

一种自增稠酸化转向聚合物的研究

尚玲¹, 甄学乐^{2,3}, 全红平^{2,3*}, 田海洋^{2,3}, 邓顺杰^{2,3}

(1. 中国石油新疆油田分公司实验检测研究院, 新疆 克拉玛依 834000;

2. 油气田应用化学四川省重点实验室, 四川 成都 610500;

3. 西南石油大学化学化工学院, 四川 成都 610500)

摘要:将 *N,N*-二甲基十八烷基烯丙基氯化铵(C₁₈DMAAC)与丙烯酰胺(AM)、甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DMC)进行共聚得到一种酸化转向用聚合物 PADD, 采用单因素法对合成条件进行优化得到反应最佳条件: 单体摩尔比 $n(\text{AM}) : n(\text{DMC}) : n(\text{C}_{18}\text{DMAAC})$ 为 85:15:1.2、单体质量分数为 30%、引发剂偶氮二乙丁腈酸盐(V50)质量分数为 0.4%、反应时间为 6 h、反应温度为 55℃、反应 pH 为 7。聚合物酸溶液随着酸岩反应的进行持续增黏, 并且通过不同酸岩反应时间岩石表面形貌的电镜图得到进一步证实。1.3% PADD 酸溶液黏度能从 48.0 mPa·s 增加至 423.0 mPa·s, 且残酸具有良好的抗温能力, 1.3% PADD 残酸黏度在 90℃ 下为 213.0 mPa·s, 为转向酸在高温地层的应用提供理论支持。

关键词: 酸化; 转向; 聚合物; 非交联

中图分类号: TE39

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2022)05-0162-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.05.031

Study on a self-thickening acidizing diverting polymer

SHANG Ling¹, ZHEN Xue-le^{2,3}, QUAN Hong-ping^{2,3*}, TIAN Hai-yang^{2,3}, DENG Shun-jie^{2,3}

(1. Experiment and Detection Research Institute, PetroChina Xinjiang Oilfield Company,

Karamay 834000, China; 2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Oil & Gas Field Applied Chemistry,

Chengdu 610500, China; 3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University,

Chengdu 610500, China)

Abstract: PADD, a polymer for acidizing diversion, is obtained through copolymerization among *N,N*-dimethyl octadecyl allyl ammonium chloride (C₁₈DMAAC), acrylamide (AM) and methacryloyl oxyethyl trimethyl ammonium chloride (DMC). By means of single-factor method, and the optimal synthesis conditions are obtained as follows: the molar ratio of AM, DMC and C₁₈DMAAC is 85:15:1.2, the monomer concentration is 30%, the initiator concentration is 0.4%, the reaction time is 6 h, the reaction temperature is at 55℃, and pH is 7. The polymer acid solution continues to thicken as the acid-rock reaction is performing, which is confirmed through SEM images of rock surface after different acid rock reaction time. The viscosity of the 1.3% PADD acid solution increases from 48.0 mPa·s to 423.0 mPa·s. Spent 1.3% PADD acid shows a good temperature resistance. The viscosity of spent 1.3 wt.% PADD acid at 90℃ is still 213.0 mPa·s, providing theoretical support for the application of diverting acid in high-temperature formations.

Key words: acidification; diversion; polymer; non-crosslinked

目前,低渗透类型油气田储量丰富、分布广泛^[1-6]。由于低渗透碳酸盐岩储层的非均质性和天然裂缝的影响,在对低渗透碳酸盐岩储层进行基质酸化处理时,酸液将沿着阻力较小的高渗透储层通道进行运移,导致低渗透储层区域无法得到有效酸化^[7-11]。因而,需要通过转向处理技术来确保整个地层都可以平均地受到酸液处理^[12-16]。目前常用的化学转向酸主要是交联聚合物转向酸和 VES 转向酸,但均存在明显缺点,交联转向酸存在破胶困难

