

页岩气藏形成机理与富集规律初探\*

陈更生<sup>1</sup> 董大忠<sup>2</sup> 王世谦<sup>3</sup> 王兰生<sup>3</sup>

1. 中国石油西南油气田公司 2. 中国石油勘探开发研究院 3. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院

陈更生等. 页岩气藏形成机理与富集规律初探. 天然气工业, 2009, 29(5): 17-21.

**摘 要** 我国存在大量富含有机质页岩地层, 具有广阔的页岩气藏勘探开发前景。分析页岩气成藏特征, 探讨页岩气藏形成机理与富集规律, 有助于为更好地评价和开发我国的页岩气资源。研究表明: 页岩气藏是一种区域性连续聚集型非常规天然气藏; 页岩具有一定厚度、有机质含量丰富、处于生气窗演化阶段以上、天然裂缝发育、位于构造低部位或盆地中心等是页岩气藏形成的主要条件; 自生自储、不间断供气与连续聚集、未经运移或极短距离运移等是页岩气藏形成机理的重要特征; 页岩有效厚度、有机碳含量、基质孔隙与天然裂缝发育程度是页岩气富集成藏的关键因素。

**关键词** 页岩气 成藏机理 富集规律 连续聚集 关键因素 有机碳含量 裂缝

DOI: 10. 3787/j. issn. 1000-0976. 2009. 05. 004

1 页岩气藏特征

页岩气、盆地中心气、致密砂岩气以及煤层气均属连续型气藏。这类气藏具有表 1 所列的 16 项明显特征。页岩气藏的成藏特征也明显不同于常规气藏, 主要表现在以下几个方面。

表 1 连续型气藏特征简述表

序号	项 目	气藏特征简述
1	气藏规模	大面积区域分布
2	气藏边界条件	没有明显的边界或界线模糊
3	“气田或气藏”概念	通常融合为统一的区域性聚集
4	盖层与圈闭条件	没有明显的封盖层和圈闭
5	油气水分布情况	没有明确的(油)气水界面
6	成藏机制	烃类不依靠水动力原地成藏
7	气藏压力特征	一般为异常压力
8	资源分布情况	地质资源量巨大, 但采收率低
9	油气富集特征	存在地质上的“甜点”高产富集区
10	储集条件	储层基质孔、渗极低
11	裂缝发育情况	储层普遍发育天然裂缝
12	生储组合关系	储层通常紧邻烃源层
13	气井产水情况	除煤层气外, 一般都不产水
14	区域气水关系	气水关系倒置, 水层通常出现在气层的上倾方向
15	勘探成功率	勘探成功率极高, 没有真正的干井
16	气井可采储量	估算的最终可采储量往往低于常规气藏

1)成藏时间早: 常规油气藏中聚集的油气是在水动力的作用下运移而来的, 即油气的生成地和储存地不属同一地质体, 烃源层、储层和盖层三者既相互关联又相对独立。而页岩气藏则不同, 作为烃源岩的页岩集生、储、盖“三位一体”, 自身构成一个独立的成藏系统。页岩气藏是烃源岩(富有机质页岩)在一系列地质作用下生成的大量烃类, 部分被排出、运移到渗透性岩层(如砂岩、碳酸盐岩)中聚集形成构造、岩性等常规油气藏, 部分则仍滞留在烃源岩中原地聚集而形成的。因此, 页岩气藏的形成时间在任何含油气盆地的所有油气藏中应该是最早的。

2)无明显圈闭: 传统上的常规油气均聚集在圈闭中, 圈闭是油气藏形成的基础, 决定着油气藏的基本特征以及勘探方法。页岩气藏虽在字面上还称之为藏, 实则没有藏的境界, 即页岩气不是聚集在某个圈闭中成藏的, 而是包含盆地中已经进入生气窗范围内的所有烃源岩中皆可成藏(图 1)。常规油气藏, 即使是岩性油气藏, 都是在一定的构造背景下形成的, 而页岩气藏不受构造因素的控制。

