

| 中国气田开发丛书 |

ZHONGGUO QITIAN KAIFA CONGSHU

“十二五”国家重点图书出版规划项目

低渗透致密砂岩气田开发

DISHENTOU ZHIMI SHAYAN QITIAN KAIFA |



贾爱林 张明禄 谭 健 © 等编著

石油工业出版社

中国气田开发丛书

低渗透致密砂岩气田开发

贾爱林 张明禄 谭 健 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从阐述国内外低渗透致密砂岩气藏的分布与开发现状开始,到国内外几个成功开发的同类气田的解剖结束共十章,内容包括:低渗透致密砂岩气藏的分布与开发技术、储层评价、渗流特征、气井产能评价及生产规律、开发方式与特征、水平井开发技术、储层改造技术、提高采收率技术、地面管理以及典型开发实例,力图对我国在该类气藏开发上的技术方法进行总结,以推动我国该类气藏开发技术的进一步发展。

本书可供从事气藏开发的技术人员、研究人员和管理人员参考,也可供相关、相近专业的师生阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

低渗透致密砂岩气田开发 / 贾爱林等编著.

北京:石油工业出版社,2016.1

(中国气田开发丛书)

ISBN 978-7-5183-0786-9

I. 低…

II. 贾…

III. 低渗透油气藏—砂岩油气田—气田开发—研究

IV. P618.13

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第144818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

2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷

889×1194毫米 开本:1/16 印张:16.75

字数:460千字

定价:138.00元

(如发现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

《中国气田开发丛书》

编委会

顾问：赵政璋 李鹭光 刘振武

主任：马新华

副主任：孟慕尧 张卫国 何江川

委员：（按姓氏笔画排序）

万玉金 马力宁 冉启全 任东

江同文 杜志敏 李保柱 李海平

张明禄 陆家亮 胡勇 胡永乐

贾爱林 廖仕孟 谭健 熊建嘉

主编：马新华 孟慕尧

副主编：张明禄

《中国气田开发丛书》

专家组

组长：孟慕尧

成员：（按姓氏笔画排序）

冉隆辉 李士伦 岳清山 袁愈久 钱凯

《中国气田开发丛书·低渗透致密砂岩气田开发》

编写组

组 长：贾爱林

副组长：张明禄 谭 健

成 员：何东博 张宗林 冀 光 程立华 位云生
杜秀芳 王丽娟 唐海发 宁 波 魏铁军
姬鹏程 付宁海 罗 娜 贾成业 季丽丹
杨顺智 刘群明 陈涛涛 王 键

序

我国常规天然气开发建设发展迅速，主要气田的开发均有新进展，非常规气田开发取得新突破，产量持续增加。2014年全国天然气产量达 $1329 \times 10^8 \text{m}^3$ ，同比增长10.7%。目前，塔里木盆地库车山前带克深和大北气田，鄂尔多斯盆地的苏里格气田和大牛地气田，四川盆地的磨溪—高石梯气田、普光和罗家寨气田等一批大中型气田正处于前期评价或产能建设阶段，未来几年天然气产量将持续保持快速增长。

近年来，中国气田开发进入新的发展阶段。经济发展和环境保护推动了中国气田开发的发展进程；特别是为了满足治理雾霾天气的迫切需要，中国气田开发建设还将进一步加快发展。因此，认真总结以往的经验和技术，站在更高的起点上把中国的气田开发事业带入更高的水平，是一件非常有意义的工作，《中国气田开发丛书》的编写实现了这一愿望。

《中国气田开发丛书》是一套按不同气藏类型编写的丛书，系统总结了国内气田开发的经验和成就，形成了有针对性的气田开发理论和对策。该套丛书分八个分册，包括《总论》《火山岩气田开发》《低渗透致密砂岩气田开发》《多层疏松砂岩气田开发》

《凝析气田开发》《酸性气田开发》《碳酸盐岩气田开发》及《异常高压气田开发》。编著者大多是多年从事现场生产和科学研究且有丰富经验的专家、学者，代表了中国气田开发的先进水平。因此，该丛书是一套信息量大、科学实用、可操作性强、有一定理论深度的科技论著。

《中国气田开发丛书》的问世，为进一步发展我国的气田开发事业、提高气田开发效果将起到重要的指导和推动作用，同时也为石油院校师生提供学习和借鉴的样本。因此，我对该丛书的出版发行表示热烈的祝贺，并向在该丛书的编写与出版过程中给予了大力支持与帮助的各界人士，致以衷心的感谢！

