



钻井液中除硫剂有效含量检测方法及其现场试验

舒小波 朱金智 陶怀志

A Detection Method for Effective Content of Sulfide Scavenger in Drilling Fluids and Its Field Test

SHU Xiaobo, ZHU Jinzhi, TAO Huaizhi

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021109>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深层油气井井筒完整性检测方法

A Method for Wellbore Integrity Detection in Deep Oil and Gas Wells

石油钻探技术. 2021, 49(5): 114–120 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021127>

塔里木油田跃满西区块高温恒流变钻井液研究与现场试验

Study and Field Test of Drilling Fluid with Constant Rheology at High Temperature in West Yueman Block, Tarim Oilfield

石油钻探技术. 2021, 49(5): 39–45 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021037>

钻井液环保润滑剂SMLUB-E的研制及应用

Development and Application of an Environmental-Friendly Drilling Fluid Lubricant SMLUB-E

石油钻探技术. 2020, 48(1): 34–39 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019113>

基于特性菱形图的钻井液用膨润土优选方法

An Optimization Method for Bentonite Used for Drilling Fluid Based on Characteristic Diamond Diagram

石油钻探技术. 2018, 46(4): 59–64 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018108>

低活度强抑制封堵钻井液研究与应用

Research and Application of Plugging Drilling Fluid with Low-Activity and High Inhibition Properties

石油钻探技术. 2018, 46(1): 44–48 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018031>

顺北油气田鹰1井超深井段钻井液关键技术

Key Drilling Fluid Technology in the Ultra Deep Section of Well Ying-1 in the Shunbei Oil and Gas Field

石油钻探技术. 2019, 47(3): 113–120 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019068>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2021109

引用格式: 舒小波, 朱金智, 陶怀志. 钻井液中除硫剂有效含量检测方法及其现场试验 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(6): 67-72.

SHU Xiaobo, ZHU Jinzhi, TAO Huaizhi. A detection method for effective content of sulfide scavenger in drilling fluids and its field test [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(6): 67-72.

钻井液中除硫剂有效含量检测方法及其现场试验

舒小波^{1,2}, 朱金智³, 陶怀志^{1,2}

(1. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院, 四川广汉 618300; 2. 油气田应用化学四川省重点实验室, 四川广汉 618300; 3. 中国石油塔里木油田分公司油气工程研究院, 新疆库尔勒 841000)

摘 要: 在含硫油气井钻井过程中, 有效检测钻井液中除硫剂含量的变化, 维持钻井液中除硫剂的有效含量, 对于保障钻井安全至关重要。为此, 基于硫化物反应试剂与锌基除硫剂间的线性作用关系, 采用间接法, 建立了除硫剂含量与硫化物反应试剂消耗率的关系式, 滴定分析了钻井液中硫化物反应试剂的消耗率, 基于此提出了钻井液中除硫剂有效含量检测方法。对该检测方法的准确性进行了验证, 结果表明: 该方法可有效检测钻井液中的除硫剂含量, 测定结果相对误差的绝对值 < 5%。对该检测方法进行了现场试验, 试验结果表明, 该方法能有效检测钻井液中除硫剂含量的变化, 达到及时有效维护钻井液中除硫剂有效含量的目的。研究结果表明, 该检测方法满足现场工程应用要求, 可有效保障含硫井段安全钻进, 同时也能避免除硫剂加量过多造成的浪费。

关键词: 钻井液; 除硫剂; 含量测定; 检测方法; 含硫井

中图分类号: TE254⁺.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2021)06-0067-06

A Detection Method for Effective Content of Sulfide Scavenger in Drilling Fluids and Its Field Test

SHU Xiaobo^{1,2}, ZHU Jinzhi³, TAO Huaizhi^{1,2}

(1. Drilling & Production Engineering Technology Research Institute, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Guanghan, Sichuan, 618300, China; 2. Oil & Gas Field Applied Chemistry Key Laboratory of Sichuan Province, Guanghan, Sichuan, 618300, China; 3. Oil & Gas Engineering Research Institute, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang, 841000, China)

