

泡沫去除含水层硝基苯微观过程及其稳定化机理

范 野,杨朝格,张瀚元,其布日,董 军* (吉林大学环境工程系,吉林 长春 130021)

摘要: 为了研究泡沫在地层多孔介质中的微观渗流行为、去除污染物的过程和机理,以及纳米 SiO₂ 颗粒对泡沫稳定性的影响,制作了真实砂岩微观模型并利用硬脂酸钠对纳米 SiO₂ 颗粒进行了改性以稳定泡沫.结果表明,泡沫在多孔介质中的生成、破灭和运移是同时发生的,其生成方式与注入气流速度有关,破灭与气体扩散有关,运移则是以大部分被孔道所捕集而少部分以气泡链的形式进行;泡沫去除污染物硝基苯的方式包括乳化增溶、剥离携带和封堵作用,其中封堵作用是主要方式;疏水改性的纳米 SiO₂ 颗粒对泡沫的稳定性有极大的提升,添加的纳米颗粒浓度越大,稳定性越强;纳米 SiO₂ 颗粒稳定的泡沫在模拟中迁移时仍具有较强的稳定性,随着泡沫注入体积的增大,注入压力及阻力因子增大,封堵效应增强.

关键词: 泡沫; 稳定性; 纳米 SiO₂; 封堵效应

中图分类号: X54 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2019)03-1061-07

Microscopic-process of foam removing nitrobenzene from aquifer and its stabilization mechanism. FAN Ye, YANG Chao-ge, ZHANG Han-yuan, QI Bu-ri, DONG Jun* (1.Department of Environmental Engineering, Jilin University, Changchun 130021, China). *China Environmental Science*, 2019,39(3): 1061~1067

Abstract: In order to study the microscopic percolation of foam, the process and mechanism of removing organic solvents, and the effect of nano-silica particles on the foam properties in the porous media, sandstone micromodel was made and nano-silica particles was modified with sodium stearate. The results showed that the formation, breakdown and migration of foam in porous media were simultaneous. The formation was related to the velocity of injection flow, the breakdown was related to the gas diffusion; A small portion of foam was carried out in the form of a bubble chain while most foam was trapped by pore. The removal of pollutants included emulsification, foam stripping and plugging, and plugging was the main way. Modified nano-silica particles can improve the stability of foam obviously, and there was a positive correlation between concentration and stability. The foam stabled by nano-silica particles still has strong stability when the foam was migrated in the simulation column. With the increase of the foam injection volume, the injection pressure and resistance factor increased, and the blocking effect is enhanced.

Key words: foam; stabilization; nano-silica particles; plugging effect

表面活性剂淋洗技术常用于污染场地的修复中,通过增加溶解度、吸附、络合和增流等作用,去除污染物^[1-3].该技术受地层条件影响较大.首先,易产生孔道效应,即表面活性剂在修复过程中会优先沿着渗透性较高的孔道流动,对于低渗透或者非均质地层,其修复效果有限;其次,表面活性剂受本身重力影响,且溶解污染物后密度可能增大,引起垂向迁移,不易控制,有造成二次污染的可能^[4].针对以上问题,有研究者提出原位表面活性剂泡沫强化修复技术^[2,5-6].泡沫不仅具有表面活性剂本身增溶、降低界面张力等特点,而且是一种气液混合体系,在多孔介质中迁移时,能够降低非均质地层的渗透性差异,从而有效避免绕流现象^[7-9].

泡沫在多孔介质中的迁移受注入压力、泡沫稳定性、流体粘度、尺寸、注入速度、表面活性剂本身性质以及介质渗透性等^[8-11]因素的影响.其中,泡沫注入压力的变化受到泡沫稳定性的影响,泡沫的

稳定性越强,注入压力越大^[9];提高泡沫稳定性,能够减弱泡沫迁移时的贾敏效应,增加在低渗透层迁移的波及系数^[12],从而增加了泡沫对地层污染物的去除效率.在提升泡沫稳定性的研究中,复配稳泡剂是最为有效的方法,常用的有聚丙烯酰胺、羧甲基纤维素钠、黄原胶等高聚物增粘型稳泡剂^[13-16],其作用机理是通过提高泡沫体系的表现粘度,增强液膜厚度,从而减缓泡沫的排液速度,降低气体扩散作用,增强泡沫稳定性,但是此类稳泡剂因为粘度较大,对于注入压力要求较高,对起泡体积也有着较大的影响,而且所留下的产物对于地层也有损害作用^[13,17].

