

通风管道内颗粒的沉降规律研究及应用*

清华大学 吴俊[★] 赵彬[△]

摘要 给出了光滑通风管道内颗粒沉降速度、沉降量和穿透率的计算方法,对光滑风道内颗粒的沉降规律、风道的过滤作用、风道所需的清洗周期进行了模拟分析。

关键词 颗粒 通风管道 沉降速度 沉降量 穿透率

Study on particle deposition in ventilation ducts

By Wu Jun[★] and Zhao Bin

Abstract Presents the calculation methods of particle deposition velocity, deposition quantity and penetration rate in smooth ventilation ducts. Discusses the pattern of particle deposition onto different orientation surfaces, the effect of ventilation duct as a particle filter and the accumulation time in duct.

Keywords particle, ventilation duct, deposition velocity, deposition quantity, penetration rate

★ Tsinghua University, Beijing, China

①

0 引言

颗粒是一种十分常见的、广泛存在于室内外的污染物。颗粒的来源很多,室外大气环境中的颗粒物有相当大部分产生于人们的生产活动中,例如采矿、燃烧、金属熔炼、交通运输等。而人们在室内的一些日常活动,如吸烟、烹饪、除尘等,也或多或少地向空气中散布颗粒。

对于通风房间而言,当空气流经风道时,悬浮的颗粒会在风道内发生沉降,从而使得经过风道后颗粒的粒径分布和含量(浓度)发生变化。研究风道内颗粒的沉降对于人体健康是非常重要的,因为一方面室外颗粒经过风道的过滤之后,粒径分布和浓度发生变化,从而影响室内人员的颗粒暴露量;另一方面,由于颗粒在风道中的沉降,风道内会积聚大量的颗粒,包括有害微生物,当风道内沉降的颗粒数量足够多,并且空气的流速足够大时,颗粒可能会二次悬浮,从而随着空气进入建筑物内,污染室内空气并且对人体健康产生危害。

美国国家职业安全与健康学会(NIOSH)的调查指出,

相当一部分与人体健康有关的 HVAC 系统的问题是由于通风管道的污染所造成的^[1]。我国也意识到了这一问题的严重性,由政府发布了 HVAC 系统中通风管道系统的清洁法令^[2],并于 2003 年 6 月 30 日开始实行。因此研究通风管道对颗粒的“过滤”作用对于评估控制室内空气质量是非常重要的。

本文提出一种使用简单、运算迅速的计算风道内颗粒沉降的方法,并使用该方法对光滑通风管道内颗粒沉降的规律、风道的过滤作用、风道所需的清洗周期进行了模拟分析,全面分析了颗粒在风道内的沉降规律及相关应用问题。

1 计算模型

1.1 沉降速度

在通风管道中,空气流速较大,湍流强度较大,湍流对

①★ 吴俊,女,1983 年 12 月生,工学硕士

△ 100084 清华大学建筑学院建筑技术科学系
(010) 62779995

E-mail: binzhao@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2006-05-17

一次修回:2006-09-15

二次修回:2008-02-22

* 北京市“供热、供燃气、通风及空调工程”重点实验室资助项目“通风房间与系统中颗粒沉降的研究”(编号:KF200612)

颗粒运动和沉降有比较大的影响,湍流对于颗粒运动的作用分为湍流扩散和湍流泳,前者是处于湍流场中的颗粒脉动引起的“等效扩散”作用,后者是湍流场湍流强度的不均匀性与颗粒相互作用的结果。对于小粒径的颗粒来说,布朗扩散和湍流扩散起主导作用,湍流泳作用可以忽略;而对于较大粒径的颗粒,湍流泳的作用不可忽略,因此在通风管道中建立颗粒沉降速度计算模型时应考虑湍流泳作用。先前已有一些学者提出了考虑湍流泳作用的模型^[3-7],但一部分模型提出的湍流泳速度的表达式非常复杂^[3-5],因此比较难以模拟;另一部分模型则需要求解一系列的颗粒相的偏微分方程^[6-7],导致计算颗粒沉降速度的过程需要耗费大量的时间,从而限制了其实际应用。