以及交联条件难以控制的问题, VES 转向酸存在加量大、成本高等问题^[17-21],基于此,笔者设计合成了一种酸化转向用聚合物,该聚合物的酸溶液能随着酸岩反应持续增黏,从而具备转向能力,并对合成条件进行优化和对产物进行表征。

1 实验部分

1.1 试剂和仪器

实验所需试剂和仪器如表 1 和表 2 所示。

收稿日期: 2021-05-12; 修回日期: 2022-03-22

基金项目: 四川省科技计划资助项目(2019YJ0315)

作者简介: 尚玲(1985-),女,硕士,工程师,主要从事储层研究工作, shangling_ll@petrochina.com.cn; 全红平(1982-),男,博士,教授,主要从事油田化学品研究工作, 通讯联系人, 59183228@qq.com。

表1 实验试剂

试剂名称	规格	厂家
<i>N,N</i> -二甲基十八烷基烯丙基氯化铵	70%	江苏飞翔化工集团
DMC	70%	成都顺达利聚合物有限公司
AM	AR	成都市科隆化工试剂厂
V50	AR	上海阿拉丁生物科技股份有限公司
盐酸	AR	成都市科隆化工试剂厂
乙醇	AR	成都市科隆化工试剂厂
磷酸三丁酯	AR	成都市科隆化工试剂厂
碳酸钙粉末	AR	成都市科隆化工试剂厂

表2 实验仪器

仪器名称	型号	生产厂家
电子天平	FA1004	上海精科天平有限公司
磁力搅拌器	B4-1A	上海司乐仪器有限公司
集热式磁力加热搅拌器	DF-101S	金坛市金南仪器制造有限公司
电热恒温鼓风干燥箱	DHG-9140A	上海齐欣科学仪器有限公司
循环水式多用真空泵	SHB-III	郑州长城科工贸有限公司
电动六速黏度计	ZNN-D6B	青岛同春石油仪器有限公司

1.2 聚合物的合成

将 AM、DMC 和 C_{18} DMAAC 按照一定的摩尔比置于反应容器中,加入去离子水溶解,待溶液完全澄清透明后,通氮气除氧 30 min 后,将反应容器放入预定温度的恒温水浴锅中,待温度达到反应温度后,加入引发剂,恒温反应一定时间后制得聚合物 PADD。其聚合反应式如图 1 所示。

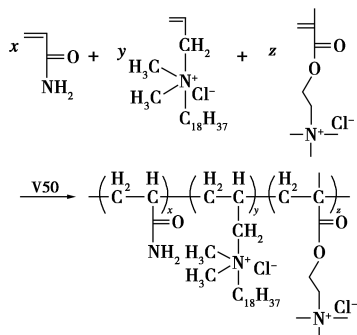


图1 PADD 的聚合反应式

1.3 聚合物的表征及增稠性能评价

1.3.1 结构表征

利用傅里叶变换红外光谱仪对共聚物 PADD 进行分析,采用 KBr 压片法。

1.3.2 增稠性能评价

将共聚物 PADD 和 1% 的缓蚀剂(以 20% 盐酸溶液的质量分数计)溶于 20% 盐酸中配制成一定浓度的 PADD 酸溶液(鲜酸溶液)。向鲜酸溶液中加入不同量的碳酸钙粉末来模拟酸液与碳酸钙的不同反应程度,于设定温度的水浴中反应完全后分别得到质量分数分别为 15%、10%、5% 和 1.5% 盐酸溶液,将不同反应程度的酸溶液倒入六速旋转黏度计的样液杯中,在 100 r/min 的转速下,测定酸溶液的表现黏度,读数的 3 倍即可视作样液在 170 s^{-1} 剪切速率下的表现黏度。

2 结果与讨论

2.1 单因素实验优化

2.1.1 反应物单体摩尔比的影响

固定单体质量分数为 25%、引发剂质量分数为 0.4%、反应温度为 55°C 、反应时间为 5 h、反应 pH 为 7,改变单体摩尔比合成聚合物,在常温下按照 1.3.2 所述方法制备 1.5% PADD 酸液,测定酸液与不同加量碳酸钙粉末反应完全后的表现黏度,结果见表 3。

