

页岩气及其聚集机理研究

白兆华 时保宏 左学敏

西安石油大学油气资源学院 陕西 西安 710065

摘要:

页岩气是非常规天然气资源勘探的重要领域,掌握其地质理论是进行页岩气开采的基础。国内学者做了中美页岩气聚集机理条件及地质条件相似性对比研究,对国外页岩气地质理论进行了总结,发现我国页岩气聚集地质条件优越,形成了对页岩气的生成、运移、聚集和成藏等方面的初步认识;页岩气成藏体现出了非常复杂的多机理递变特点,具有自生自储的成藏特征;控制页岩气成藏的主要因素有:总有机碳含量、有机质成熟度、岩石矿物成分、地层压力、温度、优质泥页岩厚度和分布面积等。分析研究页岩气成藏特征,形成聚集机理与富集规律,有助于更好地评价和开发我国的页岩气资源。

关键词:

页岩气;地质特征;成藏机理;赋存状态

文献标识码:A

文章编号:1006-5539(2011)03-0054-04

0 前言

页岩气是指以吸附或游离状态存在于低孔、低渗、富有机质暗色泥页岩或高碳泥页岩中的天然气,可以生成于有机成因的各种阶段。主体上以吸附状态存在于干酪根、粘土颗粒及孔隙表面,以游离状态存在于裂缝、孔隙及其他储集空间,极少量以溶解状态储存于干酪根、沥青质及石油中^[1]。

1 页岩气资源前景

据预测,世界页岩气资源量为 $456.24 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[2],主要分布区域为:北美、中亚和中国、中东和北非、拉丁美洲、苏联等地区^[3],见表 1。世界常规天然气资源量 $421 \times 10^{12} \text{ m}^3$,从目前的预测数据来看页岩气的资源潜力甚至还可能明显大于常规天然气。

世界上的页岩气资源研究和勘探开发最早始于美国,1821 年,第一口页岩气井钻于美国东部^[4],20 世

表1 世界主要地区页岩气储量表^[3]

地区或国家	页岩气储量 / 10^{12} m^3
北美	108.79
拉丁美洲	59.95
西欧	14.44
中欧或东欧	1.10
苏联	17.75
中东和北非	72.15
非洲沙哈拉地区	7.76
中亚和中国	99.90
太平洋(经济合作和发展组织)	65.50
亚太其他地区	8.89
南亚	0
世界	456.24

纪 20 年代步入规模生产,70 年代页岩气勘探开发扩展到美国中西部地区,进入 90 年代,由于开发技术的

收稿日期:

2011-10-13

作者简介:

白兆华(1984-),男,河北石家庄人,在读硕士研究生,研究方向为油气成藏地质学。

进步和政策、价格等因素的推动,页岩气已成为重要的勘探开发领域和目标^[5]。当前页岩气规模开发的两个主要国家是美国和加拿大,2009 年美国页岩气的产量接近于 $1\,000\times 10^8\text{ m}^3$ 。由于页岩气的快速勘探开发使美国天然气储量增加了 40%,业内有学者认为 2010 年页岩气产量占全美天然气产量的 15%以上。

据专家估算,我国页岩气可采资源量约为 $26\times 10^{12}\text{ m}^3$,与美国页岩气储量大致相当^[6]。我国的四川、鄂尔多斯、渤海湾、松辽、江汉、吐哈、塔里木和准葛尔等含油气盆地是页岩气的主要分布区域,分布面积 $300\times 10^4\text{ km}^2$,其中海陆交互相沉积 $200\times 10^4\text{ km}^2$ 。既有有机质丰富的中、新生界陆相页岩,也有有机质含量高的古生界海相页岩、海陆交互相页岩。在油气和煤炭勘探中,已在含油气盆地及盆地外的沉积地层中多处发现页岩气显示,甚至在固体矿产勘探时也有显示。对比我国与美国页岩气的地质条件有许多相似之处,页岩气富集地质条件优越。有学者认为川南、川

东、渝东南、黔北及鄂西等上扬子地区是我国页岩气主要远景区。以四川盆地为例,仅评价的寒武系和志留系两套页岩,页岩气资源量相当于该盆地常规天然气资源量的 1.5~2.5 倍^[7]。我国页岩气资源勘探开发前景很好,具有加快勘探开发的巨大资源基础。

