



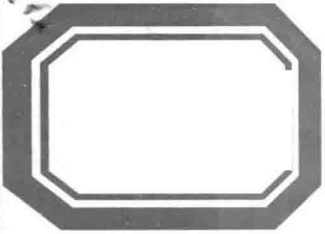
注气提高采收率方法 评价优选

——以三塘湖油田牛圈湖油藏为例

李正科 王厉强 主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)



注气提高采收率方法评价优选

——以三塘湖油田牛圈湖油藏为例

主 编 李正科 王厉强

中国石化出版社

内 容 提 要

本书是特低渗透油藏注气开发可行性论证和优选方面的专著,系统地总结了注气技术的发展现状、研究工区的地质特征、室内物理模拟和注气优选评价技术。

本书介绍的方法具有很强的实用性和可操作性,可供油气田开发研究和油藏管理的科技人员、现场工程技术人员以及石油院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

注气提高采收率方法评价优选:以三塘湖油田牛圈湖油藏为例/李正科,王厉强著.

—北京:中国石化出版社,2013.11

ISBN 978-7-5114-2424-2

I. ①注… II. ①李…②王… III. ①低渗透油气藏-注气(油气田)-提高采收率-研究-新疆 IV. ①TE357.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 248151 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京金明盛印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 10 印张 237 千字

2013 年 11 月第 1 版 2013 年 11 月第 1 次印刷

定价:32.00 元

《注气提高采收率方法评价优选》

编委会

主 编：李正科 王厉强

副 主 编：崔英怀 于家义 邵明记

编 委：荆文波 文 静 吴美娥 郭永华

谢 军 张中劲 刘长地 潘有军

赵金省

技术顾问：王仲林 孙玉凯 李艳明 袁 昭

李道阳 陈学义 熊才华 郭 平

前 言

近年来,主要石油生产大国加大了注气提高采收率(包括烃类气、 CO_2 、 N_2 、烟道气、空气等)混相驱和非混相驱的研究力度,注气矿场实验及应用项目也呈逐年增长的态势。我国注气提高采收率的技术应用基本还处于室内实验和小型矿场试验阶段,与国际水平相比还存在较大的差距。中国石油吐哈油田的注气开发研究和实践一度走在国内前列,分别于1998年和2002年建成了葡北油田注气混相驱和温五区块注气非混相驱矿场先导试验区。

本书涉及的研究工区为位于三塘湖盆地的特低渗透、低压、低流度砂岩油藏,常规注水开发效果不理想,原油黏度大且见水后有乳化现象。研究的目标是寻求该类油藏提高采收率的技术方法,形成二低复杂油藏注得进、采得出的有效开采技术手段。作为注气提高采收率优选评价的探索,也希望通过本书与同行专家进行交流,进一步发展适用于陆相储层的注气优选评价方法。

全书共分为9个章节,编写的具体分工为:第1章研究意义及现状(李正科、崔英怀);第2章油藏基本地质特征(西安石油大学赵金省);第3章储层四性关系研究(陈学义、熊才华、文静);第4章储层物性分布特征与地质建模(谢军、王厉强、于家义);第5章开发现状及注采特征分析(崔英怀、荆文波、于家义、王厉强、吴美娥、刘长地);第6章注气提高采收率技术方法研究(西安石油大学赵金省);第7章相态拟合及合理驱替介质优选(西安石油大学赵金省);第8章油藏数值模拟研究(王厉强、吴美娥、邵明记、谢军、刘长地、潘有军);第9章气水交替注入油藏工程参数优选及方案设计(李正科、王厉强、邵明记、于家义、吴美娥)。全书由李正科、王厉强主编,李道阳、张中劲、郭永华、潘有军等同志参与了资料汇总与图表制作。

