

# 氯化钠和酪氨酸增强 PVP 抑制水合物的性能

王 杰 艾志久\*

(西南石油大学 机电工程学院, 成都 610500)

**摘 要:** 油气输送管道在一定条件下会形成水合物, 可能导致灾难性的后果, 通过注入动力学抑制剂, 可以延迟水合物的形成。在 11.7 MPa 和 293.1 K 条件下, 向高压反应釜内注入混合气体(甲烷、乙烷和丙烷), 实验研究 NaCl 和酪氨酸(L-tyrosine)对聚乙烯吡咯烷酮(PVP)抑制水合物性能的影响。通过测量水合物的成核温度、诱导时间和耗气量, 评判 NaCl 和 L-tyrosine 对 PVP 抑制水合物的效果。实验结果表明: 添加 1% (质量分数, 下同) 的 PVP 后, 水合物的成核温度为 282.7 K, 诱导时间为 45 min, 耗气量为  $5.96 \times 10^{-2}$  mol; 然而, 添加 0.25% NaCl、0.25% L-tyrosine 与 0.5% PVP 组合抑制剂后, 水合物的成核温度为 281.7 K, 诱导时间为 65 min, 耗气量为  $5.19 \times 10^{-2}$  mol, 比蒸馏水系统的气体消耗量减少了约 27%。因此, NaCl 和 L-tyrosine 能明显提高 PVP 抑制水合物的效果。

**关键词:** 抑制剂; 水合物; 诱导时间; 耗气量; 聚乙烯吡咯烷酮(PVP); 酪氨酸(L-tyrosine)

**中图分类号:** TE39 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2017.03.007

## 引 言

在石油与天然气的运输过程中, 由于一定的压力和温度条件, 管道内会形成水合物并造成堵塞<sup>[1-2]</sup>, 甚至导致管道发生爆炸的严重后果, 造成巨大的财产损失。目前, 人们已经采取一些技术措施来防止油气集输管道内水合物的形成问题, 主要包括降压法、加热法、除水法和添加水合物抑制剂<sup>[3-4]</sup>。其中添加水合物抑制剂具有经济、简单、效果好等优点, 成为使用最为广泛的方法。水合物抑制剂包括热力学抑制剂和动力学抑制剂。热力学抑制剂(如甲醇、乙二醇等醇类或电解质)改变了水合物的相平衡条件, 但用量大, 一般占到水相质量分数的 10%~60%, 并且毒性强, 对环境污染较大<sup>[5]</sup>。近年来, 学者们积极从事动力学抑制剂的研究工作<sup>[6]</sup>。动力学抑制剂不改变水合物形成的热力学条件, 而是延迟水合物成核或水合物生长, 从而减少水合物聚集和形成的风险。动力学抑制剂主要包括聚合物<sup>[7]</sup>、抗冻蛋白<sup>[8]</sup>、离子液体<sup>[9]</sup>和季铵离子<sup>[10]</sup>, 其中最常用的是酰胺基类聚合物, 如聚乙烯

吡咯烷酮(PVP)、三元共聚物(Gaffix VC-713)和聚乙烯基己内酰胺(PCVap)等。动力学抑制剂的用量很少, 在水相中的浓度一般小于 1% (质量分数, 下同), 同时还可以添加少量的协同剂(如醇类、NaCl 等), 以提高动力学抑制剂的抑制效果。Cohen 等<sup>[11]</sup>研究发现, 添加 0.75% 乙二醇单丁醚(2-butoxyethanol)与 0.5% 三元共聚物(Gaffix VC-713)组合抑制剂, 水合物形成的诱导时间达到 1200 min。Kim 等<sup>[12]</sup>的实验表明, 添加少量的乙二醇(MEG)可以提高聚乙烯基己内酰胺(PCVap)的抑制性能, 明显延迟水合物形成时间。Lee 等<sup>[13]</sup>指出, 聚氧化乙烯(PEO)可作为协同剂, 增强动力学抑制剂抑制水合物的效果。Yang 等<sup>[14]</sup>采用超声法发现, 醚二醇与聚乙烯基己内酰胺聚合物(PCVap)配成组合抑制剂, 其抑制效果明显比单独添加 PCVap 要好。Khodaverdiloo 等<sup>[15]</sup>探讨了壬基酚聚氧乙烯醚(NPE)和聚乙二醇(PEG)对聚乙烯吡咯烷酮(PVP)抑制水合物的协同作用, 其主要通过抑制水合物的成核和生长速率实现。Sharifi 等<sup>[16]</sup>在实验中发现, 同时添加聚乙烯吡咯烷酮(PVP)和聚乙烯基己内酰胺(PCVap)可以显著降低水合物的生长速率。Jokandan 等<sup>[17]</sup>在含有聚乙烯吡咯烷酮(PVP)的溶液中添加聚乙二醇(PEG)、聚丙烯酰胺(PAM)和羟乙基纤维素(HEC)后, 延长了水合物的成核时间并降低了水合物的生长速率。Talaghat<sup>[18]</sup>在小流量循环装置实验中发现, 酪氨酸(L-tyrosine)对聚乙烯吡咯烷酮

