

文章编号:1673-5005(2021)01-0144-07 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2021.01.017

发泡剂静态泡沫性能综合定量表征 参数的构建及应用

刘宏生^{1,2}

- (1. 中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712;
2. 国家能源陆相砂岩老油田持续开采研发中心, 黑龙江大庆 163712)

摘要:为进一步完善驱油用发泡剂的静态泡沫性能表征参数,提出用静态泡沫综合定量指数(I_{SFCQI})表征发泡剂的静态泡沫性能,应用 I_{SFCQI} 表征一元、二元和三元发泡剂的静态泡沫性能,分析 I_{SFCQI} 与泡沫驱采收率的相关性。结果表明: I_{SFCQI} 可以表征发泡剂的起泡体积、泡沫稳定性、泡沫携液量和泡沫携液稳定性4个静态泡沫性能参数,初步实现用一个参数快速定量表征发泡剂的静态泡沫性能;三元发泡剂的 I_{SFCQI} 大于二元发泡剂的,二元发泡剂的 I_{SFCQI} 大于一元发泡剂的;发泡剂的 I_{SFCQI} 与泡沫驱采收率具有正相关性。

关键词:静态泡沫性能综合定量指数;静态泡沫性能;权重系数;泡沫驱采收率

中图分类号:TE 319 **文献标志码:**A

引用格式:刘宏生. 发泡剂静态泡沫性能综合定量表征参数的构建及应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(1): 144-150.

LIU Hongsheng. Construction and application of comprehensive quantitative characterization parameters for static foaming properties of foaming agents [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(1): 144-150.

Construction and application of comprehensive quantitative characterization parameters for static foaming properties of foaming agents

LIU Hongsheng^{1,2}

- (1. Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Company Limited, PetroChina, Daqing 163712, China;
2. Research and Development Center for the Sustainable Development of Continental Sandstone Mature Oilfield by National Energy Administration, Daqing 163712, China)

Abstract: In order to further improve the static foam performance characterization parameters of foaming agent for oil displacement, the static foam comprehensive quantitative index (I_{SFCQI}) was proposed to characterize the static foam performance parameters of foaming agent. The I_{SFCQI} was applied to characterize the static foam properties of the unitary, binary and ternary foaming agents. The relationship between I_{SFCQI} and foam flooding recovery was analyzed as well. The experimental results show that the I_{SFCQI} can be used to characterize the four static foam performance parameters, such as foaming volume, foam stability, foam liquid carrying capacity, and foam liquid carrying stability. This has achieved a quick and quantitative evaluation of static foam performance by using one parameter. It is also found that the I_{SFCQI} of the ternary foaming agent is greater than that of the binary foaming agent, and the I_{SFCQI} of the binary foaming agent is greater than that of the unitary foaming agent. The I_{SFCQI} of foaming agent shows positive correlation with foam flooding recovery.

Keywords: static foam comprehensive quantitative index; static foam properties; weight coefficient; foam flooding recovery

收稿日期:2020-05-20

基金项目:国家重大科技专项(2016ZX05054);中国石油天然气股份公司重大科技专项(2016E-0207)

第一作者:刘宏生(1979-),男,高级工程师,硕士,研究方向为化学驱油。E-mail:liuhs9902@163.com。

化学驱后地下仍有大量剩余油,但化学驱后油藏非均质性更强,平面、层间矛盾更突出,剩余油分布更零散,需要采用封堵及驱油能力更强的强化驱油体系^[1-3]。泡沫流体在多孔介质中视黏度高、封堵调剖能力强,具有堵大不堵小、堵水不堵油的扩大波及体积作用^[4-6],同时具有降低界面张力提高驱油效率作用,因此泡沫可以大幅提高化学驱后油藏采收率。发泡剂的静态泡沫性能表征参数主要有起泡能力、泡沫稳定性、泡沫半衰期、泡沫质量、液体滞留量等^[7-14],这每一个参数只能代表发泡剂的某一方面的静态泡沫性能。在对比和优选不同发泡剂的静态泡沫性能时,需要同时兼顾发泡剂的多项静态泡沫性能表征参数,因此应用以上 5 种表征参数很难同时兼顾到发泡剂的不同静态泡沫性能指标的综合效果,且泡沫稳定性直接影响发泡剂的起泡体积和泡沫半衰期间接影响泡沫在岩心中的封堵能力和运移距离,是泡沫驱油中重要的参数之一。应用泡沫综合指数^[15-16]表征泡沫的综合性能,仅代表发泡剂的起泡体积和泡沫半衰期 2 个参数的综合性能,笔者构建静态泡沫综合定量表征参数同时表征发泡剂的起泡能力、泡沫稳定性、泡沫半衰期、泡沫质量、液体滞留量参数;应用静态泡沫综合定量参数表征一元、二元和三元发泡剂的静态泡沫性能,分析静态泡沫综合定量参数与泡沫驱采收率的相关性。其中一元发泡剂只含有表面活性剂,二元发泡剂由表面活性剂和聚合物组成,三元发泡剂由表面活性剂、聚合物和颗粒组成。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

