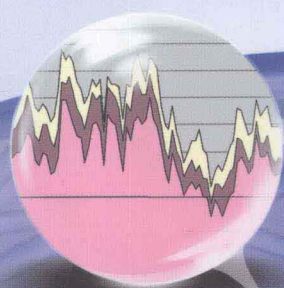


空气泡沫调驱提高采收率技术

吴信荣 林伟民 姜春河 等编著



石油工业出版社

空气泡沫调驱提高采收率技术

吴信荣 林伟民 姜春河 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书较系统地阐述了高温、高盐、高二价金属阳离子钙、镁条件下中高含水油藏空气泡沫驱油技术。书中围绕空气泡沫调驱机理、泡沫体系、数值模拟、注入工艺、安全控制技术以及现场实施进行了研究分析。内容注重实践,同时探讨了相关理论,有一定的参考价值。

本书可供油田工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

空气泡沫调驱提高采收率技术/吴信荣 林伟民 姜春河等编著.
北京:石油工业出版社,2010.10
ISBN 978-7-5021-8023-2

I. 空…

II. ①吴…②林…③姜…

III. ①泡沫驱油

IV. ①TE357.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 177905 号

空气泡沫调驱提高采收率技术

吴信荣 林伟民 姜春河 等编著

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)

发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:濮阳市卓越彩印有限公司

2010 年 10 月第 1 版 2010 年 10 月第 1 次印刷

889×1194 毫米 开本:1/16 印张:21.5

字数:416 千字

定价:80.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

中原油田 1979 年投入开发,经历了初期建产能和高速上产阶段。随着油藏开发中主力层水淹、产量逐步递减的瓶颈问题的出现,中原油田先后开展了两轮科技攻关会战,攻克了一些关键技术难题,油藏的平均采收率达到了 28.88%,部分主力油藏的采收率则达到 40% 以上,分别接近或超过油藏标定的采收率目标。

如何较大幅度地提高原油采收率,石油科技工作者进行了大量的探索与实践,先后研究应用了化学调剖、聚合物驱、表面活性剂驱、微生物驱、气驱(主要是二氧化碳或天然气驱),进而又发展应用了二元驱、三元驱等三次采油技术。大庆、胜利等油田的化学驱已相当成熟,现场应用已有相当大的规模,并取得了巨大的效益。

由于中原油田的油藏深,一般 2500 ~ 4500m;油藏温度高,一般 85 ~ 135℃;地层水矿化度高,一般 150000 ~ 350000mg/L;而其中的钙、镁离子高达 4500 ~ 9000mg/L。在这样苛刻的条件下,化学驱已是无能为力。通过调研分析,中原油田的三次采油技术突破点应在气驱技术领域,即二氧化碳驱、氮气驱、天然气驱、烟道气驱、空气驱等。经分析论证,选择了气源易得的空气作为三次采油的注入驱替气体。为了实现空气的安全注入,提出了在中高渗、中高含水油藏先进行空气泡沫调驱,待取得经验后再进行空气或空气泡沫驱的技术路线。

几年来,中原油田采油工程技术研究院的技术人员与中国石油大学(华东)的部分教授学者联合,进行了有益地探索。先后在空气泡沫调驱提高采收率机理、泡沫体系、数值模拟、注入配套工艺、安全控制技术等方面进行了研究,并经矿场应用实践取得了良好效果,为目前中原油田开展的空气泡沫驱提供了有益的借鉴。为了及时总结和应用这些成果,促进科技人员继续进行创新和探索,编写了此书。

具体各章编写人员:第一章:吴信荣、林伟民、张志远;第二章:王杰详、任绍然、刘晓平;第三章:姜春河、肖良、高海涛、许振华;第四章:张庆生、任绍然、王英华、王开秀;第五章:林伟民、高海涛、肖良;第六章:任绍然、林伟民、范锡彦;第七章:林伟民、王开秀、肖良。

本书由吴信荣、林伟民、姜春河等组织编著;肖良、高海涛、赵百万等负责初稿校排;林伟民、高海涛、李雪峰、许振华等对全书分章节进行了初审,林伟民进行了统审,最后由吴信荣教授对全书进行了终审定稿。书中不足之处在所难免,恳请各位读者提供宝贵意见。

编 者

2010 年 6 月

目 录

第一章 空气驱、泡沫驱和空气泡沫调驱技术.....	1
第一节 注空气驱油技术	1
第二节 泡沫驱油技术	9
第三节 空气泡沫调驱技术.....	20
第二章 空气泡沫调驱提高采收率机理及影响参数.....	28
第一节 空气泡沫驱油机理分析.....	28
第二节 原油静态氧化反应实验.....	41
第三节 注空气/空气泡沫动态氧化实验	68
第四节 空气泡沫封堵能力实验.....	80
第五节 空气泡沫调驱提高采收率实验.....	86
第六节 结论.....	99
第三章 空气泡沫调驱起泡剂及泡沫体系	100
第一节 起泡剂筛选	100
第二节 泡沫体系	104
第三节 结论	114
第四章 空气泡沫调驱数值模拟方法	115
第一节 胡 12 块沙三中 8^{6-8} 油藏数值模拟模型的建立.....	115
第二节 胡 12 块沙三中 8^{6-8} 油藏历史拟合.....	127
第三节 剩余油富集区及分布特征	154
第四节 空气泡沫驱数值模拟方法及实验	157
第五节 胡 12 块空气泡沫驱三维油藏数值模拟.....	173
第六节 结论	185
第五章 注空气/空气泡沫工艺配套技术.....	187
第一节 现场氮气泡沫试注工艺	187
第二节 注入参数优化设计	191
第三节 注入及产出流程优化设计和注入管柱设计	193
第四节 注入系统的防腐技术	196

