

# 聚合物钻井液防塌机理的试验研究

张红红, 徐会文, 冯 哲

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

**摘 要:**在试验研究的基础上对比了无机聚合物硅酸盐和有机聚合物——聚乙烯醇(PVA)、部分水解聚丙烯酰胺(PHPA)、非水解聚丙烯酰胺(PAM)和聚丙烯酸钾防塌能力的大小;由试验得出吸附成膜速度的快慢和保护膜的致密程度是决定钻井液体系防塌能力的关键因素;钻井液体系的防塌能力是无机聚合物和有机物质协同作用的结果;部分水解聚丙烯酰胺钻井液体系的防塌能力较非水解聚丙烯酰胺钻井液体系的防塌能力强;Na-CMC 和 PHP 的加入可提高吸附膜的致密性及体系的防塌能力。

**关键词:**聚合物钻井液;无机聚合物;有机聚合物;防塌能力;吸附成膜;致密程度;协同作用

**中图分类号:**P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2007)01-0044-03

**Experimental Research on the Instability Prevention Mechanism of Polymer Drilling Fluid/ZHANG Hong-Hong, XU Hui-wen, FENG Zhe** (College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** Based on the experiment research, it was compared that the inorganic polymer silicate with organic polymer such as polyvinyl alcohol (PVA), partially hydrolyzed polyacrylamide (PHPA), polyacrylamide (PAM) and kalium polyacrylate on the capability of instability prevention. The conclusion was drawn as following from the experiment. Firstly, the velocity of the film forming by adsorption and density of the protective foil were the key factors to determine the IPC (instability prevention capability) of the drilling fluid systems; secondly, the IPC of the drilling fluid systems was the result of synergistic action of the inorganic and organic polymers; thirdly, the IPC of PHPA drilling fluid system was better than PAM drilling fluid; finally, the addition of Na-CMC and PHPA could increase the density of the adsorbed film and improve the IPC of the system.

**Key words:** polymer drilling fluid; inorganic polymer; organic polymer; instability prevention capability; film forming by adsorption; density; synergistic action

在石油天然气的勘探开发、固体矿床勘探和基础工程施工中,经常钻遇泥页岩地层。泥页岩的主要成分是粘土矿物,由此引起泥页岩的水化和膨胀、颗粒分散和强度下降<sup>[1]</sup>。在钻进此类地层时,要求钻井液体系能很好的抑制地层的水化、膨胀和分散,从而保证孔壁的稳定。要提高水基钻井液的孔壁稳定性,一般从两方面考虑:一方面,聚合物能在孔壁形成有效的屏蔽层,降低进入页岩地层的滤液的速率;另一方面,无机盐可与有机聚合物进行适度交联、调节滤液的矿化度,降低钻井液中水的活度。

具有防塌能力的聚合物种类较多,但对各种聚合物防塌能力的大小没有明确的认识。通过试验研究确定聚合物的防塌能力,为今后选择和配制防塌能力强、护壁能力好的聚合物钻井液提供依据。

## 1 硅酸盐钻井液体系的防塌性

硅酸盐钻井液体系因其较强的抑制性、良好的

环境相容性、较低的成本而被广泛应用。硅酸盐特殊的分子结构和聚合抑制机理,使以其为主的钻井液体系可很好地解决钻进泥页岩地层时因泥页岩的水化而引起的孔壁不稳定问题。

### 1.1 硅酸盐的防塌机理

硅酸盐钻井液体系的 pH 值一般控制在 11~12 之间,此时可溶性的硅酸盐以亚稳态的硅酸盐单体形式存在。在高 pH 值条件下,硅酸盐单体缩合成由内部硅氧烷(Si-O-Si)和外部的硅烷醇(Si-OH)基团组成的三维带负电荷的低聚物。由于较小的低聚物的相互排斥作用,聚合反应停止。这种低聚合度的硅酸盐可以直接进入页岩的小孔隙中,并被扩散或水力流动运移。由于页岩孔隙中的流体的 pH 值接近于中性,低聚合度的硅酸盐一旦进入到页岩的孔隙网络,立即被稀释到中性,它们就会克服相互间的斥力而凝聚,发生硅酸盐聚合物的分子内部缩合作用而形成三维的凝胶网状结构<sup>[2]</sup>。

