

页岩气储集特征及赋存量实验研究

王本强¹, 梁旭升¹, 刘琦¹, 吕乐², 郝越翔¹, 李亚军³

1 中国石油川庆钻探工程有限公司; 2 中国石油西南油气田公司; 3 中国石油大学(华东)

摘要 基于页岩无机孔隙和有机孔隙润湿性和孔径的差异,考虑甲烷、氮气、水在页岩无机孔隙和有机孔隙中储集位置的不同,通过3种流体饱和实验建立了储层温度和压力条件下页岩气藏各赋存状态气体体积的实验测量和计算方法,得到页岩的无机孔隙度和有机孔隙度,并分析了页岩气储层含气量的影响因素。研究表明:对于所选岩样,无机孔隙和有机孔隙分别占总孔隙体积的65%和35%,无机孔隙中的游离气、有机孔隙中的游离气和吸附气分别平均占总含气量的51%、22%和27%;川南下志留统龙马溪组页岩具有较高的热演化程度,随总有机碳含量的增加,纳米级有机孔隙大量发育,为甲烷提供了吸附空间。明确了总有机碳含量主要影响吸附气含量,指出在页岩气资源量评价、产能预测和后期开发过程中,需要考虑有机质及其内部吸附气的影响。

关键词 页岩气;有机孔隙度;无机孔隙度;游离气含量;吸附气含量

中图分类号:TE135 **文献标识码**:A

0 前言

页岩气是从富有机质页岩中开采的天然气^[1-2],页岩气储层的岩石矿物成分复杂,岩石润湿性存在差异,孔隙多尺度特征明显,非均质性较强^[3-4]。根据页岩的矿物组成和润湿性的不同^[5],页岩孔隙可以分为无机孔隙和有机孔隙^[6]。页岩气的赋存状态可以分为3类:无机孔隙中的游离态气、有机孔隙中的游离态气和吸附态气^[7]。页岩储层中总含气量及3种赋存状态气体体积的准确测量涉及资源量评价和产能分析,游离气和吸附气的准确劈分可为高效开发页岩气藏提供关键基础数据。

目前,评价页岩气储层吸附气含量的实验方法主要是基于Langmuir吸附理论的等温吸附实验^[8-10],该实验是将一定目数的页岩岩样置于密闭容器中,在相同温度下测定不同压力条件下达到吸附平衡时的甲烷吸附量。由于实验过程中不能准确控制最终的吸附平衡压力,因此等温吸附实验很难直接测得地层压力条件下的吸附量,一般通过插值得到。此外,页岩气储层游离气和吸附气量的评价方法还有测井解释^[11-13]、现场解吸实验^[14]等方法。等温吸附实验不能同时测得游离气量和吸附气

量^[15];测井解释方法通过页岩物性参数拟合计算含气量,是一种间接的方法,其结果存在一定的误差,不能准确反映地层温度和地层压力条件下的含气量。

本文基于页岩气储集特征和气体赋存状态分析,建立了页岩储层3种赋存状态气体体积的测量和计算方法,在常规岩石物性参数(孔隙度和饱和度)的基础上,提出页岩非常规物性的表征参数:无机孔隙度、有机孔隙度、无机孔隙游离气饱和度、有机孔隙游离气饱和度和吸附气饱和度,结合页岩物性参数进行了含气量影响因素分析,为页岩气藏的储量和可动性评价提供了理论基础。

1 页岩气储集特征及赋存方式

页岩气储层矿物成分复杂,孔隙多尺度特征明显,气体储集空间和赋存方式多样,非均质性较强。根据页岩组成的不同,页岩孔隙可分为无机孔隙和有机孔隙:无机孔隙主要由石英、长石等无机矿物颗粒的粒间孔隙或粒内孔隙组成,孔隙尺度以微米级为主,孔隙表面具有水湿特性,甲烷气体以游离态赋存在无机孔隙和层理缝中;有机孔隙主要是存在于以干酪根为主的有机质颗粒内部,多为纳米级

收稿日期:2022-08-09;改回日期:2022-11-16

本文受中国石油川庆钻探工程公司科研项目“页岩微观储渗特征与纳米排驱提高采收率技术研究”(编号:CQCJ-2021-05)资助

第一作者:王本强,硕士研究生,工程师,2014年毕业于西南石油大学,现主要从事油气田开发研究工作。通信地址:610056 四川省成都市成华区猛追湾街6号;E-mail:wangbq_cqyyq@cnpc.com.cn

