文章编号：1008－8857(2021)04－0222－07　**DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2021.04.006

金属纤维悬浮液中天然气水合物生成特性实验研究

田德珍，刘道平，杨　亮，谢育博
（上海理工大学 能源与动力工程学院，上海 200093）

摘　要：水合物缓慢的生成速率已经成为水合物储运天然气技术应用的一大障碍。基于静态强化水合物生成技术，以含悬浮金属纤维的表面活性剂溶液作为水合储气介质，研究 4.0～7.0 MPa 下天然气水合物在悬浮溶液中的生成动力学特性。研究结果表明，金属纤维优良的导热性能够促进水合物快速生成，同时纤维的粗糙表面可促进水合物成核，水合物在金属纤维悬浮体系中的储气量与储气速率均明显高于表面活性剂溶液中的水合特性。在实验压力下，悬浮体系中水合物成核诱导时间明显降低，同时储气量可以达到 87.3～129.6 $m^3 \cdot m^{-3}$，比表面活性剂溶液中的增加了 5.0%～23.4%；储气速率达到 4.4～25.1 $m^3 \cdot (m^3 \cdot min)^{-1}$，比表面活性剂溶液中的提高了 1.1%～39.8%。研究结果可为水合物储气技术在天然气储运方面的应用提供技术参考。

关键词：天然气水合物；生成；金属纤维；悬浮液
中图分类号：TE82　　**文献标志码**：A

Formation characteristics of natural gas hydrates in the suspension of metal fibers

TIAN Dezhen，LIU Daoping，YANG Liang，XIE Yubo
(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The relatively slow gas storage rate and poor storage capacity of the static hydration system are still the major challenges in the large-scale practical application of hydrate technology. Based on the static enhanced hydrate formation, the kinetic performance of natural gas hydrates formation in surfactant solution with suspended metal fibers at 4.0～7.0 MPa were studied. The results showed that the excellent thermal conductivity of metal fibers could enhance the gas hydrates formation, and the rough surface of fibers could promote the nucleation of hydrates. The gas storage capacity and storage rate of hydrates in the suspension system were significantly higher

收稿日期：2019－04－28
基金项目：国家自然科学基金青年项目(51606125)；国家煤加工与洁净化工程技术研究中心开放基金项目(2018NERCCPP-B05)；上海理工大学教师教学发展研究项目(CFTD192001)
第一作者：田德珍(1994—)，女，硕士研究生。研究方向：天然气水合物生成与注热分解。E-mail：tiandez@163.com
通信作者：刘道平(1963—)，男，教授。研究方向：相变储能与气体水合物技术。E-mail：dpliu@usst.edu.cn

than those in surfactant solution. Within the range of experimental pressure, compared with the simple surfactant solution, the induction time of hydrate formation was reduced significantly. The gas storage capacity (87.3～129.6 $m^3 \cdot m^{-3}$) of the suspension system increased by 5.0%～23.4%, and the storage rate [4.4～25.1 $m^3 \cdot (m^3 \cdot min)^{-1}$] increased by 1.1%～39.8%. The research results would provide useful information for the application of gas hydrates technology.

Keywords: natural gas hydrates; formation; metal fibers; suspension

天然气水合物是在低温高压条件下，由水分子和天然气气体分子组成的一种类冰的笼形晶体化合物[1]。1 m^3 饱和天然气水合物可储存 160～180 m^3 的气体[2]。基于水合物独特的物理储气特性，水合物技术可应用于能源气的储运中。然而，天然气水合物技术至今未得到规模化工业应用，其主要原因在于在水合物形成过程中，诱导期长，生成速率慢。因此，强化水合物快速生成是水合物储运天然气技术应用的关键[3–4]。

目前强化水合物生成的方法有动态强化法和静态强化法。动态强化法主要通过扰动方式增大天然气与水的接触面积，增强传质传热，常见的有搅拌法、喷雾法[5]、鼓泡法[6–8]。搅拌法是在反应体系内引入搅拌装置，使气体和液体接触得更充分。郝文峰等[9]经过对比有无搅拌装置的甲烷水合体系中的诱导时间、水合速率，证明了搅拌对水和过程有促进作用，但是搅拌时间和搅拌速率都直接影响促进作用增加的程度。喷雾法是将液体经喷嘴分散到已充满气体的反应釜内，最大程度地增加气液接触面积。张亮等[10]采用喷雾装置验证了喷雾法对水合物合成速率的促进作用。鼓泡法是在反应釜底部将气体通过气泡发生器连续鼓入液相中。安丽焕等[11]研究了喷雾法对气体水合物生成的影响，证明喷雾法能促进气体水合物生成。申小冬等[12]研究了高压鼓泡装置中进气速率、压力、温度和滤网目数对水合物生成动力学和形态的影响。结果表明，提高进气速率和压力、降低温度均可提高水合物生成速率。罗艳托等[13]通过观察透明鼓泡塔内气泡表面水合物生长形态和上升速率，发现运动气泡表面更易形成水合物，但是水合物壳会阻止水合物的进一步形成，且动态强化需额外的能耗设备，成本高昂。

