



中国地质调查局地学文献中心·中国地质图书馆

# 国外地学文献速递

Express Delivery of Foreign Geological Literature

非常规油气专辑 (2020年第6期)





## **编者按**

非常规油气资源主要包括页岩气、煤层气、油页岩、天然气水合物和油砂矿等，它们在全球能源结构中扮演着重要角色，产业化前景广阔。我国非常规油气资源储量丰富，利用潜力巨大，是目前最为现实的接替能源，对非常规油气资源的勘探和开发将为保障我国能源安全做出重要贡献。

国外地学文献速递（非常规油气专辑）是中国地质调查局地学文献中心为切实服务地质调查中心工作而推出的《国外地学文献速递》系列专辑之一。通过对国外主要文献数据库中涉及非常规油气资源的最新文献进行筛选和摘要编译形成专辑。

本专辑为 2020 年非常规油气专辑的第 6 期，收录了选自 Journal of Natural Gas Science and Engineering、Journal of Petroleum Science and Engineering 和 International Journal of Coal Geology 等期刊的 11 篇文章，重点关注国际煤层气、页岩气和天然气水合物等方面的最新研究成果，以期为相关科研人员的研究工作提供支撑和服务。

# 目 录

乌克兰 Donets 盆地石炭系煤岩纳米孔隙结构：HRTEM 和气体吸附综合研究.....	1
孔隙大小对页岩纳米孔选择性气体运移的影响.....	2
Utica 和 Eagle Ford 页岩中 CO <sub>2</sub> 对流体运移和碳酸盐溶蚀影响的多尺度研究 .....	3
基于机器学习的页岩气生产潜力综合评估框架：以 Marcellus 页岩为例 .....	4
利用连通油藏储量模型预测页岩气产能 .....	5
页岩气储层流体流动模拟研究综述 .....	6
水力裂缝和天然裂缝相互作用对气井产能的影响 .....	7
北达科他州迪瓦德县 Lower Bakken 页岩的地球化学、岩相学和岩石物理学特征.....	8
含气体水合物沉积层非稳态相对渗透率测试的实验系统与过程 .....	9
二氧化硅和氧化锌纳米粒子存在条件下综合运用 CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> 置换和热作用从天然气水合物中生产甲烷的实验研究.....	10
甲烷气体影响下的客体分子交换和二氧化碳水合物的稳定性.....	11



获取更多地学文献信息，请关注“移动图书馆”

本刊由“地学文献信息更新与服务”项目支持

专辑主编：陈 杨  
审 校：宋韦剑  
审 核：王学评

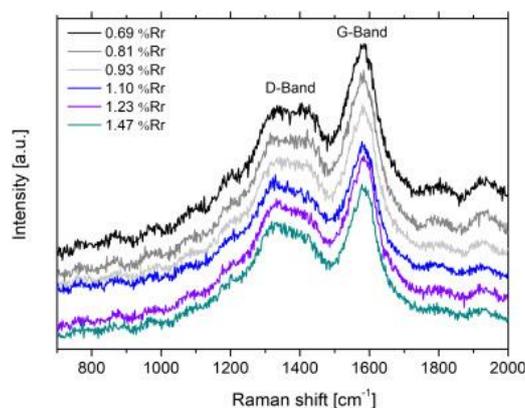
联系电话：(010)66554751  
联系人：陈 杨  
电子信箱：chenyang@cgl.org.cn

## 乌克兰 Donets 盆地石炭系煤岩纳米孔隙结构：HRTEM 和气体吸附综合研究

Nanoscale pore structure of Carboniferous coals from the Ukrainian Donets Basin: A combined HRTEM and gas sorption study

