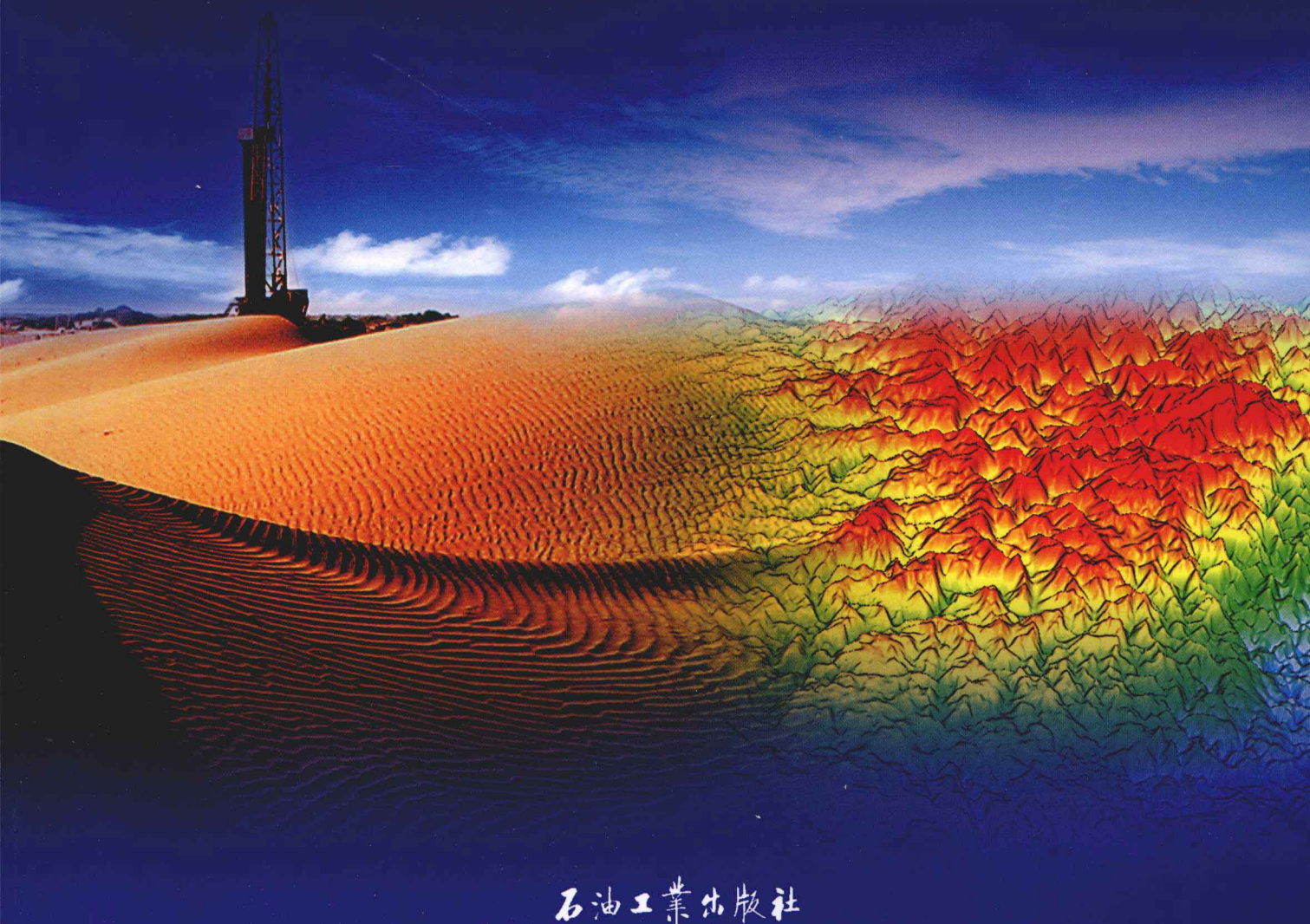


塔河油田碳酸盐岩 缝洞型油藏开发技术

窦之林 等著



石油工业出版社

塔河油田碳酸盐岩 缝洞型油藏开发技术

窦之林 等著

常州大学图书馆
藏书章

石油工业出版社

内 容 提 要

这是一部关于碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术的科学专著。碳酸盐岩缝洞型油藏类型极为特殊,油藏的主要储集空间以构造变形产生的构造裂缝,岩溶作用形成的孔、洞为主,其中大型溶洞是最主要的储集空间,不同尺度的裂缝是连通通道。该类油藏的开发技术既不同于常规孔隙型砂岩油藏,也与碳酸盐岩裂缝型油藏有较大差异。作者在多年的开发实践和研究工作基础上,系统总结了针对本类特殊油藏的开发新技术和方法,阐述了碳酸盐岩缝洞型油藏描述技术、开发方案设计与滚动开发技术、钻井与完井技术、注水开发技术、储层改造技术、采油及地面配套工艺技术、开发管理及过程控制等方面的最新技术成果。特别是以缝洞储集体识别为主的缝洞型油藏描述技术、缝洞型油藏开发储量的计算和滚动开发技术、注水开发技术,为我国碳酸盐岩油田开发技术增加了新的篇章。

本专著对国内外同类型油藏的开发有指导意义,可供从事油藏开发工程的研究技术人员,在校石油地质、油藏工程和采油工程等相关专业的学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术 / 窦之林等著.
北京:石油工业出版社,2012.4
ISBN 978-7-5021-8818-4

I. 塔…

II. 窦…

III. 塔里木盆地—碳酸岩油气田—油田开发—研究

IV. TE344

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 242985 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.cn
编辑部:(010) 64523579
发行部:(010) 64523620