中国工程院院士



前 言

低渗透致密砂岩气藏作为一种特殊类型的气藏,近年来受到高度重视,并在开发方面取得了良好的效果。这一情况出现的推动力,一是低渗透致密砂岩气藏储量规模巨大,在不同类型的盆地和不同年代的地层中均有分布,人们通过不懈地探索与研究,已基本掌握了该类气藏的分布特征与规律;二是伴随着开采工艺,特别是储层改造工艺技术的不断进步,使得对这类复杂类型气藏的商业开发成为可能。

低渗透致密砂岩储层作为一种特殊类型的储层,与常规砂岩储层的界线并不是非常清楚,即使人们按照渗透率的大小给出了明确的界线,但在实际地质体中,也经常会交错分布。那么,在确定一个砂岩气藏是常规砂岩气藏还是低渗透致密砂岩气藏时,必须从气藏的宏观面貌入手,研究主要产层段的物性是否属于低渗透这一范畴。对于低渗透储层的成因,目前的认识已非常清楚,主要是长期的深埋压实作用,使原生孔隙几乎损失殆尽,虽然个别储层在后期的成岩改造过程中得到一定程度的改造,但仍表现出较低的孔隙度与渗透率。

我国的低渗透致密砂岩气藏主要分布于鄂尔多斯盆地上古生界、四川盆地须家河组、松辽盆地登娄库组、吐哈和准噶尔盆地的下侏罗统以及塔里木盆地的大北、迪那等地区与层段,大致可划分为以岩性控制为主的苏里格型气藏,以构造控制为主的须家河型气藏和以裂缝较为发育的邛西型气藏。我国低渗透致密砂岩气藏的资源量与探明储量均占总量的40%以上,而且近年产量占比也在快速攀升,已达到中国天然气总产量的25%以上。在今后新增的储量中,低渗透致密砂岩气藏的比例将会进一步上升。因此,如何开发好这一类型的资源已经成为我国天然气工业的核心内容之一。经过近年来不断探索与实践,现已经形成一套独具特色的评价与开发该类气藏的技术与方法,并使得苏里格这一巨型低渗透致密砂岩气藏得以成功开发。在天然气工业大发展的历史阶段,低渗透致密砂岩气藏作为我国各种类型气藏之一,如何总结好对该类气藏成功开发的经验与技术方法,显得尤为重要。作为《中国气田开发丛书》的分册之一,本书从国内外低渗透致密砂岩气藏的分布与开发现状开始,到国内外几个成功开发的同类气田的解剖结束共十章,力图对我国在该类气藏开发上的技术方法进行总结,以推动我国该类气藏开发技术的进一步发展。

在本书的编写过程中,胡文瑞院士多次组织专家审查提纲,阐述了丛书编辑的目的与意义。孟慕尧具体组织内容审查与结构安排,提出了很多建设性的建议,马新华、张卫国、任东、杨炳秀等人多次对编写组给予指导,在此表示感谢。同时,在具体的编

写过程中，何东博、张宗林、冀光、程立华、位云生、杜秀芳、王丽娟、唐海发、魏铁军、姬鹏程、付宁海、罗娜、宁波、贾成业、季丽丹、杨顺智、陈涛涛、刘群明、王键等对本书的编写做了大量的工作，在此一并表示感谢。另外，该书的出版，也是近年来相关领域技术人员共同攻关的成果，书中部分图表引用了他们的研究成果，在此一并对他们表示感谢！

鉴于编者的水平有限，书中定有不少不妥之处，敬请广大读者不吝赐教，批评指正。

本书编写组

2015年10月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 低渗透致密砂岩气藏开发必要性	2
第二节 低渗透致密砂岩气藏地质特征	4
第三节 低渗透致密砂岩气藏分布特征	6
第四节 低渗透致密砂岩气藏开发特征	13
第五节 低渗透致密砂岩气藏开发历史及发展趋势	17
参考文献	24
第二章 低渗透致密砂岩气藏储层评价	26
第一节 储层特征与分类	26
第二节 储层成因与控制因素	31
第三节 储层评价	33
第四节 富集区筛选	50
第五节 储层预测与井位优选	59
参考文献	61
第三章 低渗透致密砂岩气藏渗流特征	63
第一节 储层微观特征	63
第二节 可动水分析	68
第三节 应力敏感性分析	72
第四节 滑脱效应	75
第五节 启动压力	77
参考文献	80
第四章 低渗透致密砂岩气藏气井产能评价及生产规律	81
第一节 气井产能评价	81
第二节 气井单井控制动态储量与合理配产	97
第三节 气井生产规律分析	106
参考文献	109
第五章 低渗透致密砂岩气藏开发	111
第一节 制订合理开发方案	111
第二节 开发方式	115
第三节 井型与井网	117
第四节 数值模拟与开发指标优化	129
第五节 开发主体技术	145
第六节 低产气井生产管理	161
第七节 稳产接替	165
参考文献	165

