

钻井液用纳米苯丙乳液封堵剂的制备与性能研究

王耀¹, 侯岳^{1*}, 高鹏举¹, 许权威¹, 杜焱森¹, 于培志²

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 天津 300399; 2. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 针对深层泥页岩地层纳微米孔缝引发的井壁失稳问题, 采用半连续种子乳液聚合法, 以苯乙烯、丙烯酸丁酯、丙烯酸、丙烯酰胺、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸为单体合成纳米苯丙乳液封堵剂, 并进行结构表征与性能评价。结果表明, 该乳液中位粒径 D_{50} 为 174.5 nm, 呈单峰分布, 颗粒呈球状或近球状, 分散稳定, 固相含量高于 80%; 在 180 °C 老化 16 h 后, 高温高压滤失量随乳液加量增加而降低, API 滤失量在加量 2.5% 时最低, 综合降滤失效果与经济性, 最优加量为 2.5%, 滤饼更薄更致密, 滤饼清水滤失量降低率达 41.7%; 该乳液与钻井液常用处理剂配伍性良好, 150 °C 老化后加纳米乳液体系较未加体系, 高温高压滤失量由 15.3 mL 降至 13.2 mL, 10 μ m 砂盘滤失量由 7.2 mL 降至 5.6 mL, 对微米级裂缝具有良好的封堵效果, 改善滤饼质量, 有利于井壁稳定。

关键词: 纳米苯丙乳液; 半连续种子乳液聚合; 封堵剂; 钻井液; 降滤失; 流变性; 配伍性; 井壁稳定

中图分类号: P634.6; TE254 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0177-06

Preparation and performance study of nano styrene-acrylate emulsion plugging agent for drilling fluid

WANG Yao¹, HOU Yue^{1*}, GAO Pengju¹, XU Quanwei¹, DU Yaosen¹, YU Peizhi²

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Tianjin 300399, China; 2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: To address the wellbore instability caused by nano-micro-scale pores and fractures in deep shale formations, a nano styrene-acrylate emulsion plugging agent was synthesized via semi-continuous seed emulsion polymerization using styrene, butyl acrylate, acrylic acid, acrylamide, and 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid as monomers, and its structural characterization and performance evaluation were carried out. The results show that the emulsion has a median particle size (D_{50}) of 174.5 nm with a unimodal distribution; the particles are spherical or nearly spherical and stably dispersed, and the solid content is higher than 80%. After hot-rolling aging at 180 °C for 16 h, the high-temperature and high-pressure (HTHP) fluid loss of the drilling fluid decreases with increasing emulsion dosage, while the API fluid loss reaches its minimum at a dosage of 2.5%. Considering both fluid loss control performance and economic efficiency, the optimal dosage is determined to be 2.5%, under which a thinner and denser filter cake is formed and the reduction rate of clear-water fluid loss of the filter cake reaches 41.7%. The emulsion exhibits favorable compatibility with conventional drilling fluid additives. After aging at 150 °C, compared with the blank system, the HTHP fluid loss of the nano-emulsion-containing system decreases from 15.3 mL to 13.2 mL, and the 10 μ m sand-disk fluid loss decreases from 7.2 mL to 5.6 mL, indicating good plugging performance for micron-sized fractures, improved filter-cake quality, and beneficial effects on wellbore stability.

Key words: nano styrene-acrylate emulsion; semi-continuous seed emulsion polymerization; plugging agent; drilling fluid; fluid loss control; rheology; compatibility; wellbore stability

收稿日期: 2026-09-10; 修回日期: 2026-09-20 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.020

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20240205202)

第一作者: 王耀, 男, 汉族, 1999年生, 助理工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事钻井液相关研究, 天津市东丽区锦鲤道23号, 1808972758@qq.com。

通信作者: 侯岳, 男, 汉族, 1985年生, 正高级工程师, 应用化学专业, 从事钻井液研究和应用工作, 天津市东丽区锦鲤道23号, 271399879@qq.com。

引用格式: 王耀, 侯岳, 高鹏举, 等. 钻井液用纳米苯丙乳液封堵剂的制备与性能研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 177-182.

WANG Yao, HOU Yue, GAO Pengju, et al. Preparation and performance study of nano styrene-acrylate emulsion plugging agent for drilling fluid[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 177-182.

