

泡沫驱技术研究与应用进展

李兆敏¹, 徐正晓¹, 李宾飞¹, 王 飞^{2,3}, 张宗檩⁴, 杨辉宇¹, 余光明⁵

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 青岛科技大学机电工程学院, 山东青岛 266061;
3. 青岛科技大学地质能源研究院, 山东青岛 266061; 4. 中国石化胜利油田分公司, 山东东营 257000;
5. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018)

摘要:泡沫驱是目前油田广泛使用的一种提高采收率技术,泡沫流体由于其独特的性质,对于驱替过程中窜流的防治以及油田开发增效具有重要意义。详细介绍和评述室内泡沫稳定性研究和流动机制模型,总结和分析矿场泡沫注入方式以及泡沫驱在油田中的综合应用。结果表明:泡沫稳定性影响泡沫驱的性能,纳米颗粒等合适的添加剂有助于增强泡沫的稳定性;现有泡沫流动模型虽较为成熟,但部分参数仍以经验替代为主,缺少量化的表征以及现场应用的结合;泡沫的矿场注入方式多样,应根据不同的生产需求选择不同的注入方式;国内油田在实施泡沫驱过程中,寻找廉价气源是解决开发经济性问题的关键,复合强化泡沫驱是未来的主要研究发展方向。

关键词:泡沫驱;窜流;泡沫稳定性;流动模型;注入方式

中图分类号:TE 355 **文献标志码:**A

引用格式:李兆敏,徐正晓,李宾飞,等. 泡沫驱技术研究与应用进展[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(5):118-127.

LI Zhaomin, XU Zhengxiao, LI Binfei, et al. Advances in research and application of foam flooding technology[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(5): 118-127.

Advances in research and application of foam flooding technology

LI Zhaomin¹, XU Zhengxiao¹, LI Binfei¹, WANG Fei^{2,3}, ZHANG Zonglin⁴,
YANG Huiyu¹, YU Guangming⁵

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. College of Electromechanical Engineering in Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China;
3. Geo-Energy Research Institute in Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China;
4. Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying 257000, China;
5. Exploration and Development Research Institute, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, China)

Abstract: Foam flooding is an efficient and widely applied enhanced oil recovery technology in oilfields. Foam fluid is of great significance for the prevention of cross flow during gas and water flooding due to its unique properties, which can significantly increase oil production. The indoor foam stability study and foam flow models were reviewed and described in details along with the foam formation and injection modes and its comprehensive application in oilfields. The stability of foams is of great importance for the performance of foam flooding, and suitable additives such as nanoparticles can be used to enhance the foam stability. The existing foam flow models are relatively mature, but many model parameters are slack of quantitative characterization and combination of field applications. The formation and injection of foams in oilfield are important for their performance in field operation, and different injection methods can be selected and optimized based on different production requirements. In the process of implementing foam flooding in domestic oilfields, finding economic gas sources is the key issue to reduce the operation cost. Composite and enhanced foam flooding is the main research and development targets in the future.

Keywords: foam flooding; cross flow; foam stability; flow model; injection mode

作为世界上形成的三次采油技术系列之一,泡沫驱已逐渐成为油气田广泛使用的提高采收率方法。泡沫驱提高原油采收率的作用机制主要为增大波及体积和提高洗油效率,对于驱替过程中气窜、水窜的防治具有重要意义,同时泡沫液中的表面活性物质可以降低油水界面张力,调整油水流量比。泡沫流体由于其独特的性质在油气田开发方向得到了广泛应用,最早可以追溯到20世纪50年代,其在一定程度上可以实现“堵大不堵小、堵水不堵油”,因而被称为“智能流体”,并且开发了许多相关理论指导现场应用。近年来,随着国内油气田进入中后期开发阶段,断块、低渗、稠油等难开发油藏的比重有所增加,泡沫流体在此类油藏的开发应用中日益广泛。由于多种因素的制约,国外泡沫驱的研究主要集中在流动机制及相关影响因素的研究上,相比较而言矿场试验较少,国内泡沫驱研究从室内到现场更加丰富,泡沫驱已从单一的气加活性剂水溶液形式,发展成添加多种助剂的复合泡沫驱,并且取得了较好的效果^[1-2]。笔者在依据国内外泡沫驱研究的基础上,对影响泡沫驱效果的主要因素及决定泡沫性能的关键因素进行详述,总结常用泡沫流动模型以及矿场泡沫注入方式,结合油田应用实例对泡沫驱进行分析对比,对不同类型泡沫驱的特点及存在的问题进行阐述,并基于前人的研究成果提出泡沫驱发展的建议与展望。

1 泡沫室内研究及流动模拟

1.1 泡沫稳定性

泡沫剂或表面活性剂的选择和应用是实施泡沫技术的关键,通过筛选出合适的泡沫剂可以改善起泡性能和泡沫稳定性。目前油田常用的表面活性剂主要有阴离子型、非离子型和两性表面活性剂。阴离子表面活性剂由于其来源广泛、发泡性能优异、成本低廉等优点,在石油化工领域得到广泛应用,但其有效性受到高温和高矿化度的限制。非离子表面活性剂在水中不发生电离,并且由于具有亲水基团(如含氧基团)而具备良好的耐盐性,当达到浊点时,非离子表面活性剂(如乙氧基化表面活性剂)的水溶液通常表现出相分离,超过浊点后则会导致性能变差。即便如此,部分非离子表面活性剂由于具有相对较高的浊点而在一定程度上受温度和盐度的影响较小。两性表面活性剂主要包括甜菜碱和咪唑啉,其在发泡性和耐盐性方面具有显著性能。在实际应用时通常将不同类型的表面活性剂复配成混合体系,

