

天然气开采工程技术丛书

ZHIMI SHAYAN QICANG CHUCENG
GAIZAO JISHU

致密砂岩气藏储层 改造技术



甘振维 王世泽 任山 刘林 主编

中国石化出版社

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

天然气开采工程技术丛书

致密砂岩气藏储层改造技术

甘振维 王世泽 任山 刘林 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书介绍了致密砂岩气藏储层改造现状和发展方向、致密砂岩气藏伤害特征、致密砂岩气藏压裂优化设计、大型压裂工艺、多层分层压裂工艺、水平井和斜井压裂、深层致密气藏储层改造技术、压裂液返排工艺、压裂施工及评估技术,理论与实例结合,实用性强。

本书可供从事天然气钻井、完井、采气、井下作业及相关领域的工程技术人员参考,也可作为石油院校教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

致密砂岩气藏储层改造技术 / 甘振维等主编. —北京:
中国石化出版社, 2012. 6
(天然气开采工程技术丛书)
ISBN 978-7-5114-1518-9

I. ①致… II. ①甘… III. ①致密砂岩-砂岩油气藏-
储集层-油气开采-研究 IV. ①P588.21 ②TE343

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 089637 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: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

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

E-mail: press@sinopec.com

河北天普润印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 16.75 印张 418 千字

2012 年 6 月第 1 版 2012 年 6 月第 1 次印刷

定价: 55.00 元

序

我国是天然气资源丰富的国家之一，据 2004 年完成的第三次资源评价结果，全国拥有天然气资源量 $47.14 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，其中陆上拥有天然气资源量 $36.22 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，勘探开发利用潜力大。

我国是开采和利用天然气最早的国家之一，早在 2000 多年前，我们的祖先就已经开始采气熬盐，当时的钻井采气技术已经达到了相当高的水平。近十多年来我国天然气工业迅猛发展，发现并开发了苏里格、靖边、普光、大牛地、克拉 2、塔中 1、合川、新场、徐深、榆林、迪那 2、广安、子洲、大天池、克拉美丽、乌审旗等一批探明天然气地质储量超 $1000 \times 10^8 \text{m}^3$ 的大气田，到 2009 年累积探明天然气地质储量 $87077.57 \times 10^8 \text{m}^3$ ；生产天然气 $843.95 \times 10^8 \text{m}^3$ ；建成了连接大半个中国天然气消费市场的“西气东输”工程、“川气东送”工程；天然气工业正在成为我国油气工业快速发展的主要增长点和推动力。在长期天然气勘探开发的实践中积累了丰富的经验，形成了适合于我国天然气工业发展特点的理论和技术。

长期从事天然气勘探、开发、集输研究与中国石化西南油气分公司工程技术研究院集多年的研究成果和丰富的经验，厚积薄发推出这套《天然气开采工程技术丛书》，主要针对我国复杂气藏全面系统总结出具有我国天然气开采工程特色理论和技术。《天然气井工程地质》总结了工程地质学与天然气钻井工程密切结合的成功尝试；《天然气深井超深井钻井技术》系统阐述了国内复杂地层深井超深井钻井工程面临“喷、漏、卡、塌、毒、硬、斜、磨”等技术问题的解决方案，对解决我国复杂地层深井超深井钻井井下复杂问题有很好的参考价值；《高温高压气井完井技术》集安全、经济、高效三位一体，全面系统地阐述了高温高压气井完井技术与经验，具有很强的实用价值与指导作用；《致密砂岩气藏储层改造技术》针对致密砂岩气藏储层的特点系统总结了“压得开、进得去、撑得起、出得来、排得尽、稳得住”的储层改造技术，针对性强，特色突出；《致密砂岩气藏采输技术》针对气层压力不高单井产量较低及含酸性气体等特点形成有效的实用技术，能作为我国特殊气藏开发、集输技术的借鉴……。丛书内容丰富，结构合理，较成功地尝试了勘探与开发的结合、工程与地质的结合、地下与地面的结合、技术与经济的结合……。理论与实践结合密切，理论应用准确恰当，事例深刻丰富，具有明显的特色，实用性强，对我国天然气特别是复杂气藏勘探开发有很好的参考价值。适合于高等学校、从事天然气勘探开发的工程技术人员、科技工作者参考应用。丛书的出版发行将有助于提高我国天然气开发理论和技术水平。

油气藏地质及开发工程国家重点实验室主任、中国工程院院士

罗平亚

前 言

致密砂岩气藏一般是指砂岩储集层绝对渗透率低于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、有效渗透率低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、孔隙度小于 10% 的特低品位的一类非常规气藏。

