-1配合使用时,必须对其进行可控触变实验,因为HDL-1与HSN-1接触后,HSN-1的凝胶粘度有一定的增加^[42]。

(3)高强度耐高温化学固结堵漏剂堵漏技术。詹俊阳等^[43]提出了高强度耐高温化学固结堵漏剂(HDL-1)堵漏技术。HDL-1配制的化学固结堵漏浆具有稠化时间可调(4~12 h)、密度可调(1.3~1.9 g/cm³)、承压能力较强(48 h强度可达17 MPa

以上)的特点。配方为:正电粘结剂、流变性调控剂、化学凝固剂、引发剂和密度调节剂。

(4)自胶结堵漏技术。该技术以胶结剂和膨润土为原料,采用“双液注浆法”的施工工艺,使堵漏浆滞留在漏失通道内,并发生化学反应,形成具有一定强度的固结体。胶结剂浆与膨润土浆混合后的堵漏浆非常粘稠,与漏失通道壁面间有很高的粘滞阻力,滞留在漏失通道中,充填漏失通道空间,形成堵塞隔墙,以达到堵漏的目的。该堵漏浆具有密度低、粘度高的特点,在80℃下24h抗压强度不超过11MPa,有利于钻塞,固结时间可通过添加剂调节^[44]。

化学堵漏技术种类比较多,产品也比较丰富。主要优势在于他们不像水泥密度高易漏失、强度高不易扫塞,化学堵漏技术具有密度可调,强度适中,容易进入漏层,进入漏层后驻留性好等特点,因此现场应用效果十分显著。

1.5.3 水泥堵漏技术发展现状

水泥很早就被用于堵漏,变化最大的就是围绕水泥处理剂的研发,针对处理剂的研发来改善水泥的各项性能参数,通过处理剂可以改善水泥的密度、强度、流变性、凝固时间、失水量等等主要参数。

(1)胶质水泥堵漏技术。该技术用高浓度膨润土浆代替钻井液,与水泥浆按一定比例混合配成胶质水泥浆,降低水泥浆密度及凝固强度,提高堵漏成功率。在高浓度膨润土浆中加入氯化钙,以调节胶质水泥浆稠化时间。胶质水泥浆配方比例及氯化钙加入量通过水泥浆试验确定。胶质水泥浆密度为1.75~1.80 g/cm³;高浓度膨润土浆为17%氯化钙+45%~50%膨润土;胶质水泥浆配方比例:水泥原浆:氯化钙膨润土浆=1:1~1:1.5。胶质水泥浆性能(试验温度42℃):密度为1.47~1.54 g/cm³,初凝时间为1.5~2h,流动度为15~23cm,稠化时间为2~4h^[45]。

(2)PAM—水泥—泥浆堵漏技术。PAM—水泥—泥浆堵漏技术主要配方为:甲液为PAM—水泥浆,水:水泥=(0.8~1):1(水灰比),水泥可用普通水泥或超早强水泥,水中含非水解聚丙烯酰胺(PAM)分子量500万左右,0.2%~0.4%;乙液为普通泥浆,膨润土15%~20%,碱加量为粘土质量的5%。施工工艺为:注浆时,甲乙两液的体积比大致按1:1。两液混合后立即形成不流动的絮凝物,絮凝物进入裂隙内,因其粘滞性,流动阻力大,不易

被稀释,封堵范围大,又因絮凝物随时间而增长强度,因此具有很高的堵漏成功率^[46]。

2 化学凝胶和智能凝胶堵漏技术

针对上述3种堵漏技术的发展,考虑到水泥浆堵漏技术已经比较成熟,本团队研制了一种化学凝胶堵漏剂和智能凝胶堵漏剂。

2.1 化学凝胶堵漏技术

2.1.1 化学凝胶的机理

化学凝胶是通过有机物和无机物合成交联剂和成胶剂,交联剂和成胶剂反应后形成网状结构,通过堵漏剂进行填充网状结构中的空隙,形成一种高强度的化学凝胶堵漏剂。再经过一定的配比,优化出强度高的配方。主要组成为:10%悬浮剂、5%激活剂、2%交联剂、12%成胶剂、10%堵漏剂、0.6%缓凝剂。悬浮剂和激活剂主要是起到悬浮其他物质和调节密度的作用,同时辅助增加强度。缓凝剂可以调节成胶时间。因此化学凝胶的成胶时间可控,成胶强度可调。

