

危险化学品管道输送安全研究

李宏石（山东汶河新材料有限公司，山东 济南 271114）

杨翠萍 柳志广（济南安正安全技术咨询有限公司，山东 济南 250021）

摘要：本文重点研究危险化学品管道输送的安全问题，涉及化学品特性、管道设计、风险评估与管理体制等方面的内容。本文首先介绍了危险化学品分类，并分析其物理及化学性质，进而探讨管道设计原则及材料选择的重要性，特别是材料的耐腐蚀性与强度。其次，通过对危险化学品管道输送历史泄漏事故的数据展开分析，明确了安全风险评估的必要性。在此基础上，探讨潜在风险点的识别过程及风险控制和缓解措施的设计原则。最后，针对安全管理体系的构建展开分析，并强调了实时监测与预警系统在管道安全管理中的重要性。

关键词：危险化学品；管道输送；安全风险；输送系统；泄漏

随着工业化进程的加快，危险化学品在制造业、能源和医药等行业中扮演着举足轻重的角色。应注意的是，很多化学品具有“危险”属性，存储与输送过程中潜在较高危险性。特别是管道输送，作为一种经济、高效的运输方式，其安全问题尤为突出。历史上发生的多起事故已经证明，如果管道输送系统在设计、操作或管理上存在缺陷，后果将是灾难性的。因此，系统分析危险化学品的特性、优化管道设计、严格风险评估及建立完善的安全管理体系显得尤为重要。本文旨在为提高管道输送系统的安全性提供科学、合理的建议。

1 危险化学品管道输送综合分析

1.1 化学品的分类标准

《联合国全球协调系统》（GHS）主要基于化学品对生物健康、自然环境造成的影响及物理性质的差异进行分类。首先是健康危害：涵盖急性毒性、皮肤腐蚀/刺激性、致癌性等。第二是环境危害：主要是对水生环境有毒的化学品。例如，GHS将易燃液体分为4个等级，其中第一等级的闪点低于23℃且沸点不高于35℃。第三是物理危害：主要是具有易燃易爆特性（包括自燃）、较强反应活性的化学品。满足上述三项条件之一的化学品均属于“危险化学品”，在日常生产、储存、运输过程中，必须充分考虑对应的特性，尽最大努力降低安全事故发生率。

1.2 常见危险化学品的物理及化学性质

日常生活中常见的危险化学品以氯化氢、硫酸和氨等为代表，其物理和化学特性需严格监控。氯化氢具有强烈的腐蚀性，标准状况下为气态，具有极高的溶解性，可形成浓盐酸。硫酸作为一种强酸，具有强

腐蚀性和吸水性，其密度约为1.84g/cm³，溶解时会放出大量热能。氨气为无色气体，具有刺激性气味，易溶于水形成氨水，密度比空气轻，具有一定的易燃性，其燃点在16%至25%的浓度范围内。对于液态危险化学品的输送，考虑其蒸汽气压也至关重要。以苯为例，常温下蒸汽气压为约10kPa，易形成易燃蒸汽，且具有神经系统毒性。在管道输送中，这些化学品的状态、浓度、流动速度等参数，均需严格控制以保证安全。

1.3 输送管道的设计与材料选择

1.3.1 输送管道设计原则

设计危险化学品运输管道时，应遵循安全、可靠和经济的原则，确保危险化学品的安全输送，具体需要考虑的要素包括危险化学品的理化性质、输送过程中管道内外压力大小、化学品流动速度、环境因素等。比如设计标准API 650规定，对于输送易燃液体的管道，最小壁厚应满足下列要求：

$$t = \frac{PD}{2(SE + PY)} \quad (1)$$

在公式（1）中，P为设计压力，D为管道直径，S为材料许用应力，E为焊接接头系数，Y为材料的温度降额系数。此外，还需设置冗余系统和紧急切断阀装置，从而在泄漏事故发生后的第一时间，迅速切断化学品流动，降低事故严重程度。

1.3.2 材料耐腐蚀性与强度分析

危险化学品运输管道的材料应当兼顾耐腐蚀性与强度，以防化学品腐蚀和承受内外压力。比如不锈钢316L因其良好的耐腐蚀性（耐氯化物侵蚀）和高强度（屈服强度≥170MPa），常用于制造化学品管道。碳钢材料在经济性上具有优势，但需涂层或添加合金

元素如镍来提高耐腐蚀性。数据表明,添加 2% 镍的碳钢耐硫化氢腐蚀性能可提高约 50 倍。对于高腐蚀性环境,如硫酸输送,杜普雷特合金 (PREN ≥ 40) 是优选,因其能在高浓度硫酸中抵抗点蚀和应力腐蚀开裂。并且管道设计必须满足 ASME B31.3 等国际标准,以确保结构的完整性和长期稳定性。

