

低渗透油藏

开发新技术



才汝成 李晓清 主编

中国石化出版社

低渗透油藏开发新技术

才汝成 李晓清 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书共收集 47 篇论文,集中反映了近几年我国科研技术人员对低渗透油藏的研究成果,包括低渗透油藏的非均质地质模型、渗流特征及水驱油机理、井网优化调整、开发实践及效果评价、储层敏感性、储层保护、注水及水质、注气、注采工艺以及提高采收率等方面的技术方法与成果。

本书内容翔实,资料丰富,图文并茂,是认识与研究低渗透油藏的重要窗口,可供从事油田开发科技与生产人员及有关院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

低渗透油藏开发新技术/才汝成,李晓清主编.

—北京:中国石化出版社,2003

ISBN 7-80164-481-6

I.低… II.①才…②李… III.低渗透油层—
油田开发—新技术 IV.TE348-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 117285 号

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.cn

北京精美实华图文制作中心排版

河北省徐水县印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 16 开本 22 印张 560 千字
2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月第 1 次印刷

定价:68.00 元

《低渗透油藏开发新技术》

编 委 会

主 编	才汝成	李晓清		
编 委	毕义泉	王端平	张 毅	
	姚 军	王增林	李安夏	
	李师涛	刘 静	严进荣	
	陈 东	贾庆生	丁 岗	
	刘天雁	叶柏青	赵 蓉	
	王宣龙	闫治涛	吴海清	
	郭勤涛	陈维东	郑 涛	

前 言

随着油气资源勘探程度的日趋提高，老区新探明储量的品位越来越差，低渗透油藏探明储量的比例逐步提高。目前，我国已探明低渗透油田地质储量 50 多亿吨，广泛分布于全国各个油区，而动用率只有 50% 左右。如何有效动用此类难动用储量、提高低渗透油藏采收率已成为当前研究的重要课题。近年来随着开发新理论、新技术和新方法的发展与应用，低渗透和特低渗透油藏开发取得了重大突破。各油田在低渗透和特低渗透油藏开发实践中积累了丰富经验，为了进一步促进低渗透和特低渗透油藏的开发，及时交流经验和成果，在胜利油田东胜精攻石油开发集团股份有限公司创建十周年之际，胜利油田东胜精攻石油开发集团股份有限公司、山东石油学会地质专业委员会、中国石化石油大学提高油气采收率研究中心、中国石化胜利油田有限公司地质科学研究所和采油工艺研究所联袂举办了“低渗透油藏开发学术研讨会”。

为使会议成果得以广泛及时地传播，胜利油田东胜精攻石油开发集团股份有限公司将研讨会评选出的 47 篇优秀论文正式出版。内容涵盖了低渗透油藏的非均质地质模型、渗流特征及水驱油机理、井网优化调整、开发实践及学果评价、储层敏感性、储层保护、注水及水质、注气、注采工艺以及提高采收率技术等方面。这些论文反映了当前低渗透油藏开发研究与实践的部分最新成果。

该书内容翔实，资料丰富，图文并茂，必将为进一步提高低渗透油藏的开发水平起到承前启后、引路出新的作用；相信本书能对油田开发科技与生产人员、石油院校师生有参考借鉴价值。在此，谨向会议举办单位和论文作者致以衷心的感谢。

目 录

- 发展注气提高采收率配套技术开发低渗透油藏..... 李士伦 黄全华 郭平等(1)
- 国内外低渗透油田开发技术调研..... 苏海芳 吴锦莲 曹嫣红(9)
- 胜利油区低渗透油田采油工艺现状及对策..... 唐汝众 杨其彬 马收等(28)
- 物理法采油技术研究进展..... 孙仁远 秦国鲲 陈建文等(42)
- 低渗透油藏注气技术发展现状及应用前景..... 郭平 李士伦 杜志敏等(47)
- √低渗透砂岩油藏非均质地质模型研究..... 刘峰(56)
- 浅水粗粒辫状河三角洲沉积微相特征及其与油气产能的
关系研究..... 刘斌 孙尚如 黄郑等(73)
- 采用脉冲注烃方式提高低渗透裂缝性灰岩油藏采收率实验
研究..... 郭平 莫正科 王茹芳等(81)
- √低渗透砂岩油藏渗流机理研究..... 王建 孙志刚(87)
- 聚硅材料在低渗油田开发中的应用..... 戴树高 栾志安 苏咸涛等(97)
- √低渗储层渗流规律及水驱油机理的研究..... 王启蒙(119)
- 低渗透油藏表面活性剂复合体系增注研究..... 杨铁军 张英芝 孙英娜等(124)
- 新型低伤害压裂液性能评价及现场试验..... 杨建军 叶仲斌 张绍斌等(127)
- √裂缝性储层应力敏感性评价方法应用剖析..... 闫治涛 杜宝坛 李行船等(133)
- 榆树林油田低渗透储层微观孔隙结构对油水渗流特征的影响..... 石京平 王新江 曹维政等(143)
- 东胜公司低渗透油藏开发实践..... 赵蓉(148)
- 低渗透油藏产能评价方法研究..... 吕爱民 姚军(155)
- √低渗透油田开采特征研究..... 谷建伟 秦馨(161)
- 大庆外围低渗透裂缝性油藏注采系统合理调整方式研究..... 李艳华 李莉 周锡生等(165)
- 大庆油田利用水平井提高低渗透油藏采收率的做法..... 齐春艳 梁海龙 李忠江等(171)
- 大庆油田三次加密调整现状及改善开发效果方法研究..... 赵秀娟 林影 王庆霞等(175)
- 渤海低渗透油田开发特征及开发效果分析..... 蔡勇胜 赵淑萍 黄冬宁(179)
- 缝洞型油藏压裂井产能数值模拟模型研究与应用..... 赵金洲 李勇明 郭建春(188)
- 喇萨杏油田低渗透油层调整挖潜试验研究..... 王庆霞 林影 刘振等(199)
- 喇萨杏油田三次加密调整井网优化部署研究..... 何岁扬 张善严 陈淑华等(204)
- 裂缝性低渗透油藏酸岩反应理论模型研究及应用..... 郭建春 赵金洲 李勇明(213)√
- 深化油藏研究 改善渤海油田五六区开发效果..... 吴丽华 黄东宁 陈国强等(221)
- 龙虎泡油田加密调整研究与认识..... 战剑飞 刘淑霞 王新强(233)
- 欢北杜家台低渗透油藏开发实践与认识..... 王佩虎 石利华(237)
- 宝浪油田宝北区块注水水质及注水效果..... 樊社民 贺宏普 吕晓华等(241)√
- 大庆油田分层测压系统优化研究..... 林影 张士奇 孙树文等(245)
- 孤北21断块油层保护技术研究..... 丁志聪 薛爱信 姜国忠等(251)
- √低渗透砂岩油藏水伤害及防治技术研究..... 马洪兴 史爱萍 肖驰俊等(258)