收稿日期: 2016-11-28

基金项目: 石油天然气装备教育部重点实验室开放基金(OGE201403-28)

第一作者: 男, 1990 年生, 硕士生

\* 通讯联系人

E-mail: aizhijiu123@vip.sina.com

(PVP)抑制水合物的形成起协同作用。Zhao 等<sup>[19]</sup>发现,NaCl 能增强聚乙烯吡咯烷酮(PVP)抑制水合物的性能。因此,研究协同剂与动力学抑制剂配成的组合抑制剂具有非常重要的意义。

由于不同油气田的气体成分和油气输送管道所处的环境不一样,单一的动力学抑制剂应用效果可能并不理想,可以添加少量的协同剂来提高动力学抑制剂的抑制性能。同时,相比单一气体,混合气体形成水合物的情况更加复杂。因此,本文在装有混合气体(甲烷、乙烷和丙烷)的高压反应釜内,以诱导时间、成核温度和耗气量作为评价标准,研究 NaCl 和酪氨酸(L-tyrosine)对聚乙烯吡咯烷酮(PVP)抑制水合物形成的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

实验所用混合气体由甲烷、乙烷和丙烷组成,其体积分数分别为 89.93%、7.04% 和 3.03%,佛山科的气体化工有限公司;NaCl,纯度大于 99.0%,默克技术有限公司;PVP,纯度大于 99.0%,上海一基生物科技有限公司;L-tyrosine,纯度大于 99.0%,深圳佳迪化工有限公司;蒸馏水为实验室自制。

### 1.2 实验装置

实验装置示意图如图 1 所示,主要包括恒温水浴、高压反应釜、温度表与压力表、气瓶、增压器和数据采集系统等。该装置的核心是高压反应釜,其容积为 250 cm<sup>3</sup>,最大工作压力 20 MPa,工作温度范围 263.1 K ~ 333.1 K。恒温水浴是由 85% 的水和 15% 的乙二醇组成的溶液,其目的是控制高压反应釜内的温度,控制精度为 ±0.01 K。使用 Pt100 铂电阻来测量高压反应釜内的温度,其精度为 ±0.05 K,压力传感器用来测量高压反应釜内的压力,其精度为量程的 0.1%。采用无级调速永磁旋转搅拌器,转速调节范围 0 ~ 1000 r/min。增压器用来增加高压反应釜内的气体压力。通过计算机运行 AppliLab (v6.0) 软件,记录实验数据。

### 1.3 实验步骤

用蒸馏水清洗高压反应釜 3 次,并用氮气吹干。使用真空泵对高压反应釜抽真空,注入 120 m<sup>3</sup> 的蒸馏水或注入 NaCl、L-tyrosine、PVP 与 120 m<sup>3</sup> 蒸馏水互配成不同的组合抑制剂水溶液,再次对高压反应釜抽真空,充入混合气体到高压反应釜内,其压力小于 1 MPa。开启水浴,使水浴温度达到设定值,待高

