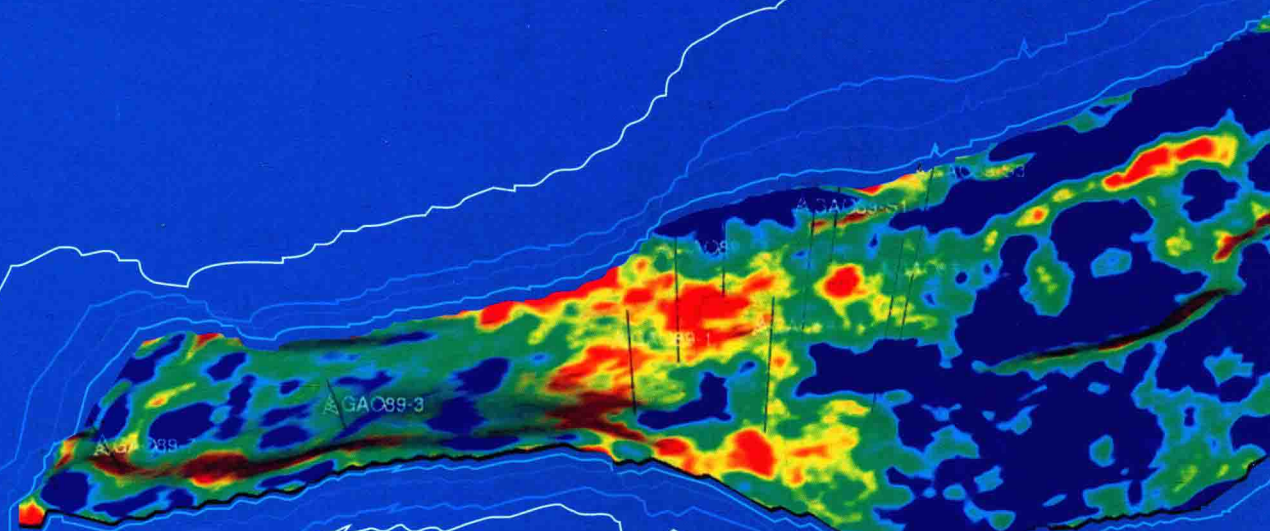


二氧化碳驱油 地震监测评价方法

Seismic

Monitoring Method for CO₂ Flooding

谭明友 张云银 曲志鹏 / 著
崔世凌 于海铖 刘建仪



科学出版社

二氧化碳驱油地震监测评价方法

谭明友 张云银 曲志鹏 著
崔世凌 于海铖 刘建仪

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍二氧化碳驱油地震监测技术在胜利油田的研究、推广及应用情况,并重点阐述二氧化碳驱油地震监测、评价方法的研究与发展现状。结合二氧化碳驱油地震监测技术在胜利油区的应用现状,本书从基础理论、岩石物理参数实验室测试方法、二氧化碳驱油地震响应特征、地震资料一致性处理方法、二氧化碳驱油波及范围地震描述的二氧化碳气窜、逸散性地震预测的技术实现等方面进行细致的阐述。

本书可供从事油气勘探开发和生产的科技人员及相关院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

二氧化碳驱油地震监测评价方法/谭明友等著. —北京: 科学出版社, 2017.8

ISBN 978-7-03-053767-6

I. ①二… II. ①谭… III. ①二氧化碳—驱油—地震—监测—评价 IV. ①TE357.45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 133549 号

责任编辑: 罗 莉 / 责任校对: 王 彭
责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年8月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017年8月第一次印刷 印张: 20 3/4

字数: 487 098

定价: 228.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

自 Whorton 等于 1952 年取得第一个采用二氧化碳采油的专利以来 (Whorton, 1952), 注二氧化碳提高石油采收率 (EOR) 的工作一直在进行。据不完全统计, 目前全世界实施的二氧化碳驱油项目有近 80 个。美国是二氧化碳驱油发展最快的国家, 目前混相二氧化碳驱油在美国石油工业中的应用已经超过其他所有的提高石油采收率方法。二氧化碳驱油的生产量占美国三次采油生产量的 41% 并呈现出长期上升的趋势。加拿大的 Weyburn 项目和 TransAlta 公司在 Alberta 的项目都从煤气化厂和燃煤电场中捕集与封存二氧化碳提高采收率。随着二氧化碳驱油技术的完善, 为了适应能源危机和环境保护, 世界各国对二氧化碳驱油技术应用更加重视 (Mungan, 1981; Martin, 1992; 陈志超等, 2009; Hardage, et al., 2009)。

为了更好地监测地下油藏在注气后的变化, 国际上对时移地震监测在驱油中的应用做出了相应探索 (Wang et al., 1996; 朱希安等, 2011)。克罗地亚国家石油公司的 Miroslav Barisic 基于三维地震数据和数值模拟建立了 Ivanic 油田全野外地质数值仿真模型, 进行了以二氧化碳驱为主的三次采油实验, 并使用时移地震行了监测 (Barisic, 2006)。堪萨斯州立大学的 Derek Ohl 通过地震属性技术的应用, 对密西西比河地区进行了时移地震监测。科罗拉多矿业学院的 T. L. Davis 等, 通过多波研究对 Weyburn 地区进行了时移地震监测, 利用纵波变化监测气体填充, 横波监测压力变化。多分量地震监测表明, 纵横波监测能更准确地测出二氧化碳驱油的变化。上述研究成果证实了二氧化碳驱油地震监测的可行性, 对国内二氧化碳驱油地震监测工作的研究具有重要的借鉴意义。