表3 单体比对聚合物酸溶液增粘性能的影响

$n(\text{AM}) : n(\text{DMC}) :$ $n(\text{C}_{18}\text{DMAAC})$	酸液表现黏度/($\text{mPa}\cdot\text{s}$)				
	20% HCl	15% HCl	10% HCl	5% HCl	1.5% HCl
75 : 25 : 1	45.0	55.5	72.0	91.5	156.0
80 : 20 : 1	60.0	66.0	99.0	151.5	249.0
85 : 15 : 1	63.0	93.0	138.0	247.5	414.0
85 : 15 : 0.6	81.0	112.5	165.0	222.0	297.0
85 : 15 : 0.8	78.0	105.0	120.0	171.0	244.5
85 : 15 : 1.0	63.0	93.0	138.0	247.5	414.0
85 : 15 : 1.2	45.0	64.5	108.0	198.0	318.0
85 : 15 : 1.4	69.0	97.5	165.0	292.5	423.0

从表 3 中可以看出,当 $n(\text{AM}) : n(\text{DMC}) : n(\text{C}_{18}\text{DMAAC})$ 为 80:20:1 和 85:15:1 时,聚合物酸液初始黏度相差不大,但残酸黏度分别增长到 $249.0\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 和 $414.0\text{ mPa}\cdot\text{s}$,增黏性能明显提升。综合考虑鲜酸初始黏度和增黏效果,最终确定最优单体摩尔比为 $n(\text{AM}) : n(\text{DMC}) : n(\text{C}_{18}\text{DMAAC}) = 85:15:1.2$ 。

2.1.2 反应物单体质量分数的影响

固定 AM、DMC 和 C_{18} DMAAC 的摩尔比为 85:15:1.2,其他反应条件不变,改变单体质量分数合成

聚合物,在常温下按照 1.3.2 所述方法制备 1.5% PADD 酸液,测定酸液与不同加量碳酸钙粉末反应完全后的表观黏度,结果见表 4。

表 4 单体质量分数对聚合物酸溶液增黏性能的影响

单体质量 分数/%	酸液表观黏度/(mPa·s)				
	20% HCl	15% HCl	10% HCl	5% HCl	HCl
15	36.0	45.0	75.0	124.5	207.0
20	48.0	63.0	105.0	186.0	312.0
25	45.0	64.5	108.0	198.0	318.0
30	60.0	84.0	162.0	291.0	472.5
35	96.0	138.0	210.0	345.0	585.0

从表 4 中可以看出,随着单体质量分数的不断升高,聚合物增黏效果和初始黏度也随之增强。单体质量分数较低时,单体碰撞反应的机率较低,而当单体质量分数为 35% 时,聚合物酸溶液的初始黏度太高,考虑酸液初始黏度和增黏效果,确定反应最优单体质量分数为 30%。

2.1.3 反应引发剂质量分数的影响

固定 AM、DMC 和 C₁₈DMAAC 的摩尔比为 85:15:1.2、单体质量分数为 30%、其他反应条件不变,改变引发剂质量分数,合成聚合物,在常温下按照 1.3.2 所述方法制备 1.5% PADD 酸液,测定酸液与不同加量碳酸钙粉末反应完全后的表观黏度,结果见表 5。

表 5 引发剂质量分数对聚合物酸溶液增黏性能的影响

引发剂质量 分数/%	酸液表观黏度/(mPa·s)				
	20% HCl	15% HCl	10% HCl	5% HCl	HCl
0.2	81.0	117.0	228.0	375.0	600.0
0.3	79.5	108.0	213.0	345.0	576.0
0.4	60.0	84.0	162.0	291.0	472.5
0.5	75.0	111.0	225.0	390.0	663.0
0.6	75.0	111.0	213.0	385.5	660.0

