



塔里木油田超深油气勘探开发理论与技术丛书

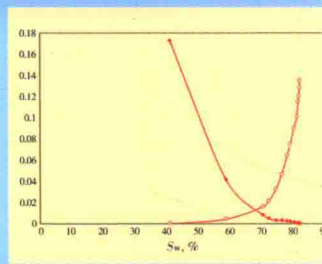
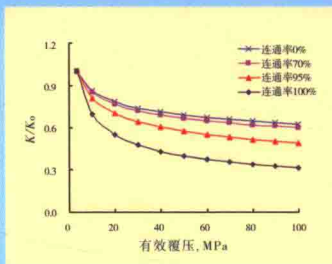
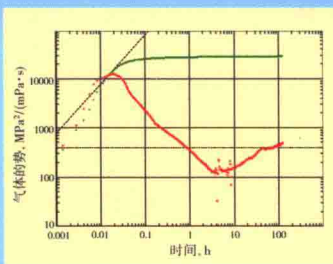
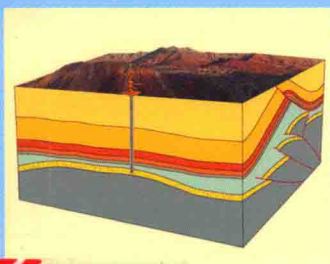
(卷六)

TALIMU YOUTIAN CHAOSHEN YOUQI KANTAN KAIFA LILUN YU JISHU CONGSHU

超深高温高压裂缝性 砂岩气藏开发机理与应用

CHAOSHEN GAOWEN GAOYA LIEFENGXING SHAYANQICANG KAIFA JILI YU YINGYONG

肖香姣 陈文龙 郭 平 等著

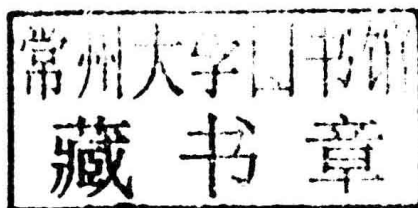


石油工业出版社

塔里木油田超深油气勘探开发理论与技术丛书(卷六)

超深高温高压裂缝性 砂岩气藏开发机理与应用

肖香姣 陈文龙 郭 平 等著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书研究了超深高温高压裂缝性砂岩气藏的开发机理,介绍了塔里木油田该类气藏流体相态及物性参数、储层应力敏感性、流体相渗特征的实验评价方法,给出了与此相关的超深高温高压裂缝性应力敏感气藏开发早期井底压力计算、试井及产能评价的渗流理论推导和实际应用所取得的阶段性成果。

本书可供从事气田开发理论研究和矿场应用的气藏工程师参考阅读,也可供相关技术研究人员及石油院校师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

超深高温高压裂缝性砂岩气藏开发机理与应用/
肖香姣等著. —北京:石油工业出版社,2017. 7
(塔里木油田超深油气勘探开发理论与技术丛书)
ISBN 978-7-5183-1894-0

I. ①超… II. ①肖… III. ①塔里木盆地-裂缝性油
气藏-砂岩油气藏-油田开发-研究 IV. ①TE34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 092314 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号楼 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 7 月第 1 版 2017 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:18

字数:440 千字

定价:168.00 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

《塔里木油田超深油气勘探开发理论与技术丛书》

编 委 会

主 任：王招明

副 主 任：田 军 江同文

编 委：(以姓氏笔画为序)

王振彪 王清华 龙 平 杨向同

杨海军 肖又军 肖承文 汪如军

宋周成 张福祥 胥志雄 梁向豪

廖 涛 滕学清

《超深高温高压裂缝性砂岩气藏开发机理与应用》

编 写 组

组 长：肖香姣

副 组 长：陈文龙 郭 平 朱忠谦 昌伦杰

编 写 人 员：（以姓氏笔画为序）

牛 玉	王小培	王洪峰	王 勇
王海应	王海波	王焰东	王翠丽
冉丽君	白晓佳	成荣红	刘立炜
刘 敏	刘新辉	刘 磊	吕江毅
孙 勇	孙晓辉	孙雄伟	阳建平
李 青	李 明	李重月	宋丙慧
吴永平	杨凤来	邹国庆	杨学君
杨 敏	张永宾	张同辉	张 杰
张建业	张承泽	陈 东	陈丽群
陈宝新	林 娜	金江宁	郑广全
孟学敏	赵力彬	赵伯田	赵英杰
胡素明	徐文圣	黄 兰	程 华
谢 伟	廖发明	魏 聪	

序

位于中国西北部的塔里木盆地是一个超深、复杂的叠合盆地,发育了多套烃源岩及优质储盖组合,具备形成大型油气田得天独厚的石油地质条件,但地下情况复杂,需要勘探开发工作锲而不舍,攻坚克难,不断战胜挫折,不断解放思想,才能逐步取得重大的胜利。因此,塔里木盆地既像一个带刺的玫瑰,又似光辉熠熠的聚宝盆镶嵌在祖国的西部边陲。

