文章编号：1000-5773(2011)04-0289-07

碳化铝与水反应合成甲烷水合物的实验研究*

李文强，寇自力，李文雍，王 赵，张 伟，贺端威

（四川大学原子与分子物理研究所，四川成都 610065）

摘要：利用自行设计的高压气水合物实验装置，通过碳化铝与水反应成功合成了甲烷水合物。实验结果表明，碳化铝与水反应合成甲烷水合物的方法有效地解决了传统甲烷水合物模拟实验中甲烷气体引入问题；同时，碳化铝与水反应产生的甲烷及沉淀物能较好地模拟海洋环境中水合物形成的自然条件，为实验模拟甲烷水合物研究提供了一种新方法。利用此方法，对甲烷水合物合成与分解温度、压力条件及动力学过程进行了初步研究。

关键词：甲烷水合物；天然气水合物；碳化铝；高压

中图分类号：O521.9 **文献标识码**：A

1 引 言

气水合物(Gas Hydrate)是由主体分子(水分子)与客体分子(如 CH_4、CO_2、H_2S 等气体分子)在特定的低温和高压条件下形成的具有笼形结构的冰状晶体，又称笼形水合物。气水合物中：水分子间以氢键结合，形成笼形孔隙，客体分子被包络其中，并且 1 个笼形孔隙最多能容纳 1 个客体分子，客体分子与主体分子间以范德华力相互作用，这是水合物形成并稳定存在的关键[1-3]。迄今为止，已发现能生成水合物的气体有几十种，包括 CH_4、C_2H_6、C_3H_8、CO_2、C_2H_2、H_2S 等[4-5]。自然界中存在的水合物叫做天然气水合物，主要存在于陆地的永久冻土带和海底沉积物中，宏观上貌似冰雪，可以直接点燃，因此又被称为“可燃冰”[6]。通常将甲烷含量超过 99%的天然气水合物称为甲烷水合物(Methane Hydrate)[7]，是天然气水合物中最重要的一种。

天然气水合物矿藏的形成与分布除了需要特定的温压条件外，还需要合适的沉积条件，包括气体来源和储存环境[8]。形成天然气水合物的沉积物中要有足够的粒间孔隙，为水合物提供赋存空间。在天然水合物形成过程中，多孔沉积物增加了气液接触面积，对水合物的形成起促进作用。在已发现的主要水合物蕴藏海域海底沉积物中有机碳的分析结果表明，水合物分布区内表层沉积物的有机碳含量较高[7]，并且这些沉积物中的有机碳可原地转化为水合物形成所需的气源。海洋环境水合物中的甲烷主要通过有机碳的原地转化和海底深部甲烷的供给，少数地区的水合物气体则来源于生物成因的甲烷以及热成因和混合成因的天然气[6]。从气体的来源可以看出，海洋环境水合物形成过程中的气源主要是就近获取，大范围的气体移动较少。

海洋环境水合物形成过程中气源和多孔沉积物介质很关键，这为实验模拟研究海洋环境水合物的形成和储存提供了方向。目前国内外进行的天然气水合物实验模拟研究中，在考虑沉积物对水合物合成的影响时，一般只是单纯地研究多孔沉积物的介质作用，对气源引入问题关注较少，大多采用直接向反应釜中注入气体的方法。利用这种方法研究 CO_2 水合物时，由于 CO_2 在高压下有较高的溶解度，溶

* **收稿日期**：2010-04-07；**修回日期**：2010-06-19

基金项目：国家自然科学基金项目(51072123)

作者简介：李文强(1984－)，男，硕士，主要从事高压科学与技术研究. E-mail：liwenqiang05@163.com

通讯作者：寇自力(1962－)，男，研究员，主要从事高压科学与技术研究. E-mail：kouzili@scu.edu.cn

入水中的 CO_2 可形成水合物，因此能够较好地模拟 CO_2 水合物的形成条件。然而对于甲烷这种即使在高压下也很难溶解于水的气体，采用注入气体与水反应的方法时，会遇到界面、扩散等动力学问题，这使得现有的甲烷水合物模拟实验在气源引入上不能真实地模拟海洋环境水合物的形成条件[9-11]。