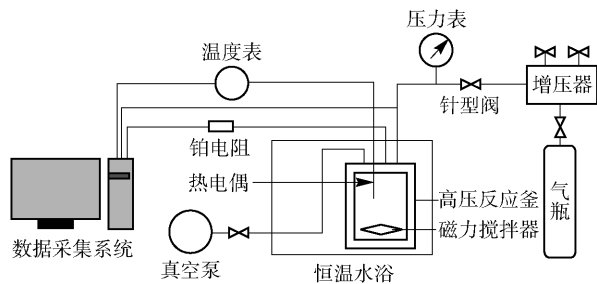


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

压反应釜内溶液温度达到 293.1 K,打开针型阀并充入混合气体,直到压力达到 11.7 MPa,关闭阀门并搅拌,开始实验并记录数据。1 h 后,降低水浴温度至 292.1 K 并保持 1 h,之后降低水浴温度为 291.1 K 并保持 1 h,以此类推,每次降低水浴温度 1 K 并保持 1 h。当压力突然显著降低,高压反应釜在该温度下保持几个小时,促使水合物完全形成。然后,再降低水浴温度 3 K 或 4 K,观察压力是否进一步下降。当压力没有明显下降时,实验结束。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水合物形成过程分析

气体水合物的形成可表示为



其中 M 是气体分子, n 是水分子数。M · nH<sub>2</sub>O 的形成可视为经历了气体溶解、形成不稳定的结构和形成稳定的水合物过程。

在这里,水合物的形成分为 3 个阶段,即混合气体溶解阶段、水合物成核阶段和水合物生长阶段。在水合物形成过程中,水分子之间通过氢键缔结成笼形结构。气体分子溶于水并进入笼形结构后,形成不稳定的团簇体。由于团簇处于不稳定状态,可与相邻的团簇间共面聚集在一起,不稳定簇与不稳定簇之间处于动态平衡,当聚集的不稳定簇达到临界尺寸后,就形成了水合物晶核。然后,水合物晶核开始生长,最终形成大量的水合物。根据水合物动力学形成过程,动力学抑制剂可以从水合物成核阶段和水合物生长阶段来抑制水合物的形成。

动力学抑制剂能够影响水合物的成核和生长过程,从而延迟水合物的形成时间。因此,动力学抑制剂的抑制性能可根据诱导时间进行评价。在水合物生长阶段,可通过耗气量来评价动力学抑制剂对水合物生长的影响。

2.2 成核温度

实验开始时,高压反应釜内的初始压力和温度分别为 11.7 MPa 和 293.1 K。每次降低水浴温度 1 K,系统在该温度下保持 1 h。当开始有水合物形成时,压力突然明显降低。图 2 所示为水合物形成过程的温压曲线。当温度降低到某一值时,压力出现拐点并明显降低,而拐点代表水合物开始成核。拐点前的曲线减小幅度很小,表示混合气体在高压下溶解于蒸馏水或溶液。表 1 所示为不同组合抑制剂下水合物的成核温度,可以看出抑制剂的添加明显降低了水合物的成核温度。在蒸馏水中,水合物的成核温度为 286 K,添加 1% (质量分数,下同) PVP 后,水合物的成核温度为 282.7 K,而添加 0.25% NaCl、0.25% L-tyrosine 与 0.5% PVP 组合抑制剂后,水合物的成核温度为 281.7 K。

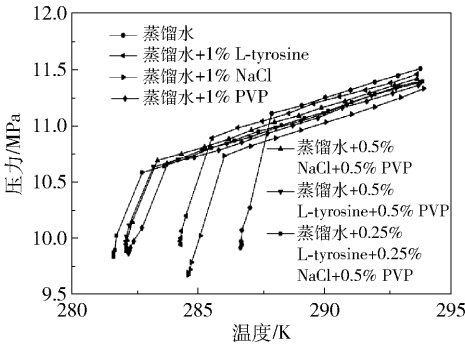


图 2 水合物形成过程的温压曲线

Fig. 2 Diagram of pressure and temperature during hydrate formation

表 1 不同组合抑制剂下水合物的成核温度

Table 1 Hydrate nucleation temperature after adding various inhibitors

溶液成分	成核温度/K
蒸馏水	286
蒸馏水 + 1% NaCl	284
蒸馏水 + 1% L-tyrosine	284.4
蒸馏水 + 1% PVP	282.7
蒸馏水 + 0.5% NaCl + 0.5% PVP	282.3
蒸馏水 + 0.5% L-tyrosine + 0.5% PVP	282.1
蒸馏水 + 0.25% NaCl + 0.25% L-tyrosine + 0.5% PVP	281.7

