

# 基于力值法的呼吸阀在线校验装置设计

吕艳君

中国石化茂名石化炼油分部, 中国·广东 茂名 525000

**摘要:** 针对石化储运设施安全泄放装置的在役性能评估需求, 比较分析了在线和离线两种方案的特点, 提出了一种融合力值法和反向压差法的动态参数辨识智能校验方法。通过构建离线基准标定与在线动态监测的效能对比模型, 验证在线校准技术在工况适配性方面的优势, 可有效将误差率降低至  $\pm 1.8\%$ 。

**关键词:** 呼吸阀; 储罐; 在线校验; 力值法; 装置

## Design of Online Calibration Device for Breathing Valve based on Force Value Method

YanJun Lv

Sinopec Maoming Petrochemical Refining Branch, Maoming, Guangdong, 525000, China

**Abstract:** In response to the in-service performance evaluation requirements of safety relief devices in petrochemical storage and transportation facilities, this paper compares and analyzes the characteristics of online and offline schemes, and proposes a dynamic parameter identification intelligent verification method that integrates force value method and reverse pressure difference method. By constructing a performance comparison model between offline benchmark calibration and online dynamic monitoring, the advantages of online calibration technology in terms of working condition adaptability are verified, which can effectively reduce the error rate to  $\pm 1.8\%$ .

**Keywords:** breathing valve; storage tank; online verification; force value method; device

### 0 前言

在石化行业关键基础设施领域, 大型常压储罐作为原油、馏分油及成品油储运系统的核心工艺装备, 其安全运行直接影响产业链完整性。该类容器设计容积普遍处于  $1000\sim 5000\text{m}^3$  量级, 受物料相变 (温度变化率  $\Delta T \geq 0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ ) 及装卸作业 (流量波动范围  $\pm 15\%$ ) 影响, 罐内气相空间压力将产生显著动态偏移 (超压/负压阈值普遍处于  $\pm 5\text{kPa}$ )。当罐内压力超出设计阈值时, 可能引发罐体结构塑性形变 (正压鼓包或负压塌陷), 统计数据此类事故占比达石化行业压力相关事故的  $34.7\%$ 。压力平衡调节装置 (呼吸阀) 作为储罐本体的关键安全附件, 通过智能启闭机制维持气相空间动态平衡: 在超压工况下执行蒸气排放, 在负压条件下实施空气补偿<sup>[1]</sup>。该装置可实现压力闭环控制, 具备逸散防控功能, 有效避免因压力失控导致的次生灾害。

### 1 呼吸阀结构分析

储罐由于容积、用途、结构和介质不同, 所需呼吸阀种类不同。《石油储罐附件第 1 部分呼吸阀》对呼吸阀型号及结构制定了相应要求, 典型结构及外观如图 1、图 2 所示。

随着石油储运体系的技术迭代, 储罐结构工程学持续革新, 大容量储罐普及化, 基于全生命周期设计理念, 现代储罐有效容积已突破  $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5 \text{m}^3$ , 对呼吸阀的设计压力、径高比提出了更高的要求。高压力、大口径的紧急泄放

阀在大型储罐的应用越来越多。



图 1 呼吸阀外观

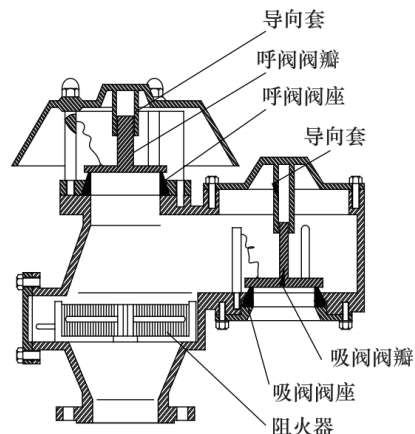


图 2 呼吸阀结构

基于压力 - 真空泄放规范, 呼吸阀工作模态遵循动态

平衡原理: 正压泄放相态中, 罐顶气相压力  $p$  超过泄放压力阈值  $p_h$  时, 导阀机构执行分级响应, 正压阀盘组件开启, 形成湍流扩散通道, 实现混合气向大气或回收装置的定向输运, 直至罐顶气相压力  $p$  低于  $p_h$ , 复合密封副闭合; 负压补偿相态中, 当气相压力  $p$  低于吸入阈值  $p_x$  时, 真空导流机构触发, 负压阀盘组件开启, 环境空气经整流栅格以层流态注入储罐, 直至罐顶气相压力  $p$  高于  $p_x$ , 密封副闭合。