感谢中国石油吐哈油田公司王仲林和孙玉凯两位教授级高工在本书编写过程中给予的指导和帮助。

由于注气提高采收率研究涉及的范围较广、内容较多,本书仅结合牛圈湖特低渗透油藏论述了作者近年来的研究成果,水平有限,难免有不足之处,希望读者批评指正。

作者

2013年10月于哈密

目 录 | Contents

第 1 章 研究意义及现状	(1)
1.1 研究的目的是和意义	(1)
1.2 注气技术研究现状	(1)
1.2.1 注气技术的发展概况	(1)
1.2.2 国内外 N_2 驱的应用现状	(4)
1.2.3 国内外 CO_2 驱现状	(5)
1.2.4 国内外烃类气驱现状	(6)
1.2.5 国内空气驱现状	(8)
第 2 章 油藏基本地质特征	(11)
2.1 自然地理状况	(11)
2.2 地质概况	(11)
2.2.1 构造特征	(11)
2.2.2 地层层序	(12)
2.2.3 小层对比标志特征	(13)
2.2.4 西山窑组 J_2X_2 砂体四级旋回划分	(16)
2.3 勘探开发简况	(16)
第 3 章 储层四性关系研究	(18)
3.1 储层岩性特征	(18)
3.1.1 岩石类型	(18)
3.1.2 岩石成分	(18)
3.1.3 填隙物特征	(19)
3.2 储层物性特征	(21)
3.2.1 基本特征	(21)
3.2.2 孔隙类型	(22)
3.2.3 孔隙结构特征	(25)
3.3 储层含油性特征	(26)
3.4 储层电性特征	(27)
3.5 测井四性关系研究	(30)

3.5.1 岩性与物性关系	(30)
3.5.2 岩性与含油性关系	(33)
3.5.3 物性与含油性关系	(34)
3.5.4 岩性与电性关系	(36)
3.6 四性研究综述	(38)
第4章 储层物性分布特征与地质建模	(43)
4.1 储层及流体性质评价	(43)
4.1.1 储层非均质性评价	(43)
4.1.2 流体性质评价	(54)
4.2 精细三维地质模型的构建	(55)
4.2.1 研究思路及关键技术流程	(55)
4.2.2 构造模型的建立	(55)
4.2.3 建立岩相和属性模型	(57)
4.2.4 模型的质量控制和粗化	(61)
4.2.5 储量估算	(62)
第5章 开发现状及注采特征分析	(64)
5.1 注采现状及水驱效果评价	(64)
5.1.1 全油藏开采历程及研究重点的转移	(64)
5.1.2 注采现状	(68)
5.1.3 水驱效果评价	(70)
5.2 裂缝对开采效果影响分析	(77)
5.2.1 压裂裂缝监测方位	(77)
5.2.2 示踪剂曲线研究裂缝影响	(79)
5.2.3 数值模拟研究裂缝影响	(84)
第6章 注气提高采收率技术研究	(86)
6.1 注气开采机理研究	(86)
6.1.1 N_2 (烟道气)驱提高采收率原理	(86)
6.1.2 CO_2 驱提高采收率的原理	(87)
6.1.3 烃类气提高采收率原理	(90)
6.1.4 空气驱提高采收率原理	(92)
6.2 适应性和潜力评价	(92)
6.2.1 氮气特点和有利条件	(92)
6.2.2 CO_2 适应性和潜力	(93)
6.2.3 烃类气适应性和潜力	(94)

6.2.4	空气驱适应性和潜力	(94)
6.3	油藏筛选标准	(95)
6.3.1	N_2 (烟道气)筛选标准	(95)
6.3.2	CO_2 筛选标准	(95)
6.3.3	烃类气筛选标准	(96)
6.3.4	空气筛选标准	(97)
第7章	相态拟合及合理驱替介质优选	(99)
7.1	流体 PVT 及注入气膨胀实验研究	(99)
7.1.1	流体样品取样及配样	(99)
7.1.2	配样检验	(99)
7.1.3	流体组成	(100)
7.1.4	单次脱气	(100)
7.1.5	PV 关系	(101)
7.1.6	注气膨胀实验	(101)
7.1.7	经验法确定最小混相压力	(104)
7.1.8	长岩芯注气采收率评价	(106)
7.2	流体相态特征拟合	(109)
7.2.1	原始流体组成	(110)
7.2.2	拟组分划分	(110)
7.2.3	描述气体相态的 PR 方程	(111)
7.2.4	流体相态特征拟合结果	(112)
7.3	长岩芯驱替实验拟合	(115)
7.3.1	长岩芯 CO_2 驱替实验拟合	(115)
7.3.2	长岩芯 N_2 驱替实验拟合	(115)
7.3.3	长岩芯烃类气驱替实验拟合	(115)
7.4	注气非混相驱替介质优选	(116)
7.4.1	剖面数值模拟模型	(116)
7.4.2	剖面模型连续注气介质优选研究	(116)
7.4.3	剖面模型注 CO_2 气水交替参数优选	(125)
第8章	油藏数值模拟研究	(130)
8.1	数值模拟软件及模型选择	(130)
8.2	组分模型基本数学方程	(130)
8.2.1	基本假设	(130)
8.2.2	数学基本方程	(130)
8.2.3	定解条件	(132)

