



ZHUQI TIGAO YOUTIAN
CAISHOULV JISHU WENJI

注气提高油田采收率 技术文集

袁士义 主编



石油工业出版社

注气提高油田采收率技术文集

袁士义 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书精选了中国石油学会石油工程专业委员会 2016 年召开的“注气提高采收率技术研讨会”录用的 75 篇文章,涵盖了二氧化碳驱、氮气驱、空气驱、烟道气驱和烃气驱等不同气体介质的驱油技术,内容涉及注气驱油机理、适应性评价、油藏工程设计、矿场试验工艺、试验效果和经验教训,以及在研究和试验过程中所应用的新技术、新方法等,反映了我国注气提高采收率技术的最新进展和发展趋势,将对我国气驱提高原油采收率及 CO₂ 埋存技术的发展起到积极的促进作用。

本书可供从事油田提高采收率研究工作的科研人员与高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

注气提高油田采收率技术文集/袁士义主编.

北京:石油工业出版社,2016.4

ISBN 978-7-5183-1146-0

I. 注…

II. 袁…

III. 注气(油气田)-文集

IV. TE357.7-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 031397 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www.petropub.com

编辑部:(010) 64523712

图书营销中心:(010) 64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:保定彩虹印刷有限公司

2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:39.75

字数:1017 千字

定价:158.00 元

(如发现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

《注气提高油田采收率技术文集》

编 委 会

主 编：袁士义

副主编：胡永乐 钟太贤

编 委：杨思玉 窦宏恩 郝明强 罗 凯 高永荣

唐 磊 郑洪印

前言

注气提高原油采收率技术越来越受到业界重视,应用规模和范围逐渐扩大。根据美国《油气杂志》2014年统计,仅美国2014年气驱(包括烃气驱、二氧化碳驱、氮气驱、烟道气驱等)项目数量就达到134个,占当年提高采收率项目总数的67%;气驱年产量达到2300多万吨,占当年提高采收率项目总产量的61%。气驱所应用的油藏类型也日益广泛,从最初的以低渗透油藏为主,逐步拓展到高含水老油田、稠油油藏、碳酸盐岩油藏和致密油藏等复杂类型油藏。而且,随着已开发油田的老龄化、待开发油田的劣质化,注气提高采收率技术的独特优势会越发突出,应用潜力将越来越大,技术前景十分光明。

我国早在20世纪60年代就在大庆油田开展了注气提高采收率的室内研究和矿场试验,但由于气源条件、压缩机装备和油藏气窜严重等瓶颈技术制约,该项技术在相当长一段时间发展缓慢。直到90年代,才陆续在吐哈葡北油田、江苏草舍油田、大庆宋芳屯油田,以及吉林、胜利等油田开展先导试验,但总体开发经验不足、技术不配套。最近十年,我国大力开展二氧化碳驱油提高采收率关键技术攻关,初步形成相关配套理论和技术,并在吉林、胜利、大庆、江苏等油田进行扩大化试验应用,取得了显著的效果。同时,天然气驱、空气驱等技术也进入快速发展阶段。

为了总结交流近年来的最新研究成果和矿场实践经验,掌握气驱开发技术的应用潜力和发展趋势,促进我国注气提高采收率技术的应用和发展,中国石油学会石油工程专业委员会联合国家973项目“二氧化碳减排、储存和资源化利用的基础研究”及国家油气科技重大专项“CO₂驱油与埋存关键技术”项目组,于2016年5月组织召开“注气提高采收率技术研讨会”,并于2015年年初开始征文。在中国石油、中国石化、中国海油等石油公司以及相关科研院所和高等院校的热情支持下,相关技术人员踊跃投稿。本次研讨会共收到论文90篇,通过专家审核,筛选出75篇编纂成册,公开出版发行。这些论文涵盖了二氧化碳驱、氮气驱、空气驱、烟道气驱和烃气驱等不同气体介质的驱油技术,内容涉及注气驱油机理、适应性评价、油藏工程设计、矿场试验工艺、试验效果和教训,以及在研究和试验过程中所应用的新技术、新方法等,反映了我国注气提高采收率技术的最新进展和发展趋势。相信本次研讨会的召开和论文集的出版,将对我国气驱提高原油采收率及CO₂埋存技术的发展起到积极的促进作用。

中国石油学会石油工程专业委员会

2016年3月

目 录

注气提高采收率理论与技术进展	袁士义 胡永乐 郝明强 (1)
----------------------	-----------------

基 础 研 究

基于一维流动的低张力泡沫驱数值模拟关键参数研究	李 冉 李兆敏 李松岩 李金洋 (19)
基于 B 样条模型计算非混相 WAG 烃气驱三相相对渗透率曲线	王代刚 胡永乐 李 勇 孙静静 (27)
一种改进型 CO ₂ —原油体系黏度预测模型	廉黎明 秦积舜 马德胜 杨思玉 杨永智 (37)
界面张力消失法与细管实验法对比研究	刘 勇 杨清彦 张 江 肖鲁川 (48)
超稠油油藏 CO ₂ 辅助蒸汽吞吐增产机理及参数设计	焦春宇 周广兴 (55)
强边底水稠油油藏水平井氮气泡沫堵水研究与应用	杨 开 汪小平 顾 宏 张学钦 (67)
氮气泡沫凝胶调剖技术在蒸汽吞吐井的应用	陈小凯 (78)
烟道气对稠油流变性影响室内实验研究	梁 涛 (89)
烟道气+蒸汽混合气驱注入参数设计研究	马 振 (94)
东河塘油田注天然气驱机理研究与应用	范 坤 周代余 张 敏 旷曦域 (111)
吉 7 中深层稠油注空气氧化特性研究	陈 龙 潘竞军 李得志 王如燕 (118)
火驱生产井套管材质腐蚀规律及机理研究	陈莉娟 潘竞军 陈 龙 计 玲 王如燕 (124)
吉林油田含 CO ₂ 气藏开发及 CO ₂ 驱防腐技术研究进展	黄天杰 殷安会 (129)
复杂断块油藏空气泡沫驱技术研究 with 试验	程海鹰 柳 敏 杨怀军 张 津 纪朝凤 蔡明俊 (134)
天然气驱不同驱替方式长岩心驱油实验研究	张 宏 任红梅 王洪涛 刘 玮 (146)
温西一区块低渗低黏油藏泡沫辅助氮气驱机理研究	黄 鹏 王晓燕 罗 中 (155)
牺牲阳极防腐技术在火驱井的应用研究	薛建兴 蒋海岩 廖坤梦 袁士宝 (166)
复杂断块油藏空气泡沫驱提高采收率技术研究	刘怀珠 郑家朋 彭 通 邢丽洁 (172)
富含沥青质油藏注伴生气提高采收率方法	廉培庆 谭学群 高慧梅 丁美爱 (181)
碳酸盐岩缝洞型油藏单元注氮气驱油规律研究	王建海 曾文广 马清杰 杨利萍 (189)
A 油田 CO ₂ 驱最小混相压力预测方法研究	王 帅 贾 振 张 慧 (195)
海上稠油注空气强化提高采收率技术实验研究	崔盈贤 张 健 唐晓东 李晶晶 康晓东 赵文森 (201)