2 关于页岩气地质要素

页岩气作为一种新型的非常规天然气,其特征变化较大。既不同于常规的天然气藏,也不同于已发现的煤层气和根源气,见表 2^[4,8-10]。普遍发育且分布广泛的页岩气,要形成有工业勘探开发价值的页岩气藏(田)尚需具备相应的地质条件。

2.1 厚度及埋深

页岩气的工业聚集需要页岩有足够的厚度与埋深。有学者认为页岩的厚度一般在 91.5~183 m 之间^[11],沉积厚度是保证足够的有机质和储集空间的前提条件。页岩的厚度越大,越能增强其封盖能力,越有利于

表2 美国含气页岩主要特征

盆地	阿巴拉契亚	密执安	伊利诺斯	福特沃斯	圣胡安
页岩名称	Ohio	Antrim	New Albany	Barnett	Lewis
时代	泥盆纪	泥盆纪	泥盆纪	早石炭世	早白垩世
气体成因	热解气	生物气	热解气 生物气	热解气	热解气
埋藏深度 /m	610~1 524	183~730	183~1 494	1 981~2 591	914~1 829
厚度 /m	91~610	49	31~140	61~152	152~579
干酪根类型					为主,少量
有机碳含量 /(%)	0.5~23	0.3~24	1~25	1~13	0.45~3
镜质体反射率 /(%)	0.4~4	0.4~0.6	0.4~0.8	1.0~2.1	1.6~1.88
含气量 / $\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$	1.7~2.83	1.13~2.83	1.13~2.64	8.49~9.91	0.37~1.27
吸附气含量 /(%)	50	70	40~60	40~60	60~88
甲烷含量 /(%)	80~95	—	72~76	77~93	—
总孔隙度 /(%)	2~11	2~10	5~15	1~6	0.5~5.5
渗透率 / $10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$	<0.1	<0.1	<0.1	0.01	<0.1
底层压力系数	0.35~0.92	0.81	0.99	0.99~1.02	0.46~0.58
压力梯度	—	—	4.84	12.21	4.97

注:据文献 Curtis, 2002; Hill et al, 2002; Montgomery, 2005; Bustin, 2005; Bowker, 2007 等,数据由英制单位换算

气体的保存。研究表明^[12],美国页岩气盆地泥盆纪页岩与更老的岩石在抬升到现在的海拔之前经历过一定程度的深埋藏,正是由于其构造演化史才创造了能够储集经济可采的油气圈闭机理和有机质大量生气的环境。从美国有关资料来看,页岩气储层的埋藏深度范围比较大,埋藏深度从最浅 76 m 到最深 2 439 m,主要介于 762~1 372 m 之间^[11]。

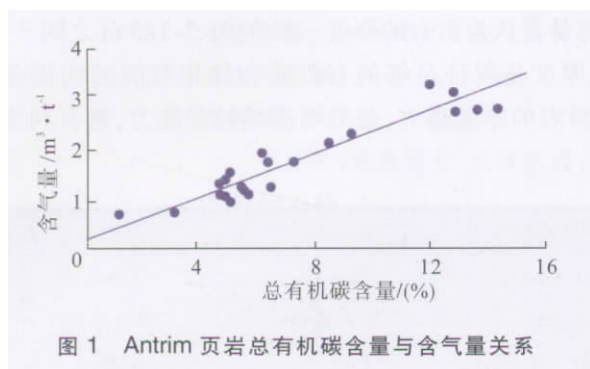
2.2 干酪根类型

I 型和 II 型干酪根主要以生油为主, III 型干酪根主要以生气为主。由于不同干酪根的化学组成与结构特征具有显著差别,因而不同阶段产气率会有较大变化。在实验条件下(据赵文智等,2006),不同升温速率有机质的成气转化基本一致,但主要生气期(天然气的生成量占总生气量的 70%~80%)对应的 R_o 值不

同。I型干酪根主要生气期的 R_o 值为1.2%~2.3%，型干酪根主要生气期的 R_o 值为1.1%~2.6%，型干酪根主要生气期的 R_o 值为0.7%~2.0%，海相石油裂解成气的 R_o 值为1.5%~3.5%^[13]。

