

伊拉克M油田防砂筛管堵塞物分析及解堵技术研究应用

邵尚奇^{*#}, 高纪超, 陈 军

中海油田服务股份有限公司, 天津

收稿日期: 2023年10月16日; 录用日期: 2023年12月12日; 发布日期: 2023年12月25日

摘 要

伊拉克M油田井下筛管出现了较为严重的作业后堵塞问题, 严重影响了油井正常生产, 针对这一问题, 鉴定了油井堵塞物类型并研制了一种油包酸型中间相解堵剂。首先, 对M油田的储层特征进行了全面的分析, 了解其潜在的油井堵塞可能, 得出温压系统改变导致有机垢沉积和CO₂、H₂S腐蚀剥落铁锈的可能堵塞原因。然后, 根据XRF等大型仪器分析结果, 确定了有机堵塞物的主体为沥青质, 无机堵塞物的主体为氧化铁, 碳酸钙以及硫化亚铁, 最后, 通过多种酸液体系的溶解实验, 进一步确认了堵塞物的类型, 并优选出一种油包酸型中间相解堵配方体系和与之相适应的缓蚀剂体系, 具备同时溶蚀有机垢和无机垢的复合解堵能力, 并用模拟垢样对其进行了溶解验证实验。结果表明, 该中间相酸解堵液体系在90℃条件下, 对油套管的N80钢片无溶蚀作用, 而2 h内对模拟垢样有着超过73%的溶蚀率, 达到既能保护油套管而又能溶蚀堵塞物的目的, 显示出良好的解堵效率。该解堵液体系, 加入DCA-6缓蚀剂后, 腐蚀速率大幅降低, 超过行业的一级标准。该体系具备较强的缓速性能, 可以达到缓速深部酸化的效果。

关键词

中间相, 解堵液, 堵塞物, 筛管, M油田, 伊拉克

Analysis of Oil Sand Screen Blockage in M Oilfield in Iraq and Blockage Removal Techniques

Shangqi Shao^{*#}, Jichao Gao, Jun Chen

China Oilfield Service Limited, Tianjin

Received: Oct. 16th, 2023; accepted: Dec. 12th, 2023; published: Dec. 25th, 2023

^{*}第一作者。

[#]通讯作者。

文章引用: 邵尚奇, 高纪超, 陈军. 伊拉克 M 油田防砂筛管堵塞物分析及解堵技术研究应用[J]. 石油天然气学报, 2023, 45(4): 350-359. DOI: 10.12677/jogt.2023.454043

Abstract

Blockage of sand screen was found in the down hole of M oilfield of Iraq, which seriously affected the well production. To solve this problem, the type of the blockage was identified by XRD instrument, and a high efficiency single-phase microemulsion formulation was developed to solve the problem. After identifying the composition of the blockage, the reservoir characteristics of the M oilfield were analyzed to ascertain the potential reasons of the blockage. It was found that the potential reason of organic scale is high asphaltene content in crude oil, the potential reasons of inorganic scale are the peeling iron rust by H₂S & CO₂ corrosion, calcium carbonate precipitate from formation water, sand particles flowing from formation, which causes the well blocking. Then using XRF instrument, the main component of the organic scale was asphaltene, and the main components of inorganic scale were iron oxide, calcium carbonate and ferrous sulfide. Finally, by dissolving the scale in various acid solutions, the type of the scale was further confirmed. A blockage removing fluid, made up of an optimized W/O blockage removal fluid, and a corrosion inhibitor fluid, were developed and tested organic and inorganic scale solubility by simulated scale sample. It was found that the blockage removing fluid thermal stability is well at 90°C and has no harm to the N80 coupon. The dissolved ratio of the simulated scale sample is over 73% in 2 h. This blockage removing fluid can not only protect casing & sand screen, also can dissolve the blockage, and it shows excellent blockage removing abilities. After adding a corrosion inhibitor DCA-6, its corrosion rate reduces dramatically, which exceeds the Class 1 of corrosion industrial standard requirement. The blockage removal fluid has strong retardance ability on acid-rock reaction, which is beneficial for deep penetration acidizing.

