

# 固结钻井液对湘西北页岩气储层的护壁机理研究

田明锦<sup>1,2</sup>, 孙平贺<sup>1,2</sup>, 曹 函<sup>1,2</sup>, 武驿铎<sup>3</sup>, 张绍和<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南长沙410083; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙410083; 3. 加拿大戴尔蒙斯大学, 哈里法克斯 B3H4R2)

**摘要:**文中提出了一种液态离子固结剂,该处理剂能够有效提高页岩气井井壁的力学强度。通过开展室内实验以及进行相关分析,初步了解了添加液态离子固结剂的钻井液的基本性能,并探究了该体系钻井液对炭质页岩膨胀的抑制性以及其对炭质页岩力学强度的影响。发现钻井液滤失量随液态离子固结剂含量的增加先减小后增大;在各配方钻井液中的压制岩心膨胀率明显低于在清水中的,但液态离子固结剂含量增加使得钻井液中的压制岩心膨胀率越来越高;各钻井液处理的岩粉所制成的剪切试样抗剪强度高于经清水处理的,随着液态离子固结剂含量的增加,试样抗剪强度总体上先升高再下降,且试样单轴抗压强度增大。实验结果表明,在适宜的含量范围内,液态离子固结剂有助于增强钻井液维护井壁稳定的能力。

**关键词:**页岩气;钻井液;井壁稳定性;岩心膨胀率;湘西北

中图分类号:P634.6 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2016)10-0193-04

**Preliminary Research on Protective Performance of a New Drilling Fluid for Shale Gas Reservoir in Northwest Hunan/TIAN Ming-jin<sup>1,2</sup>, SUN Ping-he<sup>1,2</sup>, CAO Han<sup>1,2</sup>, WU Yi-duo<sup>3</sup>, ZHANG Shao-he<sup>1,2</sup>** (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education, Changsha Hunan 410083, China; 2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China; 3. Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Canada B3H4R2)

**Abstract:** This paper presents a kind of liquid ionic consolidation agent, and this agent can effectively improve mechanical strength of shale gas wells. Through laboratory experiments, the basic properties of the drilling fluid treated with the liquid ionic consolidation agent and inhibition of this kind of drilling fluid on the expansion of carbonaceous shale and effects of this kind of drilling fluid on mechanical strength of carbonaceous shale were uncovered. The drilling fluid's filtration decreased and then increased with the increase of the concentration of the liquid ionic consolidation agent. The expansion rate of the compressed core in the drilling fluid was lower than that in clear water. But with the increase of the liquid ionic consolidation agent, the expansion rate of the compressed core in the drilling fluid was higher and higher. The shear strength of the shear specimens treated with the drilling fluid was higher than that treated with water. With the increase of the liquid ionic consolidation agent, the shear strength of shear specimens increased and then decreased, and the uniaxial compressive strength of the samples were increased. The results demonstrate that liquid ionic consolidation agent in suitable content range helps to enhance the ability of drilling fluid to maintain the stability of borehole wall.

**Key words:** shale gas; drilling fluid; borehole stability; expansion rate of the core; Northwest Hunan

## 0 引言

液态离子固结剂是一种新型环保工程材料,其主要成分包括氯化钾、碳酸钠、硫酸铝,以及三乙醇胺、磺化褐煤、磺化丙酮甲醛缩合物、木质素磺酸钠、聚甲基硅氧烷等。很多学者针对液态离子固结剂已经进行了大量的研究工作,并取得了多方面的研究

成果<sup>[1-4]</sup>。现在,许多高速公路、水利工程、机场等建设项目已经将液态离子固结剂大量应用于工程实践中<sup>[5]</sup>,并且取得了十分显著的工程效果。另一方面,钻井工艺中的井壁稳定性维护与上述工程建设中的土壤固化有诸多相似之处,尤其在水敏性地层中钻进时,抑制地层吸水膨胀、控制井壁岩土强度是