在盆地北部库车地区 3500 ~ 4000 米的中浅层,经历多次勘探失败与突破,克拉 2 大气田的发现创造了塔里木油气勘探开发的辉煌,促成了西气东输工程,惠及沿途 10 省(自治区、直辖市)亿万人民,推动了我国 21 世纪天然气工业的快速发展。

塔里木盆地是西气东输的源头,是“新疆大庆”建设的主战场,是稳疆固边的前沿阵地,塔里木盆地的油气勘探开发是我国发展西部战略的主体工程,塔里木盆地的油气勘探开发备受中国乃至世界瞩目。

塔里木盆地的最大特点是油气层埋藏超深,库车、塔北及塔中主力油气层埋深一般大于 6000 米,目前发现的油气藏,最深的气藏是克深 9 气藏,已探明天然气地质储量 548 亿立方米,气藏埋深 7600 米。克深 902 井完钻深度 8038 米,在 7813 ~ 7870 米储层,6 毫米油嘴日产天然气 45 万立方米。最深的油藏是富源 1 井,储层为缝洞型碳酸盐岩,井深 7712 米,日产轻质油 86 吨,天然气 2.89 万立方米。

“十二五”期间,塔里木油田最大进展是超深领域油气勘探开发的进展。这期间塔里木油田坚持库车、塔北、塔中三大阵地战,解放思想,创新思路,集中了全国的深井钻机,2015 年油田超过 7000 米的深井钻机达到 132 台,投入工作量大,大于 6000 米的超深井逐年增多,2014—2015 年大于 6000 米的超深井达到 92% (2014 年、2015 年大于 6000 米的探井分别完钻 53 口、39 口),在超深碎屑岩、碳酸盐岩两大领域实现重大突破:6000 米以深发现探明了比克拉 2 大三倍的克深万亿立方米大气田;发现开发了哈拉哈塘奥陶系碳酸盐岩大油田,已经控制含油面积大于 4000 平方千米;发现了塔中奥陶系碳酸盐岩大型凝析气田(探明天然气地质储量近 4000 亿立方米,凝析油储量 2 亿吨);并在寒武系盐下、东部奥陶系碳酸盐岩实现了战略突破。这些成果的取得,夯实了西气东输的战略资源,为塔里木油田的发展奠定了坚实的基础。

近十年来,通过国家重大科技攻关示范工程的实施,特别是 2010 年中国石油天然气集团公司实施塔里木重大科技专项以来,实现了超深碎屑岩、碳酸盐岩两大领域油气地质理论的创新,形成了超深领域的油气勘探开发技术系列,同时该领域已经成为我国乃至全球油气勘探开发的重要接替领域。在这个承前启后的时间节点上,塔里木油田的科研工作者系统总结了超

深领域的理论与技术成果,形成了这套《塔里木油田超深油气勘探开发理论与技术丛书》,这对进一步指导塔里木油田超深领域的油气勘探开发和前陆盆地、海相克拉通、复合盆地的油气勘探开发都有重要的意义。

作为曾经参与塔里木石油会战的老石油人,我为塔里木油田取得的成绩感到由衷的骄傲和欣慰,也为塔里木油田走向新的成就而深信不疑。

《塔里木油田超深油气勘探开发理论与技术丛书》全面系统总结了近十年来,特别是“十二五”期间取得的勘探开发成果、超深领域石油地质理论技术的创新成果和勘探开发实践认识。丛书共 15 卷,涵盖了库车前陆盆地超深油气地质理论与勘探实践、前陆冲断带超深复杂构造山地地震勘探技术、前陆冲断带超深复杂地层钻井技术、前陆冲断带超深裂缝性砂岩气藏测井评价技术、前陆冲断带超深高温高压砂岩气藏完井与储层改造技术、超深高温高压裂缝性砂岩气藏开发机理与应用、牙哈凝析气田循环注气开发实践及开发规律、超深缝洞型海相碳酸盐岩油气地质理论与勘探实践、超深海相碳酸盐岩地震勘探与缝洞雕刻技术、超深缝洞型碳酸盐岩钻井技术、超深缝洞型碳酸盐岩油气藏测井评价技术、超深缝洞型碳酸盐岩油气藏完井与储层改造技术、超深缝洞型海相碳酸盐岩油气藏开发技术、超深滨海相砂岩油藏开发实践与提高采收率技术、超深复杂油气藏录井技术等。这些成果的取得是 27 年来塔里木石油工作者在荒凉沙漠上辛勤奉献的智慧结晶,是近十年来塔里木油田勘探开发成果的集中体现,是塔里木石油人打造“百年塔里木”和“十三五”时期建设 3000 万吨大油气田目标的技术保障和有效的智力支撑。