在石油领域中,有学者对于纳米 SiO₂ 稳定泡沫的理论、影响因素和作用优势等做了相关研究^[14-15],目前主要集中在稳泡机理和静态评价等基础性研

收稿日期: 2018-08-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(3A417C351425)

* 责任作者, 教授, dongjun@jlu.edu.cn

究方面^[18].相比于利用高聚物类稳定泡沫,纳米颗粒对起泡沫的表观粘度影响较小,在稳定泡沫的同时,对于泡沫注入压力的提升并不是很高,而且 SiO₂ 是一种无毒害的稳定氧化物,不会对造成地层损害,有很大的研究价值.目前,纳米颗粒稳定的泡沫对多孔介质中有机污染物的去除尚未见相关研究报道;此外,目前对于泡沫去除土壤中有有机污染物的研究,多是从宏观模拟柱、模拟槽尺度上进行研究^[8,19],虽然有学者以刻蚀模型为对象研究泡沫微观上对污染物的去除^[20-21],但是这种研究方法所采用刻蚀模型并不能模拟真实的地层砂岩条件,有一定的局限性.

本实验研究利用真实砂岩微观模型研究泡沫在多孔介质中的渗流行为;利用纳米 SiO₂ 稳定泡沫,并探究其稳定机理及泡沫在模拟柱中迁移时的阻力因子变化情况,从而分析纳米颗粒稳定泡沫对污染物的去除能力.

1 材料与方法

1.1 实验材料

起泡沫为表面活性剂十二烷基硫酸钠(SDS,分子式 C₁₂H₂₅SO₄Na,相对分子质量 288.38),化学纯,上海国药试剂;环氧树脂胶,E-44,西亚试剂;甲醇、乙二胺、邻苯二甲酸二丁酯,分析纯,上海国药试剂;纳米 SiO₂,99.5%,(15±5)nm,麦克林.

纳米材料改性:回流冷凝管、四颈瓶、恒温水浴锅、离心机(FULGOR TDL-5A)、磁力搅拌器.

泡沫产生及评价装置:搅拌机、1000mL 量筒.

微观渗流实验装置:气体流量计(LZB-2, 0.6~6mL/min)、蠕动泵、显微镜等;选取粒径分别为 0.125mm 的红色彩砂和 0.25mm 的石英砂,用于模拟渗透性较低的地层砂岩粒径.

1.2 实验方法

1.2.1 泡沫制备及其评价指标 分别称取 1,3,5,7g 的 SDS 溶于 1000mL 去离子水中,超声分散使其充分溶解,静置 2h,待用.在常温(25℃)条件下,取配好的 SDS 溶液 100mL 倒入搅拌器的量杯中,在 12000r/min 的条件下搅拌 3min,将生成的泡沫迅速转移至 1000mL 量筒中,记录产生的泡沫体积 $V(\text{mL})$ 用于衡量溶液的起泡能力.随时间的推移,液体不断从泡沫中析出,记录泡沫中排出 50mL 液体所需要的时间 $t(\text{s})$,即为泡沫的析液半衰期,用此时间衡量泡沫的稳

定性.

1.2.2 纳米 SiO₂ 颗粒的改性 将 10g 纳米 SiO₂ 颗粒和 200mL 的去离子水置于四颈瓶中搅拌加热,随后加入 2.5g 硬脂酸钠,在 80℃ 的条件下恒温反应 2~3h,反应结束后,将溶液冷却转出至 50mL 离心管,在 5000r/min 的条件下离心分离 5min,取沉淀的 SiO₂ 颗粒,用无水乙醇清洗 2~3 次,再用去离子水清洗 2 次,干燥.得到疏水改性的纳米 SiO₂.

1.2.3 纳米 SiO₂ 颗粒疏水程度表征 纳米 SiO₂ 颗粒的疏水程度可用亲油化度的大小表征,即甲醇值.将 0.2g 制得的改性纳米 SiO₂ 颗粒放入盛有 50mL 去离子水的烧杯中,在磁力搅拌器磁力搅拌(200r/min)的条件下,向烧杯中缓慢滴入甲醇,原本浮在水面的纳米 SiO₂ 颗粒会渐渐溶于水,记录全部溶解时消耗甲醇的量 A ;消耗甲醇越多,证明疏水性越好. 甲醇值计算公式如下:

$$V_m = 100A / (50 + A) \quad (1)$$

式中: A 为消耗甲醇的量,mL; V_m 为甲醇值,无单位.

1.2.4 砂岩微观模型的制作 (1) 将环氧树脂、乙二胺和邻苯二甲酸二丁酯按照 20:2:1 的比例混合,配制环氧树脂胶;在 70~80℃ 条件下,加热.