笔者提出一种改进的欧拉模型,用来计算充分发展湍流光滑通风管道中颗粒的沉降速度。该模型是建立在 Lai

等人提出的三层模型^[8]的基础上的,不仅考虑了布朗扩散作用、湍流扩散作用、重力沉降作用,还考虑了湍流泳作用,颗粒的沉降质量通量 J 的表达式如下:

$$J = -(\epsilon_p + D) \frac{\partial C}{\partial y} - i v_g C + V_t C \quad (1)$$

式中 ϵ_p 为颗粒湍流扩散系数; D 为布朗扩散系数; C 为颗粒浓度; y 为到壁面的距离; i 为与壁面方向有关的常数,对于竖直壁面取 0,下壁面取 1,顶/上壁面取 -1; v_g 为重力沉降速度; V_t 为湍流泳沉降速度。

将沉降速度的定义式 $v_t = \frac{J(y=0)}{C_\infty}$ (C_∞ 为壁面边界层外主流区颗粒浓度)代入式(1),并将式中各个参数进行量纲一化之后可以得到量纲一颗粒沉降速度 $v_t^+ = \frac{v_t}{u^*}$ (u^* 为摩擦速度)的表达式,如下:

$$v_t^+ = \left(Sc^{-1} + \frac{n}{\tau_p + n} v_t^+ \right) \frac{dC^+}{dy^+} + \left[i v_t^+ + \tau^+ \frac{d \left(\frac{n}{\tau_p + n} \overline{v_y^2}^+ \right)}{dy^+} \right] C^+ \quad (2)$$

各量纲一量的定义式如下:

$$C^+ = \frac{C}{C_\infty} \quad (3)$$

$$y^+ = \frac{y u^*}{\nu} \quad (4)$$

$$v_t^+ = \frac{v_t}{u^*} \quad (5)$$

$$\tau^+ = \tau_p \frac{u^*}{\nu} \quad (6)$$

$$\overline{v_y^2}^+ = \frac{\overline{v_y^2}}{u^{*2}} \quad (7)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (8)$$

$$v_t^+ = \frac{v_t}{u^*} \quad (9)$$

式(2)~(9)中 n 为空气湍流流动的拉格朗日时间尺度; τ_p 为颗粒的松弛时间; ν 为空气的黏度; u^* 为空气的湍流黏度; $\overline{v_y^2}$ 为空气垂直于壁面方向的平均脉动速度强度。

通过引入拉格朗日时间尺度、空气垂直于壁面方向的脉动速度强度及湍流扩散系数的关联式,可以对式(1)进行数值求解,从而得到颗粒的量纲一沉降速度,具体的量纲一公式以及计算方法可以参考文献[9]。

该模型可以计算光滑壁面上颗粒的沉降速度,仅需要输入摩擦速度来求解一个常微分方程,因此使用非常简单,计算得到的竖直壁面(wall)和底面(floor,上表面和气流接触)结果与 Sippola 等人实测的风道颗粒沉降数据^[10]吻合得比较好,因此可以用该模型来计算竖直壁面和底面的颗粒沉降速度。