孔隙,具有较高的微孔隙体积和比表面积,孔隙表面具有油湿特性,甲烷分别以游离态和吸附态赋存于有机孔隙内和孔隙壁面上。

无机矿物内部的无机孔隙与有机质内部的有机孔隙在尺寸、体积、润湿性上各有不同,使得气体在不同孔隙中的赋存状态、储集量和流动性也存在较大差别。甲烷主要以游离态和吸附态两种状态赋存于页岩储层中,其中游离态甲烷赋存于无机孔隙和有机孔隙内部,吸附态甲烷赋存于有机孔隙的内壁面上。因此,页岩气的赋存状态可分为3类:无机孔隙游离气、有机孔隙游离气和吸附气。页岩储层总含气量及3种赋存状态气体体积的准确测量涉及页岩气藏资源量评价和产能分析,同时可为高效开发页岩气藏提供关键基础数据。

基于页岩气藏的储集特征,分别定义无机孔隙度和有机孔隙度来表示不同类型的孔隙度,无机孔隙度和有机孔隙度之和为页岩的总孔隙度。页岩气饱和度可以分为无机孔隙游离气饱和度、有机孔隙游离气饱和度、吸附气饱和度,这3种饱和度之和归一为百分之百。无机孔隙游离气饱和度与无机孔隙度相对应,有机孔隙游离气饱和度与有机孔隙

度相对应。与常规孔隙度、饱和度的定义不同,由于页岩中吸附气的存在,页岩总饱和度和总孔隙度的涵盖范围存在区别,页岩的总气体体积高于其孔隙体积。页岩孔隙度和饱和度的分类及相互关系如图1所示。

$$\text{总饱和度} \left\{ \begin{array}{l} \text{无机孔隙游离气饱和度} \Leftrightarrow \text{无机孔隙度} \\ \text{有机孔隙游离气饱和度} \Leftrightarrow \text{有机孔隙度} \\ \text{吸附气饱和度} \end{array} \right\} \text{总孔隙度}$$

图1 页岩气储集空间物性参数分类

Fig. 1 Classification of physical property parameters of shale gas storage space

2 页岩气赋存量测试原理

水相和气相的润湿性质不同,不同流体(氦气、水和甲烷)在相同温度和压力条件下分别饱和并进入页岩岩样中,不同流体在页岩孔隙中的储集位置不同,以此来区别各赋存状态流体的含量,建立页岩气各赋存状态体积的测试原理。本文采用矿化度为5%的KCl水溶液,针对含有有机质页岩储层(无机矿物为水湿且无机孔隙尺寸较大,有机质为油湿且有机孔隙多为纳米级孔隙,如图2a所示),根据流体对固体表面的润湿规律,建立如下3条准则:

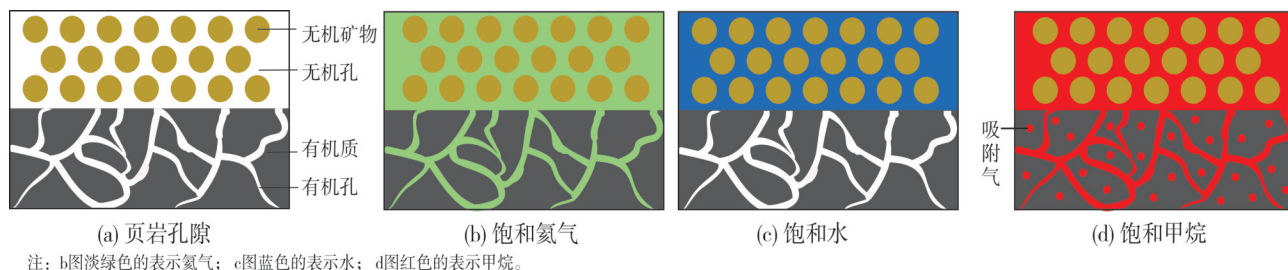


图2 页岩孔隙及不同流体赋存状态示意图

Fig. 2 Schematic diagram of shale pores and different fluid occurrence states

(1) 氦气分子体积较小,在页岩孔隙表面几乎不发生吸附,能够进入页岩所有的有效孔隙中,因此饱和进入页岩岩心中的氦气体积即为页岩总孔隙体积(如图2b所示)。

(2) 水相可以通过加压渗吸作用进入水湿性的无机孔隙,但由于有机孔隙的亲油性且有机孔隙多为纳米级孔隙,因此在实验压差范围内,水相不能进入有机孔隙,故饱和进入页岩岩心的水相体积为无机孔隙体积(如图2c所示)。