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

2012年4月第1版 2012年4月第1次印刷
889×1194毫米 开本:1/16 印张:24.25
字数:716千字

定价:280.00元
(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)
版权所有,翻印必究

序 一

1984年9月22日,西北石油地质局在新疆塔里木盆地北部沙雅隆起上部署的沙参2井测试获高产工业油气流,实现了中国古生界海相碳酸盐岩领域的重大突破,揭开了塔里木盆地油气勘探开发的序幕。1997年部署的沙46井、沙48井在奥陶系碳酸盐岩试获高产油气流,沙46井初产 $215\text{m}^3/\text{d}$,沙48井初产 $570\text{m}^3/\text{d}$,由此发现了我国第一个古生界海相碳酸盐岩大油田——塔河油田。

通过十多年的高效勘探开发,塔河油田已跻身于中国陆上十大油田之列,截至2011年底,塔河油田已累计提交探明石油地质储量 $11.01\times 10^4\text{t}$,累计产油 $5830\times 10^4\text{t}$,年产原油 $725\times 10^4\text{t}$ 、天然气 $16.8\times 10^8\text{m}^3$ 。“十一五”以来塔河油田原油产量一直保持较快速度增长,已经成为我国石油增储上产的重要战略接替区。

塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型油藏极其特殊,完全不同于陆相砂岩油藏和已发现的国内外海相碳酸盐岩油藏,其储层埋藏深,储集空间多样,其中大型洞穴是最主要的储集空间,裂缝是主要的连通通道,且非均质性极强,现有技术手段不能描述缝洞储集体的展布规律;油藏油水关系与流体流动特征复杂,以“管流”为主的多种流动方式共存,产量递减大,含水上升快,一次采收率较低;碳酸盐岩油藏的储层改造、超深层稠油开采技术面临新的问题。该类油藏的开发在国内乃至世界上都没有可以借鉴的先例和经验。

面对如此复杂的开发对象,西北石油人经过十多年的不懈努力,实现了塔河碳酸盐岩缝洞型油藏的高效开发,创建了“以缝洞单元为基本开发管理单元,以差异化开发为基本思路,以单井注水替油、多井单元注水开发为主要能量补充方式,实行滚动开发、动态调整、逐步完善”的碳酸盐岩缝洞型油藏开发理论和开发技术,从而为我国碳酸盐岩油田开发增加了新的篇章。看到这些成果,我感到可喜可贺,塔河油田碳酸盐岩的开发给我们认识和开发这类特殊的油藏提供了宝贵的经验和技術。

这是一部基于塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发的科学技术专著,是广大塔河石油工作者多年的智慧结晶,本书系统总结了该特殊类型油藏的开发技术,涵盖了碳酸盐岩缝洞型油藏描述、开发方案设计、钻井、完井、注水开发、储层改造、采油及地面工艺配套以及油藏开发管理及过程控制等方面的最新技术成果,系统提出了这类油藏的开发程序和技术手段,为建设塔河大油田提供了技术支撑,也为同类油藏开发提供了理论和技术借鉴。

我国碳酸盐岩油气田的勘探开发领域正处于一个起步发展的阶段,本书的出版必将会推动碳酸盐岩油气田开发领域技术的进步,为该类油藏的高效、科学开发提供技术指导。

在此特向从事于碳酸盐岩勘探开发的地质和工程技术人员推荐本书!

中国科学院院士 李永进

2011年10月

序 二

1978年5月8日国家地质总局决定成立会战性质的新疆石油普查勘探指挥部，先在塔里木盆地西部的喀什凹陷开展石油普查工作，后来辗转进入塔里木盆地北部的沙雅隆起进行普查勘探。1983年3月新疆石油普查勘探指挥部改组为西北石油地质局。1984年9月22日，在塔里木盆地北部沙雅隆起上部署的沙参2井，于奥陶系试获高产工业油气流，实现了中国古生界海相碳酸盐岩领域的首次重大突破，开辟了中国古生代海相油气勘探新纪元。

这支队伍是一支长期从事石油地质普查勘探的功勋队伍，是一支特别能吃苦，特别能战斗的队伍，曾先后参与发现了我国东部陆相盆地的石油普查工作，进入新疆探区后，面对塔里木盆地艰苦的地域环境、复杂的地质条件，他们继承发扬了地矿系统“三光荣精神”，大力弘扬爱国奉献、艰苦奋斗、创新发展的优良传统，终于在塔里木盆地北部的阿克库勒凸起上发现并高效开发了我国第一个古生界海相碳酸盐岩大油田——塔河油田。2011年塔河油田年产原油725万吨，已成为中国陆上十大油田之一、中国石化第二大油田。

塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏具有层位老、超深、超稠、以缝洞为储集体的特殊性，如何开发管理好这类油藏没有现成的技术可以借鉴。面对特殊的开发对象，西北石油人创新形成了“敢为人先、创新不止”的塔河精神，在这种精神的鼓舞下，他们大胆探索、勇于实践，创立了缝洞型油藏开发模式，创新了以超深层缝洞型碳酸盐岩储层预测技术、缝洞储集体空间描述技术、注水替油提高采收率技术、超深复杂地层侧钻井技术、超深高温井酸压储层改造技术和超深井超稠油开采技术等开发关键技术，实现了具有世界级难题的碳酸盐岩缝洞型油藏的高效开发，看到这些重大成果我感到深受鼓舞。

《塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术》是一部系统阐述塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术的专著，是西北石油人多年的智慧结晶，是现场工作的经验总结。他们系统总结了本类特殊油藏的开发新技术和理论，为我国碳酸盐岩油田开发增加了新的篇章。本书内容具有很强的实用性，对同类海相碳酸盐岩的勘探开发具有重要的指导意义。

中国工程院院士 
2011年10月

前 言

塔河油田自 1997 年发现并投入开发以来,西北石油人经过十多年的艰苦创业和开发建设,在我国西部的茫茫戈壁上建成了第一个年产 $725 \times 10^4 \text{t}$ 原油的特大型油气田——塔河油田。

