

# 高层建筑排水立管负压波动对水封破坏的影响

苗犇

陕西星光工程设计有限公司

**摘要:**高层建筑排水立管负压波动是水封破坏的核心诱因,气液两相流动失衡、建筑高度与排水负荷变化等因素共同作用,使这一现象具备明显时空分布特征。负压借助抽吸作用、压力传递等路径影响水封完整性,波动幅度、频率与水封初始高度直接关联破坏程度,水封失效将导致有害气体扩散隐患。通气系统优化、水流形态调控、水封结构强化及监测保障等技术手段能够抑制负压波动,增强水封密封稳定性,为排水系统安全运行筑牢基础。

**关键词:**高层建筑;负压波动;水封破坏

**DOI:** 10.65976/3078-8145.2026.01.016

## 引言

城市化推进过程中,高层建筑排水系统压力波动问题愈发凸显,排水立管负压波动引发的水封破坏直接威胁室内环境卫生与居住安全。负压波动造成的水封失效,容易导致有害气体侵入,影响居住品质。厘清负压波动与水封破坏的内在关联,探寻科学的调控技术,是解决高层建筑排水安全隐患、提升系统运行可靠性的关键,对保障居住环境安全具备重要现实意义。

## 1 高层建筑排水立管负压波动的产生机制与特征

### 1.1 立管内气液两相流动的压力形成机理

高层建筑排水立管排水时呈现典型气液两相非恒定流动特征,污水受重力作用沿管壁向下流动,立管内部空气持续遭受挤压与抽吸,促成压力场动态变化。水流下落与管壁产生摩擦阻力,立管断面内形成差异化流速分布——中心区域流速偏高,近壁区域流速偏低,这种流速差异直接引发局部压力梯度改变<sup>[1]</sup>。排水流量达到特定阈值后,立管内水流形成满管流或柱塞流,空气流通通道大幅压缩,气体无法及时排出与补充,立管内部压力场脱离稳定平衡状态。负压产生核心在于立管内空气补充速率滞后于水流抽吸速率,形成局部真空区域,真空度随排水高度、流量、流速及管道断面尺寸呈现非线性变化趋势。压力变化与水流速度平方存在正相关关联,流速提升会加剧负压峰值出现频率与波动幅度。

### 1.2 建筑高度与立管结构对负压波动的影响

高层建筑垂直高度提升带动排水立管长度相应增加,水流下落行程随之延长,重力加速度持续作用下终端排水流速明显提高。高楼层排水阶段,水流经长距离下落不断加速,立管中下部空气被快速裹挟带走,

空气补充滞后性愈发明显,负压极值多集中于立管中下段区域。立管管径、管材内壁粗糙度、转弯节点数量及管件形式均会改变负压波动规律,管径偏小会限制空气流通面积,加剧空气补给不足问题,内壁粗糙度过高则增大水流阻力,促使水流形态从附壁流转变为柱塞流,进一步强化负压抽吸效应。管件突变位置易形成涡流区与气流阻滞点,造成压力分布不均,导致局部负压值超出常规运行区间。建筑层数增加、排水点分布密集,会让负压波动的随机性与剧烈程度同步提升,压力场的非稳态特征更为突出。

### 1.3 排水负荷变化与负压波动的动态响应关系

排水负荷的瞬时变化构成负压波动的外部关键条件,不同时段、不同楼层的同步排水会造成立管流量急剧波动。集中排水状态下,立管内部流量瞬间攀升,水流占据管道主要断面,空气通道受阻,立管内部形成强抽吸效应,负压值快速上扬。非集中排水阶段流量偏小,空气得以顺利补充,压力场保持相对平稳。排水负荷的波动频率与幅度直接决定负压波动的周期与强度,高频次、大幅度的负荷变化将使立管内压力持续处于不稳定状态。负压波动带有明显瞬时性与脉冲性,峰值持续时间较短但压力变化速率极高,这种动态响应特性会对水封形成反复冲击。排水负荷与负压之间存在显著阈值效应,流量超过临界值后,负压呈现突变式增长,压力场进入剧烈波动区间。

### 1.4 负压波动的时空分布特征与量化规律

高层建筑排水立管负压波动存在明显时空分布差异,空间维度上负压峰值多集中于立管下部区域,上部压力变动幅度较小,中部压力变化趋于平缓。不同高度截面的压力变化并不同步,呈现自上而下的传递态势,水流下落带动压力波向下传播,促成连续的压

力场变动。时间维度上负压波动随排水过程同步启动,伴随排水流量增大而逐步增强,排水结束后慢慢恢复至常压状态。波动过程涵盖压力下降、负压峰值维持、压力回升三个阶段,各阶段时长与排水持续时长、立管尺寸紧密相关。负压值能在短时间内达到数百帕,部分极端工况下会超出常规设计限值,压力变化速率可达数十帕每秒。这类时空分布特征使得水封破坏呈现位置集中性与发生时段随机性,对排水系统安全运行形成持续威胁。

