

# 页岩气的形成与开发<sup>\*</sup>

张林晔 李 政 朱日房

中国石化胜利油田有限公司地质科学研究院

张林晔等.页岩气的形成与开发.天然气工业,2009,29(1):124-128.

**摘 要** 以自给系统为特征的页岩气藏的勘探开发在北美获得了巨大成功,拓宽了天然气勘探的空间。页岩气形成的成熟度较宽,在页岩演化的各个阶段均发现了页岩气藏,处于高演化阶段的页岩成藏的规模更大。页岩中有机碳含量、有机质类型、矿物组成、孔隙含水量、可诱导的裂缝发育程度等均与页岩气的产能密切相关。Barnett 页岩气的生产历史表明,页岩气地质储量评价方法的进步、针对页岩储层的有效压裂方式和水平井钻井技术的应用在页岩气的有效开发中起着关键作用。

**关键词** 页岩气 有机质 矿物组成 裂缝 压裂技术 水平井钻井

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2009.01.036

## 0 引言

页岩气是指以吸附、游离或溶解状态赋存于泥页岩中的天然气,它与常规天然气藏最显著的区别是:它是一个自给的系统。页岩既是气源岩,又是储层和封盖层<sup>[1]</sup>。1976年美国能源部启动了东部页岩气项目,对页岩气地质、地球化学和石油工程开始进行系统研究,分别发现了 Michigan 盆地泥盆系 Antirrim 页岩、Appalachian 盆地泥盆系 Ohio 页岩、Illinois 盆地的泥盆系 New Albany 页岩、Fort Worth 盆地密西西比系 Barnett 页岩和 San Juan 盆地白垩系 Lewis 页岩等五大页岩气系统,地质资源量达  $14 \times 10^{12} \sim 22 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,技术可采储量  $0.88 \times 10^{12} \sim 2.15 \times 10^{12} \text{ m}^3$ <sup>[2]</sup>。截止到2002年,在美国按照年产量排名的最大12个气田中,有4个气田的产层为页岩。Fort Worth 盆地以密西西比系 Barnett 页岩为储层的 Newark East 页岩气田的年产量在2005年接近  $141.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,已成为美国第二大气田<sup>[3]</sup>。美国页岩气勘探的巨大成功,极大地鼓舞了在世界范围内类似的页岩层序中寻找天然气资源的勘探热情。页岩气作为一种非常规含气系统在国内也逐步受到关注<sup>[4-7]</sup>。

## 1 页岩气形成的基本地质条件

### 1.1 页岩气的热成熟度

据 Curtis<sup>[2]</sup>对美国五大页岩气系统的分析发现,页岩气形成的成熟度范围较宽,既有生物气、未熟—低熟气、热解气,又有原油、沥青裂解气。

但美国最大的页岩气田 Newark East 气田, Barnett 页岩演化程度较高。Jarvie 等系统地分析了 Barnett 页岩的成熟度,认为它已进入生气窗<sup>[8]</sup>。Barnett 页岩含有大量天然气,其原因在于生烃量大、热成熟度高以及所保留的部分液态烃裂解生成了天然气。在 Barnett 页岩成熟度较低的地区,气井的产量也较低,而许多高成熟度的 Barnett 页岩气井的产量也较高。Jarvie 认为这是石油和干酪根同时裂解生气的结果。Ronald J Hill 等利用化学生烃动力学模型计算了 Barnett 页岩中液态烃开始裂解的成熟度( $R_o$ )大于1.1%<sup>[9]</sup>。

总的来看,页岩层在各个演化阶段都有气体的保存,但演化程度高,更具有开采价值。

### 1.2 有机组分与页岩产气潜力的关系

通过镜下对页岩中有机显微组分的观察发现,页岩中的有机质富氢显微组分丰富。Fort Worth 盆地 Barnett 页岩中无定型有机质占95%~100%, Appalachian 盆地 Ohio 页岩中保存了丰富的藻类物

<sup>\*</sup> 本文受到国家自然科学基金(项目编号:40673041)的资助。

**作者简介:**张林晔,女,1955年生,教授级高级工程师;从事油气地球化学研究工作。地址:(257015)山东省东营市胜利油田地质科学研究院。电话:(0546)8715487。E-mail:zhanglinye2006@163.com

质,从而使有机质大量富集。加拿大西部盆地侏罗系 Gordondale 页岩中占优势的是藻类体和基质沥青质富氢类脂组显微组分<sup>[10]</sup>。总体来看,页岩的有机显微组分以腐泥型—混合型为主。