国内对二氧化碳驱油方法研究起步较晚, 与国外尚有一定差距, 但近几年随着稠油和低渗油藏的开采, 二氧化碳驱油呈快速发展态势 (杨承志等, 1991; 李士伦等, 2001; 高慧梅等, 2009)。胜利油田 1998 年开始进行二氧化碳单井吞吐增油效果的试验, 平均单井增产 200t 以上。2007 年胜利油田在 G89-1 块开展二氧化碳混相驱先导试验, 目前已建成国内首个燃煤电厂烟气碳捕获、利用与封存技术 (carbon capture utilization and storage, CCUS) 全流程示范工程, 目前采收率由弹性驱的 8.9% 提高到 26.1%, 提高采收率 17.2%, 增油效果明显, 二氧化碳驱已经成为特低渗透油藏有效开发的主导技术之一 (史华, 2008; 李春芹, 2001; 郭平等, 2012)。同时, 二氧化碳驱油虽然效果显著, 但存在一定的技术问题需要解决, 如二氧化碳驱油过程中, 部分层位二氧化碳过早突破, 一方面会严重降低气驱的波及效率, 另一方面油井气窜后, 二氧化碳将对油井举升系统、地面工艺设备乃至井场环境造成严重影响。要从根本上解决气窜问题需要完善二氧化碳驱油监测的技术手段, 提升监测效果。目前常规的注采及油气水性质检测方法, 仅能简单地检测二氧化碳驱油的效果和二氧化碳采出情况, 驱油过程的精细监测成为薄弱环节, 制约着二氧化碳驱油的进一步发展。

地球物理技术在碳捕获与封存 (carbon capture and storage, CCS) 中具有重要地位, 承担着观测、监测、证实的角色。胜利油田研究人员通过借鉴国外研究经验, 分析 G89 二氧化碳先导试验区内注气井史和工区内气驱前后采集的地震数据, 发现区内两期地震资料存在与二氧化碳驱油注气相关的地震响应差异, 力图探索一条经济高效的利用非一致地震采集资料开展二氧化碳驱油地震监测的相关技术之路。

本书以胜利油田 G89 CCUS 先导试验区驱油波及范围地震预测为例, 对二氧化碳驱油的地震监测技术作出详细的阐述, 包括国内外二氧化碳驱油及其地震监测技术研究现状、二氧化碳驱油岩石物理测试技术及测试结果、二氧化碳驱油的岩石物理及地震响应特征、面向二氧化碳驱油的地震资料一致性匹配处理技术、二氧化碳驱油波及范围地震描述技术以及二氧化碳驱油气窜与逸散性地震预测技术等 6 方面内容, 经由 G89 先导试验区的艰苦探索, 实现了国内首次中深部薄互层二氧化碳驱油地震监测, 检测效果清晰明确, 形成了应用非一致采集地震资料开展二氧化碳驱油地震监测评价技术系列。

本书立足于胜利油田 G89 CCUS 先导试验区埋藏深、储层薄、无研究先例的特点, 介绍的技术方法既包含相关学科的理论基础及基础测试结果, 亦包含了面向学科前沿的应用非一致采集地震数据开展二氧化碳驱油地震预测的系列地震预测技术, 不仅为胜利油田下一步的二氧化碳驱油项目实施提供了技术保障, 也为我国在巴黎协议签署后, 如何监测二氧化碳地质封存状态提供了较为完备的地震描述技术系列, 可为全国的油气工作者提供有益的借鉴。

本书是胜利油田物探研究人员不断探索而取得的优秀科研成果之一。本书成果得益于中国石油化工集团公司 (中石化) 科研课题 (项目编号: P14085) 的全力支撑, 科研人员谭明友、张云银、曲志鹏、崔世凌、于海铖、刘建仪、王慧茹、杨泽蓉、葛大明、刘浩杰、雷蕾、于景强、张伟忠、元亮、李晓晨、曹丽萍、罗平平、吴明荣等做了大量的相关研究工作; 在研究过程中胜利油田纯梁采油厂李刚连所长、高刚主任, 勘探开发研究院的孟晓峰高级工程师给予了极大的帮助; 在本书的编写过程中张军华、马劲风、刘建仪、杨火海、吴孔友等教授提供了大量的宝贵资料, 对此我们表示真诚的谢意! 本书大量的实验、分析化验和研究工作, 是在中国石油大学 (华东) 地球科学与技术学院、西南石油大学石油工程院、西北大学地质学系完成, 在这里一并表示感谢!

作 者

2017 年 2 月

目 录

第 1 章 二氧化碳驱油地震监测国内外技术现状	1
1.1 二氧化碳驱油技术国内外应用情况	1
1.1.1 二氧化碳驱油机理	1
1.1.2 国内应用情况	3
1.1.3 国外应用情况	4
1.2 二氧化碳驱油地震监测国内外研究现状	6
1.2.1 二氧化碳驱油地震监测技术的基本原理	6
1.2.2 二氧化碳驱油地震监测技术的岩石物理基础	7
1.2.3 二氧化碳驱油地震监测应用实例	11
1.3 超声波测试岩心技术	24
1.3.1 超声波在岩心实验中的应用	24
1.3.2 超声波岩石实验研究进展	25
1.4 二氧化碳地质封存地球物理监测综述	26
1.4.1 二氧化碳地质封存中的地球物理监测技术	28
1.4.2 二氧化碳地质封存地球物理监测技术难题	34
1.5 研究区基本情况	46
1.5.1 研究区地质特征	46
1.5.2 储层及油藏特征	47
1.5.3 二氧化碳驱油概况	48
第 2 章 二氧化碳驱油岩石物理测试	50
2.1 岩石物理参数测试方法及装置	50
2.1.1 超声波测试系统基本原理	50
2.1.2 岩石超声波测试计算	51
2.1.3 岩石物理参数测试装置设计	53
2.1.4 验证试验	55
2.2 二氧化碳驱油岩石物理超声波测试	61
2.2.1 干岩心力学测试	61
2.2.2 饱和单相流体岩心超声波测试	69
2.2.3 双相流体岩心超声波测试	91
2.2.4 溶解不同比例二氧化碳测试	97
2.2.5 二氧化碳驱油岩石物理特征	103