收稿日期:2006-08-16

作者简介:张红红(1980-),女(汉族),山西临汾人,吉林大学硕士研究生在读,地质工程专业,从事地质工程研究工作,吉林省长春市西民大街 6 号,13500815957,zhhh6002@126.com。

以三维的凝胶网状结构形式存在的硅酸盐,进一步提供了阻止滤液侵入和压力传递的物理屏障,可提高页岩-钻井液膜的功能,防止了水从钻井液到页岩的渗透流动。由于粘土的主要成分是  $\text{SiO}_2$ ,而硅酸盐的主要成分亦是  $\text{SiO}_2$ ,硅酸盐在页岩表面吸附形成屏蔽层的速度应是比较快的。

## 1.2 硅酸盐基钻井液防塌性的试验研究

在了解硅酸盐防塌机理的基础上<sup>[3,4]</sup>,采用正交试验的方法进行了一系列的室内试验研究,测试了钻井液的防塌性。钻井液的防塌性试验是用硅酸盐配制成的钻井液浸泡泥页岩地层的试块来测试的。用模数  $m=3.8$ ,波美度为 36 的  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 + 0.5\% \text{PHP} + 1\% \text{Na} - \text{CMC} + \text{KCl}$  钻井液浸泡试块,在钻井液中浸泡 5 天,试块无任何变化。水玻璃吸附于试块的表面,形成一层白色的保护膜。试块表面无任何变化,说明硅酸盐可在很短时间内快速吸附在试块表面形成保护膜,阻止水分的进一步渗透。

为确定 CMC 在水玻璃吸附过程中所起的作用,在上述试验的基础上,将配方中的  $\text{Na} - \text{CMC}$  去掉后配制成钻井液,浸泡试块 3 天后试块开始有裂纹出现;单纯用水玻璃浸泡试块,试块也在 2~3 天有裂纹出现,说明钻井液的防塌性不仅仅取决于水玻璃的吸附,还需要高聚物的包被作用。此试验说明有机高聚物  $\text{Na} - \text{CMC}$  和  $\text{PHP}$  对钻井液的防塌能力有促进作用。硅酸盐基钻井液体系良好的防塌性是无机物和有机高聚物协同作用的结果。

由硅酸盐的防塌机理可知,硅酸盐聚合形成的是三维凝胶网状结构,其结构内部是硅氧烷( $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$ )基团,外部是硅烷醇( $\text{Si} - \text{OH}$ )基团。由其空间结构可知,成膜后网状结构的密实性较弱,高聚物通过与硅氧烷( $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$ )之间的吸附作用提高了吸附膜的密实性。有机高聚物的加入虽然可在很大程度上提高吸附膜的致密性,但仍不能完全阻止水分的渗透作用,长时间浸泡试块仍会产生裂纹。试验发现,浸泡在硅酸盐钻井液中的试块,1 周左右开始有裂纹。因此还需进一步寻找能形成致密吸附膜的其它高聚物,同时也可以通过提高钻井液的矿化度,降低滤液的渗透水化作用,进一步提高钻井液的防塌能力。

## 2 聚乙烯醇钻井液体系的防塌性

聚乙烯醇(PVA)应用较广是因为聚乙烯醇具有如下优点<sup>[2]</sup>:(1)提高钻井液稳定井壁的能力;(2)性质很稳定,不受外界环境、pH 值、温度等的影