### ■ 摘要译文

煤岩复杂的孔隙结构受不同成分、沉积环境和成熟度等相关因素的影响。为了研究煤孔隙在纳米尺度上的演化规律，选取乌克兰Donets盆地石炭系富镜质组煤岩样品，样品成熟度0.69-1.47%Rr。传统明场透射电子显微镜(BF TEM)和高分辨率透射电镜(HRTEM)成像技术被直接用于确定孔隙大小分布、孔隙形态、几何因素和其他结构特征，而低压气体吸附(CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>)等方法常用于评价微孔和中孔的结构参数。高压CH<sub>4</sub>吸附实验表明，在研究的成熟度范围内，甲烷的吸附能力存在变化，且通过拉曼光谱观察到镜质体结构变化。结果显示，镜质组孔隙封闭主要存在于生油窗成熟度峰值，微孔和中孔结构对热成熟度的敏感性，有机硫作为催化剂对结构性改变动力学的重要性。在1.10%Rr处观察到的结构改变与湿气开始生成有关。镜质组显微力学性质的结构控制是基于前期研究中减少的弹性模量与HRTEM获得的平均纳米孔径之间的相关性表现的。该综合方法的应用提高了对沉积和成熟度相关过程的认识，这些过程可能影响孔隙演化，进而决定煤层的储气能力。



不同成熟度条件下镜质体的典型拉曼光谱

### ■ 作者信息

S. Vranjes-Wessely<sup>a,b</sup>, D. Misch<sup>a</sup>, I. Issa<sup>b</sup>, et al.

<sup>a</sup> Department of Applied Geosciences and Geophysics, Montanuniversität Leoben, A-8700 Leoben, Austria

<sup>b</sup> Department of Materials Science, Montanuniversität Leoben, A-8700 Leoben, Austria

本文发表于: International Journal of Coal Geology 2020年第224卷 编号 103484

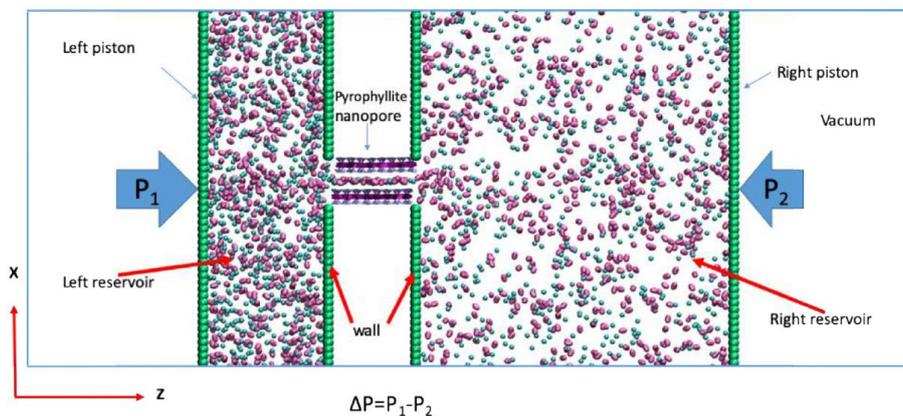
全文链接: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166516220301609>

## 孔隙大小对页岩纳米孔选择性气体运移的影响

Pore size effect on selective gas transport in shale nanopores

### ■ 摘要译文

在页岩气生产过程中,天然气成分可能会随着时间而变化。为了研究这一现象,本文采用分子动力学模拟的方法研究了  $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$  及其混合物在压力梯度驱动下从源容器通过叶蜡石纳米孔的渗透过程。对于纯气体,无论孔径大小,  $\text{CH}_4$  的流速始终高于  $\text{C}_2\text{H}_6$ 。而对于  $\text{C}_2\text{H}_6$  和  $\text{CH}_4$  1:1 的混合物,当孔径小于~1.8 nm 时,  $\text{C}_2\text{H}_6$ :  $\text{CH}_4$  的流速比高于容器内的气体组成比(即 1:1)。在纳米孔中,  $\text{C}_2\text{H}_6$  对  $\text{CH}_4$  的竞争性吸附导致了  $\text{C}_2\text{H}_6$  的选择性运移。选择性运移还取决于吸附分子表面扩散与孔隙中心粘性流的相互作用。当孔径大于 1.8 nm 时,随着粘性流开始主导表面扩散,选择性运移减小。研究表明,页岩气在生产过程中的成分分异是纳米孔限制的结果,是非常规储层的关键特征。相关的页岩气成分信息可用于监测诸如采收率等生产动态。



气体通过叶蜡石纳米孔运移模拟系统

### ■ 作者信息

Tuan A. Ho<sup>a</sup>, Yifeng Wang<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Geochemistry Department, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 87185, USA

