

Analysis of Shale Gas Reservoir Characteristics and Permeability Mechanisms

Ying Chang

Northwest University

Email: choin0418@163.com

Abstract

Through the analysis of the characteristics of shale gas reservoir, this paper focuses on the formation mechanism and occurrence mechanism of shale gas, and takes the shale gas seepage mechanism as the starting point. In the specific study, the shale gas reservoir in Leping Mountain section was taken as a case to focus on solving related problems, especially focusing on the Daxi seepage, slip effect and kernathori flow. Further study of these key mechanisms provides an important basis for the precise characterization of shale gas. The results not only provide theoretical enlightenment for the exploration and further development of shale gas, but also provide strong support for understanding the complexity of shale gas reservoirs and the formulation of relevant development strategies.

Keywords: *Shale Gas; Reservoir Characteristics; Seepage Mechanism*

对页岩气储层特征及渗流机理的分析

畅瑛

西北大学

摘要: 本文通过对页岩气储层特征的分析, 着重关注了页岩气的形成机理与赋存机理, 并以页岩气渗流机理为切入点展开研究。在具体研究中, 以乐平山段页岩气储层为案例, 着眼于解决相关问题, 特别聚焦了达西渗流、滑脱效应以及克努森流动等方面。通过深入研究这些关键机理, 为对页岩气的精确表征提供了重要的基础。研究结果不仅对页岩气的勘探和进一步开发提供了理论启示, 为理解页岩气储层的复杂性以及制定相关开发战略提供了有力支持。

关键词: 页岩气; 储层特征; 渗流机理

引言

中国海相页岩气资源丰富, 但规模化勘探与开发仍面临巨大挑战。渗流机理是页岩气勘探开发的基础, 能够使页岩气采收率得到显著提升, 所以要想加强页岩气勘探开发, 就必须掌握页岩气渗流机理。而对页岩气储层特征及渗流机理进行研究分析, 则能为掌握页岩气渗流机理提供依据, 并为促进页岩气勘探开发提供便利。

1 页岩气储层特征

1.1 页岩孔隙结构特征

页岩孔隙比储层中的其他孔隙类型小得多, 而且页岩气的孔隙尺寸通常为纳米级。该纳米孔隙和页岩储层内的裂缝相结合, 为气体的储存与渗流创造了空间。需要注意的是该空间主要由裂缝系统以及基质系统共同组成。其中基质孔隙分别为溶蚀孔隙、微裂缝、粒间孔隙以及有机质孔隙等而在裂缝系统中, 存在由各种地质作用产生的自然裂缝, 以及由水力压裂产生的人工裂缝。正是因为这种特殊的结构特征, 使得

储层内的孔隙结构相对复杂，不仅影响储层中的页岩气含量，而且在研究裂缝与基质中天然气渗透机制方面发挥着重要作用。因此，通过研究页岩孔隙结构的性质，并分析页岩储层孔隙结构对气体渗流能力的影响，能够为掌握页岩储层特征以及建立渗透性模型打下坚实基础，如表 1 所示。

表 1 页岩气储层特征与渗流机理研究

孔隙结构	定义	对气体渗流与赋存的影响
溶蚀孔	对脆弱矿物进行溶蚀，以此来产生溶蚀孔隙	该孔隙能够使储层渗透率以及孔隙度得到提升，让页岩气富集与渗流
有机质孔	位于页岩有机质颗粒中的纳米级孔隙	该孔隙广泛存在于储层机制当中，可以使裂缝网络连接在一起，以此来方便其他的运移
微裂缝	通常是由页岩内的粘土矿物、有机质颗粒以及骨架矿物等发育在颗粒中与颗粒边缘产生的微裂缝	微裂缝能够使吸附态的页岩气解吸附，并产生微裂缝网络，以此来产生页岩储层在微观方面的气体渗流通道
粒间孔	主要是指分布在粘土内脆弱矿物颗粒的孔隙	能够对游离态的页岩气进行赋存，以此来提高页岩气的储集空间

根据表 1 不难发现：页岩储层具有不同类型和形状的孔隙，这进一步解释了微观孔隙的分布和孔隙结构的异质性。一方面，这种多尺度多孔隙结构的存在有效地增加了页岩储层的渗透性，增加了储层的空间。此外，还能够产生为页岩气输送提供渗透通道的裂缝网络，从而使储层的渗透率得到显著提升。