响;(3)可与大部分的高聚物相容;(4)可生物降解,可满足环保的要求;(5)提高溶液的润滑性,降低摩阻。

### 2.1 聚乙烯醇的防塌机理

关于聚乙烯醇抑制孔壁的机理<sup>[2,5]</sup>,较为公认的主要有 3 种说法。

一种是粘度机理,由达西定律可知,液体流动速率与滤液的粘度成反比,粘度增加导致流体侵入速率的减小,从而有利于页岩的稳定。同时聚乙烯醇类分子能降低钻井液滤液的化学活性。

第二种是复合物机理,即聚乙烯醇可与页岩表面的粘土形成复合物,排掉部分水,从而阻止水分进入,起到抑制页岩水化的作用。同时  $\text{K}^+$  的存在,有利于聚乙烯醇与粘土稳定复合物的形成。

而 P. I. Reid 则指出,若抑制机理仅为聚乙烯醇吸附引起的去水化作用,所需的聚乙烯醇的量会很大,并且无法解释聚乙烯醇钻井液极低的造浆率。他认为是聚乙烯醇与水在粘土表面发生竞争吸附,聚乙烯醇优先在粘土表面取代部分水分子,形成一个疏水的膜,破坏和阻止了粘土表面导致泥页岩膨胀分散的结构水层的形成,从而起到抑制作用。

### 2.2 聚乙烯醇钻井液防塌性的试验研究

为测试聚乙烯醇的防塌性,用  $5\% \text{PAV} + 0.5\% \text{PHP} + \text{KHm} + \text{KCl}$  配制了钻井液,试块在钻井液中浸泡 3 h 无任何变化,6 h 后出现微小的裂纹,但仍保持其完整性。试块出现裂纹,说明聚乙烯醇在试块表面吸附成膜的速度较硅酸盐基钻井液慢。随着吸附膜的形成,阻止了水分的进一步渗透,试块在钻井液中继续浸泡,裂纹不会随浸泡时间的延长而扩展。这说明以聚乙烯醇为主的钻井液虽然其吸附成膜的速度较硅酸盐慢,但它的吸附膜一旦形成后,膜的致密性比硅酸盐基钻井液所形成的吸附膜的致密性要好。此种钻井液的后期防塌能力要比硅酸盐基钻井液强。

聚乙烯醇是靠与水在试块表面发生竞争吸附而在试块表面成膜的,所形成的膜是平面结构,膜的致密性也较好,保护膜一经形成便会阻止水分的渗透。聚乙烯醇不存在与粘土中  $\text{SiO}_2$  相似性的基团,决定了其吸附成膜的速度要慢得多,但保护膜的致密性较硅酸盐的致密性好。同时聚乙烯醇与钻井液中其它的高聚物具有较好的相容性,形成的吸附膜会更致密些。因此浸泡在聚乙烯醇钻井液体系中的试块开始有裂纹出现,而成膜后裂纹不会随浸泡时间的延长而扩展。

### 3 聚丙烯酰胺钻井液体系的防塌性

聚丙烯酰胺是较早使用的泥浆处理剂,主要起絮凝、包被作用,经常使用的有部分水解聚丙烯酰胺(PHPA)和非水解聚丙烯酰胺(PAM)。以水解或非水解的聚丙烯酰胺为主要组分的防塌泥浆或无固相钻井液体系具有许多优点而被广泛使用<sup>[6]</sup>,其突出的优点是低成本、良好的环境相容性。

#### 3.1 聚丙烯酰胺钻井液体系的防塌机理

国内外的实验研究和钻井现场实践都证明聚丙烯酰胺具有很好的防塌作用,认为聚丙烯酰胺的防塌机理主要是:(1)长链的聚丙烯酰胺在泥页岩井壁表面上产生多点吸附,并可横过裂缝,从而阻止泥页岩的剥落;(2)聚丙烯酰胺浓度较高时,在泥页岩井壁表面形成较致密的吸附膜,减慢自由水向泥页岩渗透的速度,对泥页岩的水化膨胀起到抑制作用。