这可以弥补单一表面活性剂的缺陷,从而表现出更好的性能。产生这种有益效果的主要原因是动态吸附的改变,表面张力和临界胶束浓度的降低^[3-4]。

影响泡沫驱提高采收率的主要因素是泡沫体系的稳定性及封堵性能^[5]。在储层条件下泡沫的产生和稳定存在许多挑战,储层温度、高矿化度和岩石对表面活性剂的吸附等苛刻条件可能导致泡沫生成的效果较差,直接影响到驱替过程中的波及效率。泡沫必须保持足够稳定才能有效地发挥作用,而研究表明,单纯使用表面活性剂并不足以产生持久稳定的泡沫^[6]。为了提高表面活性剂的性能,现已提出将包含合适化学添加剂的表面活性剂组合物用于稳定泡沫,常用化学添加剂包括有机化合物、电解质、细碎颗粒、聚合物和液晶等^[7]。

碱性电解质是较常用的一种添加剂, Farzaneh^[8]研究了氢氧化钠、碳酸盐、硼酸盐3种碱性物质在原油存在条件下对二氧化碳泡沫的稳定性影响,结果表明碳酸盐和硼酸盐促使泡沫稳定产生且硼酸盐优于碳酸盐,而氢氧化钠会降低泡沫的稳定性。聚合物添加剂可以有效地改善发泡性能,最近有学者通过将十二烷基硫酸钠(SDS)与改性丙烯酸烷基酯交联聚合物(HMPAA)混合,在气水界面形成疏水网络,从而增强泡沫的稳定性^[9]。Xu等^[10]在最近的研究中,评价了添加三乙醇胺(TEA)、三元共聚聚丙烯酰胺(AVS)、聚丙烯酰胺(HPAM)及N70K-T后几种表面活性剂混合物的起泡性以及稳定性,优选出AOS/AVS/N70K-T混合体系。一些学者近期着力于研究离子液体(IL)在强化采油过程中作为替代常用化学物质的能力,表面活性剂在IL存在下的表面活性交替受其离子部分与IL之间发生的一些相互作用的影响,由于能够在多种盐度和温度下降低油/水界面张力,IL也被推广为新型表面活性剂,除了常见类型的IL之外,基于共晶的ILs近年来也引起了研究人员的兴趣^[11]。

纳米粒子的使用在一定程度上起到了表面活性剂的替代作用,通过在界面处产生强烈吸附,以在恶劣的储层条件下稳定泡沫,因此得到了广泛研究。近几年,SiO₂纳米颗粒是较热的稳泡研究对象,由于SiO₂是丰富的天然材料,因此通常认为SiO₂纳米颗粒是一种环保型添加剂^[12]。

未经处理的纳米SiO₂一般表现出亲水性,针对亲水性纳米颗粒的稳泡机制,Horozov^[13]提出过3种假设方式,亲水性颗粒渗入液体薄膜后作为单层桥接颗粒、作为紧密堆积的双层颗粒和作为网络颗粒

聚集在薄膜内部。高度单分散的亲水性纳米颗粒,具有非常低的多分散指数,这使泡沫薄膜的排液较为缓慢。而从粒子分离能量层面进行分析,在界面分离半径为 R 的颗粒所需的能量取决于接触角(θ)和界面的表面张力(γ_{ow})。如果粒径非常小(小于几微米),则可忽略重力和浮力效应,将颗粒从界面移动到溶液所需的能量(E)和接触角余弦绝对值呈负相关。对于 $\theta < 30^\circ$ (高亲水性颗粒)或 $\theta > 150^\circ$ (高疏水性颗粒),这种分离能量将非常低,这意味着这些颗粒不能稳定泡沫。该假设表明高度亲水的 SiO_2 颗粒不易在界面稳定,另有研究人员研究了纳米粒子的各种尺寸对多孔介质中泡沫产生的影响。Kim等^[14]用非离子表面活性剂测试了不同 SiO_2 纳米粒子的稳泡性能,并且发现较小的颗粒会产生更稳定的泡沫,这是由于较小纳米颗粒具有更强的扩散性和更高的界面浓度。

SiO_2 纳米颗粒稳泡的缺点之一是其表面带负电荷,这妨碍了疏水性的调节。国外多名学者报道了通过混合表面改性的 SiO_2 纳米颗粒和阴离子表面活性剂来协同稳定泡沫的研究^[15]。Sun等^[16]将改性疏水 SiO_2 纳米颗粒引入到泡沫体系中,研究其与表面活性剂的协同稳泡作用机制以及气液界面流变性质,发现在适量的浓度下,表面活性剂分子吸附到颗粒表面后可以增强颗粒表面的活性,有助于颗粒在气液界面上的吸附,改变了颗粒的界面层结构,从而使扩张黏弹模量增强,增强泡沫的稳定性。

通过化学处理对纳米颗粒进行表面改性有时会很昂贵。在某种条件下,通过在颗粒表面原位吸附活性物质来改变其性质可能是行之有效的,一些学者已经探索了利用表面活性剂和纳米颗粒之间的协同作用产生泡沫的潜力及增强泡沫稳定性的能力^[17-19]。Zhang等^[20]分别使用了亲水性锂皂石颗粒及 SiO_2 纳米颗粒与表面活性剂四乙二醇单十二烷基醚的混合物进行泡沫评价实验,并且发现在某些条件下泡沫稳定性增强。Worthen等^[21]使用未改性的亲水 SiO_2 纳米颗粒和辛基酰胺丙基甜菜碱(CAPB)产生稳定且黏稠的 CO_2 泡沫,且验证了亲水 SiO_2 纳米颗粒不能单独稳定泡沫。

另有一些研究者进行了其他类型纳米颗粒稳定泡沫的研究。Binks等^[22]通过混合 CaCO_3 纳米颗粒和硬脂酰乳酸钠表面活性剂稳定了泡沫。Lü等^[23]制得了由廉价PM稳定的 CO_2 泡沫,且系统研究了燃煤PM和山茶籽渣中皂苷在稳定 CO_2 泡沫中的协同作用机制。Yang等^[24]系统地研究了疏水改性氧