自 20 世纪 70 年代美国发展大型水力压裂技术开发致密砂岩气藏以来，全球已发现或推测发育致密气的盆地达到 70 余个，资源量约 $210 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，2008 年产量达到 $4320 \times 10^8 \text{m}^3$ ，占世界天然气总产量的 1/7，其中美国致密气产量达 $1757 \times 10^8 \text{m}^3$ ，占其天然气总产量的 30.2%，占其非常规天然气总产量的 62.9%。致密砂岩气已成为天然气勘探开发的重要领域。

我国致密砂岩气藏勘探开发领域广阔，四川、鄂尔多斯、松辽、渤海湾、柴达木、塔里木及准噶尔等 10 余个盆地都具有形成致密砂岩气藏的有利条件。据预测，中国致密砂岩气藏远景资源量超过 $12 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，勘探开发前景十分诱人。

我国致密砂岩气藏勘探开发起步晚发展快。自从四川盆地新场气田 1984 年发现并于 1990 年投入试采，2000 年鄂尔多斯盆地苏里格气田、大牛地气田同时被发现和投入开发以来，我国致密砂岩气勘探开发得到了“非常规”的发展，截至 2010 年，我国已累积探明致密砂岩气储量 $2.65 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，2010 年致密砂岩气产量 $190 \times 10^8 \text{m}^3$ ，占全国天然气总产量的 20%。

我国致密砂岩气藏储层改造技术起步低进步大。自从 1995 年四川盆地新场气田浅层蓬莱镇组致密砂岩气藏储层压裂改造技术首获突破以来，中国石化西南油气分公司及西南石油局、华北油气分公司，中国石油长庆油田分公司及川庆石油钻探工程公司就致力于采用水力压裂来提高气井产量，引进了大功率、大流量的泵入设备，研制了低伤害压裂液体系，优选了高密度支撑剂，从浅层、中深层的压裂到深层、超深层的压裂，从直井的压裂到斜井、水平井的压裂，从单层的压裂到多层的压裂，从笼统的压裂到分段的压裂，从单井的压裂到气藏区块整体开发压裂，从水力压裂方案优化设计到实时监测都得到了发展和提高，取得了一系列的重大突破，围绕“压得开、进得去、撑得起、出得来、排得尽、稳得住”的致密砂岩气藏储层改造技术精髓已形成了关键技术体系和配套的技术系列。

但是，我国致密砂岩气藏勘探开发仍然处于初级阶段，整体技术水平和国外先进技术水平相比差距较大，而相关的致密砂岩气藏储层改造的专著较少，本书在这样的一个大背景下，总结国家“十五”、“十一五”期间致密砂岩气藏储层改造攻关成果，从地质特征、伤害特征、储层改造材料、压裂优化设计技术、储层改造工艺技术系列、设备与施工、压后评估等方面系统地阐述了压裂酸化优化设计、实施与评估技术，并推荐了一些典型的应用实例，供从事致密砂岩气藏及非常规气藏储层改造的管理人员和技术人员参考。

本书共分九章，第一章介绍了致密砂岩气藏储层改造现状和发展方向，由甘振维、任山编写；第二章叙述了致密砂岩气藏压裂伤害特征，由孙勇、林永茂、刘斌、付育武编写；第三章介绍了致密砂岩气藏压裂优化设计，由黄禹忠、张国东、邱玲、黄贵存编写；第四章介绍了大型压裂工艺，由杨永华、何红梅、向丽、付育武编写，第五章介绍了多层分层压裂工艺，由黄小军、颜晋川、李永明、尹琅编写；第六章介绍了水平井和斜井压裂，由慈建发、

钟森、宋燕高、杨逸编写，第七章介绍了深层致密气藏储层改造技术，由王兴文、卫玮、刁素、王智君编写，第八章介绍了压裂液返排工艺，由刘林、兰芳、马飞、张家由编写，第九章介绍了压裂施工及评估技术，由林立世、丁咚、滕小兰、方行、屈静编写。全书最终由任山、刘林、统稿，甘振维、王世泽审定完成。

本书编著过程中，得到了中国石化油田勘探开发事业部、西南油气分公司及西南石油局、华北油气分公司及华北石油局、胜利油田分公司及胜利石油管理局、中国石油西南油气田分公司、西南石油大学的领导、专家、教授大力支持和帮助，在此一并感谢。由于致密砂岩气藏本身的复杂性以及应用技术手段的局限性，其储层改造工艺技术还有不少难题有待进一步探索研究，希望通过本书与相关同行进行交流，以进一步发展和完善致密砂岩气藏储层改造工艺技术。由于作者水平、经验和掌握资料有限，书中不足之处敬请广大读者批评指正。

