



鄂尔多斯盆地 低渗透储层特征及开发参数设计

——以甘谷驿油田长6油层组为例

张新春 著



中国石化出版社

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

鄂尔多斯盆地 低渗透储层特征及开发参数设计

——以甘谷驿油田长6油层组为例

张新春 著

中国石化出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

鄂尔多斯盆地低渗透储层特征及开发参数设计:
以甘谷驿油田长6油层组为例/张新春著.

—北京:中国石化出版社,2017.9

ISBN 978-7-5114-4687-9

I. ①鄂… II. ①张… III. ①鄂尔多斯盆地-低渗透
储集层-油田开发 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 237407 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:北京市朝阳区吉市口路9号

邮编:100020 电话:(010)59964500

发行部电话:(010)59964526

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

E-mail:press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 10.25 印张 216 千字

2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

定价:58.00 元

前 言

陕甘宁盆地在地质学上称鄂尔多斯盆地：北起阴山、大青山，南抵陇山、黄龙山、桥山，西至贺兰山、六盘山，东达吕梁山、太行山，总面积 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，是我国第二大沉积盆地。该盆地具有地域面积大、资源分布广、能源矿种齐全、资源潜力大、储量规模大等特点。盆地内石油总资源量约为 $86 \times 10^8 \text{ t}$ ，主要分布于盆地南部 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的范围内；天然气总资源量约为 $11 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，储量超过千亿立方米的大气田就有 5 个。石油和天然气探明储量分别占全国油气探明储量近 6% 和 13%，对保障我国能源需求，加强战略能源储备，实现经济可持续发展具有非常重要的意义。

从石油赋存层位来看，液态石油主要集中在三叠系延长组地层中，侏罗系延安组地层中虽然也有赋存，但分布范围相对局限。目前，盆地中所发现石油储量的 90% 以上均赋存于低渗透储层之中，油气藏(田)开发以“低渗、低产”为主要特征，储层孔隙度与渗透率均较低，并且岩性致密，物性复杂，孔隙度、渗透率、含油饱和度在不同砂带的不同部位变化较大，此外储层喉道半径小，孔喉比大、敏感性效应突出等，导致开发难度大，采出程度低，产建矛盾十分突出，严重制约了油田勘探开发进程。陕北部分油田经过长期的开发之后，地层能量匮乏，而且储层非均质性较强，在近些年开展的注水工作过程中，注采之间存在较大矛盾，因此开展储层微观孔隙结构与非均质性规律以及主控因素等方面的研究，能够对低孔、低渗油区下一步的扩边勘探以及注水开发起到一定的指导作用。同时，也可对油田的稳产、增产起到积极的作用。

对于低孔、低渗以及严重非均质储层，常规增产措施往往很难取得理想效果，空气-泡沫驱成为增产技术领域研究方向之一。泡沫是一种可压缩的非牛顿流体，具有密度可调、低漏失、低伤害、强携砂能力以及与天然气混合不易发生爆炸等优良性能。同时，泡沫流体在地层中渗流具有选择性，既能封堵高渗透层，提高中、低渗透层的动用程度，又能有效封堵水层，提高含油饱和度较高部位的驱替效率。

本书通过对典型低孔、低渗储层的储层微观孔隙结构、储层非均质性及其

主要控制因素进行研究，并以此为基础，探讨了针对这类储集层增产及稳产的空气-泡沫驱技术，表明该技术有较好的增油降水效果，尤其适用于高含水、非均质严重、存在裂缝或大孔道的油藏。

本书的研究内容适合石油地质相关专业及油气田开发相关领域的从业人员进行参考，也可以作为相关院校师生的参考用书使用。

由于笔者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请各位读者批评指正。

目 录

第1章 概述	(1)
1.1 低渗透储层微观孔隙结构特征	(1)
1.2 成岩作用	(2)
1.3 储层非均质性	(3)
1.4 低渗透储层渗流特征	(3)
1.5 储层评价	(4)
1.6 空气泡沫驱	(5)
第2章 区域地质特征	(9)
2.1 区域位置	(9)
2.2 石油地质特征	(10)
2.3 地层	(10)
2.4 沉积特征	(15)
第3章 成岩作用及对储层的影响	(20)
3.1 储层成岩作用	(20)
3.2 成岩阶段	(28)
3.3 储层成岩演化历史与次生孔隙形成	(30)
第4章 储层微观孔隙类型及结构特征	(42)
4.1 储层岩石学特征	(42)
4.2 储层物性特征	(42)
4.3 孔隙类型	(44)
4.4 孔隙结构特征	(49)
第5章 测井解释及储层综合评价	(58)
5.1 储层四性关系特征	(58)
5.2 储层测井模型建立	(60)