Abstract: When drilling sulfur-containing oil and gas wells, safe drilling requires effective detecting the change of sulfide scavenger content and maintaining the effective concentration of it in drilling fluids. Given this, according to the linear relationship between sulfide reaction reagent and zinc-based sulfide scavenger, a relational expression utilized the indirect method was established for the content of sulfide scavenger and the consumption rate of sulfide reaction reagent. In addition, the consumption rate of sulfide reaction reagent in drilling fluids was analyzed by titration. Based on the above works, the detection method for effective content of sulfide scavenger was proposed and its accuracy was verified. The results showed that the detection method could effectively detect the content of sulfide scavenger in drilling fluids, with an absolute value of relative measurement error less than 5%. The result of the field test of the method showed that it could effectively detect the content change of sulfide scavenger in drilling fluids, thereby effectively maintaining the effective content of sulfide scavenger in drilling fluids in time. The research results demonstrate that the detection method can meet the requirements of field engineering application, effectively guarantee the safe drilling of sulfur-containing well sections, and avoid the waste of excessive use of the sulfide scavenger.

Key words: drilling fluid; sulfide scavenger; content detection; detection method; sulfur-containing well

收稿日期: 2021-02-02; 改回日期: 2021-09-02。

作者简介: 舒小波 (1985—), 男, 四川泸县人, 2008 年毕业于西南石油大学应用化学专业, 2011 年获西南石油大学油气井工程专业硕士学位, 2014 年获西南石油大学油气井工程专业博士学位, 高级工程师, 主要从事油田应用化学方向的研究工作。E-mail: shuxb921@126.com。

基金项目: 中国石油集团公司重大工程项目“含硫井安全作业关键技术研究与应用”(编号: 2018E-2104) 部分研究内容。

在含硫油气井钻井过程中,为避免地层中硫化氢随钻井液循环至地面,导致出现钻具腐蚀、硫化氢中毒等系列安全问题,通常在钻井液中添加除硫剂,以保障含硫井段的钻井安全^[1-6]。实际钻进中,由于受各种因素影响(如钻井液循环损耗、与钻井液处理剂高温受热分解产物相作用、钻井液中硫化氢污染消耗等),钻井液中的除硫剂含量不断降低。因此,及时有效地维护钻井液中的除硫剂含量,是保障含硫井安全钻进的重要措施^[7-10]。然而,目前仅能通过硫化氢污染检测判断除硫剂的消耗情况,无法直接检测钻井液中除硫剂含量的变化,使钻井液中除硫剂含量的维护往往发生在硫化氢污染以后,极易引发安全风险^[11-14]。同时,现场实际操作中,除硫剂加量的维护处理主要根据现场工程师的过往经验,易导致如下情况:要么除硫剂加量偏低,无法有效控制地层中的硫化氢气体;要么加量偏高,导致资源浪费。针对上述情况,基于现场常用的锌基除硫剂,笔者提出了基于有效检测钻井液中除硫剂含量变化的除硫剂有效含量检测方法,对其进行了原理分析、操作介绍、准确性室内分析,并通过现场试验证明了该方法的有效性,为含硫井安全钻进提供了有效保障。

1 除硫剂有效含量检测原理

钻进含硫井段时,由于固体除硫剂在钻井液中溶解度低、钻井液自身成分复杂、除硫剂除硫以后以硫化物沉淀形式存在于钻井液固相中,增大了检测钻井液中除硫剂含量的难度。针对该情况,采用间接法实现钻井液中锌基除硫剂有效含量的测定,即通过测定某反应试剂的含量间接获取锌基除硫剂的有效含量。

