

引用格式:向雪妮,黄亮,周文,等.基于分子模拟的气体水合物结构特征及储气特性研究[J].油气藏评价与开发,2022,12(5):825-832.

XIANG Xueni, HUANG Liang, ZHOU Wen, et al. Structural characteristics and gas storage properties of gas hydrates based on molecular simulation[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(5): 825-832.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.05.015

基于分子模拟的气体水合物结构特征及储气特性研究

向雪妮¹,黄亮¹,周文¹,邹杰¹,张卓雅²

(1.成都理工大学能源学院,四川成都610059;2.中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室,北京102249)

摘要:天然气水合物资源丰富,是最具潜力的新能源之一。但目前天然气水合物尚未实现商业开采,其微观结构特征和储气机理亟待明确。基于SI、SII和SH型气体水合物的骨架和客体分子信息,构建并优化了3种典型水合物的分子模型。通过结构表征,明确了水合物的氢键数目、氢键长度、孔隙度、孔隙组成和孔径分布等结构特征,对比分析了3种典型水合物的微观结构差异。基于水合物骨架结构,采用巨正则蒙特卡洛方法研究了甲烷和二氧化碳的吸附行为,结合气体吸附量和吸附热阐明了3种水合物的储气特性及差异。结果表明,SII型水合物中平均氢键长度最大且数量最多,但其孔隙连通性最差;高压有利于提升水合物对气体的储气量,低温可增加水合物中气体吸附的稳定性;二氧化碳储存量虽小于甲烷,但二氧化碳吸附稳定性更强;气体在SII型水合物中的吸附量最大,在SI型水合物中的吸附热最大。

关键词:气体水合物;结构特征;储气特性;吸附;分子模拟

中图分类号:TE311

文献标识码:A

Structural characteristics and gas storage properties of gas hydrates based on molecular simulation

XIANG Xueni¹, HUANG Liang¹, ZHOU Wen¹, ZOU Jie¹, ZHANG Zhuoya²

(1. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: Natural gas hydrate are rich, which is one of the most potential new energy resources with abundant resources. However, gas hydrate has not been exploited commercially at present, and its micro-structure characteristics and gas storage mechanism need to be clarified urgently. Based on the framework and guest molecular information of SI, SII and SH type gas hydrates, the molecular models of three typical gas hydrates are constructed and optimized. The hydrogen bonds number, hydrogen bonds length, porosity, pore composition, pore size distribution and other structural characteristics of hydrates are determined by structural characterization, and the micro-structure differences of three typical hydrates are compared and analyzed. Based on the hydrate skeleton structure, the adsorption behavior of methane and carbon dioxide is studied by the grand Canonical Monte Carlo method. Combined with the adsorption capacity and adsorption heat, the gas storage characteristics and differences of the three hydrates are clarified. The results show that the hydrogen bonds in SII hydrate are the longest and the most abundant, but the pore connectivity is the worst. High pressure is conducive to increasing the gas storage capacity of hydrate, while low temperature can increase the stability of gas adsorption in hydrate. Although the amount of carbon dioxide storage is smaller than that of methane, the adsorption stability of carbon dioxide is stronger. The adsorption capacity of gas in SII type hydrate is the largest, and the adsorption heat in SI type hydrate is the largest.

Keywords: gas hydrate; structural characteristics; gas storage properties; adsorption; molecular simulation

收稿日期:2021-11-08。

第一作者简介:向雪妮(1998—),女,在读硕士研究生,从事流体相态理论及注气提高采收率方向研究。地址:四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,邮政编码:610059。E-mail:462092559@qq.com

通信作者简介:黄亮(1991—),男,博士,研究员,本刊首届青年编委,从事非常规油气储层评价方向研究。地址:四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,邮政编码:610059。E-mail:huangliang@cdut.edu.cn

天然气水合物分布广泛,烃类资源丰富且高效清洁,其特点引起人们的广泛研究^[1-4]。在水合物储层中,大量烃类气体赋存于水分子构成的笼形结构,在标准状态下,这些烃类气体体积可达到固体体积的150~170倍^[5]。目前,天然气水合物已成为常规能源重要的接替资源^[6],已探明储量高达230万亿立方米,但其中可开采储量不到三分之一^[7]。为实现天然气水合物资源的高效开发,迫切需要加强相关基础理论攻关。