Keywords

Mesophase, Blockage Removing Fluid, Blockage, Sand Screen, M Oilfield, Iraq

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

M 油田位于伊拉克的东南部，是以白垩系和第三系碳酸盐岩和砂岩油藏为主的带边底水多层系大型油田，油藏埋深 2800~4232 m，孔隙度 10%~30%，平均孔隙度 14.5%~19%，渗透率 1~1000 mD。原油属于中 - 重质原油，原油 API 为 21~25.4，地层条件下原油粘度 0.96~3.4 C。储层地温梯度 3.35°C/100m，属正常的温度系统。自 2015 年开始，M 油田的砂岩储层逐渐得到开发，砂岩储层采用简易筛管的防砂方式。但在生产过程中，出现了防砂后产量迅速下降的现象，井下筛管出现了较为严重的堵塞现象，严重影响了油井的正常生产，而修井作业耗费时间长，费用成本较高，为了节省作业成本和时间，并提高解堵效率，有必要开展井下堵塞原因分析及防治对策研究，为解堵及相应的开发方案提供技术支持。因此，需要对地层水样、原油样品、井下堵塞物分析和储层特征分析，阐明防砂筛管堵塞的原因与机理，开展堵塞物溶蚀和解堵实验，筛选出高效、经济且安全的解堵液。

通过对 M 油田储层进行细致全面的分析，确定了井下堵塞的潜在来源，利用 EDX 等大型仪器对堵塞物样品进行分析，确认堵塞物的类型，最后优选出一种多功能弱酸解堵体系，可溶蚀有机垢和无机垢，通过室内实验研究了解堵液体系的溶蚀性能、缓速性能和腐蚀控制性能。经过现场应用，解堵体系可有

解除防砂筛管的堵塞,提高油井产能。

2. 潜在堵塞来源分析

导致井下筛管堵塞的原因有很多,需要根据储层的特征进行针对性的分析。目前大致的井下堵塞物类型可分为几大类:无机垢(CaCO_3 、 MgCO_3) [1];沥青质沉积[2];疏水缔合聚合物堵塞[3];管柱腐蚀沉积(FeCO_3 、 FeS) [4];储层矿物(硅酸盐、黏土) [5];蜡质沉积[6];天然气水合物[7]。M油田以中孔、中低渗为主,储集空间主要以孔隙性、孔隙裂缝性为主,防砂筛管的防砂精度与砂粒的粒度中值较为接近,筛管容易受到损害,造成堵塞。储层温度较高,原油中含有伴生气,原油的含水率逐渐升高,需要对水、油、气和储层矿物进行分析,找到潜在的堵塞来源,为后续的堵塞原因分析和堵塞物鉴定提供依据。

2.1. 地层水分析

地层水的结垢往往是井底堵塞的重要原因[8]。M油田地层水矿化度高达 $22.99 \times 10^4 \text{ mg/L}$,盐含量较高,钙离子含量为 $1.36 \times 10^4 \text{ mg/L}$,碳酸氢根离子含量为 423 mg/L ,存在较大的结垢风险。利用 Scalchem 计算了含伴生天然气的地层水从井底到地面的结垢特征(图 1),从预测结果来看,地层水在生产过程中都不存在盐析现象,但都具有结碳酸钙垢和硫酸钙垢的趋势,Asmari 地层水在地层温度压力条件下结碳酸钙垢量在 200 mg/L 左右,结硫酸钙垢在 600 mg/L 左右,并且受温度和压力的影响较小。