5.3	解释标准建立及应用	(70)
5.4	储层分类标准	(72)
第 6 章	储层渗流及非均质性特征	(74)
6.1	储层渗流特征	(74)
6.2	储层层间与层内非均质性	(81)
6.3	储层空间非均质性特征	(88)
第 7 章	低渗透储层开发参数优化	(97)
7.1	低渗透储层开发方式优选	(97)
7.2	注水开发区块(唐 114 井区)	(100)
7.3	空气-泡沫驱区块(唐 80 井区)	(126)
参考文献		(147)

第1章 概述

鄂尔多斯盆地横跨陕、甘、宁、蒙、晋五省区，为我国第二大沉积盆地，也是我国重要的含油气盆地和油气生产基地，其油气资源总量巨大，但目前该盆地中所发现油气储量的90%以上均赋存于低渗透储层之中，油气藏(田)开发以低渗、低产为主要特征。地理位置上，甘谷驿油田位于陕西省延安市与延长县交界处的甘谷驿镇；构造上，该油田处于鄂尔多斯盆地东部斜坡，储层孔隙度与渗透率均较低，并且岩性致密，物性复杂，孔隙度、渗透率、含油饱和度在不同砂带的不同部位变化较大，黏土矿物等胶结物的成分和含量变化也较大，使储层具有较强的非均质性，加上储层喉道半径小，孔喉比大、敏感性效应突出等特征，导致开发难度大，采出程度低，产建矛盾十分突出，严重制约了勘探开发进程。其中，甘谷驿油田经过长期的开发之后，地层能量匮乏，而在近些年开展注水工作时发现，由于受储层非均质性的影响，注采存在较大矛盾，因此，开展长6油层组储层微观孔隙结构与非均质性规律，以及主控因素等方面的研究，形成更加清晰的认识成为摆在开发建设者面前的重要课题。因此，本书希望通过对甘谷驿地区长6油层组储层的微观孔隙结构与非均质性研究，能够对该区下一步的扩边勘探以及注水开发起到一定的指导作用，同时对更好地发掘资源，确保甘谷驿油田稳产、增产具有重要的指导意义。此外，还可对鄂尔多斯盆地特低孔、特低渗储层的研究起到积极的推动作用。

1.1 低渗透储层微观孔隙结构特征

孔隙结构是指孔隙与喉道的几何形状、大小、分布及其相互连通关系。由于油、气、水是在相互连通的孔隙中流动的，通过研究孔隙结构特征可了解流体流动规律，对低渗储层更是如此。王允诚等通过对国内外油气储层孔隙结构的研究进行总结，将孔隙结构按形态及成因主要分为以下几种类型，即粒间孔、杂基微孔、矿物解理缝和岩屑内粒间微孔、纹理及层理缝、溶蚀孔隙、晶体再生长晶间隙及成岩期胶结物充填未饱和孔、胶结物晶间孔、裂隙孔隙等；将喉道分为缩颈喉道、点状喉道、片状或弯片状喉道、管束状喉道等类型。

早期的研究者对储层孔隙结构的研究多为定性到半定量的描述，主要集中在对简单的微细裂缝观察、物性分析、润湿性测试、敏感性分析、水驱油及油水相渗、孔隙类型和喉道类型大小及分布等方面的描述。常用的实验方法与手段主要有扫描电镜、铸体薄片、X

