

李士伦 郭 平 王仲林 等著

中低渗透油藏注气 提高采收率理论及应用

ZHONGDI SHENTOU YOU CANG ZHU QI
TIGAO CAISHOULU LILUN JI YINGYONG



中低渗透油藏注气 提高采收率理论及应用

李士伦 郭 平 王仲林 等著

石油工业出版社

内 容 提 要

中低渗透油藏注气是提高采收率的重要技术,本书针对中低渗透油藏注气过程中的关键理论与技术问题,系统介绍了注气与原油相态、长岩心气驱、固相沉积、油藏聚合物驱后注气、最小混相压力等特殊物理模拟技术与理论以及注气物质平衡方法、裂缝性油藏注气分子扩散理论、考虑固相沉积影响的组分模型,注气方案设计、注气动态监测技术等内容,最后介绍了注气方案设计实例。

本书可为相关工程技术人员提供参考,也可作为从事注气研究人员及高校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

中低渗透油藏注气提高采收率理论及应用/李士伦,郭平,王仲林等著. —北京:石油工业出版社,2007.11

ISBN 978-7-5021-6308-2

I. 中…

II. ①李… ②郭…

III. ①中渗透油层-油田注气-采收率(油气开采)-研究

②低渗透油层-油田注气-采收率(油气开采)-研究

IV. TE 357.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 163001 号

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.cn

发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2007 年 12 月第 1 版 2007 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:13.5

字数:344 千字 印数:1—1500 册

定价:48.00 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

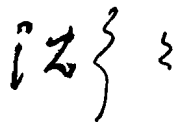
序

随着国民经济的快速发展，对油气资源的需求越来越大，而中低渗透油藏由于低产、低渗、低丰度、开发难度大，成为难采和难动用储量的重要组成部分。注气作为中低渗油藏提高采收率的重要技术手段受到越来越多地重视。

据美国油气杂志 2006 年统计，国外目前执行 138 个注气项目，其中注二氧化碳采油项目 94 个，占 68%，注天然气采油项目 35 个占 25%，注氮气采油项目 5 个，酸气 4 个，绝大部分均取得很好效果。渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 注气 45 个，小于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 中有 76 个，占 55%，混相驱 126 个占 91%、非混相驱 12 个占 9%，这说明低渗透油藏注气适应程度高，注 CO_2 和混相驱占主导地位。2006—2007 年全世界计划执行 EOR 项目： CO_2 混相驱 15 个，非混相 1 个，蒸汽驱 7 个，聚合物驱 2 个，火烧油层 2 个，表面活性剂-聚合物 2 个，说明了注气驱在提高中低渗油藏采收率中的重要地位。

我国注气开发相对较晚，大部分属于先导性试验，工业化应用的较少，但也取得了一些进展，正在实施的有吐哈葡北注烃水交替混相驱及温五注烃气非混相驱；江苏草舍油田注 CO_2 混相与大庆芳 48 注 CO_2 非混相驱；吉林、胜利等多个油田也正在开展设计，准备实施注气工程，但总体来说，开发经验不足，评价与分析配套技术不完善。本书针对中低渗透油藏注气过程中的关键理论与技术问题，以国家重点实验室开放基金“中低渗透油藏注气提高采收率理论及应用”项目成果为基础，系统介绍了注气与原油相态、长岩心气驱、固相沉积、油藏聚合物驱后注气、最小混相压力等特殊物理模拟技术与理论以及注气物质平衡方法、裂缝性油藏注气分子扩散理论、考虑固相沉积影响的组分模型，注气方案设计、注气动态监测技术，最后介绍了注气方案设计实例。

本书从实验和机理研究出发，形成了相关配套理论与技术，并应用于生产实际中，反映了目前注气研究的最新进展，对注气工程发展有重要指导意义，是一本值得一读的注气专著。



2007 年 3 月 11 日

前 言

我国中低渗透油藏类型多,地质情况复杂,开发难度大,有相当部分低渗透储量由于产量低达不到经济极限而不能投入开发。注气作为低渗透油藏开发的重要技术之一在全世界已得到广泛的应用,我国也有不少的低渗透油田开展过相关的现场试验,但还未得到大规模推广使用,为了在我国推广应用注气技术,提高中低渗透油藏注气开发技术水平,油气藏地质及开发工程国家重点实验室特设立此项目,主要针对注气过程中的基础与应用问题开展研究,取得了系列成果。

一、研究内容及目的

(1) 注气对油藏相态影响实验与理论:注气过程中气与原油会产生强烈的物理化学作用,是注气设计的必要基础参数,还可为方案设计提供基础相态参数。

(2) 长岩心注气驱油效率评价技术:通过高温高压回压阀研制、注气驱油评价采收率高低、评价驱油方式、压力及驱油效率等,为开发方案设计提供基础参数,通过拟合实验结果还可为方案设计提供气驱油相渗曲线。

