

水基钻井液防塌封堵材料封堵特性实验研究

刘徐三

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要:提高钻井液封堵能力是有效解决硬脆性页岩、煤层等复杂地层井壁失稳的主要技术手段。本文以在一定温度、压力条件下30 min的滤失量为评价标准,对几种封堵材料的封堵特性进行了实验研究。结果表明:除超细碳酸钙外,其他材料随着加量的增加,封堵效果越来越好;乳化沥青、乳化石蜡和油溶性酚醛树脂随着温度的升高,封堵效果变差,而聚乙二醇和聚酯先变差然后又有一定程度的恢复;聚酯和超细碳酸钙能够快速封堵微裂缝;几种封堵剂均对钻井液的流变性能有较明显的影响。对各封堵材料的封堵机理分析表明:不同的封堵材料具有不同的封堵特性,分别适应不同的温度、压力条件。只有根据井下实际情况,有针对性地选择与之相适应的封堵材料,才能有效提高水基钻井液的封堵能力。

关键词:复杂地层;封堵材料;封堵特性;水基钻井液;微裂缝

中图分类号:P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)06-0044-05

Experimental study on plugging characteristics of plugging materials used in water-based drilling fluids

LIU Xusan

(Xi'an Research Institute Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp.,
Xi'an Shaanxi 710077, China)

Abstract: Improving the sealing ability of drilling fluids is the primary technical way to effectively solve the borehole instability in hard and brittle shale and coal. With the filtration loss for 30 minutes under specific temperature and pressure as the evaluation standard, the plugging characteristics of several plugging materials are experimentally studied. The results showed that the sealing effect of the materials increased with the addition amount except for ultra-fine calcium carbonate. The plugging effect of emulsified asphalt, emulsified paraffin, and oil-soluble phenolic resin deteriorated with increase of temperature, while the plugging effect of polythene glycol and polyester first deteriorated and then had a certain degree of recovery. Polyester and ultra-fine calcium carbonate can quickly plug micro-cracks. These plugging materials had a significant impact on the rheological properties of drilling fluids. Analysis of the plugging mechanism of each plugging material shows that different plugging materials have different plugging characteristics and are suitable for different temperature and pressure conditions. The plugging capacity of the water-based drilling fluid can be effectively improved only if the plugging material is selected depending on specific downhole conditions.

Key words: complex stratum; plugging materials; plugging characteristics; water-based drilling fluids; micro-cracks

0 引言

随着能源勘探与开采的步伐加快,深井、超深

井、复杂结构井等数量日益增多,深部复杂地层井壁失稳问题显得更加突出^[1]。不同的地层,其失稳

收稿日期:2020-06-07; 修回日期:2020-12-10 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.06.007

基金项目:陕西省科技统筹创新工程计划项目“黄陵矿区井下大直径定向高位钻孔施工工艺研究”(编号:2016KTCL01-08)

作者简介:刘徐三,男,汉族,1983年生,助理研究员,地质工程专业,硕士,从事钻探技术研究工作,陕西省西安市高新区锦业一路82号, liuxusan@cctegxian.com。

引用格式:刘徐三.水基钻井液防塌封堵材料封堵特性实验研究[J].钻探工程,2021,48(6):44-48.

LIU Xusan. Experimental study on plugging characteristics of plugging materials used in water-based drilling fluids[J]. Drilling Engineering, 2021,48(6):44-48.

机理不尽相同,因而应对的技术措施也有差别。目前,解决复杂地层井壁失稳的技术措施主要是提高钻井液的抑制性能和封堵能力^[2-6]。针对微裂缝发育的硬脆性页岩、煤层等,由于其水化作用较弱,井壁失稳主要是由于钻井液中的水相沿着微裂缝进入地层,产生水力尖劈作用,导致地层微裂缝扩展与延伸而引起的^[2,7]。因此,解决这一类地层井壁失稳的主要措施是提高钻井液的封堵能力,阻止井筒压力的传递^[8-9]。但不同的地层,地层温度及压力不同,且裂缝宽度分布从纳米级到毫米级,非均匀性极强。要实现对不同地层进行有效封堵,就必须了解不同封堵材料的封堵特性,以便有针对性地选择不同的封堵材料。为此,本文对常用水基钻井液封堵材料乳化沥青、聚乙二醇、聚酯、乳化石蜡、油溶性酚醛树脂、超细碳酸钙等的封堵特性进行了系统性实验研究,并分析了其作用机理。这对增强钻井液封堵材料选择的针对性,提高水基钻井液的有效封堵能力,具有很好的现实意义。

