

文章编号:1673-5005(2009)04-0076-05

物理法随钻防漏堵漏机制与试验

熊继有, 蒲克勇, 王平全, 王 艳, 陈 仲

(西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500)

摘要:根据物理法随钻防漏堵漏方法的技术原理,建立物理模型,对利用射流的水力能量给漏失层井壁形成“人造井壁”的防漏堵漏机制进行分析和室内试验研究。结果表明:自行研制的试验装置能够验证物理法随钻防漏堵漏的机制;确定的随钻防漏堵漏钻井液配方体系渗透率低、封堵能力强,并能在井壁上形成薄、韧的封堵层,有效封堵裂缝;封堵层的形成扩大了钻井液安全密度窗口,而且具有很高的强度和稳定性,承压能力可达到 6 MPa,达到了随钻防漏堵漏的目的。

关键词: 随钻防漏; 物理法; 堵漏; 钻井液体系

中图分类号: TE 28 **文献标识码:** A

Mechanism and experiment of physical leak resistance and sealing while drilling

XIONG Ji-you, PU Ke-yong, WANG Ping-quan, WANG Yan, CHEN Zhong

(State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Based on the principal of physical leak resistance and sealing while drilling, the physical model was built. The analysis on leak resistance and sealing mechanism and practiced indoor experiment were carried out for the man-made sidewall which is created to the loss segment's sidewall by hydraulic energy of jetting. The results show that the independent researched experimental device is able to verify the mechanism of physical leak resistance and sealing. The determined drilling system of leak resistance and sealing while drilling is of low permeability, good sealing performance, and can form thin and sturdy sealing formation on the borehole wall to efficiently seal fractures. The forming of sealing formation enlarges the safe density window of drilling fluid. And the sealing formation has high stiffness and stability and its bearing capacity is up to 6 MPa, the result of leak resistance and sealing while drilling is satisfied.

Key words: leak resistance while drilling; physical method; sealing; drilling fluid system

钻井过程中的井漏问题是钻井界十分棘手的难题。我国西部地区油气深井的井漏更加突出,山前构造、高陡构造、复杂构造所钻井 90% 发生井漏,处理井漏时间占作业时间的 6%,有的高达 20%,堵漏成功率仅为 50% 左右。除用机械方法^[1]外,近年来,国内外在防漏堵漏技术的研究与应用方面发展较快,研制了多种配方,开发了多种防漏堵漏的钻井液体系,但这些化学的方法还没有从根本上解决防漏堵漏的问题^[2-7],堵漏剂没有与井壁有机地融合成一体,未达到无孔不入的封堵效果,缺少伸入井壁的作用力,正向

和反向承压能力差。物理法随钻防漏堵漏方法是一种新技术,其关键是利用专用井下工具将泵入的钻井液流量分流小部分,采用射流直接作用于漏失井壁,配合合适的钻井液体系,给漏失层井壁形成“人造井壁”的随钻防漏堵漏技术。笔者对物理法随钻防漏堵漏进行机制与室内试验研究。

1 物理法随钻防漏堵漏机制

1.1 随钻防漏堵漏物理模型

物理法随钻防漏堵漏专用井下工具的物理模型

收稿日期:2008-12-08

基金项目:国家自然科学基金项目(90610013)

作者简介:熊继有(1951-),男(汉族),湖北仙桃人,教授,博士生导师,主要从事钻井工艺技术、射流理论与应用技术、钻头水力学研究。

如图1所示。钻井液流体以流量 Q_s (泵排量)进入井下工具后,通过分流孔(2~3个)将流量 Q_s 分流到两个侧喷嘴,流量 Q_b (钻头喷嘴排量)进入井下钻头进行常规钻井的正常循环。分流孔的数目和当量直径、侧喷嘴的当量直径由井身结构、设计流量和射流压力、地层岩性等参数决定。

