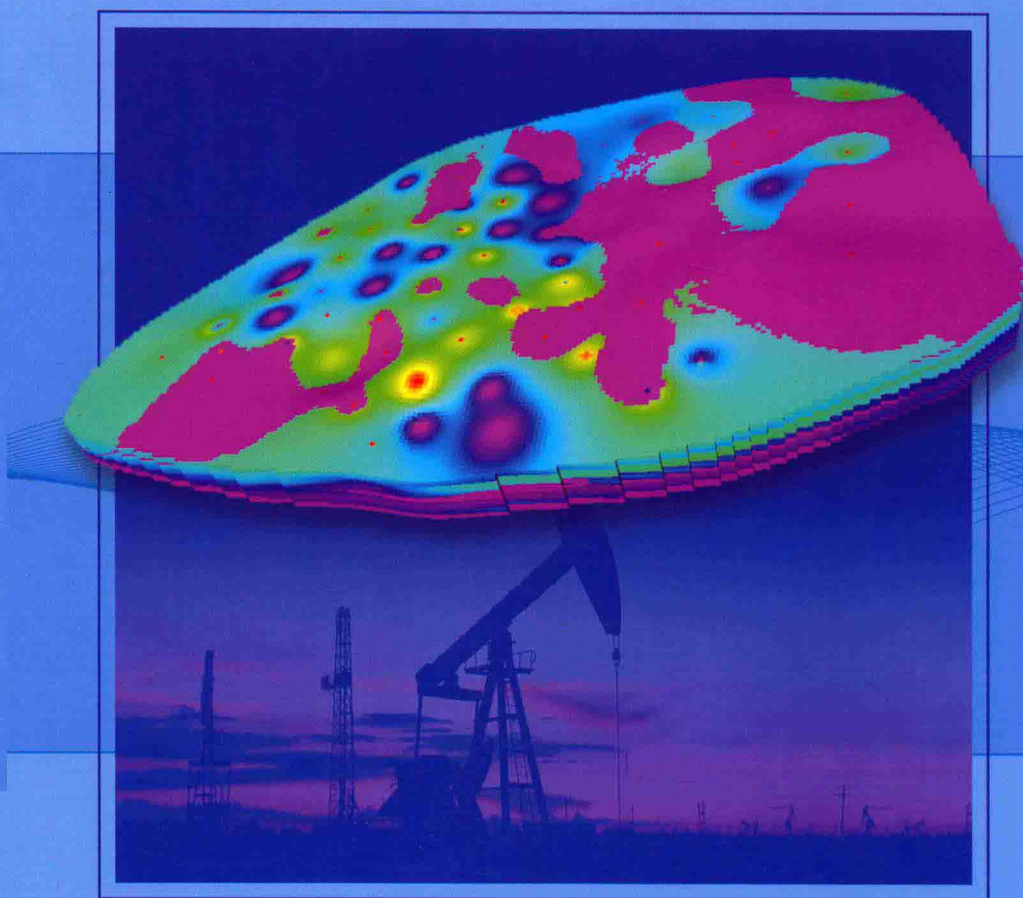


# 低渗透砂岩油藏 二氧化碳驱油技术

CO<sub>2</sub> Flooding Technology in Low Permeability Sandstone Reservoir

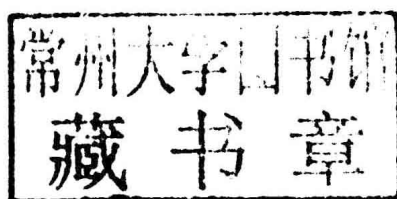
• 王香增 著 •



石油工业出版社

# 低渗透砂岩油藏 二氧化碳驱油技术

王香增 著



石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书共分 10 章,从二氧化碳的物理化学性质、驱油机理入手,主要介绍二氧化碳注采工艺、二氧化碳驱油地面工程设计等,并重点阐述了二氧化碳驱油腐蚀与防护技术、二氧化碳驱油动态检测技术,书中最后列举了二氧化碳驱油的应用实例。

本书可供石油行业从事采油工程的科研人员、技术人员及石油院校师生参考阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

低渗透砂岩油藏二氧化碳驱油技术/王香增著.

北京:石油工业出版社,2017.1

ISBN 978-7-5183-1602-1

I. 低…

II. 王…

III. 低渗透油气藏-二氧化碳-驱油

IV. TE357.45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 274648 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. com

编辑部:(010)64523541 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

---

2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:17.25

字数:317 千字

---

定价:106.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

# 序

随着我国石油需求量的持续增加和中高渗透油藏石油资源的减少,探明储量中低渗透油藏石油资源的开发比重日益增长,低渗透石油资源在我国石油资源中占有越来越重要的地位。与中高渗透油藏相比,低渗透油藏存在开发难度大、采收率低和效益差的特点。国内外研究和大量现场试验结果表明,CO<sub>2</sub> 驱油是提高低渗透油藏原油采收率的有效技术方法之一,自 20 世纪 50 年代以来,已经在美国、加拿大得到了成功应用,形成了 CO<sub>2</sub> 混相驱、非混相驱和水气交替驱为主导的 CO<sub>2</sub> 驱油技术体系。但是,由于受油藏地质条件、CO<sub>2</sub> 气源等因素的影响,国内 CO<sub>2</sub> 驱油技术尚未得到大规模推广应用。