读完全书,掩卷沉思。深深地感到这套丛书是科研与生产紧密结合的成果,既是塔里木油田近期勘探开发成果的总结,又是超深碎屑岩、碳酸盐岩两大领域石油地质理论与技术的总结,也是塔里木油田多年来勘探开发实践的总结。书中有克深万亿立方米大气田、哈拉哈塘大油田、塔中大型凝析气田的勘探开发成果;有新理论、新技术、新方法;有战例、有经验、有启示。当前,塔里木盆地的油气勘探开发正如火如荼,超深领域的油气勘探开发理论与技术创新日新月异,我期待塔里木油田在新阶段的勘探开发、理论技术创新中取得更加重要的成果,也希望这套丛书既能够成为从事塔里木盆地勘探开发科研、生产、管理工作者的工具书,也能够作为广大从事油气勘探开发科研、生产、管理人员的参考材料,还能被选为石油、地质大中专院校学生的参考书,为各条战线上的石油人提供有益的信息。

邱中建

2016年12月.

前 言

塔里木盆地库车坳陷天然气资源丰富,是“西气东输”工程的主要气源地,相继发现和开发了克拉2、迪那2、克深2、克深8等气藏,其中迪那2、大北、克深等气藏均属于超深层裂缝性砂岩气藏,已探明天然气地质储量近7000亿立方米、三级地质储量逾万亿立方米,是塔里木油田近年来天然气上产的主战场。该类气藏具有埋藏深(5000~8000米)、构造高陡、地层压力高(88~136兆帕)、压力系数高(1.63~2.22)、地层温度高(120~184摄氏度)、储层基质低孔低渗(孔隙度1.5%~10%、渗透率0.001~1.0毫达西)且非均质性强、断层及裂缝发育、边底水活跃等特点,在我国仍属于探索开发阶段。

由于地质条件的复杂性,常规气藏的开发渗流机理是否适用、开发规律是否相似、已有的经验能否借鉴均不得而知,对气藏工程的理论及方法等均提出了新的难题和挑战。基于此,塔里木油田公司在前人研究基础上,探索开展了大量的室内实验、理论方法研究及矿场实践,在超深层裂缝性砂岩气藏开发机理及渗流理论研究方面取得了阶段性的进展,且应用效果显著,为本书的编撰积累了丰富的经验和素材。本书共分为六章,从模拟地层条件下气藏流体相态特征、储层应力敏感性、流体相渗特征的实验评价着手,论述了高温超高压条件下裂缝性砂岩储层的渗流物理特征,以及该特征下超高压气井开发早期井底压力计算、裂缝性应力敏感砂岩气藏数值试井解释及产能评价等方面的渗流理论推导和现场应用,阐明了超深层裂缝性砂岩气藏开发机理的特殊性及与常规气藏的差异,以期进一步丰富和完善天然气开发理论,为同类型气藏的合理、高效开发提供借鉴和指导。

参加编写和提供具体资料的人员有肖香姣、陈文龙、郭平、昌伦杰、朱忠谦、张建业、杨敏、王海应、刘敏、胡素明、陈丽群、阳建平、孟学敏、陈宝新、郑广全、赵力彬、张承泽、王洪峰、吴永平、孙雄伟、李青、魏聪、王焰东、孙勇、刘磊、王海波、杨学君、张杰、白晓佳、冉丽君、程华、李明、王小培、孙晓辉、成荣红、牛玉、林娜、吕江毅、黄兰、邹国庆、李重月、谢伟、徐文圣、陈东、王勇、赵伯田、宋丙慧、王翠丽、张永宾等。在本书的编著过程中,我国著名的天然气开发专家——西南石油大学李士伦教授对全书进行了仔细的审阅,提出了细致且全面的修改建议,中国石油勘探开发研究院开发所李保柱、夏静,廊坊分院孙贺东、万玉金、钟世敏、朱华银、罗瑞兰,中国石油大学(北京)廖新维、杨胜来、陈光进、孙长宇、董平川,西南石油大学熊钰、孙雷、郭肖、汪周华等给予了大力支持与帮助,在此一并致以最诚挚的谢意。

之所以出版此书,一是希望对多年的研究成果有一个阶段性的总结和集成,让相关的研究人员及读者了解超深层裂缝性砂岩气藏开发这一世界级难题的研究进展;另一方面也希望能抛砖引玉,吸引更多有志于该方面研究的科研人员的参与,为深化该类气藏的研究汇集更多的力量和智慧。

