

高温高压致密气藏岩石扩散系数测定及影响因素

王晓波^{1,2,3}, 陈践发¹, 李剑^{2,3}, 王东良^{2,3},
李志生^{2,3}, 柳广弟¹, 谢增业^{2,3}, 孙明亮¹

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007; 3. 中国石油天然气集团公司天然气成藏与开发重点实验室, 河北廊坊 065007)

摘要: 根据气体在浓度梯度下通过岩样自由扩散的原理, 利用建立的高温高压致密气藏岩石扩散系数测定方法, 对四川盆地须家河组、鄂尔多斯盆地上古生界致密气藏岩石样品开展试验分析, 并探讨物性、温度、注气平衡压力、围压、饱和介质等因素对致密气藏岩石扩散系数的影响。研究表明: 物性是致密气藏岩石扩散能力的基础, 对其具有重要控制作用, 二者呈正幂函数相关关系; 温度对致密气藏岩石扩散系数具有促进作用, 二者呈指数相关关系; 孔隙流体压力、上覆地层压力对致密气藏岩石扩散能力均具有抑制作用, 呈负幂函数相关关系, 且上覆地层压力的影响与岩性密切相关(泥岩大于砂岩); 饱和介质条件致密气藏岩石干样、湿样扩散系数总体相差 2~3 个数量级。

关键词: 高温高压; 致密气藏; 扩散系数; 影响因素; 孔隙流体压力; 上覆地层压力; 饱和介质条件

中图分类号: TE 122

文献标志码: A

Rock diffusion coefficient measuring and its effecting factors of tight gas reservoir under high temperature and high pressure

WANG Xiao-bo^{1,2,3}, CHEN Jian-fa¹, LI Jian^{2,3}, WANG Dong-liang^{2,3},
LI Zhi-sheng^{2,3}, LIU Guang-di¹, XIE Zeng-ye^{2,3}, SUN Ming-liang¹

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Langfang Branch of PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang 065007, China;

3. The Key Laboratory of Gas Reservoir Formation and Development, CNPC, Langfang 065007, China)

Abstract: Based on the assumption that gas free diffusion is controlled by concentration gradient in rock samples, the typical tight gas reservoir rock samples from Xujiahe Formation in Sichuan Basin and upper Paleozoic in Ordos Basin were studied by establishing a method measuring the tight gas reservoir rock diffusion coefficients under high temperature and high pressure. Then, the influences of physical properties, temperature, gas injecting pressure, surrounding pressure and saturated media conditions on diffusion coefficient of tight gas reservoir rock samples were intensively discussed. The results show that rock physical properties are the governing factor and have the dominant controlling effects on rock diffusive abilities, and have a positive power function relationship with tight gas reservoir rock diffusion coefficients. Temperature has large positive promoting effects on rock diffusive abilities, and a positive exponential relationship with rock diffusion coefficients. Both porous fluid pressure and overlying rock pressure have suppressing effects and have negative power function relationships with tight gas reservoir rock diffusion coefficients, especially overlying rock pressure which has great relationship with lithology, e. g. mudstone is larger than sandstone. The difference of rock diffusion coefficients between saturated media and dry samples is generally about 2–3 orders of magnitude.

Key words: high temperature and high pressure; tight gas reservoir; diffusion coefficient; effecting factors; porous fluid pressure; overlying rock pressure; saturated media condition

收稿日期: 2013-12-20

基金项目: 国家重大科技专项(2011ZX05007); 国家“973”项目(2007CB209503); 国家自然科学基金项目(41102086)

作者简介: 王晓波(1982-), 男, 工程师, 博士研究生, 主要从事天然气地质、地球化学、成藏及稀有气体实验技术开发与应用研究。E-mail: Wangxb69@petrochina.com.cn.

扩散是指烃类气体在浓度梯度作用下,从高浓度区通过各种介质向低浓度区自由迁移达到平衡的一种物理过程。扩散是油气运移的重要机制之一^[1-4],尤其对于天然气的运移、聚集、成藏、保存和破坏起至关重要作用。前苏联学者 Antonov^[5]最早测定了轻烃(C_1-C_8)在不同岩性沉积岩中的扩散系数,Stklyanin 等^[6-7]进一步对扩散在初次运移中作用、轻烃扩散系数的试验测定开展了深入研究。国内肖无然^[8]首次测试了岩石甲烷的扩散系数;90 年代以来,许多学者在扩散系数试验、扩散研究方法、扩散散失量评价、封盖保存条件评价、天然气扩散的地质应用等方面开展了大量研究工作^[9-15]。扩散系数是评价天然气通过岩石扩散速度快慢的重要参数。目前,常规岩石扩散系数测定受试验温压及地质时间等限制,不能真实反映实际地层条件下地质历史时期岩石真正扩散能力。因此,笔者依据气体在浓度梯度下通过岩样自由扩散的原理,通过对现有仪器的改进,建立高温高压下致密气藏岩石扩散系数测定方法,并对典型致密气藏岩石样品进行扩散系数测定,重点对物性、温度、注气平衡压力、围压、饱和介质条件等对扩散系数的影响进行详细分析。