收稿日期:2016-07-16; 修回日期:2016-09-07

**基金项目:**国家自然科学基金“含煤层气储层物性与压裂液微观特性动态耦合作用机理研究”(编号:41302124)、“微观和宏观下离子稳定剂对煤层气钻孔的化学与力学护壁机理研究”(编号:41602372);湖南省自然科学基金“Hunan Provincial Natural Science Foundation of China”(编号:13JJ6002);国土资源部复杂条件钻采技术重点实验室开放基金项目“页岩气随钻原位探测及储层保护钻井液技术研究”(编号:DET201612)

**作者简介:**田明锦,男,侗族,1991年生,硕士,地质资源与地质工程专业,主要从事钻井液技术研究,湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号中南大学本部地学楼305室,mingjin\_TIAN@163.com。

**通讯作者:**孙平贺,男,汉族,1982年生,硕士研究生导师,博士,地质工程专业,主要从事非开挖、矿产地质及非常规能源钻进技术的教学与科研工作,pinghesun@csu.edu.cn。

维护井壁稳定的重要途径。液态离子固结剂溶于水后,通过离子交换作用可形成低水合度、高粘结力的高价离子及其水化合物,提高岩土体力学强度;同时,形成的水化合物能够有效充填裂隙,从而加固岩土体。利用液态离子固结剂这样的特点,笔者将其应用于钻井液研究中,通过开展不同的实验,探究了液态离子固结剂对炭质页岩的作用特点,以期为今后开展相关工作提供一些参考。

## 1 区域地质背景

湘西北地区处于扬子准地台东南缘上扬子台褶皱带与江南地轴结合部位的武陵褶断束内<sup>[6]</sup>,从震旦纪到早古生代主要表现为克拉通海相盆地,沉积了系列海相层系<sup>[7-9]</sup>。从三叠系开始,由于区域构造演化,盆地发生构造反转,发育了系列逆冲推覆构造和类前陆盆地,后再经过侏罗和喜马拉雅两期运动改造,形成现今以北北东或北东走向为主的褶皱和断裂体系,地形上多表现为高山峻岭,沟谷密布<sup>[10-11]</sup>。该区内出露的地层除缺失上志留统和下泥盆统外,从中元古界冷家溪群至第四系的其他地层均有分布,总体上比较齐全<sup>[12]</sup>。在早古生代沉积的海相地层中,下寒武统牛蹄塘组以黑色页岩、炭质页岩、黑色硅质页岩为主,系深海一半深海沉积,分布广、埋深大、沉积厚度大,是上扬子板块一套主力生烃层系<sup>[13-15]</sup>。

## 2 储层特征及钻井液体系

实验所用下寒武统牛蹄塘组炭质页岩原样取自湖南省常德市某现场。采用 XRD 测定岩样各矿物组分及含量,结果见表 1。

表 1 炭质页岩矿物成分 XRD 分析结果 %

石英含量	云母含量	长石含量	蒙脱石含量	锐钛矿含量	非晶质含量
24.57	13.64	16.82	11.58	5.26	28.13

由表 1 不难看出,在所采集的岩石中,石英、长

石等脆性矿物含量丰富,粘土矿物含量也较高。

### 2.1 储层特征

湘西北下寒武统牛蹄塘组蕴藏着丰富的石煤资源,也是湖南页岩气赋存的主要层位之一。该层位炭质页岩中的矿物成分以脆性矿物、粘土矿物为主,这 2 类矿物含量之和超过 50%。岩层中蜂窝状的有机质丰富,有机质主要呈分散状和条带状分布,其内部纳米级孔隙发育。岩石的基质孔隙主要由构造裂缝、有机质微孔隙和不稳定矿物溶蚀孔组成。有相关研究表明:湘西北下寒武统牛蹄塘组含气泥页岩孔隙度、渗透率均较低,孔隙度为 0.6%~11.7%,平均 4.6%,而渗透率平均值仅为 0.014 mD,其孔隙度、渗透率大小主要受构造裂缝发育程度的影响。简而言之,该层位总体上呈现出“低压、低渗、高比表面积”的特征<sup>[16-19]</sup>。