二氧化碳驱效果相对评价方法研究	赵传峰	郑家朋	孙桂玲	孙 蓉	(209)
稠油油藏注空气原油氧化反应燃料沉积特性研究	袁成东	蒲万芬	赵琦宁		(214)

工程技术与方法

低渗透油藏气驱稳产年限计算方法研究	王高峰	张云海	汪艳勇	郑国臣	(227)
非凝结气体辅助 SAGD 技术的生产特征研究	郭二鹏	高永荣	蒋有伟	王红庄	(236)
美国残油区有望成为增储上产新领域	何艳青	王 璐	张焕芝		(244)
辽河油田氮气驱技术探索及应用前景	谷 团	陈淑凤	姚 睿	崔 洁	张潇月 刘 洁 田 梅 (251)
HF 块注空气低温氧化油藏因素可行性评价研究				袁 平	(263)
数值模拟在非烃类气驱提高采收率中的应用				宋新利	(267)
小洼油田非烃类气体辅助吞吐增效技术研究与应用	齐 鹏	张新委	陈志会	丁一铭	(278)
超深稠油热汽—气 (CO_2/N_2) 井筒降黏采油技术研究				李 君	(286)
潜山注气工艺技术				贺梦琦	(296)
轮古油田缝洞型油藏注氮气提高采收率研究与实践	马小平	刘志良	刘俊锋	肖 云	(304)
准噶尔盆地 CO_2 驱油与埋存潜力评价	顾鸿君	楼仁贵	王延杰	喻克全	(318)
低孔低渗油田注天然气提高采收率可行性研究——以哈国 NN 油田侏罗系 J_2ds 层为例	郑 强	张秀丽	高立群	李晓峰	(323)
红浅火驱稳产和调控技术研究	姚团军	李 丽	黄继红		(330)
CO_2 混相驱动用储层物性下限探讨	李金龙	陈国利	吴 伟	王 昊	(338)
高饱和油藏天然气驱注入方式优化研究	王睿思	王 莉	曾庆桥	王 哲	(342)
冀东油田断块油藏二氧化碳驱油藏工程优化设计	曹亚明	郑家朋	孙桂玲	孙 蓉	邢丽洁 付治军 骆洪梅 周 敏 (355)
塔河缝洞型油藏单井注氮气效果及影响因素研究	解 慧	陈 勇	杨占红	郭 臣	赵 娟 (366)
塔河缝洞型油藏单井注氮气提高采收率技术	胡文革	刘学利	杨占红	窦 莲	陈 勇 (376)
海上高含 CO_2 高含凝析油气顶油藏提高采收率研究				余华杰	(384)
基于实验设计的低渗油藏 CO_2 驱 EOR 与埋存设计	李保振	张 健	康晓东	唐恩高	(391)
海上气水交替驱提高采收率技术及先导试验井组方案优化研究	刘建国	张 雷	陈建波	张振杰	(400)
渤海稠油油田注二氧化碳开发技术探讨	王成胜	翁大丽	易 飞	郑继龙	(406)
稠油油藏注空气低温催化氧化采油技术研究应用进展	唐晓东	李晶晶	张洋勇	崔盈贤	朱国金 (415)
火驱点火阶段注气速度的讨论	蒋海岩	张 红	李俊峰	李青青	(422)

现场应用

厚层块状超稠油油藏火驱辅助重力泄油试验研究	宫宇宁	李晓漫	韩 冰		(431)
-----------------------------	-----	-----	-----	--	-------

复合热载体高干度注汽技术研究及现场应用	王俊英	(437)
火烧油层监测新技术发展	张弘韬	(442)
注气开发巨厚变质岩潜山油藏的新方式	许宁 梁飞 孙博 司勇 邱林	(455)
高凝油潜山油藏注空气采油实践与认识	鲁奕宁 鲁红光 王家帮 马占军	(461)
黄沙坨油田氮气驱先导试验研究	乞迎安 汪小平 田鑫 景峰 王佳 刘可心	(468)
欢北杜家台低渗油藏注氮气辅助水驱试验	乔长发	(476)
沈 257 砂岩油藏二氧化碳驱先导试验	鲁奕宁 鲁红光	(482)
潜山油藏非烃类驱技术研究与应用	马占军 蔡亮 刘大伟 杨轶博	(488)
CO ₂ 辅助调剖改善水平井生产效果	王诗 耿立峰 肖程 尹志成	(496)
杜 84 块兴 I 组注 N ₂ 改善双水平井 SAGD 开发效果研究	尹志成 耿立峰 王诗 王璐璐	(504)
西峰油田董志区长 8 油藏氮气驱先导试验	刘笑春 黎晓茸 贾玉琴 马丽萍	(509)
超深高温高盐油藏注天然气提高采收率评价与应用	周代余 范坤 钟军 旷曦域	(516)
Aryskum 油气田 M-II 层气顶注气开发效果评价	郑强 赵立斌 周德阳 张韵洁	(522)
CO ₂ 驱油与地质埋存监测技术研究及应用	张华 林万臣 张威 陈江	(533)
枣 35 火成岩稠油油藏蒸汽吞吐研究与实践	王学立 邹瑾文 路永萍 王振强	(540)
葡北油田注气混相驱开发实践与认识	李正科 韩继凡 张新 任波	(544)
注二氧化碳提高石油采收率技术与运用	龚晶晶 高东华 方度 张雪娜 罗福全	(554)
CO ₂ 驱吸气剖面测井技术优选	汤金奎 李晓萌 刘晓彤 刘保忠	(564)
高倾角油藏 CO ₂ 非混相驱见效特征及气窜规律	汤金奎 刘晓彤 史英 贾倩倩	(570)
二氧化碳吞吐增油技术在南堡油田的应用	鲁娟党 刘建庄 张锋刚 于斌	(577)
薄浅层超稠油氮气辅助蒸汽吞吐开采技术研究	王学忠	(583)
碳酸盐岩缝洞型油藏注氮气吞吐采油机理研究及现场实践	惠健 陈勇 谭涛	(597)
具有组分梯度的深水高挥发性油藏注气开发实践	苑志旺 杨宝泉 杨莉 顾文欢 尚凡杰	(603)
延长油田稀油火驱试验与探索	高海龙	(611)
厚层稠油油藏火驱注采层段选择与调控技术研究	叶华兴	(620)