2.1.2 化学凝胶的性能评价

室内对化学凝胶堵剂体系进行了性能评价,评价结果为:(1)流变性良好;(2)成胶时间可控(1~10h);(3)成胶强度可调(2~10MPa);(4)抗50%的油基泥浆体系污染;(5)抗30%的复合盐水的污染;(6)抗30%酸性气体污染(H₂S);(7)抗温可达160℃;(8)抗30%聚合物体系钻井液、聚磺钻井液体系。

2.1.3 化学凝胶堵剂在鄂阳页1HF井的应用

2.1.3.1 漏失简介

鄂阳页1HF井在转换油基钻井液之后,对裸眼段进行复测过程中,发现漏失,由于井内有旋转导向仪器,颗粒不能超过1mm,现场应用随钻堵漏效果不佳,决定对其进行承压堵漏作业。

2.1.3.2 漏失分析

根据前期的钻井液设计显示,鄂阳页1HF井最大承受密度为1.40 g/cm³,井浆密度1.20 g/cm³,当量密度为0.25 g/cm³时立压应为6.6MPa。为保证后期施工效果,假设最大密度1.45 g/cm³,现场设计承压8MPa,实际承压9.5MPa,立压瞬间为0MPa。

2.1.3.3 施工方案

下钻至2706m(漏点2696m),泵入10m³化

学堵剂,替油基泥浆 22 m^3 。随后起钻至 2300 m 。关防喷器,将化学凝胶挤入地层 $3 \sim 4 \text{ m}^3$ 。图 3、4 是现场试验中化学凝胶成胶前后照片。



图 3 化学凝胶成胶前照片

Fig.3 Chemical gel before gelation

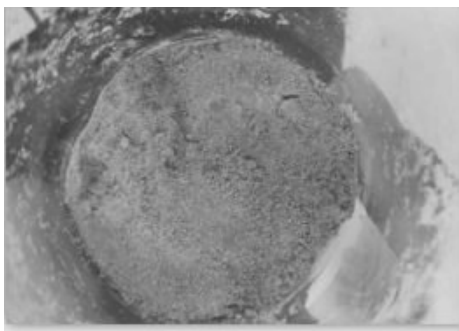


图 4 化学凝胶成胶后照片

Fig.4 Chemical gel after gelation

2.1.3.4 堵漏效果

静止 20 h ,泵冲从 50 MPa 开始循环,逐步提升泵冲至 90 MPa 。未出现漏失。做承压试验,现场最高承压 8 MPa ,最后稳压在 7.6 MPa 。堵漏成功。

2.1.4 小结

化学凝胶因为室内评价性能优异,现场应用很成功,累积施工了数十口井,其中主要包括、鄂阳页 2HF 井的现场应用,焦页 197-6 井的现场应用,晋中 3 井的现场应用,焦页 193-2 井的现场应用等。使用的区块也各不相同,说明化学凝胶具有广谱性。