### 2.2 钻井液体系及其性质

笔者采用植物胶、聚丙烯酰胺、液态离子固结剂等材料,探究了该钻井液体系对湘西北下寒武统牛蹄塘组炭质页岩的作用情况。

所用液态离子固结剂是一种磺化油树脂类电解质,它在水中能够迅速离子化,通过与井壁岩土表面发生离子交换作用,生成具有高粘结力的铝离子以及相应的水合物,有助于提高井壁强度;此外,通过一系列物理化学反应,液态离子固结剂还能将粘土矿物的结合水去除,使其由亲水性转变为憎水性<sup>[20]</sup>,这无疑将减弱地层的水敏性,有助于改善地层的工程性质。

按照表 2 所示的配方配制相应的钻井液,并测试了钻井液的密度、滤失性、pH 值 3 个性能指标,结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出,由于各配方钻井液只有液态离子固结剂含量的差异,所以密度几乎一致。钻井液的 pH 值随着液态离子固结剂含量的增加而增大,但 pH 值总体处于 9~11 的范围,能维持一个较

表 2 钻井液配方及性能

配方编号	植物胶含量/ (kg·m <sup>-3</sup> )	聚丙烯酰胺含量/ (kg·m <sup>-3</sup> )	液态离子固结剂含量/ (L·m <sup>-3</sup> )	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	表观粘度/ (mPa·s)	塑性粘度/ (mPa·s)	pH 值	30 min 滤失量/ mL
1	5	3	0	1.01	20.0	12	9.0	16.4
2	5	3	5	1.01	20.0	12	10.2	8.2
3	5	3	10	1.01	21.0	12	10.5	6.0
4	5	3	15	1.01	21.0	12	10.7	5.0
5	5	3	20	1.01	21.0	12	10.9	15.4

适宜的弱碱环境。30 min 滤失量随着液态离子固结剂含量的增加先减小后增大,说明液态离子固结剂能增强钻井液的降滤失性,但液态离子固结剂添加量并非越大越好,而是应该有一个合理的范围。

### 3 室内实验

#### 3.1 实验概况

##### 3.1.1 压制岩心的制取过程

(1)将采集的原位岩石样品击碎,研磨,并过孔径为0.25 mm 的标准圆孔土壤筛。

(2)取筛下的粉碎岩粉,在105 °C 温度下烘干4 h,冷却至室温后,装入干燥器中保存备用。

(3)取20 g 岩粉加入到的CPZ-Ⅱ型双通道泥页岩膨胀仪岩样杯中,用气压千斤顶加压至8 MPa 压实,并保压5 min。

##### 3.1.2 抑制页岩膨胀实验<sup>[21]</sup>

采用CPZ-Ⅱ双通道泥页岩膨胀仪,分别测试压制岩心在清水以及不同钻井液滤液中的膨胀量,并按下式计算压制岩心膨胀率 $V_i$ 。

$$V_i = \frac{\Delta H_i}{H} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $V_i$ ——压制岩心在某时刻的膨胀率; $\Delta H_i$ ——压制岩心在某时刻的膨胀量,mm; $H$ ——压制岩心原高度,mm。

##### 3.1.3 剪切实验

本论文所进行的剪切实验为直接剪切实验的快剪类型,每个剪切试样由80 g 干燥岩粉制取。将备用的干燥岩粉分别用清水以及表2所示配方的钻井液处理过后(80 g 岩粉对应8 mL 液体),制取实验所用剪切试样。

#### 3.2 实验结果分析

##### 3.2.1 抑制页岩膨胀实验

实验时间为10 h,膨胀实验结果如图1所示。

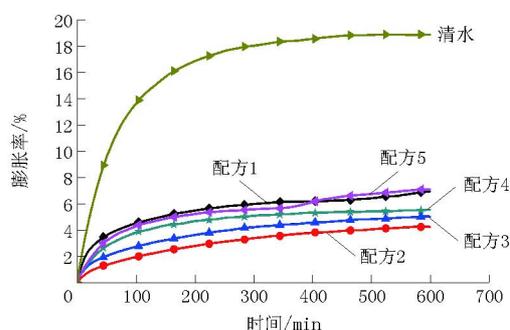


图1 清水及不同固化剂含量钻井液的页岩膨胀曲线

由图2可以看出,在清水中压制岩心的膨胀率最高,且在实验开始约3 h内膨胀最快;相比之下,在各配方钻井液中的压制岩心总体膨胀率大幅度降低,且膨胀较慢。这说明液态离子固结剂具有较好的抑制页岩膨胀的效果。