注气提高采收率理论与技术进展

袁士义¹ 胡永乐² 郝明强²

(1. 中国石油天然气集团公司咨询中心; 2. 中国石油勘探开发研究院)

气驱、热采和化学驱是目前国际上已进入矿场规模化应用的三大提高原油采收率(EOR)技术。近些年,气驱开发技术发展迅速,应用范围和产量规模逐年增大。据2014年美国《油气杂志》公布的世界EOR调查^[1],气驱项目数量达到176个,占EOR总项目数量的53%,产量也超过EOR总产量的40%。而且,随着待开发油气资源的逐渐劣质化,气驱提高采收率技术的独特优势将会越发明显,应用潜力巨大、前景广阔。

已进入工业化应用的注气提高采收率技术主要包括:CO₂驱、空气驱、氮气驱、烃类气驱和烟道气驱等^[2]。根据我国气驱开发技术的应用现状和发展趋势,本文主要介绍CO₂驱、空气驱和天然气驱技术。

1 CO₂驱提高采收率技术

1.1 发展历程

1945年,Poettmann和Katz^[3]发表论文描述了CO₂与芳香烃体系的相态特性,并指出CO₂具有降黏、使原油体积膨胀等性能,尽管当时还没有CO₂驱油的概念,但该项研究成果为后来CO₂驱油技术的诞生奠定了基础。1952年,由Whorton等人^[4]申报的世界上第一个CO₂采油专利问世,多数学者将其视为CO₂驱油技术的开端;在此之后的几年内,美国又陆续获得了4项关于CO₂非混相(碳酸水)驱提高采收率的专利权^[5]。1958年,Shell公司率先在美国Permian盆地二叠系储层实施了井组规模的CO₂驱油试验,主要目的是增加注入能力以保持地层压力^[6]。20世纪70年代,美国、苏联等国家都进行了大量的CO₂驱油工业化试验;其中,美国于1972年1月在二叠系盆地萨克洛克油田成功实施了世界上第一个工业化CO₂混相驱项目^[7],CO₂通过与原油混相、有效降低原油黏度和油气界面张力、使原油体积膨胀、改善流度比、增强注入能力将地层压力保持到较高水平等作用机理,驱油效果明显改善,初期平均单井产量提高3倍以上。80年代,CO₂驱油技术在美国得到了飞速发展,并迅速推广应用;到了90年代,这项技术日益成熟。进入21世纪,随着国际社会对温室气体减排的关注,进一步助推了CO₂驱油技术的快速发展^[8]。然而,CO₂非混相驱项目开始相对较晚,直到1998年11月,才实施了第一个工业化CO₂非混相驱Sho-Vel-Turn项目^[5],其主要的驱油机理是:使原油体积膨胀、降低原油黏度、抽提原油中的轻质组分以及溶解气驱作用等。虽然近几年非混相驱项目也有所增加,但一直发展缓慢,项目失败率也较高;在美国乃至全世界绝大多数CO₂驱项目仍为混相驱项目。据统计^[1],2014年全世

界共有 132 个 CO_2 驱项目，其中混相驱项目 117 个，占总数的 89%，产量占比 86%；美国是世界上 CO_2 混相驱项目最多的国家，数量达 109 个，产量超过 $1440 \times 10^4 \text{t}$ ，其数量和产量分别占世界 CO_2 混相驱项目的 93% 和 96%。

我国于 20 世纪 60 年代在大庆油田开展了 CO_2 驱油室内研究和矿场试验，其中小井距井组葡 I₄₋₇ 层早期注 CO_2 矿场试验比水驱提高采收率 10.5%；80 年代，又在萨南东部过渡带开展了水驱后注 CO_2 驱油的井组试验，矿场试验提高采收率 6.0%^[9]。90 年代，江苏富民油田开展了 CO_2 吞吐现场试验^[10]。但由于认识不足、气源条件限制、气窜严重等原因，2000 年之前我国 CO_2 驱油技术一直发展缓慢。最近 15 年来，我国加大了 CO_2 驱油与埋存关键技术的攻关力度，国家“973 项目”、“863 项目”、国家科技重大专项等均对其进行重点攻关，取得了重大突破， CO_2 驱油技术进入快速发展阶段。已先后在大庆油田芳 48 区块、树 101 区块、海拉尔油田，吉林油田黑 59 区块、黑 79 区块、黑 46 区块，胜利油田高 89-1 区块，江苏草舍油田，冀东柳北油田等不同类型油藏开展了 CO_2 驱油技术的先导试验，并在吉林油田建成我国第一个 CO_2 -EOR 示范区。中国石油还计划在长庆、新疆、辽河、青海、吐哈、大港等油田开展 CO_2 驱油与埋存技术可行性评价及矿场试验。

