

高温高盐钻井液用降滤失剂的合成与性能评价

李东¹, 王翟², 赵英杰³, 陈亮³, 全红平^{2,4*}, 吴洋^{2,4}
(1. 克拉玛依市创拓有限责任公司, 新疆 克拉玛依 834000;
2. 西南石油大学化学化工学院, 四川 成都 610500;
3. 唐山冀油瑞丰化工有限公司, 河北 唐山 063000;
4. 油气田应用化学四川省重点实验室, 四川 成都 610500)

摘要:选取丙烯酰胺(AM)、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)、含非离子基团抗盐单体(KYD)、十八烷基二甲基烯丙基氯化铵(DMAAC-18)4种单体,采用水溶液聚合的方法得到聚合物,并将其作为水基钻井液用降滤失剂;通过单因素法对聚合反应条件进行优化,利用傅里叶红外光谱仪对产物的结构进行分析,并对聚合物的降滤失性能进行评价。结果表明,淡水基浆中聚合物质量分数为1.2%时,API滤失量为9.6 mL;在35%的盐水基浆中,API滤失量为9.5 mL;在180℃条件下老化16 h,API滤失量为13.5 mL;通过对基浆中膨润土粒径分布和滤饼微观形貌的分析,确定了聚合物是通过提升滤饼的致密性来降低API滤失量。

关键词:共聚物;降滤失剂;抗温;抗盐

中图分类号:TE254

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)08-0187-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.08.037

Synthesis and performance evaluation of fluid loss additive for drilling fluid at high temperature and salinity

LI Dong¹, WANG Di², ZHAO Ying-jie³, CHEN Liang³, QUAN Hong-ping^{2,4*}, WU Yang^{2,4}

(1. Karamay Chuangtuo Company Limited, Karamay 834000, China;

2. College of Chemistry & Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

3. Tangshan Jiyou Ruifeng Chemical Co., Ltd., Tangshan 063000, China;

4. Sichuan Provincial Key Laboratory of Oil & Gas Field Applied Chemistry, Chengdu 610500, China)

Abstract: A copolymer is synthesized from acrylamide (AM), 2-acrylamide-2-methylpropanesulfonic acid (AMPS), non-ionic group salt-resistant monomer (KYD), and *n*-octadecyl allyldialkyl ammonium chloride (DMAAC-18) via aqueous solution polymerization process, and used as a fluid loss additive for water-based drilling fluid. The experimental conditions of polymerization reaction are optimized through single factor method, and the structure of the copolymer is analyzed by Fourier transform infrared spectrometer. The fluid loss performance of the copolymer is evaluated. The fluid loss amount of API is 9.6 mL when the mass fraction of copolymer added in the fresh water base slurry is 1.2%. The fluid loss amount of API is 9.5 mL in a 35% NaCl base slurry. The fluid loss amount of API is 13.5 mL when the copolymer has been aged at 180℃ for 16 h. Through analyzing the particle size distribution of bentonite in the base slurry and the micro-morphology of filter cake, it is confirmed that the copolymer reduces the fluid loss amount of API by improving the compactness of filter cake.

Key words: copolymer; fluid loss additive; temperature resistant; salt tolerance

钻井液广泛应用于油气开采过程中,具有携带钻屑、冷却钻头的作用。基于钻井液的应用过程和作用,希望钻井液在现场可以循环利用,在井壁上形成薄而致密的滤饼,滤失量低,可以稳定井壁,因此,往往在钻井液中加入降滤失剂来分散黏土颗粒,降低钻井液的滤失量^[1-4]。当前,降滤失剂的种类很多,其中人工合成聚合物类凭借较强的抗温抗盐能力、可以根据需要设计分子的结构、聚合单体来源广

泛的优势,具有更广泛的应用^[4-8]。

钻井过程中高温、高盐环境对钻井液降滤失剂提出了更高的要求。因此,通过对降滤失剂分子的结构进行设计,选择具有抗温、抗盐官能团的聚合单体来制备聚合物型降滤失剂,使用丙烯酰胺(AM)、含非离子基团抗盐单体(KYD)、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)、十八烷基二甲基烯丙基氯化铵(DMAAC-18)4种单体。丙烯酰胺是主要的聚合单

