

文章编号:1000-4092(2019)02-353-08

氮气泡沫驱油研究进展*

刘 珑,范洪富

(中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083)

摘要:氮气泡沫在油藏驱油过程中表现良好,深入研究氮气泡沫驱油技术对我国油田的开采具有重要的意义。介绍了国内外氮气泡沫驱油的研究现状,分析了氮气泡沫的稳定性、流变性以及在多孔介质中的渗流特性,总结了氮气泡沫驱油机理和注入方式,指出了氮气泡沫驱油技术发展存在的问题。根据现有研究结果预测了氮气泡沫驱油技术可能的研究方向,主要体现在氮气微泡沫制备技术、氮气泡沫辅助蒸汽开发技术和氮气泡沫数值模拟技术方面。参61

关键词:氮气泡沫;稳定性;驱油机理;综述

中图分类号:TE357 **文献标识码:**A **DOI:**10.19346/j.cnki.1000-4092.2019.02.031

氮气泡沫驱在油藏驱油过程中表现出良好的特性,因此在改善我国油田中后期严峻的开采状况方面具有很大的潜力,是在水驱和聚合物驱后提升原油采收率的重要方式之一^[1]。本文在氮气泡沫性质研究的基础上,阐述了氮气泡沫驱在油藏中的驱油机理,指出氮气泡沫驱仍存在泡沫稳定性较差、现场应用标准体系尚未成型等问题,预测未来氮气微泡沫技术、氮气泡沫辅助蒸汽开采技术和氮气泡沫驱数值模拟技术很可能成为研究热点,并根据前人的研究成果提出了一些建议。

1 氮气泡沫驱油研究现状

氮气泡沫驱油技术是以氮气驱为基础、驱油机理多样化的三次采油技术,借助其独特的性质和驱油机理在油气田开采过程中显现出较大的优势,受到国内外的普遍关注。

1.1 氮气泡沫驱国外研究现状

国外从1956年就开始了关于泡沫驱油技术的研究,并不断取得突破。1958年Bond和Holbrook将气体泡沫引入石油开发领域,以缓解气体注入的

限制和提高注入气体的流动性^[2];1961年,Fried等^[3]首次进行了泡沫提高驱油效率的实验,发现注入泡沫技术能驱替经过水驱、气驱或表面活性剂驱后在未固结砂中大部分的残余油,有效改善储层的流动分布和流体传导性;1964~1967年美国联合石油公司在伊利诺斯州Siggins油田进行泡沫试验,水油比由15%降至12%,注入井吸水剖面得到改善^[4];1969年,Raza^[5]对影响多孔介质中泡沫产生、扩散、质量和性质的因素进行了实验研究,发现泡沫的质量主要决定于起泡剂的种类、起泡剂溶液的浓度、多孔介质的物理性质、压差大小以及流体的组成和饱和度等;1989年,Huh和Handy^[6]在Berea砂岩中采用稳态/非稳态方法测量了起泡剂溶液和氮气的相对渗透率,发现稳态流动和非稳态流动之间存在较大的差异;1994年,英国和挪威在北海油田的3个试验区进行了长达4年的泡沫试验,发现表面活性剂吸附程度、泡沫耐油性等对泡沫的成功处理有较大的影响^[7];2014年,Singh和Mohanty^[8]采取共同注入的方式将发泡分散体和氮气注入Berea砂岩,形成了纳米颗粒-表面活性剂泡沫。

* 收稿日期:2018-08-01;修回日期:2018-11-12。

作者简介:刘珑(1995-),男,中国地质大学(北京)石油与天然气工程专业在读硕士研究生(2017-),E-mail:1872914175@qq.com。范洪富(1965-),教授,博士生导师,本文通讯联系人,中国地质大学(北京)石油工程专业博士(2002),通讯地址:100083北京市海淀区学院路029号中国地质大学(北京)能源学院,E-mail:fanhongfu@cugb.edu.cn。

1.2 氮气泡沫驱国内研究现状

国内对于氮气泡沫驱的研究起步较晚,在研究水平上仍滞后于国际水平。但近年来在大庆油田、辽河油田、新疆油田以及渤海湾油田等进行了大量的研究和现场应用,收效甚佳。如1996年辽河油田金90区块开启氮气泡沫驱油试验,2006年该试验区块的波及效率得到了有效提高,石油产量增加,储层压力增大,取得了良好的效果^[9];2003~2005年,根据胜利油田油藏条件采用数值模拟技术研究了原油黏度和地层韵律对氮气泡沫驱油效率的影响,并选取四个区块进行现场试验,截至2008年,采用氮气泡沫驱油技术开采的油井超过90%的原油采收率提高^[10];2010~2011年基于渤海湾SZ油田条件的油藏数值模拟,评估了不同起泡剂和稳泡剂的表现、不同注入方法/气液比的泡沫体系的封堵能力,氮气泡沫现场试验后,SZ油田试验区原油产量上升、含水率下降^[11];2013年在渤海湾海上油田进行氮气泡沫驱油现场试验,选取的两个井组的13口油井中有12口井效果良好,平均含水率下降6.3%,累积油量在8个月内达到20756 m³^[12]。室内研究和现场试验结果表明氮气泡沫驱在改善油藏开发状况方面具有很大的潜力。