由于笔者水平、经验和掌握资料的局限性,书中不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

目 录

绪 论	(1)
第一章 超深层裂缝性砂岩气藏流体性质研究	(6)
第一节 超深层气藏流体性质研究现状	(6)
第二节 超深层气藏流体取样方法	(14)
第三节 超深层气藏流体相态及高压物性参数实验测试	(17)
第四节 超深层气藏流体状态方程建立	(32)
第五节 超深层气藏流体经验关联式建立	(43)
第二章 超深层裂缝性砂岩储层应力敏感性评价	(49)
第一节 储层应力敏感研究综述	(49)
第二节 常规应力敏感评价实验设备及方法对比	(56)
第三节 超深层气藏岩石应力敏感影响因素研究	(64)
第四节 定容衰竭条件下应力敏感影响实验评价	(78)
第五节 模拟地层条件下超深层气藏应力敏感实验探索	(86)
第三章 超深层裂缝性砂岩气藏相渗实验研究	(98)
第一节 国内外气水相渗规律研究现状	(98)
第二节 常规方法气水相渗曲线实验测试	(111)
第三节 高温高压条件下气水相渗曲线实验测试	(119)
第四章 超深层凝析气井井底压力计算方法	(131)
第一节 国内外井底压力计算研究现状	(131)
第二节 超深层气井井口压力恢复异常机理	(135)
第三节 超深层气井井底压力计算理论基础与方法	(138)
第四节 测试影响因素及测试方法优化分析	(171)
第五节 应用实例	(175)
第五章 应力敏感储层数值试井模型及曲线特征	(182)
第一节 应力敏感储层试井分析研究现状	(182)
第二节 应力敏感均质储层试井模型及求解	(198)
第三节 应力敏感双重介质储层试井模型及求解	(206)
第四节 应力敏感试井曲线及影响因素分析	(209)
第五节 应用实例	(224)

第六章 超深层砂岩气藏产能评价 (228)

第一节 常规产能方程的理论表述 (228)

第二节 应力敏感气藏产能方程建立 (230)

第三节 裂缝性应力敏感砂岩气藏产能方程建立 (236)

第四节 产能评价实例 (264)

参考文献 (272)

绪 论

塔里木盆地是国家“西气东输”工程的重要气源地,油气资源丰富,根据第三次资源评价,盆地天然气资源量 $7.96 \times 10^{12} \text{m}^3$,主要分布在库车坳陷、塔北隆起、中央隆起、北部坳陷和西南坳陷。其中库车坳陷天然气资源量占全盆地资源量的 40% 以上,占全球超深层储量的四分之一以上,承载着落实优质资源、开发整装大气田群的光荣使命。

库车地区自 1998 年 1 月发现克拉 2 深层异常高压气藏以来,随着勘探技术的进步,天然气的勘探开发逐步向深层发展,又相继发现了 20 多个超深层裂缝性砂岩气藏,截至 2015 年底已累计探明天然气地质储量近 $7000 \times 10^8 \text{m}^3$ 、三级地质储量近 $1.4 \times 10^{12} \text{m}^3$,是塔里木油田天然气上产的主战场,预计到 2020 年该类气藏的年产气量将占全油田天然气产量的 60% 以上。

近年来,超深层油气的勘探开发是世界油气领域中重要的战略转移方向之一,因此,塔里木盆地库车地区超深层裂缝性砂岩气藏的开发具有非常重要的战略意义和社会意义,不仅对于我国清洁能源使用、新丝绸之路经济带建设意义重大,而且可提升我国超深层油气勘探开发的国际竞争力。由于该类气藏地质条件的复杂性和特殊性,如何实现规模开发、高效开发,在全球都还处于探索和试验阶段。

一、超深层裂缝性砂岩气藏基本地质特征

1. 构造特征

库车坳陷位于塔里木盆地北部,北与南天山断裂褶皱带以逆冲断层相接,南为塔北隆起,东起阳霞凹陷,西至乌什凹陷,是一个以中、新生代沉积为主的叠加型前陆盆地。它可以进一步划分为三个冲断带和三个凹陷,三个冲断带分别为克拉苏冲断带、依奇克里克冲断带、秋立塔格冲断带;三个凹陷从西向东分别为乌什凹陷、拜城凹陷和阳霞凹陷。

该区已投入开发的迪那气藏、克深气藏、大北气藏等超深层气藏盐下目的层均具有圈闭面积大、幅度高、埋藏深、构造高陡、断裂发育等特点,但由于成因不同,其构造模式有差异。

大北气藏和克深气藏位于克拉苏构造带中东部,根据纵向变形特征的不同可分为盐上层、盐层和盐下层。盐上层主要以大型逆冲断层及其褶皱为主。盐层为古近系库姆格列木组膏盐层,在构造挤压的过程中,由于膏盐层发生塑性流动,形成盐焊接、盐丘等一系列盐构造,盐厚度变化大,一般为 200 ~ 3000m 之间。克深气藏盐下层在古近系库姆格列木组膏盐层和侏罗系克孜勒努尔组煤层段之间形成双重构造,双重构造内的各个断片为形态极为类似的断背斜构造,局部发育突发构造;大北气藏距离南部塔北隆起较近,其前缘变形受到制约,盐层在与塔北隆起之间聚集,盐下层在较早阶段双重构造变形的基础上,各个断片进一步向上逆冲叠置,有向楔形构造发展的趋势。