第六章 低渗透致密砂岩气藏水平井开发	167
第一节 水平井开发现状	167
第二节 水平井地质目标评价与优化设计	170
第三节 水平井开发指标预测	173
第四节 关于水平井开发的几点思考	175
参考文献	179
第七章 低渗透致密砂岩气藏储层改造技术	180
第一节 压裂工艺技术	180
第二节 压裂液体系	189
第三节 压后评估	191
参考文献	197
第八章 低渗透致密砂岩气藏提高采收率技术	199
第一节 井网密度与采收率	199
第二节 气井类型与采收率	201
第三节 气井工作制度与采收率	211
第四节 气井废弃条件与采收率	214
第五节 工艺技术与采收率	215
参考文献	222
第九章 低渗透致密砂岩气藏开发地面工程管理	223
第一节 标准化设计	223
第二节 模块化建设	227
第三节 数字化管理	228
第四节 地面管理模式	231
参考文献	234
第十章 低渗透致密砂岩气藏典型开发实例	235
第一节 苏里格气田	235
第二节 川中须家河组气藏	250
参考文献	256

第一章 绪 论

低渗透致密砂岩气藏具有一般气藏的共性（圈闭类型、孔隙度、渗透率、储层条件、盖层、气藏范围），也具有诸如储层渗透率低、储量丰度低等若干特性。从目前的勘探开发实践来看，这种气藏具有三个特点：一是气藏分布具有隐蔽性，一般的勘探方法难以发现；二是客观认识这类气藏的周期较长，在短期内难以认识气藏特性并做出客观评价；三是气藏必须经过一定的改造措施，才具有一定的产能，即使发现、认定为具有工业价值的储量，非采取特殊方法也难以采出，其产能发挥程度是否能进行工业性开采，决定于当前的开发工艺水平。

从概念上说，“低渗透致密砂岩气藏”没有明确的定义，由于低渗透致密砂岩气藏多以共存的形式存在，所以这成为中国业内人士的习惯提法。

1978年，美国天然气政策法案中规定，只有砂岩储层对天然气的渗透率不大于0.1mD时才可以被定义为致密砂岩气藏。美国联邦能源委员会（FERC）把致密砂岩气藏定义为地层渗透率小于0.1mD的砂岩储层。在实际生产和研究中，国外一般将孔隙度低（一般10%以内），含水饱和度高（大于40%），渗透率低（小于0.1mD）的含气砂层作为致密砂岩气层。现在这个定义已成为通用的标准^[1]。

中华人民共和国国家标准GB/T 26979—2011《天然气藏分类》规定，气藏储层有效渗透率大于50mD为高渗透储层，有效渗透率为5~50mD属中渗透储层，有效渗透率为0.1~5mD属低渗透储层，有效渗透率小于或等于0.1mD为致密储层，与国外标准是统一的^[2]。

石油天然气行业标准SY/T 6832—2011《致密砂岩气地质评价方法》规定，覆压基质渗透率不大于0.1mD的砂岩气层为致密砂岩气层，其特点是单井一般无自然产能或自然产能低于工业气流下限，但在一定经济条件和技术措施下可以获得工业天然气产量。通常情况下，这些措施包括压裂、水平井、多分支井等^[3]。

实际应用中，致密砂岩气藏的渗透率低，划分气藏类型时，应注意以下三点：一是覆压校正后的岩心渗透率小于0.1mD的样品超过50%；二是大面积低渗透条件下存在一定比例的相对高渗透样品；三是裂缝可以改善储层渗流条件“甜点”，但评价时不含裂缝渗透率。