0 引言

在油气资源勘探开发不断向深层、超深层及复杂地层推进的背景下,井壁失稳已成为制约钻井效率、抬高作业成本的关键工程难题^[1-2]。尤其是泥页岩等复杂地层,普遍存在纳微米级孔隙与微裂缝,水敏性强且力学稳定性差,钻井液易侵入地层引发水化膨胀、裂缝延伸,进而导致井壁坍塌、卡钻等井下事故。常规封堵剂因粒径过大,难以进入纳微米级孔隙裂缝形成有效封堵^[3-5]。纳米封堵剂凭借其独特的尺寸效应与优异性能,成为钻井液封堵领域的研究热点,也是该技术重要的突破方向^[6-8]。与传统封堵剂相比,纳米封堵剂粒径多为纳米级,可精准匹配页岩等地层的纳微米孔隙尺寸,实现深度封堵^[9-12];其比表面积大、吸附能力强,能在井壁形成薄而致密的封堵层,显著降低钻井液滤失量,减少滤液侵入地层^[13-14],有效增强井壁稳定性。卢震^[15]基于功能单体优选策略,采用N,N-二甲基丙烯酰胺、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)、苯乙烯(St)及二甲基二烯丙基氯化铵作为聚合基元,成功制备综合性能良好的纳米级封堵材料。崔彦琦等^[16]构建了丙烯酰胺/2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸/苯乙烯/醋酸乙烯酯四元共聚体系,封堵率可达90.7%。杨现禹等^[17]研究表明,流体物性对页岩纳米孔隙封堵效果具有一定的影响,同时封堵颗粒粒径与孔喉尺寸的匹配关系、颗粒浓度及体系黏度显著影响页岩孔隙封堵效率,为纳米苯丙乳液的粒径调控与性能优化提供了理论参考。因此,研发高性能纳米封堵剂,对于解决复杂地层钻井难题、降低成本、实现绿色高效开发具有重要意义。

本文采用半连续种子乳液聚合,合成了一种纳米苯丙乳液,实验证明该乳液在钻井液中具有好的封堵与降滤失性能,可以显著改善滤饼质量,在钻井液体系中与其他处理剂配伍性良好^[18]。

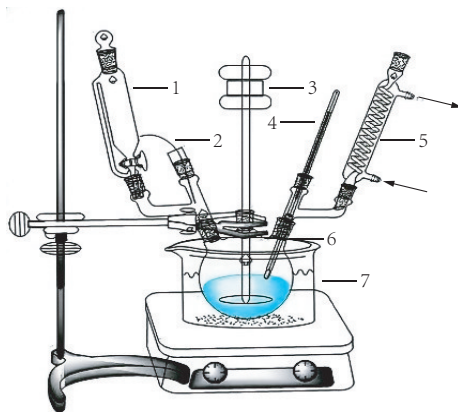
1 实验材料与方法

1.1 主要合成原料

采用St、丙烯酸丁酯(BA)、丙烯酸(AA)、丙烯酰胺(AM)、AMPS为单体,十二烷基硫酸钠(SDS)、辛基酚聚氧乙烯醚(OP-10)为乳化剂,过硫酸铵(APS)为引发剂,NaHCO₃为调节剂,均为分析纯。

1.2 合成实验方法

用烧杯称取定量的去离子水、St、BA、AA、AM、AMPS、OP-10、质量分数为5%的SDS溶液(提前配制),逐个加入高速搅拌机中,用高速剪切机以2000 r/min转速预乳化30 min,制得预乳化液。在500 mL的三口烧瓶中加入定量的去离子水、预乳化液、NaHCO₃,开动搅拌机以500 r/min的速度搅拌,插入温度计,油浴升温至75℃,加入1/4的APS水溶液,乳液瞬间变蓝,反应20 min,制得种子溶液。反应温度维持75℃,将剩余预乳化液及部分引发剂以滴加的方式加入到反应烧瓶中,滴加2 h,预乳化液与引发剂同时滴加完毕。然后将温度升至80℃,并补加剩余引发剂,保温30 min。保温完成后降温,出料。合成实验装置如图1所示。



