

doi: 10 3969/j issn 1673-1409 2011. 01. 028

# 页岩气勘探开发技术研究

许 洁, 许明标 ( 长江大学石油工程学院, 湖北 荆州 434023)

[摘要] 论述了页岩气的成藏机理、物理性质、开发特性, 重点介绍了国外页岩气勘探和开发以及增产方面的技术, 旨在为我国的页岩气开采提供技术参考。  
[关键词] 页岩气; 储量; 成藏机理; 开采  
[中图分类号] TE132 [文献标识码] A [文章编号] 1673-1409 (2011) 01-0080-03

## 1 页岩气成藏机理

页岩在地层组成上, 多为暗色泥岩与浅色粉砂岩的薄互层。在页岩中, 天然气的赋存状态多种多样。除极少量的溶解状态天然气外, 大部分均以吸附状态赋存于岩石颗粒和有机质表面, 溶解于干酪根和沥青里, 或以游离状态赋存于粒间孔隙和天然裂缝中。其中吸附状态天然气的含量变化于 20% ~ 85%<sup>[1]</sup>。

页岩气成藏具有隐蔽性, 成藏机理上具有递变过渡的特点, 一般原生页岩气藏具有高异常压力。页岩气藏不以常规圈闭的形式存在, 但页岩中裂缝发育有助于游离相天然气的富集和自然产能的提高。当发生构造升降运动时, 其异常压力相应升高或降低, 因此页岩气藏的地层压力多变。

页岩气产自富有有机质的页岩中, 气源主要来自于热成熟作用或生物作用, 是天然气在烃源岩中大规模滞留的结果<sup>[2]</sup>, 为典型的自生自储型天然气藏, 其成藏至少分为 2 个阶段: 第 1 阶段是天然气的生成 ( 生物作用和热成熟作用) 与吸附; 第 2 阶段是天然气的造隙及排出。由于天然气的生成来自于化学能的转化, 可以形成高于地层压力的排气压力, 从而导致沿岩石的薄弱面产生小规模的裂缝, 天然气就近在裂缝中保存。

## 2 页岩气特性

### 2.1 页岩气基本特征

页岩气具有如下基本特征: ①页岩岩性为沥青质或富含有机质的暗色、黑色泥页岩, 岩石组成一般为 30% ~ 50% 的粘土矿物、15% ~ 25% 的粉砂质 ( 石英颗粒) 和 1% ~ 20% 的有机质, 多为暗色泥岩与浅色粉砂岩的薄互层, TOC ( 总有机碳) 一般介于 0% ~ 25% 之间, 镜质体反射率介于 0.4% ~ 2% 之间; ②页岩本身既是气源岩又是储集层, 目前可采的工业性页岩气藏埋深最浅为 182m, 页岩产层厚度一般为 15~ 100m, 页岩总孔隙度一般为 4% ~ 6%, 而含气的有效孔隙度一般只有 1% ~ 5%, 渗透率小于  $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; ③页岩气成藏具有隐蔽性特点, 不以常规圈闭的形式存在, 但当页岩中裂缝发育时, 有利于游离相天然气的富集和自然产能的提高<sup>[3]</sup>。

### 2.2 页岩气藏开发特征

页岩气藏具有如下典型的开发特征:

1) 低产或无自然产能 据美国东部早期的页岩气井完井数据统计, 40% 的页岩气井初期裸眼测试时无天然气流, 55% 的页岩气井初期流量较小, 没有工业价值, 所有的页岩气井都要实施储层压裂改造。直井压裂改造后的产能平均为  $8063 \text{ m}^3/\text{d}$ , 水平井压裂改造后的产能平均为  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

2) 生产周期长 页岩气在投入生产后, 页岩中的天然裂缝引起的渗透性在一定程度上弥补了基质渗透率低的缺陷。因为, 页岩气藏生产中首先排出的是裂缝中的游离气, 随即是与裂缝沟通或自然连通

[收稿日期] 2010 10 03  
[作者简介] 许洁 (1983), 女, 2006 年大学毕业, 硕士生, 现主要从事油田化学方面的研究工作。

的孔隙中的游离气。页岩气井在进入稳产期后的递减速度较慢,使得生产周期比较长。根据估算,认为一般页岩气井生产寿命可在 30~50 年。

3) 气藏采收率变化较大 据美国 5 个主要页岩气产气盆地的统计,页岩气藏的采收率变化范围为 5%~60%。如埋藏较浅、地层压力较低、有机质丰度较高、吸附气含量较高的 Antrim 页岩气藏的采收率可达 60%;而埋藏较深、地层压力较高、吸附气所占比例较低的 Barnett 页岩气藏的采收率早期为 7%~8%,随着技术进步,目前采收率达到 16%<sup>[4]</sup>。