(3) 不同韵律油藏聚合物驱后注气评价技术:研究聚合物驱后注气可行性评价。

(4) 固相沉积实验测试与理论:注气过程中由于气体的抽提作用,会产生固相沉积,而固相沉积会造成地层伤害,因此该研究有助于开展工程设计。

(5) 最小混相压力实验与理论研究:混相压力是注气的关键参数,用以确定注气压力、注入方式以及采收率等。

(6) 注气物质平衡方法研究:目前已有水驱动态曲线,而没有气驱特征曲线,研究注气物质平衡,有利于建立气驱动态曲线,为注气动态分析提供基础。

(7) 油藏注气分子扩散行为研究:在注气过程中气有扩散作用,然而研究较少。

(8) 注气方案设计配套技术:为注气方案编制提供依据。

(9) 示踪剂及地震技术在注气动态监测中的应用:便于更好地研究注气效果。

二、取得的创新成果及应用

通过教育部科技查新工作站查新可知,在国内外公开的文献报道中,涉及“中低渗透油藏注气提高采收率理论及应用技术”方面研究成果中国内外未见报道以下7个内容:

(1) 导出基于状态方程为基础的气相和液相热力学模型与以溶液理论为基础的固相热力学模型有机统一的气-液-固三相平衡热力学模型;

(2) 提出了考虑有机固相沉积作用的三维四相(油相、气相、水相和有机固相)多组分数学模型,同时建立了相应的模拟计算模型;

(3) 提出考虑注气对相态影响及相间传质的注气物质平衡方程;

(4) 建立了考虑分子扩散作用的裂缝性油藏注气开采三维三相黑油数学模型和数值模型;

(5) 研制了高温高压低启动压差回压阀,用于将驱替实验系统回压控制到实验压力,并获得专利;

(6) 建立了长岩心网状裂缝物理模型制作方法,采用此技术开展高温高压下地层流体

的长岩心驱替实验机理研究；

(7) 开展注聚合物后再注烃气研究以解决韵律差异剩余石油储量的动用不平衡问题。

另外本项目在国外现有的技术基础上，有 4 个内容属国内首先开展研究的：

(1) 通过与 DBR - PVT 仪配套，建立激光测试固相沉积技术；

(2) 建立应用系线分析法确定油藏注气最小混相压力模型；

(3) 应用示踪剂及井间地震技术监测注气动态；

(4) 在油田注气过程中，将注烃混相驱技术成功应用到吐哈葡北油田，气水交替非混相驱开发技术应用于吐哈温五油田，为提高中低渗透油藏注气提高原油采收率奠定了基础。

三、成果应用

成果通过项目合作的方式广泛应用于中石油、中石化以及中海油三大石油公司所属各油田，注气类型涉及注烃气、二氧化碳、氮气、空气，储层涉及砂岩与灰岩，80%以上为低渗透油藏，应用于我国 15 个油区共 29 个油田，其中中国石油吐哈 6 个，中国石油大庆与中国石化江汉各 4 个，中国石化中原、中国石化胜利、中国石化江苏、中海油南海西部各 2 个，中国石油华北、中国石油大港、中国石油塔里木、中国石油四川、中国石油辽河、中国石油青海、中国石油新疆各 1 个。吐哈油田根据本成果建成了我国第一个注烃气混相驱开发油田——葡北油田，建成了我国第一个注烃非混相驱——温五油田，目前注气已成为吐哈提高采收率的主体技术，注气已新增产值 4.17 亿元，新增利税 928 万元，新增利润 3.24 亿元，鄯善、温西一、温西三、鄯勒等正在设计，准备推广。我们衷心感谢中国石油、中国石化、中海油三大石油公司和所属相关油田的热情支持与帮助。

该成果内容丰富，研究成果水平高，参加人员多，经过几年攻关，完成了系列工作，形成了系列新理论与新技术，发表大量学术论文和专著，在研究过程中培养大量博士、硕士人才。该成果在油田得到了广泛的应用，取得了明显的社会与经济效益。

全书由李士伦、郭平、王仲林等著。其中前言、概论由李士伦、郭平、樊建民编写；第一章由郭平、孙雷编写；第二章由刘建仪、郭平编写；第三章由杜建芬、徐艳梅编写；第四章由梅海燕、张茂林编写；第五章由郭平、杨学峰编写；第六章由郭平、夏海容编写；第七章由杜志敏、陈小凡、郭肖、文玉莲编写；第八章由王仲林、郭平、孙雷编写；第九章由王仲林、孙玉凯、刘滨编写。在专著成果的形成过程中，还得到李闽、熊钰、黄全华、欧成华、彭彩珍等老师及实验室邹振、赵晓峰、张广东等同志的帮助，黄琴同志为本著作的编辑出版做了大量工作，在此深表感谢。