1 致密气藏岩石扩散系数测定

1.1 试验装置

对常规扩散系数测定装置及条件(室温、注气平衡压力 0.2 MPa,围压 3 MPa)进行改进,采用耐高温高压岩心夹持器以及温控箱等组件进行替换及管线改造,以实现高温(大于 90 ℃)、高压(注气平衡压力可超过 3 MPa,围压可高于 20 MPa)条件下致密气藏岩石扩散系数测定。改进后的装置主要由耐高温高压岩心夹持器、温控箱、加压泵、样品、左扩散室、右扩散室、CH₄ 气源、N₂ 气源、色谱检测仪和计算机控制系统组成(图 1),还包括精密电子称、岩石饱和水装置、真空泵、精密压力表、检漏水、记录本等辅助部件和材料。

1.2 试验样品

本次研究挑选了四川盆地须家河组和鄂尔多斯盆地上古生界 12 块致密气藏岩石样品(表 1)。孔隙度、渗透率测定依据石油天然气行业标准《岩心分析方法》(SY/T 5336-2012),样品氦孔隙度分布在 0.2%~6.8%,样品空气渗透率分布在(0.001 4~0.671)×10⁻³ μm²。扩散系数测定样品规格为直径 2.5 cm、长度 0.5~0.6 cm 的小圆柱体。

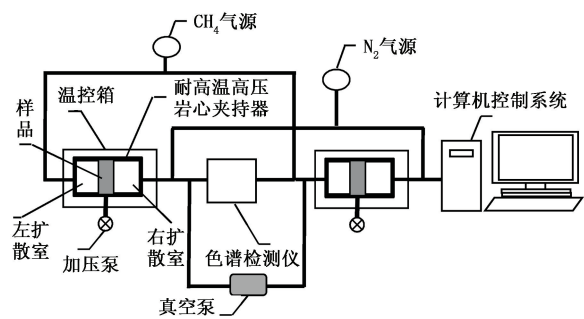


图 1 高温高压条件下致密气藏岩石扩散系数测定装置组成示意图

Fig.1 Sketch map of diffusion coefficient measuring device of tight gas reservoir under high temperature and pressure condition

表 1 四川盆地须家河、鄂尔多斯盆地上古生界致密气藏岩石样品基本参数

Table 1 Physical parameters for tight gas reservoir rock samples of Xujiahe Formation in Sichuan and Upper Paleozoic in Ordos Basin

井号	井深 H/ km	岩性	渗透率 k/ 10 ⁻³ μm ²	孔隙度 φ/%
广安 109	2.066 00	泥岩	0.003	0.2
广安 106	2.363 20	泥岩	0.008 8	0.4
广安 001-16	1.520 60	砂岩	0.171	6.6
广安 002-39	1.874 10	砂岩	0.0043	0.9
广安 138	2.537 20	砂岩	0.027	6.8
广安 138	2.509 15	砂岩	0.038	2.9
榆 11	1.472 70	泥岩	0.002 3	1.3
桃 3	3.389 00	泥岩	0.671	4.0
苏 2	3.591 00	泥岩	0.001 4	0.7
陕 26	3.481 10	泥岩	0.068	1.3
苏 4	3.316 60	砂岩	0.059	6.7
榆 19	2.289 01	砂岩	0.177	4.0

1.3 试验方法、流程及结果

试验具体方法及流程如下:①将岩心样品放入烘箱,80 ℃条件下烘干;②干样样品放入空锥形瓶抽真空 6 h 以上,饱和水样品单独装入含水锥形瓶抽真空使之充分饱和水直至无气泡溢出;③将岩心样品放入夹持器,通过加压泵设定围压;④打开左右两侧扩散室进气阀,通入 CH₄ 和 N₂ 气源,对岩心夹持器两端、扩散室两端及管线接口处进行试漏,确保不存在渗漏;⑤设定温控箱的试验温度;⑥测定干样样品,对岩心夹持器、两扩散室及管线抽真空(饱和水样品不需要);⑦两扩散室分别设定相同压力 CH₄ 和 N₂ 气源;⑧利用气相色谱间隔 0.5~2 h 测量并记录干样两室甲烷和氮气浓度(饱和水样品间隔 2~12 h);⑨每个样品试验大于 12 h 且完成 6 组以上记录停止试验;⑩按上述③~⑨的方法,完成剩余样品分析及数据记录;⑪根据菲克第二定律,计算岩石烃类扩散系数

$D=\ln(\Delta C_0/\Delta C_i)/[E(t_i-t_0)]$.