塔河油田是一个超深、超稠、储层结构以缝洞为主的特殊类型油藏,对该类油藏的开发没有现成的开发技术和管理经验可借鉴,堪称世界级难题。广大科技研究人员勇于在开发中探索,在实践中创新,在发展中完善,创建和发展了该类油气藏的相关开发理论、开发技术,其中部分技术填补了我国在碳酸盐岩油藏开发领域的空白。塔河碳酸盐岩缝洞型油藏的高效开发为我国经济又好又快发展、能源安全等方面作出了重大贡献。为了进一步加快我国海相碳酸盐岩油气田开发步伐,不断拓宽广大油气田开发科研工作者的视野,提升开发技术水平,笔者在亲历油田开发建设当中,通过不断的总结提升,凝练思考编写了本书,奉献给广大读者。本书有以下特点:

(1) 具有开创性。系统介绍海相碳酸盐岩缝洞型大油气田的配套开发技术尚属首次。相类似的油藏在世界上有墨西哥坦皮科地区白垩系黄金港油田、阿联酋迪拜的白垩系法塔赫油田、美国西德克萨斯二叠盆地中的耶茨油田等,但它们无论在油藏埋藏深度,还是在储集体发育规模和类型上,都不及塔河油田。原有的油田开发理论、开发技术、油藏工程方法不能被直接应用,也不能较好地解决开发建设和矿场中的实际问题。例如,储集体的识别与预测、油水关系等完全不同于碎屑岩油藏和常规的裂缝型油藏,缝洞型油藏的特殊性决定了开发基本概念、技术方法的不同。本书介绍的是一套全新的开发理念、开发技术,具有填补空白、丰富开发技术领域的开创性价值。

(2) 具有较强的系统性。本书系统介绍了碳酸盐岩缝洞型油藏开发的各个环节,使读者能够很清晰地了解开发的方方面面。这本书不是论文集,不是科研成果的罗列。它是开发理论、方法和技术的有机统一;它是从油藏描述到开发方案设计、钻井与完井、采油工艺、注水开发、开发过程的管理控制的系统阐述;它是如何开发这种特殊油藏的系统读本。

(3) 具有很强的实用性。在探索实践中创新发展起来的开发技术,决定了它具有较强的实用性。本书对这类油藏开发的思想方法和技术方法都有较详细的介绍,阐述的各类开发技术都是在开发实践中攻关研究、创新发展起来的,具有较强的针对性、可操作性。这些开发技术能够较好地解决同类型油藏的系统开发问题,能够提供直接的可借鉴的技术方法,使读者能在较短时间了解和掌握碳酸盐岩缝洞型油藏的开发技术。当然,由于这类油藏的特殊性,有的技术方法还在发展完善中,例如,稠油掺稀降粘替代技术、缝洞油藏储集体三维立体刻画定量描述技术等。

本书各章节的编写分工如下:前言和绪论由窦之林编写,第一章由鲁新便、漆立新、吕艳萍编写,第二章由窦之林编写,第三章由刘学利、李新华、荣元帅编写,第四章由杨兰田、罗发强、周伟

编写，第五章由林涛、张烨、耿宇迪、张泽兰编写，第六章由李子甲、王雷、张志宏编写，第七章由窦之林、龙喜彬、靳佩编写。全书的策划与统稿由窦之林完成。

由于塔河油田缝洞型油藏开发时间比较短，很多的开发技术、开发理念还处在不断的发展完善中，加之作者水平有限，错误之处在所难免，敬请广大读者批评指正！

笔 者

2011 年 10 月 15 日

目 录

绪 论	001
第一章 油藏描述技术	005
第一节 油藏地质特征	006
第二节 流体分布特征	013
第三节 缝洞体的地震反射特征分类与识别	015
第四节 缝洞单元的划分与评价技术	032
第五节 开发储量分类及评价技术	053
第六节 缝洞单元的三维地质建模技术	064
第二章 油藏开发方案设计与滚动开发技术	078
第一节 开发程序及基本原则	079
第二节 油藏前期评价及缝洞带的划分	081
第三节 开发储量计算方法及实例	086
第四节 开发方案设计及实例	090
第三章 注水开发技术	110
第一节 流体流动的特殊性	111
第二节 缝洞型油藏注水开发的可行性	111
第三节 注水替油开发	115
第四节 单元注水开发	135
第五节 注水压锥开发	146
第四章 钻井与完井技术	152
第一节 超深井钻井技术	153
第二节 超深侧钻中短半径水平井钻井技术	183
第三节 超深井固井、完井技术	201

第五章 ◆ 储层改造技术	216
第一节 酸压改造机理	217
第二节 酸压工作液体系	244
第三节 储层改造工艺技术	251
第四节 储层改造动态监测技术	261
第六章 ◆ 采油与地面工程技术	273
第一节 稠油降粘工艺技术	274
第二节 深抽工艺技术	303
第三节 稠油集输与处理技术	314
第四节 腐蚀与防护技术	331
第七章 ◆ 开发特征及过程管理控制	349
第一节 生产特征及开发规律	350
第二节 油井生产控制对策	359
第三节 油藏动态监测	366
第四节 缝洞型油藏管理	368
参考文献	376

绪 论

塔河油田是目前我国在塔里木盆地发现的唯一大型海相碳酸盐岩油田。由于塔河油田的油藏成藏条件复杂,缝洞储集体形态多样、油气分布复杂,油藏类型极其特殊,使得该油藏完全不同于国内外已有的陆相砂岩油藏,也不同于已有的裂缝型或孔隙型的海相碳酸盐岩油藏,具体体现在以下六个方面:

(1) 油藏埋藏深。塔河油田碳酸盐岩油藏埋藏深度一般在 5300~7000m,是世界上目前已开发的较深碳酸盐岩油藏之一。

(2) 油藏储集空间多样。塔河油田碳酸盐岩油藏几乎涵盖了所有的碳酸盐岩储集空间类型,包括大型溶洞、溶蚀孔洞、溶蚀孔隙、构造裂缝等,其中大型溶洞是最主要的储集空间,溶蚀孔隙只在局部地区发育,裂缝是主要的连通通道,不同类型的储集空间以不同的组合方式形成了三类主要储集体——溶洞型储集体、裂缝—溶蚀孔洞型储集体和裂缝型储集体。