第3章 二氧化碳驱油地震响应特征	115
3.1 二氧化碳流体特征	115
3.1.1 二氧化碳临界乳光可视化实验	115
3.1.2 地层温压条件下二氧化碳体积密度变化规律	120
3.1.3 流体性质计算	122
3.1.4 随压力变化的横波速度预测	125
3.2 二氧化碳驱油正演模拟	132
3.2.1 G94 井两层介质模型与井模型地震响应	132
3.2.2 G89 区块实际注入井两层模型和井模型地震响应	148
3.3 二氧化碳驱油地质模型正演	158
3.3.1 注气后时间剖面下拉现象与速度的关系研究	158
3.3.2 注气后时间剖面下拉现象与层厚的关系研究	161
3.3.3 不同偏移方法比较研究	163
3.3.4 实际连井剖面正演模拟	164
3.4 二氧化碳驱油地震响应特征	168
3.4.1 二氧化碳驱油产生的时差变化	168
3.4.2 二氧化碳驱油属性分析	173
3.4.3 二氧化碳驱油波形特征	175
3.4.4 二氧化碳驱油产生的地震响应特征	176
第4章 地震资料一致性匹配处理	178
4.1 非一致性采集地震资料品质分析	178
4.1.1 两期资料采集参数对比	178
4.1.2 两期资料品质定量分析	182
4.1.3 非一致性重复采集地震资料品质分析结论	187
4.2 二氧化碳驱油地震资料本底信息匹配处理技术	188
4.2.1 非一致性重复采集时移地震叠前互约束处理技术	189
4.2.2 非一致性重复采集资料的叠后互均化处理技术	215
4.2.3 非一致性重复采集资料的一致性处理结论及认识	223
第5章 二氧化碳驱油波及范围地震描述	225
5.1 驱油区储层本底地震信息与差异性分析	226
5.1.1 樊家三维与高94 三维地震差异分析	226
5.1.2 地震差异属性的提取及分析	228
5.2 二氧化碳驱油波及范围地震描述	231
5.2.1 驱油生产动态	231
5.2.2 二氧化碳驱油波及范围单属性地震描述方法	233
5.2.3 二氧化碳驱油波及范围地震多元逐步描述方法	240
5.2.4 基于 AVO 属性的二氧化碳驱油波及范围地震检测	243

5.2.5 基于速度频散因子表征的二氧化碳驱地震监测方法	251
第 6 章 二氧化碳驱油气窜与逸散性地震预测	260
6.1 驱油区二氧化碳地质封存能力评价	260
6.1.1 断裂识别	260
6.1.2 储层预测	266
6.1.3 断层封堵性分析	271
6.1.4 盖层封盖能力评价	288
6.2 二氧化碳驱油气窜与逸散性地震预测	290
6.2.1 二氧化碳驱气窜影响因素分析	291
6.2.2 二氧化碳驱油气窜与逸散性地震预测	292
6.2.3 气窜实地考察及综合认识	294
6.3 二氧化碳驱油地震差异性检测软件的研发	297
6.3.1 软件功能	297
6.3.2 软件操作说明	297
主要参考文献	312
编后语	321

第 1 章 二氧化碳驱油地震监测国内外技术现状

1.1 二氧化碳驱油技术国内外应用情况

1.1.1 二氧化碳驱油机理

二氧化碳驱油技术就是把二氧化碳注入油层中以提高采油率（图 1-1）。由于二氧化碳是一种在油和水中溶解度都很高的气体，当它大量溶解于原油中时，可使原油体积膨胀、黏度下降，还可降低油水间的界面张力。与其他驱油技术相比，二氧化碳驱油具有适用范围大、驱油成本低、采油率提高显著等优点（舟丹，2012）。

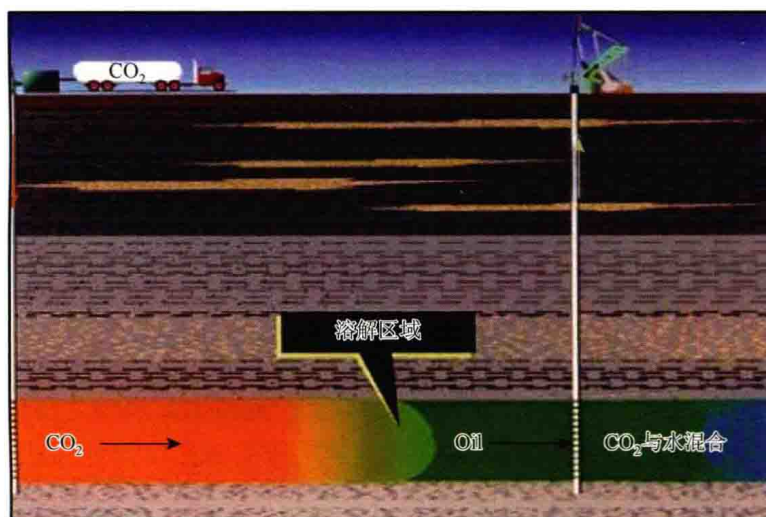


图 1-1 CO₂ 驱油原理图 [据 (Davis et al., 2003)]

世界上许多国家新增原油地质储量（尤其是陆上油田）的开发难度越来越大，勘探潜力越来越小。原油可采储量的补充，越来越多地依赖于已动用地质储量的采收率和难动用储量的开发。尤其在中国，现已发现的油田大部分属于陆相沉积储层，非均质性严重，原油黏度大，导致含水率上升较快、水驱采收率较低。中国已投入开发的油田平均采收率仅为 32.0%，美国油田的平均采收率为 33.0% 左右，这意味着在世界已经开发的许多油田中，常规技术开发以后还有大量的探明地质储量残留在地下，迫切期待着新型提高采收率技术的产生和应用（赵阳，2012）。而在众多提高采收率技术中，二氧化碳驱技术具有更广泛的应用前景和更明显的技术优势。利用二氧化碳提高采收率发展有两个原因（赵阳，2012）：

