

## 高层建筑楼梯间正压送风方式的浅析

刘 忠

(中国科学技术大学 合肥 230026)

龚敏枫 佟海涛 赵克伟

(北京市消防局 北京 100035)

### 摘 要

本文对建筑防火设计中正压送风系统的系统设计和送风方式进行了详尽的阐述。文章中列举了封闭楼梯间和防烟楼梯间的送风量计算方法,并针对目前两种主要送风方式,即点式送风与竖井送风方式的特点,从理论上分析点式送风方式的应用前景。作者们还对北京西苑饭店主楼和北京新世纪饭店主楼等高层和超高层的大型建筑进行两种不同方式的楼梯间正压送风试验,进行了点式送风方式和竖井送风方式的对比试验,精确地测量了点式送风方式下的楼梯间正压送风风量、风压情况,并对测试结果进行了比较和分析。文章通过对楼梯间正压送风系统设计送风、送风方式等的理论分析和试验对比,说明了在楼梯间正压送风系统设计中心点式送风方式具有经济、有效、合理等特点,是一种适于在高层建筑防火防烟设计中广泛使用的正压送风方式。

### 1. 引言

根据我国《高层建筑防火设计规范》的要求。凡是超过二十四米的地上建筑均应设置封闭楼梯间或防烟楼梯间,并在其内应设有必要的防排烟设施。对于不能或不宜自然通风的楼梯间,通常采用向楼梯间机械加压送风的方式防止火灾烟气的侵入。

对楼梯间加压送风的做法有送风竖井送风、单点或多点送风等几种形式。目前国内,竖井送风一般比较普遍。竖井送风方式即:在楼梯间一旁单独设置送风竖井,相隔一定高度或一定楼层开设送风口向楼梯间送风。

送风流程为:送风机→送风竖井→送风口→楼梯间

这种送风方式被普遍采用的原因是:通常认为这种送风方式可通过送风竖井、送风口对送风机送入的风量进行有效分配,有利于楼梯间内风量、风速的均衡分布。因此,竖井送

风方式被认为是一种最安全的送风方式。

单点和多点送风基本上属于一类送风方式(以下统称为点式送风方式),其特点是在新风送入过程中不通过单独的送风竖井,而是由风机直接将新风送入楼梯间,多点与单点的区别在于整个系统配制多台风机还是一台风机。

其送风流程为:送风机→楼梯间

点式送风方式目前在工程实践中被采用的不多,原因是在工程设计中普遍认为点式送风方式可能会在送风过程中出现局部孔洞漏风,形成气流短路,使楼梯间内最不利点的风压、风速值达不到设计要求,或者出现局部风压过大影响人员的正常疏散,从而影响整个加压送风系统的有效工作。

我们在本文中将对两种不同加压送风方式(送风竖井送风和点式送风)的实际工效及经济效益比进行理论分析和实际工程风速、风量测试,并说明两种送风方式的工程实用性。

## 2. 理论依据

正压送风系统的主要作用是:在火灾发生以后,对建筑内的人员疏散通道进行气流控制,防止火灾烟气对疏散通道的侵入。特别在高层建筑中,由于最远疏散距离远远大于普通建筑,人员逃离着火建筑物的时间也相对较长,通过正压送风系统对楼梯间送风使疏散通道——楼梯间内的疏散安全。

送风方式选择及系统设计是否成功,主要取决于能否将风机送入的气流迅速、均匀地送入楼梯间的各个部位,在短时间内,使整个楼梯间达到所需正压值。同时,还要求系统应使气流在输运过程中尽可能地减少阻力损失,降低能耗。

因此,正压送风方式研究中所考虑的因素有以下几个:

1. 所需正压值,根据英国有关建筑火灾研究部门所进行的研究,为了防止烟气的侵入,楼梯间相对于外界大气压的正压值应保持 50 帕<sup>[1]</sup>,相对于楼梯间前室正压值应保持 20~25 帕,相对于走廊的正压值应保持 40 帕;

2. 气体密度,所送气体为直接从外界吸取的新鲜空气,由于温差的不同,送入空气的密度可能会与楼梯内原有空气的密度不同,但其差别非常微弱,这里就认为其密度是一致的;