郭新江

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 致密砂岩气藏基本特征	(1)
一、致密砂岩气藏的定义	(1)
二、致密砂岩气藏主要特征	(2)
三、致密砂岩气藏勘探开发现状	(4)
第二节 致密砂岩气藏储层改造技术现状	(5)
一、致密砂岩气藏储层改造技术发展历程	(5)
二、致密砂岩储层改造优化设计	(6)
三、压裂液与支撑剂	(7)
四、致密砂岩气藏储层改造工艺技术	(9)
五、压裂设备	(12)
六、压裂裂缝诊断	(12)
第三节 典型气藏开发实例	(13)
一、新场气田	(13)
二、大牛地气田	(14)
第四节 致密砂岩气藏储层改造发展方向	(15)
一、低伤害压裂液技术	(15)
二、水平井压裂技术	(15)
三、长缝压裂技术	(15)
四、深层致密气改造技术	(16)
五、裂缝监测技术	(16)
六、缝网压裂技术	(16)
第二章 致密砂岩气藏压裂伤害	(17)
第一节 压裂伤害描述	(17)
一、砂岩储层伤害特点	(17)
二、储层压裂伤害类型	(19)
第二节 压裂伤害评价方法	(27)
一、储层矿物学特征评价技术	(27)
二、储层敏感性测试	(34)
三、储层改造工作液伤害评价方法	(37)
四、水锁伤害评价	(39)
五、裂缝导流能力评价	(40)
六、孔隙结构评价技术	(44)

第三节 储层伤害评价实例	(48)
一、孔隙结构及岩矿分析	(48)
二、水锁伤害实验分析	(50)
三、压裂液伤害实验分析	(54)
四、导流能力实验分析	(55)
第三章 压裂优化设计	(57)
第一节 压裂设计原理及方法	(57)
一、低伤害压裂理论及关键技术	(57)
二、压裂设计方法	(58)
三、压裂材料的选择	(59)
四、水力裂缝模拟	(60)
五、压裂方案的优化	(66)
第二节 压裂液及优选	(68)
一、压裂液概述	(68)
二、压裂液添加剂	(73)
三、压裂液体系及适用条件	(80)
四、压裂液优化技术	(85)
第三节 支撑剂及优选	(90)
一、支撑剂类型	(90)
二、支撑剂物理性能	(92)
三、支撑剂导流能力	(94)
四、支撑剂优选	(96)
第四节 压裂施工设计	(98)
一、测试压裂技术	(98)
二、压裂施工设计	(100)
第四章 大型压裂工艺	(105)
第一节 大型压裂概况	(105)
第二节 大型压裂基本条件	(106)
第三节 大型压裂技术要求	(107)
一、压裂液的耐温耐剪切要求	(107)
二、压裂液快速破胶返排要求	(108)
三、施工组织与质量控制要求	(110)
第四节 现场实例	(111)
第五章 多层分层压裂工艺	(113)
第一节 多层分层压裂的必要性	(113)
第二节 限流分层压裂	(114)
一、限流分层压裂原理	(114)
二、优化布孔原则与方法	(114)

三、压裂设计步骤	(116)
第三节 投球分层压裂	(117)
一、投球压裂原理	(117)
二、投球压裂选层原则	(117)
三、投球压裂技术关键	(117)
四、投球压裂排量控制	(118)
第四节 机械分隔分层压裂	(121)
一、机械分隔分层压裂背景	(121)
二、封隔器优选及其配套工具	(121)
三、封隔器两层分压工艺	(123)
四、封隔器三层及以上分压工艺	(124)
第五节 组合法分层压裂	(130)
一、“封隔器+投球”多层分压	(130)
二、“多层段组合式”多层分压	(131)
第六节 连续油管多层压裂	(131)
一、连续油管多层压裂主要井下工具及压裂原理	(131)
二、连续油管多层压裂优缺点	(132)
三、连续油管多层压裂概况	(133)
第七节 多层分层压裂经济性	(133)
第八节 现场实例	(134)
第六章 水平井和斜井压裂	(136)
第一节 水平井压裂技术	(136)
一、水平井压裂的必要性	(136)
二、水平井压裂裂缝优化	(137)
三、水平井分段压裂工艺	(140)
四、水平井压裂工艺配套技术	(145)
五、典型实例井分析	(147)
第二节 斜井压裂工艺技术	(149)
一、斜井压裂改造难点	(149)
二、斜井压裂裂缝起裂机理分析	(149)
三、改善斜井压裂效果技术对策与措施	(159)
四、典型井实例分析	(162)
第七章 深层致密气藏储层改造技术	(163)
第一节 深层致密砂岩气藏储层改造对策	(163)
一、深层致密砂岩气藏储层改造难点	(163)
二、深层致密砂岩气藏储层改造主要措施	(165)
第二节 降低破裂压力工艺技术	(166)
一、高破裂压力成因	(166)