(1) 二氧化碳减排的迫切需求，以避免和改变气候变暖。

(2) 能源供应安全导致能源开采效率最大化。

二氧化碳驱油是通过注射二氧化碳的方式，进行油田第二阶段开采或第三阶段开采的一种方法。通常，在储层内水平方向或近似水平方向，通过二氧化碳和水的交互式注射来改变内部流体的移动。而垂直方向则需要不同流体循环式的注射。二氧化碳注射有如下作用 (Mungan, 1981):

(1) 减小原油的黏度。

(2) 使原油体积膨胀。

(3) 发生混溶效应。

(4) 可增加吸水性。

(5) 驱赶内部溶解气体。

图 1-2 显示高渗透区域对流体运移的绝对控制作用，导致过高的成本和较低的采油率。

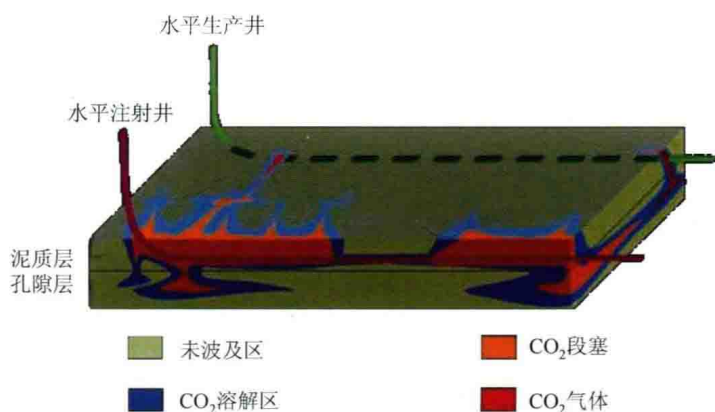
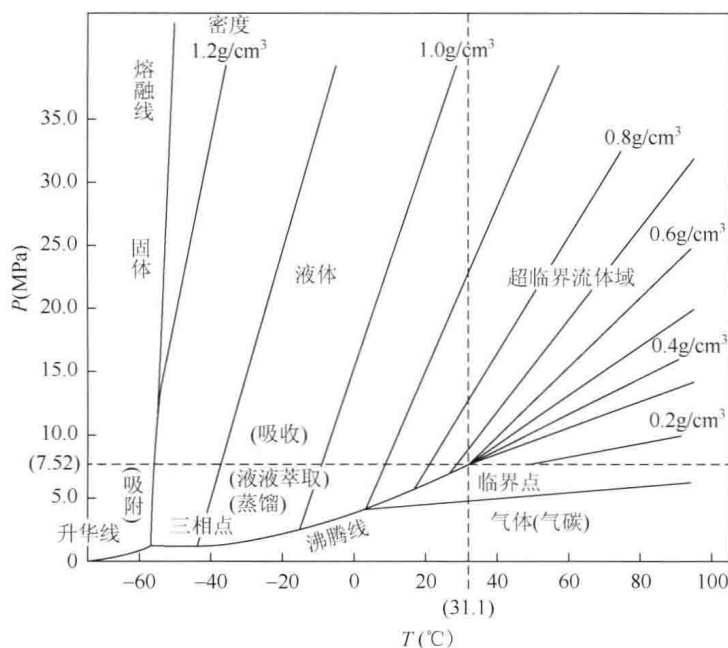


图 1-2 高渗透区域对流体运移的绝对控制作用 [据 (Davis et al., 2003)]

时移 (开发) 地震是基于不断重复对某一地区进行地震的方法来检测在这一时期内由于开采而引起的地下变化。当我们用不同时期得到的 3D 地震数据进行勘探时，这种方法就成为 4D 地震。时移地震的方法是油气藏检测的重要工具。

二氧化碳驱油的地震监测研究，主要目的在于研究储层的特征以及对于二氧化碳的最优化利用以提高采收率。提取的三维地震属性表明异常特征可以通过岩相流体变化来解释。地下盐水层是最好的地下隔离二氧化碳的可行选择。对于衰减的油气藏，利用二氧化碳驱油进行三次开采提高采收率，效果是非常好的。通过地震属性变化监测地下储层流体变化情况是一项关键技术。

二氧化碳主要优点是易于达到超临界状态，其临界温度为 31.1°C ，临界压力为 7.38MPa ，在室温附近就可出现超临界状态 (图 1-3)，在超临界状态二氧化碳对大多数溶质具有较大的溶解度 (张勇等, 2013)。在油藏注二氧化碳驱替过程中抽提携带原油中间烃和重质烃的效率明显优于 CH_4 和 N_2 。

图 1-3 二氧化碳 P - T 相图

二氧化碳驱提高采收率的机理主要包括：降低原油黏度、膨胀原油体积、蒸发原油中间烃组分、利用混相效应、降低界面张力、溶解气驱和增加注入率。混相方式是多次接触混相。按二氧化碳驱油原理可分为混相二氧化碳驱油和非混相二氧化碳驱油。两者之间最大的差别是地层压力是否达到最小混相压力。

二氧化碳混相驱的基本机理是二氧化碳和地层原油在油藏条件下形成混相，消除油水界面，使多孔介质中的毛管力降低至零，从而减少因毛细管效应产生毛细管滞留所圈捕的石油，理论上可以使微观驱油效率达到百分之百。混相驱油是在地层高温条件下，原油中轻质烃类分子被二氧化碳析取到气相中，形成富含烃类的气相和溶解二氧化碳的液相（原油）两种状态。当压力足够高时二氧化碳萃取原油中轻质组分后，原油溶解沥青、石蜡的能力下降，重质成分从原油中析出，原油黏度大幅度下降达到混相驱油的目的。原油组分是原油与二氧化碳发生混相驱的重要因素，中烃组分（特别是 $C_5 \sim C_{12}$ ）含量高的原油有利于二氧化碳驱。对于原油黏度高或者储层非均质性强的油藏不适合运用二氧化碳混相驱。