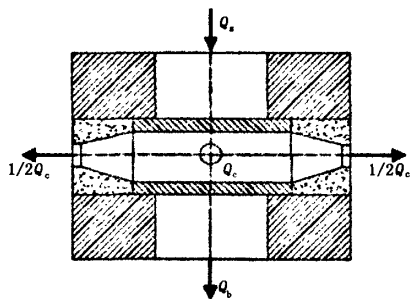


图1 专用井下工具物理模型

Fig.1 Physical model of distinct downhole tool

由此可见,物理法随钻防漏堵漏技术的关键是射流对井壁的冲击压力作用。在射流冲击压力范围内,射流冲击压力直接作用于岩石矿物晶体颗粒,经岩石微孔、洞、裂缝施加液压力于颗粒隙面,对漏失通道进行充填压实,实现随钻防漏堵漏。

1.2 随钻防漏堵漏封堵机制

1.2.1 射流冲击压力对井壁的作用

物理法随钻防漏堵漏就是通过井下特殊的侧向水力工具,利用射流的水力能量对井壁的冲击压力作用,把混入钻井液中的随钻防漏堵漏材料有针对性地强力推向漏失井壁岩石的孔、洞、隙和裂缝(包括诱导性裂缝),从而增大井壁的承压能力和钻井液的安全密度窗口,在井壁内侧形成具有一定强度的泥饼,即所谓的“人造井壁”,提高漏失层井壁正反方向的承压能力。当侧喷嘴射流^[8]入射角 θ 发生变化而其他条件不变时,壁面上同一横向距离处的冲击压力随着入射角 θ 的增大而减小。这是由于射流的出射方向与竖直方向存在着一定的夹角,引起射流在垂直于井壁面上的速度分量减小,从而使竖向的动量降低,因此壁面上的作用力相应减小,即壁面冲击压力减小。由于环空中钻井液上返速度的影响,旋流喷嘴若向下倾斜,其射流能量会被钻井液上返速度动能抵消一部分,造成浪费,并且破坏了旋转射流对称喇叭状的完整结构^[9-10],造成流体结构的混乱,影响“人造井壁”的形成。如果射流喷嘴向上倾斜的角度太大,则旋转射流作用范围内的井壁离喷嘴较近的部分和离喷嘴较远部分的射流压力相差

过大,导致造壁作用不均匀,也会影响“人造井壁”的形成。因此,选择旋流喷嘴垂直于井壁或稍向上倾斜的结构是合理的。

1.2.2 钻井液中固相颗粒封堵漏层孔隙

物理法随钻防漏堵漏技术主要适用于孔隙渗透型和裂缝型漏失地层。孔隙渗透型漏失地层漏失通道的基本形态是以孔隙为基础,由喉道连接而成的不规则的孔隙体系。常见的孔隙喉道类型^[11]有5种:

(1)喉道仅仅是孔隙的缩小部分。此类孔隙大、喉道粗,孔隙与喉道直径比接近1,粒间胶结物少,胶结疏松。

(2)喉道断面是可变收缩部分。此类孔隙较大、喉道细,孔隙与喉道直径比很大。

(3)片状或弯片状喉道。岩石进一步压实,或由于压溶作用使晶体再生长时,其再生长边之间包围的孔隙变得较小。据颗粒形状不同,又可分为片状和弯曲片状喉道,这种喉道的有效张开宽度一般小于1 mm,个别的有几十微米。此类孔隙(喉)结构很细小,孔喉比由中等到大,为凹凸接触式。

(4)管束状喉道。当杂基和各种胶结物含量较高时,原生的粒间孔隙有可能完全被堵死。这类孔喉结构常见于砂岩骨架颗粒间的杂基支撑及孔隙和基底胶结类型之中,孔喉比近似于1。