## 2 呼吸阀离线校验

储罐安全装置的核心性能指标包含泄压设定值、补压设定值及密封效能三项关键参数。根据行业技术规范要求, 新装呼吸阀须经专业机构检测认证, 确保功能达标方可运行; 已投用设备应按规定周期复检以维持参数精度。安全监管部门通过建立专项检查制度, 对设备全生命周期的校验流程实施严格管控<sup>[2]</sup>。

呼吸阀常规检测采用离线作业模式, 其标准流程如下。

### 2.1 设备准备阶段

将待测阀门从储罐拆卸后, 运送至具备资质的检测机构, 安装于专用测试平台。检测系统需符合压力测试装置规范要求。

### 2.2 正压性能检测

压力测定中, 通过正压气源(压缩空气/氮气)向阀体入口增压, 记录阀瓣初始开启时的压力值; 密封性验证中, 维持入口压力为开启值的 75%, 使用流量计测定外泄量, 泄漏率应  $\leq 0.5\text{m}^3/\text{h}$ 。

### 2.3 负压性能检测

启闭阈值测试中, 连接真空系统至阀体入口, 逐步降压至阀盘动作, 记录临界真空值; 反向密封验证中, 将入口压力提升至临界值的 75%, 采用气泡法检测内泄情况, 持续 5 min 无连续气泡产生为合格<sup>[3]</sup>。

## 3 呼吸阀在线校验技术

储罐呼吸阀在线检测是在储罐正常运行工况下, 直接在呼吸阀安装位置进行的性能参数测试与验证作业。相较于传统离线检测方式, 无需排空储罐介质, 免除设备吊装环节, 完全保持实际工作状态, 检测数据更具工况代表性, 同时避免了因清罐作业导致的停产损失, 消除了吊装过程对设备的机械损伤风险<sup>[4]</sup>。

储罐呼吸阀在线检测包含专用检测设备和标准化操作流程。由于作业环境位于运行中的储罐顶部, 检测设备需防爆性能达标, 同时具有轻量化和模块化, 便于搬运。

呼吸阀由于介质类型、工艺、结构不同, 其在线校验技术可分为反向压差法、压力法、力值法三种方式<sup>[5]</sup>。

反向压差检测技术主要适用于常规在线检测系统, 在特定工况条件下也可拓展至离线检测应用。该方法的实施需确保呼吸阀与液压安全阀出口端建立可靠密封系统。压力法主要适用于离线检测系统及配备切换阀门与通气结构的在

线检测场景。力值检测技术主要适用于紧急泄压装置的在线性能评估, 在满足特定条件的情况下可用于呼吸阀的实时检测。下面将对该检测方法的具体实施过程展开详细阐述。

### 3.1 原理分析

作为压力控制装置的重要组成部分, 呼吸阀的呼阀与吸阀组件均采用阀座-阀瓣结构作为核心启闭执行机构。当量密封面积  $S$  由阀座与阀瓣的密封带几何参数确定。 $D_1$  表示密封带内径,  $D_2$  对应外径尺寸; 储罐工作压力  $p$  作为系统基准压力, 压力阈值包含呼出压力  $p_h$  与吸入压力  $p_x$ 。通过有限元仿真与实验实测数据对比分析, 获得密封带等效面积为

$$S = \pi(D_1 + D_2)^2 / 16 \quad (1)$$

力值法中, 采用外力  $F$  辅助呼吸阀开启时, 满足以下条件:

$$\text{呼出压力: } p_h = F / S + p \quad (2)$$

$$\text{吸入压力: } p_x = p - F / S \quad (3)$$

以上即为呼吸阀在线校验的原理。

### 3.2 机械系统

机械系统由气动或液压顶升缸、管路、手动泵、调平底座、辅助工装、节流阀等构成。

### 3.3 测控系统

测控系统由数据采集器、数据通讯线、防爆平板电脑、算法软件、力值传感器等组成。

### 3.4 实施工艺

#### 3.4.1 紧急泄放阀

紧急泄放阀在火灾等突发事故场景下, 常规呼吸装置的泄放能力难以满足储罐压力控制需求。紧急泄压装置凭借其大口径设计和高流量特性, 可快速完成压力释放与真空补偿, 确保罐体维持安全工况范围。集成式真空保护模块作为附加安全单元, 能有效预防罐体因蒸气压力异常或真空过载引发的结构失稳。鉴于该装置的关键安全属性及拆装复杂性, 推荐优先采用在线检测技术进行性能验证。

