

天然气管道冻胀原因及防控措施

余立伟（国家管网集团西北公司甘陕输气分公司，陕西 西安 710016）

摘要：本文探讨了天然气管道冻胀现象原因及相应防控措施。冻胀是指在极端低温条件下，地下水分子被冻结形成冰晶，导致土壤体积膨胀，从而对场站、管道设施产生损害的现象。针对这一问题，本文提出了一系列有效的预防和应对策略，包括地质勘察、结构设计改进以及保温措施等。通过本文的研究，可为天然气管道的安全运行提供重要参考。

关键词：天然气管道；冻胀；原因分析；防控措施

0 前言

输气场站作为能源供应的重要枢纽，在面对极端气候条件时，面临着多种挑战，其中冻胀问题是极具破坏性和危害性的一种。由于地下水分子结冰膨胀的特性，冻胀不仅会损坏场站设施，还可能对运营安全造成严重影响。因此，深入研究冻胀的原因和防控措施，对于保障输气场站的正常运行至关重要。本文将从冻胀的机理出发，探讨其防治的关键技术和实用方法，旨在为输气场站、管道安全管理提供有益的参考和建议。

1 冻胀现象及原因分析

1.1 冻胀的定义和特点

冻胀是指在地下温度降低至冰点以下时，地下水中的水分在土壤中结冻并膨胀，从而引起土壤体积扩大的现象。在输气场站中，冻胀现象可能对设施产生严重影响。具体来说，当场站地下管道周围的土壤中存在地下水时，寒冷气候条件会导致地下水结冰膨胀，从而对管道和相关设施施加压力。这种压力可能会导致管道位移、地面沉降以及管道和设备的损坏，从而影响场站的正常运行。因此，在输气场站的运营和设计中，必须认真考虑和应对冻胀现象，以确保场站的安全稳定运行。

冻胀在输气场站中表现出一些显著的特点。首先，输气场站管道通常位于地下，而冻胀主要影响地下土壤的性质，因此场站的地基和地下管道等设施更容易受到影响。其次，输气场站通常需要长期运行，而冻胀是一个季节性的现象，特别是在寒冷的冬季。这意味着输气场站在寒冷季节可能面临更大的冻胀风险，需要采取相应的防控措施^[1]。另外，输气场站的设施通常包括地下管道、分离过滤设备、加热设备、计量设备、调压设备等，这些设施在受到冻胀影响时，可能出现管道位移、地面沉降、设备损坏等问题，对场

站的安全性和稳定性构成威胁。因此，输气场站必须认真对待冻胀现象的特点，采取有效的防控措施，以确保场站的正常运行和设施的安全性。

1.2 冻胀的成因机理分析

冻胀的成因机理主要与水的冻结膨胀性质有关。在寒冷气候下，地下水分子受低温影响而冻结成冰晶，在冰晶形成的过程中，水的体积会扩大，这导致了土壤的体积增大。当土壤内存在较多的水分，并且地下水含量较高时，冻结的水量增多，膨胀效应也就更为显著。输气场站所在地区的气候和地下水情况是冻胀发生的关键因素。此外，土壤的孔隙结构以及其中的含水量也会影响冻胀的程度。当土壤中的冰晶扩大时，会对周围的土壤和地下结构物施加压力，导致地下管道、基础和设施等受损。

比如，某输气场站调压设备后管道出现了管道位移、地上管道结霜、地面变形等问题。输气管道长期以来存在冻胀问题，主要是由于节流效应导致出气端温度过低，导致管道表面结冰严重，甚至出现几厘米厚的冰层覆盖，引发了管道的隆起和位移现象。在寒冬季节，特别是在天然气冬春保供时，这些问题更加显著。例如，在2023年1月，6.5~8.99MPa流程流量是1.89万m³/小时，进口压力是8.19MPa，出口压力是4.79MPa，出口的温度是-18℃，管道的结霜达到了几十毫米，管道产生了明显的位移。这种情况对管道设施的安全运行产生了不良影响，需要采取有效的措施来解决冻胀问题，确保输气场站的正常运行。

根据以上分析，天然气管道冻胀的主要原因包括以下几个方面：首先，管道位移量远超过由温差引起的位移量，主要是由于天然气管道气体温度偏低以及周围土壤冻胀所致^[2]。其次，节流效应导致调压器阀口冻堵，进而引发调压器出口瞬间超压，影响管网正常运行，存在严重的安全隐患^[3]。最后，水合物测试

分析显示，水合物中水分含量高达 96.64wt%，可能是调压设备冻堵的主要原因之一，而冬季管道内天然气温度低、气质中含水量高以及调压设备前端缺少脱水装置等因素也加剧了冻堵问题的发生。