3. 补偿风量,设计防排烟系统时,对于由于各楼层人员紧急疏散时开启楼层门造成楼梯间内风量、风压的泄漏应有补偿;

4. 系统设计风量,根据楼梯间所应达到的正压值所需风量、开门泄风量、门窗孔隙的漏风量等因素综合而定的。

5. 系统运行条件,所研究的气流运动是一种在低压、低速条件下气体密度恒定不变的理想流体的运动。

### 设计风量计算

楼梯间正压送风系统风量计算时应考虑到不同的楼梯间形式,不同的面积所需要的设计风量不同。根据我国《高层民用建筑设计防火规范》的要求,楼梯间的布局形式主要分为封闭楼梯间和防烟楼梯间两种形式。其中封闭楼梯间主要适用于建筑高度在 32 米以下

的建筑,而防烟楼梯间主要适用于 32 米以上建筑。

楼梯间作为安全的疏散通道就要求楼梯间保证不受到烟气的侵入,但如果仅仅为了烟气的不侵入而使联通楼梯间与受烟气侵入的空间的门不能通行,那么楼梯间就不能成为有效的疏散通道。因此,经常将楼梯间门打开是不可避免的。所以计算送风量时,送风总量  $Q_w$  应包括产生并维持楼梯间与外界大气压 50Pa 气体压差所需的风量  $Q_w^1$  和开启门所泄漏的风量  $Q_w^{11}$ 。

$$\text{即: } Q_w = Q_w^1 + Q_w^{11} \quad (1)$$

产生并维持楼梯间与外界大气压 50Pa 气体压差所需的风量  $Q_w^1$  主要由产生楼梯间正压所需风量和从关闭门缝所泄漏风量所确定:

$$\text{即: } Q_w^1 = Q_w^1 + Q_w^2 \quad (2)$$

其中  $Q_w^1$  为产生楼梯产间正压所需风量,  $Q_w^2$  为从关闭门缝所泄漏风量。

$$Q_w^1 = 5 \times 10^{-4} \frac{V}{t} \quad (3)$$

式中:  $v$  为楼梯间的体积

$t$  为楼梯间达到 50Pa 所需要的时间

$$Q_w^2 = K \times A \times P \frac{1}{N} \quad (4)$$

式中:  $K$  为考虑泄漏途径上的排放系数及计算单位换算影响的关系常数

$A$  为关闭门缝的泄漏面积总和

$P$  楼梯间与外界大气压的气体压差

$N$  为指数,其值变化范围在 1~2 之间

$$Q_w^{11} = n \times F_m \times v \quad (5)$$

式中:  $n$  为同时开启的门数

$F_m$  为一扇门开启时的计算流通面积

$v$  为开门时的设计气流速度

计算封闭楼梯间与防烟楼梯间送风量的区别在于封闭楼梯间的关闭门缝的泄漏面积时应将各楼层的门缝面积进行相加<sup>[2]</sup>,即:

$$A = A_1 + A_2 + \dots + A_n \quad (6)$$

而防烟楼梯间是由每层两道门组成,因此计算防烟楼梯间的关闭门缝的泄漏面积时,应采用如下算法<sup>[2]</sup>,即:

$$A = \frac{A_{11} \times A_{12}}{\sqrt{A_{11}^2 + A_{12}^2}} + \frac{A_{21} \times A_{22}}{\sqrt{A_{21}^2 + A_{22}^2}} + \dots + \frac{A_{n1} \times A_{n2}}{\sqrt{A_{n1}^2 + A_{n2}^2}} \quad (7)$$

式中:  $A_{n1}$  为  $n$  层楼梯间与前室之间的门缝面积

$A_{n2}$  为  $n$  层前室与走廊之间的门缝面积

### 送风方式比较

在点式正压送风方式中,我们可将整个楼梯间视为有障碍物、横截面积较大的通风管道。由地楼梯间的横截面积大,为保持楼梯间 25~50 帕微弱正压值所送入的气量,因此,楼梯间运动速度也相对较小。由于开门时的气流流量远远大于门缝的漏风量,因此,楼梯