### 3 勘探和开发技术

#### 3.1 储层评价技术

测井和取心是页岩气储层评价的主要手段。测井和取心是页岩气储层评价的 2 种主要手段。Schlumber 公司应用测井数据,包括 ECS (Elemental Capture Spectroscopy) 来识别储层特征。单独的 GR 不能很好地识别出粘土,干酪根的特征是具有高 GR 值和低 Pe 值。成像测井可以识别出裂缝和断层,并能对页岩进行分层。声波测井可以识别裂缝方向和最大主应力方向,进而为气井增产提供数据。岩心分析主要是用来确定孔隙度、储层渗透率、泥岩的组分、流体及储层的敏感性,并分析测试 TOC 和吸附等温曲线。

#### 3.2 钻井技术

美国页岩气钻井主要包括直井和水平井 2 种方式。直井主要目的用于试验,了解页岩气藏特性,并优化水平井钻井方案。水平井主要用于生产,可以获得更大的储层泄流面积,获得更高的天然气产量。目前多采用水平井或斜井开采,斜井钻进时开发透镜状气藏可选择的最佳方法,而水平井将成为开发边缘海相和海相席状砂岩的最佳方法。

#### 3.3 页岩气井测井技术

页岩气井测井内容主要指气层、裂缝、岩性的定性与定量识别。页岩气层测井显示高电阻、高声波时差、低体积密度、低补偿中子、低光电效应等特征。

#### 3.4 页岩气含气量录井和现场测试技术

由于页岩气的孔隙度低,以裂缝和微孔隙为主,绝大多数的页岩气以游离态,吸附态存在。游离态页岩气在取心钻进过程中逸散进入井筒,主要是测定岩心的吸附气含量。页岩气在录井过程中需要在现场做页岩气含量测定,页岩解吸及吸附等重要资料的录取。针对页岩气钻井对录井的影响,可以通过改进录井设备、方法和措施,达到取全和取准录井资料的目的<sup>[5]</sup>。

#### 3.5 完井技术

国外从事油气勘探开发的一些公司认为,页岩气井的钻井并不困难,难在完井。主要由于页岩气大部分以吸附态赋存于页岩中,而其储层渗透率低,既要通过完井技术提高其渗透率,又要避免地层损害时施工的关键。

页岩气井的完井方式主要包括组合式桥塞完井、水力喷射射孔完井。目前主要技术有 Halliburton 公司的 Delta Stim 完井技术,施工时将完井工具串下入水平井段,悬挂器坐封后,注入酸溶性水泥固井。井口泵入压裂液,依次逐段进行压裂。

#### 3.6 储层改造技术

页岩气储层改造技术包括水力压裂和酸化,可以通过常规油管或连续油管进行施工。

关键在于压裂液处理,除了使用大量的活性水外,还要加入一些特殊的添加剂,如特殊的降阻剂(不含苯酚)、微乳化表面活性剂、裂缝清洁加强剂和导流增强剂等。20 世纪 70 年代,美国对东部泥盆纪页岩气开发中曾采用裸眼完井,硝化甘油爆炸增产技术来提高天然气的采收率;20 世纪 80 年代使用高能气体压裂以及氮气泡沫压裂,使得页岩气产量提高了 3~4 倍。

沃斯堡盆地 Barnett 页岩气藏的开发先后经历了直井小型交联凝胶或泡沫压裂,直井大型交联凝胶或泡沫压裂,直井减阻水力压裂与水平井水力压裂等多个阶段,增产效果极大地提高。

1) 泡沫压裂 在压裂液中加入起泡剂,并且与氮气一起泵入。泡沫使气体在水中乳化,使用表面

张力来悬浮和携带支撑剂<sup>[6]</sup>。

2) 氮气压裂 使用氮气的原因是页岩具有水敏性, 将氮气或气体作为唯一的压裂液, 可以根除所有由清水引起的问题。

3) 水力压裂 由于页岩气产能较低, 通常埋深大, 地层压力高的页岩储层必须进行水力压裂改造才能实现经济开采。水力压裂以清水为压裂液, 支撑剂较胶凝压裂少 90%, 并且不需要黏土稳定剂与表面活性剂, 大部分地区完全可以不用泵增压, 较之凝胶压裂技术可以节约成本 50% ~ 60%<sup>[7]</sup>。