聚合物(HPAM,大庆炼化公司);表面活性剂(DWS,辽河誉达公司);交联凝胶颗粒(PPG 大庆油田);膨润土颗粒(成都优武特公司);二氧化硅颗粒(SiO_2 -12 超疏水型, SiO_2 -11 弱疏水型,河南大学提供);大庆脱水原油,大庆油田注入污水,氮气(大庆雪龙气体公司);岩心物理模型为均质并联岩心,岩心渗透率分别为 0.5、2、4 μm^2 ,高度分别为 2、4.5、1.8 cm,长度和宽度为 30、4.5 cm(大庆石油学院提供)。

1.2 实验方法

(1)泡沫性能测定:采用法国泰克力斯公司生产的泡沫扫描仪测量发泡剂的起泡体积和起泡携液量随时间变化,测量温度 45 $^{\circ}\text{C}$,气体为氮气。

(2)界面张力测定:利用美国彪为公司生产的

界面张力仪测量发泡剂与原油的界面张力,测量温度 45 $^{\circ}\text{C}$,转速为 5 000 r/min。

(3)驱油实验:采用江苏华安石油仪器公司定制的驱油装置开展泡沫驱油实验,岩心物理模型饱和油再老化 24 h;水驱至含水 95%;注入 0.57 V_p 聚合物(V_p 为孔隙体积),再后续水驱至含水 98%,注 0.5 V_p 泡沫和 0.2 V_p 聚合物,再后续水驱至含水 98%。

2 结果分析

2.1 静态泡沫性能综合定量表征参数的构建

静态泡沫性能表征参数主要包括起泡能力、泡沫稳定性、泡沫半衰期、泡沫质量、液体滞留量等^[7-14]。在综合分析发泡剂的 5 种泡沫性能表征参数的定义和含义基础上,用起泡体积、泡沫半衰期、泡沫携液半衰期和泡沫携液量 4 种可以直接测量得到的参数表征发泡剂的静态泡沫性能。其中起泡体积与起泡能力对应;泡沫半衰期与泡沫稳定性和泡沫半衰期对应;泡沫携液半衰期与泡沫半衰期对应;泡沫携液量与泡沫质量和液体滞留量对应。与常用的发泡体积和稳泡时间两个参数相比更全面地表征了发泡剂的静态泡沫性能,同时也涵盖了以上 5 个参数的基本信息。

为了解决发泡剂静态泡沫性能表征参数多,不易于应用的问题。参照文献中提出的用泡沫综合指数代表发泡剂的起泡体积和泡沫半衰期 2 个参数的综合性能^[15-16]。构建静态泡沫体积和稳定性指数(I_{SFSI})表征发泡剂的起泡体积和泡沫半衰期参数综合性能,同时构建静态泡沫携液量和携液稳定性指数(I_{SFLSI})表征发泡剂的泡沫携液量和泡沫携液半衰期参数综合性能。对 I_{SFSI} 和 I_{SFLSI} 应用权重系数方法计算得到静态泡沫综合定量指数(I_{SFCQI})。初步实现用 I_{SFCQI} 快速定量的表征发泡剂的静态泡沫性能。

泡沫扫描仪测量发泡剂的起泡体积或起泡携液量与时间的关系见图 1。图 1 中 t_0 时刻前的曲线对应起泡阶段泡沫体积 $V_{\text{FS}}(t)$ 的变化, t_0 时刻后的曲线对应泡沫衰减阶段泡沫体积 $V_{\text{FS}}(t)$ 的变化。起泡体积最大值为发泡剂的泡沫体积,泡沫体积衰减一半对应的时间为发泡剂的泡沫半衰期。用 n 次多项式对泡沫衰减阶段起泡体积变化曲线进行拟合,得到起泡体积衰减曲线拟合多项式,对拟合曲线多项式进行积分,得到 I_{SFSI} :

$$V_{\text{FS}}(t) = A + A_1 t + A_2 t^2 + \cdots + A_n t^n, \quad (1)$$

$$I_{\text{SFSI}} = \int_0^{F_{\text{stable}}} V_{\text{FS}}(t) dt. \quad (2)$$

式中, t 为时间; $A, A_1, A_2, \dots, A_n$ 为起泡体积衰减曲线多项式系数; F_{stable} 为起泡体积衰减到某一体积对应的时间。