虽然动态强化法可以缩短诱导时间、加速水合物的生成，但引入的机械装置会增加成本。为了降低成本、减小能耗，并使操作更灵活，可采用静态强化法。其常见方法主要有：添加表面活性剂、引入多孔介质、使用导热结构等。添加表面活性剂法是通过往水中添加促进剂促进水合物的生成。该方法操作简单，效果明显。Kalogerakis 等[14]发现，表面活性剂能极大地促进气体水合过程，低浓度的表面活性剂加快了水合物的生成速率并提高了气体在溶液中的溶解度。Zhong 等[15]认为当十二烷基硫酸钠（SDS）溶液质量分数达到 0.024% 时，水合速率可以提高 700 倍。但采用活性剂的方式忽略了热疏导问题。多孔介质具有很大的比表面积，它可以提供较大的气液接触面积。常见的多孔介质有活性炭、多孔硅胶，它们不仅可以提供较大的比表面积，而且具有较好的吸附性。Lu 等[16]进行了不同粒径多孔介质对水合物生成的影响的实验，结果表明，介质粒径对水合物饱和度有重要影响。Govindaraj 等[17]利用多孔活性炭与多孔石英砂复合体系进行水合实验，结果表明，多孔介质可以促进水合物生成，并提高储气量。但是采用多孔介质的方式同样忽略了热疏导问题。金属纳米粒子比表面积大，导热性能好，可以有效加快水合物生成速率。李金平等[18]在水中加入纳米铜粒子，制备导热性纳米流体时发现，水合物可以快速生成。Kakati 等[19]研究了复合导热粒子（Al_2O_3 和 ZnO）对水合物生成的影响，结果表明，水合物成核和生长时间极大缩短，但是因纳米粒子是独立的离散导热点，其对提升体系热传导性能的作用不明显，削弱了其对后续水合过程的促进效果。

金属纤维作为一种新型材料，具有金属材料的高导热性，且对比于金属纳米粒子，又具有更好

的延展性，常用在相变强化过程中。Mustaffar 等[20]在研究金属丝网中填充石蜡的相变传热过程发现，金属丝网可加速石蜡相变。汤勇等[21]按照一定规律将金属纤维置于石蜡容器内，结果表明，金属纤维可以从多方面改善传热性能，促进石蜡相变。气体水合过程的本质是高压相变过程。本文中将金属纤维悬浮于表面活性剂溶液中，以提高体系导热性能，并将其用于合成天然气水合物，考察金属纤维对水合物生成动力学特性的影响，以期达到改善水合物生成过程中的传热特性、促进水合物快速生成的目的。

1 实验部分

1.1 实验装置和材料

实验装置如图 1 所示。该装置主要包括低温恒温槽、高压反应釜、热电阻、压力传感器、数据采集仪和计算机等。高压反应釜反应腔体为竖直放置的内径为 50 mm、高为 150 mm 的圆柱体不锈钢（1Cr18Ni9Ti）空腔，其壁厚为 8 mm，容积为 300 cm^3。低温恒温槽温控范围为 243～373 K。热电阻为 A 级精度的 Pt100 铂电阻。数据采集仪为安捷伦 34972A，数据采集时间间隔为 10 s。

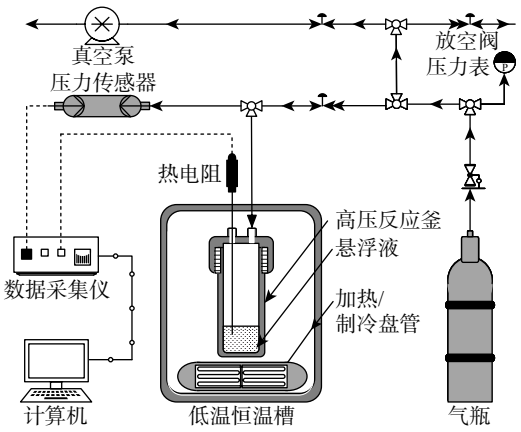

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

实验中采用甲烷体积分数为 87.64% 的天然气，表面活性剂为 SDS，金属纤维采用单丝直径在 5～8 μm 之间的不锈钢纤维（SSF），长度为 40 mm。图 2 为扫描电子显微镜（SEM）下 SSF 的形态。从图中可知，不锈钢纤维（SSF）在悬浮液中是不规则分布的线状物质，能提供较大的比表面积。

