



聚醚类稠油降黏剂的合成及降黏机理研究

张培智

Synthesis and Viscosity Reduction Mechanism of Polyether Viscosity Reducer for Heavy Oil

ZHANG Peizhi

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024106>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

古城油田B125区块稠油油藏超高分子量聚合物驱技术

Ultra-High Molecular Weight Polymer Flooding Technology for Heavy Oil Reservoirs in Block B125 of the Gucheng Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(1): 66–71 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019127>

苏北陆相页岩油高性能水基钻井液技术

Technique of High-Performance Water-Based Drilling Fluid for Continental Shale Oil in Subei Basin

石油钻探技术. 2024, 52(4): 51–56 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024061>

新疆风城油田稠油热采高温封堵剂研究与现场试验

Study and Field Test on a High Temperature Plugging Agent for the Thermal Recovery of Heavy Oil in Fengcheng Oilfield, Xinjiang

石油钻探技术. 2021, 49(6): 113–117 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021132>

压裂液稠化剂两性聚丙烯酰胺的合成与性能评价

Synthesis and Property Evaluation of an Amphoteric Polymer Fracturing Fluid Thickener

石油钻探技术. 2023, 51(2): 109–115 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023044>

纳米材料改善压裂液性能及驱油机理研究

Study on Mechanism of the Fracturing Fluid Performance Improvement and Oil Displacement Using Nanomaterials

石油钻探技术. 2022, 50(1): 103–111 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021118>

缝洞型碳酸盐岩油藏注氮气致稠机理研究

Research on Crude Oil Thickening Mechanisms during Nitrogen Injection in Fracture-Cavity Carbonate Reservoirs

石油钻探技术. 2021, 49(5): 75–80 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021015>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2024106

引用格式: 张培智. 聚醚类稠油降黏剂的合成及降黏机理研究 [J]. 石油钻探技术, 2025, 53(1): 102–107.

ZHANG Peizhi. Synthesis and viscosity reduction mechanism of polyether viscosity reducer for heavy oil [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2025, 53(1): 102–107.

聚醚类稠油降黏剂的合成及降黏机理研究

张培智

(中国石化胜利油田分公司河口采油厂, 山东东营 257299)

摘 要: 为解决传统降黏剂在辅助稠油举升过程中因搅拌速度低无法与采出液充分混合, 导致现场应用效果不佳的问题, 以苯乙烯、马来酸酐、壬基酚聚氧乙烯醚为主要原料, 合成了一种聚醚类稠油降黏剂 MSN, 通过室内试验测试了其降黏性能, 并分析了降黏机理。试验结果表明, 在搅拌速度 50 r/min、搅拌 1 min 条件下, MSN 对稠油的降黏率达到 95.6%, 24 h 后降黏率仍保持在 87.2%, 表现出低搅拌速度下降黏能力和降黏稳定性较强的特点; 观察 MSN 加入稠油前后胶质和沥青质形貌的扫描电镜结果发现, 胶质和沥青质的聚集结构发生了明显的分散。分析认为, MSN 通过分散作用, 减弱了稠油中胶质和沥青质分子间的相互作用, 使其不能形成结构稳定的胶体, 从而实现稠油降黏的目的。研制的降黏剂 MSN 为稠油油藏高效开发提供了技术支撑。

关键词: 稠油降黏剂; 降黏性能; 降黏机理; 分散降黏; 稠油开发

中图分类号: TE39

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2025)01-0102-06

Synthesis and Viscosity Reduction Mechanism of Polyether Viscosity Reducer for Heavy Oil

ZHANG Peizhi

(Hekou Oil Production Plant, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong, 257299, China)