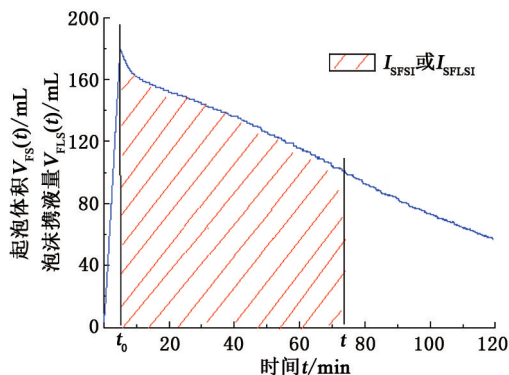


图1 起泡体积或起泡携液量与时间关系

Fig. 1 Relationship between foaming volume or foaming liquid carrying capacity and time

或者利用泡沫体积及其衰减到某一体积与时间坐标围成的梯形面积进行简化计算 I_{SFSI} :

$$I_{\text{SFSI}} = 3V_1 t/4. \quad (3)$$

式中, V_1 为泡沫体积。

图1中 t_0 时刻前的曲线对应起泡阶段起泡携液量 $V_{\text{FLS}}(t)$ 的变化, t_0 时刻后的曲线对应泡沫衰减阶段起泡携液量 $V_{\text{FLS}}(t)$ 的变化。起泡携液量最大值为泡沫携液量, 泡沫携液量衰减一半对应的时间为发泡剂的泡沫携液半衰期。同样用 n 次多项式对泡沫衰减阶段起泡携液量变化曲线进行拟合, 得到起泡携液量衰减曲线拟合多项式, 对拟合曲线多项式进行积分, 得到 I_{SFLSI} :

$$V_{\text{FLS}}(t) = B + B_1 t + B_2 t^2 + \dots + B_n t^n, \quad (4)$$

$$I_{\text{SFLSI}} = \int_0^{I_{\text{stable}}} V_{\text{FLS}}(t) dt. \quad (5)$$

式中, $B, B_1, B_2, \dots, B_n$ 为起泡携液量衰减曲线多项式系数; I_{stable} 为起泡携液量衰减到某一值对应的时间。

同样可利用泡沫携液量与其衰减某一值与时间坐标围成的梯形面积进行简化计算 I_{SFLSI} :

$$I_{\text{SFLSI}} = 3V_2 t/4. \quad (6)$$

式中, V_2 为泡沫携液量。

根据 I_{SFSI} 和 I_{SFLSI} 运用权重系数方法计算得到 I_{SFCQI} :

$$I_{\text{SFCQI}} = I_{\text{SFSI}} \alpha + I_{\text{SFLSI}} (1 - \alpha). \quad (7)$$

式中, α 为权重系数(取值为 0~1)。

静态泡沫性能综合定量参数可以同时表征发泡剂的起泡体积、泡沫稳定性、泡沫携液量和泡沫携液稳定性 4 个静态泡沫性能参数, 实现用一个参数快速定量表征发泡剂的静态泡沫性能。

2.2 静态泡沫性能综合定量表征参数的应用

2.2.1 一元发泡剂 I_{SFCQI}

一元发泡剂的泡沫性能如图2所示。由图2可知, 一元发泡剂的起泡体积趋于平稳不随 DWS 质量分数变化, 泡沫稳定性、泡沫携液量和泡沫携液稳定性均随 DWS 质量分数增加而增加, 但 3 个参数增加的幅度有一定差别。一元发泡剂的 I_{SFCQI} 随 DWS 质量分数增加而增加, 这与泡沫稳定性、泡沫携液量和泡沫携液稳定性 3 个参数的变化趋势相一致, 但变化幅度不同。随着权重系数增加, 一元发泡剂的 I_{SFCQI} 逐渐增加; 且 DWS 质量分数越大, 权重系数对一元发泡剂的 I_{SFCQI} 的影响越明显。由于发泡剂的 I_{SFCQI} 是起泡体积、泡沫稳定性、泡沫携液量和泡沫携液稳定性 4 个参数的综合定量表征参数。 I_{SFCQI} 对以上 4 个参数均有依赖性, 4 个参数中任意一个变化均会影响 I_{SFCQI} 的值。但单一参数的变化趋势不能决定 I_{SFCQI} 的变化趋势, 可以影响 I_{SFCQI} 的变化趋势。