综合对比来看，国外多采用地层条件下的渗透率来评价致密储层，通过试井或实验室覆压渗透率测试来求取地层条件下的渗透率值。中国一般习惯采用常压条件下实验室测得的空气渗透率来评价储层，测试围压条件一般为1~2MPa。考虑到致密储层的滑脱效应和应力敏感效应的影响，对于不同孔隙结构的致密砂岩，地层条件下渗透率0.1mD大体对应于常压空气渗透率0.5~1.0mD。与渗透率不同，从常压条件下恢复到地层压力条件下，致密砂岩的孔隙度变化不大。地层条件下渗透率为0.1mD致密砂岩对应的孔隙度一般在7%~12%。

综合目前国内低渗透致密砂岩气藏地质、生产动态特征及技术经济条件,本书将在覆压条件下含气砂岩渗透率小于0.1mD的储层称为致密砂岩气藏。在覆压条件下,含气砂岩渗透率0.1~1mD的储层称为低渗透砂岩气藏。但是,尽管在储层渗透率大小上可以给出低渗透和致密气藏的界限,但在论述气田和储量分布等方面难以把二者截然分开。

苏里格气田和四川盆地须家河组气藏的砂岩储层常压条件下孔隙度一般为3%~12%、渗透率为0.001~1.000mD,覆压条件下渗透率小于0.1mD的样品比例占80%以上,两者属于致密砂岩气藏,局部区块属于低渗透砂岩气藏。

第一节 低渗透致密砂岩气藏开发必要性

一、世界工业和经济生活的发展对天然气的需求不断增长

天然气作为一种清洁、方便、价廉和用途广泛的能源和原料,其需求量在最近50年的能源结构中一直呈增长趋势,并且是增长最快的一种。据统计^[4],1973—1993年间,世界能源需求增长了38%,天然气、石油、煤分别增长了65%、12%、28%;天然气在能源需求结构中的比例也由25年前的19%提高到21%。据国际能源机构专家Oliver Appere预测,到2020年,天然气在能源需求结构中的比例将进一步提高至30%。

据2002年《BP世界能源统计年鉴》记载,尽管“9·11”事件加上其他因素导致世界经济发展变缓,但世界能源的总需求量仍然增长了0.3%,世界天然气的总需求量也大致增长了0.3%,具体表现为北美市场的天然气需求量严重紧缩,亚洲天然气需求依然强劲,中国的总需求量增长高达12.9%。2010年《BP世界能源统计年鉴》表明^[5],2009年天然气消费量居世界前10位的国家包括美国、俄罗斯、伊朗、加拿大、中国、日本、英国、德国、沙特阿拉伯和意大利,美国消费量为 $6466 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全球总消费量的22.2%,位居第一;俄罗斯消费量为 $3897 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全球总消费量的13.2%,位居第二;排在第三位的伊朗为 $1317 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全球总消费量的4.5%;中国消费量为 $887 \times 10^8 \text{ m}^3$,比2008年增长了9.4%,占全球总消费量的3.0%,超过日本,进入全球天然气消费量的前五位。

随着人们对环境保护意识的增强,对天然气这种清洁能源的需求越来越多,天然气必将成为未来能源消费的主体。

二、资源分布不均

世界范围内天然气资源分布十分不均,气田探明储量在 $0 \sim 40 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 之间均有分布,大部分国家缺乏天然气资源。同时,各国对天然气的消费和使用也严重不均。一些地区的天然气资源已经得到较大程度的开发,现存资源量不足以维持长期的需求。一些地区的天然气资源量巨大,远远超出消费需求,但由于天然气储存、输送上的困难,不能提供给天然气短缺的地区。因此,资源分布的不均衡和储运技术的限制,使得需求天然气资源的国家不得不把更多的技术和资金投入本国或临近地区,去开发新的、低品位、低渗透率的气藏。技术的不断突破也使得低渗透致密砂岩气藏的储量级别不断升

级, 规模逐渐扩大, 这充分证实低渗透致密砂岩气藏的开发能够在一定程度上缓解天然气资源分布不均的现状。

三、常规天然气无法满足消费需求

常规气藏勘探、开发技术难度相对较低, 经过多年的实践, 已经基本得到了开发利用。随着世界各地对天然气资源的需求不断增加, 尤其是受天然气资源分布不均的影响, 促使各国不断提高勘探开发技术水平, 寻找和利用非常规天然气资源。在这一领域中, 美国一直占据世界领先地位。2009年, 美国天然气产量 $5928.85 \times 10^8 \text{m}^3$, 非常规天然气产量占总产量的55.7%左右, 其中致密砂岩气产量 $1864.97 \times 10^8 \text{m}^3$, 煤层气产量 $509.4 \times 10^8 \text{m}^3$, 页岩气产量 $928.24 \times 10^8 \text{m}^3$ 。致密砂岩气产量占美国天然气总产量的31.4%。