(2) 将配制好的环氧树脂胶涂抹在 2 块玻璃平板上(150mm×50mm×2mm),胶层要薄,避免在显微镜下影响观察.

(3) 在胶面上洒上彩砂或石英砂,修理平整,放置 2h,待胶干,再次修理边缘;边缘修整后放置 2h,待胶干透.

(4) 按(1)中步骤配制环氧树脂胶,环氧树脂量稍多些,涂抹于边缘,胶层厚度略高于沙面,将 2 块玻璃平板盖合,不能留有孔隙和气泡;在玻璃平板上压上重物,4h 后待胶干透,即制作成功;在左右两端合适位置处打孔,安装玻璃导管,作为注入井和出水井.

将表面活性剂溶液和气体同时从注入井中按照一定的流速注入,在显微镜下观察泡沫的渗流现象.图 1 为显微镜下同一位置处多孔介质的孔隙及泡沫图,可以清晰看到孔隙结构和泡沫形状.为了突出对比观察,后续实验中泡沫渗流实验用 0.125mm 红色彩砂;微观驱替污染物实验选用 0.25mm 白色石英砂.

1.2.5 微观驱替实验 利用制得的砂岩微观模型,在注入端通入空气(2~6mL/min)和表面活性剂(2mL/min)起泡,在显微镜下观察,分析泡沫的生成、破灭和

运移现象;将硝基苯用油红(III)染色后,先将硝基苯以 0.2mL/min 的速度缓慢注入模型内,饱和整个模型;再将表面活性剂与气体同时从注入井注入形成泡沫,在显微镜下观察泡沫驱替污染物过程,分析泡沫去除污染物的机理.

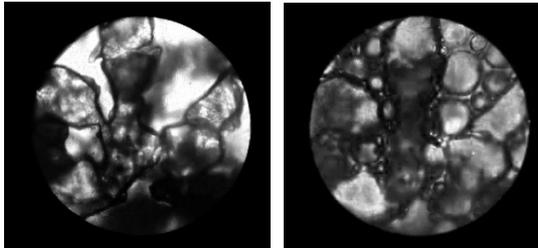


图1 显微镜下砂岩微观模型孔隙及泡沫($\times 100$)

Fig.1 Microscopic pore and foam under a microscope

1.3 模拟柱实验

模拟柱为有机玻璃柱,侧面有三个测压口,分别距离入口端 125,250,375mm;模拟柱中均匀填满石英砂(粒径 0.25mm),在模拟柱的顶端和底端分别装有细孔径纱网以防止石英砂流出以及保证布水的均匀性;以流速 2mL/min 通入去离子水,计算出孔隙体积(PV)为 2980mL;模拟柱持续通入去离子水至饱和,当压力稳定后测量两端压差,记为基础工作压差 ΔP_b ;当通入泡沫时,两端压差记为工作压差 ΔP_f ;同时记录不同体积倍数泡沫流动时在不同位置处的压力值,记为沿程压力.实验用阻力因子来评价泡沫的封堵性能,阻力因子越大,封堵性能越好,其计算公式如下:

$$RF = \Delta P_f / \Delta P_b \quad (2)$$

式中:RF 为泡沫阻力因子,无量纲; ΔP_f 为泡沫工作压力差; ΔP_b 为基础工作压力差.

2 结果与讨论

2.1 泡沫微观渗流机理研究

2.1.1 多孔介质中泡沫的生成 如图 2 所示,通过制作的砂岩微观模型观察可以发现,多孔介质中的泡沫是一种气液分散体系,观察到泡沫的产生有 3 种途径.

第一种是液膜滞后,如图 2(a)、2(b),即在注入井周围气体的注入速度较小时(3mL/min),气体接触的液面就会被挤压形成较薄的液膜,气体驱使液膜端向前移动,且多为连续的.这种方式会形成大量的

液膜堵塞孔隙通道,造成“气阻效应”,使气体的流动性减少,减少了气窜现象的发生.

