

油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助出版

空气泡沫驱提高稠油 油藏采收率技术研究

KONGQI PAOMU DUTIGAO CHOUYOU
YUCCANG CAISHOUYI JISHUYANJIU

李华斌 刘 露 程柯扬 著
尹玉川 陈 超 王晓燕 刘清栋



科学出版社

油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助出版

空气泡沫驱提高稠油油藏 采收率技术研究

李华斌 刘 露 程柯扬 尹玉川 陈 超 王晓燕 刘清栋 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

稠油具有黏度高、密度高、含轻质馏分少、胶质与沥青含量高等特点,因此在开发方面要求具有更高表观黏度的驱油体系以达到提高采收率的目的。空气泡沫驱油技术结合了空气驱油与泡沫驱油两者的优点,可解决稠油油藏长期以来驱油效果差、经济价值低的问题。本书内容包括空气泡沫驱稠油的微观驱油机理、稠油泡沫驱体系筛选及评价、驱油效果预测及评价以及空气泡沫驱安全性技术评价,分别从机理、技术手段和现场实施性做了全方位的研究。

本书适合油气勘探、能源化工等领域的科研人员、工程技术人员阅读,也可作为相关专业高等院校师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

空气泡沫驱提高稠油油藏采收率技术研究 / 李华斌等著. —北京: 科学出版社, 2014.9

ISBN 978-7-03-041884-5

I. ①空… II. ①李… III. ①泡沫驱油-高黏度油气田-采收率(油气开采)-研究 IV. ①TE357.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 206194 号

责任编辑: 韩卫军 / 责任校对: 王 翔

封面设计: 墨创文化 / 责任印制: 余少力

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年9月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014年9月第一次印刷 印张: 11 1/4

字数: 260千字

定价: 73.00元



前 言

稠油是指地层条件下黏度大于 $50 \text{ mPa} \cdot \text{S}$ ，或在油层温度下脱气原油黏度为 $1000 \sim 10000 \text{ mPa} \cdot \text{S}$ 的高黏度重质原油。稠油具有黏度高、密度高、含轻质馏分少、胶质与沥青含量高等特点。因此在开发方面，要求具有更高表观黏度的驱油体系，以达到提高采收率的目的。目前聚合物驱在稠油上较多使用，但因其驱油体系的表观黏度大幅度下降以及体系稳定性差，驱油效果差。而蒸气吞吐因油层驱油能量降低快，随着周期数的增加效果会越来越差；蒸气驱要求井距比常规井距小，一般只能为 $100 \sim 150 \text{ m}$ ，经济效益差。所以有必要研究新的技术手段，以便提高稠油的采收率。

目前，针对稠油黏度高、密度大、流动阻力大的特点，利用高黏度泡沫体系驱油来提高波及体积并增加洗油效率的方法已开始使用。因为泡沫体系不仅可以在低浓度条件下理想发泡，且体系还是有“高视黏度”、“遇油消泡”以及“堵高不堵低”等特性。此外，由于产生泡沫的起泡剂为表面活性剂，具有降低油水界面张力的作用，能提高原油的波及效率。现在国内外泡沫驱油所用气体主要为 N_2 、 CO_2 、天然气以及烟道气。但因为气源困难或分离成本高，导致泡沫驱不能大规模推广应用。而使用空气作为泡沫驱的气源克服了我国 CO_2 以及烃类气源不足的问题，同时由于空气价格的低廉而大大降低了空气泡沫驱的成本。空气泡沫驱油技术结合了空气驱油与泡沫驱油两者的优点，空气驱油技术通过对地层原油的低温氧化，能降低原油的黏度；而泡沫体系独有的渗流特征和理想的驱油效果能提高注入流体的黏度。空气泡沫驱油技术受到越来越多石油工作者的重视，是一种高效并且很有应用前景的提高原油采收率的方法。

在国内，胜利油田在 20 世纪 70 年代实施了空气泡沫驱矿场试验。广西百色油田较早就开展了泡沫驱项目，2001 年又进行空气泡沫驱矿场试验。结果表明，空气泡沫驱可以大幅度地提高原油采收率且降低成本。2007 年 5 月，中原油田在胡 12-152 井组开展空气/空气泡沫调驱试验。三个月内，该油田含水率由 97% 下降至 92%，累计产油达 800 t，且生产井未见 O_2 突破，没有发生安全事故。长庆油田在长庆马岭油田对 2 个井组开展空气泡沫调驱试验，实施后含水上升趋势得到控制，增产原油 118 t，且在生产井套管内未检测到 O_2 ， O_2 已经在油层中发生氧化反应而被完全消耗。

闫凤平等(2008)针对甘谷驿油田唐 80 井区为低产、特低渗、低饱和轻质油藏的特点，在丛 54 和丛 55 两个井组开展空气泡沫驱提高采收率矿场试验。实施半年后，丛 54 和丛 55 井组含水降低，增产效果明显。