迪那气藏位于秋里塔格构造带东部,与大北气藏和克深气藏不同的是,迪那气藏古近系库姆格列木组膏盐层不发育,而新近系吉迪克组发育巨厚的膏盐层。吉迪克组膏盐层在迪那区



块形成盐丘,导致浅层形成两翼陡立的背斜构造,在持续挤压过程中,背斜核部进一步发生破裂,形成向上断至地表,向下没入膏盐层的大的逆冲断层。盐下层为基底卷入的断层转折褶皱。

2. 储层特征

塔里木库车地区超深层气藏总体表现为埋藏深,储层厚度大,基质低孔隙度、低渗透—特低渗透,裂缝发育但非均质性强,基质为主要储集空间、而裂缝为重要渗流通道的特征。由于埋藏深度、构造成因等的不同,各气藏的储层特征也有一定的差别。

超深层气藏储层特征统计

气藏名称	气藏埋深 m	储层厚度 m	孔隙度 %	基质渗透率 mD	试井渗透率 mD	地层温度 ℃	地层压力 MPa	压力 系数	气藏类型
迪那气藏	5000	400	6.0~10	0.01~1.0	1.5~85	132.44	106	2.22	异常超高压边底水凝析气藏
大北气藏	5300~6300	240	1.5~7.5	0.01~0.1	1.3~81	120~140	89~96	1.65	异常超高压边底水湿气藏
克深气藏	6500~8000	350	2~6	0.001~0.1	1.2~34	167~184	115~134	1.73	异常超高压边水干气藏

迪那气藏埋深 5000m 左右,含气层系主要为古近系,气柱高度约 400m,储集岩以粉砂岩、细砂岩为主,储集空间以原生粒间孔为主,次为粒间及颗粒溶孔、微裂缝、微孔隙。储层沉积以扇三角洲、湖泊相为主,横向变化稳定,有效孔隙度主要分布在 6.0%~10.0%、渗透率分布在 0.01~1.0mD,且非均质性强。裂缝主要以高角度裂缝为主,裂缝线密度 0.1~1.82 条/m、开度 0.05~0.15mm、孔隙度主要在 0.03% 以下,分布不均匀。气藏内发育三套厚度 10~50m 稳定分布的隔夹层,但由于气藏内部三、四级断裂发育,隔夹层不具备封堵性,储层整体连通性好。

大北气藏和克深气藏等气藏储层埋深更深,分别为 5300~6300m、6500~8000m,含气层系均为白垩系巴什基奇克组,储层岩性以细砂岩、含砾细砂岩为主,沉积相带分布稳定,以辫状河三角洲、扇三角洲沉积为主;储层空间主要为原生粒间孔、溶孔和裂缝;储层基质致密,孔隙度分布在 1.5%~7.5%,渗透率分布在 0.001~0.1mD;储层高角度裂缝发育,多为半充填,但充填规律复杂,裂缝主要发育在高部位和断裂附近,分布非均质性强,岩心观察裂缝发育段线密度达 3~18 条/m,裂缝孔隙度 0.02%~0.05%,为裂缝—孔隙型储层;层间没有明显稳定连续分布的隔层,储层整体连通性较好。相比较而言,克深气藏储层基质更加致密,孔隙半径 5~150μm,多呈扁平状,空间分布不均匀;喉道呈管束状,喉道半径 0.01~0.5μm,孔喉比大于 500,配位数小于 6,孔喉的微观特征及其配置关系更加复杂。

3. 气藏特征

迪那、大北和克深等气藏均为常温异常超高压的边底水气藏。

气藏地层温度 120~184℃,地温梯度 2.19~2.31℃/100m,属常温系统;气藏中深地层压力 89~134MPa,压力系数 1.65~2.22,属异常超高压系统。气藏流体性质有一定差异,既有低凝析油含量的凝析气藏,也有湿气藏和甲烷含量高于 95% 的干气藏。地层水为 CaCl₂ 水型,

总矿化度高,在 $(15.4 \sim 22.7) \times 10^4 \text{ mg/L}$ 之间,氯离子含量 $(9.5 \sim 12.5) \times 10^4 \text{ mg/L}$,水体倍数不大(3~5倍),但由于断层及裂缝发育,水体相对比较活跃。

二、超深层裂缝性砂岩气藏开发面临的难题和挑战

综上所述,迪那、大北、克深等气藏具有埋藏深、构造高陡、储层厚、地层压力高、压力系数高、地层温度高、储层基质低孔隙度低渗透率且非均质性强、断层及裂缝发育、边底水活跃等特点,地质条件复杂,属世界罕见的超深超高压裂缝性低孔砂岩气藏。据不完全统计,目前全球鲜有类似气田成功开发的先例,没有成熟的开发经验可借鉴,其开发研究面临以下世界级难题和挑战。