8.2.4 模型的求解	(132)
8.3 三维地质模型	(133)
8.4 渗流模型	(133)
8.5 流体模型	(134)
8.6 产量模型	(134)
8.7 历史拟合	(134)
8.7.1 储量拟合	(134)
8.7.2 动态历史拟合	(135)
8.8 模拟结果及总体评价	(135)
第9章 气水交替注入油藏工程参数优选及方案设计	(141)
9.1 气水交替注入油藏工程参数优选	(141)
9.1.1 正交优化设计表的生成	(141)
9.1.2 实验结果及优选	(142)
9.2 方案设计与预测	(144)
参考文献	(147)

第1章 研究意义及现状

1.1 研究的目的是和意义

研究工区属低孔、低压、低流度砂岩油藏，区块低产井比例高，分区开采差异大，常规注水调控效果不理想；河道轴向水线推进快，侧向油井低液量，水流方向性明显；地层压力分布不均衡；原油黏度大且见水后有乳化现象。因此，如何有效改善开发状况，提高油田开发效果，提升区块单井产量，是目前急需解决的重点问题。

本书的研究目标是寻求该类油藏提高采收率的技术方法，形成三低复杂油藏注得进、采得出的有效开采技术手段，编制区块提高采收率先导试验方案。

1.2 注气技术研究现状

1.2.1 注气技术的发展概况

《油气杂志》(Oil&Gas Journal)于1971年发布了第一份提高采收率(EOR)调查报告，从1974年开始每两年发布一次世界 EOR 调查。2010 年4月发布的油气采收率调查报告，主要涉及热采、气驱和化学驱3类提高采收率技术，调查国家包括美国、加拿大、巴西、埃及、德国、印度尼西亚、特立尼达岛、土耳其、委内瑞拉、墨西哥、阿曼等。2010 年 EOR 调查显示(表1-1、表1-2)，世界 EOR 项目数为325个，EOR 产量为 $25.82 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

表 1-1 2010 年世界提高采收率项目数统计

区域	热采				化学驱			气驱						其他		总计
	蒸汽驱	火烧油层	热水驱	小计	聚合物	表面活性剂	小计	烃混相/非混相	CO ₂ 混相	CO ₂ 非混相	N ₂	酸气	小计	微生物驱	小计	
美国	46	12	3	61	1	2	3	13	109	5	3		130			194
加拿大	10			10	2		2	20	6		1	1	28			40
委内瑞拉	43			43		2	2	3					3			48
巴西	5			5					2	1			3	1	1	9
特立尼达岛	9		2	11						5			5			16
印度尼西亚	2			2												2
其他	10			10	1		1			1	3	1	5			16

目前，进入矿场规模化应用的提高采收率技术集中在热采、化学驱、气驱3大类，从产量规模看(图1-1)，世界三大提高采收率技术依次为热采、气驱和化学驱技术。热采产量



在 $20.77 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上, 约占世界 EOR 总产量的 59.1%, 主要包括蒸汽吞吐、蒸汽驱、SAGD、火烧油层和热水驱等, 其产量主要来自美国、加拿大、中国、委内瑞拉和印度尼西亚, 这 5 个国家热采产量占世界热采产量的 97.68%。其中美国和印度尼西亚以蒸汽驱为主, 加拿大、中国和委内瑞拉以蒸汽吞吐为主。气驱产量为 $9.21 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 约占世界 EOR 总产量的 26.2%, 主要包括 CO_2 混相/非混相驱、烃混相/非混相、氮气驱、酸气混相驱等, 其产量主要来自美国的 CO_2 混相驱和委内瑞拉的烃混相/非混相驱。这两个国家的气驱产量占世界气驱产量的 92.7%。化学驱产量在 $5.18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上, 约占世界 EOR 总产量的 14.7%, 其产量主要来自我国的聚合物驱和二元/三元复合驱, 我国化学驱产量占世界化学驱产量的 92%。

表 1-2 2010 年世界提高采收率产量统计 m^3/d

区域	热采			化学驱		气驱				
	蒸汽驱	火烧油层	热水驱	聚合物	表面活性剂	烃混相/非混相	CO_2 混相	CO_2 非混相	N_2	酸气
美国	43473	2682	266	11		12893	43260	1456	1431	
加拿大	47138			3975		3519	1860			159
委内瑞拉	33391				138	26391				
印度尼西亚	30207									
巴西	3428									
其他	1298		97					1163		
合计	158935	2682	363	3986	138	42803	45120	2619	1431	159