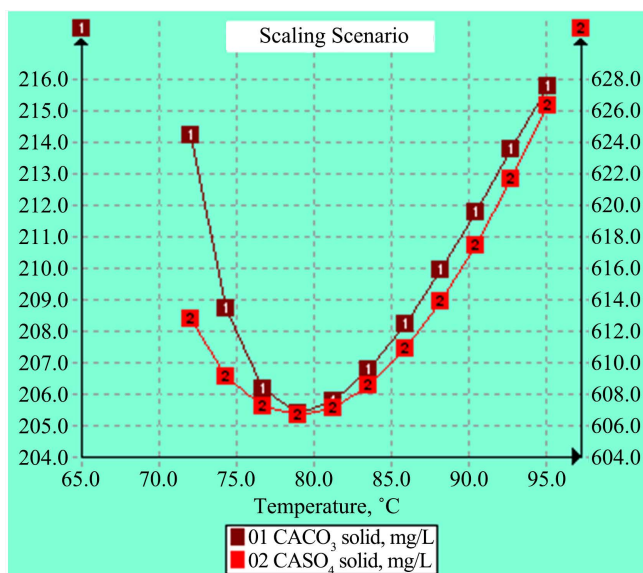


Figure 1. Prediction results of formation water scaling

图 1. 地层水结垢预测结果

2.2. 气体分析

酸性气体如 CO_2 和 H_2S 等是腐蚀剥离生产管柱铁材质的重要因素[9]。 CO_2 可溶于水生成碳酸,与铁材质发生化学反应从而腐蚀生产管柱。 H_2S 气体中的氢原子渗入钢的内部固溶于晶格中,使钢的脆性增加,在外界应力的作用下形成开裂。酸性气体的腐蚀与温度和分压有很大关系。如表 1 所示,M油田筛管所在层系的 H_2S 含量为 0,无 H_2S 腐蚀,无生成 FeS 垢的可能。 CO_2 的分压超过 0.21 MPa ,说明筛管有腐蚀。当温度条件在 $60^\circ\text{C} \sim 110^\circ\text{C}$ 范围内(储层温度为 95°C),已局部腐蚀为主,在高速流动的状态下易破坏腐蚀产物膜,造成腐蚀加剧。

Table 1. Partial pressure calculation of two types of acidic gases**表 1.** 两种酸性气体的分压计算

气体	层系 1		层系 2	
	物质的量分数, %	分压, MPa	物质的量分数, %	分压, MPa
CO ₂	3.44	0.62	7.12	1.29
H ₂ S	0.61	0.11	2.44	0.44

2.3. 有机垢分析

通过原油四组分分析实验发现(表 2), 原油中的沥青质含量为 10%, 饱和分含量为 21.1%, 芳香分含量为 34.2%, 胶质含量为 34.6%。原油中的重质组分含量较高, 随着油田的开发, 地层压力逐渐衰竭, 当压力低于泡点压力时, 原油发生脱气, 随着注入水或完修井液的侵入, 形成冷伤害, 造成温度下降, 原油中的沥青质等逐渐析出, 堵塞储层孔隙吼道, 这也会导致 M 油田出现有机垢沉积。

Table 2. Analysis of four component content in crude oil**表 2.** 原油四组分含量分析

原油粘度, mPa·s		原油四组分含量, %			
50℃	120℃	沥青质	饱和分	芳香分	胶质
208.2	59.4	10.0	21.2	34.2	34.6

2.4. 出砂分析

油气井出砂后会给油气井生产带来一系列严重的后果, 轻者导致油气井减产或停产、磨损设备, 严重的可以导致油气井报废。对地层出砂样品进行粒度分析(表 3), 由筛析报告可以看出: 砂样的中值粒度为 276 μm, 且以中砂、细砂为主。目前 M 油田采用简易筛管防砂, 筛管精度为 275 μm~400 μm, 这说明筛管的防砂精度与砂样中值粒度十分接近, 粒度较小的砂粒可能会经过筛管进入井筒中, 堵塞筛管。

Table 3. Test results of SFY-E sieve particle sizer**表 3.** SFY-E 型筛分粒度仪测试结果

井号	井深, m	含量, %	粒径(Φ)	粒径(μm)
F-3	3100-3103	5	0.89	539.7
		10	1.111	463
		16	1.256	418.6
		25	1.389	381.9
		30	1.466	361.9
		40	1.622	324.8
		50	1.857	276.1
		75	2.461	181.7
		84	2.672	156.9
		90	3.027	122.6
		95	3.398	94.9