水合物储气技术具有贮存和释放容易,成本低和安全性高等优点^[8],受到了研究者的青睐。目前,水合物已成为甲烷和氢气等载能气体运输以及储存的首选替代材料^[9]。此外,利用水合物封存二氧化碳也是实现碳中和目标的研究热点之一。由于气体在水中的溶解度小,气体水合物形成难度较大且气体含量较低^[10],如何提高水合物的储气密度是亟待解决的科学问题。

水合物苛刻的生成条件导致实验手段受到极大限制,分子模拟方法可以突破实验测试条件的限制,成为水合物研究的重要技术手段^[11-16]。ALAVI等^[17]采用蒙特卡洛模拟研究了SII和SH型甲烷水合物的笼占据率和最佳储气条件。OHGAKI等^[18]研究了二氧化碳在水合物中置换甲烷的微观机理。颜克凤^[19]和张庆东等^[20]研究了天然气水合物中的气体吸附行为和影响因素。颜克凤、胥萍等^[21,10]采用分子模拟研究了水合物的微观结构和储氢机理。尽管国内外学者针对气体水合物的结构稳定性和储气能力开展了一些研究,但几种典型天然气水合物在微观上的结构特征差异和储气特性尚待明确。为此,该文通过构建SI、SII和SH型气体水合物的分子模型,明确3种典型水合物的结构特征差异,通过开展客体分子的吸附模拟,阐明3种水合物的储气特性差异。

1 分子模拟细节

模拟在Materials Studio 7.0软件中开展。Materials studio为美国Accelrys公司开发的新一代全尺度材料模拟平台。它不仅拥有Microsoft标准用户界面,能够快速实现模型搭建、参数设定以及结果的可视化分析,而且融合了多种模拟方法和功能模块,能够实现从原子结构解析到宏观性能预测的全尺度科学研究。该文选用Materials studio 7.0软件,不仅

可以实现水合物建模前的处理操作,也可以完成水合物结构表征和吸附模拟的工作,还可以开展模拟平衡后水合物中氢键、储气量和吸附热等结果的后处理分析。

水合物分子模型的构建基于Visualizer界面开展。首先,基于水合物的空间群和晶格参数,构建水合物的晶胞结构。然后,输入水合物中氧原子坐标,并采用自动加氢构建水合物的初始晶体结构。最后,固定晶体中全部的氧原子,对氢原子进行几何优化,得到水合物的稳定结构。几何优化中选择Smart算法,共进行5 000步优化,力场选择CVFF(一致性价力场)。优化中动态监测体系能量的变化,当能量趋于最低并保持稳定状态,表明水合物晶体结构达到平衡状态。

在水合物微观结构表征中,通过perl脚本分析水合物的所有氢键数目及长度。采用探针法分析结构中的孔隙空间。水合物孔隙的计算包括两种方式,分别基于Connolly Surface和Solvent Surface开展。Connolly Surface的方式反映了水合物原始的孔隙结构,而基于Solvent Surface的方式考虑了球形探针分子尺寸的影响,对应于客体分子的可接触孔隙结构。对于孔径分布,基于水合物的骨架结构在Linux系统下利用Porosityplus程序得到孔径与孔隙直径之间的关系。

水合物对甲烷和二氧化碳的吸附行为采用巨正则蒙特卡洛方法模拟。吸附模拟之前,需要对甲烷和二氧化碳赋力场,并进行几何优化,几何优化和后续的吸附模拟均采用CVFF力场。气体逸度由Peng Robinson状态方程获取。吸附模拟温度值低于300 K,压力介于3~50 MPa,水合物在此温度压力条件下处于相对稳定状态。当水合物中气体平均吸附量随模拟时间趋于平缓,表明气体吸附达到平衡。

2 气体水合物分子模型

表1为3种典型水合物晶胞结构^[22],3种水合物的氧原子坐标见表2。构建并优化后的水合物分子模型见图1。3种典型水合物中,SI型和SII型水合物的晶胞均为立方晶体,而SH型水合物的晶胞为六方晶体。SII型水合物单胞中水分子数最多,而SH型水合物单胞中水分子数最少。3种典型水合物单胞晶体中均含有小胞腔和大胞腔,SH型水合物单胞晶体中还含有中胞腔。