2 氮气泡沫的性质

氮气泡沫是利用氮气、起泡剂和稳泡剂等混合产生的连续不稳定体系,对其性质的研究主要集中在两个方面:氮气自身的性质和泡沫体系的稳定性。

2.1 氮气的性质

氮气作为一种非凝析气体,具有相对于其他气体较为特殊的性质特征,如压缩系数高、密度可调、携砂能力强、低滤失以及高黏度^[13],并且来源广,不易与储层岩石流体等发生化学反应,故对地层的伤害较小。氮气还具有良好的膨胀性和压缩性,通过向地层中注入氮气泡沫可以增大地层压力,补充地层弹性能量;氮气由于压缩性好可以进入小孔道中,从而扩大了波及范围,改变了油藏相渗特征,提高了油藏采收率^[14]。

2.2 泡沫体系的稳定性

泡沫作为一种不稳定体系,其自由能自发减少的趋势使得泡沫逐渐破灭直至气液分离。表面活

性剂可使泡沫具有暂时的稳定性^[15]。泡沫的稳定性对其在油藏中的作用时间、驱替范围等具有重要的影响。影响泡沫体系稳定性的因素主要包括:(1)泡沫的气泡半径、表面黏度以及气液比;(2)起泡剂的种类、浓度;(3)油藏含油饱和度等。

2.2.1 泡沫气泡半径、表面黏度和气液比的影响

泡沫直径越小,气液相压力降越大。由Laplace公式^[16]可知大气泡的气压小于小气泡,气泡越大,上升速度越大,气泡间排列更加紧密,存活时间越短,泡沫的稳定性越差;气泡直径越小,界面 ζ 电位越高,形成的泡沫稳定性越高。

随着气液比的增大,泡沫的含气量增加,表观黏度随之增大;当气液比大到一定程度时,泡沫质量下降,容易发生破裂,产生的气体较多,容易发生气窜^[17]。向湘兴等^[18]提出表面活性分子在其表面单分子层内的亲水基间相互作用及水化作用是泡沫表面黏度产生的原因,并发现泡沫表面黏度越高,泡沫存活时间越长。合理的气液比是保持泡沫稳定流动和良好黏度的重要保障。

2.2.2 起泡剂浓度、种类的影响

通过合理调节起泡剂的浓度不仅可以改善其起泡性能,还可以延长泡沫的半析水期,有效提高泡沫的稳定性。在其他条件不变的情况下,泡沫体系的半析水期和起泡体积随着模拟水矿化度的升高而显著降低^[19],由此反映出地层水矿化度对泡沫体系稳定性的影响较大。

起泡剂种类是影响泡沫稳定性的根本因素。不同种类起泡剂的分子结构不同,其在液膜中的排列以及与水的相互作用不同,液膜的厚度、弹性以及溶液的黏度不同导致泡沫携液、排液过程的差异,进而影响泡沫的稳定性^[20]。

2.2.3 油藏含油饱和度的影响

由于泡沫具有“遇油消泡”的特性,当泡沫遇到原油时泡沫破裂,起泡剂溶入原油中,从而降低原油的黏度,有利于油藏驱油效果的改善。李兆敏等^[21]提出泡沫在遇到原油时会将其乳化小油珠,小油珠在界面张力等作用下进入泡沫,并对泡沫液膜完整性造成不同程度的影响,加速泡沫破灭速度,进而降低了泡沫的稳定性。周玉萍^[22]提出泡沫遇油消泡或耐油性较差的根本原因:泡沫注入油层后,油水界面张力要比水气界面张力小很多,根据

界面能趋向于减小的规律,在三相界面共存时表面活性剂会从气液界面转移到油水界面,气液界面张力增大,泡沫稳定性遭到破坏。

2.3 氮气泡沫的流变性

泡沫的流变性对泡沫形成过程具有重要的影响,因此研究泡沫的流变性有利于改善泡沫驱油的过程。由于泡沫的黏度主要取决于泡沫的机械性能(强度和弹性),而气体本身黏度又很小,因此起泡气体(空气、氮气、天然气和二氧化碳等)种类对泡沫流变性的影响可以忽略不计^[23]。

李春洲等^[24]用氮气作为起泡气体与分别含有不同起泡剂(十二烷基苯磺酸钠、十二烷基磺酸钠、十二烷基硫酸钠)的水溶液混合,研究了影响泡沫流变性的因素。(1)起泡沫液类型:不同的起泡沫液黏度不同,使得其产生的泡沫的液膜机械性能产生差异,因而不同起泡剂所产生的泡沫的流变性也不同。(2)起泡沫剂浓度:泡沫的表观黏度随着起泡沫剂浓度的增加而增大,当起泡沫剂加量大于1%后,泡沫的表观黏度趋于稳定。(3)泡沫质量(气含率):常温下,泡沫表观黏度随着泡沫质量的增大而增大,但增幅较小,当泡沫质量(泡沫中气体体积与泡沫总体积的比值)超过70%后,泡沫表观黏度增幅变大。(4)温度:当泡沫质量较低时,随着温度上升,气泡体积膨胀,液体黏度降低,泡沫表观黏度随之增大;当泡沫质量较高时,泡沫液膜较薄,液体蒸发作用加强,气泡强度及弹性减弱,表观黏度减小。