衍射和毛管压力曲线法等。毛管压力曲线的获取途径相对较多,有离心机法、常规压汞法、最大气泡法、半隔板渗透法等。在 Edword (1992) 首次利用实验室内的压汞实验确定岩石孔隙大小及分布后,现已发展成为研究储层孔隙结构的重要方法之一。20 世纪 90 年代后期,储层微观孔隙结构相关实验的研究进入快速发展期,对孔隙和喉道分布、填隙物类型和填隙方式的描述更加量化,采用的实验手段也更为先进,如通过电镜进行扫描可在含油或含水的情况下直接对样品进行分析研究,从而能够准确地获知矿物、岩石及孔隙结构等微观特征。恒速压汞实验技术可将孔隙和喉道分开,分别获取孔隙和喉道的各项参数,从而定量研究孔隙、喉道特征。通过对毛细管曲线的分析,可定量确定孔喉大小、分选、连通性和渗流能力等。扫描电镜、纳米 CT 技术不仅可以直接观察孔隙、喉道大小及形态,还可确定各类黏土矿物的类型及产状。铸体薄片能够直接观察碎屑成分及结构、孔隙和喉道大小及形态以及孔喉配位数等。核磁方法可以直接利用 T_2 曲线转化为毛管压力曲线,进行孔隙结构参数评价。

同时,储层微观孔隙结构研究的相关理论也得到较快发展,集中体现在两个方面:①关于孔隙结构的模拟,主要是计算机网络模型模拟;②孔隙结构描述理论,主要体现在分形几何理论的发展上,是在扫描电镜、毛管压力曲线、铸体薄片分析等资料的基础上进行的,孔隙结构的分形维数介于 2~3 之间,且分形维数越小,孔隙越均质,分形维数越大,孔隙结构越不均质。另外,由于孔隙结构受多种因素的影响,低渗储层的孔隙结构更为复杂,需要多种技术的综合应用。

综上所述,微观孔隙结构的实验研究手段越来越先进,描述理论更加多样化、精细化,并由定性到半定量向量化的方向发展。

1.2 成岩作用

Guimbert 等早在 1868 年就提出了有关成岩作用的概念,但直到 20 世纪 80~90 年代,随着油气勘探研究的不断深入,才逐步受到沉积学家、石油地质学家及矿床研究者的重视。成岩作用研究经历了早期不重视阶段(20 世纪 40~70 年代),重视并深入研究阶段(70 年代中期~80 年代),应用新方法、新技术的快速发展阶段(80 年代)和运用计算机等先进技术的成岩模拟阶段(90 年代以后~现今)四个重要时期。一般而言,广义的成岩作用是指构造运动使得沉积物经过埋藏所产生的所有作用,包括地层的抬升剥蚀及沉积埋藏中发生的一切变化。一般石油地质学所涉及的成岩作用主要包括压实及压溶作用、胶结及交代作用、重结晶与溶解作用以及后期矿物的转化等,这些作用相互影响,并控制了沉积物的演化历史、储层的发育及物性特征等。

成岩作用在不同含油气盆地、不同的构造带,甚至在不同的含油气聚集带都会发生变化和产生差异。早期成岩作用的研究主要是依靠构造演化来分析,后来逐渐发展为依靠沉积岩相的综合特征来分析,并结合各种石油实验地质的分析化验手段,如常规薄片分析、

扫描电镜、阴极发光、X 射线荧光光谱分析及衍射分析、电感耦合激光探针、激光拉曼、有机岩石学、碳氧同位素等, 这些实验分析手段为成岩作用的研究提供了基础的数据分析资料, 使得成岩作用研究更为准确和科学, 更加符合地质特征。另外, 近年来, 微量元素及痕量元素分析、地层水元素分析等也逐渐成为研究成岩作用的有效手段。

最近, 部分国内外学者提出了成岩作用的定量模拟, 使得成岩作用研究进入半定量—定量阶段, 并与实验室的模拟相结合。如在模拟成岩作用过程中物理化学条件变化时, 运用地球热动力学来分析成岩作用中各种碎屑矿物的稳定性及其关联性, 可综合反映储层的成岩演化历史过程。再结合油气成藏演化历史便可破译油气运移和成藏发生时期的地质演化历史过程, 为油气勘探开发指明方向。