任韶然等(2009)在中原油田胡 12 区块开展空气泡沫驱矿场先导性试验。该区块为中低渗油藏，且非均质性严重。通过对比分析原油与空气的静态和动态氧化实验，发现该区块的低温氧化性能较好。通过室内实验发现，空气泡沫驱能应用于非均质严重的油藏。

针对马岭油田属于低渗透油藏且已进入开发后期的特点，张力等(2009)在马岭油田木 A 和木 B 井组开展空气泡沫驱先导试验。该试验采用泡沫辅助气驱和发泡液驱。施工后，木 A 井组综合含水降低，含水率下降，木 B 井组口产油量增加，综合含水也降低。两个井组累计增油 440 t，在低渗油藏中空气泡沫驱的增产效果明显。

从已开展的理论研究及矿场实验可知，目前已进行的空气泡沫驱技术也仅仅限于解决低渗、低黏和普通温度油藏问题，对于高黏度($\geq 100 \text{ mP} \cdot \text{S}$)油田且油层温度高($\geq 75^\circ\text{C}$)、矿化度高的油藏($\geq 10000 \text{ mg/L}$)，空气泡沫驱的研究鲜见报道。但随着开采的进行，普通油藏开采到一定程度后只能转向高温、高黏、高矿等油藏条件苛刻的特殊油藏。因此，本书依托鲁克沁稠油油藏中区地质条件(地层温度 80°C ，地层水矿化度 $100252 \sim 174925 \text{ mg/L}$)，借助室内试验及数值模拟软件 CMG 研究空气泡沫驱在此油藏中的适用性、驱油效果及实施方案。为此，特别注重研究温度、原油黏度和矿化度对起泡剂起泡性能、驱油性能以及封堵性能的影响。通过岩心驱替试验研究起泡剂浓度、气液比、渗透率及其级差和含油饱和度对空气泡沫驱油效果的影响，选出适合高温、高盐、高黏油藏条件的空气泡沫驱油体系。依托数值模拟技术从段塞大小、前置段塞、气液比、交替周期及注采速度等方面合理设计开发方案并预测开发效果，为下一步进行矿场实验提供有力的理论支持。

目 录

第 1 章 空气泡沫驱驱油机理	1
1.1 空气泡沫驱微观驱油机理	1
1.1.1 实验材料及仪器	1
1.1.2 空气泡沫驱微观驱油过程分析	3
1.1.3 空气泡沫驱微观封堵实验	4
1.2 空气泡沫驱宏观封堵实验	5
1.3 稠油空气泡沫驱驱油机理	6
1.3.1 空气泡沫驱驱油效果对比	6
1.3.2 稠油空气泡沫驱微观驱油机理	7
1.3.3 稀油空气泡沫驱微观驱油机理	8
1.4 结论	9
第 2 章 原油低温氧化特征及安全性分析	10
2.1 氧化机理及低温氧化影响因素	10
2.1.1 氧化机理分析	10
2.1.2 原油低温氧化影响因素	11
2.2 反应速率计算方法	11
2.3 混合气体分压计算方法	13
2.4 压力对氧化反应特征的影响	13
2.4.1 压力对氧化速率及耗氧率的影响	13
2.4.2 压力对轻烃组分的影响	19
2.4.3 压力对原油组分的影响	21
2.5 温度对氧化反应特征的影响	22
2.5.1 温度对氧化速率及耗氧率的影响	22
2.5.2 温度对轻烃组分的影响	25
2.5.3 温度对原油组分的影响	28
2.6 原油氧化反应动力学	29
2.7 稠油空气泡沫驱安全性分析	31
2.7.1 可燃物质的爆炸极限	31
2.7.2 混合气体爆炸极限实验	33
2.8 相关安全与控制措施	34
2.9 小结	35

第3章 空气泡沫体系筛选与评价	36
3.1 实验仪器和材料	37
3.1.1 实验仪器	37
3.1.2 材料及化学试剂	38
3.2 起泡剂的筛选	40
3.3 起泡剂性能评价	47
3.3.1 不同有效浓度对起泡剂性能的评价	47
3.3.2 矿化度对起泡剂 XHY-4 性能的影响	51
3.3.3 注入水和采出水对起泡剂性能的影响	53
3.3.4 注入水和采出水按比例混合对起泡剂性能的影响	55
3.3.5 高温高压下起泡剂 XHY-4 评价	56
3.4 泡沫体系其他性质及评价	60
3.4.1 界面张力的测定	60
3.4.2 发泡液及泡沫的吸附性能研究	61
3.5 小结	67
第4章 空气泡沫提高稠油采收率实验	68
4.1 空气泡沫在多孔介质中的性能评价	68
4.1.1 实验条件、仪器及方法	68
4.1.2 起泡剂有效浓度对阻力系数的影响	70
4.1.3 气/液比对阻力系数的影响	71
4.1.4 渗透率对阻力系数的影响	73
4.1.5 线速度对阻力系数的影响	74
4.1.6 线速度对起泡和消泡速度的影响	75
4.1.7 含油饱和度对阻力系数的影响	76、
4.2 空气泡沫驱油效果评价	77
4.2.1 石英砂组驱油效果分析	78
4.2.2 天然油砂组驱油效果分析	82
4.2.3 石英砂与天然油砂组驱油效果对比	88
4.2.4 起泡液与泡沫段塞驱油效果分析	89
4.3 小结	90
第5章 空气泡沫驱方案设计	91
5.1 鲁克沁稠油油藏地质特征	91
5.1.1 油田概况	91
5.1.2 油藏地质特征	91
5.1.3 勘探开发历程与现状	92
5.2 油藏地质模型	93
5.2.1 储层地质建模的原则	93
5.2.2 储层地质建模的方法	93