(3) 油藏非均质性极强。塔河油田碳酸盐岩油藏具有很强的分隔性,不同储集类型在空间上相互交织组成了连通程度各异的缝洞单元,各缝洞单元具有不同的压力系统和油水界面。

(4) 油藏开发规律复杂。由于缝洞单元的储集体类型不同,储量、能量规模不同,不同缝洞单元的开发规律也不同,既有能量不足、产量快速递减的单元,也有能量充足、产量缓慢递减的单元。

(5) 油藏的流动规律复杂。由于溶洞储集体中可以忽略毛管力的作用,流体在溶洞中的流动具有管流特征,而裂缝中的流体流动符合渗流特征,因此塔河油田缝洞型油藏流体流动具有管流、渗流耦合特征。

(6) 具有高温、高压、超稠、超粘、高含硫的特点。由于塔河油田碳酸盐岩油藏埋藏深、成藏年代早等原因,油藏温度高达 140℃,平均油藏压力在 60MPa 以上,主力区块原油密度在 0.98g/cm³ 以上,局部地区高达 1.04g/cm³,主力区块 50℃ 原油粘度为 1000 mPa·s,局部地区高达 1.3 × 10⁶ mPa·s,同时油藏还具有高含 H₂S 的特点。

总之,塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏的特殊性向油田的高效开发和开采工艺技术提出了巨大挑战。

正是由于缝洞型油藏的上述特点,加之国内外没有可以借鉴的成功经验和开发模式,该类油藏开发研究、开发技术是一个全新的领域,属于“世界级难题”,在开发的过程中存在以下 5 个主要技术难点:

(1) 储集体及储量分布的描述。碳酸盐岩缝洞型油藏是以缝洞为主的储集体,不同于连续分布的碎屑岩砂体:油藏的主要储集空间以构造变形产生的构造裂缝与岩溶作用形成的溶孔、溶洞为主,其中大型溶洞是最主要的储集空间,裂缝是主要的连通通道,油藏储集空间、储集体类型复杂多样。由于储集体的发育和展布主要受控于构造、岩溶作用,并非受控于沉积相,因此难以用常规的砂岩储层研究思路和方法来建立缝洞型油藏的地质模型。此外,由于缝洞型油藏储集体性质和油水关系的复杂性,用容积法计算的探明储量与碎屑岩油藏和碳酸盐岩古潜山油藏提交的储量性质差异较大,对该类探明储量如何进行开发研究、描述和开发的有效动用是一个难题。

(2) 提高采收率的方向及方法。塔河碳酸盐岩缝洞型油藏储层结构独特,空间连通性特殊,又加之以溶洞为主,与国内外碳酸盐岩油藏相比,塔河碳酸盐岩油藏采收率较低,一次采收率只有 10% ~ 13%。该类油藏用什么方法保持能量,注水是否可行,注水驱油机理是什么,整个储层裸眼段能否细分,超深裸眼井筒中能否分段注水,用什么方式注水,注采关系怎样确定等,如何提高采收率技术是一个需要探索实践的重要技术课题。

(3) 超深缝洞型储层的钻完井。塔河油田缝洞型油藏具有超深(5300~7000m)、高温(大于120℃)、高压(大于55MPa)的特点,同时地层结构复杂,二叠系地层易漏,钻井周期较长,膏岩层塑性蠕变快(4.59mm/h),承压堵漏、扩孔作业难度大,作业周期长,优快钻井难度大。侧钻中短半径水平井钻井造斜井段短,造斜率高,轨迹控制难度大;井眼曲率高,摩阻大、易托压、难以有效持续钻进;套管开窗侧钻中短半径水平井井壁稳定难度大。上覆地层压力大,塑性蠕变流动性强,套管受挤压易变形,井身结构优化及完井难度大。

(4) 超深缝洞型储层改造。塔河油田缝洞型油藏超深高温的地质特征决定了酸液体系必须具有高缓速、高缓蚀、高破乳能力、低滤失、低表面张力“三高两低”的特点,以满足不同工艺的需要。随着塔河油田外围地质条件越来越复杂,近7000m的超深井酸压改造,施工存在很高的泵送摩阻,要求酸液不但具有十分优良的降阻性能,还应具有优异的缓蚀性能,为井下管柱和工具提供良好的保护,酸液体系和工艺技术的进一步优化面临难题。

(5) 超稠油采油集输。随着塔河油田缝洞型油藏超稠油区块的开发,西北部区块特高粘度、高含蜡、高含硫的超重质原油开发难度大,以掺稀为主的稠油井筒掺稀降粘工艺不完善,化学降粘难度大,稠油机采工艺不成熟,掺稀油日趋紧张;由于塔河油田部分地区原油的 H_2S 和 CO_2 含量高,对井下及地面系统腐蚀严重,防腐难度大。

“十五”以来,中国石化西北油田分公司以塔河油气田的高效探明与科学开发为目标,针对缝洞型碳酸盐岩油气田开发的关键技术和核心技术,从地下、井筒到地面,从油藏描述到采油工艺,从地面的系统配套到油气藏的管理与开发的过程,进行了长期的攻关和探索实践,取得了一系列的重要技术成果,基本满足了该类油气藏的高效开发的技术需求。这些技术方法可以概括为以下6个方面:

(1) 以地震属性特征为主的缝洞储集体描述技术。

以地震属性特征为主,并综合断裂构造、岩溶地质研究,提出了缝洞单元的基本概念,建立了缝洞储集体反射特征分类评价方法以及缝洞单元的划分技术。缝洞单元是指由一条或若干条裂缝孔隙网络沟通的溶洞组成的流体连通的缝洞储集体,单元的边界划分和井间连通性分析是单元研究的主要内容,连通程度是单元描述的主要参数之一。通过对缝洞单元天然能量、储量规模、内部连通程度等研究,建立了缝洞单元分类评价指标体系。连通程度的评价对于以缝洞单元为基本开发单元的碳酸盐岩油藏的后期开发(如注水)有着重要的意义,动静结合,建立了多井缝洞单元动静综合连通分级标准。以缝洞单元划分及评价为基础,开展储层纵向细分层段、储层综合描述识别,油藏认识不断深化,为缝洞型油藏注水开发提高采收率奠定了基础。

建立了缝洞储集体反射特征分类评价方法:将塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏缝洞储集体的地震反射特征细分为四大类、九亚类、二十个小类;对各个小类的反射特征与钻遇溶洞关系、投产方式、产量大小、未建产原因进行评价研究,分析缝洞发育与地震反射特征的关系,建立典型地震反射特征样本库,形成了以模式识别为核心的地震反射特征自动识别技术,以此为基础结合缝洞型油藏特点建立缝洞型油藏的井位部署优化技术。

在油藏描述的基础上,创立了一套碳酸盐岩缝洞型油藏开发储量的描述评价方法:针对碳酸盐岩缝洞型油藏的特殊性和探明储量开发动用的需求,建立以地震属性特征、测井评价和生产动态为主的储量计算方法,形成适合塔河缝洞型油藏开发储量分类、分级的技术,在开发过程中把探明储量划分为五类:已开发储量、落实待开发储量、待评价Ⅰ类储量、待评价Ⅱ类储量、待核销储量,深化了对缝洞型油藏开发储量的认识,为滚动开发提供了资源基础。

针对缝洞型油藏三维建模的特殊性,以不同储集体类型和储层参数的定量研究为基础,将不同性质的地震属性体作为不同尺度缝、洞空间分布的约束数据体,以缝洞单元作为缝洞油藏建模的基本单元,利用确定性模拟和随机模拟方法相结合的思路,形成了融合不同尺度溶洞、断裂、裂缝模型的缝洞

型油藏的三维建模方法。

(2) 缝洞型油藏滚动开发及方案设计技术。

塔河油田缝洞型油藏的特殊性决定了它的开发过程是一个不断深化认识缝洞发育规律、不断评价落实储量、不断滚动建产的过程，为此建立了缝洞型油藏滚动开发、滚动建产及开发方案设计技术。

缝洞型油藏滚动建产的基本原则是：“滚动部署、分批实施、跟踪研究、及时调整”。一方面，对已发现落实的缝洞单元，或有利缝洞发育带，加快开发节奏，分批部署开发井；对于不落实的缝洞区带，强化油藏前期研究与评价，部署滚动开发井，深化认识，减小开发风险；对投入试采的单元或缝洞区带通过压力恢复试井、干扰试井、试采动态、油藏监测等技术手段，深化对油藏地质特征、地震属性特征、油井的产能、储集体规模和连通性的再认识，以提高开发井的建产率和保证油井高产稳产。另一方面，在滚动开发程序上，通过开发前期油藏评价、油藏开发概念设计、分期次的开发产能建设等阶段按主建产缝洞带、滚动开发缝洞带和评价缝洞带三个层次进行开发方案设计和产能建设。

油藏工程方案设计主要是根据前期油藏评价、油藏描述成果，研究确定不同区带的储集体的发育状况、储量规模、天然能量大小、油井产能高低等特征，建立不同缝洞区带的油藏地质模型。根据各缝洞区带内缝洞体的发育特点、评价井的开发动态以及井网对缝洞体的控制程度，以拟部署井点的构造特征、地震反射类型确定部署井的合理单井能力，并依据以洞布井的原则进行开发井网的设计。按照井数优化和递减优化原则，利用常规油藏工程方法进行井数优化、采速优化，确定合理的开发指标，最后对整体开发方案进行经济评估。在开发方式上，开发初期、中期采用天然能量进行开发，开发中后期对不同类型的缝洞单元采用注水替油或单元注水方式进行能量补充。

(3) 单井缝洞单元注水替油、多井缝洞单元注水开发技术。2005 年以来在缝洞单元的划分和评价的基础上，针对能量不足和储量规模较小的定容单井，采用注水替油的方法，补充地层能量并利用油水重力分异作用恢复了油井生产；针对由于能量不足造成的产量递减快得多井单元，通过注水在补充能量恢复油井产能的同时，垂向上依靠油水重力分异作用将缝洞体底部的原油置换至上部，以达到提高采收率的目的。

通过室内物理模拟实验和数值模拟研究，结合现场注水替油试验分析，碳酸盐岩缝洞型油藏单井注水替油机理为补充能量和油水重力分异，同时依据单井单元注水替油的开发实践，建立了一套注水替油的技术政策，主要包括注水时机、注入量、注入速度、焖井时间、开井工作制度等，筛选出注水替油效果评价指标，主要包括周期存水率、周期吨油耗水比、周期增油量、周期含水、周期时效以及累积存水率、吨油耗水比、最终增油量和提高采收率幅度等。多井缝洞单元注水开发机理为补充能量、横向和纵向驱油以及抑制水锥作用，结合单元现场注水的开发试验，建立了以“低注高采、缝注洞采”为主的缝洞型油藏注水方式，同时优化了不同注水阶段、不同储集体类型的注采参数。

(4) 超深碳酸盐岩油气藏钻井、完井工程技术。

为了加快钻井速度，优选并试验了“螺杆+PDC”、涡轮钻井及水力脉冲空化射流钻井三种优快钻井技术，其中螺杆+PDC 提速较稳定，现场试验提高机械钻速可达 26%，钻井周期由 2007 年的 99.33 天缩短至 90.65 天，周期缩短率 8.7%，同时对穿盐层井井身结构进行了优化，使钻井周期由 285 天缩短为 175 天，缩短率 35.1%，为加速盐区勘探开发进程提供了有力的支撑。