1—恒压漏斗; 2—蠕动泵; 3—恒速搅拌器; 4—温度计; 5—蛇形冷凝管; 6—三口烧瓶; 7—恒温油浴锅

图1 合成实验装置

2 纳米苯丙乳液性能表征

2.1 挥发分含量分析

本实验选取烘干法进行纳米苯丙乳液的挥发分含量分析,具体的实验方法如下:将称量瓶在105℃下烘干,取3 g左右的纳米苯丙乳液的样品(精确到0.01 g)放入称量瓶,在烘干箱中105℃烘干24 h,烘干结束后进行称重,计算方法见式(1)。实验选取了两组不同批次合成的纳米苯丙乳液进行挥发分含量分析,所得实验数据如表1所示。由表1中数据可见,不同批次制备的纳米苯丙乳液挥发分含量均低于20%,说明本实验合成工艺条件合理,聚合物转化率较高,乳液聚合反应进行较为充分。

$$D = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: D ——固相含量(质量分数); m_0 ——称量瓶质量; m_1 ——烘干前试样和称量瓶的质量; m_2 ——烘干后试样和称量瓶的质量。

表1 纳米苯丙乳液的挥发分含量

实验 编号	称量瓶 质量/g	苯丙乳 液质量/g	烘干前 总重/g	烘干后 总重/g	固相含 量/%	挥发分 含量/%
1	50.56	2.99	53.55	52.98	80.9	19.1
2	51.73	2.95	54.68	54.22	84.4	15.6

2.2 粒度分析

本实验采用Malvern公司激光粒度仪对纳米苯丙乳液的粒度分布进行测试。乳液的粒径、分布范围及均匀性是评价其性能的关键指标,直接决定乳液的分散稳定性与应用效果。实验选取质量分数为10%的纳米苯丙乳液,在常温下进行粒度测试,如图2所示。由图可知,所合成的纳米苯丙乳液中位粒径 D_{50} 为174.5 nm,粒径指标达到纳米级标准,且乳液的粒度分布曲线呈现出单峰分布特征,表明该纳米苯丙乳液的颗粒粒径均一性良好、分布高度集中,乳液整体分散性佳、体系稳定性优异。

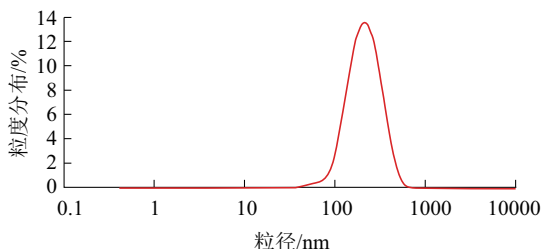


图2 纳米苯丙乳液粒度分布

2.3 微观结构分析

扫描电镜(SEM)可以直接观察乳液中的颗粒形态、表面特征及分布情况。通过高分辨率图像,可以判断颗粒的大小、形状以及颗粒间的相互关系,同时可以分析乳液的分散性和均匀性。本实验选用GeminiSEM 300型扫描电子显微镜进行扫描分析,实验将1%的纳米苯丙乳液烘干后进行SEM分析,如图3所示。由图3可见,纳米苯丙乳液颗粒整体呈现规整的球状或近球球形貌,轮廓清晰,粒径大小较为均一,无明显团聚现象,能够在水相中形成分散性良好的微观结构,证明该乳液具有优异

的分散稳定性。

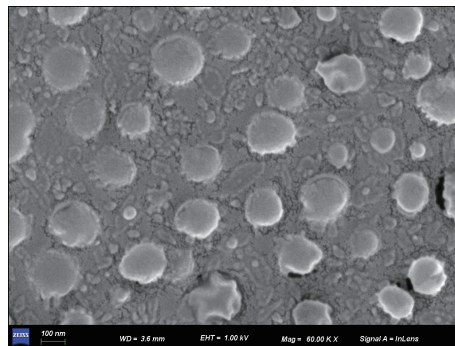


图3 纳米苯丙乳液SEM图

3 钻井液性能评价

3.1 纳米苯丙乳液封堵效果评价

钻井液基浆配方为400 mL水+14 g膨润土+0.7 g无水碳酸钠,搅拌4 h后水化20 h。若无特殊说明,本文的钻井液基浆均按照此方法配制。实验数据均为多次重复试验的平均值,老化试验的温度均设置为180℃,目的是进一步考察纳米苯丙乳液的极限抗温能力,评价其在更高温度工况下的流变调控性与降滤失性。