由于目前理论模型计算顶面(ceiling,下表面和气流接触)沉降速度的结果与实验结果吻合得比较差,因此考虑采

用经验公式对顶面的沉降速度进行计算。通过分析 Sippola 等人测得的风道内各个壁面上沉降速度的结果^[10],笔者拟合得到顶面沉降速度的经验公式,为

$$\lg v_{d,c} = 1.775 \lg v_{d,w} - 0.857 \lg v_{d,f} \quad (10)$$

式中 $v_{d,c}$, $v_{d,w}$, $v_{d,f}$ 分别为顶面、侧壁及底面的沉降速度。

图 1 给出了经验公式计算结果和实测数据的对比。从图 1 可以看出,经验公式对于顶面颗粒沉降速度的模拟结果与实验数据吻合得较好。

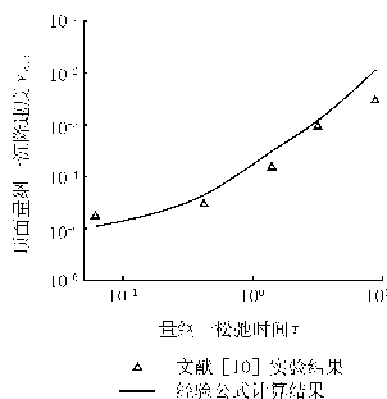


图 1 经验公式计算结果与实测数据的比较 ($u^* = 0.45 \text{ m/s}$)

对于常见的钢制风道而言,可以认为其壁面是光滑的(对于绝大多数实际工程中所采用的外保温而言,这种处理方式是合理的),因此可以采用上述方法计算风道内颗粒沉降速度。

1.2 直风道内颗粒的沉降量和穿透率

对于某一粒径的颗粒,在风道内的直管段上颗粒沉降质量通量可以采用下式进行计算:

$$J = C_\infty v_{d,c} \quad (11)$$

式中 $v_{d,t}$ 为当地的整个断面的颗粒平均沉降速度, 计算式如下:

$$v_{d,t} = \frac{v_{d,i}L_i + v_{d,w}L_w + v_{d,c}L_c}{L_p} \quad (12)$$

式中 L_i, L_w, L_c 分别为风道横截面上底面、侧壁及顶面的长度; L_p 为管道的周长。

设管道的横截面积为 S , 边界层外主流区空气流速为 u_∞ , 根据颗粒的质量守恒, 与过滤器的穿透率的定义类似, 定义风道出入口的颗粒浓度比为风道的穿透率, 则可推得长度为 L 的直风道的穿透率 P , 为

$$P = \exp\left(\frac{-v_{d,t}L_pL}{Su_\infty}\right) \quad (13)$$

式(13)中 $v_{d,t}, L_p, L, S, u_\infty$ 均仅与管道本身参数(长度、横截面积、粗糙度)、颗粒本身参数及风量有关, 因此对于一定的风道, 当风量不变时, 粒径一定的颗粒的穿透率也不变。

1.3 弯头处颗粒的穿透率

颗粒通过管道弯头处的穿透率可以采用 McFarland 等人提出的经验模型来计算^[11],

$$\ln P_{\text{bend}} = \frac{4.61 + a\theta S\theta k}{1 + b\theta S\theta k + c\theta S\theta k^2 + d\theta^2 S\theta k} \quad (14)$$

式中 P_{bend} 为弯头处的穿透率, %; θ 为弯曲角, rad; a, b, c, d 为与曲率 δ 有关的系数, $a = -0.9526 - 0.05686\delta$, $b = -0.297 - 0.0174\delta$, $c = -0.306 + \frac{1.895}{\sqrt{\delta}} - \frac{2.0}{\delta}$, $d = \frac{0.131 - 0.0132\delta + 0.000383\delta^2}{1 - 0.129\delta + 0.013\delta^2}$ (d 的表达式在原文献中有误, 在上式中已经改正), 管道弯曲处的曲率 $\delta = \frac{2R}{d_t}$ (R 为管道弯曲半径, d_t 为管子水力直径); $S\theta k = \frac{C_c \rho_p d_p^2 U_\infty}{9\mu d_t}$,

其中 C_c 为 Cunningham 修正系数, $C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \left[2.514 + 0.8 \exp\left(-0.55 \frac{d_p}{\lambda}\right) \right]$ (λ 为空气分子的平均自由程, 在温度 20℃, 压力 101.325 kPa 下为 0.066 μm), ρ_p 为颗粒密度, d_p 为颗粒直径, U_∞ 为空气的平均流速, μ 为空气的动力黏度。

