

水基压裂液的制备与性能优化

孙雨¹, 戴毅², 刘健¹, 金奇杰², 李妍妍¹, 安晓洁¹, 宋静^{2,3}, 徐慕涛², 徐海涛^{2,3*}

(1. 山东省水利科学研究院山东省水资源与水环境重点实验室, 山东 济南 250014;

2. 南京工业大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 211816;

3. 南京杰科丰环保技术装备研究院有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 研制了分别基于瓜尔胶基、田菁胶基和羧甲基纤维素钠稠化剂体系的水基压裂液, 根据表观粘度、挑挂性能、破胶性能、耐温性能、悬砂性能、残渣含量等 6 个方面对 3 种压裂液进行性能研究。结果表明, 基于瓜尔胶为稠化剂的水基压裂液表观粘度值为 37.5 mPa·s, 在 60℃ 时降至 50 mPa·s 以下, 可实现挑挂, 10 h 后破胶彻底, 悬砂性能为 6 mm/min, 残渣含量为 376 mg/L, 各项指标均满足 SY/T 6376—2008《压裂液通用技术条件》评价标准, 综合性能优异。该水基压裂液体系的研制可为未来常规压裂液体系的拓展优化和粘性土壤压裂增渗技术提供一定的借鉴。

关键词: 水基压裂液; 稠化剂; 瓜尔胶; 粘度; 性能优化

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)S2-0232-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S2.041

Preparation and performance optimization of water-based fracturing fluid

SUN Yu¹, DAI Yi², LIU Jian¹, JIN Qi-jie², LI Yan-yan¹, AN Xiao-jie¹,

SONG Jing^{2,3}, XU Mu-tao², XU Hai-tao^{2,3*}

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Water Resources and Environment, Water Resources

Research Institute of Shandong Province, Jinan 250014, China; 2. School of Environmental Science and

Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 3. Nanjing Gekof Institute of Environmental

Protection Technology & Equipment Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: Three kinds of hydraulic fracturing fluid, respectively based on guar gum, sesbania gum and sodium carboxymethyl cellulose as thickener, are developed. Their performances are investigated from perspectives of apparent viscosity, picking and hanging performances, gel-breaking performance, temperature resistance, sand-suspending performance and residue content. It is found that the water-based fracturing fluid with guar gum as thickener exhibits the best among the three kinds, its apparent viscosity is 37.5 mPa·s, which drops to less than 50 mPa·s at 60℃. It can realize good picking and hanging performances, and its gel-breaking is completed after 10 h. Its sand-suspending performance is 6 mm/min, and the residue content is 376 mg/L. All indexes of this guar gum-based fracturing liquid meet the requirements of SY/T 6376—2008 “General Technical Conditions for Fracturing Fluid” evaluation standard, showcasing an excellent comprehensive performance. This fracturing fluid system provides a certain reference for the expansion and optimization of conventional fracturing fluid system and the fracturing-permeability enhancement technology in viscous soil.

Key words: water-based fracturing fluid; thickener; Guar gum; viscosity; performance optimization

近年来,我国有机污染场地数量及规模不断增长,化学氧化技术因其对污染物降解彻底、修复周期短等优势,已成为大规模应用前景最好的有机污染场地修复技术^[1-3]。然而,长三角地区的有机污染场地土壤粘度高,渗透性差,修复药剂难以在土壤中实现有效地扩散传质,导致低渗场地修复效果差^[4-6]。水力压裂技术通过压裂液的冲击作用,在土壤中人为构建可控裂缝网络,能够有效提升土壤渗透性,极具解决低渗有机污染土壤中化学氧化剂

难以传质扩散难题的潜力^[7-9]。此外,水力压裂技术已广泛应用于石油、天然气开采领域,压裂液的研发是其技术核心之一。

目前,压裂液主要有水基、油基压裂液两类,其中水基压裂液由于其成本低,综合性能优异等优点,已成为水力压裂技术中使用最为广泛的压裂液体系^[10-12]。随着实际应用工况的不断变化,水基压裂液的性能面临新的要求和挑战。水基压裂液主体分为水和各种添加剂,添加剂包括稠化剂、交联剂、