中国天然气开发处于快速发展阶段, 勘探潜力大, 有80%以上的可采资源量待发现。探明未开发资源中有85%以上为低品位储量, 其中, 约有50%以上的天然气储于低渗透和致密储层中, 这是中国今后天然气工业勘探开发的重要物质基础和方向。

四、致密砂岩气藏在一定地质条件下仍然具有经济开采价值

M.奥尔森 (Terrilyn M.Olson) 认为^[1], 致密气藏能获得经济上有吸引力的气井, 主要原因是气体黏度较低, 易流动。一般认为, 气井产能的渗透率下限是0.01mD; 布兰尼甘 (Brannigan) 认为, 如果有大范围的裂缝系统与气井相连, 即使基质渗透率低至0.08mD, 也能够获得相当高的产量。

伊朗的气藏以基质低渗透率但裂缝高度发育而著称, 产层的基质孔隙度为7%~8%, 渗透率约1mD。美国的特拉华 (Delaware) 气田和瓦尔费尔得 (Val Verde) 气田很多方面与伊朗气田相似, 其主产层Fusselman的渗透率约为0.1~90mD (包括裂缝的影响)。东得克萨斯 (East Texas) 盆地白垩系底部的Trvis Peak层和上侏罗统的棉花谷层 (Cotton Valley) 是天然气主要开采层位, 由砂岩和页岩组成, 孔隙度约13%, 渗透率约0.1~10mD。密执安盆地 (Michigan Basins) 范围较大, 下部地层为有机质十分丰富的厚层石炭系页岩, 孔隙度和渗透率都很低。科罗拉多州的皮昂斯盆地 (Picence Basin of Colorado) 的产层为上白垩统的梅萨费尔得 (Mesa Verde) 地层, 其中, 许多气藏都属于致密砂岩气藏, 储层孔隙度约6.5%, 渗透率非常低 (0.0012mD), 但天然裂缝系统发育 (长度可达300m), 因此, 仍然可以获得经济的天然气生产能力。这些气田的开发充分说明, 在一定地质条件下, 致密砂岩气藏大多具有开发潜力。

五、高新技术的依托

20世纪90年代以来, 计算机科学前所未有地进入了世界各行各业, 各种软件和技术成功地服务于石油天然气勘探开发, 在地质、测井解释、地震勘探数据处理、气藏描述、试井和数值模拟、动态分析等各个方面的应用不断成熟。这使得低渗透储层评价、有效储层和有利区块识别、大型改造措施施工设计等方面也获得突破并取得了很好的实用效果。特别是钻井和储层改造技术的进步, 大大提高了

低渗透致密砂岩气藏单井产量,使得更多的低渗透致密砂岩气藏得到经济有效开发。因此,各种新方法、新技术的发展和成熟,使得以前人们无法开发利用的低渗透致密砂岩气藏,成为了新的开发领域和目标。

第二节 低渗透致密砂岩气藏地质特征

低渗透致密砂岩气藏在不同的沉积环境中广泛发育,目前,国外开发的低渗透致密气储层主要以沙坝—滨海平原和三角洲沉积体系为主,河流相沉积较少,储层分布相对较稳定,累计有效厚度较大,但优质储层连续性和连通性较差,多以透镜状分布。国内开发的低渗透致密砂岩气藏主要以辫状河沉积体系为主,有效储层多呈透镜状发育,连续性和连通性更差。

中国低渗透致密砂岩气藏总体地质特征是:圈闭类型多样,储层大规模分布,储量规模大,饱和度差异大,油气水易共存,无自然产量或自然产量极低,需进行储层改造,稳产时间长。

一、圈闭特征

圈闭类型具有多样性,既有构造圈闭,也有岩性圈闭,以及构造—岩性复合圈闭。圈闭类型主要与其所处盆地的构造位置有关,盆地斜坡区等低缓构造区带主要为岩性圈闭或构造—岩性复合圈闭,高陡构造带多形成构造圈闭。构造圈闭气藏如迪那、大北、八角场、邛西等,岩性圈闭气藏如苏里格、榆林、子洲、昌德等,构造—岩性复合圈闭气藏如广安、合川、白马庙、长岭等。