3. 筛管堵塞物鉴定

将现场取的堵塞物, 分为几类: 铁锈、砂和有机垢, 分别进行实验研究。

3.1. 铁锈样品鉴定

现场返排作业取了液体样品，液体颜色呈现砖红色，经过过滤，得到了棕红色的粉末状垢样。对样品进行能量色散 X 射线光谱仪(EDX)分析可知(表 4)。主体为铁元素，其次有钙元素、硫元素、氯元素等，推测垢样为氧化铁、碳酸钙。

Table 4. Sample EDX elemental analysis

表 4. 样品 EDX 元素分析

元素	含量, %
Fe	60.909
Ca	14.924
S	9.511
Cl	7.765
Cr	2.442
Ba	1.511
Pb	1.201
Si	0.819
Sr	0.289
Cu	0.169
Zn	0.163
Mn	0.162

3.2. 砂样鉴定

M 油田的砂岩进行了 XRD 的分析(表 5)，砂岩的矿物组成主要是石英，有少量的长石、石盐。

Table 5. XRD Analysis Results of Sandstone Core in Well F-3

表 5. F-3 井砂岩岩心 XRD 分析结果

井号	矿物种类及含量, %							
	石英	钾长石	斜长石	方解石	石盐	赤铁矿	硬石膏	黏土矿物
F-3	90.2	1.0	1.8	0.6	6.4	/	/	/

3.3. 有机垢鉴定

通过对井下垢样进行分析(表 6)，发现沥青质、胶质含量较高，和原油中的重质组分含量情况一致，这更加验证了导致注水井有机堵塞的潜在原因是原油中的沥青质、胶质组分含量较高[4]，随着油田的开发，地层压力逐渐衰竭，当压力低于泡点压力时，原油发生脱气，随着注入水或完修井液的侵入，形成冷伤害，造成温度下降，原油中的沥青质等逐渐析出(图 2)，堵塞储层孔隙吼道，严重影响注水效果。

Table 6. Composition analysis of underground scale samples

表 6. 井下垢样的成分分析

沥青质	饱和分	芳香分	胶质	其他
49%	12%	19%	8%	12%



Figure 2. Organic scale samples attached to the downhole string
图 2. 井下管柱上附着的有机垢样

4. 新型解堵液开发实验研究

确定无机堵塞物主体为铁的硫化物及氧化物，有机堵塞物主体是沥青，需要对其进行溶解，但是目前可同时溶解有机垢和无机垢的解堵体系较少，因此研发了一种中间相解堵体系，可同时溶解有机垢和无机垢，且对井下油管钢材的腐蚀较小。

4.1. 中间相解堵体系

水和油为互不相溶体系，可在表面活性剂和剪切条件下，形成动力学稳定的液-液分散体系，即乳状液。乳状液粒径为微米级别，本质上仍然是两相体系，长期放置后恢复油水分层状态。Hoar 和 Schulman [8]通过室内研究发现油/水/表面活性剂/助表面活性剂可互溶为均相、稳定、透明的微乳液体系。微乳液具备油水互通的特性，可同时溶解有机质和无机质，是理想的解除混合垢的体系。本文以表面活性剂、异丙醇、油相以及水相为基础，研发了适用于筛管解堵的中间相缓速酸体系。该体系粒径为 10~100 nm，澄清透明、长期稳定，可用于根据其原理开发油酸互溶的中间相解堵体系，实现储层酸化、解堵过程中的混合介质溶解溶蚀过程。