收稿日期:2020-09-23;修回日期:2021-06-21

作者简介:李东(1966-),男,硕士,工程师,主要从事油田化学助剂生产及应用工作,3331838904@qq.com;全红平(1982-),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事油田化学品的研发与应用,通讯联系人,59183228@qq.com。

体,其含有的酰胺基团具有较强的水化能力和吸附能力,可以提升聚合物的吸附、水化性能^[2];含非离子基团抗盐单体是一种非离子的聚合单体,可以提升聚合物的抗盐能力,同时,可通过氢键作用吸附在黏土表面^[9-10];2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸是一种抗温、抗盐的聚合单体,其含有的磺酸根对盐不敏感,可以提升聚合物的抗盐能力^[11];十八烷基二甲基烯丙基氯化铵上含有疏水链,可使聚合物在水中发生疏水缔合作用,提升聚合物的抗温、抗盐能力^[12-13]。

笔者以 AM、KYD、AMPS、DMAAC-18 为单体,通过自由基聚合的方法得到聚合物,对聚合物降滤失性能、抗温抗盐能力进行评价,对聚合物的降滤失机理进行分析。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

试剂:丙烯酰胺(AM)、氢氧化钠、碳酸钠,分析纯,成都市科龙化工试剂厂生产;2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)、偶氮二异丁基脒盐酸盐(V50),分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产;含非离子基团抗盐单体(KYD)、十八烷基二甲基烯丙基氯化铵(DMAAC-18),分析纯,江苏飞翔化工集团生产;实验用水为去离子水。

仪器:GKC-2 数显智能型恒温水浴锅,上海波洛实验设备有限公司生产;DHG-9140A 电热恒温鼓风干燥箱,上海齐欣科学仪器有限公司生产;DF-101S 集热式磁力加热搅拌器,金坛市金南仪器制造有限公司生产;JB50-D 型恒速搅拌机,上海申顺生物科技有限公司生产;WQ-F520 傅里叶红外光谱仪,北京瑞利分析仪器有限公司生产;ZNS-2 泥浆失水量测定仪,青岛同春石油仪器有限公司生产;FEI Quanta 650 FEG 场发射扫描电镜,美国 FEI 公司生产;JL-1197 型激光粒度分布测试仪,成都精新粉体测试设备有限公司生产。

1.2 聚合物的合成

取洁净的三口烧瓶置于恒温水浴锅中,向三口烧瓶中加入去离子水,然后加入 KYD,混合、搅拌使其完全溶解;接着加入 AM,混合、搅拌使其完全溶解;再加入 AMPS,混合、搅拌使其完全溶解;加入 DMAAC-18,混合、搅拌使其完全溶解;加入 NaOH 调节溶液体系的 pH;向溶液体系中通入 N₂,并保持搅拌状态;30 min 后,设定水浴锅温度,开始加热,持

续通入 N₂;待溶液体系温度到达设定值,向溶液体系中加入引发剂 V50,开始引发聚合反应;反应一段时间后,得到凝胶状粗产物,利用无水乙醇对粗产物多次洗涤、提纯,干燥、粉碎后得到的聚合物即为产物。

1.3 样品的表征

取最优条件下制备的产物,与 KBr 混合,在干燥的条件下研磨、混合,然后压片,利用傅里叶红外光谱仪对其进行分析,扫描范围 500~4 000 cm⁻¹。

1.4 样品的性能评价

1.4.1 基浆的配制

(1)淡水基浆的配制:在搅拌的条件下,缓慢将 40.00 g 膨润土分散于 1 000 mL 的去离子水中,然后加入 1.60 g Na₂CO₃ 完全溶解,高速搅拌器高速搅拌 20 min,在室温条件下密闭养护 24 h。