从圈闭性质而言,一般构造圈闭形成的气藏其富集程度和储量丰度较高,资源品质较好,分布范围较为局限,具有明确的气藏边界,一般存在边水或底水。岩性气藏的富集程度和储量丰度一般较低,资源品质较差,分布范围广,整体储量规模大。

二、储层类型

储集空间主要有孔隙型和裂缝—孔隙型两大类。

孔隙型储层多处于盆地的构造平缓区,断层和裂缝不发育,孔隙类型多为原生残余孔隙与次生孔隙混合型。目前发现的低渗透致密砂岩气藏多为孔隙型储层。

裂缝—孔隙型储层多位于构造发育区,地层所受构造应力强,变形明显,断层和裂缝较发育,虽然储层基质渗透率低,但裂缝改善了储层的渗流能力,严格意义上讲,部分该类气藏不需要储层改造措施即可获得工业产量,已不属于低渗透致密砂岩气藏范畴。

根据低渗透致密砂岩气藏地质特点以及开发的需要,按照气藏储集体形态,可以将其划分为块状、层状和透镜体状等三种类型。

三、地层压力

受气藏地质条件和成藏演化过程的影响,原始地层压力低压、常压、高压均有分布,少量区块还

形成超高压气藏。由于气体的强压缩性，高压气藏所蕴含的天然气更加丰富。

(1) 低压气藏。以苏里格气田为代表的大面积、低丰度、低渗透致密砂岩气田，埋藏深度为3300~3500m，平均地层压力系数为0.87，气藏主体不含水。

(2) 常压气藏。以川中须家河组气藏为代表的多层状致密砂岩气藏，天然气充注程度弱，构造平缓区表现为大面积气水过渡带的气水同层特征，埋藏深度为2000~3500m，构造高部位含气饱和度为55%~60%，平缓区含气饱和度一般为40%~50%，压力系数为1.1~1.5。以长岭气田登娄库组气藏为代表的多层致密砂岩气藏储层横向分布稳定，天然气充注程度较高，含气饱和度为55%~60%，埋藏深度为3200~3500m，地层平均压力系数为1.15。

(3) 高压气藏。以库车坳陷迪北气田为代表的块状致密砂岩气藏，埋藏深度为4000~7000m，压力系数为1.2~1.8。

四、气水关系

受构造条件、储层条件和烃源条件多重因素控制，不同气藏具有不同的气水分布特征。

构造型气藏气水关系较为简单，如我国的迪那、邛西、大北气田具有明显的气水界面，地层水以边底水形式存在。

岩性气藏地层水分布较为复杂。苏里格气田由于天然气充注程度较高，除苏里格西区局部区块有残存的可动地层水之外，气田大部分储层中的地层水都以束缚水形式存在，气井基本不产地层水。四川盆地川中地区须家河组气藏天然气充注程度较低，构造平缓，低渗透储层毛细管阻力较大，天然气在储层中发生二次运移调整聚集的能力较弱，从而使气水分异差，大部分地区的气水分布类似于常规气藏的气水过渡带性质，仅有局部构造位置或裂缝发育带形成较好的气水分异。

五、气体相态

中国干气、湿气、凝析气气藏均有分布，以干气气藏为主。鄂尔多斯盆地干气气藏，四川盆地干气、湿气气藏均有分布，塔里木盆地主要分布凝析气藏（表1-1）。

低渗透致密砂岩气藏储量规模与储量丰度表现出反比关系，构造气藏具有小而优，岩性气藏具有大而贫的特征（图1-1），主要受储层厚度、构造幅度等因素控制；前陆冲断带高陡背斜部位的低渗透致密砂岩气藏一般气柱高度大，富集程度较高，储量丰度一般为 $(3\sim5)\times10^8\text{m}^3/\text{km}^2$ ，盆地构造平缓的斜坡区储量丰度较低，一般为 $1\times10^8\text{m}^3/\text{km}^2$ 左右。

表1-1 中国低渗透致密砂岩气藏气体相态特征统计

气藏类型	储量大于 $100\times10^8\text{m}^3$ 的低渗透致密砂岩气藏		
	数量, 个	储量, 10^8m^3	名 称
干气	13	12730	昌德、长深、召探1—陕13、陕251、米脂、苏里格、乌审旗、榆林、子洲、白马庙、充西、邛西、平落坝
凝析气	6	3096	霍尔果斯、莫索湾、迪那、吐孜洛克、八角场、中坝
湿气	6	3903	大北、广安、荷包场、安岳