其中

$$E=A(1/V_1+1/V_2)/L.$$

式中, D 为烃类气体在岩石中扩散系数, cm^2/s ; t_0 为初始时刻; t_i 为 i 时刻; ΔC_i 为 i 时刻烃类气体在扩散室中浓度差,%; ΔC_0 为初始时刻烃类气体在扩散室中浓度差,%; A 为岩样的截面积, cm^2 ; L 为岩样的长度, cm ; V_1 和 V_2 分别为左扩散室和右扩散室的

容积, cm^3 。

按上述方法开展以下试验:①围压 10 MPa,注气平衡压力 3 MPa,温度分别 30、50、70、90 ℃;②围压 10 MPa,注气平衡压力 0.2 MPa,温度分别为 30、50、70、90 ℃;③围压 3 MPa,注气压力 0.2 MPa,温度分别为 30、40、50、60 ℃等不同温压下多组试验。试验结果见图 2~7 及表 2。

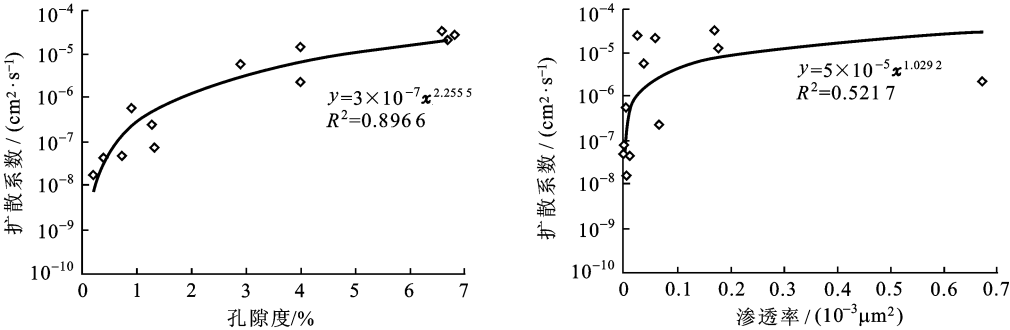


图 2 注气平衡压力 0.2 MPa,围压 3 MPa,60 ℃下致密气藏岩石干样扩散系数与物性关系

Fig. 2 Relationship between diffusion coefficient with physical properties of dry tight gas reservoir rock samples under 60 ℃, 0.2 MPa injecting balance pressure and 10 MPa surrounding pressure

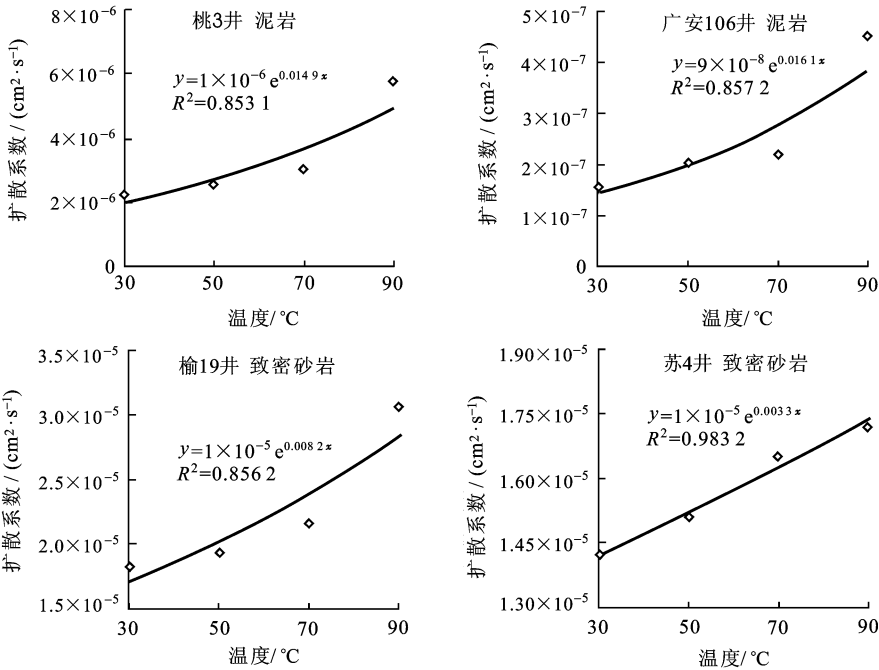


图 3 围压 10 MPa,注气平衡压力 3 MPa 下致密气藏岩石干样扩散系数与温度之间关系

Fig. 3 Relationship between diffusion coefficient and different temperature of dry tight gas reservoir samples under 3 MPa injecting balance pressure and 10 MPa surrounding pressure