在实验室采用硫化物电位滴定分析法^[15],分别测定了不同锌基除硫剂含量下质量浓度为 3 588.80 和 6 155.52 mg/L 反应试剂的消耗率(反应试剂为特制硫化物反应试剂),结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出,当硫化物反应试剂质量浓度大于除硫剂消耗量时,硫化物反应试剂的消耗率与锌基除硫剂的含量呈线性关系,其拟合方程的决定系数分别达到 0.989 4 和 0.991 6,说明测试数据与拟合方程的吻合度很高。分析认为,这是因为,在过量的硫化物反应试剂溶液中,定量的除硫剂仅能消耗定量的硫化物反应试剂。因此,可以在测试样品中加入定量的硫化物反应试剂,待两者完全作用以

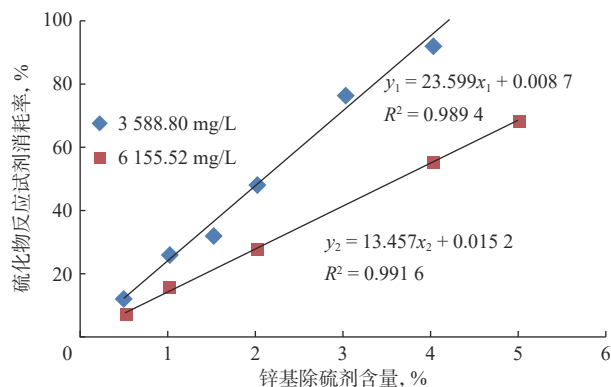


图 1 硫化物反应试剂消耗率与锌基除硫剂含量的关系

Fig. 1 Relationship between consumption rate of sulfide reaction reagent and content of zinc-based sulfide scavenger

后,采用硫化物电位滴定分析法测定剩余硫化物反应试剂的含量,获取硫化物反应试剂的消耗率,最终根据硫化物反应试剂消耗率与除硫剂含量的线性关系,获取测试样品中除硫剂的有效含量。

2 除硫剂有效含量检测方法

采用间接法测定钻井液中除硫剂的有效含量时,不仅要考虑操作的时效性,还需考虑测试结果的有效性。结合硫化物电位滴定分析法,通过测试样品预处理条件的筛选、硫化物反应试剂消耗率的测定、除硫剂含量与硫化物反应试剂消耗率关系式的建立,最终形成了钻井液中除硫剂有效含量检测方法。

2.1 检测需要的材料和仪器

材料:氢氧化钠;0.100 mol/L 标准硝酸铅溶液,根据需要稀释成 0.010 mol/L 或 0.001 mol/L 的标准硝酸铅滴定溶液;SAOB 贮备液,滴定分析时将其与等体积去离子水混合配制成 SOAB(1+1)溶液;硫化物反应试剂,质量浓度 $\geq 6\ 000$ mg/L(以硫离子计,下同),使用时采用硫化物电位滴定分析法进行标定。

仪器:ZDJ-5 型电位滴定仪,217 型饱和甘汞双盐桥参比电极,P-Ag-S-1-01 型银硫离子选择电极,磁力搅拌器,测量天平。

2.2 消耗率关系式的建立

除硫剂含量与硫化物反应试剂消耗率的关系式的建立步骤为:

1)称取 4.0 g 氢氧化钠,放入磨口锥形瓶或类似容器中,并加入 25 mL 蒸馏水或去离子水使其溶解。

2)以 25 mL 蒸馏水或去离子水为基准,加质量分数为 1% 的除硫剂于磨口锥形瓶或类似容器中。

3) 加 25 mL 硫化物反应试剂溶液于磨口锥形瓶或类似容器中, 其质量浓度记为 C_1 。

4) 将搅拌子放入磨口锥形瓶或类似容器中密封处理, 并置于磁力搅拌器上, 在室温 ($<30\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下, 以 $300\sim 500\text{ r/min}$ 搅拌速度搅拌 10 min 后, 采用快速滤纸, 利用中压失水仪, 压取混合液的滤液。

