

doi: 10.11720/wtyht.2020.0222

卢丽, 王国建, 朱怀平, 等. 深层天然气扩散系数模拟实验装置的研制[J]. 物探与化探, 2020, 44(6): 1441–1445. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0222>

Lu L, Wang G J, Zhu H P, et al. The development of an experimental measuring apparatus for simulating the diffusion coefficient of natural gas in depth[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1441–1445. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0222>

# 深层天然气扩散系数模拟实验装置的研制

卢丽, 王国建, 朱怀平, 王光华, 蒋涛

(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126)

**摘 要:** 为了更准确地测定烃类气体在岩石中的扩散系数, 为评价天然气藏的散失与保存评价提供参数, 研制了深层天然气扩散系数模拟实验装置。文章介绍了装置的硬件结构、技术参数、实验流程等, 以寒武系牛蹄塘组页岩、二叠系茅口组致密灰岩等样品为例, 进行高温、高压条件下岩石的扩散系数模拟实验, 计算了它们的扩散系数。研究表明, 该深层天然气扩散系数模拟实验装置测试数据可靠, 为研究深层天然气保存条件评价提供了技术手段。

**关键词:** 深层天然气; 扩散系数; 模拟实验装置

**中图分类号:** P632

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2020)06-1441-05

## 0 引言

天然气扩散系数是衡量天然气扩散能力大小的重要物理量之一, 是盖层评价的重要参数之一, 也是天然气扩散散失量计算必不可少的参数。实验室测定扩散系数采用间接方法, 即实验测定一定时间内通过样品的扩散量或浓度, 再由这些实测值通过某种方法确定或求得扩散系数值。国外与国内的天然气扩散系数测定方法不同, 国外的实验为开放实验, 即天然气从岩样一端的气室扩散到另一端开放的气室, 扩散过去的气体被流体带走, 扩散的终止浓度保持为零<sup>[1]</sup>; 国内实验为封闭实验, 即天然气扩散是在岩样两端两个封闭的气室间进行, 扩散的终止浓度不为零<sup>[1-14]</sup>。目前, 国内外扩散系数测定装置在围压和温度方面已可仿真地层压力和温度, 但是, 国内的扩散室压力都不超过 42 MPa<sup>[6-13]</sup>, 与气藏中天然气真实压力存在差距, 另外, 实验过程中由于取样容易造成岩石样品两端扩散室存在浓度差; 以上因素导致实验测定的扩散系数与真值差异较大。为了更准确地测定烃类气体在岩石中的扩散系数, 为评

价天然气藏的散失与保存评价提供参数, 需要一种除能够仿真地层围压和温度外, 同时还能够仿真天然气藏压力且保持两端扩散室无压差的扩散系数测定装置。

## 1 实验装置及技术参数

目前, 天然气扩散系数是在实验室内对岩样模拟测试得到的。测试方法按照行标 SY/T 6129—2016 岩石中烃类气体扩散系数测定方法获得, 即先测出在一定时间内通过样品的扩散量或浓度, 再根据实测值和费克定律确定或求得天然气的扩散系数<sup>[15]</sup>。

自行研制的深层天然气扩散系数模拟实验装置结构见图 1。该装置由 9 部分组成: 夹持器模拟室、气体减压取样部件、气体注气增压系统、超高压环压跟踪泵控制系统、恒温油浴温度控制系统、实时数字显示系统、抽真空系统、仪器自动控制及数据采集系统。扩散室是通过逐级增压的方法来实现气室压力为 70 MPa 的参数, 超高压环压跟踪泵控制系统可以实现选择环压跟踪模式或者恒压模式, 环压可以实