目 录

苏北盆地阜宁组低渗储层压裂改造效果评价 秦学成 唐建信(263)

滨南油田滨 660-665 块水力压裂优化研究 杜宝坛 李行船 杨 斌等(268)

分层地应力描述技术及其应用 杨 斌 闫治涛 李行船等(273)

孤南 131 断块低渗透油藏的改造实践 汪正勇(278)

裂缝性砂岩油藏水力压裂实践 闫治涛 李行船 杜宝坛等(284)

裂缝性油藏酸液滤失计算模型研究 李勇明 郭建春 赵金洲(289)

“等效深度法”在低渗油藏开发中的应用 王宣龙(295)

东胜公司低渗透油田开发工艺技术 李晓清 严进荣 闫治涛等(300)

√低渗透双重介质储层的压裂诊断与施工工艺 孟庆民 杨其彬 于 永等(311)

滨南油田低渗透油藏有机土酸体系的研制及应用 马增海 张士学 屈 红等(325)

利津油田利 853 块低渗透砂砾岩油藏整体压裂改造开发实践 张士学 于 永(329)

应用水力喷砂射孔辅助压裂技术的探讨 于 永 杜宝坛 蒋维红(334)

王 53 断块注水防膨工艺研究 许新华(338)

√低渗透油田微生物采油现场试验研究 乐建君 于盛鸿 张宝忠等(341)

(18) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(87) 王 志 强 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(97) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(111) 王 志 强 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(124) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(137) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(133) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(143) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(148) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(153) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(161) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

√(163) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(171) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(175) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(179) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(183) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(193) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(204) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

√(313) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(321) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(333) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(337) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

√(341) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(345) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(351) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

(355) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

√(358) 李 斌 王 林 五 莫 平 崔 采 油 工 程 技 术 研 究 所 研 究 院 编 写 组 编

发展注气提高采收率配套技术 开发低渗透油藏

李土伦 黄金华 郭平 孙雷 刘建仪 李闯

西南石油学院“油气藏地质与开发工程”国家重点实验室

摘要 我国低渗透油藏储量占相当大的比例,而其中相当部分处于低产、低采收率状态。如何发展这类油藏的开发、开采技术,改善开发效果和经济效益,对保持我国石油工业持续稳定发展有着十分重要的意义。我国现有大部分老油田已处于开发中后期,开发难度愈来愈大,而近些年来新发现的油田亦多属低渗透、高粘度等难采储量。进一步发展提高石油采收率技术将是一项迫切的重大战略任务。本文围绕低渗透油田开发问题着重介绍注入烃类气体、 CO_2 、 N_2 (烟道气)及空气等混相、非混相驱替技术,结合东部地区的气源情况,着重介绍 N_2 气和烟道气驱、 CO_2 单井吞吐等方面的有关问题。

关键词 低渗透油藏 开发 注气

一、低渗透油藏的地质特征和开发特征

一般认为渗透率低于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层为低渗透油层,其中渗透率为 $1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的地层为特低渗透油层,渗透率低于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的地层为微渗透油层。国内外很多学者和科技工作者从事了这方面的研究。低渗透油藏的地质和开发特征可归纳为以下几点。

(一) 构造特征

低渗透断块油藏通常面积小、物性差、产能低和储量不大。透镜体在低渗透砂岩储油层中占相当大的比重,如何准确确定透镜状砂岩层的大小、形态、方位和分布,是能否成功地开发这类油藏的关键。低渗透储层的渗透能力很低,导流能力很差,但只要能与裂缝搭配,就能形成相对高产的储层,因此对裂缝系统的研究是开发好这类油藏的重要内容。裂缝主要对油气渗流作贡献。由于单井控制储量小,可采储量小,供油范围小,所以单井产量低,且递减快,油井和油藏的稳产条件差。