(2)盐水基浆的配制:将一定质量的 NaCl 加入到去离子水中得到盐水,用盐水代替去离子水配制的基浆即为盐水基浆。

1.4.2 降滤失性能的测定

将一定质量的聚合物加入到不同的基浆中,待其完全溶解后,在不同的温度条件下滚动老化 16 h。取出后,再高速搅拌 20 min,根据石油与天然气行业标准 SY/T 5241—1991《水基钻井液用降滤失剂评价程序》对聚合物的降滤失能力、抗温能力、抗盐能力进行评价。

1.5 膨润土颗粒的粒径分布测试

利用激光粒度分布测试仪对添加聚合物前后的不同基浆中膨润土的粒径分布进行测试。

1.6 滤饼的微观形貌分析

将性能评价中得到的滤饼置于真空烘箱中烘干、制样,利用场发射扫描电镜(FEI Quanta 650 FEG,美国 FEI 公司生产)对滤饼的微观形貌进行观察并拍照,并对聚合物的降滤失机理进行分析。

2 结果与讨论

2.1 聚合物制备条件的优化

2.1.1 单体配比的确定

固定单体质量分数为 20%、引发剂质量分数为 0.5%、pH=7.0、反应温度为 50℃、反应时间为 4 h,改变单体配比制备聚合物,并将其加入到淡水基浆中,加量为 1.0%,评价降滤失性能,结果如表 1 所示。

表1 单体摩尔比对聚合物降滤失能力的影响

序号	$n(\text{AM}) : n(\text{AMPS}) : n(\text{KYD}) : n(\text{DMAAC-18})$	API 滤失量/ mL
1	70:25:4.5:0.5	12.4
2	75:20:4.5:0.5	13.0
3	65:30:4.5:0.5	14.1
4	70:25:4.0:0.6	11.9
5	70:25:5.0:0.6	12.5

从表1中可以看出,当单体 $n(\text{AM}) : n(\text{AMPS}) : n(\text{KYD}) : n(\text{DMAAC-18})$ 为70:25:4.0:0.6时降滤失能力最好,在该单体摩尔比下,反应得到聚合物中各个官能团能够互相配合协同作用,有效地降低滤失量。

2.1.2 单体浓度的确定

固定 $n(\text{AM}) : n(\text{AMPS}) : n(\text{KYD}) : n(\text{DMAAC-18})$ 为70:25:4.0:0.6、引发剂质量分数为0.5%、 $\text{pH}=7.0$ 、反应温度为 50°C 、反应时间为4 h,改变单体质量分数制备聚合物,将其加入到淡水基浆中,加量为1.0%,评价降滤失效果,结果如图1所示。

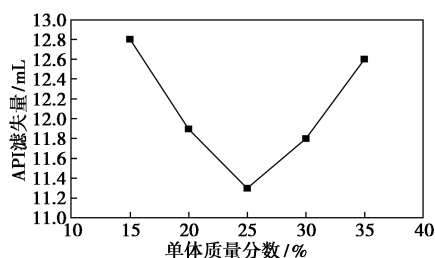


图1 反应单体质量分数对聚合物降滤失能力的影响

由图1可以看出,随着反应单体质量分数的增加,淡水基浆的滤失量先减小后增大,当单体质量分数为25%时,API失水量最小,为11.3 mL,因此,选择反应的最佳单体质量分数为25%。单体质量分数主要影响反应物分子在溶液中碰撞反应的概率,单体质量分数过低,碰撞反应概率低,不易发生聚合反应或聚合产物分子质量较小,导致产物不能有效的起到降滤失的作用;单体质量分数过高,碰撞反应概率高,反应较为剧烈,增大链终止和链转移概率,导致聚合产物分子质量较小,不能有效起到降滤失的作用。

2.1.3 反应 pH 的确定

固定 $n(\text{AM}) : n(\text{AMPS}) : n(\text{KYD}) : n(\text{DMAAC-18})$ 为70:25:4.0:0.6、单体质量分数为25%、引发剂质量分数为0.5%、反应温度为 50°C 、反应时间为