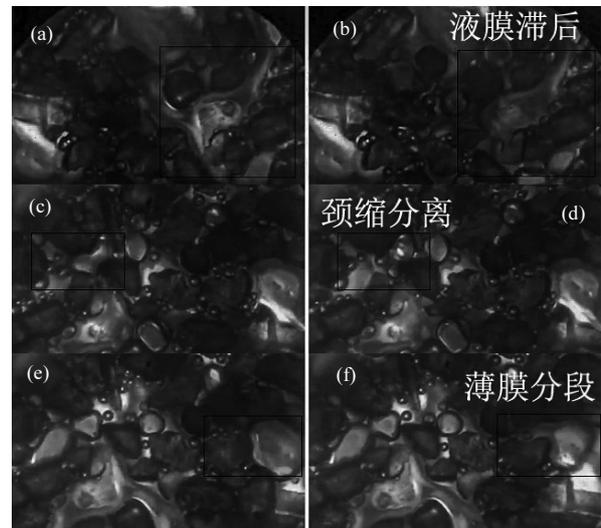


图2 多孔介质中泡沫的生成

Fig.2 Generation of foam in porous medium

第二种是颈缩分离,如图 2(c)、2(d),即当注入气体的速度逐渐增大时,气泡高速穿过吼道进入另一侧,此时由于气泡的体积扩大而导致毛管压力减小,液相中产生的压力梯度使周围的液体重新聚集到吼道中,当毛管压力降低到临界值时,气泡被液体截断,产生新的独立气泡.在分析图像时发现,颈缩分离现象会在某一孔隙吼道处重复发生,生成的气泡可以流动或者是在某处聚集堵塞气流通,而且停留的情况占大多数.

第三种是薄膜分段,如图 2(e)、2(f),即产生在液膜滞后和缩颈分离后,泡沫在流动到两条或两条以上的通道时产生分段的现象,一部分沿着较大的通道继续运移,另一部分则会分裂成若干更为细小的泡沫继续运移;与颈缩分离相类似,所形成的分散气泡能够流入或者堵塞气体孔道.

2.1.2 多孔介质中泡沫的破灭

通过观察微观模型可以发现,多孔介质中产生的泡沫是一种不稳定的分散体系,流动过程中伴随着泡沫的破灭与再生,泡沫破灭主要因素包括以下两个原因:第一,泡沫本身是一种不稳定的热力学体系,为了趋于一种稳定的趋势,最终会自我破灭来实现这种稳定,即液膜破灭;第二,泡沫在多孔介质中的大小并不均匀,通常小气泡内部的压力大于大气泡,这就导致小气泡中的气体容易窜出进入相邻的大气泡内,所以会产生小

气泡变小或者消失,大气泡变大甚至膨胀破灭的现象,即气体扩散.气体扩散是泡沫破灭的主要因素.

从微观层面上分析,为了提升泡沫的稳定性,可以从以下几点考虑,第一,通过增加液膜的厚度,减少泡沫的破灭速度,比如添加高聚物;第二,改变起泡溶液的性质,使液膜表面和气泡内部能量接近,延缓泡沫破灭,比如添加表面活性剂;第三,增加泡沫尺寸的均匀性,减小泡沫之间相互影响.

2.1.3 多孔介质中泡沫的运移 因为泡沫本身的运移速度要比液相运移速度较慢,所以多孔介质中泡沫的运移可以看成 2 个部分,气相的运移和液相的运移.通过对微观模型中泡沫运移过程的分析,可以发现以气泡形式运移只占了很少的部分,如图 3 所示,少部分气泡以气泡链的形式移动,大部分气泡在模型孔隙中处于不流动状态,即被孔隙捕集;这些被捕集的气泡对孔隙进行了封堵,大大降低了气泡的流动性.泡沫中的液相有未形成泡沫的液体部分和形成泡沫的液膜部分.液体部分会在气体的作用下不断变化,形成液膜;形成液膜的部分在泡沫破灭后重新成为液体.

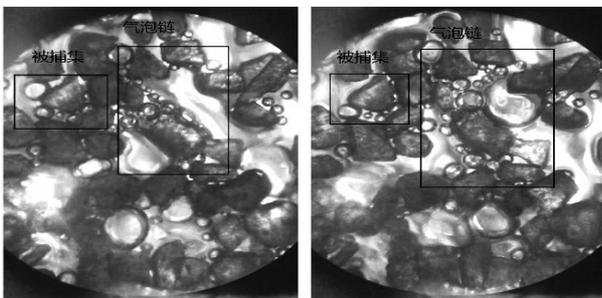


图 3 气相、液相运移实验

Fig.3 Migration of gas and liquid phase

2.2 泡沫微观驱替硝基苯的过程研究

2.2.1 泡沫驱替硝基苯实验 以油红(III)染色的硝基苯作为污染物,在砂岩微观模型中用泡沫进行驱替去除.如图 4,颜色较深部分为油红(III)染色的硝基苯,白色不规则形状部分为石英砂,驱替过程中,孔隙被液相或者泡沫所占据.

图中硝基苯在多孔介质模型中被泡沫不断驱替出来,颜色由深变浅;驱替过程可以分为 2 个阶段,不同阶段的反应有些区别,流动情况也有所不同.