钻井液中的固相颗粒封堵漏失层孔隙喉道的机制是由于固相颗粒侵入以后,增大了固相颗粒于孔壁的附着面积,在物理法的射流作用下使得固相颗粒封堵孔隙喉道更为有效。

1.3 井底水力能量的分配

井底水力能量的分配实际上是排量的分配,即分配给钻头喷嘴和侧向水力工具喷嘴的排量,根据井身结构和地层岩性确定。由管路并联原理(图1)可知:

$$Q_s = Q_b + Q_c.$$

假设分配给侧向水力工具喷嘴的排量与泵排量的比为 I ,即 $I = Q_c/Q_s$,则有

$$Q_b = (1 - I)Q_s.$$

设计时先给出分配比值 I ,即可计算 Q_b 和 Q_c ,然后可计算出钻头喷嘴、侧向水力工具喷嘴直径和相应的水力参数。

2 物理法随钻防漏堵漏试验

针对物理法随钻防漏堵漏技术的特点,研制了针对该项技术的堵漏试验装置,对室内试验及其堵

漏效果进行评价。

2.1 模拟试验装置

所用装置为西南石油大学自行研制的随钻堵漏模拟试验装置(图2)。该设备由数控动力系统、钻井液流动系统两部分组成。钻井液暂存器、立轴、模拟井筒和返排装置均安装有密封承压圈,材料均为有一定厚度的合金钢,这样既满足了试验需要,又保证了试验的安全、可靠。立轴部分加工为空合金钢柱,模拟井下钻柱部分,可供钻井液流动。立轴的初始位置可用试验托台上的升降装置和立轴上的手动调整装置进行调整。

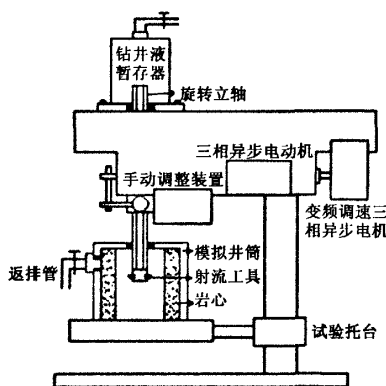


图2 试验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of experimental device

旋转立轴的转速动力由 YVP 型变频调速三相异步电动机提供,并由 DZB100 型变频器对转速进行控制。装置根据物理法随钻防漏堵漏技术的原理模拟钻进时井下的工作环境。通过使用试验装置专用的岩心,能够准确模拟漏失地层,根据堵漏效果对堵漏材料进行评价。其特点是:①该装置的立轴转速为 $0 \sim 120 \text{ r/min}$,可以进行正、反向调速,能够满足模拟要求;②装置重量轻,可拆性较好;③承压能力强,设计承压能力为 15 MPa ,在返排口装有回压装置;④结构简单,布局合理,操纵灵活可靠。

2.2 室内试验

2.2.1 试验岩心制作

由于实际岩心少,且长度难以满足试验模拟和堵漏效果分析评价要求,为了便于试验模拟和加工,制作了人造岩心,根据裂缝的两种倾角(即横向和纵向)对岩心进行了再加工。共加工制作了3组,每组岩心若干。3组岩心样件如图3所示。岩心高 40 cm ,内径为 7.3 cm ,外径为 10 cm ,横向和纵向的裂缝宽度均为 2 mm ,裂缝深度为 2.7 cm 。

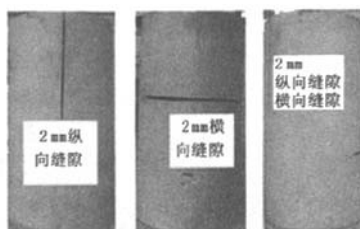


图3 人造岩心试验样品

Fig.3 Man-made core sample for experiment

2.2.2 试验方法

堵漏装置的具体操作步骤为:根据试验设计要求设定好旋转立轴的转速和射流工具工作的终点位置,并通过调节试验托台调整好射流工具的起始位置;将调配好的堵漏钻井液置入钻井液暂存器内,装好暂存器的密封盖;向暂存器施加设定好的压力,同时启动数控动力系统,射流工具在模拟井筒内按照设定的旋转、下移速度和压力对岩心进行模拟随钻堵漏。这时,可以根据需要在返排口调整回压。