文献[12]指出, 通风管道弯曲处的曲率 δ 都在 1~5 范围内, 而在这种情况下 δ 的值对这个模型影响很小, 因此在计算时可以将曲率取为 3。

2 应用

2.1 风道内颗粒沉降的规律

应用上述计算颗粒沉降速度的模型, 可以分析不同粒径、不同风量(也对应了不同摩擦速度)、不同朝向的壁面上颗粒的沉降规律。图 2 给出三种摩擦速度下竖直壁面量纲一沉降速度的比较。

从图 2 中可以看出, 当粒径小于 1 μm 时, 竖直壁面上

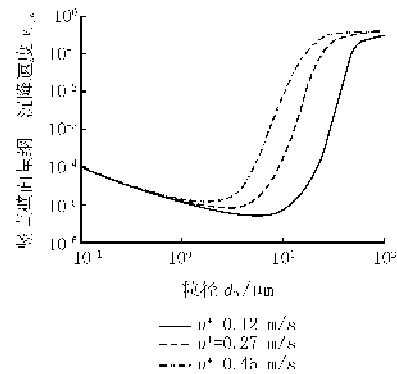


图2 不同摩擦速度下竖直壁面量纲一沉降速度的比较

的量纲一颗粒沉降速度与摩擦速度的大小无关, 并随着粒径的增大而减小。原因是在这种情况下, 湍流泳作用力远远小于布朗扩散和湍流扩散作用力, 而颗粒的湍流扩散率 ϵ_p 在这种情况下可以近似认为与流体的湍流运动黏度相等, 而流体量纲一湍流运动黏度仅与距离壁面的量纲一距离有关, 因此湍流扩散作用力与摩擦速度及颗粒本身特性都无关; 而布朗扩散率 D 仅与粒径有关, 并且随着粒径的增大而减小, 与摩擦速度无关, 因此, 当粒径小于 1 μm 时, 随着粒径的增大, 竖直壁面的量纲一沉降速度相应减小。当粒径大于 1 μm 时, 同样的粒径下, 摩擦速度越大, 竖直壁面上的量纲一颗粒沉降速度越大, 这是因为摩擦速度越大, 颗粒的量纲一松弛时间越大, 因此湍流泳作用越大。随着粒径的增大, 竖直壁面上的量纲一颗粒沉降速度增大, 最终趋于一个定值, 这是因为随着粒径的增大, 颗粒的松弛时间

也增大, $\frac{\tau_p}{\tau_p + \alpha}$ 趋近于 1, 因此式(2)中 $\tau^+ \frac{d(\frac{\tau_p}{\tau_p + \alpha} \sqrt{\frac{\tau_p}{\tau_p + \alpha}})}{dy^+}$ 趋

近于 $\frac{d(\frac{\tau_p}{\tau_p + \alpha} \sqrt{\frac{\tau_p}{\tau_p + \alpha}})}{dy^+}$, 即 $\frac{d\tau^+}{dy^+}$, 与粒径及摩擦速度均没有关

系, 此时布朗扩散作用力和湍流扩散作用力远远小于湍流泳作用力, 因此当颗粒的松弛时间足够大时, 竖直壁面颗粒量纲一沉降速度接近于一个定值。

图 3 给出了不同摩擦速度下风道底面的量纲一沉降速度随粒径的变化。

从图 3 中可以看出, 对于底面而言, 随着粒径的增大, 底面的颗粒量纲一沉降速度先减小后增大, 这是因为当粒径较小时, 颗粒的布朗扩散作用和湍流扩散作用大于重力沉降作用和湍流泳作用, 与竖直壁面类似, 在粒径较小时量纲一沉降速度随着粒径的增大而减小。随着粒径的增大, 颗粒的重力沉降作用力和湍流泳作用力都增大, 因此当粒径足够大时, 重力沉降作用和湍流泳作用远远大于布朗扩散作用和湍流扩散作用, 对于颗粒的沉降起主导作用, 因此随着粒径的增大, 底面的颗粒量纲一沉降速度也增大。另一方面, 与竖直壁面相比, 底面的量纲一沉降速度在不同的

