

长输天然气管道冰堵的防治与应急处理研究

朱晓昀¹ 乔丹²

1. 国家管网集团联合管道有限责任公司西气东输分公司 江苏南京 211100

2. 国家管网集团联合管道有限责任公司西气东输分公司 上海 200122

摘要:长输天然气管道是能源运输中的一种主要途径,对确保能源供应稳定与安全起到关键作用。但是在低温情况下天然气管道内可能会出现冰堵的情况,对天然气输送效率造成了严重的影响,甚至会造成管道的阻塞,从而影响到整个输送系统能否正常工作。冰堵主要是因为天然气中水在运输过程中由于温度下降冷凝,结冰并形成冰晶导致管道堵塞。为确保长输天然气管道安全运营,开展冰堵防治措施及应急处理策略研究有现实意义。

关键词:长输天然气管道;冰堵防治;应急处理

引言

伴随着我国天然气消费需求不断增加,长输天然气管道建设与运行规模也在逐步增大。但由于我国一些地区冬季温度偏低,尤其是东北和西北寒冷地区管道冰堵现象频繁发生。冰堵在影响管道正常输气的同时,也会给管道安全带来威胁甚至导致环境污染事故发生。因此,对长输天然气管道冰堵产生原因、发展机理、影响因素及相应预防和应急处理技术进行深入研究,已经成为保障我国能源安全,提高天然气管道可靠性的一项重要工作。

一、长输天然气管道冰堵现象的形成机理

1. 冰堵的定义与基本概念

冰堵是长输天然气管道在低温环境中,因温度骤降而使管内水分冷凝形成冰晶,然后聚集于管道某一处,妨碍天然气的正常运行。天然气开采、加工及运输过程中常夹带着一些水。这些水随着气流流入输气管道时,若遇温度下降,水就逐渐冷凝成冰块,尤其在温度偏低或者管道有局部压力变化时,冰晶将逐渐变大,并最终导致管内固态冰阻塞。冰堵产生的原因不但和温度有着密切的联系,而且和压力、气流速度以及管道设计和运行条件有着直接的联系。管道中压力波动将引起水分蒸发或者凝结,从而进一步加快冰晶生成和累积。另外天然气中杂质可能会给冰晶产生提供附着点而加大冰堵的危险。冰堵的出现不仅显著降低了管道输送效率,而且可能导致局部管道压力不正常,断裂等隐患,从而影响到天然气输送系统整体的稳定与安全。

2. 长输天然气管道中的水分来源

长输天然气管道中的水分来源多种多样,主要来自天然气的开采、处理和输送环节。天然气在采出过程中,往往会随着地层水或者凝析水进入到采集系统中,而地层水正是天然气采出过程中最为普遍的水分来源。尽管天然气进入输气管道之前都要进行分离处理以除去大部分水,但是仍然存在部分水不能被彻底除去的问题,尤其是当处理设备效率低或者保养不当时,这些残水将随着天然气流入长输管道。另外,在天然气运输过程中管道自身湿度或者温度的改变都会使空气中水蒸气流入管道系统。输气时因温差变化可能会导致管内发生冷凝,从而将空气中水蒸气冷凝为液态水并进一步提高管内水分含量。设备维护不到位造成管道或者输气站中的水流入到系统中也是造成水的来源之一。在作业时管道内部出现细小裂缝或者密封不严都会造成外部水分渗透。这一切因素共同造成输气管道内水很难被彻底排除,这就给管道冰堵提供条件与依据。

3. 冰堵形成的主要条件

冰堵是由诸多因素综合影响而成,温度、压力、气流速度及管内水分含量等都是至关重要的条件。低温环境对冰堵产生影响最为直接,管道中天然气温度降低到冰点以下后,剩余水分快速冷凝并形成冰晶。寒冷地区气候条件或者管道输送时气温变化特别是冬季或者高海拔地区显著提高冰晶形成概率。压力变化对冰堵形成同样具有显著影响,管内天然气压力波动会使气体中水蒸气骤然凝结并转化成液态水进一步凝聚成为冰晶。局部压力骤降处,通常是冰堵最易形成区,尤以管道拐角、

阀门和连接点处压力波动较为显著。气流速度变慢对冰堵也有促进作用，当管道内气体速度下降时水分更易在管壁等不规则表面上团聚并逐渐生成冰晶。水分含量累积是冰堵发生的物质基础，管内水含量越高，冰晶生成的速度与大小也就越大，最后有可能会将整条管道阻塞。由于杂质提供水分凝结的附着点而使冰晶快速长大，杂质的出现还能加快冰晶生成。这几种情况叠加使长输天然气管道出现冰堵风险更大。