完善与配套超深侧钻短半径水平井钻井技术：优化了超深侧钻短半径水平井轨迹，优化了超深侧钻短半径水平井钻柱组合与井眼轨迹控制技术，完善了超深侧钻短半径水平井钻井液技术与井眼净化技术配套，满足了深层短半径水平井高造斜率的施工要求。实现了水平位移不断延伸，TH12301CH 井在 6339m 的超深井段成功实施侧钻，创造了国内超深小井眼侧钻井的新纪录。配套了碳酸盐岩超深井固井、完井技术：形成了适合于碳酸盐岩超深井固井多套工作液体系，满足不同类型地层固井施工要求；完善了提高顶替效率配套技术。现场应用效果明显，固井优良率达 61.5%，较 2007 年提高

了 27.2 个百分点。

(5) 缝洞型油藏储层酸压改造配套技术。

塔河油田自 1998 年 12 月 20 日 S23 井第一次酸压成功以来,按照“室内研究,现场试验,总结完善,推广应用”的原则,经过“技术引进、工艺配套、不断完善”三个阶段的技术攻关,目前已初步建立了碳酸盐岩缝洞型油藏压前评价预测技术;研发了针对不同地层特点的胶凝酸、乳化酸、变粘酸、冻胶酸和转向酸等五大酸液体系;形成了前置液酸压、多级交替注入酸压、闭合酸压、复合酸压四种成熟的酸压工艺,酸蚀裂缝穿透距离达到 140m 以上;形成了超深井压后快速返排工艺;通过地面微地震裂缝监测、压降测试、井温测试、产液剖面测井、示踪剂等手段建立了压后评价体系,进一步指导施工设计优化;并在碳酸盐岩储层中开展了水力加砂压裂,储层改造技术得到不断提高。储层改造技术已经成为塔河油田勘探开发的核心技术之一,碳酸盐岩缝洞型油藏 70% 的储量通过储层改造得以动用。截至 2010 年底,储层改造施工 1194 井次,累计增产原油 $1775 \times 10^4 \text{t}$ 。

(6) 超深、超稠油采油工艺及地面工程技术。

面对复杂的油藏地质条件和油田开发中存在的问题,通过不断的攻关研究和新工艺、新技术引进及推广应用,在稠油开采、地面集输与防腐技术等方面取得了丰硕的成果。经过近 10 年的发展,形成了以掺稀油降粘工艺为主、化学降粘工艺为辅的稠油降粘工艺技术。掺稀降粘覆盖率达 90% 以上,水溶性降粘实现 $60 \times 10^4 \text{mPa} \cdot \text{s}/50^\circ\text{C}$ 以下稠油井降粘,油溶性降粘节约稀油率达 30% 以上,掺稀降粘累计生产稠油 $944.5 \times 10^4 \text{t}$,化学降粘累计产油 $12.4 \times 10^4 \text{t}$ 。结合油田生产面临的稀油深抽及稠油举升难题,通过自主创新与技术引进,重点开展了稀油深抽工艺、稠油举升工艺、深抽配套工艺及机采软件等技术研究,形成了多项技术成果并快速地转化现场成果,现场实施 201 井次,累增油 $18.9 \times 10^4 \text{t}$,稀油深抽最深泵挂至 5312m,稠油电潜泵举升最深泵挂至 5020m。塔河油田油气集输处理系统逐步完善,目前,塔河油田稠油集输系统主要采用两级或三级布站、掺稀加热混输的集输工艺模式,脱水工艺包括压力沉降法、电—化学两段脱水法和三级热化学沉降法。塔河油田整体腐蚀环境恶劣,具有“三高一低”的特征,即高 H_2S 、高 CO_2 、高矿化度水、低 PH 值的特征。针对这一问题,塔河油田在腐蚀环境评价、腐蚀监测技术以及高效防腐技术等方面都取得了一系列的成果。

第一章

油藏描述技术

塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型油藏主要发育在以泥微晶灰岩、颗粒灰岩为主的中下奥陶统一间房组，呈巨厚块状，基质不具备储渗能力。其储集空间多样，储集类型复杂，非均质性极强，沿着高角度风化裂缝和构造裂缝溶蚀形成的溶洞是主要的储集空间，缝洞储集体分布不连续，尺度变化大，储集体发育分布规律不是受控于沉积相，而是受控于断裂和岩溶作用。储集体内油水关系复杂，不同缝洞单元自成系统。原油物理性质平面上凝析油—轻质油—中质油—重质油均有分布，局部 H_2S 含量高，地层水为高矿化度 CaCl_2 型水，总矿化度达219467mg/L。常规砂岩及碳酸盐岩储层相控描述技术和方法很难适用此类油藏。

针对碳酸盐岩缝洞型油藏的特殊性，通过开发实践和理论分析，构筑了缝洞单元的概念，指出缝洞单元是由一个溶洞或若干个由裂缝网络沟通的溶洞所组成的相互连通的缝洞储集体，周围被基岩或封闭断裂分隔，是一个独立的油藏，也是碳酸盐岩缝洞型油藏的基本开发单元。以缝洞单元为核心，开展了储集体发育分布规律、储集体识别和评价、储集体内部连通性评价以及储集体的定量建模研究，形成了以缝洞储集体反射特征识别评价技术、缝洞单元划分和评价技术、储集体空间描述技术、缝洞单元岩溶相控建模技术为核心的碳酸盐岩缝洞型油藏描述技术，基本满足了塔河油田奥陶系油藏高效开发的需要，为此类油藏的剩余油研究和提高采收率奠定基础。