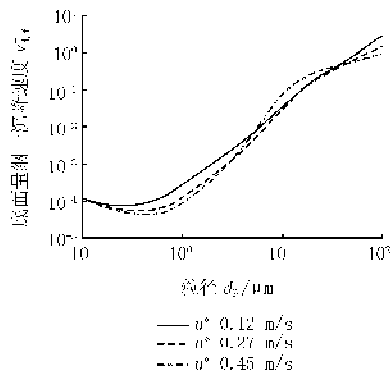


图3 不同摩擦速度下底面量纲一沉降速度的比较

摩擦速度下相差很小,这是因为同一粒径下,摩擦速度越小,量纲一重力沉降速度越大,但是湍流泳作用力越小,因此,底面的量纲一沉降速度在不同摩擦速度下的区别明显小于竖直壁面。

从图1~3中可以看出,当粒径较小或者量纲一松弛时间较小时,各个壁面(顶面、竖直壁面、底面)上颗粒的量纲一沉降速度基本相同,而当粒径较大或者量纲一松弛时间较大时,底面上颗粒的量纲一沉降速度远远大于竖直壁面和顶面。

2.2 风道所需的清洗周期

风道内会积聚大量的颗粒,包括有害微生物,可能会二次悬浮,随着空气进入建筑物内,因此确定合理的风道所需清洗周期对于人体健康有着非常重要的意义。而采用上述的计算模型可以计算出颗粒的沉降量,从而根据相应的标准计算出风道所需的清洗周期,对风道进行定期的清洁。

根据文献[13]可知,北京室外大气中总悬浮颗粒在一年内的平均质量浓度为 0.353 mg/m^3 ,大气尘的粒径分布如表1所示。

表1 大气中颗粒粒径分布

颗粒直径/ μm	平均直径/ μm	数量比例	质量比例
0~0.5	0.25	0.916 8	0.01
0.5~1	0.75	0.067 8	0.02
1~3	2	0.010 7	0.06
3~5	4	0.002 5	0.11
5~10	7.5	0.001 7	0.52
10~30	20	0.000 5	0.28

为了分析不同过滤器情况下风道所需的清洗时间,笔者考虑了三种工况:没有过滤器、过滤器的总计数效率为80%、过滤器的总计数效率为40%。其中两种过滤器的各粒径分级效率见表2(参考文献[13]中玻璃纤维中效过滤器的分级效率)。

根据空调系统中风道的设计规范,干管的风速应该在 $6\sim 14 \text{ m/s}$ 的范围内,支管的风速应该在 $2\sim 8 \text{ m/s}$ 的范围内。根据我国的风道清洗规范,积尘量达到 1 g/m^2 时,就

表2 过滤器各粒径分级效率

平均直径/ μm	各粒径分级效率	
	总计数效率 80%	总计数效率 40%
0.25	0.798	0.393
0.75	0.8	0.4
2	0.9	0.76
4	0.96	0.94
7.5	0.98	0.96
20	0.99	0.98

需要清理。由于风道内颗粒的沉降,沿程的颗粒浓度越来越小,若风道的尺寸和走向不发生变化,根据沉降质量通量 J 的计算式(11)可以看出沉降量越来越小,因此风道内积尘最严重的部位就是风道入口处,以断面尺寸为 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的水平矩形管道为例,风速在 $2\sim 14 \text{ m/s}$ 范围内允许的积尘时间如图4所示。