(二) 储层特征

低渗透致密砂岩主要特征是非均质性强、低孔低渗和高含水饱和度。储层物性在纵横向的各向异性非常明显,产层厚度和岩性都不稳定,在很短距离内就会出现岩性、岩相变化,甚至岩性尖灭,以至在井间无法进行小层对比。这类砂岩具有孔隙连通但喉道细小、泥质含量高的特点,孔隙结构主要特征是孔隙类型多样、孔喉半径小和泥质成分多。储层孔隙有粒间孔隙、次生孔隙、微孔隙和裂缝等四种基本类型。粒间孔隙愈少,微孔隙所占比例愈大,渗透率就愈低。储层的含水饱和度高,一般为30%~70%,通常以40%作为估算储量的下限。

统计北美172个低渗砂岩油藏的数据表明,渗透率一般小于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,大致为几个~几十个 $\text{md}(10^{-3} \mu\text{m}^2)$,少数低于 $1\text{md}(10^{-3} \mu\text{m}^2)$ 。

这类岩石具有强烈的应力敏感性,并在压力卸载后,渗透率恢复不到原值。

(三) 开发特征

在开发过程中,油井自然产能低,大多数油井需经加砂压裂或酸化才能获得较高产量,甚至才接近工业标准产量,但随之而来的是投产后递减率高。油井生产压差大,油藏弹性能量小,可供利用的压力资源低。

油层受岩性控制,水动力联系差,边、底水驱动不明显,水不活跃,自然能量补给差,多数靠弹性驱动和溶解气驱采油,一次采油的采收率低,一般只达8%~12%,采用注水保持能量后,二次采油的采收率提高到25%~30%,但也较低。

孔隙结构的特征差异大,毛管压力曲线多为细歪度型,细喉峰非常突出,喉道半径均值很小,排驱压力很高,对流体的渗流规律产生很大的影响,存在“启动压力”现象。

由于孔隙结构复杂,喉道小,泥质含量高以及存在着水敏性矿物,导致开采过程中油层易受伤害,产量损失大,因此,在整个采油工艺系列中,保护油层是至关重要的环节。

鉴于上述特征,这类油藏开发中应特别注意:①在全国,这类油藏所占的储量较大,将是今后的开发难点和重点之一;②精细油藏地质研究将是开发成功的关键;③在开发过程中,要自始至终认真对待储层的保护,使伤害程度降低到最低限度;④要普遍进行压裂改造等增产措施,其工艺技术的先进性对低渗透油藏至关重要;⑤钻加密井、合理调整开发井网是低渗透油藏开发的重要方法;⑥优先利用天然能量开发,有利于提高采收率和能获得较好的经济效益;⑦注水注气保持压力是开发这类油藏普遍的做法。对低渗透油藏的三次采油已日益受到重视;⑧水平井是低渗透油藏开发的一种可供选择的方式。

二、国内外发展注气提高石油采收率技术的概况

(一) 国内概况

1999年9月我国进行了第二次油藏三次采油潜力评价。17个油区参评的储量为 $101.36 \times 10^8 \text{t}$,占已投入开发地质储量的72.6%。其中适用于注气混相驱提高采收率技术I类潜力的覆盖储量为 $5.25 \times 10^8 \text{t}$,与水驱到含水98%时的采收率相比,平均可提高采收率18.2%,增加的可采储量为 $0.954 \times 10^8 \text{t}$;适用于注气非混相驱的覆盖储量为 $7.02 \times 10^8 \text{t}$,与水驱相比,可提高采收率8.7%,增加可采储量 $0.608 \times 10^8 \text{t}$ 。II类潜力注气混相驱覆盖的储量为 $4.48 \times 10^8 \text{t}$,与水驱相比,可提高采收率18.1%,增加可采储量 $0.81 \times 10^8 \text{t}$,注气非混相驱覆盖储量 $3.20 \times 10^8 \text{t}$,与水驱相比,可提高采收率5.9%,增加可采储量 $0.19 \times 10^8 \text{t}$ (参见中国石油勘探开发科学研究院三次采油潜力评价报告)。I类潜力指技术上可行、风险小、近期内实现的可行性较大的潜力;II类潜力是技术上通过了各项筛选标准,但由于筛选及潜力预测中未考虑的各种因素影响(如高温、高压、大孔道、注入能力低、无气源、井况差、裂缝影响实施等因素),使其实施困难较大、风险高的潜力。

从潜力评价中看出,我国发展注气提高石油采收率技术的潜力相当大。我国现有大部分油田属陆相沉积,非均质性严重,水驱采收率低,大部分老油田的开发进程逐步深化,采收率难以明显提高,新区的资源接替不足,近些年来发现的新油田,又多属低渗透、高粘度等难采储量。因此,要加强注气提高石油采收率配套技术的研究,争取以较快的速度,使其发展成为一种经济有效的提高采收率技术。

由于受 CO_2 和天然气资源的限制,该项技术发展较晚。随着西部地区大量天然气资源的开发和大批低渗透油田储量的发现,才日益受到重视。中国石油吐哈油田在葡北油田开展了

我国第一个注烃混相驱、塔里木油田在塔中实施注烃非混相驱和在牙哈凝析气藏实施高压注气试验,大庆、吉林、辽河等油田也开展了 N₂、CO₂ 和天然气驱开发低渗透油田的先导试验。中国石化积极在江苏、江汉、中原、胜利和滇黔桂等油田开展 N₂、CO₂ 和空气驱等多种矿场试验。当前中国的注气事业主要是搞好配套技术的研究,包括各类气驱机理、数值模拟技术、注入工艺、动态监测、防气窜和提高波及效率以及室内评价技术研究,为大规模发展作好技术储备和人才培养工作。