2. 输送管道安全风险评估

2.1 危险化学品管道输送过程中泄漏事故案例分析

2.1.1 历史事故数据分析

历史数据显示,管道泄漏事故多起因于材料疲劳、腐蚀、操作失误、自然灾害和第三方破坏等因素。以美国为例,根据美国运输部管道和危险物质安全管理局 (PHMSA) 的数据,2010 至 2020 年间,共发生了超过 3000 起涉及危险化学品的管道事故,造成累计超过 10 亿美元的财产损失。其中,约 30% 的事故归因于腐蚀,20% 因为材料、焊接或设备失败,而操作失误则占到大约 10%。

2.1.2 泄漏事故造成的影响分析

管道泄漏事故的影响可划分为直接和间接效应。直接效应包括火灾、爆炸、毒性暴露和环境污染。例如,2014 年在印度发生的一起事故中,天然气管道泄漏后爆炸,造成至少 18 人死亡,多人受伤。间接效应则包括社会经济影响,如疏散成本、健康护理支出、环境修复费用以及对公众信心的打击。环境影响方面,水体污染尤为严重。2010 年密歇根州的基兰迪河 (Kalamazoo River) 油管破裂泄漏,释放出超过 100 万加仑的原油,清理工作持续了五年,总成本超过 12 亿美元。这一事故凸显了危险化学品管道泄漏对生态系统的长期影响,以及对环保及公共安全系统造成的持久负担。

2.2 管道输送安全风险识别与控制措施

2.2.1 潜在风险点识别

采用管道方式输送危险化学品时,若要确保安全性,从业者必须对运输管道的潜在风险点进行精确识别。实际上,该项工作要求从业者对管道各个环节的全面审查,识别可能导致泄漏、爆炸或其他安全事故的因素。常见风险点包括但不限于:①材料和构造缺陷。使用质量不符合标准的材料或存在设计缺陷的管道部分;②腐蚀和磨损。管道长时间运行可能导致内外壁受到腐蚀或磨损;③操作错误。人为操作失误或程序不当可能导致设备故障;④自然灾害,如地震、洪水或土壤侵蚀等自然因素可能导致管道损坏;⑤第

三方影响。非法挖掘、破坏或其他第三方活动可能对管道完整性构成威胁;⑥监控和检测系统失效。监测设备的故障或误报可能导致对真实威胁的忽视。

2.2.2 风险控制与缓解措施的设计

明确危险化学品管道运输的潜在风险点后,需设计有效的风险控制与缓解措施,以保障管道系统的安全运行。具体措施包括:①材料选择与设计改进。采用耐腐蚀、高强度的材料和设计改进以提高管道的抗风险能力;②采取具有较强针对性防腐蚀措施。如涂层保护、牺牲阳极保护或阴极保护系统等;③制定定期维护与检测计划。制定严格的维护计划,定期对管道进行检查和测试,使用超声波、射线或其他非破坏性测试技术;④做好操作培训工作。为操作人员提供充分的培训,确保他们了解所有操作程序和应急措施;⑤制定并严格实施应急预案。制定针对各种潜在事故的应急预案,并定期进行演练以确保准备的充分性;⑥构建智能监测系统。利用先进的传感技术和实时数据监控系统,及时检测并响应异常情况;⑦制定第三方干预预防措施。包括对地下管道的标记,以及在易受干扰区域设立警告标识和障碍物。合理制定并科学运用上述措施,可以大幅降低管道输送系统的安全风险事故发生率,减轻事故对环境和社会造成的不良影响。

3 管道输送安全管理与应急响应

3.1 安全管理体系建设

围绕危险化学品管道运输全过程建立健全安全管理体系,是确保管道输送系统可靠运行的关键。有效的安全管理体系应包括以下组成部分:①组织结构与责任。明确各级组织结构和员工的安全职责,确保安全管理体系在各个层级上得到有效实施;②风险评估与管理。定期进行风险评估,识别潜在的风险点,并制定相应的风险管理措施;③规范安全操作程序。编写和实施标准化的操作程序,包括维护、监测和应急响应等方面;④健全事故调查与报告机制。对任何事故或存在重大安全隐患事件(但未造成严重后果)进行彻底调查,分析原因,并编写报告以避免同类事件再次发生;⑤持续改进。安全管理体系应具备自我评估和持续改进的机制,不断地根据最新的数据、事故调查结果及技术进步来更新和完善安全措施。

