

天然气管道运输中的压力损失与流动特性分析

孙浩文（山东莱克工程设计有限公司，山东 东营 257000）

摘要：天然气作为一种清洁、高效的能源，广泛应用于全球各领域，其长距离管道运输是保证能源供给的重要方式。然而，在运输过程中，管道内的压力损失及其流动特性直接影响输送效率和经济性。因此，本文以天然气管道为研究对象，分析了天然气的流动特性及其对压力损失的影响。文章首先介绍了天然气管道流体力学基础，包括流动类型、流动方程与压力损失模型；随后对影响压力损失的关键因素进行了深入分析，包括管道几何参数、流量流速、温度压力及气体成分的变化；最后提出了优化天然气管道输送效率的方法，包括设计优化、压缩机站配置及智能化监测技术的应用。

关键词：天然气管道；压力损失；流动特性；优化控制；管道输送效率

0 引言

天然气因其清洁、高效等特点，在现代社会中扮演着重要的能源角色，广泛应用于工业生产、城市燃气和发电等领域。而在天然气输送体系中，长距离管道运输是最为经济和常见的方式。然而，由于天然气在管道中长距离流动时会受到管壁摩擦、流动阻力以及局部构件影响，导致显著的压力损失，这不仅增加了输送能耗，还对管网运行的安全性和经济性产生了不利影响。因此，研究天然气管道中的压力损失与流动特性，深入探讨其影响因素，并提出优化控制方法，具有重要的理论价值和实际意义。

1 研究背景及意义

天然气作为一种清洁、高效的能源，在全球能源结构转型过程中占据重要地位，其广泛应用于城市燃气、发电、工业生产等多个领域，对经济发展和环境保护具有积极作用。而天然气的运输主要依赖于长距离管道，这种方式具有成本低、效率高、安全性好的显著优势。然而，在管道运输过程中，天然气由于流动阻力和摩擦作用，会发生显著的压力损失，这不仅影响了管道的输送能力，还可能造成能源浪费和运行成本的增加。因此，研究天然气管道运输过程中的压力损失规律，分析其与流动特性的关系，并探索优化控制方法，对于提升管道运行效率、降低输送成本、保障能源稳定供给具有重要的现实意义。

近年来，国内外学者对天然气管道运输的流动特性和压力损失展开了大量研究。在国外，许多研究集中于气体流动的物理特性与管道设计优化方面，开发了多种压力损失模型和预测方法，并提出了一系列减少能耗的技术手段；而在国内，随着天然气输送需求的快速增长，对长输管道的压力控制与安全运行研究

逐步深入，特别是在复杂管网系统的动态特性、非稳态流动分析以及智能监测方面取得了一定进展。然而，目前的研究仍存在一些不足之处，如对压力损失的非线性特性和多因素耦合影响机理认识不够深入，优化方法的实际应用效果有待进一步验证。

2 天然气管道中的流体力学基础

2.1 天然气的物性参数及其影响

天然气的物性参数是决定其流动特性和压力损失的重要因素，包括气体的密度、黏度、压缩因子及组分特性等。这些参数受到温度和压力的显著影响，例如，随着压力的升高，天然气的密度会显著增加，而温度的升高则会降低气体的黏度，从而影响其流动阻力。此外，天然气的组分复杂多变，主要由甲烷、乙烷及少量杂质组成，其中杂质含量的变化会导致流动过程中附加的阻力和能量损失。因此，准确测定天然气的物性参数，并分析其在不同工况条件下的变化规律，是研究管道流动特性和压力损失的基础。

2.2 管道流动类型及其特性分析

天然气在管道中的流动类型主要分为层流和湍流，其特性直接影响压力损失的计算和预测。层流主要发生在低流速或低雷诺数条件下，此时流体颗粒以平行层的方式运动，流动稳定且摩擦损失较低；而湍流则发生在高雷诺数条件下，其流动不稳定，流体内部伴有大量涡流和混合运动，导致能量损失显著增加。在实际的天然气管道输送过程中，由于管道内气体流速较高且雷诺数远大于湍流临界值，天然气流动通常处于湍流状态，摩擦阻力占主导地位。此外，湍流条件下流动特性的复杂性使得压力损失的计算更加困难，需要依赖经验公式（如达西-魏斯巴赫公式或科尔布鲁克公式）进行估算。研究湍流的能量损失规律及影响