与其他提高采收率技术相比,CO<sub>2</sub> 驱油技术在显著提高原油采收率的同时,能够大规模地封存 CO<sub>2</sub>,减少温室气体排放,综合实现 CO<sub>2</sub> 资源化利用和环境效益。尤其是在全球应对气候变化的大背景下,该项技术由于能够实现 CO<sub>2</sub> 埋存成本而受到了国内外高度关注。2016 年 4 月发布的《能源技术革命创新行动计划(2016—2030)》明确了 CO<sub>2</sub> 驱油利用与封存技术作为重点任务“二氧化碳捕集、利用与封存技术创新”的一个重要内容。《能源技术革命重点创新行动路线图》更是明确提出了到 2020 年建成以 CO<sub>2</sub> 驱油利用为核心的百万吨级全流程碳捕集、利用与封存技术示范工程的目标。

《低渗透砂岩油藏二氧化碳驱油技术》是作者多年的油田研究和实践,特别是结合延长油藏特征进行了理论和技术创新。该书对 CO<sub>2</sub> 物化性质、驱油机理、油藏工程、注采工艺、地面工程设计、腐蚀与防护、动态监测等方面进行了系统论述,重点介绍了延长石油首个碳捕集、利用与封存的现场试验项目,内容翔实,逻辑严谨,集中反映了我国低渗透油藏 CO<sub>2</sub> 驱油技术的理论和实践成果。相信该书的出版,对我国低渗透砂岩油藏 CO<sub>2</sub> 驱油技术理论创新、技术应用和人才培养等方面具有重要意义,并将有力推动我国碳捕集、利用与封存技术的发展。



# 前 言

石油作为目前最重要的能源,其供需状况已成为影响一个地区、国家乃至全球的政治、经济秩序的重要因素。随着我国经济的迅速发展,石油需求持续大幅度上升。2015 年我国石油消费量达到  $5.43 \times 10^8 \text{t}$ ,对外依存度达到 60.6%。据预测,石油消费量和对外依存度依然有上升的趋势,寻找新的石油资源接替阵地和老油田高效开发技术,实现我国石油稳定安全供给已成为时代赋予的历史责任。

低渗透砂岩油藏具有巨大的资源潜力和相对较大的勘探与开发难度,是目前国内外石油地质和油藏工程专家们关注的焦点。当前,我国石油工业中比较突出的一个问题是探明未动用石油地质储量大部分存在于低渗透砂岩油藏中,在近期探明的地质储量中绝大部分为低渗透油藏储量。到 2014 年底,我国累计探明石油储量为  $1085 \times 10^8 \text{t}$ ,其中低渗透油藏储量  $537 \times 10^8 \text{t}$ ,占总资源量的 49%。2011—2014 年,共新增石油地质储量  $50.1 \times 10^8 \text{t}$ ,其中 60% ~ 80% 为低渗透油藏储量。可见,低渗透石油资源在国内石油资源中占有十分重要的地位,而且随着石油勘探程度的逐步加深,其所占的比例还将继续增大。因此,低渗透油藏在当前和今后一段时间内无疑是我国石油勘探与开发的主战场。如何经济有效地开发好低渗透油藏的石油资源对我国石油工业乃至整个国民经济的发展具有重要意义。

低渗透砂岩油藏储层非均质严重,水驱采收率低,怎样提高低渗透油藏的采收率成为油藏经济有效开发的关键。近年来,采用注气驱提高(或改善)石油采收率以其逐年增长的态势和显著的成效成为当今石油工业中最具潜力、最有前景的一项技术革命。二氧化碳驱是国内外提高采收率的主要技术之一,美国、加拿大等国家已广泛应用,尤其是美国。截至 2014 年,美国二氧化碳驱油年产量为  $1371 \times 10^4 \text{t}$ ,约占世界总二氧化碳驱油年产量的 93%。与水驱相比,二氧化碳驱不但有降低油水界面张力、降低原油黏度、增加原油膨胀能、改善流度比和达到混相驱油等效果,还具有较低的注入压力和更强的注入能力。因此,该项技术能在常规技术基础上提高原油采收率 10% ~ 15%,使低渗透油藏采收率达到 30% 以上,具有广阔的应用前景。目前我国投入开发的低渗透油藏多为陆相沉积砂岩油藏,与

国外普遍分布的海相沉积油藏相比,还具有油藏物性差,储层非均质性强,原始含油饱和度较低,最小混相压力偏高,驱油效果差等问题。因此,低渗透油藏二氧化碳驱提高采收率技术攻关已迫在眉睫。