该装置可以模拟常规随钻堵漏和不同钻井液参数条件下的物理法随钻堵漏。通过试验后的堵漏效果对比分析,可以得到合理的设计参数,并验证理论分析的正确性。试验条件为:钻井液暂存器容量 5 L ;工作压力 $5 \sim 10 \text{ MPa}$;试验立轴转速和下移速度分别为 $20 \sim 120 \text{ r/min}$ 和 $0.1 \sim 0.4 \text{ m/min}$;试验回压 $0 \sim 2 \text{ MPa}$ 。

2.2.3 钻井液体系和堵漏材料

通过钻井液体系和堵漏材料的优选试验^[12]得到最佳堵漏配方:加重钻井液 + 1.0% A 级刚性颗粒 + 0.5% B, C, D, E, F 级刚性颗粒 + 0.5% B, C, D 级核桃壳 + 0.5% B, C, D, E 级橡胶颗粒。试验证明:①固相颗粒合理的颗粒形状、与裂缝匹配的尺寸及其合理的级配就可能对漏失裂缝完成封堵;②封堵颗粒应该是刚性非球形颗粒状粒子(各方面尺寸大致相等的刚性小颗粒),它是高效堵剂;③封堵颗粒中必须有自身(单粒)就能够在裂缝上卡死的架桥颗粒,堵层的承压能力首先由它决定,此架桥颗粒尺寸(D_1)与裂缝宽度(D_f)的关系是: $D_f > D_1 > 2/3 D_1$;④只有颗粒随钻井液漏失进入裂缝,它才能够起到架桥作用,而颗粒一旦进入裂缝则必然能在裂缝某个位置卡住,并起到架桥作用;⑤当架桥粒子在裂缝中架稳后,其他各级粒子分别起填充作用(重钻井液中间的固相粒子有加强作用),最后填死裂缝。试验架桥颗粒尺寸最大为 2 mm 。

