

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.17.011

# 顶部通气方式对专用通气排水系统的影响

朱诗慧<sup>1</sup>, 张哲<sup>2</sup>, 赵珍仪<sup>2</sup>, 张勤<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400030; 2. 国家住宅与居住环境工程技术研究中心, 北京 100044)

**摘要:** 在122.9 m高的足尺实验塔上,采用定流量法,对H管件每层连接的专用通气排水系统在排水立管顶部通气方式不同时(伸顶通气或侧墙通气)进行比对实验,探究顶部通气方式对排水系统内压力、通风流量的影响,从而研究其对专用通气排水系统排水能力的影响。结果表明:相比伸顶通气,采用侧墙通气会导致系统最小压力 $P_{\min}$ 减小,进入专用通气立管顶部的通风流量 $Q_2$ 减小,排水能力下降。

**关键词:** 专用通气排水系统; 顶部通气方式; 排水能力; 伸顶通气; 侧墙通气; 通风流量

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)17-0062-07

## Influence of Top Ventilation Mode on Special Ventilation and Drainage System

ZHU Shi-hui<sup>1</sup>, ZHANG Zhe<sup>2</sup>, ZHAO Zhen-yi<sup>2</sup>, ZHANG Qin<sup>1</sup>

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. China National Engineering Research Center for Human Settlements, Beijing 100044, China)

**Abstract:** On a full scale experimental tower with height of 122.9 m, special ventilation and drainage system with H pipe connected each floor with different ventilation modes (extended top ventilation or side wall ventilation) at the top of the drainage pipe was compared. The influence of the top ventilation modes on pressure and ventilation flow in the drainage system was explored, so as to study its effect on the drainage capacity of the special ventilation and drainage system. Compared with extended top ventilation, side wall ventilation led to a reduction of the minimum pressure ( $P_{\min}$ ), ventilation flow ( $Q_2$ ) into the top of the special vertical vent and drainage capacity of the system.

**Key words:** special ventilation and drainage system; top ventilation mode; drainage capacity; extended top ventilation; side wall ventilation; ventilation flow

根据国家2009年版《建筑给水排水设计规范》(GB 50015—2003),体育馆、剧院等屋顶采用特殊结构材料、通气管无法穿越屋面伸顶时,首先应采用侧墙通气和汇合通气;研究表明在伸顶通气排水系统中,伸顶通气管处通风流量随着通气管长度、粗糙度的增加而减小<sup>[1]</sup>,那么专用通气排水系统的通风

流量是否与这些因素有关?本研究采用定流量法,对专用通气排水系统在分别采用伸顶通气、侧墙通气以及在侧墙通气的基础上扩大横向通气管径并向上伸出“屋顶”3种工况进行了比对实验,探究了顶部通气方式对专用通气排水系统通风流量和排水能力的影响。

基金项目: 青海省科技计划项目(2019-SF-125)