由于编者水平有限，书中难免有缺点和不足之处，还恳请读者批评指正。

目 录

1 概论	(1)
1.1 低渗透油藏的基本特点	(1)
1.2 国内外低渗透油藏注气提高采收率概况	(2)
1.3 国内外低渗透油藏注气提高采收率实例分析	(4)
1.4 低渗透油田注气面临的问题	(6)
1.5 认识及建议	(7)
2 注入气对流体相态影响	(9)
2.1 常规相态测试	(9)
2.2 膨胀实验与模拟	(11)
2.3 多级接触实验	(18)
3 注气长岩心驱油效率评价技术	(24)
3.1 长岩心网状裂缝物理模型制作方法	(24)
3.2 注气方式研究	(29)
4 不同韵律油藏聚合物驱后注气评价技术	(48)
4.1 人工填砂管驱替实验	(48)
4.2 韵律对提高采收率影响的驱替实验	(54)
5 固相沉积实验测试与理论	(61)
5.1 有机固相沉积激光测试技术	(61)
5.2 有机固相沉积相态模拟理论研究	(66)
5.3 考虑有机固相沉积的数值模拟研究	(90)
6 最小混相压力实验与理论研究	(103)
6.1 最小混相压力研究发展趋势	(103)
6.2 细管实验确定最小混相压力	(105)
6.3 系线分析法确定最小混相压力	(113)
6.4 中国原油混相条件分析	(125)
7 注气驱物质平衡方程的建立	(129)
7.1 传统的物质平衡方程简介	(129)
7.2 注气非混相及混相驱替物质平衡方程的建立	(134)
7.3 混相驱替物质平衡方程在核实原始储量中的应用	(141)
8 裂缝性油藏注气开发分子扩散现象研究	(145)
8.1 裂缝性油藏注气开发中的分子扩散行为	(145)
8.2 分子扩散物理学基础及数学描述	(146)
8.3 考虑分子扩散的裂缝性油藏注气开发数学模型	(154)
8.4 考虑分子扩散的裂缝性油藏注气开发数值模型	(162)
8.5 裂缝性油藏气驱扩散效果分析	(164)

9 注气方案设计配套技术 (172)

9.1 注气方案设计配套技术包括内容 (172)

9.2 W5 区块注气提高采收率油藏工程方案设计实例 (175)

9.3 W5 区块注气采油工程方案设计实例 (186)

9.4 注气地面工程方案研究 (190)

10 示踪剂及地震技术在注气动态监测中的应用 (193)

10.1 注气油田开发动态监测实施标准研究 (193)

10.2 注气工程动态监测工作量部署 (194)

10.3 注气示踪剂现场实施方案 (195)

10.4 井间地震技术现场应用研究 (198)

10.5 注气提高采收率技术应用效果评价 (201)

参考文献 (204)

1 概 论

全国低渗透油田石油地质储量丰富,据估计,渗透率小于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的非稠油低渗透未动用储量占全国未动用储量总数的 40% 以上。我国目前渗透率低于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的低渗透探明储量约 $50 \times 10^8 \text{t}$ 。低渗透储量中动用和未动用储量几乎各占一半,近年发现的储量中,低渗油田储量所占比例也越来越大。

低渗透油田的显著特点就是储层渗透率低,自然能量不充足,靠天然能量开采,弹性能量衰竭快,很快转变为效益低、周期长的溶解气驱开发阶段,油井产量递减快,开发水平低。

注气法,作为一种提高采收率的常用方法,受到国内外各大油田的普遍关注。它不受地层水矿化度的影响,能解决注水困难或水敏性油藏的很多问题,尤其在低渗透油田开发方面优势明显。

在低渗油藏中,注气最有利的因素是:气容易渗流;合理的注入量,加上注气过程中油的黏度降低、体积膨胀和低渗油藏不易早期气窜的特点,这些在适合的油藏条件下给人们展现出了低渗油藏注气驱未来开发的前景。

1.1 低渗透油藏的基本特点

国内外低渗透油藏有一些共同特点,也有区别,主要特点见表 1-1。

表 1-1 国外某些低渗透油田简况统计表

油 田	巴罗岛	大学芳	多林	文士拉	大井	布来得福	萨卡托萨	斯伯拉雷
油层埋深 (m)	770	2590	2850	3000	1630	518	541	
含油面积 (km^2)	82	32		13.6	59	344	46	4000
储量 (10^4t)	12000			13100	2075			63000
孔隙度 (%)	25	15	9.5	19	18.9	15	24	11.5
渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	5.7	1	5	8.5	7.5	7.5	3.6	<1
原油黏度 ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	0.7	0.25	1.0			3.0		0.3

(1) 低渗、低孔、自然产能低,常规投产甚至不出油,必须经过油层改造才能达到商业产能。

(2) 原油黏度低,密度小、性质较好,有利于混相驱。

(3) 储层物性差,粒细、分选差、胶结物含量高,后生作用强。

(4) 油层砂泥岩交互,砂层厚度不稳定,层间非均质性强。

(5) 油层受岩性控制、水动力连续差,边底水不活跃。

(6) 流体的流动具有非达西流的特征。

1.2 国内外低渗透油藏注气提高采收率概况

2006 年统计资料表明,全世界正在生产的注气采油项目共有 138 个,其中注二氧化碳采油项目 94 个,占 68%,注天然气采油项目 35 个占 25%,注氮气采油项目 5 个,酸气 4 个,绝大部分均取得很好效果。渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 注气 45 个,小于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 中有 76 个,占 55%,混相驱 126 个占 91%、非混相驱 12 个占 9%,说明了低渗透油藏注气适应程度高,而且混相驱占主导地位。2006—2007 年全世界计划执行 EOR 项目: CO_2 混相驱 15 个,非混相 1 个,蒸汽驱 7 个,聚合物驱 2 个,火烧油层 2 个,表面活性剂-聚合物 2 个,说明了注气驱在提高采收率中的重要地位。