(3) 甲烷既可以进入无机孔隙,也可以进入有机孔隙,且甲烷会以吸附态存在于有机颗粒表面,

因此饱和进入页岩岩心的甲烷体积为有效孔隙体积和吸附气体积之和,即总含气量(如图2d所示)。

根据页岩储层孔隙度和饱和度分类方法以及各参数之间的关系(图1)可知:页岩中饱和水的体积为无机孔隙的体积;饱和甲烷和水的体积差为页岩有机质中甲烷的含量,有机质中的甲烷包括有机孔隙游离气和吸附气;通过相同温度压力下饱和甲烷和氦气的体积差可以得到页岩中吸附态甲烷的含量;将有机质中总甲烷含量减去吸附气体积,即为有机孔隙游离气的体积,通过气体状态方程即可得到有机孔隙体积。结合页岩的表观体积,可得到

页岩的有机孔隙度和无机孔隙度。

3 页岩气赋存量实验测试和分析方法

3.1 实验装置及实验流程

通过流体饱和法,使氦气、水、甲烷在相同条件下分别饱和进入页岩的岩样中,基于真实气体状态方程和体积计算,测量所需温度和压力条件下的页岩气储层中的无机孔隙游离气、有机孔隙游离气和吸附气含量。根据上述的页岩气赋存量测试原理设计搭建实验测试装置,装置能够测量氦气、水、甲烷在页岩中的饱和量,并能够实现气体饱和平衡压力与地层压力一致,保证测试结果的有效性。装置如图3所示。

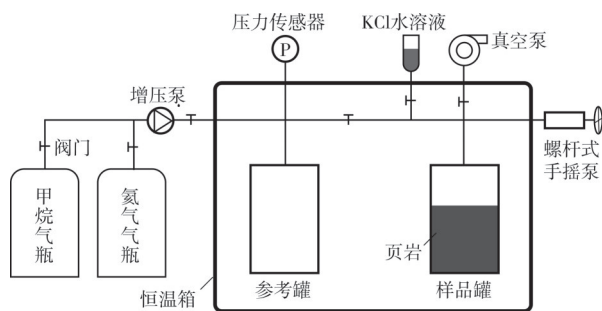


图3 页岩气赋存量测试装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of testing device for shale gas storage

具体的实验步骤为:

(1)实验准备:将恒温箱设定至测量所需的地层温度,将页岩的岩样装填进样品罐,进行密封性测试,对实验装置进行抽真空处理。

(2)气体饱和过程:通过增压泵将氦气或甲烷气体增压至设定压力,然后将增压后的气体注入参考罐,打开参考罐和样品罐之间的截止阀,开始气体饱和实验。

(3)调整压力:通过螺杆式手摇泵向样品罐中正向或反向补充气源,使最终平衡压力调整为测量所需的地层压力,通过螺杆式手摇泵的转盘转动角度计算进泵体积。

(4)气体饱和和量计算:根据真实气体状态方程和体积计算推导,得到页岩气储层的甲烷饱和量和氦气饱和量。

(5)水相饱和过程:对于相同页岩的岩样进行抽真空处理,在同等温度和压力向下向样品罐中饱和并注入矿化度为5%的KCl水溶液,计量水的饱和量。

该实验原理明确,方法简便易行,且能保证气

体饱和平衡压力与地层压力完全一致,以保证测试结果的可靠性;实验过程采用相同的页岩岩样和实验装置,减小因更换样品和拆装仪器产生的误差,提高测量精度。

3.2 页岩孔隙体积计算方法

根据氦气饱和实验结果,结合真实气体状态方程和体积计算推导,得到页岩岩样的总孔隙体积为:

$$V_p = V_b + \frac{z_{12}P_1}{z_{11}P_2} V_1 - V_2 - V_3 \quad (1)$$

根据水相饱和结果,页岩岩样的无机孔隙体积为:

$$V_{p1} = V_w - (V_2 - V_b) \quad (2)$$

相应的,可以得到有机孔隙体积为:

$$V_{p2} = V_p - V_{p1} = \left(\frac{z_{12}P_1}{z_{11}P_2} - 1 \right) V_1 - V_3 - V_w \quad (3)$$