4 h,改变反应体系 pH 制备聚合物,将其加入到淡水基浆中,加量为1.0%,评价降滤失效果,结果如图2所示。

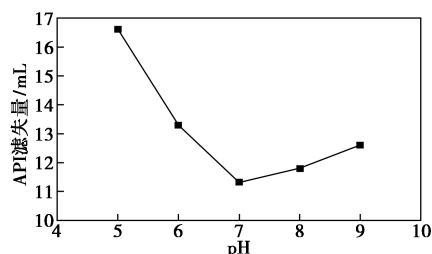


图2 反应 pH 对聚合物降滤失能力的影响

从图2可以看出,随着 pH 的逐渐增大,降滤失性能先增大后减小,当 $\text{pH}=7$ 时,降滤失效果最好,为11.3 mL,因此,选择反应 pH 为7。这是由于当 pH 小于7时, H^+ 浓度过大,不利于引发剂的分解,导致反应不易引发;而当 pH 大于7时, H^+ 浓度过小,导致引发剂分解速度加快,分子质量降低,进而降低聚合物降滤失性能。

2.1.4 引发剂质量分数的确定

固定 $n(\text{AM}) : n(\text{AMPS}) : n(\text{KYD}) : n(\text{DMAAC-18})$ 为70:25:4.0:0.6、单体质量分数为25%、 $\text{pH}=7.0$ 、反应温度为 50°C 、反应时间为4 h,改变引发剂质量分数制备聚合物,将其加入到淡水基浆中,加量为1.0%,评价降滤失效果,结果如图3所示。

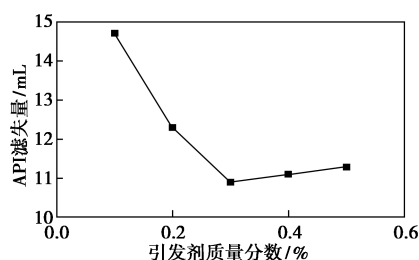


图3 引发剂质量分数对聚合物降滤失能力的影响

从图3可以看出,随着引发剂质量分数的增大,淡水基浆的滤失量先减小后增大,当引发剂质量分数为0.3%时,滤失量最小,为10.9 mL,因此,选择反应引发剂质量分数为0.3%。引发剂的质量分数会影响产生自由基的数量,引发剂质量分数小,产生的自由基浓度低,不易引发聚合反应或聚合产物分子质量低;引发剂质量分数过多,产生的自由基浓度高,容易使聚合反应提前进入链终止或者链转移阶段,导致聚合物聚合程度低,不能有效降低滤失量。

2.1.5 反应温度的确定

固定 $n(\text{AM}) : n(\text{AMPS}) : n(\text{KYD}) : n(\text{DMAAC-18})$

18) 为 70:25:4.0:0.6、单体质量分数为 25%、pH=7.0、引发剂质量分数为 0.3%、反应时间为 4 h, 改变反应温度制备聚合物, 将其加入到淡水基浆中, 加量为 1.0%, 评价降滤失效果, 结果如图 4 所示。

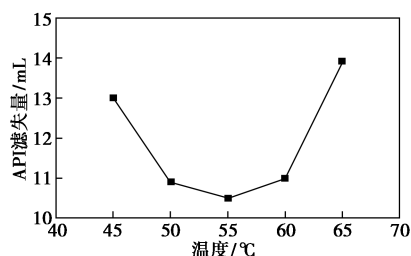


图 4 反应温度对聚合物降滤失能力的影响

从图 4 可以看出, 随着温度的升高, 淡水基浆的滤失量先减小后增大, 在 55°C 时, 滤失量最低, 为 10.5 mL, 所以选择反应温度为 55°C。温度过低时, 引发剂不易分解产生自由基, 自由基和单体分子之间碰撞概率低, 不易发生聚合反应; 温度过高则容易发生“爆聚”, 聚合产物分子质量较小, 影响其降滤失性能。

