

胶态微泡沫用于冲洗含水层的迁移分布特征

何宇^{1,2,3}, 郭超^{1,2,3}, 付玉丰^{1,2,3}, 张成武^{1,2,3}, 张婧懿^{1,2,3}, 秦传玉^{1,2,3*} (1. 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130012; 2. 吉林大学新能源与环境学院, 吉林 长春 130012; 3. 石油化工污染场地控制与修复技术国家地方联合工程实验室, 吉林 长春 130012)

摘要: 目前有关胶态微泡沫(CGAs)冲洗含水层过程中的迁移分布特性尚不明确,本研究利用二维模拟实验详细探究了注入速率、表面活性剂浓度和介质条件对CGAs迁移分布时空变化特征的影响。结果表明,在单侧单点注入条件下,CGAs的波及区域形状近似半圆形,迁移锋面相对规则;CGAs破裂产生的泡沫液分布在其迁移锋面四周,泡沫气体受地下水浮力影响向上方迁移,导致出现在纵向向上迁移距离大于向下迁移距离的“向上漂移”现象。表面活性剂浓度对CGAs的迁移分布影响较小;注入流速低或介质渗透性差,CGAs均会在迁移后期出现明显的“向上漂移”现象,同时其波及区域形状逐渐趋向于半椭圆形;恒定流量注入CGAs,其在含水层中的波及面积存在最大值。相对传统液相冲洗液,CGAs在非均质含水层中迁移分布较为均匀,受介质非均质性影响较小。

关键词: 胶态微泡沫(CGAs); 含水层; 迁移分布; 影响因素

中图分类号: X523 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2021)02-0720-07

The migration and distribution characteristics of colloidal gas aphrons during its flushing of aquifer. HE Yu^{1,2,3}, GUO Chao^{1,2,3}, FU Yu-feng^{1,2,3}, ZHANG Cheng-wu^{1,2,3}, ZHANG Jing-yi^{1,2,3}, QIN Chuan-yu^{1,2,3*} (1. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130012, China; 2. College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun 130012, China; 3. National and Local Joint Engineering Laboratory for Petrochemical Site Control and Remediation Technology, Changchun 130012, China). *China Environmental Science*, 2021,41(2): 720~726

Abstract: At present, the migration and distribution characteristics of colloidal gas aphrons (CGAs) during the flushing of aquifers are not clear. In this study, the effects of injection rate, surfactant concentration and media conditions on the spatial and temporal variation characteristics of the migration and distribution of CGAs were investigated in detail using two-dimensional simulation experiments. The results showed that under single-point and single-side injection conditions, the shape of the sweeping area of CGAs was approximately semi-circular, and the migration front was relatively regular. Besides, the foam liquid generated by the bursting of CGAs was distributed around its migration front, and the foam gas migrated upward due to the influence of groundwater buoyancy, resulting in the "drift up" phenomenon that the upward migration distance in the vertical direction was greater than the downward migration distance. As for surfactant concentration, it had little effect on the migration and distribution of CGAs. When the injection velocity was low or the permeability of the media was poor, CGAs appeared an obvious "drift up" phenomenon in the later stage of migration, at the same time, the shape of the sweeping area gradually tended to be semi-elliptical. There was a maximum sweeping area in the aquifer when CGAs were injected at a constant flow. In all, compared with traditional liquid flushing fluids, the migration and distribution of CGAs in the heterogeneous aquifer was relatively uniform and less affected by the heterogeneity of the media.

Key words: colloidal gas aphrons (CGAs); aquifer; migration and distribution; affecting factors

目前,对于重质非水相液体(NAPLs)污染地下水的原位治理技术中,原位表面活性剂冲洗技术因具有去除效果好、成本低、操作简单等优点而广受关注^[1-4]。但国内外学者研究表明,传统的表面活性剂冲洗液在介质中迁移易出现“孔道流”现象,在非均质区域会产生“绕流”现象,冲洗药剂难以完全覆盖污染区域,从而导致污染物去除效率变差^[5-10]。

为了解决上述问题,原位表面活性剂泡沫强化冲洗技术逐渐受到关注,研究显示泡沫在介质中分布更为均匀,可以有效避免“孔道效应”等问题,且污

染物去除效果较好^[11-18]。胶态微泡沫(CGAs)是通过高速搅拌表面活性剂溶液制得的一种稳定的微泡沫,其具有独特的泡沫结构,稳定性和耐压性比普通泡沫更强^[19-24]。且研究表明,和普通表面活性剂泡沫冲洗相比,胶态微泡沫冲洗对污染物的增溶增流效果更明显,修复效果更显著^[25-26]。

收稿日期: 2020-06-22

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07109-003);国家重点研发计划“土壤”专项(2018YFC1802500)

* 责任作者, 教授, qincyu@jlu.edu.cn

CGAs 具有非牛顿流体的性质,其在含水层中的迁移分布特征与普通流体不同,准确认识和描述 CGAs 在含水层的迁移分布特征对明确 CGAs 冲洗强化机理至关重要,同时也对提高修复效果有着实际意义.