在配方1(无液态离子固结剂)钻井液中的压制岩心膨胀率相对较高,随着液态离子固结剂含量的增加,相应的钻井液中的压制岩心膨胀率反而越来越高,液态离子固结剂含量最高的配方5钻井液中的压制岩心膨胀率略微超过配方1。这说明,液态离子固结剂有助于提高钻井液抑制页岩膨胀的能力,但是液态离子固结剂的含量应该有一个适宜区间,超过相应区间的限度,液态离子固结剂含量越高,钻井液抑制炭质页岩膨胀性的效果反而越差。

实验所用的页岩粘土矿物含量较高,因而岩粉中含有大量的负电荷以及活泼的次生矿物,主要形成双电层胶体颗粒。所用的液态离子固结剂是一种磺化油树脂类电解质,溶于水后能解离出带正电的阳离子,可同岩粉中带负电荷阴离子产生离子交换作用,从而形成具有较高粘结力的水合物,使得岩心基本结构单元在相界面上受到一定强度的网状结构的束缚,从而可提高岩心的强度,抑制岩心膨胀;同时,形成的化合物还能够充填于裂隙,以减少流体造成的微裂隙发展。

##### 3.2.2 直接剪切实验

一共进行了6个剪切试样的直接剪切实验,每个剪切试样进行50、100、200、300、400 kPa 五级竖向压力下的实验。根据库仑强度准则采用线性回归方法处理所得的实验数据,求出各个剪切试样的抗剪强度参数:粘聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ ,结果如表3所示。

表3 各剪切试样抗剪强度参数

制取剪切试样时处理岩粉所用钻井液	粘聚力 $c$ / kPa	内摩擦角 $\varphi$ / (°)
清水	21.5	18.2
配方1	27.4	18.6
配方2	22.3	24.2
配方3	22.7	25.0
配方4	22.2	26.3
配方5	17.4	24.0

由表3可看出,与经清水处理过的岩粉所制成的剪切试样相比,总体上,经各配方钻井液处理过的岩粉所制成的剪切试样剪切强度更大。随着液态离子固结剂含量的增加,剪切试样的粘聚力总体呈下降趋

势,尤其是配方5钻井液处理过的岩粉所制成的剪切试样,其粘聚力相比经配方4钻井液处理过的岩粉所制成的剪切试样而言,下降了21.6%,降幅非常明显。而内摩擦角随着液态离子固结剂含量的增加呈现总体增大的趋势,虽然配方5钻井液处理过的岩粉所制成的剪切试样,其内摩擦角比由配方4钻井液处理过的岩粉所制成的剪切试样略有下降,但是下降幅度很小。这表明,一方面,液态离子固结剂提高炭质页岩的抗剪强度,但是液态离子固结剂的含量应该有一个适宜区间,超过该区间的限度,液态离子固结剂含量越高,炭质页岩的抗剪强度反而逐渐降低;另一方面,粘聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 这2个抗剪强度参数受液态离子固结剂含量影响的程度不一致。

### 3.2.3 单轴抗压强度实验

该实验采用重塑样进行,将石英砂:岩粉:水泥:普通石膏按4:8:3:3的质量比均匀混合制取重塑样。岩粉为页岩样品在105℃下烘干4h,再研磨,过200目筛所得。以DL-2型堵漏材料试验装置为容器,将重塑样完全浸没于固化剂钻井液中,然后将氮气加压罐打开,给装置加压至7MPa,密闭静置3h之后,将重塑样取出,用滤纸将样品擦净,测定其单轴抗压强度,液态离子固结剂钻井液成分以及实验结果如表4所示。

表4 重塑样单轴抗压强度试验结果

配方编号	植物胶含量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	聚丙烯酰胺含量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	液态离子固结剂含量/( $\text{L} \cdot \text{m}^{-3}$ )	单轴抗压强度/kPa
1	5	3	5	0.41
3	5	3	15	0.57