化铝(AlOOH)纳米颗粒对泡沫的稳定作用,采用异丙苯磺酸钠(SC)对纳米粒子进行改性,生成泡沫后发现纳米粒子与SC之间存在竞争效应。另有研究比较了 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 CuO 、 TiO_2 纳米颗粒作为表面活性剂添加物对起泡性以及稳泡性的影响,发现添加 Al_2O_3 纳米颗粒的效果最好,其次是 SiO_2 ,二者皆可产生稳定的泡沫,而 Fe_2O_3 由于易发生聚集导致其稳泡性能较差^[25]。

1.2 泡沫模型

对于泡沫的模拟,从70年代到现在一直有大量国外学者进行研究,国内学者研究相对较少。提出的泡沫流动模型主要有以下几种:

(1)非牛顿流体模型。在考虑泡沫可压缩性的基础上,Ikoku等^[26]提出了将泡沫流体作为幂律流体进行处理的渗流模型。除此之外延伸发展的包括宾汉流体、H-B模型等,都是将泡沫流体作为单相进行处理。

(2)气液模型。该模型中将泡沫看作气液两相,主要包括考虑含油条件的黑油模型。Marfoe等^[27]提出了利用黑油模型模拟泡沫在多孔介质中流动的方法。

(3)渗流阻力因子模型。Chou^[28]基于统计网格模型和渗流理论提出了泡沫模拟的渗流阻力因子模型。首先定义阻力因子的概念,得到泡沫阻力因子随着泡沫质量的增加而降低,即气体流量增加,阻力因子下降,液体流量增加,阻力因子上升。且岩石渗透率越大,泡沫阻力因子越大,残余油的存在对泡沫产生的影响较小,但会导致阻力因子和圈闭气体含量降低。

(4)总量平衡模型。Falls等^[29]考虑了泡沫流动中泡沫结构对于渗流的影响,根据气泡总量随着生成破灭处于平衡状态而提出。此模型是目前使用范围最广的模型,后续学者对其进行了一系列扩展研究。Friedmann等^[30]在质量守恒和泡沫总量平衡的基础上,考虑到泡沫视黏度和有效渗透率,模拟了泡沫在多孔介质中的产生、聚并、圈闭和对流,得到了泡沫结构在多孔介质中的分布。Kovscek等^[31]利用泡沫总量平衡模型,结合常规的油藏数值模拟,由总量平衡模型的一般性,扩展到整个油藏尺度,并将泡沫结构变化考虑为流动阻力的变化,并将泡沫总量平衡模型的应用推广到三维情况,进行了模拟计算,结果表明,气相相对渗透率和有效黏度受泡沫结构控制,泡沫能降低气相流度,泡沫可以在岩心深处产生,但传播较慢。Bertin等^[32]利用总量平衡的理

论提出了另外一种可以替代总量平衡关系的模型,该思想是利用泡沫产生处的多孔介质的岩石物性来计算泡沫结构,再用泡沫结构来表征泡沫流度,得到的结果与总量平衡模型吻合并且所需参数较少。

此外还有基于分流理论的一些特殊模型,如临界毛管力模型^[33]、孔隙网络模型^[34]、泡沫超覆及排液模型^[35]等,而基于泡沫结构最有效的模拟是 Saye 等^[36]提出的多尺度模型,其利用水平集、多尺度分析等方法成功模拟了泡沫液膜的重排、排液和破裂演变过程。Wang 等^[37]基于分形理论提出了泡沫结构演变模型,将泡沫流体结构定量化,并在此基础上分析了泡沫运移中结构动态变化特征。

迄今为止,在泡沫流动建模技术部分,没有任何单一泡沫模型能够在各种条件下适用于多孔介质中的所有泡沫实验,因此将实验室或矿场数据拟合到建模参数中对于泡沫模型的建立及验证变得尤为重要,而对应的实验条件也应从短距离运移扩展到长距离运移、从一维实验扩展到多维实验。由于模型之间差异较大,每种模型的参数拟合方法也不尽相同,在泡沫驱油的过程中,同样需要基于实际研究数据,建立合适的假设条件,结合泡沫流动机制,充分考虑原油对于泡沫稳定性及流动性的影响等多种主控因素。

2 泡沫驱在油气田开发中的应用

2.1 泡沫注入方式

在现场应用中,泡沫的注入方式与实验室相比更加多样化,可以归结为5种类型^[38]:

(1)预成型泡沫注入。该方法是在多孔介质外部形成泡沫,通过在地表的泡沫发生器中或者在泡沫液注入管柱向下流动时产生,此种方式的特点是注入泡沫的质量和强度方便调控。

(2)共注入泡沫。该方法是通过将气体和表面活性剂混注,在距离注入井较近的地层内形成泡沫。这种方法也被称为泡沫原位生成法,该方法需要两根注入管柱同时工作,一根用于气相注入,一根用于表面活性剂溶液的注入^[39]。

(3)表面活性剂交替气体(SAG)的泡沫注入。在该方法中,气体和表面活性剂连续注入,在多孔介质内部形成泡沫,在SAG期间,表面活性剂溶液被气体排动,因此该方法也被称为“排水泡沫”注入法。该方法产生的泡沫不受进入区域的限制,只要气体与已注入的表面活性剂溶液接触,就可以产生泡沫^[40]。

(4)溶解表面活性剂的泡沫注入。研究表明,一些表面活性剂可以溶解在超临界二氧化碳中^[41]。该方法仅需要将超临界二氧化碳注入到储层中,当遇到地层水之后就可以产生泡沫。