在俄罗斯,40%以上的难采储量集中在低渗透层中,这表明首先开采这类油藏的重要性。低渗透油藏大部分原油储量属于低黏油。利用自动化系统对低渗透油藏的采油方法进行了评估,乌拉尔和西西伯利亚两个区的 910 个油藏中 355 个层系被建议注 CO_2 , 351 个层系注气态烃,87 个层系注循环气体,2 个层系注热水。而乌拉尔下游最有效的开采方法是注 CO_2 。其中 559 个层系中 355 个被建议注 CO_2 。对西西伯利亚油藏来说,注气态烃是最合理的方法,351 个层系中有 313 个层系注气态烃。可见,注气法适用于 80%的低渗透油藏。而在美国,注气采油法在提高采收率中排到第二位,仅次于热力采油。从 1988 年到 1998 年,利用注气法增产的产量占总增产量的比例,由 21.2%上升到 40.8%,而设计数由 24.6%增加到 43.7%。

表 1-2 国内已投入开发的低渗透油藏基本数据表

油 田	榆树林	沈 150 块	安塞	新民	义北	拖市	马西深层	鄯善
埋深 (m)	2000	3000	1200		2500	3200	3900	3018
岩性	砂岩	细砂岩	砂岩	粉砂岩		砂岩	细砂岩	砂岩
孔隙度 (%)	11.8	12.9	12.4	15.2		11.1	13	13
渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	3.09	9.8	1.29	5.4	6.7	9.3	6.6	6.2
黏度 ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	4	0.5	2~2.6	0.8~1.3	4.2	0.4~1.5	0.38	0.37
含油饱和度 (%)	60	60	55	57		54		52.5
泥质含量 (%)	12.5	0.49	10~11.4	12	8.9	9.3	9.9	10.2

在美国现行注气的大部分油藏均为中、低渗油藏,北欧沃森油田的威拉德开发单元 ($K = 1.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 注 CO_2 , Antelope 油藏和 Lost Hills 油田 ($K = 0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 注 CO_2 ; 西得克萨斯 31 块油田 ($K = 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 注烟道气; 安蒂溪油田 ($K = 9.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 注富气, 列沃兰德开发单位 ($K = 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 注富气等。

现行的注气项目中油藏渗透率分布如图 1-1, 孔隙度分布见图 1-2, 可以明显地看出来, 渗透率越低, CO_2 项目数越多; 烃类气项目随渗透率增加而增加; 孔隙度最高分布在 10%~20%之间。从原油黏度来看 (图 1-3), CO_2 驱应用的黏度大于 $0.8 \text{mPa} \cdot \text{s}$ 相对多一些, 烃类气黏度相对较小。从油藏面积来看 (图 1-4), 注气项目实施面积小于 10km^2 较多。从注采井网上看 (图 1-5), 采用 5 点井网最多。从油藏深度来讲 (图 1-6), CO_2 实施深度小于 2000m 较多, 而烃类气没有明显的深度分布。