表1 3种典型水合物晶胞结构

Table 1 Cell structures of three typical hydrates

类型	晶系	空间群	晶格参数	单品中水分子数	胞腔种类
SI	立方晶系	PM3N	$a=11.82\text{\AA}$	46	小、大
SII	立方晶系	FD3M	$a=17.14\text{\AA}$	136	小、大
SH	六方晶系	P6/MMM	$a=12.26\text{\AA}, c=10.17\text{\AA}$	34	小、中、大

表2 3种典型水合物氧原子坐标

Table 2 Oxygen atom coordinates of three typical hydrates

类型	原子	X	Y	Z
SI	O ₁	0.184 10	0.184 10	0.184 10
	O ₂	0	0.310 00	0.115 40
	O ₃	0	0.500 00	0.250 00
SII	O ₁	0	0	0
	O ₂	-0.092 28	-0.092 28	-0.092 28
	O ₃	-0.057 44	-0.057 44	-0.244 87
SH	O ₁	0.333 30	0.666 70	0.364 33
	O ₂	0.867 98	0.132 02	0.500 00
	O ₃	0.613 89	0.613 89	0.137 26
	O ₄	0.790 99	0.209 01	0.277 65

3 气体水合物微观表征

在气体水合物中,水分子间通过氢键作用形成笼形结构。对于不同类型的气体水合物,受氢键受体与供体距离和角度的影响,氢键的数目和长度存在差异,使得水合物中的笼形结构也各不相同。水合物的笼形结构为客体分子提供了赋存的孔隙空间,表征水合物的微观结构,如其内部的氢键、孔隙结构和孔径分布对水合物储气特性分析具有重要意义。

3.1 3种典型水合物的氢键

图2为3种水合物的氢键数目和长度分布。SI型水合物单胞中共含有92个氢键,氢键最长为1.644Å,最短为1.560Å,平均长度为1.615Å。SII型水合物单胞中共含有272个氢键,氢键最长为2.432Å,最短为1.772Å,平均长度为1.930Å。SH型水合物单胞中共含有68个氢键,氢键最长为2.481Å,最短为1.779Å,平均长度为1.831Å。3种水合物中,SII型水合物的氢键数目最多且平均长度最大,而SI型水合物最长氢键和最短氢键的长度差值最小。