鉴于现有天然气水合物模拟实验研究存在的问题，本工作提出了通过碳化铝与水反应法合成甲烷水合物的设想，以期同时解决水合物模拟实验研究中多孔介质沉积物和气源引入问题。通过在自行设计的高压水合物装置上进行实验模拟研究，利用碳化铝与水反应法探索水合物合成分解规律，希望能够模拟海洋环境水合物的成藏条件，为后续开展天然气水合物研究提供参考。

2 碳化铝与水的反应实验

实验合成甲烷水合物的气源由碳化铝与水反应提供。在已报道的文献中碳化铝与水的反应方程式有两种[12-13]，即

$$Al_4C_3(s) + 6H_2O(l) \longrightarrow 3CH_4(g) + 2Al_2O_3(s) \quad (1)$$

$$Al_4C_3(s) + 12H_2O(l) \longrightarrow 3CH_4(g) + 4Al(OH)_3(s) \quad (2)$$

对(1)式和(2)式进行验证：使用水浴加热，在试管中加入 2 mL 的蒸馏水和 0.3 g 的碳化铝，分别在 25、60、80 及 100 ℃下进行实验，待反应完成后，通过 X 射线衍射(X-Ray Diffraction，XRD)分析反应产物，实验结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看出：反应温度低于 100 ℃时，没有观察到有 Al_2O_3 生成，反应后的沉淀物主要是 $Al(OH)_3$ 及 AlOOH；随着反应温度的升高，生成的 AlOOH 逐渐增多；100 ℃时，反应产物基本都是 AlOOH。也就是说，提高反应温度可以明显加快反应速度，因此在进行甲烷水合物实验前，可对样品进行加热，以提高甲烷的产出速度，加快实验进程，进而缩短实验周期。

表 1 碳化铝与水反应的实验结果

Table 1 Experimental results of reaction of Al_4C_3 with H_2O

Reactant	Reaction temperature/(℃)	Reaction time	Reaction product
$Al_4C_3+H_2O$	25	7 d	$Al(OH)_3$
$Al_4C_3+H_2O$	80	30 min	$AlOOH+Al(OH)_3$
$Al_4C_3+H_2O$	100	25 min	AlOOH

3 甲烷水合物实验

实验采用自行设计的便携式高压气水合物实验装置[14]，如图 1 所示。高压气水合物实验系统主要包括水合物实验装置、电液伺服压机、温度压力数据采集装置等。气水合物实验装置包括上下底座、上下顶砧和封垫。将蓝宝石套入上顶砧中，粘接在上底座的中心孔处，起可视及光学窗口作用。上底座的可视实验窗中安装摄像装置，用以进行光学观察。下顶砧中心开设螺纹口，将压力传感器一端安装在螺纹口中，另一端粘接在下底座上，用以原位测量样品腔的压力变化。温控槽与下底座加工成一体。首先将封垫放在底座上，然后把样品装在封垫中的样品腔内，压上上顶砧后，用定位螺杆螺母连接成整体。在封垫中的样品腔内安装 K 型热电偶，用于原位监测样品腔的温度变化。

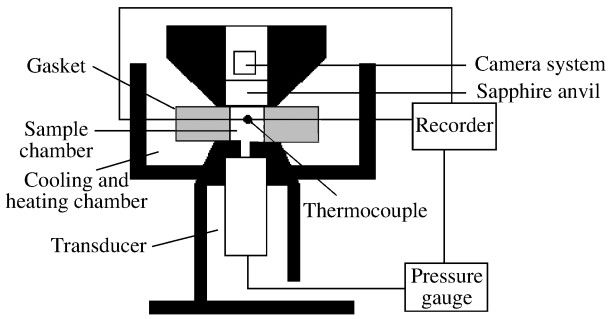


图 1 高压气水合物实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of the gas hydrate experimental apparatus