间气流速度数值可根据底层开门面积与楼梯截面积之比以及开门设计流速进行计算,根据工程经验可估算出在底层门出口风速为1米/秒的情况下,假设楼梯的横截面积为10平方米,开门门洞的面积为2平方米,那么,楼梯间竖向风速应大约为0.2米/秒。双跑楼梯对低速气流流动的阻碍作用也是极其微弱的,由此在流动中所产生的沿程阻力和局部阻力相应很小。这样,便给风机提供了一个很好的工况条件。

同样的假设对于竖井送风方式来讲,由于楼梯间的横截面积比竖井的横截面积大十倍以上,因此,竖井中的气流流速相对气流在楼梯间通过的流速要大十倍以上。竖井送风方式还应对送风竖井进行专门设计,譬如,为了满足尽可能减少气流在竖井内流动的能量损失以及风量在竖井中的泄漏,就需要通过对竖井风量、风速计算以及严格选择风道管壁材料等一系列工作来完成。

楼梯间空气压力分布通常不考虑空气重力因素的影响,常温常压下的空气(根据流体力学的有关知识,此时的空气可视为密度不变的理想流体)进入空间和截面均较大的楼梯间后可认为使楼梯间内的气体压力瞬时即达到平衡,楼梯内气压应处处相等。

气流短路问题是对点式送风方式产生怀疑的关键。认为采用这种送风方式会由于距离送风机较近处的局部气压高于较远处气压,气流从近处开启门洞大量泄漏,形成气流短路,从而影响整个系统的正常运行。我们认为这种推测是缺乏理论依据的。首先,前面已经论述过了在气流流速很低的情况下楼梯间内各处气压大致相同,不可能出现某一局部气压过高的情况;其次,对楼梯间点式送风事实上是一种射流运动。其对周围空气会产生引流作用,例如,在由层顶风机竖直向下送风的系统中,引流作用将对屋顶门、顶层门处的气压产生负压影响,使其略低于楼梯间其他各处气压。当然,这种影响的作用是很微弱的,不致于造成两处的气压值低于外界相邻区域的气压。

从经济方面考虑,点式送风方式是很值得推广的。这种方式既可节省建造竖井所需的占地面积又可减少一套风阀设备。

对于点式送风方式的有效性,我们不仅在理论上进行了推导。而且,我们还进行了实际工程的风压、风速测试和两种送风方式的对比试验,用以验证我们的结论。

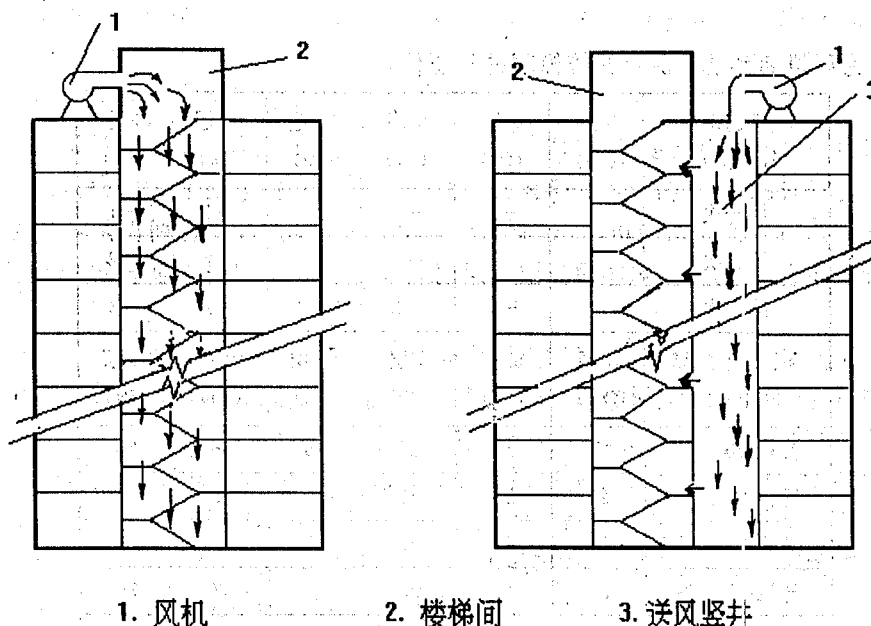
### 3. 试验过程

我们选择在北京西苑饭店、北京新世纪饭店两栋高层建筑的疏散楼梯间进行试验。北京西苑饭店、北京新世纪饭店均系重要的高层宾馆,内部功能复杂,属于高层一类建筑。其中,北京西苑饭店地上23层,地下3层,高度将近百米。因为属于早期高层建筑,所以其疏散楼梯间为封闭楼梯间;北京新世纪饭店高为107.45米,地上33层,楼梯间为防烟楼梯间。