<sup>b</sup>Nuclear Waste Disposal Research and Analysis Department, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 87185, USA

本文发表于: Journal of Natural Gas Science and Engineering 2020年第83卷 编号 103543

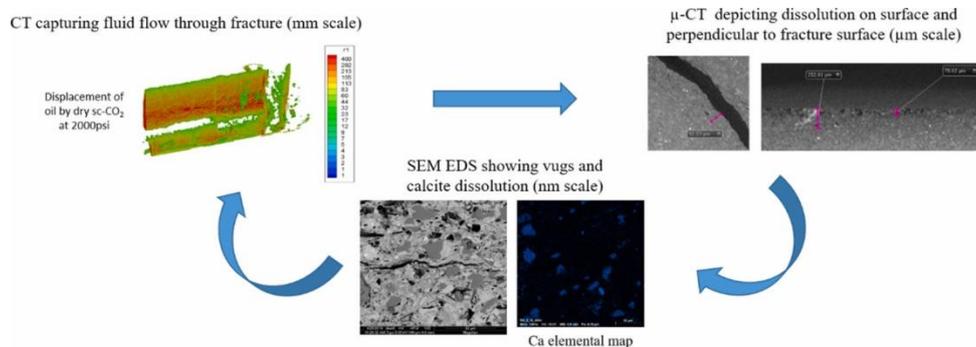
全文链接: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875510020303978>

## Utica 和 Eagle Ford 页岩中 CO<sub>2</sub> 对流体运移和碳酸盐溶蚀影响的多尺度研究

Multiscale study of CO<sub>2</sub> impact on fluid transport and carbonate dissolution in Utica and Eagle Ford shale

### ■ 摘要译文

本文研究了 CO<sub>2</sub> 对富碳酸盐矿物的 Utica 和 Eagle Ford 页岩的矿物蚀变、流体运移和提高采收率的影响。研究方法包括计算机断层扫描(CT)、岩心或厘米尺度脉冲衰减、扫描电子显微镜(SEM)和 $\mu$ -CT 微米尺度评价等。岩心尺度的研究结果显示,当存在水饱和(水湿)超临界 CO<sub>2</sub> 或碳酸水的情况下,其对基质流动或采收率没有显著贡献。在注入纯碳酸水过程中,CT 扫描能够获取孔径缩小的情况,这种效应可能是由于裂缝表面附近基质软化和有效应力引起的孔隙减小所致。这表明利用 SEM 和 $\mu$ -CT 等更好的检测技术在获取 CO<sub>2</sub>-水流体与富碳酸盐矿物页岩之间相互作用的必要性。微尺度分析表明,碳酸水确实可以溶解方解石,但在观察时间内并不能溶解白云石,溶解深度限制在 100 微米。此外,能量色散谱(EDS)和 $\mu$ -CT 图像显示,水湿超临界 CO<sub>2</sub> 中的水分不会引起碳酸盐岩溶蚀。最后,分析证明用于 SEM 成像样品制备的金涂层并不影响本文实验中观察到的溶解结果。



图解摘要

### ■ 作者信息

Youssef Elkady, Anthony R. Kavscek

Energy Resources Engineering, Stanford University, United States of America

本文发表于: Journal of Petroleum Science and Engineering 2020 年第 195 卷 编号 107867

全文链接: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410520309268>

## 基于机器学习的页岩气生产潜力综合评估框架：以 Marcellus 页岩为例

Machine learning-informed ensemble framework for evaluating shale gas production potential: Case study in the Marcellus Shale