1.2 理论与技术进展

1.2.1 国外理论技术进展

美国是世界上最早使用 CO_2 驱油技术的国家，经过 60 多年的发展， CO_2 驱油各项配套技术已基本成熟；目前，正以提高采收率 25% 为目标，研发新一代 CO_2 驱油技术^[11]。世界上其他国家，如加拿大、法国、匈牙利、特立尼达、土耳其和克罗地亚等国家也都进行了 CO_2 驱油室内实验研究和矿场试验，并取得了显著效果^[12]。近年来，针对理论技术和矿场试验存在的机理和气窜等问题，国外 CO_2 驱油理论技术的发展可概括为以下 4 个方面。

第一， CO_2 驱扩大波及体积技术。这项技术主要通过降低流度比、延缓气体突破、提高注入能力、减少重力分异、改变润湿性等油藏工程原理来实现，主要包括 4 种方法。一是水气交替驱（WAG）方法，这种方法的优点是通过延缓 CO_2 指进和重力分异保持地层压力和提高 CO_2 的利用率；其缺点是水气交替过程中伴随着 CO_2 有大量的水同时注入油藏，延缓了地层原油与 CO_2 的接触机会，残留了较大一部分剩余油，且延长了项目时间^[13]。二是水气同注方法，即在储层上部注水下部注气，有助于降低指进和重力超覆，提高垂向波及效率，进而提高采收率；其缺点是水气同时注入，在井筒容易发生分离，现场不易操作^[14]。三是泡沫辅助 CO_2 调驱方法，这种方法的优点是通过降低流度比来延缓气窜、提高原油与 CO_2 的接触机会；缺点是容易造成地层伤害，且泡沫在地层中的稳定性和有效时间很难控制^[15]。四是单井动态控制方法，根据单井控制的实际地层情况和生产情况进行调剖调驱，优化井的设计和注采参数，延缓和均衡生产井气体突破时间等^[16]。目前，这 4 种方法已在油田现场得到应用。

第二，促进 CO_2 -原油体系混相技术。主要包括两个方面：一是降低 CO_2 -原油体系最小混相压力技术，这种技术主要是在注入的 CO_2 中（或注入之前）添加一些能够降低 CO_2 -原油体系界面张力的化学剂，如 J. Bon 提出在 CO_2 中加入少量的 C_{5+} 可以有效地降低最小混相压力，并针对澳大利亚中部 Cooper 盆地的油藏进行了研究，发现在 CO_2 气体中加入摩尔分数为 0.3% 的 C_{5+} ，可使最小混相压力从 23.7MPa 下降到 19.8MPa^[17]。二是通过提高地层压

力扩大混相区域技术,这种技术主要是通过增大 CO_2 注入量来提高地层压力,注气量最高可达 2~3PV,远大于传统的 0.3~0.5PV;也有油田通过在 CO_2 混相驱之前先注水不采油进行憋压或者提高生产井的井底流压等方法来提高地层压力^[18]。混相驱技术提高原油采收率效果显著,美国 87% 的 CO_2 驱产量来自混相驱^[1]。

第三, CO_2 驱油配套工艺技术。经过长时间的研究与探索,现已形成了对注入 CO_2 进行有效智能监测、对注入层位和生产剖面进行调堵、产出气处理及 CO_2 循环注入、有效筛选适合 CO_2 非混相驱的油藏等方面的配套技术^[19~21]。其中,智能 CO_2 监测技术可以洞悉 CO_2 在油藏中的动态分布,通过遥控智能井的注入量和采出量,从而减少 CO_2 无效循环提高石油采收率。需要特别指出的是,美国有着丰富的天然 CO_2 资源和发达的 CO_2 输送管网,已建成运营干线的总里程达 6000km,为提供价格低廉的 CO_2 气源奠定了坚实基础,气源至井口成本低于 250 元/t。这也是该项技术得以大规模推广应用的重要原因之一。

第四,新一代“ CO_2 -EOR”技术。这项技术通过增大 CO_2 注入量、优化井的设计、改进驱替方式、添加聚合物或其他增黏剂、加入降低最小混相压力添加剂来消除黏性指进和非混相驱的问题,进而降低油藏孔隙中水驱之后的残余油饱和度,使残余油重新流动起来。新一代集成 CO_2 驱油技术的目标是追求提高石油采收率和 CO_2 有效埋存的技术平衡点和经济效益最大化。此项技术很好地诠释了 CCUS (CO_2 的捕集、利用与埋存)的技术理念。通过应用新一代“ CO_2 -EOR”技术,可在现在的基础上进一步提高采收率 10%^[11]。

CO_2 驱油技术的成熟和配套,支撑美国 CO_2 驱油年产油量持续 5 年保持在 $1500 \times 10^4 \text{t}$ 左右,占有 EOR 总产量的 43.5%,提高原油采收率 7%~15%,已成为美国第一大提高石油采收率技术^[1,22]。目前, CO_2 驱油技术进一步向稠油油藏、残余油区 (Residual oil zone, 简称 ROZ) 等新领域扩展应用,并取得较好的试验效果^[23]。随着新一代“ CO_2 -EOR”技术的逐渐成熟,将进一步促进该项技术的规模应用。

1.2.2 国内理论技术进展

最近 10 年,我国加大对 CO_2 驱油提高采收率技术发展的支持力度,先后设立了两期国家“973 项目”、“863 项目”和三期国家科技重大专项项目开展理论、技术、示范工程攻关,中国石油、中国石化等石油公司还配套设立科技专项,围绕制约我国陆相油藏 CO_2 驱油技术发展的关键瓶颈问题进行集中攻关。在借鉴国外先进技术的基础上,经过近 10 年的持续攻关,我国无论在理论、技术还是矿场试验方面都取得了重大进展。

(1) 在理论研究方面,丰富和发展了陆相沉积油藏 CO_2 驱油理论,完善了 CO_2 驱三相渗流规律表征方法^[24]。

针对我国陆相原油组分特征,通过系统的室内实验研究,发现“ C_{7-15} 也是影响混相的重要组分”,突破了国际公认“ C_{2-6} 组分决定混相”的传统观点,在此基础上建立了烃组分组成特征段划分方法,并提出了烃组成系数的概念。较为全面地评价了我国油藏适合 CO_2 混相驱的潜力,建立了 CO_2 -地层油体系相态基础参数数据库以及系列 CO_2 -地层油体系关键参数预测模型和图版,为将室内研究成果向工程应用转化提供了基础。