3.1.1 对钻井液流变性能的影响

在基浆中分别加入2%~3.5%的纳米苯丙乳液,用六速旋转黏度计测量其流变性能,实验结果见表2。如图4、图5所示,随着纳米苯丙乳液加量的逐渐增大,钻井液的表观黏度与塑性黏度在逐渐上升,可起到一定增黏作用。在经过180℃老化16 h之后,纳米苯丙乳液对钻井液的流变性影响较小。

3.1.2 降滤失性能评价

为进一步探究纳米苯丙乳液的降滤失性能,采用基浆+0~3.5%纳米苯丙乳液进行实验,探究180℃老化前后钻井液滤失量的变化,其中高温高压滤失量在150℃条件下测得,实验结果见表3。由表3可知,老化前后纳米苯丙乳液均可显著降低钻井液的滤失量,在180℃老化16 h之后,随着苯丙乳液加量的逐渐增加,钻井液的滤失量逐渐降低(图6),其中加量2.5%时滤失量降幅最大;继续提升至3%时滤失量虽仍有小幅降低,但性能改善幅度明显趋缓。综合考虑材料成本及现场施工要求,兼顾滤失控制效果与经济性,推荐纳米苯丙乳液最优加量为2.5%。

表 2 纳米苯丙乳液对钻井液流变性的影响

苯丙乳液加量/%	测试条件	表观黏度/(mPa·s)	塑性黏度/(mPa·s)	屈服值/Pa
0(基浆)	老化前	5.0	4	1.0
	老化后	8.0	7	1.0
2.0	老化前	10.5	8	2.5
	老化后	8.0	6	2.0
2.5	老化前	13.5	8	5.5
	老化后	8.5	7	1.5
3.0	老化前	16.5	9	7.5
	老化后	9.0	6	3.0
3.5	老化前	19.5	10	9.5
	老化后	10.5	7	3.5

注:老化条件为180℃老化16 h。

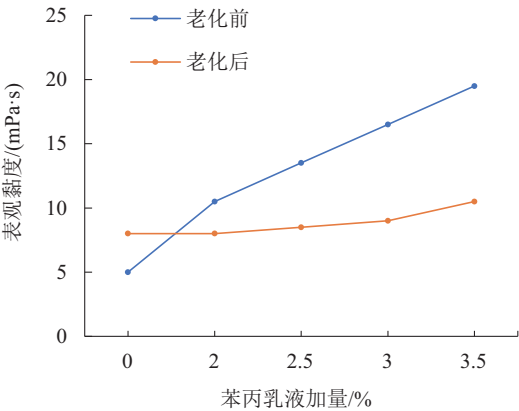


图 4 纳米苯丙乳液加量对表观黏度的影响

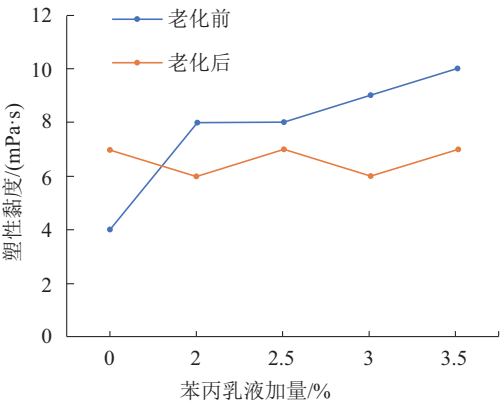


图 5 纳米苯丙乳液加量对塑性黏度的影响

图 7 为高温高压滤失实验后所形成的滤饼。由图可知,加入纳米苯丙乳液后所形成的滤饼更薄更致密,实验结果证明纳米苯丙乳液可以显著改善滤饼质量。

表 3 纳米苯丙乳液加量对钻井液滤失量的影响

苯丙乳液加量/%	测试条件	滤失量/mL	高温高压滤失量/mL
0	老化前	22	130
	老化后	32	
2.0	老化前	12.4	62
	老化后	17.2	
2.5	老化前	12	55
	老化后	15.8	
3.0	老化前	12.8	51
	老化后	16.4	
3.5	老化前	12.6	49
	老化后	16	