第六章 注空气/空气泡沫工艺安全技术	215
第一节 气体混合物爆炸理论	215
第二节 空气、天然气混合爆炸特性实验.....	223
第三节 注空气过程中主要安全隐患及防护措施	237
第四节 注空气工艺安全评价	242
第五节 现场监测规定和安全控制措施	267
第六节 结论	268
第七章 现场试验及效果分析	270
第一节 试验区油藏特征	270
第二节 现场试验	304
第三节 注采动态变化	311
第四节 试验效果及结论	331
参考文献	335

第一章 空气驱、泡沫驱和空气泡沫调驱技术

注空气驱油技术是一项富有创造性的提高采收率技术。注空气驱油气体来源广,不受地域和空间的限制,气源丰富,成本廉价,氧化反应产生的热效应也可增加采收率。但对我国大多非均质(中高渗夹层)薄层、无倾角的水平地层来说,由于气窜和粘性指进,单纯注空气的驱油效率受到限制,并导致氧气窜到油井引起一些安全隐患。利用泡沫能降低水和气的相对渗透率,增加驱油效率和波及体积,可大幅提高油藏采收率。因此,注空气泡沫能充分发挥泡沫驱与空气驱两种技术的优点,效果明显,尤其适用于高含水、非均质严重的油藏调驱提高采收率。中原油田采油工程技术研究院与中国石油大学(华东)合作,近年开展研究,并已经投入矿场试验应用的“空气泡沫调驱提高采收率技术”为一项提高中高渗高含水油藏采收率的有效技术。

第一节 注空气驱油技术

在石油开采的历史上,油田经历了一次采油(地层原始压力采出)、二次采油(注水)和三次采油(注聚合物、表面活性剂等)等开采方式。目前,大部分油田主要以注水为主,再辅以注聚合物、表面活性剂等三次采油手段。基于多年来我国低渗透油藏开发以注水为主,采收率比较低,部分渗透率过低的油藏,水难以注入,因此为提高低渗轻质油油藏的原油采收率,就需要开发新的开采技术。

空气注入到轻质油油藏中以提高石油采收率,是注气开发技术应用的新领域。注空气采油既可以用于重油油藏,又可用于轻质油和中等重度的油藏。注空气驱油主要包括重油火烧油层开采技术和空气注入轻质油油藏低温氧化开采技术。

注空气能够有效提高低渗透轻质油油藏的采收率。空气具有来源广阔、不受地域和空间的限制、气源丰富、成本廉价等优点。由于空气流动性比水要好,因此,注空气能解决超低渗油藏注水难以注入的问题。空气与原油发生氧化反应后会产生以下有利因素:空气中 O_2 消耗后可实现氮气驱维持油藏压力的效果;由于 O_2 的氧化作用,生产了一定量的 CO_2 和 CO ,一些轻油组分因产生的热量而蒸发,这样就会形成 N_2 , CO_2 , CO 和部分轻油组分所组成的“烟道气”,直接起驱替作用的不是空气而是烟道气;氧

化反应产生的热量能够降低原油黏性,有利于原油的流动。

因此,注空气开采低渗透轻质油油藏是一项很有前景的提高原油采收率技术,研究注空气开采的机理并进行室内模拟实验,对注空气现场采油具有重要的指导意义。空气与实际油藏原油经过低温氧化反应后,原油组成和气体组成发生变化,原油的性质也随之发生一些改变,原油能否被采出,除了与岩层的孔隙度、渗透率等参数有关外,还与原油本身的组成和化学性质有关;原油发生低温氧化反应后,释放热量。分析原油组成及气体成分变化、原油性质变化、低温氧化发热升温程度对于了解注空气后轻质油油藏条件变化和驱替机理的认识有重要意义。

一、注空气驱油国内外研究进展

1. 注气采油的历史及国内外现状

近年来,采用注气驱提高(或改善)原油采收率以其逐年增长的态势和显著的成效,逐渐成为当今世界石油开采业中具有潜力和良好发展前景的一项技术。注气提高原油采收率技术,包括烃类气体、 CO_2 、 N_2 、烟道气以及空气的注入等混相驱和非混相驱技术。注气已成为除热采以外发展较快的提高石油采收率技术,其领先者是美国和加拿大。在美国,注气主要以 CO_2 为主导,因为那里有相当大的 CO_2 储量;加拿大天然气资源丰富,以烃类气驱为主。提高采收率二次潜力评价结果分析,目前我国适合注气开发的储量范围较大,特别对那些不适宜注水储油层(如低渗透、强水敏储层等),注气是提高采收率切实可行的一种开发方式。早在 20 世纪 60 年代,我国大庆油田就开始了注气试验,而后其他油田也相继开展了对该项技术的探索、研究与实践,只是由于受压缩机装备限制,以及缺乏稳定、充足的高压气源,该技术的工业化应用受到较大程度的限制。从总的情况来看,除吐哈葡北油田,即我国的第一个注混相驱二次采用现场试验,取得了显著的成效之外,我国目前涉及的注气提高石油采收率的技术应用还处在室内实验和小型矿场试验阶段,与国际水平相比尚存在明显的差距。

