

# 长输天然气管道采空区应力变形监测及治理

张 祥 (山西燃气产业集团有限公司管道分公司, 山西 太原 030000)

**摘 要:** 长输天然气管道在能源输送领域中占据核心地位, 然而, 其安全运行面临众多挑战, 尤其是在采空区地带。采空区的存在由于地质不稳定可能引起管道应力变形, 甚至导致严重的安全事故。本研究通过分析采空区形成的地质机制及其对管道的潜在威胁, 探讨了多种应力变形监测技术, 包括地面监测技术和管道内部监测技术。研究还提出了一系列治理策略, 如地面加固技术、管道本体加强措施及紧急响应策略, 减轻采空区对管道的不利影响, 为类似环境下的天然气管道安全管理提供了实践指导。

**关键词:** 采空区; 天然气管道; 应力变形; 监测技术; 治理策略

天然气作为一种清洁高效的能源, 在全球能源结构中占据了不可替代的地位。随着能源需求的增长, 长输天然气管道的建设和使用日益增多。然而, 这些管道常常需要跨越复杂多变的地质环境, 其中, 采空区的地质条件对管道的安全运行构成了重大挑战。采空区由于历史上的采矿活动留下的空洞, 地下结构不稳定, 易引发地面塌陷或地质滑坡, 进而影响上覆管道的稳定性。这种不稳定性不仅威胁管道本身的结构完整性, 更有可能影响到天然气的正常输送和整个能源供应的安全。如何有效监测并治理长输天然气管道在采空区的应力变形, 成为确保能源输送安全的重要课题。

## 1 采空区的形成及其对管道的影响

### 1.1 采空区的形成机制

采空区是指因历史上的矿业开采活动导致地下存在大面积的空洞和疏松区域。这些空洞的存在, 往往会导致地表和地下结构的不稳定性。采空区的形成过程涉及到多种地质和人为因素。自然因素包括岩石的物理性质、地质结构、水文地质条件等, 而人为因素主要包括矿山的开采方式、开采强度以及开采后的处理措施。地下开采活动通常会移除一部分岩石, 留下空间, 如果没有适当的支撑和填充, 这些空间会随着时间的推移而发生塌陷, 进而影响到地表的稳定性。开采后地下水的流动可能会改变, 进一步加速地下空间的塌陷和土壤的侵蚀。地质学家通过对岩层的物理和化学性质进行分析, 结合地形地貌和历史开采数据, 可以预测和评估采空区的分布和稳定性, 为后续的地面建设和使用提供数据支撑。

### 1.2 采空区对天然气管道的影响

采空区对天然气管道的安全运营构成了直接威胁。管道在采空区域内的安装和运行面临着由于地下

空洞导致的地面不稳定性问题。地面的突然塌陷或持续沉降会对管道造成物理应力, 可能导致管道材料的疲劳、变形乃至破裂。地质不稳定还可能导致管道接口处的密封性失效, 从而引发泄漏事故。采空区的地质环境对管道设计、施工和日常维护提出了更高要求。工程师必须在管道设计和施工过程中充分考虑到地质条件, 选择适当的管道材料和加固技术, 确保管道能够抵抗地质活动带来的影响。监测技术的应用也是保障管道安全的重要手段, 能够及时发现并处理由地质不稳定引起的潜在风险。

## 2 应力变形监测技术

### 2.1 地面监测技术

地面监测技术是监测和预测采空区对天然气管道可能造成影响的关键手段。这类技术通常包括地面位移监测、倾斜监测、裂缝宽度监测等。地面位移监测可以利用 GPS 和其他地表位移测量设备实施, 这些设备能够以高精度追踪地表的移动情况, 从而预警可能的塌陷或滑坡事件。倾斜监测设备用于检测地面的倾斜变化, 这对于评估地下空洞的稳定性及其对上方设施影响非常重要。实时数据的收集和分析, 监测系统能够提供关键信息, 供工程师和管理人员制定应对措施。这些技术还可以与地理信息系统 (GIS) 集成, 形成更为全面的地质风险评估和管理工具, 为天然气管道的安全运营提供科学的数据支持。

### 2.2 管道内部监测技术

管道内部监测技术是另一种重要的应力变形监测手段。这些技术主要包括应力传感器、应变计和内部检测机器人等。应力传感器和应变计可以安装在管道的关键部位, 实时监测管道材料承受的应力和发生的变形情况。这对于早期识别潜在的结构问题至关重要。内部检测机器人, 例如智能化的管道巡检机器人, 可

以在管道内部移动，应用高清摄像头和其他传感设备检查管道的内壁情况，及时发现裂纹、腐蚀等问题。这些技术的应用不仅提高了监测的效率和精确度，也极大地提升了预防和应对管道应力变形事故的能力。