1 实验方法

目前,评价钻井液封堵材料的封堵性能的方法很多,包括高温高压静/动滤失量评价方法、流动装置岩心评价方法、高温高压砂床滤失量、高温高压砂床渗透失水等评价方法^[3,9-10]。这些方法虽然尽可能地模拟了井下实际的温度和压力条件以及钻井液动态循环状态,但是实验重复性差,难以准确比较封堵材料的封堵效果。此外,这些方法大多是针对孔隙性地层,其评价结果对裂缝性地层封堵材料的选择,没有实际参考价值。本文采用西南石油大学钻井液研究室研发的高温高压封堵评价仪来对常用水基钻井液封堵材料的封堵特性进行评价^[11],该评价仪能够模拟地层的微裂缝,裂缝宽度20~100 μm可调,裂缝深度5 mm,且可以将裂缝拆开,直观观察封堵材料在裂缝内的封堵状态。实验操作过程与高温高压静滤失量测定的操作过程一致,实验结束后,将微裂缝取出,观察封堵材料对微裂缝的封堵情况,结合在一定时间内的滤失量,综合分析封堵材料的封堵特性。

2 实验内容及结果

2.1 封堵材料加量对封堵特性的影响

实验准备了7个配方。1号:钻井液基浆,配方

为水+4%膨润土+0.3%Na₂CO₃+0.5%LV-CMC;2号:基浆+乳化沥青;3号:基浆+聚乙二醇;4号:基浆+聚酯;5号:基浆+乳化石蜡;6号:基浆+油溶性酚醛树脂;7号:基浆+超细碳酸钙(800目与400目的超细碳酸钙按照质量比3:2充分混合)。

向钻井液基浆中分别加入1%、3%、5%的封堵材料,充分搅拌,利用高温高压封堵评价仪(裂缝宽度设置为30 μm,下同)测试在120℃、3.5 MPa的条件下30 min内的滤失量,根据测试结果,分析加量对封堵特性的影响,实验结果见图1。

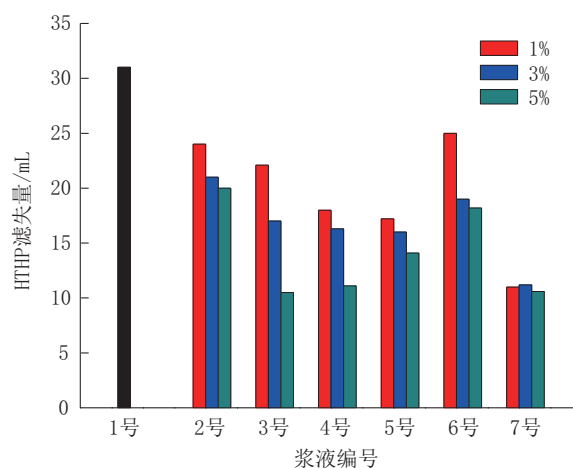


图1 封堵材料加量对封堵特性的影响

Fig.1 Effect of the adding amount of plugging materials on plugging characteristics

滤失量越低,表明封堵材料对微裂缝的封堵效果更好。由图1可见,基浆里面加入封堵材料后,基浆的滤失量均有下降。但不同封堵材料,滤失量降低程度不同。几种封堵材料横向比较,超细碳酸钙的封堵效果最好。但随着加量的增加,超细碳酸钙的封堵效果并没有明显的提升,说明超过1%时,加量对超细碳酸钙的封堵效果不再有明显的提升。加量对封堵效果影响最大的是聚乙二醇,随着加量的增加,封堵效果明显提升。其次是聚酯和乳化石蜡,不同加量条件下的封堵效果,差异较明显。而乳化沥青和油溶性树脂在加量超过3%以后,对微裂缝的封堵效果便没有明显的提升。