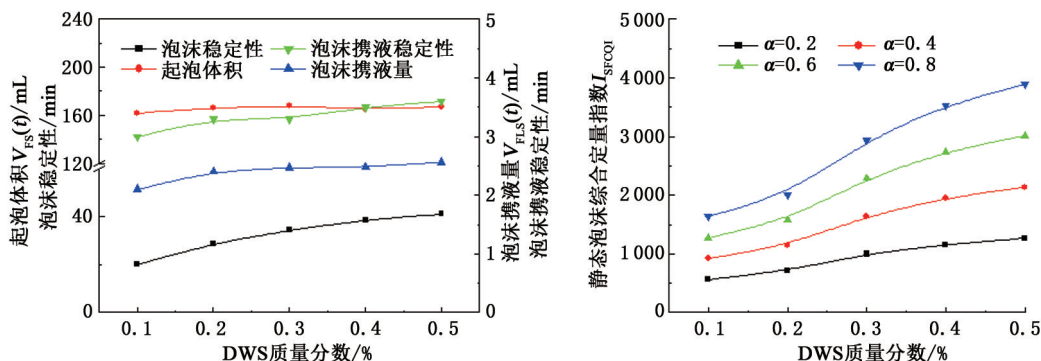


图2 一元发泡剂的泡沫性能

Fig. 2 Foam properties of unitary foaming agent

2.2.2 二元发泡剂 I_{SFCQI}

二元发泡剂的 I_{SFCQI} 如图 3 所示。二元发泡剂中含有 DWS 和聚合物。由图 3 可知,二元发泡剂的 I_{SFCQI} 随聚合物质量浓度增加而增加。在聚合物质

量浓度大于 2.5 g/L 时,随着权重系数增加,二元发泡剂的 I_{SFCQI} 变化趋于平稳或略有降低。不同权重系数条件下,二元发泡剂的 I_{SFCQI} 随 DWS 质量分数增加先增加,而后趋于平稳。

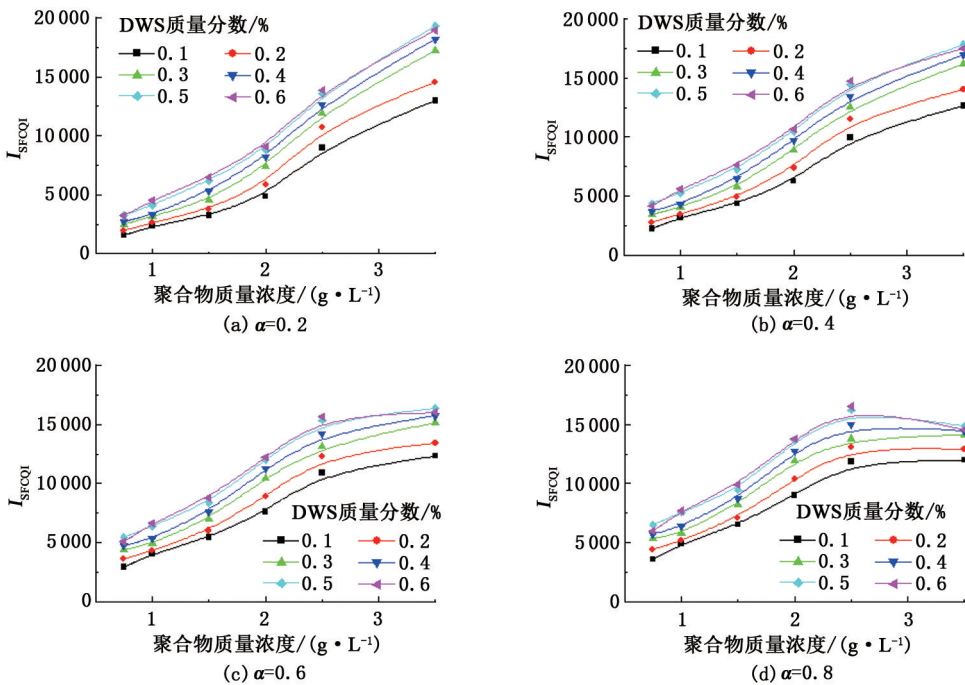


图 3 二元发泡剂的 I_{SFCQI}
Fig. 3 I_{SFCQI} of binary foaming agent

二元发泡剂中聚合物质量浓度增加,体系黏度变大。聚合物分子与 DWS 分子之间相互吸引和缠绕作用更加明显,使得二元发泡剂的表面黏弹性增强,二元发泡剂的起泡体积、泡沫携液量、泡沫稳定性和携液稳定性均增加,因此其 I_{SFCQI} 增大。当聚合物质量浓度大于 2.5 g/L 时,二元发泡剂黏度过高,阻碍 DWS 分子在气液界面分布,表现为二元发泡剂的起泡体积和泡沫稳定性降低,在权重系数较大时,二元发泡剂的 I_{SFCQI} 会出现降低现象。二元发泡剂中 DWS 质量分数增加,其起泡体积和泡沫稳定性明显增加,但携液量和携液稳定性影响较小;而当二元发泡剂中 DWS 质量分数大于 0.5%,DWS 对起泡体积、泡沫携液量、泡沫稳定性和携液稳定性影响趋于平稳。因此二元发泡剂的 I_{SFCQI} 先增加,而后趋于平稳。