第一阶段:如图 4(a)所示,泡沫主要以液膜滞后的形式运移,形成的泡沫较少,此时硝基苯部分被乳

化与泡沫一起驱替出来.

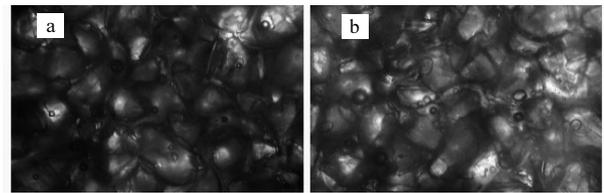


图 4 泡沫驱替污染物过程示意

Fig.4 Process of foam displacement

第二阶段:如图 4(b)所示,泡沫逐渐增多,且不断被孔隙所捕集,处于长时间停留状态,只有少量泡沫以气泡链的形式不断运移,此时泡沫比较稳定;气体从中间部分运移,剩余的硝基苯不断被泡沫驱替出模型.在模型末端的出口处,泡沫携带有被染色的硝基苯.此外,被孔隙捕集的泡沫形成了封堵,造成了多孔介质局部渗透性减小,泡沫流动阻力变大,迫使后续进入的液体和泡沫改向其他通道,从而提高了流体整体的波及面积.

2.2.2 泡沫去除多孔介质中硝基苯的机理 分析砂岩微观模型中泡沫去除污染物的过程,可以看出并非单独的物理或者化学作用过程,而是几种去除方式的结合,包括乳化增溶、剥离携带以及封堵作用,其中封堵作用是最主要的方式.

首先,泡沫的封堵作用是指泡沫在流动过程中不断被孔隙捕集,同时,在驱替压力的作用下,小气泡不断聚集形成大气泡,在局部形成封堵,造成此部分渗透性能降低,使后进入的气泡有更多的机会进入原本不能进入的渗透性较低的区域,从而扩大了波及面积.

其次,泡沫是表面活性剂与气体共同作用生成的,在泡沫驱替时,表面活性剂能够降低硝基苯与水之间的表面张力,将其乳化成水包油(O/W)的乳状液,大幅度降低了硝基苯的黏度,提高其流动性;同时,表面活性剂的存在可以使吸附在颗粒上的硝基苯解吸溶解于表面活性剂内;这两种作用易于污染物的去除.

再次,泡沫反复通过同一通道时可能发生剥离现象,将硝基苯从孔隙中拖拽携带出来,沿着压力梯度减小的方向运移,此过程属于物理作用.

泡沫的封堵是泡沫能够去除多孔介质中污染物的主要原因,与单独利用表面活性剂增溶、络合等

作用去除污染物的原理有所不同,封堵作用中,泡沫的稳定性起着极为重要的作用;稳定性越强,泡沫越不容易破灭,越容易占据介质孔隙,封堵作用越明显,后续进入的流体更容易进入渗透性较低的区域,提高泡沫稳定性对于去除含水层的污染物有着重要的意义。

2.3 浓度配比优选

2.3.1 表面活性剂浓度对泡沫性能的影响 分别配制浓度为 1,3,5,7g/L 的 SDS 溶液,高速搅拌起泡,记录起泡体积并测定其析液半衰期。

实验结果如图 5 所示。泡沫的析液半衰期随着浓度增大先增加后减小,当 SDS 溶液浓度为 3g/L 时,析液半衰期最长,其稳定性最好;当浓度大于 3g/L 时,起泡体积增加而析液半衰期减小,其原因在于随着起泡体积的增加,泡沫尺寸变大,泡沫之间的相互作用如挤压形变以及泡沫内部的气体扩散变得明显,从而造成泡沫的稳定性的降低。后续实验选择浓度为 3g/L 的 SDS 溶液作为起泡液。

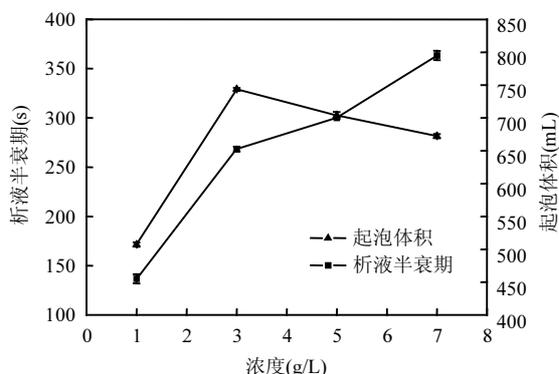


图 5 表面活性剂浓度对泡沫性能的影响

Fig.5 Effect of SDS mass fraction on foam properties

2.3.2 改性对纳米颗粒表面性质的影响 如表 1 所示,利用硬脂酸钠进行改性的纳米 SiO_2 其甲醇值可以达到 6.54,而未改性的 SiO_2 颗粒甲醇值为 0.这表明在恒温加热搅拌的作用下,硬脂酸钠以疏水的碳链朝外,而羧基朝内吸附在纳米颗粒表面,从而具有一定的疏水性能。