**收稿日期:** 2020-04-26; **修回日期:** 2020-06-15

**基金项目:** 国家重点研发计划项目“超深层及中新元古界盖层封闭性与油气保存机理”(2017YFC0603105); 国家自然科学基金项目“近地表轻烃来源辨识模型及其油气勘探应用基础研究”(41872126)

**作者简介:** 卢丽(1978-), 女, 本科, 高级工程师, 主要从事油气地球化学分析测试及研究工作。

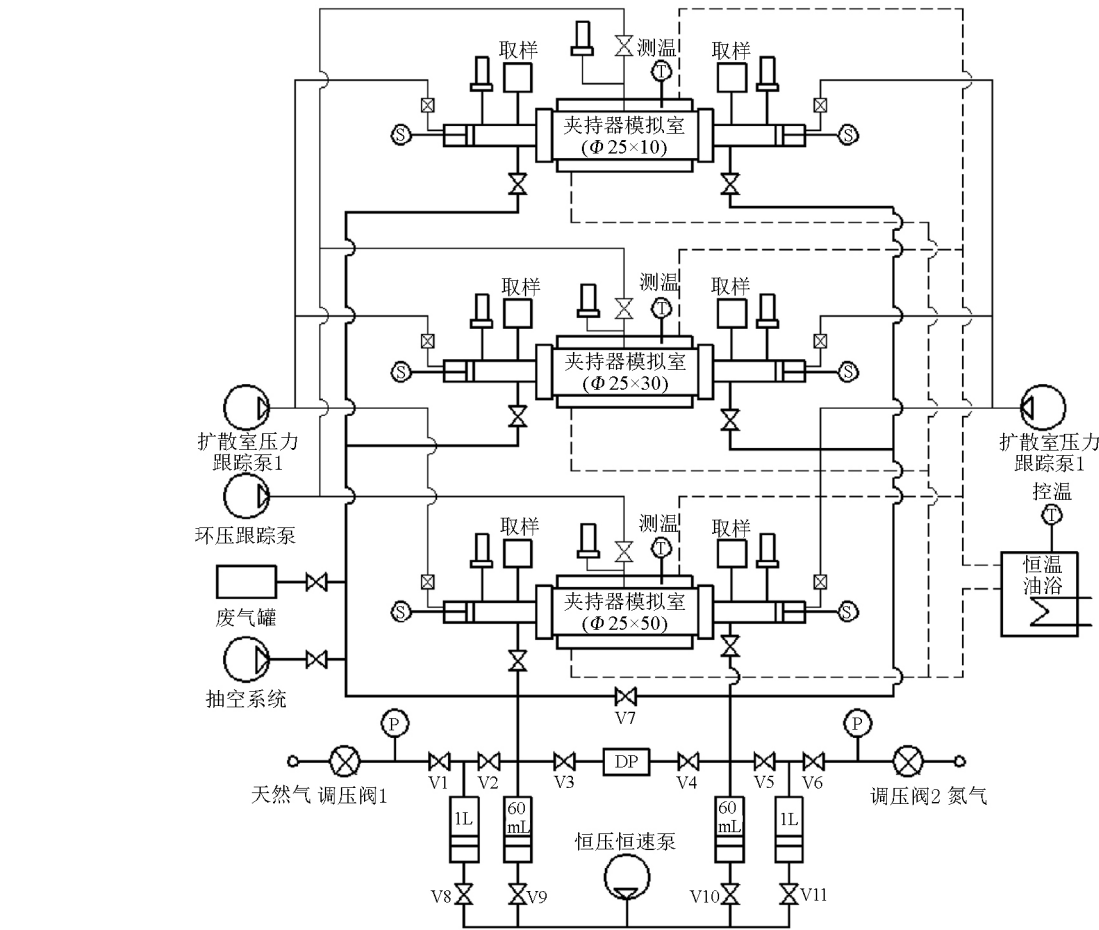


图 1 深层天然气扩散系数模拟实验装置示意

**Fig.1 Schematic diagram showing the experimental apparatus for simulating the diffusion coefficient of natural gas in depth**

现 100 MPa 的压力,环压泵保护压力为 150 MPa,这是本次自研仪器的特色。

该套实验装置可自动跟踪并恒定两端扩散室压力,维持压力差趋近于零 ( $\leq 0.01$  MPa),且可仿真更大深度地层温度和压力的天然气扩散系数测定装置,解决现有天然气扩散系数测试装置扩散室压力偏低的问题。