收稿日期: 2025-03-14; 修回日期: 2025-08-01

基金项目: 山东省水资源与水环境重点实验室开放基金项目(2024-05); 国家重点研发计划项目(2021YFB3500600, 2021YFB3500605); 扬州市科技计划项目(YZ2023020)

作者简介: 孙雨(1995-), 女, 博士生, 主要研究方向为环境污染防治, sunny317100@outlook.com; 徐海涛(1977-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为大气污染物控制、土壤污染治理, 通讯联系人, htxu@njtech.edu.cn。

破胶剂等,通过添加剂的种类筛选和组分占比优化可有效提升水基压裂液的综合性能,从而更好地适应工程对水力压裂技术的需求^[13-15]。根据稠化剂的不同,水基压裂液可以分为植物胶、纤维素衍生物和人工合成聚合物3种体系^[16-18]。其中,植物胶稠化剂和纤维素衍生物稠化剂因粘度高、悬砂性好、耐盐性佳等优点,被广泛应用于水力压裂领域^[19-21]。尽管水力压裂技术已有较大程度的应用,但水基压裂液的稠化剂体系筛选、其余添加剂(破胶剂、交联剂、杀菌剂等)与稠化剂复配后对水基压裂液综合性能的影响规律还有待研究^[22-23]。

本研究为了明确瓜尔胶(GG)、田菁胶(SG)、羧甲基纤维素(CMCC)3种不同稠化剂体系之间的差异,系统性测试、评价与比较3种压裂液体系表观粘度、挑挂性能、破胶性能、耐温性能、悬砂性能、残渣含量等6个方面的性能。根据压裂液性能测试结果,以SY/T 6376—2008《压裂液通用技术条件》为标准,评价3种压裂液体系的综合性能。

1 实验部分

1.1 实验试剂

田菁胶, BR, 源叶生物科技有限公司生产; 瓜尔胶, AR, 希恩思生化科技有限公司生产; 过硫酸铵, AR, 国药集团化学试剂公司生产; 三水硝酸铜, AR, 阿拉丁生化科技有限公司生产; 石膏粉, AR, 南京海泰科学器材有限公司生产; 羧甲基纤维素钠, CP、硼砂, AR、氢氧化钠, GR、亚硫酸氢钠, AR、十二烷基磺酸钠, AR、碳酸钠, AR, 麦克林生化科技有限公司生产。

1.2 实验仪器

ZNN-D6型六速旋转粘度计, 青岛神宇石油机械有限公司生产; JB90-SH型数显恒速强力电动搅拌器, 上海标本模型厂生产; FA2004电子分析天平、1DHG-9053A电热鼓风干燥箱, 南京晚晴化玻仪器有限公司生产; HH-2数显恒温水浴锅, 上海力辰邦西仪器科技有限公司生产。

1.3 压裂液配制

按实验需求量取3L清水置于塑料桶中, 使用电子天平准确称取适量的稠化剂溶入其中, 使用数显恒速强力电动搅拌器以1200 r/min的转速搅拌30 min, 配制成含稠化剂的压裂液基液; 向配制好的基液中, 加入实验所需质量的交联剂, 并使用数显恒速强力电动搅拌器以1200 r/min的转速搅拌30 min, 再依次加入破胶剂、杀菌剂等其他添加剂,

配制得到压裂液。

1.4 压裂液性能评价方法

压裂液性能的优劣可以从多个方面进行评价, 包括挑挂性能、基液表观粘度、耐温性能、破胶性能、悬砂性能、残渣含量等。压裂液表观粘度为600 r/min时压裂液粘度值的二分之一。本研究根据石油行业标准中SY/T 5107—2016《水基压裂液性能评价方法》对制备出的水基压裂液进行性能研究, 采用SY/T 6376—2008《压裂液通用技术条件》评价标准中各性能技术指标, 具体见表1。