1.1.2 国内应用情况

我国东部主要产油区二氧化碳气源较少，但注二氧化碳提高采收率技术的研究和现场先导试验却一直没有停止。注二氧化碳技术在油田的应用越来越广泛，已在江苏、中原、大庆、胜利等油田进行了现场试验。并且多个油田也相应地利用二氧化碳捕集电厂烟气，为相应的油田提供气源。

1996 年，江苏富民油田 48 井进行了二氧化碳吞吐试验，并已开展了二氧化碳驱试验。

1998 年,江苏油田富 14 断块在保持最低混相压力的状态下,开始了二氧化碳水交替(WAG)注入试验,注入 6 周期后水气比由 0.86:1 升至 2:1,起到了明显的增油降水效果。水驱后油层中形成了新的含油富集带。试验区采油速度由 0.5%升至 1.2%,综合含水率由 93.5%降至 63.4% (钱伯章, 2010)。

2007 年大港油田公司对孔店油田“沉睡”了一年的孔 103 区块经二氧化碳驱油,使之重新投入生产,为大港油田带来了希望。

2007 年,中石化在胜利油田 G89-1 块进行的二氧化碳驱油先导性试验得到良好结果。二氧化碳的注入使对应的 5 口生产井产量上升,井组日产油由 31.6t 上升至 42.1t,累计增油 7500t。胜利油田适合二氧化碳驱油的低渗透油田储量多达 2 亿 t,若用二氧化碳驱油开发,每年可消耗二氧化碳 300 万 t,提高油田采收率 10%~15%。胜利电厂烟气二氧化碳捕集封存技术的推广,为今后胜利油田大规模开展二氧化碳驱油提供了稳定的气源保障和技术保证。

2008 年,在大庆油田的榆林油田进行二氧化碳驱油技术,使之递减率控制为零,提高采收率 20.1%,增加可采储量 113.45 万 t,同时三年减排 7 万 t 液态二氧化碳。这为外围油田有效动用、增产带来了新的希望。

2009 年中原油田濮城油田采出程度最高,采出程度达 49.2%,二次采油已经见不到油气。为此,对濮城油田沙一段油藏濮 1-1 井组也进行了二氧化碳驱油试验研究,室内进行了地层原油相态、压力组分、注二氧化碳压力等试验。通过在濮 1-1 井进行试验,井组取得了好的效果,日增油 8.5t,累计增油 1150t,唤醒了一个沉睡的油田,并捕集炼厂烟道中的二氧化碳作为油田三次采油的驱油剂(王天明等, 1999)。

2010 年,江苏草舍油田泰州组油藏属于中孔-低渗透砂岩油藏,通过实施二氧化碳混相驱实践,已经初步取得含水率下降、原油产量回升的效果。截至 2011 年年底,已累计注入二氧化碳 7380 万 m^3 ,油藏日产油由 48t 升至 85t,综合含水率由 56.4%降为 33.7%,增油 5.6 万 t,评价期末比水驱采收率提高 16.8% (袁颖婕等, 2012)。

2012 年 8 月,吉林油田二氧化碳驱油与埋藏关键技术实现工业化应用。吉林油田腰英台油田开展二氧化碳驱油提高采收率试验,需要进行有效防腐保护,加注缓蚀剂是解决二氧化碳腐蚀的有效方法(张龙胜, 2012)。

虽然二氧化碳驱油技术在国内东部各大油田均有应用,但是,二氧化碳驱油地震监测的研究还属于起步阶段,该方向的研究工作主要来源于国外,国内需要开展研究。

1.1.3 国外应用情况

自 Whorton 等取得第一个二氧化碳驱油专利以来,国内外一直在进行注二氧化碳提高采收率方面的相关研究。经过 60 多年的发展,二氧化碳驱油技术在发达国家的应用逐步趋于成熟。

美国是二氧化碳驱发展最快的国家。自 20 世纪 80 年代以来,美国的二氧化碳驱项目不断增加,已成为继蒸汽驱之后的第二大提高采收率技术。最大也是最早使用二氧化碳驱

的是始于 1972 年的 Sacroc 油田。其余半数以上的大型气驱方案是于 1984~1986 年开始实施的,目前其增产油量仍呈继续上升的趋势。大部分油田驱替方案中,注入的二氧化碳体积约占烃类孔隙体积的 30%,提高采收率的幅度为 7%~22%。

加拿大同样重视二氧化碳油驱技术,Pann 西部公司在 Calgary 油田和 Joffre Viking 油田注入二氧化碳提高采收率。Glencoe 资源公司在加拿大几处采收率较低的油田注入二氧化碳,采油率从 10%~20%提高到 40%。加拿大驱油项目的二氧化碳气源多来自生产和燃气捕集,这有利于降低二氧化碳排放。欧洲 BP 公司、GE 公司也将捕集的二氧化碳注入 Miller 油田,提高采收率;2006 年壳牌公司和挪威石油公司开始建设由燃气发电厂产生的二氧化碳捕集项目,提高海洋油田的生产量;同样,道达尔公司每年把 15 万 t 二氧化碳注入法国西南部衰竭的 Rousse 气田,以提高采收率,并减少温室气体排放。

日本三菱重工公司与壳牌公司联合捕集和压缩电厂二氧化碳注入约 1000m 深的油藏内。采用该技术,每注入 1t 二氧化碳,可提高石油产量 4 桶。两家公司计划建设可捕集 1 万 t 二氧化碳的设施,并使石油生产提高 4 万桶/天。

阿联酋于 2008 年 1 月下旬宣布,计划投资 20 亿~30 亿美元建设碳捕集和封存网络,以减少二氧化碳排放和提高阿联酋的石油产量(陈志超等,2009)。

可见,为了适应能源危机和环境保护,随着二氧化碳驱油技术的完善,世界各国对二氧化碳驱油技术的应用越加重视。同时,为了更好地监测地下油藏在注气后的变化,国际上,对时移地震监测在驱油中的应用做出了相应探索。