3)储层超致密: 页岩是由大量黏土矿物、有机质及细粒碎屑(粒径小于 0. 003 9 mm)组成的、很容易碎裂的一类沉积岩。研究表明, 页岩的原始孔隙度

\* 本文受到国家科技重大专项课题(编号: 2008ZX05004-005)的资助。

作者简介: 陈更生, 1963 年生, 教授级高级工程师, 博士; 主要从事天然气地质与成藏研究工作, 现任中国石油西南油气田公司副总地质师。地址: (610051) 四川省成都市府青路一段 3 号。电话: (028) 86011112。E-mail: chengs@petrochina. com. cn

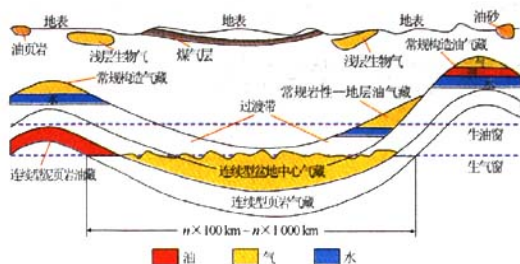


图1 页岩气藏与其他类型油气藏关系示意图  
(据 Pollastro, 2001 年, 有修改)

可达 35% 以上, 随埋藏深度增加, 迅速减少, 在埋深 2 000 m 以后, 孔隙度仅残留 10% 或更低。据美国含气页岩统计(表 2), 页岩岩心孔隙度小于 4%~6.5%(测井孔隙度 4%~12%), 平均 5.2%; 渗透率一般为  $(0.001 \sim 2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 平均  $40.9 \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$ 。但在断裂带或裂缝发育带, 页岩储层的孔隙度可达 11%, 渗透率达  $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

4) 气体赋存状态多样: 页岩气主要由吸附气和游离气组成。吸附气赋存于有机质颗粒与黏土颗粒

表 2 美国主要含气页岩储层特征统计表

主要特征参数	Haynesville	Barnett	Fayetteville	Marcellus
埋深(m)	3 048~3 962.4	1 645.9~2 926.08	365.76~2 286	1 524.0~2 438.4
厚度(m)	60.96~91.44	60.96~152.4	15.24~60.96	15.24~91.44
总有机碳含量(%)	? ~4.0	2.0~7.0	2.0~5.0	5.3~7.8
平均测井孔隙度(%)	10	? ~7	4~12	5.5~7.5
含水饱和度(%)	15~20	25~35	15~50	12~35
单位面积储量 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	16.40~24.60	8.20~21.86	3.28~6.56	3.28~16.40
预测采收率(%)	25~30	25~50	35~40	? ~30
平均单井可采储量 (水平井, 10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	1.27~2.41	0.64	0.62	1.06

表面,与煤层气相似;游离气则赋存于页岩基质孔隙和天然裂缝中,与常规天然气相似。

图2为美国页岩气藏中的气体组成统计结果,表明不同地质条件下形成的页岩气藏其吸附气与游离气的含量存在较大差别。页岩气藏中吸附气含量比例较高,变化范围较大。页岩含气量最高的(如Barnett页岩气藏)可达 $10\text{ m}^3/\text{t}$ ,最低(如New Albany页岩气藏)仅有 $1.1\text{ m}^3/\text{t}$ ,含气量平均为 $3.81\text{ m}^3/\text{t}$ 。其中,吸附气含量最低为16%,最高达80%。

吸附气含量的变化主要受岩石组成、有机质含量、地层压力、裂缝发育程度等因素影响,详见后述。

5) 页岩需具有一定的生烃条件: 按油气有机成因理论, 有机质在整个热演化过程中均可生成天然气。有机质演化进入生气窗后, 生气量剧增, 应是具有商业价值页岩气藏的主要形成阶段。根据北美地区页岩气勘探开发经验, 页岩气藏勘探开发的最有利目标是有效厚度大于 15 m、有机碳含量大于 2%、热演化程度处于生气窗范围内的页岩(表 3、4)<sup>[1]</sup>。

需要指出的是,页岩有效厚度的下限不是一个固定值,其随着页岩气藏钻、完井技术的进步而变化。北美在页岩气藏开发的早期是打直井,当时确定的页岩有效厚度下限值为 30 m。目前,由于水平井钻井技术和水力压裂、分段压裂等完井技术的成功应用,页岩有效厚度下限值已降至 10~15 m。将来在技术进一步提高、开发成本不断降低的情况下,只要是在技术允许范围内的页岩厚度都会是有效页岩厚度<sup>[2]</sup>。