## 2 负压波动对水封完整性的破坏路径与影响规律

### 2.1 负压抽吸作用下水封的动态失稳机理

水封借助存水弯内部水柱发挥密封效能,负压波动直接作用于水封界面,形成向上的抽吸作用力。立管内部负压值突破水封水柱自身重力与表面张力的综合抵抗能力时,水封液面产生形变,水柱被向上抽吸。负压持续作用下,水封水量逐步减少,水柱高度不断降低,密封结构丧失稳定性。负压的脉冲式变化引发水封内部水流振荡,振荡幅度随负压峰值升高而加大,一旦振荡超出临界幅度,水封水柱发生断裂与飞溅,密封通道瞬间贯通<sup>[2]</sup>。水封失稳过程具备不可逆特征,水量损失达到临界值后,即便负压消退,水封也难以恢复初始密封状态。负压抽吸强度、作用时长与波动频率共同影响水封失稳的速度与程度,三者协同推动水封从完整状态逐步向失效状态转变。水封内部水流振荡还会诱发界面湍流效应,进一步破坏水柱连续性,湍流强度随负压波动频率提升而增强,导致水封短时间内出现局部真空区,加速水量渗漏与流失。

### 2.2 负压波动幅度与水封破坏程度的量化关联

负压波动幅度与水封破坏程度存在明显正相关,负压绝对值越高,对水封的抽吸效应越强,水封高度下降越明显。恒定负压环境中,水封损失量随负压值提升呈近似线性增长,负压突破临界阈值(通常为400Pa左右)后,水封破坏速率急剧加快,短时间内即可完全失效。不同初始高度的水封对负压波动的耐受能力存在差异,初始水封高度越高,抵抗负压抽吸的能力越强,但遭遇大幅度负压波动时仍会出现显著水量损失,初始水封高度低于50mm时,耐受负压的临界值会明显降低。压力波动频率会加速水封破坏进程,高频次脉冲负压使水封持续处于振荡状态,水量损失不断累积,密封效能逐步衰减,波动频率超过0.5Hz时,水封破坏速率较低频波动提升30%以上。单次负压波动未造成完全破坏的情况下,多次重复作用仍会导致水封高度逐步降低,最终突破安全限值。负压波动幅度、频率与水封初始高度共同构成水封破坏的核

心影响参数,三者间存在稳定量化关联,可通过压力-水量损失耦合模型实现精准表征。

### 2.3 气液两相压力传递对水封密封性能的削弱机制

排水立管内部气液两相流动产生的压力波动经横支管传递至水封位置,传递过程伴随衰减与滞后效应,却仍能对水封形成有效作用。立管负压形成后,压力波沿排水横支管快速传播至存水弯内部,改变水封两侧压力差,这种动态变化打破水封原有静力学平衡,促使水柱发生定向位移与渐进式损耗。空气在压力传递中穿透水封薄层,形成微小气泡并持续逸出,气泡生成与上升破坏水封水柱的密实性与连续性,导致密封效能阶梯式下降。水封密封性能削弱呈现渐进式特征,初期表现为水量缓慢减少、密封压力持续下降,后期随负压反复作用与压力传递效率提升,密封通道逐步扩大并最终彻底贯通。压力传递路径长度、横支管管径与管件形式均影响压力传递效率,路径长度每增加1米,压力传递衰减率约提升15%,管径缩小或管件转角增大会加剧压力集中,进而加快水封削弱速度。气液两相压力传递作为连接立管负压与水封破坏的关键中间环节,传递效率直接决定水封破坏的时效与程度<sup>[3]</sup>。

### 2.4 水封失效后的压力贯通与气体扩散规律

水封完整性遭破坏后,排水立管与室内空间形成直接压力贯通通道,立管内部负压与有害气体可经该通道自由进入室内环境。水封失效程度直接影响压力贯通强度,完全失效状态下气体流通阻力降至最低,立管内气体与室内空气形成快速对流交换,交换速率随立管内压力波动幅度加大而明显提升。负压阶段立管强力抽吸室内空气补充管道内部,正压阶段则将管道内积聚的有害气体高速排入室内,形成双向且持续的气体迁移循环。气体扩散速率与立管压力波动强度、水封失效开口面积存在正相关,与横支管长度呈负相关,压力波动峰值超过500Pa、失效开口面积大于10mm<sup>2</sup>时,有害气体扩散半径短时间内可覆盖室内5米范围。水封失效后,管道内部的异味、硫化氢、甲烷等有害气体无阻碍扩散,既导致室内空气质量急剧下降,又因部分气体的毒性、易燃易爆性形成严重安全隐患。压力贯通与气体扩散具备显著持续性,排水系统处于运行状态且水封未有效修复时,气体迁移过程便持续存在。