全球气候变暖对许多地区的自然生态系统已经产生了影响。作为温室气体的重要组成部分,二氧化碳已成为全球关注的热点。国内外大量研究表明,地质封存是二氧化碳减排的有效方法之一。在地质封存的同时,利用二氧化碳驱提高原油采收率,是最经济有效的地质封存方式之一,已日益受到各界的高度重视。

2007 年以来,在国家科技支撑计划项目的支持下,笔者与所带领科研团队,针对鄂尔多斯盆地低渗透、特低渗透油藏的特征,利用本地区特有的资源优势,开展二氧化碳驱提高采收率及其地质封存技术的研究与应用。率先在国内外首次实施 CCUS 全流程示范工程,建立了国内第一个 CCUS 示范工程基地,旨在研究和探索 CCUS 方面的捕集、利用、封存以及监测等工程技术方面的问题,为 CCUS 方面的规范制度、法律法规和行业标准的制定提供技术依据。笔者和所带领的科研团队与业内同行进行了广泛地合作与交流,本书所涉及的内容是笔者与所带领的科研团队近十年研究成果的高度总结。同时,部分内容参考了近年来国内外同行在这一领域公开出版或发表的研究成果。由于涉及参考资料较多,书中未能一一标出,只将重要的参考文献列于每章结尾处。特此说明,并对他们致以诚挚的感谢。

全书共分 10 章,第 1 章介绍了国内低渗透油田和二氧化碳驱油技术现状;第 2 章介绍了二氧化碳的物理化学性质;第 3 章、第 4 章分别阐述了低渗透油藏二氧化碳驱油机理和影响因素;第 5 章阐述了低渗透油藏二氧化碳驱油油藏工程;第 6 章阐述了低渗透油藏二氧化碳驱油注采工艺技术;第 7 章阐述了低渗透油藏二氧化碳驱油地面工程设计;第 8 章阐述了低渗透油藏二氧化碳驱油腐蚀与防护技术;第 9 章阐述了低渗透油藏二氧化碳驱油动态监测技术;第 10 章介绍了延长石油二氧化碳驱油的应用实例。

本书编写过程中,得到笔者科研团队江绍静、黄春霞、王伟、余华贵等成员的鼎力相助,同时得到陕西延长石油(集团)有限责任公司、中国石油大学(北京)、湖南大学及西安石油大学等单位的大力支持,在此对以上单位和个人表示衷心的感谢。

目前,低渗透油藏二氧化碳驱油技术仅处于先导试验阶段,诸多方面尚不成熟,仍需持续攻关,加之笔者水平有限,书中难免存在不足或错漏之处,敬请各位同行和专家提出宝贵意见。

# 目 录

|          |                    |      |
|----------|--------------------|------|
| <b>1</b> | <b>绪论</b>          | (1)  |
| 1.1      | 国内低渗透油田现状          | (1)  |
| 1.2      | 二氧化碳驱油技术现状         | (2)  |
|          | 参考文献               | (6)  |
| <b>2</b> | <b>二氧化碳的物理化学性质</b> | (8)  |
| 2.1      | 二氧化碳的物理性质          | (8)  |
| 2.2      | 二氧化碳的化学性质          | (24) |
| 2.3      | 二氧化碳的超临界性质         | (28) |
|          | 参考文献               | (33) |
| <b>3</b> | <b>二氧化碳驱油机理</b>    | (34) |
| 3.1      | 改变储层岩石性质           | (34) |
| 3.2      | 改变储层流体性质           | (36) |
| 3.3      | 溶解气驱               | (39) |
| 3.4      | 混相效应               | (39) |
|          | 参考文献               | (40) |
| <b>4</b> | <b>二氧化碳驱油影响因素</b>  | (41) |
| 4.1      | 储层条件               | (41) |
| 4.2      | 注入方式               | (44) |
| 4.3      | 注入参数               | (49) |
| 4.4      | 驱替状态               | (51) |
|          | 参考文献               | (53) |
| <b>5</b> | <b>二氧化碳驱油油藏工程</b>  | (54) |
| 5.1      | 油藏描述与储层地质建模        | (54) |