克罗地亚国家石油公司的 Miroslav Barisic (Barisic, 2006) 最近基于三维地震数据和数值模拟建立了 Ivanic 油田全野外地质数值仿真模型,进行了以二氧化碳驱为主的三次采油试验,并使用时移地震进行了监测。

堪萨斯州立大学的 Derek Ohl (Ohl et al., 2011),通过地震属性技术的监测,对密西西比河地区进行了时移地震监测。

克拉多矿业大学的 T. L. Davis 等 (Davis et al., 2003),通过多波的研究对韦本地区进行了时移地震监测,根据纵波监测气体填充,横波监测压力,横波能检测到因流体扩散引起的压力变化。多分量地震监测表明,横波监测能更准确地反映出第三方流体的位置。

此外国外还进行了大量的注二氧化碳驱油室内研究和矿场试验(Sakaii, 2006)。TPAO、日本国家石油公司(JNOC)和日本 EOR 研究协会(JEORA)在 Ikiztepe 重油油田成功完成了二氧化碳非混相驱现场试验(Terrell et al., 2002),在一个 200m×200m 的反五点井网应用二氧化碳非混相驱。试验动态表明,二氧化碳驱是提高特低渗透油藏采收率的可行办法。

Champlin 石油公司在 Wilmington 油田断块油藏的 Tar 层进行了非混相二氧化碳驱先导试验(Terrell et al., 2002),1981 年 3 月开始注二氧化碳,到 1983 年 5 月 1 日,与水相互间隔共注入 4.25 亿 m³ 二氧化碳,3 口生产井产油量均增加,采油速度增加 7 倍。

1.2 二氧化碳驱油地震监测国内外研究现状

为了更好地监测地下油藏在注气后的变化,研究人员已开始探索在二氧化碳驱油项目中应用地震相关技术(Khatriwada et al., 2009; Gutierrez et al., 2012; Wang et al., 1998),详细研究并总结了注入二氧化碳前后岩石物理参数与速度的变化规律,为应用时移地震技术进行二氧化碳驱油监测提供了理论基础。克罗地亚国家石油公司基于三维地震数据和数值模拟建立了 Ivanic 油田全野外地质数值仿真模型,开展了以二氧化碳驱为主的三次采油实验,并采用时移地震进行了监测(Barisic, 2006)。堪萨斯州立大学的 Ohl 等(2011)通过应用地震属性技术,对密西西比河地区进行了时移地震监测。Terrell 等(2002)通过多波研究对韦本地区进行了时移地震监测,其利用纵波监测气体填充,并利用横波来监测压力变化,取得了较好的效果。

1.2.1 二氧化碳驱油地震监测技术的基本原理

在二氧化碳驱油前后,进行高分辨率的连井地震成像,以监测二氧化碳驱油并勾勒驱油区间。观测到的横纵波速度变化幅度约为-6%,最大为-10%。注入二氧化碳之后的孔隙压力明显地高于原先的孔隙压力,所以测得的横纵波速度变化比预想的要大得多,实验表明,孔隙压力增大以及从注入二氧化碳之后的流体替换效应,足以监测二氧化碳驱油过程并描绘驱油区域。

横纵波速度的下降可以直接由井间地震或地表地震明显地观测到。实验表明,纵波速度对于二氧化碳填充以及孔隙压力的增大均非常敏感,而横波速度仅对孔隙压力敏感。故可以圈定驱油范围。

高孔隙、高渗透的岩石能引起速度更大的变化,若该地层较地震分辨率足够厚,可以由较大的速度改变将其清楚地识别。纵波速度变化范围为 0.2%~8.7%,并且为强烈依赖于孔隙度的函数,横波速度变化范围较小,为 0.1%~2.8%,越高的孔隙压力,表明二氧化碳的影响越大。

超压(20MPa)情况下,孔隙压力由 8.3MPa 增至 15.9MPa,纵波速度降低 1.75%,横波速度下降 2.6%;若填充了二氧化碳,变化幅度分别为 2.0%~6.9%以及 3.1%~8.5%。在高孔隙度样本中,压力影响更大。

高孔隙度时,平均速度变化 9%;中低孔隙度时,平均速度变化 4%。

碳酸盐岩中的二氧化碳驱油监测中,二氧化碳驱油依赖于许多参数,如注气前后的压力、岩石的空孔隙度、注气压力等,并且,它们是相互影响的。

- (1) 二氧化碳填充引起流体密度变化,会降低横纵波波速。
- (2) 孔隙构造:多孔构造对于波速的影响更大。
- (3) 油藏深度及注气压力:埋深越深,孔隙越容易闭合,对速度变化不敏感。
- (4) 温度:31.1℃是二氧化碳的临界温度,低于此温度,呈液态。

注入流体状态不同,引起流体密度不同,对速度影响不同。横波速度对二氧化碳填充

不敏感,纵波速度对于二氧化碳填充以及孔隙压力的增大均非常敏感,综合可圈定驱油范围。利用时移地震或井间地震进行监测,可刻画高孔隙高渗透岩层。

1.2.2 二氧化碳驱油地震监测技术的岩石物理基础

二氧化碳的注射对储层岩石的弹性参数的改变是非常多的 (Huang et al., 2003), 例如储层内流体的性质, 甚至岩石的骨架等。当处于超临界状态下的二氧化碳从某一深度向上移动的时候, 其热力学状态将会向着低温低压的方向发生改变, 从而移动到一个过渡到亚临界状态条件可能需要的地方。这将影响岩石中流体的分布以及饱和度。另外, 当二氧化碳注射时, 流体-岩石相互作用会影响储层中 P - T 相的不均衡, 从而引发一系列后果, 例如岩石模型地表的吸收、模型分解、失水的新矿物学的阶段 (例如岩盐、硫酸盐、碳酸盐、铝硅酸盐)。因此, 岩石物理特性的研究将成为二氧化碳驱油地震监测的核心技术 (Martin, 1992)。