1.2 页岩储层物性特征

储层的物理性质决定了储层中页岩气的储存机制，渗透率与孔隙度是评估储层物理性质的重要参数。通过研究不难发现，页岩储层拥有特低渗致密以及低孔等物理性特征。本次实验从 YXZ01 井乐平山段采集页岩岩心样品，根据岩心数据分析样品的渗透率与孔隙度，并获得实验数据，如表 2 所示。

表 2 岩心取样实验数据

样品编号	岩性	深度/m	渗透率/mD	孔隙度/%
1	粉砂岩	317.96-318.16	0.00034	3.48
2	粉砂质泥岩	472.08-472.28	0.00206	3.73
3	泥岩	493.28-493.50	0.00191	3.33
4	钙质泥岩	548.50-548.68	0.00028	2.60
5	粉砂质页岩	557.40-557.65	0.00296	4.22
6	砂质页岩	628.30-628.55	0.00566	4.99
7	页岩	669.33-669.48	0.00021	3.23

表 2 中获得的实验数据表明，乐平山段页岩渗透率分布相对平均，有效渗透率为 2.70%至 5.09%，平均渗透率为 3.75%。试验段样品的渗透率为 0.00031 至 0.00576mD，平均渗透率 0.002mD。由此不难看出渗透率存在明显的差异，且数值相对较低。

尽管页岩气储层的渗透率和孔隙度较低，但渗透率与孔隙度之间的正相关表明，在实验过程中，页岩气储层具有良好的物理性能和孔隙结构，为页岩气储存以及渗流提供了物理基础。然而，页岩气储层中仍然存在页岩气储存条件，页岩气产量可以通过生产措施增加和稳定。如图 1 所示。

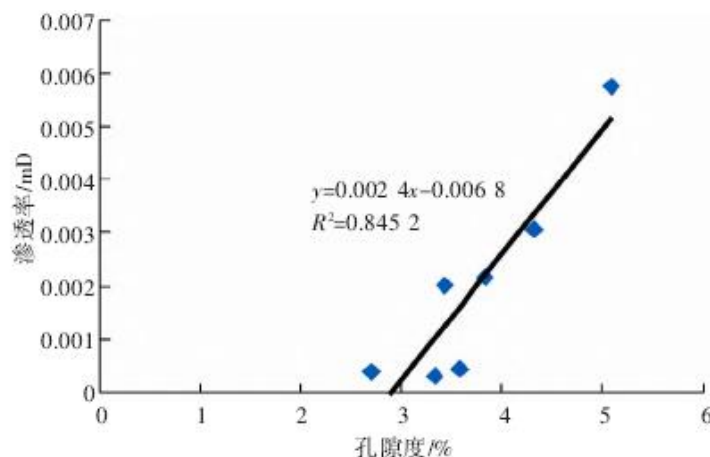


图 1 乐平山段页岩渗透率以及孔隙度的关系

总之，根据对页岩气储层孔隙结构和物理性质的研究，页岩气储层的性质决定了页岩气的储存空间，对页岩气储层形成过程具有深远影响。因此，了解页岩气存储特征有助于进一步研究页岩气形成机制，分析影响天然气输送的因素，并找到有利于天然气生产和富集的页岩储层。

2 页岩气形成机理

页岩气通常存在于各种类型的页岩中，具有自生产和储存的特殊性。由于页岩气的成因相对复杂，现阶段，页岩气的有机形成机制分别为：生物和热成因混合、热成因以及生物成因三种。如表 3 所示。

页岩气是由热成因以及生物成因结合产生的。页岩气形成条件与储存方法密切相关。因此，了解页岩气形成机制将有助于进一步研究页岩气储存和形成机制，促进了解不同储存模式下页岩气循环特征，并为促进页岩气的勘探和进一步开发提供依据。

表 3 页岩气形成机理

成因类型	页岩气成因	生气量主要影响因素
混合成因	生物成因与热成因产生的页岩气在页岩当中存在，并以热成因为主导	有机碳含量、有机质的成熟度以及干酪根类型
热成因	当处于高温以及高压条件下，泥页岩内的有机质会借助热裂解以及化学降解变成页岩气	
生物成因	借助理藏成岩作用和含有厌氧细菌的降水侵蚀作用，从而让厌氧细菌发生降解，最后变成页岩气	