1.3 冻胀对输气场站设施的影响

天然气管网在国民经济发展中占据着重要位置，可以说是经济发展中的“命脉”。由于城市规模的扩大，城市对天然气的需求量也在不断攀升。2023 年，天然气消费恢复增长，全年天然气消费量 3917 亿 m^3 ，同比增长 6.6%。在这一背景下，针对于天然气行业而言，最重要的是要关注输气管道的安全稳定供应问题。而冻胀对输气场站设施的影响是多方面的。首先，冻胀导致地下管道的位移和隆起，可能会损坏管道本身及其支撑结构，增加了管道破裂的风险，进而影响气体输送的连续性和稳定性。其次，管道周围土壤的膨胀可能导致地面变形和沉降，使得地面管道出现错位、断裂或者管道与地面结构物的脱离，从而影响了管道的安全性和可靠性^[4]。最后，冻胀还可能导致调压设备的冻堵，阻碍了气体的正常调压和分配，使得管网运行不稳定，甚至可能造成管道系统压力异常，增加了爆炸事故的风险。因此，冻胀对输气场站设施的影响不仅表现在结构的损坏和地面沉降，还体现在管道系统的安全性和稳定性受到威胁，需要采取相应的防控措施来保障场站的安全运行。

2 冻胀防控措施

2.1 地质勘察和选址原则

在输气场站的冻胀防控措施中，地质勘察和选址原则是确保场站建设安全稳定的重要环节。首先，地质勘察应采用多种方法，包括地质地貌调查、地下水勘察、土壤力学测试等，以全面了解场址地质情况。地下水勘察应重点关注地下水位、水质、水流方向等信息，以判断地下水对场址的影响程度。土壤力学测试则可评估土壤的承载能力和抗冻胀性，指导后续场站建设。其次，选址原则应根据地质勘察结果确定，应避免选择地下水位高、土质松软或易受冻等地质条件不利的区域建设场站。同时，应考虑场站周边的地形地貌、土地利用情况和交通便利程度等因素，选择地质条件较好、地形平坦、交通便利的区域作为场址。

此外，还应特别注意以下几点原则：一是保证场址地质条件稳定，避免地质灾害风险；二是考虑场址对周边环境的影响，尽量减少对自然环境的破坏；三是保证场站建设后的安全性和可靠性，避免因地质原

因导致设施损坏或事故发生。综上所述，地质勘察和选址原则应结合场站具体情况和地质条件，采用科学的方法进行勘察，严格遵循选址原则，确保场站建设安全稳定，最大程度地降低冻胀对场站设施的影响。

2.2 结构设计改进措施

在应对输气场站冻胀问题时，结构设计的改进措施至关重要。针对管道位移和隆起的问题，可采取多种措施：首先，针对管道位移和隆起的问题，应优化管道支撑结构。这包括增加管道支撑结构的数量和稳定性，以及加固支撑墩的深度和强度。通过对支撑结构的加固和改进，可以有效减少管道在温度变化下的位移和隆起情况，提高其稳定性和安全性。其次，设计合理的排水系统也是防止管道冻胀的重要措施。合理设计排水系统可以有效排除场站周围的积水以及天然气管道表面冰层消融的积水，减少地下水与土壤的接触，降低土壤的含水量，从而减缓土壤冻结的速度，降低冻胀的风险^[5]。另外，应优化管道的布置方案，避免管道穿越地下水位较高或土壤松软的地区，减少地下水对土壤的影响，降低土壤的冻胀风险。对于地下埋设的管道，还应加强其固定和固化，采用更牢固的固定装置，确保管道在土壤冻胀情况下不易移动或变形。最后，选用耐寒材料也是结构设计改进的重要方面。在新建管道或设备时，选择耐寒、抗冻性能良好的材料，如低温钢、聚氨酯保温材料等，以提高设施的抗冻性能。通过优化管道支撑结构、设计合理的排水系统、优化管道布置方案、加强管道的固定和固化以及选用耐寒材料等措施的实施，可以有效提高输气场站结构的抗冻能力，减少冻胀对设施造成的影响。

2.3 保温隔热措施

在应对输气场站冻胀问题时，保温隔热措施是至关重要的一环。有效的保温隔热措施能够有效减缓地下管道和设施的温度下降，从而降低土壤冻结的速度，减少土壤体积的膨胀，进而减少冻胀带来的不利影响。保温隔热措施的具体实施包括以下几个方面。第一，选用优质的保温材料。在管道和设施的设计和建设中，应优先选择具有良好保温性能的材料，如聚氨酯、聚苯乙烯等，以降低管道和设施的表面温度下降速率。第二，采取有效的保温措施。可以在地下管道和设施的周围设置保温层或保温罩，或者采用埋地保温、包覆保温等技术手段，提高管道和设施的保温性能，减少热量的散失。第三，采用加热装置如水套炉、电加热器等装置对输送的天然气进行加热，以此增大