5.2.3	三维构造模型的建立	96
5.2.4	属性参数建模	96
5.2.5	基于模型的地质储量计算	97
5.3	空气泡沫驱油效果预测及分析	98
5.3.1	泡沫驱数值模型的建立	98
5.3.2	模型粗化	99
5.3.3	数值模拟的思路和方法	99
5.3.4	确定模型参数的可调范围	99
5.3.5	历史拟合方法	100
5.3.6	拟合指标	100
5.3.7	水驱效果预测	101
5.4	空气泡沫驱方案优化设计及效果预测	101
5.4.1	泡沫参数的优化设计	101
5.4.2	泡沫优选参数的驱油效果	116
5.5	小结	118
第6章	配注工艺技术研究	120
6.1	起泡剂的配注工艺	120
6.1.1	静脉注射配注工艺	120
6.1.2	罐配工艺技术	121
6.2	空气注入工艺	121
6.3	发泡工艺技术	122
6.3.1	井底发泡工艺技术	122
6.3.2	气液交替注入工艺技术	123
6.4	水井注入量	123
6.4.1	泡沫深部调驱注入量	123
6.4.2	空气泡沫驱注入量	124
6.5	注入工艺要求	124
6.5.1	强制性规定	124
6.5.2	管柱的要求	125
6.5.3	资料录取及要求	125
6.6	结论	127
参考文献		129
彩 图		133
索 引		169

第 1 章 空气泡沫驱驱油机理

稀油泡沫驱油机理在部分著作中已有详细研究，而稠油泡沫驱微观驱油机理的相关研究却较少。因为稠油物性大大异于稀油物性，为此其泡沫驱油机理与普通泡沫驱油机理存在较大差异。本章以鲁克沁中区稠油作为实验主体，利用微观仿真模型重点研究稠油的泡沫微观驱油机理，并研究稠油和稀油在多孔介质中泡沫微观驱油机理的异同点。

1.1 空气泡沫驱微观驱油机理

1.1.1 实验材料及仪器

实验主要是通过图像采集系统将驱油过程的图像转化为计算机的数字信号，采用图像分析技术研究泡沫的形成过程、泡沫的破灭过程、泡沫的运移特征及泡沫驱的微观驱油特性。化学试剂为 XHY-4(成都华阳兴华化工厂产)起泡剂，泡沫体系所用气体为空气，实验所用原油为鲁克沁中区地层原油，在油藏温度 80℃条件下原油黏度 268 mPa·s，实验用水模拟鲁克沁油藏地层水，矿化度 160599 mg/L。

微观驱油实验所用仪器如表 1-1 和图 1-1~图 1-5 所示。

表 1-1 微观驱油实验仪器

仪器名称	数量	生产厂家
微观仿真模型	1 台	自制
恒流泵	1 台	东台市燕山仪表厂
泡沫发生器	1 个	江苏海安
压力表	若干	上海自动化仪器厂
恒温箱	1 台	江苏海安华达石油仪器厂
50 mL 中间容器	1 个	江苏海安
电子摄像机	1 台	深圳德与辅科技有限公司
计算机	1 台	联想公司
电子天平	1 台	上海力能电子仪器公司
烧杯、量筒	若干	四川蜀牛玻璃仪器厂

微观仿真模型：模型为自主设计并制作，尺寸 80 mm×21 mm×3 mm，夹持器尺寸 18 cm×10 cm×3 cm。中间设有窗口可用于电子摄像机观察，两边各有进出口管线连接，模型最大承压 3 MPa。如图 1-1 所示。