装置的主要设计参数为:

- ① 实验温度最高为  $180\pm 1$   $^{\circ}\text{C}$  ;
- ② 围压  $\leq 100$  MPa;
- ③ 扩散室气源压力  $\leq 70$  MPa;
- ④ 被测岩样的直径为 2.5 cm,岩样厚度为 0.5、1、3 和 5 cm;
- ⑤ 扩散室压力跟踪装置的压力差  $\leq 0.01$  MPa。

## 2 扩散实验流程

### 2.1 岩样的准备

将待测样品用钻床钻成圆柱状,直径 2.5 cm,长度 1.0 cm 或者 0.5 cm,对个别不符合要求的样品需

要进行打磨。如果样品表面含油,需先洗油,然后放在恒温箱内加热 105  $^{\circ}\text{C}$  烘干,再放入干燥器中冷至室温待测。

### 2.2 测定装置的准备

实验前所有传感器阀门均处于关闭状态,保证储气容器、泵、容器内流体充足,不足时需添加。

### 2.3 样品的安装

将夹持器环压放空,拧开法兰螺钉,取下法兰。将钢圈、待测样品、钢圈依次放入配套的铅套内,并塞入夹持器内,装上法兰,拧紧螺钉,接好岩心夹持器进出口管线。

### 2.4 测定装置气密性检查

先将真空泵接到测定装置上。启动恒压泵,使环压高于气室 3~5 MPa。抽真空 30 min,使真空度达到 -0.1 MPa,关闭真空泵,查看真空度是否降低,对装置进行检漏。有问题及时查找原因,排除故障。

### 2.5 加注扩散气体

打开注气阀门和增压泵,缓慢开始注气增压,注气过程中始终保持环压高于气室 3~5 MPa,达到所需实验压力时,及时关闭各个阀门。

2.6 加热

根据实验条件设定温度,启动恒温油浴系统,可以单独加热也可以3个同时加热。扩散室内气压会因为温度的升高而增大,这时需提高围压的压力,始终保持环压高于气室3~5 MPa。

2.7 样品检测

所有实验条件恒定以后,用100 μL气密性气体进样针采集模拟样品气,注入气相色谱检测甲烷浓度。实验中所用气相色谱为Agilent6890N气相色谱仪,配一个火焰离子化检测器(FID)色谱柱:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PLOT毛细柱,柱长50 m,柱内径0.53 mm。

2.8 实验结束

当一个实验条件结束以后,氮气室甲烷浓度已经较高,需要卸除气室压力,卸压时一定要缓慢卸压,防止岩心损坏。同时环压也要减压,保持压差3~5 MPa。

2.9 测定装置的维护与保养

各种泵要定期清洗,长期使用会对流程密封件的正常磨损,影响密封性能。所以,需定期对装置进行耐压试验,对装置的泄漏部分更换密封件。

3 结果与讨论

3.1 压力实验

实验中选择使用湖北姊归茅坪镇寒武系牛蹄塘组剖面露头样品,将岩心加工成厚度0.5 cm,岩心直径2.5 cm装入岩心夹持器,常温下扩散室气压升高到55 MPa,间隔一段时间抽取氮气扩散室气体进行检测,检测结果如表1、图2所示。按照行标SY/T 6129—2016 岩石中烃类气体扩散系数测定方法获得扩散系数为4.04×10<sup>-9</sup> cm<sup>2</sup>/s。

3.2 温度实验

实验中选择使用四川旺苍正源茅口组剖面茅三段露头样品,将岩心加工成厚度0.5 cm,岩心直径2.5 cm装入岩心夹持器,扩散室气压升高到2 MPa,

升高温度110 ℃,间隔一段时间抽取氮气扩散室气体进行检测,检测结果如表2、图3所示。按照行标SY/T 6129—2016 岩石中烃类气体扩散系数测定方法获得扩散系数为2.74×10<sup>-9</sup> cm<sup>2</sup>/s。

