

# 油罐车油气回收系统密闭性压力衰减问题研究

王明娜

河南迅佳检测有限公司 河南 郑州 450001

**【摘要】**：随着国家对环境保护要求的日益严苛，油罐车作为成品油运输的关键载体，其油气回收系统的密闭完整性备受关注。在实际运营中，系统因车辆颠簸、部件老化及温度变化导致的压力衰减问题频发，不仅造成挥发性有机物逸散污染大气，更潜藏火灾爆炸风险。深入探究压力衰减机理与影响因素，对于提升运输环节本质安全水平与环保合规性具有重要的现实意义。

**【关键词】**：油罐车；油气回收系统；密闭性；压力衰减；问题

DOI:10.12417/2811-0528.26.10.065

## 引言

油罐车油气回收系统在长距离运输与装卸作业过程中，面临着复杂多变的动态工况考验。系统内部压力的稳定性直接关系到油气回收效率与行车安全，然而由密封件失效、呼吸阀卡滞及管路微泄漏引发的压力衰减现象极为普遍。针对这一技术瓶颈，亟需从材料特性、结构设计与流体力学角度剖析成因，进而构建系统化的压力维持与优化策略，以保障危化品运输的全程密闭。

## 1 油罐车油气回收系统结构与密闭机理

油罐车油气回收系统是连接加油站地下储罐与油库的关键密闭循环网络，主要由气相主管路、支管路、多通接头、紧急切断阀、呼吸阀及底部的底部装油鹤管组成。其核心结构在于通过物理隔绝实现气体的定向流动，防止挥发性有机物在转运过程中逸散。在密闭机理上，系统利用发油与收油过程中的液位变化产生的压力差作为驱动力。当油罐车进行底部装油时，液位上升迫使罐内油气通过气相管路被压回至发油栈桥，实现一次密闭回收；而在运输途中，系统则依靠呼吸阀的精密调控来维持罐内微正压。理论上，一个合格的系统应在全工况下保持气密性，通过橡胶密封圈、金属垫片及焊接接口阻断气体分子迁移路径。只有当系统结构完整且各组件配合精密时，才能确保压力恒定，防止外界空气渗入或内部油气渗出，从而保障运输安全与环境合规。

## 2 压力衰减对油气逸散及运输安全的危害分析

压力衰减直接导致油罐车密闭系统失效，引发严重的油气逸散污染。当罐内压力低于设计阈值时，原本应被压缩回收到的油气会从呼吸阀、量油口等薄弱环节泄漏至大气。这不仅造成成品油资源的无谓损耗，更使得高浓度挥发性有机物扩散至作业环境，形成以臭氧和细颗粒物为特征的区域性大气污染。在职业健康层面，逸散的油气含有苯系物等有毒成分，长期暴露将威胁操作人员的神经系统与造血功能。

在运输安全维度，压力衰减带来的危害更为致命。系统负压会导致外界空气通过泄漏点被吸入罐内，与残留油气混合形成爆炸性气体环境。油罐车在长途行驶中面临频繁制动与路面颠簸，一旦吸入空气量达到爆炸极限，微小的静电火花或机械摩擦热都可能触发灾难性的燃烧或爆炸。此外，持续的压力失衡还会加速呼吸阀膜片、密封垫片等关键部件的疲劳老化，造成设备连锁失效，极大地增加了道路运输的安全风险。

## 3 密闭性压力衰减的主要成因分析

### 3.1 动态工况下机械结构的疲劳松动

油罐车在运输过程中长期处于高频振动与剧烈颠簸状态，这对油气回收系统的机械连接部位构成了严峻考验。气相管路的法兰连接、螺纹接口以及焊接接头，在交变载荷的持续作用下容易产生微观塑性变形。这种累积损伤会导致连接件逐渐松动，原本紧密贴合的密封面出现微小间隙。同时，车辆转弯时的惯性力与路面不平产生的冲击力，会使管路支架受力不均，造成管路整体位移或扭曲。这种结构性的疲劳松动直接破坏了系统的密闭完整性，使得罐内油气在压力作用下通过这些新生缝隙向外渗漏。

### 3.2 非金属密封材料的老化与介质侵蚀

油气回收系统中的O型圈、垫片及隔膜等非金属密封元件，长期处于汽油蒸气的高温熏蒸环境中，极易发生化学与物理变化。汽油中的芳香烃成分对橡胶材料具有极强的溶胀作用，会导致密封件体积膨胀、硬度下降，失去原有的弹性回复能力。而在北方冬季低温环境下，这些橡胶制品又会迅速硬化脆化，产生收缩裂纹。此外，随着乙醇汽油、甲醇汽油等替代燃料的推广，燃料组分的改变加速了密封材料的溶胀与老化进程。当密封件表面出现龟裂或永久变形后，其接触面的比压不足以抵抗罐内压力，从而形成微观泄漏通道，导致系统压力缓慢衰减。