2.2 温度对封堵特性的影响

为便于横向比较,结合2.1节的实验结果,向钻井液基浆中分别加入3%的各封堵材料,充分搅拌

后,分别在温度为100、120、150℃,压差为3.5 MPa的条件下测定30 min的高温高压滤失量,结果见图2。

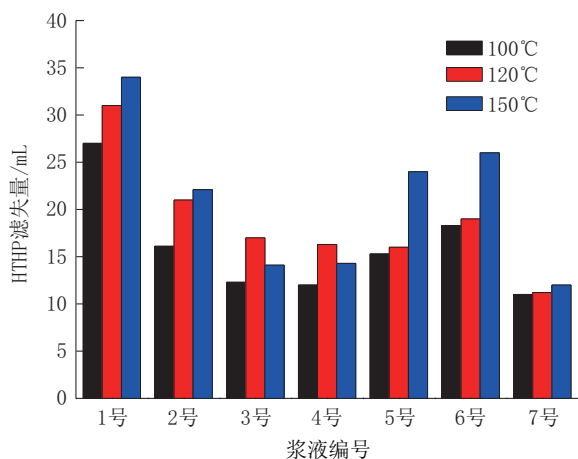


图2 温度对封堵材料封堵特性的影响

Fig.2 Effect of the temperature on plugging characteristics of plugging materials

从图2可以看出,除了超细碳酸钙外,温度对其他封堵材料的封堵特性的影响比较明显。总体来看,在各温度条件下,各封堵材料依然具有一定的封堵效果,只是温度对其封堵特性的影响规律不同。对于乳化沥青、乳化石蜡和油溶性酚醛树脂,随着温度的升高,封堵效果变差。在120℃以下,乳化沥青的封堵效果随温度变化比较明显,而乳化石蜡、油溶性酚醛树脂的封堵效果随温度变化并不显著。但温度超过120℃后,乳化石蜡、油溶性酚醛树脂的封堵效果恶化严重,高温高压滤失量明显上升。对于聚乙二醇、聚酯,温度低于120℃时,封堵效果随温度升高而变差,但超过120℃后,其封堵效果并没有继续恶化,反而开始变好。超细碳酸钙的封堵效果受温度影响很微小,随着温度的升高,高温高压滤失量并没有很大的变化。在各温度条件下,各封堵材料所表现出来的封堵特性不同,与各材料对温度的响应条件不同有密切的关系。

2.3 封堵特性随时间变化规律

钻井液基浆中加入3%的各封堵材料,充分搅拌后,在120℃、3.5 MPa条件下,测定在30 min内不同时间点的高温高压滤失量,分析各封堵材料的封堵特性随时间的变化规律,实验结果见图3。