我们进行风压测试的季节为夏季。采用的设备为:多路微压测定仪(可24路巡回检测,最小测量值为1帕)一台,多功能风速测定仪一台,热球风速仪两台。所有试验设备在测试之前均经过重新标定。

### 4. 试验结果

我们在北京西苑饭店主要进行了两种送风方式的对比试验。首先对楼梯进行原始状



点式送风方式与竖井送风方式比较性实验的示意图

态测量(即在不启动风机的情况下)得到如下数据:

相对压差为  $0 \sim 3\text{Pa}$

首层开门风速为  $0.3 \sim 0.4$  米/秒

顶层开门风速为  $-0.4$  米/秒

先由顶层风口单点向楼梯间送风,启动风机后,风口流速稳定在  $15$  米/秒,风机启动后二十分钟开始进行开门风速试验。开首层门,开门风速为  $0.5 \sim 0.6$  米/秒。测试后,将首层门关紧,使楼梯间内正压值上升。待系统稳定后,将顶层门、首层门同时打开,并测量门洞的气流流速,得首层开门风速为  $0.5$  米/秒,顶层开门风速为  $0.3$  米/秒。点式送风测试结束后,我们将风机停机,并打开数层楼梯间的门,使楼梯间与相邻区域的气压值相等。两个小时之后,我们开始进行竖井送风的风速试验。启动风机,气流经过送风竖井由数个风口同时向楼梯间送风(每隔四层一个风口),测定风口流速为  $2.7$  米/秒,维持二十分钟。待系统气压值稳定之后,开启首层门,测得开门风速为  $0.5 \sim 0.6$  米/秒。之后,关门稳压二十分钟之后,将首层门、顶层门同时开启,测得首层开门风速为  $0.4$  米/秒,顶层开门风速为  $0.3$  米/秒。

由于西苑饭店条件的限制,设置在楼梯间内的微压测定仪无法与外界相通,在加压送风时未能选定标零点,因此,未能得出送风时楼梯间内正压值的测试数据。但所得到的测量数据已经能够说明点式送风方式与竖井送风方式在楼梯间开启门洞的气流流速方面达到了同样的功能要求。

在北京新世纪饭店的送风试验主要对点式送风方式的送风效果即风压及开门风速进行了测定。我们分别在楼梯间的3层、6层、9层、10层、19层、32层处设置了气压采样点,并以外界气压为标零点。气流由风量为  $16000$  立方米/小时的屋顶风机直接向楼梯间内送

人。

下表为风机启动前后测定的楼梯间的气压值:

| 风机启动前<br>气压测定  | 3 层<br>(Pa) | 6 层<br>(Pa) | 9 层<br>(Pa) | 10 层<br>(Pa) | 19 层<br>(Pa) | 32 层<br>(Pa) |
|----------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 第一次            | 0           | -1          | -1          | 0            | -1           | -1           |
| 第二次            | 1           | -1          | -1          | -1           | -2           | -2           |
| 第三次            | 1           | -1          | -2          | -2           | -1           | -3           |
| 风机启动后<br>气压测定  | 3 层<br>(Pa) | 6 层<br>(Pa) | 9 层<br>(Pa) | 10 层<br>(Pa) | 19 层<br>(Pa) | 32 层<br>(Pa) |
| 开机 20 分钟       | 27          | 19          | 29          | 25           | 36           | 63           |
| 开机 22 分钟       | 25          | 20          | 23          | 26           | 39           | 75           |
| 开机 25 分钟       | 75          | 39          | 26          | 26           | 32           | 19           |
| 开机 27 分钟       | 25          | 19          | 23          | 24           | 37           | 75           |
| 系统稳定后<br>开启楼层门 | 3 层<br>(Pa) | 6 层<br>(Pa) | 9 层<br>(Pa) | 10 层<br>(Pa) | 19 层<br>(Pa) | 32 层<br>(Pa) |
| 开首层门           | 8           | 10          | 20          | 18           | 26           | 50           |
| 开首、顶两<br>层楼梯间门 | 3           | 4           | 3           | 4            | 7            | 6            |
| 开首、顶、<br>次顶层三门 | 2           | -1          | -2          | -1           | -1           | 0            |