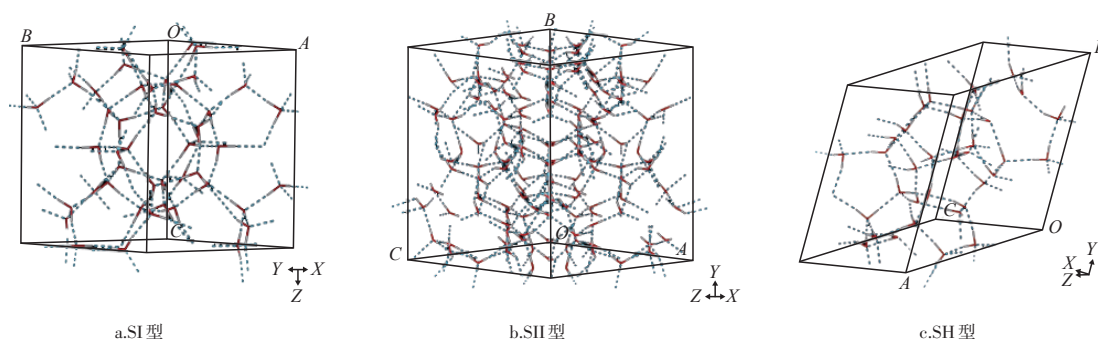


图1 3种水合物优化后分子模型

Fig. 1 Optimized molecular models of three hydrates

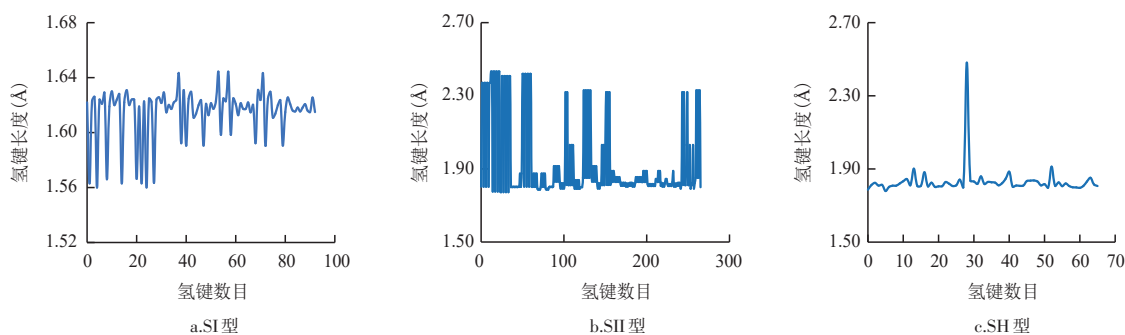


图2 3种水合物的氢键数目和长度分布

Fig. 2 Hydrogen bond number and length distribution of three hydrates

散。SH型水合物不仅具有最小直径的孔隙(3.3Å),还具有最大直径的孔隙(6.4Å)。水合物中最大孔隙直径的顺序为SH型>SII型>SI型,与3种水合物中最长氢键的大小顺序一致。

4 气体水合物微观储气特性

水合物中气体的吸附量可反映水合物的储气能力,气体的吸附热可反映气体的赋存稳定性。采用巨正则蒙特卡洛方法模拟甲烷和二氧化碳在水合物中的吸附行为,分析温度、压力、水合物类型和气体类型对气体吸附量和吸附热的影响规律。

4.1 水合物吸附特征

以SI型水合物为例,研究温度、压力和气体类型

对水合物吸附特征的影响。图5为甲烷和二氧化碳在SI型水合物中的等温吸附曲线。SI型水合物对甲烷的吸附量随着压力的增大而增加,随着温度的增加而降低,在高压区,3个温度之间吸附量的差别较小。SI型水合物对二氧化碳的吸附量也随压力的增大而增加,随着温度的增加而降低,在高压区,280 K下吸附量增加的趋势小于275 K和265 K。因此,在低温高压下,水合物储气效率更高。此外,相同温度压力下,在SI型水合物中,总体上甲烷的吸附量大于二氧化碳的吸附量。

图6为甲烷和二氧化碳在SI型水合物中的等量吸附热。在SI型水合物中,甲烷的吸附热随着压力的增加而增加,随着温度的降低而增加。相比高压区,吸附热在低压区随压力的变化相对平缓。二氧化碳的吸附热同样随着压力的增加而增加,随着温