封垫由 3 个聚四氟乙烯圆片和 2 块铜片制

作而成。首先将聚四氟乙烯加工成 3 个厚度为 2 mm、内径为 12 mm、外径为 32 mm 的圆片以及 1 个长度为 14 mm、内径为 8 mm、外径为 12 mm 的圆管,再将铜加工成 2 个厚度为 4 mm、内径为 12 mm、外径为32 mm 的圆片。将热电偶安装在聚四氟乙烯圆孔的中心位置,在聚四氟乙烯圆管外套上 1 个聚四氟乙烯圆片,紧贴热电偶,然后将 2 个铜片分别套装在聚四氟乙烯圆片的两边,最后在两个铜片的两边套装上剩余的 2 个聚四氟乙烯圆片,如图 2 所示。套装过程中,在层与层之间的空隙处填满聚四氟乙烯密封带。采用 YAW-300 型微机控制电液伺服压机进行预压成型(实验腔体的体积为 502.4 mm^3)。

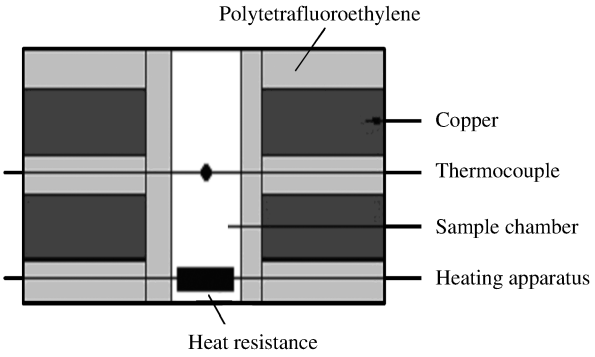


图 2　封垫及样品腔示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the gasket and sample chamber

采用 YAW-300 型微机控制电液伺服压力试验机(长春市奥维精密试验设备有限公司,压力机的最大加载力为 300 kN),对样品进行升压、保压及卸压处理。样品腔的工作压力为 0～40 MPa,温度为 −20～80 ℃,加压速率为 30 kN/s。实验样品腔内可同时进行压力、温度测量,由多通道记录仪记录并存取温度和压力数据。

本实验采用碳化铝与水反应法制取甲烷,以甲烷作为气源生成甲烷水合物。实验前,将 0.1 g 的碳化铝加入样品腔中,然后加入蒸馏水,放入冰箱中冷冻至 −20 ℃。实验时,取出冷冻的样品及封垫,快速安装在实验系统上,利用电液伺服压力试验机将样品加压到所需压力,随后停止加压并保压。利用自制的加热装置给样品腔加温,加热到 80 ℃后保温 0.5 h。通过摄像装置,可以看到这段时间内碳化铝与水剧烈反应生成大量的甲烷气体。待反应完成并且样品腔内的压力、温度稳定后,开始进行甲烷水合物实验。通过电液伺服压力试验机将压力调整到实验所需压力后,在实验装置的上、下温控槽中加入冰块以实现降温,当温度降至实验所需温度后,保温一段时间,然后在温控槽内加入温水进行升温。整个实验过程中,利用压力传感器和热电偶实时原位监测样品腔内的压力和温度变化。通过调节样品腔内的温度和压力来控制甲烷水合物的合成与分解。

4　实验结果与讨论

形成水合物有两个必备条件:适合水合物生成的温压条件以及充足的气源。海洋中适合水合物生成的海水深度一般为 300～3 500 m,气源大多由鱼虾、藻类等生物尸体的沉积物经转化来提供,因此海洋环境中天然气水合物多形成于海底的沉积物中[15]。本实验采用碳化铝与水反应生成的甲烷作为气源,将甲烷气体生成过程中产生的沉淀物(如 AlOOH 等)作为多孔介质,以此模拟海洋环境中气水合物的形成条件。