2. 注空气驱油历史及现状

空气注入到油藏以提高原油采收率,是注气开发技术应用的新领域。注空气采油既可以用于重油油藏,又可用于轻质和中等重度的油藏。注空气驱油主要包括重油火烧油层技术和空气注入轻质油油藏低温氧化技术。

高压注空气低温氧化工艺主要应用在高温低渗透轻质油油藏。

对于轻质油油藏原油低温氧化动力学的研究,一开始主要沿用研究火烧重油油藏的试验方法和试验设备。如 TOTAL、University of Salford、Middle East Technical University 等国外研究机构或大学采用燃烧管、高压釜等设备改进装置,填充经粉碎的油藏岩心或固结岩心,来研究原油氧化动力学,获取动力学参数活化能、反应级次等。

在此基础上,英国 Bath 大学采用等温反应器(SBR)实验来专门研究空气与原油

氧化速率。定量空气与定量原油在油藏条件下反应,利用气压的变化来测量氧化速率,同时还可分析氧化后的气体成分和油组分变化。SBR 实验研究在空气与原油低温氧化动力学方面做出了重要贡献。

目前,国外多采用高压小等温反应器进行静态研究。在静态条件下,通过检测体系压力下降的速度来确定反应过程中氧气的消耗速度,并测试其气体的组成。

该反应器主体是高压反应管,其最大操作压力为 34MPa,反应器有效样品体积为 100mL,反应器水平放置于圆柱型加热槽内,其温度控制在 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$,实验中把已知量的油或油加岩心置入反应槽中。在所需压力下填充反应气体(空气),然后把反应器加热到所需的工作温度。由于氧气在氧化作用下被消耗掉,故正常情况下可观察到压力下降。利用其压降可求出反应速度。反应之后生产的气体(O_2 , CO_2 和 CO)排放到气体分析器中进行分析。试验结果表明,在油藏温度下,氧化作用的主要产物是碳的氧化物和水。尤其是北海低黏油,在氧气几乎完全耗尽的条件下,通过低温氧化反应将生成 9% CO_2 和 1% CO (初始空气量为油量的三倍)。

国外在火烧重油油藏基础之上,针对一些水驱后的油藏,开展了注空气低温氧化技术研究,并且在美国的 MPHV 油田、West HackBerry 油田以及 Horsecreak 油田等应用了多年,这些现场作业都见到明显的效果。

近几年,注空气驱油技术的研究在国内才刚刚起步,正处于实验室研究阶段。中国石油勘探开发研究院与吐哈油田分公司勘探开发研究院针对吐哈油田的低渗透油藏做了注空气采收率实验研究。西南石油学院对原油与空气低温氧化反应的氧气消耗情况以及原油采收率、反应后气体组成进行了研究。另外,中原油田、河南油田、胜利油田均进行了注空气提高采收率技术研究,并取得了大量的科研成果和良好的矿场应用效果。

二、注空气开采低渗透油藏原理

1. 轻质油油藏中原油低温氧化过程

根据原油与氧气发生低温氧化的不同反应阶段,轻质油油藏注空气过程可以划分为 3 个区域,即氧化反应后缘区、氧化反应前缘区和氧气未波及区,空气驱不但具有一般注气的作用,而且具有氧化产生的其他效果。空气注入油藏后,氧气和原油发生放热反应,在这种以氧化放热反应为主的过程中,消耗氧气生成碳的氧化物以及反应产生的热量使油层温度升高,促使轻质组分蒸发。因此,直接起驱油作用是在油层内生成的 CO , CO_2 以及由 N_2 和蒸发的轻组分等组成的烟道气。

2. 轻质油油藏注空气提高采收率机理

空气注入轻质油油藏提高采收率技术综合了许多驱油机理,对不同的油藏来说,其驱油机理也有所不同,归纳起来有以下几种。

(1) 高压注空气提高或维持了油藏压力。

(2) 通过原油低温氧化把空气中的氧气都消耗掉,至少可实现氮气驱或间接的烟道气驱。

(3) 在适当的油藏压力下,烟道气可与原油之间发展为混相驱。

(4) 由于氧化反应的热效应可以产生原油降粘、热膨胀效应。

(5) 对陡峭或倾斜的油藏顶部注空气还能产生重力驱替作用。

轻质油油藏的注入井与采出井的距离一般为几百米。在注气过程中,由低温氧化反应产生的驱替气,主要由 CO_2 , CO , N_2 和被蒸发/抽提过的烃类组成。在气体突破前,产出的油是未反应的原始油。在驱替前缘前面的油和水是由“烟道气”驱替出来的,在前缘的后面仍然有大量的油被留下与注入的氧反应。离注入井距离越远,采出气中的氧浓度越低。