## 1 实验系统与方法

### 1.1 实验管道系统

实验在国家住宅工程中心——万科建研中心超高层足尺实验塔上进行。

搭建1套33层高(层高为3.0 m)的专用通气排水系统,排水系统模拟高度为104.1 m。实验系统(工况1)如图1所示。

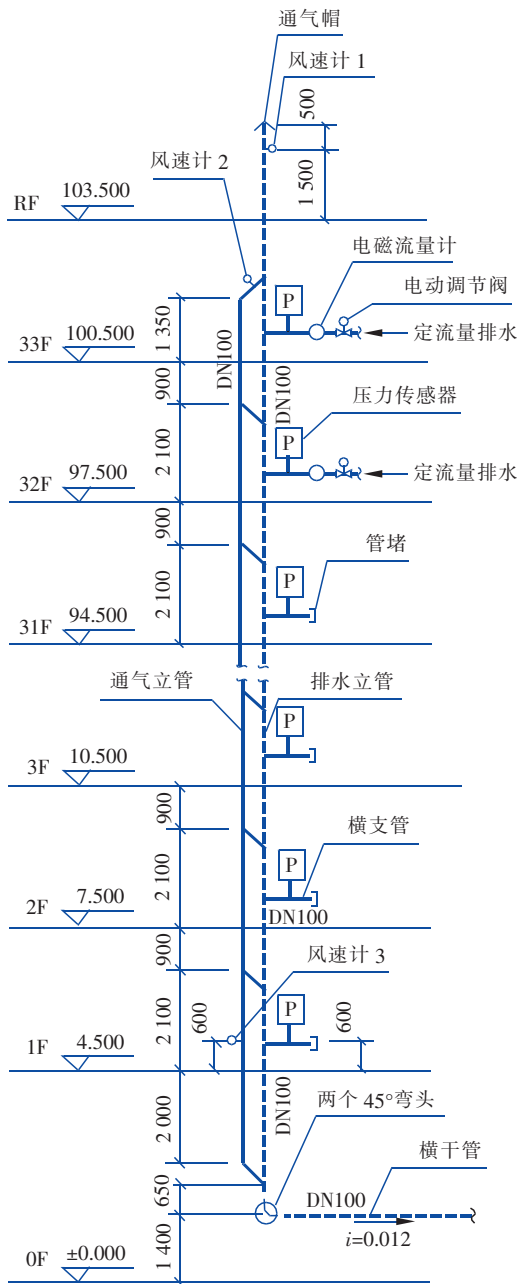


图1 工况1系统示意

Fig. 1 Test system for operating mode 1

排水立管、通气立管以及横支管均为DN100的

PVC-U光壁塑料管,通气立管与排水立管之间采用DN100的H管件每层连接;横支管与排水立管采用顺水三通连接,除排水层外,其余各层横支管末端采用堵头封堵。排水横干管为DN100的透明光壁塑料管,与排水立管之间采用两个45°弯头连接,以 $i=0.012$ 的坡度坡向回用水箱。

根据顶部通气方式的不同(安装示意图2)分为如下3种工况:工况1为伸顶通气,通气管总长度(以通气管超出屋面的长度计,下同)为2 m,采用DN100伞状通气帽;工况2为侧墙通气,通气管总长度为5.8 m,采用DN100蘑菇形通气帽,参照《建筑排水设备附件选用安装》(04S301)中侧墙式通气帽甲型安装图,要求蘑菇形通气帽距外墙不小于50 mm,如图3(a)所示,工况2蘑菇形通气帽距建筑外墙75 mm,如图3(b)所示;工况3在侧墙通气的基础上扩大横向通气管管径,并向上伸出“屋顶”,通气管总长度为6.4 m,采用DN150伞状通气帽,通气管横管靠近排水立管的前1.0 m管径为DN100,用大小变径接头将通气横管扩径为DN150。

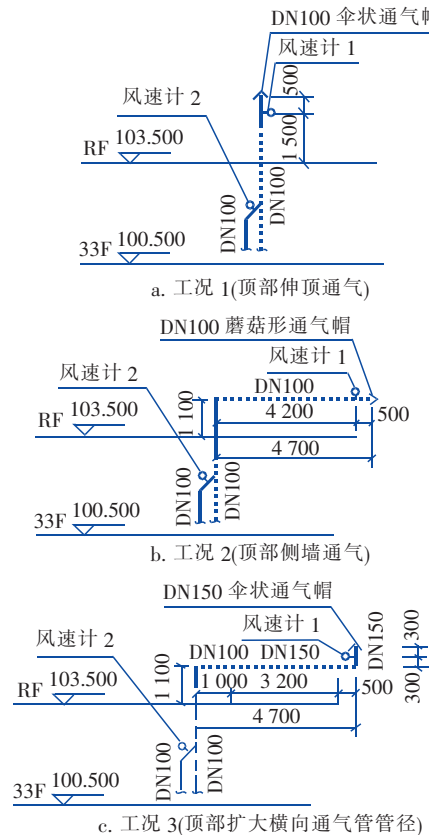
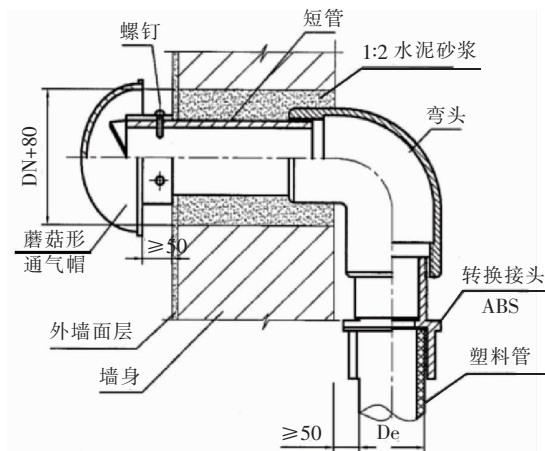
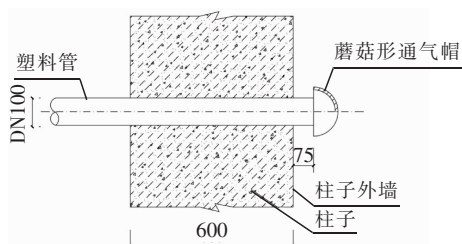