1.3 储层非均质性

对低孔低渗致密储层来说, 其储层非均质性的研究至关重要, 直接影响储层的后期开发措施。由于储层砂体分布复杂、物性空间非均质性强、砂体沉积环境多变, 并经过后期成岩及构造演化作用的改造, 使得储层表现出强烈的非均质性。根据国内外储层非均质性研究成果, 在强非均质性的油田, 当产液进入高含水期时, 产量递减明显, 此时储层非均质性研究显得尤为重要。20 世纪 70 ~ 80 年代, 国内外众多学者开始探讨储层非均质的问题, 并且掀起了一股研究储层非均质的热潮, 提出了众多的储层非均质性分类和研究方法。如 Weber(1986) 依据储层非均质的成因、规模、流体与岩石相互作用等特征, 将储层非均质划分为七种类型。国内学者针对储层非均质的规模, 将储层非均质划分为储层宏观非均质性及微观非均质性等, 研究分类的依据多数是根据储层非均质性的规模。裘怿楠(1993) 依据国内碎屑岩储层的特征, 进一步将储层的非均质性类型划分为层间非均质性、层内非均质性、平面非均质性和孔隙微观特征的非均质性四种, 目前这种分类方法已经为多数研究学者采纳。此外, 近年来有部分学者提出储层的非均质性特征与成岩演化历史有关, 并提出了成岩相的非均质性特征。

1.4 低渗透储层渗流特征

低渗透储层由于孔喉细小、微观孔隙结构复杂、渗流阻力大、固液表面分子力作用强烈等, 使其渗流特征与中高渗透储层有很大的不同。总体来看, 低渗透储层具有以下渗流特征: 小喉道连通的孔隙体积比例高、比表面积大、贾敏效应显著、卡断现象严重、可动流体饱和度小。国内外大量研究表明, 单相流体在低渗孔隙介质中的流动表现出非达西渗流特征, 反映到生产上, 有着启动压力大、油井见效慢、见水后含水上升快、产液产油指数下降快、水驱效率低等特点, 从而造成开发难度大、注不进、采不出、开发效果普遍不理想, 采出程度低等特点。前人在岩心级别上对低渗岩心水驱油特征也进行了大量的研

究,结果表明致密低渗砂岩储层岩心油水相渗曲线特征与常规碎屑岩储层明显不同,即等渗点低,相渗曲线受储层内部的毛管压力影响明显。对于不同润湿性的亲水储层相渗曲线特征主要为:①储层的束缚水饱和度高,一般大于40%;②油水两相共渗区范围窄;③残余油饱和度高时,水相相对渗透率低。而弱亲水性和中性储层岩心相渗曲线则有所差异,主要是油水两相共渗区相对较宽,残余油时,水相相对渗透率较高。沈平等(2000)对多孔介质进行了三个层次的观察和描述,包括细微层次的观察、宏观层次的观察以及介于二者之间的描述,细微层次观察针对单孔隙分析,宏观层次针对岩心观察与分析(通常指岩心范围内)。国内外学者在岩石相渗分析方面做了大量研究,认为岩心油水相渗曲线反映了油水在孔隙介质中的渗流规律,低渗致密砂岩储层的相渗曲线明显区别于常规的碎屑岩储层的相渗曲线,首先是储层的等渗点较低,通常小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储层的毛管压力直接影响相渗曲线的变化特征。亲水性碎屑岩储层的相渗曲线特征为,一般储层的原始含水饱和度较高,通常大于40%,油水两相共同的渗流区域相对较窄,残余油饱和度高时,水的相对渗透率要低一些,通常小于 $0.15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。另外,弱亲水性和油水中性储层的岩石相渗曲线也明显不同,主要表现在油水相对渗透区域大小以及残余油饱和度变化时水相渗透率的高低。但是,不同油气聚集带存在差异,主要原因为储层的孔隙结构存在明显差异,比如储层的微观裂缝特征、岩石的比表面积、岩石的驱替效率、岩石的润湿性等诸多因素影响着储层的油水相渗曲线的变化特征。因此,对于低孔低渗储层,尤其是孔隙结构较为复杂的致密砂岩储层,有必要分析储层的渗流特征,为后期储层的开发及开发措施的制定提供理论依据。

1.5 储层评价

国外储层评价方法是采用将勘探与开发相结合、沉积与物性研究相结合、宏观与微观相结合、描述与机理研究相结合的方法,并大致形成了储层类型及特征、储层分布、成因演化、地层测试、精确预测及优化建模等方面的评价技术。