二、长输天然气管道冰堵防治技术

1. 降低水含量的技术手段

减少长输天然气管道中的水含量对于预防冰堵具有重要意义，目前普遍采用的工艺有天然气除湿、管道清洗等。天然气除湿技术就是在天然气入管之前先经过严格脱水处理来降低水。常用除湿方法包括冷凝法，吸附法以及化学除水法。冷凝法是用降低天然气温度，把气体中水蒸气凝结为液态水而排除。吸附法则是通过利用特定的吸附材料，例如分子筛或硅胶，来捕获并清除气体中的水分。化学去水技术利用特定的化学试剂与水分子进行化学反应，从而将水分转变为无害的化合物并排放到系统中。基于上述方法，又可与在线水分监测系统相结合对天然气中水的含量进行实时追踪，以保证水分处于安全状态。定期对管道进行清理也是减少水含量的一种有效方法，在清理过程中采用特殊的清管器或者液体介质对管道内的水分以及杂质进行清理，避免了管道中水分的聚集，尤其对于某些地势较低或者压力经常发生变化的地区，更易被水淹没，并且通过清理能够降低水分在这些地区的滞留量。另外定期对管道进行大修和保养，保证管道密封性能良好，避免外界水的渗透，是降低管道内部水含量的一种有效手段。综合运用多种方法可以大幅度降低天然气管道中水分含量以有效防止冰堵现象。

2. 保持管道温度的技术手段

维持长输天然气管道的温度是防止冰堵发生的一项关键技术，采取有效的温度控制措施可避免水在管道中冷凝形成冰晶。管道伴热技术通常采用外部热源向管道持续供热以保证管道内温度保持在冰点之上。伴热方式分为电伴热与蒸汽伴热，电伴热系统一般由发热电缆，温控装置及绝缘材料等组成，能准确地控制管表面温度，通常能使管道温度保持在 5°C ~ 20°C 之间，以避免气体中水凝结成冰块。蒸汽的伴热效应是通过在管道外部安装蒸汽管道或覆盖蒸汽管套来实现的，这样可以通过热传

导的方式将热量传输到天然气管道，从而有效地避免管道内部温度的下降。蒸汽伴热适合远距离管道输送，加热温度可调在 40°C ~ 60°C 之间，能稳定地确保输送环境温度。除伴热技术外，保温材料在管道中的使用也非常关键，一般使用高效保温材料如聚氨酯泡沫，玻璃棉或者岩棉对管道进行包裹，这类材料导热系数比较小，本实用新型能够有效地降低管道和外界环境之间的热交换，避免外界低温对管道内部温度造成影响。聚氨酯泡沫的热传导系数通常为 $0.02\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，这有助于显著增强管道的保温性能，尤其在寒冷地带，其保温层的厚度可以根据实际需求进行调整，一般为 50mm ~ 100mm ，确保低温环境中天然气仍能处于流动状态。采用伴热与保温技术相结合的方式，能够有效地控制管道内部温度，进而降低冰堵危险，保证天然气平稳运输。

3. 应用化学抑制剂防治冰堵

应用化学抑制剂预防冰堵效果显著，抑制剂改变了水体物理化学性质，减小冰晶生成速度及大小，进而预防冰堵。通常使用的化学抑制剂有甲醇、乙二醇及三乙二醇，这些化学抑制剂冰点低、水溶性好，能在管道中与水完全混合并抑制水结冰。甲醇冰点 -97°C ，乙二醇冰点 -12.9°C ，使其在寒冷环境中能有效地减少水分冻结点和阻止冰晶生成。甲醇在寒冷地区的管道防冻中是常用的，其添加量通常是基于管道内的水分含量和周围环境的温度来确定的，最常見的使用量是天然气流量的 0.1% 到 0.2% 。实际使用时，化学抑制剂由专门的注入系统直接喷入管内，和水混合后生成不容易结冰的溶液并随气流散布到管内各部位，尤其在气温低或者压力波动大的地区，抑制剂可以明显降低冰堵风险。对长输管道系统而言，需要对抑制剂注入点及注入量进行准确的计算与监控，以保证化学剂均匀地分布于管道各处。乙二醇与三乙二醇相比较甲醇沸点高、挥发性小，适合在高温高压管道环境中使用，特别适合在管道压力大于 2.5MPa 的情况下使用，三乙二醇使用效果较理想，因为它能稳定抑制高压。化学抑制剂的合理应用可以在确保管道安全高效的前提下有效地防止冰堵的形成。

三、长输天然气管道冰堵应急处理措施

1. 冰堵监测与预警系统

冰堵监测及预警系统是保障长输天然气管道运行安全的关键一环，它通过对管道内部温度、压力、流量等参数变化进行实时监控，及时发现冰堵可能带来的危险，并采取措施进行处理。系统一般包括传感器、数