(5)分层注入泡沫。在该方法中,气体和表面活性剂溶液同时但不在同一位置注入,常应用于水平井中,且垂直井中也可实施。一般是从下部水平井注入气体,从上部水平井注入表面活性剂,水气由于密度差会出现重力分异,气体和表面活性剂在上下水平井之间的地层区域接触并产生泡沫^[42]。

起泡方式直接影响着最大起泡能力,多种影响因素导致起泡体积和泡沫稳定性受到一定限制。在油气田开发过程中,现场注入工艺研究较少且室内研究工作质量不高,导致泡沫注入方式及参数选择不能为现场试验提供可靠的基础。目前常用的起泡剂与气体交替注入方式并不是泡沫生成的最佳工艺,具体的泡沫注入方式应根据油藏实际类型进行灵活选择。

2.2 矿场泡沫驱类型

2.2.1 空气泡沫驱

空气泡沫驱以空气作为驱油剂,在注入过程中补充地层能量,以泡沫作为调剖剂,调整吸水剖面,有效控制流度,扩大波及体积,同时其液相中的表面活性剂可降低油水界面张力,改善岩石表面润湿性,提高洗油效率。空气泡沫驱不仅综合了空气驱和泡沫驱的优点,还具备低温氧化驱油机制,间接实现烟道气驱以及热效应采油^[43-44]。

目前,空气泡沫驱在中高渗油田的实施技术已相对成熟,国内多个油田先后实施了空气泡沫驱,取得了较好的效果。中原油田针对胡12区块开展了相关研究,进行了空气泡沫室内模拟驱替试验,分析了空气泡沫的提高采收率机制以及其与原油之间的氧化特性,定量评价了空气泡沫对非均质严重地层的适用性^[45]。空气泡沫驱在特低渗低温油藏中的应用较少,延长甘谷驿油田具有“低孔、低渗、低产能”的特征,其唐80区块于2008年1月开展注空气泡沫驱油先导试验研究,截至2012年11月底累积注入泡沫液8283 m³,注空气泡沫至今,受益油井累积增产2107.01 t,控水增油效果明显^[46-47]。处于鄂尔多斯盆地的试验区,主力油层以长6为主,属于浅层低渗油藏,2013年10月开始对某井组进行空气泡沫驱现场试验,至2014年5月综合含水率由98%下降至54%,累积增油164.7 m³,这表明空气泡沫驱在低渗透油藏中同样具有良好的应用性^[48]。

位于吐哈盆地的鲁克沁油田非均质性严重,注水效果差,结合玉东区块现状开展了室内空气泡沫驱物理和数值模拟研究,矿场试注试验的成功,为空气泡沫驱在超深层稠油油藏的应用提供了技术支撑^[49]。对于海上油田空气泡沫驱,海水、空气泡沫等对管线、光缆、设备、井筒的腐蚀一直是制约实施的安全隐患^[50]。在空气泡沫驱各个生产环节,由于空气中氧气的存在会诱发很多风险因素,例如管道的爆裂、泄露以及腐蚀等^[51-52]。针对空气泡沫驱存在的安全性问题,延长油田开展了相关的腐蚀防护研究^[53]。蒋海岩等^[54]针对空气泡沫驱油的各个环节进行了风险性分析,建立了双层风险评估指标体系以及评估模型,可以基于此采取相应的安全技术措施。

2.2.2 氮气泡沫驱

为延缓注气前缘突破、提高气驱开发经济性,氮气泡沫驱进一步发展了表面活性剂交替气体技术,兼具氮气驱和表面活性剂驱的特性,具备独特的流变性和封堵性^[55-56]。氮气泡沫驱的机制主要有:向地层注入氮气可以其补充能量并维持储层压力,大量的氮气具有一定的弹性膨胀能,可以在气举、助排等方面发挥良好作用;泡沫具有一定的选择性封堵作用,能够对含水高渗层进行有效封堵,在中、低渗透带易形成气、水驱双重作用,有利于残余油的运移;泡沫破灭后,氮气与地层水、原油之间易发生相互作用形成乳状液,从而使原油降黏,调整水油流度比,驱替效率增加;由于氮气与储层流体存在密度差异,会出现流体间的重力分异现象,容易形成非混相驱,扩大纵向波及体积,增加可动油饱和度,进而提高采收率^[57]。

氮气泡沫相对空气泡沫来说含氧量极少,在很大程度上缓解了空气泡沫驱过程中的氧化腐蚀问题,然而在泡沫驱油过程中同样会出现气窜现象^[58]。有学者结合室内氮气泡沫驱替模拟试验提出产气率上升指数的概念,确定出临界气窜点,对现场试验具有一定的指导意义^[59]。近年来,由于氮气来源广泛且制备方法趋于成熟,氮气泡沫驱在国内多个油田如吐哈油田鲁克沁区块^[60]、吉林大老爷府油田及新木油田^[61-62]等进行成功应用并取得了良好的效果。氮气泡沫驱下步的主要应用方向为氮气泡沫辅助蒸汽驱和氮气强化泡沫驱。新疆克拉玛依油田九区于2003年进行稠油蒸汽吞吐开采,2011年转蒸汽驱,2012年选取8个井组进行蒸汽泡沫驱现场试验,至2013年累积增油970.8 t,吸汽剖面得

到明显改善^[63]。河南下二门油田自投入开发以来,调剖效果随着调剖轮次的增多越来越不明显,采用氮气强化泡沫深部调驱进行先导试验,5个月后试验区含水率下降,累积增油922.1 t,肯定了氮气强化泡沫驱的深部调驱作用^[64]。中石化河南油田分公司勘探开发研究院建立了适合氮气泡沫驱油藏的筛选标准,对双河油田聚合物驱后转氮气强化泡沫驱的可行性进行了预测^[65]。由此可见,针对氮气泡沫驱而言,制定一套行之有效的油藏选用标准具有重要的意义。