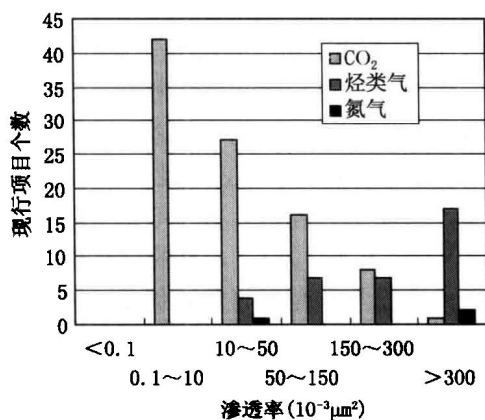


图 1-1 开展注气项目渗透率分布图

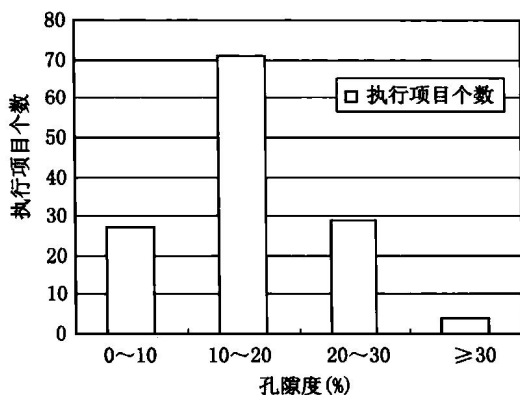


图 1-2 开展注气项目油藏孔隙度分布图

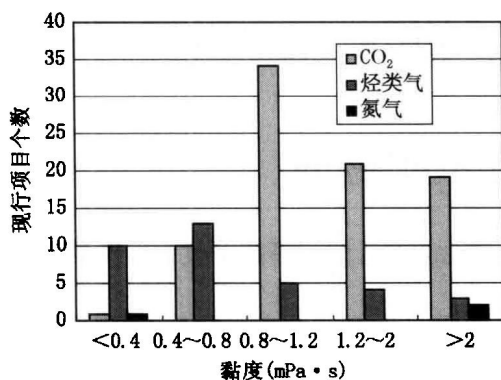


图 1-3 开展注气项目的黏度分布

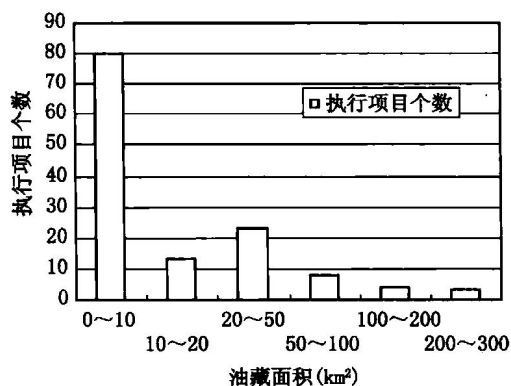


图 1-4 开展注气项目油藏面积分布

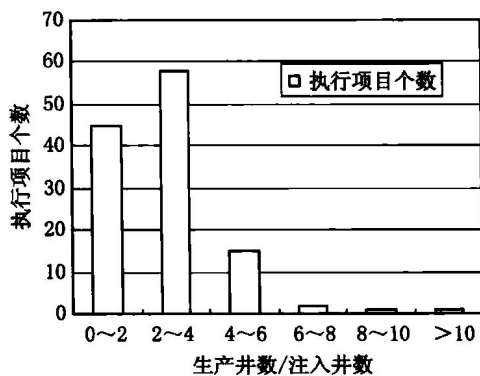


图 1-5 开展注气项目注采井网分布

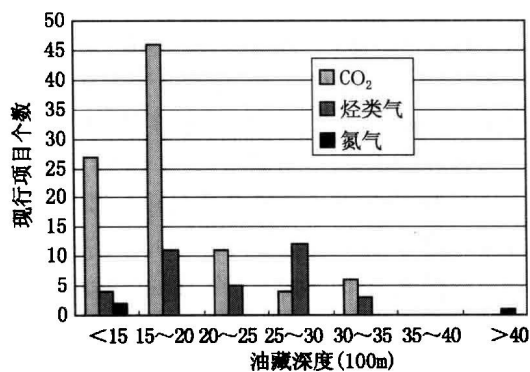


图 1-6 开展注气项目深度分布

我国发展注气较慢,主要在于:(1)对于多数油田而言,气源紧张,不可能用来大量注气;(2)原油含蜡多,密度和黏度都比较高,绝大多数油藏原油黏度大于 $5\text{mPa}\cdot\text{s}$,注气后由于不利的流度比、气窜和重力差异比较严重,波及系数不高,而且难于混相;(3)我国注气油藏深度较大,温度也较高,不利于混相。因此注气混相驱和非混相驱一直未能很好地开展起来。但近十几年有较好的发展,人们逐步认识到注气在油田开发中的重要地位。中国大部分油田的储层属陆相沉积,非均质严重,原油黏度又比较高,因此,含水上升快,即使采取了强化的注采系统,水驱采收率仍比较低,只有33%左右,有2/3的原油储量留在地下采不出来,目前全国陆上注水开发油田综合含水已在81%以上,有的更高达90%以上,产量已出现递减,近来发现的石油储量又多属低渗透及高黏度等难采储量,西部新油田又多处边缘沙漠地区,运输距离长,产量一时难以大幅度增长。

1998年,全国开展了三次采油潜力的二次评价工作,据初步统计,适合于注气(CO_2)混相驱的地质储量在 $10.57\times 10^8\text{t}$ 以上,占参评石油地质储量的10.4%,与水驱相比,平均可提高采收率16.4%,增加可采储量 $1.73\times 10^8\text{t}$ 。因此,要改变单一的注水开发模式,因地制宜、经济有效地发展多种提高采收率技术,这就迫切地要求我们对注气混相和非混相驱技术予以足够的重视和必要的关注。

在低渗油藏中,前几年我国由于气源问题,影响了注气的发展,国内目前进入现场试验的低渗油藏注气项目不多,主要开展了 CO_2 吞吐及注气驱、烃类直接驱、烃类气水交替驱等。

1.3 国内外低渗透油藏注气提高采收率实例分析

总体来讲目前注气是低渗透油藏居多,美国和北欧进行注气提高采收率情况简要介绍如下:

(1) 北欧 Ekofisk 油田。

该油田位于 Nowegian 区块,于1969年发现,属于典型挥发性、欠饱和油藏。它是高孔隙度、特低渗透率硅酸盐地层。孔隙度 $\phi=25\%\sim 40\%$,渗透率 $K=0.1\sim 5\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,上层是低孔、低渗地层。于1975年开始注入烃类气体,从1975年到2001年间,注气可提高2%~3% (OOIP; origin - oil - in - place)。