烟道气中主要成分是氮气,另外含有少量的一氧化碳和二氧化碳,因此烟道气起驱替作用的主要是氮气。氮气提高采收率主要有以下几个方面的作用。

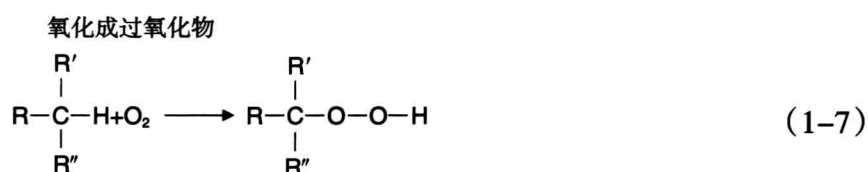
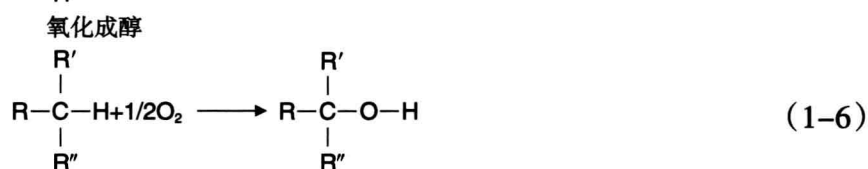
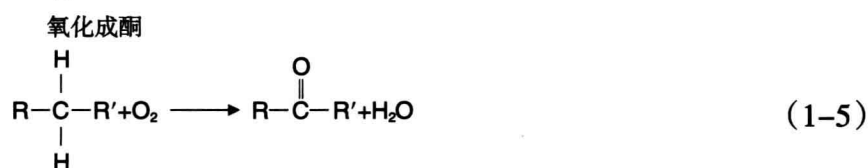
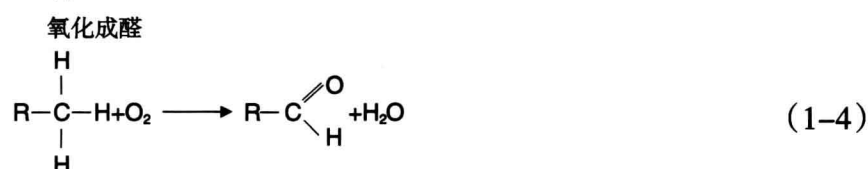
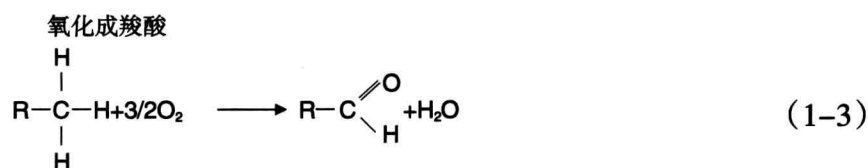
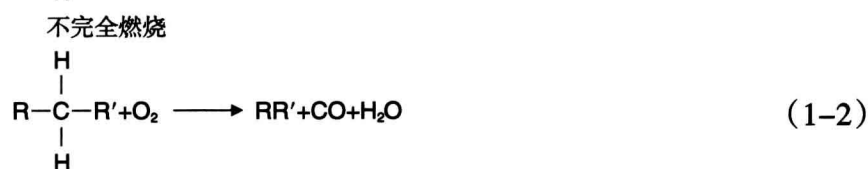
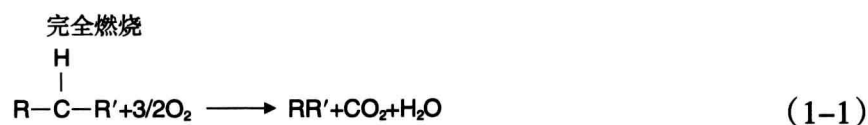
(1) 重力稳定驱替。用氮气进行混相驱替,往往 MMP(最小混相压力)比较高,实际的油藏压力不能满足要求。但是氮气与乙烷以上烃类气体含量高的天然气、二氧化碳等相比,密度较小,而且在油、水中的溶解性也很微弱,这些特点是氮气进行重力稳定驱油的有利条件。

(2) 驱替溶剂段塞。因为二氧化碳和烃类气体资源的价格不如氮气优越,为了降低二氧化碳和烃类气体混相驱的成本,充分利用二氧化碳、烃类气体等溶剂的资源,采用氮气推动溶剂段塞混相驱以提高采收率。如果溶剂段塞的尺寸选择合理,用氮气推动溶剂段塞的驱油效果和连续注入溶剂的效果是相同的,而前者的经济效益要比后者高得多。

用烟道气提高石油采收率的效果介于二氧化碳和氮气之间。烟道气不仅具有与二氧化碳类似的改变油流特性的机理,还具有氮气驱油的优点。

三、低温氧化过程

低温氧化的机理是,当原油与空气接触时,可以同空气中的氧发生低温氧化(LTO),也可以发生高温氧化(HTO 或称为燃烧)。对原油中碳氢化合物(烃类)的氧化过程描述如下[见反应式(1-1)~反应式(1-7)]:



反应式(1-1)和反应式(1-2)在高温下(大于300℃)反应导致碳氢化合物被破坏,生成CO₂,CO和H₂O。反应式(1-3)~反应式(1-7),在低温下(小于300℃)发生反应,导致氧原子与碳氢化合物分子连接,生成羧酸、醛、酮、醇或过氧化物和水,几乎没有CO₂和CO产生。反应式(1-3)~反应式(1-7)的表述详见图1-1。但也有研究发现原油(API度为31.1~10.1,即相对密度0.8702~0.9993,黏度14~54300mPa·s)在低温(90~120℃)下产生氧化现象,有二氧化碳和水产生,其主要原因是反应产生的已氧化的原油组分经再度氧化转化成了二氧化碳。因此,原油的低温氧化(LTO)是非常复杂的,不可用简单的反应产物或单一的反应途径来进行描述和解释。