由表 5 可知,聚合物鲜酸黏度和增稠能力均随着引发剂质量分数的升高先降低后升高。考虑聚合物溶于酸液后的初始黏度应尽量低,因此确定引发剂质量分数为 0.4%。

2.1.4 反应时间的影响

固定 AM、DMC 和 C₁₈DMAAC 的摩尔比为 85:15:1.2、单体质量分数为 30%、引发剂质量分数为 0.4%、其他反应条件不变,改变反应时间,合成聚合物,在常温下按照 1.3.2 所述方法制备 1.5% PADD

酸液,测定酸液与不同加量碳酸钙粉末反应完全后的表观黏度,结果见表 6。

表 6 反应时间对聚合物酸溶液增黏性能的影响

反应时间/ h	酸液表观黏度/(mPa·s)				
	20% HCl	15% HCl	10% HCl	5% HCl	1.5% HCl
3	49.5	84.0	120.0	231.0	360.0
4	51.0	96.0	124.5	252.0	381.0
5	60.0	84.0	162.0	291.0	472.5
6	64.5	100.5	192.0	348.0	591.0
7	63.0	97.5	175.5	330.0	573.0
8	67.5	105.0	192.0	340.5	567.0

从表 6 中可以看出,在反应时间小于 6 h 时,聚合物的增黏性能随反应时间的增大而不断加强,当反应时间大于 6 h 后,聚合物的增黏性能趋于稳定,因此选择 6 h 作为反应时间的最优条件。

2.1.5 反应温度的影响

固定 AM、DMC 和 C₁₈DMAAC 的摩尔比为 85:15:1.2、单体质量分数为 30%、反应时间为 6 h、引发剂质量分数为 0.4%、反应 pH 为 7,改变反应温度,合成聚合物,在常温下按照 1.3.2 所述方法制备 1.5% PADD 酸液,测定酸液与不同加量碳酸钙粉末反应完全后的表观黏度,结果见表 7。

表 7 反应温度对聚合物酸溶液增黏性能的影响

反应温度/ ℃	酸液表观黏度/(mPa·s)				
	20% HCl	15% HCl	10% HCl	5% HCl	1.5% HC
45	96.0	126.0	204.0	327.0	480.0
50	87.0	108.0	204.0	318.0	420.0
55	64.5	100.5	192.0	348.0	591.0
60	54.0	70.5	117.0	210.0	363.0
65	45.0	67.5	105.0	183.0	327.0

由表 7 可知,在 45℃ 和 50℃ 条件下,聚合物酸溶液初始黏度过高,而在 60℃ 和 65℃ 条件下,产物的增黏效果和溶于酸后的初始黏度均出现明显的降低,综合考虑聚合物酸溶液初始黏度和增黏性能,选择 55℃ 作为反应温度的最优条件。

2.1.6 反应 pH 的影响

固定 AM、DMC 和 C₁₈DMAAC 的摩尔比为 85:15:1.2、单体质量分数为 30%、反应温度为 55℃、反应时间为 6 h、引发剂质量分数为 0.4%、改变反应 pH,合成聚合物,在常温下按照 1.3.2 所述方法制

备 1.5% PADD 酸液,测定酸液与不同加量碳酸钙粉末反应完全后的表观黏度,结果见表 8。

表 8 反应 pH 对聚合物酸溶液增黏性能的影响

pH	酸液表观黏度/(mPa·s)				
	20% HCl	15% HCl	10% HCl	5% HCl	1.5% HCl
5	57.0	82.5	135.0	243.0	469.5
6	60.0	87.0	153.0	276.0	507.0
7	64.5	100.5	192.0	348.0	591.0
8	102.0	156.0	294.0	405.0	604.5
9	105.0	165.0	312.0	459.0	621.0

由表 8 可知,随着反应 pH 的升高,聚合物酸溶液的初始黏度和增黏性能均不断增加,其中,当反应 pH 为 5~7 时,聚合物的初始黏度增加幅度较小,综合考虑初始黏度和增稠性能,最终确定最优反应 pH 为 7。