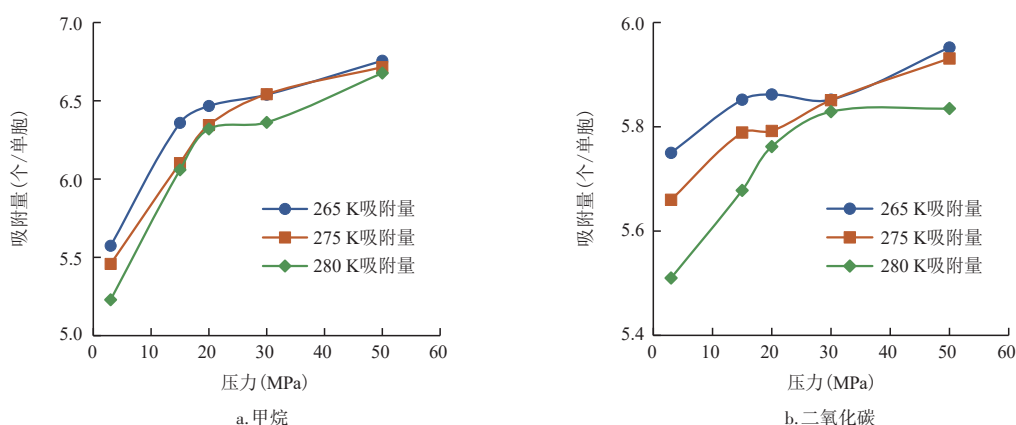


图5 SI型水合物对甲烷和二氧化碳的吸附量

Fig. 5 Adsorption capacity of SI hydrate for methane and carbon dioxide

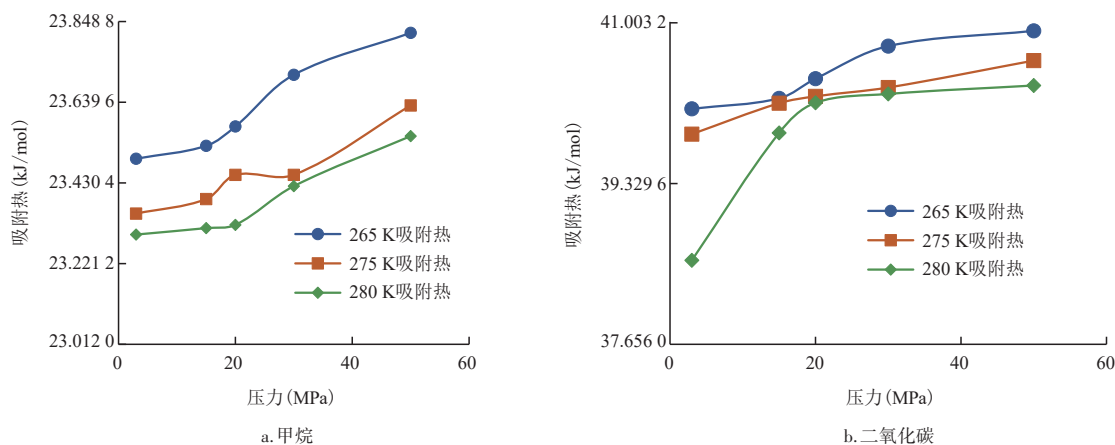


图6 SI型水合物对甲烷和二氧化碳的吸附热

Fig. 6 Adsorption heat of methane and carbon dioxide by SI hydrate

度的降低而增加。高压区,二氧化碳吸附热的增量趋于平缓。而在低压区,相比275 K和265 K,二氧化碳吸附热在280 K下随压力增加幅度更大。

4.2 3种水合物的储气特性差异

图7为3种水合物对甲烷和二氧化碳的吸附量对比图。在265 K下,SII型水合物对甲烷的吸附量在3种水合物中最大,SI型水合物和SH型水合物对甲烷的吸附量相差较小。3种水合物中,SII型水合物对二氧化碳的吸附量最大,其次是SH型水合物,最低为SI型水合物。SII型水合物对甲烷和二氧化碳的吸附量均为最大,可由水合物的孔隙结构差异解释。3种水合物中,SI型水合物的孔隙度最小,储气能力最低。虽然SH型和SII型水合物的孔隙度接近,但是SH型水合物中含有较多的小孔隙(约

3.3Å),气体分子基本无法进入。因此,SII型水合物具有最大的有效储气空间,使得其对气体的吸附能力最大。

图8为3种典型水合物对甲烷和二氧化碳的吸附热对比图。3种水合物中,SI型水合物对甲烷分子的吸附热最大,SII型和SH型水合物对甲烷的吸附热比较接近。在50 MPa下,SI型水合物中甲烷吸附热为23.819 512 kJ/mol,SII型和SH型水合物中甲烷吸附热分别为20.899 080 kJ/mol和20.175 248 kJ/mol。SI型水合物吸附二氧化碳分子产生的吸附热最大,其次是SH型水合物,最小为SII型水合物。在50 MPa下,SI型、SH和SII型水合物中二氧化碳的吸附热分别为40.919 52 kJ/mol,37.706 208 kJ/mol和37.358 9 kJ/mol。3种水合物中,SI型水合物对甲烷和二氧化碳的吸附热均为最大,该现象与水合物的