表1 水基压裂液通用技术指标

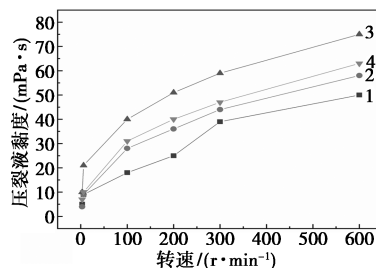
序号	项目	指标	
1	基液表观粘度/(mPa·s)	20℃ ≤ t ≤ 60℃	10~40
		60℃ ≤ t ≤ 120℃	20~80
		120℃ ≤ t ≤ 180℃	30~100
2	交联时间/s	20℃ ≤ t ≤ 60℃	15~60
		60℃ ≤ t ≤ 120℃	30~120
		120℃ ≤ t ≤ 180℃	60~300
3	耐温能力	表观粘度/(mPa·s)	≥50
4	破胶性能	破胶时间/min	≤720
		破胶液表观粘度/(mPa·s)	≤5
5	残渣含量/(mg·L ⁻¹)		≤600

2 结果与讨论

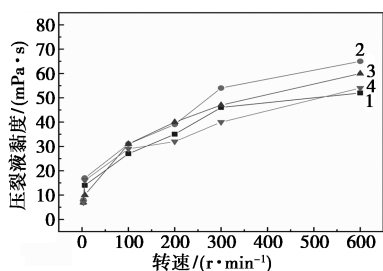
2.1 添加组分对压裂液粘度的影响

2.1.1 稠化剂添加量对压裂液粘度的影响

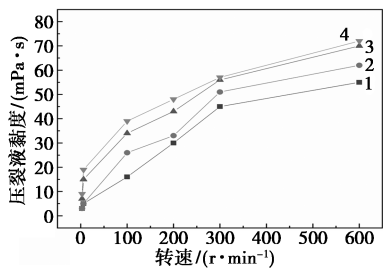
不同稠化剂添加量下压裂液的粘度分布如图1所示。基于GG稠化剂的压裂液粘度随GG添加量的增加呈先升后降趋势, 在GG添加量为8‰时粘度达到最大值; 基于SG稠化剂的压裂液粘度随SG添加量的增加也呈先升后降趋势, 在SG添加量为6‰时粘度达到最大值; 基于CMCC稠化剂的压裂液粘度值在CMCC添加量为4‰~8‰时变化较大, 在8‰~10‰时基本稳定, 在10‰时粘度达到最大值。



(a) GG



(b) SG



(c) CMCC

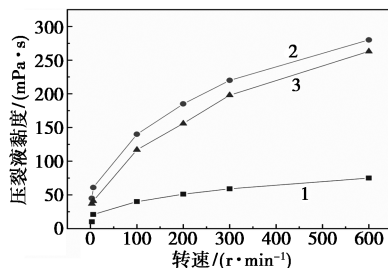
1—添加量 4‰;2—添加量 6‰;3—添加量 8‰;4—添加量 10‰

图 1 3 种稠化剂不同添加量下压裂液的粘度分布

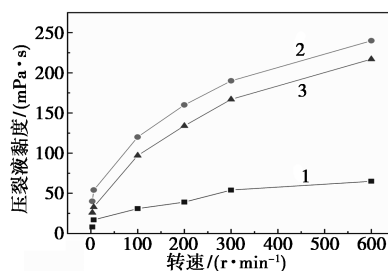
因此,优选出 GG 添加量为 8‰、SG 添加量为 6‰、CMCC 添加量为 10‰的水基压裂液作为后续研究对象,分别命名为 GG 压裂液、SG 压裂液、CMCC 压裂液。