2.4 氮气泡沫在多孔介质中的渗流特性

泡沫在多孔介质中产生的机理主要有:液膜滞留、气泡截断和液膜分割,其中气泡截断是主要的机理。当气体流速超过临界流速时,在截断和液膜分割机理作用下生成流动液膜;当气体流速低于临界流速时,在液膜滞留机理作用下形成静止泡沫^[25]。泡沫在多孔介质中的生成具有周期性,每个周期包括生成封堵、开始运移、稳定运移和结束,同时需要一个最小的压力梯度(临界压力梯度)或气体速度(临界气体速度)^[26]。

泡沫在多孔介质中渗流时不断经历破灭和再生过程,通常情况下并不是以连续相的形式通过介质孔隙,泡沫的液相和气相分别以不同的速率在孔隙介质中运移^[27]。泡沫在多孔介质的流动过程中,其气相和液相与岩石孔隙结构的相互作用过程存

在一定的差异性,因此需要分别研究泡沫的气相和液相在孔隙结构中的作用机理。气相包括流动泡沫和捕集气体两部分,捕集气体能堵塞大孔道,因此气体有效渗透率降低;流动泡沫可以在小孔隙中流动,但由于液膜的存在增大了流动阻力;而液相在小孔隙中呈液膜状态附着于岩石表面,并以连续状态占据了小孔隙^[28]。

3 氮气泡沫驱油机理及注入方式

3.1 氮气泡沫驱油机理

氮气泡沫在油藏开采过程中的驱油机理主要包括选择性封堵机理、气液重力分异作用机理以及表面活性作用机理。

3.1.1 选择性封堵机理

氮气泡沫的选择性封堵机理可以分为两种作用机制。(1)堵水不堵油:由于泡沫具有“遇水起泡,遇油消泡”的特性,遇水时会产生更多的泡沫阻隔水的流动,而遇油时会溶入其中,使得原油体积增大,黏度降低,流动性增强,从而提高驱油效率;(2)堵高不堵低:由于高渗透层相对于低渗透层的含水率较大、含油饱和度较小,因而氮气泡沫在高渗透层所形成的封堵能力要比在低渗透层大得多,使得后续注入流体能向低渗透区域流去。

Liu等^[29]在泡沫驱油实验中发现氮气泡沫具有较高的封堵能力和驱油效率,在用于目标稠油油藏的开采过程中,氮气泡沫注入由于封堵能力较强可减少底水锥进现象的产生,并能在一定程度上缓解低渗透层非均质性严重的问题,有效提高原油采收率。李文静等^[30]提出氮气泡沫具有调整分流的作用,可改善水驱波及的状况,具有“分级堵调、逐级启动”的特性;由于泡沫流体具有剪切变稀性,其在孔隙尺寸较小的低渗透油层中的渗流流速更大,视黏度降低,封堵能力减弱,因而氮气泡沫更适合封堵高渗透层。韩红旭等^[31]发现泡沫流体在储层移动的过程中会产生贾敏效应,气泡在孔隙中发生膨胀使得液流的阻力迅速上升,提高了对高渗透层的封堵效果;并通过实验证明泡沫对高渗岩心的分流效果明显好于低渗岩心;泡沫堵水不堵油的特点使其能更好的应用于封堵高渗层出水层位或水平井段。

3.1.2 气液重力分异作用机理

氮气泡沫在储层流动的过程中,泡沫中的液体

在重力的作用下逐渐向下流动,使得泡沫液膜逐渐变薄,最终导致泡沫破裂,发生气液分离。气液重力分异作用会极大地影响泡沫在储层内部的运移过程及封堵效果^[32]。

从破裂的泡沫中分离出的气体会从孔道底部上升到顶部形成气顶,给油藏增加了气驱的能量,由于气体半径较小,能进入狭窄的喉道或者盲道中,从而将原注入流体无法驱替到的剩余油驱替出来^[33];并且从破灭的泡沫中分离出的氮气有利于保持地层压力,在一定程度上增加地层的弹性势能,其能量释放可起到良好的气举、助排作用^[34]。

3.1.3 表面活性作用机理

氮气泡沫驱替液中含有很多表面活性剂分子,由吉布斯原理可知整个泡沫体系会呈现出较低的表面性能状态,即较低的界面张力能保持泡沫的稳定性^[35];起泡剂作为一种表面活性剂具有较高的表面活性,使得其所产生的泡沫在实际驱油过程中具有降低油水界面张力、乳化稠油和改变油藏润湿性的特性。