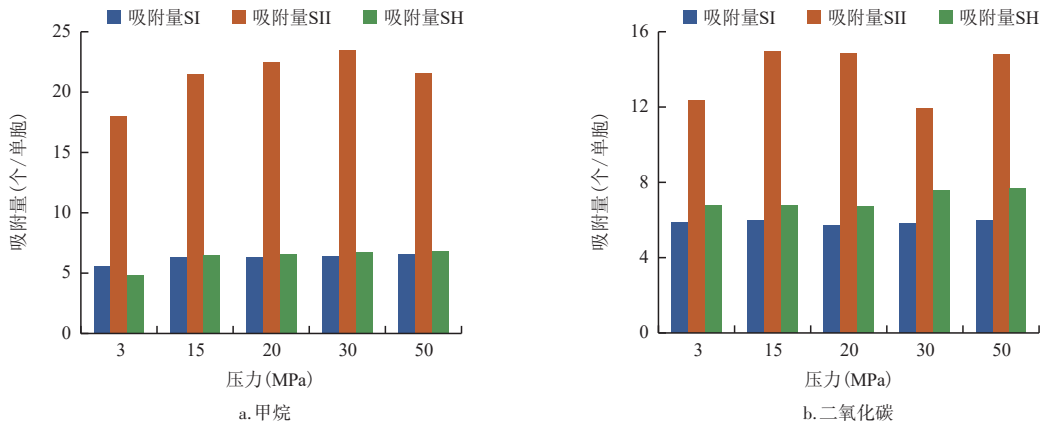


图7 265 K下3种水合物中甲烷和二氧化碳的吸附量对比

Fig. 7 Comparison of adsorption capacity of methane and carbon dioxide in three hydrates at 265 K

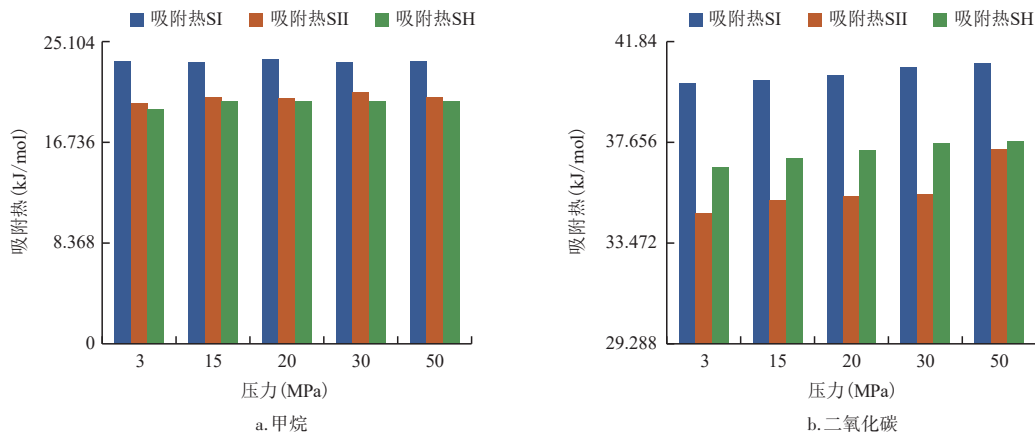


图8 265 K下3种水合物中甲烷和二氧化碳的吸附热对比

Fig. 8 Comparison of adsorption heat of methane and carbon dioxide in three hydrates at 265 K

结构特征有关。相比SII型和SH型水合物,SI型水合物中的氢键长度最短,孔隙尺寸最小,气体分子与水合物孔隙的相互作用势最大,进而使得气体的吸附热最大。总体上,3种水合物中甲烷吸附量大于二氧化碳吸附量,而二氧化碳的吸附热大于甲烷吸附热。甲烷的分子尺寸(3.8Å)大于二氧化碳分子尺寸(3.3Å),二氧化碳分子能够进入水合物中更小的孔隙,因而使得其吸附热大于甲烷。

5 结论

1) 在3种典型水合物中,SI型水合物的氢键最短,SII型水合物的平均氢键长度最大且氢键数目最多,SH型水合物的氢键数目最少。SII型水合物中交错的氢键将孔隙空间分割为较多不连通的小孔隙,使得其孔隙连通性差于SI型和SH型水合物。水合物中最大孔隙直径的顺序为SH型>SII型>SI型,与3种水合物中最长氢键的大小顺序一致。

2) 3种典型水合物中,甲烷和二氧化碳的吸附量以及吸附热均随压力增大而增加,随温度增加而降低。高压有利于提升水合物对甲烷和二氧化碳的储气量,低温可增加水合物中甲烷和二氧化碳吸附的稳定性。

3) 3种典型水合物中,SII型水合物具有最大的有效储气空间,使得其对甲烷和二氧化碳的吸附量最大;SI型水合物中的氢键长度最短,孔隙尺寸最小,气体与水合物孔隙的相互作用势最大,使得甲烷和二氧化碳的吸附热最大。