二、降低破裂压力措施	(170)
三、典型实例井分析	(175)
第三节 裂缝性气藏解堵酸化工艺技术	(178)
一、裂缝性气藏解堵酸化作用原理	(178)
二、裂缝性气藏解堵酸化工艺技术	(179)
三、实例井分析	(180)
第四节 裂缝型储层加砂压裂技术	(182)
一、裂缝性气藏加砂压裂难点	(182)
二、裂缝性气藏裂缝诊断技术	(183)
三、裂缝性气藏加砂压裂关键技术	(184)
四、实例井分析	(186)
第八章 压裂液返排工艺技术	(190)
第一节 压后返排控制技术	(190)
一、压裂液动态滤失	(190)
二、支撑剂临界回流流速数学建模	(191)
三、裂缝强制闭合模型及参数求解	(192)
四、气井压裂裂缝地带渗流模型	(195)
五、裂缝及储层建模研究	(206)
六、气井压后返排制度	(211)
第二节 纤维压裂工艺	(212)
一、纤维压裂机理	(212)
二、纤维性能评价	(214)
三、纤维压裂工艺	(216)
四、现场实例	(216)
第三节 泡沫压裂工艺	(218)
一、泡沫压裂液基本类型	(218)
二、泡沫压裂工艺	(222)
三、自生热类泡沫增能压裂	(223)
四、现场实例	(225)
第九章 压裂施工及压后评估	(229)
第一节 压裂设备	(229)
一、压裂井口装置	(229)
二、压裂车组	(230)
三、现场配液设备	(235)
第二节 压裂施工	(235)
一、现场压裂液和支撑剂的质量控制	(236)
二、施工过程的质量控制要点	(237)
三、施工后期管理质量要点	(238)

四、施工资料录取要求 (238)

五、压裂施工工程质量评价 (238)

第三节 裂缝诊断评估技术 (239)

一、裂缝诊断技术分类 (239)

二、诊断技术适用条件 (240)

第四节 压后压力递减分析裂缝评估方法 (241)

一、压裂后压降曲线解释技术 (241)

二、水力压裂施工净压力拟合技术 (245)

三、近井摩阻分析 (247)

四、实例分析 (249)

参考文献 (252)

第一章 概 论

第一节 致密砂岩气藏基本特征

砂岩气藏分常规砂岩气藏和致密砂岩气藏。将致密砂岩气从常规砂岩气中划分出来,是出于技术和经济的目的。国外划分致密砂岩气主要是为了享受税收优惠政策。国内划分致密砂岩气,主要是出于技术和开发政策的需要。事实上,世界上并无统一的致密气标准和界限,不同国家根据不同时期的资源状况、技术经济条件、税收政策来制定其标准和界限,且在同一国家、同一地区,随着价格、认识程度和技术水平的变化,致密气的概念和下限也在不断地更新。但总体来说,致密砂岩气呈现出了相似的基本特征,并和储层改造技术紧密联系在一起。

一、致密砂岩气藏的定义

目前,致密砂岩气藏是指砂岩储集层绝对渗透率低于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、有效渗透率低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、孔隙度小于 10% 的特低品位的非常规气藏。低渗砂岩气藏是指砂岩储集层绝对渗透率在 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、有效渗透率在 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、孔隙度在 10% ~ 15% 的低品位常规气藏。致密砂岩气藏和低渗砂岩气藏统称为低渗致密砂岩气藏。

早在 1980 年,美国联邦能源管理委员会(PERI)根据《美国国会 1978 年天然气政策法(NG—PA)》的有关规定,率先提出确定致密气藏的注册标准是其原始渗透率低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。1987 年,美国能源部对致密砂岩气层进行进一步的分类,根据原始渗透率划分为:

- (1) $(0.1 \sim 0.05) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为致密砂岩气层;
- (2) $(0.05 \sim 0.001) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为很致密砂岩气层;
- (3) $(0.001 \sim 0.0001) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为极致密砂岩气层;

还制定了致密砂岩气层的开采标准(部分):

- (1) 含气砂岩至少有 30.48m(100ft), 含水饱和度必须低于 65%, 孔隙度为 5% ~ 15%;
- (2) 目的层埋深 1500 ~ 4500m(5000 ~ 15000ft);
- (3) 产层总厚度中至少有 15% 的有效厚度;
- (4) 可供勘探的面积至少有 31km^2 (12mile^2);
- (5) 产气砂岩不与高渗透水层交互。