据传输模块、控制中心等。温度传感器可以准确地监测管道内不同部位温度的变化情况，特别适用于管道拐角和阀门等易冰堵关键节点处，通常使用的监测温度范围从 -50°C 至 150°C ，精度可达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以上。压力传感器的主要功能是监测管道内的压力变化。当压力迅速降低时，这可能意味着管道的某个位置出现了冰晶的生成或阻塞。常用的压力传感器的测量范围是0至25MPa，而其测量精度都控制在 $\pm 0.1\text{MPa}$ 之内。其次，流量计也是冰堵监测的一个重要装置，它通过探测管内气体流量变化来判断有无局部堵塞现象。通常情况下，流量计可以测定流量的1%到100%的变动，但当气体流速突然降低或出现局部流量异常时，预警系统会迅速发出警告信号。所有的数据都是通过无线通信技术，例如GPRS或光纤进行传输，并实时发送到控制中心。控制中心会利用数据分析模型，结合过去的数据和环境因素，来预测冰堵可能的形成。预警系统按照所设阈值进行报警，如管道中温度接近冰点或者压力波动超出容许范围等情况下系统将自动启动报警以提示操作人员做好应急处理。预警系统智能化程度越来越高，以人工智能与大数据为基础的分析平台可以预测出未来几小时内冰堵出现的可能性，以便提前做出预防。通过使用自动化监测和预警系统，管道运营商能够及时采取应对措施，规避冰堵造成的巨大安全隐患，确保长输天然气管道有效运营。

2. 管道冰堵的应急解堵技术

管道冰堵应急解堵是保证天然气管道冰堵后恢复正常运输的关键步骤，通常采用加热解堵、化学解堵及机械清除等方法。加热解堵技术是利用外部加热装置升高管道局部温度来熔化已经生成的冰晶，恢复气体流动。电伴热常用于加热，一般采用发热电缆绕设在管道外壁上，为热量提供一个稳定来源。通常将加热温度控制在 5°C ~ 20°C 之间，可有效地消除局部冰堵现象，特别是对于管道长度短或者易于靠近的地区。对长输管道而言，加热系统也需要有足够功率及温控精度以保证加热过程不会对管道完整性造成损害。化学解堵技术是将甲醇和乙二醇等冰点较低的化学物质喷入管道中，使水冻结点下降，冰晶逐步消融。甲醇的注入量通常在管道气体流量的0.1%到0.2%之间，但在冰堵较为严重的地方，可

以适当提高注入量和浓度。化学解堵具有操作简单、可实现不停输、但需准确控制注入量、避免管道材料腐蚀等优点。乙二醇与三乙二醇相比较甲醇化学稳定性较高，适合高压管道系统使用，特别是当压力大于2.5MPa，三乙二醇可以较长时间保持解堵效果。机械清除法，主要是靠清管器这种工具，对管道中冰晶、杂质进行物理清除。清管器通常是用硬质橡胶或者塑料制作而成，它可以沿管内气流方向运动，通过压力差或者机械推动力把冰堵物推送到指定排放点。这种方法在严重冰堵情况下具有良好效果，但是需中止输气操作且在复杂管道结构中使用受到限制。综合运用这几种解堵技术，可以有效地应对各种冰堵，保证管道安全稳定地运行。

结束语

长输天然气管道冰堵直接关系到管道安全性和输送效率，对该问题进行研究并取得技术进展有实际意义。对冰堵形成机理进行深入剖析，可更深入地了解冰堵产生的关键条件并据此制定科学、高效的预防和治理措施。降低水含量，维持管道温度和施加化学抑制剂的技术手段可以从根本上降低冰堵的危害。另外，构建一套完整的冰堵监测预警系统并配合应急解堵技术可以保证冰堵出现后迅速作出反应，将管道运行受到的冲击降至最低。

参考文献

- [1] 于忠宁, 武思雨, 任远, 等. 典型长输天然气管道冰堵案例分析研究[J]. 全面腐蚀控制, 2022, 36(11): 69-72.
- [2] 孙路昊. 天然气长输管道冰堵的防治与应急处理[J]. 中国科技期刊数据库 工业A, 2024(002): 000.
- [3] 李锐. 注气及降压开采天然气水合物实验模拟及开采方案优选研究[D]. 中国石油大学(北京), 2023.
- [4] 王意茹, 王洁, 刘晓伟. 甲醇注入法处置天然气站场冰堵问题实际应用分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(20): 117-119.
- [5] 陈鑫, 张彦华, 谭森耀, 等. 新型天然气管道冰堵预测及抑制技术探讨[J]. 石油工业技术监督, 2023, 39(3): 53-56.