3.2 氮气泡沫注入方式

目前泡沫注入开发主要包括交替注入、共同注入和直接注入3种方式,在选择氮气泡沫驱进行油藏开采时,应针对不同的开发状况,分析不同泡沫注入方式对泡沫封堵性、稳定性的影响,选择合适的注入方式,充分发挥氮气泡沫优越的驱油特性,提高油藏原油采收率。

杨浩^[36]提出对泡沫注入方式进行优选可以使注入的起泡剂溶液和气体形成均匀的泡沫体系,充分发挥泡沫的封堵作用;目前注入流体封堵实验仍存在注入流体段塞过大、表面活性剂易被吸附等问题。Hou等^[37]针对大庆油田非均质性严重、残余油分散程度较高的储层进行泡沫驱试验,对比了气体-溶液共同注入、气体-溶液交替注入和泡沫溶液直接注入3种方式,发现泡沫直接注入是最有效的注入方式,而气体-溶液交替注入方式效果最差。

4 氮气泡沫驱存在的问题

4.1 氮气泡沫稳定性较差

氮气泡沫虽然具有较好的驱油特性,但是泡沫的体积较大、结构不够稳定,其含有的表面活性剂成分易被储层岩石矿物吸附,导致其稳定性较低。

而稳定性会影响其在油藏中的存活时间、作用面积以及是否会形成气窜等,因此需要从技术层面提高氮气泡沫的稳定性,进而优化其驱油性质。

国内关于泡沫的研究较多,但实验结果不尽如人意,这可能和国内泡沫驱油技术研究手段落后、泡沫流动特性理论尚未成型以及复合泡沫体系仍需改进等因素有关^[38]。国外针对提高泡沫稳定性的研究取得了一些进展,其中主要包括微泡沫和纳米颗粒稳定泡沫的研究。研究发现微泡沫直径较小,稳定性较高,在液体中上升速度较慢,液膜强度较高,存活时间较长,作用效果较好。而纳米颗粒由于在泡沫气液边界和Plateau边界的不可逆吸附和累积过程,所形成的纳米颗粒稳定泡沫在储层条件下能保持较高的稳定性,并且纳米颗粒在移动过程中不易被储层岩石和黏土矿物吸附,因而不易造成孔隙喉道堵塞,具有优异的特性。但由于纳米颗粒对人体健康和环境影响的不确定性,纳米颗粒稳定泡沫在矿场试验和油田应用方面受到了限制^[39]。因此在提高氮气泡沫的稳定性和增大其应用范围方面,目前微泡沫的研究价值大于纳米颗粒稳定泡沫。

4.2 氮气泡沫驱现场应用标准缺乏

泡沫驱油技术在实际矿场试验过程中没有形成系统有效的现场应用标准体系,而不同的生产参数对泡沫驱油效果具有很大的影响,如注气速度、注入方式、段塞大小以及表面活性剂浓度等都会对泡沫的质量和数量产生不同的影响,进而导致驱油效果的差异^[40],影响泡沫驱油的推广和应用,因此有必要加强关于泡沫驱现场应用标准的研究力度。

我国的泡沫驱油技术尚未成熟,需要对气体-泡沫注入方式、注入时机以及起泡剂和稳泡剂的配方等参数进行更深层次的研究,综合考虑不同区块的实际开发状况,优化注入参数,选择合适的开发方式,达到室内研究和现场应用技术相结合的目的^[41]。泡沫驱在应用过程中,泡沫的稳定性、泡沫驱尤其是泡沫复合驱的乳化问题以及泡沫管线设备的腐蚀等问题都会严重影响其在油藏的驱油效果,因此很有必要建立一套适用度高的泡沫驱现场应用标准。尽管目前泡沫驱现场应用效果方面有待提高,但室内研究以及现场应用都充分表明泡沫驱在非常规油藏中能很好的改善油藏渗透性、提高

油藏采出程度,是一种继聚合物驱后很有潜力的三次采油技术^[42]。

4.3 氮气泡沫驱环境污染问题

氮气泡沫驱作为一种具有高效驱油特性的三次采油技术,在给油田带来可观的经济效益的同时,也带来了一定程度上的环境问题。对于泡沫驱提高原油采收率的方法研究相对较多,但关于泡沫体系和环境之间的相互作用、泡沫驱产出液后续处理技术的研究较少,三次采油污水的处理已经成为油田采油污水处理的难点及研究热点^[43]。

任广萌等^[44]总结出三次采油污水具有如下特点:(1)组成中除含有石油烃类、固体颗粒、无机盐、细菌等物质之外,还含有残余的聚合物;(2)污水黏度大;(3)油滴初始粒径小;(4)乳化程度高。油田当前采用的处理工艺已经无法满足要求,出现设备处理能力低、水质不合格及沉降时间长等问题。因此,对氮气泡沫驱油环境污染处理技术的研究具有重要的意义。