2.1.2 交联剂添加量对压裂液粘度的影响

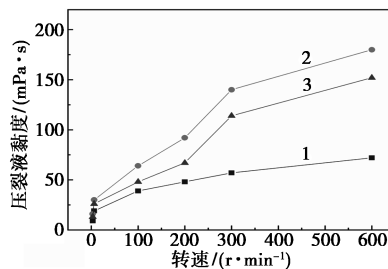
选择硼砂(十水合四硼酸钠)作为交联实验的交联剂,添加量分别为 0‰、2‰、4‰。不同硼砂添加量下 GG 压裂液、SG 压裂液、CMCC 压裂液的粘度分布如图 2 所示。由图 2 可知,在加入硼砂后压裂液的粘度均显著提升,3 种压裂液的粘度均在硼砂添加量为 2‰时达到最大值。其中 GG 压裂液、SG 压裂液粘度变化较大,又以 GG 压裂液的交联效果为最佳,CMCC 压裂液的粘度变化相对较小。这可能是硼砂交联剂与纤维素衍生物之间本来交联效果就不好导致的;而对于植物胶来说,硼砂交联剂可以很好地与其内部的线性高分子络合生成复杂的网状结构提高胶液粘性。因此,选 2‰为最佳硼砂添加量。



(a) GG



(b) SG



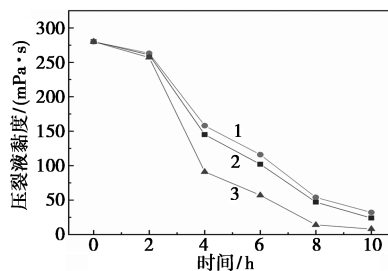
(c) CMCC

1—硼砂添加量为 0‰;2—硼砂添加量为 2‰;3—硼砂添加量为 4‰

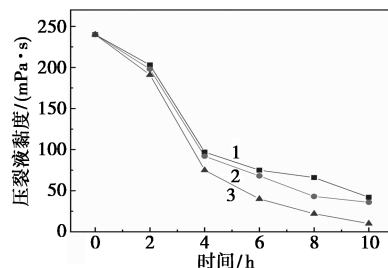
图 2 不同硼砂添加量下 3 种压裂液粘度分布

2.1.3 破胶剂种类及添加量对压裂液粘度的影响

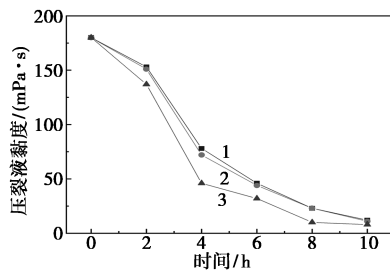
向 GG 压裂液、SG 压裂液、CMCC 压裂液中分别添加 1‰的 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 、1‰的 NaHSO_3 、1‰的 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8+1‰$ 的 NaHSO_3 , 分别测试压裂液在不同时间的粘度值,结果如图 3 所示。由图 3 可知,添加不同破胶剂后 GG 压裂液、SG 压裂液、CMCC 压裂液的粘度值均随时间增长呈下降趋势,10 h 后粘度值均降至 50 mPa·s 以下。在相同时间内,同时添加 2 种破胶剂比只添加 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 或只添加 NaHSO_3 具有更好的破胶能力。



(a) GG



(b) SG



(c) CMCC

1—1% (NH₄)₂S₂O₈; 2—1% NaHSO₃;
3—1% (NH₄)₂S₂O₈+1% NaHSO₃

图 3 添加不同破胶剂的 3 种压裂液
粘度-时间分布

2.2 水基压裂液性能评价与分析

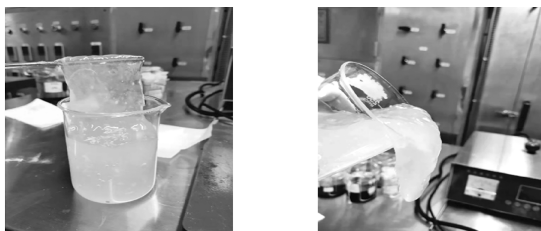
根据上述研究,已经确定了 3 种稠化剂体系压裂液基础配比,分别是 GG 添加量为 8%、SG 添加量为 6%、CMCC 添加量为 10%;硼砂交联剂添加量均为 2%。在此基础上,3 种基础配比压裂液中均添加其他组分,包括 1% (NH₄)₂S₂O₈+1% NaHSO₃ (破胶剂)、0.5% 氢氧化钠+0.8% 碳酸钠 (防腐剂)、2% 石膏粉 (降滤失剂)、8% 过硫酸钠 (氧化剂)、2% 三水硝酸铜 (过渡金属)、1.5% 十二烷基磺酸钠 (表面活性剂),最终形成了 3 种水基压裂液体系,分别记为 PF-1 (GG 稠化剂体系);PF-2 (SG 稠化剂体系);PF-3 (CMCC 稠化剂体系)。进一步地考察 3 种水基压裂液体系的表观粘度、挑挂性能、耐高温性能、破胶性能、悬砂性能、残渣含量等,从而获取各压裂液体系的性能对比。