目前,国内储层评价方法主要是以分析化验为依据,依靠储层的测井解释评价技术来分析,测井技术方法包括常规的三孔隙度(中子、密度、声波)、自然伽马、电阻率、自然电位及特殊测井技术,包括成像测井、核磁测井、声波测井等。20世纪70~80年代,经过国家有关部门主导的科技攻关建立了国内储层评价体系,形成了储层油气聚集性能、温度压力、渗流特征、岩石物理、伤害机理等评价参数的综合储层评价体系。在90年代,国家石油行业标准委员会编写了《油气储层评价体系规范》,为储层评价内容及方法提供了指导性参考。按照标准体系,储层评价与勘探开发密切结合,并划分为三个尺度的评价,包括盆地级别、圈闭级别及油气藏级别。在开发阶段,储层评价内容涵盖了储层的各项特征,包括储层的区域地质特征(构造、沉积)、砂体展布、岩石矿物学、孔隙结构分析、储层非均质性、渗流机理、储层的流体性质、温度压力特征、油藏驱动机制等。所依靠的资

料包括岩石物理分析化验、地球物理测井及解释、油气井的地层测试及地震信息等。开发阶段储层评价极为重要,是制定开发方法及开发措施的重要依据,储层评价包括储层的厚度、孔隙度、渗透率、砂体面积及厚度、黏土矿物特征、泥质含量特征、水平井储层的钻遇率等、储层胶结物含量、孔隙结构参数以及层内非均质性等,其层内非均质性是注水开发和提高采收率评价中的重要研究内容,一般以层内渗透率变异系数以及韵律性作为评价指标。

与常规储层研究类似,当今国内外对低渗透储层研究的发展趋势主要表现在:

(1)宏观研究规模更大,向理论化和系统化方向发展,微观研究更加精细,比如采用高分辨率的数字岩心技术、纳米 CT 技术以及特殊测井系列来综合解决致密低渗储层的孔隙结构及油水识别的难题,尤其是当前特殊测井技术的发展,比如多维核磁共振技术,目前已有多个油田服务公司开始将其应用于致密砂岩及非常规页岩超低渗储层的评价中,因此,多种新技术的综合应用使得低渗储层向更精细评价方向发展。

(2)基于成岩作用及成岩岩石物理相的储层类型划分技术。近年来,通过对致密砂岩成藏机理及微观矿物岩石组分研究显示,储层的物性与储层的成岩作用密切相关,并且储层成岩演化及成岩相直接影响储层的物性条件。

(3)从单因素、单学科分析向多因素、多学科协同研究方向发展。

1.6 空气泡沫驱

泡沫流体应用于油田提高采收率技术已有 40 多年的历史。最初,只是简单地在气驱过程中加入表面活性剂水溶液,防止过早发生气窜。后来,逐渐发展为复合泡沫、凝胶泡沫等提高注气采收率技术。近年来,在注气过程中加入一定量的泡沫段塞提高注气采收率和泡沫驱成为提高油藏采收率研究的重点。大量室内实验研究及现场应用都表明,泡沫具有较高的波及效率、驱替效率,是提高水驱后油藏采收率的有效方式。

对于低压、低渗以及严重非均质,常规增产措施往往很难取得理想效果,泡沫驱成为增产技术领域研究方向之一。泡沫是一种可压缩的非牛顿流体,具有密度可调、低漏失、低伤害、强携砂能力以及与天然气混合不易发生爆炸等优良性能。同时,泡沫流体在地层中的渗流具有选择性,既能封堵高渗透层,提高中低渗透层的动用程度,又能有效封堵水层,提高含油饱和度较高部位的驱替效率。

1) 国外泡沫提高注气采收率技术应用现状

1956 年, Fried 首次开展了泡沫提高采收率方面研究,其研究结果表明:泡沫可以引起气相相对渗透率迅速降低,从而延缓了气体的突破。泡沫法提高采收率主要原因在于注入泡沫后气体渗透率快速降低。他认为泡沫能有效封阻气流,延缓气体突进。在弱泡沫的情况下,他观察到泡沫可以不断地破灭和再生。

1958 年, Boud 等申请了世界上第一份泡沫驱油的专利(US 2866507)。1961 年,美国

官方文献开始出现记载泡沫用于提高原油采收率的实例,这标志着泡沫驱矿场应用的开始。

1963年,Bemand等发现当有泡沫存在时,气驱效果明显增强。其研究表明:泡沫作为驱替剂,在只含水的松散砂中效果十分明显,而在只含油的松散砂中效果却不明显。泡沫可以提高气驱采油过程中的波及体积,这主要是因为泡沫可以选择性地降低油藏中的气体渗透率。