式(1)-(3)中: P_1 —参考罐内初始压力,MPa; P_2 —氦气饱和平衡时样品罐最终平衡压力(即地层压力),MPa; V_1 —参考罐内体积(包含与参考罐相连的管线体积), cm^3 ; V_2 —样品罐内体积(包含与样品罐相连的管线体积), cm^3 ; V_3 —氦气饱和实验时螺杆式手摇泵的进泵体积(进泵为正值,退泵为负值), cm^3 ; V_b —页岩岩样的表观体积, cm^3 ; V_p —页岩岩样内部的孔隙体积, cm^3 ; V_{p1} —页岩岩样内部的无机孔隙体积, cm^3 ; V_{p2} —页岩岩样内部的有机孔隙体积, cm^3 ; V_w —水相饱和体积, cm^3 ; z_{11} —温度为 T 、压力为 P_1 时氦气的压缩因子,无量纲; z_{12} —温度为 T 、压力为 P_2 时氦气的压缩因子,无量纲; T —地层温度,K。

3.3 各赋存状态页岩气含量计算方法

根据甲烷饱和实验的结果,得到实验温度 T 、地层压力 P_2 条件下页岩岩样内部的游离甲烷气体体积,该甲烷体积即孔隙体积 V_p 。根据真实气体状态方程,换算成标准状况 T_0 和 P_0 下的游离甲烷气体体积为:

$$V_f = \frac{z_{20}P_2T_0}{z_{22}P_0T} V_p \quad (4)$$

根据无机孔隙和有机孔隙的测量结果,标准状况下无机孔隙游离气体体积为:

$$V_{f1} = V_f \frac{V_{p1}}{V_p} \quad (5)$$

标准状况下有机孔隙游离气体体积为:

$$V_{i2} = V_f \frac{V_{p2}}{V_p} \quad (6)$$

实验温度 T 、地层压力 P_2 条件下页岩岩样内部的吸附甲烷气体体积为:

$$V_{a1} = V_b + \frac{z_{22} P_1}{z_{21} P_2} V_i - V_1 - V_2 - V_p - V_4 \quad (7)$$

根据真实气体状态方程, 换算成标准状况 T_0 和 P_0 下的吸附甲烷气体体积为:

$$V_a = \frac{z_{20} P_2 T_0}{z_{22} P_0 T} V_{a1} \quad (8)$$

式(4)–(8)中: P_0 —标准状况的大气压, 0.101 325 MPa; T_0 —标准状况的温度, 273.15 K; T —地层温度, K; V_f —标准状况下页岩岩样内部的游离气含量, cm^3 ; V_{i1} —标准状况下页岩岩样内部的无机孔隙游离气含量, cm^3 ; V_{i2} —标准状况下页岩岩样内部的有机孔隙游离气含量, cm^3 ; V_{a1} —实验温度为 T 、压力为 P_2 时页岩岩样内部的吸附气含量, cm^3 ; V_a —标准状况下页岩岩样内部的吸附气体积, cm^3 ; V_4 —甲烷饱和实验时的螺杆式手摇泵的进泵体积(进泵时为正值,

退泵时为负值), cm^3 ; z_{20} —温度为 T_0 、压力为 P_0 时甲烷的压缩因子, 无量纲; z_{21} —温度为 T 、压力为 P_1 时甲烷的压缩因子, 无量纲; z_{22} —温度为 T 、压力为 P_2 时甲烷的压缩因子, 无量纲。

4 实验结果与分析

实验选取川南下志留统龙马溪组某区块的 19 块页岩岩样, 所选页岩岩样的石英含量为 50%~70%, 黏土矿物含量为 10%~20%, 碳酸盐矿物含量为 10%~20%, 镜质组反射率 R_o 介于 2.2%~2.6%。在地层温度和压力条件下开展氦气、甲烷和水的饱和实验, 得到无机孔隙、有机孔隙和各赋存状态的甲烷体积。为了进行相互对比, 所有实验结果转化成单位质量页岩在标准状况下的气体饱和和体积, 水相的饱和体积等效为相同实验温度、压力下的氦气体积, 再利用气体状态方程转化成标准状况下的气体体积。所测得的 19 块页岩的总有机碳含量 (TOC)、孔隙度、饱和实验结果、孔隙体积、各赋存状态甲烷体积的计算结果如表 1 所示。