多数盆地研究发现页岩中有机碳的含量( $TOC$ )与页岩产气率之间有良好的线性关系<sup>[11]</sup>,并把  $TOC$  作为评价页岩气的重要参数,原因有两方面:其一由于页岩气运移距离短,含气面积常常与页岩的分布面积相当; $TOC$  高,生气潜力大,由于运移不出去,其单位面积页岩的含气率也高。其二由于有机质含有大量微孔隙,它对气体有较强的吸附能,同时烃类气体在无定形和无结构基质沥青质体中的溶解作用也对增加气体的吸附能力作出了贡献。Ross 等在对加拿大大不列颠东北部侏罗系 Gordondale Member 页岩研究过程发现,有机碳与甲烷吸附能力具有一定关系(图 1),但是相关系数较低( $R_2=0.39$ ),见图 2。他认为在这个地区影响有机碳与吸附气量关系的还有其他因素<sup>[12]</sup>。

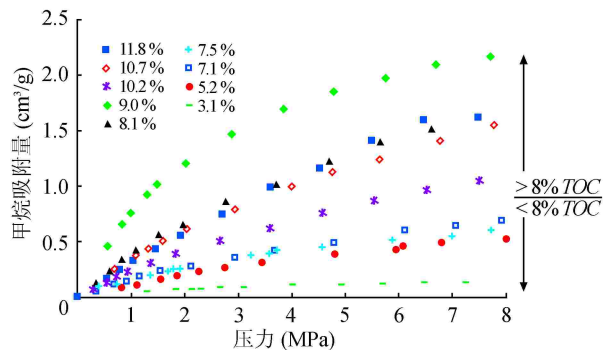


图 1 Gordondale 组页岩在不同压力下甲烷吸附等温线与有机碳含量的关系图(据 Daniel J K Ross, 2007 年)

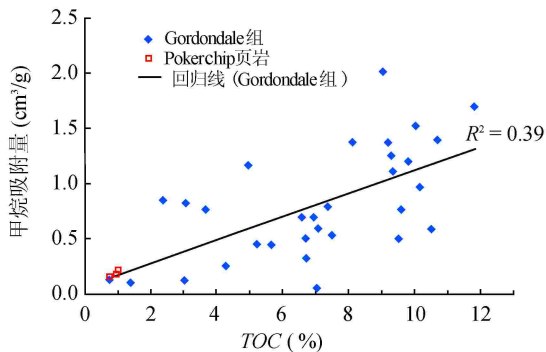


图 2 在 6 MPa 压力下甲烷吸附量与有机碳含量的关系图(据 Daniel J K Ross, 2007 年)

### 1.3 无机组分与页岩产气率的关系

Ross 等研究发现孔隙度中的含水量对页岩吸附烃类气体的能力有重要影响<sup>[12]</sup>。由于水占据了孔隙空间,减少了烃类气体的吸附位置,尽管在含水量

和气体吸附能力之间没有一个确定的关系,但是相对于具有较低含水量的样品,含水量高的页岩气体吸附能力低(见图 3)。

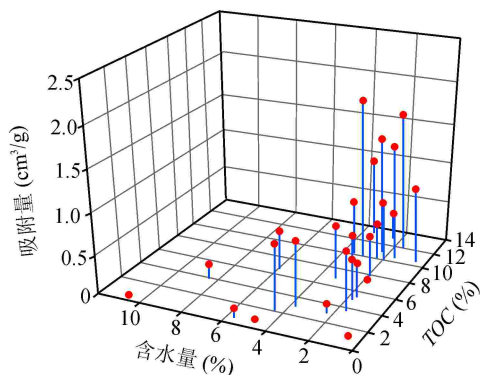


图 3 吸附气量、有机碳与含水量三维关系图(据 Daniel J K Ross, 2007 年)

页岩中的无机矿物成分主要是黏土、石英、方解石,其相对组成的变化影响了页岩的岩石力学性质、孔隙结构和对气体的吸附能力。黏土矿物与石英和方解石相比,由于前者有较多的微孔隙和较大的表面积,因此对气量有较强的吸附能力,但是当水饱和的情况下,对气体的吸附能力要大大降低。石英含量的增加将提高岩石的脆性。Bowker 认为 Fort Worth 盆地的 Barnett 页岩之所以能产出大量的天然气,其原因在于它的脆性及其对增产措施的良好响应,这种脆性与矿物成分有关<sup>[13]</sup>,Barnett 页岩的石英含量可达 45%。石英和碳酸盐矿物含量的增加,将降低页岩的孔隙,使游离气的储集空间减少,特别是方解石在埋藏过程的胶结作用,将进一步减少孔隙,因此对页岩气储层的评价,必须在黏土矿物、含水、石英、碳酸盐含量之间寻找一种平衡。由于页岩相对孔隙度和渗透率较低,有利目标的选择必须考虑储层的潜能(游离气+吸附气)与易压裂性的匹配关系,因此,必须对页岩的无机矿物组成和成岩作用开展更宽范围和更深入的研究工作。