4.1　甲烷水合物形成与分解过程的温度-压力曲线分析

观察法是水合物相平衡温度的主要测定方法。它通过调节水合物腔体温度,使腔体中已存在的水合物完全分解,此分解结束点即为水合物的相平衡点。图 3 为水合物形成及分解的压力-温度曲线示意图[16]。图 3 中:从 A 点开始降温,A 点到 B 点为水合物成核的亚稳态区;在 B 点,水合物开始大量成核并生长,此时气体累积消耗摩尔数和成核数开始大量增加,压力也随着气体的消耗而大幅降低;到 C 点,水合物生成结束;随后开始升温,水合物的分解压力随温度升高而增大,到达 A 点,水合物分解结束,A 点即为三相平衡点[17-18]。

实验时,保持实验腔体体积和外界加载压力基本不变,通过对腔体进行升、降温处理来实现甲烷水合物的合成与分解,在整个实验过程中,保持升、降温的速率一定,实时监测腔体内的温度和压力变化。

图 4 为实验测得的由碳化铝与水反应法得到的甲烷水合物的温度-压力曲线。在图 4 中：自 A 点开始腔体温度不断降低，保持降温速率恒定；从 B 点到 C 点，样品处于水合物非稳定区，随着温度下降，样品腔内压力变化较小；从 C 点开始，水合物开始生成，此过程是一个放热过程，因而温度的下降速率变小，并且伴随出现放热峰，此外在甲烷水合物生成的同时，大量甲烷气体被吸收，致使腔体压力大幅下降；直到 D 点，压力和温度趋于稳定，这也意味着甲烷水合物已经生成完成，整个体系处于甲烷水合物的稳定态；自 D 点开始升温，同样保持升温速率不变，此时体系开始从甲烷水合物的稳定态过渡到亚稳态；从 E 点开始，腔体压力大幅升高，说明甲烷水合物从 E 点开始大量分解，分解的大量甲烷气体使腔体压力升高，由于水合物分解反应是吸热反应，因而温度上升速率变缓；直到 F 点，甲烷水合物分解完成。F 点即为甲烷水合物分解结束点，也就是三相平衡点。

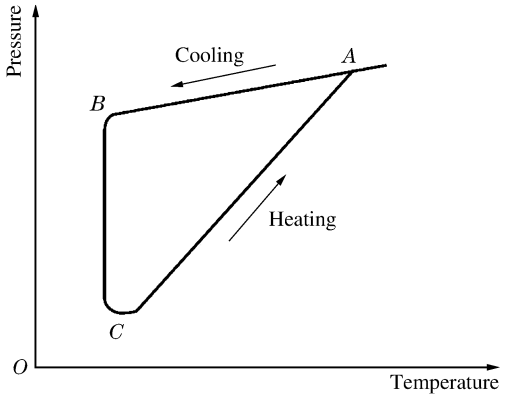


图 3 水合物形成/分解压力-温度示意图[16]

Fig. 3 Pressure-temperature trace in the gas hydrate formation and decomposition

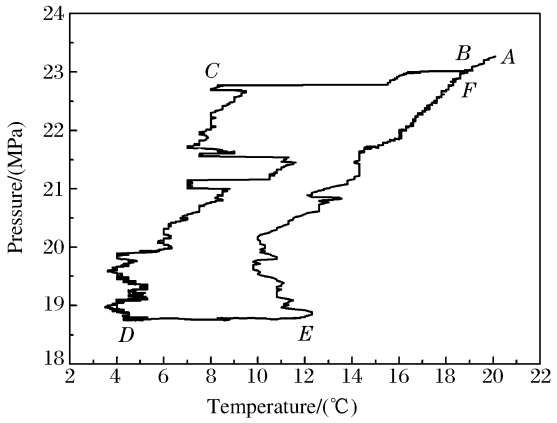


图 4 碳化铝与水反应法合成甲烷水合物温度-压力曲线

Fig. 4 Pressure-temperature trace of methane hydrate through reaction of Al_4C_3 with H_2O