2.3 有机质含量

有机质含量决定着生烃的多少，是生烃强度的主要影响因素。页岩中的有机物质可以将其作为母源生成的页岩气吸附在其表面，它对气体的吸附能力与页岩中总有机碳含量之间存在着线性关系。研究表明：在相同压力下，总有机碳含量较低的页岩比其含量较高的页岩的甲烷吸附量明显要低。在对Antrim页岩总有机碳含量与含气量关系的研究中发现，二者呈密切的正相关关系，见图1，说明含气量主要取决于其总有机碳含量^[14]。



2.4 成熟度

研究发现，含气页岩的热成熟度越高页岩中赋存的气体也越多，表明其热成熟度越高生气量越大。成熟低的Barnett页岩位置，产气速率就比较低，其原因可能是由于生成的气体量少或者是孔隙喉道被残留的液态烃堵塞造成的。另据调研资料发现页岩中能够被吸附在有机物质表面的天然气量也受干酪根的热成熟度影响。此外，随着演化程度的增高，烃类气体生成导致地层压力的增大也可以提高页岩对气体的吸附能力。当地层压力升高到一定程度时，地层中微裂缝的生成也是页岩气赋存的良好储集空间。因此，热成熟度是评价可能的高产页岩气的关键地球化学参数。

2.5 地层压力

页岩层中吸附气量的大小也受地层压力大小的影响。研究表明，地层压力与吸附气存在正相关性，地层压力越大，其吸附能力也越大，吸附气含量也越高。一些学者认为，不同地区由于有机质含量、产气量和周围围岩封存能力的不同，压力梯度也会产生差异；另据统计，页岩气藏的地层压力系数可有较大幅度变化^[15]。

3 关于页岩气聚集机理

许多学者认为，页岩气成藏机理具有明显的“混合型”特征。在页岩中，页岩气的赋存状态多种多样。大部分均以吸附状态赋存于岩石颗粒和有机质表面，或以游离状态赋存于孔隙和裂缝之中，还有极少量的溶解状态页岩气存在。

张金川对页岩气成藏特征进行了深入研究^[15-18]，他认为：页岩气是在干酪根及粘土颗粒表面上以吸附状态存在，是在页岩孔隙及天然裂缝中以游离方式存在，甚至是在干酪根及沥青质中以溶解状态存在的天然气。在成藏分布上具有运移距离短、聚集成藏隐蔽、多种封闭机理、地层饱含气等地质特殊性。由于其地质特殊性，页岩气又是主体上以吸附和游离状态同时赋存于高碳泥/页岩、暗色泥/页岩及其间夹层状发育的砂岩有效储层中，以自生自储为成藏特点的天然气聚集。因此，页岩气的自生自储、吸附作用机理及其大规模聚集是页岩气的重要地质特点。

张金川等对页岩气成藏机理也进行了全面分析^[15]，认为：在页岩气的成藏过程中，天然气的含气丰度与富集程度逐渐增加，赋存方式与成藏类型逐渐改变；页岩气聚集成藏具有复杂多机理递变特点，兼具煤层吸附气和常规圈闭气藏特征；页岩气的成藏条件与成藏机理变化对其成藏与分布产生了控制和影响作用；页岩中裂缝发育状况与岩性特征变化对其气藏中天然气的分布规律及赋存特征具有控制作用。

业内学者认为页岩气成藏与演化可分为三个主要过程^[15,19]：第一阶段页岩气的吸附与聚集。发生在成藏初期由于生物作用所产生的天然气，吸附在有机质和岩石颗粒表面，总体含气量有限，其气藏分布限于页岩内部且以吸附状态为主要赋存方式。第二阶段膨胀造隙富集。此阶段类似于深盆地成藏，天然气的生成作用主要来源于热化学能的转化，有机质大量裂解生气。在相对密闭的系统中，天然气的大量生成作用使原有的地层压力得到不断提高，从而产生原始的高异常地层压力，即“高压锅”原理^[17]。高异常地层压力，导致页岩内部沿应力集中面、岩性接触过渡面或脆性薄弱面产生裂缝，此时页岩气以游离相为主聚集成藏。第三阶段活塞式推进或置换式运移的机理序列。随着页岩气生气过程的继续，越来越多的游离相天然气无法全部保留于页岩内部，在地层中逐渐形成高压，页岩气在裂缝中以游离态运移聚集。由于页岩孔隙及微裂缝孔喉细小，具有低孔低渗特点，因此页岩气的运移方式具有活塞式排水特点，这种气水排驱方