2.2.3 三元发泡剂 I_{SFCQI}

二元发泡剂中加入 SiO_2 、PPG 或膨润土颗粒构成三元发泡剂,三元发泡剂的 I_{SFCQI} 如图 4 所示。三元发泡剂中 DWS 质量分数为 0.3%,聚合物相对分子质量为 2.5×10^7 ,质量浓度为 1 g/L。由图 4 可

知,加入不同颗粒体系的三元发泡剂 I_{SFCQI} 均显著增加,其中 SiO_2 -12、PPG 和膨润土使 I_{SFCQI} 增加 2.5~3 倍。在权重系数小于等于 0.4 时,PPG 三元发泡剂的 I_{SFCQI} 最大,其次为 SiO_2 -12 三元发泡剂。在权重系数大于 0.4 时, SiO_2 -12 三元发泡剂的 I_{SFCQI} 最大,其次为 PPG 三元发泡剂。PPG 或膨润土三元发泡剂的 I_{SFCQI} 先增加,而后降低; SiO_2 三元发泡剂的 I_{SFCQI} 先增加,而后趋于平稳。

PPG 溶于水后,三维网状软体内核体积膨胀扩大,外部的亲水高分子支链与水分子形成水化层,导致 PPG 溶于水后束缚大量水分子;且 PPG 与 DWS 和聚合物相互作用,使 PPG 颗粒均匀分布在泡沫液膜内部。 SiO_2 -12 表面经过疏水基团改性,DWS 易通过范德华力和缠绕作用吸附在 SiO_2 -12 周围,形成具有较强水化层的 SiO_2 -12-DWS 体系;同时聚合物分子也通过范德华力和缠绕作用吸附 SiO_2 -12,使颗粒均匀悬浮在泡沫液膜内部。膨润土遇水膨胀形成片状结构,束缚水能力也较强,同样 DWS 和聚合物与膨润土片状结构相互作用,使膨润土片状颗粒悬浮在泡沫液膜内部。因此不同颗粒体系使得泡沫液膜排液速和泡沫歧化速度顺序为 PPG < 膨

润土<SiO₂-12。这导致在权重系数小于等于 0.4 时,PPG 三元发泡剂的 I_{SFCQI} 最大,其次为 SiO₂-12 三元发泡剂,再次为膨润土三元发泡剂。但由于

SiO₂-12 三元发泡剂的泡沫稳定性好于 PPG 或膨润土三元发泡剂的,因此在权重系数大于 0.4 时, SiO₂-12 三元发泡剂的 I_{SFCQI} 最大。