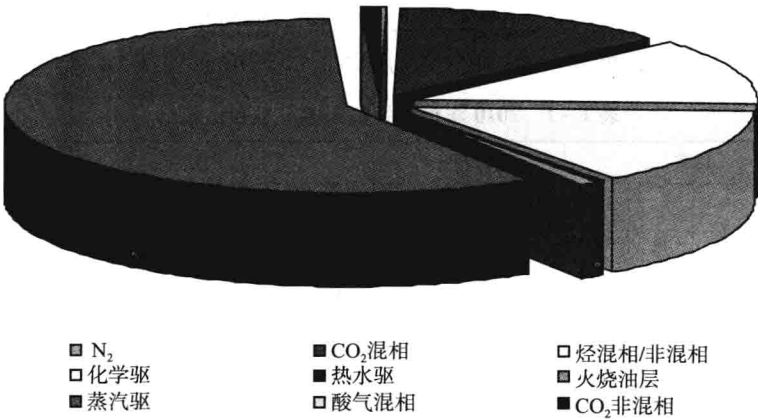


图 1-1 世界 EOR 产量分布

向油藏中注入流体提高油田的最终采收率, 取决于注入流体的驱油效率和注入流体波及到油层的体积(波及系数)。早在 20 世纪初, 人们为了保持油藏压力、提高生产能力, 特别针对那些特低渗透油田, 提出了利用注气方法改善油田开发效果的建议。但是注气过程中, 由于气体的黏度小, 容易发生严重的指进, 导致气体在生产井过早突破, 降低了波及系数, 因此同水驱相比, 它的最终采收率较低, 其应用受到很大限制。但是, 当油藏的构造倾角较大($>5^\circ$), 垂向渗透率比较合适时, 在顶部注气可以应用重力排驱机理, 获得比水驱更高



的采收率，或者在刺穿岩丘的顶部存在“阁楼油”的情况下，也可以利用注气的方法开采水驱无法开采到的原油。

改善注气的关键环节是减缓气窜以避免注入气体过早在生产井端突破。1957年，考德儿和戴维斯提出，在注气的同时向油层注水，目的是注水后降低气体的相对渗透率，从而降低它的流动性，以此控制气体的指进，改善波及状况。近年来，人们又把水气交替注入方式作为三次采油的方法加以应用，以提高水驱开发效果。其机理是向水驱后的油田中注气，降低水、气的相对渗透率，从而降低水、气的流度，改善水油流度比，从而提高水的波及系数。

限制注气项目应用的一个重要的问题是气源。由于天然气本身就是一种能源和化工原料，在当前能源价格上涨的情况下，注天然气虽然易于混相且提高采收率效果明显，但在国内天然气供需缺口不断加大的背景下，很难获得明显的经济效益。此外，我国 CO_2 气藏资源比较少，很多油藏虽然前期论证可行，但受制于 CO_2 气源而无法进行较大规模的矿场试验。国外油田曾有利用发电厂或燃气轮机的废气，注入烟道气提高采收率的报道，但是由于腐蚀性太大而未被广泛应用。近年来，制氮技术的进展，为注气提供了丰富的气源，但成本较高的问题仍没有得到本质性的改变，注气技术的应用前景仍需要关键技术的突破和成本的大幅降低。

表 1-3 美国提高采收率项目数变化情况

年份	热采			化学驱		气驱			
	蒸汽驱	火烧油层	热水驱	聚合物	表面活性剂	烃混相/非混相	CO_2 混相	CO_2 非混相	N_2
2000	86	5	1	10		6	63	1	4
2002	55	6	4	4		7	66	1	4
2004	46	7	3	4		8	70	1	4
2006	40	12	3			13	79	2	3
2008	43	12	3	1	1	13	101	5	4
2010	46	12	3	1	2	13	109	5	3

美国仍然是世界上 EOR 产量最高的国家，提高采收率技术主要包括热采和气驱(表 1-3、表 1-4)。由于 CO_2 混相驱规模不断扩大，2006 年气驱技术已成为第一大提高采收率技术，产量占 EOR 产量的 55.98%。主要有 CO_2 混相驱、烃混相/非混相驱、 CO_2 非混相驱和氮气驱。热采规模逐年缩小，主要为蒸汽驱、火烧油层和热水驱，产量占 EOR 产量的 44.01%。化学驱规模较小，产量较低。

表 1-4 美国提高采收率产量变化情况

m^3/d

年份	热采			化学驱		气驱			
	蒸汽驱	火烧油层	热水驱	聚合物	表面活性剂	烃混相/非混相	CO_2 混相	CO_2 非混相	N_2
2000	66403	442	49	254	10	19793	30126	10	2337
2002	58143	379	534	0	10	15151	29795	10	2337
2004	54094	302	534	0	10	15469	32715	16	2337
2006	45575	2707	282			15230	37416	429	2337
2008	43751	2707	282			12878	38206	1486	3132
2010	43473	2682	266	11		12893	43260	1456	1431