楼梯间开门风速为:

仅开首层门,风速为:4.5 米/秒

仅开顶层门,风速为 3.0 米/秒

开顶、次顶层两扇门,顶层风速为:1.7 米/秒

次顶层风速为:2.0 米/秒

开顶、次顶、首层三扇门,顶层风速为:0.35 米/秒

次顶层风速为:0.45 米/秒

首层风速为:0.8 米/秒

## 5. 结果分析

通过在两栋高度不同的大型高层建筑内楼梯间所进行的正压送风试验,我们对防火设计中正压送风系统的送风方式及系统构成有了较全面的认识,在试验中得到的气压值能够比较客观地反应楼梯间内的气体压力分布。气压测定值中出现的几个明显高于平均值的气压数据并不是测量过程中所造成的误差,这些数据反应了气流在流动过程中是处于湍流状态,这些值与平均值的差值称之为湍流运动的脉动量。分析试验记录数据,我们

会从风机未起动时所测定的数据中非常明显地观测到,夏季由于室内外温差而引起的“反烟囱效应”现象即气流在无机机械动力的作用下,通过楼梯间上下开口产生的气流流动,在楼梯间内出现气流上进下出的现象。

对比试验虽然由于试验条件的限制,仅作了风速对比,选定开启距离风机最近处的顶层门和距离是最远的首层门,主要是为了测试气流流动过程中的气流短路问题。分析点式送风和竖井送风两种情况下的顶层和首层开门风速数值,可以认为在点式送风方式能够保证楼梯间的风压均匀分布。点式送风有效性从正压送风的风压、风速两方面得到了满意的结果。

综合理论和试验结果,我们可以发现对楼梯间点式送风,特别是从屋顶向下送风不仅不会造成气流短路,影响送风效果;相反,由于其充分利用楼梯间作气流流动通道,使气流流动具有的低流速、大流量的特点,而且,气流输运的环节少,沿程阻力和局部阻力都很小,避免了气流高速流动所产生的压力降,降低了风机出口处的压力,提高了风机的运行工况,使得正压送风更为有效。可以认为点式送风方式在火灾发生后的人员疏散过程中能够有效工作,起到防止烟气侵入的作用。加之点式送风方式具有较为经济等特点,因此,这种送风方式具有很强的实用性。

进行正压送风试验的场所均属于一类高层建筑,而且,两栋建筑均具有使用功能复杂、火灾危险性大等特点。特别是北京新世纪饭店高度达一百米,为超高层建筑,因此,我们认为进行试验的地点是有很强的代表性。希望所得的试验结果能对于以后的建筑防火设计有一定的参考和指导价值。

### 参 考 文 献

- [1] 赵国凌编著,防排烟工程,天津科技翻译出版公司,天津,(1991)
- [2] 吴启鸿,冯绍全译,建筑消防安全设计中的烟气控制,群众出版社。北京,(1988)

## **A Discussion on the Pressurized Ventilations Systems of Smoke Control in Staircases in High-Rise Buildings**

Liu Zhong

(University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Gong Minfeng Tong Haitao Zhao Kewei

(Beijing Fire Bureau, Beijing 100035)

In this paper, a detailed discussion on the design of the pressurized ventilation systems for building fire prevention has been given. The calculating method of the ventilation amount for enclosed and smoke-controlling staircases is presented. Analysis has been made of the characteristics of the two ventilation systems: local ventilation system and shaft ventilation system, along with emphasis of the application prospects of the local ventilation system. Experimental test of the two methods of pressurized ventilation have been conducted in Xiyuan Hotel and New Century Hotel in Beijing by the authors, and the comparison between the results has been made. Based on the analysis and tests of the two ventilation systems, we find that, the local ventilation system is economic and effective, and the application of this system to pressurized smoke control ventilation in high-rise buildings is promising.