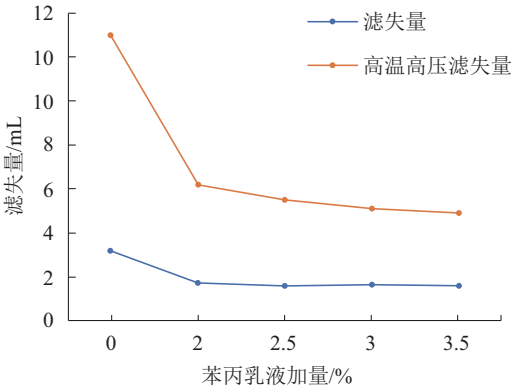


图 6 纳米苯丙乳液加量对180℃老化后钻井液滤失量的影响

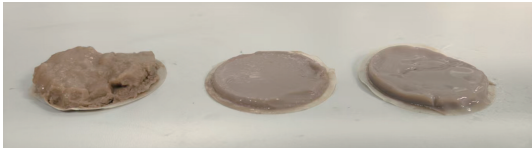


图 7 滤饼对比

3.1.3 滤饼清水滤失性能评价

滤饼清水滤失实验主要用于评价钻井液的封堵与降滤失性能,并可通过滤饼致密度、厚度及滤失降低率间接分析钻井液处理剂对滤饼质量的改善作用。具体实验方法:取两份400 mL基浆,其中一份加入10 g纳米苯丙乳液,高速搅拌20 min;将两份浆体置于老化罐中,180℃老化16 h,冷却后高速搅拌,用少量消泡剂消除气泡;将浆液缓慢倒入高温高压滤失仪,在0.69 MPa下测定30 min滤失量;倒出钻井液后保留滤饼;沿玻璃棒在罐体中加入400 mL纯净水,在相同条件下测定清水滤失量。按

上述方法分别测定基浆与加纳米苯丙乳液的浆液的滤失量及滤饼清水滤失量,结果见表 4。由表 4 可知,加入纳米苯丙乳液的浆液滤饼清水滤失量降低率达 41.7%。结合滤失性能实验可知,该乳液可使滤饼更薄、更致密,改善滤饼质量效果明显,显著提升滤饼降滤失性能,具有良好的降滤失作用。

表 4 滤饼清水滤失量	
浆液类型	滤失量/mL
基浆	36
基浆+纳米苯丙乳液	21

3.2 体系配伍性评价

为了探究合成纳米苯丙乳液在体系中发挥的作用及其在钻井液体系中的配伍性,对有无纳米苯丙乳液进行对比,设计了 I、II 两种配方。为评价

材料在现场常规作业温度下的配伍及封堵效果,老化温度设置为 150℃。

配方 I: 水+膨润土 3%+无水碳酸钠 0.3%+硅酸钠 5%+LV-PAC 0.2%+磺化沥青 1.0%+磺酸盐共聚物 1.2%+腐植酸钠 2.0%。

配方 II: 水+膨润土 3%+无水碳酸钠 0.3%+纳米苯丙乳液 2.5%+硅酸钠 5%+LV-PAC 0.2%+磺化沥青 1.0%+磺酸盐共聚物 1.2%+腐植酸钠 2.0%。

3.2.1 流变性能评价

测量钻井液在 150℃老化前后的流变性能,所得实验结果见表 5。由表 5 可知,配方 I、II 的表观黏度与塑性黏度相近,表明该乳液对钻井液体系流变性能影响较小。此外,配方 II 的 API 滤失量及高温高压滤失量均显著低于配方 I,证明该乳液具有较好的降滤失性能。

表 5 钻井液流变性能									
配方	实验条件	初切/Pa	终切/Pa	表观黏度/(mPa·s)	塑性黏度/(mPa·s)	屈服值/Pa	动塑比/[Pa·(mPa·s) ⁻¹]	滤失量/mL	高温高压滤失量/mL
I	老化前	1.5	4	63	46	17	0.37	5.2	
	老化后	3	5	75	51	24	0.47	6.1	15.3
II	老化前	2	5	60	43	17	0.40	4.5	
	老化后	3	6	77	49	28	0.57	5.6	13.2

3.2.2 封堵性能评价

实验选用 HTD18984 型钻井液封堵性能评价仪对钻井液的封堵性能进行评价。苯丙乳液本身为纳米级材料,但本实验重点评价多种材料复配形成的钻井液体系整体封堵能力。地层孔隙与微裂缝具有多尺度特征,除纳微米级孔隙外,地层中普遍存在微米级优势渗流通道。因此选用平均孔喉 10 μm 的砂盘模拟地层微米级微孔隙与微裂缝,对 150℃老化后的配方 I、II 进行评价,可考察复配钻井液的封堵效果。配方 I、II 的 30 min 砂盘滤失量分别为 7.2、5.6 mL。配方 II 的滤失量较小,证明纳米苯丙乳液降滤失性能良好且与其他处理剂配伍性良好。