式开始于页岩,从而在页岩边缘以活塞式推进方式产生页岩气运聚。

含气页岩多显示出低的孔隙度^[12](一般<10%),低的渗透率^[3,17](小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),成藏过程中吸附机理和活塞式运聚机理共同作用,控制着页岩气藏中吸附状态与游离状态页岩气比例的变化。吸附状天然气的赋存与有机质含量密切相关^[20],与游离状天然气含量之间呈彼此消长关系,一般前者天然气的含量变化在20%~85%之间^[21]。

4 结论与认识

页岩气是指主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中,以吸附或游离状态为主要存在方式的天然气聚集。页岩气自生自储的成藏特征,在理论上与圈闭无关,因此成藏研究的主要矛盾不再是通常的运移、圈闭、生储盖时空配置的常规问题。相反,吸附作用、含气量等问题则构成了该类气藏勘探认识的主要矛盾。页岩气成藏与演化可分为三个主要的作用过程,自身构成了从吸附聚集、膨胀造隙富集到活塞式推进或置换式运移的机理序列。

全球页岩气资源丰富,具有巨大的开发潜力,主要分布在北美、中亚、中国。美国率先进行页岩气的勘探开发,其页岩气藏的成功开发为世界页岩气藏的勘探开发积累了大量的理论基础和丰富的经验。近两年来,国内页岩气的研究和勘探工作逐渐得到国家和石油公司的重视。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Kent Perry, John Lee. Unconventional Gas Reservoirs—Tight Gas, Coal Seams, and Shale. Working Document of the NPC Global Oil and Gas Study[R]. Made Available July 18, 2007.
- [3] 江怀友,宋新民,安晓璇,等.世界页岩气资源与勘探开发技术综述[J].天然气技术,2008,2(12):26–30.
- [4] Curtis J B. Fractured Shale—gas Systems [J]. AAPG Bulletin, 2002,86(11):1921–1938.
- [5] 李武广,杨胜来,殷丹丹,等.页岩气开发技术与策略综述[J].天然气与石油,2011,29(1),34–37.
- [6] 张鸿翔.页岩气:全球油气资源开发的新亮点——我国页岩气开发的现状与关键问题[J].中国科学院院刊,2010,25(4):406–410.
- [7] 高慧丽.唤醒沉睡的页岩气[J].山东国土资源,2010,26(4):60–61.
- [8] Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, North-central Texas: Gas-shale Play with Multi-trillion Cubic Foot Potential [J]. AAPG Bulletin, 2005,89(2):155–175.
- [9] Bustin R M. Gas Shale tapped for Big Pay [J]. AAPG Explorer, 2005,26(2):5–7.
- [10] Bowker K A. Barnett Shale Gas Production, Fort Worth Basin: Issues and discussion [J]. AAPG Bulletin, 2007,91(4):523–533.
- [11] James W Schmoker. Resource-assessment Perspectives for Unconventional Gas Systems [J]. AAPG Bulletin, 2002,86(11):1993–1999.
- [12] 蒲泊伶,包书景,王毅,等.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(5):33–36.
- [13] 赵文智,邹才能,宋岩,等.石油地质理论与方法进展[M].北京:石油工业出版社,1996.132–134.
- [14] 樊明珠,王树华.高变质煤区的煤层气可采性[J].石油勘探与开发,1997,24(2):87–90.
- [15] 张金川,金之钧,袁明生,等.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业,2004,24(2):15–18.
- [16] 张金川,汪宗余,聂海宽,等.页岩气及其勘探研究意义[J].现代地质,2008,22(4):640–645.
- [17] 聂海宽,张金川,张培先,等.福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏特征启示[J].地质科技情报,2008,28(2):87–93.
- [18] 张金川.深盆地气成藏及分布预测[D].北京:中国地质大学,2001.
- [19] 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,(3):20–23.
- [20] Milici R C. Autogenic Gas (self sourced) from Shales—an Example from the Appalachian basin. in: Howell D G, ed, the Future of Energy Gases: U S Geological Survey Professional Paper 1570:253–278.
- [21] Sott L, Montgomery, Daniel M, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth basin, north-central Texas: Gas-shale Play with Multi-trillion Cubic Foot Potential [J]. AAPG Bulletin, 2005,89(2):155–175.