图2 工况1~3的管道顶部通气方式安装示意

Fig. 2 Top ventilation mode of operating mode 1-3



a. 侧墙式通气帽(甲型)安装示意



b. 工况2侧墙式通气帽安装示意

图3 侧墙式通气帽安装示意

Fig. 3 Installation diagram of side wall ventilation cap

## 1.2 实验装置及仪器

每层排水层均设有1套定流量排水装置,包括1台可以远程自动控制的电动调节阀和1台高精度电磁流量计,测量范围为0.3~12 m/s,测量精度为 $\pm 0.5\%$ 。排水层每层最大排水流量为2.5 L/s。实验采集时长为120 s,采集周期为20 ms。

实验时除排水层外,测试层每层的排水横支管距立管中心500 mm处均安装GE DruckPTX610双向式压力传感器,测量范围为 $\pm 10$  kPa,测量精度为 $\pm 0.08\%$ ,采集周期为20 ms。

每种工况下安装3个风速计,分别位于排水立管顶部通气部分(风速计1)、通气立管与排水立管通气部分连接顶端的斜三通上(风速计2)、通气立管1F处(风速计3),具体安装位置见图1、2。安装时保证风速计探针位于管道截面中心。在预实验中曾将风速计3安装于通气立管下端与排水立管连接的斜三通处,但由于该处时而有水向上溅出易导致风速计失灵,故将风速计3安装于通气立管1F处。实验采用Delta Ohm HD2903T02风速传感器,测量范围为0~20 m/s,采集周期为0.5 s,采集时长为

140 s。选取实验开始40~120 s的通气流量,计算其平均值,得到各排水流量下的平均通气流量。

## 1.3 实验方法及判定标准

实验方法参考行业标准《住宅生活排水系统立管排水能力测试标准》(CJJ/T 245—2016)中的定流量法,排水层最大排水流量为2.5 L/s;判定标准为:排水系统内最大压力 $P_{\text{max}}$ 不得大于400 Pa、排水系统内最小压力 $P_{\text{min}}$ 不得小于-400 Pa。实验中以系统压力波动达到压力判定值时的排水流量为该工况的排水能力。

实验步骤如下:气密性检测→定流量排水→压力测试→分析各工况排水能力和通气流量。

## 2 结果与分析

### 2.1 顶部通气方式对排水系统内压力的影响

工况1~3在不同排水流量下的 $P_{\text{max}}$ 和 $P_{\text{min}}$ 如图4所示。可以看出,各工况下系统最大压力 $P_{\text{max}}$ 随着排水流量的增大而增大,系统最小压力 $P_{\text{min}}$ 随着排水流量的增大而减小。工况1、3的系统最大压力 $P_{\text{max}}$ 略大于工况2;系统最小压力 $P_{\text{min}}$ 大小则是工况1与工况3相差不大,均大于工况2。

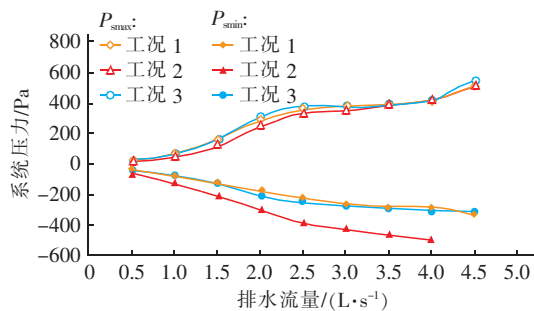


图4 不同排水流量下各工况系统最大、最小压力

Fig. 4 Maximum and minimum pressure of system under different discharge conditions