针对 CO_2 驱三相渗流规律表征难题,利用核磁共振、CT 扫描等实验手段,实验测出了油—气—水三相相对渗透率曲线;在大量物理模拟实验研究基础上,建立了 CO_2 驱油渗流数学模型,对 CO_2 -地层油体系相态及物性参数计算方法进行了多项改进,主要包括:修正 PR-EOS 方程,提高多组分体系相态参数计算精度;引入界面张力判别混相状态;改进

CO₂-原油体系黏度计算模型；引入实验扩散系数计算模型；改进建立了 CO₂ 驱三相相渗计算模型等。从而提高了 CO₂ 驱油藏数值模拟的精度，提升了 CO₂ 驱油藏工程设计的准确性和可靠性。

(2) 在工程技术方面，初步形成了陆相油藏 CO₂ 驱油藏工程优化技术、注采工艺技术、地面工程设计技术及其他配套技术^[25,26]。

在油藏工程方面，形成了考虑 CO₂ 驱特点的油藏精细地质描述方法，构建了“油藏建模、数值模拟、动态分析”一体化软件技术平台，形成了不同尺度的数值模拟方法；建立了陆相油藏 CO₂ 混相驱油藏工程方案设计模式和优化方法；在研究和认识 CO₂ 驱开发规律及影响效果关键因素的基础上，形成了全过程控制与阶段调整相结合的注采调控技术政策和开发调整技术流程。

在注采工艺方面，建立了注入、采出井筒流体流动模型，搭建了注采工艺参数优化设计平台；为了调整注入剖面、有效控制气窜，研发设计了同心双管分层注气工艺和单管分层注气工艺技术及其配套工具；针对采油井腐蚀、高套压、高气油比、低泵效等问题，形成了气举—助抽—控套一体化举升工艺、防气泵高效防气举升工艺、高效防气装置举升工艺等 3 种高效举升工艺技术。

在地面工程方面，突破了 CO₂ 长距离管输及超临界注入技术瓶颈，实现从先导试验到规模化应用关键的“四个转变”，即 CO₂ 注入方式从液相向超临界转变、站模式从橇装小站到规模建站转变、CO₂ 运输从罐车运送向长距离管输转变、循环注气方式从产出气分离后注入向直接回注转变，支撑了国内首座超临界循环注入站安全运行；形成 CO₂ 液态和超临界注入技术，提出了直接回注、混合回注和分离提纯后回注 3 种 CO₂ 产出气循环注入方法，建成两套循环注气中试装置，实现了 CO₂ 零排放。

除了油藏工程、注采工艺、地面工程三大主体技术以外，同时还形成了 CO₂ 驱油与埋存腐蚀防护技术、安全风险评价及控制技术、监测技术以及 CO₂ 驱油与埋存潜力评价等配套技术系列。

(3) 在矿场试验方面，近几年我国实施了多个 CO₂ 驱先导试验项目，取得了较好的驱油效果，丰富了现场实践经验^[27,28]。

吉林大情字井油田黑 59 区块为特低渗透油藏，于 2004—2008 年陆续投入注水开发。2007 年下半年确定为 CO₂ 混相驱试验区，共形成 6 个完整注气井组，总井数 26 口，注入井 6 口。从 2008 年 5—10 月陆续投注 CO₂。2008 年 11 月—2009 年 9 月快速补充地层能量，2010 年 4 月—2011 年 12 月 WAG 注入，预计试验区可提高采收率 10% 以上。黑 79 南区块于 2001 年开始注水开发，进入 2009 年产量开始递减，最低单井日产量 2.5t。2010 年 3 月采用原反九点井网进行注气开发，注气井 18 口，油井 46 口。到 2010 年底，黑 79 区块南部注气较早的 8 个井组地层能量得到有效补充，提高单井产量的效果十分明显。到 2011 年 9 月，黑 79 南部单井日产量仍然维持在 4t 的较高水平，预计可提高采收率 10.4%。

大庆榆树林油田树 101 区块平均渗透率 $1.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，注水开发效果差。从 2007 年开始注 CO₂ 开发，油井不压裂投产初期的单井日产油就达 2.9t，稳定产量仍可保持在 1.7t 以上。且油层一直保持较强的吸气能力，使得地层压力保持在较高水平，采油速度连续 4 年保持在 1% 以上，远高于同类水驱区块采油速度。

2007 年胜利油田在高 89-1 区块开展 CO₂ 驱油先导性试验。CO₂ 的注入使对应的 5 口生产井产量上升，井组日产油从 31.6t 上升至 42.1t，累计增油 7500t。其中高 89-9 井产量从

注入前的每天 4.5t 上升到 9t, 增长了 1 倍。2011 年又在腰英台油田的低渗透高含水油藏进行了 CO₂ 驱先导试验, CO₂ 注入能力是注水能力的 1.5~2.0 倍, 50% 以上的油井见到较好的注气效果。

1.3 存在问题及下步攻关方向

我国 CO₂ 驱油技术具有巨大的应用潜力和现实需求。国外该项技术从研发到工业化应用经历了 30 余年, 目前除了实践不足及技术差距外, 我国实施 CO₂ 驱的油藏对象主要为陆相沉积油藏, 相比国外海相沉积油藏要复杂得多, 存在 CO₂ 与陆相原油混相难度较大、油藏非均质严重更易气窜、低渗透油藏油井见气后举升困难, 以及廉价 CO₂ 气源、驱油经济性问题。因此, 还需要针对制约该项技术发展的一些关键瓶颈问题, 进一步加大攻关、试验力度, 不断完善技术体系^[29,30]。

(1) 进一步加强低成本 CO₂ 捕集技术研究和应用。不仅从含 CO₂ 气藏分离 CO₂, 更需要从大量的燃煤锅炉排放中低成本捕集 CO₂, 为 CO₂ 驱油提供廉价的气源。