2.3 诱导时间

水合物的形成先以晶核的形式出现,当水-气体团簇达到临界晶核尺寸时,水合物晶核开始生长。不同学者对诱导时间的定义不同。在这里,诱导时

间定义为从混合气体与蒸馏水接触时的时间到温度升高到最大值时的时间间隔。图 3 所示为添加 1% PVP 后水合物形成过程的温压曲线。由图可知,混合气体溶解于溶液内,压力最初逐渐下降。在成核之前,气体分子处于无序状态;在成核过程中,压力突然降低是由于气体分子进入到水合物晶体的空腔里。由于气体分子进入到晶体的空腔,释放出热量,导致高压反应釜内的温度升高。

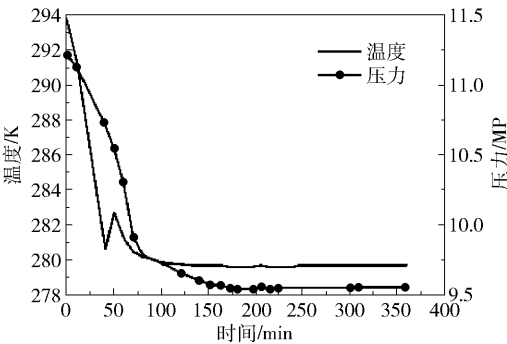


图 3 添加 1% PVP 后水合物形成过程的温压曲线

Fig. 3 Diagram of pressure and temperature during hydrate formation after adding 1% PVP

诱导时间是评价动力学抑制剂抑制水合物效果的重要指标。表 2 所示为添加抑制剂后水合物形成的诱导时间。添加 1% NaCl 后,诱导时间为 32 min;添加 1% L-tyrosine 后,诱导时间为 36 min;而添加 1% PVP 后,诱导时间为 45 min。相比 NaCl 和 L-tyrosine,PVP 抑制水合物成核的效果更明显。当分别添加 0.5% NaCl 与 0.5% PVP 组合抑制剂和 0.5% L-tyrosine 与 0.5% PVP 组合抑制剂后,其诱导时间分别为 59 min 和 62 min。NaCl 和 L-tyrosine 可作为协同剂,但协同效果却不同,这与抑制机理有关。当添加 0.25% NaCl、0.25% L-tyrosine 与 0.5%

表 2 添加抑制剂后水合物形成的诱导时间

Table 2 Induction time of hydrate formation after adding various inhibitors

溶液成分	诱导时间/min
蒸馏水	27
蒸馏水 + 1% NaCl	32
蒸馏水 + 1% L-tyrosine	36
蒸馏水 + 1% PVP	45
蒸馏水 + 0.5% NaCl + 0.5% PVP	59
蒸馏水 + 0.5% L-tyrosine + 0.5% PVP	62
蒸馏水 + 0.25% NaCl + 0.25% L-tyrosine + 0.5% PVP	65

PVP 组合抑制剂后,诱导时间为 65 min。因此,NaCl 和 L-tyrosine 对 PVP 抑制水合物成核具有协同作用,这是由于 NaCl 溶解于蒸馏水中的离子与水分子的偶极形成静电键,这种电离允许较少的水分子形成水合物团簇,而 L-tyrosine 和 PVP 则吸附在水合物晶体上或扰乱水结构,从而阻碍水合物成核。

## 2.4 水合物生长

成核之后,水合物快速生长,消耗掉水合物晶体周围的水和气体。观察水合物形成过程中的耗气量,可以研究抑制剂对水合物生长过程的影响情况。假定在水合物形成过程中,可忽略气体与水合物平衡时成分的变化,因此,水合物形成过程中的耗气量可用式(2)计算

$$n = \left( \frac{p_1}{z_1 T_1} - \frac{p_2}{z_2 T_2} \right) \frac{V}{R} \quad (2)$$