1.2.2.1 饱和多孔岩石的地震建模

岩石物理学为地震监测与二氧化碳驱油架起了沟通的桥梁, 拓宽了地震技术的应用领域 (Vanorio et al., 2010)。在二氧化碳驱油过程中, 二氧化碳的注入会改变储层岩石的弹性参数, 如储层内流体的性质和岩石的骨架等, 同时也会造成纵横波速度发生不同程度的变化。对砂岩纵横波速度的测定表明, 注入二氧化碳进行驱油后, 纵波速度明显下降, 而横波速度变化较小。

图 1-4 显示, 二氧化碳注射的正演模拟的 P 波与 S 波地震特征, 会出现三种情况: ①化学惰性均匀饱和; ②化学惰性片状饱和; ③由于溶解引起的孔隙增加。图中还显示除了二氧化碳饱和度解释的错误。图中 A 点表示注射二氧化碳前水饱和砂岩的 P 波初始速

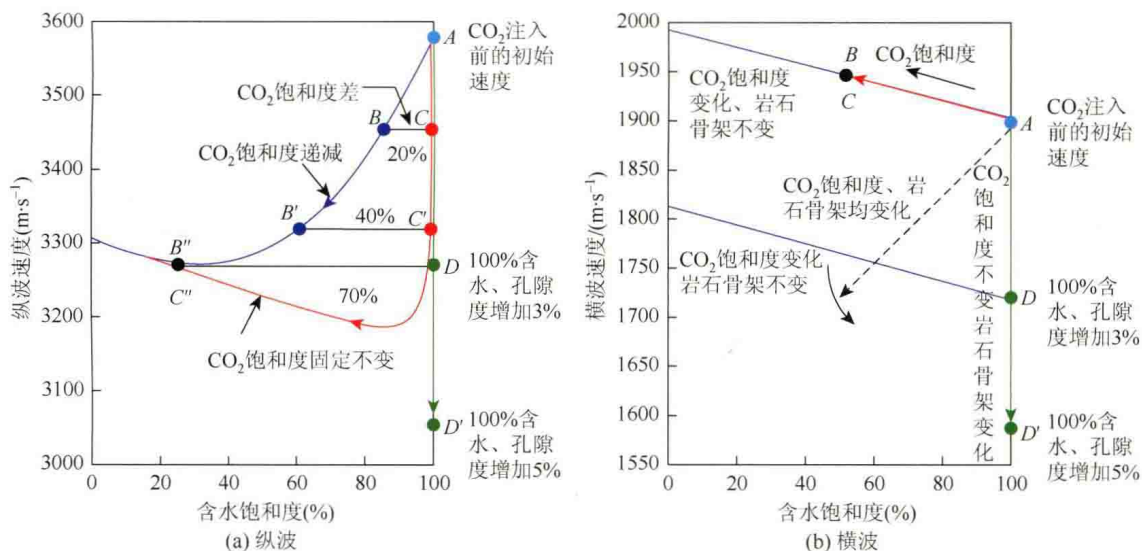


图 1-4 纵波和横波速度随二氧化碳注入的变化规律 (Vanorio et al., 2010)

度。在只考虑岩石中流体性质的情况下，可以观察到，气水饱和度为片状饱和（粗尺度混合）的模型 P 波速度下降 100m/s，相当于下降了 20%（B 点）。为均匀饱和时，下降 1%。图 1-4（b）表明，横波速度有可能有助于区分饱和效应。根据 Gassmarnn 定理，S 波速度只会因为岩体密度的变化而改变（Wang et al., 1996）。

1.2.2.2 亚临界状态下水-二氧化碳混合声波特性

二氧化碳注射的同时，对速度、压力、温度进行连续的监测，监测结果如图 1-5 所示，可以将水-二氧化碳混合的特性看作温度和压力的函数。图 1-5（a）表示二氧化碳注射的实时压力变化，图 1-5（b）表示实时压力变化，图 1-5（c）表示体积弹性模量实时变化，这个变化可以看作温度和压力的函数。