1.2.2 国内外 N_2 驱的应用现状

(1) 国外应用

氮气(N_2)驱是20世纪70年代中期到80年代发展起来的提高采收率新技术。美国和加拿大等国家进行了大量系统的实验研究及矿场试验。表1-5为美国实施 N_2 驱的几个典型实例。

表1-5 美国实施 N_2 驱成功实例

实施单位	菲利普石油	Spirit 能源	雪佛兰	雪佛兰	Spirit 能源
油田名称	Binger	C. F. U	E. Painter	Painter	C. F. U
起动时间	1997 年	1982 年	1983 年	1980 年	1982 年
驱替类型	混相驱	混相驱	非混相驱	非混相驱	非混相驱
生产井数	55	53	17	33	33
注入井数	23	8	7	13	8
地层岩性	砂岩	白云岩	砂岩	砂岩	白云岩
深度/m	3050	5640	3660	3500	5640
密度/(g/cm ³)	0.8348	0.7628	0.7972	0.7920	0.7628
孔隙度/%	7.5	12.35	11	11.9	12.35
渗透率/mD	0.2	10	3	4	10
日增油量/(bbl/d)	1050	2300	9065	1102	2300

从表1-5可以看出,几个成功实例的 N_2 驱类型既有混相驱,又有非混相驱,既有砂岩油藏,又有碳酸盐油藏,油藏普遍埋藏较深,且为低孔低渗的轻质油藏。图1-2为美国实施 N_2 驱方案数与增油量的变化情况。

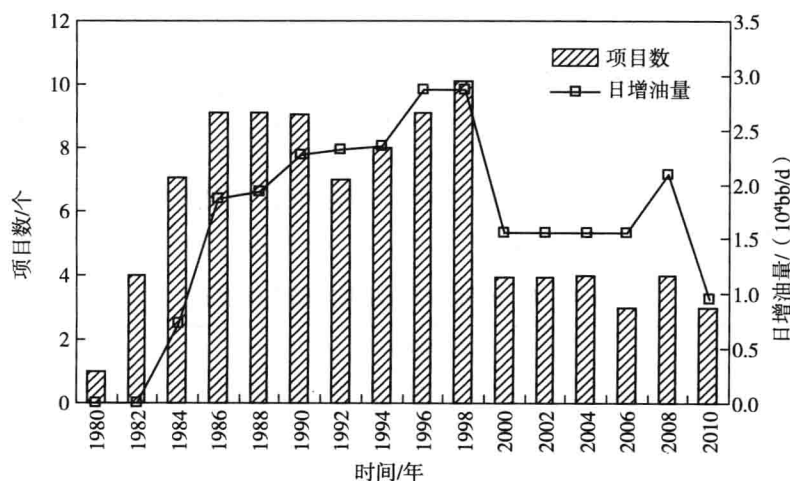


图1-2 美国 N_2 驱项目数与日增油量变化情况

世界上最大的 N_2 驱EOR项目为墨西哥湾坎塔雷尔海上油田。墨西哥国家石油公司帕麦克斯勘探开发公司投资10亿美元,建成世界上最大的 N_2 生产厂及其配套的输送设施,于2000年11月开始投产运行。该氮气厂设4套 N_2 生产装置,每套均由世界上最大的空气分



离装置组成,生产总能力为 $3398 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 高纯度、高压 N_2 。 N_2 通过配气系统输至墨西哥湾坎塔雷尔大型海上油田,其陆上及海底管线的总长为 113km。将 N_2 注入坎塔雷尔各油井,维持地层压力,提高油田产量。坎塔雷尔油田从 20 世纪 70 年代油田开采以来,累积产油量 $12.36 \times 10^8 \text{ m}^3$,占墨西哥石油总产量的 40%,由于地层压力下降,每口井的产量由开始时的 $5530 \text{ m}^3/\text{d}$ 降至 1997 年底的 $221 \text{ m}^3/\text{d}$ 。为提高产量,该油田未按常规进行二次注水采油,而是直接开展注 N_2 开发,并收到了明显的效果,该公司预测实施 N_2 驱后油田产量能够增加 60%。

(2) 国内应用

国内注 N_2 开发起步较晚,华北油田雁翎油田为裂缝性潜山挥发性油藏,在 1986 年底开始与 TOTAL 法国石油公司合作,1994~1999 年共进行了 3 次注气,累积注气 4.6 万 m^3 ,取得一定效果。

国内矿场试验较多、规模较大、效果较好的为江汉油田,自 1997 年开始进行 N_2 驱矿场实验,已开展 16 井组氮气-水交替非混相驱和氮气吞吐矿场试验,累积增油 49178t;氮气吞吐 6 个井组,累积增油 7999t。