本研究通过设置二维均质模拟槽实验,探究了 CGAs 在含水层中迁移的时空分布特征,并考察了注入速率、表面活性剂浓度和介质粒径条件对 CGAs 迁移分布特征的影响;同时通过二维非均质模拟槽实验,比较了表面活性剂溶液和 CGAs 在非均质含水层的迁移分布特征.研究结果可为 CGAs 冲洗技术在含水层中的应用提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 实验材料

试剂及仪器:C₁₄₋₁₆ α -烯基磺酸钠(AOS),纯度为 92%(上海源叶生物技术有限公司);水溶伊红和亮兰,分析纯(天津市光复精细化工研究所);SDF1100 分散机(上海微特电机有限公司);07522-30Masterflex L/S 蠕动泵(美国,cole-parmer);YZ1515 蠕动泵(保定齐力恒流泵有限公司).

实验介质采用石英砂,将石英砂筛分后清洗风干,不同粒径介质的填充参数见表 1.

表 1 不同粒径介质的填充参数

Table 1 Configurations of media with different grain sizes

介质粒径(mm)	孔隙度	填充密度(g/cm ³)	渗透系数(m/d)
2.0~4.0	0.418	1.534	709.749
0.5~1.0	0.427	1.471	43.373
0.25~0.5	0.433	1.448	15.205
0.1~0.25	0.439	1.434	3.018
<0.1	0.444	1.427	0.282

1.2 实验装置

实验所用模拟槽为有机玻璃材质,均质模拟槽尺寸为 50cm×2.5cm×100cm,注入口设置在模拟槽左侧面中点位置,模拟槽右侧设置布水板和 1cm 宽的隔水槽,隔水槽最上端设置出流口,如图 1(a)所示.非均质模拟槽尺寸为 65cm×2.5cm×75cm,模拟槽左右两侧均设置布水板和 1cm 宽的隔水槽,左侧隔水槽均匀设置 3 个注入孔,右侧隔水槽最上端设置出流口,实验介质的粒径及分布如图 1(b)所示.以石英砂装填模拟槽,然后通过模拟槽左侧最底端注入孔以 6mL/min 流速注入自来水进行饱和以模拟含水层环境.

实验通过 CGAs 连续发生装置以 4000r/min 搅拌 AOS 溶液连续产生 CGAs,有关产生的 CGAs 性质参照何宇等的研究^[26-27].

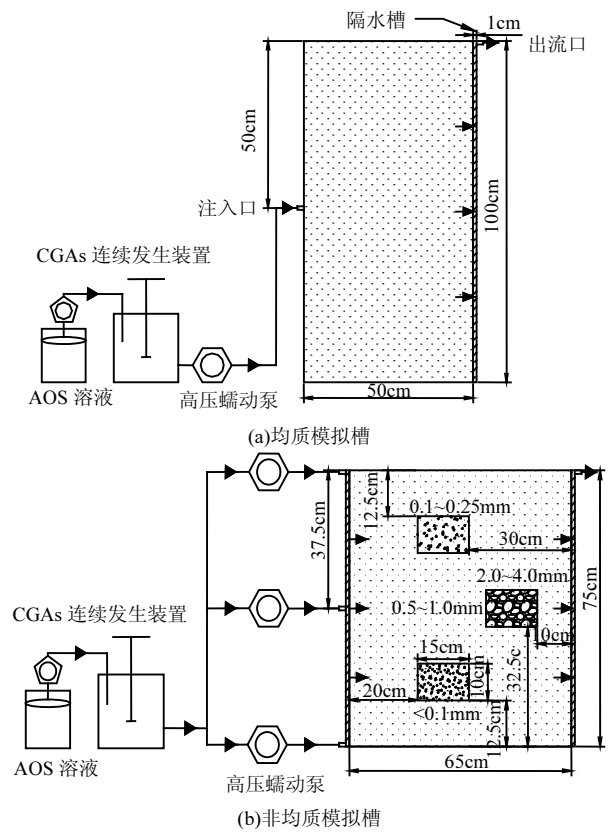


图 1 模拟槽实验装置示意

Fig.1 Experimental setup for tank experiment

1.3 实验方法

表 2 均质模拟槽实验方案一览表

Table 2 Schedule of testing programm for homogeneous tank experiments

实验组别	AOS 浓度(%)	密度(g/cm ³ , 水为 0.996)	泡沫注入速率 (mL/min)	介质粒径 (mm)
A	0.15	0.198	20	0.5~1.0
B	0.15	0.198	60	0.5~1.0
C	0.15	0.198	60	0.25~0.5
D	1.0	0.195	60	0.5~1.0
E(溶液)	0.15	0.996	60	0.5~1.0

1.3.1 CGAs 在二维均质含水层中的迁移模拟实验 实验方案如表 2 所示,A~D 组实验冲洗剂为 CGAs, E 组实验冲洗剂为 AOS 溶液.配制以 1g/L 亮兰染色的 AOS 溶液,连续产生 CGAs,以固定速率向模拟槽左侧中点位置的注入孔中连续注入冲洗剂.