4) 3种典型水合物中,甲烷吸附量大于二氧化碳吸附量,但二氧化碳吸附热大于甲烷吸附热,表明二氧化碳储存量虽小于甲烷,但二氧化碳与水合物的吸附稳定性大于甲烷。

参考文献

- [1] 刘庭崧,刘妮,陈利涛,等. CH₄水合物生长速率影响因素的分子动力学模拟[J]. 原子与分子物理学报, 2020, 37(5): 778-782.
LIU Tingsong, LIU Ni, CHEN Litao, et al. Molecular dynamics simulation of factors affecting the growth rate of CH₄ hydrate[J]. Journal of Atomic and Molecular Physics, 2020, 37(5): 778-782.
- [2] 宁伏龙,梁金强,吴能友,等. 中国天然气水合物赋存特征[J]. 天然气工业, 2020, 40(8): 1-24.
NING Fulong, LIANG Jinqiang, WU Nengyou, et al. Reservoir characteristics of natural gas hydrates in China[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(8): 1-24.
- [3] 赵克斌,孙长青,吴传芝. 天然气水合物开发技术研究进展[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(1): 7-14.
ZHAO Kebin, SUN Changqing, WU Chuazhi. Research progress of natural gas hydrate development technologies[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(1): 7-14.
- [4] 吴能友,李彦龙,万义钊,等. 海域天然气水合物开采增产理论与技术体系展望[J]. 天然气工业, 2020, 40(8): 100-115.
WU Nengyou, LI Yanlong, WANG Yizhao, et al. Prospect of marine natural gas hydrate stimulation theory and technology system[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(8): 100-115.
- [5] 张世明. 东营凹陷页岩油赋存特征分子动力学模拟[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(5): 74-80.
ZHANG Shiming. Molecular dynamics simulation of shale oil occurrence in Dongying Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(5): 74-80.
- [6] 杨蕾. CO₂置换天然气水合物的分子模拟研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
YANG Lei. Molecular simulation of CO₂ replacement of natural gas hydrate[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [7] 吴强,吴琼,刘昌岭,等. 丙烷含量对多组分气体水合物生长速率的影响[J]. 黑龙江科技大学学报, 2012, 22(3): 259-262.
WU Qiang, WU Qiong, LIU Changling, et al. Effect of propane volume fraction on formation rate of multi-component gas hydrate[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology, 2012, 22(3): 259-262.
- [8] 耿春宇,丁丽颖,韩清珍,等. 气体分子对甲烷水合物稳定性的影响[J]. 物理化学学报, 2008, 24(4): 595-600.
GENG Chunyu, DING Liying, HAN Qingzhen, et al. Influence of gas molecule on stability of methane hydrate[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2008, 24(4): 595-600.
- [9] 代梦玲,孙志高,李娟,等. 水合物储气促进技术研究进展[J]. 化工进展, 2020, 39(10): 3975-3986.
DAI Mengling, SUN Zhigao, LI Juan, et al. Progress on promotion technology for gas storage in hydrates[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(10): 3975-3986.
- [10] 胥萍. 天然产物类水合物动力学抑制剂分子模拟研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
XU Ping. Molecular simulation study on kinetic hydrate inhibitors with natural products[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [11] 陈勇. SII型水合物成核与晶体生长分子动力学模拟研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
CHEN Yong. Molecular dynamics simulation of nucleation and crystal growth of SII hydrate[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [12] 苟倩. 基于分子动力学模拟的甲烷水合物生成与分解过程影响因素研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
GOU Qian. Factors influencing the formation and decomposition of methane hydrate based on molecular dynamics simulation[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [13] 芦文浩,梁海峰,王帅,等. 环状化合物-甲烷水合物稳定性