(2) 针对陆相沉积油藏特点, 深入研发改善 CO₂ 混相条件和扩大波及体积技术, 进一步提高 CO₂ 的驱油效果。

(3) 进一步加强 CO₂ 驱油示范工程和工业化试验, 尽快完善配套工艺技术和相应的标准规范, 推动产业规模应用。

(4) 与 CO₂ 减排埋存技术结合, 在国家相关政策支持下, 进一步提高 CO₂ 驱油和埋存的经济效益和社会效益。

2 空气驱提高采收率技术

2.1 发展历程

注空气驱油技术大致分为 4 个发展阶段: 第一阶段, 注空气的目的是用来保持地层压力, 主要用于枯竭油藏; 第二阶段, 注空气用于火烧油层开采重质油, 主要利用空气中的氧气; 第三阶段, 逐渐把注空气技术推广到轻质油田开发中, 特别是低渗透油藏注空气开发技术不断发展; 第四阶段, 将注空气驱用于中高渗透油藏, 为阻止气窜, 采用空气泡沫驱^[27]。

早在 1910 年左右, 随着压缩机技术的成熟, 美国就开始将空气注入废弃油藏以补充地层能量, 并于 20 年代早期, 开始注空气提高原油采收率试验^[31]。苏联从 1931 年起, 在斯霍特尼兹油田注空气采油, 实施 21 年累计增油 $10.96 \times 10^4 \text{t}$ ^[32]。20 世纪 60 年代以来, 美国针对注空气提高轻质油油藏采收率做了大量研究工作, 并于 1963 年在内布拉斯加州 Sloss 油田实施注空气采油技术, 实施 4 年累计增产原油 $8.4 \times 10^4 \text{t}$ ^[33]; 从 1967 年开始, 美国的阿莫科、雪佛龙和海湾三大石油公司先后在水淹轻质油油藏成功地开展了注空气三次采油现场试验, 增油效果令人瞩目。1971 年在密西西比州 West Heideberg 油田 Cotton Valley 油藏成功实施了注空气项目, 该项目在当时油价 4 美元/bbl 的情况下, 仅用 2.5 年便开始盈利^[34]。70 年代后期, 在 Williston 盆地 Buffalo 油田实施的 BRRU 注空气项目, 提高原油采收率 15.6%, 成为注空气技术的典型成功先例^[35]。1985 年至今, 又先后在威利斯顿盆地 MPHU、HC、CC 等低渗透轻质油油藏进行注空气二次和三次采油先导性试验, 其中, MPHU 油田预计可提高原油采收率 14.2%、HC 油田比氮气驱提高采收率 10%, CC 油田在注气结束时提高采

出程度 7.26%^[36]。最近十几年,俄罗斯、英国、挪威、印度、阿根廷、日本等国家也相继开展了注空气技术的相关研究工作和现场试验。

我国的空气驱技术主要集中在空气泡沫驱方面,增产机理以空气泡沫调剖调驱为主。玉门油田在我国最早开展空气泡沫驱现场试验,分别于 1964 年在 934 井组、1968 年在 6813 井组、1979 年在老君庙油田开展了 3 次现场试验;1971 年,克拉玛依油田也进行了空气泡沫驱试验,但都未获成功^[37]。1977—1978 年,胜坨油田开展了空气泡沫驱试验,增油降水效果明显,试验有效期长达 3 年^[38]。1982 年大庆油田在小井距北井组萨Ⅱ₇₊₈层进行了“正韵律油层注水后期注空气矿场试验”,依靠气体重力分异及水气交替注入方式改善低渗透层位的开发,取得了一定的经验和效果^[39]。百色油田百 4 块从 1996 年开始实施空气泡沫驱技术现场试验,先后经历了空气泡沫驱、空气—泡沫段塞驱、泡沫辅助—空气驱、泡沫辅助—混气水驱等 4 个阶段,取得了较好的驱油效果^[40]。从 2005 年开始,中原油田在东濮凹陷胡 12 断块等 3 个区块实施了空气泡沫驱^[41]。最近 10 年,空气泡沫驱项目数量逐渐增多,先后在长庆吴旗油田、马岭木油田、五里湾油田、河南魏岗油田、延长油矿唐 80 区块等实施了空气泡沫驱技术,均不同程度地见到增油效果。目前,中国石油正在玉门油田鸭儿峡白垩系油藏开展减氧空气驱试验,该项技术主要是降低空气驱的爆炸风险。

2.2 理论与技术进展

2.2.1 国外理论技术进展

国外的空气驱项目以高压空气驱为主,其驱油机理是利用注入空气中的氧气在油藏高温条件下与部分原油发生氧化反应产生的 CO₂、烟道气对原油起驱动作用;同时提升油藏压力、保持地层能量;另外烟道气也可使原油膨胀、降低原油黏度,且在满足温压条件时也可与原油发生混相^[42]。无论从室内研究还是现场试验,国外高压空气驱技术都取得了较为成熟的经验和配套技术,现从以下 4 个方面简要介绍。

第一,轻质油藏高压注空气驱油机理研究。一是建立了完善的轻质油藏注空气低温氧化实验方法,包括等温氧化反应器实验、绝热盘反应器实验、加速测热计实验、高压氧化管实验、等温烟道气/空气驱油实验、绝热空气驱油实验等,这些实验可以在压力高达 40MPa、温度高达 500℃的条件下测试氧化反应动力学参数^[43]。二是明确了注空气驱油机理及影响因素,包括空气驱过程中耗氧量、氧化反应速率等,通过建立氧化动力学模型评价油藏原油的氧化活性与性质变化,确定可燃气体燃爆极限与临界氧含量界限,为制定监测方案和安全控制措施提供理论基础^[44]。

第二,注空气提高采收率油藏筛选与评价技术。空气驱对油藏条件要求比较严格,为了保证项目的成功率,注空气初期应先考察油藏条件评价注空气的可行性,如果可行再进行室内实验评价、方案设计评价和经济评价,优选合理的注空气方式。一是通过总结现场实践经验与教训,明确了影响空气驱油效果的地质因素。对美国 70%以上空气驱项目调查认为,空气驱要求油藏满足以下条件:具有高温高压特点,油藏温度在 100℃左右,以有利于低温氧化和注气混相;油层横向连续性好,最佳产层厚度为 1.2~15.2m,最好是纵向隔开的多个小于 2.4m 的薄砂层,如果油藏巨厚且垂向无遮挡,也可以考虑顶部注气重力驱;垂向深度上限一般为 3600~3800m,必须具备致密盖层等^[45]。二是建立了不同方式注空气提高采收率技术的油藏筛选标准,包括高温氧化—非混相空气驱、低温氧化—非混相空气驱、高温氧化—混相空气驱、低温氧化—混相空气驱等^[46-48]。