### ■ 摘要译文

目前,人工智能和机器学习(ML)被广泛应用于油气领域,并被视为有助于提高勘探和生产开发效率的新技术。但若想在这方面有显著的提升,需要结合内在协同效应,将 ML 技术应用于油气挑战评估。该研究引入了一个综合框架,将数据驱动的 ML 预测模型与使产能最大的井位设计优化方法相结合。该模型能够评价与预估最终采收率相关的非常规油气水平井的产能指标。应用该框架对整个 Marcellus 页岩的生产潜力进行从低到高的空间排序。ML 模型的建立使用了梯度提升回归树(GBRT)算法,能够对测试数据达到 82%的预测精度。通过对页岩气的地质特征分布、优化的井位设计和完井参数进行统计评估,明确了页岩气井生产控制因素,并确定显著特征中是否存在共性及差异。产能最高的区域位于 Marcellus 页岩的东北部核心区及其外围。统计分析表明,相对于产能较低的地区,产能较高地区的某些有利于天然气生产的地质特征存在显著不同,最明显的是储层净厚度和孔隙度。优化的井位设计参数会随着它们在研究区域的位置和后续产能排名区域变化。总的来说,本文所讨论的基于 ML 的框架试图同时分析页岩的控制因素,从而对生产潜力提供一个系统的评价结果,并对与地质属性和井位设计参数进行量化。

### ■ 作者信息

**Derek Vikara<sup>a,b</sup>, Donald Remson<sup>c</sup>, Vikas Khanna<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>Department of Civil and Environmental Engineering University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA, 15261, United States

<sup>b</sup>KeyLogic Systems, LLC. National Energy Technology Laboratory, 626 Cochran Mill Road, Pittsburgh, PA, 15236, United States

<sup>c</sup>National Energy Technology Laboratory, 626 Cochran Mill Road, Pittsburgh, PA, 15236, United States

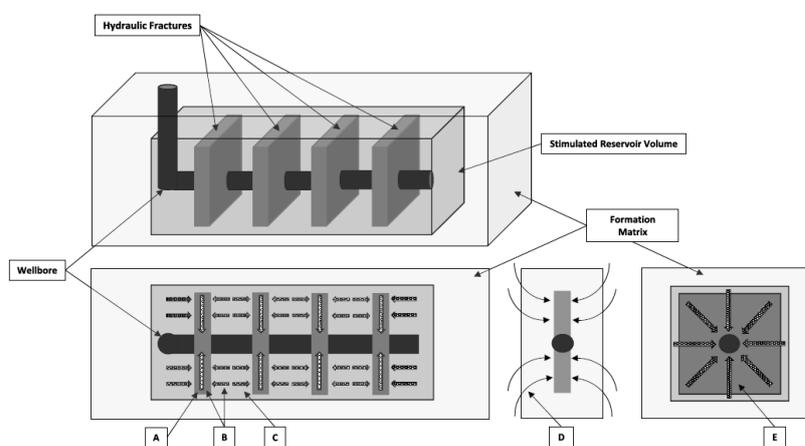
本文发表于: Journal of Natural Gas Science and Engineering 2020年第84卷 编号 103679  
全文链接: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875510020305333>

## 利用连通油藏储量模型预测页岩气产能

Forecasting shale gas performance using the Connected Reservoir Storage Model

### ■ 摘要译文

页岩储层岩石沉积和储集机理特征复杂,是以建立由复杂天然裂缝和水力压裂改造组成的流动系统为基础,实现油气的经济开采的。由于页岩气井开采周期内会遇到多种复杂的流动机制,因此页岩储层生产动态预测对储层管理至关重要且极具挑战性。许多基于历史生产曲线拟合的模型往往不能准确预测页岩气储层的产量,特别是当一口井的生产历史数据较少时。本文进一步将连通油藏储量模型(CRSM)的适用性推广到页岩储层。CRSM是根据扩散性理论推导出来的,利用历史产量和井底流压(BHFP)来确定储层动态和单位压力响应,可方便地预测不同工作条件下的生产动态。由于CRSM可以在不知道油藏几何形态或渗透率等有限油藏信息条件下进行确定,其在数学上是可靠且易于应用的。本研究利用页岩气井的生产历史来证明CRSM在产能预测方面的作用,并将该模型与随机方法耦合,在变化的工作条件下求得最可靠的预测结果。