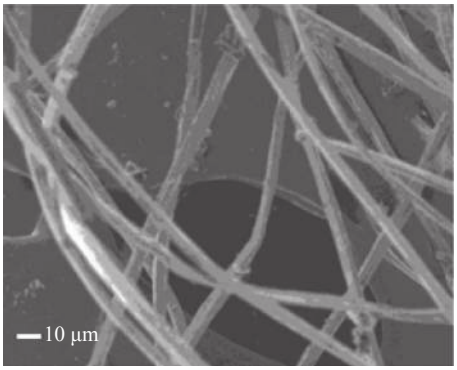

图 2 不锈钢纤维样品 SEM 图

Fig. 2 SEM image of SSF sample

1.2 实验步骤

在进行水合储气实验前先配制质量分数为 0.05% 的 SDS 溶液。再将一定量结冷胶和 SSF 加入到 SDS 溶液中，在搅拌器中高速搅拌 120 s，制得 SSF 质量分数为 0.15% 的悬浮溶液。其中，结冷胶用于稳定悬浮 SSF，其在悬浮液中的质量分数为 0.30%。然后用自制蒸馏水清洗高压反应釜 2 次，待其干燥后，将 20 mL溶液倒入反应釜中。连接热电阻和进气管线后，对系统抽真空，排除系统残留空气。将反应釜置于已降温的低温恒温槽中，温度设定在 274.2 K。最后向釜中通入实验压力下的天然气，温度、压力由数据采集仪记录。当温度开始上升、压力开始下降时，天然气水合物开始生成。待反应一段时间后，当温度和压力趋于平稳时，认为水合过程完成。

2 实验结果与分析

2.1 实验数据分析

利用水合物生成时单位体积溶液的气体消耗量来计算水合物的储气量。根据气体压力和温度变化计算出消耗的气体量。在计算过程中已知反应釜体积、釜内溶液体积，气体压力、温度和气体组成成分，则水合物中气体物质的量Δn为

$$\Delta n = \frac{p_0 V}{RZT_0} - \frac{p_t V_t}{RZ_t T_t} \quad (1)$$

式中：V 为初始状态下气体的体积，即反应釜体积与溶液体积之差；V_t 为 t 时刻气体的体积，即反应釜体积与水合物体积之差；p_0、T_0 分别为初始状态下气体的压力和温度；p_t、T_t 分别为 t 时刻气体的压力和温度；R 为通用气体常数；Z 为初始状态下混合气体压缩因子；Z_t 为 t 时刻混合气体压缩因子。

在水合过程中任一时刻 t 时，单位体积的水合物的储气量 C_t 为

$$C_t = \frac{22\,400\Delta n}{V_L} \quad (2)$$

式中，V_L 为溶液体积。

2.2　实验结果与讨论

SDS+SSF 体系和 SDS 体系的水合实验条件和水合储气性能如表 1 所示。

表 1　实验条件和水合储气性能

Tab. 1　Experiment conditions and performance of hydrate formation

实验体系	悬浮液体积/mL	压力/MPa	温度/K	诱导时间/min	储气量/($m^3 \cdot m^{-3}$)	储气速率/[$m^3 \cdot (m^3 \cdot min)^{-1}$]
SDS+SSF	20.00	7.0	274.2	1.7	129.6	25.1
SDS+SSF	20.00	6.0	274.2	2.2	122.5	21.8
SDS+SSF	20.00	5.0	274.2	4.7	112.9	10.4
SDS+SSF	20.00	4.0	274.2	8.7	87.3	4.4
SDS	20.00	7.0	274.2	1.7	123.5	24.8
SDS	20.00	6.0	274.2	2.7	113.3	17.8
SDS	20.00	5.0	274.2	8.7	91.4	7.5
SDS	20.00	4.0	274.2	14.2	71.5	4.2