第三, 压缩机设计技术。压缩机是高压空气驱项目的核心装备, 国外多采用多级往复式压缩机或多级螺旋式压缩机与往复式压缩机相结合, 设计的压缩机要有足够的级数, 排气温度在 149℃ 以下。如美国 WestHakberry 油田注空气项目采用七级压缩, 由一台串联的两级 Oil~Less 螺旋式压缩机和一台 Ariel JGK~4 五级往复式压缩机组成, 两台压缩机可保证注气量恒定, 且留有余量, 一旦出现故障, 还备有应急补救措施^[49]。

第四, 安全风险控制技术。主要通过 3 项措施防止不同环节的爆炸发生: 一是采用合成双酯润滑剂定期清除管道内的润滑剂沉积, 防止压缩机和管线内爆炸^[50]; 二是采用一套净化洗井液系统, 向井内泵入氮气、水或 2% 的氯化钾水溶液, 将剩余的空气推入地层, 阻止注入井内爆炸^[51]; 三是通过监测产出流体中的氧气含量防止生产设施内爆炸^[52]。

2.2.2 国内理论技术进展

国内注空气提高采收率项目以空气泡沫驱为主, 其驱油机理是通过泡沫封堵气窜通道来增加薄差层的吸气量、调整吸气剖面, 从而扩大波及体积; 另外, 发泡剂能够大幅度降低油气界面张力, 有利于提高微观驱油效率, 因此空气泡沫驱兼有气驱和化学驱的双重优势。在借鉴国外理论技术的基础上, 我国在空气泡沫驱基础理论、工程技术、矿场试验等方面取得了重要进展。

(1) 在理论研究方面, 揭示了不同地层条件下空气驱/空气泡沫驱机理。

在空气泡沫驱方面, 通过注空气泡沫低温氧化与驱油实验, 定量表征了注空气过程中耗氧量规律、氧化反应速率和影响因素、动力学特性和放热特性, 建立了氧化反应动力学模型^[53]。通过系列机理实验, 如空气泡沫体系优选评价实验、封堵能力实验、泡沫稳定性实验、以及起泡剂的损失和抑制机理实验等, 分析了空气泡沫驱对油藏的适应性和驱油效果的影响机理^[54]。开展了非均质油藏空气泡沫驱提高采收率微观驱油实验和岩心驱替实验, 分析了不同注入方式、段塞大小和周期等对采收率的影响规律, 为空气泡沫驱矿场试验提供了依据^[55]。基于空气泡沫驱低温氧化模型与其他经验模型, 建立了三维三相七组分空气泡沫驱数学模型, 为机理分析和开发方案优化设计提供了工具^[56]。

在空气驱方面, 由于我国相比国外差距较大、基础薄弱, 近几年加强了该方面基础攻关研究。建立了物理模拟实验方法系列, 并通过原油氧化动力学特性 (SBR) 实验、泡沫剂动静态评价实验、岩心驱替实验等, 定量研究了原油低温氧化耗氧规律及其主控因素^[57]。通过机理模拟, 分析了空气驱过程中烟道气驱效应、热效应及氧化产生的 CO₂ 效应等不同机理对提高采收率的贡献, 揭示了低渗透油藏注空气提高采收率机理^[58]。

(2) 在工程技术方面, 初步形成了注空气油藏工程优化方法及配套工艺设计技术。

初步建立了考虑油藏温压条件、构造倾角、层间连通性、韵律、孔渗条件、非均质性、流体特征、氧化可行性等因素的油藏筛选评价方法, 以及注空气提高采收率的油藏数值模拟方法, 为空气驱可行性评价及油藏工程优化设计提供了手段^[59]。

借鉴相对成熟的二氧化碳驱、烃气驱等注气工艺设计技术, 结合国外的成功经验, 建立了一套注空气配套工艺设计方法, 包括注入井完井要求和防爆对策、注采井管柱设计要求、空气压缩机优选、地面集输工艺设计、防腐防爆措施等, 同时建立了地面—井筒—油藏一体化的安全生产制度和科学操作规范, 提出了一套有别于其他气驱的矿场安全运行管理模式^[60-62]。

(3) 在矿场试验方面, 自 20 世纪 60 年代以来, 我国许多油田相继开展了空气/空气泡沫驱提高采收率现场先导试验, 如玉门油田、新疆油田、胜利油田、大庆油田、广西百色油

田、中原油田等。近年来,中国石油又针对以大港油田为代表的复杂断块双高油藏和以长庆、大庆外围油田为代表的低渗透油藏开展了空气泡沫驱先导试验。

广西百色上法油田百 4 块为一裂缝性石灰岩油藏,注泡沫前可采储量采出程度达 79.4%,综合含水达 87.1%,地层压力仅有 2.5MPa,接近枯竭。1996 年 9 月—2004 年 8 月实施空气泡沫驱,在 5 口井上累计注入泡沫液 $3.43 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、空气 $843 \times 10^4 \text{ m}^3$,累计增油 $1.48 \times 10^4 \text{ t}$,开采效果和经济效益显著^[63]。中原油田在胡 12 块沙三中 8^6-8 油藏开展了 4 个井组的注空气泡沫调驱试验,从 2007 年 5 月—2008 年 11 月,试验井组累计增油 2465t,综合含水由试验前的 96.2% 降至 92.9%,阶段递减由 26.04% 下降到 2.16%,增加可采储量 $4.44 \times 10^4 \text{ t}$,阶段采收率提高 3.94%,投入产出比达 1:4.35^[37]。

大港油田港东二区五断块是典型的复杂断块双高油田,截至 2011 年底,综合含水达 94.81%,可采储量采出程度达 89.56%;于 2013 年 3 月开始进行空气泡沫驱,预计可降低含水 6% 以上,提高采收率 12%。长庆靖安油田五里湾一区长 6 油藏已进入中含水阶段,截至 2011 年底,综合含水达 42.72%,可采储量采出程度 66.18%,综合递减 7.24%;2009 年底,在 ZJ53 井区开展了 3 个井组的空气泡沫驱先导试验,之后又进行了扩大试验,形成 15 注 64 采的规模,预计可提高最终采收率 7.19%^[27]。