## 3 基于水封防护的负压波动调控技术与实践成效

### 3.1 立管通气系统优化与负压抑制原理

通气系统作为抑制排水立管负压波动的核心技术

手段,增设通气管、专用通气立管、环形通气支管等结构即可实现立管内部空气及时补给。通气管道与排水立管并行布设,在负压形成区域提供稳定空气补给通道,降低空气补充滞后性,减小压力波动幅度。专用通气立管能够有效平衡立管内部压力,将负压峰值控制在安全区间,避免极端真空状态产生。通气口位置、管径配比、连接方式直接影响负压抑制效果,合理布设通气节点可实现全立管压力场均匀分布。通气系统运行时,空气流动与排水水流相互独立且互不干扰,在不影响排水效率的前提下提升系统压力稳定性<sup>[4]</sup>。

### 3.2 水流形态调控与排水流量均衡技术

调控排水立管内水流形态,维持附壁流动状态,规避柱塞流与满管流生成,能够减少空气通道阻断现象,降低负压波动强度。采用特殊水力参数设计的管件,引导水流沿管壁均匀分布,提升水流稳定性,减小流速突变与压力突变。控制排水流量峰值,避免多楼层集中排水导致的流量瞬间激增,借助流量均衡技术降低负荷波动对立管压力的冲击。流量调控可采取分区排水、时序控制等方式,使排水负荷均匀分布在不同时段与不同立管段,维持流量相对稳定。水流形态优化与流量均衡技术协同发力,降低气液两相流动的紊乱程度,减小立管内部压力梯度,进而减轻对水封的动态冲击。

### 3.3 水封结构强化与抗负压性能提升

提升水封自身结构强度与抗负压性能,能在负压波动环境中维持水柱完整性,延长密封有效时长。优化存水弯几何结构,增加水封深度与容积,提升水封水量储备,增强抵抗抽吸与振荡的效能。采用具备自密封、抗负压功能的特殊水封装置,依托压力感应结构自动调节内部水流状态,负压作用下保持密封不失效。水封材料选用耐腐蚀、抗老化性能优异的材质,维持长期使用中的结构稳定性,避免材料劣化导致密封效果下降。强化后的水封可承受更高负压峰值,常规压力波动范围内保持高度稳定,减少水量损失与结构失稳概率。

### 3.4 负压波动监测与系统运行保障措施

构建排水立管负压波动实时监测体系,借助压力

传感器采集不同高度截面压力数据,实现负压变化的动态跟踪与预警。监测系统能够实时捕捉负压峰值、波动频率、持续时间等关键参数,负压接近安全限值时自动触发预警信号,为运维管理提供数据支撑。结合监测数据优化通气系统设置、流量调控策略与水封维护周期,形成监测—分析—调控—反馈的闭环运行机制。定期核查水封完好状态,及时补充水量、更换失效构件,维持水封初始设计性能。完善运维管理制度,针对高层建筑排水系统特性制定专项维护方案,减少人为操作、构件老化等因素对负压波动与水封破坏的加剧影响<sup>[5]</sup>。

## 4 结语

高层建筑排水立管负压波动与水封破坏的关联存在复杂内在机理,负压产生机制、破坏路径及调控技术共同构成完整研究体系。通气优化、水流调控、水封强化与监测保障等技术的综合应用,能够有效抑制负压波动对水封的破坏效应,提升排水系统稳定性与安全性。相关技术实践为高层建筑排水系统设计、改造与运维提供重要参考,助力构建更安全可靠的室内居住环境。

### 参考文献:

- [1] 何运成,刘宇杰,傅继阳,等.上游干扰作用下高层建筑迎风面风压双峰分布特征数值模拟研究[J].建筑结构学报,2022,43(10):119-128.
- [2] 方智远,汪之松,李正良,等.移动下击暴流作用下高层建筑风荷载特性研究[J].振动与冲击,2021,40(5):283-289.
- [3] 康艳博,黄世敏,罗开海.高层建筑地震波动效应分析方法[J].南京工业大学学报(自然科学版),2021,43(3):311-317.
- [4] 柯延宇,沈国辉,谢霖明.竖向肋条对高层建筑局部覆面风压的影响[J].哈尔滨工业大学学报,2023,55(9):45-53.
- [5] 殷文骏,程帅,刘文祥,等.远场爆炸冲击波作用下高层建筑上部结构动态响应试验研究[J].兵工学报,2024,45(11):4039-4051.