|     |                        |       |
|-----|------------------------|-------|
| 5.2 | 油藏数值模拟 .....           | (64)  |
| 5.3 | 油藏工程设计 .....           | (72)  |
| 5.4 | 开发动态分析 .....           | (82)  |
|     | 参考文献 .....             | (91)  |
| 6   | 二氧化碳驱油注采工艺技术 .....     | (92)  |
| 6.1 | 二氧化碳注入工艺 .....         | (92)  |
| 6.2 | 二氧化碳驱油采油工艺 .....       | (107) |
| 6.3 | 二氧化碳驱油采油工程配套技术 .....   | (109) |
|     | 参考文献 .....             | (121) |
| 7   | 二氧化碳驱油地面工程设计 .....     | (123) |
| 7.1 | 二氧化碳输送技术 .....         | (123) |
| 7.2 | 二氧化碳注入技术 .....         | (138) |
| 7.3 | 二氧化碳集输技术 .....         | (144) |
| 7.4 | 工程运行及维护 .....          | (147) |
| 7.5 | 安全性分析及风险评估 .....       | (149) |
| 7.6 | 管道完整性管理 .....          | (164) |
|     | 参考文献 .....             | (169) |
| 8   | 二氧化碳驱油腐蚀与防护技术 .....    | (171) |
| 8.1 | 二氧化碳驱油腐蚀及其危害 .....     | (171) |
| 8.2 | 二氧化碳驱油腐蚀影响因素及其机理 ..... | (176) |
| 8.3 | 二氧化碳驱油腐蚀速率预测 .....     | (187) |
| 8.4 | 二氧化碳驱油腐蚀防护技术 .....     | (190) |
| 8.5 | 二氧化碳驱油腐蚀监测 .....       | (198) |
|     | 参考文献 .....             | (206) |
| 9   | 二氧化碳驱油动态监测技术 .....     | (209) |
| 9.1 | 油藏动态监测 .....           | (209) |
| 9.2 | 油井产出物分析 .....          | (212) |
| 9.3 | 浅地表监测 .....            | (213) |



|      |                      |       |
|------|----------------------|-------|
| 9.4  | 地层监测 .....           | (215) |
| 9.5  | 井筒完整性监测 .....        | (223) |
|      | 参考文献 .....           | (232) |
| 10   | 延长石油二氧化碳驱油应用实例 ..... | (234) |
| 10.1 | 试验区油藏地质特征 .....      | (234) |
| 10.2 | 试验区地质建模 .....        | (246) |
| 10.3 | 试验区开发动态特征 .....      | (254) |
| 10.4 | 试验区油藏工程方案设计 .....    | (259) |
| 10.5 | 延长石油二氧化碳驱油现场试验 ..... | (263) |

# 1 绪 论

## 1.1 国内低渗透油田现状

目前关于低渗透储层的划分,国内外尚无统一的标准。原苏联将储层渗透率小于 100mD 的油田划为低渗透油田;美国把低于 10mD 的储层划为中—差储层;我国将低渗透砂岩储层分为低渗透(渗透率 10 ~ 50mD)储层、特低渗透(渗透率 1 ~ 10mD)储层和超低渗透(渗透率 0.1 ~ 1mD)储层。

我国低渗透油气资源分布广泛,主要包括长庆、延长、大庆外围、胜利、新疆、大港和吉林等油区。2014 年底,我国累计探明石油储量为  $1085 \times 10^8 \text{t}$ ,其中低渗透油藏储量  $537 \times 10^8 \text{t}$ ,占总资源量的 49%。2011—2014 年,共新增石油地质储量  $50.1 \times 10^8 \text{t}$ ,平均年增加  $12.5 \times 10^8 \text{t}$ ,其中新增石油地质储量的 60% ~ 80% 为低渗透储量。可见,低渗透石油资源在国内石油资源中占有十分重要的地位,而且随着石油勘探程度的逐步加深,其所占的比例还将继续增大。与中高渗透油藏相比,低渗透油藏在渗流机理、开发方式、采收率方法和经济效益等方面都有明显差异,存在开发难度大、采收率低和效益差的特点。因此,提高低渗透油藏采收率的意义重大,也面临诸多挑战。

低渗透储层具有沉积矿物成熟度低、黏土含量高、颗粒细、成岩压实作用强、孔隙度低、渗透率小、溶蚀孔和微裂缝发育、孔隙喉道细小(且小孔喉所占比例很大)、非均质性强等特点。因此,油水渗流机理不同于常规储层:基质中流体呈现出渗吸作用和低速非达西渗流的特征;微裂缝中流体以达西渗流为主导,压敏效应严重。由于低渗透储层天然能量不足,油井无自然产能,压裂改造后才能投产,油井单井产量低,自然递减快,注水补充地层能量是其必然的选择。注水开发过程中,储层存在启动压力梯度大、渗流阻力大、注水压力高、基质油启动压差大,难以有效驱替,驱油效率低的特点;而天然裂缝以及后期储层改造的人工裂缝的普

遍存在,使得注入水具有明显的方向性,油井含水上升快,波及面积小,极易造成水窜、水淹。目前为止,国内外低渗透油藏采收率在 11% ~ 30% 之间,平均仅为 20% 左右,大部分原油滞留在油藏中无法采出,因此低渗透、特低渗透油藏提高采收率的潜力十分巨大。

如何实现低渗透油田的经济有效开发,仍然面临很多需要解决的问题,其中最主要的就是技术难题。目前,面临的技术挑战主要有:

(1) 驱油机理复杂,量化表征难度大,有待进一步深化。

外界流体的注入,使得低渗透油藏油、水、气渗流关系更为复杂。驱油过程中,常伴随着对流、扩散、吸附、离子交换、相渗变化等物理化学反应。研发客观反映驱油机理、操作简单、可行性强的低渗透油藏提高采收率技术油藏数值模拟软件是优化注采参数和效果预测的关键。