通过现场应用显示,化学凝胶可以解决窄安全密度窗口问题、裂缝性漏失问题、失返性漏失问题(有液面不返浆)等复杂问题。现场使用成功率 100% 。

通过现场数口恶性漏失井(溶洞性漏失)的应用,加上室内试验的不断优化,研制的化学凝胶堵剂已经非常成熟,现场应用效果非常好,目前正在国

内很多地区得到了广泛应用,总的成功率达到 98% 以上。

2.2 智能凝胶堵漏技术

2.2.1 智能凝胶的机理

智能凝胶以天然大分子纤维素为骨架,接枝共聚水溶性丙烯酸酰胺单体的凝胶,通过加入交联剂、催化剂控制合理的成胶时间,以达到便于施工注入的目的。凝胶具有较好的抗污性能,对强酸、强碱、高矿化度盐水以及原油污染能保持较强的稳定性,交联之后具有较高的强度,在修井作业、恶性漏失、封堵出水层等方面具有较好的应用效果。凝胶在施工结束后破胶为流体,可通过连续油管或者泥浆泵循环出井筒,较传统机械封堵,及水泥塞封堵有比较明显的优势。

2.2.2 智能凝胶的性能评价

室内对智能凝胶体系进行了性能评价,评价结果为:(1)流变性良好;(2)成胶时间可控($50 \sim 600 \text{ min}$);(3)成胶强度可调($1.5 \text{ MPa}/0.6 \text{ m}$);(4)可破胶;(5)抗 10% 的原油污染;(6)抗 10% 的复合盐水的污染;(7)抗酸碱;(8)抗温可达 150°C ;(9)抗 10% 聚合物体系钻井液、聚磺钻井液体系;(10)抗酸性气体污染(H_2S 、 CO_2)。图 5、6 为智能凝胶的成胶前后图片。

2.2.3 智能凝胶在晋中 3 井的应用

2.2.3.1 漏失简介

晋中 3 井钻至井深 2778 m 出现放空现象,下探至井深 2778.36 m 开始起压(放空井段 $2778 \sim 2778.36 \text{ m}$,段长 0.36 m ,判断为溶洞漏失)。

2.2.3.2 堵漏效果

堵漏完成 10 h 后开始循环验漏,环空灌浆 5.4 m^3

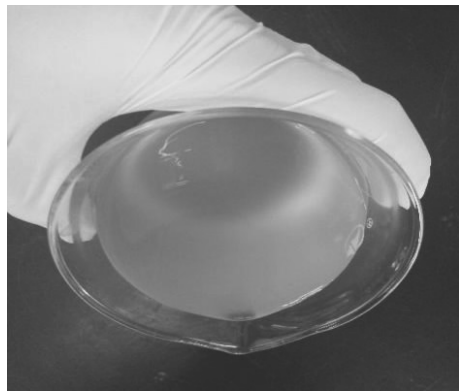


图 5 成胶前照片

Fig.5 Intelligent gels before gelation



图 6 成胶后照片

Fig.6 Intelligent gels after gelation

开始返浆,下光钻杆至 2726 m 在漏层以上开始钻杆内灌浆,泵入 2 m^3 时开始起压, 4 m^3 时开始返浆,并且立压不断上升,泵入 7.5 m^3 时测出漏速为零。间歇性的提升泵冲,立压不断上升,最终立压达到 15 MPa(如表 1 所示)。

表 1 双液法堵漏验漏具体情况

Table 1 Leakage checking and plugging with double-liquid method

时间	泵入量/ m^3	立压/MPa	泵冲/MPa	排量/L	漏失情况
8:42	3.6	3.0	58	10	起压
8:49	8.5	4.0	56	12	返浆
9:02	8.5	6.0	64	12	不漏
9:17	8.5	8.5	80	14	不漏
9:35	8.5	15.5	87	14	不漏
12:03	8.5	15.5	87	14	不漏

晋中 3 井钻遇马家沟组期间,在复合凝胶堵漏成功的前提下,保持补加随钻堵漏剂,使堵漏剂的浓度维持在 15%,起钻前配一罐封闭浆,泵入下马家沟组井段对地层进行封堵。封闭浆配方:10%膨润土浆+7%DF-2+8%FD。在钻进下马家沟组期间,晋中 3 井只有正常的渗漏消耗,渗漏消耗速度 $< 2 \text{ m}^3/\text{h}$,整个下马家沟井段未发生漏失,安全钻达了下一个地层。智能凝胶在晋中 3 井应用成功,从根本上解决了晋中地区下马沟组地层的井漏问题,大大节约了钻井成本,有望在晋中地区推广应用。