2.2.1 表观粘度

PF-1、PF-2、PF-3 的基液在 600 r/min 时粘度分别为 75、65、72 mPa·s,则它们的表观粘度值为 37.5、32.5、36 mPa·s。温度在 20~60℃ 之间时,压裂液表观粘度值均满足在 10~40 mPa·s 之间的要求。

2.2.2 挑挂性能

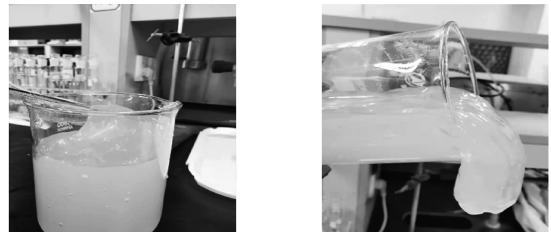
压裂液的挑挂性能评价主要是看其能否被玻璃棒挑起或者在将烧杯倾斜时是否可以出现“吐舌”现象。在室温条件下,PF-1 冻胶的挑挂性能如图 4 所示;PF-2 冻胶的挑挂性能如图 5 所示;PF-3 胶



(a)挑挂

(b)“吐舌”

图 4 PF-1 冻胶挑挂性能测试



(a)挑挂

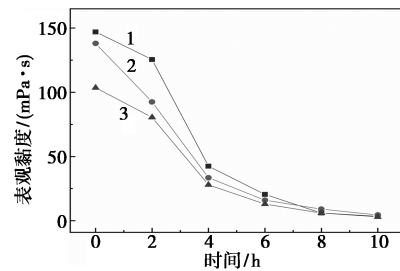
(b)“吐舌”

图 5 PF-2 冻胶挑挂性能测试

液不可挑挂。

2.2.3 破胶性能

压裂液的破胶性能主要通过压裂液的破胶时间和破胶液的表观粘度来进行评价。根据 SY/T 5107—2016《水基压裂液性能评价方法》的要求,压裂液的破胶时间要≤720 min,破胶液的表观粘度值要≤5 mPa·s。3 种压裂液体系的表观粘度值随时间的变化趋势见图 6。通过对比可知,3 种压裂液体系在 10 h 的时候均已破胶彻底,表观粘度值均小于 5 mPa·s,均满足标准要求。

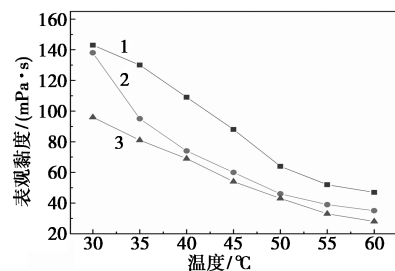


1—PF-1; 2—PF-2; 3—PF-3

图 6 3 种压裂液体系表观粘度值随时间的变化

2.2.4 耐高温性能

以 30℃ 为起始温度,然后以 5℃/min 的升温速率将 3 种压裂液体系加热。在此期间测其表观粘度值,当表观粘度值小于 50 mPa·s 时,说明压裂液已到其耐高温极限,结果如图 7 所示。通过对比可知,PF-1 表观粘度值在 60℃ 时降至 50 mPa·s 以下,为 47.5 mPa·s;PF-2、PF-3 表观粘度值均在 50℃ 时降