2.3.3 改性前后纳米 SiO_2 颗粒对泡沫稳定性的影响 如图 6 所示,加入改性纳米 SiO_2 颗粒,对泡沫的析液半衰期有着较为明显的影响,当加入的 SiO_2 浓度较小时(小于 5g/L),析液半衰期先增大后减小。在 1g/L 时,其半衰期最大,从最初的 328s 提升到 760s,

提升倍数达 2.3 倍;当加入的 SiO_2 浓度较大时(大于 5g/L),析液半衰期逐渐增大,半衰期由 328s 增加至 1050s,增加了 3.2 倍;从图中可知,纳米 SiO_2 颗粒在增强泡沫稳定性的同时,泡沫的起泡体积会相应的减小,起泡体积从最初的 650mL 降低至 470mL,泡沫体积降低了 28%;泡沫变得细密均匀使得泡沫起泡体积减小,泡沫之间尺寸的差异性减小,减弱了气体的扩散速度和泡沫之间的相互作用,因此泡沫稳定性增加。后续实验起泡液 SDS 浓度为 3g/L,纳米 SiO_2 颗粒的浓度为 30g/L。

表 1 改性前后纳米颗粒甲醇值变化

Table 1 Comparison of hydrophobicity between modified and unmodified silica particles

类别	SiO_2 质量(g)	消耗甲醇量(mL)	甲醇值
未改性	0.2	0	0
改性	0.2	3.5	6.54

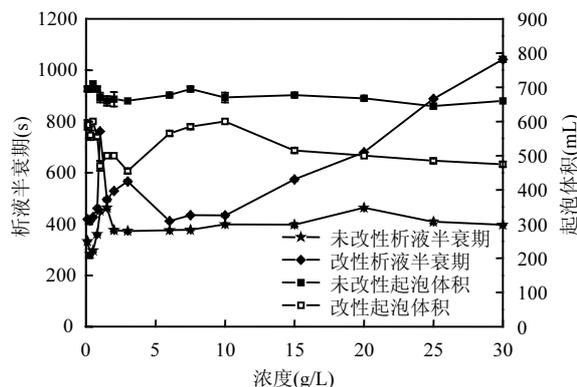


图 6 纳米 SiO_2 颗粒浓度对泡沫性能的影响

Fig.6 Effect of nano- SiO_2 mass fraction on foam properties

2.4 SiO_2 增强泡沫稳定性机理分析

改性前粒子由于亲水性较强而主要存在于分散相和外层液膜上,虽然一定程度上增加了液膜的粘弹性模量,但是液膜由于受到纳米颗粒重力影响和气体扩散作用,容易破裂。

改性后,纳米颗粒进入泡沫内部,泡沫的尺寸相对变小,泡沫之间的相互作用减弱,而且液膜内表面形成致密的壳膜,气体不易逸出,从而稳定性增强。 SiO_2 浓度较低时,大部分位于液相中,但稳泡作用只有当纳米颗粒吸附在液膜界面上时才能形成。随着浓度增加,纳米 SiO_2 颗粒靠近液膜,泡沫趋于稳定,但吸附在液膜界面的粒子之间的相互作用较强,包

壳不完全,且泡沫受到气体扩散作用和颗粒的重力作用,液膜较薄易破灭,稳定性增加不明显; SiO_2 浓度较高时,由于疏水性进入泡沫内部,SDS 分子和纳米粒子之间起协同作用,使得纳米颗粒吸附在气泡内表面形成致密的壳状结构,减弱了气泡内气体的逸出,同时增加液膜的厚度和刚性强度,减缓气泡之间的合并,液膜不易破灭,稳定性增加。

2.5 纳米颗粒对泡沫阻力因子的影响

由图 7 可知,SDS 溶液在加入改性纳米 SiO_2 颗粒后,泡沫在模拟柱中迁移的阻力因子为 96.2,要明显高于未添加纳米颗粒所形成的泡沫(77.8);随着泡沫注入体积的增加,阻力因子逐渐增大;证明添加改性纳米 SiO_2 后产生的泡沫具有较强的封堵性能。