- 的分子模拟[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2019, 44(1): 57-61.
- LU Wenhao, LIANG Haifeng, WANG Shuai, et al. Molecular simulation of the stability of ring compounds-methane clathrate hydrate[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2019, 44(1): 57-61.
- [14] 雍宇, 史博会, 丁麟, 等. 水合物生成诱导期研究进展[J]. 化工进展, 2018, 37(2): 505-516.
- YONG Yu, SHI Bohui, DING Lin, et al. Research progress of hydrate formation induction time[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(2): 505-516.
- [15] 李佳, 梁贞菊, 王照亮, 等. 不同分子模型对甲烷水合物分解微观特性表征[J]. 化工学报, 2020, 71(3): 955-964.
- LI Jia, LIANG Zhenju, WANG Zhaoliang, et al. Characterization of microscopic nature of methane hydrate decomposition by different molecular models[J]. CIESC Journal, 2020, 71(3): 955-964.
- [16] 范东稳, 卢振权, 李广之, 等. 南祁连盆地木里坳陷石炭系-侏罗系天然气水合物气源岩有机地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(2): 348-358.
- Fan Dongwen, Lu Zhenquan, Li Guangzhi, et al. Organic geochemical characteristics of the Carboniferous-Jurassic potential source rocks for natural gas hydrates in the Muli Depression, Southern Qilian Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 348-358.
- [17] ALAVI S, RIPMEESTER J A, KLUG D D. Molecular-dynamics simulations of binary structure II hydrogen and tetrahydrofuran clathrates[J]. The Journal of Chemical Physics, 2006, 124(1): 14704-14710.
- [18] OHGAKI K, TAKANO K, SANGAWA H, et al. Methane exploitation by carbon dioxide from gas hydrates-phase equilibria for CO₂-CH₄ mixed hydrate systems[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1996, 29(3): 478-483.
- [19] 颜克凤. 水合物抑制及储氢分子模拟研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2005.
- YAN Kefeng. Molecular simulations on the inhibitor mechanism and hydrogen storage of the hydrate[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2005.
- [20] 张庆东, 李玉星, 王武昌, 等. 温度对甲烷水合物形成过程影响的分子动力学模拟[J]. 油气储运, 2015, 34(12): 1288-1294.
- ZHANG Qingdong, LI Yuxing, WANG Wuchang, et al. Molecular dynamics simulation of the influence of temperature on the formation of methane hydrate[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(12): 1288-1294.
- [21] 颜克凤, 李小森, 孙丽华, 等. 储氢笼型水合物生成促进机理的分子动力学模拟研究[J]. 物理学报, 2011, (12): 640-647.
- YAN Kefeng, LI Xiaosen, SUN Lihua, et al. Molecular dynamics simulation of promotion mechanism of store hydrogen of clathrate hydrate[J]. Acta Physics Sinica, 2011, (12): 640-647.
- [22] 韩晓敏. 天然气水合物形成分子动力学模拟研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
- HAN Xiaomin. Study on molecular dynamics simulations of natural gas hydrate formation[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.

(编辑 尹淑容)

(上接第815页)

- matching between system and reservoir pore throat and its field application: A case of post-polymer flooding Es₂1-3 in Shengli area, Shengtuo Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(5): 53-61.
- [16] 屈亚光, 阮迪, 未志杰, 等. 海上S油田聚合物驱注采井网优化[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(2): 112-117.
- QU Yaguang, RUAN Di, WEI Zhijie, et al. Optimization of injection-production pattern for polymer flooding in S offshore Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(2): 112-117.
- [17] 王刚, 刘斌, 张国浩, 等. 海上油田与陆上油田聚驱开发效果对比及影响因素研究[J]. 石油化工应用, 2017, 36(8): 15-18.
- WANG Gang, LIU Bin, ZHANG Guohao, et al. Study on the comparison of development effects of polymer flooding in offshore and onshore oilfield and its influencing factors[J]. Petrochemical Industry Application, 2017, 36(8): 15-18.
- [18] 徐冰. 纵向非均质储层凝胶调剖剩余油分布特征实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(6): 71-80.
- XU Bing. Experimental study on distribution characteristics of remaining oil in vertical heterogeneous reservoirs by gel profile control[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(6): 71-80.
- [19] 李秋言, 岳湘安. 聚合物滞留率对特低渗透非均质油藏调堵效果的影响——以长庆西峰油田某边底水天然能量开发油藏为例[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(3): 85-90.
- LI Qiuyan, YUE Xiang'an. Effect of polymer retention on conformance control in ultra-low permeability heterogeneous reservoirs: A case study on reservoir with edge and bottom water produced by natural energy in Changqing Xifeng Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(3): 85-90.
- [20] 王强, 计秉玉, 聂俊, 等. 聚合物驱油过程中不同粘度比情况下波及系数计算方法[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 551-555.
- WANG Qiang, JI Bingyu, NIE Jun, et al. Sweep efficiency calculation method for different viscosity ratio in polymer flooding[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 551-555.
- [21] 王颂夏. 原油黏度对早期聚合物驱效果影响研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
- WANG Songxia. Study on the effect of crude oil viscosity on early polymer flooding[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.

(编辑 尹淑容)