6)页岩气藏较易保存:与常规油气藏相比,页岩气藏不易遭受破坏,这主要基于以下3方面因素。首先,页岩气藏多形成于盆地区域构造低部位或盆地中心(图2),这是由页岩地层的沉积特征所决定

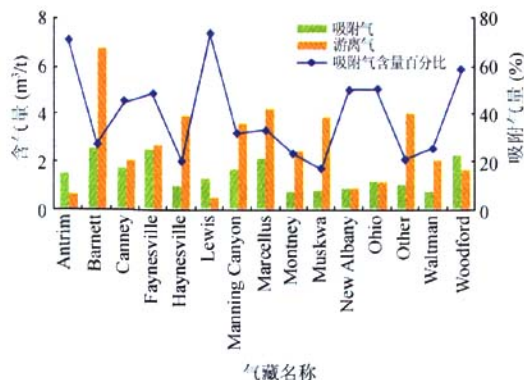


图2 北美地区各页岩气藏中吸附气与游离气含量统计直方图

表 3 北美页岩气藏烃源岩特征表

主要特征参数	Haynesville	Barnett	Fayetteville	Marcellus
厚度(m)	61~91	61~152	15~61	15~91
总有机碳含量(%)	~4.0	2.0~7.0	2.0~5.0	5.3~7.8
$R_o$ (%)	2.2~3.0	1.1~2.2	1.2~3.0	0.6~3.0

主要特征参数	Woodford	Antrim	New Albany	Lewis
厚度(m)	35~103	21~37	15~31	61~91
总有机碳含量(%)	4.9~7.8	1~20	1~25	0.45~2.5
$R_o$ (%)	0.37~4.89	0.4~0.6	0.4~1.0	1.6~1.88

表 4 页岩气藏有机碳含量评价标准表

有机碳含量 (%)	干酪根质量	有机碳含量 (%)	干酪根质量
<0.5	很差	2~4	好
0.5~1	差	4~12	很好
1~2	一般	>12	极好

注：据斯伦贝谢公司，2006 年。

的；其次，页岩气藏为不间断供气、连续聚集成藏。页岩气藏即使在遭受构造运动局部有所抬升，在烃源岩分布的较大范围内，仍部分处于油气持续演化状态，对整个页岩气藏保持不间断持续供气、连续聚集，从而弥补因构造活动可能造成的部分散失；最后，页岩气藏中 16%~80% 的气体是以吸附状态存在，即使游离气散失殆尽，吸附气也可保存下来，不至于整个气藏遭到完全破坏。因此，即使在构造油气藏破坏严重的盆地或区带，仍有勘探开发页岩气藏的前景。

7) 与常规油气共生共处：在含油气盆地中，形成页岩气藏的页岩往往都是盆地中的主力源岩或重要源岩，且呈大面积区域分布。因此，页岩气藏分布面积一般与有效烃源岩面积相当或一致。而且，页岩气藏与常规油气藏在紧邻构造隆起、大型斜坡区等部位是相伴生的(图 1)。从区域构造上看，页岩气藏往往分布在构造低部位、凹陷或盆地中心<sup>[3]</sup>。

2 页岩气藏形成机理

2.1 页岩气属典型的自生自储含油气系统

如前所述，页岩气藏是作为烃源岩的页岩持续生气、不间断供气和连续聚集成藏形成的。生烃、排烃、运移、聚集和保存全部在烃源岩内部完成(图 3)，页岩既是烃源岩、储层，也是盖层。研究表明，烃源岩中生成的烃类能否排出，关键在于生烃量必须大于岩石和有机体对烃类的吸附量，同时必须克服页岩微孔隙强大的毛细管吸附等因素。因此，烃源岩