### 3.3 呼吸阀组件的卡滞与调节失灵

呼吸阀是维持油罐车内外压力平衡的核心安全附件,其动作灵敏度直接决定系统的密闭性。在实际运行中,由于油品杂质、铁锈或粉尘的随气流迁移,极易在呼吸阀阀盘与阀座的结合面上沉积结垢。这种沉积物会形成物理屏障,阻碍阀盘的灵活启闭,导致阀门在正常压力范围内无法及时复位。同时,阀内弹簧在长期高频压缩下会产生金属疲劳,弹力系数发生改变,使得呼吸阀的开启与关闭压力阈值漂移。当弹簧失效或阀盘卡在微开位置时,罐内油气便会持续通过该缝隙向大气泄放,造成系统无法建立起正常的操作压力,形成持续性的压力衰减。

### 3.4 焊接缺陷与法兰界面的微泄漏

在油罐车的制造与改装过程中,气相管路的焊接质量与法兰安装精度直接决定了系统的初始密闭性。部分厂家为降低成本,采用单面焊或手工电弧焊,导致焊缝根部存在未熔合、气孔或夹渣等内在缺陷。在车辆服役期间,这些缺陷在振动应力作用下会逐步扩展成宏观裂纹。而对于法兰连接部位,若紧固螺栓预紧力不均匀或垫片选型不当,会造成密封面受力失衡。特别是在管路拐弯处的法兰,由于受到流体冲击产生的弯矩作用,连接螺栓易被拉长,导致法兰面分离。这种微小的缝隙虽然肉眼难以察觉,但在高压差下足以让油气分子渗透逃逸,是导致系统压力缓慢衰减却又极难排查的隐蔽成因。

## 4 提升系统密闭性与压力稳定性的优化策略

### 4.1 耐介质复合密封材料的升级换代

密封件在复杂燃油组分中溶胀失效的问题,必须对现有密封材料体系进行彻底的迭代升级。传统的丁腈橡胶在接触乙醇汽油或甲醇汽油后,体积溶胀率往往超过30%,导致密封预紧力丧失。优化策略应转向全氟醚橡胶或填充改性聚四氟乙烯材料,这些高性能聚合物具有极低的溶解度参数,能够有效抵抗芳烃及醇类溶剂的化学侵蚀。在结构设计上,引入多重唇形密封结构,利用介质压力辅助增强密封效果,确保在负压状态下仍能紧贴密封面。同时,针对高寒地区应用,需建立密封件低温回缩试验标准,确保材料在零下40摄氏度环境下不发生玻璃化转变,维持足够的弹性模量,从而在全工况范围内阻断微观泄漏路径。

### 4.2 管路系统抗振疲劳的结构拓扑优化

油罐车在复杂路况下的随机振动是诱发管路连接松动的主要因素。基于有限元模态分析技术,对气相管路支撑结构进行拓扑优化,识别并避开车辆行驶中的共振频率点。具体措施包括在管路拐点处增设液压阻尼减震器,以及在长直管段中间

隔布置弹性吊架,将刚性固定改为弹性约束,允许管路在热胀冷缩及振动过程中有微量的自由伸缩空间。对于法兰连接部位,采用碟形弹簧垫圈替代普通平垫圈,利用其变刚度特性补偿螺栓因振动产生的松动伸长量。这种结构动力学的优化设计,能显著降低管路的应力幅值,延长金属构件与连接节点的疲劳寿命,从根本上遏制因机械松动导致的压力衰减。

### 4.3 呼吸阀双冗余与自适应调压机制

单阀芯呼吸阀在脏污或结冰条件下极易卡滞,为此需引入双阀瓣并联式冗余结构。主阀负责日常频繁的小幅压力调节,副阀作为安全冗余,仅在主阀失效或流量超限时开启。同时,对阀盘导向机构进行精密研磨,降低摩擦系数,并结合磁力辅助复位技术,确保阀盘在任何倾斜角度下都能准确回座。针对高原与平原地区压差变化大的特点,开发可调式先导式呼吸阀,通过感应罐内外压差的变化率自动调节弹簧预紧力,避免在车辆爬坡或快速减压时出现误动作。这种自适应调压机制大幅提升了系统对动态工况的跟随性,确保压力始终维持在设定的安全阈值之内。

### 4.4 基于氦质谱技术的微泄漏精准诊断

传统皂液检漏法无法发现的微泄漏难题,需引入高精度的氦质谱检漏技术作为系统优化的核心手段。在生产线检测或定期维修中,向气相管路充入氦气示踪气体,利用氦质谱仪对焊缝、法兰、阀门填料函等可疑部位进行扫描探测。该方法灵敏度可达10的负9次方帕立方米每秒级别,能捕捉到肉眼无法识别的分子级渗漏。结合真空箱法或嗅探法,不仅可以定性定位泄漏点,还能定量分析泄漏率。通过建立基于泄漏率分级的评价体系,对超标部件进行强制更换或返修,确保交付使用的每一台油罐车都具备极高的初始气密性,将运行中的压力衰减风险扼杀在出厂前。