4.2. 模拟垢样配制

从井下取出的无机垢垢样较少，为了方便室内研究，在能量色散 X 射线光谱仪(EDX)分析(表 4)的基础上，按照一定的比例(表 7)配制模拟无机垢样。

实验步骤为：取定量的 Fe_2O_3 、 CaCO_3 、 FeS 、砂样放入烘箱中烘干，按比例将样品放入清水中搅拌均匀，倒入滤纸中过滤，放入烘箱中烘干。取 2 g 垢样，按照 1:20 的比例分别加入不同的酸液体系，在 90℃ 水浴锅中加热。将溶蚀后的样品倒入滤纸中过滤，放入烘箱中烘干，称重，计算溶蚀率。

Table 7. Preparation of simulated scale samples

表 7. 模拟垢样配制

试剂	Fe_2O_3	CaCO_3	FeS	F-3 井砂样
含量, %	50%	28%	16%	6%

用原始垢样和模拟垢样分别用盐酸进行溶解，发现相同的盐酸体系对原始垢样和模拟垢样的溶解率基本一致(表 8)，误差率 0.6%，说明模拟垢样组成较为接近原始垢样(图 3)，具备室内研究的可行性。

Table 8. HCl dissolution rate of scale sample**表 8.** 垢样的盐酸溶解率

酸液配方	垢样	溶蚀率, %
15% HCl	模拟垢样	88.40
	原始垢样	87.89

**Figure 3.** Simulated scale sample after drying**图 3.** 烘干后的模拟垢样

5. 解堵液体系优选

根据井下筛管堵塞物的特点, 针对复合垢研究了 3 种体系: 其一, 盐酸 + 水包油中间相体系 12% HCl + 3% SPRA-1, 通过中间相溶解无机垢表面的有机垢; 其二, 土酸 + 水包油中间相体系 12% HCl + 1.5% HF + 1.5% SPRA-1; 其三, 弱酸性油包水中间相体系 6% HCl + 14% SPRA-2, 该体系酸性弱, 互溶性较强, 有一定的电导率, 主体为油连通, 可用于解除有机为主的垢样, 克服有机垢溶解速率不足的弱点。

5.1. 溶垢能力评价

取定量的沥青, 将沥青熔融为液态, 按比例加入垢样, 得到沥青质量占 30%, 无机垢质量占 70% 的混合垢样, 每块钢片放入混合垢样中(图 4)。使用 6 种解堵液体系进行高温溶解实验(表 9), 实验操作方法按标准执行[10]。盐酸 + 水包油中间相体系 12% HCl + 3% SPRA-1 溶蚀率为 16.76%, 无法作为解堵剂使用。土酸 + 水包油中间相体系 12% HCl + 1.5% HF + 1.5% SPRA-1 溶蚀率仅有 3.13%, 无法作为解堵剂使用。弱酸性油包水中间相体系 6% HCl + 14% SPRA-2 溶蚀率达到 73.49%, 可作为解堵剂使用。

**Figure 4.** Appearance of composite scale hanging plate**图 4.** 复合垢挂片外观

Table 9. Dissolution rate of composite scale samples in different solution system**表 9.** 复合垢样在 6 种不同解堵液体系中的溶蚀 2 h 结果

解堵液体系	溶蚀率/%	现象描述
15% HCl	0.59	
12% HCl + 3% HF	0.57	未加缓蚀剂, 钢片腐蚀严重
12% HCl + 3% SPRA-1	16.76	垢样表面有溶蚀孔
12% HCl + 1.5% HF + 1.5% SPRA-1	3.13	垢样表面有少量的溶蚀孔
6% HCl + 14% SPRA-2	73.49	垢样全部从钢片表面剥离溶解分散, 溶液分层, 上层为黑色 (溶解沥青), 下层为淡黄色澄清溶液
二甲苯	13.93	沥青质溶解后, 红色的无机垢游离分散溶液中, 在底部沉积