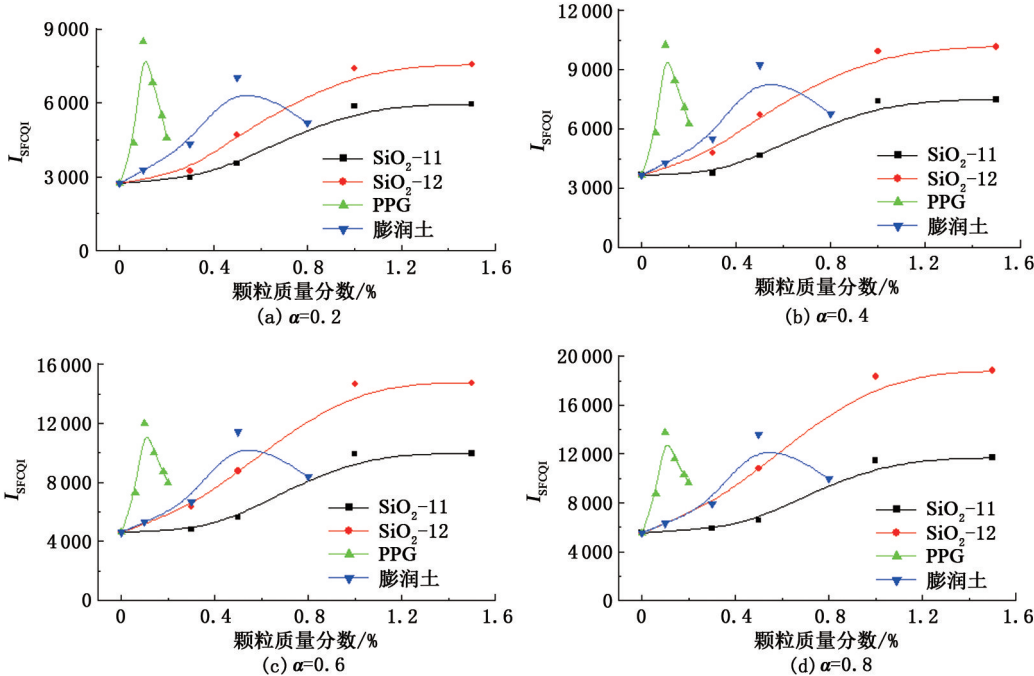


图 4 三元发泡剂的 I_{SFCQI}

Fig. 4 I_{SFCQI} of ternary foaming agent

2.3 静态泡沫性能综合定量表征参数与采收率的相关性

2.3.1 相关性分析

一元泡沫体系的驱油效果如表 1 所示。由表 1 可知,在真实模拟大庆油田聚驱后的岩心条件下,岩心聚驱采收率达到约 55%。由于三层并联岩心渗透差异较大,经过水驱和聚驱后,高渗层中含油饱和度仅约为 30%,分流率达到 90%,导致高渗层中出现优势渗流通道。一元泡沫体系在三层并联岩心中形成了一定封堵能力,泡沫驱采收率可达接近 4%。一元发泡剂的 I_{SFCQI} 越大,一元泡沫体系驱采收率越高。这表明一元发泡剂 I_{SFCQI} 与采收率具有正相关性。

表 1 一元泡沫体系的驱油效果

Table 1 Displacement effect of unitary foam system

DWS 质量 分数/%	含油饱和 度/%	水驱采收 率/%	聚驱采收 率/%	泡沫驱采收 率/%
0.1	72.2	37.9	16.5	1.9
0.2	71.7	38.3	17.0	2.7
0.3	72.5	38.5	16.8	3.3
0.4	71.9	37.8	17.3	3.6
0.5	72.6	38.1	16.9	3.9

泡剂中 DWS 质量分数为 0.3%,聚合物相对分子质量为 2.5×10^7 。由表 2 可知,二元发泡剂中聚合物质量浓度增加,聚驱后泡沫驱采收率逐渐增加,而后趋于平缓。二元泡沫体系在三层并联岩心中形成了较好的封堵能力。二元发泡剂黏度超过 110 mPa·s 时,二元泡沫驱有协同增效作用,即同时具有泡沫驱和聚合物驱双重有点,泡沫驱采收率可达 14%。二元发泡剂的 I_{SFCQI} 越大,二元泡沫体系驱采收率越高,同样二元发泡剂 I_{SFCQI} 与采收率具有正相关性。

表 2 二元泡沫体系的驱油效果

Table 2 Displacement effect of binary foam system

聚合物质量 浓度/ (mg·L ⁻¹)	发泡剂黏 度/ (mPa·s)	含油饱 和度/ %	水驱采 收率/ %	聚驱采 收率/ %	泡沫驱 采收率/ %
750	20	73.4	37.2	17.5	5.8
1000	33	72.5	38.7	16.6	6.9
1500	71	72.7	37.9	16.8	9.6
2000	113	72.3	39.5	16.5	13.9
2500	152	73.1	37.6	17.2	15.6
3500	218	73.6	38.1	16.3	15.9

三元泡沫体系的驱油效果如表 3 所示。三元发泡剂中 DWS 质量分数为 0.3%,聚合物相对分子质量为 2.5×10^7 、质量浓度为 1 g/L, SiO₂ 质量分数为

二元泡沫体系的驱油效果如表 2 所示。二元发

1%,PPG 质量分数为 0.1%,膨润土质量分数为 0.5%。由表 3 可知,三元泡沫驱采收率明显高于二元泡沫驱的。其中 SiO₂-12、PPG 或膨润土颗粒三元泡沫驱效果最好,采收率均超过 12%。三元泡沫体系具有泡沫、聚合物、颗粒三种特性,且具有协同增效作用,因此三元泡沫能有效封堵高渗层中的优势渗流通道,使泡沫转向到中渗层、低渗层,扩大波及体积。PPG 或 SiO₂-12 三元发泡剂体系的 I_{SFCQI} 比膨润土三元发泡剂体系的大,导致 PPG 或 SiO₂-12 三元泡沫体系的扩大波及体积作用好于膨润土三元泡沫体系的。另外,由于 SiO₂-12 浓度高时,泡沫体系界面张力较高,而 PPG 或膨润土泡沫体系具有超低界面张力。因此 PG 三元泡沫驱采收率高于 SiO₂-12 三元泡沫驱的。在界面张力一致的情况下,三元发泡剂的 I_{SFCQI} 越大,三元泡沫体系驱采收率越高,同样三元发泡剂的 I_{SFCQI} 与采收率也具有正相关性。

表 3 三元泡沫体系的驱油效果

Table 3 Displacement effect of ternary foam system				
颗粒类型	含油饱和度/%	水驱采收率/%	聚驱采收率/%	泡沫驱采收率/%
SiO ₂ -11	72.5	38.7	16.6	9.2
SiO ₂ -12	73.6	38.1	16.9	12.9
PPG	72.9	37.7	16.1	13.5
膨润土	73.1	38.4	17.7	12.1