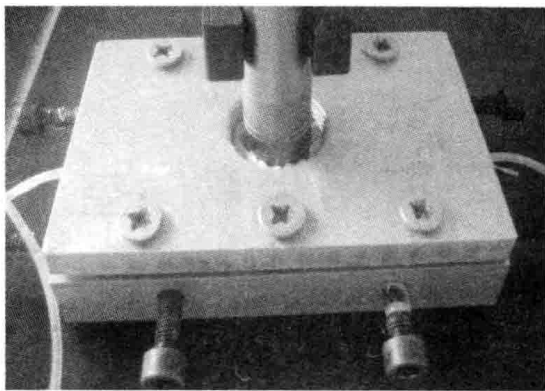
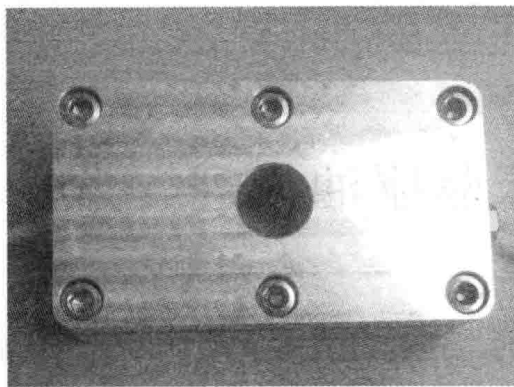


图 1-1 可视化微观仿真模型

玻璃球珠微观模型：玻璃球珠直径 0.3 mm。该模型能重复利用，模拟程度高且可视化性好，能够清楚地观察到多孔介质内气泡产生、破灭、运移以及驱油全过程。微观模型中的玻璃微珠排列方式如图 1-2 所示。模型中玻璃微珠排列为菱形排列，这种排列为球体中最紧密的排列方式，其截面图如图 1-3 所示。经过计算，此种排列的孔隙度为 25.96%。

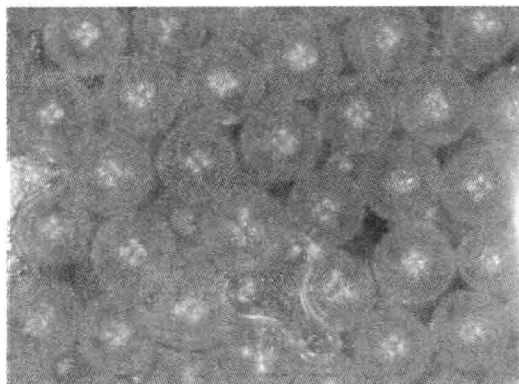


图 1-2 模型中玻璃微珠的排列

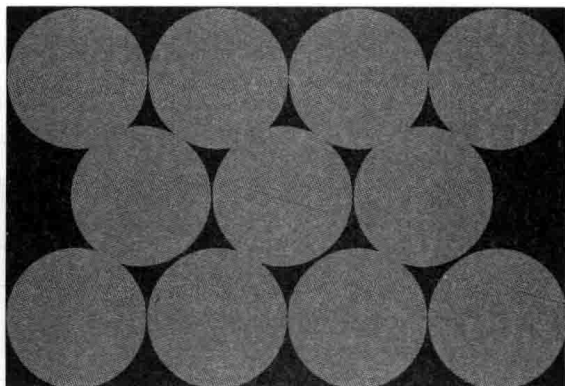


图 1-3 球粒菱形排列截面图

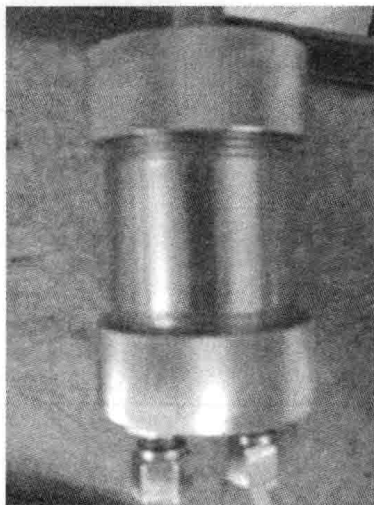


图 1-4 泡沫发生器

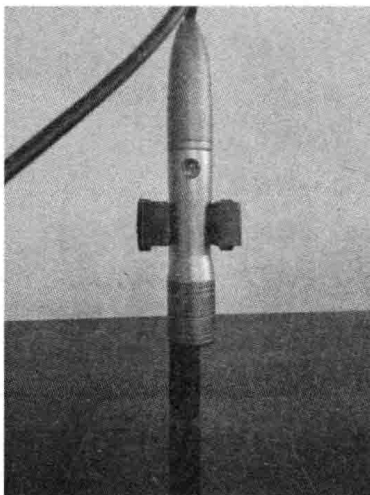


图 1-5 摄像机探头

泡沫发生器：如图 1-4 所示。

电子摄像机：放大倍数为 1~500 倍，像素为 5 MP，分辨率为 2592×1944，摄像机探头如图 1-5 所示。

恒流泵：流量控制为 1~500 mL/h。

恒温箱：温度控制为 20~100℃，实验温度为 90℃。

1.1.2 空气泡沫驱微观驱油过程分析

实验采用气液注并经过泡沫发生器形成泡沫的方式，利用微量注入泵控制起泡剂注入速度，用气体流量计控制气体注入速度。电子摄像机采集泡沫驱微观驱油过程，实验的流程如图 1-6 所示。