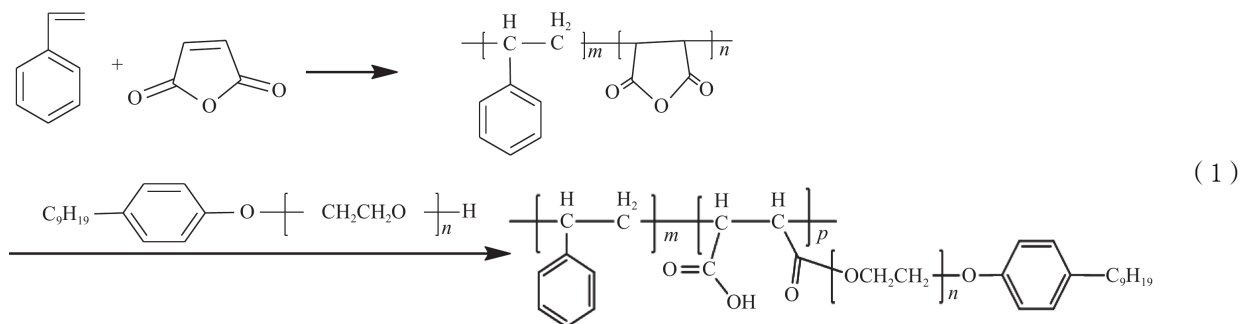
Abstract: The traditional viscosity reducer has low stirring strength in the process of auxiliary heavy oil lifting, and it fails to be fully mixed with the produced liquid, leading to a poor on-site application effect. To solve this problem, a polyether viscosity reducer for heavy oil (MSN) was synthesized with styrene, maleic anhydride, and nonylphenol polyoxyethylene ether as main raw materials, and its viscosity reduction performance was investigated by laboratory tests. The viscosity reduction mechanism was discussed. The results show that MSN can achieve a viscosity reduction rate of 95.6% under the condition of stirring at 50 r/min for 1 min and can still maintain a viscosity reduction rate of 87.2% after 24 h. It also shows strong viscosity reduction ability and viscosity reduction stability under low stirring intensity. Scanning electron microscope (SEM) is used to observe the morphology of colloid and asphaltene before and after the addition of MSN and results show that the addition of MSN significantly disperses the original agglomerated structure of colloid and asphaltene. The analysis finds that MSN reduces the interaction between colloid and asphaltene molecules in heavy oil through dispersion and prevents them from forming a colloidal stable structure, so as to achieve the purpose of viscosity reduction in heavy oil. The successful development of viscosity reducer MSN provides technical support for the efficient development of heavy oil.

Key words: heavy oil viscosity reducer; viscosity reduction performance; viscosity reduction mechanism; dispersion viscosity reduction; heavy oil development

收稿日期: 2024-01-10; 改回日期: 2024-04-20。

作者简介: 张培智 (1976—), 男, 山西介休人, 2001 年毕业于中国地质大学 (武汉) 石油工程专业, 2013 年获中国石油大学 (华东) 石油工程专业工程硕士学位, 主要从事油田开发及管理工作。E-mail: zpz761211@163.com。

稠油黏度高的原因是其胶质、沥青质含量高^[1-3], 稠油降黏技术是实现稠油经济高效开发的关键^[4-17]。胜利油田稠油资源量丰富^[18], 经过多年的攻关研究, 已经形成电加热降黏^[19]、掺水降黏^[20]和化学降黏^[21]等稠油辅助举升降黏技术, 但电加热降黏技术能耗高, 导致吨油成本约升高 200 多元, 在低油价形势下严重影响了其现场应用; 掺水降黏技术对稠油黏度的适用范围窄, 且对水质要求高, 前期水处理工艺复杂且成本高; 化学降黏技术具有成本低、使用范围广的优点, 目前以廉价的磺酸盐型表面活性剂为主, 依靠乳化作用实现稠油降黏^[22-27], 但需要对油水混合液强烈搅拌以形成乳状液, 这在现场稠油举升过程中很难实现, 导致化学降黏效果较差, 需要研制一种能够在低搅拌速度下实现高效降黏的降黏剂, 以改善化学降黏效果。为此, 笔者以苯乙烯、马来酸酐、壬基酚聚氧乙烯醚为主要原料, 合成了一种聚醚类稠油降黏剂(MSN), 能够破坏稠油中胶质和沥青质形成胶体的稳定结构, 从而降低稠油黏度, 改善稠油的流动性。