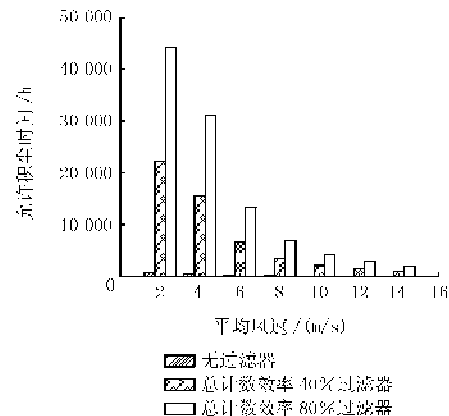


图4 允许积尘时间

从图4可以看出,有过滤器时允许的积尘时间远远大于没有过滤器的情况,说明过滤器可以非常有效地减少颗粒在风道内的沉降,因为它可以有效地减少直径较大的颗粒进入风道。而根据前面所分析的颗粒的沉降规律,对 $0.25\sim 20 \mu\text{m}$ 范围内的颗粒而言,粒径越大沉降速度越大,因此风道内沉降的颗粒主要为粒径较大的颗粒,因此加了过滤器之后可以有效地减少风道内颗粒的沉降。从图4还可以看出,针对本文中所采用的颗粒沉降计算模型,风道内平均风速越大,允许的积尘时间越短,也就是说沉降的颗粒越多,这是由于随着风速增大,湍流扩散和湍流泳的作用都增大的缘故。没有过滤器时,风速最低时允许的积尘时间为560 h左右,风速最高时为24 h左右(也就是说风速为 14 m/s 时,每天都需要清洗风道)。而加入一个过滤效率较低(40%)的过滤器之后,风速最低时允许的积尘时间为22 200 h左右,风速最高时为910 h左右。

上述计算中过滤器效率是参考文献[13]中玻璃纤维中效过滤器的分级效率给出的,实际应用中只需根据所采用的过滤器的效率,采用上述同样的计算方法就可以计算出

风道内的积尘时间,从而根据国家标准判断风道是否需要清洗。

2.3 风道的过滤作用

室外颗粒经过风道的过滤之后,粒径分布和浓度发生变化,从而影响室内人员的颗粒暴露量,另一方面机械通风系统中,室内产生的颗粒也可能通过回风途经通风管道再

次进入室内,因此研究风道的过滤作用对于确定室内实际的颗粒粒径和浓度分布有重要意义。

根据前文计算颗粒通过风道的穿透率的方法,以断面尺寸为 400 mm×400 mm 的水平方向矩形管道为例,可以计算出当风温为 20℃时,颗粒通过 1 m 长管道的穿透率,结果如表 3 所示。

表 3 1 m 长水平直管的穿透率

$d_p/\mu\text{m}$	$P_s/\%$						
	$u_{\text{air}}=2\text{ m/s}$	$u_{\text{air}}=4\text{ m/s}$	$u_{\text{air}}=6\text{ m/s}$	$u_{\text{air}}=8\text{ m/s}$	$u_{\text{air}}=10\text{ m/s}$	$u_{\text{air}}=12\text{ m/s}$	$u_{\text{air}}=14\text{ m/s}$
0.25	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2	99.98	99.99	99.99	99.99	100.00	100.00	100.00
4	99.93	99.96	99.97	99.97	99.97	99.97	99.96
7.5	99.70	99.81	99.80	99.74	99.61	99.38	98.68
20	98.12	98.56	97.32	95.86	94.82	94.45	94.20

从表 3 可以看出,针对本文中所采用的颗粒穿透率计算模型,空气流速一定时,颗粒的穿透率随着粒径的增大而减小,这是由于在 0.25~20 μm 粒径范围内颗粒的沉降速度随着粒径的增大而增大的缘故,原因见上述分析。当粒

径大于等于 7.5 μm 时,风道的过滤作用不可忽略。

以 400 mm×400 mm 的矩形管道为例,当风温为 20℃,弯曲率为 3,风速在 2~14 m/s 范围内时,颗粒通过弯管的穿透率如表 4 所示。

表 4 弯管的穿透率

$d_p/\mu\text{m}$	$P_{\text{bend}}/\%$						
	$u_{\text{air}}=2\text{ m/s}$	$u_{\text{air}}=4\text{ m/s}$	$u_{\text{air}}=6\text{ m/s}$	$u_{\text{air}}=8\text{ m/s}$	$u_{\text{air}}=10\text{ m/s}$	$u_{\text{air}}=12\text{ m/s}$	$u_{\text{air}}=14\text{ m/s}$
0.25	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.75	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.99	99.99
2	99.99	99.99	99.98	99.97	99.96	99.96	99.95
4	99.97	99.94	99.92	99.89	99.86	99.83	99.80
7.5	99.90	99.81	99.71	99.61	99.51	99.41	99.32
20	99.31	98.60	97.86	97.10	96.32	95.51	94.67