5) 将参比电极、选择电极与电位滴定仪相连, 打开电源, 进入测定界面; 测量杯中, 加入 25 mL SOAB (1+1) 溶液, 移取 1~5 mL 混合液滤液, 随后补加蒸馏水至总液量为 50 mL; 用标准硝酸铅溶液作为滴定液, 根据硫化物电位滴定分析法, 测定混合液滤液中的硫化物反应试剂含量 C_2 , 并按式 (1) 计算出质量分数为 1% 的除硫剂所对应的硫化物反应试剂消耗率。

$$\eta = \frac{C_1 - 2C_2}{C_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为硫化物反应试剂的消耗率, %; C_1 为硫化

物反应试剂溶液质量浓度, mg/L; C_2 为样品处理后测定滤液中剩余硫化物反应试剂质量浓度, mg/L。

6) 重复操作步骤 1)~5), 并将步骤 2) 中的除硫剂质量分数提高至 2%、3% 和 4% 等时, 即可获得除硫剂质量分数分别为 2%、3%、4% 等条件下硫化物反应试剂的消耗率。

7) 根据除硫剂在不同质量分数下的硫化物反应试剂消耗率, 可建立除硫剂含量与硫化物反应试剂消耗率的关系式。

2.3 除硫剂有效含量检测步骤

测定钻井液中除硫剂有效含量时, 首先称取 4.0 g 氢氧化钠放入磨口锥形瓶或类似容器中, 随后加入 25 mL 待测钻井液, 按消耗率关系式建立操作步骤 3)~5) 获取当前条件下的硫化物反应试剂消耗率 η , 将该消耗率代入建立的除硫剂含量与硫化物反应试剂消耗率关系式中, 即可获得钻井液中除硫剂的有效含量, 具体操作步骤如图 2 所示。

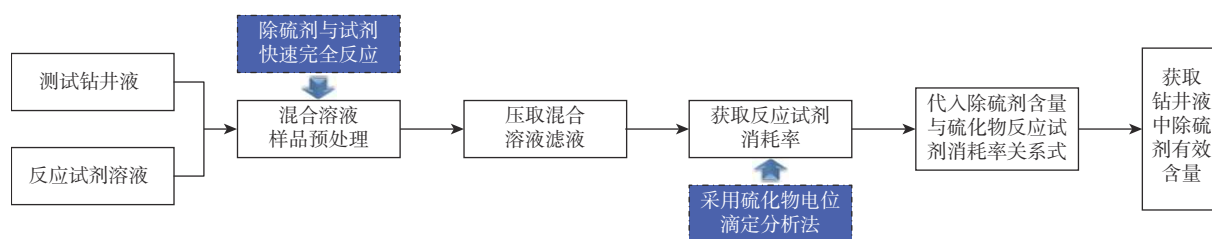


图 2 钻井液中除硫剂有效含量检测操作步骤

Fig.2 Operation steps for detection of sulfide scavenger effective content in drilling fluids

3 检测方法准确性室内分析

在实验室内, 采用钻井液中除硫剂有效含量检测方法, 对 4 口井含硫井段钻进中的钻井液样品 (编号 1#、2#、3#和 4#) 进行了测定, 分析了样品中的锌基除硫剂含量, 通过人为定量加入锌基除硫剂对该方法的准确性进行了分析验证。

3.1 消耗率关系式

针对选用的锌基除硫剂, 采用质量浓度为 6 000 mg/L 的硫化物反应试剂溶液, 按前述消耗率关系式的建立步骤, 获得了不同除硫剂含量下硫化物反应试剂的消耗率, 结果如图 3 所示。