5.2. 缓蚀剂优选

优选 2 种缓蚀剂, 根据腐蚀行业标准[11]进行粗筛, 所用的钢片为 N80 钢片, 温度为 90℃, 缓蚀剂加量均为 1%, 所得数据列于表 10。从腐蚀速率可以看出, 6% HCl + 14% SPRA-2 解堵液, 不加缓蚀剂时, 腐蚀速率较大, 说明该中间相体系腐蚀性较大; 加入购置的 2 种酸缓蚀剂后, 腐蚀速率均大幅降低, 尤其是 DCA-6 缓蚀剂[12], 腐蚀速率 1.38 g/(m² × h), 可超过行业一级标准, 能够很好地控制腐蚀, 可作为优选的缓蚀剂。从腐蚀形态上看(图 5), 不加入缓蚀剂, 腐蚀后的钢片质量损失较大, 表面坑坑洼洼, 发生点蚀, 加入缓蚀剂后表面光滑, 尤其以 DCA-6 效果最好。

Table 10. Corrosion rate of 2 acid system**表 10.** 90℃ 两种体系腐蚀速率评价

解堵液基液	缓蚀剂	腐蚀速率/(g·(m ² × h) ⁻¹)	
		不加缓蚀剂	加入 1% 缓蚀剂
6% HCl + 14% SPRA-2	DME-1	347.7	6.99
	DCA-6		1.38

**Figure 5.** Comparison of steel sheet corrosion**图 5.** 90℃ N80 钢片腐蚀前后图片

5.3. 缓速性能验证

用美国 Core Lab 公司的旋转岩盘仪进行酸岩反应实验。将配好的酸液注入储酸罐中并将固定好岩样

(已知反应表面积)的圆盘置于反应釜内旋紧,在 90℃,8 MPa 压力条件下由电动机带动釜体内的岩盘旋转进行反应,300 s 取样测定酸浓度,计算相应条件下的酸岩反应数据(图 6)。酸岩反应为固液非均相反应,低压条件下二氧化碳在岩心表面生成并逸出,会影响酸岩反应速度,当压力大于 7 MPa 时,生成的二氧化碳完全溶解在酸液中,因此实验压力设定为 8 MPa。

对比常规盐酸,中间相解堵体系的酸岩反应速度明显下降,这与中间相解堵体系的粒径相关,粒径越小,酸岩反应速度越慢。仅仅加入 3%SPRA-1 的体系相比盐酸缓速效果下降一个数量级,而油包酸的 SPRA-2 体系缓速效果最强,可以达到缓速深部酸化的效果。SPRA-2 反应后岩心表面为均匀酸蚀,未见流线型凹槽,而 SPRA-1 和盐酸反应后岩心表面均出现非均匀酸蚀的现象(图 7)。

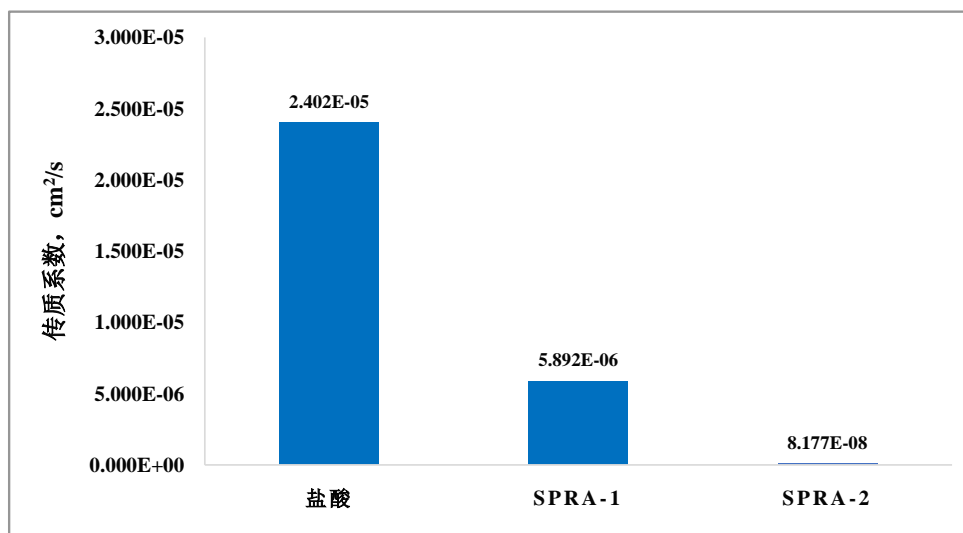


Figure 6. Comparison of mass transfer coefficients of different acids
图 6. 不同酸液传质系数对比图