通过图4发现,改变顶部通气方式对各个排水流量下 $P_{\text{max}}$ 和 $P_{\text{min}}$ 均有影响。各工况在排水流量 $Q_w$ 为4.0 L/s时的横支管压力 $P$ 分布如图5所示。可以看出,3种工况下横支管压力 $P$ 变化趋势相同:各楼层横支管的最大压力 $P_{\text{max}}$ 总体上是随着高度的降低而增大,在1F处达到系统最大,其中工况2变化幅度更大;各楼层横支管的最小压力 $P_{\text{min}}$ 随高度变化趋势平缓,其中工况1和工况3各楼层最小压力在-300~-200 Pa之间,工况2各楼层最小压力在-500~-400 Pa之间。

结合图4、5发现,当顶部通气方式由伸顶通气

变为侧墙通气时,对1F最大压力影响不大,即对系统最大压力影响不大,但会缓解除1F外其余楼层横支管的最大压力;同时所有楼层横支管的最小压力减小,系统最小压力也相应减小。相比于侧墙通气,当顶部通气方式在侧墙通气基础上扩大横向通气管管径时,系统各楼层横支管的最小压力值增大,在系统上、中部各楼层横支管最大压力也增大。

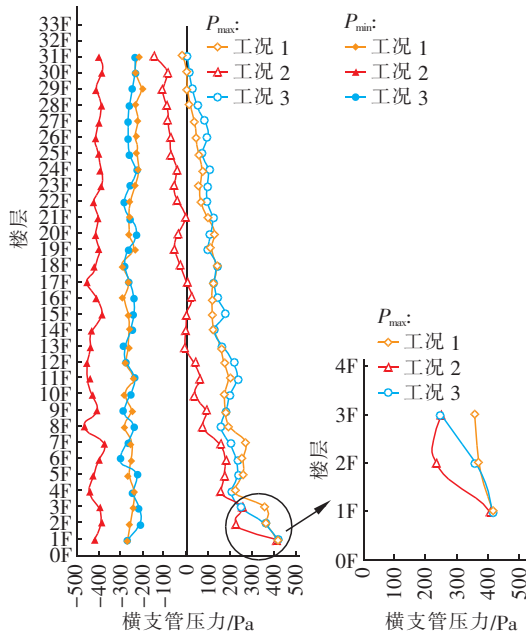


图5 各工况在排水流量为4.0 L/s时各层横支管最大压力和最小压力分布

Fig.5 Maximum and minimum pressure of each floor horizontal branch of different operating modes with constant flow rate of 4.0 L/s

## 2.2 顶部通气方式对系统通风流量的影响

造成工况2的压力分布不同于工况1和工况3的原因可能是:顶部通气方式的不同导致系统内部各处的通风量不同,于是对各工况的通风流量进行分析。

根据顶部气象站记录在实验期间以多云为主,没有出现特殊气象,且气象条件没有大幅度变化,为1~2级北风。工况2、3横向通气管的安装方向为东西方向(见图2),可以忽略气象差异对通风流量的影响。为方便描述,将各风速计处的通风流量定义为 $Q_{i-j}$ ,其中 $i$ 表示风速计所处位置, $j$ 为工况编号(见图6),排水流量记为 $Q_w$ ,通气管内气流方向参考课题组以往研究成果<sup>[2]</sup>。选取空气进入管口处为基准面0—0;33F排水横支管以下、H管件以上