第一节 油藏地质特征

一、构造特征

1. 构造特征

就整个塔里木盆地而言,加里东中晚期的主应力场方向是近南北向的,形成了整个近东西走向、西端偏南的宽泛的塔北隆起。自早奥陶世末起,在北西—南东偏南的主应力(垂直于阿克库勒凸起轴线,这与整个盆地的应力场略有差异)挤压下,阿克库勒逐步形成北东向南西倾伏的鼻状凸起后,海西早期在北西—南东向的压扭应力作用下,鼻凸进一步发育,并发育了阿克库木、阿克库勒等近东西走向的背冲断裂及与之相配套的北东和北西向剪切断裂,海西晚期运动使该凸起进一步抬升出露水面,断裂进一步活动,同时,海西期的剧烈抬升运动,凸起大部长期暴露并经受了风化剥蚀和淋滤溶蚀作用,形成了大量岩溶缝洞型储集体;印支—燕山运动表现为整体沉降;喜马拉雅期由于库车前陆盆地急剧沉降,凸起由于差异沉降作用,阿克库木断裂以北的沉降量相对较大,使得凸起上下古生界顶面由早期的鼻状凸起转为大型背斜。中—新生代时期,盆地内以沉降活动为主,沉积了巨厚的地层,不同层位地层超覆在奥陶系潜山之上,使潜山得到保存。

阿克库勒凸起为下古生界奥陶系碳酸盐岩大型褶皱—侵蚀型潜山,潜山四周倾伏呈背斜形态,顶部受断层复杂化,据近东西向的断裂组合分布特征,凸起可划分为北部斜坡、阿克库木断垒、中部平台、阿克库勒断垒和南部斜坡等5个区。

塔河油田位于阿克库勒凸起南斜坡区西部,构造变形强烈,加之大气淡水下渗、溶蚀与流动,在下奥陶统顶面(T_4^1) (部分为上奥陶统顶面)形成大量岩溶残丘、岩溶丘丛,构造类型多以岩溶残丘(丛)、断块残丘(丛)为主。

2. 断裂特征

阿克库勒地区经历了多次构造运动,断裂体系较为复杂,断裂不仅控制了研究区的主要局部构造,并且对储集体改造以及油源的沟通起到了十分重要的作用。塔河油气田受加里东中晚期—海西早期、海西晚期构造运动影响,发育不同级别、期次叠加的断裂系统。

加里东期主应力方向为北西西—南东东,由于挤压应力较弱,区内主要发育北东向挤压断裂、北北西(近南北)和近东西向剪切断裂。

海西早期在北西—南东主应力作用下,形成一系列与主应力方向垂直的北东向、北西向压扭性断裂及少数近南北向与近东西向共轭剪切断裂,北东、近东西和南北向断裂具有继承性。

海西晚期主应力由早期的北西—南东转变为南北向,在强大的南北向构造挤压作用下形成近东西向纵断裂、具逆冲性质和压扭(扭动)性质的构造,变形强度及剥蚀程度北强南弱,工区内前期形成的主干断裂再次活动,且发生力学性质的转换,可延伸到上覆下石炭统上部、二叠系地层中,断裂方向也有所调整,走向上可分为东西向、北东向以及近南北向、北西向四组。

1) 平面特征

由于受区域性挤压、压扭和张扭应力的作用及石炭系盐层塑性流动和底辟作用的影响,区内形成了4种不同性质的断裂,断裂在平面上具明显的方向性,清楚地呈现出近东西向的逆断裂、北东向的正断裂、近北北东向的压扭性正断裂以及北北西向的逆断裂,在平面上成排成带分布。根据其性质、类

型、走向可将研究区内断裂分为 4 个带:

(1) 阿克库木、阿克库勒及艾协克近东西向背冲逆断裂发育带。分别控制了阿克库木、阿克库勒及艾协克断块构造的形成,断裂在剖面上多表现为背冲断裂组合,平面上具有斜列特征,表现在断裂带内的不同断裂平面上的斜列展布,同一断裂不同段的斜列展布。断裂延伸长(12 ~ 50km),断距大(50 ~ 100m),切割层位深,是沟通油源岩的主要断裂。该带断裂走向大体可分为近东西、北西、南北三组。

(2) 牧场—桑塔木盐边及塔河南北东向断裂发育带。断裂的形成与盐的逆向流动及底辟作用形成的局部拉张有关,主要形成期是印支期,以正断层为主要发育类型,断开层位石炭系卡拉沙依组—三叠系,垂直断距 20m 左右,断裂走向以北东向为主,单个断层平面延伸有限(2 ~ 8km),但由其组成的北东向雁行斜列相向倾向正断裂系统贯穿全区。这组断裂对盐边背斜及盐丘背斜起明显改造作用。

(3) 达里亚北北东向斜列断裂发育带。位于工区的东南部,总体呈北北东向展布,由多条断层组成,断裂走向多为北东方向的正断层,倾向多为南东倾,是在区域左旋压扭应力作用下产生的张扭应力场造成的。这一断裂均断开泥盆系—三叠系,有的断裂向下延伸至奥陶系,是沟通油源的重要通道,断裂延伸较短,垂直断距大,断层面在空间上多形成铲状,浅层断面陡,向深部断面变缓,平面上呈斜列组合。

(4) 艾丁—塔里木乡 1 号北北西向断裂发育带。位于塔河地区的西部,总体呈北北西向展布,由 2 ~ 3 组断层组成,断裂走向多为北北西向的逆断层,是早期断裂在印支—燕山期北东—南西向应力作用下继承发育形成的。这一断裂均断开奥陶系—三叠系,断裂延伸较短,垂直断距小,断层面陡,可能有水平断距。目前勘探发现该组断裂对奥陶系岩溶缝洞型储层的形成具有改善作用,该组断裂与阿克库勒凸起北东向轴部的交会部位是目前钻井揭示储层较为发育的部位。