观察模拟槽内 CGAs 破裂后的气液分离情况,以及 CGAs 泡沫主体的运移情况,并记录 CGAs 在不同时间的迁移距离.

1.3.2 CGAs 在二维非均质含水层中的迁移模拟实验 设置冲洗剂分别为 AOS 溶液和 CGAs,其他实验条件相同.配制以 1g/L 亮兰染色的 0.15% AOS 溶液,连续产生 CGAs,通过模拟槽左侧的 3 个注入孔同时以 60mL/min 注入冲洗剂.同 1.3.1,对 AOS 溶液和 CGAs 的迁移分布情况进行观察并记录.

2 结果与讨论

本文以 AOS 溶液或 CGAs 注入的孔隙体积(PV)数来表征 AOS 溶液或 CGAs 的注入量随时间的变化,以衡量其迁移分布特征随时间的变化规律.

2.1 CGAs 在均质含水层的迁移分布规律

图 2 为不同注入量下, 0.15% AOS 产生的 CGAs 以 20mL/min 的注入速率在粒径为 0.5~

1.0mm 的均质含水层中的迁移分布情况(表 2 中 A 组实验),为了防止实验过程中的压力过大而导致模拟槽发生形变,模拟槽外部使用不锈钢框架进行固定.CGAs 在单侧单点注入条件下,CGAs 波及区域形状近似半圆形,CGAs 迁移锋面相对规则,随注入体积增加, CGAs 波及面积相应逐渐增大,如图 2 中浅蓝色区域所示.CGAs 锋面前端破裂产生的泡沫液(图 2 中深蓝色部分)分布在 CGAs 锋面四周,随着泡沫液体积增多,泡沫液受重力影响主要聚集在 CGAs 迁移方向的前方和下方.CGAs 迁移过程中,破裂产生的泡沫气体逐渐累积,由于气体重力小,且含水层中存在地下水浮力,使泡沫气体向上方迁移,逐渐出现 CGAs 在纵向向上迁移距离大于向下迁移距离的现象,即“向上漂移”现象.当 CGAs 注入量为 1.65PV 时,可观察到 CGAs 迁移出现了“向上漂移”现象;CGAs 注入量为 2.44PV 时,“向上漂移”现象已十分明显.