2.2.3 其他泡沫驱

国内油田在泡沫驱开发过程中对空气泡沫和氮气泡沫的选用较多,而其他类型的泡沫驱虽然应用相对较少,但也表现出一定的应用潜力。

二氧化碳泡沫驱油的机制和氮气泡沫驱具有相似之处,不同点在于二氧化碳泡沫破灭后,其气相在一定条件下能够与原油多次接触达到混相,降低原油黏度,并且能够萃取出轻质组分原油,在提高采收率的基础上贯彻了碳捕集、利用与封存(CCUS)的理念。国内二氧化碳气源较少,因此需要根据现场条件对二氧化碳泡沫驱的实际应用进行综合决策。

天然气泡沫驱是以天然气作为气相分散在表面活性剂中进行驱替,其除了具备普通泡沫驱的机制外,还因天然气在原油中良好的溶解性使得原油黏度降幅明显,然而由于天然气在注入的过程中存在问题较多,对设备 and 安全性要求较高,因此天然气泡沫驱在室内实验和矿场应用中较少。

稠油油藏常用开采方式为蒸汽吞吐、蒸汽驱以及蒸汽辅助重力泄油(SAGD)等,而这些热力开采过程存在着蒸汽窜流的问题,对生产效果和经济效益产生不利影响。近年来,蒸汽驱堵窜技术一直是开发和应用的热点,采用泡沫流体在蒸汽驱过程中调整油层吸汽剖面,扩大蒸汽波及系数,对解决气窜和蒸汽超覆问题具有显著的效果,这促进了蒸汽泡沫驱的发展^[66-67]。

随着油藏开发难度的增大,储层物性相对来说逐渐变差,基于此,强化泡沫驱技术应运而生,该技术是在泡沫体系中加入聚合物,通过聚合物来增强泡沫体系的表现黏度、液膜的厚度及弹性,从而提高了泡沫的起泡能力,延长了泡沫的析液半衰期,改善了普通泡沫稳定性差的缺点。同时,聚合物增强了泡沫体系的阻力系数和界面活性,降低了地层中发泡剂的吸附损失^[68-70]。

在泡沫驱的应用过程中,泡沫剂的选取对于开

采效果至关重要。由于地层流体溶解性存在差异,使得泡沫体系的筛选条件不同,且气体成分对泡沫稳定性的影响机制不同。相对来说,氮气泡沫的稳定性较好,二氧化碳泡沫的稳定性较差且几乎不受表面活性剂浓度影响,空气泡沫稳定性介于二者之间,其主要原因是二氧化碳和氧气的扩散速度大于氮气,导致液膜强度变差使泡沫破灭速度加快。制约当前蒸汽泡沫驱发展的主要因素是抗温抗盐泡沫剂的研发^[71],针对此问题,国内外学者开展了广泛研究,将具有抗温性能的阴离子表面活性剂磺酸盐和具有抗盐能力的非离子表面活性剂醇醚类基团结合在一起,实现抗温抗盐的目的^[72-73]。另外一个关键问题是在蒸汽驱替过程中,随着蒸汽潜热的释放,其汽相会凝析冷却,导致泡沫破灭消失,研究表明,伴随非凝析气的注入会降低蒸汽的冷凝并有助于泡沫保持形态^[74]。在一些非均质性严重的、高温高盐的稠油油藏中,选用性能卓越、价格低廉的泡沫剂,采用蒸汽泡沫驱的方式能够显著降低汽窜问题。

3 问题与展望

(1)泡沫驱机制相关的研究仍然不足,泡沫在实验多孔介质中的渗流规律与实际地层状态存在一定的差距,关于泡沫的产生、运移、滞留、聚并、破灭等研究依旧停留在实验层面,如何使得泡沫在长距离运移破灭后重新生成泡沫将会是下一步研究的难点。泡沫具有良好的调剖能力,然而由于起泡剂和原油间的界面张力相对较高导致其在洗油能力上表现较差,因此需要在发展常规泡沫驱的基础上强化其洗油效率,从而进一步提高泡沫驱采收率。

(2)泡沫室内评价良好,然而在高温、高矿化度的油藏条件下稳定性差,会减少施工作业的有效期以及增产效果,同时存在地面注气压力过大、地下泡沫注入量偏低等问题。因此应该结合现场,加大技术研发的力度,在研制出性能优异的新型发泡剂和稳泡剂的同时优化泡沫注入工艺,进一步控制泡沫在非常规油藏条件下的生成、稳定、渗流、驱油等问题。

(3)泡沫驱的数值模拟技术有待提高,泡沫的评价、运移等都缺少对泡沫结构的定量化描述,即使在总量平衡模型中,也是以经验参数替代。此外,泡沫的模拟手段虽已成熟,但仍限制在开放空间,对于狭窄空间或多孔介质中的复杂结构,缺少有效的直观模拟结果。泡沫渗流模型的研究较为广泛,但结合泡沫应用,特别是井筒、地层耦合模型还有待完

善。

(4)在泡沫矿场应用方面,寻找廉价气源是解决开发经济性问题的关键,泡沫基本用于调节气窜,然而特低渗透油藏并不适合开展泡沫技术。国内各大油田一般应用较广泛的为空气泡沫驱和氮气泡沫驱,然而空气泡沫驱过程中由于氧的存在易引起氧化腐蚀等问题;近年来二氧化碳泡沫驱技术发展迅速,但由于国内二氧化碳气源较少,其在油田的应用受到了制约;天然气泡沫驱提高采收率效果较好,但存在着安全可控性差、成本高等问题,在油田的应用也较少;在一些进行热采的稠油油藏中,作为辅助作用的蒸汽泡沫驱应用较多;而针对地层条件较为苛刻以及海上的一些油藏,强化泡沫驱是主要的应用措施。

参考文献:

- [1] 王其伟. 泡沫驱油发展现状及前景展望[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(2): 94-97.
WANG Qiwei. Present situation and development prospect of foam flooding [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(2): 94-97.
- [2] 张更, 陈雨飞, 郑浩, 等. 泡沫驱油机理研究综述[J]. 当代化工研究, 2017(11): 6-7.
ZHANG Geng, CHEN Yufei, ZHENG Hao, et al. A research overview on the mechanism of foam oil displacement mechanism [J]. Modern Chemical Research, 2017(11): 6-7.
- [3] WEI P, PU W, SUN L, et al. Research on nitrogen foam for enhancing oil recovery in harsh reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 157: 27-38.
- [4] CHEN Y, ELHAG A S, REDDY P P, et al. Phase behavior and interfacial properties of a switchable ethoxylated amine surfactant at high temperature and effects on CO₂-in-water foams [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2016, 470: 80-91.
- [5] 李宾飞. 氮气泡沫调驱技术及其适应性研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2007.
LI Binfei. Study on profile control and flooding technology of nitrogen foam and its applicability [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2007.
- [6] WANG C, LI H Z. Foam stability of solvent/surfactant/heavy-oil system under reservoir conditions [R]. SPE 172888, 2014.
- [7] PRUD'HOMME R K, KHAN S A. Experimental results on foam rheology [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1996.
- [8] FARZANEH S A, SOHRABI M. Experimental investiga-

- tion of CO₂-foam stability improvement by alkaline in the presence of crude oil[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015,94:375-389.
- [9] LÜ W, LI Y, LI Y, et al. Ultra-stable aqueous foam stabilized by water-soluble alkyl acrylate cross polymer[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2014,457:189-195.
- [10] XU X, SAEEDI A, LIU K. Experimental study on a novel foaming formula for CO₂ foam flooding[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2017, 139 (2): 022902.
- [11] HEZAVE A Z, DOROSTKAR S, AYATOLLAHI S, et al. Effect of different families (imidazolium and pyridinium) of ionic liquids-based surfactants on interfacial tension of water/crude oil system[J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2013,360:139-145.
- [12] CLARK J A, SANTISO E E. Carbon sequestration through CO₂ foam-enhanced oil recovery: a green chemistry perspective[J]. *Engineering*, 2018,4(3):336-342.
- [13] HOROZOV T S. Foams and foam films stabilised by solid particles[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2008,13(3):134-140.
- [14] KIM I, WORTHEN A J, JOHNSTON K P, et al. Size-dependent properties of silica nanoparticles for pickering stabilization of emulsions and foams[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2016,18(4):82.
- [15] ALYOUSEF Z, ALMOBARKY M, SCHECHTER D. Enhancing the stability of foam by the use of nanoparticles [J]. *Energy & Fuels*, 2017,31(10):10620-10627.
- [16] SUN Q, LI Z, LI S, et al. Utilization of surfactant-stabilized foam for enhanced oil recovery by adding nanoparticles[J]. *Energy & Fuels*, 2014,28(4):2384-2394.
- [17] LIU Q, ZHANG S, SUN D, et al. Foams stabilized by Laponite nanoparticles and alkylammonium bromides with different alkyl chain lengths[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2010,355(1/2/3):151-157.
- [18] FARHADI H, RIAHI S, AYATOLLAHI S, et al. Experimental study of nanoparticle-surfactant-stabilized CO₂ foam: stability and mobility control[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2016,111:449-460.
- [19] MAESTRO A, RIO E, DRENCKHAN W, et al. Foams stabilized by mixtures of nanoparticles and oppositely charged surfactants: relationship between bubble shrinkage and foam coarsening [J]. *Soft Matter*, 2014, 10 (36):6975-6983.
- [20] ZHANG S, SUN D, DONG X, et al. Aqueous foams stabilized with particles and nonionic surfactants [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2008,324(1/2/3):1-8.
- [21] WORTHEN A J, BRYANT S L, HUH C, et al. Carbon dioxide-in-water foams stabilized with nanoparticles and surfactant acting in synergy[J]. *AIChE Journal*, 2013, 59(9):3490-3501.
- [22] BINKS B P, CAMPBELL S, MASHINCHI S, et al. Dispersion behavior and aqueous foams in mixtures of a vesicle-forming surfactant and edible nanoparticles[J]. *Langmuir*, 2015,31(10):2967-2978.
- [23] LÜ Q, LI Z, LI B, et al. Synergistic mechanism of particulate matter (PM) from coal combustion and saponin from camellia seed pomace in stabilizing CO₂ foam[J]. *Energy & Fuels*, 2018,32(3):3733-3742.
- [24] YANG W, WANG T, FAN Z. Highly stable foam stabilized by alumina nanoparticles for EOR: effects of sodium cumenesulfonate and electrolyte concentrations [J]. *Energy & Fuels*, 2017,31(9):9016-9025.
- [25] EMRANI A S, NASR-EL-DIN H A. An experimental study of nanoparticle-polymer-stabilized CO₂ foam[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017,524:17-27.
- [26] IKOKU C U, RAMEY H J J. Transient flow of non-Newtonian power-law fluids in porous media[J]. *SPE Journal*, 1978,19(3):164-174. .
- [27] MARFOE C H, KAZEMI H, RAMIREZ W F. Numerical simulation of foam flow in porous media[R]. *SPE* 16709, 1987.
- [28] CHOU S I. Percolation theory of foam in porous media [R]. *SPE* 20239, 1990.
- [29] FALLS A H, HIRASAKI G J, PATZEK T W, et al. Development of a mechanistic foam simulator: the population balance and generation by snap-off[J]. *SPE Reservoir Engineering*, 1988,3(3):884-892.
- [30] FRIEDMANN F, CHEN W H, GAUGLITZ P A. Experimental and simulation study of high-temperature foam displacement in porous media[J]. *SPE Reservoir Engineering*, 1991,6(1):37-45.
- [31] KOVSCEK A R, TADEUSZ W P, RADKE C J. Mechanistic foam flow simulation in heterogeneous and multidimensional porous media[J]. *SPE Journal*, 1997,2(4): 511-526.
- [32] BERTIN H J, QUINTARD M Y, CASTANIER L M. Development of a bubble-population correlation for foam-flow modeling in porous media[J]. *SPE Journal*, 1998,3(4):356-362.
- [33] ROSSEN W R, ZEILINGER S C, SHI J X, et al. Simplified mechanistic simulation of foam processes in por-