页岩气生产过程中流动状态示意图

### ■ 作者信息

David R. Childers, Xingru Wu

University of Oklahoma, United States

本文发表于: Journal of Natural Gas Science and Engineering 2020年第82卷 编号 103499

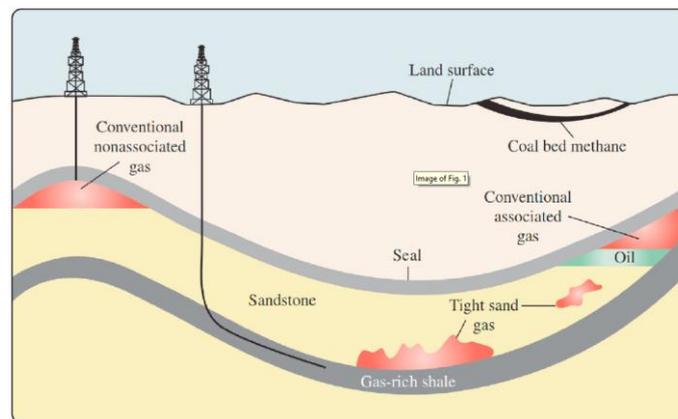
全文链接: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187551002030353>

## 页岩气储层流体流动模拟研究综述

Flow modeling in shale gas reservoirs: A comprehensive review

### ■ 摘要译文

页岩气储层(SGRs)在过去的十年里一直用于商业天然气的生产,并已成为当今世界的主要能源来源之一。由于其重要性日益提高,必须对这类储层进行描述和表征,尤其是从流体动力学模拟的角度开展研究。基于其超致密多孔结构、埋深及较大的横向延展性,页岩的岩石物理和储层物性与常规储层相比具有明显的特殊性。这些差异使得气体在低渗透性地层中流动更为复杂,前人开发了大量模型来表征流体流动特征。本文对现有的SGRs流动模型进行了综述,并对其具体特征进行了讨论,包括致密孔隙中受限气体的相态、气体的吸附/解吸、流动机理(滑脱、克努森扩散和表面扩散)和应力敏感性。此外,为了阐明页岩孔隙结构对气体流动的影响,介绍了以孔隙网络模型(PNMs)为代表的实际页岩孔隙结构,并对该领域的优秀研究成果进行了评述。这里所讨论的所有模型都是最新发表的文献,且兼顾早期的主流模型。在大多数情况下,本文进行了实验数据比较,并在模型间进行敏感性分析,以确保读着能更好地理解在自己的研究中应该使用哪一个模型。本文的目的是为今后SGR流体流动和压力/速率瞬态分析与建模等研究提供指导。



不同天然气藏地质剖面示意图

### ■ 作者信息

Amin Taghavinejad<sup>a,b</sup>, Mohammad Sharifi<sup>a</sup>, Ehsan Heidaryan<sup>c</sup>, et al.

<sup>a</sup>Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran; <sup>b</sup>Ahvaz Center for Petroleum Research, Petroleum University of Technology, Ahvaz, Iran; <sup>c</sup>Department of Chemical Engineering, Engineering School, University of São Paulo (USP), Caixa Postal 61548, São Paulo, SP, 05424-970, Brazil

本文发表于: Journal of Natural Gas Science and Engineering 2020年第83卷 编号 103535

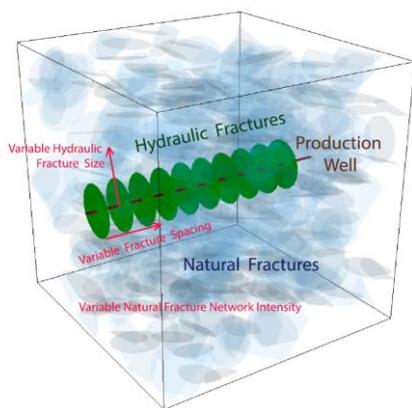
全文链接: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875510020303899>