中原油田在卫 42 块进行了一个井组的 N_2 驱先导试验,该块平均空气渗透率为 $3.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,埋深为 3290m,注水压力 45MPa 时,单井日注水量为 $15 \sim 30 \text{ m}^3$,注水困难,地层亏空大,产量下降快,注气前产量仅 $1 \sim 3 \text{ t/d}$ 。注气启动压力为 50MPa,上升到 56.5MPa 时压力维持稳定,注气 50d 后见效,平均日增油 4.6t,停注后产量迅速下降。效果不甚理想,但证明了高压注气工艺是成功的。

国内外的矿场试验说明 N_2 驱的注气工艺是成熟的, N_2 驱可以解决部分低渗透油田提高采收率的难题,但还有许多难题需要攻关研究, N_2 驱的关键在于选择适合 N_2 驱的油藏和注气方式的优化。

1.2.3 国内外 CO_2 驱现状

(1) 国外应用

美国二氧化碳(CO_2)驱主要以混相驱为主,非混相驱不论实施项目数还是日增油量都与混相驱相去甚远(图 1-3)。其他一些典型应用案例如下:

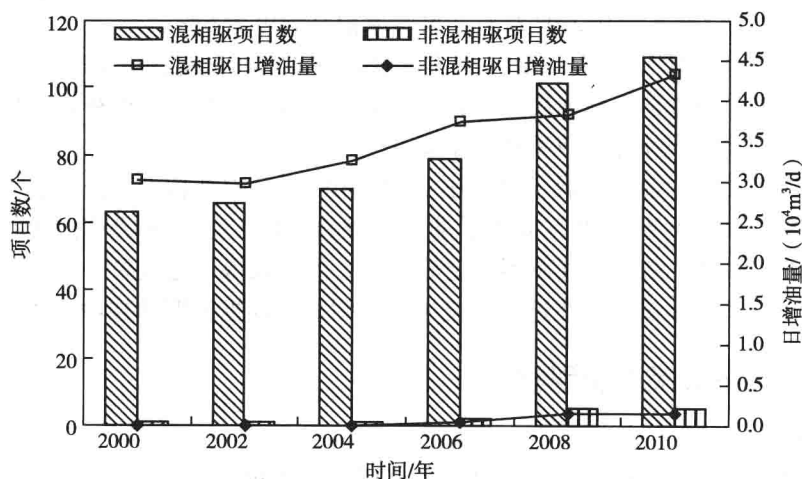


图 1-3 美国 CO_2 驱项目数与日增油量变化情况



1976年Phillips石油公司在阿肯色州的Lick Creek油田开始进行非混相CO₂驱项目。产层埋深686m,孔隙度为33%,渗透率为 $1.184\mu\text{m}^2$ 。在油藏温度48℃下,原油相对密度为0.95,黏度为 $160\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。一次开采采出原油 715440m^3 ,峰值产量为 $302\text{m}^3/\text{d}$,随后逐渐递减到 $37\text{m}^3/\text{d}$ 。这个项目涉及面积为 6.64km^2 ,由4个不同阶段组成:①所有采油井均用CO₂进行吞吐;②向注入井中注CO₂;③向注入井中注入CO₂和水;④向注入井中注水。在第一阶段,用CO₂进行吞吐的目的是使残余油可与CO₂接触,使生产井通过自喷开采。这一阶段某些井的产油量从 $0.8\text{m}^3/\text{d}$ 增加到 $1.6\text{m}^3/\text{d}$ 及 $16\text{m}^3/\text{d}$ 以上;第二阶段增加了油层压力,由溶解气驱机理驱替原油。这一阶段生产井也可以自喷开采,产油量增加了,但同时也出现了问题,发现了CO₂气窜;第三阶段,水和CO₂以1:1的WAG比注入,采取了气举方式生产,产油速率稳定。由于见水,使产量逐渐从 $127\text{m}^3/\text{d}$ 降至 $64\text{m}^3/\text{d}$ 。据估计由注CO₂增产的油量为 254380m^3 ,同时在开采过程中还存在原油起泡及油管腐蚀的问题,用非离子聚合物处理注入井可减少CO₂气窜。