#### 3.4.2 准备工作

对紧急切断阀进行外观检查, 确保表面无显著锈迹或粘连物。重点观察阀盖销轴区域的运动状态, 确认其转动顺畅无阻滞现象, 通过油枪向销轴部位加注润滑油脂。同步协调储罐管理人员保持运行参数稳定, 准确读取并登记储罐顶部的介质压力值  $p$ 。查阅资料或现场实测获取泄放装置密封组件内外径尺寸, 据此计算密封面的等效作用面积  $S$ ; 最后分别测定阀体几何中心与销轴间距  $L_2$ , 以及施力部位至销轴的杠杆长度  $L_1$ 。

#### 3.4.3 硬件安装

将配有传感器的油缸稳妥地安置于调平基座上, 完成测力装置的装配工作。调节基座方位使测力装置轴线与阀体施力部位垂直。接通手动液压泵与油缸的管路接口, 依次建立计算机、数据采集模块与测力装置之间的信号连接, 安装

过程须保证各连接件垂直度误差在允许范围内。

### 3.4.4 启动软件

在测控系统中输入参数  $L_1$ 、 $L_2$  及密封面等效面积  $S$  后, 执行液压加载程序。操作人员需交替提压液压泵操纵杆, 使工作介质注入液压执行机构。此时测力单元受液压驱动对泄压装置施加举升作用力  $F$ , 监控界面同步显示载荷 - 时间图谱的上升趋势。持续泵送过程中需密切观察曲线特征, 当载荷增长率出现阶跃式衰减且伴随排气生效时, 系统即达到泄压装置临界开启状态, 此时记录的峰值即为  $p_h$  值。具体计算关系式为:

$$p_h = p + E_1 / L_2 S \quad (4)$$

以相同方法得到紧急泄放阀吸入压力  $p_x$ 。

$$p_x = p - F / S \quad (5)$$

## 4 测定呼吸阀在线泄漏率

作为安全性能评估的核心参数, 呼吸阀密闭效能直接影响装置运行的经济性与环保性。区别于动作压力参数(呼出/吸入开启值), 优良的密封特性可使介质逃逸量维持在低位水平, 长期运行既能降低挥发性物料损耗, 又能显著减少大气污染物排放。当密封系统存在缺陷时, 异常升高的逸散速率将导致物料大规模泄漏, 不仅造成直接经济损失, 更会引发环境风险事件。为有效监控呼吸阀非正常排放, 需建立基于压力梯度分析的实时监测。该动态检测方法的实施流程包含三个关键阶段: 首要准确测定排放端密闭空间的标准容积, 继而通过精确调控储罐内部压力, 使密闭空间与储罐间的压差稳定在设定阈值, 记录特定时段内的压力波动数值, 最终推导出介质逃逸速率。整个过程需确保测量系统的热力学平衡状态, 并排除环境温度波动对检测结果的干扰。

### 4.1 测量油罐呼吸阀大气侧腔体容积

①基于工程实测数据, 排放端密闭腔体的有效容积通常分布在 1~20L。文中选用 10L 标准气室作为压力源, 该装置配有精密压力仪表, 采用螺纹紧固式密封盖结构, 密封盖集成 DN6 截断阀。操作时先向气室充入设定压力(推荐 100kPa)的压缩气体, 随后闭锁截断阀。

②在待测呼吸阀排放端口安装专用密封法兰组件, 该组件集成 DN6 控制阀并保持常开状态, 确保气路贯通性。

③使用  $\phi 6 \times 500\text{mm}$  聚氨酯软管建立标准气室与检测法兰间的气路连通。依次开启气室截断阀与法兰控制阀, 使压缩介质沿管路传输至检测腔体, 直至系统压力均衡。