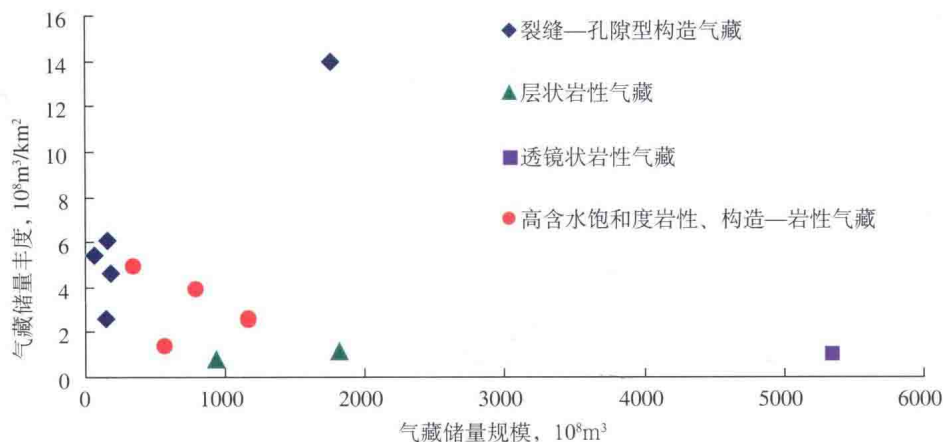


图1-1 中国低渗透致密砂岩气藏储量规模与储量丰度关系图

第三节 低渗透致密砂岩气藏分布特征

据统计，全球已发现或推测发育低渗透致密砂岩气的盆地有70多个，主要分布在北美洲、欧洲和亚太地区。全球已开发的大型低渗透致密砂岩气藏主要集中在美国西部和加拿大西部，即落基山及其周围地区。美国落基山地区西侧以逆掩断层带开始，向北与加拿大阿尔伯达盆地西侧逆掩带对应，向东、向南依次散布着数十个盆地，蕴含着丰富的低渗透致密气资源。中国低渗透致密砂岩气藏在多个盆地都有分布，包括鄂尔多斯盆地、四川盆地、松辽盆地、吐哈盆地等，其中鄂尔多斯盆地资源潜力最大，气藏地质条件相对简单，已经实现了规模开发。

一、美国典型含致密砂岩气盆地

美国本土现有含气盆地113个，其中含有致密砂岩气藏的盆地23个（图1-2），主要的含致密砂岩气区包括东得克萨斯州棉花谷盆地、新墨西哥州圣胡安盆地、西得克萨斯州二叠纪盆地的峡谷砂岩、犹他州尤因塔盆地、南得克萨斯州以及怀俄明州的绿河盆地。

2010年美国剩余探明可采储量超过 $5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，剩余探明可采储量大约一半的致密气探明资源来源于落基山地区，2010年该地区致密砂岩气产量达 $1754 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，约占美国天然气总产量的26%，在天然气产量构成中占有重要地位。致密砂岩储层以白垩系和新近—古近系的砂岩、粉砂岩为主。以下是美国几个典型低渗透致密砂岩气田简介。

(1) 圣胡安盆地。发现于1927年，圣胡安盆地3个边界为逆冲断层，盆地主体部位为向东北倾斜的单斜。盆地白垩纪经历了两次海侵和海退，形成Dakota, Mesaverde, Pictured Cliffs三套砂岩储层，顶部形成Fruitland Coal煤系地层。4套产层均广泛分布，单井钻遇气层厚度40~100m，各层系单井最终可采储量较少，一般 $(0.2 \sim 0.5) \times 10^8 \text{ m}^3$ 。砂岩储层中普遍存在天然裂缝，是低渗透致密气藏得以有效开发的重要地质条件。储层基质的有效渗透率基本上小于0.1mD；单井最终可采储量少，大部分小于 $0.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。单井产量递减快、长期低产是气井生产的主要特征。大量的生产井才能使气田产量达到一定规模；不断地钻开发井，是保持气田稳产的基础；逐步加密井网，是提高气藏采收率的主要手段。