3 结语

进入 21 世纪以后堵漏技术主要可以分为 3 类:一是聚合物凝胶堵漏技术,该技术具有较好的韧性、粘弹性、吸水膨胀性等优势,但是普遍强度不是很高;二是化学堵漏技术,该技术具有密度可调,强度

适中,容易进入漏层,进入漏层后驻留性好等特点,因此现场应用效果十分显著;三是水泥堵漏技术,因其粘滞性,流动阻力大,不易被稀释,封堵范围大,又因絮凝物随时间而增长强度,因此具有很高的堵漏成功率。

研制的化学凝胶和智能凝胶堵漏剂,室内评价显示,流变性良好、成胶时间可控、成胶强度可调,可以抗 40%油污染,抗 30% H_2S 气体污染,抗 30%复合盐水污染,抗 10%酸碱污染。经生产井试验应用,取得了良好的效果,有望进一步推广应用。

参考文献(References):

- [1] 赵巍,李波,高云文,等.诱导性裂缝防漏堵漏钻井液研究[J]. 油田化学,2013,30(1):1-4.
ZHAO Wei, LI Bo, GAO Yuanwen, et al. Study of circulation protection and control drilling fluid for induce cracks[J]. Oil-field Chemistry, 2013,30(1):1-4.
- [2] FIDAN E, BABADAGLI T, KURU E. Use of cement as lost circulation material-field case studies[C]// SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Malaysia, Society of Petroleum Engineers, 2004.
- [3] DONALD L, TERRY H. All lost-circulation material and systems are not created equal[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2003.
- [4] 陈军,王先兵,刘松,等.恶性井漏治理现状及展望[J].石油化工应用,2017,36(6):12-15.
CHEN Jun, WANG Xianbing, LIU Song, et al. Serious lost circulation current situation and disposing prospects[J]. Petrochemical Industry Application, 2017, 36(6): 12-15.
- [5] 王先兵,陈大钧,蒋宽,等.新型防漏堵漏剂 TFD 与油气层保护技术[J].钻井液与完井液,2011,28(1):20-23.
WANG Xianbing, CHEN Dajun, JIANG Kuan, et al. New preventing and plugging agent TFD and technology of reservoir protection[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2011,28(1):20-23.
- [6] 郝惠军,田野,贾东民,等.承压堵漏技术的研究与应用[J].钻井液与完井液,2011,28(6):14-16.
HAO Huijun, TIAN Ye, JIA Dongmin, et al. Study and application of pressure bearing circulation loss plugging technique [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2011,28(6): 14-16.
- [7] 陈尔志.常用惰性堵漏材料堵漏效果及综合效应研究[D].四川成都:成都理工大学,2011.
CHEN Erzhi. Study on the sealing effects and comprehensive effects of widely-used inert lost circulation materials [D]. Chengdu Sichuan: Chengdu University of Technology, 2011.
- [8] 田陆飞.高效承压智能堵漏复合材料的制备与性能研究[D].山东济南:济南大学,2011.
TIAN Lufei. Preparation and property of efficient pressure-bearing smart lost circulation composite materials[D]. Jinan Shandong: University of Jinan, 2011.
- [9] 徐江,石秉忠,王海波,等.桥塞封堵裂缝性漏失机理研究[J].钻井液与完井液,2014,31(1):44-46.
XU Jiang, SHI Bingzhong, WANG Haibo, et al. Mechanism study on bridge technology for fractured formation[J]. Drilling