因素,如管壁粗糙度、流体温度和压力条件等,是天然气管道设计和优化运行的重要基础工作。

2.3 流动方程与压力损失模型

天然气管道的流动和压力损失可以通过流体力学基本方程进行描述,包括连续性方程、动量方程和能量方程。在实际工程中,压力损失通常分为沿程摩擦损失和局部阻力损失,常用的计算模型包括达西-魏斯巴赫公式、科尔布鲁克公式及其修正模型。其中,沿程摩擦损失主要由管壁的粗糙度和流体的黏性作用引起,而局部阻力损失则与管道中的弯头、阀门和分支等构件有关。此外,为了提高计算精度,近年来研究中引入了基于数值模拟和实验验证的综合模型,从而更准确地预测压力损失并指导工程实践。

2.4 流动稳定性及动态特性

天然气管道中的流动稳定性和动态特性是保证系统安全运行的重要研究内容。在输送过程中,流动的稳定性可能受到流量波动、压力变化及外界干扰的影响,导致流动状态的变化甚至出现不稳定现象。例如,在管道内可能发生压力波动和气液分离现象,进而加剧能量损失并引发运行风险。此外,输气管道系统的动态特性还体现在启动、关闭和事故状态下的瞬态过程,这些动态行为不仅影响压力损失的分布,还可能对管道及其附属设备造成冲击。因此,深入研究管道的流动稳定性及动态特性,对提升天然气管道系统的安全性和运行效率具有重要意义。

3 天然气管道压力损失影响因素分析

3.1 管道几何参数对压力损失的影响

管道的几何参数是影响天然气管道压力损失的重要因素,包括管道的直径、长度以及内壁的粗糙度等。管道直径的变化直接决定了流体的流速,当直径减小时,流速增加,导致沿程摩擦损失显著升高;而管道长度的增加则会线性累积沿程损失。此外,管道内壁粗糙度是湍流条件下影响摩擦系数的关键参数,粗糙度越高,湍流产生的涡流越强,压力损失越大。对于弯管和分支管道等特殊几何结构,其局部阻力会大幅增加,进一步加剧压力损失。因此,合理设计管道的几何参数,优化弯管和分支管道的布局,是降低压力损失的有效手段。

3.2 流量及流速变化的影响

流量和流速的变化对天然气管道的压力损失具有显著影响,是决定管道输送效率和安全的重要因素,两者之间存在复杂的非线性关系。在一定管径条件下,

流速的增加会显著提升管道内的摩擦阻力,这种增长呈指数级,导致压力损失急剧上升。而当管道运行过程中流量发生突变时,例如在管道启动或关闭阶段,可能会引发瞬态流动现象,如水锤效应或气体压力波动,这些现象会显著影响管道系统的运行安全,甚至可能造成设备损坏或安全事故。此外,高流速条件下,由于湍流的增强,管道内部的动量交换更加剧烈,能量损耗进一步加大,从而加剧压力损失。为了有效降低压力损失并保障管道系统的稳定运行,实际运行中需要通过合理控制流量和流速来优化输送条件,例如通过调整流速避免湍流过强或过快的流量变化,尽量降低系统承受的压力波动或水锤效应的冲击,从而延长管道的使用寿命和保障输送过程的安全性与稳定性。

3.3 温度和压力变化的影响

温度和压力的变化同样对天然气管道中的压力损失产生重要影响,这主要是由于它们会改变天然气的物性参数及流动特性,从而间接影响压力损失。在高压条件下,天然气的密度会显著升高,导致流动阻力相应增加,压力损失加剧;而在低压条件下,气体体积膨胀更明显,这会进一步增加管道内的摩擦损失。与此同时,温度的变化则通过影响气体的黏度间接改变流动状态,从而对压力损失产生作用。例如,随着温度升高,天然气的黏度通常会下降,这会减小流体的摩擦阻力,有助于降低压力损失;而温度降低则可能导致黏度增加,加大阻力并升高压力损失。此外,温度和压力的耦合作用还可能引发复杂的非线性现象,例如在长输管道中,这种耦合效应尤其显著,会对流体的流动稳定性和压力分布造成深远影响。

3.4 天然气成分变化的影响

天然气成分的变化是影响压力损失的重要因素之一,其主要原因在于不同气体组分的物理性质(如密度、黏度和压缩因子)存在较大差异。例如,甲烷含量越高,天然气的流动性越好,而乙烷、丙烷等重烃成分的增加会显著提高气体的黏度,导致压力损失加剧。此外,天然气中的杂质(如硫化氢、二氧化碳和水蒸气)以及可能形成的水合物沉积,也会在管道内壁附着,从而增加局部阻力损失。特别是在低温高压环境下,水合物的生成可能导致管道堵塞,进一步加剧压力损失并威胁管道的安全运行。因此,天然气组分变化的影响应在压力损失研究中予以重点关注,并通过优化气体净化和除杂技术来减少成分变化对压力损失的不利影响。