2 致密气藏岩石扩散系数影响因素

2.1 物 性

天然气在岩石中的扩散主要是在连通孔道中进行,受孔道数量、孔径、弯曲程度、孔隙连通性等影响^[5-7,11-12]。根据气体在多孔介质中的扩散机

制^[16-17],可以用表示孔隙直径 d 和分子运动平均自由程 λ 之比的诺森数 Kn ,将扩散分为 Fick 型扩散($Kn \geq 10$)、Knudsen 型扩散($Kn \leq 0.1$)和过渡型扩散($0.1 < Kn < 10$)。总体上,从 Fick 型扩散、过渡型扩散到 Knudsen 型扩散,岩石的扩散能力在不断减弱。

从致密气藏岩石扩散系数与物性关系可以发现

(图2):样品扩散系数与物性呈较好的正幂函数相关关系。此外,岩石扩散系数总体与孔隙度具有更好的相关性。根据天然气在多孔介质的扩散机制进行分析,当天然气分子在致密气藏岩石孔隙介质中扩散时,物性提高意味着分子扩散孔隙直径 d 增大,在分子扩散的主体 CH_4 及平均自由程 λ 保持相对不变的情况下,反映岩石扩散类型的诺森数 Kn 相对增大,分子扩散类型总体向较好方向发展,岩石扩散能力不断增强;最终表现为随着物性增大岩石扩散系数呈幂函数关系增加。

2.2 温度

从致密气藏岩石干样扩散系数与温度关系可以看出:随着温度从30℃增加到50、70、90℃,二者呈较好的指数相关关系增加;在30~70℃,扩散系数增加幅度相对较小,总体提高约1~1.4倍;在70~90℃,扩散系数相对快速增大,总体提高约2.6~2.9倍(图3)。从微观机制上进行分析,分子扩散是分子热运动的结果,温度对气体分子扩散的影响,主要改变了气体分子的均方根速度和平均自由行程^[18]。在分子扩散空间保持相对不变情况下,随着温度不断升高,气体分子活动性增强,分子运动速度加快,气体分子均方根速度显著增加,而平均自由行程缓慢增加,二者共同作用,使气体分子扩散能力显著增强,表现出岩石扩散系数与温度呈指数关系增加的特征。此外,温度的提高也有利于改变孔隙结构,使孔隙中微孔隙和微裂隙发生扩张,对于提高岩石扩散能力也起了一定作用。

2.3 注气平衡压力

常规扩散系数测定设定相同注气平衡压力一般较小(约为0.2 MPa),没有考虑到气藏中天然气不仅受浓度梯度控制,同时还具有较高的孔隙流体压力。为弄清其对样品扩散能力的影响,本次设计了不同注气平衡压力(0.2、3 MPa)、相同围压(10 MPa)和温度系列的两组试验(图4)。研究表明:在围压和温度相同情况下,随着注气平衡压力从0.2 MPa提高到3 MPa,致密气藏岩石扩散系数减小为原来的0.13~0.2倍(平均0.16倍),整体降低约1个数量级。进一步对2块致密砂岩样品开展不同注气平衡压力系列、相同温度30℃和围压10 MPa下扩散系数测定试验(图5),随着注气平衡压力增大,扩散系数呈幂函数关系递减。从分子动力学和扩散机制角度进行分析:根据理想气体状态方程,保持温度不变,增大注气平衡压力,相当于减小气体分子扩散空间体积,分子扩散主体 CH_4 且平均自由程保持相对不变情况下,分子扩散的诺森数 Kn 相对减小,

表明扩散方式由较好的Fick扩散型扩散向较差的Knudsen型扩散转化,岩石扩散能力总体不断减弱,因此宏观上表现为随着注气平衡压力增大,岩石扩散系数呈幂函数关系递减。

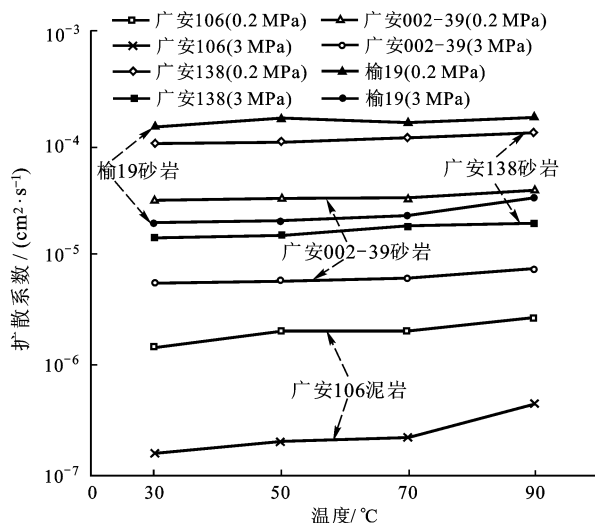


图4 相同围压(10 MPa)和温度系列、不同注气平衡压力(0.2、3 MPa)下干样扩散系数对比
Fig. 4 Comparison on diffusion coefficient between 0.2 and 3 MPa gas injecting pressure of dry tight gas reservoir rock samples under the same surrounding pressure of 10 MPa and temperature series