### 3 长输天然气管道采空区应力变形治理策略

#### 3.1 地面加固技术

##### 3.1.1 注浆加固

注浆加固是一种广泛应用于地质工程中的加固方法，特别适用于处理采空区导致的地下空洞和裂缝问题。该技术通过向地下裂缝和空洞内注入固化材料，如水泥浆或化学浆料，填充这些空间，增强地基的承载力和稳定性。在长输天然气管道的采空区应力变形治理中，注浆加固首先需要对采空区进行详细的地质勘察，包括使用地质雷达或钻探方法确定空洞的位置、大小和形态。

确定了目标区域后，技术团队将设计注浆方案，选择合适的浆料类型和注浆压力。通常情况下，水泥基浆料因其良好的可塑性和成本效益而被广泛使用。注浆作业利用专用的注浆设备，这些设备能够精确控制浆料的流量和压力，确保浆料均匀分布并充分填充地下空洞和裂缝。注浆固化后，可以有效地防止地面进一步塌陷和移动，从而保护上方天然气管道的稳定性。此外，定期的监测也是必要的，评估注浆效果和及时发现后续可能出现的问题。

##### 3.1.2 应用土工合成材料

土工合成材料的应用是解决采空区地质问题的另一种有效方法。这些材料包括土工布、土工网、土工膜等，它们具有良好的抗拉伸、抗撕裂和透水性能，能够在改善地基承载力的同时，防止水和土壤的流失。在长输天然气管道的采空区应力变形治理中，土工合成材料通常用于加强土层结构和稳定斜坡。施工前，需要对受影响区域进行彻底的地质评估和表面准备，包括清除松散的土壤和其他杂质。根据具体的地质条件和工程需求，选择合适类型和规格的土工材料。这些材料以卷材形式铺设在预定区域，通过机械或手工方法固定，与土层紧密结合。

在某些情况下，还会采用多层土工材料复合系统，达到最佳的加固效果。加固完成后，还需对覆盖区域进行覆土和植被恢复，保持生态平衡和美观，同时进行稳定土壤。利用这种方法，可以显著提高地基的整体稳定性，减少采空区对天然气管道安全的潜在威胁。

#### 3.2 管道本体加强

##### 3.2.1 增加管道壁厚

在长输天然气管道的设计和施工中，增加管道壁厚是提高管道抵抗外部压力和应力变形能力的一种有效方法。采空区地质条件的不稳定性要求管道具有更高的机械强度和更好的抗变形能力。增加管道的壁厚，可以显著提高管道的抗压和抗弯曲能力，从而在地面发生轻微塌陷或地质移动时，保护管道不受损伤。在管道壁厚的选定过程中，工程师会基于地质评估结果和预计的最大负载进行计算，保证所选管道壁厚可以有效应对潜在的地质风险。增加壁厚的做法还需要综合考虑管道材料的性能、成本以及施工的可行性。在实际应用中，可能会选择在特别需要增强的区段，如穿越采空区或其他地质不稳定区域，局部增加管道壁厚。这种区段化的加固方法不仅能有效地提升管道的整体安全性，还能控制工程成本。完成设计后，相关施工团队将按照精确的工程图纸和技术规范进行施工，每一段管道的壁厚都能符合安全标准。

##### 3.2.2 使用高强度材料

使用高强度材料是提升长输天然气管道在采空区应对地质风险能力的关键措施之一。随着材料科学的进步，越来越多的高性能材料被应用于管道工程中，包括不同类型的钢材、合金以及复合材料。这些材料通常具有更高的抗拉强度、更好的耐腐蚀性和更长的使用寿命。在选择适用于采空区的管道材料时，工程师需考虑到材料的机械性能、化学稳定性以及与已有管道系统的兼容性。例如，某些特殊合金能够在地下复杂的化学环境中提供更好的耐腐蚀性能，适合用于酸性较高的土壤中。复合材料因其轻质高强的特点，能够减少管道自身重量，降低由地质不稳定引起的应力。高强度材料的应用还需要配合先进的连接和焊接技术，保证管道各接头处的密封性和整体结构的稳定性。在施工过程中，所有材料和工艺都必须符合国家和行业的安全标准，确保管道系统的长期安全运营。

#### 3.3 地面监测与预警系统

##### 3.3.1 安装地面位移监测设备

地面位移监测设备在长输天然气管道的安全运营中起着至关重要的作用，尤其是在穿越采空区这类地质不稳定区域。这些设备可以实时监控地面移动情况，为早期警报系统提供支持，有效预防因地质问题引发的管道损害。地面位移监测通常包括安装 GPS 测量仪器、倾斜仪、裂缝计等多种传感设备。这些仪器被安