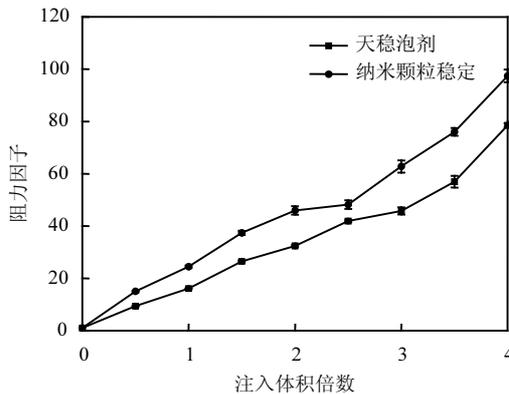


图 7 泡沫注入体积对阻力因子变化的影响

Fig.7 Effect of the injected volum on resistance factor

分析公式(2)可知,工作压差与阻力因子呈正相关,所以压差越大、封堵性能越强,泡沫越稳定。模拟柱实验结果表明改性纳米 SiO_2 颗粒稳定的泡沫在迁移过程中仍具有较强的稳定性和封堵性能。

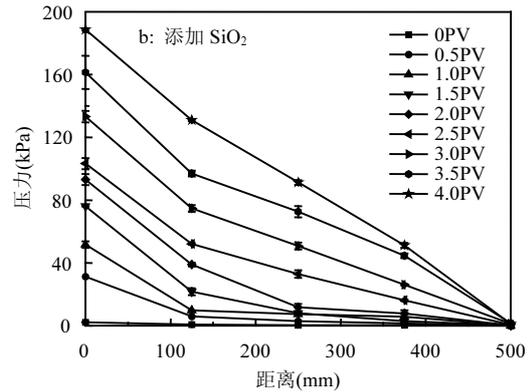
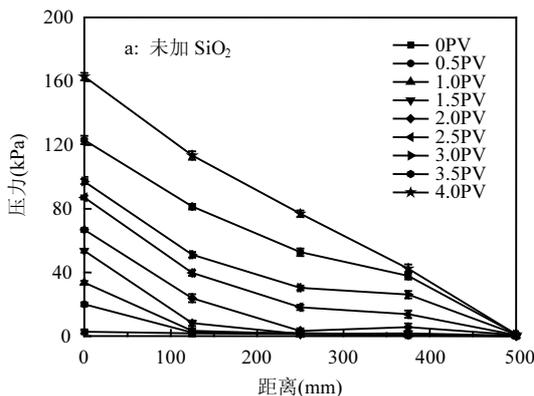


图 8 不同泡沫注入体积对沿程压力的影响

Fig.8 Effect of the injected volum on the pressure

由图 8 可知,改性纳米颗粒稳定的泡沫形成的封堵压力要明显大于未添加稳泡剂的泡沫;沿程压力变化表明,随着注入泡沫量的增多,在入口端泡沫注入所需要的注入压力也逐渐增加,沿程压力随着距离的增加而变小。

3 结论

3.1 在砂岩微观模型中,泡沫的生成、破灭和运移是同时发生的,气体流速较小时,以薄膜滞后为主,气体流速较大时以缩颈分离和薄膜分段为主;泡沫运移过程中大部分泡沫被多孔介质孔隙所捕集,少部分以泡沫链的形式流动。

3.2 泡沫去除污染物的主要原因包括乳化增溶、剥离携带和封堵作用,其中,封堵作用是主要原因,封堵能力越强,泡沫波及面积越大,去除能力越强。

3.3 经疏水改性的纳米 SiO_2 颗粒对泡沫的稳定性有着明显的提升。 SiO_2 浓度较小时,析液半衰期先增大后减小,在 1g/L 时,其半衰期最大,达 760s ;当加入的 SiO_2 浓度较大时,析液半衰期逐渐增大,半衰期可达 1050s 。

3.4 纳米颗粒稳定的泡沫有着较强的稳定性能,泡沫稳定性越强,封堵性能越强,代表着去除污染物的能力越强,但是注入压力会变大;泡沫注入体积的增加,也会增大注入压力。

参考文献:

- [1] Seungwoo J, Corapcioglu M Y, Roosevelt S E. Micromodel study of surfactant foam remediation of residual trichloroethylene [J]. Environ.sci.technol, 2000,34:3456-3461.
- [2] Bera A, Ojha K, Mandal A. Synergistic Effect of Mixed Surfactant