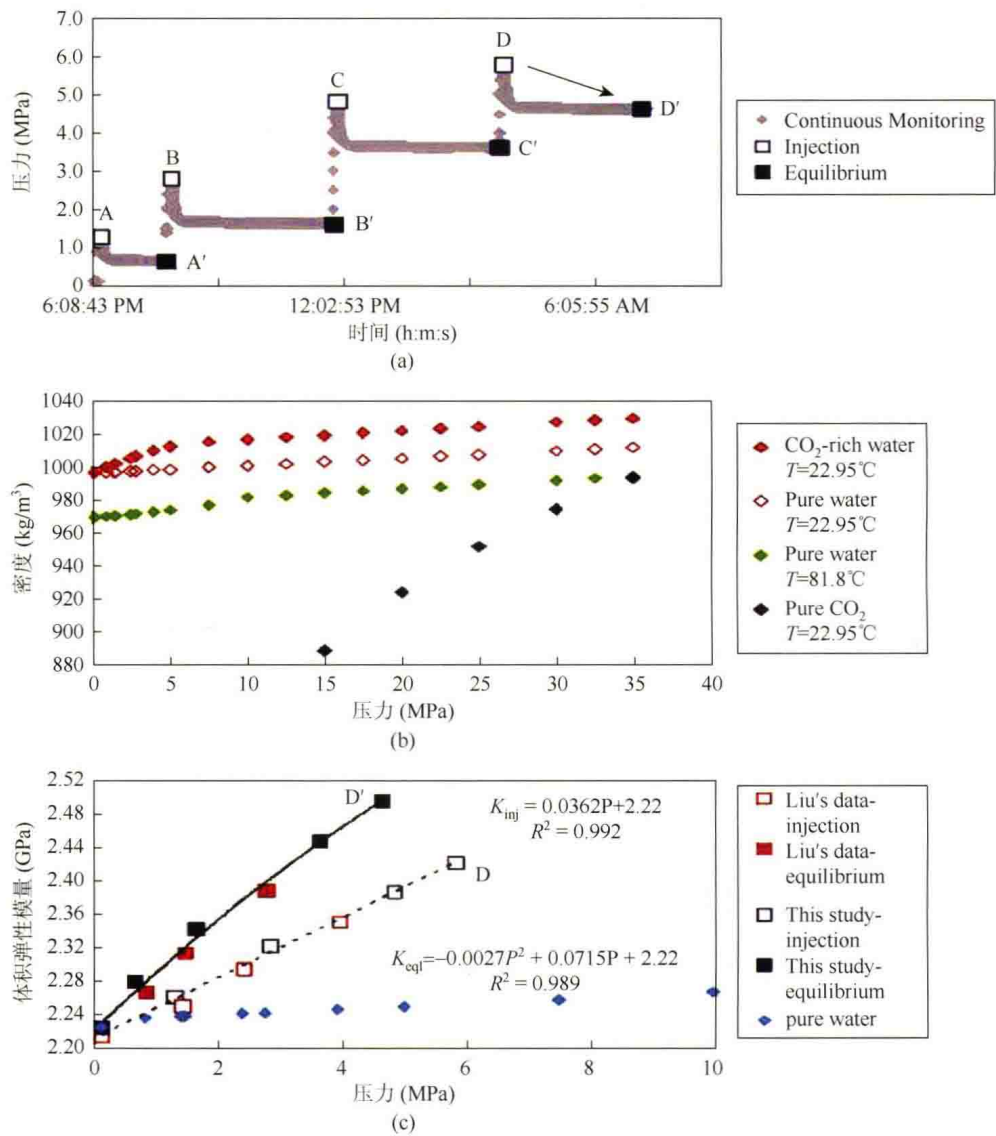


图 1-5 温度、压力、体积模量随二氧化碳注入的实时监测

2010年苏北台兴油田根据其阜宁组三段储层油藏特征和开发现状,利用长岩心驱替实验装置,对长岩心注二氧化碳驱油进行了室内模拟实验(图1-6),得到了阜三段油藏流体在水驱后三个注二氧化碳气驱压力点下的采收率和相态变化的重要参数,为下一步确立台兴油田合理开发方案提供了依据(Martin, 1992)。

苏北台兴油田构造位置处在溱潼凹陷的东北斜坡,主力含油层系为阜宁组三段(Ef³),注水开采后含水上升较快,目前原油含水率已达75%~80%。其间曾采取压裂、酸化等增产措施,效果均不理想。它的油藏类型为低硫、高凝固点、常温、常压、中低渗、复杂断块层状油藏,比较适合实施注二氧化碳采油工艺,而邻近的苏北黄桥二氧化碳气田资源又非常丰富。钻取台兴油田阜三段储层天然岩心进行注二氧化碳驱油模拟实验研究,以期得到阜三段油藏流体在水、二氧化碳驱油过程中随注气压力变化的原油采收率和相态变化的情况,为台兴油田下一步合理开发方案的确立提供依据。

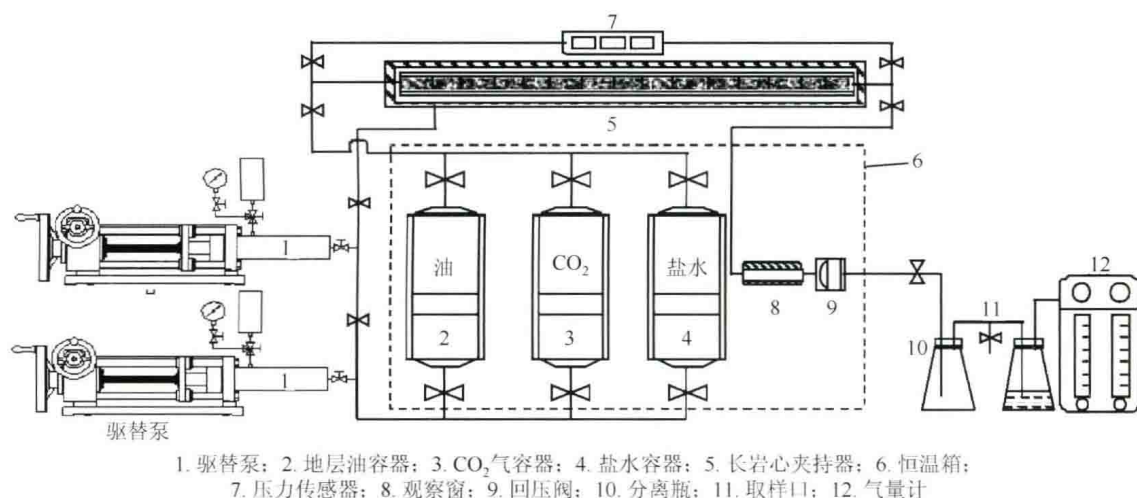


图1-6 长岩心驱替实验流程

先通过对配制的阜三段地层原油进行基本物性分析,得到原油的饱和压力、体积系数、黏度和密度等基本参数;又通过二氧化碳加气膨胀实验研究注入二氧化碳后阜三段地层原油体系相态变化情况;再通过细管实验确定阜三段地层原油与二氧化碳的最小混相压力。

根据三个注气压力点的长岩心驱替实验,结合阜三段原油性质得出以下结论(徐辉等, 2010):

(1) 二氧化碳对阜三段地层原油有很强的膨胀能力,原油中溶解的二氧化碳越多,体积膨胀越大。长岩心驱替时注气压力越高,二氧化碳在原油中的溶解量越大,地层原油体积膨胀越大(图1-7)。二氧化碳气混相驱替能大幅提高阜三段储层原油采收率,近混相驱替次之,非混相驱替效果最差。生产上提高注气压力,有利于提高驱油效率,增加产能(图1-8)。