表 1 页岩物性参数及含气量测试结果

Table 1 Testing results of physical properties and gas content of shale

编号	TOC/ %	孔隙度/ %	饱和含气量/($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)			孔隙体积/($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)			含气量/($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)		
			CH_4	He	H_2O	总孔隙 体积	无机 孔隙体积	有机 孔隙体积	无机孔隙 游离气	有机孔隙 游离气	吸附气
1	4.38	4.908	7.673	5.080	3.575	0.019 3	0.012 2	0.007 1	3.575	1.504	2.593
2	2.27	5.449	6.531	5.647	4.085	0.021 5	0.014 6	0.006 9	4.085	1.562	0.884
3	2.64	4.016	5.533	4.155	2.997	0.015 8	0.010 6	0.005 1	2.997	1.159	1.377
4	6.00	8.980	13.958	9.317	6.545	0.035 4	0.022 6	0.012 8	6.545	2.772	4.641
5	3.65	3.654	5.468	3.787	2.701	0.014 4	0.009 5	0.004 9	2.701	1.086	1.681
6	4.04	3.721	6.683	3.889	2.850	0.014 8	0.010 1	0.004 7	2.850	1.039	2.794
7	1.40	3.403	3.984	3.501	2.634	0.013 3	0.009 4	0.003 8	2.634	0.866	0.483
8	0.53	1.187	1.262	1.161	0.970	0.004 4	0.003 7	0.000 7	0.970	0.191	0.101
9	5.02	8.462	13.294	8.835	5.769	0.033 6	0.019 2	0.014 4	5.769	3.066	4.459
10	2.51	5.632	6.868	5.810	3.913	0.022 1	0.014 3	0.007 8	3.913	1.897	1.058
11	2.96	6.529	8.219	6.685	4.328	0.025 4	0.014 8	0.010 6	4.328	2.357	1.535
12	3.58	3.981	6.601	4.105	2.720	0.015 6	0.009 0	0.006 6	2.720	1.385	2.495
13	2.07	3.249	4.614	3.425	2.391	0.013 0	0.008 4	0.004 6	2.391	1.034	1.189
14	3.04	6.234	7.918	6.412	4.333	0.024 4	0.015 2	0.009 2	4.333	2.078	1.506
15	2.60	2.164	3.751	2.319	1.574	0.008 8	0.005 4	0.003 4	1.574	0.745	1.432
16	5.99	3.907	7.092	4.060	2.517	0.015 4	0.008 5	0.006 9	2.517	1.543	3.032
17	1.80	3.160	4.362	3.283	2.475	0.012 5	0.008 9	0.003 6	2.475	0.807	1.080
18	2.29	2.032	3.420	2.109	1.496	0.008 0	0.005 1	0.002 8	1.496	0.613	1.311
19	2.02	3.032	4.391	3.083	2.189	0.011 7	0.007 6	0.004 1	2.189	0.894	1.308

注: 实验温度 70 $^{\circ}\text{C}$, 实验压力 30 MPa。

为验证实验测量精度,绘制页岩孔隙度与氦气饱和和体积交会图。如图4所示,孔隙度与氦气体积基本呈线性关系,说明测量精度较高。

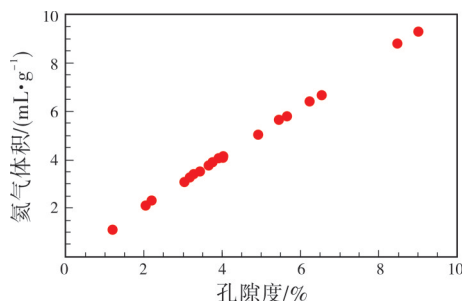


图4 页岩孔隙度与氦气体积交会图

Fig. 4 Crossplot of shale porosity and helium volume

从表1中可以看出,对于同一岩样,氦气、水、甲烷饱和量差别较大:甲烷饱和量最大,水饱和量最低。如图5所示,页岩中赋存的吸附气体积与总有机碳含量 TOC 成正相关关系:随着 TOC 的增加,吸附气体含量增加。当 TOC 较高时,吸附量增幅没有变缓,表明所选取的页岩具有较高的热演化程度。