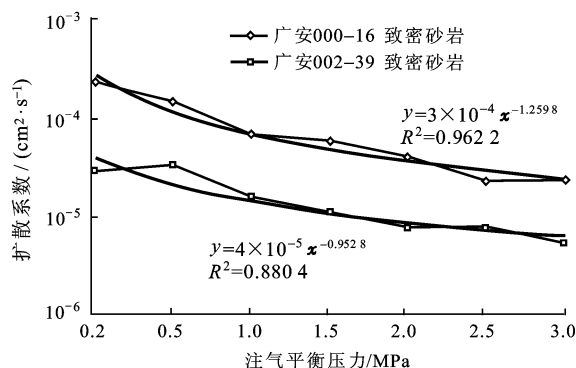


图5 围压10 MPa、温度30℃、不同注气平衡压力与干样扩散系数之间关系

Fig. 5 Relationship between gas different injecting pressure and diffusion coefficient of dry tight gas reservoir rock samples under the same surrounding pressure of 10 MPa and temperature of 30 °C

2.4 围压

围压主要用于模拟上覆地层压力,常规设定值只要求保证样品与加持器接触之间不漏,而对围压与上覆地层压力是否接近(或一致)及其对样品扩散系数的影响未开展深入讨论。本次设计了不同围压下(10和3 MPa)、相同注气平衡压力(0.2 MPa)和温度(50℃)的两组试验,对比研究围压对致密气藏岩石扩散系数的影响(图6)。由图6可知:在相

同注气平衡压力及温度下,致密气藏岩石干样扩散系数随着围压增大整体呈减小趋势,10 MPa 围压下的扩散系数减小为 3 MPa 的 3% ~ 83%,平均为 44%;其中,泥岩减小为 3% ~ 43%,平均为 16%,整体降低约 1 个量级;砂岩减小为 65% ~ 83%,平均 73%,整体降低约 1/4;降低程度与样品岩性密切相关。进一步设计了相同室温和注气平衡压力、不同围压系列的多组试验,研究发现(图 7):致密气藏岩石扩散系数与围压呈负幂函数关系。从扩散微观机

制角度分析,在上覆地层压力作用下,岩石骨架和孔隙结构受到压缩发生变化;颗粒与颗粒接触更加紧密,孔隙及喉道空间变小,部分喉道甚至闭合,分子扩散空间变小;在扩散分子平均自由程保持相对不变情况下,诺森数 Kn 相对减小,岩石扩散能力发生明显下降;最终宏观上表现为岩石扩散系数随着上覆地层压力增加呈负幂函数关系减小,并且泥岩的降幅较大,砂岩降幅较小。

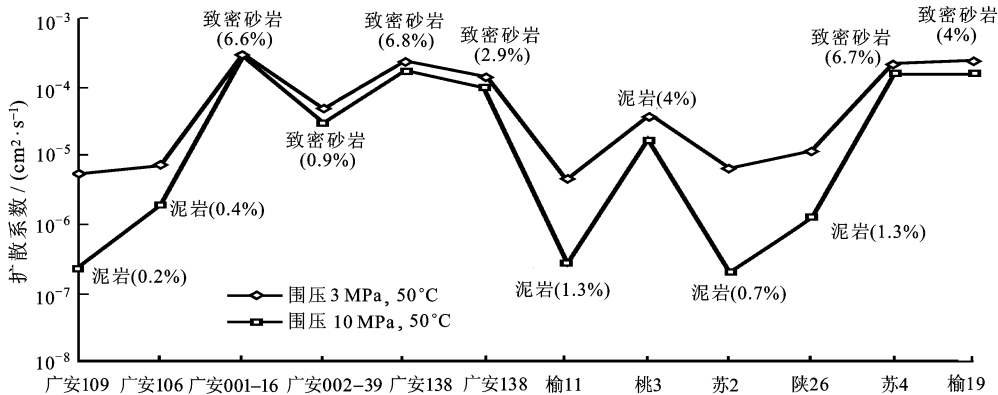


图 6 0.2 MPa 注气平衡压力、温度 50 °C 条件下围压与致密气藏岩石干样扩散系数之间关系

Fig. 6 Relationship between surrounding pressure and diffusion coefficient of dry tight gas reservoir rock samples under temperature of 50 °C and gas injecting pressure of 0.2 MPa