(2) 裂缝体系复杂,深部调堵技术有待进一步提高。

低渗透油藏人工裂缝与天然裂缝交织,油水渗流规律十分复杂,尤其特低渗透油藏经过体积压裂后形成的储层破碎缝网极易导致后期注水补充地层能量难度大,水窜、水淹现象严重,波及效率低,产量递减快。因此,建立合理的注水开发技术政策,研发合适的调堵技术是解决此类问题的核心。

(3) 环境保护压力大,绿色提高采收率技术有待进一步完善。

低渗透油田生态环境脆弱,石油资源的高效开发与环境保护的矛盾日渐突出。环保廉价型表面活性剂的研发、微生物采油、CO<sub>2</sub> 驱油等成为研究热点,特别是 CO<sub>2</sub> 驱油可以实现温室气体的埋存与原油采收率的提高,是一项极具发展前景的低渗透油藏提高采收率技术。但目前这些技术成熟度低,仍需进一步完善。

(4) 提高采收率技术经济极限条件苛刻,综合决策难度大。

低渗透油田提高采收率综合决策受资源类型、油藏特征、物质供应、原油产量(增油量)、原油价格、经营成本、建设投资以及国家配套激励政策等多种因素决定,现有技术体系需要不断完善,以满足油田可持续发展需要。

## 1.2 二氧化碳驱油技术现状

自 Whorton 在 1952 年取得第一个利用 CO<sub>2</sub> 采油的专利以来,注 CO<sub>2</sub> 提高石油采收率的工作一直在进行。20 世纪 50—60 年代,美国、加拿大进行了大量烃类驱现场实验。因气源丰富,CO<sub>2</sub> 混相驱在美国、加拿大等国家已经成为一项重要且成

熟的提高原油采收率的方法。美国是  $\text{CO}_2$  驱油技术发展最快、项目数量最多的国家,据《油气杂志》统计,美国 2012 年实施 121 个  $\text{CO}_2$  驱油项目,75.8% 的油藏属低渗透油藏,可见  $\text{CO}_2$  驱对于低渗透、特低渗透油藏提高采收率具有重要意义。 $\text{CO}_2$  驱油一般可提高原油采收率 7% ~ 15%,相当于延长油井生产寿命 15 ~ 20 年。

### 1.2.1 美国二氧化碳驱油技术现状

美国是世界上研究和实施  $\text{CO}_2$  驱油最早、技术最为先进、实施项目最多、增油效果最好的国家,通过大量的室内研究和矿场试验,明确了驱油机理,并已经形成了  $\text{CO}_2$  混相驱、非混相驱和水气交替驱为主导的  $\text{CO}_2$  驱油技术。

1952 年,美国大西洋炼油公司(The Atlantic Refining Company)在  $\text{CO}_2$  驱油性质的研究取得一定程度的进展后,壳牌石油公司组织相关技术人员在美国二叠系储层进行注采井组小规模  $\text{CO}_2$  驱油试验。实验结果表明, $\text{CO}_2$  在补充储层能量的同时可以提高单井原油产量。

1972 年,雪佛龙公司在得克萨斯州的凯利斯奈德油田投资第一个  $\text{CO}_2$  驱油项目,该区块主力产层为石灰岩,平均埋深为 2043.5m,平均孔隙度为 9.41%,平均渗透率为 3.03mD,原油黏度为 0.381mPa·s,投产初期单井提高原油产量 300%。截至 1988 年, $\text{CO}_2$  驱油提高原油采收率 9%。该项目的成功实施,标志着该技术完全可以承担提高原油采收率的重任。

20 世纪 80 年代,美国大规模开发  $\text{CO}_2$  气田,利用管道集输方式为  $\text{CO}_2$  驱油提供充足气源,奠定了其是开展  $\text{CO}_2$  混相驱与非混相驱油最多的国家,其 4/5 的项目集中在低渗透特低渗透油藏区块。

1983 年,阿美拉达赫斯公司(Amrada Hess)在得克萨斯州塞米诺尔油田主力区块开展  $\text{CO}_2$  驱油试验,该油藏储层渗透率 1.3 ~ 123mD,孔隙度 12%,井深 1643m,黏度 1mPa·s。投产后,截至 2000 年累计增产原油 2200 多万吨。

美国密西西比州的 Creek 油田就是一个小油田成功实施  $\text{CO}_2$  驱的实例。该油田于 1996 年被 JP 石油公司收购时的原油产量只有 143m<sup>3</sup>/d,因油田实施了  $\text{CO}_2$  驱油技术,使该油田的原油采收率大大提高,其原油产量在 1998 年达到 209m<sup>3</sup>/d,比 1996 年增加了 46%。

截至 2014 年,美国  $\text{CO}_2$  驱油年产量为  $1371 \times 10^4 \text{t}$ ,约占世界总  $\text{CO}_2$  驱油年产量的 93%。驱替方式主要是混相驱。截至 2014 年底,美国共有 130 个  $\text{CO}_2$  混相驱油项目,年产油  $1263.93 \times 10^4 \text{t}$ 。