## 水力裂缝和天然裂缝相互作用对气井产能的影响

Role of interaction between hydraulic and natural fractures on production

### 摘要译文

在页岩等非常规储层中，水力压裂的主要目的之一是改善现有天然裂缝与生产井之间的连通性。由于页岩储层的原始渗透率极低，这种新形成的裂缝连通性为先存天然裂缝中的油气提供了更快的运移通道。对不同先存天然裂缝网络密度、不同水力裂缝尺寸和阶段的大型裂缝性储层的游离气产量进行了数值模拟。发现产能随天然裂缝（密度）和水力裂缝（大小和阶段）特征变化。本文假设一旦达到最大裂缝连通性，其他的增产措施将不再显著提高产量。在数值模拟研究中，本文使用了一种先进的建模工具来研究裂缝连通性，即离散裂缝网络(DFN)法，该方法可以代表与现场观测相似的裂缝网络。在该模型中，准确定义了水平生产井和垂直水力裂缝，且其被随机生成的天然裂缝网络包围。数值模拟实验结果表明，不同裂缝密度的裂缝性储层的裂缝连通性取决于水力裂缝设置。对于大密度天然裂缝网络，水力裂缝尺寸(25 m -150 m)和裂缝间距(15 m-45 m)对累积产气量没有显著影响。然而，在天然裂缝稀疏的储层中，尽管裂缝间距作用不明显，但水力裂缝的尺寸对产气量非常重要。



储层模型和参数复杂情况示意图

### 作者信息

N. Makedonska<sup>a</sup>, S. Karra<sup>a</sup>, H.S. Viswanathan<sup>a</sup>, G.D. Guthrie<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Earth and Environmental Sciences Division, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, 87545, USA; <sup>b</sup> Science Program Offices, Applied Energy, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, 87545, USA

本文发表于: Journal of Natural Gas Science and Engineering 2020年第82卷 编号 103451

全文链接: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187551002030305>

## 北达科他州迪瓦德县 Lower Bakken 页岩的地球化学、岩相学和岩石物理学特征

Geochemical, petrographic and petrophysical characterization of the Lower Bakken Shale, Divide County, North Dakota

### ■ 摘要译文

Lower Bakken 页岩是 Bakken 油气系统的重要组成部分，也是北美非常规油气富集地区。由于孔隙度、渗透率和其他岩石性质等多种因素的影响，非常规油气藏的油气产量的横向变化是不可预测的。因此，了解这些单元的地球化学(烃源岩潜力)、岩石学和岩石物性对评价 Lower Bakken 页岩的油气潜力至关重要。本研究利用北达科他州迪瓦德县 3 个油田的 4 口井的岩心开展研究，对样品进行岩石热解、有机岩石学、岩石薄片、XRD、SEM、孔隙度、孔径和孔隙流体分布分析。氦气孔隙度测试和核磁共振  $T_2$  孔隙度分析技术用于评价孔隙度，并验证测试结果的质量，避免误差。 $T_{max}$  和固体沥青反射率结果表明，研究区成熟度介于未成熟到早成熟阶段。有机岩石学研究表明，研究区以固体沥青和海藻类体为主，证实了通过热解和研究区海相沉积环境确定的 II 型干酪根类型。SEM 研究表明有机质类型主要有：细粒有机质、有机-无机质混合物、颗粒有机质和纯有机质，纯有机质充填于大部分有机质孔隙中。此外，通过 SEM 识别的孔隙类型包括矿物基质孔隙、有机质孔隙和微裂隙。氦气和 NMR 测试的孔隙度值差异主要由大量粘土矿物引起。微孔、中孔和大孔分布主要受热成熟度、TOC 和粘土矿物含量等因素影响。根据  $T_2$  截止值和丰富的粘土基质孔隙度证据，可确定粘土束缚水为页岩样品中的主要流体。

### ■ 作者信息

Adedoyin Adeyilola<sup>a</sup>, Stephan Nordeng<sup>b</sup>, Chioma Onwumelu<sup>b</sup>, Francis Nwachukwu<sup>b</sup>, Thomas Gentzis<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Department of Earth and Atmospheric Sciences, Central Michigan University, Mount Pleasant, MI 48859, USA

<sup>b</sup>Harold Hamm School of Geology & Geological Engineering, University of North Dakota, Grand Forks, ND 58202, USA

<sup>c</sup>Core Laboratories, Reservoir Geology Group, 6316 Windfern Road, Houston, TX 77040, USA