1.3 IR 和核磁谱图分析

采用 VERTEX-70 型红外光谱仪, 对反应产物的结构和化学组成进行检测, 产物的红外谱图如图 1 所示。由图 1 可以看出, 羧基($1\,127\text{ cm}^{-1}$)、羟基($3\,425\text{ cm}^{-1}$)、酯基($1\,715\text{ cm}^{-1}$)及苯环特征峰都

存在, 说明原料都参与了化学反应。采用 LC20 型凝胶渗透色谱仪和 RID20A 液相色谱仪, 测定反应产物的相对分子质量, 其数均相对分子质量为 7 805, 进一步证明发生了聚合反应。由此可见, 反应产物即为聚醚类稠油降黏剂 MSN。

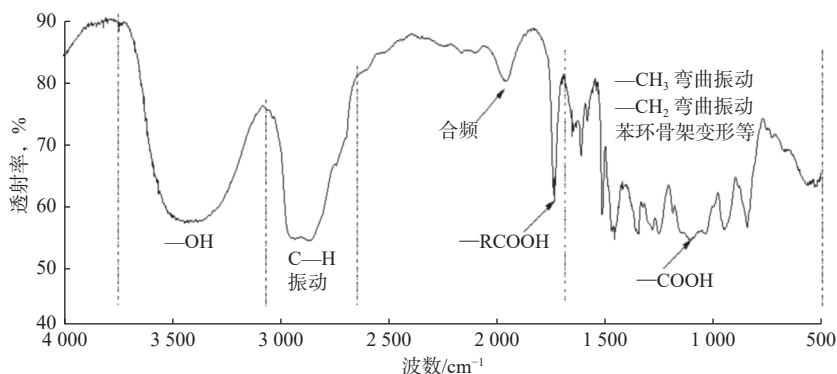


图 1 MSN 的红外谱图

Fig.1 Infrared spectrum of MSN

2 MSN 降黏性能评价

采用 TW、SWJ、XJF 和 MSN 等 4 种降黏剂, 分别配制 30 mL 质量分数 0.8% 的降黏剂溶液, 并分别加入到 70 mL 稠油 (50 ℃ 脱水脱气黏度为 6 240 mPa·s) 中, 用 HJ-5 型多功能搅拌器在转速 50~150 r/min 条件下搅拌 1 min, 测量其在 50 ℃ 温度下的降黏率, 同时测量不同时间 (24 h 以内) 下稠油黏度的恢复情况。降黏率越高, 表明降黏能力越强; 恢复速度越慢, 表明稳定性越好。

2.1 降黏率试验结果

4 种降黏剂在不同搅拌速度下的降黏率试验结果如表 1 所示。由表 1 可以看出, 在 50 r/min 搅拌速度下, 搅拌 1 min 时降黏剂 MSN 的降黏率最高, 可以达到 95.60%, 远超其他 3 种降黏剂, 表现出在低搅拌速度下高降黏性的特点。

2.2 降黏稳定性试验结果

由于稠油自油层流出至地面联合站需要一定的时间, 这要求在流动期间稠油黏度不会发生较大幅度的回升。为此, 采用 4 种降黏剂, 分别配制了质量

表 1 不同搅拌速度下 4 种降黏剂的降黏率试验结果

Table 1 Test results of viscosity reduction rate of four kinds of viscosity reducers under different stirring intensities

降黏剂	质量分数, %	降黏率, %		
		50 ^①	100 ^①	150 ^①
TW	0.8	77.85	87.66	91.14
SWJ	0.8	76.45	87.25	92.16
XJF	0.8	78.65	89.15	94.18
MSN	0.8	95.60	97.32	98.38