美国实施 CO<sub>2</sub>混相驱的原因主要是由油藏条件决定的,美国 CO<sub>2</sub> 混相驱油藏岩性主要有砂岩、碳酸盐岩、硅藻土、未胶结砂岩等几种,其中砂岩和碳酸盐岩居多。2014 年,美国 128 个 CO<sub>2</sub> 混相驱项目中砂岩和碳酸盐岩油藏分别为 39 个和 55 个,共占有不同类型岩性油藏数目的 73%。通过对油藏参数的分析可以看出(表 1.1、表 1.2),美国进行 CO<sub>2</sub>混相驱油藏产量比例较大的是孔隙度为 10% ~ 20%,产量占 64%(2014 年),渗透率范围为 10mD 以下和 10 ~ 50mD,产量分别占 39% 和 37%。从油藏深度和温度上来看,最合适的深度为 1220 ~ 2440m,油藏温度为 38 ~ 65℃,其产量分别占 74% 和 83%(2014 年)。地下原油平均黏度为 1.32 ~ 1.74mPa · s,相对密度为 0.84。油藏低温、原油低黏度等性质使 CO<sub>2</sub>与原油较易形成混相,这也是混相驱多于非混相驱的主要原因,这些优越的油藏条件是美国实施 CO<sub>2</sub>混相驱的基础。

表 1.1 2004—2014 年美国 CO<sub>2</sub>混相驱油藏孔隙度统计

| 年份   | 不同孔隙度油藏的项目数,个 |           |      | 不同孔隙度油藏的年产量,10 <sup>4</sup> t |           |        | 产量比例,% |           |       |
|------|---------------|-----------|------|-------------------------------|-----------|--------|--------|-----------|-------|
|      | <10%          | 10% ~ 20% | >20% | <10%                          | 10% ~ 20% | >20%   | <10%   | 10% ~ 20% | >20%  |
| 2004 | 10            | 49        | 11   | 233.34                        | 725.37    | 110.87 | 21.82  | 67.82     | 10.37 |
| 2006 | 12            | 54        | 14   | 494.74                        | 796.47    | 141.26 | 34.54  | 55.60     | 9.86  |
| 2008 | 18            | 64        | 18   | 250.59                        | 828.18    | 157.87 | 20.26  | 66.97     | 12.77 |
| 2010 | 17            | 68        | 24   | 256.31                        | 894.97    | 267.58 | 18.06  | 63.08     | 18.86 |
| 2012 | 17            | 71        | 24   | 263.74                        | 899.63    | 181.57 | 19.61  | 66.89     | 13.50 |
| 2014 | 28            | 78        | 22   | 302.31                        | 818.54    | 143.07 | 23.92  | 64.76     | 11.32 |

表 1.2 2004—2014 年美国 CO<sub>2</sub>混相驱油藏渗透率统计

| 年份   | 不同渗透率油藏的项目数,个 |           |       | 不同渗透率油藏的年产量,10 <sup>4</sup> t |           |        | 产量比例,% |           |       |
|------|---------------|-----------|-------|-------------------------------|-----------|--------|--------|-----------|-------|
|      | <10mD         | 10 ~ 50mD | >50mD | <10mD                         | 10 ~ 50mD | >50mD  | <10mD  | 10 ~ 50mD | >50mD |
| 2004 | 37            | 21        | 12    | 506.53                        | 394.26    | 168.8  | 47.36  | 36.86     | 15.78 |
| 2006 | 40            | 23        | 18    | 507.93                        | 682.5     | 242.04 | 35.46  | 47.64     | 16.90 |
| 2008 | 43            | 25        | 32    | 522.07                        | 434.55    | 280.02 | 42.22  | 35.14     | 22.64 |
| 2010 | 44            | 27        | 38    | 494.45                        | 475.29    | 449.11 | 34.85  | 33.50     | 31.65 |
| 2012 | 45            | 30        | 37    | 513.54                        | 470.21    | 361.19 | 38.18  | 34.96     | 26.86 |
| 2014 | 52            | 29        | 47    | 495.97                        | 461       | 303.96 | 39.33  | 36.56     | 24.11 |

从油田实施  $\text{CO}_2$  混相驱之前的开发方式来看,大部分油田是在长时间的水驱后进行的统计。2004—2014 年,美国 EOR 数据发现,有 67% 的  $\text{CO}_2$  驱油项目是在水驱后进行的,这表明  $\text{CO}_2$  驱油技术是水驱油藏进一步提高采收率的有效技术方法。