1965年,美国联合石油公司进行了泡沫驱油室内研究。其研究表明:模型注入泡沫后可将模型的含油饱和度降低到11.8%。1965~1967年,该公司在伊利诺伊州希金斯油田进行了一次矿场实验。其结果表明,泡沫驱过程中平均水油比从15降低至12,而作对比的另一个区块,同期平均水油比从20增加至28。1976年,该公司又在这个油田进行了一次小规模泡沫驱现场实验,约增油 1.9×10^4 t。

1983年,Mobil公司开始在室内研究CO₂泡沫驱油的工作。为研究CO₂泡沫的封堵能力,评价泡沫驱油的经济性,该公司于1991~1992年在西德克萨斯州的Platform碳酸盐储层中进行了矿场实验。实验采用两种不同的起泡剂,并且两种起泡剂采用不同的注入方式进行泡沫驱。实验结果表明:进行泡沫驱后,生产井的产油量明显增加,产气量明显减少,泡沫的作用效果十分明显。

1991年,美国新墨西哥石油研究开发中心(PRRC)和美国能源部在新墨西哥州东南部Vacuum油田进行了CO₂泡沫驱实验。矿场实验结果表明:起泡剂在油藏中能够形成较强的泡沫体系,使CO₂的流度降低了1/3。通过不同浓度的泡沫驱实验表明:当起泡剂浓度降低至100mg/L时,仍具有很好的起泡作用。实验井组中含有8口生产井,其中有3口井产油量明显增加。

1994年,英国、挪威分别在北海油田进行泡沫驱油实验。此次实验评估了30多例重要的泡沫驱矿场实验。在17例蒸汽泡沫驱矿场实验中,成功11例,失败3例,不确定3例;在6例CO₂泡沫驱矿场实验中,成功2例,失败1例,不确定3例;在5例天然气或N₂泡沫驱矿场实验中,成功1例,失败1例,不确定3例。由此可见,通过泡沫进行深部流度控制以提高采收率,其潜力要比水气交替注入更大。通过泡沫驱,生产井多产1桶原油,一般要花费5美元左右,可见泡沫驱是一种经济性较好的提高采收率方法。

通过对国外泡沫提高注气采收率和泡沫驱技术的调研和分析后发现,国外对该技术的研究主要集中在起泡剂的筛选,泡沫在多孔介质中的产生及影响因素,泡沫在多孔介质中的运移机理,并提出了相应的数学模型,通过建立模型来解释泡沫在多孔介质中的运移形态。国外对泡沫提高注气采收率技术进行了大量的现场实验,大部分都获得了很好的效果。

2)国内泡沫提高注气采收率技术应用现状

自70年代以来,我国也进行了大量泡沫驱油方面的研究。研究内容主要集中在起泡剂的损失及其抑制、泡沫的稳定性和泡沫驱油机理等。目前,我国泡沫驱油技术还处于实

实验室研究和井组规模的先导性实验阶段,使用泡沫的主要目的是在气驱及混相驱过程中防止气体窜流,改善注入剖面,延缓气体突破。

1965年,玉门油田最早进行泡沫驱油实验。1965~1971年,在玉门老君庙油田和石沟油田先后进行了9个井组10井次的现场实验,有6次实验效果明显。1979年,又进行了扩大的现场实验,实验以烷基苯磺酸钠为起泡剂,三聚磷酸钠为稳泡剂,累计注入起泡剂654t,稳泡剂172t。注入泡沫后,18口生产井中仅有6口生产井的产量有所增加,而其他生产井效果并不明显。经过分析认为,该区块水驱采出程度已经很高,波及体积也较大,泡沫体系的流度控制能力对于提高采收率的贡献不大。另外,起泡剂在油藏中的吸附、沉淀损失较大,油井内层间窜流严重,这些原因都导致部分生产井增产效果不明显。

1971年,新疆克拉玛依油田在六区检8井组进行泡沫驱现场实验。起泡剂为烷基苯磺酸钠,气液比为1:1,共注入起泡剂95.4t。注入泡沫体系后,高渗透层的吸水量明显下降,低渗透层的吸水量上升,见效井平均日产油量增加48%,含水下降27.7%,有效期26.6个月,共增产原油9900t,提高采收率6%~8%。