钻井液中除硫剂有效含量测定值 (拟合曲线的决定系数为 0.997 1) 可表示为:

$$\omega = \frac{\eta - 0.0236}{18.24} \times 100\% \quad (2)$$

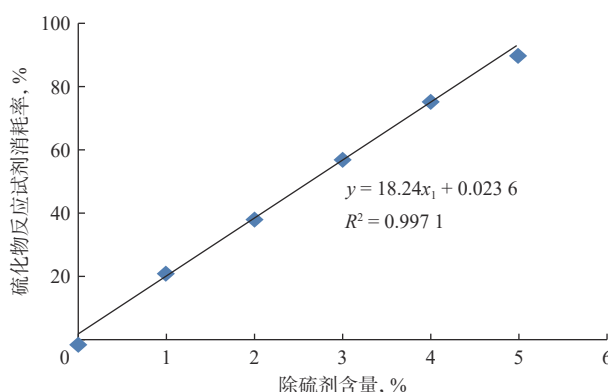


图 3 除硫剂含量与硫化物反应试剂消耗率的关系曲线

Fig.3 Relationship between sulfide scavenger content and consumption rate of sulfide reaction reagent

式中: ω 为钻井液中除硫剂有效含量的测定值, %。

3.2 钻井液中除硫剂有效含量

按照钻井液中除硫剂有效含量检测步骤, 获取了上述 4 组样品对应硫化物反应试剂的消耗率, 再用建立

的除硫剂含量与硫化物反应试剂消耗率的关系式,计算了4组样品对应除硫剂的有效含量,结果见表1。

表1 钻井液中除硫剂有效含量检测结果

Table 1 Detection result of sulfide scavenger effective content in drilling fluids

样品编号	硫离子消耗率, %	除硫剂有效含量, %
1#	4.18	0.10
2#	77.51	4.12
3#	12.21	0.54
4#	17.50	0.83

表2 钻井液中除硫剂有效含量检测方法误差分析结果

Table 2 Error analysis result of detection method for sulfide scavenger effective content in drilling fluids

样品编号	除硫剂加量, %			平行测定1			平行测定2		
	原加量	补加量	总加量	反应试剂消耗率, %	除硫剂有效含量, %	相对误差, %	反应试剂消耗率, %	除硫剂有效含量, %	相对误差, %
1#	0.10	2.00	2.10	40.30	2.08	-0.95	41.58	2.15	2.38
2#	4.12	0.50	4.62	84.08	4.48	-3.03	82.98	4.42	-4.33
3#	0.54	1.00	1.54	30.27	1.53	-0.65	29.90	1.51	-1.95
4#	0.83	3.00	3.83	70.21	3.72	-2.87	69.97	3.71	-3.13

从表2可以看出,该检测方法检测结果相对误差的绝对值均小于5%,满足现场检测要求。

4 现场试验

钻井液中除硫剂有效含量检测方法在X井进行了现场试验。X井为一口斜井,其三开井段设计井深5 590~5 966 m,钻遇奥陶系良里塔格组与鹰山组碳酸盐岩地层。该井所钻储层天然气具有低含氮气、中含二氧化碳、高含硫化氢的特征,与该井同一断裂带的已钻邻井的硫化氢含量见表3。

表3 X井的邻井硫化氢含量统计结果

Table 3 Statistical result of hydrogen sulfide content in adjacent wells

井号	层位	井段/m	硫化氢含量/(mg·m ⁻³)
Y井	鹰山组	5 805~6 125	10 080~17 280
H井	鹰山组	5 918~7 165	8 640~21 600
Z井	鹰山组	5 083~6 484	5 760~6 430

根据表3中数据,预测X井的硫化氢含量为8 340~20 850 mg/m³,属于中含硫井。因此,X井钻井过程中应做好防硫、防毒等安全预案,并根据设计要求,在钻进目的层前,向钻井液中加入1%的除

硫剂,由表1可知,采用提出的钻井液中除硫剂有效含量检测方法,可对钻井液中除硫剂的含量进行测定。检测得知,上述4组样品中,1#样品的除硫剂几乎消耗完毕,需向钻井液中及时补充除硫剂。