4 结论

(1)通过性能表征与室内评价实验证明,合成的纳米苯丙乳液中位粒径 D_{50} 为 174.5 nm,颗粒粒径处于纳米级,同时具备良好的微观形貌;加入纳米

苯丙乳液的浆液滤饼清水滤失量降低率达 41.7%,具有较好的流变性、降滤失性,180℃老化后仍可稳定发挥作用。

(2)钻井液体系研究表明,合成的纳米苯丙乳液与其他处理剂配伍性良好,老化后滤失量从 15.3 mL 降低至 13.2 mL,钻井液滤失量显著降低,砂盘滤失量由 7.2 mL 降低至 5.6 mL,可以对微裂缝进行有效的封堵。

参考文献:

- [1] 金军斌,张杜杰,李大奇,等. 顺北油气田深部突破性地层井壁失稳机理及对策研究[J]. 钻采工艺, 2023, 46(1): 42-49.
- [2] 魏耀冉,冯永存,干建华,等. 缝间水化诱发的井壁垮塌机理研究——以准噶尔盆地五区南水平井为例[J]. 钻采工艺, 2025, 48(6): 53-63.
- [3] 徐琳,邓明毅,郭拥军,等. 纳米封堵剂在钻井液中的应用进展研究[J]. 应用化工, 2016, 45(4): 742-746.
- [4] 于军泉,安玉秀,马京缘,等. 高性能页岩封堵剂的合成及其性能[J]. 石油化工, 2022, 51(7): 806-814.
- [5] 于洪江,拓丹,熊迅宇. 成膜性纳米微乳液封堵剂的制备与评价

- [J].应用化工,2018,47(1):92-95.
- [6] Li H, Lü K H, Huang X B, et al. The synthesis of polymeric nanospheres and the application as high-temperature nano-plugging agent in water based drilling fluid[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2020, 8:247.
- [7] 黄昱昊,徐建根,步文洋,等.钻井液用纳米封堵剂的研究与进展[J].*辽宁化工*,2023,52(3):436-438,449.
- [8] Huang X B, Meng X, Lü K H, et al. Development of a high temperature resistant nano-plugging agent and the plugging performance of multi-scale micropores[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 639: 128275.
- [9] 马永宇,林梅钦,王志永,等.新型耐温聚合物微球的封堵特性研究[J].*石油化工高等学校学报*,2020,33(2):47-52.
- [10] Zhao Z, Sun J S, Liu F, et al. Micro-nano polymer microspheres as a plugging agent in oil-based drilling fluid[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 673.
- [11] 于庆河,刘涛,吴文兵.钻井液用纳米复合封堵剂的研制[J].*石油工程建设*,2024,50(S1):76-80.
- [12] Fielding L A, Tonnar J, Armes S P. All-acrylic film-forming colloidal polymer/silica nanocomposite particles prepared by aqueous emulsion polymerization[J]. *Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2011, 27(17): 11129-11144.
- [13] 黄乘升,褚奇,李涛,等.抗高温聚合物纳米微球封堵剂的合成与性能评价[J].*钻井液与完井液*,2022,39(2):139-145.
- [14] 徐哲,孙金声,刘敬平,等.柔性微球封堵剂的封堵性能及机理研究[J].*断块油气田*,2024,31(6):1105-1113,1121.
- [15] 卢震.钻井液用抗高温纳米聚合物封堵剂研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2021.
- [16] 崔彦琦,于洪江,雷亮,等.水基钻井液复合纳米成膜封堵剂的制备及性能[J].*精细化工*,2024,41(9):2031-2037.
- [17] 杨现禹,蔡记华,蒋国盛,等.维持页岩井壁稳定的物理封堵模拟和化学抑制实验研究[J].*钻探工程*,2021,48(4):37-46.
- [18] 徐丽丽,刘增伟,马凤国.以丙烯酸为功能性单体的苯丙乳液聚合及其性能研究[J].*丝绸*,2015,52(5):11-15.

(编辑 王跃伟)