2.1.7 单因素优化结果

合成聚合物的最佳条件为:单体摩尔比 $n(\text{AM}):n(\text{DMC}):n(\text{C}_{18}\text{DMAAC})=85:15:1.2$ 、单体质量分数为 30%、引发剂质量分数为 0.4%、反应时间为 6 h、反应温度为 55℃、反应 pH 为 7。

2.2 红外光谱分析

红外光谱分析是一种分析化合物常用的分析手段。将纯化后的聚合物用溴化钾压片制样,通过红外光谱仪对聚合物进行表征,结果如图 2 所示。

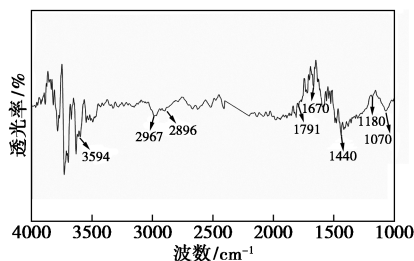


图 2 聚合物的红外光谱图

从图 2 中可以看出,1 670 cm^{-1} 处是羰基的伸缩振动吸收峰,3 594 cm^{-1} 处为 $-\text{NH}_2$ 的伸缩振动吸收峰;1 070 cm^{-1} 处为 $-\text{C}-\text{N}-$ 的伸缩振动吸收峰;2 967 cm^{-1} 和 2 896 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_3$ 和 $-\text{CH}_2$ 的伸缩振动吸收峰,1 180 cm^{-1} 处为 $\text{C}-\text{O}$ 的伸缩振动吸收峰,说明该产物是设计的目标产物。

2.3 聚合物酸溶液性能评价

2.3.1 聚合物酸液增稠性能

在 20%的盐酸中添加不同量 PADD 和 1%的缓蚀剂得到 0.8%、1.0%和 1.3%的聚合物酸溶液,在

常温下按照上述 1.3.2 增稠性能评价方法测定其在加入不同质量分数的碳酸钙粉末且反应完全后的表观黏度,结果如表 9 所示。

表 9 聚合物酸溶液不同质量分数下的增稠性能

酸液表观黏度/ (mPa·s)	聚合物黏度/(mPa·s)		
	0.8%	1.0%	1.3%
20% HCl	18.0	30.0	48.0
15% HCl	22.5	42.0	72.0
10% HCl	30.0	55.5	114.0
5% HCl	43.5	102.0	216.0
1.5% HCl	84.0	210.0	423.0

由表 9 可知,随着酸岩反应的进行,聚合物酸溶液展现出持续增稠的性能。当聚合物质量分数不断增大,其对应聚合物酸液的初始黏度不断升高,增黏效果也明显增强,1.3% PADD 鲜酸溶液反应至残酸时,其酸液黏度由初始的 48 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 增加至 423.0 $\text{mPa}\cdot\text{s}$,增黏效果较强。

2.3.2 聚合物残酸的抗温性能

由于该聚合物能够随着酸岩反应持续增稠,当酸液反应至残酸时黏度最大,残酸的抗温能力对于酸液能否在高温地层实现转向具有重要影响,而在高温下,聚合物分子之间由于缠结形成的结构会被不同程度的破坏,这将导致酸液体系黏度出现明显下降,因此需要研究残酸的抗高温性能。

常温下,在 20%的 HCl 溶液中加入不同质量分数的聚合物配制成 0.8%、1.0%、1.3%的酸液,再加入 1%的缓蚀剂,溶解完全后加入 CaCO_3 粉末进行反应,直至酸液 pH 升高至 5 左右,将残酸分别放入不同温度的水浴锅中进行加热,待酸液升温至对应温度后,用六速旋转黏度计在 170 s^{-1} 剪切速率下对残酸黏度进行测定,结果如表 10 所示。