3.3 检测结果的误差

为进一步验证钻井液中除硫剂有效含量检测方法的准确性,继续采用上述4组样品,根据钻井液取样体积定量加入一定质量分数的锌基除硫剂,测定加入除硫剂以后钻井液中除硫剂的有效含量。每个样品采用不同的两个人平行测定,试验数据及结果见表2。

硫剂,进入目的层以后补加3%的除硫剂。

X井三开实钻井段为5 599~5 862 m,钻进过程中采用钻井液中除硫剂有效含量检测方法监测钻井液中除硫剂的有效含量,并根据监测结果进行了除硫剂加量维护处理,同时同步开展钻井液中硫化氢污染检测分析。对钻井液取样分析,相关节点检测数据见图4。

如图4(a)所示,未进入目的层前,钻井过程中无气侵现象,钻井液中未检测出硫化氢污染,但2次添加除硫剂后,除硫剂均存在消耗。分析认为,这是因为钻井液循环消耗、日常性能维护、处理剂高温分解产物消耗等因素影响,导致钻井液中除硫剂有效含量逐渐降低,通过相关数据分析,该井除硫剂正常日损耗量在0.3%左右。

如图4(b)所示,考虑钻至井深5 794 m以深除硫剂有效含量降至0.41%,同时进入目的层前需要按设计要求补加3%的除硫剂,为保障目的层安全钻进,及时补充了除硫剂,实现了目的层正常钻进,并使井漏处理过程中的除硫剂有效含量维持在2.5%以上。