4.2 甲烷水合物形成与分解过程的温度、压力变化曲线分析

如果保持腔体体积不变，水合物形成过程中腔体压力的变化情况主要依赖于水合物气源的提供者，即是由游离气体提供还是由溶解气体提供。若由游离气体提供，则腔体内压力随着水合物的合成而降低，这是由于水合物所占用的体积要远远小于等质量的水和游离气体的体积，这也正是水合物良好储气能力的体现[19]。若由溶解气体提供，则腔体内压力随着水合物的生成而升高，气体溶解于水中时占用的体积相对较少，而液态水变成笼形结构的水合物时体积会膨胀，因此生成水合物所占有的体积要比等质量的水和溶解气体的体积大，合成时腔体压力将有所升高[10]。

图 5 为实验中腔体内温度和压力随时间的变化曲线。在碳化铝与水反应生成甲烷气体完成后，设定外界加载压力为 25 kN。腔体温度、压力稳定时对应图 5 中的 L 点(25.8 MPa)和 O 点(25.3 ℃)。随后温度下降，温度曲线在 7 ℃左右时出现了一个放热峰，对应于 P 点(7 ℃)，该温度点对应的腔体压力也出现快速下降，对应于 M 点(21.7 MPa)，这与水合物大量生成时的温压特点相吻合。甲烷水合物的生成是放热反应，水合物大量生成时放出的热量减缓了温度的下降，另外，水合物生成时吸收了游离态的甲烷气体，引起腔体压力下降。因此，可以将 M 点(21.7 MPa)、P 点(7 ℃)作为水合物合成的温压条件。温度继续下降到 3 ℃左右后，压力开始稳定，预示着甲烷水合物已经合成完成并进入了甲烷水合物的稳定区，此时停止降温。保温过程中，压力无明显变化，该温压条件应为甲烷水合物的稳定区。保温 30 min 后开始升温，当温度达到 12 ℃左右时，出现吸热峰，对应于图 5 中的 Q 点(12.3 ℃)，这时压力也迅速升高，即图 5 中的 N 点(18.8 MPa)。水合物分解过程是吸热反应，水合物的大量分解在温度曲线上表现为吸热峰，同时分解过程中放出的大量甲烷气体致使腔体压力升高。将甲烷水合物开始大量分解时作为甲烷水合物分解时的温压条件，即 N 点(18.8 MPa)和 Q 点(12.3 ℃)。再经过一段时间后，温度继续升高，压力达到 23 MPa 左右后趋于稳定，说明水合物分解完成。

4.3　甲烷水合物合成与分解时的温压条件分析

图 6 给出了本实验以及 Sloan[1]、Pang[20]等人得到的甲烷水合物合成、分解的温压数据。从图 6 可以看出:由碳化铝与水反应法合成的甲烷水合物所需要的温压条件比 Sloan 等人[1]给出的甲烷水合物相平衡数据稍高,这是因为水合物合成时不是在刚进入水合物的稳定区后就立即大量生成,而是会有一定的滞后,滞后时间与样品腔内环境及温度、压力的变化速率等动力学参数有关。本实验得到的分解点比 Sloan 给出的甲烷水合物相平衡数据稍低,反映出水合物分解时也存在一定的滞后,但滞后不是很明显。相比 Pang 等人[20]报道的甲烷水合物合成、分解数据,碳化铝与水反应法合成的甲烷水合物的合成、分解数据更接近 Sloan 给出的甲烷水合物的相平衡数据。这些初步对比表明,本研究采用的碳化铝与水反应法合成甲烷水合物可能更好地模拟海洋环境中天然气水合物的生成条件。

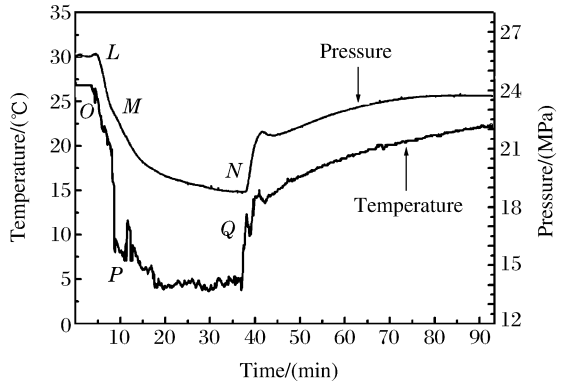


图 5　水合物形成/分解时压力及温度变化曲线[16]