相对于  $\text{CO}_2$  混相驱,非混相驱有着自身的油藏特点。根据 2014 年数据: $\text{CO}_2$  非混相驱项目多属中高孔渗油藏,孔隙度多分布在 17% ~ 30%,平均值为 25.23%,渗透率分布在 325.78 ~ 3000.00mD,平均值为 1000mD;油藏平均埋深 1412m,属于中等深度;平均油藏温度和混相驱温度相近,在 60℃ 左右;原油偏重、偏稠,相对密度为 0.85 ~ 0.99,平均为 0.90,黏度为 0.6 ~ 17.4mPa · s,平均为 8.528mPa · s。2014 年,美国  $\text{CO}_2$  非混相驱生产井数已达到 993 口,年产量达  $106.89 \times 10^4 \text{t}$ 。

### 1.2.2 加拿大二氧化碳驱油技术现状

Weyburn 油田位于加拿大萨斯喀彻温省东南部,油藏分为两层,性质差异很大,上部为 Marly 层,平均孔隙度为 26%,渗透率为 1 ~ 100mD,下部为 Vuggy 层,平均孔隙度为 11%,渗透率为 15mD,面积约 180km<sup>2</sup>,原油储量约为  $14 \times 10^8 \text{t}$ 。从 1965 年开始,油田进行注水开采,1991 年后,开始进行水平井开采。2000 年开始实施  $\text{CO}_2$  驱油项目,通过把加压的  $\text{CO}_2$  气体注入油田储层中,以增加石油采收率。同时,通过综合监测,查明  $\text{CO}_2$  被灌注之后的运移规律,从而建立长期、安全的  $\text{CO}_2$  地下埋存的技术和范例。至 2000 年注入  $\text{CO}_2$  之前,采收率约为 20%。注  $\text{CO}_2$  增加石油采收率的方案首先于 2000 年 9 月进行,初期注气量为  $269 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 。目前的注气量为  $339 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ,其中,每天有  $71 \times 10^4 \text{m}^3$  的  $\text{CO}_2$  通过生产井进行再循环。在试验区块中,日产油 3269m<sup>3</sup>,其中  $\text{CO}_2$  增油 817m<sup>3</sup> 以上,Weyburn 油田是世界上将  $\text{CO}_2$  地质埋存与提高石油采收率相结合比较成功的案例。

### 1.2.3 中国二氧化碳驱油技术现状

国内  $\text{CO}_2$  天然气源较少, $\text{CO}_2$  采油方法研究起步较晚,与国外存在较大差距。前期,江苏、吉林、胜利、大庆、大港、中原等油田发现了一些富含  $\text{CO}_2$  气藏,开启了  $\text{CO}_2$  驱油的研究工作。

江苏油田富 14 断块 1998 年在可行性研究的基础上开始  $\text{CO}_2$  混相驱现场试

验,试验区含油面积  $0.57\text{km}^2$ ,平均中深  $2090\text{m}$ ,油层平均有效厚度  $6.1\text{m}$ ,平均渗透率  $854\text{mD}$ ,原始含油饱和度  $66\%$ ,原始油藏压力  $20.90\text{MPa}$ ,地下原油黏度  $2.43\text{mPa}\cdot\text{s}$ ,密度为  $0.82\text{g}/\text{cm}^3$ ,原始气油比为  $23\text{m}^3/\text{m}^3$ 。截至 2000 年底,试验区  $\text{CO}_2$ 混相驱油试验阶段累计增产原油  $5218\text{t}$ ,占波及区原始地质储量的  $4.01\%$ 。

大庆油田芳 48 井区位于松辽盆地北部,于 2002 年部署了 5 口设计井,试验区含油面积为  $0.43\text{km}^2$ ,地质储量  $23 \times 10^4\text{t}$ ;平均空气渗透率为  $112\text{mD}$ ,有效孔隙度为  $12\%$ ,地层原油黏度为  $6.6\text{mPa}\cdot\text{s}$ ,密度为  $0.815\text{g}/\text{cm}^3$ 。现场试验结果表明, $\text{CO}_2$ 非混相驱油试验能够使特低渗透扶杨油层建立起有效驱动体系,5 口试验井都见到了不同程度的增油效果。

吉林大情字井油田黑 59 区块试验区储层平均孔隙度为  $14\%$ ,平均渗透率为  $4.5\text{mD}$ ,原油密度为  $0.8546\text{g}/\text{cm}^3$ ,原油黏度为  $8.3\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。该试验区 4-2 井组,注水开发处于低速低产状态,注  $\text{CO}_2$ 后效果得到明显的改善,含水率大幅度降低,由原来的  $45\%$  降到  $25\%$  左右;日产油由水驱时的  $2\text{t}$  左右上升到  $5\text{t}$  左右,部分井自喷生产。

苏北草舍油田也开展了  $\text{CO}_2$ 混相驱提高采收率先导试验。试验区水驱井网存在开发层系划分粗、层间矛盾严重、局部井网不完善等诸多问题,注入  $\text{CO}_2$ 后,注气井吸气剖面得到明显改善,地层达到最小混相压力,原油重质组分被动用,整个区块初见成效。经过多年努力,该区已形成了适合自己的  $\text{CO}_2$ 驱配套工艺。