表 10 不同温度对聚合物 PADD 残酸黏度的影响

温度/℃	残酸黏度/(mPa·s)		
	0.8%	1.0%	1.3%
30	186.0	399.0	591.0
50	172.5	315.0	498.0
70	90.0	162.0	303.0
90	45.0	87.0	213.0

由表 10 可知,随着温度升高,残酸黏度均逐渐降低,其中温度从 30℃ 增加到 50℃ 时,残酸黏度降

低幅度小,当温度升高至 70℃ 后,残酸黏度降低幅度加大,这是由于高温破坏了聚合物疏水链分子之间的缔合强度,从而致使酸液黏度降低。当聚合物质量分数为 1.3% 时,残酸黏度在 90℃ 下仍有 213.0 mPa·s,说明该聚合物具有较好的耐温性。

2.4 环境扫描电子显微镜分析

通过环境扫描电镜 (SEM) 对岩石表面形貌进行扫描,对比在 20% 盐酸中加入转向剂与岩石反应前后的表面形貌图,从而得到转向剂分子在酸岩反应过程中黏度的变化情况。配制转向剂质量浓度为 10 000 mg/L 的酸溶液,分别与岩石在 60℃ 下反应不同时间,切割反应后的岩样表面进行扫描电子显微镜分析,结果如图 3 所示。并对不同酸岩反应时间后的黏度进行测试,结果如表 11 所示。

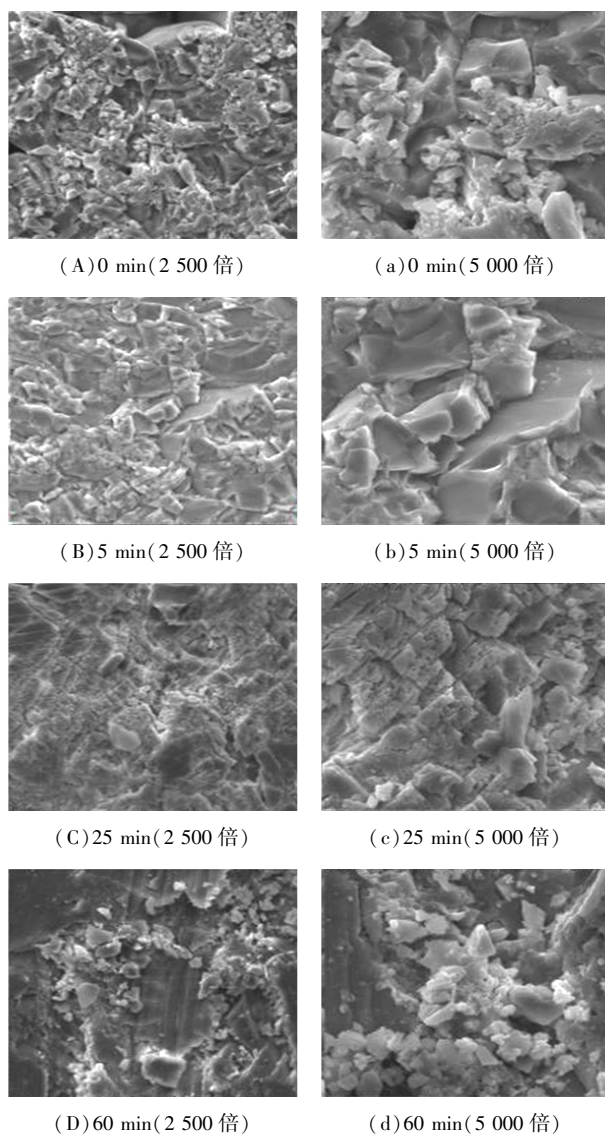


图 3 碳酸钙与转向酸液反应不同时间后岩样的扫描电镜图

表 11 不同酸岩反应时间下 PADD 黏度的变化

酸岩反应时间/min	0	5	25	60
酸液表观黏度/(mPa·s)	12	36	57	132

由图 3 可知,随着反应时间的增加,岩样表面被腐蚀的情况越来越弱,这是因于随着酸岩反应的进行,溶液黏度越来越高,使得酸溶液中氢离子到岩石表面的阻力增大,从而降低了与岩石接触的概率。并且随着反应时间的增加,黏度逐渐增大,进一步证实了转向酸在酸岩反应过程中是可以自动增稠。