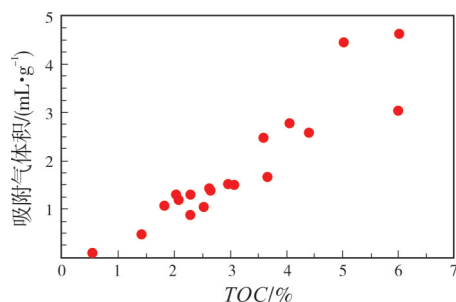


图5 页岩总有机碳含量与吸附气含量交会图

Fig. 5 Crossplot of TOC and adsorbed gas content in shale

基于实验测量的无机孔隙和有机孔隙体积,计算得到两类孔隙在总孔隙体积中的占比,绘制页岩总有机碳含量与无机/有机孔隙占比的交会图。如图6所示:随着 TOC 增加,有机孔隙体积占比增加,无机孔隙体积占比降低。对于本次实验所选岩心,无机孔隙体积占比为55%~83%,平均为65%,有机孔隙体积占比为17%~45%,平均为35%。

依据实验可以有效劈分页岩气储层中无机孔隙游离气、有机孔隙游离气和吸附气的含量。对于实验岩心,游离气体积占总含气量的57%~92%,平均为73%;无机孔隙游离气占比为35%~77%,平均为51%;有机孔隙游离气占比为15%~29%,平均为22%;吸附气体积占总含气量的8%~43%,平均为27%;有机质中饱和含气量(包括有机孔隙游离气和

吸附气)约占总含气量的23%~65%,平均为49%。页岩总有机碳含量与各赋存状态气体体积占比的关系如图7所示:随着 TOC 增加,页岩中吸附气占比增加,总游离气占比相应减少,其中无机孔隙游离气占比降低明显,而有机孔隙游离气占比变化不明显。这表明干酪根中发育有大量的纳米级孔隙,比表面积大,吸附能力强,干酪根为甲烷提供了主要吸附空间,但由于其孔隙尺寸主要为纳米级,孔隙空间增幅较小,因此有机质内部的游离气含量受 TOC 的影响不大。

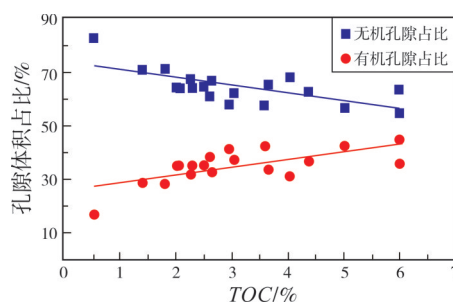


图6 页岩总有机碳含量与无机/有机孔隙占比交会图

Fig. 6 Crossplot of TOC and proportion of inorganic/organic pore volume in shale

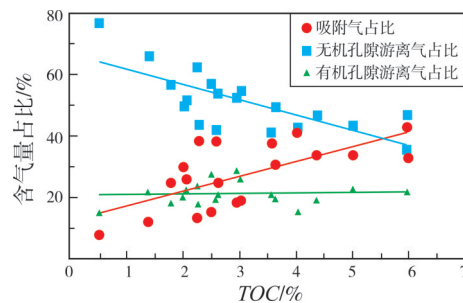


图7 页岩总有机碳含量与各赋存状态气体体积占比交会图

Fig. 7 Crossplot of TOC and gas volume proportion in each occurrence state in shale

5 结论

(1)基于甲烷、氦气、水在页岩无机孔隙和有机孔隙中赋存位置及赋存状态的不同,建立页岩含气量的实验测试与劈分方法,所建立的实验方法适用于富含有机质的泥页岩或煤岩储层的含气量测试,解决了常规测井以标定无机孔隙度和游离气储量为主的技术瓶颈,提高了地质储量计算精度。