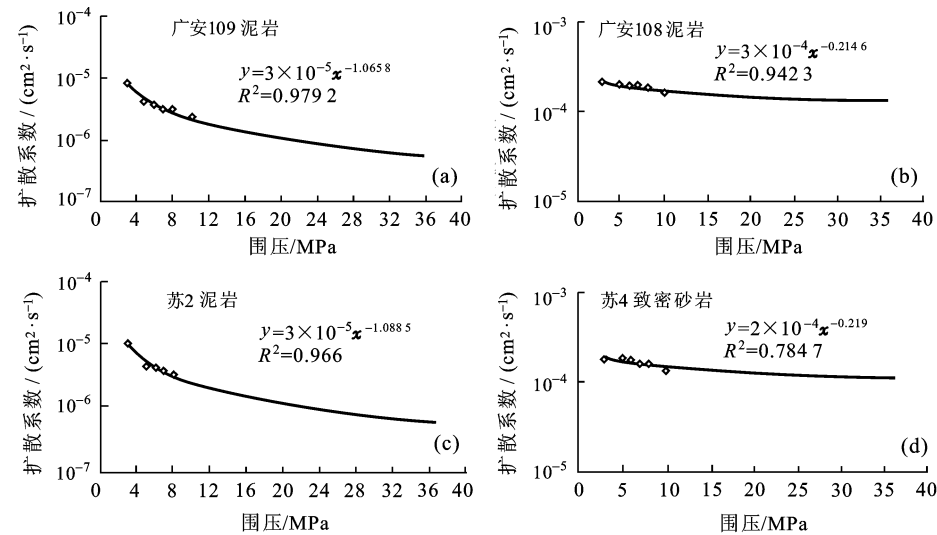


图 7 0.2 MPa 注气平衡压力、室温条件下不同围压与致密气藏岩石干样扩散系数之间关系

Fig. 7 Relationship between surrounding pressure and diffusion coefficient of tight gas reservoir rock samples under room temperature and gas injecting pressure of 0.2 MPa

2.5 饱和和介质条件

同一岩样饱和不同介质扩散系数也不同,甲烷通过饱和和空气(即干样)岩样扩散系数最大,其次是饱和淡水,而饱和盐水的最小^[6-7,13]。前人研究认为人造石英粉砂岩岩心干样与湿样扩散系数比为 4.64 ~ 7.27,平均约为 6.06 倍^[13]。考虑到人造岩心可能无法反映真实岩心的实际情况,本次选取多

个致密砂岩岩心样品,孔隙度分布在 0.9% ~ 6.8%,渗透率为 $(0.0043 \sim 0.177) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,实测室温条件下岩石干样和饱和水湿样扩散系数(表 2),得到干湿比为 149 ~ 381,平均值为 267。研究表明:实测致密气藏岩石干、湿样扩散系数大约相差 2 ~ 3 个数量级,远大于通常所认为的一个数量级。

表 2 注气平衡压力 0.2 MPa、3 MPa 围压、室温条件下致密气藏岩石干、湿样扩散系数测定结果

Table 2 Dry and wet sample diffusion coefficient comparison of tight gas reservoir under gas injecting pressure of 0.2 MPa, surrounding pressure of 3 MPa and room temperature

井号	岩性	干样扩散系数/(cm ² ·s ⁻¹)	湿样扩散系数/(cm ² ·s ⁻¹)	干湿比
苏 4	砂岩	2.05×10 ⁻⁴	7.21×10 ⁻⁷	284
榆 19	砂岩	2.01×10 ⁻⁴	1.04×10 ⁻⁶	193
苏 4	砂岩	2.05×10 ⁻⁴	6.74×10 ⁻⁷	304
榆 19	砂岩	2.01×10 ⁻⁴	8.69×10 ⁻⁷	231
苏 4	砂岩	2.05×10 ⁻⁴	6.57×10 ⁻⁷	312
榆 19	砂岩	2.01×10 ⁻⁴	1.35×10 ⁻⁶	149
广安 001-16	砂岩	3.16×10 ⁻⁴	9.23×10 ⁻⁷	342
广安 002-39	砂岩	6.83×10 ⁻⁵	3.29×10 ⁻⁷	208
广安 138	砂岩	2.38×10 ⁻⁴	6.25×10 ⁻⁷	381
广安 138	砂岩	1.52×10 ⁻⁴	5.78×10 ⁻⁷	263

3 地层条件校正

由于泥岩样品不易饱和水、天然气扩散通过饱和水岩样需要时间太长、长时间高温易使饱和水蒸发等原因,导致饱和水岩样扩散系数分析试验周期长、效果差且不易获取,因此实验室通常测试岩石干样扩散系数,但实际地层条件既含水又具有高温、高压,本次测得高温高压岩石干样扩散系数与实际地层条件地质历史时期岩样古扩散系数存在着饱和和介质、古地温和地层压力差异,必须进行饱和和介质条件转化和地质历史时期古地温和压力恢复与校正(岩