美国路易斯安那州Paradis油田位于南路易斯安那州。油层深3139.4m,有效厚度15.2m,孔隙度28%,渗透率 $1.033\mu\text{m}^2$,油藏温度90.6℃,原油相对密度0.8348,原油黏度 $0.5\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。1984~1985年期间,在该油田的11口井上进行了CO₂吞吐采油试验。试验时首先往井里注入大量的CO₂,随后关井浸泡一个周期,然后开井生产。有的井曾进行两个甚至三个周期的CO₂吞吐采油。位于新奥尔良西部T油藏Main层上的一口油井,1984年3月进行CO₂吞吐采油。在第一个周期中,3d的注气时间里,共向井里注入了 509706m^3 的CO₂,随后关井浸泡3周。然后开井生产,开始产量 $23.85\text{m}^3/\text{d}$ (试验前 $3.66\text{m}^3/\text{d}$),生产了 1430.89m^3 油以后,产量开始递减,直到降至 $3.66\text{m}^3/\text{d}$ 。1985年2月,该井又进行了第二个周期的CO₂吞吐采油。在5d的注气时间内,又向井里注入 7333874m^3 的CO₂,随后关井浸泡,到1985年3月开井生产,初期产量为 $43.1\text{m}^3/\text{d}$,以后稳定在 $36.25\text{m}^3/\text{d}$ 。

(2) 国内应用

1988年大庆油田在萨南东部过渡带开辟了注CO₂试验区,矿场试验用的CO₂是大庆炼油厂的副产品,纯度为96%。1990~1995年底先后对葡I2油层和萨II10~14油层进行了非混相CO₂驱油先导性矿场试验。两次试验均采用先进行前期水驱,而后进行水、气交替注入方式,CO₂气体注入总量各为0.2PV左右,采收率提高幅度为6%。

1998年江苏富民油田富14块开始了注CO₂混相驱油现场试验,由于距离CO₂气源较近,且具有CO₂混相驱油的各种有利地质条件,试验效果较好。CO₂混相驱有效地提高了该区块的采收率,在试验阶段内原油采收率提高了2.09%。

此外,国内还在草舍油田开展了直接注CO₂混相驱,在吉林新立油田开展了非混相驱气水交替CO₂、特低渗大庆芳48井区开展了非混相驱直接注CO₂井组试验,试验过程中出现了CO₂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。

1.2.4 国内外烃类气驱现状

(1) 国外应用

美国烃类气驱应用规模仅次于CO₂驱和蒸汽驱,与火烧油层增产方式规模相当(表1-3、表1-4)。其他一些典型应用案例如下:



北欧 Ekofisk 油田于 1969 年发现, 孔隙度 25% ~ 40%, 渗透率 $(0.1 \sim 5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属高孔隙度、特低渗透率挥发性、欠饱和硅酸盐油藏。1975 年开始注入烃类气体, 1975 ~ 2001 年, 注气提高采出程度 2% ~ 3%。

英国北海第一个混相驱工程在大型南 Brae 老油田实施。自 1983 年投入开发以来, 其产油量已超过 265MMstb, 主要采用水驱。在得到室内实验和油藏模拟的验证后, 1994 年实施了先导试验工程。全油田气驱油藏模拟表明, 注入 200bcf ($1\text{bcf} = 10^9 \text{ft}^3$) 的天然气可增产原油 18 ~ 32MMstb, 相当注入气的一半多被回采出来, 由于天然气的出口受到限制, 注入气的机会成本可以忽略不计。综合考虑这些因素, 气驱工程具有较高的经济效益。

加拿大的注烃混相驱在提高采收率的方法中一直占主导地位。2006 年加拿大以烃类混相驱为主, 共 22 项, 注气油田基本上都是白云岩和石灰岩, 除一个油田的岩性为砂岩。22 个烃类混相驱项目中, 成功 20 项, 有前途 2 项。目前阿尔伯达正在进行的混相驱, 平均最终采收率达到 59%, 平均纯水驱采收率为 32%。混相驱工程中大部分是注气重力排驱形式, 也有少数采用气/水交替注入法的水平混相驱工程。垂向混相驱比纯水驱采收率提高了 15% ~ 40% 的原始地质储量, 而水平混相驱增加的采收率为 5% ~ 20%, 相对较小。

除此之外, 委内瑞拉的 Carito Central 油田和挪威北海的 Gullfaks 油田也都进行过注气提高原油采收率的现场实施。以 Carito Central 油田为例, 它是目前全世界最大的注天然气采油项目, 其油藏孔隙度为 12% ~ 20%, 渗透率为 $(10 \sim 1000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 地层深度 3962 ~ 4420m, 原油 API 度为 21 ~ 33, 原油黏度为 0.1 ~ 0.5mPa · s。该油田 1996 年投产, 采用注天然气混相驱方法采油, 2000 年注天然气采油方法的原油增产量达到 $400 \times 10^4 \text{t/a}$ 。