不同种类发泡剂的 I_{SFCQI} 差别较大,在相同条件下,三元发泡剂的 I_{SFCQI} 明显大于二元发泡剂的,二

元发泡剂的 I_{SFCQI} 明显大于一元发泡剂的,对应的三元泡沫体系驱采收率明显大于二元发泡剂体系的,二元泡沫体系驱采收率明显大于一元发泡剂体系的。即不同种类发泡剂的 I_{SFCQI} 与采收率具有正相关性。

2.3.2 发泡剂 I_{SFCQI} 的权重系数优化

为了优化发泡剂在泡沫驱应用时不同种类发泡剂 I_{SFCQI} 的权重系数,应用归一化方法,对一元、二元和三元发泡剂的 I_{SFCQI} 和泡沫驱采收率分别进行归一化处理,得到发泡剂的 I_{SFCQI} 和泡沫驱采收率的归一化值如图 5 所示。由图 5 可知, I_{SFCQI} 的权重系数增加,一元发泡剂 I_{SFCQI} 的归一化值逐渐降低,但二元发泡剂 I_{SFCQI} 的归一化值随权重系数增加而增加。当权重系数为 0.7~0.9 时,一元、二元发泡剂的 I_{SFCQI} 归一化值与泡沫驱采收率归一化值基本一致。SiO₂ 三元发泡剂的 I_{SFCQI} 归一化值随着权重系数增加先增加后降低,而 PPG 或膨润土三元发泡剂的 I_{SFCQI} 归一化值随权重系数增加逐渐降低。当权重系数为 0.1~0.3 时,三元发泡剂的 I_{SFCQI} 归一化值与泡沫驱采收率归一化值基本一致,但 SiO₂-11 三元发泡剂例外。由于 SiO₂-11 三元发泡剂不具有超低界面张力,而其余三元发泡剂在一定条件下均能形成超低界面张力,且 I_{SFCQI} 不包含界面性能参数。因此其 I_{SFCQI} 与泡沫驱采收率的相关性与其余三元发泡剂的不一致。

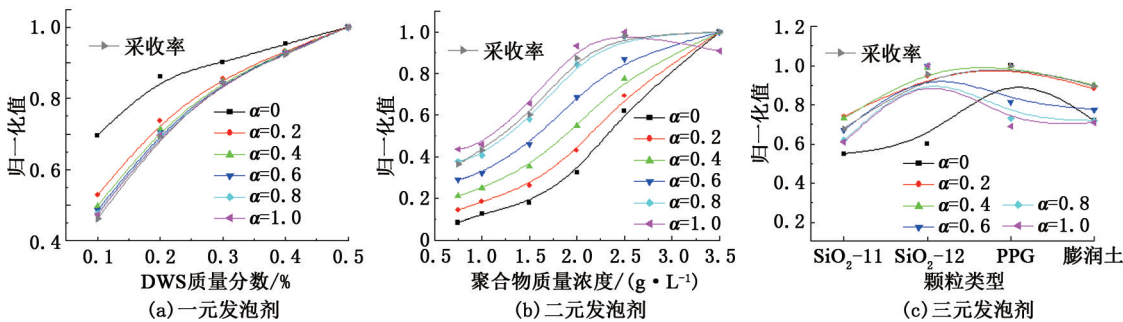


图 5 发泡剂体系的 I_{SFCQI} 与泡沫驱采收率的归一化值

Fig. 5 Normalized values of I_{SFCQI} and foam flooding recovery of foaming agents

一元发泡剂的泡沫体积、泡沫稳定性是影响泡沫扩大波及体积的主要因素。二元发泡剂的泡沫体积、泡沫稳定性和体系黏度是影响泡沫扩大波及体积的主要因素,而二元发泡剂黏度主要影响泡沫携液量和携液稳定性。因此泡沫体积和泡沫稳定性是 I_{SFCQI} 的主要影响因素,泡沫携液量和携液稳定性是 I_{SFCQI} 的次要影响因素,且不同聚合物质量浓度条件下二元发泡剂均具有超低界面张力。因此在权

重系数为 0.7~0.9 时,一元、二元发泡剂的 I_{SFCQI} 与泡沫驱采收率的相关性最佳。

三元发泡剂的起泡性能、泡沫稳定性、泡沫携液量、携液稳定性、体系黏度和颗粒悬浮状态参数是影响泡沫驱扩大波及体积的主要因素。颗粒泡沫体系的黏度和颗粒悬浮状态直接表现为泡沫携液量和携液稳定性,同时泡沫携液量和携液稳定性决定了泡沫稳定性好坏。因此泡沫携液量和携液稳定性是

I_{SFCQI} 的主要影响因素,而起泡性能和泡沫稳定性是 I_{SFCQI} 的次要影响因素。在权重系数为 0.1~0.3 时,三元发泡剂的 I_{SFCQI} 与泡沫驱采收率的相关性最佳。