(2)通过实验明晰了川南下志留统龙马溪组页岩各赋存状态气体的体积。对于所选岩样,在总孔隙体积中,无机孔隙体积平均占比为65%,有机孔

隙平均占比为35%;在总含气量中,游离气平均占比为73%,吸附气平均占比为27%,无机孔隙内部含气量占比为51%,有机孔隙内部含气量占比为49%。

(3)基于页岩气含气量细分实验结果,认为川南龙马溪组页岩具有较高的热演化程度,随总有机碳含量的增加,纳米级有机孔隙大量发育,为甲烷提供了吸附空间;与内比表面的增加相比,有机质孔隙体积增加有限,因此有机质内部的游离气含量受TOC的影响不大,总有机碳含量主要影响吸附气含量。在页岩气资源量评价、产能预测和后期的开发过程中,需要考虑有机质及其内部吸附气的影响。

参考文献

- [1] 邹才能,董大忠,王社教,等.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum exploration and development, 2010, 37(6): 641-653.
- [2] 王淑芬,董大忠,王玉满,等.四川盆地南部志留系龙马溪组富有机质页岩沉积环境的元素地球化学判别指标[J].海相油气地质,2014,19(3):27-34.
WANG Shufen, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Geochemistry evaluation index of redox-sensitive elements for depositional environments of Silurian Longmaxi organic-rich shale in the south of Sichuan Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2014, 19(3): 27-34.
- [3] 曹涛涛,宋之光,王思波,等.上扬子区古生界页岩的微观孔隙结构特征及其勘探启示[J].海相油气地质,2015,20(1):71-78.
CAO Taotao, SONG Zhiguang, WANG Sibao, et al. Characteristics of microscopic pore structure in Paleozoic shales in Upper Yangtze region and its enlightenment for shale gas exploration[J]. Marine origin petroleum geology, 2015, 20(1): 71-78.
- [4] 聂海宽,张金川.页岩气储层类型和特征研究:以四川盆地及其周缘下古生界为例[J].石油实验地质,2011,33(3):219-225,232.
NIE Haikuan, ZHANG Jinchuan. Types and characteristics of shale gas reservoir: a case study of Lower Paleozoic in and around Sichuan Basin[J]. Petroleum geology and experiment, 2011, 33(3): 219-225, 232.
- [5] 马行陟,柳少波,姜林,等.页岩吸附气含量测定的影响因素定量分析[J].天然气地球科学,2016,27(3):488-493.
MA Hengzhi, LIU Shaobo, JIANG Lin, et al. Quantitative analysis on affecting factors of gas adsorption capacity measurement on the shale[J]. Natural gas geoscience, 2016, 27(3): 488-493.
- [6] 窦锦爱,林业青,邵丰,等.页岩气储层孔隙结构表征技术及实验方法研究进展[J].西安科技大学学报,2020,40(6):1019-1030.
DOU Jin'ai, LIN Yeqing, SHAO Feng, et al. Advances in characterization techniques and experimental methods of shale gas reservoir pore structure[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(6): 1019-1030.
- [7] 李靖.页岩气赋存方式及产气机理研究[D].北京:中国石油大学(北京),2017.
LI Jing. Storage characteristics and production mechanisms of shale gas reservoirs[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [8] 周尚文,薛华庆,郭伟,等.基于重量法的页岩气超临界吸附特征实验研究[J].煤炭学报,2016,41(11):2806-2812.
ZHOU Shangwen, XUE Huaqing, GUO Wei, et al. Supercritical isothermal adsorption characteristics of shale gas based on gravimetric method[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2806-2812.
- [9] 李维,张海杰,罗彤彤,等.渝西地区页岩储层微观孔隙结构对页岩气赋存影响[J].天然气地球科学,2022,33(6):873-885.
LI Wei, ZHANG Haijie, LUO Tongtong, et al. Influence of micro pore structure of shale reservoir on shale gas occurrence in western Chongqing[J]. Natural gas geoscience, 2022, 33(6): 873-885.
- [10] 聂舟,衡德,邹源红,等.四川盆地长宁地区海相页岩吸附气含量演化特征:以N201井五峰组—龙马溪组一段为例[J].海相油气地质,2021,26(1):43-50.
NIE Zhou, HENG De, ZOU Yuanhong, et al. Evolution of adsorbed gas content of marine shale in Changning area, Sichuan Basin: a case of Wufeng Formation—Longmaxi Member 1 in Well N201[J]. Marine origin petroleum geology, 2021, 26(1): 43-50.
- [11] 颜磊,周文,樊靖宇,等.川南深层页岩气储层含气量测井计算方法[J].测井技术,2019,43(2):149-154.
YAN Lei, ZHOU Wen, FAN Jingyu, et al. Log evaluation method for gas content of deep shale gas reservoirs in Southern Sichuan Basin[J]. Well logging technology, 2019, 43(2): 149-154.
- [12] 冀昆,余春昊,郭瑛,等.页岩吸附气含量测井计算模型及其在昭通A井的应用[J].测井技术,2018,42(5):535-541.
JI Kun, YU Chunhao, GUO Ying, et al. Log calculation model of shale adsorption gas content and its application in Well Zhaotong A [J]. Well logging technology, 2018, 42(5): 535-541.
- [13] 张冲,郭聪,朱林奇,等.考虑有机质校正的页岩气储层总孔隙度测井评价方法[J].煤炭学报,2017,42(6):1527-