注: ①为搅拌速度, r/min。

分数 1.0% 的降黏剂溶液, 加入稠油后, 在 50.0 ℃ 温度下、以 200 r/min 搅拌速度搅拌 2 min 后, 测量静置不同时间下稠油流体的黏度, 结果见表 2。

从表 2 可以看出, 加入降黏剂 TW 和 SWJ 的稠油其黏度的恢复速度较快, 而加入降黏剂 MSN 和 XJF 的稠油其黏度的恢复速度较慢, 其中加入降黏剂 MSN 的稠油 12 h 后的降黏率保持在 97.8%, 24 h 后降黏率仍保持在 87.2%, 可满足现场稠油举升及集输需求。

表 2 稠油加入 4 种降黏剂后不同时间下的黏度

Table 2 Viscosity of heavy oil at different time after adding four kinds of viscosity reducers

降黏剂	不同时间下稠油的表现黏度/(mPa·s)								
	1 h ^①	2 h ^①	3 h ^①	6 h ^①	9 h ^①	12 h ^①	15 h ^①	20 h ^①	24 h ^①
TW	149	175	553	948	1 570	2 240	3 300	4 500	4 700
SWJ	689	880	960	1 500	1 689	2 350	3 702	4 990	5 220
XJF	567	580	720	879	1 161	1 209	1 930	2 009	2 100
MSN	102	80	85	93	104	136	176	395	799

注: ①为加入降黏剂后的时间。

3 MSN 降黏机理分析

为分析 MSN 的降黏机理, 考察了加入 MSN 前后稠油流体的黏温特性曲线、沥青质及胶质形貌变化情况。

3.1 MSN 对稠油黏温特性的影响

将脱水脱气的空白稠油 (黏度为 14 980 mPa·s) 及加有 0.8%MSN 的稠油 (黏度为 14 980 mPa·s) 加热到 80 ℃, 并放置于恒温水浴中 1 h, 再以 0.5 ℃/min 的速度降温至 30 ℃, 降温期间采用布氏旋转黏度计测量不同温度下的黏度, 结果如图 2 所示。

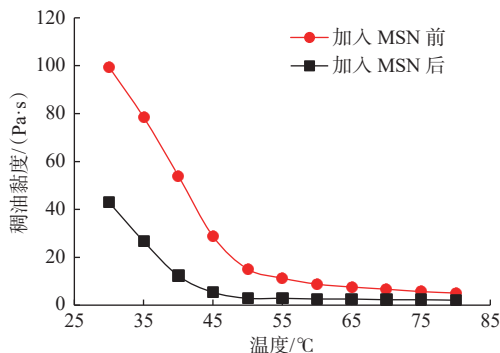


图 2 降黏剂 MSN 对稠油黏温特性的影响

Fig.2 Effect of MSN on viscosity temperature characteristics of heavy oil

由图 2 可以看出,在温度 50~80 ℃ 区间内,随着温度降低,稠油加入 MSN 前后的黏度变化均较为平缓;在温度 30~50 ℃ 区间内,随着温度降低,加入 MSN 前稠油的黏度大幅度升高,但加入 MSN 后稠油黏度的变化幅度明显减小。可见,MSN 能显著降低稠油的温敏性。

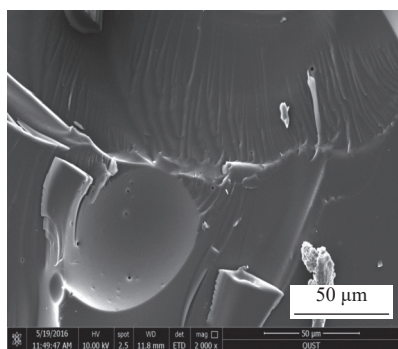
分析认为,MSN 结构上的苯环和极性官能团通过 $\pi-\pi$ 键、氢键与沥青质相互作用,分散了沥青质的空间缔合结构,并利用其具有一定活性的侧链阻止重质组分再度聚集,从而阻止了沥青质的聚集沉淀。当温度较高时,稠油分子的热运动较为活跃,沥青质的分布较为分散,此时温度对稠油黏度的作用占主导,因此降黏剂 MSN 的加入对于降低稠油黏度的作用较小;随着温度降低,稠油分子的热运动活跃度降低,沥青质具有了相互聚集并产生沉淀