1988年,针对辽河油田稠油油藏实际情况,我国研制了用于蒸汽开采稠油的耐高温起泡剂。自1990年起,先后在吉林扶余油田、辽河油田、胜利油田进行了现场实验,实验效果非常明显。1996年,辽河锦45块 N_2 泡沫辅助热水驱油现场实验表明,泡沫驱油效率不仅高于水驱,也优于三元复合驱,预计最终可以提高采收率25%。

1999年,张彦庆等对泡沫复合驱的注入程序、注入方式及段塞大小等重要因素进行了一系列的研究。通过大量的热处理模拟实验及物理模拟实验证明,气液交替注入时,注入段塞交替的频率越高、交替段塞越小,越有利于驱油效率的提高。

3) 国内外技术发展趋势

通过国内的大量文献调研后发现,泡沫以其特有的性质在提高注气采收率方面具有一定的技术优势。国内的研究人员对空气-泡沫驱进行了大量的室内研究,目前国内对于空气泡沫驱技术的研究主要对泡沫驱的注入方式、注入参数进行研究,另外,空气-泡沫驱的安全性也是一个研究的趋势。任韶然通过研究发现,在中高渗油藏中,空气-泡沫与空气交替驱有较好的封堵能力及调驱效果,能够改善低渗透层的波及效率,并且对中原油田的空气-泡沫驱的注入方式与注入参数进行了优选,日产油增量是以前的1.43倍,产液量下降。孟令君等通过研究发现,低渗油藏中气水交替、空气泡沫驱较水驱有更高的采收率,泡沫注入段塞为0.1PV时,采出程度最高;注入速度适当减小,对采出程度的提高也有帮助。袁义东利用双管模型对泡沫驱进行了研究,发现泡沫能够较好地封堵高渗的岩心,最终的采收率能够达到55.1%。董俊艳等对泡沫/表面活性剂复合体系进行研究,发现能够进一步提高洗油效率,而且能够有效降低注入压力。此外,在注空气的安全性上,研究者着重研究爆炸的氧含量以及对CO的消除。

对于气驱,在气驱过程中加入泡沫可以有效封堵大孔道,扩大气体的波及体积,提高驱油效率。空气驱时,加入泡沫段塞可以有效延长气体突破时间,降低气体到达生产井时

的含氧量，防止发生起火或爆炸事故。国内在泡沫提高注气采收率和泡沫驱方面进行了一些矿场实验，还没有大量应用于提高采收率技术中。现阶段对泡沫驱的研究趋势为对其注采参数的优化，以及对泡沫驱压力上升的对策研究。

第2章 区域地质特征

2.1 区域位置

2.1.1 地理位置

鄂尔多斯盆地甘谷驿油田地处陕西省延安市与延长县交界处的甘谷驿镇(图2-1)。甘谷驿镇周边有延河穿过,延长-延安高速与210国道在此相交,交通较为便利。甘谷驿油田东西长约16km,南北长约12km,地貌上属于黄土高原地貌,地形整体上起伏不定,地面海拔约1000m,气候为大陆季风气候,植被相对发育,年降水量较少,主要集中于夏季,年平均气温在10℃左右,最高气温在35℃左右,昼夜温差相对较大。