的某排水立管处为断面1—1;32F排水横支管与排水立管交界处为断面2—2。

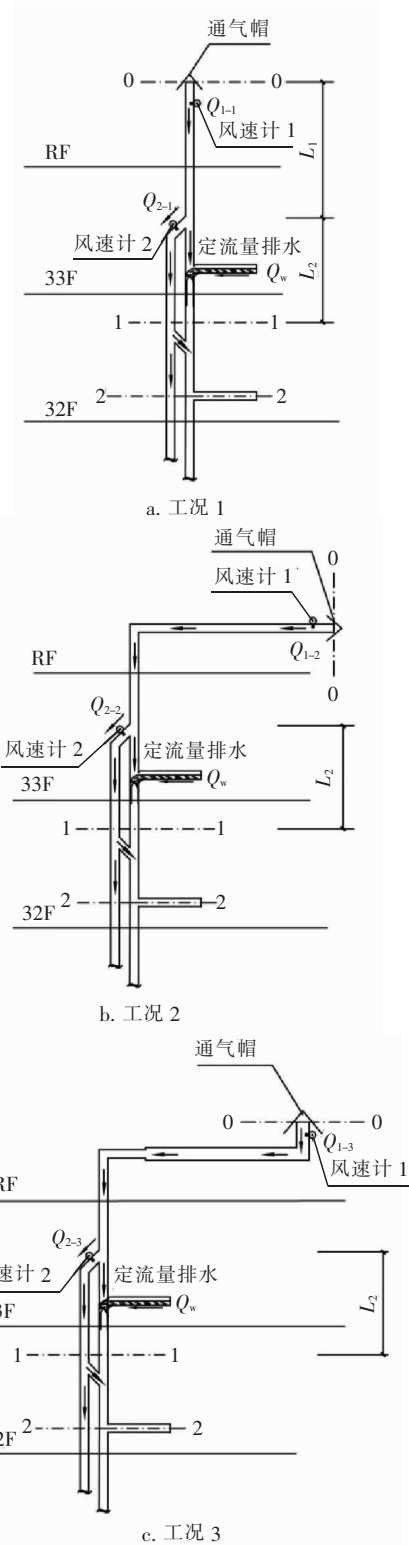


图6 各工况下通风流量示意

Fig.6 Schematic diagram of ventilation flow rate under different operating modes



## ① 系统各处通气流量随排水流量的变化趋势

图7是 $Q_1$ 随 $Q_w$ 的变化曲线。可以看出,当排水流量较小( $Q_w < 3.0 \text{ L/s}$ )时,各工况的 $Q_1$ 随 $Q_w$ 的增大而增大;而当排水流量逐渐增加( $3.0 \text{ L/s} \leq Q_w \leq 4.0 \text{ L/s}$ )时, $Q_1$ 随 $Q_w$ 的增长趋势逐渐稳定;当 $Q_w > 4.0 \text{ L/s}$ 时,工况3的 $Q_1$ 随 $Q_w$ 的增大而减小,工况1同样存在减小趋势,但不明显。

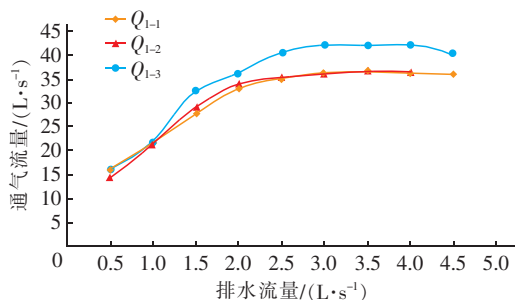
图7 各工况下 $Q_1$ 随排水流量的变化曲线

Fig. 7 Variation of  $Q_1$  with drainage flow rate under different operating modes

$Q_1$ 均是先随着 $Q_w$ 的增加而增加,然后逐渐稳定,最后可能会减小。这可能是因为:当 $Q_w$ 较小时,水舌阻力作用不明显,此时气、水表面的切应力是气体流动的主要动力。 $Q_w$ 增大,水流下降速度增大,导致切应力变大,大于水舌阻力,此时 $Q_1$ 随 $Q_w$ 的增大而增大<sup>[3]</sup>;随着 $Q_w$ 逐渐增大,在使气水表面剪切力增大的同时也使得排水层三通处水舌阻力增大,两种力的相互作用使 $Q_1$ 达到稳定状态;当 $Q_w$ 继续增大,水舌对空气的阻力作用大于剪切力的动力作用时,通气流量有减小趋势。

图8是 $Q_2$ 随 $Q_w$ 的变化曲线。可以看出,3种工况下,排水量为 $2.0 \text{ L/s}$ 是一个转折点。

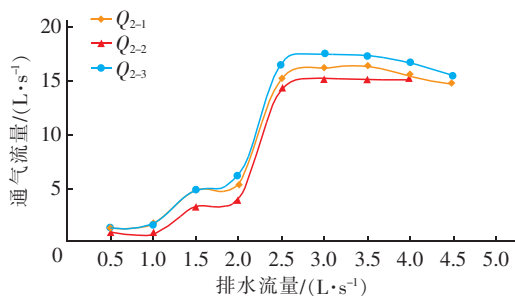
图8 各工况下 $Q_2$ 随排水流量的变化曲线

Fig. 8 Variation of  $Q_2$  with drainage flow rate under different operating modes