事实上,致密砂岩气藏类型众多,特征复杂,其埋深可以从 500 m 到 5000 m 以上,储层厚度、物性、电性、沉积特征、构造特征、储量都变化很大,而勘探开发致密砂岩气藏在很大程度上决定于工程工艺技术与天然气价格。因此单一渗透率值来定义致密砂岩气藏的意义不大。在埋藏较深、储层厚度大、压力高的气藏中,只有当地层渗透率在微达西数量级(即 0.001mD),才能获得有经济价值的产量。埋藏浅、储层厚度小、压力低的气藏中,即使采用压裂措施,渗透率也要求达到几毫达西以上才能获得有经济价值的产量。随着技术和认识的进步,甚至经济环境的变化也会使致密砂岩气的概念不断更新。

因此 SPE 完井专家 Stephen A. Holditch 定义致密气藏为“只有经过水力压裂，或利用水平井或多分支井才能以具有经济价值的产量生产并采出大量天然气的气藏。”

二、致密砂岩气藏主要特征

致密砂岩气藏可以是深层或浅层、高压或低压、高温或低温，可以是毯状的或透镜状的，可以是孔隙型或裂缝型的，也可以含有一个储层或多个储层。致密砂岩气地质特征复杂多样，其共有的特征是单井无自然产能或低于工业气流下限，通常需要通过加砂压裂、水平井或分支井等技术措施才能获得商业可开发的天然气产量。

1. 致密砂岩气藏基本地质特征

致密砂岩气藏储层特征是常规砂岩气藏之间呈现一个渐变变差的过程，相对常规砂岩气藏，致密砂岩气藏各项储层特征均有不同程度下降，并没有统一的标准来衡量致密砂岩气的品质和好坏，对致密砂岩气的评价和分类，必须根据气藏的实际情况进行。表 1-1-1 是常规与低渗致密天然气储层的特点比较。

表 1-1-1 常规与致密天然气储层特点比较

项 目	常规砂岩气藏	毯状或透镜状致密砂岩气藏	毯状砂、粉砂岩、粉砂质页岩致密气藏
孔隙度/%	14 ~ 25	3 ~ 12	10 ~ 30(粉砂岩单层)
孔隙类型	原生(粒间)，有些次生	常见次生，有些粒间	主要为原生，有些次生
孔隙连通性	好 ~ 极好 短孔喉	差，较长，带状毛管系统	好，短孔喉，孔隙小，含水饱和度较高，妨碍气流体
相对黏土含量 (孔隙中)	低	高 ~ 中	低 ~ 高
地球物理 测井解释	黏土含量低的气藏 比较可靠	不准确，真实孔隙度 难以确定	由于孔隙薄层极薄，含水饱和度较高，一般不可靠
含水饱和度	30 ~ 50	45 ~ 70 ⁺	大约 40 ~ 90
地层条件下气相渗透率/ μm^2	$1.0 \sim 500 \times 10^{-3}$	$0.0005 \sim 0.1 \times 10^{-3}$	$< 0.1 \times 10^{-3}$
毛管压力	低	较高	中等
储层岩石组分	丰富的石英，少量 长石及岩石碎屑	石英(60% ~ 90%)常见岩石 碎屑、碎屑长石及云母， 可能有碳酸盐胶结物	石英、长石、岩石碎屑及 黏土，可能有一些碳酸 盐胶结物
颗粒密度/(g/cm^3)	2.65	2.65 ~ 2.74， 平均 2.68 ~ 2.71	未知，粉砂岩可能为 2.65 ~ 2.70
储集层压力	一般为正常压力到 低于正常压力	可能低于正常压力 或超高压	低于正常压力
地质储量的采收率/%	75 ~ 85	估计 25 ~ 50	未知，可能较低

致密砂岩气藏孔隙度及渗透率低，孔隙度一般在 3% ~ 12%，就地或有效渗透率通常低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。致密砂岩气地层条件下渗透率一般比地面条件下小一个数量级，而试井有效渗透率也比测井渗透率低一个数量级。比如，四川新场气田上沙溪庙组气藏平均测井渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右，而试井有效渗透率在 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右，如此低的孔渗性导

致密砂岩气藏获得经济开发难度较大。

致密砂岩气孔喉结构差，孔喉、孔道狭小，孔隙与喉道的配置差， $<0.1\mu\text{m}$ 喉道控制孔隙比例超过 50%。如，四川新场气田上沙溪庙组气藏储层据铸体薄片和扫描电镜、激光共焦扫描等分析，多为细喉道、微喉道组合类型，孔喉直径比很大，孔喉配位数多为 2~3，孔隙结构较差。根据压汞资料，孔隙喉道分布属于微喉道，分选不好，略粗歪度，毛管力强。