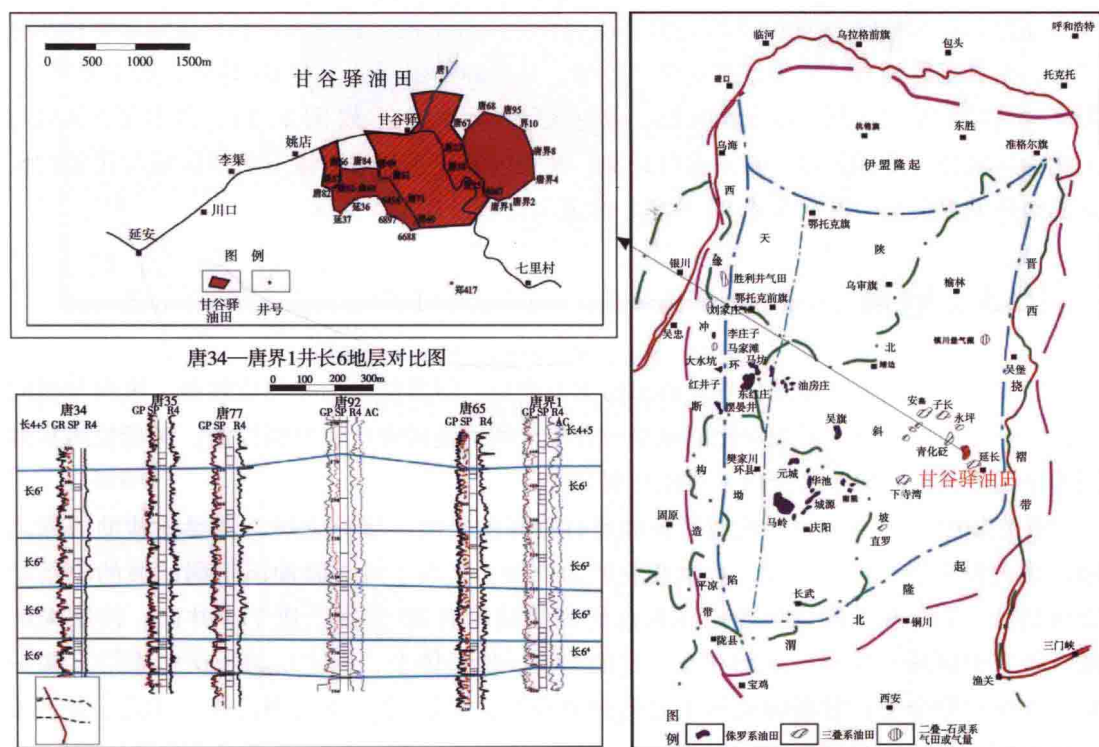


图2-1 鄂尔多斯盆地构造区带划分及油田位置

2.1.2 构造位置

鄂尔多斯盆地是一个形态上总体为一东翼宽缓、西翼陡窄的南北向不对称矩形台坳型盆地,面积 $46.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地内部构造相对简单,地层平缓,仅盆地边缘褶皱断裂比较发育。其东部斜坡带是鄂尔多斯盆地重要的含油气构造带之一,主要形成于白垩纪的早期,斜坡的坡降较小,倾角变化不大,一般在 1° 左右,构造较为稳定,所裸露的地层主要为延安组与延长组地层,受后期地层的抬升影响,白垩纪以上地层并不发育。另外,整体上地层断层不发育,仅发育一些由于地层的高低起伏引起的低幅度的鼻状构造,形态不规则,构造两翼一般对称,闭合面积一般小于 10 km ,闭合高度一般为 $10 \sim 20 \text{ m}$ 。幅度较大、圈闭较好的背斜构造在该斜坡不发育。本书中涉及的研究区——甘谷驿油田则处于鄂尔多斯盆地斜坡带的东部(图2-1),与斜坡带整体的构造区域特征一致。

2.2 石油地质特征

甘谷驿油田于20世纪60年代投入勘探,1960年,在唐家坪钻探了唐1井,并在三叠系延长组长6油层组发现油气显示。自1975年起,开始进行滚动勘探开发至今,共完成钻井5000多口,累计产油超过 $500 \times 10^4 \text{ t}$ 。其油气主要来源于长7段的烃源岩,油气主要分布在延长组长6段、长4+5段、长3段和长2段等层位,其中又以长6段储层物性相对较好,是甘谷驿油田的主力产油层位。目前,甘谷驿油田划分为唐80井区、唐114井区、张家沟区域、岳口区域、沙家沟区域、顾屯区域及元龙寺区域(图2-2),其中顾屯区域与元龙寺区域处于勘探阶段,并未进行开发,其余区域处于开发阶段。岳口区域与张家沟区域的地质储量最高,其次为唐80井区、沙家沟区域及唐114井区。

2.3 地层

三叠系延长组长6段是甘谷驿油田的主力产层,但其储层的非均质性强,纵向与横向变化大。本书按照地层精细对比的原则与方法,利用旋回对比、分级控制,对延长组从油层到单层不同尺度的小层进行了对比与划分。

首先根据测井与岩石学响应特征确定甘谷驿油田的区域标志层,再寻找辅助的标志层,从大段入手,再对小段,以沉积旋回为依据,实现了甘谷驿油田不同区域的小层对比与划分。划分长6段的标志层在重点研究区域的唐80井区、唐114井区、沙家沟区域、张家沟区域、岳口区域均存在一定的差异,但整体上,标志层与长庆标志层大体一致。在小层划分上,甘谷驿油田主要依据斑脱岩标志层(B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5),把长6油层组细分为4个砂层组(表2-1)。