1—PF-1; 2—PF-2; 3—PF-3

图 7 不同压裂液耐高温性能对比

至 50 mPa·s 以下,分别为 46、42 mPa·s。综合比较下 PF-1 耐温性能要优于 PF-2、PF-3。

2.2.5 悬砂性能

压裂液的悬砂性能主要取决于压裂液的粘性大小,粘性越大代表其悬砂性能越好。本研究通过石英砂(支撑剂)在压裂液中的沉降速率来对压裂液的悬砂性能进行评价,压裂液中支撑剂的沉降速率控制在 40 mm/min 之内是比较理想的。图 8 为 PF-1 在 0、15、30 min 的沉降效果图。图 9 为 PF-2 在 0、10、20 min 的沉降效果图。图 10 为 PF-3 在 0、10 min 的沉降效果图。

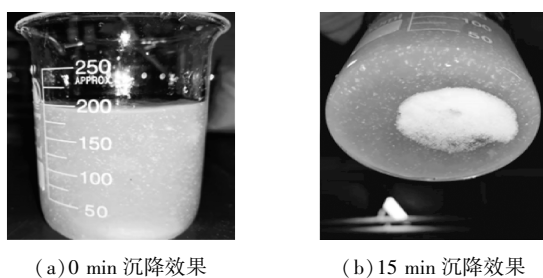


图 8 PF-1 压裂液在不同时间的沉降效果

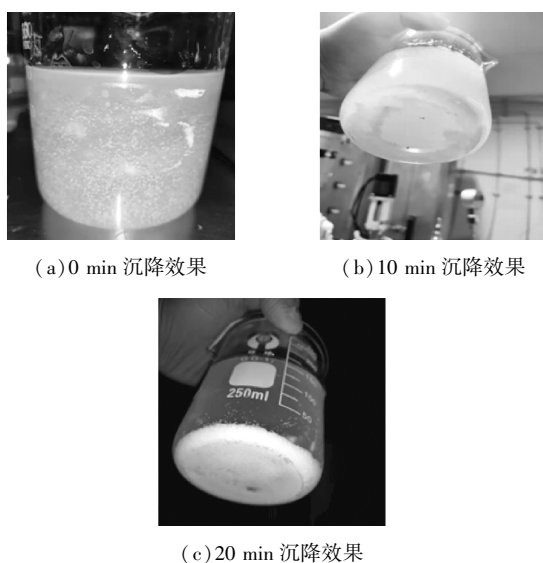


图 9 PF-2 压裂液在不同时间的沉降效果

由图 8 可以看出,石英砂支撑剂在开始时与压裂液均匀混合,15 min 后烧杯下部出现了较多的石英砂,30 min 后压裂液中的石英砂基本均已沉降

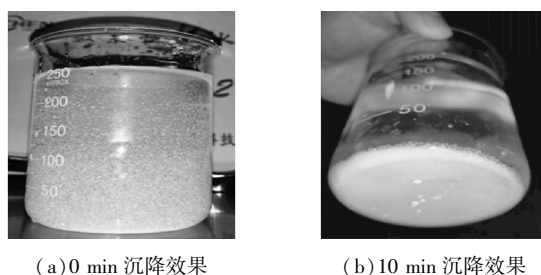


图 10 PF-3 压裂液在不同时间的沉降效果

杯底,此时可以看做悬砂实验结束,得出支撑剂在 PF-1 中的沉降速率约为 6 mm/min。由图 9 可以看出,支撑剂在开始时与压裂液均匀混合,10 min 后烧杯下部出现了部分石英砂,20 min 后压裂液中的石英砂基本均已沉降至杯底,得出支撑剂在 PF-2 中的沉降速率约为 9 mm/min。由图 10 可以看出,支撑剂在开始时与压裂液均匀混合,10 min 后压裂液中的石英砂基本均已沉降至杯底,得出支撑剂在 PF-3 中的沉降速率约为 18 mm/min。支撑剂在 3 种压裂液中的沉降速率均小于标准参考值的 40 mm/min,说明 3 种压裂液体系的悬砂性能均优异。