一般而言，致密砂岩储层中黏土矿物含量较高，通常含有伊利石、高岭石、伊-蒙混层和绿泥石以及绿-蒙混层。这些黏土矿物的存在阻碍了喉道的连通，既影响孔隙度，也影响砂岩的渗透性，尤其是对砂岩的渗透性有较大的破坏作用。

非均质性是致密砂岩储层最常见的地质特征。它源于复杂的沉积环境、成岩作用及后来的构造作用，使储集层岩相岩性极不稳定，厚度变化大，常出现地层尖灭，或呈透镜状、席状分布。由于产层在横向上连续性很差，以致在井与井之间无法对比。

大部分致密砂岩储层含气丰度低，含水饱和度一般高达 40% 以上。由于储层岩石气、水及少量的油赖以流动的孔道狭窄，液、固界面及液、气界面的相互作用力增加，使液相滞留效应和应力敏感性明显增强，并导致油、气、水渗流规律发生变化，造成气体低速渗流具有一定的特殊性，表现在气体的渗流存在严重的“滑脱效应”和“启动压力梯度”。其渗流特征曲线分为两部分，在低压力梯度范围内渗流量与压力梯度呈非线性，在高压压力梯度范围呈拟线性。拟线性段的反向延长线不通过坐标原点，而与压力梯度轴有交点，称为拟启动压力梯度。由非线性段过渡到拟线性段的点称为临界点，该点界定了两种不同的流态，两种流态反映了两种不同的渗流规律。

对于低渗致密气藏，一方面，由于其孔喉、孔道狭小，外来工作液中的固相颗粒难以侵入储层，但液相可侵入储层，且会产生水锁效应，使得侵入的外来流体难以完全排出，近井地带储层的含水饱和度增加，气相渗透率降低，致使气井产能下降；另一方面，当地层的降压梯度超过地层原始平衡水恢复流动所需的启动压差时，会使近井地层一部分平衡共存水以分相渗流和蒸发态方式流入井筒形成井底积液，而井底积液在井筒回压、储层岩石润湿性和毛管压力作用下，会向生产层组中、低渗层的微毛管孔道反向渗吸，形成反向渗吸水锁伤害，渗透率越低，这一现象越严重。

致密砂岩气藏岩石的渗透率对周围压力变化很敏感，压力的变化可以引起气液渗流孔道的收缩，造成气藏渗透率降低。因此气层通常具有较强的压力敏感性。

2. 致密砂岩气藏的主要开采特征

致密砂岩气藏有以下不同于常规气藏的开采特征。

(1) 增产改造是发现气藏并形成工业性气流的最重要手段。

低渗致密气藏由于储集岩的岩相岩性变化大，产层厚度极不稳定，很难找准产层部位，即使钻井通过产层，也因产层渗透率太低而往往错过。如美国的 Carthage 气田，1937 年已钻穿棉花谷致密砂岩层，仅有微气显示。1955 年首次对该层进行酸化压裂，气产量达 $3.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。1976 年以后，采用了大型水力加砂压裂，打开了局面，使该气田成为美国最大的气田之一。又如 Hugoton 气田，1987 年已累计采气 $5097 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，目前开采低渗透带，采用钻加密井和大型水力压裂技术，预计尚可采出 $8495 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

而致密砂岩气的开采和水力压裂技术密不可分，尤其是大型压裂、多层压裂和水平井分段压裂。最新的进展是依靠水平井分段压裂技术，大幅度提高了致密气藏的单井产能。一般

而言,压裂可以使得致密砂岩最终采收率提高到40%~75%。

(2) 具备滚动勘探开发特征,气藏稳产通过大规模钻井、井间、区块间接替方式保持相对稳产。

致密砂岩气初期大多数是“有气无田”,往往由探井发现气的显示,经大型压裂产出工业性气流后就转入开采。然后在此井的生产周期内布加密井,随着资料的积累,加深对储层的认识,逐步向外扩大含气面积和增加储量,形成不同的井组、区块,最后才形成气田,气藏稳产通过大规模钻井、井间、区块间接替方式保持相对稳产。美国 Wattenberg 气田于 1970 年投入开发,至今仍在继续勘探。四川新场气田于 1990 年投入开发,至今仍然保持稳产。