5 氮气泡沫驱研究方向

5.1 氮气微泡沫

微泡沫又称为胶质气体泡沫,是在高速搅拌速率(大于5000 r/min)下对含表面活性剂水溶液进行搅拌生成直径较小(10~100 μm)的微细气泡^[45]。与普通泡沫相比,微泡沫的特点主要有气泡微细,比表面积大,含气率高,具有较好的动力稳定性、聚结稳定性以及和水相似的黏度、流动性等^[46]。由前文泡沫稳定性影响因素分析可知,微泡沫相对于普通泡沫具有更高的稳定性,其在油藏驱油过程中可以表现出更大的优越性,具有重要的研究意义。目前制备微泡沫的主要方法为:高速搅拌法、加压溶气法、引气法、电解法以及超声空化法等。

高速搅拌法是最为常见的制备微泡沫的方法,通过将起泡剂置于搅拌杯中,然后在高速搅拌(搅拌速率大于5000 r/min)下将空气包裹起来产生微泡沫,通过控制搅拌速率、起泡剂浓度、稳泡剂浓度和地层水矿化度来调节微泡沫大小和粒径分布。该方法要求起泡剂中必须同时含有起泡性能突出的表面活性剂和黄原胶,使得微泡沫具有胶体性质易于流动^[47]。房炎伟等^[48]用高速搅拌法制得微泡沫体系,发现微泡沫在20 MPa、120℃的条件下仍然

存在,抗温抗压能力较强;燕永利等^[49]选取不同浓度的油溶性非离子表面活性剂GMS-水混合液用高速搅拌法制备微泡沫,发现微泡沫的流动性好于普通泡沫。

加压溶气法的原理是先使气体在溶液中达到过饱和状态,然后通过减压产生气穴效应,压力降低后水中的分子态空气便以微气泡形式释放出来,产生的气泡大多介于50~80 μm。这种方法存在能耗大、能源利用不合理等问题。引气法的原理是气体在各种剪切力作用下被粉碎成微纳米气泡。该方法主要包括:压缩空气通过扩散板法、机械力高速剪切空气法和引射流分散空气法^[50]。

电解法产生微气泡的原理较为简单,通过向水中通电,在电流作用下正负两电极产生微小气泡,直径在20~60 μm之间,气泡均匀性较好,但是气泡产量较少,设备损耗较大^[51]。Sakai等^[52]通过向电解质溶液通电发生电解反应,在两电极表面产生微气泡,数量较少,能耗大;Shin等^[53]通过电解实验产生微气泡,研究了毛细管半径、电极距离及气体流动速率等对微气泡形成的影响,发现气泡体积随着施加的电压和韦伯数的增大而减小,随着气体流动速率和雷诺数的减小而减小。

超声空化法是通过高频超声波使气体或者液体分散成为悬浮微粒并包裹于特定包裹材料内;气体或者液体乳化形成微气泡或者微液泡悬浮在具有自动吸附性的涂层材料如蛋白质或者表面活性剂上,然后施以高温高压从而产生空穴现象继而对表层进行化学修饰来提高其稳定性。该方法操作简单、成本较低,但制备的微气泡粒径通常较大^[54]。

微泡沫的研究对氮气泡沫稳定性的提高具有重要的价值,但对于氮气微泡沫的研究尚处于初级阶段,需要进一步增大研究力度。

5.2 氮气泡沫辅助蒸汽开发技术

由于稠油对温度特别敏感,因此利用蒸汽开采稠油油藏具有非常明显的增产效果。目前利用蒸汽开采稠油油藏主要有两种技术:蒸汽吞吐和蒸汽驱油。两种技术在应用过程中均易产生蒸汽超覆和蒸汽窜流,并有一定的热损失,因而热采效果受到一定的影响。为了解决这些问题,可以考虑使用氮气泡沫辅助蒸汽开采来减少蒸汽窜流、蒸汽超覆等现象的产生。

5.2.1 氮气泡沫辅助蒸汽吞吐开采

针对泡沫辅助蒸汽吞吐技术存在的热损失、蒸汽超覆等问题,目前辽河油田、大庆油田等都相继研制出相应的解决技术,如真空隔热油管技术、蒸汽锅炉与配套的烟道气回收技术等,但存在工艺复杂、对环境伤害大等问题。而利用氮气泡沫辅助蒸汽吞吐来开发稠油油田,可以有效减少热损失,降低气相渗透率,抑制蒸汽窜流或蒸汽超覆,并且对环境污染较小^[55]。周海红等^[56]针对九区南部齐古组稠油油藏进入蒸汽多轮次吞吐后期,地层非均质性严重、含水率高、开发效果较差的情况,进行了伴蒸汽注入氮气和起泡剂驱替原油的室内实验和现场应用,结果表明氮气泡沫辅助蒸汽吞吐技术可有效提高波及系数和驱替效率,提高稠油油藏的原油采收率。氮气泡沫辅助蒸汽吞吐技术的深入研究对于未来我国稠油油藏的开采具有重要的意义。