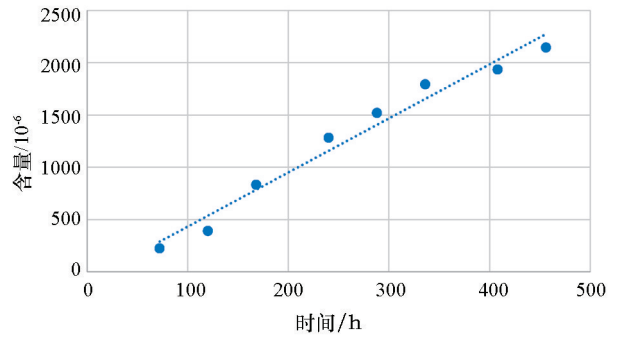


图2 常温、55 MPa 实验条件氮气扩散室气体甲烷含量变化  
Fig.2 Variation of methane concentration in nitrogen chamber under experimental conditions of 25 °C and 55 MPa

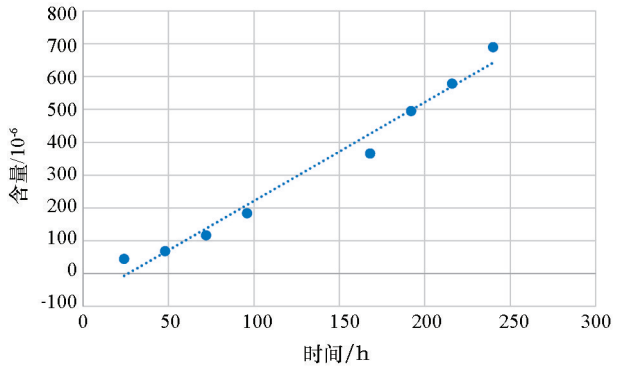


图3 2 MPa、110 ℃实验条件氮气扩散室气体甲烷含量变化  
Fig.3 Variation of methane concentration in nitrogen chamber under experimental conditions of 110 °C and 2 MPa

3.3 温度压力实验

实验中选择使用湖北姊归茅坪镇寒武系牛蹄塘组剖面露头样品样品,将岩心加工成厚度0.5 cm,岩心直径2.5 cm装入岩心夹持器,扩散室气压升高到10 MPa,升高温度50 ℃,间隔一段时间抽取氮气扩散室气体进行检测,检测结果如表3、图4所示。按照行标SY/T 6129—2016 岩石中烃类气体扩散系数测定方法获得扩散系数为2.68×10<sup>-10</sup> cm<sup>2</sup>/s。

表1 常温、55 MPa 实验条件氮气扩散室气体甲烷含量变化

Table 1 Variation of methane concentration in nitrogen chamber under experimental conditions of 25 °C and 55 MPa								
时间/h	72	120	168	240	288	336	408	456
含量/10 <sup>-6</sup>	225	392	834	1284	1521	1795	1937	2147

表2 2 MPa、110 ℃实验条件氮气扩散室气体甲烷含量变化

Table 2 Variation of methane concentration in nitrogen chamber under experimental conditions of 110 °C and 2 MPa								
时间/h	24	48	72	96	168	192	216	240
含量/10 <sup>-6</sup>	44.5	68.1	116	184	366	495	579	690

表 3 50℃、10 MPa 实验条件氮气扩散室气体甲烷含量变化

时间/h	18	90	186	330	498	666	810	1266
含量/10 <sup>-6</sup>	22.4	32.2	53.9	88.4	129	166	208	403