### 1.4 天然和诱导裂缝与页岩气产能的关系

Curtis 对美国五大页岩气系统研究发现,页岩的渗透率很低(见表 1),只有存在天然裂缝网络才能增加页岩极低的基质渗透率<sup>[2]</sup>。Michigan 盆地北部 Antrim 页岩气生产与北西向和北东向发育的两组断裂有关,Illinois 盆地的 New Albany 页岩气为裂缝和基质孔隙中的游离气以及干酪根和黏土颗粒表面的吸附气。Hassenmueller 等认为商业性页岩气产出与断裂和褶皱引起的破裂作用以及碳酸盐构造

表 1 5 套页岩气系统的地质、地球化学和储层参数表(据 Curtis, 2002 年)

参 数	Antrim	Ohio	New Albany	Barnett	Lewis
深度(m)	183~730	610~1 524	183~1 494	1 981~2 591	914~1 829
总厚度(m)	49	91~305	31~122	61~91	152~579
有效厚度(m)	21~37	9~31	15~30	15~60	61~91
井底温度(℃)	23.9	37.8	26.7~40.6	93.3	54.4~76.7
总有机碳含量(%)	0.3~24	0~4.7	1~25	4.5	0.45~2.5
镜质体反射率(%)	0.4~0.6	0.4~1.3	0.4~1.0	1.0~1.3	1.6~1.88
总孔隙度(%)	9	4.7	10~14	4~5	3~53.5
充气孔隙度(%)	4	2	5	2.5	1~3.5
充水孔隙度(%)	4	2.5~3.0	4~8	1.9	1~2
储能系数( $10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$ )	0.30~1 524	0.05~15.24	无	0.003~0.61	1.83~121.92
含气量(标准 $\text{m}^3/\text{t}$ )	1.13~2.83	1.69~2.83	1.13~2.26	8.50~9.91	0.42~1.27
吸附气含量(%)	70	50	40~60	20	60~85
储层压力(psi)	400	500~2 000	300~600	3 000~4 000	1 000~1 500
压力梯度(psi/m)	1.15	0.49~1.31	1.41	1.41~1.44	0.66~0.82
钻井成本(1 000 美元)	180~250	200~300	125~150	450~600	250~300
完井费用(1 000 美元)	25~50	25~50	25	100~150	100~300
水产量( $\text{m}^3/\text{d}$ )	0.79~79.49	0	0.79~79.49	0	0
气产量( $10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ )	1.13~14.16	0.85~14.16	0.28~1.42	100~1 000	2.83~28.31
井距( $\text{km}^2$ )	0.16~0.24	0.16~0.64	0.32	0.32~0.64	0.32~1.28
采收率(%)	20~60	10~20	10~20	8~15	5~15
天然气地质储量( $10^9 \text{ m}^3/\text{km}^2$ )	0.07~0.16	0.05~0.11	0.08~0.11	0.33~0.44	0.09~0.55
储量( $10^6 \text{ m}^3/\text{井}$ )	5.66~33.98	4.25~16.99	4.25~16.99	14.16~42.48	16.99~56.63
生产区	密歇根州 Otsego 郡	肯塔基州 Pike 郡	印地安纳州 Harrison 郡	得克萨斯州 Wise 郡	新墨西哥州 San 和 Rio Aceiba 郡

注:1 psi=6.895 kPa。

上的页岩披覆作用相关<sup>[14]</sup>。然而,近来 Bowker 在 Fort Worth 盆地的 Barnett 页岩的研究工作,对天然和诱导裂缝与页岩气生产之间的关系有了新的认识:天然开启的裂缝是 Barnett 页岩研究者中最有争议的问题,在开始研究 Barnett 页岩时,许多人包括 Boewker 本人,都认为开启的天然裂缝对 Barnett 页岩气的生产是关键的,事实上,假如在 Barnett 页岩中存在大量开启的裂缝,目前在这套储层中被保存的天然气的规模要小得多。天然裂缝的存在会导致大量天然气排出并运移至上覆岩层,这将减少 Barnett 页岩的孔隙压力和天然气的储量,如果存在大量开启的天然裂缝,Barnett 页岩就不会有超压<sup>[15]</sup>。