所生成的烃类只有部分被排出，仍有大量烃类滞留于烃源岩中。Jarvie 等人(2003)研究认为 40%~50% 的烃类残留下来。而 Hunt 等人则认为从烃源岩中初次运移出来的烃量最多只占生烃总量的百分之几，最大不超过 10%。Tissot 和 Pelet(1971)认为烃源岩中只有靠近储层 14 m 的范围内烃类可有效排出，即能够发生排烃过程的烃源岩总厚度不超过 20~30 m，而厚层烃源岩中大部分排烃效率很低或根本不能排烃。这些残留下来的烃类便形成了页岩气自生自储含油气系统。

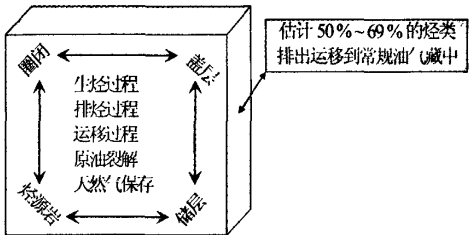


图 3 页岩气自生自储含油气系统图  
(据 Jarvie, 2003 年)

2.2 页岩气藏与常规天然气藏的气源条件虽相似，但两者在演化过程上存在差异

北美地区目前发现的页岩气藏存在 3 种气源(图 4)，即生物成因、热成因以及两者的混合成因。其中以热成因为主，生物成因及混合成因仅存在于美国东部的个别盆地中，如 Michigan 盆地 Antrim 生物成因页岩气藏及 Illinois 盆地 New Albany 混合成因页岩气藏。

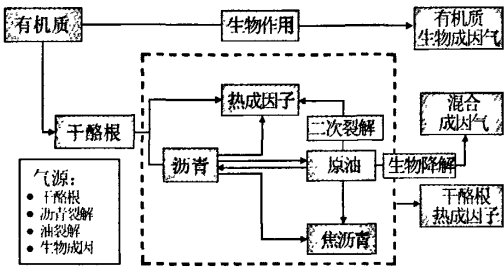


图 4 页岩气藏天然气形成与演化过程示意图

研究表明，热成因气的形成有干酪根成气、原油裂解成气和沥青裂解成气 3 种途径：①干酪根成气是由沉积有机质直接热解形成天然气。②原油裂解成气是有机质在液态烃演化阶段形成的、滞留在烃源岩中的液态烃，经深埋藏后的高温、高压作用，进一步裂解成气。③沥青裂解成气的物质基础来源于

两个方面:一是源岩中干酪根在各演化阶段生烃过程中形成的,另一方面是由原油裂解成气或遭破坏形成的。原油及沥青二次裂解生成的天然气量大小主要取决于烃源岩中有机质丰度、类型以及液态烃残留量。由烃源岩有机质热演化直接成气及原油裂解成气是页岩气藏中天然气的主要来源。

### 2.3 页岩气藏的形成兼有常规气和煤层气的特征

页岩气藏中气体的赋存形式多种多样,其中绝大部分是以吸附气的形式赋存于页岩内有机质和黏土颗粒的表面,这与煤层气相似。吸附气量与有机碳含量、地层压力等因素有关。游离气则聚集在页岩基质孔隙或裂缝(主要为微裂缝)中,这与常规气藏中的天然气相似。此外,可能还有极少部分页岩气以溶解气形式存在于页岩孔隙束缚水或沥青中。因此,页岩气的形成机理兼具煤层吸附气和常规天然气两者特征,为不间断充注、连续聚集成藏(图5)。在页岩气成藏过程中,随天然气富集量增加,其赋存方式发生改变,完整的页岩气藏充注与成藏过程可分为4个阶段<sup>[4]</sup>。第一阶段为天然气生成与吸附阶段,该阶段形成的页岩气藏具有与煤层气相似的成藏机理;第二阶段为吸附气量(包括部分溶解气量)达到饱和时,富余气体解吸或直接充注到页岩基质孔隙中(也不排除少量直接进入了微裂缝中),其富集机理类似于孔隙型储层中天然气的聚集;第三阶段是随着大量气体的生成,页岩基质孔隙内温度、压力升高,出现岩石造缝以及天然气以游离状态进入页岩裂缝中成藏;经过前述三个过程后,天然气最终以吸附气和游离气的形式富集形成页岩气藏,即页岩气藏形成阶段。