当 $Q_w < 2.0 \text{ L/s}$ 时,各工况下 $Q_2$ 随 $Q_w$ 的增长

率均较平缓,且数值较小;当 $2.0 \text{ L/s} \leq Q_w \leq 2.5 \text{ L/s}$ 时, $Q_2$ 随 $Q_w$ 的增长率陡然增大,这与水流在33F三通处形成的水舌有关,随着排水流量增大,水舌阻力也就增大,这时气流绕开水舌,向通气立管内流动;当 $Q_w > 2.5 \text{ L/s}$ 时, $Q_{2-1}$ 、 $Q_{2-3}$ 均是先增大后减小, $Q_{2-2}$ 则是先增大后逐渐稳定。

根据连续性方程,排水立管1—1断面处的空气流量 $Q_p = Q_1 - Q_2$ ,于是绘制出各工况下 $Q_p$ 随 $Q_w$ 的变化曲线,如图9所示。当 $Q_w < 2.0 \text{ L/s}$ 时, $Q_p$ 随 $Q_w$ 的增大而增大;当 $2.0 \text{ L/s} \leq Q_w \leq 2.5 \text{ L/s}$ 时, $Q_p$ 随 $Q_w$ 的增大而减小,这可能是因为随着 $Q_w$ 的增大,水舌面积增大,气流通道的减小;当 $Q_w > 2.5 \text{ L/s}$ 时, $Q_p$ 随 $Q_w$ 的变化较平缓,这可能与实验中设定单层最大排水流量为 $2.5 \text{ L/s}$ ,当 $Q_w > 2.5 \text{ L/s}$ 时增加下一层作为排水层有关,当增加排水流量后,33F排水量不变,其水舌阻力也可认为不变。

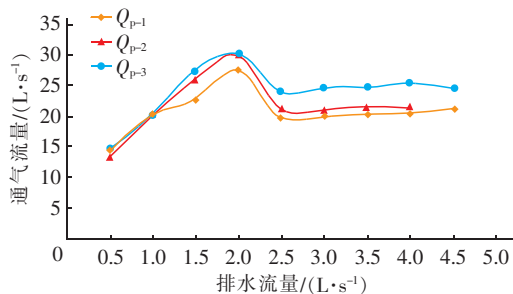
图9 各工况下 $Q_p$ 随排水流量的变化曲线

Fig. 9 Variation of  $Q_p$  with drainage flow rate under different operating modes

$Q_3$ 随 $Q_w$ 的变化曲线如图10所示。当 $Q_w \leq 3.5 \text{ L/s}$ 时,各工况下 $Q_3$ 均随着 $Q_w$ 的增大而增大;而当 $Q_w > 3.5 \text{ L/s}$ 时,各工况的 $Q_3$ 呈现缓慢下降的趋势。

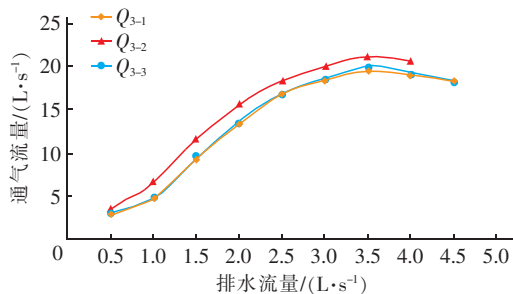
图10 各工况下 $Q_3$ 随排水流量的变化曲线

Fig. 10 Variation of  $Q_3$  with drainage flow rate under different operating modes

## ② 各处通气流量与系统内压力的关系

通气管内的气流方向参考课题组以往研究成果<sup>[2]</sup>:在排水层及其以下几层,专用通气管内气流向下运动;系统中、下部专用通气立管内气流方向总体是由下向上运动,但有个别楼层存在气流频繁往复现象。在仅伸顶通气的排水立管中(顶部集中负荷排水),由于水舌产生负压、横干管水跃产生正压,使得排水系统内从上至下由负压区逐渐过渡到正压区。当专用通气立管通过H管件与排水立管连接,可以近似认为相同高度下各层通气立管内的压力与该层排水立管内压力相等。水流由横支管进入排水立管,在排水立管中水流携带气体向下运动,为补充携气水流造成的真空,在排水层及其以下几层的排水立管和通气立管内气流均向下运动;又由于排水立管内压力是随着高度的下降而增大的,同样由于压差作用,在系统中、下部通气立管内气体向上运动。在风速计3的位置处安装“风向摆片”,发现1F通气立管内气体向上运动。 $Q_3$ 大小印证了这一说法: $Q_{3-2} > Q_{3-1} \approx Q_{3-3}$ ,这可能与工况2系统1F处的压力梯度大于工况1和工况3有关(见图5)。