2.2.6 残渣含量

压裂液残渣指的是压裂液破胶后,破胶液中仍存在的不溶性物质。3 种压裂液体系残渣含量对比如表 2 所示。

表 2 3 种压裂液体系残渣含量对比

压裂液	稠化剂	交联剂	残渣含量/(mg·L ⁻¹)
PF-1	GG	十水合四硼酸钠	376
PF-2	SG		720
PF-3	CMCC		145

由表 2 可知,PF-1 破胶后的残渣含量约为 376 mg/L;PF-2 破胶后的残渣含量约为 720 mg/L;PF-3 破胶后的残渣含量约为 145 mg/L。研究得出,PF-1、PF-3 破胶后的残渣含量小于 600 mg/L,符合 SY/T 5107—2016《水基压裂液性能评价方法》的要求。PF-2 破胶后的残渣含量大于 600 mg/L,不符合要求。

3 结论

本研究通过制备基于瓜尔胶、田菁胶和羧甲基纤维素钠稠化剂的压裂液体系,筛选优化了水基压裂液的组成。其中性能最佳的是基于瓜尔胶的压裂液体系(PF-1),其配比为 8‰瓜尔胶(稠化剂)、2‰硼砂(交联剂)、1‰过硫酸铵+1‰亚硫酸氢钠(破胶

剂)、0.5%氢氧化钠+0.8%碳酸钠(防腐剂)、2%石膏粉(降滤失剂)、8%过硫酸钠(氧化剂)、2%三硝酸铜(过渡金属)、1.5%十二烷基磺酸钠(表面活性剂)。基于瓜尔胶为稠化剂的水基压裂液表观粘度为37.5 mPa·s;挑挂性能优异;彻底破胶时间为10 h;耐温性能好,60℃时表观粘度降至50 mPa·s以下;悬砂性能为6 mm/min;残渣含量为376 mg/L,均优于行业标准要求。