的趋势,此时降黏剂的作用开始占据主导,阻止了沥青质的聚集沉淀,维持了降黏剂对沥青质的溶解分散,造成稠油黏度变化的幅度较小。

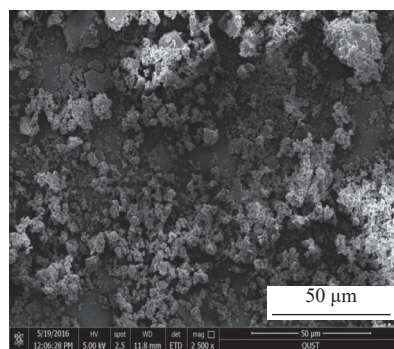
3.2 MSN 对胶质和沥青质形貌的影响

称取 100 mg 降黏剂 MSN 溶解在 30 mL 甲苯乙醇混合液(体积比 1:1)中,再加入 300 mg 胶质或沥青质,在 50 ℃ 温度下,以一定的搅拌速度搅拌 2 h,然后在真空下干燥,得到扫描电镜用样品。空白试验样品为不加降黏剂 MSN 的胶质或沥青质溶液。试验结果分别见图 3 和图 4。

由图 3 可以看出:加入 MSN 前胶质是以团聚结构存在的,这是因为胶质具有一定的极性,分子间存在较强的分子间作用力;加入 MSN 后,胶质聚集结构发生了明显的分散,说明 MSN 具有分散作用,减弱了胶质分子间的相互作用。



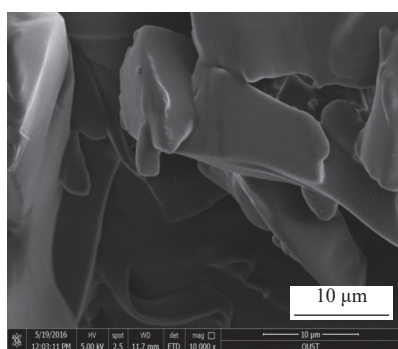
(a) 加入 MSN 前胶质形貌



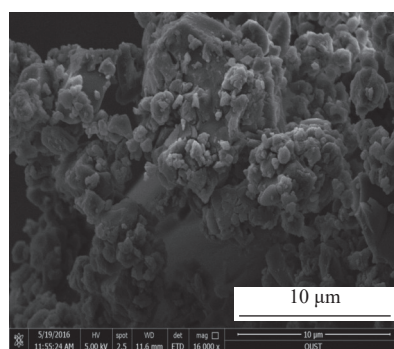
(b) 加入 MSN 后胶质形貌

图 3 降黏剂 MSN 加入前后胶质形貌的变化

Fig.3 Changes in morphology of colloid before and after MSN addition



(a) 加入 MSN 前沥青质形貌



(b) 加入 MSN 后沥青质形貌

图 4 降黏剂 MSN 加入前后沥青质形貌变化情况

Fig.4 Changes in morphology of asphaltene before and after MSN addition

由图 4 可以看出,加入 MSN 前沥青质为片状重叠聚集结构,加入 MSN 后,沥青质呈较为分散的小聚集体,说明 MSN 能够有效分散重叠堆积聚集结构的沥青质。

3.3 MSN 降黏机理分析

胶质中含有大量较强极性的 $-\text{NH}_2$ 、 $-\text{OH}$ 、 $-\text{COOH}$ 等杂原子基团,且会发生酸碱作用和缔合作用,造成自身发生聚合,使稠油黏度升高。另外,