本文发表于：International Journal of Coal Geology 2020年第224卷 编号 103477

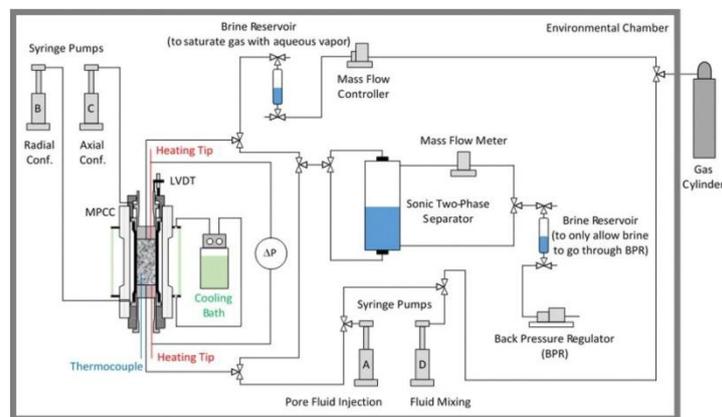
全文链接：<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166516219310882>

## 含气体水合物沉积层非稳态相对渗透率测试的实验系统与过程

An experimental system and procedure of unsteady-state relative permeability test for gas hydrate-bearing sediments

### ■ 摘要译文

水合物沉积层 (HBS) 中气水相对渗透率以及相对渗透率与水合物饱和度相关性的准确评价对预测水合物储层的产能至关重要。然而, 目前由于在 HBS 中进行多相流实验较为困难, 缺乏相关实验数据, 因此仍未能有效开展相关评价。基于以上问题, 本文研究拟开发并验证一种新的非稳态相对渗透率测试系统和程序, 可以在 HBS 中得到可靠且可重现的流体测量值。天然气水合物被认为是沉积物中固体基质的一部分, 因此保持恒定的水合物饱和度是实验的难点之一。在本实验研究中, 在水合物稳定边界运用压力-温度(P-T)控制来实现恒定的饱和度。采用常规 Buckley-Leverett 理论, 通过测试样品压差、甲烷注入速度和驱替盐水体积来计算相对渗透率。含水合物样品的残余盐水饱和度比无水合物样品高, 这可能是由于孔隙尺寸减小、固体基质非均质性增强、有水合物存在时固体基质和孔隙尺寸分布增大等原因所致。基于气体水合物相对渗透率模型描述 HBS 的非稳态流动实验结果还需开展进一步的研究。



实验过程示意图

### ■ 作者信息

Jeong-Hoon Choi<sup>a,b</sup>, Evgeniy M. Myshakin<sup>a,b</sup>, Liang Lei<sup>a,c</sup>, Timothy J. Kneafsey<sup>d</sup>, Yongkoo Seol<sup>a</sup>

<sup>a</sup>National Energy Technology Laboratory, U.S. Department of Energy, Morgantown, WV, USA;

<sup>b</sup>Leidos Research Support Team, Morgantown, WV, USA <sup>c</sup>Oak Ridge Institute for Science and Education, Morgantown, WV, USA <sup>d</sup>Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA

本文发表于: Journal of Natural Gas Science and Engineering 2020 年第 83 卷编号 103545

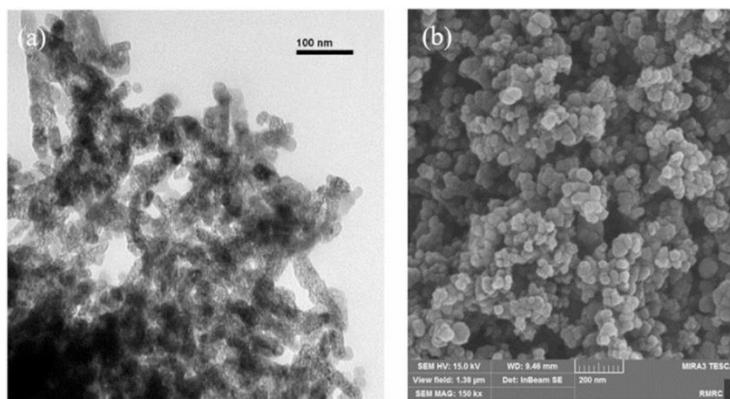
全文链接: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875510020303991>

## 二氧化硅和氧化锌纳米粒子存在条件下综合运用 CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> 置换和热作用从天然气水合物中生产甲烷的实验研究

Experimental investigation of using combined CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> replacement and thermal stimulation methods for methane production from gas hydrate in the presence of SiO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles

### ■ 摘要译文

本文在纳米粒子存在的情况下,综合采用热处理和 CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> 置换方法,在前期形成的甲烷水合物中提高 CH<sub>4</sub> 的采收率和 CO<sub>2</sub> 的封存率。为此,首先研究了不同 CO<sub>2</sub> 注入压力和 CO<sub>2</sub> 水合物形成温度对置换过程的影响,得出最佳 P-T 条件。然后,将二氧化硅和氧化锌纳米粒子加入到实验体系中,研究在最佳条件下纳米材料对 CH<sub>4</sub> 产出和 CO<sub>2</sub> 封存的影响。结果表明,甲烷最佳产出条件为 45 bar, 8°C。此外,在纳米粒子存在的情况下,综合方法的采收效率显著提高。结果表明,二氧化硅和氧化锌纳米粒子存在条件下,甲烷的采收率分别为 37.7% 和 51.9% 以上,CO<sub>2</sub> 的存储率分别为 54.6% 和 68.4%。本研究为进一步提高水合物资源的甲烷采收率提供了新的途径。



(a) SiO<sub>2</sub>de TEM 图像; (b)ZnO 纳米颗粒的 SEM 图像

### ■ 作者信息

**Noushin Adibi, Mohsen Mohammadi, Mohammad Reza Ehsani, Erfan Khanmohammadian**  
Department of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, 84156-83111, Iran

本文发表于: Journal of Natural Gas Science and Engineering 2020年第84卷 编号10690

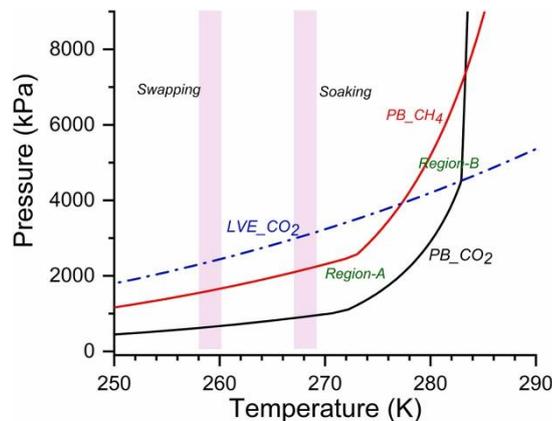
全文链接: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875510020305448>

## 甲烷气体影响下的客体分子交换和二氧化碳水合物的稳定性

Guest molecular exchange and stability of carbon dioxide hydrates under the influence of methane gas

### ■ 摘要译文

分子交换是天然气水合物开采过程中的前沿技术。在这种情况下，笼形中的甲烷分子与二氧化碳分子置换，该过程的效率取决于注入气体的压力(P)和温度(T)。关于“客客”交换问题，存在着很多矛盾观点，主要是目前还不清楚这个过程是通过分子扩散还是通过水合物的重组实现的。这项研究报告了在低于融冰温度下，原始二氧化碳水合物中 CO<sub>2</sub> 被 CH<sub>4</sub> 取代的过程。直观上，该过程是不易进行的，因为二氧化碳水合物在热力学上比甲烷水合物更稳定。实验过程中注入气体(CH<sub>4</sub>)压力介于 0.7-8.5 MPa。笼形中 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 拉曼特征共存也证实了在原始 CO<sub>2</sub> 水合物中存在分子交换。此外，CH<sub>4</sub> 在 sI 型水合物的 5<sup>12</sup>6<sup>2</sup> 和 5<sup>12</sup> 笼中的扩散为混合水合物的形成提供了途径，水合物的分解模式也支持了混合水合物的快速增长。



甲烷（红线）和二氧化碳（黑线）水合物相界限示意图

### ■ 作者信息

**Pinnelli S. R. Prasad<sup>a,b</sup>, Burla Sai Kiran<sup>a,b</sup>**

<sup>a</sup> Gas Hydrate Division, CSIR–National Geophysical Research Institute (CSIR–NGRI), Hyderabad, 500 007, India;

<sup>b</sup> Academy of Scientific and Innovative Research (AcSIR), Ghaziabad, 201 002, India

本文发表于: Journal of Natural Gas Science and Engineering 2020 年第 84 卷 编号 103689

全文链接: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875510020305436>