### 4.5 全生命周期智能压力监测预警平台

构建基于物联网的远程监控系统,实现从被动维修向主动预防的转变。在每辆油罐车的关键节点安装高精度绝压传感器与温度传感器,实时采集罐内压力瞬态数据。通过车载终端将数据上传至云平台,利用大数据分析算法建立压力衰减预测模型。系统可根据历史数据自动学习车辆的基线压力曲线,一旦实时压力偏离正常范围或衰减速率异常,即刻向驾驶员与调度中心发送分级预警信息。此外,平台还能结合GPS定位与气象数据,预测不同海拔与气温下的压力变化趋势,为驾驶员提供操作建议。这种数字化运维手段,使得压力稳定性管理从离散的人工检查升级为连续的智能监护。

## 5 未来发展趋势

### 5.1 全生命周期数字化孪生管理

未来油罐车油气回收系统将深度融入数字孪生技术,构建从设计、制造到运营维护的全生命周期数字模型。通过在虚拟空间建立与实体车辆完全一致的数字镜像,实时映射罐体应力、压力波动及密封件老化状态。这种技术将彻底改变传统的被动维修模式,利用历史数据与实时监测信息,在虚拟空间中模拟不同路况、油品及气候条件下的系统性能演变,提前预测潜在的泄漏风险点,实现从根源上预防压力衰减,大幅提升系统的可靠性与运维效率。

### 5.2 新型智能材料与自适应密封结构

材料科学的突破将推动密封技术向自适应方向发展。未来的密封元件将采用具有形状记忆效应的合金材料或自愈高分子复合材料,能够根据接触面的微小形变自动调整密封轮廓,填补因振动产生的间隙。同时,纳米涂层技术将被广泛应用于罐体内壁与管路连接处,形成超低表面能的防护层,不仅防止油品附着腐蚀,还能有效阻隔油气分子渗透。这种软硬件结合的智能材料体系,将从根本上解决极端环境下密封失效引发的系统性压力衰减难题。

### 5.3 基于物联网的远程闭环联控系统

随着5G与卫星通信技术的普及,油罐车将不再是一座信

息孤岛。未来的油气回收系统将将与加油站、油库的卸油鹤管实现智能握手与联锁控制。在装卸油过程中,车载压力数据将实时上传至云端,若检测到压力异常衰减,系统将自动触发联锁装置,暂停作业并发出警报。这种跨主体的远程闭环控制,打破了运输与装卸环节的信息壁垒,实现了全链路的压力稳定性协同管理,确保VOCs气体在转运全程的零逸散。

### 5.4 氢能及新能源混动背景下的技术重构

面对氢能等新能源载运工具的兴起,传统油气回收技术将面临颠覆性重构。针对高压氢气管路极易发生的氢脆泄漏问题,未来的密封与检测技术将向超高真空与惰性气体保护方向发展。同时,针对电动化底盘带来的静音运行特征,系统需配备更高灵敏度的声发射检漏设备以替代传统的人工听漏。技术演进将不再局限于单一的油气回收,而是向多气种、多工况的通用型密闭安全保障体系迈进,以适应能源结构转型的迫切需求。

## 6 结语

综上所述,通过对油罐车油气回收系统压力衰减特性的系统研究,明确了关键泄漏点及其对系统性能的耦合影响机制。提出的优化方案与改进措施,有效解决了传统系统在动态工况下的压力维持难题,显著提升了油气密闭回收率与运输安全性。研究成果不仅为相关标准的修订提供了理论支撑,也为行业实现绿色低碳与安全运营奠定了坚实的技术基础。

## 参考文献:

- [1] 王兴巍,张龙.加油站油气回收系统原理及检测问题浅析[J].仪器仪表标准化与计量,2024,(04):40-42.
- [2] 魏明.油气回收系统对加油机计量的影响分析[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(02):131-133.
- [3] 吴宇.汽车油罐车油气回收系统校准规范.广西壮族自治区,广西壮族自治区计量检测研究院,2021-12-22.
- [4] 张震,曾祥平,崔小平.油气回收系统检测中遇到的问题及解决方法[J].化工设计通讯,2021,47(10):154-155.
- [5] 林星.加油站环境污染现状及其防治措施[J].化工管理,2021,(16):47-48.
- [6] 胡引.贵州省加油站油气回收系统存在的问题及其探讨[J].广州化工,2021,49(01):104-105.
- [7] 毛君峰,王益飞.一种汽车油罐车油气回收检测装置的研制[J].中国计量,2020,(12):87-88.