空气在0—0与1—1(见图6)两断面上的能量方程为:

$$\frac{\rho v_0^2}{2} + P_0 = (\varepsilon + \lambda \frac{L_1}{d_1}) \frac{\rho v_a^2}{2} + (\lambda \frac{L_2}{d_j} + K) \frac{\rho v_1^2}{2} + \frac{\rho v_1^2}{2} + P_1 \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为空气密度,kg/m<sup>3</sup>;  $v_0$ 、 $P_0$ 、 $v_1$ 、 $P_1$ 分别为0—0、1—1断面处的空气流速(m/s)及相对压力(Pa);  $\varepsilon$ 为管顶空气入口处的局部阻力系数,一般取0.5;  $\lambda$ 为管壁总摩擦系数,包括沿程损失和局部损失;  $L_1$ 为从管顶到“T”三通分流处长度,m;  $d_1$ 为 $L_1$ 长度管段内径,m;  $L_2$ 为从“T”三通分流处到1—1断面处长度,m;  $d_j$ 为排水立管内径,m;  $v_a$ 为 $L_1$ 长度管段内空气流速,m/s;  $K$ 为水舌阻力系数。

管顶空气入口处空气流速和相对压力很小,为简化计算,令 $v_0=0$ 、 $P_0=0$ ,整理式(1)得:

$$P_1 = -\rho [(\varepsilon + \lambda \frac{L_1}{d_1}) \frac{v_a^2}{2} + (\lambda \frac{L_2}{d_j} + K + 1) \frac{v_1^2}{2}] \quad (2)$$

各工况下 $v_a = Q_1/A_1$ 、 $v_1 = Q_p/A_2$ 。其中, $A_1$ 为空气入口处气流通道面积,m<sup>2</sup>;  $A_2$ 为排水立管内气流通道面积,m<sup>2</sup>。代入式(2)有:

$$P_1 = -\frac{\rho}{2} [(\varepsilon + \lambda \frac{L_1}{d_1}) \cdot (\frac{Q_1}{A_1})^2 + (\lambda \frac{L_2}{d_j} + K + 1) \cdot (\frac{Q_p}{A_2})^2] \quad (3)$$

结合图7~9可知,3种工况的 $Q_1$ 与 $Q_p$ 大小为:当 $Q_w \leq 1.0$  L/s时,3种工况下 $Q_1$ 与 $Q_p$ 均相差不大;当 $Q_w > 1.0$  L/s时, $Q_{1-1} \approx Q_{1-2} < Q_{1-3}$ , $Q_p$ 大小排序为工况1 < 工况2 < 工况3。3种工况下,由于工况1的 $L_1=3.2$  m、工况2的 $L_1=7.0$  m、工况3的 $L_1$ 包括4.3 m的DN150管和3.3 m的DN100管,各工况的 $L_2$ 相等,则根据式(3)计算得 $P_1$ 的大小关系为:工况3 < 工况2 < 工况1。而从1—1断面到2—2断面之间,有气体通过H管件由专用通气立管向排水立管内补气(见图6),可以缓解在水舌下方产生的负压,3种工况专用通气立管在系统上部向排水立管内的补气量与 $Q_2$ 呈正相关,大小为: $Q_{2-2} < Q_{2-1} < Q_{2-3}$ ,导致2—2断面处 $P_2$ 的大小关系为:工况2 < 工况3  $\approx$  工况1。

对于伸顶通气排水系统,Wise等<sup>[4]</sup>把动量方程和连续性方程用于排水立管内的气核流:

$$Q_a = f(Q_w, D, K_p, \frac{\Delta P}{\Delta L}) \quad (4)$$

此式定性地揭示出:气量 $Q_a$ 与水量 $Q_w$ 、管径 $D$ 、管壁粗糙度 $K_p$ 、管内压力梯度 $\frac{\Delta P}{\Delta L}$ 有关。各专用通气排水系统中 $Q_{1-1} \approx Q_{1-2} < Q_{1-3}$ ,说明增加顶部通气管长度、通气管转弯对 $Q_1$ 影响不大,通气横管扩径为DN150后, $Q_1$ 增大。 $Q_{p-1} < Q_{p-2} < Q_{p-3}$ ,这可能是因为:在0—0与1—1断面之间,工况2、3顶部通气管长度增加和转弯,使得空气的沿程阻力和局部阻力均增大,排水立管内压力梯度增大,使得 $Q_p$ 增大。由气体的连续性方程可知,在 $Q_1$ 一定的情况下, $Q_p$ 增大、 $Q_2$ 减少,导致 $Q_{2-2} < Q_{2-1}$ ;而工况3由于扩大了顶部通气管管径,有 $Q_{1-1} < Q_{1-3}$ ,使得 $Q_w < 2.5$  L/s时 $Q_{2-3} \approx Q_{2-1}$ , $Q_w > 2.5$  L/s时 $Q_{2-1} < Q_{2-3}$ 。

### 2.3 顶部通气方式对系统排水能力的影响

对比3种工况可以看出,工况1和工况3的排水能力为4.0 L/s,最大压力(分别为417、419 Pa)先达到判定条件;工况2的排水能力为3.0 L/s,最小压力(-422 Pa)先达到判定条件。对比分析发现,3种工况的系统最大压力 $P_{\text{max}}$ 相差不大,造成工

况2最小压力先达到判定条件的原因可能是:采用侧墙通气时,顶部通气管长度增加,通气管转弯虽然对系统顶部进气量 $Q_1$ 没有影响,但会使通气立管顶部进气量 $Q_2$ 减小,最后结果导致所有横支管的最小压力 $P_{\min}$ 和系统最小压力 $P_{s\min}$ 大幅度增大。

### 3 结论与建议

① 对于专用通气排水系统,系统顶部通气流量 $Q_1$ 主要受顶部通气管管径、气水剪切力和水舌阻力的影响,受系统最小压力的影响不大。当扩大顶部通气管管径时, $Q_1$ 会增大,而增加通气管长度、通气管转弯对其影响不大;随着排水流量 $Q_w$ 增大,在气水剪切力和水舌阻力的共同作用下, $Q_1$ 先增大后逐渐稳定最后有减小趋势。

② 当顶部采用不同的通气方式时,会对进入专用通气立管顶部的通气流量 $Q_2$ 产生影响,侧墙通气相比伸顶通气由于顶部通气管长度的增加和转弯会使得 $Q_2$ 减小;当在侧墙通气的基础上扩大横向通气管管径并向上伸出“屋顶”时,会使 $Q_2$ 增大。

③ 顶部通气方式不同会对系统的排水能力产生影响,相比伸顶通气,采用侧墙通气时会导致所有横支管的最小压力 $P_{\min}$ 和系统最小压力 $P_{s\min}$ 大幅度减小,排水能力减小。相较于侧墙通气,扩大横向通气管管径可使进入通气立管内的通气流量增大,向排水立管内补气充足,系统内的最大压力和最小压力与伸顶通气基本一致,其通水能力也与伸顶通气一样。

在实际工程中,如遇到专用通气排水系统需要采用侧墙通气方式时,可以考虑适当扩大顶部通气管管径,以增大系统进气量,保证排水能力。

### 参考文献:

- [1] Campbell D P, Macleod K D. Investigation of the causative factors of air flow entrainment in building

drainage-waste-ventilation systems[J]. Building Services Engineering Research & Technology, 1999, 20(3): 99 - 104.

- [2] 李博远,赵珍仪,张哲,等. 专用通气排水系统通气机理研究初探[J]. 中国给水排水, 2017, 33(21): 133 - 138.

Li Boyuan, Zhao Zhenyi, Zhang Zhe, et al. Preliminary study on ventilation mechanism of specific vent stack drainage system[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(21): 133 - 138 (in Chinese).

- [3] 彭海龙,张勤,赵世明,等. 关于单立管系统通气流量影响因素的试验研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32(5): 127 - 130.

Peng Hailong, Zhang Qin, Zhao Shiming, et al. Influence factors of air flow for single stack drainage system[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(5): 127 - 130 (in Chinese).

- [4] Wise A F, Swaffield J A. Water, Sanitary and Waste Services for Buildings [M]. New York: Longman Scientific & Technical, 2002.



作者简介:朱诗慧(1995 - ),女,湖北天门人,硕士研究生,研究方向为建筑给水排水。

E-mail: 1391550215@qq.com

收稿日期:2019-03-22

幸福生活靠奋斗,美丽河湖靠呵护