高温高压滤失量的稳定时间越早,表明封堵材

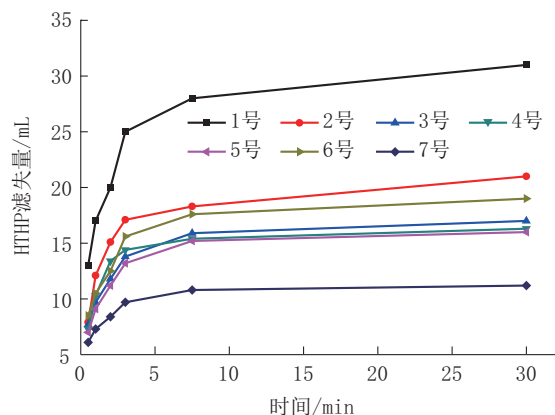


图3 封堵材料的封堵特性随时间变化规律

Fig.3 Plugging performance of plugging materials vs time

料对微裂缝的封堵越快速,十分有利于微裂缝发育的硬脆性页岩、煤岩等地层的井壁稳定。从图3可以看出,聚酯和超细碳酸钙的高温高压滤失量在3 min内便稳定下来,往后随着时间的延长,滤失量增幅非常微小。而聚乙二醇、乳化石蜡和油溶性酚醛树脂则在7.5 min时才稳定下来,表明这3种封堵材料对微裂缝的封堵速度不如聚酯和超细碳酸钙快。乳化沥青的高温高压滤失量虽然在3 min后的增加幅度远比前3 min内的增加幅度小,但比其他5种封堵材料的增加幅度要明显,且总的滤失量也更大。由此表明,在选择水基钻井液封堵材料时,不能仅以总滤失量为选择标准,还应考虑封堵材料对微裂缝的封堵速度。

2.4 封堵材料对钻井液流变性能的影响

在钻井液基浆中加入3%的各封堵材料,充分搅拌后,测定钻井液的表现粘度(AV)、塑性粘度(PV)和动切力(YP),实验结果见表1。

封堵材料对钻井液流变性能影响越小,越有利

表1 封堵材料对钻井液流变性能的影响

Table 1 Effect of plugging materials on the rheological properties of drilling fluids

浆液编号	AV/(mPa·s)	PV/(mPa·s)	YP/Pa
1	11.0	5	6.1
2	36.0	21	14.8
3	37.5	22	15.8
4	34.5	16	18.9
5	37.5	20	17.9
6	35.0	16	19.4
7	34.5	17	17.9

于其在实际工程中的应用。从表1可以看出,几种封堵材料对钻井液的流变性能均有明显的影响,加入封堵材料后,钻井液的表观粘度、塑性粘度和动切力均有较大幅度的增长。具体来看,对表观粘度的影响相当,在加量相同的情况下,钻井液表观粘度相差不大。但对钻井液的塑性粘度和动切力影响差异较大,其中,聚乙二醇对钻井液塑性粘度的影响最大,加入聚乙二醇后,钻井液的塑性粘度值增幅最大,超细碳酸钙、油溶性酚醛树脂和聚酯对钻井液塑性粘度的影响相当。而对钻井液动切力影响最大的是油溶性酚醛树脂,影响最小的是乳化沥青。

3 封堵材料的封堵机理分析

总体上讲,封堵材料随钻井液循环的过程中,在存在压力差的条件下,通过地层的滤出效应、颗粒运动的惯性作用、颗粒的扩散作用以及沉淀作用等而被地层捕获,从而在地层微裂隙或孔隙形成封堵层,阻断地层通道,阻止钻井液液相向地层渗透,达到稳定井壁的目的^[12-14]。

(1)乳化沥青是最常用的水基钻井液封堵材料之一,在一定温度条件下,沥青能够变软变形,能够较好地进入地层微裂缝,形成致密的封堵层;同时,沥青具有疏水能力,其吸附于井壁上,形成疏水层,延缓了水进入地层,从而起到防塌作用。也就是说,乳化沥青不仅具有表面堆积、架桥填充作用,还具有憎水阻隔效应。

(2)超细碳酸钙则是在井筒压力差作用下,进入地层微裂缝,在合适的粒度分布范围内,通过上一级颗粒架桥,次一级颗粒逐级填充,在裂缝内形成致密封堵层。其封堵效果跟粒径分布范围与地层微裂缝宽度分布的匹配关系密切相关,匹配越好,封堵能力越强。与其他材料相比,超细碳酸钙对温度不太敏感,由本文实验结果也印证了这一点。

(3)聚乙二醇具有浊点效应,即在一定温度条件下,聚乙二醇能够从溶液中析出胶体微粒,在微裂缝中聚集变大,逐步形成封堵层。但要形成有效封堵,需要的聚乙二醇浓度较高,且其封堵效果与温度密切相关,达不到其浊点温度,便不具有封堵能力。

(4)乳化石蜡成乳液状态分散于水基钻井液中,随钻井液滤液进入地层微裂缝,并在裂缝壁面吸附形成“膜”,使裂缝具有“贾敏效应”,从而阻止钻井液滤液进入微裂缝,达到稳定井壁的目的。