2.1.6 反应时间的确定

固定 $n(\text{AM}) : n(\text{AMPS}) : n(\text{KYD}) : n(\text{DMAAC-18})$ 为 70:25:4:0.6、单体质量分数为 25%、pH=7.0、引发剂质量分数为 0.3%、反应温度为 55°C, 改变反应时间制备聚合物, 将其加入到淡水基浆中, 加量为 1.0%, 评价降滤失效果, 结果如图 5 所示。

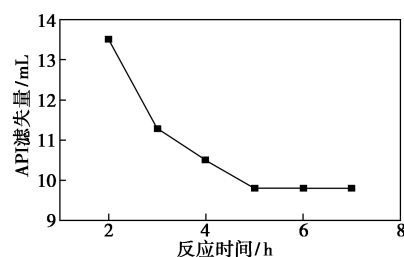


图 5 反应时间对聚合物降滤失能力的影响

从图 5 可以看出, 随着反应时间的增加, 淡水基浆的滤失量先减小后趋于稳定, 在反应时间为 5 h 时, 滤失量几乎不再减小, 所以选择反应时间为 5 h。说明当反应达到 5 h 时, 反应已经完全结束。

根据以上实验, 得出该反应的最佳反应条件: 单体配比 $n(\text{AM}) : n(\text{AMPS}) : n(\text{KYD}) : n(\text{DMAAC-18}) = 70:25:4.0:0.6$ 、单体质量分数为 25%、引发剂质量分数为 0.3%、pH 为 7、反应温度为 55°C、反应时间为 5 h。

2.2 聚合物的红外光谱表征

将在最优条件下得到聚合物样品进行提纯, 采

用 KBr 压片法进行红外光谱分析, 结果如图 6 所示。

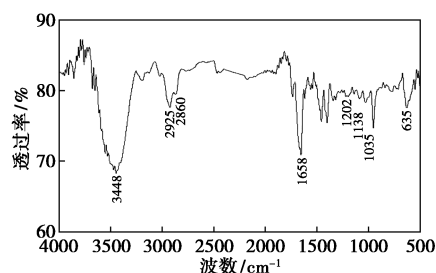


图 6 聚合物的红外光谱图

由图 6 中可以看出, 3 448 cm^{-1} 和 1 658 cm^{-1} 处是聚合物中来自 AM 中的 N—H 吸收峰; 1 202 cm^{-1} 处是聚合物中有非离子基团的伸缩振动峰; 1 138 cm^{-1} 和 1 035 cm^{-1} 处是聚合物中来自 AMPS 中磺酸基团的不对称伸缩振动峰; 635 cm^{-1} 处是聚合物中来自 DMAAC-18 中的 $(\text{CH}_2)_{18}$ 的吸收峰; 2 925 cm^{-1} 和 2 860 cm^{-1} 处为甲基和亚甲基的剪切振动峰。由此可以看出, 聚合物含有设计的官能团, 与设计结构一致。

2.3 聚合物降滤失性能评价

2.3.1 聚合物质量分数对降滤失的影响

向淡水基浆中添加不同质量的聚合物, 并高速搅拌 20 min, 利用泥浆失水量测定仪测定淡水基浆的滤失量, 测定压力为 0.69 MPa, 结果如图 7 所示。

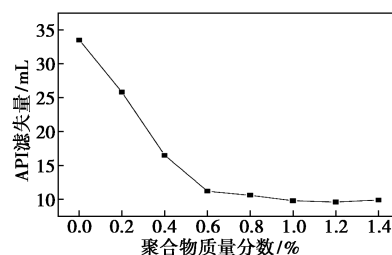


图 7 聚合物质量分数对聚合物降滤失能力的影响

由图 7 可以看出, 随着淡水基浆中聚合物质量分数的增大, 淡水基浆的 API 滤失量先减小后略微增大, 在聚合物质量分数为 1.2% 时, 降滤失性能最好, 为 9.6 mL。