3 结论

(1) 通过单因素法优化出聚合物最优合成条件为:单体摩尔比 $n(\text{AM}) : n(\text{DMC}) : n(\text{C}_{18}\text{DMAAC}) = 85 : 15 : 1.2$ 、单体质量分数为 30%、引发剂质量分数为 0.4%、反应时间为 6 h、反应温度为 55℃、反应 pH 为 7。

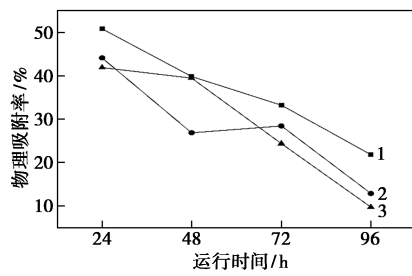
(2) PADD 酸溶液随着酸岩反应的进行表现为良好的持续增稠能力,环境扫描电子显微镜实验进一步证实了这一点。1.3% PADD 鲜酸溶液反应至残酸,其酸液黏度从初始的 48.0 mPa·s 增加至 423.0 mPa·s。

(3) 该聚合物残酸溶液具有较好的耐温性能,在 90℃ 下残酸黏度为 213.0 mPa·s,为转向酸在高温地层的应用提供了理论支持。

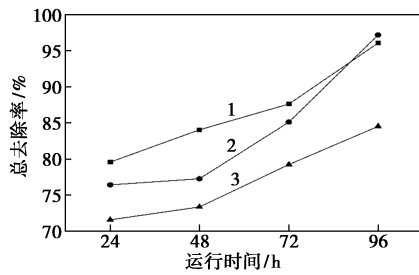
参考文献

- [1] 王艺之,柯强,陈清,等.水溶性无机盐颗粒转向酸的制备与应用[J].石油钻采工艺,2018,40(5):641-646.
- [2] 全红平,蒋思龙,马英,等.一种 pH 响应性酸化用自增稠聚合物[J].石油化工,2020,49(11):1093-1099.
- [3] 毛金成,范津铭,赵金洲,等.化学转向暂堵技术的研究进展[J].石油化工,2019,48(1):76-81.
- [4] 陈大钧,陈馥.油气田应用化学[M].北京:石油工业出版社,2015.
- [5] 李文杰,谷庆江,张秀青,等.转向酸体系室内评价及其在伊拉克现场的应用[J].石油化工应用,2021,40(2):29-33.
- [6] 陈晓宇,张志全,李鼎.化学分流酸化工艺试验研究[J].现代化工,2016,36(8):67-70,72.
- [7] 乐宏,刘飞,薛衡,等.四川盆地下寒武统龙王庙组气藏转向酸化模拟及其应用[J].天然气工业,2017,37(10):46-53.
- [8] 徐良伟.非均质油藏变粘酸的研制及酸岩反应动力学研究[D].荆州:长江大学,2012.
- [9] 张林.砂岩储层转向酸酸液体系研究[D].成都:西南石油大学,2018.

(下转第 171 页)



(b) 物理吸附率的变化情况



(c) 总去除率的变化情况

1—123.29 mg/m³; 2—268.19 mg/m³; 3—357.20 mg/m³

图3 不同进气口质量浓度甲苯去除率

4 结论

基于海上钻井平台和船舶尾气排放所开发的生物滴滤工艺的核心为生物降解与物理吸附,在生物降解部分,选择高效降解菌群构建并驯化甲苯混菌降解体系。以甲苯废气为模拟废气主要成分,利用本实验室工程化混菌体系实施降解,验证该生物滴滤系统的实施可行性,同时,针对海上船舶尾气的处理不便性进行滴滤系统的改进,使该生物滴滤系统不仅可以高效降解废气,同时可将该生物滴滤系统