其中, $n$  为水合物形成过程中的耗气量, $V$  为混合气体的体积, $R$  为通用气体常数, $p_1$  和  $T_1$  为初始条件下高压反应釜内的压力和温度, $p_2$  和  $T_2$  为最终条件下高压反应釜内的压力和温度, $z_1$  和  $z_2$  是由 Peng-Robinson 状态方程得到的气体常数。

图 4 所示为添加 1% PVP 后水合物形成过程中的耗气量曲线。可以看出在水合物成核之前,耗气量可以忽略不计。在成核过程中,温度增加,耗气量突然增大。几小时后,水合物的形成停止,没有进一步的气体消耗。

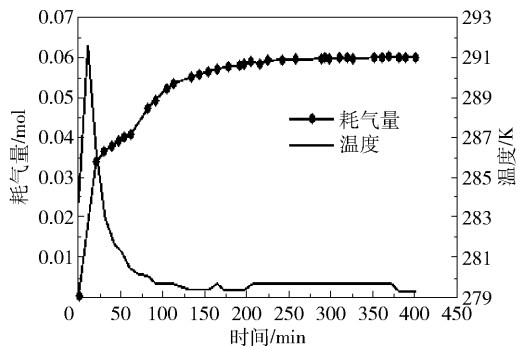


图 4 添加 1% PVP 后水合物形成过程中的耗气量和温度曲线

Fig. 4 Diagram of pressure and temperature during hydrate formation after adding 1% PVP

图 5 所示为添加抑制剂后的耗气量曲线。由于成核后的水合物形成速度较快,混合气体初始消耗速率很快。然而,由于 L-tyrosine 和 PVP 吸附在水合物晶体的表面上,减少了进入水合物晶体的气体量,导致水合物的生长速率变慢。250 min 后,蒸馏

水中耗气量为  $7.15 \times 10^{-2}$  mol。当分别添加 1% NaCl、1% L-tyrosine 和 1% PVP 后,耗气量分别为  $6.73 \times 10^{-2}$  mol、 $6.64 \times 10^{-2}$  mol 和  $5.96 \times 10^{-2}$  mol。因此,NaCl、L-tyrosine 和 PVP 均能抑制水合物的生长速率,并且 PVP 比 NaCl 和 L-tyrosine 抑制水合物生长的效果更好。

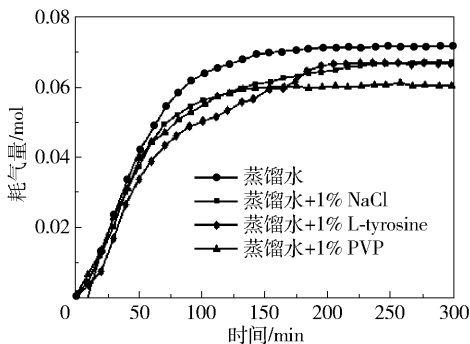


图 5 添加抑制剂后的耗气量曲线

Fig. 5 Diagram of gas consumption after adding various inhibitors

图 6 所示为不同浓度 PVP 的耗气量曲线。当添加 0.5% PVP, 250 min 后的耗气量为  $6.39 \times 10^{-2}$  mol; 当添加 1% PVP, 250 min 后的耗气量为  $5.96 \times 10^{-2}$  mol。因此,适当增加 PVP 的浓度,可以减慢水合物的生长速度。