5.2.2 氮气泡沫辅助蒸汽驱油

为了解决蒸汽驱过程中出现的蒸汽超覆和蒸汽窜流问题,Pang等^[57]向蒸汽中加入非凝析气体(氮气)和起泡剂进行单一填砂管驱替实验。氮气泡沫辅助蒸汽驱可有效提高稠油油藏采收率,氮气泡沫将蒸汽驱的驱替效率由43.30%提高到81.24%。热泡沫能改善注入剖面从而起到抑制蒸汽窜流和蒸汽超覆的目的。

通常所说的蒸汽驱油是采用饱和蒸汽进行驱油,而如今也逐渐开始采用过热蒸汽驱油。过热蒸汽是饱和蒸汽在达到干饱和状态之后继续加热形成的。相比于常规饱和蒸汽,过热蒸汽密度更小,比容积更大,在稠油油藏热采过程中会产生更强的超覆作用;而氮气由于压缩系数较大,体积膨胀性较好,能补充地层能量和有效提高驱油效率;氮气泡沫含有表面活性剂能降低油水流动度比,因而加入氮气泡沫能增大过热蒸汽的波及体积、改善过热蒸汽在稠油油藏的热采效果^[58]。

5.3 氮气泡沫数值模拟开发技术

氮气泡沫数值模拟技术可以通过计算机对实验过程或者现场应用过程进行模拟或数据处理,并可调整优化参数,模拟结果直观性强,模拟时间短,具有较大的优势。Hosseini等^[59]利用数值模拟技术来研究在没有油存在的情况下表面活性剂浓度对泡沫驱替的岩心压降的影响,模拟两种表面活性剂

浓度下泡沫驱油的压力降曲线来确定参数,模拟结果和压力降实验数据十分符合;并利用数值模拟技术研究了泡沫驱油过程,确定泡沫模型参数;数值模拟得到的压力降曲线和原油采收率与室内岩心驱替实验结果一致。张雷等^[60]以岐口17-2油田为例建立了聚合物与氮气泡沫驱数值模拟模型,按优化的注入参数进行先导性实验后,井组日增油32.0 m³,含水率下降4.8%。周志斌等^[61]采用数值模拟与实验相结合的方法研究了氮气泡沫对裂缝性低渗油藏的封堵性能和驱油性能,结果表明氮气泡沫调驱“控水增油”效果显著,对裂缝通道具有较好的封堵能力,有效增大波及效率。

氮气泡沫数值模拟技术与实验结合使用,在参数优化、效果预测等方面展现其优越性,但也因模拟过程中简化了边界条件和部分属性,导致模拟结果精度不够高,因而需要在氮气泡沫数值模拟技术的研究方面进一步改善。

6 结论

氮气泡沫流体在多孔介质中的流变性和渗流特性不同于水、气体和聚合物溶液在多孔介质中的流变性和渗流特性。氮气泡沫作为典型的非牛顿流体,在多孔介质中的渗流行为具有剪切变稀的特征,其流变性主要受温度、气泡尺寸、压力和泡沫质量等因素的影响,而泡沫流速对渗流特性的影响较大。氮气泡沫驱同时具有气驱和泡沫驱的驱油优势,能有效增大波及效率和提高油田驱油效率。在油藏开采过程中的驱油机理主要包括选择性封堵机理、气液重力分异作用机理以及表面活性作用机理,注入开发方式主要为交替注入、共同注入和直接注入。针对氮气泡沫驱存在的问题,提出以下几点建议:(1)建立氮气泡沫驱油理论体系,改进实验方法,完善数学模型,加强泡沫在多孔介质中的流动特性研究;(2)制定一套适用度较高的氮气泡沫驱油田应用标准,优化生产参数,改善应用状况;(3)加强泡沫体系产出液后续处理技术的研究,减少氮气泡沫驱油过程所造成的环境污染,提高油藏开采的可持续发展性;(4)加大氮气微泡沫制备技术、氮气泡沫辅助蒸汽开发技术和氮气泡沫数值模拟技术的研究力度,进一步提高氮气泡沫驱油技术的优越性,增大其应用范围。

参考文献:

- [1] 刘荣全, 杨双春, 潘一, 等. 气体泡沫驱油研究进展[J]. 当代化工, 2016, 45(3): 627-629.
- [2] BOUD D C, HOLBROOK O C. Gas drive oil recovery process: US 2866507 [P]. 1958-12-30.
- [3] FRIED A N. Foam-drive process for increasing the recovery of oil [R]. Tech Rep Arch Image Library, 1960.
- [4] 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.
- [5] RAZA S H. Foam in porous media: characteristics and applications [J]. Soc Pet Eng AIME, 1969, 10(4): 328-336.
- [6] HUH D G, HANDY L L. Comparison of steady and unsteady-state flow of gas and foaming solution in porous media [J]. SPE Reserv Eng, 1989, 4(1): 77-84.
- [7] 周东, 冯海全, 李明, 等. 国内外泡沫驱提高采收率技术发展现状[J]. 内蒙古石油化工, 2009, 35(17): 56-57.
- [8] SINGH R, MOHANTY K K. Synergistic stabilization of foams by a mixture of nanoparticles and surfactants [C]. //SPE Improved Oil Recovery Symposium. Tulsa, Oklahoma, USA, 12-16 April, 2014.
- [9] LIN Yuqiu, YANG Guanglu. A successful pilot application for N₂ foam flooding in Liaohe oilfield [C]. //SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. Adelaide, Australia, 11-13 September, 2006.
- [10] LIU Renjing, LIU Huiqing, LI Xiusheng, et al. The reservoir suitability studies of nitrogen foam flooding in Shengli oilfield [C]. //SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. Perth, Australia, 20-22 October, 2008.
- [11] MA Kuiqian, JIA Xiaofei, YANG Jing, et al. Nitrogen foam flooding pilot test for controlling water cut and enhance oil recovery in conventional heavy oil reservoirs of China offshore oilfield [C]. //SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. Jakarta, Indonesia, 22-24 October, 2013.
- [12] ZHANG Yunbao, XU Guorui, BO Haijiang, et al. Foam flooding technology used for enhanced oil recovery in offshore oilfields of China's Bohai Bay [C]. //The Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference. Busan, Korea, 15-20 June, 2014.
- [13] 李兆敏, 马天态, 李宾飞. 氮气泡沫在多孔介质中的稳定性实验研究[C]. //全国水动力学研讨会. 上海, 2006.
- [14] 常城. 浅析氮气泡沫驱技术在油田地区的应用[J]. 化工管理, 2017(27): 127.
- [15] 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.
- [16] 杨丽, 廖传华, 朱跃钊, 等. 微米气泡特性及在环境污染控制中的应用[J]. 化工进展, 2012, 31(6): 1333-1337.
- [17] 潘婷, 金泽宁, 廖旋, 等. X区块氮气泡沫驱油室内实验研究[J]. 石油化工应用, 2016, 35(3): 133-135.
- [18] 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.
- [19] 王旭, 曲景迪. 浅谈氮气泡沫驱油体系的筛选与评价[J]. 化工管理, 2016(8): 174.
- [20] 赵建兵, 王世兵, 王蒙蒙. 泡沫剂的泡沫稳定性实验研究[J]. 内蒙古石油化工, 2015, 41(11): 8-10.
- [21] 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.
- [22] 周玉萍. 江汉油田高盐油藏低界面张力泡沫驱提高采收率研究[J]. 油田化学, 2017, 34(1): 92-95.
- [23] 严宇. 高温高压下泡沫流变特性研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2004: 46-47.
- [24] 李春洲, 马宝歧. 泡沫流变特性研究[J]. 化工学报, 1993(4): 480-485.
- [25] 程浩, 郎兆新. 泡沫在多孔介质中的流动规律及其数值模拟[C]. //全国流体力学学术会议. 上海, 2001.
- [26] 耿小焜, 罗幼松, 牛佳玲, 等. 泡沫在多孔介质中的生成过程和形态研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2012, 14(5): 62-68.
- [27] 张鹏. 泡沫流体稳定性及泡沫在多孔介质中的行为和性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2005: 4-5.
- [28] 杜庆军. 泡沫驱渗流特征的实验和模拟研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2008: 49-50.
- [29] LIU Yanmin, ZHANG Liang, REN Shaoran, et al. Injection of nitrogen foam for improved oil recovery in viscous oil reservoirs offshore Bohai Bay China [C]. //SPE Improved Oil Recovery Conference. Tulsa, Oklahoma, USA, 11-13 April, 2016.
- [30] 李文静, 林吉生, 徐国瑞, 等. 绥中36-1油田氮气泡沫逐级调驱实验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(9): 177-181.
- [31] 韩红旭, 郝爱刚, 冀延民, 等. 氮气泡沫堵调技术在热采水平井开发中的应用——以LF油田馆陶组为例[J]. 石油地质与工程, 2017, 31(5): 122-124.
- [32] 喻贵民. 气液分异作用对泡沫运移封堵效果的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(4): 126-130.
- [33] 张作安. 低渗透油藏泡沫驱油机理及应用现状研究[J]. 当代化工, 2017, 46(8): 1693-1695.
- [34] 郑红梅. 低渗油田高含水期氮气泡沫驱提高采收率研究[J]. 中国石油石化, 2017(5): 30-31.
- [35] 丁雅洁. 氮气泡沫调驱技术及应用研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(23): 173-174.
- [36] 杨浩. 泡沫注入方式对封堵效果的影响[J]. 精细石油化工进展, 2009, 10(1): 4-8.
- [37] HOU Qingfeng, ZHU Youyi, LUO Yousong. Studies on foam flooding EOR technique for Daqing reservoirs after polymer flooding [C]. //Society of Petroleum Engineers, SPE Improved Oil Recovery Symposium. Tulsa, Oklahoma, USA, 14-18 April, 2012.
- [38] 金光明, 于建良. 泡沫驱油现状与展望[J]. 科技信息, 2008(30): 52.