最初进入 Barnett 页岩勘探的许多经营公司(包括 Mitchell 公司和雪佛龙公司)勘探开发的策略都是测试断层附近的 Barnett 页岩,他们认为在断层附近,天然裂缝的密度高,地层的渗透性也高,的确如此,但是这些裂缝统统被胶结物(通常是方解石)封堵。在 Barnett 页岩气的勘探中,地质学家和工程师

花了 2~3 a 的时间认识到开启的裂缝对 Barnett 页岩气的产能是无关紧要的,之所以无关紧要,是因为不存在开启的天然裂缝,这并不是说 Barnett 页岩中天然裂缝不发育,它们的数量还是比较多的,只是因胶结而被封堵。Bowker 认为,因胶结而封闭的裂缝是力学上的薄弱环节,它增加了压裂处理的有效性。因此他认为,扩散作用和岩石破裂能力的共同作用是 Barnett 页岩成藏带成功储集天然气的关键。Barnett 页岩不是裂缝性页岩层带,而是一个能够压裂的页岩层带<sup>[15]</sup>。

## 2 Barnett 页岩气生产史的启示

图 4 展示了 Nework East (Barnett 页岩气)气田生产历史。该气田是美国第二大气田,受到世界的广泛关注。从图中可以看出,在 1999 年,该气田产量大幅度增长,为什么天然气的产量在开采了 17 a 之后又突然大幅度上升? 原因有两个:其一是人们发现实际的天然气地质储量是以前估计的 4 倍,其

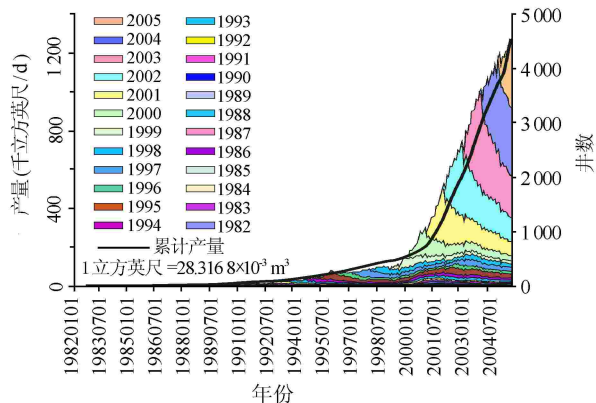


图 4 Nework East (Barnett 页岩气) 气田产量曲线图  
(数据截至 2005 年 9 月)

(数据来自 the Texas Railroad Commission, 2005 年)

注:不同颜色表示在不同年份完成气井的产量

二是水力压裂技术在这个成藏层带得到了成功应用(压裂液为水、降阻剂、杀菌剂、防垢剂和低含量支撑剂),大大降低了生产成本。

在 20 世纪 80 年代以前, Fort worth 盆地的 Barnett 页岩并不是勘探目的层。相反,勘探主要集中在宾夕法尼亚系的碎屑岩和碳酸盐岩等常规储层, Barnett 页岩的大量天然气显示和意外的小规模产量,引起了 Mitchell 公司的勘探兴趣,尤其是雪弗龙公司在煤层甲烷气评价技术的基础上,在该区进行罐解吸和吸附等温线的研究工作,重新评估了该区的天然气地质储量<sup>[16]</sup>,坚定了 Mitchell 能源公司在页岩层中寻找非常规天然气的信心。开始的气井产量大多数不具有经济价值,在 1981~1990 年期间仅完钻了 100 口井,该公司将主要的精力集中在如何更有效地在 Barnett 页岩中完井,以及如何提高采收率。到 1998 年在完井技术上取得了重大突破,用水基液压裂代替了凝胶压裂,在采用水基压裂液技术后,对该气田较老的 Barnett 页岩气井(特别是 1990 年底以前完成的气井)重新实施了增产措施。因此极大地提高了采收率,增幅有时可达 2 倍或更高,在很多情况下对老井重新采取增产措施可使产量超过初始产量,增产措施在某些不具经济价值的井也获得了成功。目前所有的 Barnett 气井在生产几年后都要进行例行的重新处理,多次重新完井的情况也很普遍。

从 2002 年开始, Devon 能源公司开始钻探实验水平井。这些井都获得了极大成功,这促使人们改变了钻井方式,即水平井技术的广泛应用,使 Barnett 页岩气产量出现了稳步增长的大好局面<sup>[3]</sup>(见图 4)。同时他们开始实验一种新的称为“simo-frac”