- Systems on Foam Behavior and Surface Tension [J]. *Journal of Surfactants & Detergents*, 2013,16:621-630.
- [3] Couto H J B, Massarani G, Biscaia E C, et al. Remediation of sandy soils using surfactant solutions and foams [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009,164(2/3):1325-1334.
- [4] Khan F I, Husain T, Hejazi R, An overview and analysis of site remediation technologies [J]. *Journal of Environmental Management*, 2004,71(2):95-122.
- [5] Laha S, Tansel B, Ussawarujikulchai A. Surfactant-soil interactions during surfactant-amended remediation of contaminated soils by hydrophobic organic compounds: A review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2008,90(1):95-100.
- [6] Yan Y L, Deng Q, He F, et al. Remediation of DNAPL-contaminated aquifers using density modification method with colloidal liquid aphrons [J]. *Colloids & Surfaces A: Physicochemical & Engineering Aspects*, 2011,385:219-228.
- [7] Wang H, Chen J. A study on the permeability and flow behavior of surfactant foam in unconsolidated media [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013,68:567-576.
- [8] Zhong L R, Szecsody J E, Zhang F., et al. Foam delivery of amendments for vadose zone remediation: propagation performance in unsaturated sediments [J]. *Vadose Zone Journal*, 2010,9:757-767.
- [9] Afsharpoor A, Lee G S, Kam S I, Mechanistic simulation of continuous gas injection period during surfactant-alternating-gas (SAG) processes using foam catastrophe theory [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010,65:3615-3631.
- [10] Chowdiah P, Misra B R, Ii J J K, Srivastava V J, et al. Foam propagation through soils for enhanced in-situ remediation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1998,62:265-280.
- [11] Roy D, Kongara S, Valsaraj K T. Application of surfactant solutions and colloidal gas aphron suspensions in flushing naphthalene from a contaminated soil matrix [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1995,42: 247-263.
- [12] 李宾飞,李兆敏,刘祖鹏,等.多相泡沫体系调驱试验 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2010,34(4):93-98.
Li Bin-fei, Li Zhao-min, Liu Zu-peng, et al. Experiment on profile control and flooding by multiphase foam system [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2010,34 (4):93-98.
- [13] 赵化廷. 新型抗盐抗温泡沫复合体系的研究与性能评价 [D]. 西南石油学院, 2005.
Zhao Hua-ting. Preparation of Salt and Oil Resistant Foaming System and Evaluation on Oil-Displacement Ability [D]. Southwest Petroleum University, 2005.
- [14] 茹 冕,常志东,罗文利,等.疏水型二氧化硅粒子对泡沫体系稳定性的影响 [J]. *化工学报*, 2012,63:1943-1950.
Ru Mian, Chang Zhi-dong, Luo Wen-li, et al. Influence of hydrophobically modified silicon dioxide particles on stability of EOR flooding foam [J]. *CIESC Journal*, 2012,63:1943-1950.
- [15] 樊泽霞,李玉英,丁长灿,等.聚合物对泡沫稳定性的影响研究 [J]. *特种油气藏*, 2013,20:102-104.
Fan Ze-xia, Li Yu-ying, Ding Chang-can, et al. Effects of Polymer on Foam Stability [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2013,20:102- 104.
- [16] 李兆敏,王 鹏,李松岩,等.纳米颗粒提高二氧化碳泡沫稳定性的研究进展 [J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2014,36:155-161.
Li Zhao-min, Wang Peng, Li Song-yan, et al. Advances of Researches on Improving the Stability of CO₂ Foams by Nanoparticles [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2014,36:155-161.
- [17] 王增林,王其伟.强化泡沫驱油体系性能研究 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2004,28:49-51.
Wang Zeng-lin, Wang Qi-wei. Performance of foam in the forced foam flooding system [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2004,28:49-51.
- [18] Espinoza D A, Caldelas F M, Johnston K P, et al. Nanoparticle-Stabilized Supercritical CO₂ Foams for Potential Mobility Control Applications. 2010.
- [19] Longpré-Girard M, R Martel, T Robert, et al. 2D sandbox experiments of surfactant foams for mobility control and enhanced LNAPL recovery in layered soils [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2016,193:63-73.
- [20] Osei-Bonsu K, Grassia P, Shokri N. Relationship between bulk foam stability, surfactant formulation and oil displacement efficiency in porous media [J]. *Fuel*, 2017,203:403-410.
- [21] Osei-Bonsu K, Grassia P, Shokri N. Investigation of foam flow in a 3D printed porous medium in the presence of oil [J]. *Journal Colloid Interface Science*, 2017,490:850-858.

作者简介: 范 野(1993-),男,重庆彭水人,吉林大学硕士研究生,主要从事污染场地控制与修复研究.发表论文 1 篇。