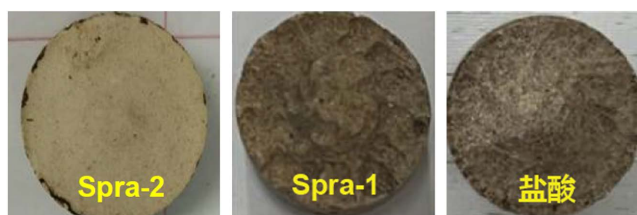


Figure 7. Core images of different acid reactions
图 7. 不同酸液反应岩心图像

6. 结论

(1) 通过储层特征分析、堵塞物样品化验和室内实验,证实了 M 油田筛管的堵塞物主体为三价铁的氧化物、碳酸钙、硫化亚铁和有机垢。油套管在 H_2S 和 CO_2 等酸性条件下的腐蚀剥,原油中的重质组分在温压系统变化下的沉积可能是堵塞发生的重要原因。

(2) 通过溶解评价实验,优选出中间相的解堵体系 6% HCl + 14%SPRA-2 + 1%DCA-6 作为筛管解堵液体系,90℃,2 h 对复合堵塞物溶蚀率可达 73%。该体系既可有效溶蚀复合堵塞物,又能够控制腐蚀速率好于行业一级标准,保护筛管,具备较强的缓速性能,可以达到缓速深部酸化的效果,具有潜在的应用前景。

参考文献

- [1] 鲍彦锋, 郑凯元, 高建崇, 等. JZ9-3 油田注入井堵塞物组分分析及形成机理研究[J]. 化学工程师, 2022, 36(8): 63-67.
- [2] 李二庭, 靳军, 陈亮, 等. 准噶尔盆地南缘井筒堵塞物中沥青质分子组成研究[J]. 石油实验地质, 2022, 44(2): 306-313.
- [3] 兰夕堂, 高尚, 张璐, 等. 渤海油田疏水缔合类堵塞物伤害机理及解堵技术[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(5): 675-681.
- [4] 陈怀兵, 黄永章, 薛艳. 某气田苏南区块井筒堵塞原因及机理分析[J]. 石油工业技术监督, 2021, 37(3): 34-37.
- [5] 秦晓蕾. 油田注水井堵塞原因分析及解堵增注措施研究[J]. 当代化工, 2021, 50(1): 213-216.
- [6] 吴文明, 侯吉瑞. 新疆某油田油井堵塞物成分及成因分析[J]. 油田化学, 2022, 39(2): 349-354.
- [7] 万里平, 姚金星, 李皋, 等. 元坝气田 X1 井筒堵塞原因分析[J]. 长江大学学报(自然版)理工卷, 2021, 18(2): 62-68.
- [8] 丁亮. 哈萨克斯坦 K 油田注水井管柱腐蚀结垢因素分析及防治措施[J]. 采油工程, 2023(2): 54-59+90.
- [9] 李燕, 豆宁辉, 姚二冬. 哈萨克 K 油田油井堵塞物分析及解堵技术研究[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(3): 391-396.
- [10] Hoar, T.P. and Schulman, J.H. (1943) Transparent Water-in-Oil Dispersions: the Oleopathic Hydro-Micelle. *Nature*, **152**, 102-103.
- [11] 靳玉琴, 钟安海, 姜安娜, 等. SY 5886-2012. 砂岩缓速酸性能评价方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- [12] 郭彬, 胡恩安, 张汝生, 等. SY T5405-1996. 酸化用缓蚀剂性能试验方法及评价指标[S]. 北京: 石油工业出版社, 1996.