图 3 为 SDS+SSF 体系和 SDS 体系水合储气过程液相温度和天然气压力的变化。以最高压力 7.0 MPa 下的储气过程为例进行说明。整个实验过程的初始温度为 274.2 K，且维持不变。整个实验过程维持 300 min，现仅对前 30 min 水合速率较快的过程进行描述。从图中可以看到，天然气水合物在 SSF 悬浮体系中的压力达到 7.0 MPa 后可以快速形成，温度和压力曲线会出现三个明显的变化阶段：溶解阶段（阶段 1）、快速水合阶段（阶段 2）、缓慢水合阶段（阶段 3）。在溶解阶段，因为 SSF 提供了较大的气液接触面积，但因受实验室条件限制，无法完全实现其在悬浮液中的均匀分布，在液体表面的 SSF 数量较少，气体进入液体内部的速率相对较慢，所以较不添加 SSF 的实验组仅仅缩短了溶解时间，而不能使溶解过程消失。待体系通气 1.7 min 后，温度开始上升，水合反应进入快速水合阶段。从气体温度、压力达到系统温度、压力，到水合温升压降出现为止的这段时间定义为本实验过程的诱导时间；大约 14.1 min 后，水合速率降

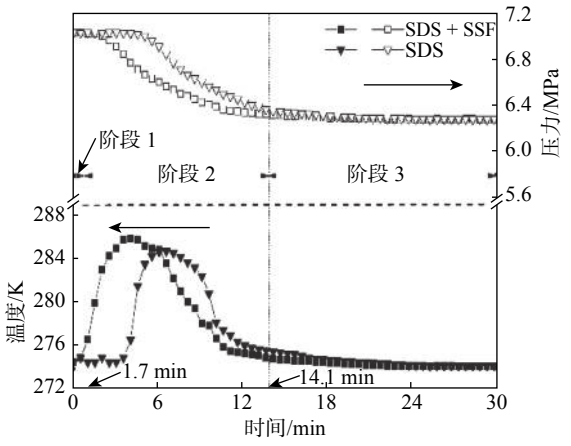

图 3　SDS+SSF 体系和 SDS 体系水合储气过程液相温度和天然气压力的变化

Fig. 3　Variation of pressure and liquid temperature during the hydrate formation in the system of SDS+SSF and SDS

低，进入缓慢水合阶段。整个水合过程的压降为 0.79 MPa，比 SDS 体系的压降 0.74 MPa 略高。压降值比预期值要低，其原因可能是由于不锈钢纤维体系分布不均匀，在水合物形成时部分区域内没有不锈钢纤维，其导热性能就较弱，而不锈钢纤维分布区域的导热系数很大，可以快速地移除水合热。因此，不锈钢纤维均匀分布的体系可以促进水合反应的进行，在随后陆续进行的较低压力（4.0～6.0 MPa）下的储气实验中也发现了温度上升与压力下降的现象。

SDS+SSF 体系和 SDS 体系在 7.0 MPa 下水合物生成动力学随时间的变化如图 4 所示。由图中可知，在 30 min 内储气量可以达到 130 $m^3 \cdot m^{-3}$。随着反应的进行，在 15 min 后，储气量基本趋于稳定。选取图 4 中斜率最大的点（虚框内）进行拟合，作近似曲线（分别为图 4 中附图的两条拟合曲线），其斜率即为最大储气速率。由图中可知，在 7.0 MPa 下，SDS+SSF 体系最大储气速率达到 25.1 $m^3 \cdot (m^3 \cdot min)^{-1}$，SDS 体系最大储气速率达到 24.8 $m^3 \cdot (m^3 \cdot min)^{-1}$。SSF 对天然气水合物的最大生成速率有一定的提升作用。

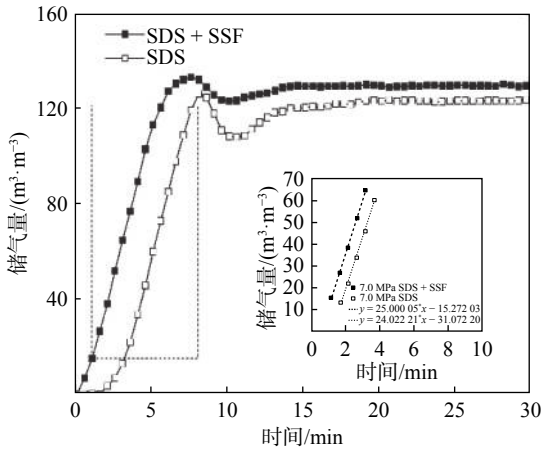

图 4 天然气水合物在 SDS+SSF 体系和 SDS 体系中的生成动力学（p = 7.0 MPa，T = 274.2 K）

Fig. 4 Kinetics of hydrate formation in the system of SDS +SSF and SDS (p = 7.0 MPa, T = 274.2 K)