从表 4 可以看出,针对本文中所采用的颗粒穿透率计算模型,空气流速一定时,颗粒通过弯管的穿透率随着粒径的增大而减小;当颗粒较大(>2 μm)时,穿透率随着空气流速的增大而减小(实际上对于粒径较小的颗粒也是如此,但是由于粒径较小时,穿透率接近于 1,无法看出明显区别)。这是因为颗粒在弯管处的沉降主要是由于颗粒在惯性力的作用下撞击到管道表面而造成的,当粒径较大或者空气流速增大时,颗粒的惯性力也增大,导致穿透率减小。当粒径大于等于 7.5 μm 时,弯管的过滤作用不可忽略。

下面以一个游泳池的风系统为例说明如何利用上述结果考察实际通风管道对颗粒的过滤作用,图 5 为其风系统平面图,每个风口的送风量相同,均为 820 m^3/h 。

根据各个风口的风量,可以得到各段风管处的空气平均流速,从而计算出各段管道的穿透率,将到达各个风口之前的各管段的穿透率相乘,便可以得到从风道入口处(3.6 m 高处水平入口)到各个风口处颗粒的穿透率,如表 5 所示。

从表 5 可以看出,1 号风口处的穿透率最大,6 号风口处的穿透率最小。这是由于风道内流速较低(<5 m/s),并

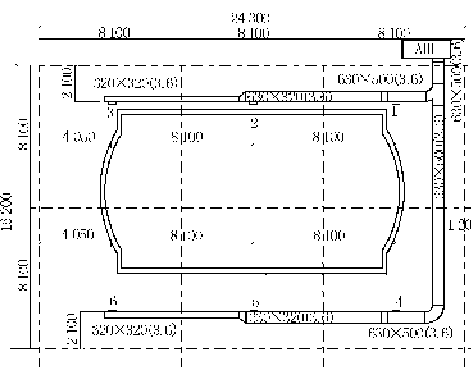


图 5 游泳池风系统平面图

表 5 各个风口处的穿透率

$d_p/\mu\text{m}$	$P/\%$					
	风口 1	风口 2	风口 3	风口 4	风口 5	风口 6
0.25	99.979	99.943	99.907	99.925	99.930	99.871
0.75	99.986	99.960	99.934	99.947	99.951	99.908
2	99.923	99.781	99.640	99.708	99.730	99.498
4	99.710	99.186	98.664	98.918	98.998	98.145
7.5	98.689	96.407	94.178	95.271	95.604	92.001
20	91.098	78.488	67.623	72.876	74.436	58.263

且颗粒的粒径较小,导致弯管对于颗粒的过滤作用较小,颗粒的沉降主要是由于直管段的过滤所造成的。而直管段过滤作用的大小与直管段的长度密切相关,由于1号风口距离总风道出口处的距离最短,因此风道的过滤作用最小,而6号风口距离最长,风道的过滤作用最大。随着粒径的增大,风道的过滤作用先减小后增大,这是由于颗粒的沉降速度先减小后增大的缘故,且对于粒径大于 $7.5\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒而言,这种过滤作用不可忽略。

3 讨论

上述的计算风道内各个壁面上颗粒沉降速度的模型仅适用于光滑壁面,对于粗糙壁面(例如风道采用内保温,则风道内壁是不光滑的,需要考虑其粗糙情况)来说,需要对该模型进行一定的修正。