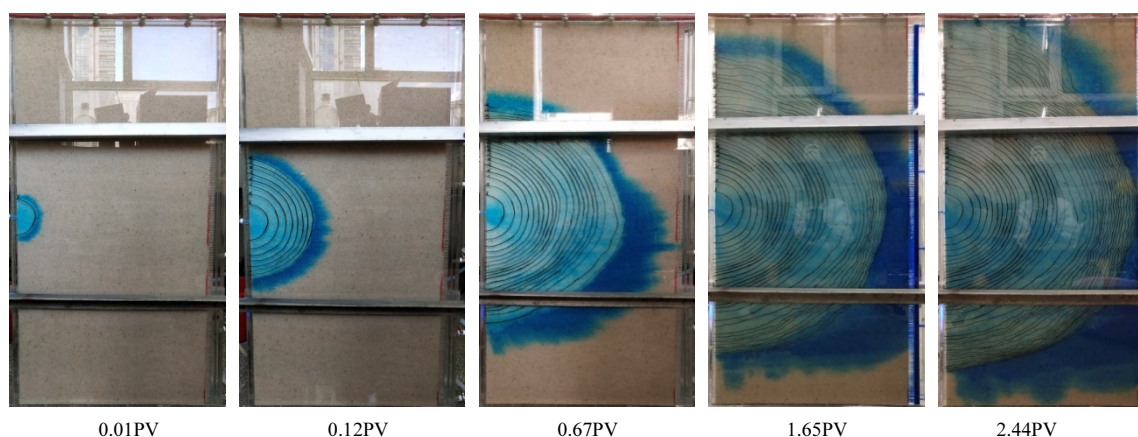


图 2 CGAs 在均质含水层中的迁移过程

Fig.2 CGAs migration in homogeneous aquifer

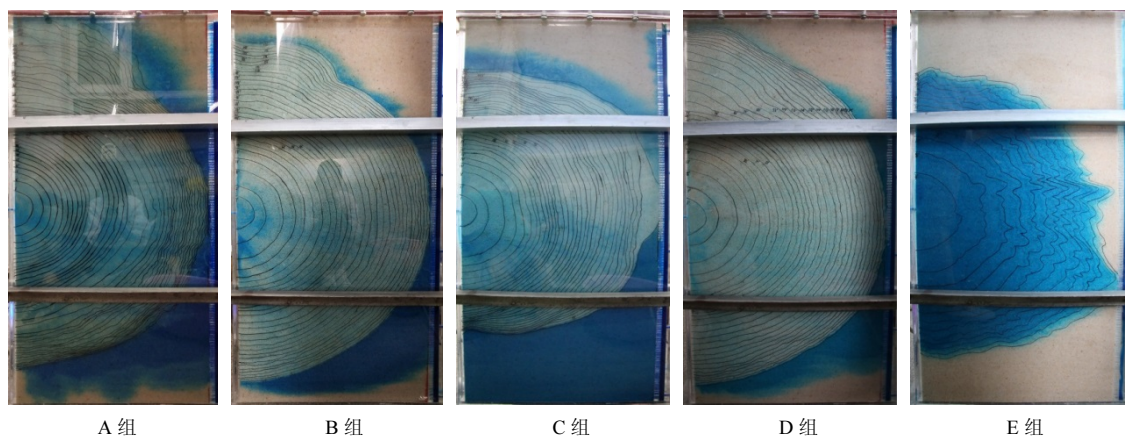


图 3 不同实验参数对 CGAs 在均质含水层迁移过程的影响

Fig.3 Effects of different experimental parameters on the migration process of CGAs in homogeneous aquifers

图 3 为不同实验参数下(A~E 组实验)CGAs 锋面/AOS 溶液锋面迁移至模拟槽右端时(即 7.26、2.13、4.96、1.93 和 0.52PV)的照片.以注入点为原点,定义 CGAs 锋面/AOS 溶液锋面在水平方向的迁移距离为“水平迁移距离”,在竖直方向的迁移距离为“纵向迁移距离”,并分为“纵向向上迁移距离”和“纵向向下迁移距离”。

2.2 CGAs 的水平迁移变化规律

图 4 为 CGAs/AOS 溶液的水平迁移距离随注入量的变化,曲线斜率即表征了水平迁移速率,斜率越大说明水平迁移速率越大.以恒定流量注入,CGAs/AOS 溶液的水平迁移速率均随注入量增大而逐渐降低.B 组实验中当 CGAs 注入量为 0.52PV 时,CGAs 锋面水平迁移距离为 29.43cm; E 组实验中当 AOS 溶液注入量为 0.52PV 时,溶液锋面水平迁移距离为 49.91cm.说明在相同注入量时,CGAs 的水平迁移速率小于 AOS 溶液,这主要是由于 CGAs 的黏度大于溶液,因此水平迁移时的阻力较溶液更大,且通过观察也可以看出,CGAs 的纵向迁移能力比溶液强.B 曲线斜率明显大于 C 曲线,说明 CGAs 在渗透系数低的介质中的水平迁移速率较低. B 和 D 两曲线斜率相近,说明表面活性剂浓度变化对 CGAs 水平迁移速率影响较小。

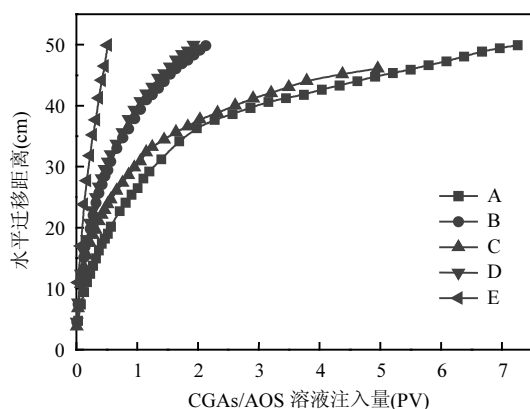


图 4 水平迁移距离的变化

Fig.4 Changes in horizontal migration distance

2.3 CGAs 的纵向迁移变化规律

图 5 为 CGAs/AOS 溶液的纵向上下迁移距离比 Y 随水平迁移距离的变化, Y 值大于 1 即说明发生“向上漂移”现象.E 曲线的 Y 值持续小于 1,说明 AOS 溶液受重力影响下沉现象明显.比较 A 和 B 曲线,A 曲