因为聚合物中含有酰胺基团、羟基, 可以通过氢键吸附在黏土表面, DMAAC-18 为聚合物引入了疏水链, 使聚合物分子间通过疏水缔合作用形成网络结构, 可以封堵黏土颗粒之间的空隙, 使形成的滤饼更加致密, 从而降低滤失量。如果聚合物的质量分数过多, 聚合物中的阳离子会造成黏土颗粒的絮凝, 导致滤失量增大。

2.3.2 聚合物抗盐实验

向淡水基浆中添加不同质量的 NaCl,得到一系列不同质量分数的盐水基浆,向盐水基浆中添加 1.2% 的聚合物,并高速搅拌 20 min,利用泥浆失水量测定仪测定盐水基浆的滤失量,测定压力为 0.69 MPa,结果如图 8 所示。

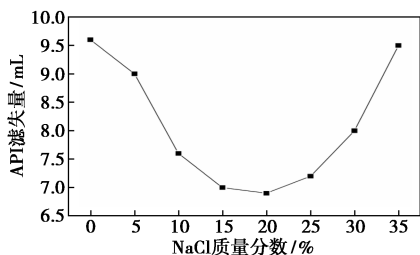


图 8 不同质量分数 NaCl 对聚合物降滤失能力的影响

由图 8 可以看出,随着 NaCl 质量分数的增大,盐水基浆的滤失量呈现出先下降后上升的趋势;在 NaCl 质量分数为 20% 时,滤失量最低,为 6.9 mL;当 NaCl 质量分数达到 35% 时,滤失量为 9.5 mL,说明该聚合物具有较强的抗盐能力。

由于聚合物中含有疏水缔合作用,在 NaCl 质量分数较低 (<20%) 时,随着 NaCl 质量分数增大,聚合物中的疏水缔合能力增强,聚合物形成的网状结构比较稳定,可以有效地提升滤饼的致密性,降低滤失量;随着 NaCl 质量分数的持续增大,NaCl 使得聚合物分子链变得卷曲,减弱其降滤失的能力,但滤失量仍然小于 10 mL。同时,聚合物分子中含有聚氧乙烯链和磺酸基团,对外界的阳离子不敏感,也可以有效提升聚合物的抗盐能力。所以聚合物具有较强的抗盐能力。

2.3.3 聚合物抗高温降滤失能力

向淡水基浆中加入 1.2% 的聚合物,并高速搅拌 20 min,然后放入滚子加热炉中,在不同的温度下,滚动老化 16 h,利用泥浆失水量测定仪测定淡水基浆的滤失量,测定压力为 0.69 MPa,结果如图 9 所示。

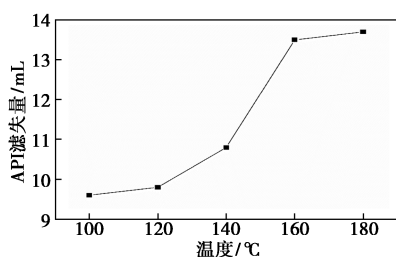


图 9 高温对聚合物降滤失性能的影响

由图 9 可以看出,随着老化温度的升高,淡水基浆的滤失量呈现出逐渐增大的趋势,当老化温度为 180°C 时,API 滤失量为 13.5 mL,说明该聚合物具有一定的抗温能力。

聚合物分子中的磺酸基团具有较强的水化能力和抗温性能,当聚合物吸附在黏土表面时,在高温下,仍可以维持黏土的水化膜保持一定的厚度,使基浆的 API 滤失量保持在较低的状态。