参考文献

- [1] Chen B, Xu J, Zhu L Z. Controllable chemical redox reactions to couple microbial degradation for organic contaminated sites remediation: A review[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2024, 139: 428-445.
- [2] Nie J, Wang Q M, Han L J, *et al.* Synergistic remediation strategies for soil contaminated with compound heavy metals and organic pollutants[J]. *J Environ Chem Eng*, 2024, 12(4): 113145.
- [3] Cheng M, Zeng G M, Huang D L, *et al.* Hydroxyl radicals based advanced oxidation processes (AOPs) for remediation of soils contaminated with organic compounds: A review[J]. *Chem Eng J*, 2016, 284: 582-598.
- [4] Shi F J, Feng S J. Oxidation effectiveness and kinetics of potassium permanganate on low-permeability phenanthrene-contaminated soil under fracturing conditions[J]. *Chem Eng J*, 2024, 496: 154373.
- [5] Yukselen-Aksoy Y, Reddy K R. Electrokinetic delivery and activation of persulfate for oxidation of PCBs in clayey soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(1): 175-184.
- [6] 沈曙华, 余锦涛, 孙天宇. 水力压裂增透多环芳烃低渗场原位修复技术研究进展[J]. *上海化工*, 2023, 48(5): 47-51.
- [7] 唐颖, 唐玄, 王广源, 等. 页岩气开发水力压裂技术综述[J]. *地质通报*, 2011, 30: 393-399.
- [8] Jaber T J, Saghir M Z. Three-dimensional study of permeability effect on convection in heterogeneous porous medium filled with a ternary hydrocarbon mixture[J]. *Journal of Porous Media*, 2011, 14(4): 305-315.
- [9] 余锦涛, 孙天宇, 戴毅. 水力压裂结合化学氧化法修复多环芳烃污染的低渗土壤[J]. *环境污染与防治*, 2024, 46(2): 174-180.
- [10] 何丹丹, 赖璐. 油气田废水配制水基压裂液技术研究进展[J]. *工业水处理*, 2024, 45(4): 1-17.
- [11] 周福, 赵健, 郭布民, 等. 中低温淡水基压裂液在海上油田的应用[J]. *广州化工*, 2024, 52(18): 164-166.
- [12] 罗梓轩, 袁斌, 张世阔, 等. 耐温水基聚合物压裂液制备及性能评价[J]. *当代化工*, 2024, 53(9): 2036-2039, 2044.
- [13] 丁瑜, 辜思曼, 何方舟, 等. 纳米材料在水基压裂液中的应用研究进展[J]. *石油化工*, 2022, 51(1): 100-106.
- [14] 何青, 姚昌宇, 袁胥, 等. 水基压裂液体系中交联剂的应用进展[J]. *油田化学*, 2017, 34(1): 184-190.
- [15] 李景娜, 张金生, 李丽华, 等. 水基压裂液有机硼交联剂的合成[J]. *精细石油化工*, 2013, 30(5): 33-36.
- [16] 林蔚然, 黄凤兴, 伊卓. 合成水基压裂液增稠剂的研究现状及展望[J]. *石油化工*, 2013, 42(4): 451-456.
- [17] 易辉永, 王世彬, 赵占江, 等. 耐盐、耐高温水基压裂液研制[J]. *应用化工*, 2020, 49(S2): 69-74.
- [18] 侯晓晖, 王煦, 王玉斌. 水基压裂液聚合物增稠剂的应用状况及展望[J]. *西南石油学院学报*, 2004, 26(5): 60-62, 89.
- [19] 苏清清, 王瑞芳. 水基压裂液增稠剂研究进展[J]. *化工设计通讯*, 2024, 50(7): 117-120.
- [20] 王满学, 何静, 韦海龙, 等. 可重复使用的水基压裂液的制备与性能评价[J]. *油田化学*, 2022, 39: 21-27.
- [21] 李昭滢, 杨旭, 杨杰, 等. 压裂液稠化剂两性聚丙烯酰胺的合成与性能评价[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(2): 109-115.
- [22] 王满学, 刘建伟, 何静, 等. 水基压裂液重复使用技术的现状及发展趋势[J]. *断块油气田*, 2018, 25(3): 394-397.
- [23] 王海荣, 张金生, 李丽华, 等. 水基压裂液性能影响因素的研究[J]. *现代化工*, 2014, 34(8): 95-97. ■
- [14] 韩广顺, 丁红胜, 黄云, 等. 套管式相变储热单元储热换热的研究[J]. *热能动力工程*, 2016, 31(2): 14-19.
- [15] Sparrow E M, Larson E D, Ramsey J W. Freezing on a finned tube for either conduction-controlled or natural-convection-controlled heat transfer[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1981, 24: 273-284.
- [16] Padmanabhan P V, Krishna M M V. Outward phase change in a cylindrical annulus with axial fins on the inner tube[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1986, 29: 1855-1868.
- [17] Marcel L. Study of the heat transfer behavior of a latent heat thermal energy storage unit with a finned tube[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1993, 36: 2083-2092.
- [18] Velraj R, Seeniraj R V, Hafner B, *et al.* Experimental analysis and numerical modelling of inward solidification on a finned vertical tube for a latent heat storage unit[J]. *Solar Energy*, 1997, 60: 281-290.
- [19] Ismail K A R, Alves C L F, Modesto M S. Numerical and experimental study on the solidification of PCM around a vertical axially finned isothermal cylinder[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2001, 21: 53-77.
- [20] Eftekhari J, Haji-Sheikh A, Lou D Y S. Heat transfer enhancement in a paraffin wax thermal storage system[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1984, 106: 299-306.
- [21] Choi J C, Kim S D, Han G. Heat transfer characteristics in low-temperature latent heat storage systems using salt-hydrates at heat recovery stage[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1996, 40: 71-87.
- [22] Al-Abidi A, Mat S, Sopian K, *et al.* Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 53: 147-156.
- [23] Liu Y, Duan J, He X, *et al.* Experimental investigation on the heat transfer enhancement in a novel latent heat thermal storage equipment[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 142: 361-370. ■

(上接第231页)