分别在 4.0、5.0、6.0、7.0 MPa 下，对比在 30 min 内全部实验组的储气量，结果如图 5 所示。在相同压力下，SSF 对天然气水合物的最大储气量均有促进作用。

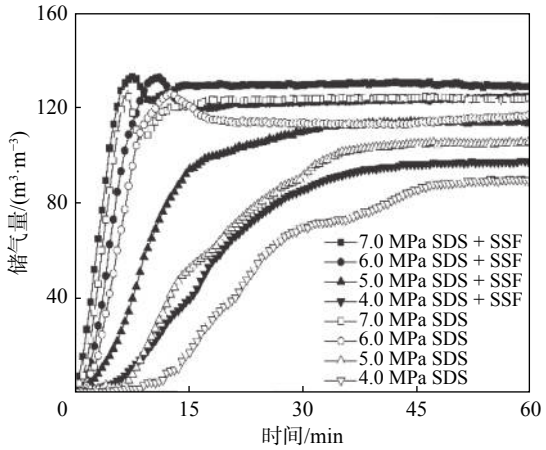

图 5 SDS+SSF 体系和 SDS 体系水合储气量（p = 4.0～7.0 MPa，T = 274.2 K）

Fig. 5 Gas capacity of the hydrate in the system of SDS +SSF and SDS (p = 4.0～7.0 MPa, T = 274.2 K)

比较相同压力下 SDS+SSF 体系和 SDS 体系的最大储气量，结果如图 6 所示。在 4.0、5.0、6.0、7.0 MPa 下，SDS+SSF 体系对应的最大储气量分别为 87.3、112.6、122.5、129.6 $m^3 \cdot m^{-3}$，SDS+SSF 体系对最大储气量的提升率分别为 22.1%、23.4%、8.1%、5.0%。在低压（4.0、5.0 MPa）下，SSF 的快速导热特性及比表面积的增大特性对反应有明显的促进作用。由表 1 中的诱导时间可知，SSF 因增大了比表面积，诱导时间

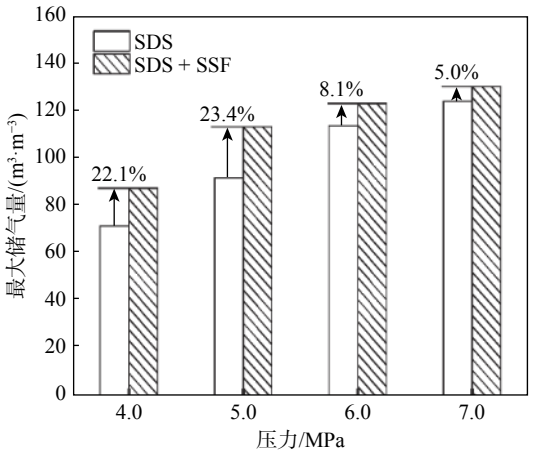

图 6 SDS+SSF 体系和 SDS 体系最大储气量（p = 4.0～7.0 MPa，T = 274.2 K）

Fig. 6 Maximum gas capacity of the hydrate in the system of SDS +SSF and SDS (p = 4.0～ 7.0 MPa, T = 274.2 K)

缩短。同时，在高压（6.0、7.0 MPa）下，SSF 对水合过程的促进作用明显较小，此时反应更为激烈，SSF 导出的热量远小于水合过程放热量，所以压力起决定性作用。但 SSF 的加入缩短了水合反应的诱导时间。

使用上述求最大斜率点的方法对 SDS+SSF 体系和 SDS 体系最大储气速率进行拟合，结果如图 7 所示，同时水合储气结果也列于表 1 中。

在 4.0、5.0、6.0、7.0 MPa 下，SDS+SSF 体系中水合物最大储气速率分别为 4.4、10.4、21.8、25.1 $m^3\cdot(m^3\cdot min)^{-1}$。相同压力下 SDS+SSF 体系中的储气速率均比 SDS 溶液中的储气速率有明显提高。SSF 的粗糙表面为水合物生成提供了丰富的成核点，使水合物成核诱导时间缩短；其优良的导热能力可使水合热较快地传递至釜外，使悬浮液最大水合速率明显提高。