- Fluid & Completion Fluid, 2014, 31(1): 44-46.
- [10] 王建华, 李建男, 闫丽丽, 等. 油基钻井液用纳米聚合物封堵剂的研制[J]. 钻井液与完井液, 2013, 30(6): 5-8.
WANG Jianhua, LI Jiannan, Yan Lili, et al. The development and performance evaluation of plugging agent for oil-based drilling fluids[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2013, 30(6): 5-8.
- [11] Nayberg T M, Petty B R. Laboratory study of lost circulation materials for use in oil-based drilling muds[C]// SPE14995, 1986.
- [12] Scorsone J T, Sanders M W, Patel A D. An improved oil based chemical gel system for wellbore stabilization[C]// SPE121676, 2009.
- [13] 孙其诚, 王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 94-99.
SUN Qicheng, WANG Guangqian. Introduction to the mechanism of granular materials[M]. Beijing: Science Press, 2009: 94-99.
- [14] 李家学, 黄进军, 罗平亚, 等. 随钻防漏堵漏技术研究[J]. 钻井液与完井液, 2008, 25(3): 25-28.
LI Jiaxue, HUANG Jinjun, LUO Pingya, et al. Study on leak prevention and plugging-while-drilling technology[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2008, 25(3): 25-28.
- [15] 刘明华, 孙举, 王中华, 等. 非常规油气藏水平井油基钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2013, 30(2): 1-5.
LIU Minghua, SUN Ju, WANG Zhonghua, et al. Oil-based drilling fluid technology for horizontal wells in unconventional oil and gas reservoirs[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2013, 30(2): 1-5.
- [16] 王绪美, 解洪祥, 赵福祥, 等. 钻井液用新型无荧光纳米处理剂 PNP 的研究[J]. 钻井液与完井液, 2014, 31(6): 13-16.
WANG Xumei, XIE Hongxiang, ZHAO Fuxiang, et al. Laboratory study of a new non-fluorescent nano drilling fluid additive PNP[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2014, 31(6): 13-16.
- [17] 四川省地质局科学研究所, 等. 脲醛树脂用于钻孔堵漏的试验情况[J]. 勘探技术, 1973, (2): 1-6.
Institute of Science, Sichuan Geological Bureau, et al. Plugging tests with urea-formaldehyde resin[J]. Exploration Technology, 1973, (2): 1-6.
- [18] 薛征. 介绍一种护壁堵漏的方法——“711”型水泥速凝剂在钻探施工中的应用[J]. 地质与勘探, 1975, (8): 77-79.
XUE Zheng. Application of “711” cement accelerator in drilling work[J]. Geology and Exploration, 1975, (8): 77-79.
- [19] 陕西省冶金地质勘探公司地质研究所. 301 聚酯护壁堵漏情况[J]. 勘探技术, 1977, (6): 62-71.
Institute of Geology, Shaanxi Metallurgical Geological Exploration Company. 301 borehole wall protection and plugging with polyester[J]. Exploration Technology, 1977, (6): 62-71.
- [20] 江苏省地质局地质探矿处, 等. 使用聚丙烯酰胺泥浆护孔堵漏的体会[J]. 探矿工程, 1979, (3): 37-39.
Geological Prospecting Department of Jiangsu Geological Bureau, et al. Experience on using polyacrylamide mud to protect holes and prevent leakage[J]. Exploration Engineering, 1979, (3): 37-39.
- [21] 黄荣华, 何勤功, 等. PMN 凝胶堵漏剂研究[J]. 油田化学, 1984, 2(4): 271-277.