(二) 世界发展概况

根据美国“油气杂志”每隔两年的“提高采收率报告(EOR Report)”,近些年来,世界主要石油生产大国(以美国、加拿大为代表)仍把蒸汽驱作为继续提高(EOR)或改善(IOR)采收率的主导技术,化学驱的应用逐年减少,注气驱则以逐年增长的态势和显著的成效正成为当今世界石油开采业中具有很大潜力和前景的一项技术革命,它包括烃类气体、CO₂、N₂(烟道气)及空气的注入等混相和非混相驱技术。

美国自 1996~2002 年的 EOR 项目变化见表 1。2002 年 EOR 项目总数为 147 项,其中热采项目 65 项,占项目总数 44.2%;化学驱项目 4 项,占项目总数 2.7%;注气驱项目 78 项,占项目总数 53.1%;微生物驱和其他项目为 0。注气 78 项中,CO₂ 混相驱 66 项,CO₂ 非混相驱 1 项,N₂ 驱 4 项。

表 1 1996~2002 年美国提高采收率项目变化表

项 目	1996 年	1998 年	2000 年	2002 年	
热 采	蒸汽驱	105	92	86	55
	火烧油层	8	7	5	6
	热水驱	2	1	1	4
	热采总计	115	100	92	65
化学驱	微乳液-聚合物驱	0	0	0	0
	聚合物驱	11	10	10	4
	碱 驱	1	1	0	0
	表面活性剂驱	0	0	0	0
	化学驱总计	12	11	10	4
	气 驱	烃类气体混相驱/非混相驱	14	11	6
CO ₂ 混相驱		60	66	63	66
CO ₂ 非混相驱		1	0	1	1
N ₂ 气驱		9	10	4	4
烟道气驱		0	0	0	0
其 他		0	0	0	0
气驱总计		84	87	74	78
其 他		微生物驱	1	1	1
	其他总计	1	1	1	0
总 计	212	199	177	147	

美国自 1996~2002 年的 EOR 增油量变化见表 2。2002 年 EOR 总日增油量 10.6467 × 10⁴m³/d,其中热采 5.9162 × 10⁴m³/d,占总日增油量 55.57%;化学驱 9m³/d,注气 4.7296 ×

表 2 1996~2002 年美国日增油量变化表

单位: m^3/d

项 目	1996 年	1998 年	2000 年	2002 年	
热 采	蒸汽驱	66676	69803	66410	58149
	火烧油层	713	757	442	379
	热水驱	40	350	49	634
	热采总计	67429	70910	66901	59162
化学驱	微乳液-聚合物驱	0	0	0	0
	聚合物驱	22	22	254	0
	碱 驱				
	表面活性剂驱			9	9
	化学驱总计	22	22	263	9
气 驱	烃类气体混相驱/非混相驱	15306	16226	19796	15153
	CO ₂ 混相驱	27144	28465	30129	29798
	CO ₂ 非混相驱			10	10
	N ₂ 气驱	4454	4471	2337	2337
	烟道气驱				
	其 他		692	692	
	气驱总计	46904	49162	52964	47296
其 他	微生物驱	0	0	0	0
	其他总计	0	0	0	0
总计	114355	120094	120128	106467	

$10^4 \text{m}^3/\text{d}$, 占总日增油量 44.42%。

2003 年 1 月 1 日, 探明的石油地质储量为 $1928.67 \times 10^8 \text{m}^3$ ($12128.80852 \times 10^8 \text{bbl}$)。

2003 年 1 月 1 日, 探明天然气地质储量为 $154 \times 10^{12} \text{m}^3$ ($5.5 \text{quad} \text{rillcon}(10^{15}) \text{scf}$)。

2000 年所列的大多数 EOR 项目在继续执行, 至少有 8 个换了新业主, 美国加州的蒸汽驱项目有所减少。

最普及的 EOR 项目分别是: 重油油田的蒸汽驱; 轻油油田的 CO₂ 驱; 轻油油田的烃类混相驱; 化学驱和聚合物驱(主要在中国)。

奥西登塔尔二迭系有限公司是美国二迭盆地 CO₂ 驱的最大拥有者, 其 CO₂ 驱的主要技术进步有: “气藏表征”的改善; CO₂ 段塞尺寸的增加, 初期为 20% HCPV(烃类孔隙体积), 随后增加到 60%~80% HCPV, 有的甚至计划增到 100% HCPV; 水平井、四维地震和层析成像测井只是有限的应用; 膜分离 CO₂ 的技术已趋成熟, 德州金德摩根 CO₂ 公司(Killder Morgan CO₂ Co.)是凯利-斯那特油田(Kelly-Snyder) SACROC 单元 CO₂ 驱作业者, 雪佛隆公司早在 1983 年就建了两个膜 CO₂ 处理厂, 日处理量分别为 $1.4 \times 10^6 \text{m}^3/\text{d}$ 和 $0.7 \times 10^6 \text{m}^3/\text{d}$ 产出气, 现已到达 $5.04 \times 10^6 \text{m}^3/\text{d}$ 日处理量, 把产出气中 85% 的 CO₂ 含量降到 10%。

原油、CO₂ 和燃料的价格影响着极大多数的 EOR 项目, 在 CO₂ 价折合为 146 人民币元/t ($0.29 \text{元}/\text{m}^3$) 和油价为 18 \$/bbl, 西德克萨斯州二迭盆地的 CO₂ 驱替是经济可行的。