(2) 美国东 Canton 油田。

位于美国俄亥俄州,属于低渗透、溶解气驱的砂岩油藏。深1218~6000m,注气前可采出 $13.67\times 10^3\text{m}^3$,初始采收率为7.2%。当注入天然气后,每注入 420m^3 气体,则可提高 0.159m^3 油,注气后的采收率达到14.4%,最终可采储量可达到 $22.3\times 10^3\text{m}^3$ 。

(3) Antelope 油藏和 Lost Hills (LH) 油田。

Antelope 是一个典型的低渗硅质泥岩油藏,其原始地层压力17.66MPa,目前地层压力4.2MPa,渗透率为0.08mD,属溶解气驱油藏。生产6年后,当地层压力低于饱和压力后,油藏压力下降很快,气油比迅速上升,采收率很快下降,只有6.5% (OOIP) 被采出,现在分别进行水驱、二氧化碳非混相驱实验研究。结果表明:水驱采收率可以达到51%,而进行二氧化碳非混相驱后,又可以提高30%的采收率。Lost Hills 也是一个低渗透硅质泥岩油藏,进行注水和二氧化碳非混相驱替,其结果见表1-3。

随着低渗透油藏的比例和储量增大,国内已对一批油田进行可行性评价和现场试验,

如我国吐哈葡北油田 [$K = (30 \sim 100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$] 已开展注烃混相驱达 8 年多, 运行效果良好; 长庆靖安油田注天然气 ($K = 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 已获得成功, 并取得了一定经验; 富民油田 ($K = 7.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、吉林新立油田、辽河油田已成功地开展了 CO_2 吞吐试验和注气驱现场试验, 取得了明显经济效益; 江苏草舍、大庆外围油田 ($K < 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 注 CO_2 驱现场试验正在进行中; 中原文留油田 [$(10 \sim 20) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$] 低渗透注烃气项目已通过评审, 进入实施阶段; 塔中 4 油田为了保存资源已实施注烃气; 克拉玛依低渗透油田 ($K = 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 正处于论证中; 川中大安塞低渗透裂缝石灰岩油藏注气进行室内评价论证认为有经济效益; 青海南翼山带裂缝油藏 (基质 $K = 0.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 注天然气可行性也在论证之中; 结合注气提高采收率任 11 潜山油藏改建储气库也正在论证中, 预计可提高原油采收率 9% 左右。

表 1-3 Lost Hills 油田注水与注气效果比较

井距 ($10^{-3} \text{km}^2/\text{井}$)	1997 年后水驱采收率 (%)	1997 年后 CO_2 驱采收率 (%)
5.06	4~9	7~19
2.53	7~12	7~28
1.26	11~15	8~18
3.37	5~8	9~18
2.53	5~8	11~20

近几年来, 我国已有许多低渗透油田对注气开发低渗透油藏潜力进行了研究, 并有部分油田投入现场试验。例如:

(1) CO_2 吞吐与驱替现场试验。

CO_2 吞吐在全国开展最多, 有胜利、中原、大庆、吉林、江苏、大港等, 已基本探索出一套注气吞吐的评价方法, 富民油田最为成功。江苏富民油田是一复杂小断块低渗透砂岩油藏, 地质条件差, 储层 $K = 7.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 含油面积小。地质储量为 $55 \times 10^4 \text{t}$, 渗透率为 $7.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 孔隙度为 11.8%, 地下原油密度为 0.8324g/cm^3 , 地下原油黏度为 $1.6 \text{mPa} \cdot \text{s}$ 。原始含油饱和度为 70%, 目前剩余油饱和度为 40%, 地层压力为 19.49MPa, 地层温度为 102.5°C 。现在注入 CO_2 进行吞吐, 结果表明: 产液量、产油量明显增加, 含水下降。吞吐后, 可提高水驱残余油采收率 10% 以上, 注入量越高, 采收率增加幅度越大。投入产出比为 1:5.82, 内部收益率为 89%, 研究表明 CO_2 吞吐在低渗透复杂小断块轻油油藏运用是可行的, 增油效果和经济效益均显著。

为了进一步提高原油采收率, 开展了注 CO_2 驱的现场试验, 我国在江苏富 14 油田开展了气水交替混相驱、草舍油田开展了直接注 CO_2 混相驱, 在吉林新立油田开展了非混相驱气水交替注 CO_2 、特低渗大庆芳 48 井区开展了非混相驱直接注 CO_2 驱井组试验, 试验过程中出现了 CO_2 早期突破、腐蚀、结垢及气源不稳定等问题, 但均取得一定效果, 其中江苏草舍、吉林新立油田还在继续工业试验, 在这些试验中没有明显的证据说明储层中产生了固相沉积。

(2) 烃类气驱现场试验。

我国第一个开展注烃混相驱开发的砂岩油田是吐哈葡北油田, 该油田储层渗透率 $110.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 构造完整, 连通性好, 断裂系统不发育, 属典型挥发性油藏, 最小混相