#### 3.2 聚丙烯酰胺钻井液体系防塌性的试验研究

试验测试了以 PHPA[水解度  $H = 30\%$ , 分子量  $(3.0 \sim 3.8) \times 10^6$ 、 $(6.0 \sim 9.6) \times 10^6$ 、 $(1.6 \sim 1.8) \times 10^7$ ]、PAM $[(1.2 \sim 1.6) \times 10^7]$ 为主的钻井液体系的防塌性。试验分别配制了 PHPA + PVA + CMC + KCl 和 PHPA + PVA + KHm + KCl 以及 PHPA + PVA + 聚丙烯酸钾 + KCl 三种钻井液,用相同的方法浸泡了试块。通过试验可知,浸泡的试块 1 h 无任何变化,但 3 h 后开始出现裂纹。这说明聚丙烯酰胺的吸附成膜速度没有硅酸盐以及聚乙烯醇快。试验发现:浸泡在加有腐植酸钾(KHm)钻井液中的试块,2 h 仍无任何变化,而浸泡在加有聚丙烯酸钾钻井液中的试块 2 h 便开始有微裂纹出现。这说明:(1)KHm 的加入可提高钻井液的防塌性;(2)聚丙烯酸钾的加入使体系的防塌性有一定的增强,但不如腐植酸钾的效果好。

为对比 PHPA 和 PAM 钻井液防塌能力的差异性,试验同时用 PAM + PVA + CMC + KCl 溶液浸泡试块。浸泡在两种溶液中的试块都在 3 h 后开裂,但其开裂程度随聚丙烯酰胺含量的增加而减小,浸泡在部分水解聚丙烯酰胺溶液中的试块的开裂程度要较非水解聚丙烯酰胺的小,说明部分水解聚丙烯酰胺钻井液体系的防塌能力较非水解聚丙烯酰胺的防塌能力强。

部分水解聚丙烯酰胺分子链中含有羧钠基( $-\text{COONa}$ )和酰胺基( $-\text{CONH}_2$ ),酰胺基( $-\text{CONH}_2$ )吸附在孔壁上而羧钠基( $-\text{COONa}$ )伸入到钻井液体系中。由于羧钠基( $-\text{COONa}$ )的水化,其周围带有一定水化半径的水化膜,在水化膜压力的作用下,

水化后的羧钠基( $-\text{COONa}$ )将使所形成的吸附膜更致密。当同类分子间的距离较远时,分子间以吸引力为主;距离较近时,分子间以排斥力为主。部分水解聚丙烯酰胺分子中的羧钠基( $-\text{COONa}$ )在分子力的作用下产生聚集,使体系成膜的强度增大,密实性提高;而非水解聚丙烯酰胺分子中全部是酰胺基( $-\text{CONH}_2$ ),虽分子间的吸引力大,排斥力较小,但因其分子中不存在水化基羧钠基( $-\text{COONa}$ ),因其水化产生的水化膜的压力也就不存在。因此体系成膜的强度较小,密实性也较弱,这就从分子结构上说明了为何部分水解聚丙烯酰胺钻井液体系的防塌能力较非水解聚丙烯酰胺的防塌能力强。

### 4 聚丙烯酸钾钻井液体系的防塌性试验研究

聚丙烯酸钾是一种白色或淡黄色粉末,易吸潮,其耐热性能好,溶解后溶液的粘度很高,能起絮凝、提粘、降失水、防塌和堵漏作用。在油田钻探 3000 m 以内的浅井时,可用来取代聚丙烯酰胺。

#### 4.1 聚丙烯酸钾钻井液体系的防塌机理

聚丙烯酸钾钻井液体系具有防塌性主要是因为聚丙烯酸钾能有效地对钻屑产生“包被”作用,抑制地层造浆;同时钾离子能防止软泥页岩和硬脆性泥页岩的水化与剥落,起到稳定孔壁的作用。从防塌机理可知,聚丙烯酸钾和聚丙烯酰胺的防塌机理相似,其体系的防塌能力应无大的差别。