2.4 降滤失机理分析

2.4.1 黏土颗粒粒径分析

基浆中黏土颗粒的大小会影响形成的滤饼的致密程度,进而影响基浆的滤失量,利用激光粒度分布仪对加入聚合物前后的基浆中黏土颗粒的大小进行分析,结果如图 10 所示。

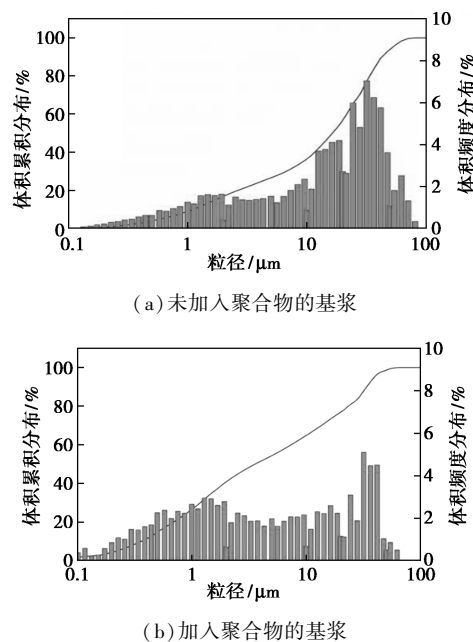
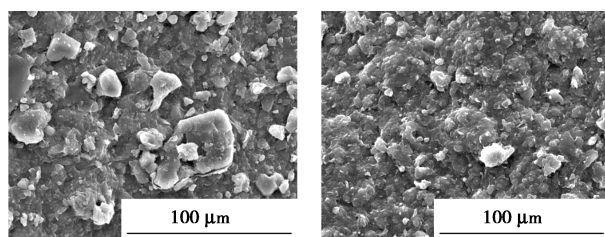


图 10 基浆中膨润土颗粒的粒径分布

由图 10(a) 中可以看出,加入聚合物前,基浆中膨润土的粒径分布情况为: D_{50} 为 16.37 μm , D_{90} 为 42.66 μm 。由图 10(b) 中可以看出,加入聚合物后,基浆中膨润土的粒径分布情况为: D_{50} 为 3.58 μm , D_{90} 为 33.76 μm 。说明加入聚合物后可以明显降低基浆中膨润土的粒径,使膨润土在基浆中更加分散,利于形成更加致密的滤饼来降低滤失量。

2.4.2 滤饼的微观结构

滤饼的致密程度影响滤失量的大小,利用扫描电镜对加入聚合物前后得到的滤饼的致密性进行观察分析,结果如图 11 所示。



(a) 未加入聚合物的滤饼 (b) 加入聚合物的滤饼

图 11 基浆的滤饼扫描电镜图(2 000×)

由图 11(a) 中可以看出,加入聚合物前的基浆滤饼中黏土颗粒分散性差、聚集程度较高、颗粒较大,存在较多的孔道,在实际应用过程中液体很容易通过这些孔道滤失掉,造成滤失量较高;由图 11(b) 中可以看出,加入聚合物后基浆滤饼中黏土颗粒分散性好、聚集程度低、颗粒较小、孔道少、致密程度高,可以有效地降低滤失量。说明该聚合物加入到基浆中可以有效地分散黏土颗粒,使形成的滤饼较为致密,有效降低滤失量。

3 结论

(1) 聚合物合成的最优条件为: 单体摩尔比 $n(\text{AM}) : n(\text{AMPS}) : n(\text{KYD}) : n(\text{DMAAC}-18) = 70 : 25 : 4.0 : 0.6$ 、单体质量分数为 25%、引发剂质量分数为 0.3%、pH 为 7、反应温度为 55℃、反应时间为 5 h。