装在地面或管道关键部位,能够精确地测量即时的地面移动速度和方向,以及任何可能对管道完整性构成威胁的变化。监测设备的部署应根据地质评估结果和管道布局进行精心规划,确保覆盖所有关键区域。例如, GPS 监测设备可以布设在预计可能出现地面塌陷或较大地面位移的区域,连续跟踪地面坐标变化,提供高精度的地面位移数据。监测设施的建设还需考虑设备的长期稳定性和维护便利性,保证其能够在恶劣的环境条件下也能稳定运行。

### 3.3.2 实施实时数据分析

实时数据分析是长输天然气管道安全监控系统中的核心部分,特别是在面对复杂多变的采空区地质环境时。分析实时数据,可以及时处理从地面位移监测设备和其他传感器收集到的数据,快速识别出潜在的风险并作出反应。数据分析系统通常包括数据采集、处理和可视化等多个环节。收集到的原始数据需要通过先进的数据处理软件进行清洗和整理,去除噪声和非相关信息。这些数据会被输入到专用的分析模型中,这些模型可以基于历史数据和地质动态进行趋势预测和风险评估。例如,对比当前数据与历史数据,分析模型可以识别出地面移动的异常模式,及时警告管理人员采取措施。此外,实时数据分析还包括设置预警阈值,当数据显示地面位移速度或者幅度超过安全阈值时,系统会自动发出警报,引起操作人员的注意,可以在第一时间内采取应急措施,如减压、关闭部分管段或进行现场检查,从而保障管道及周边环境的安全。

## 3.4 应急响应措施

### 3.4.1 设立应急响应小组

为了有效应对长输天然气管道在采空区可能发生的应力变形和其他紧急情况,应设立专门的应急响应小组。应急响应小组主要负责制定应对措施,快速响应和处理突发事件,减少可能的损害和影响。这一小组由多个部门的专业人员组成,包括安全工程师、地质专家、维修技术人员和危机管理专家等,确保各方面的专业知识和技能都能得到充分利用。应急响应小组的主要职责包括监测预警系统的报告,评估事件可能带来的风险,制定具体的应急措施,并指挥应急操作。小组还需负责定期更新应急预案,根据最新的技术发展和过往的应急处理经验进行调整。为了确保响应的及时性和有效性,应急响应小组还需要设立一个常设的监控中心,配备必要的通讯设备和监控系统,

实时接收来自监测设备的数据,确保能在第一时间发现问题并作出反应。

### 3.4.2 制定应急方案并组织演练

制定详尽的应急方案并定期进行演练是确保应急响应小组能有效执行其职责的关键步骤。应急方案应包括所有可能的紧急情况,如管道破裂、泄漏、地面塌陷等,并为每种情况提出具体的应对策略和步骤。方案中应详细描述如何迅速有效地封锁受损管道段、减少泄漏、修复损坏、保护现场安全以及通知相关部门和社区。除了书面方案,定期的应急演练也非常重要,演练可以帮助团队成员熟悉应急程序,提高团队协作的效率。在演练中,应急响应小组需要实际操作应急设备,执行封锁、抢修和疏散等操作,模拟不同的紧急情况测试方案的可行性和实际效果。组织这些演练,可以显著提高团队对真实事件的响应速度和处理能力,演练后应对方案中的不足之处进行修正和优化,在实际发生紧急情况时,能够最大限度地减轻损失和影响。

## 4 结语

本研究围绕长输天然气管道在采空区的应力变形监测与治理进行了深入探讨,分析了采空区形成的机制及其对管道的影响,详细介绍了长输天然气管道采空区应力变形治理策略。在此基础上,相关的天然气输送与矿业企业应积极采纳这些研究成果,实施先进的监测技术和采取有效的地面治理措施预防和管理采空区的风险。企业应不断提升应急响应能力,在面对突发地质事件时,迅速有效地采取行动,保障天然气供应的连续性和安全性。展望未来,随着技术的进步和研究的深入,更多高效的监测与治理技术将被开发出来,这将进一步提升天然气管道系统的安全运营水平。随着可持续发展战略的实施和新能源的开发利用,对于天然气行业的环境保护和资源利用效率的要求也将不断提高,推动整个行业向更高标准、更安全可靠的方向发展。

### 参考文献:

- [1] 杨一,申倬伟,杨有东,等.天然气管道途经煤矿采空区注浆治理实践[J].山西化工,2023,43(6):132-135.
- [2] 苏庆伟.无人机技术在长输天然气管道山区段巡护应用研究[J].化工管理,2023(31):61-64.

### 作者简介:

张祥(1989-),男,山西五寨人,本科,助理工程师,研究方向:天然气地质灾害治理。