#### 4.2 聚丙烯酸钾钻井液体系的防塌性的试验研究

试验用聚丙烯酸钾 + PVA + KCl 钻井液浸泡试块。同聚丙烯酰胺钻井液体系一样,试块在溶液中浸泡 1 h 无任何变化,3 h 后开始有微小裂纹出现。这说明聚丙烯酸钾体系的防塌性与聚丙烯酰胺钻井液体系的防塌性相近。试块有裂纹出现,充分说明聚丙烯酸钾在试块表面的吸附成膜速度较慢,体系的防塌性较硅酸盐和聚乙烯醇体系相对弱些。

### 5 结论

(1)钻井液在页岩表面吸附成膜速度的快慢及保护膜致密程度是体系防塌能力的决定因素。

(2)一个体系的防塌性是无机聚合物和有机高聚物有良好的协同作用的结果。

(3)硅酸盐的吸附成膜速度快,体系的防塌性好;PVA 的吸附成膜速度较 PHP 和 PAM、聚丙烯酸钾快些,因此聚乙烯醇体系的防塌性介于硅酸盐体系和聚丙烯酰胺、聚丙烯酸钾体系之间;聚丙烯酸钾

(下转第 61 页)

回次进尺长、取心效果好、钻进功耗低、钻柱磨损小以及钻柱对井壁扰动小等优点。该项技术在科钻一井中取心钻进 4042.73 m, 占科钻一井全部取心钻进的 80.7%, 岩心采取率 85.5%, 平均机械钻速 1.13 m/h, 平均回次长度 6.34 m。液动锤技术取得重大突破, 创造了使用井深 5118.2 m 和单井进尺 4057.39 m 的世界纪录。研究成果于 2005 年通过国土资源部国际合作与科技司组织的部级鉴定, 评价为“项目研究总体达到国际先进水平, 螺杆马达-液动锤-金刚石取心钻探技术系统属世界首创, 达到了国际领先水平。”

硬岩深井取心钻探新技术在科钻一井中经受住了苏鲁超高压变质带坚硬岩石和复杂地层的严酷考验, 取得了显著的经济和社会效益, 得到了国际钻井技术界的高度评价, 极大地推动了我国钻探技术向安全、高效、低耗方向发展, 对钻探行业的技术进步有重大的推动作用。

#### 八、中国大陆科学钻探工程参加第八届中国国际高新技术成果交易会

第八届中国国际高新技术成果交易会于 2006 年 10 月 12 日下午在深圳会展中心开幕, 国务院副总理吴仪出席了开幕式。国土资源部国际合作与科技司副司长崔岩, 中国地质调查局副局长张洪涛、新技术处处长张伟等应邀参加了开幕式并参观了展会。

本届高交会由商务部、科技部、信产部、国家发改委等共同主办。其中, 国家发改委围绕“自主创新”主题, 集中展示了“十五”期间我国在国家重大科技基础设施、国家工程研究中心等自主创新方面取得的重大成果。中国大陆科学钻探工程中心在王达主任的带领下组团参加了这一盛况空前的展会, 向社会各界集中展示了中国大陆科学钻探工程获取的一系列科技创新成果。

#### 九、“CGDS 近钻头地质导向钻井系统”和“EILOG 测井车装装备”研制成功并投入现场应用

2006 年 3 月 3 日, 国家“十五”重大技术装备研制项目、中国石油天然气集团公司“十五”重大科技专项“CGDS-1 近钻头地质导向钻井系统”通过专家组评审。专家组认为, 近钻头地质导向钻井系统的研制成功, 是我国油气钻井技术的重大突破, 将为我国油气勘探开发提供重要的技术支持, 具有广阔的应用前景。