(3) 自然能量补给缓慢,气井初期产量递减快。

由于孔隙度和渗透率太低,致密气藏的单井产量也很低。经水力压裂增产后,产气量在初期递减很快,在后期可以在较低产量上保持长期生产。

(4) 基质孔隙与裂缝之间流体窜流。

裂缝—孔隙型储层中,基质孔隙与裂缝之间的流体窜流是渗流过程的主要特征。

(5) 气价是控制天然气开发速度的决定因素。

致密砂岩气田,由于勘探开发费用远远高于常规气田,因此,除了勘探开发技术进步外,天然气价格是控制气田开发速度的决定性因素。

三、致密砂岩气藏勘探开发现状

1. 世界致密砂岩气藏勘探开发情况

自 20 世纪 70 年代以来,全球已发现或推测发育致密气的盆地达到 70 余个,资源量约 $210 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 2008 年产量达到 $4320 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占世界天然气总产量的 1/7, 致密砂层气藏已成为天然气勘探开发的重要领域。

以美国为例,在 20 个世纪 80 年底,在联邦课税扣除加上由私人组织、公共公司和政府机构资助的不同类型的开发项目的支持下,北美的非常规天然气勘探和开发得到了巨大的发展。美国共发现含气盆地 113 个,其中具有致密砂岩气藏的盆地 23 个,主要分布在西部,特别是落基山地区。自 1990 年以来,美国致密气产量快速增长,2008 年产量达 $1757 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占美国天然气总产量的 30.2%, 在非常规气中占 62.9%。

据 EIA 2008 年评价结果,美国致密砂岩气资源量 $19.8 \times 10^{12} \sim 42.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 为常规气资源量的 29.8%~63.9%, 勘探开发前景十分诱人。

2. 国内致密砂岩气藏勘探开发情况

致密砂岩气藏在我国的勘探领域广阔,四川、鄂尔多斯、松辽、渤海湾、柴达木、塔里木及准格尔等 10 余个盆地都具有形成致密砂岩气藏的有利条件。据预测,中国致密砂岩气藏远景资源量超过 $12 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

自从 1990 年发现并开发了四川盆地新场气田,2000 年鄂尔多斯盆地苏里格气田、大牛地气田同时被发现和投入开发以来,我国致密砂岩气勘探开发飞速发展,截至 2010 年,我国已累积探明致密砂岩气储量 $2.65 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 2010 年致密砂岩气年产量 $190 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

我国高、中品味储层天然气储量有限,页岩气、煤层气等非常规气处于勘探开发初期或探索阶段,而致密砂岩气储量落实,已进入规模化、商业化、产业化开发利用,在未来的 10 年依然是天然气勘探开发主体,因此,加大致密砂岩气藏的勘探开发力度对于保障我国的能源安全具有十分重大的意义。毫无疑问,随着以提高单井产量和效益为核心的致密砂岩储层改造技术的不断进步,致密砂岩气藏必将成为未来天然气产量的主要来源之一。

第二节 致密砂岩气藏储层改造技术现状

致密砂岩气藏必须经过储层改造才能获得商业气流和商业开采量,越来越多实例证实,即使是水平井也要经过多段改造才能获得好的经济收益。气井获得增产的原理主要体现为:扩大泄气面积,沟通天然气储集区;改善近井地带的天然气渗流条件,将原来的径向流改变为线性流和拟径向流;解除近井地带污染和水锁效应;单井多层压裂或水平井分段压裂提高了单井改造效率。

一、致密砂岩气藏储层改造技术发展历程

1947年,水力压裂技术在美国堪萨斯州试验成功,在以后的半个多世纪内,持续推动全球油气产量的上升。水力压裂的成功很大程度上归因于技术革新,技术革新使能源工业充满竞争力,大大增加了产量,降低了成本。致密气藏经济开发,主要体现在压裂液体系、裂缝扩展理论、支撑剂制造、地面井下工具制造、压裂优化设计软件、大型压裂技术、直井分层压裂、水平井分段压裂技术等。目前,水力压裂已经成为致密砂岩气藏的一种常规投产技术,成为致密砂岩气藏勘探开发最具决定性的力量,带动了石油工业的又一次新的革命。在非常规领域,水力压裂已经超过钻井,成为建井最大的投资。

早期压裂基本是小型的,主要目的在于解除近井地带的钻井完井伤害,但关于地应力与裂缝走向、岩石力学与地应力、滤失机理与控制、压力响应特征的初步研究构成了水力压裂系统轮廓,为第二代水力压裂技术发展奠定了基础。McGuire & Sikora 发表了重要的增产研究,即在封闭油藏中拟稳定流动条件下增产倍比与裂缝穿透比和相对导流能力的电模拟实验成果,奠定了水力压裂设计的基础。即对于低渗透储层压裂改造应该努力形成长裂缝,对于高渗透储层压裂改造应该努力形成高导流能力。