胜利油田已开展了多个区块的  $\text{CO}_2$ 驱先导试验研究,并于 2008 年在 G89-1 块实施了  $\text{CO}_2$ 驱先导试验,稳定注入压力为  $4\text{MPa}$ ,日注液态  $\text{CO}_2$   $40\text{t}$ 。G89-4 井注气后,地层能量逐步恢复,注入井底压力由注入前的  $23.2\text{MPa}$  上升到  $26.3\text{MPa}$ ,上升了  $3.1\text{MPa}$ ,周围 6 口油井目前已经有 4 口见效,日产油由注气前的  $25.5\text{t}$  上升至目前的  $45\text{t}$ 。而非注气周边井的日产油一直呈现递减趋势。截至 2009 年 10 月,中心试验区已累计注气  $28956\text{t}$ ,地层压力恢复  $3.3\text{MPa}$ ,增油  $4700\text{t}$ ,显示了良好的应用效果。

## 参考文献

- [1] 张志强,郑军卫. 低渗透油气资源勘探开发技术进展[J]. 地球科学进展,2009(8): 54-64.
- [2] 郑军卫,庾凌,孙德强. 低渗透油气资源勘探开发主要影响因素与特色技术[J]. 天然气地球科学,2009(5):651-655.
- [3] 汪焰. 全球致密气勘探开发现状及关键技术[J]. 石油知识,2014(2):8-9.



- [4] Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside the United States [N/OL]. U. S. Energy Information Administration, 2013 - 06 - 10 (13) [2015 - 03 - 09]. <http://www.eia.gov/analysis/studies/world-shalegas/>.
- [5] AEO2014 Early Release Overview [N/OL]. U. S. Energy Information Administration, 2013 - 10 - 16 [2015 - 03 - 09]. [http://www.eia.gov/forecasts/aeo/er/early\\_production.cfm/](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/er/early_production.cfm/).
- [6] 胡文瑞. 中国低渗透油气的现状与未来[J]. 中国石油企业, 2009(6): 56 - 58.
- [7] 秦同洛. 关于低渗透油田的开发问题[J]. 断块油气田, 1994(3): 21 - 23.
- [8] 朱维耀. 特低渗透油藏有效开发渗流理论和方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- [9] 袁明生, 李德同, 童亨茂, 等. 低渗透裂缝性油藏勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- [10] Petro - Kazakhstan Corporation. North American Oil & Gas Conference Data [C]. Toronto, 2004.
- [11] Law B E, Richard M P, Keighin C W. Geologic Characterization of Low Permeability Gas Reservoir in Selected Wells, Great Green River Basin, Wyoming [D]. AAPG Studies in Geology. Colorado and Utah, 1986: 253 - 269.
- [12] 李道品, 罗迪强, 刘雨芬. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [13] 唐曾熊. 油气藏的开发分类及描述[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- [14] SY/T 6285—2011 油气储层评价方法[S].
- [15] 胡文瑞. 中国低渗透油气田开发概论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- [16] 胡文瑞. 高端驱油技术进展与展望[R]. 北京: 中国工程院, 2014.
- [17] 秦积舜, 韩海水, 刘晓蕾. 美国 CO<sub>2</sub> 驱油技术应用及启示[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 209 - 215.
- [18] 裴辉, 张赞武. 不同相态 CO<sub>2</sub> 形成的泡沫体系性能研究[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(2): 141 - 145.
- [19] James Sheng. Enhanced Oil Recovery Field Case Studies[M]. Houston: Gulf Professional Publishing publications, 2013.

## 2 二氧化碳的物理化学性质

### 2.1 二氧化碳的物理性质

常温下  $\text{CO}_2$  是一种无色无味的气体,比空气略重,能溶于水,根据压力、温度的不同, $\text{CO}_2$  有固体、液体、气体和超临界 4 种形态。由于  $\text{CO}_2$  是非极性分子,分子间作用力较弱,固体(干冰)不经液体直接气化(升华),气体加压、冷却可以液化和固化。其部分物理性质见表 2.1。

表 2.1  $\text{CO}_2$  的部分物理性质

| 性质                    |                        | 数值            |
|-----------------------|------------------------|---------------|
| 熔点,℃                  |                        | -56.6(527kPa) |
| 沸点,℃                  |                        | -78.5(升华)     |
| 表面张力(-25℃),mN/m       |                        | 9.13          |
| 绝热系数 $K$              |                        | 1.295         |
| 标准状态<br>(0℃,0.101MPa) | 气体密度,kg/m <sup>3</sup> | 1.977         |
|                       | 流体黏度,mPa·s             | 0.0138        |
|                       | 定压比热容,kJ/(kg·K)        | 0.85          |
|                       | 定容比热容,kJ/(kg·K)        | 0.661         |
|                       | 比容,m <sup>3</sup> /kg  | 0.5059        |
|                       | 摩尔体积,L/mol             | 22.26         |
|                       | 导热系数,W/(m·K)           | 52.75         |
|                       | 折射率                    | 1.00045       |