

# 管输工艺中天然气水合物防治技术

钱一冰（中国石油天然气股份有限公司天然气销售分公司，北京 100101）

**摘要：**天然气水合物是一种具有极强燃烧力的固体物质，主要由水分子和烃类气体分子构成。在特定条件下，天然气与水在中高压和低温环境中结合形成类冰状笼形结构。随着温度升高或压力降低，水合物中的甲烷会溢出，导致水合物的崩解。为了在管输过程中有效避免天然气水合物的形成及堵塞问题，研究和应用防治技术显得尤为重要。本文将探讨天然气水合物的形成机理，并分析天然气水合物防治技术的应用，进一步提高天然气的运输效率。

**关键词：**天然气水合物；管输工艺；防治技术

## 0 引言

天然气水合物是一种独特的固态物质，具有良好的能源特性。它由水分子和烃类气体分子（主要是甲烷）以笼状结构结合而成。在一定的温度和压力条件下，水合物会被稳定地存在于固态，但当温度升高或压力降低时，水合物会分解并释放甲烷。因此，天然气水合物在管输过程中可能成为导致流量减少、管道堵塞和系统故障的重要因素。特别是在深海天然气和陆地寒冷地区的天然气输送过程中，水合物的形成问题显得尤为突出。

## 1 天然气水合物的形成机理

天然气水合物的形成机理在管输工艺中具有重要的影响，特别是在低温高压条件下，天然气水合物易于在管道中形成并堵塞管道，影响天然气的正常输送。天然气水合物，通常被称为“燃气冰”或“天然气冰”，是由天然气分子和水分子通过氢键作用形成的固体化合物。其形成条件主要包括温度、压力和水的存在。水合物的形成需要满足一定的热力学条件，通常是在低温、高压下，天然气分子中的主要成分甲烷、乙烷等与水分子形成固体晶体结构<sup>[1]</sup>。天然气水合物的形成过程涉及气体分子与水分子之间的相互作用。当天然气通过管道输送时，随着温度下降和压力的升高，水分子可以与天然气分子结合，形成水合物晶体。在管道内，天然气的温度和压力条件可能会发生变化，这种变化会促进水合物的形成。例如，在管道弯头、阀门附近或其他局部低温区域，水合物更易形成。水合物的形成不仅与温度和压力有关，还与水的含量密切相关。在天然气管道中，即使是少量的水分，也能促进水合物的生成。在水合物形成过程中，气体分子被“包围”在水合物晶体的空隙中，形成类似“笼状”结构的固体物质。水合物一旦形成，便会迅速膨胀，

导致管道内径的减少，甚至完全堵塞管道，严重时会导致输气管道的断裂或损坏。

## 2 管输工艺中天然气水合物防治技术思路

### 2.1 反应釜

反应釜是研究天然气水合物生成与分解过程中常用的实验装置，广泛应用于管输工艺中的水合物防治技术研究。在实验中，首先将油水混合物（通常使用纯水）按照设定的比例注入反应釜内，然后迅速向釜内注入天然气，直到达到预定的压力值，进而开始生成天然气水合物<sup>[2]</sup>。天然气水合物的生成依赖于精确的温度和压力条件，这要求实验装置必须配备高精度的温度和压力控制系统，以确保水合物的稳定生成。在整个实验过程中，反应釜内的温度和压力是动态变化的，因此，需要通过高效的数据采集系统实时监测这些关键参数。

通过收集反应釜内的实时数据（如温度、压力及其他物理参数），研究人员可以对反应体系的变化进行准确分析。这些数据不仅能够帮助研究人员掌握水合物生成过程的详细情况，还能够为后续的分解过程和水合物防治提供科学依据。为了更深入地研究水合物生成与分解的过程，通过影像资料的采集，如照片和视频，观察水合物在反应釜内的形态变化。影像数据的采集为水合物生成过程提供了可视化的证据，使研究人员能够直观地了解水合物从气体溶解到固体水合物的转变过程。

此外，结合温度、压力及影像数据，研究人员可以对水合物的生成机理和转变过程进行详细分析，揭示其形成与分解的内在规律。在实验中，采用不同的操作手段，例如加热、降压、注入抑制剂等，来研究这些因素对水合物生成与分解的影响。通过对这些数据的综合分析，研究人员可以优化水合物的防治技术，

提高天然气管道输送系统的安全性和稳定性。

## 2.2 高压环道

高压环道实验是一种用于模拟天然气水合物生成、积聚及堵塞过程的重要实验方法。在这一实验中，整体系统的容积保持不变，即定容条件下进行操作，这使得实验结果更贴近实际管道条件。在实验开始时，研究人员将特定比例的油水混合物（或纯水）注入到反应釜和高压环道中，并迅速向系统注入天然气，直达到预设的压力值，从而促使天然气水合物的生成。在这一过程中，天然气水合物在高压环道内逐步积聚，随着水合物的生成，管道内的空间逐渐被水合物占据，最终可能导致管道堵塞，进而模拟管道内水合物积累的真实情况。