4 天然气管道压力损失的优化控制方法

4.1 管道设计优化

管道设计优化是降低天然气压力损失的首要环节,包括优化管道的直径、长度、走向及管壁材料等因素。在设计阶段,选择合适的管径尤为重要,过小的管径会导致流速过高,从而引起显著的摩擦损失,而过大的管径则增加了建设成本。因此,在满足输气需求的前提下,通过精确计算优化管径可以平衡压力损失和经济成本。此外,管道的布置和走向也会影响压力损失,尽量减少不必要的弯管、分支及陡升陡降的地形,可以有效降低局部阻力和附加损失。在材料选择上,使用内壁光滑、耐腐蚀的管材(如聚乙烯管或内衬聚合物的钢管)可以显著减少摩擦阻力,从而优化管道的流动特性和运行效率。

4.2 流量和压力控制策略

在天然气管道的运行过程中,通过合理的流量和压力控制可以有效降低压力损失并提高输送效率。流量的控制需要结合管道的输气能力和用户需求,避免流速过高或波动过大引起的能量损耗和瞬态流动风险;而压力的控制则需根据管道的设计参数进行合理调节,确保管道在安全压力范围内运行,避免过高压力导致输气成本增加或低压造成输送不足。在实际操作中,利用先进的自动化控制系统对流量和压力进行实时监测和调节,可以提高控制精度。例如,采用分段压力调节技术,合理设置沿线增压站的位置和增压强度,能够有效平衡压力损失,保障输送稳定性和能源利用率。

4.3 管道清洁与维护技术

管道清洁和定期维护是减少压力损失、延长管道使用寿命的重要手段。在长期运行中,天然气管道的内壁可能会由于杂质、腐蚀产物及水合物的堆积而产生附加阻力,甚至导致堵塞,从而显著增加压力损失。因此,定期清洁管道内部,去除积聚的杂质和腐蚀产物,是降低局部阻力损失的必要措施。目前常用的清管技术包括机械清管、化学清洗和气液混合清管,其中机械清管通过使用清管器(如球形或圆盘清管器)能够高效清理管道内壁沉积物,同时对管道状况进行检测。此外,管道维护技术还包括对腐蚀点的修复、老化管段的更换以及对阀门、连接处的密封性检查,这些措施可以有效减少运行中因管道泄漏或故障导致的额外压力损失和安全隐患。

4.4 智能化监测与优化技术

随着物联网、大数据和人工智能技术的发展,天

然气管道的智能化监测与优化技术成为减少压力损失的重要手段。通过在管道沿线布置传感器,实现对流量、压力、温度及管道状态的实时监测,可以及时发现运行中的异常情况并采取相应措施。此外,利用大数据分析技术对历史运行数据进行挖掘,可以提取出管道压力损失与流量、温度、地形等因素的关联规律,从而为优化管道运行提供科学依据。在优化控制方面,人工智能算法(如机器学习和优化算法)可以根据实时监测数据对压力损失进行预测,并自动调整运行参数以实现最低损失状态。例如,通过智能增压站的优化控制,可以根据不同的输送需求动态调节增压站的运行模式,从而显著降低能源消耗,提高输送效率。智能化技术的应用不仅可以优化管道运行,还能够提升管道系统的安全性和可靠性,为天然气输送提供全面保障。

5 结论

天然气管道运输中的压力损失是影响输送效率和经济性的重要因素,其大小由多种复杂因素共同决定,包括管道几何参数、流量与流速、天然气物性参数以及运行工况等。通过系统分析可以发现,合理优化管道设计、精确控制流量与压力、加强管道清洁维护以及引入智能化监测与优化技术,是有效降低压力损失、提高输送效率的关键途径。在实际工程应用中,应综合考虑技术、经济和安全等多方面因素,因地制宜地制定优化策略,最大限度地减少压力损失带来的能耗和运行成本。本研究为天然气管道压力损失的理论分析与实践应用提供了系统的思路和方法,对未来天然气输送技术的进一步发展具有重要的参考价值,同时也为保障能源运输的安全性与可持续性提供了有力支撑。

参考文献:

- [1] 封德彬,王文,马凡华.掺氢天然气的管道输运特性仿真与分析[J].化工进展,2024,43(1):390-399.
- [2] 马华伟,何利民,罗小明.石油、天然气储存与运输工程—严重段塞流压力波动特性试验[J].中国学术期刊文摘,2008,14(14):1.
- [3] 刘艳军,唐孝蓉,胡坤,等.天然气水合物浆体分解对其在垂直管中流动特性影响的研究[J].化学通报,2018,81(3):7.
- [4] 李力,金文斌.管道输送中充填浆体的压力损失预测[J].世界采矿快报,1992,008(022):10-13.
- [5] 王明军,杜晓春.天然气增压输送管道节能技术研究[J].天然气技术与经济,2013,7(2):2.