在氢键、范德华力的作用下,胶质相互作用,形成复杂的大分子空间网状结构。基于分子相似相溶原理合成的MSN,是具有芳香环的油溶性降黏剂,可渗透到胶质片层之中,其极性基团中的强负电性的O、N等原子与胶质形成更强的氢键,从而减弱胶质之间及自身内部的有序性和内聚力,阻止大分子聚集体的形成,达到降黏的目的。此外,油溶性降黏剂结构中的长链烷基可吸附在稠油大分子表面形成溶剂化层,当稠油大分子相互靠近时,溶剂化层之间产生排斥力,使胶质更好地分散开来,从而降低稠油黏度。

沥青质是稠油中极性最强的组分,其分子中含有的羟基、羧基等基团相互形成氢键,分子间具有较强的范德华力、电荷转移力和离子间力,从而形成体积较大的片状重叠堆积结构。MSN利用其极性基团与沥青质中极性基团的相互作用、苯环与沥青质中芳香环 $\pi-\pi$ 键的相互作用,以及壬基酚聚氧乙烯醚的分散作用,有效降低了沥青质分子间的相互作用,使其不能聚集成重叠堆积结构,从而实现降低稠油黏度的目的。

综上可得,降黏剂MSN通过对胶质和沥青质的分散作用,使胶质和胶质分子之间、沥青质和沥青质分子之间、胶质和沥青质分子之间的相互作用减弱,沥青质小分子不能聚集成片状重叠堆积结构,其对胶质分子的吸附作用消失,不能形成结构稳定的胶体。也就是说,降黏剂MSN的加入,破坏了稠油中结构稳定的胶体,使稠油中大分子之间的作用力减弱,稠油的流动性得到改善。