3 结 论

(1) 构建发泡剂静态泡沫性能综合定量参数综合表征泡沫体积、泡沫稳定性、泡沫携液量和泡沫携液稳定性 4 个静态泡沫参数,初步实现用一个参数快速定量评价发泡剂的静态泡沫性能。

(2) 三元发泡剂的 I_{SFCQI} 大于二元发泡剂的,二元发泡剂的 I_{SFCQI} 大于一元发泡剂的。一元、二元或三元发泡剂的 I_{SFCQI} 与采收率具有正相关性。

(3) 一元、二元发泡剂 I_{SFCQI} 最优权重系数为 0.1~0.3,三元发泡剂 I_{SFCQI} 最优权重系数为 0.7~0.9。在最优权重系数条件下,发泡剂 I_{SFCQI} 与采收率的归一化值基本重合。

参考文献:

- [1] 白振强,吴胜和,付志国.大庆油田聚合物驱后微观残余油分布规律[J].石油学报,2013,34(5):924-931.
BAI Zhenqiang, WU Shenghe, FU Zhiguo. Microscopic residual oil distribution after polymer flooding in Daqing Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(5): 924-931.
- [2] 杨菲,郭拥军,张新民,等.聚驱后缔合聚合物三元复合驱提高采收率技术[J].石油学报,2014,35(5):908-913.
YANG Fei, GUO Yongjun, ZHANG Xinmin, et al. EOR technology of ASP flooding after polymer flooding [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(5): 908-913.
- [3] 张继红,李承龙,赵广.用灰色模糊综合评判方法识别聚驱后优势通道[J].大庆石油地质与开发,2017,36(1):104-108.
ZHANG Jihong, LI Chenglong, ZHAO Guang. Identifying predominant passages after polymer flooding by grey-fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(1): 104-108.
- [4] BENJAMIN D, MIGUEL A, FRANCOIS G. Anti-inertial lift in foams: a signature of the elasticity of complex fluids[J]. Physical Review Letters, 2005, 95: 168303.
- [5] ASHOORI E, MARCHESIN D, ROSSEN W R. Stability analysis of uniform equilibrium foam states for EOR processes[J]. Transport in Porous Media, 2012, 92(3): 573-595.
- [6] 王增林,亓翔,何绍群,等.粉煤灰三相泡沫的制备及

其稳定机制[J].中国石油大学学报(自然科学版),2020,44(5):166-176.

WANG Zenglin, QI Xiang, HE Shaoqun, et al. Preparation of fly ash three-phase foam and its stabilization mechanism [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(5): 166-176.

- [7] 侯吉瑞,赵凤兰.界面化学及其在 EOR 中的应用[M].北京:科学出版社,2014:177-198.

- [8] SHRESTHA L K, ACHARYA D P, SHARMA S C, et al. Aqueous foam stabilized by dispersed surfactant solid and lamellar liquid crystalline phase [J]. Journal of Colloid Interface Sci, 2006, 301(1): 274-281.

- [9] OKA H, IWAYA M, HARADA K, et al. Effect of foaming power and foam stability on continuous concentration with foam counter-current chromatography [J]. Journal of Chromatogr A, 1997, 791(1/2/3): 53-63.

- [10] SHRESTHA L K, SAITO E, SHRESTHA R G, et al. Foam stabilized by dispersed surfactant solid and lamellar liquid crystal in aqueous systems of diglycerol fatty acid esters [J]. Colloids Surf A: Physicochem Eng Aspects, 2007, 293(1/2/3): 262-271.

- [12] KOEHLER S A, HILGENFELDT S, STONE H A. A generalized view of foam drainage: experiment and theory [J]. Langmuir, 2000, 16(15): 6327-6341.

- [13] STEVENSON P. Inter-bubble gas diffusion in liquid foam [J]. Curr Opin Colloid Interface Sci, 2010, 15(5): 374-381.

- [14] BRITAN A, LIVERTS M, BEN-DOR G, et al. The effect of fine particles on the drainage and coarsening of foam [J]. Colloids Surf A: Physicochem Eng Aspects, 2009, 344(1/2/3): 15-23.

- [15] 吕其超,张星,周同科,等. SiO_2 纳米颗粒强化的 CO_2 泡沫压裂液体系 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2020,44(3):114-123.

LÜ Qichao, ZHANG Xing, ZHOU Tongke, et al. CO_2 foam fracturing fluid system enhanced by SiO_2 nanoparticles [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(3): 114-123.

- [16] 章杨,张亮,陈百炼,等.高温高压 CO_2 泡沫性能评价及实验方法研究 [J]. 高校化学工程学报,2014,28(3):535-541.

ZHANG Yang, ZHANG Liang, CHEN Bailian, et al. Performance evaluation and experimental method of CO_2 foam at high temperature and pressure [J]. Journal of Chemical Engineering Chinese Universities, 2014, 28(3): 535-541.

(编辑 刘为清)