线当水平迁移距离为 18.23cm 时, Y 值为 1.06,并随水平迁移距离增大逐渐增大,水平迁移距离为 48.87cm 时, Y 值已达到 1.20;B 曲线在水平迁移距离达到 25.69cm 之后, Y 值持续保持在 1.05 左右.说明 CGAs 注入流速较低时,CGAs 迁移速率慢,累积产生的泡沫气体体积大,在 CGAs 迁移后期会出现明显的“向上漂移”现象.C 曲线在水平迁移距离为 34.44cm 时, Y 值为 1.05,并逐渐增大,水平迁移距离为 46.10cm 时, Y 值已达到 1.18,与 B 曲线相比,说明 CGAs 在渗透性差的介质中迁移受到阻力较大,CGAs 破裂严重,累积的大量泡沫气体使 CGAs 在迁移后期产生明显的“向上漂移”现象. B 和 D 曲线的 Y 值始终相差较小,说明表面活性剂浓度变化对 CGAs 在介质中的纵向迁移规律影响较小。

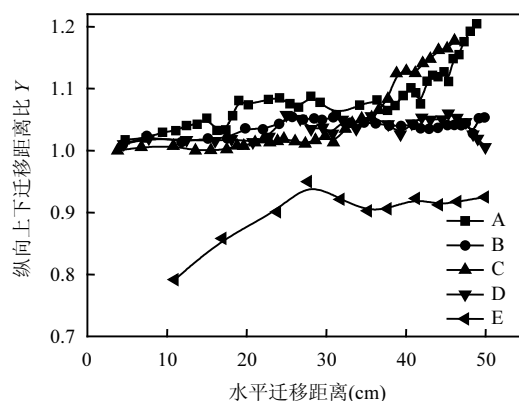


图 5 纵向上下迁移距离比 Y 的变化

Fig.5 Changes in the ratio of upper to lower transport distance in vertical direction

2.4 CGAs 的波及区域形状变化规律

图 6 为 CGAs/AOS 溶液的水平与纵向迁移距离比 S 随水平迁移距离的变化, S 值大于 0.5 说明波及区域形状呈长轴在水平方向上的半椭圆形.E 曲线的 S 值持续大于 0.5,并逐渐增大,当 AOS 溶液水平迁移距离为 49.91cm 时, S 值为 0.72,说明 AOS 溶液在含水层中的波及区域形状呈现半椭圆形,迁移以水平方向为主,纵向上的波及影响能力有限.B 和 D 曲线的 S 值始终在 0.5~0.58 变化,说明在单点单侧注入条件下,CGAs 在地下水中的波及区域形状接近半圆形,主要是由于 CGAs 的密度小,受重力影响小,在纵向上可以相对均匀地分布和迁移,同时其黏度与水比相对较大,可以均匀地进入不同的介质孔隙;也说明表面活性剂浓度对 CGAs 波及区域形

状影响较小. B 曲线 S 值的最大值为 0.58; A 曲线在水平迁移距离为 29.21cm 时, S 值为 0.59, 且 S 值随 CGAs 迁移逐渐增大, 说明 CGAs 注入速率低, 在 CGAs 迁移过程中, 波及区域形状会逐渐趋向于半椭圆形, 且水平与纵向的迁移距离比逐渐增大. 但 A 曲线在水平迁移距离增加到 38.63cm 时, S 值逐渐降低, 是由于 CGAs 注入速率低, 迁移后期的“向上漂移”现象严重, 纵向向上迁移距离迅速增大, 使得 S 值下降. 与 B 曲线相比, C 曲线在水平迁移距离达到 26.08cm 后, S 值逐渐增大, 说明 CGAs 在渗透性差的介质中迁移, 迁移前期的波及区域形状接近于半圆形, 但在迁移后期, 水平的单点注入模式使得 CGAs 在水平方向的迁移动力更大, 使得 CGAs 的波及区域形状呈半椭圆形, 且水平与纵向的迁移距离比逐渐增大.