- ous media[J]. SPE Journal, 1999,4(3):279-287.
- [34] BALAN H O, BALHOFF M T, NGUYEN Q P, et al. Network modeling of gas trapping and mobility in foam enhanced oil recovery[J]. Energy & Fuels, 2011,25(9):3974-3987.
- [35] SHI J X, ROSSEN W R. Simulation of gravity override in foam processes in porous media[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 1998,1(2):148-154.
- [36] SAYE R I, SETHIAN J A. Multiscale modeling of membrane rearrangement, drainage, and rupture in evolving foams[J]. Science, 2013,340(6133):720-724.
- [37] WANG F, LI Z, CHEN H, et al. Fractal characterization of dynamic structure of foam transport in porous media[J]. Journal of Molecular Liquids, 2017,241:675-683.
- [38] HEMATPUR H, MAHMOOD S M, NASR N H, et al. Foam flow in porous media: concepts, models and challenges[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018,53:163-180.
- [39] TURTA A T, SINGHAL A K. Field foam applications in enhanced oil recovery projects: screening and design aspects[R]. SPE 48895,1998.
- [40] ROSSEN W R, BOEIJJE C S. Fitting foam simulation model parameters for SAG foam applications[R]. SPE 165282,2013.
- [41] LE V Q, NGUYEN Q P, SANDERS A. A novel foam concept with CO₂ dissolved surfactants [R]. SPE 113370,2008.
- [42] STONE H L. A simultaneous water and gas flood design with extraordinary vertical gas sweep[R]. SPE 91724, 2004.
- [43] WATTS B C, HALL T F, PETRI D J. The horse creek air injection project: an overview [R]. SPE 38359, 1997.
- [44] PASCUAL M, CROSTA D, LACENTRE P, et al. Air injection into a mature water flooded light oil reservoir: laboratory and simulation results for Barrancas field, Argentina[R]. SPE 94092,2005.
- [45] 于洪敏,任韶然,左景桀,等. 注空气泡沫低温氧化工艺提高采收率试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(2):94-98.
- YU Hongmin, REN Shaoran, ZUO Jingluan, et al. Experiment of improved oil recovery by air foam injection low temperature oxidation process[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009,33(2):94-98.
- [46] 许金良,邓强,徐敬芳. 甘谷驿采油厂唐80井区空气泡沫驱先导试验研究[J]. 石油化工应用,2013,32(7):30-33.
- XU Jinliang, DENG Qiang, XU Jingfang. Pilot test study on air foam flooding in Tang 80 well area of Ganguyi oil production plant[J]. Petrochemical Industry Application,2013,32(7):30-33.
- [47] 张冠华,马良. 甘谷驿采油厂空气泡沫驱油技术[J]. 辽宁化工,2013(9):1138-1139.
- ZHANG Guanhua, MA Liang. Application of air-foam flooding in Ganguyi oil production plant[J]. Liaoning Chemical Industry, 2013(9):1138-1139.
- [48] 栾春芳. 空气泡沫驱油技术在低渗透油藏中的应用研究[J]. 石油化工高等学校学报,2015,28(3):51-55.
- LUAN Chunfang. Application of air-foam flooding technology in low permeability reservoir[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2015,28(3):51-55.
- [49] 刘露. 普通稠油空气泡沫驱提高采收率技术研究[D]. 成都:成都理工大学,2015.
- LIU Lu. Research to improve heavy oil recovery of air foam flooding [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2015.
- [50] 冯高城,胡云鹏,姚为英,等. 注气驱油技术发展应用及海上油田启示[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2019,41(1):147-155.
- FENG Gaocheng, HU Yunpeng, YAO Weiying, et al. Development and application of gas injection for oil recovery from offshore oilfields[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2019,41(1):147-155.
- [51] ZANGANEH M N, KAM S I, LAFORCE T, et al. The method of characteristics applied to oil displacement by foam[J]. SPE Journal, 2011,16(1):8-23.
- [52] 毛志高,曹瑛,周圣昊,等. 空气泡沫驱腐蚀治理技术研究及应用[J]. 化学工程与装备,2017(1):116-119.
- MAO Zhigao, CAO Ying, ZHOU Shenghao, et al. Air foam flooding corrosion control technology research and application[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2017(1):116-119.
- [53] 张新春,陈微,杨海龙,等. 延长油田空气泡沫驱腐蚀防护研究[J]. 当代化工,2018,47(11):2341-2344,2348.
- ZHANG Xinchun, CHEN Wei, YANG Hailong, et al. Study on corrosion protection of air foam flooding in Yan-chang Oilfield[J]. Contemporary Chemical Industry, 2018,47(11):2341-2344,2348.
- [54] 蒋海岩,廖坤埏,李叔阳,等. 空气泡沫驱矿场试验风险量化评估方法[J]. 数学的实践与认识,2019,49(4):89-98.