3 页岩气聚集运输机理

在页岩气储层中，储层机制是影响页岩气泄漏的主要核心^[1]。气体通常以三种形式沉积在孔隙中：以吸附状态吸附在固体颗粒和有机物表面，以游离形式存在于页岩储层的纳米孔隙和裂缝中，并以溶解形式溶解在液态烃和有机物中。根据实验研究不难发现，页岩气主要以吸附和游离的形式存在于页岩矿床中，主要以吸附气体的形式存在，溶解气体很少。同时，在不同的储层中，可以通过改变地质条件下的温度和压力来实现不同储存模式下的气体相互转化，从而实现页岩气储层中储层的动态平衡。

3.1 吸附态

吸附气体主要通过粘土矿物颗粒和有机物表面的物理和化学作用吸收。根据研究不难发现，吸附气体含量占总气体的 20%-85%，气体含量主要受页岩气吸附能力的影响。

目前，表征气体吸附的主要模型是 Langmuir 模型、BET 模型和 DA 模型。最常用的模型是 Langmuir 吸附模型。根据分子动力学理论，该模型假设固体表面是均匀的，气体吸附是单层分子吸附，吸附的分子层之间没有相互作用。在某些条件下，可以实现吸附和解吸之间的动态平衡。如图 2 所示。

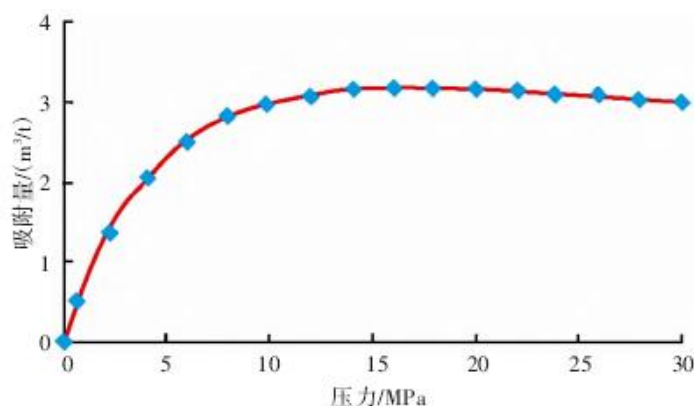


图 2 Langmuir 等温吸附曲线图

根据上述曲线图不难发现，吸附的气体量会随储存压力的变化而变化。通过调查得知，在中低压条件下，页岩储层的压力 P 越高，吸附气体 Q 的含量越高，对页岩储层压力储备的影响越大。

但需要注意的是，该模型很难准确地反映粘土矿物吸附能力的差异和页岩储层多孔隙结构的异质性，Langmuir 等温吸附方程不能合理解释吸附实验的结果。^[2]因此，张跃磊等学者以修正压力系统这一方面出发，提出了一种新的等温 p -Langmuir 吸附方程，以改变系统压力，更好地适应实际结果，并改进气体吸附机制。

3.2 游离态

页岩气以游离形式存在于孔隙和裂缝中，可自由输送和过滤。由于存储空间有限，天然气分子流也受到限制。游离气含量主要受地质构造保护条件的影响，如页岩渗透率和天然气饱和度。

目前，油气饱和度主要通过岩芯提取实验确定，然后确定游离气饱和度，然后通过饱和度测井法确定游离气含量。此外，一些科学家使用 Trinity3D 数值模拟软件计算了页岩气 PGI 的空间分布，并提出了一种计算页岩气储层中游离气体含量的方法。根据实验研究不难发现，游离气含量随着页岩有效渗透率的增加而增加，表明孔隙和微裂缝越多，游离气储存就越有利。天然气饱和度也与游离气含量呈正相关。

同时，以游离形式储存的页岩气和吸附剂可以在不同的沉积深度条件下相互转化，但沉积深度的差异对相变和两者的条件有显著影响。在正常储层压力下，当埋深较浅（大于 1150m）时，吸附气体含量随着埋深的增加而显著增加，但如果埋深小于 1150m，则逐渐稳定。随着游离气体含量的增加，吸附页岩气和游离页岩气可在不同深度转化为稳定的天然气。