通过高压环道实验，研究人员能够深入分析天然气水合物在管道内的生成、积聚与堵塞的全过程，研究水合物堵塞的机理和影响因素。实验提供了一种有效的手段来观察和评估水合物在实际管道中的行为，尤其是在复杂流体环境下的演变过程<sup>[3]</sup>。为了更好地控制水合物生成与分解的过程，实验中通常采用多种分解手段，例如降压、加热以及注入化学抑制剂等方式，通过这些手段来解除管道堵塞，并探讨不同条件下的水合物分解效率。

在整个实验过程中，系统持续采集多种关键参数数据，如压力、温度、差压和流量等。这些实时数据对于分析天然气水合物的生成速度、堵塞程度以及分解效率至关重要。通过对不同实验条件下的数据，研究人员可以评估不同操作方法对水合物生成和分解的影响，进一步优化防治技术。实验还通过透明视窗的设计，使得研究人员可以直观地观察水合物的生成和堵塞过程，实时捕捉反应的动态变化，帮助研究人员验证理论假设，为防治天然气水合物积聚和堵塞提供具体的解决方案。

## 2.3 缩短天然气水合物生成时间

天然气水合物的生成过程通常需要较长的时间，尤其是在冷却水循环机降温速率受到一定限制时，油水混合物的温度从室温降低至水合物生成区所需时间较长。为了缩短这一时间，通常需要通过预冷手段将油水混合物（或纯水）提前降至预设的温度。通过增大过冷度，可以显著提高天然气水合物生成的驱动力，从而有效缩短生成时间。预冷措施的应用能够加速水合物的生成过程，提高实验的效率。在天然气水合物的生成过程中，气液平衡的建立是一个重要的过程，

通常需要较长的时间。在静态条件下，天然气溶解速度较慢，导致水合物的生成时间较长。为了加速这一过程，可以使用磁力搅拌来增强混合效果。通过搅拌，天然气和水的接触面增大，天然气溶解速度也得到了提高。此外，磁力搅拌还能促进水合物的成核过程，进而加速水合物的生成。在搅拌过程中，转速的控制也是至关重要的，合适的搅拌转速不仅能够提高生成效率，还能避免因过高或过低的搅拌速率而引发实验数据的波动。

## 3 管输工艺中天然气水合物防治技术方案

### 3.1 加热分解

在天然气水合物生成并达到稳定状态后，为了有效地分解水合物，首先需要调整实验系统的温度条件。该过程的第一步是对冷却水循环机进行设置，将其温度调整至预定值，并等待冷却介质的温度稳定达到这一设定温度<sup>[4]</sup>。当冷却介质的温度稳定后，启动冷却机外循环，确保冷却系统能够顺利运转并达到预期的效果。在此基础上，通过外部热源向高压透明反应体系持续输入热量。此时，外部热量的输入将使反应体系中的温度逐渐升高，进而改变反应体系的热力学条件。这一过程不仅仅是一个简单的温度升高，而是通过温度的逐步增加，使天然气水合物的稳定条件逐渐远离其形成的平衡区。天然气水合物的稳定性与温度和压力有密切关系，当温度升高至超出其稳定区时，水合物的结构将被破坏，水合物的固态结构开始向气态甲烷转化。

随着温度持续升高，系统中的水合物会逐渐分解，从固态水合物转变为气态甲烷，并通过系统中的气体排放管道排出。这一过程中，温度和压力是两个至关重要的监测参数。研究人员需要在整个加热过程中密切监测温度变化、压力波动以及水合物分解所需的具体条件。同时，还需要实时采集数据，对反应体系中的温度、压力和水合物变化进行系统记录和分析。通过精确记录水合物分解的时间、温度、压力等多维度数据，研究人员能够深入分析天然气水合物分解过程中的特性及其影响因素，从而获得更准确的分解规律和分解特性。借助实验数据，研究人员可以更好地理解温度与压力对天然气水合物分解的作用机理，进而为防治天然气水合物的生成与积聚提供科学依据。实验中得出的理论结论也为未来的天然气管道输送技术提供了重要的参考，尤其是在天然气管道中天然气水合物防治的过程中，具有重要的实践意义。