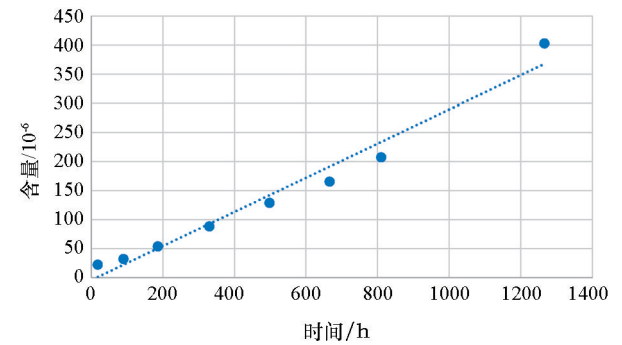


图 4 50℃、10 MPa 实验条件氮气扩散室气体甲烷含量变化  
Fig.4 Variation of methane concentration in nitrogen chamber under experimental conditions of 50 °C and 10 MPa

3.4 与物性相似样品数据对比

薛海涛等<sup>[10]</sup>测得塔里木灰岩样品扩散系数(30℃,0.10 MPa)为 $1.87\times10^{-7}\text{ cm}^2/\text{s}$ (如表 4 所示)。我们实验中选择了一块物性相似的灰岩样品(如表 5 所示),实验温度 30℃,气室压力 20 MPa,实验围压 26 MPa,测定扩散系数为 $1.63\times10^{-8}\text{ cm}^2/\text{s}$ 。物性相似的不同灰岩样品,当扩散室压力由 0.10 MPa 提高到 20 MPa 时,所获得的扩散系数降低了 1 个数量级。说明在较高的压力条件下,本装置的测试数据更能代表深层天然气的扩散系数。

表 4 塔里木灰岩样品扩散系数(30℃,0.01 MPa)<sup>[10]</sup>  
Table 4 Diffusion coefficient of the limestone sample from Tarim Basin (30℃, 0.01 MPa)

岩性	孔隙度/%	实验温度/℃	气室压力/MPa	扩散系数/( $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )
结晶灰岩	2.4	30	0.10	$1.87\times10^{-7}$

表 5 某灰岩样品孔隙度和渗透率

岩性	孔隙度/%	深度/m	渗透率/mD
灰岩	2.4	1593.9	0.0003

4 结语

自行研制的天然气扩散模拟实验装置可实现较高温度和压力条件下(深层条件)的天然气扩散系数测定,解决现有天然气扩散系数测试装置扩散室压力偏低的问题。

以物性相似的不同灰岩样品,使用自研的装置测定扩散系数,并与前人测试数据进行对比,结果表明该深层天然气扩散实验装置测试数据更能反映深层条件,为研究深层天然气保存条件评价提供了技术手段。

参考文献 (References):

[1] 柳广弟,赵忠英,孙明亮,等. 天然气在岩石中扩散系数的新认识[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5):559-565.  
Liu G D,Zhao Z Y,Sun M L,et al.New insights into natural gas diffusion coefficient in rocks[J].Petroleum Exploration and Development,2012,39(5):559-565.

[2] 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):108-112.  
Li H Y,Fu G,Peng S B.Experimental study on the diffusion coefficients of natural Gas [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2001,23(1):108-112.

[3] 李海燕,彭仕宓,傅广.天然气扩散系数的研究方法[J].石油勘探与开发,2001,28(1):33-35.  
Li H Y, Peng S B, Fu G.Research method of diffusion coefficient of natural gas[J].Petroleum Exploration and Development,2001,28(1):33-35.

[4] 娄洪,罗鹏,薛盼,等. 天然气扩散系数影响因素的定量模拟研究[J]. 内蒙古石油化工, 2012, 14: 5-6.  
Lou H,Luo P,Xue P,et al.The quantitative study on factors influencing diffusion coefficients of natural gas[J].Inner Mongolia Petrochemical Industry,2012,14:5-6.

[5] 张璐,国建英,谢增业,等.岩石中烃类气体扩散系数测定技术细节浅析[J].石油和化工设备, 2019, 22(5):28-31.  
Zhang L,Guo J Y,Xie Z Y,et al.Technical details of determination of hydrocarbon gas diffusion coefficient in rock [J].Petroleum and Chemical Equipment, 2019, 22(5):28-31.