4 结论与建议

1)室内试验结果表明,降黏剂MSN在低搅拌速度下具有高降黏性能,且具有良好的降黏稳定性。

2)降黏剂MSN通过对胶质和沥青质的分散作用,打散胶质和沥青质的堆叠状态,使其不能形成结构稳定的胶体,实现稠油降黏。

3)降黏剂MSN的降黏效果还需通过现场试验验证。建议开展现场试验,以不断优化MSN的降黏性能,满足稠油高效开发的需要。

参 考 文 献

References

- [1] 崔青, 张长桥, 修建新, 等. 稠油沥青质胶质降粘机理的分子动力学模拟[J]. 山东大学学报(工学版), 2017, 47(2): 123-130.
- [2] ZHOU Xiaodong, DONG Mingzhe, MAINI B. The dominant mechanism of enhanced heavy oil recovery by chemical flooding in a two-dimensional physical model[J]. *Fuel*, 2013, 108: 261-268.
- [3] 展学成, 马好文, 王斌, 等. 稠油黏度影响因素研究进展[J]. *石油化工*, 2019, 48(2): 222-226.
- [4] ZHAN Xuecheng, MA Haowen, WANG Bin, et al. Review of influencing factors of viscosity of heavy oil[J]. *Petrochemical Technology*, 2019, 48(2): 222-226.
- [5] WU Zhengbin, LIU Huiqing, WANG Xue, et al. Emulsification and improved oil recovery with viscosity reducer during steam injection process for heavy oil[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2018, 61: 348-355.
- [6] 陈宁宁, 宋立新, 郑云重, 等. 新型聚合油溶性稠油降粘剂的合成及性能研究[J]. *化学试剂*, 2017, 39(2): 134-136.
- [7] CHEN Ningning, SONG Lixin, ZHENG Yunchong, et al. Synthetic and properties research of a novel viscosity reducer of oil-soluble polymers[J]. *Journal of Chemical Reagents*, 2017, 39(2): 134-136.
- [8] 杨兆臣, 鲁雪梅, 代纯川, 等. 树枝型油溶性稠油降粘剂的研制[J]. *应用化工*, 2015, 44(10): 1909-1912.
- [9] YANG Zhaochen, LU Xuemei, DAI Chunchuan, et al. The study of dendritic oil-soluble viscosity reducer for heavy oil[J]. *Applied Chemical Industry*, 2015, 44(10): 1909-1912.
- [10] 王大威, 张健, 吕鑫, 等. 双子表面活性剂对海上S油田稠油降粘性能评价[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(4): 109-113.
- [11] WANG Dawei, ZHANG Jian, LYU Xin, et al. Evaluation of Gemini surfactant for viscosity reduction of heavy oil in offshore S Oil-field[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(4): 109-113.
- [12] 王大喜, 杜永顺, 陈秋芬. 全氟聚醚酰胺磺酸钠稠油降粘剂的合成和表面活性[J]. *石油学报(石油加工)*, 2004, 20(4): 56-60.
- [13] WANG Daxi, DU Yongshun, CHEN Qiufen. Synthesis and surface activity of perfluoropolyether-sulfonate viscosity reducer[J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2004, 20(4): 56-60.
- [14] 杨服民, 王惠敏, 底国彬. HRV-2稠油降粘剂的研制与评价[J]. *石油钻采工艺*, 1996, 18(3): 93-96.
- [15] YANG Fumin, WANG Huimin, DI Guobin. Development and evaluation of HRV-2 thinner for heavy crude oil[J]. *Oil Drilling and Production Technology*, 1996, 18(3): 93-96.
- [16] 薛建泉, 刘均荣, 高庆贤. 稠油井空心杆泵上掺稀油降粘举升工艺设计[J]. *石油钻探技术*, 2006, 34(5): 70-72.
- [17] XUE Jianquan, LIU Junrong, GAO Qingxian. A Lifting technological design for viscosity break by mixing light hydrocarbon in hollow rod in heavy oil well[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2006, 34(5): 70-72.
- [18] 吕柏林, 马鹏, 卢迎波, 等. 风城浅层超稠油油藏原位催化改质降黏技术[J]. *石油钻采工艺*, 2023, 45(5): 632-637.
- [19] LYU Bailin, MA Peng, LU Yingbo, et al. In-situ catalytic modification and viscosity reduction technology in shallow ultra-heavy oil reservoirs in Fengcheng[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2023, 45(5): 632-637.
- [20] 杜安琪, 毛金成, 王鼎立, 等. 中深层稠油化学降黏技术研究进展