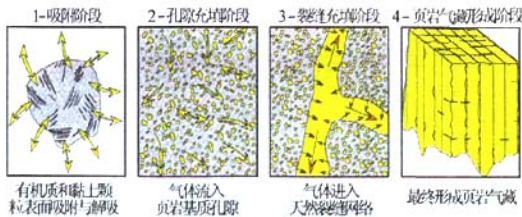


图5 页岩气赋存方式与成藏过程示意图

(据 Ron McDonald, 2002 年, 略作修改)

### 3 页岩气藏富集规律

综上可知,无论是页岩气藏的特征,还是页岩气藏的形成机理,都表现出与常规气藏迥异的复杂性,

从而使页岩气的富集规律受诸多因素的影响。页岩气藏为典型自生自储式的连续型气藏,控制页岩气藏富集程度的关键因素主要包括页岩厚度、有机质含量和页岩储层空间(孔隙、裂缝)3大因素。

1) 富有机质页岩厚度愈大,气藏富集程度愈高。与常规油气藏一样,要形成工业性页岩气藏,页岩储层需要达到一定的有效厚度和分布面积。页岩厚度和分布面积是保证页岩气藏有足够的有机质及充足的储集空间的重要条件<sup>[5]</sup>。一般而言,在海相沉积体系中,富有机质页岩主要形成于盆地相、大陆斜坡、台地凹陷等水体相对稳定的环境;在陆相湖盆沉积体系中,富有机质页岩发育在深湖相、较深湖相以及部分浅湖相带中<sup>[6]</sup>。这些沉积相带一般具有广泛的展布空间。在有效厚度大于 15 m、有机碳含量大于 2% 以及处于生气窗演化阶段等页岩气藏形成基本条件的限定下,页岩厚度愈大,所含有机质就愈多,天然气生成量与滞留量也就愈大,页岩气藏的含气丰度愈高(图 6)。需要指出的是,要形成一定规模的页岩气藏,页岩厚度一般应在有效排烃厚度以上<sup>[7]</sup>。

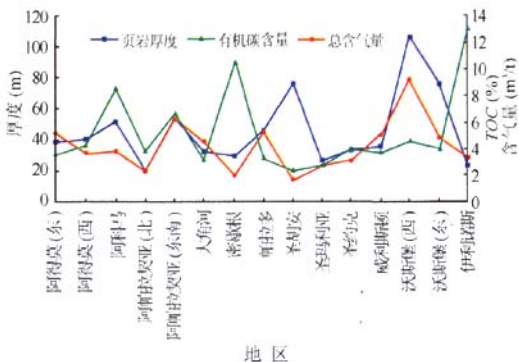


图 6 页岩厚度、有机碳含量与含气量关系曲线图

2) 有机碳含量愈高,气藏富集程度愈高。商业性页岩气藏需要达到页岩有机碳含量最低界限标准。斯伦贝谢公司对北美页岩气盆地的研究认为,页岩气藏的有机碳含量最低标准原则上应大于2.0%(表4)。因此,有机碳含量是页岩气藏评价中的一个重要指标,它既是页岩生气的物质基础,决定页岩的生烃强度,也是页岩吸附气的载体之一,决定页岩的吸附气大小,还是页岩孔隙空间增加的重要因素之一,决定页岩新增游离气的能力。在相同的地质条件及演化阶段下,页岩生烃强度、吸附气量大小及新增游离气能力与页岩中有机碳含量呈明显的

线性正相关性。实验分析结果表明,页岩含气量(吸附气及游离气总量)随页岩有机碳含量的增加而增大(图7-a)。对加拿大哥伦比亚省下白垩统 Bucking Horse 组 202 块页岩样品的等温吸附实验结果也同样表明<sup>[7]</sup>,页岩有机碳含量与甲烷吸附量之间呈正相关分布(图7-b)。此外,不同母质类型、不同演化程度的页岩,其等温吸附曲线也存在明显差别。页岩有机质类型越好,甲烷的吸附量越大<sup>[7]</sup>。但与此同时,图6、图7中也存在一些异常现象,说明页岩含气量大小不仅仅受有机碳含量的影响,还可能受其他多种因素的影响,如黏土成分及含量、有机质热成熟度、页岩含水量等。对此,尚需作进一步的深入研究。