据估计, 在未来 15 年中有 $14 \times 10^6 \text{t}$ CO₂ (折合 $70.84 \times 10^8 \text{m}^3$) 储存于油气藏中, 从而避免相当数量的 CO₂ 排入大气污染环境。重油仍是 EOR 的最大目标, 一批 SAGD(蒸汽驱+重力

驱)在加拿大有前景,泛加拿大资源有限公司(The Pan Canadian Resource Ltd.)的 Christina Lake (克里斯金娜湖)SAGD 项目到 2009 年相当于从 700 口水平井中日产 7950 ~ 11130m³ 原油。

三、低渗油藏注气提高采收率的几项具体建议技术

我国东部油区应侧重发展注 CO₂ 和 N₂(烟道气)驱,当然也不排斥注烃混相驱或非混相驱;在西部油区要根据天然气资源情况,应侧重开展注烃混相驱和非混相驱,但也不排斥利用非烃气体的可能性。在气源少的情况下,应先把 CO₂ 单井吞吐的增产措施开展起来,把注蒸汽 + N₂ 开采稠油试验开展起来,针对近混相驱,注 CO₂/N₂, CO₂/C₁ 和 N₂/烃类气体等混合气体。限于篇幅,本文着重介绍注 N₂ 气驱和 CO₂ 单井吞吐有关问题。

(一) 注 N₂ 混相驱和非混相驱

自 20 世纪 60 年代以来,特别是进入 70 年代以后,人们逐渐把气源扩展到非烃类气体,其中应用得最多、效果最好的是 CO₂。但是,由于 CO₂ 气源受到限制,且容易产生腐蚀, N₂ (或烟道气)以广泛的来源和低廉的价格在注气驱提高油气采收率工程应用中越来越受到人们的重视。

1. N₂ 作为驱替剂的特点

用 N₂ 作为驱替剂有如下几个特点:① N₂ 是一种无腐蚀性的惰性气体,用作驱替剂在工艺上不存在防腐问题。② 在相同的温度和压力下, N₂ 的密度小于油藏气顶气的密度,粘度则与气顶气接近(即使在地层压力高达 42MPa 以上,仍能保持此特性),这种特性适合于块状油藏和倾斜油藏采用顶部注气,按重力分异方式驱替原油,还有利于缓和重力驱过程中出现的粘性指进现象。③ N₂ 的偏差系数(Z)比气顶气、烟道气和 CO₂ 的都大。N₂ 不溶于水,较少溶于油,对改善原油的流动性能虽作用不大,但却能抽提(蒸发)原油中的轻烃和中间组分,使 N₂ 本身得到富化,并使其物性逐渐趋向于原油,这一特性就有利于在富含轻烃和中间烃的轻质油油藏、挥发性油藏和凝析气藏中采用注 N₂ 以混相蒸发气驱或非混相的方式开采原油。此外, N₂ 资源充足,现已形成一整套从空气中制 N₂ - 注 N₂ - 脱 N₂ 的工业化流程和配套设备,这样,注 N₂ 的成本比较低廉。

烟道气的主要成分是 N₂(80% ~ 85%)和 CO₂(10% ~ 15%),另含有少量 CO 等杂质。它的性质取决于所含各气体组分的比例。因此,它的驱油机理与 N₂ 的驱油机理相似,但因含有 CO₂,所以在驱油过程中还能起到一定的溶解降粘、改善原油流动性能的作用,其不利因素仍是所含的 CO₂ 气体具有腐蚀作用。

2. N₂ 驱筛选标准

N₂ 驱的筛选标准可参考如下:① 含油饱和度大于 30%;② 储层为砂岩或碳酸盐岩;③ 厚度有利;④ 渗透率无限制;⑤ 深度大于 1371.6m(4500ft);⑥ 地层温度无限制;⑦ 陡峭的倾斜的油藏是所希望的;⑧ 原油相对密度小于 0.8408 (> 35°C API);⑨ 原油粘度低于 10mPa·s;⑩ 原油组成富含 C₁ ~ C₇。此外,可放宽到以下标准,即原油相对密度小于 0.8498;地层温度高于 100°C;油藏埋深大于 1500m。

3. N₂ 驱替类型

注 N₂ 开发油藏的驱替机理通常有以下几种类型:① 多次接触混相驱(特别要指出的是它包括作为驱赶 CO₂、富烃气体混相段塞注入,或气水交替注入混相驱);② 多次接触非混相或近混相驱;③ 循环注 N₂ 以保持油藏的压力;④ 重力驱。

混相驱或非混相驱适用于油层物性较差、原油中含有一定溶解气，原油相对密度在 0.8348 ~ 0.7753 (38 ~ 51°API) 范围和油藏埋藏较深的轻质油油藏。

循环注气保持压力适用于注水效果差、低孔低渗、原油相对密度在 0.8708 ~ 0.7389 (31 ~ 60°API) 范围、埋藏较浅的油藏。

重力驱适合于油层物性好、埋藏较深、闭合高度大的盐丘、礁块或背斜油藏。

特别推荐几种 N_2 驱类型：

3.1 注 N_2 推动易与原油混相的气体段塞混相驱

注 N_2 混相驱要求的条件较注 CO_2 和烃类气体高。由于 N_2 和原油的混相压力很高，注 N_2 要求原油的轻烃和中间烃含量高，实施的难度大，且适用范围较窄，但它有比注 CO_2 和烃类气体资源丰富、价格低廉的特点。为了充分利用 CO_2 和烃类气体易混相的特点，同时又降低 CO_2 和烃类气体的成本，可通过注 N_2 推动 CO_2 和烃类气体段塞混相驱来提高采收率，其机理同 CO_2 和烃类气体混相驱一样。如果易混相气体段塞的尺寸选择合理，则其效果一定会比连续注 N_2 好，经济效益也会更好。