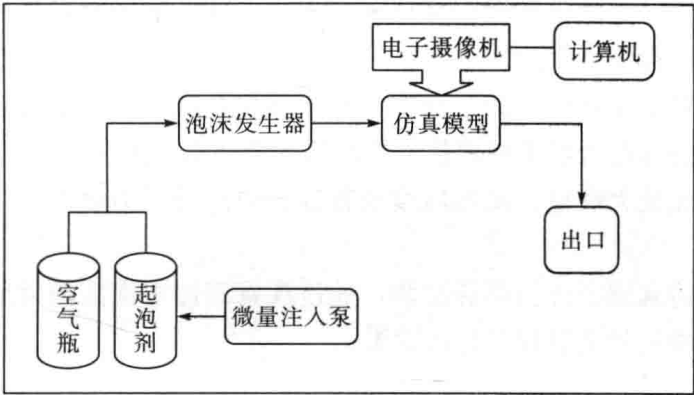


图 1-6 微观驱油实验流程示意图

泡沫微观驱油过程显示泡沫流体是一种力学过程复杂的多相流体，有着一系列的物理及化学变化，且还有气-固、气-液、液-液的界面作用。泡沫在油层内沿流动方向有三个渗流带，如图 1-7 所示。

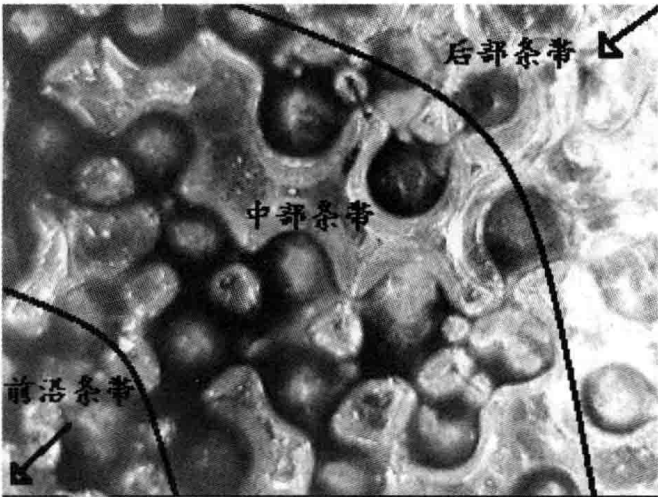


图 1-7 泡沫驱油过程

从图 1-7 中可以看出，前沿条带中只有少量的泡沫，且泡沫膜薄而不稳定。这是因为前沿条带油相占主要地位，使得泡沫体系中的表面活性剂离开气水界面吸附于油相上，

以致泡沫膜不稳定, 所以此区域渗流大部分是 O/W 或 W/O 型乳状液渗流。

在中部条带, 因存在一定量的油相, 在表面活性剂乳化的作用下易产生 O/W 型乳状液渗流。同时, 由于此条带中的含油饱和度小于前沿条带, 吸附于油相上的表面活性剂减少, 浓度较高的表面活性剂使得产生的泡沫变得稳定, 因此在此条带的渗流为乳状液和泡沫渗流共存。

在后部条带, 空间中的原油已经大部分被驱替出来, 含有大量的空气和泡沫液, 此条带的渗流大部分为泡沫渗流。

1.1.3 空气泡沫微观封堵实验

泡沫体系中的液体流动阻力除了存在黏滞阻力外, 还有因体系中气相与液相碰撞时产生的附加阻力。同时, 由于气泡在穿过多孔介质中的孔喉时会发生扭曲变形, 贾敏效应所形成的附加阻力也将会增加。

在泡沫体系驱替水驱残余油的过程中, 泡沫首先会进入流动阻力较小的大喉道, 在驱替压力作用下, 泡沫在大喉道处聚集。当泡沫的流动阻力大于后续驱替液驱替压力时, 聚集的泡沫会堵塞此处大喉道, 使得后续驱替液流向流动阻力更大的小喉道, 扩大驱替液的波及体积。

本节利用微观仿真模型进行驱替实验, 通过观察稠油中泡沫的封堵大喉道现象, 研究泡沫在稠油中的微观封堵过程及封堵效果。

1. 空气泡沫微观封堵过程

通过分析稠油空气泡沫驱微观驱油实验图像, 发现泡沫的微观封堵过程如彩图 1 所示。

首先, 泡沫在大喉道中不断聚集, 随着泡沫量逐渐增加(彩图 1 中图 A), 泡沫会占据喉道的大部分空间, 泡沫面接触且排列紧密(彩图 1 中图 B)。在原油及驱替压力作用下, 泡沫不断被挤压, 泡沫液膜变薄(彩图 1 中图 C), 最后聚并成更大的气泡。此气泡被拉伸变形, 增加了贾敏效应所产生的附加阻力, 再加上本身的黏滞力, 起到有效封堵高渗透大喉道的作用(彩图 1 中图 D)。