压力 (MMP) 为 33MPa, 注入气为油田伴生气。长岩心的实验表明先注气比先注水原油采收率更高, 为了对比先注气还是先注水好, 采用东边先注水西边先注气的开发方式, 地层压力保持在 35MPa, 方案设计采用 6 注 9 采系统, 方案实施 8 年后经过井网调整为总井数 23 口, 其中注气井 2 口, 日注气量 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 注水井 8 口, 采油井 13 口, 按气水交替方式进行, 但由于水井转注气时注入压力升高, 气注不进而未能实施气水交替设计切换, 只在西区实现了气水交替混相驱试验。葡北注气已实施 8 年, 累计采油 $97 \times 10^4 \text{ t}$, 含水率 42%, 已比水驱增加产油量 $15.364 \times 10^4 \text{ t}$, 方案继续实施将比水驱新增 $26 \times 10^4 \text{ t}$ 。

(3) 氮气-水交替现场试验。

氮气-水交替试验在江汉油田马 36 进行了现场试验, 孔隙度分布在 15.9%~34.8%, 平均孔隙度为 23.7%; 渗透率分布在 $(5.4 \sim 4917.2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均渗透率为 $515.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。油藏温度 74℃, 油藏原始压力 13.3MPa, 由于长期欠注, 在进行试验时, 油藏压力已下降为 5MPa, 泡点压力 4.43MPa, 地层原油黏度 $2.63 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 对注气井组进行分析, 可能受效的 14 口井中, 4 口井油产量回升, 6 口井产量递减得到减缓。总趋势是, 注气后, 注采井组产油量略有上升, 产水量略有降低, 注气后产量递减率有所减低。在此基础上进行优化设计方案预测可提高原油采收率 5% 左右。后将此技术在江汉黄场油田、八面河油田等进行了实施, 先后在共 16 井区、黄新 33 井组、八面河油田面一区等开展了水气交替, 新增产值 4929 万元。

氮气水脉冲是一种防止注入气过早突破的裂缝油藏注气方法, 实验采用人造砂岩平面裂缝低渗透模型和氮气, 进行了脉冲气-水间歇采油研究, 在 $K = 8.84 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 油藏模型中, 进行了脉冲试验, 同时还开展了数值模拟研究, 研究表明气-水脉冲是一种有效提高低渗透裂缝油藏采收率的方法。按照物理模拟结果, 当油藏稳定注水水淹后, 采用气-水间歇脉冲注法可平均提高原油采收率 28%, 采用单一气脉冲可提高 20%, 单一水脉冲可提高 16%。在油藏选择时, 应选择封闭型油藏, 同时由于脉冲的注入阶段油藏要关井, 因此在现场操作具有一定难度。但对于挥发性油藏采用脉冲注气是否有效还有待于研究。

目前, 我国低渗透油气田注水开发现状很不理想, 采油速度和采收率都很低, 甚至有的油田由于注水井注不进水、还有水敏性储层, 生产井产不出油, 而处于半瘫痪状态。因而在天然气储量比较充足的地区, 对油层渗透低、原油黏度也低的油田应该积极开展注气保持压力的开发方式试验。改变单一的注水开发模式, 因地制宜、不失时机、经济有效地发展注气提高采收率。

1.4 低渗透油田注气面临的问题

我国低渗透油田发展面临的问题从总体上讲属“注不进、采不出”, 在注气方面将面临的问题主要是:

(1) 低渗透油田注气压力高, 注入能力低的问题。

由于低渗透油藏渗透率低, 对气质量有要求, 要注意对地层造成的伤害; 由于注入压力高, 给压缩机压力等级提出了新的要求。

(2) 低渗透裂缝油藏如何注气问题。

在我国, 很多低渗透油藏都有裂缝, 如吉林大安油田、新立油田、新民油田、扶余油田、大庆朝阳沟油田、辽河雷家油田、新疆火烧山油田、克拉玛依同田乌尔禾油层、

吐哈丘陵油田、青海南翼山油田等，如何开展了裂缝性油藏注气，防止气窜，提高波及效率，提高采收率是一个技术难题，可以考虑用脉冲注气或调驱结合的方式来提高原油采收率。

（3）低渗透油田的岩心物理模拟及注气评价问题。

低渗透油藏注水困难，取出岩心后清洗困难，恢复原始地层条件非常困难，耗时长，重复性差；如果带有缝，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非常困难的事，现在已有在基质岩心基础上造网状裂缝的技术，值得推广。

（4）防止固相沉积的问题。

在注气过程中，尤其是在高含蜡及沥青质油藏注 CO_2 或干气时，由于气的强烈抽提作用，易产生固相沉积问题，对低渗油藏开发将会产生明显的影响，但现在组分模型数值模拟中还不具有此模拟功能，也是值得发展的模拟技术。

（5）注 CO_2 过程防腐问题。

目前全国已开展的注 CO_2 项目中，出现了明显的腐蚀问题，随着 CO_2 减排要求愈来愈强烈， CO_2 的利用会越来越多，因此研究防腐问题有助于注 CO_2 项目的顺利进行，同时我国许多现场试验均在老井中进行，发展防腐技术应着重考虑在现有套管的基础上进行防腐，这样才有助于推广。