上述的计算风道允许的积尘时间是针对风道中积尘最多的部位(过滤器出口处)而言的,考虑的是最不利的情况,如果考虑整个风道中平均的积尘量(或每根风道中平均的积尘量)来计算允许的积尘时间,则可以根据风道穿透率的计算方法,得到颗粒在整个风道内的沉降量(或该风道中的积尘量),再除以整个风道内表面积(该风道的内表面积),得到单位面积平均沉降量,从而计算允许的积尘时间。

4 结论

本文给出了计算风道内颗粒沉降速度、沉降量、穿透率的模型,并应用该模型对风道内颗粒的沉降规律、风道允许积尘时间、风道的过滤作用进行了分析,针对本文中采用的颗粒沉降和穿透率计算模型,可以得出以下主要结论。

4.1 颗粒在竖直壁面上的量纲一沉降速度随着粒径的增大先减小后增大最后趋于定值,并且随着摩擦速度的增大而增大,在底面的量纲一沉降速度随着粒径的增大先减小后增大,并且摩擦速度对其影响较小。

4.2 加入过滤器之后可以有效地增大风道允许的积尘时间,并且风道内平均风速越大,允许的积尘时间越短。对于本文列举的算例而言,当速度达到 14 m/s 时,若没有过滤器则风道需要每天清洗,若有过滤器风道则需要20 d左右清洗一次。

4.3 对于直管段来说,随着颗粒直径的增大,风道的过滤作用先减小后增大;对于弯管来说,穿透率随着颗粒直径、空气流速的增大而减小。增加弯管的数目或者直管段的长度,都会增强通风管道的过滤作用。对于粒径较大($>7.5\text{ }\mu\text{m}$)的颗粒,通风管道的过滤作用不可忽略。

参考文献:

- [1] National Institute for Occupational Safety and Health. Building air quality—a guide for building owners and facility managers[M]. Washington: SSOP, 1991
- [2] 卫生部. GB 19210—2003 空调通风系统清洁规范[S],

2006

- [3] Caporali M, Tampieri F, Trombetti F, et al. Transfer of particles in nonisotropic air turbulence[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1975, 32(3): 565–568
- [4] Reeks M W. The transport of discrete particles in inhomogeneous turbulence[J]. Journal of Aerosol Science, 1983, 14(6): 729–739
- [5] Johansen S T. The deposition of particles on vertical walls [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1991, 17(3): 355–376
- [6] Guha A. A unified Eulerian theory of turbulent deposition to smooth and rough surfaces[J]. Journal of Aerosol Science, 1997, 28(8): 1517–1537
- [7] Young J, Leeming A. A theory of particle deposition in turbulent pipe flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 340(6): 129–159
- [8] Lai C K, Nazaroff W W. Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces [J]. Journal of Aerosol Science, 2000, 31(4): 463–476
- [9] Zhao B, Wu J. Modeling particle deposition from fully developed turbulent flow in ventilation duct[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(3): 457–466
- [10] Sippola M R, Nazaroff W W. Experiments measuring particle deposition from fully developed turbulent flow in ventilation ducts[J]. Aerosol Science and Technology, 2004, 38(9): 914–925
- [11] McFarland A R, Gong H, Muyschondt A, et al. Aerosol deposition in bends with turbulent flow[J]. Environmental Science and Technology, 1997, 31(12): 3371–3377
- [12] Sippola M R, Nazaroff W W. Modeling particle loss in ventilation ducts[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(40): 5597–5609
- [13] 许钟麟. 空气洁净技术原理[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2003

• 会讯 •

北京华仪乐业节能服务有限公司召开新闻发布会

会议于3月31日在北京国际会议中心召开,会上介绍了该公司以热计量产品为核心,提供从产品到服务的供热节能和分户计量的整体解决方案。该公司可帮助供热企业解决节能技术和资金不足方面的问题,为供热企业实施节能改造提供诊断、设计、融资、改造、运行、管理等服务。

(本刊)