天然气输送温度，保证调压节流后天然气温度依然比水合物生成要求温度高，进而避免生成水合物。当未确定天然气水露点的时候，加热装置使用功率以比调压节流后温度仍高5℃为准。一般情况下，天然气压力每增大1MPa，温度相应提高约10℃；压力每减小1MPa，温度相应降低约4.5℃。水套炉、电加热器均为能耗较大的装置，从经济学角度分析，当加热功率超过300kW的时候，应选择水套炉；当加热功率不足300kW的时候，应选择电加热器。第四，定期检查和维护保温隔热设施。保温隔热设施一旦出现损坏或老化，就会影响其保温效果，增加管道和设施受到冻胀影响的可能性。因此，需要定期对保温隔热设施进行检查和维护，及时修复和更换损坏的部分，确保其长期有效地发挥保温隔热作用。

2.4 排水系统设计与维护

在应对冻胀的防控措施中，排水系统的设计与维护是不可忽视的重要方向。针对输气场站周边地区可能存在的地下水位较高或土壤易受冻等问题，应设计合理的排水系统。具体措施包括设置足够数量和合适位置的排水沟和排水管道，确保能够有效排除场站内部和周边地区的积水，降低土壤的含水量，减缓土壤冻结的速度。除此以外，对排水系统的维护也是至关重要。定期清理和检查排水沟、排水管道和雨水口，确保通畅畅通无阻，防止因堵塞而造成积水。同时，需要定期清理和检查场站内部的排水设施，包括检查排水井、排水管道和雨水口等设施，确保其正常运行^[6]。另外，还需注意及时修复漏水、渗水等问题，防止水分积聚和冻结，减少对场站设施的损害。排水系统的设计与维护需要根据具体场站的地质情况和工程需求，采取科学合理的措施，确保排水系统的畅通和有效运行，从而有效降低输气场站的冻胀风险，保障设施的安全运行。

2.5 检测监控系统建设及应急预案制定

在应对冻胀的防控措施中，检测监控系统的建设和应急预案的制定能在出现问题的时候发挥重要的作用。首先要对检测监控系统应包括对管道系统的温度、压力、流量等参数进行实时监测，并能够自动识别异常情况并进行预警。建设过程需要首先对输气场站进行全面的评估和分析，确定监控系统的需求和功能。然后选择合适的监测设备和传感器，进行系统的布置和安装，并进行系统的联调和调试，确保系统的正常运行。还需要关注监控系统的可靠性和稳定性，定期

进行系统的维护和检修，确保其长期有效地运行。其次，应急预案的制定需要根据输气场站的具体情况和潜在风险进行详细的分析和评估。预案应包括明确的应急处置流程、责任分工、应急资源调配和应对措施等内容。例如，针对可能发生的管道冻堵或位移等情况，预案应包括针对不同情况的具体处理方案，以及应对紧急情况的应急联系人和联系方式。在制定预案过程中，还需考虑天气变化、地质条件、人员安全等多方面因素，确保预案的全面性和有效性。预案制定完成后，还需要定期进行演练和培训，提高应急响应能力，确保在发生紧急情况时能够及时、有效地应对，最大限度地减少损失和影响。检测监控系统的建设和应急预案的制定需要结合输气场站的实际情况和潜在风险，采取科学合理的措施，确保系统的有效运行和应急响应能力，从而有效地防控冻胀对场站设施的影响。

3 结语

综上所述，在输气场站运行中，地下温度的变化、地下水位的影响以及土壤的性质等因素都可能导致冻胀现象的发生，从而对场站的设施产生不利影响。为了确保输气场站的安全稳定运行，必须采取一系列有效的防控措施，包括地质勘察和选址原则、结构设计改进、保温隔热措施、排水系统设计与维护以及检测监控系统建设及应急预案制定等方面的工作。只有通过科学合理的防控措施和全面系统的应对方案，才能有效应对输气场站冻胀带来的挑战，保障场站设施的安全可靠，确保供气系统的稳定运行。

参考文献：

- [1] 张良, 惠文颖, 徐琳等. 高原冻土区含缺陷天然气管道现场应力检测和分析 [J]. 石油管材与仪器, 2022, 8 (05): 57-59+65.
- [2] 王健, 顾晓婷, 张瑶瑶等. 基于管沟尺寸的冻胀作用下输油管道应力分析 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (16): 6488-6495.
- [3] 李欣泽, 金会军, 吴青柏等. 北极多年冻土区埋地输气管道周边温度场数值分析 [J]. 地球科学进展, 2021, 36(01): 69-82.
- [4] 李欣泽, 金会军. 多年冻土区天然气管道建设关键技术 [J]. 冰川冻土, 2021, 43(02): 628-637.
- [5] 孟凡凡. 长输天然气站内工艺危害识别、分析与措施 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(09): 197-198.
- [6] 张继龙, 邢琳琳, 高岷等. 输气场站管道冻胀原因分析及防护措施研究 [J]. 全面腐蚀控制, 2019, 33(01): 32-36.