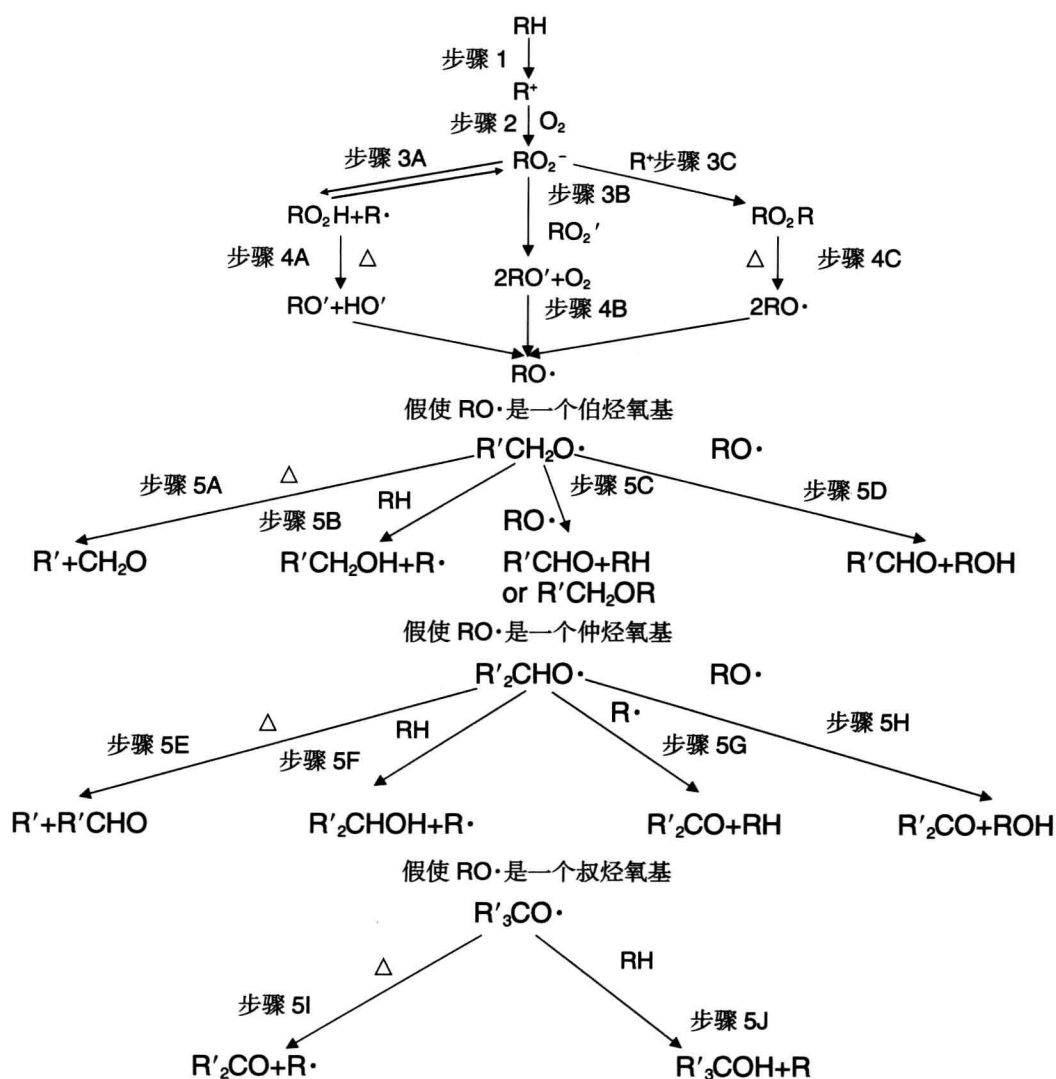


图 1-1 原油低温氧化机理

在油藏条件下 $100 \sim 120^\circ\text{C}$ 左右空气与轻质原油会触发自行燃烧,但只能在高速空气注入的条件下可能产生这种情况。若氧在非均质油层中的低速率燃烧,不能消耗所有的注入氧,余下的氧绕过燃烧前沿,产生绝热放热不连续,导致原油只能经历低温氧化过程。

原油低温氧化反应产生 CO_2 可能是由于某些碳氢化合物,特别是饱和的碳氢化合物,能被氧化成中间化合物,如醛、酮、醇等。这些中间化合物能进一步被氧化形成过氧化物,过氧化物通过脱羧产生 CO_2 。实验证实 CO_2 是轻质原油低温氧化的主要的气体产物。

四、中原油田注空气驱油试验研究

1. 空气驱低温氧化驱油试验装置

由于空气驱的特点是通过多级接触混相,而且是低密度、低黏度流体驱替高密度、

高黏度流体,因此,油层模型设计必须满足以下两个基本条件:

- (1)油层足够长,能够满足经过多级接触后形成氧化带、混相带和油带所需要的长度。
- (2)波及系数要求尽可能大,以避免波及系数对气驱的影响。

为此,须将油层模型设计成具有足够长度,而直径小到能忽略重力分离和粘性指进的尺寸。在试验时采用了不锈钢管模型,内部用人工精选的砂砾充填以模拟实际油层渗透率,模型长 18.0m,该模型的主要特点是管长(18.0m)、耐高温(300℃)和高压(40MPa)。