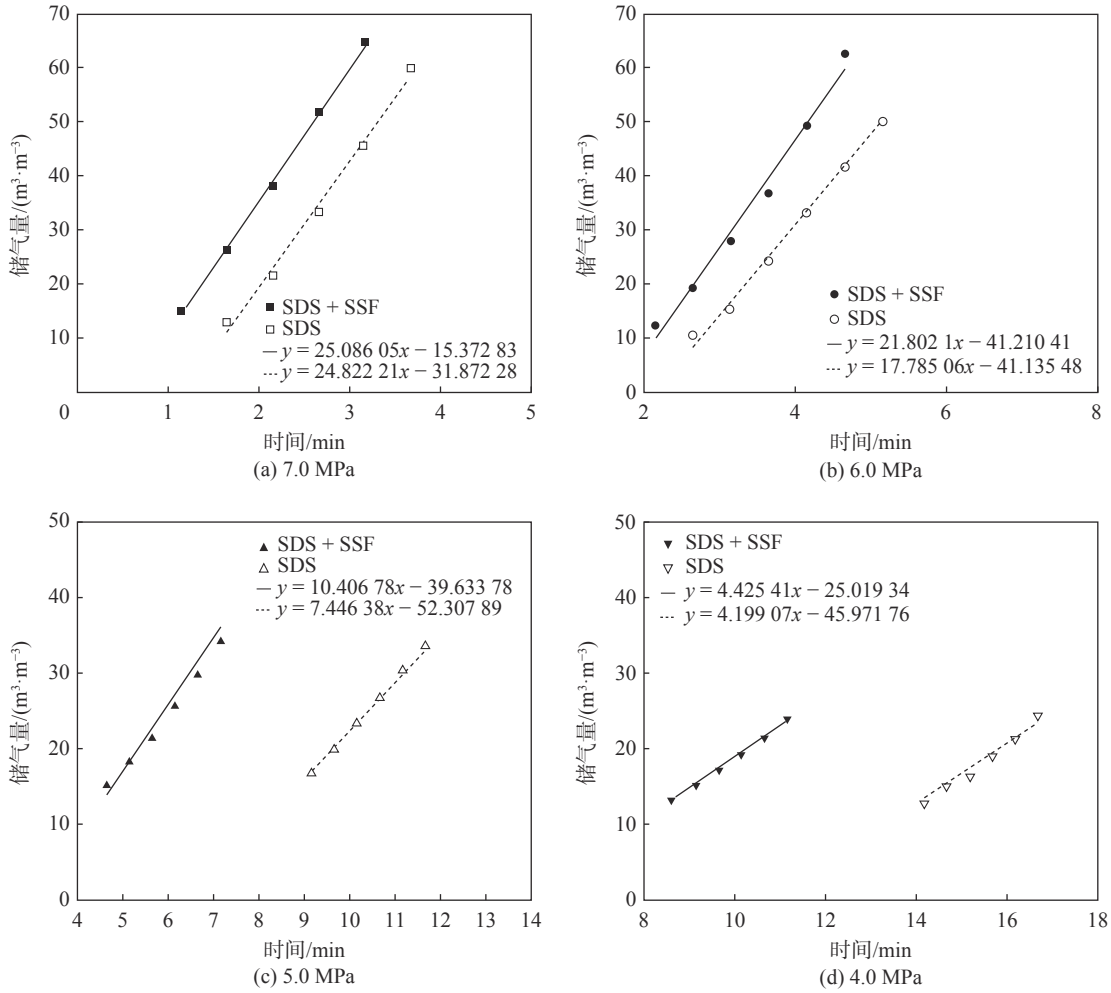

图 7　SDS +SSF 体系和 SDS 体系储气速率

Fig. 7　Gas storage rate in the system of SDS+ SSF and SDS

不同压力下，SDS+SSF 体系和 SDS 体系的最大储气速率如图 8 所示。在低压（4.0 MPa）下，水合物最大储气速率的提升较慢，此时，水合反应不完全，水合放热量较小，加入 SSF 只能在一定程度上提升储气速率（5.4%）。在中压（5.0、6.0 MPa）下，悬浮体系中水合物最大储气速率的提升幅度明显，提升率分别为 22.6% 和 39.8%。由于 SSF 的粗糙表面为水合反应提供了极佳的反应场所，水合反应开始得更早。随着压力的升高，水合反应更完全，进入悬浮液中的气体更多，在 SSF 的推动力下同等水合反应时间内，水合的气体更多，且水合反应相对温和，单位时

间生成的热量较少，此时的 SSF 可以快速导出大部分热量，加速效果明显，即最大储气速率提高。在高压(7.0 MPa)下，水合反应剧烈，单位时间放出的热量远远大于 SSF 瞬时导热量，因此储气速率提升不明显，提升率仅为 1.1%，说明此时 SSF 对最大储气速率提升作用不大。