2.3 存在问题及下步攻关方向

由于空气气源丰富、成本低廉,且来源广泛、不受地域和空间限制,因此空气驱提高采收率技术有着十分广阔的应用前景。但是,注空气开发技术是一项复杂的系统工程,涉及地质、油藏工程、注采工艺和配套装备等系列技术问题,加之我国起步较晚、目前尚处于探索阶段,还有很多问题需要进一步攻关^[64,65]。

(1) 由于注空气低温氧化涉及多个化学反应和频繁的相态转换,需要进一步加深机理认识等基础研究;并在物理模拟的基础上,完善注空气提高采收率的数值模拟方法研究。

(2) 针对不同的油藏条件开展多种空气驱注入方式研究,如减氧空气/泡沫驱、注空气火驱、空气与泡沫等堵剂组合驱、空气—水交替驱、空气与 CO_2/N_2 /烟道气等其他气体组合驱等,并进一步完善空气驱筛选标准和可行性评价体系。

(3) 深入研究注空气压缩机和管线爆炸、注入井筒爆炸、生产井爆炸、注气管线和注气井油套管腐蚀问题等潜在的安全问题,确保注空气驱工程的安全;同时在吸收或引进国外先进配套技术的基础上,加强自主研发工艺装备的力度,以提高空气驱项目的经济效益。

(4) 开展注空气驱示范工程和工业化试验,完善配套工艺技术。

(5) 建立空气驱安全操作规范、科学管理规范以及行业标准,推动注空气提高采收率技术规模化推广和应用。

3 天然气驱提高采收率技术

3.1 发展历程

最早向油藏注天然气的思想可以追溯到大约 1890 年左右,地点位于美国宾夕法尼亚州的维南弋县,该项目是将一个已经部分枯竭的砂岩油藏与另一个位于其下部的尚未枯竭的砂岩气藏沟通,实现保持油藏压力的目的^[5]。在这之后的 40 年间,又陆续在西弗吉尼亚州、

俄亥俄州、肯塔基州、伊利诺伊州、俄克拉何马州、堪萨斯州和得克萨斯州等地开展了注天然气项目,但这些项目的主要对象仍为枯竭油藏,注气的目的是保持油藏压力,因此,该阶段注气项目属于“二次采油”的范畴^[31]。20世纪30年代开始进行注气提高采收率技术的研究,40年代至50年代,美国在向油层注入干气过程中发现气窜带来的不利影响,提出水气交替驱的开发方式降低注入气流量^[66]。到了20世纪60年代,加拿大、苏联、阿尔及利亚、智利、利比亚、波兰等国家也相继开展了天然气驱、富化气驱等混相驱开发方式研究,70年代,烃气混相驱达到了顶峰^[67],注天然气技术步入“三次采油”范畴^[68]。此后,印度尼西亚、委内瑞拉、阿曼、挪威、巴西等国家也相继开展了天然气驱项目,并取得较好的开发效果,提高采收率达11.5%~66%(部分与衰竭开发相比)^[69]。由于天然气是一种优质能源,也是重要的化工原料,因此到20世纪90年代后期,注天然气项目开始减少,但仍是重要的提高采收率技术之一。据2014年世界EOR调查统计^[1],世界上烃气驱项目占EOR项目总数的11%,产量占比9.7%。

我国于1989年3月,针对大庆非均质正韵律厚油层分别在北二区东部和北一区断东开展了水—天然气交替注入非混相驱先导试验^[70];1998年9月在吐哈葡北油田实施了我国第一个注天然气混相驱开发现场试验^[71],2003年7月又在温吉桑油田温五区块油藏顶部实施了注天然气水气交替注入非混相驱试验^[72],这些项目均取得了良好的开发效果,其中北一区断东、葡北和温五3个油田分别比水驱提高采收率9%、10%和6.46%。另外,我国于2000年在塔里木牙哈凝析气田采用循环注天然气开发方式,取得显著效果,预计凝析油采收率可以达到60%以上,成为国内外凝析气田循环注气开发的成功典范^[73]。近十几年来,我国又在新疆、大港、长庆、中原、涠洲12-1等多个油田实施过注天然气提高采收率的矿场试验^[74]。这些项目除了葡北油田为混相驱以外,其余均为天然气非混相驱。目前,中国石油正在青海马北油田开展注天然气重力稳定驱先导试验,已初步见到良好效果。

3.2 理论与技术进展

3.2.1 国外理论技术进展

国际上,加拿大天然气混相驱一直在各种提高采收率方法中占主导地位,是世界上烃气驱项目最多的国家,2014年拥有20个烃气驱项目,占世界烃气驱项目总数的56%^[1]。其中,阿尔伯达省的天然气混相驱平均采收率达59%,比水驱高27%^[75]。在注天然气混相驱机理、开采工艺、矿场应用等方面形成了较为完善的技术体系,并积累了丰富的现场经验。

第一,天然气驱物理模拟和数值模拟技术。主要包括3个方面:一是形成了完善的天然气驱物理模拟实验方法和测试技术,并且,流体相态测试技术正在向传压介质无汞化、检测和控制自动化等方向发展,天然气驱物理模拟向微观渗流方向发展,可准确描述微观孔隙结构下油气接触过程中的流体相态变化和渗流特征^[76]。二是根据烃气驱机理新认识,不断修正数学模型和相态模拟软件包,改进数值算法提高计算精度和速度,使天然气驱数值模拟结果更加逼近客观实际^[77]。三是明确了不同类型油藏、不同注气方式下天然气驱提高采收率机理,以及对开发效果的影响规律,建立了天然气混相驱和非混相驱的油藏筛选标准^[78]。

第二,提高天然气驱采收率技术。主要包括4种方法:一是重力稳定驱方法,即从油藏顶部注气向下驱动原油,重力作用削弱了注入气的黏性指进现象,特别适用于垂向厚度大、面积相对较小的油藏,加拿大大多数天然气混相驱采用垂向重力稳定驱形式,可比水驱提高采