（6）油藏压裂与注气优化研究。

低渗油藏一般均进行过压裂，如果与压裂井裂缝分布结合起来，优化注气方式，是防止气窜、提高波及效率及采收率的重要途径。

（7）注气过程非平衡问题。

在注气过程中，由于注入气与原油有一个扩散速度问题，因此注入的气只与部分原油接触，如何确定多大的油量参与扩散和溶解？由于对流扩散作用，注入速度对注气效果有直接影响，应当如何确定？在数值模拟中假设每个网格上流体瞬间处于相平衡，但在实际油藏往往是达不到的，应如何考虑？

（8）注气最小混相压力问题。

由于混相驱的驱油效率很高，因此混相压力在注气评价中是一个非常重要的参数，即使在标准的细管混相压力评价方法中测得此值，如何证明在地下是否混相也是一个难题。

（9）注气突破机理问题。

研究混合带或混相带长度对注气开发有重要意义，它直接关系了气突破后气油比上升规律和全面突破时间，但目前还没有相关的成熟方法，也没有气驱特征曲线，有必要加强研究，建立特征曲线，以指导注气动态分析。

1.5 认识及建议

（1）低渗透油田由于其自身的特点，由于渗透率低、水敏等因素，无法有效补充地层能量，而注气提高采收率具有很多优越性，尤其是对于低渗储层、正韵律储层采用注气的方法可以大大地提高采收率。

（2）注气提高采收率技术在全世界的范围内得到了广泛的应用，主要发展趋势是 CO_2 为主的混相驱，随着各国政府对 CO_2 减少排空的重视， CO_2 收集与储存越来越重要，为我国注 CO_2 提高石油采收率技术的发展提供了前所未有的机遇，我国也应当加强注 CO_2 提高

采收率时的 CO₂资源循环利用问题。

(3) 根据低渗特点，建立考虑启动压力和固相沉积影响的注气组分模型商业化油藏数值模拟软件，为低渗油藏注气动态分析与方案设计提供必要的评价工具。

(4) 加强全国从事注气研究的力量整合，为各大公司注气提供研究条件，同时可交流注气经验，有利于推动注气事业的发展。

(5) 低渗透油田注气提高采收率是一个系统工程，投资大，在工程项目实施前要开展充分的论证和评价，特别是要评价注气提高采收率的经济效益。

2 注入气对流体相态影响

相态对于注气驱替过程是相当重要的。当存在多相流动时,油气体系间会产生相间的传质和传热,当有气体注入时,流体的物理化学性质如黏度、密度、体积系数、界面张力、气液相组分和组成均会发生变化,对相态的定量描述是了解非均质性、黏性指进,确定能否进行混相驱,研究混相驱和非混相驱机理的重要依据。我们将目前油气田使用的相态分析视为常规相态研究,在常规相态基础上,要研究对于注气的膨胀实验及多次接触混相研究。

2.1 常规相态测试

为了研究地层原油在注气前后的物理化学性质变化,首先要对所确定的油气井进行取样和配样,并分析井流物组成、饱和压力、恒组成膨胀(CCE)、定容衰竭(对于挥发性油要测CVD)、多级脱气(DLT)、分离试验等,将此配样作为基础,注入一定比例的气体,并研究注入气后流体物化性质的变化情况,从而研究注入气对地层流体的相态的影响。

常规地层流体相态研究有井流物组成、饱和压力、恒组成膨胀(CCE)、定容衰竭(CVD)、多级脱气(DLT)、分离试验等,油气流体的PVT测试有相应的测试标准。对于原油可按SY/T 5542—92“地层原油物性分析方法无汞仪器分析法”进行测试分析,PVT测试过程如下。

(1) 恒组成膨胀。

油气藏流体的恒组成膨胀试验是在地层温度下,油气体系从地层压力开始逐步向下降,从而测试饱和压力和流体的相对体积变化,以测试流体的膨胀能力、饱和压力以上流体物性参数等值。其测试的流程见图2-1。

对于原油,一般PV关系的压力和相对体积曲线两端为直线,可通过拐点来确定原油的泡点压力。

(2) 定容衰竭(CVD)。

定容衰竭是在地层温度和饱和压力下,记录此时的体积,并逐渐退泵降压使体积膨胀,在此恒定压力下恢复到饱和压力下的体积,记录下每次压力下产出的气量、油量,并进行色谱分析,如此往复直到压力降到废弃压力,试验研究以确定定容衰竭采出气的气油比、油采收率、气采收率、液相饱和度变化,体积系数等参数的变化。此试验一般作为模拟凝析气藏衰竭式开发的主要方法,其结果可给出凝析气藏开发主要指标,同时对挥发油藏,也推荐做此试验。图2-2给出了凝析气相应的测定过程。

(3) 多级脱气实验(差异凝析DLT)。

多级脱气是在地层温度下,从泡点压力饱和压力起,退泵降低一定压力,在此压力下排除平衡的气相,记录下此时的油相体积和采出气的量;再进一步退泵降压,并恒压放掉平衡气,如此直到压力降到大气压力下为止,试验研究目的是确定在脱气过程中不同压力下原油体积系数、密度、黏度、溶解气油比等的变化,是原油的基本物性试验,图2-3给出了测定的过程。