

天然气门站管道检验技术应用实践

汪孟洲（宜宾中石油昆仑国鼎燃气有限公司，四川 宜宾 644000）

摘 要：天然气门站作为长输天然气管道至下游城镇及工业用户分输的气源站，其管道的安全性和稳定性直接关系到天然气供应的可靠性和安全性。但是，由于天然气场站管道长期处于高压、高温、高腐蚀等恶劣环境中，很容易出现管道渗漏、腐蚀、裂纹等问题，从而影响其运营效果。因此，对天然气门站管道的检验技术应用实践进行探讨，对于保障天然气供应安全具有重要意义。本文将结合实际案例，详细阐述基于 RBI 技术的天然气场站管道检验应用方式。

关键词：RBI 技术；天然气门站；管道检验；定量；风险；评价

传统的天然气门站管道检验方法通常采用随机抽查的模式，这种方法使得过检和漏检的风险较高，传统检验方法还依赖于人工操作，检测精度和效率受到人为因素的制约，不利于防范管道事故和提高安全保障。针对这些问题，发展了基于风险评估的 RBI 技术，通过确定分析边界、收集管道资料、开展风险评估、制定维修方案、实施检验和跟进管道状况等步骤，可全面评估管道风险等级，制定科学合理并且具有可操作性的检验方案，最大程度地保障管道的运行安全。

1 定量风险评价技术（RBI）的计算原理

定量风险评价技术（Risk Based Inspection，简称 RBI）是一种以追求特种设备系统安全性与经济性统一为核心理念的风险评估和管理方法，该技术主要关注因材料劣化引起的设备破坏，通过科学分析特种设备系统中固有的或潜在的危險，给出风险排序，找出薄弱环节，从而建立一种优化检验方案的方法。在 RBI 的理论框架中，风险被定义为设备失效发生的概率与失效后果的乘积，因此，RBI 技术的核心在于对这两个因素的准确评估和量化。失效可能性分析主要关注设备每年可能发生的泄漏次数，失效后果分析主要关注设备失效后可能带来的影响，在得到失效可能性和失效后果的量化结果后，可以将它们分别列入一个 5×5 的矩阵中，形成风险矩阵，通过对比不同设备在风险矩阵中的位置，可以直观地比较它们的风险水平，从而确定哪些设备是高风险设备，需要重点关注和加强检验。

1.1 编制 RBI 项目数据库

在某大型石油化工企业的装置检修项目中，首先要收集和分析以下资料：设计资料、工艺流程图（PFD）、管道与仪表流程图（PID）、设备的结构与材料、工艺操作资料、装置更换费用等。其中，设计资料包括

装置的设计说明书、图纸、计算书等；设备的结构与材料分析要通过查阅设备的设计文件、制造图纸以及材料清单详细了解了设备的结构特点、材料属性以及制造过程中的特殊要求；工艺操作资料主要收集装置的操作手册、操作规程、工艺参数记录等文件，并对这些资料进行了整理和分析；装置更换费用的估算要根据设备的结构、材料以及市场价格等因素对设备的更换费用进行初步估算，还要考虑设备更换过程中可能产生的其他费用，这些费用数据将用于后续的风险评估和检修计划制定，以确保检修工作的经济性和合理性。在完成上述各项资料的收集和分析后开始建立 RBI 项目数据库，即利用专业的数据库软件将设计资料、工艺流程图（PFD）、管道与仪表流程图（PID）、设备的结构与材料、工艺操作资料以及装置更换费用等信息进行整合和存储。

1.2 确定损伤机理与腐蚀回路

天然气站场管道的损伤机理主要包括内部腐蚀减薄和外部损伤，内部腐蚀减薄主要是由于天然气中的硫化氢、二氧化碳等腐蚀性介质与管道内壁发生化学反应，导致管道壁厚逐渐减小，外部损伤则主要是由于环境因素、施工质量、外力作用等因素导致的管道破损。腐蚀回路是指腐蚀介质在管道内部形成的闭合回路，是内部腐蚀减薄的关键因素，在天然气站场管道中，腐蚀回路主要由天然气中的腐蚀性介质、管道内壁、管道外壁以及周围环境构成，腐蚀介质通过管道内壁与外部环境进行交换，形成腐蚀回路，加速管道的腐蚀进程。内部腐蚀减薄的速率可以通过以下公式进行计算：腐蚀速率（mm/a）= $K \times (\text{介质浓度})^n \times (\text{温度})^m \times (\text{压力})^p$ 。其中，K 为腐蚀速率常数，n、m、p 分别为介质浓度、温度、压力的指数，通过该公式可以计算出不同条件下管道的腐蚀速率，从而预测管