2. 空气泡沫微观封堵效果

泡沫堵塞喉道现象是泡沫驱油的重要机理, 能显著提高驱替液的波及体积。彩图 2 及彩图 3 为泡沫在多孔介质内的封堵效果图。

彩图 2 的图 A 中, 泡沫在喉道 a 处聚集, 由于贾敏效应, 堵塞大孔隙喉道, 导致后续泡沫液的流动阻力增加, 驱替压力作用下, 气泡转而流向未被波及的小喉道 b, 如彩图 2 中图 B 所示, 提高了驱替液的波及体积。

彩图 3 的图 A 中, 喉道处的泡沫在运移到一定的位置后停止不动, 引起流度下降, 从而大幅度地降低泡沫的渗透率, 对液相渗透率则影响不大, 油滴或水溶液绕过气泡沿着压降方向运移, 如彩图 3 中图 B 所示。泡沫的选择性堵塞是由于泡沫具有较高的视黏度, 较高的黏滞力使得气泡梗在喉道处, 降低气相渗透率, 控制“气窜”。

实验结果表明，空气泡沫能很好地封堵多孔介质中的高渗透大孔道，使得更多的驱替液流向流动阻力更大的小喉道，扩大驱替液的波及体积。同时泡沫的高黏度控制流度比能降低气相渗透率以提高驱油效果。

1.2 空气泡沫驱宏观封堵实验

为了验证空气泡沫驱微观驱油实验中观察到的泡沫封堵高渗透大喉道的现象，本节利用填砂管模型进行空气泡沫驱驱替实验。通过测量填砂管模型两端的压差，即阻力系数的变化来测定泡沫的宏观封堵能力。

图 1-8 所示为单管岩心驱替实验流程图。微观驱油实验发现泡沫具有“堵高不堵低”的特点，在表 1-2 所示的条件下，选取 4 根渗透率分别为 $256\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 、 $463\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 、 $687\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 和 $852\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 的填砂管进行空气泡沫封堵实验。实验结果如图 1-9 所示。

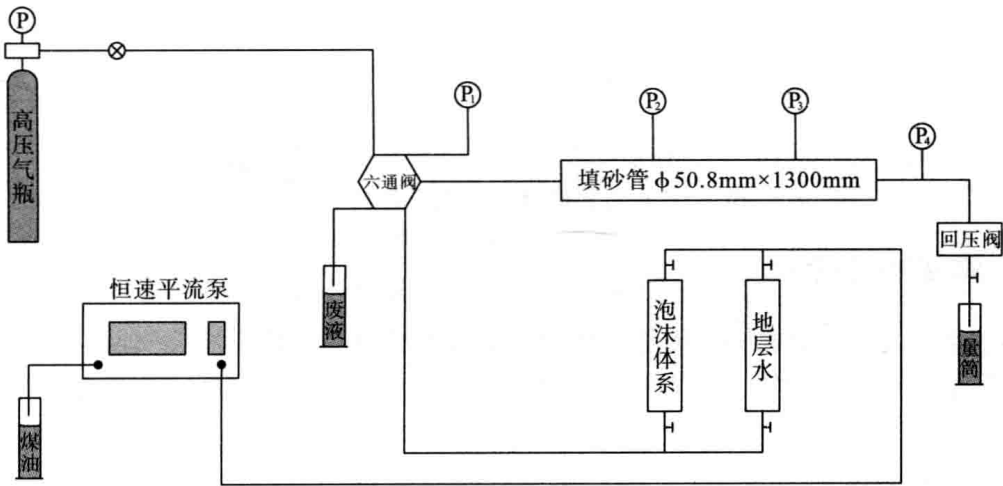


图 1-8 驱替实验流程图

表 1-2 空气泡沫驱实验条件

序号	渗透率/ $10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$	发泡剂	温度/ $^{\circ}\text{C}$	压力/ MPa	注入方式	气液比
1	256	XHY-4	78	10	交替注入	1.2 : 1
2	463	XHY-4	78	10	交替注入	1.2 : 1
3	687	XHY-4	78	10	交替注入	1.2 : 1
4	852	XHY-4	78	10	交替注入	1.2 : 1

由图 1-9 可以看出，提高实验岩心的渗透率，阻力系数也随着变大，封堵效果更好。实验结果显示，泡沫在多孔介质中运移会选择性地封堵高渗透大孔道，这验证了泡沫在微观驱油实验中观察到的“堵大不堵小”现象。