2000 年发表的 SPE62547 论文介绍了一个块状裂缝性碳酸盐岩挥发性油藏，注 N_2 推动富含 $C_2 \sim C_6$ 产出气段塞高压混相驱的成功做法。这是一个大油田，原始石油地质储量达 $19.08 \times 10^8 m^3$ ，一次采油开采了 15 年，仅采出了 $1.908 \times 10^8 m^3$ 原油，在此期间，地层压力从 79.235MPa 下降到 28.249MPa，泡点压力为 25.838MPa，油藏平均产油量由 $2.385 \times 10^4 m^3/d$ 下降到 $3498 m^3/d$ 。原油相对密度为 0.8299，其原始体积系数为 1.75，原始气油比为 $264.15 m^3/m^3$ ，地层温度 185℃，产出气中富含 $C_2 \sim C_6$ ，初始含量达 $0.2839 \sim 0.5679 m^3/m^3$ 。1994 年开始先导试验 3 年，选择了高压混相驱，井底混相压力 41.34MPa，预计每采出 $0.159 m^3$ 原油，要注 $46.2 m^3 N_2$ ，1994 ~ 1999 年累积注 N_2 $243 \times 10^8 m^3$ ，在注 N_2 前先注一个 10% 孔隙体积的富含 $C_2 \sim C_6$ 产出气段塞，此时混相压力可降到 22.048MPa。若无此类产出气，那么注 CO_2 段塞也会获得同样的效果。

3.2 重力稳定驱

注 N_2 重力驱是指对倾斜的、垂向渗透较高的地层，在含油气构造顶部注入 N_2 ，利用重力分异作用保持或部分保持油藏压力，其采收率是所有非混驱中最高的。它要求油层具有足够高的垂向渗透率，并且注入速度应当小于临界速度。根据开采方式不同，重力驱可向构造顶部注气或向含油气构造油柱部分注气两种方式。

3.3 保持地层压力

富含凝析油的凝析气藏一般需要在保持压力条件下开发，挥发性油藏以至重质油藏也需保持压力来改善开发效果，注 N_2 的目的是使油、气藏压力保持在露点或泡点压力之上。

(二) 单井 CO_2 吞吐

1. CO_2 基本性质和增产原理

CO_2 易溶于油，起到三个作用：①增加原油体积，提供有利的流动条件；②降低原油粘度，提高其流动性和驱油效率；③改善毛细管渗吸作用。

CO_2 溶于水也起到三个作用：①提高水的粘度，使油水粘度比变小；② CO_2 水溶液与碳酸盐岩石起反应，提高储层的渗透性能；③降低油水界面张力，提高驱油效率。

CO_2 可萃取原油中 $C_2 \sim C_{30}$ 烃类，随气采出地面，可明显降低地层剩余油饱和度。改善油水相对渗透率曲线特征，降低最终残余油饱和度。在一定 P 、 T 条件下 CO_2 具有与原油混

相的能力。注入碳酸水,可使含水带前缘形成和保持一个 CO_2 游离气带。

在常温常压下 CO_2 为无色无臭气体,其相对密度为空气的 1.53 倍。压力为 0.1013MPa 和温度为 0°C 时, CO_2 的密度为 $1.98\text{kg}/\text{m}^3$, 粘度为 $0.0138\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。 CO_2 的化学性质不活泼,不可燃,不助燃,无毒,具有腐蚀性(水存在时)。压力大于 2.017MPa、温度低于 -17°C 时 CO_2 以液态存在,在 0.52MPa、 -56.6°C 时 CO_2 以气液固三相同步存在。 CO_2 的临界温度 (T_C) 为 31°C , 临界压力为 7.399MPa。液态 CO_2 密度受压力的影响甚微,受温度的影响十分明显。气态 CO_2 密度随温度升高而减小,随压力升高而增大。固态 CO_2 的密度基本不受压力影响,温度对它影响也小。气态 CO_2 粘度是压力和温度的函数,温度不变时随压力增大而明显增大。液态 CO_2 粘度受温度影响较大。 CO_2 的偏差系数受压力和温度影响较大。 CO_2 局部溶于水,且随压力增加而增大,随温度升高而减小,随水中含盐量增加而溶解度降低。 CO_2 易溶于原油,它使原油体积膨胀、粘度降低和密度改变,同时还会降低油气界面张力。在烷烃混合物中 CO_2 的浓度超过 $0.65\text{mol}/\text{m}^3$, 压力为 27.21MPa 时,就出现气液两相;在更高压力下,则出现两个密度不同的液相,超过 $0.8\text{mol}/\text{m}^3$ 、压力为 8.16MPa 时会出现两个液相和气相;小于 6.8MPa 时则出现气液两相。

CO_2 吞吐又称循环注 CO_2 或 CO_2 增产措施,它起源于注蒸气单井吞吐。它的优越性是:不同油藏条件均能成功应用;投资少、见效快、返本期短、技术要求相对不高,风险性较低;稠油、低孔低渗、深层、剩余饱和度低和高含水的油藏均能适用。