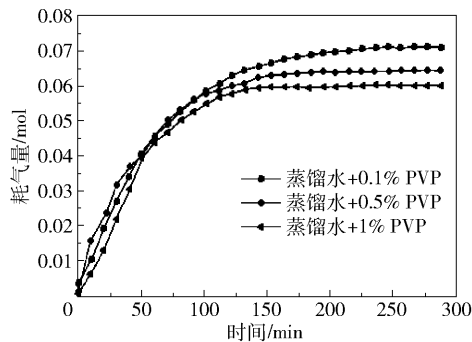


图 6 不同浓度 PVP 的耗气量曲线

Fig. 6 Diagram of gas consumption after adding different concentrations of PVP

表 3 所示为不同组合抑制剂的耗气量。可以看出,与只添加 PVP 相比,同时添加 NaCl、L-tyrosine 和 PVP 可以进一步降低耗气量。当添加 0.25% NaCl、0.25% L-tyrosine 和 0.5% PVP 组合抑制剂时,250 min 后的耗气量为  $5.19 \times 10^{-2}$  mol。因此,与蒸馏水相比,同时添加 NaCl、L-tyrosine 和 PVP 到蒸馏水中后,耗气量减少了 27% 左右。这是由于 NaCl 电离出的离子与水分子的偶极形成静电键,以及 L-tyrosine 和 PVP 吸附在水合物晶体上或扰乱水



结构的缘故。

表 3 不同组合抑制剂的耗气量

Table 3 Diagram of gas consumption after adding various inhibitors

溶液成分	耗气量/mol
蒸馏水 + 1% PVP	$5.96 \times 10^{-2}$
蒸馏水 + 0.5% NaCl + 0.5% PVP	$5.70 \times 10^{-2}$
蒸馏水 + 0.5% L-tyrosine + 0.5% PVP	$5.68 \times 10^{-2}$
蒸馏水 + 0.25% NaCl + 0.25% L-tyrosine + 0.5% PVP	$5.19 \times 10^{-2}$

3 结论

适当增加 PVP 的浓度,可以减缓水合物的生长速度。在蒸馏水中添加 1% PVP 后,水合物的成核温度为 282.7 K,诱导时间为 45 min,消耗掉的混合气体总量为  $5.96 \times 10^{-2}$  mol,比单独添加 1% NaCl 或 1% L-tyrosine 的抑制效果好。而添加 0.25% NaCl、0.25% L-tyrosine 与 0.5% PVP 组合抑制剂后,水合物的成核温度为 281.7 K,诱导时间为 65 min,耗气量为  $5.19 \times 10^{-2}$  mol,比蒸馏水系统的耗气量减少了约 27%,并且比只添加 1% PVP 的抑制效果更好。因此,NaCl 和 L-tyrosine 有助于动力学抑制剂 PVP 抑制水合物的成核和生长过程,提升其抑制效果。

参考文献:

[1] Sloan E D, Koh C A, Sum A K, et al. Hydrates: state-of-the-art inside and outside flowlines[J]. Journal of Petroleum Technology, 2009, 61(12): 89–94.

[2] DelVillano L, Kelland M A, Miyake G M, et al. Effect of polymer tacticity on the performance of poly(N, N-di-alkylacrylamide)s as kinetic hydrate inhibitors[J]. Energy & Fuels, 2010, 24(4): 2554–2562.

[3] Talaghat M R. Prediction of induction time for natural gas components during gas hydrate formation in the presence of kinetic hydrate inhibitors in a flow mini-loop apparatus [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2013, 91(4): 790–797.

[4] 关利军, 任金山, 孙宝江, 等. 深水气井测试水合物抑制剂优选及注入方法[J]. 中国海上油气, 2014, 26(2): 55–60.

Guan L J, Ren J S, Sun B J, et al. An optimization of hydrate inhibitor and its injection method for the testing of deep water gas wells[J]. China Offshore Oil and Gas,

2014, 26(2): 55–60. (in Chinese)

[5] Lou X, Ding A L, Maeda N, et al. Synthesis of effective kinetic inhibitors for natural gas hydrates[J]. Energy & Fuels, 2012, 26: 1037–1043.

[6] Kumar A, Sakpal T, Kumar R. Influence of low-dosage hydrate inhibitors on methane clathrate hydrate formation and dissociation kinetics[J]. Energy Technology, 2015, 3(7): 717–725.

[7] 樊桂卿, 王燕鸿, 郎雪梅. 天然气水合物动力学抑制技术研究进展[J]. 天然气工业, 2011, 31(12): 99–109.