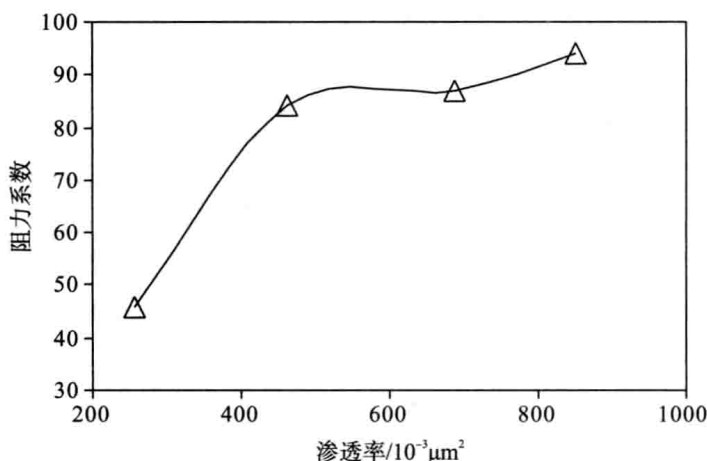


图 1-9 阻力系数随渗透率变化曲线

1.3 稠油空气泡沫驱驱油机理

1.3.1 空气泡沫驱驱油效果对比

实验选用鲁克沁地层稠油(黏度 $286 \text{ mPa} \cdot \text{s}$)和普通稀油(黏度 $40 \text{ mPa} \cdot \text{s}$)分别进行水驱和空气泡沫驱驱油实验。结果如彩图 4~彩图 7 所示。

1. 稠油驱油效果对比

稠油水驱实验后如彩图 4 所示,由于孔隙表面润湿的非均质性及稠油中重组分的影响,模型中还存在大量的残余油未被水驱出孔隙,水驱波及效率低,驱油效果差。实验还发现,在水驱后期向模型中持续注水,模型出口未发现油渍,注入水在大喉道处形成水窜,影响水驱效果。

注空气泡沫液结束后的驱替效果如彩图 5 所示,孔隙介质大部分被泡沫所填充,说明空气泡沫驱扩大了驱替液的波及体积,介质中的原油大部分被驱替出孔隙喉道,表明空气泡沫驱具有良好的驱油效果。同时,在彩图 5 中还发现泡沫能封堵大喉道、剥离油膜并乳化原油。

2. 稀油水驱和泡沫驱后驱油效果对比

稀油水驱后效果如彩图 6 所示。由于稀油中重质组分少、原油黏度低,因此水驱能将孔隙中大部分的原油驱出,但在喉道壁上及细小孔隙中还存在部分呈束缚状态的原油。

饱和稀油模型中空气泡沫驱结束后的效果如彩图 7 所示。同理,实验结果表明空气泡沫能提高驱替液的波及体积,可以驱出水驱后未被驱出孔隙的残余油,提高了原油采收率。

3. 泡沫驱波及程度对比

利用方格纸法计算彩图 4、彩图 5、彩图 6 及彩图 7 中驱替液波及面积的百分比,通

过对比稠油及稀油泡沫驱较水驱提高的幅度,研究空气泡沫驱应用于稠油油藏的优势。

通过计算得出,彩图4中稠油模型水驱后的波及面积百分比约为8.8%,彩图5中稠油模型泡沫驱后的波及面积百分比约为96.6%,彩图6中稀油模型水驱后的波及面积百分比约为69.8%,彩图7中稀油模型泡沫驱后的波及面积百分比约为97.3%。因此,得出稠油泡沫驱波及面积提高的幅度为87.8%,而稀油提高的幅度为27.5%,泡沫驱应用于稠油油藏较稀油油藏提高采收率的幅度更大,波及面积更广,空气泡沫驱更适合于稠油油藏。

1.3.2 稠油空气泡沫驱微观驱油机理

通过研究空气泡沫驱的微观驱油过程,同时对比分析稠油水驱和空气泡沫驱的驱油效果,结合空气泡沫驱在微观和宏观上的封堵实验结果,可以得出空气泡沫驱的微观驱油机理有五种:空气泡沫的乳化和分离作用、泡沫剥离油膜和挤压携带作用、泡沫的搅动作用、泡沫“堵大不堵小”、泡沫的高黏度控制流度比。

1. 乳化和分离作用

由于泡沫体系中起泡剂的乳化作用,多孔介质的喉道内及孔壁上的残余油会被乳化,原油变得相对较易被驱出。

(1) 泡沫乳化特性

在注空气泡沫初期,由于泡沫体系中表面活性剂的乳化作用,孔隙喉道中未被水驱驱出的稠油被表面活性剂乳化,形成大量的水包油(O/W)型乳状液。如彩图8中图A与图B所示,原油均不同程度地被表面活性剂乳化成水包油型乳状液。

(2) 泡沫的分离特性

由于表面活性剂能降低油水界面张力,使得残留在孔壁上及细小孔隙中的残余油软化,如彩图9中的图A所示。软化的乳化液分离了呈束缚状态的原油,使得原油较易被驱出孔隙。

2. 剥离油膜和挤压携带作用

(1) 剥离油膜

如彩图10中图A所示,在表面活性剂降低油水界面张力的作用下,大量残留在喉道壁上的油段被泡沫剥离成呈分散的细粉状或丝状,变得相对较易流动。如彩图10中图B所示,残余油块的边缘缩小,被剥离的原油随水流动,被驱出孔隙。