石物性差异主要由地面和实际地层条件下温压场变化引起,不用重复考虑)。

3.1 饱和和介质条件转化

利用本次试验实测的多个致密气藏岩石干湿样品扩散系数平均值 267,对实测岩石干样扩散系数进行饱和和介质条件转化(表 3)。

3.2 地质历史时期古地温恢复及校正

由于试验温度依据现今地温梯度及地层温度设定,与样品实际地质历史时期地层条件下古地温梯度及古地温仍存在一定差异,必须进行地质历史时期古地温恢复和校正。四川盆地川中地区须家河组现今地温梯度大约为 2.31℃/100 m,伍大茂等^[19]推算川中隆起古地温梯度约为 3.38℃/100 m,现今地表温度和古地表温度相同大约为 20℃。任战利等^[20]认为鄂尔多斯盆地古生代到中生代早期地温梯度都较低,为 2.2~3.0℃/100 m,与现今平均地温梯度 2.89℃/100 m 相近。若古地温梯度按 3.0℃/100 m,古地表温度也按 15℃考虑,则岩样古地温 $T_0=15+3H/100$ 。古地温恢复和校正后的样品扩散系数见表 3。

3.3 地层条件下压力校正

如果四川盆地须家河组、鄂尔多斯盆地上古生界气藏储层的上覆地层压力分别按 25、40 MPa 计算,孔隙流体压力均按 10 MPa 计算,分别利用建立的致密气藏岩石样品注气平衡压力、围压与扩散系数关系对孔隙流体压力和围压的影响进行校正(表 3)。

表 3 致密气藏岩石扩散系数地层条件校正后汇总数据

Table 3 Revised diffusion coefficient of tight gas reservoir rock samples under geological condition

井号	井深/km	岩性	岩石扩散系数/(cm ² ·s ⁻¹)			
			饱和和介质转化	古地温恢复校正	孔隙流体压力校正	上覆地层压力校正
广安 109	2.066 00	泥岩	3.19×10 ⁻⁸	3.57×10 ⁻⁸	4.10×10 ⁻⁹	1.33×10 ⁻¹⁰
广安 106	2.363 20	泥岩	4.91×10 ⁻⁸	5.53×10 ⁻⁸	6.35×10 ⁻⁹	2.06×10 ⁻¹⁰
广安 001-16	1.520 60	砂岩	1.03×10 ⁻⁶	1.13×10 ⁻⁶	1.29×10 ⁻⁷	6.48×10 ⁻⁸
广安 002-39	1.874 10	砂岩	1.78×10 ⁻⁷	1.98×10 ⁻⁷	2.28×10 ⁻⁸	1.14×10 ⁻⁸
广安 138	2.537 20	砂岩	7.98×10 ⁻⁷	9.03×10 ⁻⁷	1.04×10 ⁻⁷	5.19×10 ⁻⁸
广安 138	2.509 15	砂岩	4.91×10 ⁻⁷	5.55×10 ⁻⁷	6.37×10 ⁻⁸	3.19×10 ⁻⁸
榆 11	1.472 70	泥岩	1.84×10 ⁻⁸	2.04×10 ⁻⁸	2.34×10 ⁻⁹	4.22×10 ⁻¹¹
桃 3	3.389 00	泥岩	1.36×10 ⁻⁷	1.56×10 ⁻⁷	1.80×10 ⁻⁸	3.24×10 ⁻¹⁰
苏 2	3.591 00	泥岩	3.60×10 ⁻⁸	4.16×10 ⁻⁸	4.78×10 ⁻⁹	8.62×10 ⁻¹¹
陕 26	3.481 10	泥岩	4.95×10 ⁻⁸	5.71×10 ⁻⁸	6.56×10 ⁻⁹	1.18×10 ⁻¹⁰
苏 4	3.316 60	砂岩	6.93×10 ⁻⁷	7.99×10 ⁻⁷	9.17×10 ⁻⁸	4.09×10 ⁻⁸
榆 19	2.289 01	砂岩	7.87×10 ⁻⁷	8.94×10 ⁻⁷	1.03×10 ⁻⁷	4.57×10 ⁻⁸

4 结 论

(1)物性是致密气藏岩石扩散能力的基础,对其具有重要控制作用,二者具有较好的正幂函数相关关系,且与孔隙度具有更好的相关性。

(2)温度对致密气藏岩石扩散能力具有积极促进作用,二者呈较好的指数相关关系递增。

(3)孔隙流体压力对致密气藏岩石扩散能力具有明显抑制作用,二者呈负幂函数关系递减。

(4)上覆地层压力对致密气藏岩石扩散能力具

有显著抑制作用,二者呈负幂函数关系递减;且降低程度与岩性密切相关,泥岩降幅大,砂岩降幅小。

(5)饱和介质条件对致密气藏岩石扩散能力也具有重要影响,致密砂岩干样、湿样扩散系数大体相差2~3个数量级,远大于通常所认为的一个量级。

参考文献:

- [1] LEYTHAEUSER D, SCHAEFER R G, YUKLER A. Role of diffusion in primary migration of hydrocarbons [J]. AAPG Bulletin, 1982, 66(4): 408-429.
- [2] 李明诚. 石油与天然气运移[M]. 3版. 北京:石油工业出版社, 1999: 190-225.
- [3] 吴晓东, 张迎春, 李安启. 煤层气单井开采数值模拟的研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2000, 24(2): 47-49.
WU Xiao-dong, ZHANG Ying-chun, LI An-qi. Numerical simulation for coalbed methane production[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natrual Science), 2000, 24(2): 47-49.
- [4] 姚军, 孙海, 樊冬艳, 等. 页岩气藏运移机制及数值模拟[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(1): 91-98.
YAO Jun, SUN Hai, FAN Dong-yan, et al. Transport mechanisms and numerical simulation of shale gas reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(1): 91-98.
- [5] ANTONOV P L. On the diffusion permeability of some claystones [J]. Sb Geokhi Met Poisk Nefti I Gaza (Gostoptekhizdat, Moscow, in Russian): Trudy NIIG-GR, 1954, 2: 39-55.
- [6] STKLYANIN Y I, LITVINOVA V N. On the parameters of methane diffusion through a water-saturated core [J]. Geologiya Nefti Gaza, 1971, 15(1): 19-22.
- [7] KROOSS B M, SCHAEFER R G. Experimental measurements of the diffusion parameters of light hydrocarbons in water-saturated sedimentary rocks-I: a new experimental procedure [J]. Organic Geochemistry, 1987, 11(3): 193-199.
- [8] 肖无然, 陈伟钧. 天然气藏的研究方法[M]. 北京:地质出版社, 1988: 1-64.
- [9] 郝石生, 黄志龙, 高耀斌. 轻烃扩散系数的研究及天然气运聚动平衡原理[J]. 石油学报, 1991, 10(3): 17-24.
HAO Shi-sheng, HUANG Zhi-long, GAO Yao-bing. Light hydrocarbon diffusion coefficient research and natural gas migration accumulation dynamic balance principle [J]. Acta Petrolei Sinica, 1991, 10(3): 17-24.
- [10] 查明, 张晓达. 扩散排烃模拟研究及其应用[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1994, 18(5): 14-20.
- ZHA Ming, ZHANG Xiao-da. Hydrocarbon diffusion expulsion simulation and its application [J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 1994, 18(5): 14-20.
- [11] 李国平, 郑德文, 欧阳永林, 等. 天然气封盖层研究与评价[M]. 北京:石油工业出版社, 1996: 25-105.
- [12] 付广, 吕延防. 天然气扩散作用及其研究方法[M]. 北京:石油工业出版社, 1999: 1-88.
- [13] 李海燕, 付广, 彭仕宓. 天然气扩散系数的实验研究[J]. 石油实验地质, 2001, 23(1): 108-113.
LI Hai-yan, FU Guang, PENG Shi-mi. Experimental research on gas diffusion coefficient [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(1): 108-113.
- [14] 王晓波, 李剑, 王东良, 等. 天然气盖层研究进展及发展趋势[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(6): 664-668.
WANG Xiao-bo, LI Jian, WANG Dong-liang, et al. Natural gas research advance and its development tendency [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(6): 664-668.
- [15] 柳广弟, 赵忠英, 孙明亮, 等. 天然气在岩石中扩散系数新认识[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5): 559-565.
LIU Guang-di, ZHAO Zhong-ying, SUN Ming-liang, et al. New insights into natural gas diffusion coefficient in rocks [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(5): 559-565.
- [16] 林瑞泰. 多孔介质传热传质引论[M]. 北京:科学出版社, 1995: 152-156.
- [17] 何学秋, 聂百胜. 孔隙气体在煤层中扩散的机理[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(1): 1-4.
HE Xue-qiu, NIE Bai-sheng. Diffusion mechanism of porous gases in coal seams [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(1): 1-4.
- [18] 王绍亭, 陈涛. 动量、热量与质量传递[M]. 天津:天津科学技术出版社, 1986: 16-47.
- [19] 伍大茂, 吴乃苓, 郜建军. 四川盆地古地温研究及其地质意义[J]. 石油学报, 1998, 19(1): 18-23.
WU Da-mao, WU Nai-ling, GAO Jian-jun. Paleogeotemperature in Sichuan Basin and its geological significances [J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(1): 18-23.
- [20] 任战利, 赵重远, 张军, 等. 鄂尔多斯盆地古地温研究[J]. 沉积学报, 1994, 12(1): 56-65.
REN Zhan-li, ZHAO Chong-yuan, ZHANG Jun, et al. Research on paleotemperature in Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(1): 56-65.

(编辑 徐会永)