HUANG Ronghua, HE Qingong, et al. A study on a PMN gel used for plugging well lost circulation[J]. Oilfield Chemistry, 1984, 2(4): 271-277.
- [22] 林学彬, 李天然, 杜秀金. 高吸水性树脂(PAN-HAK)堵漏剂的研制与应用[J]. 地质与勘探, 1985, (8): 71-73.
LIN Xuebin, LI Tianran, DU Xiujin. Development and application of superabsorbent resin (PAN-HAK) plugging agent[J]. Geology and Exploration, 1985, (8): 71-73.
- [23] 王德承. 用清水强钻法处理恶性井漏[J]. 石油钻采工艺, 1990, 3(9): 39-41.
WANG Decheng. Treatment of severe leakage by clear water blind drilling[J]. Petroleum Drilling and Production Technology, 1990, 3(9): 39-41.
- [24] 王德承. 快速止漏剂 DTR 的应用性能研究[J]. 油田化学, 1991, 2(8): 161-164.
WANG Decheng. Fast-working plugging material GTR in use for stopping circulation losses of drilling fluids[J]. Oilfield Chemistry, 1991, 2(8): 161-164.
- [25] 肖绪玉, 史东军, 李国楠, 等. 塔里木盆地顺北地区二叠系随钻堵漏技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(10): 37-41.
XIAO Xuyu, SHI Dongjun, LI Guonan, et al. Plugging while drilling technology for permian in Shunbei Area of Tarim Basin[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(10): 37-41.
- [26] 陈星星. 涪陵页岩气田防漏堵漏技术应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(3): 11-14.
CHEN Xingxing. Application research on lost circulation prevention and plugging in Fuling Shale Gas Field[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(3): 11-14.
- [27] 李成岗. 波纹管堵漏现场试验获得成功[J]. 石油学报, 1999, 2(4): 73-74.
LI Chenggang. Field trial of profile liners for sealing circulation loss has been successful[J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 2(4): 73-74.
- [28] 李家龙, 王德康, 赵正培, 等. 泡沫钻井液在大井眼漏失井中的应用[J]. 钻采工艺, 2000, 23(6): 81-82.
LI Jialong, WANG Dekang, ZHAO Zhengpei, et al. Application of foam drilling fluid in large hole lost circulation well[J]. Drilling & Production Technology, 2000, 23(6): 81-82.
- [29] 徐孝思, 李坤, 敬祖佑, 等. MTC 复合堵漏技术在塔里木和田河气田 MA4-H1 井中的应用[J]. 钻采工艺, 2003, 26(3): 82-83.
XU Xiaosi, LI Kun, JING Zuyou, et al. Application of MTC compound plugging technology in well MA4-H1 in hetianhe gas field of tarim basin[J]. Drilling & Production Technology, 2003, 26(3): 82-83.
- [30] 黄达全, 陈少亮, 马运庆, 等. 可膨胀高效承压剂在堵漏作业中的应用[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(3): 71-72.
HUANG Daquan, CHEN Shaoliang, MA Yunqing, et al. Application of expandable bearing material with high efficiency in sealing operation[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006, 23(3): 71-73.
- [31] 苏长明, 李家芬, 张进双, 等. 化学堵漏技术在河坝 101 井的应用[J]. 钻井液与完井液, 2009, 26(2): 108-109.
SU Changming, LI Jiafen, ZHANG Jinshuang, et al. The application of chemical mud loss control method in Well Heba 101[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2009, 26(2): 108-109.