2.2.4 试验结果分析

所用钻井液为聚磺钻井液体系($\gamma = 1.20$) + 堵漏配方。1#岩样:裂缝2 mm、竖向切割;2#岩样:裂缝2 mm、横向切割(图4)。

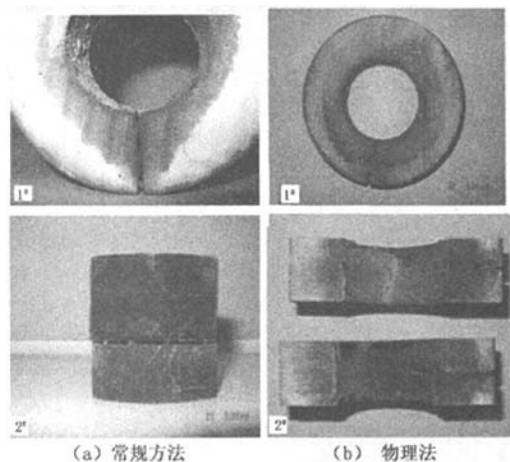


图4 岩样使用射流工具前后情况对比

Fig. 4 Cores sample's comparison before and after using jet tool

由图4堵漏情况可以看出,在设备工作压力1.0 MPa下未加射流工具的堵漏情况并不理想,颗粒堆积并不紧密,2 mm的裂缝并未堵住(图4(a)),而加射

流工具后的堵漏情况良好,颗粒堆积紧密,侵入裂缝有一定的深度,能将裂缝堵住,并在井壁形成一层致密的泥饼,从而达到防漏堵漏的目的(图4(b))。

3 封堵承压能力试验

3.1 承压能力试验仪封堵承压试验

为了对比分析随钻防漏堵漏技术在钻井过程中的防漏堵漏效果,采用同样的钻井液体系和堵漏材料配制成堵漏钻井液。使用随钻堵漏模拟装置对堵漏钻井液的堵漏效果和堵漏层的承压能力进行评价。在试验条件不变的情况下重新进行堵漏试验,使用 ZIESS stemi SV 11 型超长焦距连续变焦视频显微镜和承压试验装置对堵漏效果进行观察和分析。承压能力试验仪主要测定封堵后岩心或裂缝的承压能力,主要由注入系统、储液系统、控温系统、控制流程系统、加压及压力监视系统、计量系统、数据采集处理系统及系统软件等组成。承压能力试验仪与堵漏效果模拟试验仪配合使用,堵漏试验完成后,将岩心夹持器从堵漏效果模拟试验仪上取下,接入承压能力试验仪,开启平流泵,逐渐加压直至滤液接收杯中有液滴,此时平流泵压力即为岩心的承压能力。承压堵漏效果如图5所示。

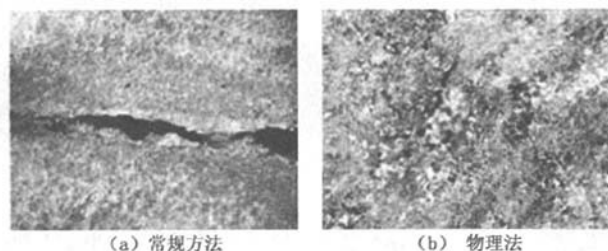


图5 不同方法的承压堵漏效果

Fig. 5 Bearing plugging effect of different methods

由图5可知,常规钻并堵漏试验后缝隙中只堆积和胶结了少量的堵漏材料,而物理法随钻堵漏试验后的缝隙中则形成了致密的堵漏层。这就说明侧向水力工具的射流作用能使钻井液中的堵漏材料“主动”进入并有效封堵漏失地层,而进行一般的常规随钻堵漏时堵漏材料只是在环空上返时“被动”进入漏失地层,这样往往造成堵漏失败。试验裂缝的承压能力与其厚度有关,试验条件下承压能力为5~6 MPa。

3.2 随钻封堵承压能力试验

试验方法是加重钻井液 + 1.0% A 级刚性颗粒

+ 0.5% B, C, D, E, F 级刚性颗粒 + 0.5% B, C, D 级核桃壳 + 0.5% B, C, D, E 级橡胶颗粒,在堵漏过程中,当压力加至3.5 MPa时若未被压穿,则卸压将仪器中的堵漏浆搅动,然后再加压至3.5 MPa,然后卸压取出模具,清洗装置并用未加堵漏材料的钻井液对已堵好的模具进行加压,观察承压能力。0, 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.0 MPa 压力下,随钻堵漏结果分别为无漏失、几滴漏失、几滴漏失、数十滴漏失、数十滴漏失、无漏失、无漏失、无漏失。

可以看出,刚性粒子、核桃壳和橡胶颗粒复配能较好地封堵裂缝,刚性颗粒架桥,核桃壳和橡胶颗粒

利用其韧性能很好地封堵裂缝。试验搅动2次,其承压能力为4.0 MPa,缝上面颗粒较少,裂缝封堵效果很好,缝中刚性颗粒较多,有部分核桃壳,压穿时为一个洞。裂缝中刚性颗粒较核桃壳承压能力好,刚性颗粒中补充适量的核桃壳和橡胶颗粒有利于提高裂缝中堵漏颗粒承压能力;试验裂缝的承压能力与其厚度有关,试验模具楔形裂缝厚度只有4 cm,封堵层的厚度还不到4 cm,承压能力只有6 MPa,用在实际井位上,其裂缝厚度远不止4 cm,故其承压能力远高于6 MPa。

4 结 论

(1)射流对岩石水楔作用有利于堵漏材料颗粒的分散以及材料摆脱缝间流体充填物的干扰,快速进入各种复杂产状的孔隙、裂缝,使之在更深的距离滞留、堆积,可形成较大范围的堵漏带,提高了泥饼的承压能力。