- [J]. 天然气工业, 2022, 42(2): 110–122.
- DU Anqi, MAO Jincheng, WANG Dingli, et al. Research progress in chemical viscosity reduction technologies used for medium and deep heavy oil[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(2): 110–122.
- [13] 魏超平, 束青林, 吴光焕, 等. 敏感性普通稠油水驱油藏化学降黏实践[J]. *特种油气藏*, 2023, 30(2): 109–115.
- Wei Chaoping, Shu Qinglin, Wu Guanghuan, et al. Practice of chemical viscosity reduction in water flooding for sensitive conventional heavy oil reservoirs[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(2): 109–115.
- [14] 刘硕, 柯文奇, 杨猛, 等. 稠油开采中新型井下混配器降黏携带特性研究[J]. *石油机械*, 2022, 50(6): 91–97.
- LIU Shuo, KE Wenqi, YANG Meng, et al. Viscosity reduction and carrying characteristics of a new downhole mixer in heavy oil recovery[J]. *China Petroleum Machinery*, 2022, 50(6): 91–97.
- [15] 周娜, 姜东, 杜玮暄, 等. 稠油井过泵旋流混合降黏举升技术[J]. *石油钻探技术*, 2016, 44(6): 84–87.
- ZHOU Na, JIANG Dong, DU Weixuan, et al. Lifting technology by swirl pumping vortex-reducing viscosity for heavy oil production well[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, 44(6): 84–87.
- [16] 赵帅, 蒲万芬, MIKHAIL A V, 等. 催化剂和环境温度对稠油燃烧的影响[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(4): 164–173.
- ZHAO Shuai, PU Wanfen, MIKHAIL A V, et al. Effects of catalyst and environment temperature on heavy oil combustion[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2023, 45(4): 164–173.
- [17] 王春升, 杨天宇, 杨泽军, 等. 海上稠油油田热采开发工程技术研究与应用[J]. *中国海上油气*, 2023, 35(5): 193–200.
- WANG Chunsheng, YANG Tianyu, YANG Zejun, et al. Engineering technologies study and application of offshore heavy oil thermal recovery[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(5): 193–200.
- [18] 杨勇. 胜利油田稠油开发技术新进展及发展方向[J]. *油气地质与采收率*, 2021, 28(6): 1–11.
- YANG Yong. New progress and next development directions of heavy oil development technologies in Shengli Oilfield[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(6): 1–11.
- [19] 王俊奇, 张祖峰, 李建馨, 等. 稠油开采电加热设备节能技术[J]. *石油机械*, 2010, 38(9): 45–48.
- WANG Junqi, ZHANG Zufeng, LI Jianxin, et al. The energy-saving technology of the electric heater for heavy oil recovery[J]. *China Petroleum Machinery*, 2010, 38(9): 45–48.
- [20] 郝林, 孙楠, 王东, 等. 泵上掺水工艺在孤东油田稠油油藏的应用[J]. *油气地质与采收率*, 2004, 11(3): 71–73.
- HAO Lin, SUN Nan, WANG Dong, et al. Application of water blending technology above pump in the heavy oil reservoir of Gudong Oilfield[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2004, 11(3): 71–73.
- [21] 徐立民, 范玉斌, 王建恩. 深层稠油开采配套技术在胜利油田的应用研究[J]. *石油天然气学报*, 2011, 33(4): 138–141.
- XU Limin, FAN Yubin, WANG Jian'en. Matching technique for deep heavy-oil production and its application[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2011, 33(4): 138–141.
- [22] 辛迎春. 纳米 SiO₂ 改性稠油高效破乳剂的研制及应用[J]. *石油钻探技术*, 2008, 36(5): 75–77.
- XIN Yingchun. Research and application of modified Nano-sized silica demulsifier for heavy oil[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2008, 36(5): 75–77.
- [23] 唐清. ZDT 乳化降黏剂在超深井稠油开发中的应用[J]. *石油钻探技术*, 2008, 36(2): 74–76.
- Tang Qing. Application of ZDT in heavy oil recovery in ultra-deep well[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2008, 36(2): 74–76.
- [24] 刘书杰, 安志杰, 于继飞, 等. 海上稠油乳化降黏剂的研究及评价[J]. *断块油气田*, 2015, 22(6): 829–832.
- LIU Shujie, AN Zhijie, YU Jifei, et al. Research and performance evaluation of heavy oil viscosity reducer for offshore oilfield[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2015, 22(6): 829–832.
- [25] 张阳, 安高峰, 蒋琪, 等. 稠油化学降黏剂研究进展与发展趋势[J]. *特种油气藏*, 2024, 31(1): 9–19.
- ZHANG Yang, AN Gaofeng, JIANG Qi, et al. Research progress and development trend of heavy oil chemical viscosity reducing agent[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2024, 31(1): 9–19.
- [26] 葛际江, 李德胜, 张贵才. 新型耐温稠油降黏剂的制备与评价[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2007, 29(5): 112–115.
- GE Jijiang, LI Desheng, ZHANG Guicai. Preparation and evaluation of temperature resistance viscosity reducer for heavy oil[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2007, 29(5): 112–115.
- [27] 李成见. 海上欠饱和稠油油田原油降黏方式探讨[J]. *中国海上油气*, 2004, 16(6): 408–411.
- LI Chengjian. The discussion of reducing crude oil viscosity methods for offshore undersaturated viscous oil field[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2004, 16(6): 408–411.

[编辑 陈会年]