20世纪70年代,为有效开发美国棉花谷致密低渗透气藏,提出了致密砂岩大型压裂的概念并现场应用,取得了非常显著的增产效果,大型压裂通常要求裂缝半长大于300m,加砂规模大于 100m^3 ,大型压裂压后产量是常规加砂产量的3倍;大型压裂技术的进步,使得北美 Wattenberg 气田 $360 \times 10^8 \text{m}^3$ 的地质储量成功开发动用,标志着致密砂岩气层储层改造进入了大型水力压裂时代。

80年代以后,伴随大型压裂技术应用,认识到裂缝通常沿长、宽、高三个方向延伸,从而重点研究裂缝三维延伸模型;大型水力压裂技术在致密砂岩油气藏改造中逐渐成熟;1985年明确提出了压裂改造经济优化的概念,即通过油气藏模拟、压裂模拟、经济评价等优化最佳裂缝长度和导流能力,气藏基质渗透率越低,需要的最佳裂缝半长越长。

大部分致密砂岩气藏纵向上多具有多层系、多砂体叠置特点,20世纪90年代开始采用分层压裂,分段排液方法。2000年以来逐渐采用不动管柱的分层压裂、合层排液手段。典型的分段压裂方法有滑套+封隔器分段压裂、连续油管分段压裂、桥塞分段压裂等。如美国大绿河 Jonah 气田,2000年后采用10层压裂,控制储量增加3~7倍,单井产量增加2~3倍。在同一时期,基于成本和对储层和裂缝伤害的认识,逐步发展成熟了清水(滑溜水)压裂液、低稠化剂交联压裂液、混合压裂液技术等,在现场开始大规模推广应用。

21世纪初,水平分段压裂技术逐步成为开发非常规气藏增产主要技术手段,并由此引发了石油工业的又一次革命。1985年提出了水平井压裂问题,20世纪90年代初,分段压裂技术主要采用液体胶塞隔离分段压裂,90年代中后期出现了分段桥塞和水力喷砂分段压裂

技术，2005 年以来，滑套多级分段压裂技术日新月异，在全球开始大规模推广应用，目前已可进行多达 40 级以上分段改造。水力压裂技术主要进展见表 1-2-1。

表 1-2-1 水力压裂技术的主要进展一览

项 目	1950's	1960's	1970's	1980's	1990's	2000's
市场氛围	常规	常规	经济危机 取消管制	经济衰退 价格崩溃	低油价	高油价
基本需求	解堵和增产	解堵	裂缝长度	裂缝长度和 导流能力	产量和 裂缝优化	水平井 分段
主要进步						
液体	油基、凝胶	交联凝胶	泡沫	延迟交流	先进破胶剂	滑水
支撑剂	砂	砂，玻璃珠	高强度烧结 陶粒，树脂包 裹支撑剂	中等强度	防止支撑剂 回流的纤维 支撑剂	超低密度 支撑剂
理论模型	Hubbert & Willis, Sneddon, Howard Fast, Zel'tov & Kristianovitch	Perkins & Kern Geertsma and De Klerk, Barenblatt	Daneshy, Nordgren, Nolte, Smith	Advanti, Barree, Cleary, Clifton, Meyers, Settari, Schlaber, Shlyapobersky		
模拟类别	简单	2D	2D	拟 3D, 3D	3D, 拟 3D	
新技术 应用			大规模水力 压裂，地温	钻屑回注	水力密封	水平井分 段压裂、 井下微地 震裂缝 监测
重点关注	故障 & 跟踪	装备	理论	计算机化	优化	水平井 分段工具

二、致密砂岩储层改造优化设计

致密砂岩储层改造优化设计的方法论不仅仅是优化设计本身，还包括了从目的井层的选择、油气藏特征分析、压裂设计、经济评价、压裂诊断测试到主压裂施工、压后评价、设计优化的全过程。

对于致密砂岩而言，在渗透率 $< 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的情况下，地层条件下测定岩石和裂缝渗透率值比以前在简易条件下测定的要小，为对更精确设计提供依据，设计采用的渗透率需采用压力脉冲技术等方法进行校正。

从设计理念出发，致密砂岩气藏储层不同于常规油藏，其具有低孔、低渗、水敏、水锁等特征，压裂改造通常要求以长裂缝为主，从而提供更大的渗流面积。致密砂岩气藏的开采方式以衰竭式开采为主，地层能量得不到补充，在目前的技术条件下通常认为砂岩气藏讲究一次性压裂到位，综合而言，致密砂岩气藏的储层特性决定了低伤害、低砂比、造长缝是储层改造的目标，因此以压裂液、支撑剂的优选和优化设计在致密砂岩气藏中至关重要。

随着理论和计算机水平技术的发展，水力裂缝模拟是压裂优化设计的重要组成部分。岩