由图4可知,本文提出的钻井液中除硫剂有效含量检测方法,可有效检测出钻井液中除硫剂含量的变化情况,指导现场除硫剂加量维护处理,既能

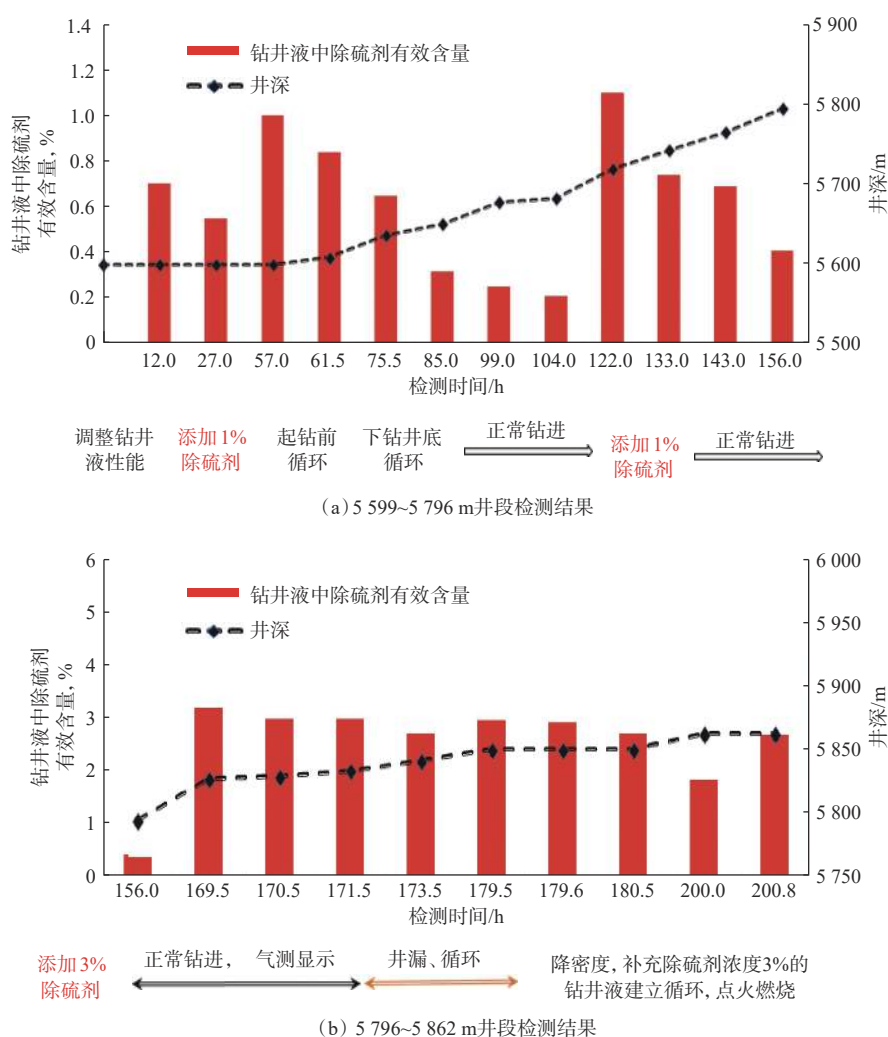


图4 钻井液中除硫剂有效含量检测结果

Fig.4 Detection result of sulfide scavenger effective content in drilling fluids

保障含硫井段安全钻进,又能避免除硫剂加量过多造成浪费。同时,还可监测钻井液中除硫剂点有效含量进行有效监测,保障钻井液处理硫化氢的能力。

方法试验,试验表明,该检测方法可定量检测钻井液中除硫剂含量的变化情况,有效指导现场钻井液中除硫剂含量维护,保障含硫井段安全钻进。

5 结论与认识

1)根据锌基除硫剂与硫化物反应试剂的线性作用关系,采用间接法,通过建立除硫剂含量与硫化物反应试剂消耗率的关系式、滴定分析钻井液中硫化物反应试剂消耗率,提出了钻井液中除硫剂有效含量检测方法。

2)在实验室内,对钻井液中除硫剂有效含量检测方法的准确性进行了验证。验证结果表明,该检测方法可有效检测钻井液中除硫剂的含量,测定结果相对误差的绝对值<5%。

3)在现场进行了钻井液中除硫剂有效含量检测

参考文献

References

- [1] 徐龙君,毕智明.高含硫天然气钻井环境风险评价及防范措施[J].*油气田环境保护*,2013,23(1):46-49,62.
XU Longjun, BI Zhiming. Environmental risk assessment and preventive measures of high-sulfur gas drilling[J]. *Environmental Protection of Oil & Gas Fields*, 2013, 23(1): 46-49,62.
- [2] 周文,兰伟,曹献龙,等.CO₂-H₂S环境下钻杆腐蚀机理与防护技术的研究进展[J].*电镀与涂饰*,2017,36(3):131-136.
ZHOU Wen, LAN Wei, CAO Xianlong, et al. Research progress of corrosion mechanism and protection technologies for drill pipe in CO₂-H₂S environment[J]. *Electroplating & Finishing*, 2017, 36(3): 131-136.
- [3] 罗曦.大牛地奥陶系风化壳低含硫气井井筒除硫技术研究[J].重