Fig. 5　Pressure and temperature traces in the gas hydrate formation and decomposition

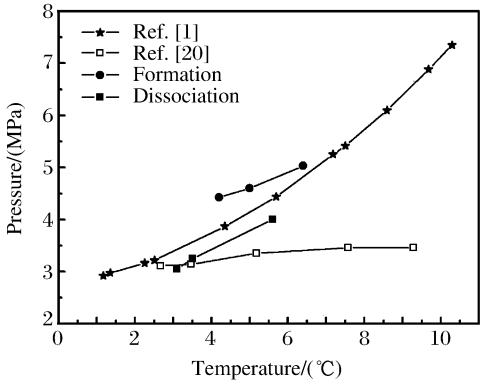


图 6　碳化铝与水反应法合成甲烷水合物压力-温度曲线

Fig. 6　Pressure-temperature trace of methane hydrate through reaction of Al_4C_3 with H_2O

5　结　论

利用自行设计的高压水合物装置,采用碳化铝与水反应法实验研究了甲烷水合物合成和分解的温度、压力条件。研究结果表明:

(1)高压实验装置的气密性良好,能够进行水合物相关实验;

(2)将碳化铝与水反应生成的甲烷作为甲烷水合物合成气源,反应生成的沉淀物作为甲烷水合物合成的多孔介质,成功合成出了甲烷水合物,避免了传统实验中直接向样品腔中通入甲烷气体时的相对复杂过程以及对水合物合成条件的影响,较好地模拟了海洋环境中天然气水合物的合成;

(3)实验中采用碳化铝粉末与水反应生成甲烷,增加了碳化铝与水的接触面积,使生成的甲烷气体能够最大限度地与水接触,增加了气液接触面积,从而加快了水合物的生成,避免了引入活性剂或者搅拌等传统方法在增大气液接触面积的同时对水合物生成的干扰;

(4)利用碳化铝与水反应法得到的甲烷水合物实验数据更接近它的相平衡数据,表明采用碳化铝与水反应生成甲烷水合物的方法较好地模拟了海洋环境中天然气水合物的合成,为今后进行海洋环境天然气水合物实验研究提供了一种新方法。

References:

[1]　Sloan E D, Koh C A. Clathrate Hydrates of Natural Gases [M]. 3rd ed. New York: Marcel Dekker, 2007: 1-102.

[2]　Zhou H Y, Peng X T, Ye Y. Gas Hydrates [M]. Beijing: Ocean Press, 2000: 63-66. (in Chinese)
周怀阳,彭小彤,叶　瑛. 天然气水合物 [M]. 北京:海洋出版社,2000:63-66.

[3]　Li W Y, He D W, Li W Q, et al. Experimental Study on Formation and Decomposition of C_2H_2 Hydrate [J]. Chem-

ical Engineering of Oil and Gas,2010,39(2):104-107. (in Chinese)
李文雍,贺端威,李文强,等. 高压下乙炔水合物的形成与分解实验研究 [J]. 石油与天然气化工,2010,39(2):104-107.

[4] Chen G J,Sun C Y,Ma Q L. Gas Hydrate Science and Technology [M]. Beijing:Chemical Industry Press,2007:1-14. (in Chinese)
陈光进,孙长宇,马庆兰. 气体水合物科学与技术 [M]. 北京:化学工业出版社,2007:1-14.

[5] Qiu J H,Chen Z H. Present Situation and Prospect of Clathrate Hydrates and Hydrate Technology [J]. Jiangsu Chemical Industry,2005,33(1):1-4. (in Chinese)
裘俊红,陈志辉. 笼形水合物及水合物技术现状及展望 [J]. 江苏化工,2005,33(1):1-4.

[6] Kvenvolden K A. A Review of the Geochemistry of Methane in Natural Gas Hydrate [J]. Org Geochem,1995,23(11-12):997-1008.

[7] Gornitz V,Fung I. Potential Distribution of Methane Hydrates in the World's Oceans [J]. Global Biogeochem Cycles,1994,8(3):335-347.