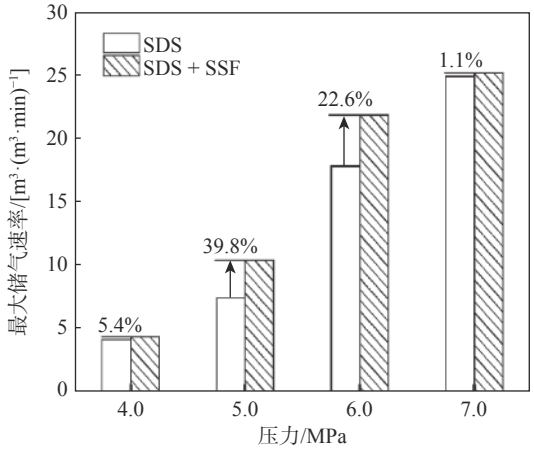

图 8 SDS +SSF 体系和 SDS 体系最大储气速率

Fig. 8 Maximum storage rate in the system of SDS+ SSF and SDS

3 结 论

针对表面活性剂溶液在快速水合过程中放出的大量水合热不能移除的问题，本文中采用不锈钢纤维(SSF)悬浮液作为水合储气介质，研究天然气水合物在悬浮液中的生成动力学特性。SSF 因其丰富的粗糙表面及优良的导热性能，在悬浮液中通过提供水合结晶核并加速水合物疏导，从而缩短了水合诱导时间，提高了水合储气速率和储气量。不同压力下，SSF 能使最大储气量提高 5.0%～23.4%，最大储气速率提升 1.1%～39.8%。研究结果为静态强化天然气水合物生成提供了新的方法，对能源气水合储运技术的规模化应用具有指导意义。

参考文献：

[1] GHAVIPOUR M, GHAVIPOUR M, CHITSAZAN M, et al. Experimental study of natural gas hydrates and a novel use of neural network to predict hydrate formation conditions[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2013, 91(2): 264 – 273.

[2] 郑新, 孙志高, 樊栓狮, 等. 天然气水合物储气实验研究 [J]. 天然气工业, 2003, 23(1): 95 – 97.

[3] LIN W, CHEN G J, SUN C Y, et al. Effect of surfactant on the formation and dissociation kinetic behavior of methane hydrate[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(21): 4449 – 4455.

[4] 刘真真, 杨亮, 刘道平, 等. 金属颗粒与纤维悬浮液中天然气水合物生成实验研究 [J]. 上海理工大学学报, 2020, 42(3): 232 – 239.

[5] 钟栋梁, 刘道平, 邬志敏, 等. 天然气水合物在喷雾装置中的制备 [J]. 上海理工大学学报, 2009, 31(1): 27 – 30.

[6] 张健, 刘道平, 时竞竞, 等. 一种喷雾强化制备二氧化碳水合物的实验系统 [J]. 化学反应工程与工艺, 2012, 28(6): 551 – 556.

[7] ROGER R, YEVIG, SWALM M. Hydrate for storage of natural gas[C]//Proceeding of the 2nd International Conference on Gas Hydrate. Toulouse, France, 1996: 423–429.

[8] LUO Y T, ZHUJ H, FAN S S, et al. Study on the kinetics of hydrate formation in a bubble column[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(4): 1000 – 1009.

[9] 郝文峰, 樊栓狮, 王金渠. 搅拌对甲烷水合物生成的影响 [J]. 天然气化工, 2005, 30(3): 5 – 7.

[10] 张亮, 刘道平, 钟栋梁, 等. 喷雾法合成天然气水合物的工艺设计 [J]. 现代化工, 2008, 28(10): 64 – 67.

[11] 安丽焕, 刘道平, 杨晓舒, 等. 雾流强化 CO_2 水合物形成特性实验研究 [J]. 制冷学报, 2016, 37(1): 84 – 89.

[12] 申小冬, 任俊杰, 梁德青. 微型鼓泡器中甲烷水合物的生成特性 [J]. 石油化工, 2018, 47(5): 431 – 436.

[13] 罗艳托, 朱建华, 陈光进. 甲烷–四氢呋喃–水体系水合物生成动力学的实验和模型化研究 [J]. 化工学报, 2006, 57(5): 1153 – 1158.

[14] KALOGERAKIS N, JAMALUDDIN A K M, DHOLABHAI P D, et al. Effect of surfactants on hydrate formation kinetics[C]// SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. New Orleans, Louisiana: Society of Petroleum Engineers, 1993.