这套我国具有独立知识产权的近钻头地质导向钻井系统, 是国际钻井界公认的 21 世纪钻井高新技术, 由中国石油勘探开发研究院钻井工艺研究所、西安石油仪器总厂钻井仪

器公司和北京石油机械厂共同承担完成。它集钻井技术、测井技术及油藏工程技术为一体, 用近钻头地质、工程参数测量和随钻控制手段来保证实际井眼穿过储层并取得最佳位置, 可根据随钻监测到的地层特性信息调整和控制井眼轨道, 使钻头闻着“油味”走, 具有随钻识别油气层、导向功能强的特点。

此前, 这项技术只有国外 3 家公司拥有。目前, 这一项目已申请 10 多项专利和专有技术, 其中已取得 5 项发明专利。

“EILOG 测井车装装备”也是我国具有自主知识产权的性能世界领先的产品, 它是将 10 余种测井仪器装载在一辆大型桥车上, 钻井结钻后, 测井车一次到现场, 全部测井方法逐一进行, 取得的数据快速可靠, 一次成功。

2006 年 12 月 28 日, 中国石油天然气集团公司科技发展部在北京召开了上述两项成果的产品发布会, 会上由各自的研究部门讲述了研制过程、经历的困难和采取的技术措施, 以及仪器的使用方法和功能, 参观了实物。刘广志院士应邀出席了发布会。

#### 十、“第十届中国非开挖技术研讨会暨展览会”在无锡召开

2006 年 3 月 1 日, “第十届中国非开挖技术研讨会暨展览会”在江苏省无锡市召开, 来自包括美国、德国、英国、日本、印度和马来西亚等国内外代表 250 多名、室内外展位近 50 个, 展出了 30 多家厂商的设备和产品。1000 余人参观了展览。

会上中国非开挖技术协会首席顾问何宜章研究员作了题为《2005 年中国非开挖行业调查》、协会副主席马福海教授授高级工程师作了《发展中的中国非开挖事业》、中国地质大学(武汉)马保松教授作了《地下工程的一个新领域——非开挖工程学》的报告。朱文鉴博士发表了《国内外非开挖管线修复技术现状》的报告。

会议论文集共收集了论文和译文近 50 篇, 内容涉及定向钻进、微型隧道、管线修复和替换以及检测技术和管材等非开挖领域。

展览会上展出了各类水平定向钻机、顶管机、导航仪、塑料管熔焊机、钻具等。其中最大的亮点是国产水平定向钻机和顶管设备实物的展出, 特别是大中型钻机实物的展出吸引了大批参观者, 如上海谷登公司的回拖力 800 kN 的钻机和多家公司生产的回拖力 400 kN 以上的钻机。绍兴新光基础有限公司生产的偏心挤压式泥水平衡顶管机也在展会上进行了演示, 这是历届会议上首次展示的顶管机实物。

#### (上接第 46 页)

钻井液体系与聚丙烯酰胺钻井液体系的防塌性相似。

(4) Na-CMC 和 PHP 的加入有助于促进硅酸盐的吸附, 可提高成膜的致密性。

(5) 部分水解聚丙烯酰胺钻井液体系的防塌能力较非水解聚丙烯酰胺钻井液体系的防塌能力强。

#### 参考文献:

[1] 徐同台, 洪培云, 潘世奎. 水平井钻井液与完井液[M]. 北京:

石油工业出版社, 1999. 186-187, 215-216.

[2] 徐同台, 赵忠举. 21 世纪初国外钻井液和完井液技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004. 275-277, 265-272.

[3] 丁锐. 硅酸盐钻井液防塌性能的室内研究[J]. 油田化学, 1998, 15(1): 2-5.

[4] 郭健康, 鄢捷年. 硅酸盐钻井液体系的研究与应用[J]. 石油钻采工艺, 2003, 25(5): 20-22.

[5] 于培志. 聚合醇钻井液体系的研究与应用[J]. 石油钻采工艺, 2001, 23(5): 30-31.

[6] 王果庭, 张春光. 聚丙烯酰胺不分散低固相泥浆[M]. 北京: 地质出版社, 1980. 6-14.