- [32] 王中华. 聚合物凝胶堵漏剂的研究与应用进展[J]. 精细与专用化学品, 2011, 19(4): 16—19.
WANG Zhonghua. Research and application progress of the polymer gel plugging agent[J]. Fine and Specialty Chemicals, 2011, 19(4): 16—19.
- [33] 曹晓春, 李倍任, 秦义, 等. 聚合物凝胶堵漏剂的研究及应用[J]. 当代化工, 2015, 44(11): 2572—2574.
CAO Xiaochun, LI Beiren, QIN Yi, et al. Research and application of polymer gel plugging agent[J]. Contemporary Chemical Industry, 2015, 44(11): 2572—2574.
- [34] 鲁红升, 张太亮, 黄志宇. 一种新型堵漏凝胶 DNG 的研究[J]. 钻井液与完井液, 2010, 27(3): 33—35.
LU Hongsheng, ZHANG Tailiang, HUANG Zhiyu. Study on a new loss controller of polymer gel[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2010, 27(3): 33—35.
- [35] 夏海英, 周沙, 兰林, 等. GCY-X 体膨胀堵漏剂的研制与性能评价新方法[J]. 钻井液与完井液, 2011, 28(6): 11—13.
XIA Haiying, ZHOU Sha, LAN Lin, et al. Study on development and new evaluation method of swelling LCM GCY-X[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2011, 28(6): 11—13.
- [36] 隋跃华, 成效华, 关芳, 等. 低密度膨胀型堵漏技术在伊朗 BAB-1 井的应用[J]. 钻井液与完井液, 2008, 25(1): 78—80.
SUI Yuehua, CHENG Xiaohua, GUAN Fang, et al. The application of low density swelling lost circulation material in Well BAB-1 in Iran[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2008, 25(1): 78—80.
- [37] 黄春雨, 欧阳伟, 刘向君, 等. 交联聚合物堵漏剂室内性能研究[J]. 石油化工应用, 2014, 33(12): 93—97.
HUANG Chunyu, OUYANG Wei, LIU Xiangjun, et al. Laboratory study on the performance of a crosslinked polymer plugging agent[J]. Petrochemical Industry Application, 2014, 33(12): 93—97.
- [38] 苗娟, 李再钧, 王平全, 等. 油田堵漏用吸水树脂的制备及性能研究[J]. 钻井液与完井液, 2010, 27(6): 23—26.
MIAO Juan, LI Zaijun, WANG Pingquan, et al. Synthesis on water absorbing resin as lost circulation material[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2010, 27(6): 23—26.
- [39] 钱志伟, 王平全, 白杨. 钻井堵漏用特种凝胶的适用性[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(2): 51—54.
QIAN Zhiwei, WANG Pingquan, BAI Yang. Research on special gel used for mud loss control[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2012, 29(2): 51—54.
- [40] 张新民, 聂勋勇, 王平全, 等. 特种凝胶在钻井堵漏中的应用[J]. 钻井液与完井液, 2007, 24(5): 83—84.
ZHANG Xinmin, NIE Xun Yong, WANG Pingquan, et al. A special gel for mud loss control[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2007, 24(5): 83—84.
- [41] 赵启阳, 邓慧, 王伟, 等. 一种可固化堵漏工作液的室内研究[J]. 钻井液与完井液, 2013, 30(1): 41—44.
ZHAO Qiyang, DENG Hui, WANG Wei, et al. Laboratory study on curing lost circulation control fluid[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2013, 30(1): 41—44.
- [42] 王悦坚. 塔河油田恶性漏失堵漏与大幅度提高地层承压技术[J]. 钻井液与完井液, 2013, 30(4): 33—36.
WANG Yuejian. Technology on mud lost control of severe lost circulation and improving formation pressure containment in Tahe Oilfield[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2013, 30(4): 33—36.
- [43] 詹俊阳, 刘四海, 刘金华, 等. 高强度耐高温化学固结堵漏剂 HDL-1 的研制及应用[J]. 石油钻探技术, 2014, 24(2): 70—71.
ZHAN Junyang, LI Sihai, LIU Jinhua, et al. Development and application of chemical consolidation plugging agent HDL-1[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 24(2): 70—71.
- [44] 王灿, 侯士立, 齐奔, 等. 自胶结堵漏技术研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(5): 63—65.
WANG Can, HOU Shili, QI Ben, et al. Study and application of self-cementation lost circulation control method[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(5): 63—65.
- [45] 卓云, 曾庆旭, 刘德平, 等. 碳酸盐岩裂缝溶洞层胶质水泥堵漏技术——以川东地区蒲 005-2 井为例[J]. 天然气工业, 2012, 30(5): 84—85.
ZHUO Yun, ZENG Qingxu, LIU Deping, et al. Gel cementing technology for the wells drilled in the acture-karst carbonate reservoirs—a case study of the Well Pu 005-2 in eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(5): 84—85.
- [46] 尹江. 钻进严重漏失层的封堵处理方法[J]. 西部探矿工程, 2015, 20(2): 14—15.
YIN Jiang. Plugging treatment method for drilling serious leakage layer[J]. West-China Exploration Engineering, 2015, 20(2): 14—15.

(编辑 王建华)