的气体发生装置拆卸移接至实际废气排出口,同时可根据废气处理的实际情况,调节滴滤系统的大小及数量,故该生物滴滤系统具备可移动性,因此,应用前景较为广泛,但针对其生物滴滤系统运行情况、菌体挂膜情况等因素仍需进一步研究。

参考文献

- [1] 张鹤清,胡洪营,席劲瑛.6种挥发性有机物在甲苯驯化微生物中的好氧生物降解性能[J].环境科学,2003,(6):83-89.
- [2] 李尚.生物滴滤塔处理甲苯废气实验研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.
- [3] 孙立,吴旭景.生物滴滤法净化VOCs气体的研究进展[J].广东化工,2016,43(11):138-139,134.
- [4] 范立维,童志权.生物滴滤塔处理低浓度CS-2废气的研究[J].化工进展,2005,(3):291-294.
- [5] 高亭,戴珏,关杰,等.生物滴滤系统处理模拟甲苯废气的研究[J].上海第二工业大学学报,2019,36(2):90-102.
- [6] 曹旭.基于生物质填料的生物滴滤塔对甲苯废气净化效果的影响[J].农业与技术,2017,37(13):175-176.
- [7] Chung Y C, Ho K L, Tseng C P. Two-stage biofilter for effective NH₃ removal from waste gases containing high concentrations of H₂S[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2007,57(3):337-347.
- [8] 王灿,席劲瑛,胡洪营,等.白腐真菌生物过滤塔处理氯苯气体的研究[J].环境科学,2008,(2):500-505.
- [9] 贺赞.多环芳烃非降解人工双菌体系的构建及其代谢交流分析[D].天津:天津大学,2018.
- [10] 陈东之,缪孝平,欧阳杜娟,等.生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究[J].环境科学,2015,36(9):3168-3174.
- [11] Rene E R, Maria C Veiga, Kennes C. Combined biological and physicochemical waste-gas cleaning techniques[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2012,47(7):920-939. ■

(上接第166页)

- [10] 王云云,杨彬,张镇,等.自转向酸用缓蚀剂的研究与应用[J].钻井液与完井液,2017,34(5):96-99.
- [11] 郭昊.酸化自转向剂的合成与性能评价[D].大庆:东北石油大学,2016.
- [12] 王建青.普光气田暂堵转向酸压工艺现场适应性分析[J].内蒙古石油化工,2018,44(3):55-57.
- [13] Rabie A I, Gomaa A M, Nasr-El-Din H A. Reaction of in-situ-gelled acids with calcite: Reaction-rate study[J]. SPE Journal, 2011, 16(4):981-992.
- [14] 毛金成,王晨,张恒,等.阳离子VES转向酸体系的研制及性能评价[J].石油与天然气化工,2019,48(6):65-69.
- [15] Li Yongming, Deng Qi, Zhao Jinzhou, et al. Simulation and analysis of matrix stimulation by diverting acid system considering temperature field[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 170:932-944.
- [16] Tian H, Quan H, Huang Z. Polymeric and non-crosslinked acid self-thickening agent based on hydrophobically associating water-soluble polymer during the acid rock reaction[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(36):47907.
- [17] 李瑶,王骁轲,周正鹏.低渗透油田压裂水平井生产动态分析[J].云南化工,2020,47(11):22-23.
- [18] 杨建梁,朱旭,何旭东.低渗透油田分层注水技术今后趋势[J].化工管理,2019,(32):210-211.
- [19] 李亚林,敬显武,鲁红升.碳酸盐岩气藏清洁转向酸的研究[J].精细石油化工进展,2015,16(4):9-11.
- [20] 于泽坤.酸化转向用季铵盐阳离子型表面活性剂的合成与评价[D].青岛:中国石油大学(华东),2015.
- [21] 胡景涛,刘平礼,胡刚,等.VES自转向酸存在的问题及解决对策[J].石油化工应用,2015,34(3):6-10. ■