其开采机理主要是:①降粘机理,如果原油粘度降低 50%,产量约提高一倍;②膨胀机理, CO_2 溶于油后原油体积可增加 0.5~0.7 倍,能增加储集空间含油饱和度,油相渗透率也提高;③解堵机理,溶于水产生 H_2CO_3 ,能溶解某些岩石胶结物,同时还有抑制粘土膨胀的作用;④降低界面张力机理, CO_2 溶于油的能力比溶于水的能力要大 3~9 倍,它有降低油气界面张力的能力;⑤轻质油藏 CO_2 能汽化原油中间烃和 C_7 组分,使在近混相过程中完成吞吐过程。

2. 备选油藏的筛选和油藏参数的作用

2.1 影响 CO_2 吞吐过程的两类变量

油藏变量是自然因素,主要包括:油藏压力和原油粘度、原油密度、当前的原油饱和度和、初始的含气饱和度、地层渗透率和润湿性。

操作变量是可控的参数,其优化意味着吞吐过程的效率达到最好,重要的操作变量是:作业压力、 CO_2 注入量、油井开井时的井底回压、浸泡时间和循环次数(周期)。

2.1.1 作业压力或注入速度

高压使更多的 CO_2 溶于油中,有利于降低原油粘度。措施井应以与注入设备和深度相一致的最高速度注入,应尽可能以最快的速度注入。目标处理半径总是有限的,它依赖于油藏的条件,地层压力较高,则处理半径可扩大些,而在低能环境下,则选择使用较小的处理半径。据美国德州 30 口吞吐井的成功经验, CO_2 运移的平均半径大致为 22.3m。也有研究者认为,很高或很低的流动速度都会使采收率和气体利用率变差。

2.1.2 注入体积

美国用每英尺净产层注入 $\text{CO}_2 \times 10^6\text{scf}$ 来表示措施注入量,一般为 $10.1 \sim 18.3\text{m}^3/\text{m}$ ($0.11 \times 10^3 \sim 0.2 \times 10^3\text{scf}/\text{ft}$)。

2.1.3 回压

高的回压对生产有利,但它意味着低的产出物,产出物主要含气和少量水,留下的油仍

处于油井深处，直到这一周期结束。实际上，生产能力是随井底压力下降而增加的，要找出合适的措施控制回压。

2.1.4 浸泡时间

最大、最终采收率都要求有一个浸泡期。2~3周或更长的浸泡期可采出几乎一样的原油。有人在评价106口单井施工资料后认为，应有一个最佳的浸泡期。

2.1.5 循环次数(周期)

第1个周期总是好的。有利的循环周期数平均为3~5次，第5次的效果几乎总是很差的。第3周期末的效果常可最佳地表达各油藏参数的组合。

3. 我国注CO₂单井吞吐现场试验简况

单井注混合气的吞吐过程值得重视。据了解，1994年后，吉林油田利用万金塔CO₂气田的液态CO₂开展了CO₂吞吐和CO₂泡沫压裂等工艺技术措施。到1998年为止，共对144口井实施了CO₂吞吐实验，平均注1tCO₂可产出3.3t油；还对119口井开展了CO₂泡沫压裂，平均1tCO₂增油8.6t。还对大庆、长庆低渗油田压裂后的8口井实施CO₂泡沫酸化，1tCO₂平均增油8.7t，此外，还开展了水井降压增注、注水井CO₂段塞水气交替注入等工艺措施。

江苏油区也开展了CO₂吞吐和CO₂酸化试验。江汉油田开展了注N₂单井吞吐和驱替试验。中原油田积极地开展了单井吞吐试验，回收石化厂排放的CO₂，并准备驱替试验。大庆、辽河、胜利、吐哈等油田都开展了类似现场试验。吐哈已把注气作为油田三采的主攻技术，也开展了混气(液N₂)压裂或酸化试验。总之，这项技术已日益受到重视，各家都在探索，都积累了一定经验，也锻炼了队伍，相信今后还会有更大的发展。

参 考 文 献

- 1 李士伦,张正卿,冉新权. 注气提高石油采收率技术. 四川:四川科学技术出版社,2001
- 2 中国石油天然气总公司. 低渗透油田开发技术. 北京:石油工业出版社,1994
- 3 Necmetti Mungan. EOR with High Pressure N₂ Injection. SPE 62547, 2000
- 4 中国石油天然气股份有限公司. 油气田开发技术座谈会论文集. 北京:石油工业出版社,2001

国内外低渗透油田开发技术调研

苏海芳 吴锦莲 曹嫣红

胜利油田有限公司地质科学研究院

一、国内外低渗透油田开发现状

(一) 国内外低渗透油田划分方法、标准和依据

低渗透油田的划分标准和界限因不同国家、不同时期的资源状况和技术经济条件不同而各异。国外曾把渗透率小于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油田划为低渗透油田。

前苏联将低渗透油藏的上限定为 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，它是根据地层产能、导水性、孔隙空间结构和经济标准来确定的。他们认为，各油田低渗透储层的形成和埋藏的地质物理条件千差万别，其渗透率上限也就互不相同，应视具体情况而定。例如，根据萨莫特洛尔油田岩样的气测渗透率，并考虑其毛管和超毛管孔隙的定量比值，确定出该油田低渗透储层的渗透率上限为 $22 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。而用同样的方法确定的苏达尔明油田低渗透储层的上限为 $12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，乌津油田的为 $80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。实验证明，仅用渗透率作为低渗透储层的定量标准是不够的，不考虑油层的厚度与原油的粘度，仅凭渗透率是不能确定油藏的可采性的。要划分低渗透储层，必须采用有关地层渗滤-容积特性、产能及其开发效益的综合指标。首先要用比较广泛的水动力学标准，它可反映低渗透油藏开发的效益，经济效益在很大程度上取决于波及效率、井网和单位储量；其次要考虑开发的经济指标。