(5)聚酯封堵微裂缝的机理与乳化沥青类似,在温度和压力的作用下软化变形,进入微裂缝架桥、填充,在裂缝前段形成致密封堵带^[15]。不同的是,聚酯软化后,容易与粘土颗粒协同形成团状物,这种团状物能够提高封堵层的致密性,封堵微裂缝的能力较强^[16]。

(6)油溶性酚醛树脂能完全溶于油,但不溶于水。在水基钻井液中依然保持微粒状态,与乳化沥青类似,油溶性酚醛树脂也具有一定的软化点,当温度达到软化点时,可以变软变形,在压差作用下,挤入地层微裂缝,并堆积形成致密封堵层,阻止水进入地层,防止地层坍塌。

4 结论

本文采用高温高压封堵评价仪,对乳化沥青、聚乙二醇、聚酯、乳化石蜡、油溶性酚醛树脂及超细碳酸钙等水基钻井液封堵材料的封堵特性进行了实验研究,得到以下几点结论:

(1)在评价的加量范围内,除了超细碳酸钙的封堵效果受加量影响较小外,其他几种封堵材料对微裂缝的封堵效果受加量的影响均较大,加量越多,封堵效果越好。

(2)在评价的温度范围内,乳化沥青、乳化石蜡和油溶性酚醛树脂对微裂缝的封堵效果随温度升高而变差;而聚乙二醇和聚酯对微裂缝的封堵效果随温度的升高先变差,然后又有一定程度的恢复;超细碳酸钙对微裂缝的封堵效果受温度影响不明显。

(3)在30 min内,聚酯和超细碳酸钙能快速实现对微裂缝的封堵,聚乙二醇、乳化石蜡和油溶性酚醛树脂对微裂缝的封堵速度则相对较慢,而乳化沥青在30 min内的滤失量一直在增加,只是在3 min后的增加幅度比前3 min要小。

(4)几种封堵材料均对钻井液流变性能有较大的影响。在加量相同的情况下,钻井液表观粘度相差不大;对钻井液塑性粘度影响最明显的是聚乙二醇,而对动切力影响最大的是油溶性酚醛树脂,最小的是乳化沥青。

(5)现场应用时,要根据井下温度条件、地层裂缝宽度范围等,有针对性地选择与地层条件相匹配的钻井液封堵材料,才能取得理想的封堵效果,达到防止井壁坍塌的目的。

参考文献(References):