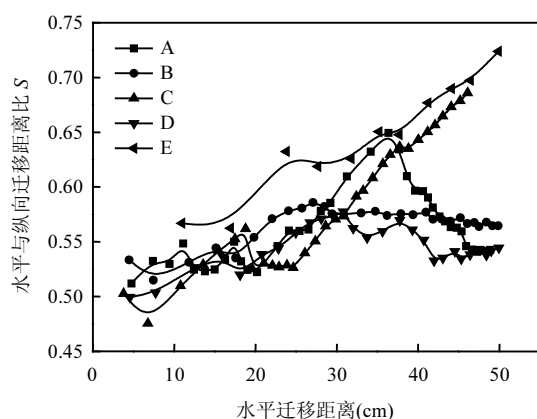


图6 水平与纵向迁移距离比 S 的变化

Fig.6 Changes in the ratio of horizontal to vertical migration distance

2.5 CGAs 的波及面积变化规律

图7为 CGAs/AOS 溶液的波及面积和注入每升 CGAs/AOS 溶液的波及面积增长量 M 随注入量的变化, 波及面积曲线的斜率可以反映出波及面积增长率. 由图 7(a)可知, CGAs/AOS 溶液在含水层中迁移, 波及面积增长率随注入量的增加而降低. 由图 7(b)可知, A~D 曲线的 M 值均随 CGAs 注入量增大逐渐降低并趋向于零, 说明恒定流量注入 CGAs, 其在含水层中迁移的波及面积达到一定值后, CGAs 将不能再继续向前迁移, 即 CGAs 冲洗在实际应用中, 单个注入井的作用范围存在上限. B 和 D 曲线变化规律几乎一致, 说明表面活性剂浓度对 CGAs 的波

及面积和波及面积增长率影响较小. 比较 A 和 B 曲线可知, CGAs 注入速率低, 波及面积增长率较小, CGAs 最大波及面积较小. 比较 B 和 C 曲线可知, 介质渗透性越差, CGAs 迁移的波及面积增长率降低的越快, CGAs 最大波及面积越小.

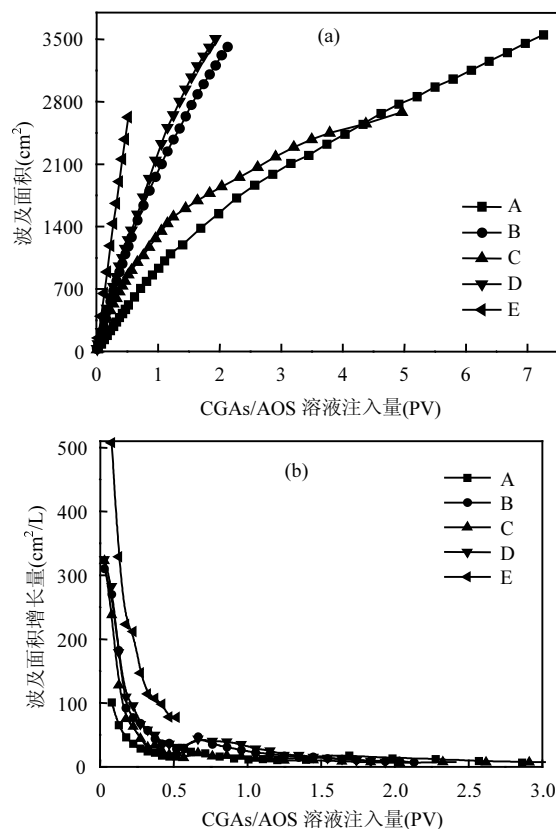


图7 波及面积和注入每升 CGAs/AOS 溶液的波及面积增长量 M 的变化

Fig.7 Changes in sweeping area and the increase of sweeping area of injecting CGAs/AOS solution per liter

2.6 CGAs 在非均质含水层的迁移变化规律

如图8所示, AOS 溶液迁移时的“指进”现象明显, 在 AOS 溶液注入量为 0.99PV 时, AOS 溶液快速优先通过渗透系数较高(粒径 2.0~4.0mm)区域, 在其中的平均迁移速度达到 388.86cm/h; 而迁移至渗透系数较低(粒径 0.1~0.25mm 和 <0.1mm)区域发生明显的“绕流”现象, 在其中的平均迁移速度仅分别为 3.37 和 3.04cm/h. CGAs 在粒径 2.0~4.0mm 区域的平均迁移速率为 23.45cm/h, 明显比 AOS 溶液的迁移速率小. 虽然 CGAs 破裂产生的泡沫液会发生“绕流”现象, 但 CGAs 在迁移至粒径 0.1~0.25mm 和 <0.1mm 区域几乎未发生“绕流”现象, 在粒径 0.1~0.25mm 和 <0.1mm 区域的

平均迁移速度分别为 7.09 和 6.57cm/h,是 AOS 溶液的 2.10 和 2.16 倍.AOS 溶液在不同渗透系数介质中的迁移速率差别较大,CGAs 的迁移速率差别相对较小,说明 CGAs 受介质非均质性影响较小,在非均质含水层中迁移分布相对 AOS 溶液较为均匀.

CGAs 作为一种非牛顿流体,即其剪应力与剪切应变率呈非线性关系,且 CGAs 在介质中迁移时呈

剪切稀化的流动状态,即 CGAs 表观黏度随剪切速率增加而降低. CGAs 的黏度大于 AOS 溶液,CGAs 的高黏度使其在较高渗透性区域迁移时的迁移速率明显低于 AOS 溶液;而 CGAs 的剪切稀化性质可以降低其在较低渗透性区域的迁移阻力,提高迁移速率.如此,使得 CGAs 在非均质含水层迁移时表现出“均匀推流”特征.