(2) 国内应用

吐哈葡北油田是我国第一个采用注天然气混相开采的油田, 开发方式为气水交替注入混相驱开发。葡北油田气水交替混相驱投产以来, 油田产量保持稳定, 地层压力保持水平、井底流压控制程度和注入气组分均在方案制定的技术政策范围内。地层流体黏度由原始的 0.67mPa · s 降为 0.20mPa · s, 体积系数由 2.210 增大为 2.819, 饱和压力由 29.44MPa 上升为目前的 32.86MPa, 原油组分变化明显, 中间烃含量由 23.79% 上升至 25.12%, 说明葡北油田实现混相驱开发, 效果较好。

文南油田文 72 块沙三中油藏开展了贫气非混相驱提高采收率研究, 进行了室内实验研究和油藏数值模拟研究, 研究结果表明文 72 块沙三中油藏最小混相压力为 47.1MPa, 在目前地层条件下可达到近混相, 针对深层低渗透油藏开展注贫气近混相驱, 可大幅度提高采收率, 注天然气驱的最大注气压差是注水的 0.48 倍, 可通过天然气驱实现深层高温高压低渗透难采油藏的开发。

安塞油田是典型特低渗透油田, 其储油层为三叠系延安组致密砂岩, 地质储量 $5000 \times 10^4 \text{t}$, 该区渗透率较低, 平均孔隙度为 11.7%, 平均渗透率为 $0.97 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 原油密度为 0.84 ~ 0.85g/cm³, 地面黏度为 4.8 ~ 7mPa · s, 地下黏度 2 ~ 3mPa · s, 油层压力为 8.31MPa, 饱和压力为 4.65 ~ 6.79MPa, 油层温度 45℃, 原始含水饱和度为 0.46, 原始含油饱和度为 0.54, 油藏无气顶。注入天然气, 当注入 80% C₂H₆ 时, 可实现混相驱替。计算水驱采收率是 20.6%, 而天然气驱采收率是 26.3%, 采收率增长大于 5%。

1.2.5 国内空气驱现状

(1) 国外应用

表 1-6 国外低渗油藏空气驱项目基本开发数据表

油田名称	Buffalo	MPHU	HorseCreek
主产层	红河 B	红河 B、C	红河 D
油藏类型	碳酸盐岩	碳酸盐岩	碳酸盐岩
面积/ 10^4 m^2	3110.4	3888	1548.72
主产层顶部深度/m	2575.56	2895.6	2781.3
净产层平均厚度/m	3	5.5	6.1
平均孔隙度/%	20	17	16
平均空气渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	10	5	10~20
初始含油饱和度/%	55	57	65
油藏温度/ $^{\circ}\text{C}$	102	110	104
油藏原始压力/MPa	24.8	28.4	27.6
原始地质储量/ 10^6 t	5	5.4	6.2
原油地面相对密度	0.876	0.830	0.865
泡点压力/MPa	2.1	15.5	4.3
溶解气油比/ $(\text{Sm}^3/\text{Sm}^3)$	21.4	93.4	36.5
地层体积系数	1.16	1.4	1.205
地层原油黏度/ $(\text{mPa} \cdot \text{s})$	0.5	0.5	1.4
一次采收率/%	5.95	15	9.92
二次采收率/%	15.67	14.25	16.62
总采收率/%	21.62	29.25	26.53

1967 年至今,美国先后在 Sloss、West Heidelberg Unit 油田以及 Williston 盆地的 Buffalo、MPHU、Horse Creek 以及 W. Hackberry 等油田进行空气驱二次和三次采油现场应用,获得了显著的经济效果。目前,美国 Williston 盆地东南部的 Coral Creek 油田进行了空气驱先导性试验,阿根廷的 Barrancas 油田进行了空气驱可行性评价,印度尼西亚 Handil 油田进行了空气驱先导性试验,挪威北海西南的 Ekofisk 油田进行过空气驱室内实验和数模评价。

表 1-6 列出了 Buffalo、MPHU、Horse Creek、Coral Creek 等国外 4 个低渗油藏空气驱项目的基本开发数据。表 1-7 列出了 Sloss、W. Hackberry、West Heidelberg、Barrancas、Handil 等国外 5 个中高渗油藏空气驱项目的基本开发数据。在实施空气驱采油的油藏中,所有的油藏温度均高于 85°C ,所有油藏的地层原油黏度均低于 $6 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,所有的油藏渗透率均大于 $(5 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,大部分为中低渗透油藏。根据综合分析国外空气驱项目及各自的开发数据可以看出,通过空气驱可以提高 14%~16% 的采收率。