的钻井模式,即钻探 2 口水平井,间隔 152~305 m,并且同时压裂两口井<sup>[16]</sup>。

Barnett 页岩气生产历史给我们的启示是:页岩气作为一种非常规气藏是客观存在的,其能否合理地开发利用,很大程度上取决于技术的进步:一方面评价技术的发展使人们更加了解 Barnett 页岩的储集特征,从而对于页岩气的地质储量的评估更客观,另一方面钻井技术的进步在开采 Barnett 页岩气的历史中起到了关键作用。针对页岩的储层特征采取压裂和钻井方式在该区获得良好的效果。

### 3 结论

以吸附、游离和溶解状态赋存于泥页岩中的天然气与常规天然气相比,其气藏的特点是页岩既是源岩,又是储层和封盖层。美国页岩气勘探的巨大成功,大大地拓宽了天然气勘探的空间。勘探目标的选择不仅仅局限在常规的砂岩和碳酸盐地层,在泥页岩地层中也展现了广阔的勘探前景。

页岩气有机成因来源种类多,即有生物气、未熟—低熟气、热解气,又有原油、沥青裂解气。页岩演化和各个阶段均有可能形成具备商业价值的页岩气藏,但高演化阶段页岩气藏的规模更大。目前发现的具有商业价值的页岩气藏有机质类型以 I—II 型为主,页岩中有机质丰度与页岩气产能之间有着良好的线性关系。但是页岩孔隙中的含水量和矿物组成的变化会影响这种线性关系。页岩中的矿物成分以黏土、石英、方解石为主,其相对组成的变化影响岩石力学性质、孔隙结构和对气体的吸附能力。天然和诱导裂缝与页岩气产能关系研究发现,天然开启的裂缝在页岩中并不常见,而因胶结而封堵的裂缝,是力学上的薄弱带,容易在压裂中破裂,能够压裂的页岩带才是页岩成藏带成功储集天然气的关键。Barnett 页岩气生产历史证明,页岩气地质储量评价方法的进步、针对页岩储层采取的有效压裂方式和钻井技术的进步在成功开采 Barnett 页岩气的过程中发挥了关键作用。

### 参 考 文 献

- [1] RONALD J H, DANIEL M J, JOHN ZIMBERGE, et al. Oil and gas geochemistry and petroleum systems of the Fort Worth Basin[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 445-473.
- [2] CURTIS J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.

- [3] RICHARD M P. 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.
- [4] 戴金星. 我国天然气资源及其前景[J]. 天然气工业, 1999, 19(1): 3-6.
- [5] 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): 466-466.
- [6] 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.
- [7] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国天然气勘探的两个重要领域[J]. 天然气工业, 2007, 27(11): 1-11.
- [8] DANIEL M J, RONALD J H, TIM E R, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [9] RONALD J H, ETUAN Z, BARRY J K, et al. Modeling of gas generation from the Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 501-521.
- [10] DANIEL J K ROSS, R MARC BUSTIN. Sediment geochemistry of the lower Jurassic Gordondale member, northeastern British Columbia [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2006, 54(4): 337-365.
- [11] JARVIE D. Evaluation of hydrocarbon generation and storage in the Barnett shale, Fort Worth basin, Texas [R]. Texas: Humble geochemical services Division, 2004.
- [12] DANIEL J K ROSS, R MARC BUSTIN. Shale gas potential of the Lower Jurassic Gordondale Member, northeastern British Columbia, Canada [J]. AAPG Bulletin, 2007, 55(1): 51-75.
- [13] BOWKER K A. Recent development of the Barnett Shale play, Fort Worth basin [J]. West Texas Geological Society Bulletin, 2003, 42(6): 1-11.
- [14] HASSENMUELLER N R, ZUPPARRI C W. Exploratory drilling in the New Albany Shale in Southern Indiana; Petroleum Technology Transfer Council and Illinois State Geological Survey Website Summary [EB/OL]. <http://www.isgs.uiuc.edu/isgsroot/oilgas/nablban.html>.
- [15] BOWKER K A. Barnett shale gas production Fort Worth basin: Issues and discussion [J]. AAPG Bulletin, 2007, 55(1): 523-533.
- [16] DAVID F MARTINEAU. History of the Newark East field and the Barnett shale as a gas reservoir [J]. AAPG Bulletin, 2007, 55(1): 399-403.

(修改回稿日期 2008-11-05 编辑 罗冬梅)