- 1534.
- ZHANG Chong, GUO Cong, ZHU Linqi, et al. A logging interpretation method for total porosity considering organic matter correction of shale gas reservoirs [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(6): 1527–1534.
- [14] 俞凌杰, 范明, 蒋启贵, 等. 页岩气现场解吸方法优化[J]. *石油实验地质*, 2015, 37(3): 402–406.
- YU Lingjie, FAN Ming, JIANG Qigui, et al. Optimization of shale gas desorption method in field [J]. *Petroleum geology and experiment*, 2015, 37(3): 402–406.
- [15] 聂海宽, 张金川, 马晓彬, 等. 页岩等温吸附气含量负吸附现象初探[J]. *地学前缘*, 2013, 20(6): 282–288.
- NIE Haikuan, ZHANG Jinchuan, MA Xiaobin, et al. A preliminary study of negative adsorption phenomena of shale adsorption gas content by isothermal adsorption [J]. *Earth science frontiers*, 2013, 20(6): 282–288.

编辑:黄革萍

Experimental study on reservoir characteristics and accumulation quantity of shale gas

WANG Benqiang, LIANG Xusheng, LIU Qi, LÜ Le, HAO Yuexiang, LI Yajun

Abstract: Shale gas has enormous resources and potential, and has gradually become an important growth point of natural gas industry in China. Shale gas reservoirs are characterized by complex mineral compositions, multi-scale pore, various gas storage spaces and modes of occurrence, and strong heterogeneity. Shale pores can be divided into inorganic pores and organic pores. Inorganic pores are mainly composed of intergranular or intragranular pores of mineral particles such as quartz, feldspar and other minerals. The pore size is mainly micrometer scale, and the pore surface has water-wet characteristics. Organic pores are mainly nanoscale and exist in the organic matter of shale, with high specific surface area and oil-wet pore surfaces. Methane in shale gas reservoir has three occurrence states: free gas in inorganic pores, free gas and adsorbed gas in organic pores. Accurate volume measurement of gas with different occurrence state can provide important basic data for resource evaluation of shale gas reservoir. Based on the differences of wettability and pore size between shale inorganic pores and organic pores, and considering the different storage locations of methane, helium and water in shale inorganic pores and organic pores, experimental measurement and calculation methods are presented to test gas volume of different occurrence states under reservoir temperature and pressure conditions, and shale inorganic porosity and organic porosity are also obtained. On this basis, the influencing factors of gas content in shale gas reservoir are analyzed. The results show that for the selected rock samples, inorganic pores and organic pores account for 65% and 35% of the total pore volume respectively, and the free gas in inorganic pores, free gas in organic pores and adsorbed gas account for 51%, 22% and 27% of the total gas content on average respectively. The shale of the Lower Silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan has a high degree of thermal evolution. With the increase of the total organic carbon content, a large number of nanoscale organic pores are developed, providing adsorption space for methane. It is clarified that the total organic carbon content mainly affects the content of adsorbed gas. It is pointed out that in the evaluation of shale gas resource quantity, production capacity prediction, and later development process, the influence of organic matter and its internal adsorbed gas needs to be considered.

Key words: shale gas; organic porosity; inorganic porosity; free gas content; adsorbed gas content

WANG Benqiang, First author: MSc, Engineer, mainly engaged in petroleum development geology. Add: CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, No. 6 Mengzhuiwan Rd., Chenghua District, Chengdu, Shichuan 610056, China