3.3 溶解态

一小部分页岩气可以溶解在石油和水中，在储层中形成溶解的页岩气。页岩气溶解方程可以用亨利定律表示：

$$P_b = K_c C_b \quad (1)$$

上述式子中 P_b 代表着溶解态页岩气分压； K_c 代表着亨利平衡常数；而 C_b 则代表着当页岩气处于液态物质时的溶解度。

根据该定律，可以看出，页岩气的分辨率与给定温度下的平衡分压成正比。研究发现，页岩中的溶解气体含量主要受页岩中压力、温度、盐度和残余油的影响。然而，由于溶解页岩气含量低，在数值模拟研究中可以忽略页岩气对液体流动的影响。

4 页岩气渗流机理

储层中的页岩气流经历三个主要过程：天然气解吸形成吸附在基质表面的自由气的过程、自由气通过孔隙扩散到低压区的过程以及页岩气迁移到断层网络和渗透孔隙的过程。因此，将天然气从孔隙和裂缝系统转移到钻孔孔隙的过程主要发生在微观和宏观多尺度流动条件下。

4.1 页岩气渗流特征

页岩气气藏与常规天然气气藏存在明显差异，其中孔隙分布便是典型差异之一。页岩气储层中的沉积岩主要以纳米级孔隙为主，孔径从几纳米到几微米不等。渗透率在 2%-4% 之间的变化通常小于 $0.001 \times 10^3 \text{m}^2$ 。是十分典型的低渗流储层。

4.2 达西渗流

通常，储层自然部分的页岩气流遵循达西定律，因此可以构建基于达西定律的渗透模型，以模拟天然部分页岩气的渗透过程^[3]。根据实验研究不难发现，达西流仅适用于层流，其流动形状随储层孔隙直径大小而变化。

4.3 滑脱效应

页岩多孔隙介质中气体的渗透性更为具体：通道中心和通道壁之间的气体速度差较小，通道壁不产生膜吸附^[4]。在某些压力条件下，页岩气扩散可能是无限的，导致天然气渗透性增加。由于页岩储层的特殊物理性质和低容量，在研究天然气时必须考虑滑脱效应的影响。渗透性试验表明，孔隙压力越低，地层越平坦，滑脱对气体泄漏的影响越明显。同时，当页岩渗透率较低时，滑脱效应也会增加。

4.4 克努森流动

由于页岩孔隙处于纳米水平，页岩气渗透性主要有两种流动机制：滑动流以及过渡流。有必要考虑气体的扩散、吸附解吸以及滑脱等影响。这口井附近的气流主要为达西渗流，因此页岩气能够在这里进行连续流动。从而为对气体渗透机制的详细研究以及渗透模型建立打下坚实基础。

5 结论

综上所述，综合分析页岩气储层特征及渗流机理，揭示了其独特的孔隙结构和物性特征，表现为多孔多裂的复杂性。实验结果显示了低渗透和低孔隙度的特点，但这并不妨碍页岩气在其中形成和富集。多元的形成机理包括混合成因、热成因和生物成因，为页岩气的产生提供了复杂的物质基础。吸附、游离和溶解以多态的方式相互作用，为储层中天然气的储存和渗透提供了多样性。达西渗流、滑脱效应和克努森流动等多样性的渗流机理在微观和宏观尺度上相互作用，对页岩气的渗透过程产生关键影响。这些综合结论不仅为科学界提供了深入研究的方向，同时也为页岩气的勘探与开发提供了实质性的理论支持，具有解决能源问题和提高能源利用效率的重要价值。

参考文献

- [1] 赵越,李磊,司运航等.浅层页岩气储层孔隙分形特征及控制因素——以云南昭通地区龙马溪组为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(06):1813-1829.
- [2] 柳文欣,路盼盼.页岩气储层特征及渗流机理研究进展[J].石油化工应用,2022,41(08):9-14.
- [3] 宋姝豫.昭通示范区龙马溪组页岩气储层评价技术研究[D].中国石油大学(北京),2020.
- [4] 张辰庆.基于测井资料及水力压裂试验的页岩气储层可压性评价方法及其应用[D].重庆大学,2020.