1. 地震资料品质差,构造落实程度低,储层预测难

库车地区地表为山地环境,沟壑发育,地表相对高差大,岩性横向变化大,条件非常恶劣;气藏埋藏深,地下构造复杂,速度变化剧烈,逆掩推覆发育造成地震资料信噪比低、成像困难,以Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级品质为主,构造解释多解性强,落实程度难度大,基于地震资料的储层分布预测特别是裂缝分布预测的基本条件都难以满足。

2. 超高压条件下裂缝性致密砂岩储层描述难

该类气藏为裂缝—孔隙型储层,储层基质物性表现为低孔—特低孔、特低渗特征,其物性比国外典型致密砂岩储层的物性更差;裂缝为主要的渗流通道,高角度缝发育但分布不均匀;常规的开发实验技术无法满足复杂的孔喉缝特征描述的要求,细小复杂的孔喉微观特征及其配置关系导致气水赋存状态、流体分布特征更加复杂,储层描述难度更大,制约了产能评价及预测等研究。

3. 裂缝描述及分布预测难度大

该地区高角度裂缝发育但分布非均质性强,裂缝孔隙度 $0.02\% \sim 0.05\%$,充填程度较高,开启性差;裂缝与应力夹角关系、孔喉缝配置关系、裂缝发育程度对产能的影响大,准确的裂缝发育预测是高效井部署的关键。目前条件下裂缝的评价和预测是世界级的难题,尤其是油基钻井液体系下裂缝的定性识别和参数定量评价难度更大。

4. 高温超高压条件下动态监测、取样及开发机理实验难度大

(1)由于埋藏超深,地层压力高、温度高,地层流体含有 CO_2 、 Cl^- 等,受现有设备量程及安全操作的限制,超深井井下压力、产气剖面、饱和度等动态资料监测实施难度大,压力、储层动用状况、气水界面等关键资料缺乏,产能及开发动态等评价难度大。

(2)地层压力高、压力系数高,部分气藏为湿气,生产气油比高,取得合格流体样品的难度大,处于高度压缩状态下流体的性质与常压气藏是否相同、常用的气体状态方程是否能正确描述其相态特征还缺乏实验的验证。

(3)由于埋藏超深,气藏上覆地层压力高,地层孔隙压力高、温度高,对开发渗流机理等实验研究设备的要求苛刻,现有的实验设备和方法多不能满足高温超高压条件的需求。

譬如,超深层裂缝性砂岩气藏由于地层压力高,开发过程中弹性驱动能量大,储层所受的有效应力变化会更大,有效应力的变化将导致储层岩石变形,使储层物性变差,与常规气藏相比,表现出较强的应力敏感性,影响气藏的开发效果。模拟地层条件下的储层三轴应力敏感性实验是目前认为获得该类气藏应力敏感性对开发效果影响认识的有效手段,但由于上覆地层

压力高达近 200MPa,对实验设备和试验方案均提出了严峻的挑战。

而该类气藏由于断裂和高角度裂缝发育、复杂的孔喉缝配置关系和流体分布特征,更加大了模拟地层条件下渗流机理实验研究的难度,如何定量描述高温超高压裂缝性致密砂岩储层渗流机理,建立可靠的渗流模型,是目前国内外研究的前沿及难题。

5. 缺乏地质、工程一体化的研究手段

由于缺乏系统的井下动态资料、油基钻井液下裂缝解释以及储层改造后微地震裂缝评价均受到限制,超深层裂缝性致密砂岩储层的改造方式优选和产能预测缺乏可靠的依据,且在真实地层应力条件下裂缝的有效性、应力敏感性、其压降速率等与产能的关系等均认识不清,迫切需要建立地质力学与气藏工程一体化的研究思路和方法,目前地应力在全球石油行业多用于钻井、压裂等工程领域,开发中地应力场建模及其动态变化以及与气藏开发指标的耦合等研究属前沿探索领域。

三、超深层裂缝性砂岩气藏开发机理研究阶段进展及认识

从 2001 年 4 月塔里木油田的第一个超深层裂缝性砂岩气藏——迪那 2 气田发现以来,塔里木油田即陆续启动了相关开发专题的攻关研究,由于地质条件的复杂性,该研究也经历了比较长的过程,先后与中国石油勘探开发研究院、中国石油大学(北京)、西南石油大学等国内有实力的科研院所、石油院校以及 Schlumberger 公司、Corelab 公司等国际知名的石油技术服务公司合作,探索开展了大量的室内实验、理论方法及新技术攻关研究,并进行矿场实践,在超深层裂缝性砂岩气藏开发机理及渗流理论研究方面取得了阶段性的进展。