道的剩余寿命。外部损伤主要依赖于对管道外部环境的监测和评估,例如,可以通过对管道所在区域的土壤腐蚀性、地下水位、外力作用等因素进行监测,结合历史数据和统计分析方法,评估外部损伤对管道安全的影响。

1.3 失效可能性的计算

在实际案例中,失效可能性的计算常采用极限状态分析与可靠性指数法。极限状态分析是评估结构或系统在特定条件下是否达到或超过其承载能力极限的一种方法,在天然气门站管道检验中,极限状态分析主要关注管道的损伤机理、退化速率以及检验历史等因素,首先,天然气门站管道的腐蚀、疲劳、裂纹扩展等损伤机理的识别需要结合管道的材质、运行环境、运行时间等因素进行综合分析,初步判断管道的失效模式和潜在风险;其次,预计退化的速率需要借助实验数据、历史记录以及专业知识进行量化分析;最后,评估检验历史要记录管道在过去一段时间内的运行状况、维护记录和损伤情况,了解管道的损伤历程和当前状态,为失效可能性的计算提供重要依据。

可靠性指数法是一种基于概率统计的失效可能性评估方法,在天然气门站管道检验中,可靠性指数法的计算步骤主要包括确定失效准则、建立概率模型以及计算可靠性指数等,首先,根据管道的损伤机理和退化速率,确定管道的失效准则,失效准则可以是管道的某一性能指标达到或超过某一阈值;其次,基于历史数据和专业知识建立管道失效的概率模型;最后,利用概率模型计算出管道的可靠性指数,可靠性指数越大,说明管道的可靠性越高,失效可能性越小。

1.4 物流回路划分和失效后果的计算

物流回路是天然气门站管道系统中用于输送天然气的关键部分,在实际操作中,物流回路的划分需综合考虑管道的走向、阀门的位置、监测点的设置以及潜在的风险因素等因素。在本案例中,其管道系统包括多个进出口管道、分支管道以及连接管道等,在物流回路划分时,首先根据管道的走向和阀门的位置将管道系统划分为若干个独立的回路,每个回路均设有独立的进出口阀门和监测点,还需对每个回路进行风险评估,识别潜在的风险因素和安全隐患。失效后果的计算主要依据泄出流体物料的性质与量,以及其对环境和人员的影响程度,在本案例中采用以下公式计算:失效后果=流体性质系数×泄漏量系数×影响范围系数。其中,流体性质系数主要考虑了天然气的

易燃易爆性、毒性等因素;泄漏量系数根据管道的运行压力和流量进行计算;影响范围系数考虑了泄漏点周边环境的敏感性和人员分布情况。在本案例中,根据天然气的特性将其流体性质系数设定为2.0,泄漏量系数主要取决于管道的运行压力和流量,根据该管道的实际情况,利用相关公式进行计算,得出泄漏量系数为1.5,泄漏点周边为工业区和居民区,人员密集,环境敏感性较高,因此,将影响范围系数设定为1.8。综合以上三个系数,可以计算出该天然气门站管道失效后果值为 $2.0 \times 1.5 \times 1.8 = 5.4$ 。

1.5 风险计算

为准确评估管道系统的风险水平,本案例采用了基于风险矩阵的风险计算方法,该方法通过综合考虑事故发生的可能性和事故后果的严重程度,来确定管道系统的风险等级。事故发生的可能性主要取决于管道系统的状况、运行环境及管理水平的因素,根据历史数据、现场检查情况及专家评估,将管道系统的状况划分为五个等级,并赋予相应的可能性值。事故后果的严重程度主要取决于泄漏量、泄漏速率及泄漏物质的性质等因素,根据天然气泄漏后可能引发的火灾、爆炸等后果,将事故后果划分为四个等级,并赋予相应的严重程度值,其中,火灾和爆炸等严重后果的严重程度值较高。风险值(R)是事故发生的可能性(P)与事故后果的严重程度(S)的乘积,即 $R = P \times S$,通过计算各段管道的风险值可以得出整个管道系统的风险分布情况。根据计算得到的风险值,将管道系统划分为高、中、低三个风险等级,对于高风险等级的管道段,需立即采取紧急措施进行修复或更换;对于中风险等级的管道段,需加强监测和定期检查;对于低风险等级的管道段,可维持正常的运行管理。

2 基于 RBI 技术的天然气场站管道检验应用

2.1 确定分析边界

在 RBI 技术应用过程中,合理的分析边界能够确保检验工作的全面性和针对性,避免遗漏重要部位或过度检验,在确定分析边界时,应遵循以下原则:一是完整性原则,分析边界应涵盖主管道、分支管道、阀门、法兰等关键部件,确保无遗漏;二是重要性原则,根据管道系统的重要和风险等级对关键部位和薄弱环节进行重点分析,确保高风险区域得到充分关注;三是可操作性原则,分析边界的确定应考虑到实际检验工作的可操作性,避免过于复杂或难以实现的分析范围。基于上述原则,检验人员要对管道走向、规格、