由表4可知,随着钻井液中液态离子固结剂浓度增加,重塑样的单轴抗压强度也增大。表明液态离子固结剂有助于提高炭质页岩的力学强度,进而增强其稳定性。

## 4 结论

(1)实验所用钻井液总体上能维持一个较适宜的弱碱性环境。液态离子固结剂能够增强钻井液的降滤失性,但其添加量并非越大越好,而是应该有一个合理的范围。

(2)各配方的钻井液都具有较好的抑制页岩膨胀的效果,但是液态离子固结剂的含量应该有一个适宜区间,超过相应区间的限度,液态离子固结剂含量越高,钻井液的抑制效果反而越差。

(3)在适宜的含量区间范围内,液态离子固结剂有助于提高炭质页岩的抗剪强度,但是炭质页岩的粘聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 这2个抗剪强度参数受液态离子固结剂含量影响的程度不一致。

## 参考文献:

- [1] 梁文泉,何真,李亚杰,等.土壤固化剂的性能及固化机理的研究[J].武汉水利电力大学学报,1995,28(6):675-679.
- [2] Tomohisa S, Sawa K, Naitoh N. Hedoro hardening treatment by industrial wastes [J]. Zairyo/Journal of the Society of Materials Science, Japan,1995,44(503):1023-1026.
- [3] Bobrowski L. Injection of a liquid soil stabilizer into subgrade soil—research rept[R]. Austin: Texas Dept of Transportation,1992.
- [4] Nalbantoglu Z, Gucbilmez E. Improvement of calcareous expansive soils in semi-arid environments [J]. Journal of arid environments,2001,47(4):453-463.
- [5] 樊恒辉,高建恩,吴普特.土壤固化剂研究现状与展望[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(2):141-146.
- [6] 谢湘雄.湖南大地构造单元划分及其地球物理场特征[J].湖南地质,1992,11(4):334-342.
- [7] 马力,陈焕疆,甘克文,等.中国南方大地构造和海相油气地质[M].北京:地质出版社,2004.
- [8] 马立桥,董庸,屠小龙,等.中国南方海相油气勘探前景[J].石油学报,2007,28(3):1-7.
- [9] 林拓,张金川,李博,等.湘西北常页1井下寒武统牛蹄塘组页岩气聚集条件及含气特征[J].石油学报,2014,35(5):839-846.
- [10] 湖南省地质矿产局.湖南省区域地质志[M].北京:地质出版社,1988.
- [11] 林拓,张金川,李博,等.湘西北地区龙马溪组页岩气聚集条件与含气性分析[J].新疆石油地质,2014,35(5):507-510.
- [12] 庞维华.湖南下寒武统层序地层格架与古环境演化变迁[D].北京:中国地质科学院,2011.
- [13] 王鸿祯.中国古地理图集[M].北京:地质出版社,1985.
- [14] 郭成贤,朱忠德,靳涛,等.湘西北杨家坪寒武纪事件沉积[J].石油与天然气地质,1999,20(1):41-47.
- [15] 赵宗举,朱琰,王根海,等.叠合盆地油气系统研究方法——以中国南方中、古生界为例[J].石油学报,2002,23(1):11-18.
- [16] 肖正辉,宁博文,杨荣丰,等.多层次模糊数学法在湘西北页岩气有利区块优选中的应用[J].煤田地质与勘探,2015,43(3):33-37.
- [17] 肖正辉,王朝晖,杨荣丰,等.湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气储集条件研究[J].地质学报,2013,87(10):1612-1623.
- [18] 周庆华,宋宁,王成章,等.湖南花垣页岩气区块地质评价与勘探展望[J].天然气地球科学,2014,25(1):130-140.
- [19] 王阳,朱炎铭,陈尚斌,等.湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气形成条件分析[J].中国矿业大学学报,2013,42(4):586-594.
- [20] 项伟,崔德山,刘莉.离子土固化剂加固滑坡滑带土的试验研究[J].地球科学-中国地质大学学报,2007,32(3):397-402.
- [21] 张孝华,罗兴树.现代泥浆实验技术[M].山东东营:石油大学出版社,1999:14-39.