据 1996 年《低渗透油气田》报道，美国 A. I. Levenson 把渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的低渗透油藏划为好储层，故低渗透储层的上限就等于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

低渗透油田下限就是通常所称的有效厚度下限。对低渗透油田来说，这是一个十分重要的问题。加拿大对低渗透油藏的分类与油田的实际情况比较适应。他们主要根据某一压汞饱和度所对应的喉道大小、配合渗透率、孔隙度和其比值等参数对油层进行分类。美国、加拿大等国家有效厚度的下限一般定为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，如加拿大最大的油田帕宾那油田，总地质储量为 $92059 \times 10^4 \text{t}$ ，而渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的特低渗透油层储量就有 $40195 \times 10^4 \text{t}$ ，占总储量的 44%。

我国根据低渗透油田的渗流特征和开采特征，将储层渗透率不大于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油田算作低渗透油田。

随着科学技术的发展，目前通常也把低渗透油田的上限规定为 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，并进一步将低渗透油藏分为三种类型：

一类储层渗透率为 $50 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，此类储层的特点接近于正常储层。地层条件下含水饱和度为 25% ~ 50%，测井油水层解释效果较好。这类储层一般具有工业性自然产能，但在钻井和完井过程中极易造成污染，需采取相应的储层保护措施。开采方式及最终采收率与常规储层相似，压裂可进一步提高其产能。

二类储层渗透率为 $10 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，此类储层是最典型的低渗透储层。地层条件

下含水饱和度变化较大(30%~70%),部分为低电阻油层,测井解释难度较大。这类储层自然产能一般达不到工业性标准,需压裂投产。

三类储层渗透率为 $1 \times 10^{-3} \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,它属致密低渗透储层。由于孔隙半径很小,因而油气很难进入。这类储层已接近有效储层的下限,几乎没有自然产能,需进行大型压裂改造方能投产。就目前的世界工艺技术水平而言, $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下的低渗透油藏也是可以开发的,但经济上可能是不可行的。可见,仅根据渗透率还不能确定油藏的可采性,还必须考虑生产层的厚度、含油饱和度、含水饱和度、原油粘度以及开发效果的经济指标。

(二) 国内外低渗透油田储量分布

1. 国外低渗透油田储量分布

世界上低渗透油田资源十分丰富,分布范围广泛,各产油国基本上都有该类油田。美国中部、南部、北部和东部,前苏联的前喀尔巴阡山、克拉斯诺达尔、乌拉尔-伏尔加、西西伯利亚油区和加拿大西部的阿尔伯达省都有广泛的分布。随着开采时间的延长,小而复杂的低渗透油田的比例越来越大。例如,俄罗斯近几年来在东西伯利亚地区新发现的低渗透、薄层等低效储量已占探明储量的50%以上。有的地区,低渗透砂岩油田连片分布,成为低渗油区。

据1999年石油业报道,俄罗斯各油气区中难以开采的石油储量占剩余可采储量的40%以上,低渗透储层的储量达数百亿吨,其中,渗透率低于 $0.05 \mu\text{m}^2$ 的低渗透储集层中储量约有 $150 \times 10^8 \text{t}$,占低渗透储量的90%以上(图1),占俄罗斯可采储量的30%以上。其中65%分布在西西伯利亚。这些低渗透储量大部分已投入开发。目前全俄罗斯从低渗透储集层中采出的石油占全部储量的20%左右。低渗透储集层中石油的粘度绝大多数在 $10 \text{mPa} \cdot \text{s}$ 以下,其有效厚度多数为2~10m,埋藏深度大多为1200~4000m,采出程度不高。

另据《低渗透油气田》1998年报道,美国低渗透油气田可采储量占全国总储量的10%~15%。据北美172个低渗透砂岩油藏的统计,渗透率一般从几个毫达西到几十个毫达西,其中, $20 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油藏占低渗透油藏总数的60%, $20 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的占30%;少数低于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,约占5%。

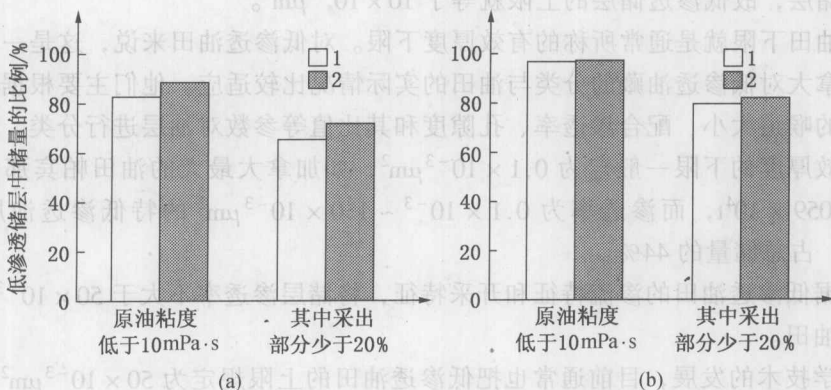


图1 俄罗斯低渗透油藏储量分布

2. 国内低渗透油田储量分布

2.1 低渗透油田分布状况

低渗透油田广泛分布于全国各个油区。截至2000年底,我国已探明低渗透油田地质储量 $52.14 \times 10^8 \text{t}$,占全部探明地质储量的26.1%。其中中石油为 $43.37 \times 10^8 \text{t}$,占低渗透探明