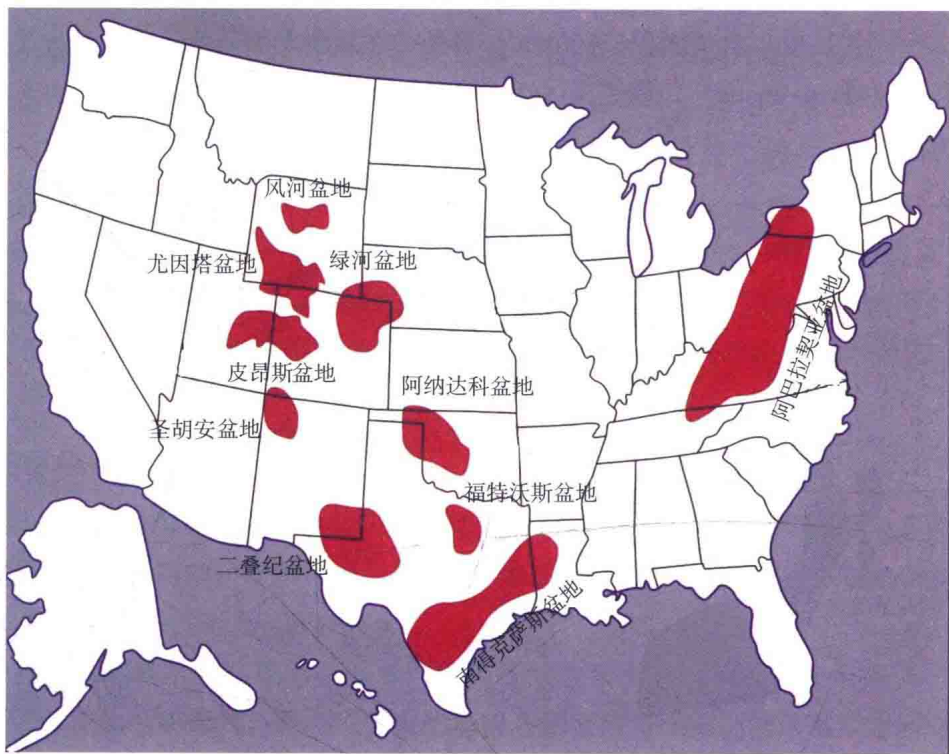


图1-2 美国低渗透致密砂岩气藏分布的主要盆地

(2) 奥卓拉气田。位于得克萨斯州西部，有三套产层：二叠系狼营统Canyon砂岩层天然气储量 $55.2 \times 10^8 \text{m}^3$ ；宾夕法尼亚系Strawn灰岩层天然气储量 $7.8 \times 10^8 \text{m}^3$ ；下奥陶统Ellenburger白云岩层天然气储量 $34.8 \times 10^8 \text{m}^3$ 。Canyon砂岩是主要的产气层段，属岩性—构造圈闭气藏，沉积类型为三角洲相。储层渗透率0.27mD，孔隙度9%~15%，平均11.2%，储层埋深1900~2100m，气层厚度6.1~30.5m，原始地层压力18.19MPa。采取均匀布井，开发过程中逐渐加密井网。20世纪60年代开发初期，单井控制面积1.3km²，通过两次加密后，单井控制面积达到0.65km²和0.32km²；1995年主力区单井控制面积加密到0.16km²；1996—1997年计划打加密井400~600口，1999年已钻开发井超过1500口，气田大约52%的单井控制面积小于0.16km²，23%的单井控制面积在0.16~0.32km²之间。

(3) 棉花谷气田。位于得克萨斯州东北部，地质储量 $3074.2 \times 10^8 \text{m}^3$ ，沉积年代是晚侏罗—早白垩，砂岩产层厚度300~427m，渗透率介于0.015~0.043mD之间。

(4) 瓦腾伯格气田。位于美国丹佛盆地轴部，气藏主要为下白垩统（J）砂岩，储层为朝北西方向推进的三角洲前缘的海退滨线砂体；岩性以细砂岩和粉砂岩为主；孔隙度8%~12%，渗透率0.0003~0.01mD；天然气的富集主要受岩性控制；气井自然产能约为 $(0.2 \sim 0.3) \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ，需要压裂改造才能投产。

二、加拿大典型含致密砂岩气盆地

加拿大在北美洲天然气市场占有重要地位。据2009年的World Energy Outlook统计，2009年加拿大致密砂岩气产量 $500 \times 10^8 \text{m}^3$ 。目前，天然气产量占北美洲地区的四分之一，天然气主要来自西部的阿尔伯达地区。阿尔伯达盆地位于落基山东侧，内部构造格局简单，为一巨大的西倾单斜构造，地层