材质、运行参数等信息进行收集和整理,利用历史数据、运行记录以及专家经验等对管道系统进行风险识别,确定潜在的风险源和风险因素,最后结合管道系统的实际情况划定分析边界,对于高风险区域,应将其纳入重点分析范围,对于一般风险区域,可根据实际情况进行适当简化或合并。

2.2 收集管道资料

在 RBI 技术应用之初,首要任务是编制一个全面、系统的项目数据库,该数据库应包含设计资料、工艺流程图(PFD)、管道与仪表流程图(PID)、设备的结构与材料、工艺操作资料、流程物料的量与组成、装置更换费用、周边环境受破坏后恢复所需费用等关键信息。在收集这些资料时,场站管理人员与技术人员需密切配合,对现有资料进行梳理和整理,对于缺失或不确定的资料,需及时与设计单位、施工单位或供应商沟通,确保所有关键信息的完整性和准确性。除了上述基础资料外,还需收集管道的出厂合格证、出厂检测报告、安装记录、运行记录等,在收集这些资料时需注重细节和完整性,例如,出厂合格证和出厂检测报告应详细记录管道的材质、规格、生产批次等信息;安装记录应包含安装过程中的关键步骤和质量控制点;运行记录应详细记录管道在运行过程中的压力、温度、流量等参数的变化情况。在完成上述资料收集的基础上,还需进行现场勘查和数据采集,现场勘查旨在对管道系统进行全面检查和测量,获取管道的实际状况和运行数据。

2.3 开展风险评估

风险评估主要运用排查法、统计学方法和故障树分析法等多种方法对管道系统可能存在的风险进行识别和分析,在风险识别和分析的基础上,构建 5×5 矩阵图进行风险评估,矩阵图的横轴代表风险发生的可能性,纵轴代表风险发生后可能造成的后果严重程度,将识别出的风险按照其可能性和后果严重程度分别填入矩阵图的相应位置。通过矩阵图,可以直观地看出不同风险的大小和优先级,场站可以根据风险评估结果制定相应的风险控制措施和检验策略。

2.4 制定维修方案

在对管道系统的失效可能性和失效后果进行综合分析,确定管道的风险等级后,可以制定针对性的检验和维修方案,对于高风险区域和关键设备,需要采取更加严格的维修措施,如增加巡检频次、缩短维修周期等,还需要考虑维修资源的合理配置和利用,确

保维修工作的有效性和经济性;根据维修策略,编制维修项目、维修时间、维修人员、维修工具等具体的维修计划,维修计划需要充分考虑现场实际情况和维修资源的可用性,确保维修工作的顺利进行。

2.5 实施检验

检验实施前,针对不同类型的损伤机理和腐蚀回路,选择超声波检测、射线检测、磁粉检测等合适的检验方法和工具,同时,根据管道的实际情况和场站的运行需求合理安排检验时间和周期,确保检验工作的有效性和高效性。检验实施过程中,应严格按照操作规程进行,确保检验结果的准确性和可靠性,同时对检验过程中发现的问题和隐患进行记录,并及时上报和处理。完成检验后,对检验结果进行深入分析,总结管道存在的问题和隐患,提出相应的维修和改进措施,并根据本次检验的经验和教训对 RBI 技术实施过程进行反思和优化,为今后的检验工作顺利开展提供有力保障。

2.6 跟进管道状况

在检验过程中,需要对管道的状况进行实时跟进,对于发现的缺陷或问题,及时进行分类、记录和分析,确定其严重程度和影响范围,再根据问题的性质和严重程度制定相应的修复措施或监控计划,同时对修复后的管道进行再次评估,确保其安全性能达到要求。为了实现管道状况的实时跟进,需要建立详细的管道信息数据库,通过数据库的管理和更新,可以方便地对管道状况进行查询、分析和统计,还可以利用远程监控系统、传感器等现代化的监控手段,实现对管道运行状态的实时监控和预警。

3 总结

总而言之,天然气门站管道检验技术应用实践表明,采用基于 RBI 技术的在线检验方法是提高管道安全性和稳定性的有效途径,经过确定分析边界、收集管道资料、开展风险评估、制定维修方案、实施检验和跟进管道状况等步骤的实施,不仅提高了检验效率和准确性,也降低了维护成本和安全风险,从而确保天然气门站管道的安全和稳定运行。

参考文献:

- [1] 李俊贤. PE 天然气管道全面检验技术及风险评估实践[J]. 科技创新, 2023(19):157-160.
- [2] 刘旭. 天然气长输管道施工监督检验中的问题探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(05):34-36.