(2) 在聚合物质量分数为 1.2% 时,基浆的滤失量为 9.6 mL,同时,可抗 35% 的 NaCl,抗温 180℃,具有一定的抗温、抗盐能力。

(3) 加入聚合物后的基浆中膨润土的粒径分布趋于变小,形成的滤饼更加致密,利于降低滤失量。

参考文献

- [1] 王爱荣,石海信,童张法,等.KH570-AM-淀粉接枝共聚物降滤失剂的制备及其性能[J].化工进展,2018,37(10):4022-4028.
- [2] 全红平,徐为明,袁志平.AM/APEG/AA/SSS 聚合物降滤失剂的合成及性能[J].石油化工,2017,46(3):356-363.
- [3] 全红平,吴洋,黄志宇,等.抗高温耐盐型钻井液用降滤失剂的合成与性能评价[J].化工进展,2015,34(5):1427-1432.
- [4] 姚林祥,许小荣,范少文,等.水基钻井液降滤失剂的研究进展[J].化工进展,2011,30(s1):302-305.
- [5] 马喜平,朱忠祥,侯代勇,等.抗高温抑制型钻井液降滤失剂的合成与评价[J].现代化工,2016,36(2):117-121.
- [6] 王晓娜,岳钦艳,高宝玉,等.分散聚合合法合成纳米有机阳离子聚合物 PDMDAAC-AM[J].化工学报,2007,58(7):1868-1874.
- [7] 吕挺,单国荣.丙烯酰胺在聚乙二醇水溶液双水相聚合过程中的单体分配[J].化工学报,2009,60(6):1581-1586.
- [8] 钟传蓉,黄荣华,张熙,等.疏水缔合改性三元丙烯酰胺共聚物的合成[J].化工学报,2006,57(10):2475-2480.
- [9] 张太亮,刘婉琴,李亮,等.四元共聚钻井液降滤失剂的合成与性能评价[J].精细化工,2014,31(10):1269-1274.
- [10] 吴洋,王金玉,郭帆,等.阳离子聚合物型酸液缓速剂的合成与性能评价[J].现代化工,2018,38(1):102-106.
- [11] Hongping Q, Huan L, Zhiyu H, et al. Copolymer SJ-1 as a fluid loss additive for drilling fluid with high content of salt and calcium[J]. International Journal of Polymer Science, 2014, 2014: 1-7.
- [12] Quan Hongping, Li Zhuoke, Huang Zhiyu. Self-assembly properties of a temperature-and salt-tolerant amphoteric hydrophobically associating polyacrylamide[J]. RSC Advances, 2016, 6(54): 49281-49288.
- [13] 黄志宇,李鹏飞,饶政,等.疏水缔合聚合物 AHAPAM 的制备与性能评价[J].油田化学,2018,35(2):289-295. ■
- [15] Liu Z, Xu W. Fabrication of $\text{BiO}_{2-x}@\text{TiO}_2$ heterostructures with enhanced photocatalytic activity and stability[J]. Applied Surface Science, 2020, 511: 145460.
- [16] Shivani V, Harish S, Archana J, et al. Highly efficient 3-D hierarchical Bi_2WO_6 catalyst for environmental remediation[J]. Applied Surface Science, 2019, 488: 696-706.
- [17] Wang J, Liu Z, Liu Z, et al. $\text{BiO}_{2-x}/\text{NaBiO}_3$ hybrid composites: Facile synthesis, enhanced photocatalytic activity and mechanism[J]. Solid State Sciences, 2019, 95: 105935.
- [18] Wang J, Tang L, Zeng Z, et al. 0D/2D interface engineering of carbon quantum dots modified Bi_2WO_6 ultrathin nanosheets with enhanced photoactivity for full spectrum light utilization and mechanism insight[J]. Applied catalysis. B, Environmental, 2018, 222: 115-123.
- [19] Wang W, Zhao W, Zhang H, et al. 2D/2D step-scheme $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Bi}_2\text{WO}_6$ photocatalyst with efficient charge transfer for enhanced photo-Fenton catalytic activity[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2021, 42(1): 97-106.
- [20] Chen Y, Xie X, Si Y, et al. Constructing a novel hierarchical $\beta\text{-Ag}_2\text{MoO}_4/\text{BiVO}_4$ photocatalyst with Z-scheme heterojunction utilizing Ag as an electron mediator[J]. Applied Surface Science, 2019, 498: 143860.
- [21] Bai X, Wang L, Wang Y, et al. Enhanced oxidation ability of $\text{g-C}_3\text{N}_4$ photocatalyst via C_{60} modification[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2014, 152-153: 262-270. ■

(上接第 186 页)