- [39] YEKEEN N, MANAN M A, IDRIS A K, et al. A comprehensive review of experimental studies of nanoparticles-stabilized foam for enhanced oil recovery [J]. *J Pet Sci Eng*, 2018, 164: 43–74.
- [40] 张作安. 泡沫驱油提高采收率技术研究[J]. *科技风*, 2017 (15): 2.
- [41] 张然, 杨双春, 潘一, 等. 泡沫驱提高油田采收率的研究进展[J]. *能源化工*, 2017, 38(3): 73–76.
- [42] 汪鹏, 杨珍, 姚逸风. 泡沫助采在油田中的现状与发展前景[J]. *化工技术与开发*, 2015, 44(6): 42–45.
- [43] 王其伟. 泡沫驱提高原油采收率及对环境的影响研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2009: 20–21.
- [44] 任广萌, 孙德智, 王美玲. 我国三次采油污水处理技术研究进展[J]. *工业水处理*, 2006, 26(1): 1–4.
- [45] SEBBA F. Foams and biliquid foams-Aphrons [M]. *Endeavour*: Wiley, 1987: 384–385.
- [46] 罗建洪, 李军, 朱新华, 等. 胶质气体泡沫CGA稳定性实验研究[J]. *化学工程师*, 2017, 31(1): 4–6.
- [47] 史胜龙, 王业飞, 周代余, 等. 微泡沫体系的制备及在调剖、驱油中的应用进展[J]. *油田化学*, 2016, 33(4): 750–755.
- [48] 房炎伟, 杨佳伟, 马玉梁, 等. 三塘湖油田微泡沫防漏钻井液技术研究与应用[J]. *石油与天然气化工*, 2016, 45(4): 51–54.
- [49] 燕永利, 邓强, 孟梅. 层状液晶凝胶对微泡沫的稳定作用[J]. *高等学校化学学报*, 2011, 32(11): 2598–2604.
- [50] 刘凯, 王前荣, 王维波. 微泡沫提高采收率技术研究进展[J]. *应用化工*, 2017, 46(6): 1204–1209.
- [51] 邓超, 杨丽, 陈海军, 等. 微纳米气泡发生装置及其应用的研究进展[J]. *石油化工*, 2014, 43(10): 1206–1213.
- [52] SAKAI O, KIMURA M, SHIRAFUJI T, et al. Underwater micro-discharge in arranged micro-bubbles produced by electrolysis in electrolyte solution using fabric-type electrode [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(23): 231501–231503.
- [53] SHIN W T, YIACOUMI S, TSOURIS C. Experiments on electrostatic dispersion of air in water [J]. *Indus Eng Chem Res*, 1997, 36(9): 3647–3655.
- [54] 阮晓博, 杨芳, 顾宁. 微纳气泡制备及其应用于医学超声影像增强与药物载运的发展[J]. *东南大学学报(医学版)*, 2011, 30(1): 208–214.
- [55] 潘一, 付洪涛, 殷代印, 等. 稠油油藏气体辅助蒸汽吞吐研究现状及发展方向[J]. *石油钻采工艺*, 2018, 40(1): 111–117.
- [56] 周海红, 杨林科, 宗世英. 高含水后期氮气泡沫驱提高采收率技术研究[J]. *化工管理*, 2016(17): 198.
- [57] PANG Zhanxi, LIU Huiqing, ZHU Ling. A laboratory study of enhancing heavy oil recovery with steam flooding by adding nitrogen foams [J]. *J Pet Sci Eng*, 2015, 128: 184–193.
- [58] ANZHU A X, MU L, BING B, et al. Development and application of a modified superheated steam flooding assisted by N₂ foam and high-temperature resistant gel [C]. // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2017.
- [59] HOSSEINI-NASAB S M, DOUARCHE F, SIMJOO M, et al. Numerical simulation of foam flooding in porous media in the absence and presence of oleic phase [J]. *Fuel*, 2018, 225: 655–662.
- [60] 张雷, 刘建国, 陈建波, 等. 海上聚合物与氮气泡沫组合驱注入参数优化[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2017, 19(1): 39–42.
- [61] 周志斌, 王杰祥, 王腾飞, 等. 裂缝性低渗透油藏氮气泡沫调驱技术研究[J]. *石油化工高等学校学报*, 2016, 29(1): 31–34.

Research Progress of Nitrogen Foam Oil Flooding

LIU Long, FAN Hongfu

(School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, P R of China)

Abstract: Since nitrogen foams had good performances in the process of oil flooding in oil reservoirs, intensive study of the technology of nitrogen foams oil flooding was of great significance to the exploitation of oilfields in China. The present research situation of nitrogen foams oil flooding at home and abroad was introduced, the stability, rheology and percolation characteristics of nitrogen foam in porous media were analyzed, the displacement mechanism and injection method of nitrogen foam flooding were summarized, and the problems existing in the development of nitrogen foam flooding technology were pointed out. According to the existing research results, the possible research direction of nitrogen foam flooding technology was predicted, mainly in preparation technology of nitrogen micro-foam, the development technology of nitrogen foam assisted steam and nitrogen foam numerical simulation technology.

Keywords: nitrogen foam; stability; displacement mechanism; review