4) 清洁压裂液 有些地方页岩远景区的作业者发现, 压裂过程中存在水力压裂裂缝中支撑剂充填不充分的情况。该现象可能是由于压裂液产生的裂缝宽度不够, 不足以容纳支撑剂颗粒所造成的, 也可能是因为泵入裂缝的砂粒从携砂液中快速脱离悬浮状态造成的。

国外开发出清洁压裂液体系来解决这一困难。这种体系造缝和携带支撑剂方面具有高粘度液体体系的所有优点, 并且不需要破胶剂来降低粘度。

一些作业者采用了 ClearFRAC 无聚合物压裂液或 FiberFRAC 纤维基压裂液。ClearFRAC 的目的是为了将支撑剂送入裂缝深处, 此体系中不含可能降低裂缝渗透率的固相成分, 并且可以与富含有机质的页岩配伍, 该体系不需要另外添加破胶剂, 遇到烃类和地层水便能自动破胶<sup>[8]</sup>。FiberFRAC 中的纤维使支撑剂砂粒处于悬浮状态, 直至裂缝在砂粒闭合并将其锁定。最后流体中的纤维溶解, 从而增加裂缝中流体的流动能力。此外还有水平井分段压裂技术<sup>[9]</sup>、重复压裂<sup>[10]</sup>、同步压裂等。

### 3.7 裂缝综合监测技术

页岩气井实施压裂改造措施后, 需要有效的方法来确定压裂作业效果, 获取压裂诱导裂缝导流能力、几何形态、复杂性及其方位等诸多信息, 改善页岩气藏压裂增产作业效果以及气井产能, 并提高天然气采收率。

推断压裂裂缝几何形态和产能的常规方法主要包括利用净压力分析进行裂缝模拟、试井以及生产动态分析等间接的井响应方法。利用地面、井下测斜仪与微地震监测技术结合的裂缝综合诊断技术, 可直接地测量因裂缝间距超过裂缝长度而造成的变形来表征所产生裂缝网络, 评价压裂作业效果, 实现页岩气藏管理的最佳化。该技术有以下优点: ①测量快速, 方便现场应用; ②实时确定微地震事件的位置; ③确定裂缝的高度、长度、倾角及方位; ④具有噪音过滤能力<sup>[11]</sup>。

### [参考文献]

- [1] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布 [J]. 天然气工业, 2004, 24 (7): 15-18
- [2] 张利萍, 潘仁芳. 页岩气的主要成藏要素与气储改造 [J]. 中国石油勘探, 2009, 14 (3): 20-23
- [3] 张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理 [J]. 现代地质, 2003, 17 (4): 466
- [4] 闫存章, 黄玉珍, 葛春梅, 等. 页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源 [J]. 天然气工业, 2009, 29 (5): 1-6
- [5] 刘洪林, 王莉, 王红岩, 等. 中国页岩气勘探开发适用技术探讨 [J]. 油气井测试, 2009, 18 (4): 68-71, 78
- [6] 许卫, 李勇明, 郭建春, 等. 氮气泡沫压裂液体系的研究与应用 [J]. 西南石油学院学报, 2002, 24 (3): 64-67
- [7] 黄玉珍, 黄金亮, 葛春梅, 等. 技术进步是推动美国页岩气快速发展的关键 [J]. 天然气工业, 2009, 29 (5): 7-10
- [8] 赫泽. 无聚合物压裂液 [J]. 国外油田工程, 2007, 17 (1): 13-16
- [9] 付玉, 郭肖. 煤层气储层压裂水平井产能计算 [J]. 西南石油学院学报, 2003, 25 (3): 44-46
- [10] Pollastro R M. Total petroleum system assessment of undiscovered resources in the giant Barnett Shale continuous (unconventional) gas accumulation, Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91 (4): 551-578
- [11] 李艳春. 改进 Barnett 页岩增产效果的综合裂缝监测技术 [J]. 油气田开发与开采, 2009, 25 (1): 20-23

[编辑] 洪云飞