profiles and the characteristics are more obvious and the response is more clear. Finally, it is confirmed through drilling that fracture development zones are real in the areas, which shows that the coherence analysis is an effective, reliable and scientific method for identifying and predicting fracture development zones.

KEYWORDS: Crack; Forward modeling; Geological model; Seismic model; Seismic Response; Coherence analysis

Study on Shale Gas and its Aggregation Mechanism

Bai Zhaohua, Shi Baohong, Zuo Xuemin (Xi'an Petroleum University Oil and Gas Resources Institute, Xi'an, Shaanxi, 710065, China) **NGO, 2011, 29 (3):54–57**

ABSTRACT: Shale gas exploration and development is very important in the unconventional natural gas exploration and development field and to know well its geological theory is an important foundation for its exploration and development. Researchers in China have carried out comparative studies on the similarity of shale gas gathering mechanism conditions and geological conditions in China and America and summarized foreign shale gas geology theories. They point out that good geology conditions for shale gas gathering exist in China and such initial common view on shale gas generation, migration and accumulation conditions has been formed as that shale gas generation and accumulation reflects very complicated multiple-mechanism alternation characteristics and has features of self-generation and self-accumulation. Main factors for controlling shale gas accumulation includes total organic carbon content, organic matter maturity, rock mineral composition, formation pressure and temperature, high quality clay shale thickness and distribution area, etc. Analytical investigation on shale gas accumulation features, generation and accumulation mechanism and enrichment regularity is conducive to better evaluate and develop shale gas resources in China.

KEYWORDS: Shale gas; Geologic feature; Accumulation mechanism; Reservoir state

CORROSION AND CORROSION PROTECTION

Application of Duplex Stainless Steel in Oil and Gas Industry

Jiang Fang, Cao Xiaoyan, Shi Daiyan (China Petroleum Engineering Co., Ltd. Southwest Company, Chengdu, 610017, China)

Yang Guang, Chen Caohui (PetroChina Tarim Oil Field Company, Kurla, Xinjiang, 841000, China) **NGO, 2011, 29 (3):58–60**

ABSTRACT: KL2 Gas Field is a large CO₂ condensate gas field with high output and its gas gathering and transportation pipelines suffer severe CO₂ corrosion. Duplex stainless steel is used in the gas field development, since this kind of material is used largely for the first time in China's condensate gas field development, its technical requirements are very important for safe application. Based on relative requirements in codes, standards and specifications followed in the gas field surface engineering design and combined with technical features of this project, additional technical requirements are put forward for steel pipes, fittings and clad steel plates made of duplex stainless steel. Special examination requirement in these additional technical requirements includes stress corrosion test being able to bear or endure environment conditions at site and detrimental intermetallic phase test being able to control fabrication quality, in which method B and C in ASTM A 923 is adopted respectively for impact toughness test and ferric chloride solution pitting corrosion test. The gas field has been developed for 6 years successfully, which has proved that these special technical requirements for duplex stainless steel have good effects for the project and are suitable to similar projects.

KEYWORDS: Duplex stainless steel; Test; Intermetallic phase

Moulding Process for Pipe-in-Pipe of Polyurethane Insulation Pipe and its Quality Control

Jiang Linlin, Han Wenli, Zhang Honglei, Wang Wei (CNPC Engineering Institute of Technology, Tanggu, Tianjin, 300451, China) **NGO, 2011, 29 (3):61–63**

ABSTRACT: Directly berried insulated pipelines with large diameter are of underground facilities. After these pipelines are put into operation, their inspection and maintenance are very difficult and the costs for inspection and maintenance are also very high, so quality of the pipelines is one of the key factors affecting overall construction