Fan S S, Wang Y H, Lang X M. Progress in the research of kinetic hydrate inhibitors[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 99–109. (in Chinese)

[8] Walker V, Zeng H, Ohno H, et al. Antifreeze proteins as gas hydrate inhibitors[J]. Canadian Journal of Chemistry, 2015, 93(8): 839–849.

[9] Kim K S, Kang J W, Kang S P. Tuning ionic liquids for hydrate inhibition[J]. Chemical Communications, 2011, 47(22): 6341–6343.

[10] Storr M T, Taylor P C, Monfort J P, et al. Kinetic inhibitor of hydrate crystallization[J]. Journal of the American Chemical Society, 2004, 126(5): 1569–1576.

[11] Cohen J M, Wolf P F, Young W D. Enhanced hydrate inhibitors: powerful synergism with glycol ethers[J]. Energy & Fuels, 1998, 12(2): 216–218.

[12] Kim J, Shin K, Seo Y, et al. Synergistic hydrate inhibition of monoethylene glycol with poly(vinylcaprolactam) in thermodynamically underinhibited system [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2014, 118(30): 9065–9075.

[13] Lee J D, Englezos P. Enhancement of the performance of gas hydrate kinetic inhibitors with polyethylene oxide[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(19): 5323–5330.

[14] Yang J H, Tohidi B. Characterization of inhibition mechanisms of kinetic hydrateinhibitors using ultrasonic test technique[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(3): 278–283.

[15] Khodaverdiloo K R, Rad S A, Naeiji P, et al. Synergistic effects of nonylphenol ethoxylates and polyethylene glycols on performance of gas hydrate kinetic inhibitor [J]. Journal of Molecular Liquids, 2016, 216: 268–274.

[16] Sharifi H, Ripmeester J, Walker V K, et al. Kinetic inhibition of natural gas hydrates in saline solutions and heptane[J]. Fuel, 2014, 117: 109–117.

- [17] Jokandan E F, Naeiji P, Vara minian F. The synergism of the binary and ternary solutions of polyethylene glycol, polyacrylamide and hydroxyethyl cellulose to methane hydrate kinetic inhibitor[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 29: 15–20.
- [18] Talaghat M R. Experimental investigation of induction time for double gas hydrate formation in the simultaneous presence of the PVP and L-tyrosine as kinetic inhibitors in a mini flow loop apparatus[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 19: 215–220.
- [19] Zhao X, Qiu Z S, Zhou G W, et al. Synergism of thermodynamic hydrate inhibitors on the performance of poly(vinyl pyrrolidone) in deepwater drilling fluid[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 23: 47–54.

## Enhancement of the performance of polyvinylpyrrolidone (PVP) for inhibiting hydrate formation by means of NaCl and L-tyrosine

WANG Jie AI ZhiJiu \*

(School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** Gas hydrates can be formed under certain conditions in oil and gas transmission pipelines, which may have disastrous consequences. Hydrate formation can be delayed by adding kinetic hydrate inhibitors. In a high-pressure reactor with methane, ethane and propane gas mixture under a pressure of 11.7 MPa at 293.1 K, the effect of adding NaCl and L-tyrosine on polyvinylpyrrolidone (PVP) as a kinetic inhibitor of the formation of hydrates has been studied. By measuring the temperature of hydrate nucleation, induction time and gas consumption, the effect of NaCl, L-tyrosine and PVP on the inhibition of hydrate formation were studied. The experimental results show that when adding 1% PVP, the temperature of hydrate nucleation is about 282.7 K, the induction time is 45 minutes and the total consumption of gas mixture is  $5.96 \times 10^{-2}$  mol. However, when adding 0.25% NaCl, 0.25% L-tyrosine and 0.5% PVP, the temperature of hydrate nucleation is about 281.7 K, the induction time is 65 minutes and the total consumption of gas mixture is  $5.19 \times 10^{-2}$  mol. The gas consumption is reduced by about 27% compared to the pure water system. Therefore, NaCl and L-tyrosine can significantly improve the inhibition performance of PVP.

**Key words:** inhibitor; hydrate; induction time; gas consumption; polyvinylpyrrolidone (PVP); L-tyrosine

(责任编辑:吴万玲)