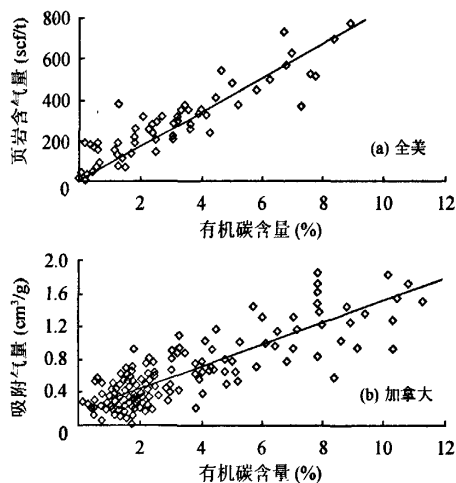


图7 页岩有机碳含量与含气量关系曲线图

注:a. 美国主要页岩气藏统计结果,据 Boyer 等,2006 年;b. 加拿大哥伦比亚省页岩实验结果,据 Gareth 等,2008 年。图中,1 scf=0.028 3 m<sup>3</sup>

3)页岩孔隙与微裂缝愈发育,气藏富集程度愈高。如前所述,页岩储层的孔隙度和渗透率极低,非均质性极强,页岩气藏中的游离气主要储集在页岩基质孔隙和裂缝等空间中。由于页岩中矿物组成、富含有机质等独特因素的存在,页岩除基质孔隙外,天然裂缝的发育、有机质经生烃演化后的消耗而增加的大量孔隙空间以及页岩层中的粉、细砂岩夹层等,均可极大地增加页岩的实际储集空间,从而提高页岩的储气能力。Jarvie 等人(2007)的实验分析结果表明,有机质含量为7%的页岩在生烃演化过程中,消耗35%的有机碳可使页岩孔隙度增加4.9%。因

此,有机碳含量愈高,页岩基质中的超微孔隙愈多,页岩气藏丰度愈高。与常规油气藏相似,页岩气藏中孔隙与微裂缝愈发育,气藏的富集程度愈高。

## 4 结论

1)页岩气藏在含油气盆地中分布广泛,是烃源岩持续生烃、不间断供气、连续聚集而形成的一类非常规连续型气藏。在成藏时间、储层性质、气体赋存状态及气藏空间展布等方面独具特征。

2)页岩气藏为富含有机质页岩集生、储、盖为一体的自生自储气藏,气源类型丰富,包括生物成因气、有机质热解气、原油裂解气以及沥青裂解气,以热成因气为主。完整的气藏充注与富集过程可分为生气与吸附、生气与孔隙充注、天然裂缝网络充注以及富集成藏4个阶段。

3)页岩气藏的富集受多种因素综合影响,包括页岩矿物成分和结构、有机碳含量、有机质类型、热演化程度、页岩有效厚度、孔隙与裂缝空间、埋深以及压力等。其中,页岩有效厚度、有机碳含量以及孔隙与裂缝的发育程度对页岩气藏的富集影响最大。

## 参考文献

- [1] CRETIES D JENKINS, CHARLES M BOYER. 煤层气和页岩气藏[J]. JPT, 2008, 1: 92-99.
- [2] JOHN B COMER. Reservoir characteristics and production potential of Woodford Shale[J]. World Oil, 2008 (8): 83-88.
- [3] 蒲泊伶, 包书景, 王毅, 蒋有录. 页岩气成藏条件分析——以美国页岩气盆地为例[J]. 石油地质与工程, 2008, 22 (3): 33-35.
- [4] 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.
- [5] 秦建中. 中国烃源岩[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [6] 孙超, 朱筱敏, 陈善, 等. 页岩气与深盆地成藏的相似与相关性[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(1): 43-47.
- [7] GARETH R, CHALMSERS R, MARC BUSTIN. Lower Cretaceous gas shale of Northeastern British Columbia: Geological controls on gas capacity and regional evaluation of a potential resource[C]. AAPG Annual Convention. San Antonio, Texas: AAPG, 2008.

(修改回稿日期 2009-03-20 编辑 罗冬梅)