[6] 王晓波,陈践发,李剑,等.高温高压致密气藏岩石扩散系数测定及影响因素[J].中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(3):25-31.  
Wang X B,Chen J F,Li J,et al.Rock diffusion coefficient measuring and its effecting factors of tightgas reservoir under high temperature and high pressure[J].Journal of China University of Petroleum,2014,38(3):25-31.

[7] 张云峰,于建成,李蓬,等.饱和水条件下天然气在岩石中扩散系数的测定[J].大庆石油学院学报,2001,25(4):4-7.  
Zhang Y F,Yu J C,Li P, et al.Determination of the diffusion coefficient of natural gas in rocks under saturated water[J].Journal of Daqing Petroleum Institute,2001,25(4):4-7.

[8] 邵英梅,曲斌,刘玉,等. 温度压力下岩石扩散系数检测装置的研制[J]. 石油仪器,2004,18(5):16-18.  
Shao Y M,Qu B,Liu Y, et al.Development of rock diffusion coeffi-

cient detecting device under temperature and pressure[J]. Petroleum Instruments, 2004, 18(5): 16-18.

[9] 银占华,赵希春,刘振东.天然气扩散系数测试装置的研制[J]. 石油仪器, 2014, 28(3): 19-21.

Yin Z H, Zhao X C, Liu Z D. Development of gas diffusion coefficient testing device[J]. Petroleum Instruments, 2014, 28(3): 19-21.

[10] 薛海涛,李璐璐,卢双舫. 天然气扩散损失量估算方法探讨[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(3): 343-352.

Xue H T, Li L L, Lu S F. A discussion on methods for estimating diffusion loss of natural gas[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3): 343-352.

[11] 曲秀英. 扩散系数实验技术研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2012, 31(4): 46-49.

Qu X Y. Studies on the experimental technique of diffusion coefficient[J]. Petroleum Geology and Oil field Development in Daqing, 2012, 31(4): 46-49.

[12] 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, 12(3): 17-24.

Hao S S, Huang Z L, Gao Y B. Study on diffusion coefficient of light hydrocarbon and dynamic equilibrium principle of natural gas migration and accumulation[J]. Acta Petrolei Sinica, 1991, 12(3): 17-24.

[13] 付广,李椿,孟庆芬. 天然气扩散系数的系统研究[J]. 断块油气田, 2003, 10(5): 13-16.

Fu G, Li C, Meng Q F. Systematic study on diffusion coefficient of natural gas[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2003, 10(5): 13-16.

[14] 杨建,康毅力,桑宇,等. 致密砂岩天然气扩散能力研究[J]. 西南石油大学学报:自然科学版, 2009, 31(6): 76-79.

Yang J, Kang Y L, Sang Y. Research on diffusiblity of the gas in tight sand gas reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2009, 31(6): 76-79.

[15] SY/T 6129—2016 岩石中烃类气体扩散系数测定方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2016.

SY/T 6129—2016 Determination method of diffusion coefficient for hydrocarbon gas in rocks[S]. Beijing: China Standard Press, 2016.

The development of an experimental measuring apparatus for simulating the diffusion coefficient of naturalgas in depth

LU Li, WANG Guo-Jian, ZHU Huai-Ping, WANG Guang-Hua, JIANG Tao  
(Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Wuxi 214126, China)

**Abstract:** In order to measure the diffusion coefficient of hydrocarbon gases in rocks more accurately and provide parameters for the evaluation of the loss and preservation of natural gas accumulations, the authors developed an experiment apparatus to simulate the diffusivity of natural gas in depth. The hardware structure, technical parameters of the apparatus and the experimental flow for simulating the deep natural gas diffusion coefficient were described. Taking the shale of Cambrian Niutitang formation and the dense limestone of Permian Maokou formation as examples, the authors simulated the natural gas diffusion in rocks under high temperature and high pressure, and calculated their diffusion coefficients. The results show that the test data of the deep natural gas diffusion coefficient are reliable by using the apparatus, which provides a technical means for the evaluation of deep gas preservation conditions.

**Key words:** deep natural gas; diffusion coefficient; simulation experiment device

(本文编辑:蒋实)