- 庆科技学院学报(自然科学版), 2017, 19(1): 85–88.
- LUO Xi. Research on desulfurization technology for Ordovician weathering crust in Daniudi low sulfur gas field[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Sciences Edition), 2017, 19(1): 85–88.
- [4] 邓昌松, 张宗谭, 冯少波, 等. 高含硫、大漏、超深水平井钻完井技术: 以塔里木油田中古 10HC 井为例 [J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(1): 27–32.
- DENG Changsong, ZHANG Zongtan, FENG Shaobo, et al. Drilling and completion technologies suitable for ultradeep horizontal wells of high sulfur content and serious circulation loss: a case study on Well 10HC of Middle Paleozoic in Tarim Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(1): 27–32.
- [5] 李嘉奇, 余有金, 钟波, 等. 长膏盐岩段小间隙套管固井技术与认识: 以楼探 1 井 $\phi 168.3$ mm 尾管悬挂固井为例 [J]. 天然气勘探与开发, 2019, 42(4): 133–139.
- LI Jiaqi, YU Youjin, ZHONG Bo, et al. Small-clearance casing cementing in long gypsum-salt intervals: an example from 168.3 mm liner suspension cementing in Loutan 1 Well[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2019, 42(4): 133–139.
- [6] 曾浩, 常启帆, 张旺, 等. 除硫剂井筒内除硫效果动态评价方法 [J]. 油气井测试, 2020, 29(1): 74–78.
- ZENG Hao, CHANG Qifan, ZHANG Wang, et al. Dynamic evaluation method of sulfur removal effect in the wellbore of sulfur removal agent[J]. Well Testing, 2020, 29(1): 74–78.
- [7] 万立夫, 李根生, 田守增, 等. 钻井过程中硫化氢侵入井筒后的赋存状态研究 [J]. 石油钻探技术, 2013, 41(6): 29–33.
- WAN Lifu, LI Gensheng, TIAN Shouceng, et al. Occurrence state of hydrogen sulfide invading into wellbore during drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(6): 29–33.
- [8] 王均, 蒲晓林, 刘伟, 等. 葡萄糖酸亚铁清除钻井液中硫化氢的实验研究与评价 [J]. 钻采工艺, 2020, 43(3): 97–99, 7.
- WANG Jun, PU Xiaolin, LIU Wei, et al. Experimental study and evaluation of ferrous gluconate removing hydrogen sulfide from drilling fluid[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(3): 97–99, 7.
- [9] 奚宏军. 钻井液有毒硫化物分析及处理方法研究 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13(8): 2198–2202.
- XI Hongjun. Study on the toxic sulfide of oilfield drilling fluids and handled method[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(8): 2198–2202.
- [10] 卫伟, 张洁, 朱宝忠, 等. 钻井液用除硫方法研究进展 [J]. 化工技术与开发, 2020, 49(1): 25–30, 41.
- WEI Wei, ZHANG Jie, ZHU Baozhong, et al. Research progress of desulfurization method for drilling fluid[J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2020, 49(1): 25–30, 41.
- [11] 王晓丹. 一种硫化氢侵入钻井液的在线连续监测方法 [J]. 录井工程, 2014, 25(1): 37–39, 91.
- WANG Xiaodan. An on-line continuous monitoring method for hydrogen sulfide in drilling fluid[J]. Mud Logging Engineering, 2014, 25(1): 37–39, 91.
- [12] 王静, 柳爱华, 程清, 等. 自动电位滴定仪在硫化物含量测定中的应用 [J]. 分析仪器, 2014(4): 26–28.
- WANG Jing, LIU Aihua, CHENG Qing, et al. Determination of sulfide by automatic potentiometric titration[J]. Analytical Instrumentation, 2014(4): 26–28.
- [13] 舒小波, 王娟, 曾婷. 水基钻井液中硫化氢污染快速检测方法 [J]. 石油地质与工程, 2017, 31(5): 125–129.
- SHU Xiaobo, WANG Juan, ZENG Ting. Rapid detection of hydrogen sulphide pollution in water-based drilling fluid[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2017, 31(5): 125–129.
- [14] 张亚文. 现场与实验室 H_2S 检测方法的比对研究 [J]. 油气田地面工程, 2018, 37(5): 23–25.
- ZHANG Yawen. Comparative study on onsite and laboratory detection methods for H_2S [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2018, 37(5): 23–25.
- [15] 朱金智, 舒小波, 张绍俊, 等. 钻井液中可溶性硫化物快速定量检测方法研究 [J]. 当代化工, 2018, 47(6): 1298–1301.
- ZHU Jinzhi, SHU Xiaobo, ZHANG Shaojun, et al. Study on the rapid quantitative determination of soluble sulfide in drilling fluids[J]. Contemporary Chemical Industry, 2018, 47(6): 1298–1301.

[编辑 令文学]