2. 试验结果及其分析

针对中原油田胡 12 块油藏脱水脱气原油,在 20MPa、23MPa、26MPa 和 70℃、90℃、110℃ 下进行注空气低温氧化动态驱油试验,结果见表 1-1。

表 1-1 空气驱实验结果

温度 ℃	注入压力 MPa	出口压力 MPa	气体突破时间 h	突破气体含氧量 %	气体突破时驱油效率 %
70	20	14	6.67	11.80	20.5
70	23	15	6.34	12.15	19.9
70	26	20	8.17	8.24	21.5
90	20	14	5.34	8.71	22.8
90	23	15	5.00	9.39	21.3
90	26	20	7.58	7.95	23.6
110	20	14	4.75	8.14	24.5
110	23	15	3.67	7.45	24.1
110	26	20	4.84	7.44	27.3

为便于分析,定义注入压差与注入压力的比为无因次压力,对表 1-1 中的数据进行分析,分析结果详见图 1-2 ~ 图 1-4。

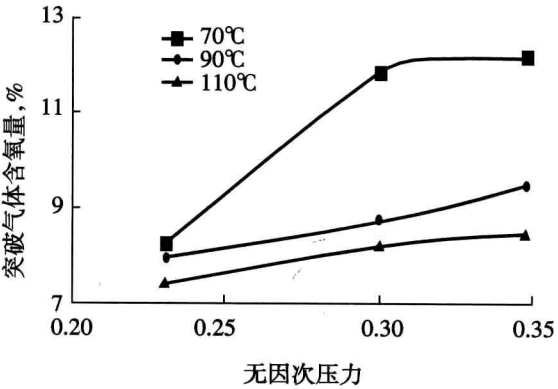
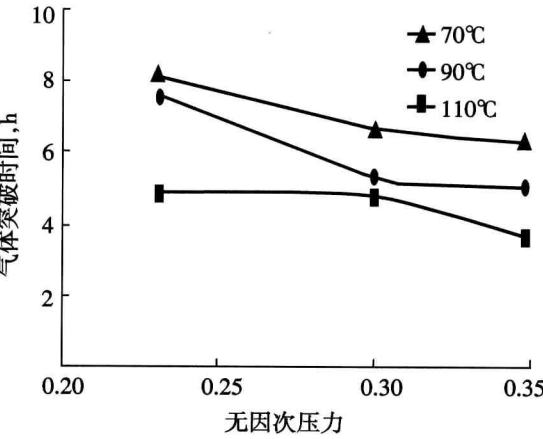


图 1-2 气体突破时间与无因次压力的关系 图 1-3 气体突破时氧含量与无因次压力的关系

由图 1-2 ~ 图 1-4 中可看出:

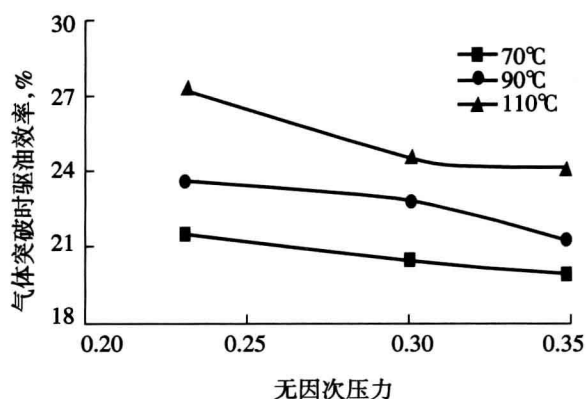


图 1-4 气体突破时驱油效率与
无因次压力的关系

(1) 温度一定时,随着无因次压力的增加,气体突破时间缩短,突破气体含氧量增大,气体突破时驱油效率降低。如 70℃,当无因次压力由 0.231 增加到 0.348 时,气体突破时间由 8.17h 缩短到 6.34h,突破气体含量由 8.24% 增加到 12.15%,气体突破时驱油效率由 21.5% 减小到 19.9%。

(2) 无因次压力一定时,随着温度的升高,气体突破时间缩短,突破气体

含氧量减小,气体突破时驱油效率增加。例如,当无因次压力为 0.348,温度由 70℃ 升高至 110℃ 时,气体突破时间由 6.34h 缩短至 3.67h,突破气体含氧量由 12.15% 减小到 7.45%,气体突破时,驱油效率由 19.9% 增加到 24.1%。

3. 几点认识

(1) 针对中原油田胡 12 块油藏脱水脱气原油,在三个不同注入压力 (20MPa、23MPa 和 26MPa) 和三个不同驱替温度 (70℃、90℃ 和 110℃) 下进行了注空气低温氧化动态驱油试验,为中原油田提高采收率探索了一种新方法。

(2) 试验采用自制的高压长氧化管模型,将空气注入试验模型中,空气和模型中原油在一定温度、压力下发生低温氧化反应,空气中的氧气被大量消耗,从而在一定程度上验证了注空气低温氧化驱油机理。

(3) 温度、注入压力和压差对气体突破时间、突破气体含量和气体突破时驱油效率的影响不同。试验结果表明,在高温地层采用高注入压力、低压差注空气驱油时,随着气体与原油反应时间的增长,产出气中含氧量不断降低。