- [1] 孔勇, 杨小华, 徐江, 等. 抗高温强封堵防塌钻井液体系研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(6): 17-22.
KONG Yong, YANG Xiaohua, XU Jiang, et al. Study and application of a high temperature drilling fluid with strong plugging capacity[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(6): 17-22.
- [2] 何恕, 王波, 陈晓飞, 等. 页岩长水平段水基钻井液封堵剂优选[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2015, 17(5): 47-50.
HE Shu, WANG Bo, CHEN Xiaofei, et al. Optimization of blocking agent for water-based drilling fluids in long horizontal shale drilling[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 17(5): 47-50.
- [3] 徐同台, 卢淑芹, 何瑞兵, 等. 钻井液用封堵剂的评价方法及影响因素[J]. 钻井液与完井液, 2009, 26(2): 60-62.
XU Tongtai, LU Shuqin, HE Ruibing, et al. Methods for evaluating drilling fluid sealing and plugging agents and the influential factors[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2009, 26(2): 60-62.
- [4] 刘刚, 徐同台, 毛亚军, 等. 延长气田强抑制强封堵胺基钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2014, 31(3): 39-42.
LIU Gang, XU Tongtai, MAO Yajun, et al. Amine-based drilling fluid having high inhibitive and sealing capacities used in Yanchang Gasfield[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2014, 31(3): 39-42.
- [5] 刘音, 崔远众, 张雅静, 等. 钻井液用页岩抑制剂研究进展[J]. 石油化工应用, 2015, 34(7): 7-10.
LIU Yin, CUI Yuanzhong, ZHANG Yajing, et al. Research progress of shale inhibition for drilling fluid[J]. Petrochemical Industry Application, 2015, 34(7): 7-10.
- [6] 杨小华. 提高井壁稳定性的途径及水基防塌钻井液研究与应用进展[J]. 中外能源, 2012, 17(5): 53-57.
YANG Xiaohua. The way of improving wellbore stability and progress of research and application of water-based anti-sloughing drilling fluid[J]. Sino-Global Energy, 2012, 17(5): 53-57.
- [7] 王力, 盟尚志, 陈万钢, 等. 提高煤层强度的钻井液防塌封堵剂的研制[J]. 钻井液与完井液, 2018, 35(5): 46-49.
WANG Li, MENG Shangzhi, CHEN Wangang, et al. Development and study on an anti-sloughing plugging agent used in drilling fluids to strengthen coal beds[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2018, 35(5): 46-49.
- [8] 徐加放, 邱正松, 黄晓东. 谈钻井液封堵特性在防止井壁坍塌中的作用[J]. 钻井液与完井液, 2008, 25(1): 3-5.
XU Jiafang, QIU Zhengsong, HUANG Xiaodong. Application of the sealing property of drilling fluids in bore hole stabilization[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2008, 25(1): 3-5.
- [9] 王建华, 鄢捷年, 苏山林. 硬脆性泥页岩井壁稳定评价新方法[J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(2): 28-31.
WANG Jianhua, YAN Jienian, SU Shanlin. New method for evaluating borehole stability in brittle shale[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006, 28(2): 28-31.
- [10] 朱宽亮, 卢淑芹, 徐同台, 等. 岩心封堵率与返排解堵率影响因素的试验研究[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(4): 61-64.
ZHU Kuanliang, LU Shuqin, XU Tongtai, et al. Laboratory tests of factors effecting core sample blocking ratio and flow back break down ratio[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 39(4): 61-64.
- [11] 张勇, 褚奇, 陈勇, 等. 低荧光防塌封堵剂的研制及评价[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(3): 45-47.
ZHANG Yong, CHU Qi, CHEN Yong, et al. Development and evaluation of the low fluorescence anti-soughing blocking agent[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(3): 45-47.
- [12] 王中华. 页岩气水平井钻井液技术的难点及选用原则[J]. 中外能源, 2012, 17(4): 43-46.
WANG Zhonghua. Difficulty and application principle of the drilling fluid technology of horizontal wells for shale gas[J]. Sino-Global Energy, 2012, 17(4): 43-46.
- [13] 张凡, 许明标, 刘卫红, 等. 一种油基膨胀封堵剂的合成及其性能评价[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2010, 7(3): 507-509.
ZHANG Fan, XU Mingbiao, LIU Weihong, et al. Synthesis and performance evaluation of an oil-based expansion plugging agent[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2010, 7(3): 507-509.
- [14] 闫传梁, 邓金根, 蔚宝华, 等. 页岩气储层井壁坍塌压力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1595-1602.
YAN Chuanliang, DENG Jingen, WEI Baohua, et al. Research on collapsing pressure of gas shale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1595-1602.
- [15] 李之军, 蒲晓林, 王贵, 等. 低荧光钻井液防塌封堵新材料及其作用机理[J]. 天然气工业, 2013, 33(9): 97-101.
LI Zhijun, PU Xiaolin, WANG Gui, et al. A novellow-fluorescence anti-sloughing agent for a drilling fluid system and its mechanism analysis[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(9): 97-101.
- [16] 黄书红, 蒲晓林, 陈勇, 等. 新型无荧光防塌封堵剂 HSH 的研制及机理研究[J]. 钻井液与完井液, 2013, 30(1): 9-12.
HUANG Shuhong, PU Xiaolin, CHEN Yong, et al. Development and mechanism research on novel bloomless shale inhibitor HSH[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2013, 30(1): 9-12.

(编辑 荐华)