[15] ZHONG Y, ROGERS R E. Surfactant effects on gas hydrate formation[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(19): 4175 – 4187.

(下转第 237 页)

其中叠加波形锯齿前缘叶片与正弦波锯齿前缘叶片相比，尾迹涡厚度更薄，涡系结构相对宽松且小尺度涡区域更大。

（2）叠加波形锯齿前缘叶片压力脉动幅值下降最为明显，在尾缘处基本未出现明显的窄带峰值。锯齿前缘叶片展向不同位置处，波谷切面所在尾缘位置压力波动最大，其与原始叶片相比压力脉动主峰频率发生频移现象，压力脉动幅值最大下降 50 Pa。

（3）锯齿前缘结构改变了原始叶片压力脉动主峰频率，压力脉动主峰频率与涡脱落的频率有关，从而可知锯齿前缘结构也改变了原始叶片涡脱落的频率。

参考文献：

[1] 谢志宾, 陈二云, 丁京涛, 等. 叶片包角对离心泵流场及脉动特性的影响 [J]. 上海理工大学学报, 2017, 39(5): 430 – 437.

[2] MOREAU D J, DOOLAN C J. Tonal noise from trailing edge serrations at low Reynolds number[R]. AIAA 2013−2010, Reston: AIAA, 2013.

[3] CHONG T P, JOSEPH P, GRUBER M. An experimental study of airfoil instability noise with trailing edge serrations[C]//16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Stockholm, Sweden: AIAA, 2010.

[4] 仝帆, 乔渭阳, 王良锋, 等. 仿生学翼型尾缘锯齿降噪机理 [J]. 航空学报, 2015, 36(9): 2911 – 2922.

[5] 王国付, 张明明, 徐建中. 仿鲸鱼鳍翼段气动控制实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(10): 1842 – 1846.

[6] 马群毅, 邓清华, 丰镇平. 基于座头鲸胸鳍结节的仿生透平叶片内流特性研究 [C]//高等学校工程热物理第二十届全国学术会议论文集——热流体力学专辑. 青岛, 中国: 中国高等教育学会工程热物理专业委员会, 2014.

[7] 陈伟杰, 乔渭阳, 仝帆, 等. 前缘锯齿对边界层不稳定噪声的影响 [J]. 航空学报, 2016, 37(12): 3634 – 3645.

[8] JIANG M, LI X D, BAI B H, et al. Numerical simulation on the NACA0018 airfoil self-noise generation[J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2012, 2(5): 052004.

[9] 杨景茹, 杨爱玲, 陈二云, 等. 锯齿尾缘叶片气动特性和绕流流场的数值研究 [J]. 航空动力学报, 2017, 32(4): 900 – 908.

[10] 戴丽萍, 焦建东, 李新凯, 等. 涡发生器安装位置对风力机翼型流场影响的数值研究 [J]. 太阳能学报, 2016, 37(2): 276 – 281.

[11] 孙晓峰, 周盛. 气动声学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1994: 150−156.

[12] LOCKARD D P. A comparison of ffowcs Williams-hawkings solvers for airframe noise applications[C]// Proceedings of the 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference & Exhibit. Breckenridge, Colorado: AIAA, 2002: 2580.

[13] CASALINO D, JACOB M, ROGER M. Prediction of rod-airfoil interaction noise using the ffowcs-Williams-hawkings analogy[J]. AIAA Journal, 2003, 41(2): 182 – 191.

(上接第 228 页)

[16] LU H L, KAWASAKI T, UKITA T, et al. Particle size effect on the saturation of methane hydrate in sediments— Constrained from experimental results[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(10): 1801 – 1805.

[17] GOVINDARAJ V, MECH D, PANDEY G, et al. Kinetics of methane hydrate formation in the presence of activated carbon and nano-silica suspensions in pure water[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 26: 810 – 818.

[18] 李金平, 吴疆, 梁德青, 等. 纳米流体中气体水合物生成过程的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(3): 365 – 368.

[19] KAKATI H, MANDAL A, LAIK S. Promoting effect of Al_2O_3/ZnO-based nanofluids stabilized by SDS surfactant on CH_4+C_2H_6+C_3H_8 hydrate formation[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2016, 35: 357 – 368.

[20] MUSTAFFAR A, HARVEY A, REAY D. Melting of phase change material assisted by expanded metal mesh[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 90: 1052 – 1060.

[21] 汤勇, 张娟, 周德明, 等. 纤维复合相变蓄热材料的固/液界面模拟及分析 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2001, 29(11): 1 – 6.