[8] Davie M K,Buffett B A. A Steady State Model for Marine Hydrate Formation:Constraints on Methane Supply from Pore Water Sulfate Profiles [J]. J Geophys Res,2003,108(B10):2495.

[9] Booth J S,Winters W J,Dillon W P. Apparatus Investigates Geological Aspects of Gas Hydrates [J]. Oil Gas J,1999,97(40):63-68.

[10] Buffett B A,Zatsepina O Y. Formation of Gas Hydrate from Dissolved Gas in Natural Porous Media [J]. Mar Geol,2000,164(1-2):69-77.

[11] Ye Y G,Zhang J,Diao S B,et al. Experimental Technique for Marine Gas Hydrates [J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2003,23(1):119-123. (in Chinese)
业渝光,张 剑,刁少波,等. 海洋天然气水合物模拟实验技术 [J]. 海洋地质与第四纪地质,2003,23(1):119-123.

[12] Chou I M,Sharma A,Burruss R C,et al. Diamond-Anvil Cell Observations of a New Methane Hydrate Phase in the 100 MPa Pressure Range [J]. J Phys Chem A,2001,105(19):4664-4668.

[13] Johnson W B,Sonuparlak B. Diamond/Al Metal Matrix Composites Formed by the Pressureless Metal Infiltration Process [J]. J Mater Res,1993,8(5):1169-1173.

[14] Wang Z,He D W,Zhang W,et al. Portable High Pressure Sapphire Anvil Cell for Gas Hydrates Research:China,CN201335825Y [P]. 2009-10-28. (in Chinese)
王 赵,贺端威,张 伟,等. 便携式高压及气水合物实验装置:中国,CN201335825Y [P]. 2009-10-28.

[15] Jin Q H,Zhang G X,Yang M Z,et al. Introduction of Natural Gas Hydrate Resources [M]. Beijing:Science Press,2006:104-123. (in Chinese)
金庆焕,张光学,杨木壮,等. 天然气水合物资源概论 [M]. 北京:科学出版社,2006:104-123.

[16] Sun Z G,Shi L,Fan S S,et al. Study of the Measuring Methods of Gas Hydrate Phase Equilibrium [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas,2001,30(4):164-166. (in Chinese)
孙志高,石 磊,樊拴狮,等. 气体水合物相平衡测定方法研究 [J]. 石油与天然气化工,2001,30(4):164-166.

[17] Khokhar A A. Storage Properties of Natural Gas Hydrates [D]. Trondheim,Norway:Norwegian University of Science and Technology,1998.

[18] Natarajan V,Bishnoi P R,Kalogerakis N. Induction Phenomena in Gas Hydrate Nucleation [J]. Chem Eng Sci,1994,49(13):2075-2087.

[19] Gudmundsson J S,Børrehaug A. Frozen Hydrate for Transport of Natural Gas [A]//Proceedings of 2nd International Conference on Natural Gas Hydrate [C]. Toulouse,France,1996:1-4.

[20] Pang W Y,Xu W Y,Sun C Y,et al. Methane Hydrate Dissociation Experiment in a Middle-Sized Quiescent Reactor Using Thermal Method [J]. Fuel,2009,88(3):497-503.

Experimental Study of Methane Hydrate Prepared through Reaction of Al_4C_3 with H_2O

LI Wen-Qiang, KOU Zi-Li, LI Wen-Yong, WANG Zhao, ZHANG Wei, HE Duan-Wei

(*Institute of Atomic and Molecular physics, Sichuan University, Chengdu* 610065, *China*)

Abstract: Methane hydrate is successfully prepared through the reaction of Al_4C_3 and H_2O using a laboratory designed high pressure hydrate apparatus. Experimental results indicate that this method is an effective solution to introduce CH_4 in the synthetic experiments of methane hydrates, and the pressure-temperature formation conditions of the methane hydrate approach the natural situation. In addition, the products of the reaction of Al_4C_3 and H_2O can simulate the real formation process of methane hydrate in the ocean environment and offer an effective route to natural gas hydrate research. With this method, a preliminary study is presented concerning the formation, dissociation and dynamic processes of methane hydrate under different temperature and pressure conditions.