- JIANG Haiyan, LIAO Kunmeng, LI Shuyang, et al. Quantitative risk evaluation method for air foam flooding field test [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2019, 49(4): 89-98.
- [55] SALEHI M M, SAFARZADEH M A, SAHRAEI E, et al. Comparison of oil removal in surfactant alternating gas with water alternating gas, water flooding and gas flooding in secondary oil recovery process [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, 120: 86-93.
- [56] 廖辉,孔超杰,邓猛,等. 氮气泡沫驱提高采收率机理及影响因素研究进展 [J]. *当代化工*, 2019, 48(1): 122-126.
- LIAO Hui, KONG Chaojie, DENG Meng, et al. Research progress of influence factors and mechanism of nitrogen foam flooding [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2019, 48(1): 122-126.
- [57] 杨滢. 高温高盐底水油藏氮气泡沫体系控水及机理研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2018.
- YANG Ying. Research water control and mechanism of nitrogen foam system in high temperature and high salinity bottom water reservoir [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2018.
- [58] 郭兰磊. 泡沫体系多流态渗流特征试验 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(3): 126-129.
- GUO Lanlei. Experiment on multiple flow regime characteristics of foam system [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2012, 36(3): 126-129.
- [59] 李兆敏,张习斌,李松岩,等. 氮气泡沫驱气体窜流特征实验研究 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(5): 96-103.
- LI Zhaomin, ZHANG Xibin, LI Songyan, et al. Experimental study on gas channeling problem of N_2 foam flooding [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2016, 40(5): 96-103.
- [60] 闫茜. 鲁克沁区块氮气泡沫驱工艺参数优化研究 [D]. 重庆: 重庆科技学院, 2018.
- YAN Qian. Study on process parameters optimization of nitrogen foam flooding in LKQ block [D]. Chongqing: Chongqing University of Science & Technology, 2018.
- [61] 张晶. 大老爷府油田老 16-2 井组氮气泡沫驱先导试验 [J]. *应用能源技术*, 2018(6): 14-16.
- ZHANG Jing. Pilot test of nitrogen foam flooding in Lao 16-2 well group of Dalaoyefu Oilfield [J]. *Applied Energy Technology*, 2018(6): 14-16.
- [62] 邢帅. 新木油田木 146 区块氮气泡沫驱注入技术研究 [J]. *石油知识*, 2018(4): 40-41.
- XING Shuai. Study on nitrogen foam flooding injection technology in Block 146 of Xinmu Oilfield [J]. *Petroleum Knowledge*, 2018(4): 40-41.
- [63] 向湘兴,陈静,侯军伟,等. 克拉玛依油田稠油油藏氮气泡沫驱应用 [J]. *新疆石油地质*, 2017, 38(1): 76-80.
- XIANG Xiangxing, CHEN Jing, HOU Junwei, et al. Application of nitrogen foam flooding in heavy oil reservoirs in Karamay Oilfield [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2017, 38(1): 76-80.
- [64] 张艳辉,戴彩丽,徐星光,等. 河南油田氮气泡沫调驱技术研究与应用 [J]. *断块油气田*, 2013, 20(1): 129-132.
- ZHANG Yanhui, DAI Caili, XU Xingguang, et al. Research and application on nitrogen foam flooding in Henan Oilfield [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2013, 20(1): 129-132.
- [65] 张伊琳. 聚合物驱后油藏强化泡沫驱参数优化设计 [J]. *石油地质与工程*, 2018, 32(2): 82-85.
- ZHANG Yilin. Optimized design of enhanced foam flooding parameters after polymer flooding [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2018, 32(2): 82-85.
- [66] FARAJZADEH R, ANDRIANOV A, KRASTEV R, et al. Foam-oil interaction in porous media: implications for foam assisted enhanced oil recovery [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2012, 183: 1-13.
- [67] MA K, LOPEZ-SALINAS J L, PUERTO M C, et al. Estimation of parameters for the simulation of foam flow through porous media. part 1: the dry-out effect [J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(5): 2363-2375.
- [68] 曹绪龙,蒋生祥,孙焕泉,等. 阴离子表面活性剂与聚丙烯酰胺间的相互作用 [J]. *应用化学*, 2002(9): 866-869.
- CAO Xulong, JIANG Shengxiang, SUN Huanquan, et al. On the interaction between polyacrylamide and anionic surfactants [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2002(9): 866-869.
- [69] 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 Binfei, LI Zhaomin, LIU Zupeng, 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.
- [70] 王增林,王其伟. 强化泡沫驱油体系性能研究 [J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(3): 49-51.
- WANG Zenglin, WANG Qiwei. Performance of foam in the forced foam flooding system [J]. *Journal of the Uni-*

versity of Petroleum, China (Edition of Natural Science),2004,28(3): 49-51.

[71] 王云龙,赵法军,宋军,等. 用于改善蒸汽驱效果的高温抗盐泡沫剂研究进展[J]. 化学通报,2016,79(1): 23-30.

WANG Yunlong, ZHAO Fajun, SONG Jun, et al. Progress in temperature resistance and salinity tolerance foam agent for improving steam flooding [J]. Chemistry, 2016, 79(1): 23-30.

[72] 宫俊峰,曹嫣嫔,唐培忠,等. 高温复合泡沫体系提高胜利油田稠油热采开发效果[J]. 石油勘探与开发, 2006,33(2): 212-216.

GONG Junfeng, CAO Yanbin, TANG Peizhong, et al. Improving development efficiency of heavy oil in Shengli Oilfield by using high-temperature compounded foaming agent [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006,33(2): 212-216.

[73] 王成文,王瑞和,陈二丁,等. 新型抗高温耐盐起泡剂 AGS 合成与性能研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2008,32(4):55-59.

WANG Chengwen, WANG Ruihe, CHEN Erding, et al. Synthesis and properties of novel alkyl glyceryl ether sulfonate with thermal stability and brine tolerance[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2008,32(4):55-59.

[74] 王壮壮,李兆敏,鹿腾,等. 烟道气对蒸汽腔影响可视化研究及机理分析[J]. 特种油气藏,2019,26(2): 136-140.

WANG Zhuangzhuang, LI Zhaomin, LU Teng, et al. Visualization and mechanism analysis of the flue gas action on steam chamber[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(2): 136-140.

(编辑 李志芬)