3.2 管道完整性监测技术的应用

通过管道运输危险化学品时,可采用管道完整性监测技术。技术运用后通过动态监测运输管道是否处于完整状态,确保管道输送系统的完整性与实时性。

3.2.1 光纤传感技术

应用光纤传感技术进行温度、声音和压力的监测，通过分布式温度传感(DTS)和分布式声音传感(DAS)系统，连续监测数十公里管道。此技术能在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 的温度精度和 ± 1 米的空间分辨率下，实现沿管线的温度和声波异常的实时监测。具体来说，光纤传感技术主要依靠分布式温度传感(DTS)和分布式声音传感(DAS)系统来检测管道的完整性。DTS系统通过测量光纤内部反射光的拉曼散射，对温度变化进行精确测量。光纤沿管道布设，温度异常通常表明潜在的泄漏或其他管道损伤。例如，如果某段管道因泄漏导致内部产品渗出，会在土壤中形成热点或冷点，DTS能够检测到这种温度差异。DAS系统利用光纤作为连续的声波传感器，通过分析反射光频移(即光纤中发生的相位变化)来监测声波活动。当管道发生泄漏时，流体的泄漏会产生特定的声波频率。DAS系统能捕捉这些频率变化，并利用高级算法计算声波源的位置，实现对泄漏点的精确定位。

3.2.2 声波监测技术

应用基于声波识别的监测技术，能实时检测并定位管道泄漏。通过分析管道内流体流动产生的声波特征，在发生微小泄漏时，系统能在泄漏发生后的数秒内以 $\pm 2\%$ 的流量精度发出报警。具体来说，声波监测技术则利用装置于管道特定区域的声波传感器来探测和分析管道内的声学信号。这些传感器能够检测到由于压力变化、气泡释放或流体速度变化等原因引起的声音。在泄漏发生时，流体从管道内部逸出到外部环境会产生特有的声音特征，声波传感器捕捉到这些声音并将其与正常流动状态下的声音特征进行比较。高精度的声波分析软件能够从环境噪声中过滤出与泄漏相关的声音特征，这些特征包括频率、振幅和声波在管道内的传播速度。通过这些参数的变化，软件能够确定声音源头，即泄漏点的大致位置。

3.3 泄漏检测与预警机制的建立

泄漏检测与预警机制的建立是管道安全管理中的重要环节，其目的在于实现对管道系统潜在风险的早期发现、快速响应和及时控制。该机制通常包括以下措施：

3.3.1 检测技术应用

泄漏检测技术的选择需基于管道的具体特点和运输介质的性质。如上文提到的光纤传感技术以及声波监测技术，均需以先进传感器技术为基础，通过对运输管道的特定指标进行监控，完成对管道状态、危险

化学品输送状态的评估，最终确定输送过程是否存在安全风险。

3.3.2 数据分析处理流程

收集到的传感器数据需要通过专门的数据分析系统进行处理，以识别泄漏特征。利用机器学习算法训练模型能够提高识别泄漏的准确性，减少误报和漏报的可能性。数据处理系统会实时分析压力、流量、声音等数据，一旦检测到异常模式，系统会立即判定为泄漏信号。

3.3.3 预警信号发出机制

检测到潜在泄漏后，预警系统应立即启动，向管道运营管理部门发出预警信号。预警信号应包括泄漏位置、泄漏程度和建议的应对措施等关键信息，以便快速响应。该机制需确保无论在何种工作环境下都能可靠地传递预警信息。

3.3.4 应急措施

预警机制的另一个关键组成部分是制定和执行应急措施。管道运营商应制定详细的应急预案，包括关闭阀门、降低泵站压力、启动应急修复作业和环境清理等。预警系统应与管道自动化控制系统相连，以实现在检测到泄漏的第一时间内自动采取初始应急措施。

4 结语

危险化学品管道输送的安全性关系到生产效率，更直接关联到环境保护和人民生命财产安全。本文通过对危险化学品的特性、管道设计原则、风险评估方法以及安全管理体系的细致考察，提出一系列安全措施和管理策略。实时监测与预警系统的构建，有效预防和控制事故的发生，而应急响应与事故处理策略的制定和执行，能够最大限度减少事故的负面影响。未来管道输送安全管理将进一步向自动化、智能化方向发展，以达到更高安全保障水平。

参考文献：

- [1] 李竞. 关于危险化学品经营许可有关问题的探讨[J]. 劳动保护, 2021,(09):58-59.
- [2] 刘中庆. 纳入危险化学品监管后油气管道站场与公路安全间距适用规范分析[J]. 石油规划设计, 2018, 29(06):9-11+46.
- [3] 高新玉, 李宁, 孟园园, 等. 危化品输送管道安全距离判定探讨[J]. 山东化工, 2018,47(18):171-172.

作者简介：

李宏石(1973-), 男, 汉族, 山东济南莱芜区人, 本科, 工程师, 生产部部长, 研究方向: 化工工艺。