Key words: methane hydrate; natural gas hydrate; aluminium carbide; high pressure

《高压物理学报》征稿简则

《高压物理学报》是我国高压物理领域唯一的专业性学术刊物,在国内外公开发行。力求及时报道高压物理学科基础理论和应用研究方面具有创新性、高水平、有重要意义的研究成果,读者对象为国内外科技工作者。征稿内容为动态及静态高压技术,人工合成新材料,高温高压下材料的力学、光、电、磁等特性以及物质微观结构的研究,动态及静态高压研究中的测试技术,高温高压下的相变,高温高压物态方程等。接受中、英文稿件。

1. 来稿应具有科学性、先进性和实用性,论点明确、论据可靠、数据准确、逻辑严谨、文字简练、图表清晰。每篇论文的篇幅应在 6 000～8 000 字以内,请使用中华人民共和国法定计量单位。论文格式请参考近期出版的《高压物理学报》。请使用网站(www.gywlxb.cn)的作者投稿系统进行投稿。

2. 所投稿件不得涉及国家及本单位机密,投稿时请附本单位保密审查意见,由审查者签名并加盖公章。

3. 文章标题字数应在 20 字以内。文中图、表应有自明性,所有图题、图注、表题、表注均为中、英文对照,图、表中的文字一律用英文。

4. 第一作者应确保全体作者同意文章署名,请提供第一作者、通讯作者简介(姓名、出生年、性别、职称、学位、研究方向等),以及所有联系方式(通信地址、邮政编码、电话号码、传真、电子邮箱等),以备联系。请注明论文(工作)的资助项目(资助项目名称和批准号),简要介绍工作背景和论文意义。

5. 来稿应保证文章版权的独立性,严禁抄袭,文责自负,请勿一稿多投。

重点注意事项

▲ 中英文摘要　摘要用第三人称书写,语言要简练,应有具体内容。要求:(1) 拥有与论文同等量的主要信息,重点包括 4 个要素:即研究目的、方法、结果和结论。(2) 以提供论文梗概为目的,不得评论、解释论文内容。中文摘要应在 200～400 个字之间,英文摘要不少于 120 个实词。为便于 Ei Compendex 以及国外其它数据库收录,英文摘要中尽量避免特殊字符(各种数学符号、上下脚标及希腊字母)及由特殊字符组成的数学表达式;第一句不要与英文题名重复;尽量用短句子并避免句形单调;用过去时态叙述主要工作,用现在时态叙述结论,尽量用主动语态代替被动语态。

▲ 参考文献　参考文献应是公开出版物。请充分著录参考文献,引用条数不宜太少,并尽量引用近期国内外文献,采用"顺序编码制"著录。中文参考文献必须附英译文,著录项目应齐全。

▲ 版权与稿酬　《高压物理学报》已加入《中国学术期刊(光盘版)》、万方数据——数字化期刊群、中国核心期刊(遴选)数据库、中文科技期刊数据库、中国期刊网、台湾中文电子期刊服务——思博网(CEPS)等,并被 Ei Compendex 光盘收录。凡经本刊录用的稿件,其著作权(包括光盘版和网络版出版权)便自动转让给《高压物理学报》编辑部,编辑部不再另行通知。来稿一经发表,即付稿酬(包括光盘版和网络版稿酬)。

《高压物理学报》一贯秉承服务科学、服务读者、服务作者的办刊理念,慎重对待每一篇来稿,尊重作者劳动。优秀稿件享有快速发表通道,重大创新性成果可在 3 个月内刊出。

通信地址:四川绵阳 919 信箱 110 分箱《高压物理学报》编辑部,邮政编码:621900

网　　站:www.gywlxb.cn;　电子邮件:gaoya@caep.ac.cn (征订、咨询)

电　　话:(0816)2490042;　传　　真:(0816)2485139

《高压物理学报》编辑部