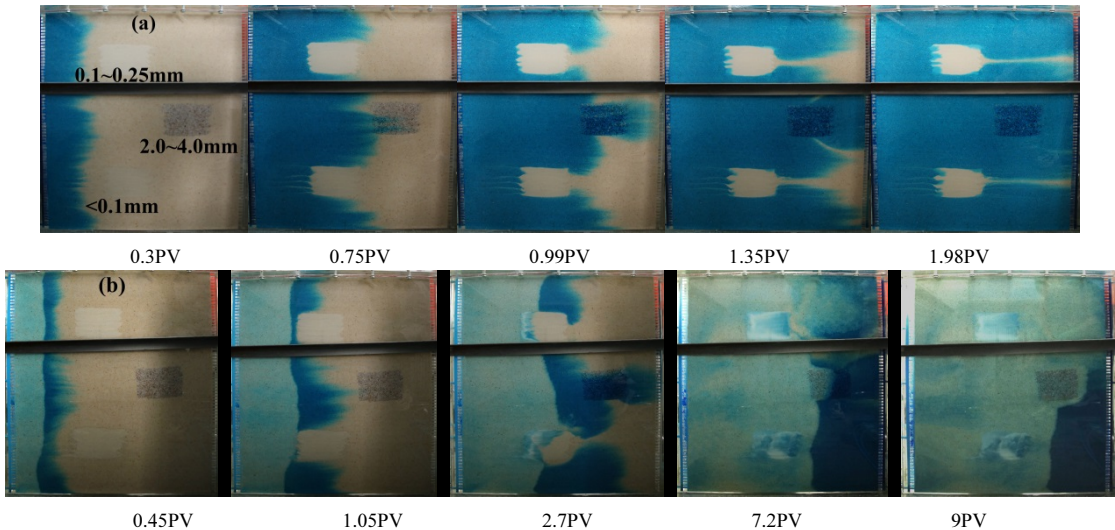


图 8 0.15%AOS 溶液(a)和 CGAs(b)在非均质含水层中的迁移过程

Fig.8 The migration process of 0.15% AOS solution (a) and CGAs (b) in heterogeneous aquifer

表 3 0.15% AOS 溶液和 CGAs 在不同粒径区域的平均迁移速率

Table 3 Average migration rates of 0.15% AOS solution and CGAs in different particle size regions

项目	迁移速率(cm/h)		
	0.1~0.25mm	<0.1mm	2~4mm
CGAs	7.09	6.57	23.45
AOS 溶液	3.37	3.04	388.86

3 结论

3.1 CGAs 在单侧单点注入条件下,CGAs 波及区域形状近似半圆形,CGAs 迁移锋面相对规则,泡沫液分布在 CGAs 锋面四周,并受重力影响主要聚集在 CGAs 迁移方向的前方和下方.泡沫气体由于重力小,且含水层中存在地下水浮力,会向上方迁移,出现 CGAs 在纵向向上迁移距离大于向下迁移距离的“向上漂移”现象.

3.2 表面活性剂浓度对 CGAs 的迁移分布影响较小;注入流速低或介质渗透性差,均会使 CGAs 在迁移后期出现明显的“向上漂移”现象,且波及区域形

状逐渐趋向于半椭圆形,CGAs 在水平与纵向的迁移距离比逐渐增大.

3.3 恒定流量注入 CGAs,其在含水层中的波及面积存在最大值,即 CGAs 冲洗在实际应用中,单个注入井的作用范围是有限的.CGAs 注入速率低或介质渗透性差,CGAs 的最大波及面积较小.

3.4 CGAs 受介质非均质性影响较小,在非均质含水层中迁移分布较为均匀,在不同渗透系数介质中的迁移速率差别相对较小,且 CGAs 在渗透性较低的介质中的迁移速率明显大于 AOS 溶液. CGAs 独特的迁移分布特征可以使得 CGAs 冲洗 NAPLs 污染非均质含水层的修复效率更高,对较低渗透性区域的污染物去除效果更好.

参考文献:

[1] Paria S. Surfactant-enhanced remediation of organic contaminated soils and water [J]. Advanced Colloidal Interface Science, 2008,138: 24-58.