2) 纵向特征

研究区断裂发育与构造期次演化密切相关,不同应力性质产生不同的断裂系统。根据其构造运动和沉积特点,以海西早期和海西晚期形成的两个大的不整合面(T_6^0 、 T_5^0)为界,纵向上形成了具不同构造特征的三层结构,自下而上分别为:第 I 结构层(T_6^0 面之下);第 II 结构层(T_5^0 ~ T_6^0 之间);第 III 结构层(T_5^0 面之上)。断裂纵向上在 I、II、III 构造层均有分布,其中 I、II 构造层中的断裂规模大,延伸长,切割层位深,有的断裂断开层位向上可延伸至三叠系,向下断开寒武系,如阿克库木和阿克库勒背冲断裂及艾协克逆断层,这些断层为区内主干断裂,对局部构造的形成起控制作用,第 III 构造层内的断裂有一部分是第 I、II 构造层的断裂向上延伸形成,这一部分断裂也具有延伸长、断距大等特点,此外局部发育的张扭作用和盐拱形成的正断层,单个断层规模小、延伸短、走向以北东向为主,对局部构造起改造作用。

二、岩溶古地貌特征

1. 主体区岩溶古地貌特征

塔河奥陶系蓬莱坝组、鹰山组、一间房组沉积期,阿克库勒地区古地貌为南南东倾的缓坡,在该缓坡背景上叠加了朝北呈分支状分布的古洼陷;恰尔巴克组—良里塔格组沉积期,在 S88 井附近形成一个北东向古突起(短轴背斜),围绕该古突起形成三个古洼陷;桑塔木组沉积期,在保留了奥陶系早中世南南东倾缓坡背景和良里塔格组的 S88 井的古突起面貌的情况下,塔河西北部形成了一个北西向的鼻凸;志留系沉积时基本形成了与现今形态较接近的阿克库勒南西倾古鼻凸面貌。塔河主体区大部分地区下石炭统巴楚组直接覆盖在中奥陶统一间房组和中下奥陶统鹰山组之上,缺失上奥陶统至泥盆系地层,由于强烈剥蚀及构造变形,褶皱变形、断裂、裂缝十分发育。古地貌恢复研究结果,该区古地貌起

伏变化较大,对古岩溶的发育十分有利。

按照海西早期有效岩溶发育区(上奥陶统桑塔木组尖灭线以北地区),在石炭系巴楚组双峰灰岩沉积前,地质构造演化以整体升降为主,几乎没有区域性的构造变形,而双峰灰岩及其下伏的泥岩沉积则是在其前古地貌上的填平补齐。因此,奥陶系顶面至区域性标志层下石炭统双峰灰岩顶的厚度(即巴楚组泥岩段和双峰灰岩的厚度)可以近似地反映海西早期古岩溶地貌的起伏。据此划分出岩溶高地(缺失巴楚组的地区)、岩溶斜坡(巴楚组厚度在100m之内的地区)和岩溶谷地(巴楚组厚度大于100m的地区)3个岩溶地貌单元。

整个塔河油田主体区(包括塔河油田2、3、4、6、7、8区块)海西早期都处于岩溶地貌的斜坡相带,奠定了油田广大区域洞穴层或洞穴型储层发育的前提,本区海西早期岩溶地貌表现了较大的地形起伏,区内地形高差可达400m以上。从总体看,具明显的北高南低的特征,北侧为岩溶高地,南侧及东西两侧均为岩溶谷地,其间为岩溶斜坡。

2. 外围区岩溶古地貌特征

加里东中晚期,阿克库勒凸起刚刚形成,构造变形宽缓,出露部分起伏不大,水动力相对较弱,加之构造裂缝、断裂还不十分发育,因此,岩溶强度不大。岩心观察统计表明,加里东中晚期大气水活动痕迹绝大部分集中在不整合面以下0~30m范围内,个别位于断裂带附近的可达到60~90m左右。加里东中晚期岩溶主要分布于上奥陶统和中下奥陶统的浅部,由于海西早期的强烈剥蚀和岩溶改造,塔河油田奥陶系上奥陶统尖灭线以北加里东中晚期岩溶的赋存地层被基本剥蚀干净或经历了严重甚至是彻底的多期岩溶改造,宏观上已经失去了相应的地质特征,而受上奥陶统泥质层的隔挡,在上奥陶统尖灭线以南地区的地层中,仍保留了相对完整的加里东中晚期岩溶,当然其中也不乏海西早期岩溶的改造。

加里东期岩溶主要形成于一间房组与恰尔巴克组之间第一幕、良里塔格组与桑塔木组之间第二幕以及桑塔木组以后的沉积间断,因此,不整合面控制了大气水岩溶活动,区域上也呈层状分布,由于大气水岩溶发育程度相对较弱,大型洞穴层较为少见。加里东中期运动第一幕,在区域性北西西—南东东向主应力作用下,阿克库勒凸起的轴部奥陶系中下统内幕形成共轭剪切裂缝,形成近南北向的压扭断裂带,以及发育较弱的东西向压扭断裂,该断裂带对控制本区加里东中期岩溶的发育具有重要作用,凸起轴部上的T705、T706、T707、T708、T720、T725等井均有大型溶洞发育(钻具放空或大量漏失),使该区中下奥陶统储层得以改善。同时,沿加里东中期形成的断裂发育有利储层,如S106井在加里东中期断裂附近,该井有严重漏失,并钻获高产油气流;沿TK721、S86、TK720井等加里东中期断裂附近,也是岩溶储层发育地区。T738井一间房组上覆的上奥陶统岩心中有一套灰质角砾岩,在T738—T751井区相干切片上可以清楚地观察到一间房组顶面发育一条近南北向岩溶水系,溶蚀水系与北北西向深部大断裂交汇,并且在交汇处终止,表明地表水沿断裂形成的裂缝下渗,北北西向断裂控制了工区西部沿断裂带发育的岩溶储层。

三、储集体发育特征

塔河奥陶系碳酸盐岩缝洞型油藏极其复杂,油藏具有埋深大(5300m以下)、储集体非均质性强、储集空间复杂多样、油水关系复杂的特点。油藏的主要储集空间以构造变形产生的构造裂缝与岩溶作用形成的孔、洞、缝为主(表1-1-1),储集空间往往由孔、洞、缝穿层组合,具有储层连通网络多变、裂缝切割、展布规律复杂的特点。