(4) 注空气驱油技术油藏针对性强,目标油藏的选择应根据油田实际情况及注气设备的状况,对注空气驱油的关键技术 (如安全措施、产出气处理技术等) 进行综合评估。

五、低渗透油藏注空气面临的问题

我国低渗透油藏开发面临的问题从总体上讲属“难注入、低采出”,在注空气方面面临的问题主要是:

(1) 低渗透油藏注空气压力高,注入能力低。由于低渗透油藏渗透率低,对注入气质量要求高,要注意注气可能对地层造成的伤害;由于注入压力高,对压缩机压力等级提出了更高的要求。

(2) 低渗透裂缝油藏注空气防气窜技术。很多低渗透油藏都有裂缝, 如何开展裂缝性油藏注空气, 防止气窜, 是一个技术难题。可以考虑采用不同的注入方式来提高原油采收率。

(3) 低渗透油藏的岩心物理模拟及注空气评价问题。低渗透油藏注水困难, 取出岩心后恢复原始地层条件非常困难; 如果带有裂缝, 又很难取得有代表性的岩心, 如何进行基质造缝, 并能代表地层实际情况也是一个严峻的挑战。

(4) 防止固相沉积的问题。在注空气过程中, 尤其是高含蜡及沥青质油藏, 由于 CO_2 和 N_2 的抽提作用, 易产生固相沉积, 对低渗透油藏提高采收率开发将会产生影响。

第二节 泡沫驱油技术

利用表面活性剂发泡性配成驱油剂进行采油的方法称为泡沫驱。泡沫驱是在三元复合驱基础上发展起来的一种新的驱油方法。泡沫用于油田开发已有 50 多年的发展历史, 泡沫驱既能显著提高波及效率, 又可提高驱油效率, 同时又减小了以往化学驱导致的环境伤害, 是一项有发展前途的改善和提高原油采收率技术。

自 1958 年 Bond D. C. 和 Helbrook O. C. 首先提出用烃气泡沫进行流度控制的设想以来, 泡沫被用来提高或改善原油采收率的技术有了很大发展。泡沫在蒸汽采油中已成功工业化推广应用 (FAST—泡沫辅助蒸汽采油), 泡沫在气驱中有成功的现场实例 (FAWAG—泡沫辅助水气交替驱油), 在化学驱或水驱中应用泡沫也有现场试验效果明显的报道。应用泡沫驱可以提高采收率 8% ~ 10%。由于泡沫还具有密度小、体积大、不伤害地层等优点, 因此泡沫驱潜力大, 引人注目。

一、泡沫的性质

泡沫是不溶性或微溶性的气分散于液体中所形成的分散体系, 是由液体薄膜包围着的气体形成的单个气泡的聚集物, 其中气是分散相 (不连续相), 表面活性剂溶液是分散介质 (连续相)。分散介质可以是固相, 也可以是液相。前者称为固体泡沫, 如泡沫水泥; 后者称为液体泡沫, 即通常所说的泡沫, 如灭火泡沫、浮选泡沫、钻井泡沫等。

1. 泡沫的物理特性

1) 压缩性

泡沫总体积中气体部分的体积含量称为泡沫质量, 液体部分的体积含量称为泡沫湿度。通常泡沫质量的变化范围是 50% ~ 99%, 若泡沫质量低于 50%, 这种水—气混合物的状态是液体中悬浮着气泡和没有气泡的单一流体。由于气体的存在, 这种流体

可以压缩。泡沫的液体部分本质上是不可压缩的,而气体部分是可以压缩的,所以这种流体为半压缩体。泡沫质量与压力有关。按照波义耳定律,若压力为 p_1 , 泡沫质量为 r_1 , 则在压力 p 下的泡沫质量 r_p 为 $r_p = p_1 r_1 / ((1 - r_1)p + p_1 r_1)$, 此外, 由于气液界面上吸附了表面活性剂分子, 使液体薄膜具有弹性, 能够经受压缩和减压膨胀。

2) 流变性

用范氏黏度计和爱波里脱 (Epprecht) 同轴筒黏度计直接测定泡沫的表观黏度得知, 泡沫具有非牛顿流体特性。由图 1-5 看出, 泡沫是一种假塑性流体, 在低剪切速率下具有很高的表观黏度, 但其黏度随剪切速率的增加而降低。图 1-6 是不同剪切速率条件下泡沫质量对表观黏度的影响。由图 1-6 看出, 在一定剪切速率下, 泡沫的表观黏度随泡沫质量的增高而升高。