④待系统稳定后, 读取气室压力表的稳态压力值  $p$ , 结合气体状态方程即可推导密闭空间有效容积  $V_h$ 。

依据理想气体状态方程, 在等温条件(温度恒定)下, 密闭体系中气体压力  $p$  与占据体积  $V$  的乘积保持守恒。针对标准气室初始容积与待测密闭空间有效容积  $V_h$ , 当两者实现压力平衡时, 其物理关系满足如下方程(连接管路  $\phi 6 \times 500\text{mm}$  的有效容积相较于测试系统总容积属于二阶微

量, 在工程计算中可予忽略):

$$10 \times 100 = (10 + V) p \quad (6)$$

### 4.2 泄漏量与呼吸阀大气侧腔体压力变化的关系

由气体定律可知, 遵循基本气体规律的气体介质可纳入理想化气态模型研究范畴。该理论条件限定在中低压范围(相对于标准大气压)与常温工况(与常规环境温度相当)的共同作用下。实际工程应用中, 呼吸阀介质流动过程的工作压力处于近常压水平, 其热力学状态与环境温度基本同步, 完全满足理想气体状态方程的适用前提。故在泄漏率计算时可采用简化气态方程建立数学模型, 即:

$$pV = nRT \quad (7)$$

$$n = M / \mu \quad (8)$$

式中:  $M$ ——气体质量;

$\mu$ ——摩尔质量。

依据 SY/T0511.1—2010 技术规程要求, 呼吸装置密封效能的检测需在 0.75 倍阀值压力下实施标定作业。泄露实验中, 首先封闭排放端密闭空间, 通过压力调节装置精确控制储罐与密闭空间之间形成规定倍数的压力梯度。将系统稳定后的初始工况参数定义为状态 1, 同步采集环境温度  $T_1$ 、密闭空间几何容积  $V$  及系统压力  $p_1$  等关键参数, 通过式 7 建立参数间的定量关系:

$$p_1 V / T_1 = (M_1 / \mu_1) R \quad (9)$$

基于式(8)计算呼吸阀大气侧腔体内气体的摩尔质量, 即:

$$M_1 = (p_1 V \mu_1) / (R T_1) \quad (10)$$

在经过时间间隔  $t$  (60s) 后, 记录呼吸阀大气侧状态参数。设此时的状态为 2, 记录温度为  $T_2$ , 体积为  $V$ , 压力为  $p_2$ , 三者关系为:

$$p_2 / T_2 = (M_2 / \mu_2) R \quad (11)$$

$$M_2 = (p_2 V \mu_2) / (R T_2) \quad (12)$$

泄漏率为:

$$V = (M_2 - M_1) / t \quad (13)$$

## 5 结论

储罐呼吸阀的安全防护效能主要体现在精准启闭性能、充分泄放能力及可靠闭锁功能三个维度, 直接关系到储罐本质安全水平与生态保护效果。文中研究建立的反向压力加载法可精确测定泄压阀的呼出/吸入临界压力值, 结合动态泄漏监测技术, 实现了安全装置免拆卸工况下的综合性能评估。该技术既能保障储罐连续运行需求, 又可有效控制挥发性有机物无组织排放, 具有显著的监管效能提升与双效益协同特征。

### 参考文献:

[1] 李武俊, 胡健, 林骏, 等. 危险化学品常压储罐泄漏检测与维修技术研究[J]. 石油和化工设备, 2024, 27(5): 171-175+166.

- [2] 张东许,李佳航,多英全,等.不同补氮程度油品罐通过呼吸阀排放油气危险性研究[J].压力容器,2024,41(4):43-52.
- [3] 刘浩,周永春.LNG低温储罐压力安全系统设计[J].化工设计,2021,17(1):7-10+16.
- [4] 吴全龙,徐锋,后文杰.基于ASME X III—2021的压力泄放装置应用综述[J].压力容器,2023,40(2):64-70.
- [5] 闪从新,李琦,胡太江,等.超临界CO<sub>2</sub>管道泄放特性及参数敏感性[J].化学工程,2025,53(1):84-89.

作者简介: 吕艳君(1988-),男,中国山西忻州人,本科,工程师,从事设备管理研究。