(2)物理法随钻防漏堵漏模拟装置能够有效地封堵裂缝,并在井壁形成一层封堵能力强、承压能力可达到6 MPa的致密泥饼。这种“人造井壁”可以承受抽吸压力和激动压力作用,也能承受异常高压或异常低压的层间压差作用。

(3)随钻防漏堵漏形成泥饼的渗透率、封堵能力、承压能力和韧性与射流对井壁合理的冲击压力、立轴转速和下移速度、钻井液体系和堵漏材料有关。

参考文献:

- [1] ADAM M, LUNDEMO K, MACKENZIE G, et al. Development and installation of a high-pressure-rated bridge plug with metal-to-metal sealing system [R]. SPE 99770, 2006.
- [2] 徐同台,刘玉杰,申威,等. 钻井工程防漏堵漏技术 [M]. 北京:石油工业出版社,2000:212-270.
- [3] 熊继有,程仲,薛亮,等. 随钻防漏堵漏技术的研究与应用进展[J]. 钻采工艺,2007,30(2):7-10,19. XIONG Ji-you, CHENG Zhong, XUE Liang, et al. Research and application of leak resistance and sealing technology while drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2007,30(2):7-10,19.
- [4] 马光长,吉永忠,熊焰. 川渝地区井漏现状及治理对策[J]. 钻采工艺,2006,29(2):25-27. MA Guang-chang, JI Yong-zhong, XIONG Yan. Present state and treatment measures of lost circulation in Sichuan and Chongqing area[J]. Drilling & Production Technology, 2006,29(2):25-27.
- [5] EOFF Larry, DALRYMPLE Dwyann, REDDY B R. Development of a hydrophobically modified water-soluble polymer as a selective bullhead system for water-production problems[R]. SPE 80206, 2003.
- [6] FREDDY Mata, MANUEL Veiga. Crosslinked cements solve lost circulation problems[R]. SPE 90496, 2004.
- [7] MARRIOTT T, GRIFFITH J, SZUTIAK G. Foamed conventional lightweight cement slurry for ultra-low density and low ECDs solves loss-circulation problem across coal formations; a case history[R]. SPE 96108, 2005.
- [8] 熊继有,杨峰,周鹏亮,等. 环空响应段流体流动特性数值模拟[J]. 天然气工业,2008,28(6):86-87. XIONG Ji-you, YANG Feng, ZHOU Peng-liang, et al. Numerical simulation of fluid flow behavior at response section in annulus[J]. Natural Gas Industry, 2008,28(6):86-87.
- [9] 王惠艺,周卫东. 旋转射流钻头的叶轮设计[J]. 石油大学学报:自然科学版,1997,21(4):43-44. WANG Hui-yi, ZHOU Wei-dong. Design of vane wheel in conical jet bit[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1997,21(4):43-44.
- [10] 步玉环,王瑞和,周卫东. 旋转射流流动规律研究[J]. 石油钻采工艺,1997,19(2):7-10. BU Yu-huan, WANG Rui-he, ZHOU Wei-dong. Study on flow principles of rotating jet[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1997,19(2):7-10.
- [11] 黄立新,张光明. 固相颗粒封堵孔隙喉道的机理研究[J]. 江汉石油学院学报,1996,21(2):41-43. HUANG Li-xin, ZHANG Guang-ming. Mechanism of pore throat's plugging due to solid particles in a formation[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1996,21(2):41-43.
- [12] 李春霞,黄进军,崔茂荣. 评价钻井液完井液对裂缝性地层封堵效果的新方法[J]. 西南石油学院学报,2003,25(5):57-59. LI Chun-xia, HUANG Jin-jun, CUI Mao-rong. Plugging effects of drilling fluid and completion fluid on fractured formation by mud filter press[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2003,25(5):57-59.

(编辑 李志芬)