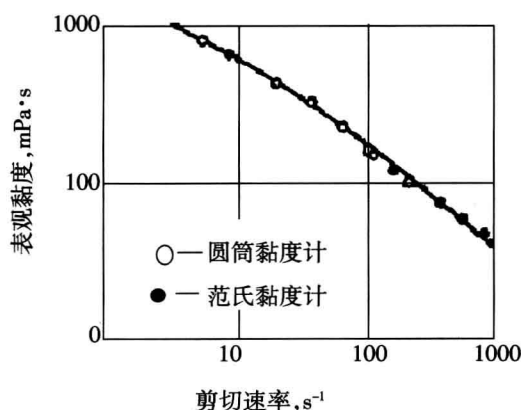


图 1-5 质量为 92.5% 的泡沫的流变曲线

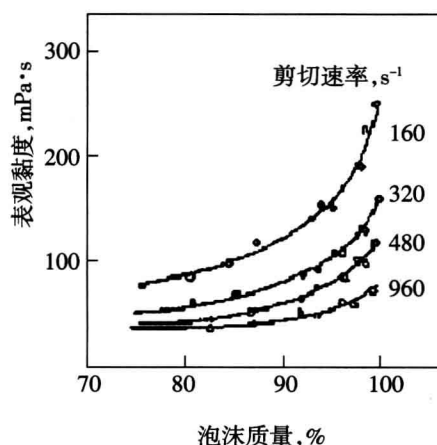


图 1-6 泡沫质量对泡沫表观黏度的影响

3) 稳定性

泡沫具有十分巨大的气液界面面积, 因而有较高的表面自由能。从热力学角度看, 泡沫是不稳定体系, 自由能具有自发减少的倾向, 导致泡沫的逐渐破灭, 直至气、液完全分离。然而体系中表面活性剂的存在, 大大降低了气、液之间的界面张力, 使泡沫具有了相对的暂时稳定性。

泡沫稳定性通常是以一定数量的泡沫样品在单位时间内的排出液量来度量的。排出液量越多, 则泡沫越不稳定。泡沫稳定性与泡沫质量和体系中的液相黏度有关, 泡沫质量越高, 泡沫稳定性越好 (见图 1-7); 液相黏度增加, 可增加液膜的机械强度, 因而稳定性变好, 但是如果液相黏度过高, 不仅阻碍气体在液相中的分散, 而且不利于活性剂分子在液膜中的移动, 体系在受到物理和机械作用时, 便会产生严重的降解, 这时泡沫稳定性是随泡沫质量的升高而降低的 (见图 1-8)。

4) 油敏性

泡沫的油敏性反映泡沫与油类接触时的稳定性特征。泡沫在空气中静置时, 一般

在 30 ~ 50min 后才能排出全部液体,而当与油类接触时,只需几分钟即可将液量全部排出。可以说,无论用何种表面活性剂配制的泡沫,接触油类后,稳定性总是降低的。

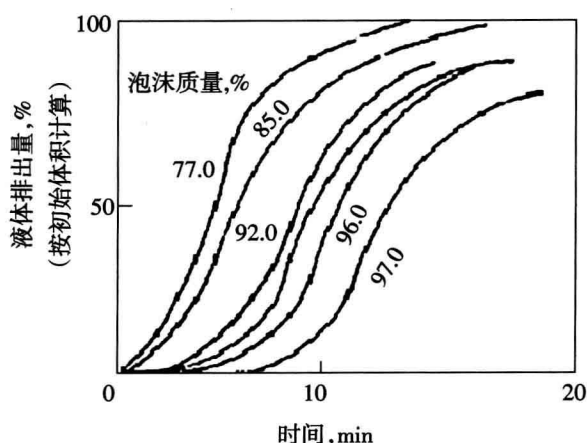


图 1-7 泡沫质量对泡沫稳定性的影响

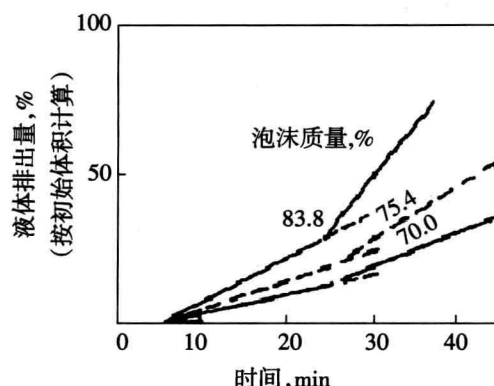


图 1-8 高黏度起泡液形成的泡沫稳定性

2. 泡沫在多孔介质中的渗流特性

泡沫在多孔介质中渗流时,表现出以下独特的渗流性。

(1) 泡沫在渗流时不断地破灭与再生。

向模型管内同时注入气体和发泡液进行发泡试验时,在泡沫流动过程中,用 X 射线测定模型管中的液体饱和度分布情况,不管孔隙介质内的实际压力大小和泡沫质量的高低,除模型入口端一小段内含水饱和度较高外,液体在整个模型管内的分布几乎是均匀的(见图 1-9),即泡沫在孔隙介质中的分布是均匀的。

通过透明模型可以清楚地看到,泡沫在多孔介质内渗流时,并不是以连续相的形式通过介质孔隙的,而是不断地破灭与再生,气体在泡沫破灭和再生过程中向前运动,液体则通过气泡液膜网络流过孔隙介质。液体是连续相,气体是非连续相。孔隙介质的作用像一个可变的滤器,泡沫的两相以不同的速度在孔隙介质中移动,气体比液体移动得快。

(2) 泡沫在多孔介质中具有很高的视黏度,视黏度随介质孔隙度的增大而升高。

泡沫在多孔介质中渗流时,其视黏度(表观黏度或有效黏度)比活性水和气体的黏度都高得多,并随介质孔隙度(或渗透率)的增大而升高(见图 1-10)。泡沫是假塑性流体,黏度随剪切应力的增加而降低。孔道大则流速低,剪切应力小,因而视黏度较高。泡沫的这种特性,不利于它在大孔道中的流动,而有利于在小孔道中的流动,非常适合于非均质油层驱油。

(3) 泡沫在含油孔隙介质中稳定性变差,并随介质含油饱和度的升高而降低。