(1) 利用法国 ST 相态仪进行了高温超高压条件下流体相态特征实验测试。结果表明,常用的流体状态方程及参数计算经验关联式并不适用于超高压气藏,在大量流体性质实验的基础上,拟合建立了适用于超高压气藏的修正气体状态方程,气体偏差系数、黏度、露点压力等参数的计算关联式,提高了参数计算的精度,为相关工程应用提供了依据。

(2) 开展了超深层裂缝性气藏应力敏感实验方法及其对开发影响的实验研究。研究表明,现有的应力敏感实验仪器及方法各有其优缺点;储层应力敏感性受岩石成分、填充物含量、孔隙结构、含水、裂缝发育等多因素的影响;深层异常高压气藏储层在开发初期会经历软塑性变形阶段,表现出较强的应力敏感性;储层的应力敏感性会导致开发效果变差;模拟超高压气藏实际开发过程的“定围压变孔隙压力法”储层应力敏感性探索实验表明,常规的变围压法测得的应力敏感性偏弱。

(3) 研发了全直径超高压渗流测试装置(200℃、200MPa),建立了考虑气水互溶作用的气水相渗测试新方法。结果表明,不论是常规还是高温高压条件下,气驱水测得的相渗曲线与水驱气测试结果均存在较大的差异,不能反映气藏实际开发的过程。地层条件下裂缝性致密砂岩储层束缚水饱和度高,水驱气下的残余气饱和度高,驱替效率低,渗流机理复杂,开发过程中要充分利用弹性膨胀能量并采取温和的开发对策。

(4) 针对超高压气井开发早期井口压力高、井下压力监测安全风险大以及井口压力恢复存在下降的异常现象,开展了产生异常的机理及影响因素等研究,考虑井筒传热、井身结构、大气温度、流体相态和压力耦合等因素,建立了超高压气井从井口到井底的压力和温度耦合计算模型,提高了井底压力计算的精度,解决了超高压气井开发早期压力监测的难题。



(5)引入渗透率模量的概念,建立了考虑储层应力敏感性下的均质地层和双重介质地层的数值试井模型,应用有限元方法求解,得出应力敏感性储层的试井理论曲线特征,从理论上解释了异常高压气藏用常规试井软件解释表皮系数异常偏大的原因。并研发了相应的软件,为准确评价裂缝性应力敏感性气藏的储层参数及相关研究提供了有力的技术手段。

(6)根据气藏的地质特点,在常规砂岩气藏渗流理论及产能评价方法的基础上,通过引入新的拟压力定义、渗透率模量、裂缝的发育程度及非均质性等参数,探索建立了异常高压裂缝性砂岩气藏考虑应力敏感、裂缝等因素下的渗流理论模型及产能方程,为合理评价不同类型气藏的产能和开发井网的设计提供了理论依据。

以上机理研究成果已陆续在塔里木油田的 10 多个超深层气藏的前期评价和方案编制中应用,现场实施效果良好,目前已建成油气当量产量超 $1000 \times 10^4 \text{t}$,经济效益和社会效益都十分显著,具有广阔的应用前景。

由于库车山前超深层裂缝性砂岩气藏地质条件的复杂性,其高效开发研究任重而道远,以上的诸多研究也多处于探索阶段,还需要进一步的深化、完善和长期矿场实践的检验。

第一章 超深层裂缝性砂岩 气藏流体性质研究

天然气藏的流体性质及相态特征对开发方式的确定、气藏工程研究、地面工程计算等方面都至关重要。由于库车地区气藏埋藏深、温度高、地层压力高,其相态行为有无特殊性,常用的相态方程及各种参数的经验关联式等能否适用,尽管国内外学者进行了大量计算模型的评价和对比,但目前尚无实验验证。因此,本节从实验出发,通过多个超高压气体的高压物性实验,描述了高温超高压流体的相态特征,对已有的状态方程及各种参数计算关联式等进行修正和完善,为工程应用等研究提供了依据。

第一节 超深层气藏流体性质研究现状

国内外专家对超深层高温高压天然气相态特征及物性参数求取方面已取得了大量的成果,主要包括气体组成、密度、气体偏差系数、等温压缩系数、黏度、天然气中水含量等。采用的研究方法归类起来主要有实验测定法、图版法和经验关联式法。

一、实验测定法

实验测定法(郭平,2004;郭绪强等,1999;刘建仪等,2002;胡越等,2009;江同文等,2006)是最为可靠的方法(尤其在高压区),但在高温、超高压条件下实验所需的人力和物力成本高,且实验操作安全风险大。目前国内外使用的PVT设备最高的额定工作压力为150MPa、温度为200℃。

二、图版法

目前常用的流体性质图版有Standing-Katz气体偏差系数图版、Carr-Kobayshi-Burrows黏度图版、McKetta-Wehe天然气水含量图版等(李士伦,2008)。这些图版均是基于多个实验结果回归得到的,由于实验条件的限制,仅能用部分区域,人工读值误差较大,且不利于计算机应用。