### 3.2 降压分解

天然气水合物的降压分解是通过改变反应系统的压力条件，使水合物在压力梯度的驱动下开始分解的过程。具体操作中，首先需要将高压透明反应釜的排气阀调整至设定开度，以控制降压速率，确保反应体系的压差逐渐增大。通过缓慢降低系统压力，使得水合物的稳定条件被破坏，并逐渐引发水合物的分解。在这一过程中，反应釜中的天然气水合物在压力变化的影响下，会由固态转变为气态，释放出甲烷气体<sup>[5]</sup>。降压过程不仅涉及到水合物的稳定性变化，还涉及到气体的相变与释放。因此，实验中需要精确控制降压速率，以保证系统的稳定性和水合物的有效分解。与加热分解过程不同，降压分解的优势在于能够在不改变系统温度的情况下，通过压差驱动水合物分解。这种方式的分解效率较高，且更加适用于不同的实验环境。在降压过程中，反应系统中的压力、气体流量、温度等数据需要实时采集和分析，以便评估分解速率与水合物稳定性之间的关系。通过对这些数据的处理，可以更好地理解水合物的分解过程，并为天然气水合物防治技术的优化提供依据。

### 3.3 抑制剂注入

天然气水合物的形成与稳定性强烈依赖于温度、压力和水合物体系的热力学平衡条件。为了有效防治天然气水合物的生成与积聚，抑制剂的注入是一种行之有效的技术手段。特别是热力学抑制剂如甲醇和乙二醇，因其能够通过改变反应体系的热力学平衡，抑制水合物的形成和稳定性，因此在管道运输工艺中，抑制剂的应用被广泛研究和使用。在天然气水合物生成实验中，抑制剂注入的过程通常由恒流泵精确控制流速，确保甲醇或乙二醇的注入量和速度符合实验要求。恒流泵将抑制剂缓慢且稳定地注入高压透明反应釜中，形成一定浓度的甲醇或乙二醇溶液。由于甲醇和乙二醇属于典型的热力学抑制剂，这些抑制剂可以通过改变水合物的热力学平衡条件，降低水合物生成所需的温度和压力，使得天然气水合物不再稳定，最终达到抑制水合物的形成和分解的目的。甲醇和乙二醇的注入改变了高压透明反应体系的平衡条件，使得天然气水合物的生成温度和压力上升，水合物的稳定性降低<sup>[6]</sup>。当抑制剂的浓度达到一定阈值时，水合物在管道和反应釜中的生成和存在条件将被有效抑制。这一过程不仅减缓了天然气水合物的形成速度，还能避免水合物在管道中积聚形成堵塞，确保管道的正常

流通和天然气的顺利输送。对于抑制剂注入过程的研究，关键是要控制注入的时间、流速以及注入量。研究表明，在不同的试验条件下，抑制剂的注入速率和注入时间对于水合物的抑制效果具有显著影响。若注入过快，抑制剂可能未能均匀分布，导致抑制效果不佳；而过慢注入可能会延缓抑制效果的发挥，因此合理控制注入速率是实现高效抑制的关键。在实验中，除了注入抑制剂外，还需要监测反应釜内的压力和温度变化。随着抑制剂的注入，天然气水合物的分解和生成的平衡发生变化，系统压力和温度会呈现出不同的变化趋势。通过记录这一过程中的数据，可以更深入地理解抑制剂对天然气水合物形成的影响，以及其分解过程的特性。同时，通过这些数据的处理和分析，也可以优化抑制剂的使用条件，为实际应用中天然气水合物防治提供更精确的技术方案。

## 4 结语

综上所述，天然气水合物作为一种新型的能源载体，在能源利用、输送以及环境保护等方面具有巨大的潜力。尽管天然气水合物的防治技术在管输过程中取得了一定进展，但在实际应用中仍面临着许多挑战。为了进一步提高管输工艺的安全性和效率，需要深入研究水合物的形成机理、优化防治措施，并探索更多高效、低成本的解决方案。随着技术的不断发展，天然气水合物的防治技术有望在未来为天然气行业的可持续发展提供更加坚实的支持。

## 参考文献：

- [1] 张懿帆,徐顺义,陆祎晨,等.储层物性变化对天然气水合物分解的影响研究[J].石油工业技术监督,2024,40(12):40-46.
- [2] 高斌,赵葶,王华杰,等.基于克里金插值法的天然气水合物分布评价与预测[J].技术与市场,2024,31(12):15-26.
- [3] 李佳玥,李文镖,张鹏飞,等.天然气水合物形成/分解过程中的同位素分馏效应及其能源-环境意义[J].华东地质,2024,45(04):387-401.
- [4] 秦绪文,陆程,张召彬,等.南海天然气水合物试采储层热流耦合与温度场调控研究进展[J].地质学报,2024,98(11):3213-3224.
- [5] 赵义,陈云龙,阮海龙,等.新型天然气水合物保温保压取样器具研制[J].地质装备,2024,25(S1):139-144.
- [6] 邓娇,王权.化工园区掺氢天然气管道水合物生成预测研究[J].石油和化工设备,2024,27(10):40-43.