(2) 挤压携带作用

当泡沫能克服原油与孔壁之间的黏附力,则可以将油滴整体驱动。从彩图11中可看出,多个大气泡占据着孔隙喉道的大部分空间,在后续驱替压力作用下,分散的大气泡像一段柱塞挤压孔隙中的残余油,并将油滴携带出孔隙,但此种现象在喉道中较少发生,特别是原油黏度较高时。

3. 搅动作用

泡沫在多孔介质中渗流, 由于原油及驱替压力挤压的影响, 会循环往复地发生聚并、破裂现象。这种过程会局部地改变多孔介质中孔隙和喉道的压力, 加剧孔喉中泡沫的运动, 甚至使得泡沫短时间出现反向流动及局部“回流”现象。这种扰动会促使泡沫的乳化及剪切作用发生得更频繁, 有利于泡沫驱油过程, 如彩图 12 所示。

4. “堵大不堵小”

泡沫流体在多孔介质中渗流, 层间摩擦力使液体进入液膜边界与喉道壁之间的滑动层, 泡沫将产生扭曲变形; 同时, 由于孔隙的不规则性造成气泡两端曲率不同, 于是产生了迭加的气液界面阻力效应——贾敏效应。因此, 聚集的大气泡会梗在不规则喉道处, 堵塞高渗透大喉道, 形成了泡沫的“堵大不堵小”现象。

如彩图 13 中图 A 所示, 泡沫在流动阻力较小的高渗透大喉道 a 处聚集, 气泡被拉伸, 形状变得不规则, 产生贾敏效应, 堵塞了孔隙喉道, 导致后续的泡沫液的流动阻力增加。在驱替压力的作用下, 气泡转而流向未被波及的小喉道 b, 驱替小喉道 b 处的原油, 扩大了驱替液的波及体积, 如彩图 13 中的图 B 所示, 造成泡沫“堵大不堵小”。

在饱和稠油的微观模型中, 泡沫的“堵大不堵小”现象会频繁发生, 小气泡聚并成大气泡阻塞大喉道。

5. 高黏度控制流度比

泡沫在地层多孔介质内渗流, 由于孔隙喉道的非均质性导致气泡在穿过孔隙喉道时界面会发生变形, 引起黏滞阻力增加, 泡沫的视黏度增加。

泡沫具有较高视黏度的特性使得气泡在运移到某一位置后会停留在此处, 引起流度下降, 从而大幅度地降低气相(泡沫)的渗透率, 对液相(油水混合物)渗透率则影响不大。如彩图 14 所示, 在驱替压力不变的情况下, 大气泡梗在喉道处, 而后续的油滴及水溶液沿着液膜边缘绕过泡沫的阻挡, 不断向前运移。

1.3.3 稀油空气泡沫驱微观驱油机理

通过分析模型注入空气泡沫液后的实验图像, 实验结果表明: 稀油中同样有乳化(彩图 15)、贾敏效应(彩图 16)及泡沫的高黏度控制流度比现象(彩图 17)。

实验发现, 当注入泡沫液后, 在驱替压力作用下, 泡沫体系内的小气泡大量地挤入原油中, 如彩图 18 所示。由于原油黏度较小, 小气泡在表面活性剂降低油水界面张力的作用下更易分离原油, 这种现象在饱和稠油模型中较少发生。

小气泡挤入原油能把孔隙内未被水驱驱出的原油及残留在孔壁上的油段切割成更小的油滴, 沿着压降方向更易被排出孔隙, 如彩图 18 所示。在饱和稀油的模型中, 气泡的挤入切割并分离原油的作用是与稀油泡沫驱和稠油泡沫驱不相同的驱油机理。

1.4 结 论

空气泡沫流体沿流动方向有前沿、中部及后部三个渗流条带，三个渗流条带的渗流方式各不相同，前沿条带为 O/W 或 W/O 型乳状液渗流，中部条带共存着乳状液及泡沫渗流，后部条带主要为泡沫渗流。

实验发现泡沫在微观上具有良好的封堵效果，能选择性地封堵高渗透大喉道，提高了驱替液的波及体积。宏观的填砂模型驱替实验发现阻力系数随着岩心渗透率的提高而增大，显示泡沫对高渗透大喉道有较理想的封堵效果。

由于原油的黏度不同，在稠油和稀油中的泡沫驱微观驱油机理也不相同。稠油泡沫驱油微观机理有乳化分离、剥离油膜、搅动、堵塞大喉道及高黏度控制流度比。相比稀油原油黏度小，小气泡易挤入原油产生挤入、切割原油现象，稠油泡沫驱微观驱油机理不相同；并且空气的氧化还原作用和泡沫剂降低界面张力作用都能有效地降低原油黏度。