1. 偏差系数图版

1941年,Standing和Katz用天然气进行恒质膨胀试验,测得不同温度下的 $Z=f(p,T)$ 数据。根据天然气主要由化学特征相似的烷烃组成的特点,应用对比状态原理,得出 Z 因子与拟对比温度和拟对比压力的关系图版,通称两参数的 Z 因子图版,如图1-1所示,对于以烷烃为主要组成的天然气,都可以较准确地用来确定气体的 Z 因子。但是对比状态原理不适宜化学性质相差甚远的混合气,若在气体中有较多非烃气体时,可以用临界参数校正法进行校正。

2. 黏度图版

Carr,Kobayashi和Burrows在1954年提出了估算天然气黏度的图版(王鸣华,1997),黏度是温度、压力和相对密度的函数。这种关系以曲线图形式表示,如图1-2和图1-3所示,是目前确定天然气黏度最广泛使用的方法。

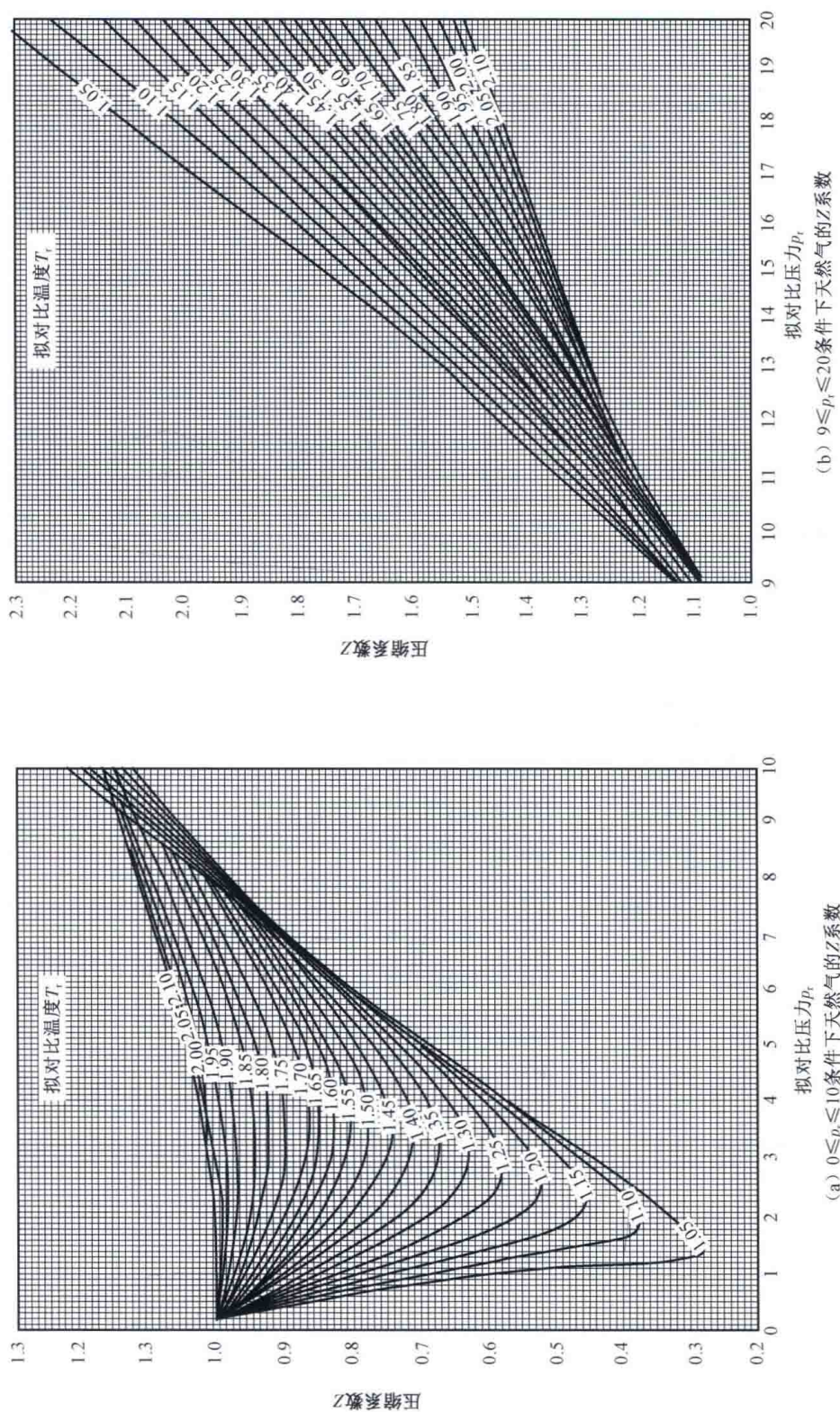


图1-1 压缩系数图版