[2] Laha S, Tansel B, Ussawarujikulehai A. Surfactant-soil interactions during surfactant- amended remediation of contaminated soils by

- hydrophobic organic compounds: A review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009,90:95–100.
- [3] 李 隋.表面活性剂强化抽取处理修复 DNAPL 污染含水层的实验研究 [D]. 长春:吉林大学, 2008.
- Li S. Research on surfactant enhanced pump and treat remediation of a DNAPL contaminated aquifer [D]. Changchun:Jilin University, 2008.
- [4] 赵勇胜.地下水污染场地污染的控制与修复 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007,37(2):303–310.
- Zhao Y S. Groundwater pollution control and remediation [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007,37(2):303–310.
- [5] Li R Z, Szecsody J, Oostrom M, et al. Enhanced remedial amendment delivery to subsurface using shear thinning fluid and aqueous foam [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011,191(1–3):249–257.
- [6] Wang H, Chen J J. A study on the permeability and flow behavior of surfactant foam in unconsolidated media [J]. *Environmental Earth Science*, 2013,68:567–576.
- [7] Hayden N, Diebold J, Farrell C, et al. Characterization and removal of DNAPL from sand and clay layered media [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2006,86(1/2):53–71.
- [8] Mulligan C N, Wang S L. Remediation of a heavy metalcontaminated soil by a rhamnolipid foam [J]. *Engineering Geology*, 2006,85:75–81.
- [9] Conrad S H, Glass R J, Peplinski W J. Bench-scale visualization of DNAPL remediation processes in analog heterogeneous aquifers: Surfactant floods and in situ oxidation using permanganate [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2002,58(1):13–49.
- [10] Dermont G, Bergeron M, Mercier G, et al. Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008,152:1–31.
- [11] Szafranski R, Lawson J B, Hirasaki G J, et al. Surfactant/foam process for improved efficiency of aquifer remediation [J]. *Structure, Dynamics and Properties of Disperse Colloidal Systems*, 1998,111:162–167.
- [12] Chowdiah P, Misra B R, Kilbane II J J, et al. Foam propagation through soils for enhanced in-situ remediation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1998,62(3):265–280.
- [13] Shen X, Lin Z B, Ding Y Z, et al. Foam, a promising vehicle to deliver nanoparticles for vadose zone remediation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011,186:1773–1780.
- [14] Longpré-Girard M, Martel R, Robert T, 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.
- [15] Zhang Z F, Mark L Z, White D, et al. Experimental investigation of the effective foam viscosity in unsaturated porous media [J]. *Vadose Zone Journal*, 2012,11:421–427.
- [16] Huang C W, Chang C H. A laboratory study on foam-enhanced surfactant solution flooding in removing n-pentadecane from contaminated [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2000,173(1):171–179.
- [17] Wang S L, Mulligan C N. An evaluation of surfactant foam technology in remediation of contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2004,57(9):1079–1089.
- [18] Maire J, Fatin-Rouge N. Surfactant foam flushing for in situ removal of DNAPLs in shallow soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017,321:247–255.
- [19] Rothmel R K, Peters R W, Martin E S, et al. Surfactant foam/bioaugmentation technology for in situ treatment of TCE-DNAPLs [J]. *Environmental Science and Technology*, 1998,32(11):1667–1675.
- [20] Pasdar M, Kazemzadeh E, Kamari E, et al. Insight into the behavior of colloidal gas aphron (CGA) fluids at elevated pressures: An experimental study [J]. *Colloids and Surfaces A*, 2018,537:250–258.
- [21] Ziaee H, Arabloo M, Ghazanfari M H, et al. Herschel-Bulkley rheological parameters of lightweight colloidal gas aphron (CGA) based fluids [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015,93:21–29.
- [22] Juaidyah A, Jaber M H A. Use of colloidal gas aphron in subsurface treatment of soil [D]. Florida: University of Florida, 2006.
- [23] Arabloo M, Shahri M P. Experimental studies on stability and viscoplastic modeling of colloidal gas aphron (CGA) based drilling fluids [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014,113:8–22.
- [24] Boonamnuayvitaya V, Jutaporn P, Sae-ung S, et al. Removal of pyrene by colloidal gas aphrons of a biodegradable surfactant [J]. *Separation and Purification Technology*, 2009,68:411–416.
- [25] Couto H J B, Massarani G, Biscaya E C, et al. Remediation of sandy soils using surfactant solutions and foams [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009,164(2/3):1325–1334.
- [26] 何 宇,郭 超,付玉丰,等.胶态泡沫在饱和和介质迁移特性及对 PCE 冲洗效果 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(11):4673–4680.
- He Y, Guo C, Fu Y F, et al. Migration characteristics of colloidal gas aphron in saturated media and flushing effect on PCE [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(11):4673–4680.
- [27] 秦传玉,郭 超,何 宇.胶态微泡沫在非饱和多孔介质中的迁移规律及影响因素 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2019,49(6):1732–1740.
- Qin C Y, Guo C, He Y. Migration characteristics of CGAs and the influencing factors in unsaturated porous media [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019,49(6):1732–1740.

作者简介: 何 宇(1995–),女,吉林公主岭人,吉林大学硕士研究生,主要从事水土污染控制与修复方面的研究.发表论文 1 篇.