

人工气候室内呼出气溶胶颗粒物分布的实验研究

高乃平¹, 贺启滨², 李晓萍³, 牛建磊³

(1. 同济大学 机械工程学院, 上海 201804; 2. 深圳市建筑科学研究院有限公司, 广东 深圳 518049;
3. 香港理工大学 屋宇设备工程学系, 香港)

摘要: 实验研究了全尺寸人工气候室内, 置换通风条件下, 人体呼出气溶胶颗粒物在室内竖直、水平方向的分布以及人员暴露情况. 采用一套气溶胶发生系统产生近似人体呼出粒径范围的多分散颗粒物, 采用高精度的气溶胶光谱仪测量室内颗粒物的分布, 采用一个具有呼吸功能的暖体假人以及一个自行研制的暖体假人来模拟真实人体. 结果发现, 在距离发生源较近的位置, 颗粒物在呼吸区高度有“自锁现象”发生; 而在远离发生源的位置, 颗粒物沿高度方向呈现下低上高的两区分布. 人体对颗粒物的暴露量与人体距离发生源的位置有关, 人体周围上升的热羽流有助于减小人体对颗粒物的暴露量.

关键词: 气溶胶颗粒物; 置换通风; 分布; 人员暴露

中图分类号: X513 **文献标识码:** A

Experimental Study on Distribution of Human Exhaled Aerosol Particles in a Full-scale Chamber

GAO Naiping¹, HE Qibin², LI Xiaoping³, NIU Jianlei³
(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shenzhen Institute of Building Research, Shenzhen 518049; 3. Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)

Abstract: The temperature and velocity distributions along the room height in a full-scale experimental chamber were measured. In order to simulate human exhaled droplets, an aerosol generator system based on the Collision type atomizer (Model 7388AGS) was used to generate poly-dispersed droplets. An aerosol spectrometer (Model 1.108 Grimm) was used to measure the concentration distribution indoors. A breathing thermal manikin and a self-made thermal manikin were used to simulate occupants. It is found that a trap phenomenon of exhaled droplet occurred in the breathing height near the particle source. There is a two-zone

distribution of particle concentration along room height far away from the particle source. The human exposure to particles is related to the distance to the particle source. The thermal plume of human can entrain air from below the breathing zone and help improving the quality of the inhaled air.

Key words: aerosol particles; displacement ventilation; distribution; human exposure

气溶胶是悬浮于气体中的固体或液体颗粒, 是室内主要污染物之一, 其不仅具有物理颗粒物的污染特性, 而且人体呼出的气溶胶还可以作为各种病毒的载体, 威胁他人健康. 2002 年在我国及世界各大城市肆虐的非典型肺炎(SARS), 2003 年在亚洲爆发的 H5N1 型高致病性禽流感病毒以及 2009 年在墨西哥爆发并肆虐全球的甲型 H1N1 猪流感疫情, 严重威胁人们的健康, 夺去了无数人的生命. 越来越多的证据表明, 上述疾病之所以能在全球范围内广泛传播, 是因为除了近距离的飞沫传播、分泌物传播、密接接触传播等传播途径外, 这些病毒还可以通过气溶胶作为载体, 在空气中进行长距离传播^[1-2].

室内通风方式与人体呼出气溶胶的传播密切相关, 实际通风房间(尤其是置换送风以及地板送风)中的颗粒物往往会偏离均匀混合的集总参数假设^[3]. 因此, 有必要研究人体呼出气溶胶颗粒物在实际通风房间中的分布及室内人员的暴露情况. 以往, 实验中大多使用示踪气体代替颗粒物来研究人体呼出污染物在室内的分布与传播^[4-6], 采用真实颗粒物进行的室内污染物分布和人员暴露的实验数据还比较少. 本文采用实验方法研究通风房间中人体呼出气溶胶颗粒物的分布及人员暴露规律, 为实现一个更健康的人居环境提供理论支撑.

1 实验装置及测试设备

1.1 人工气候室

图 1 为人工气候室布置图. 气候室的围护结构采取了良好的绝热保温措施,围护结构从内到外分别为 3.5 mm 厚不锈钢板,20.0 mm 厚木板,60.0 mm 厚发泡聚氨酯以及 1.0 mm 厚不锈钢装饰板. 实验室采用楼宇全空气中央空调系统;人工气候室采用置换通风方式,使用独立的空调系统进行室内温、湿度控制.

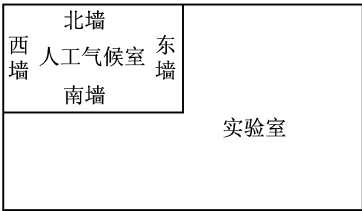
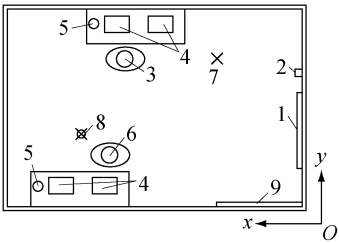


图 1 人工气候室布置图
Fig.1 Configuration of the experimental chamber

人工气候室尺寸为 4.0 m×2.7 m×3.0 m(长×宽×高),内部布置了两个典型的工作台,如图 2 所示. 使用两个坐姿的暖体假人模拟办公室内的真实人体. 其中,暖体假人 A 为自行研制,采用电阻丝均匀缠绕在假人外部模拟人体发热,总功率约为 80 W,衣服表面的平均温度约为 30 ℃. 暖体假人 B 购于丹麦 (MODEL TM03/18R),配备具有呼吸功能



a 示意图



b 实物图

1 为置换送风进口;2 为气溶胶进口;3 为暖体假人 A;4 为电脑;5 为台灯;6 为暖体假人 B;7 为测量线 A;8 为测量线 B;9 为门

图 2 人工气候室平面布置图
Fig.2 Layout of the experimental chamber

的人工肺. 该假人全身分为 18 个部分,每一个部分都有独立温控模块^[7-8],总功率为 80 W. 每个暖体假人面前布置两台电脑(每台 120 W)以及一个台灯 (18 W)作为额外的热源. 室内总热源为 676 W,单位面积冷负荷约为 63 W·m⁻².

1.2 气溶胶发生及测试设备

气溶胶生成系统 (型号 7388AGS, Aerosol & Particle Technologies)由压缩空气过滤系统、具有 3 个喷嘴的碰撞雾化器、干燥空气调节装置、稀释空气调节装置、离子发生器以及混合室组成,见图 3. 在碰撞雾化器内,使用无色无味无毒的癸二酸二异辛酯 (DEHS)作为产生气溶胶颗粒的液体物质 (密度为 914 g·m⁻³),采用异丙醇作为 DEHS 的溶剂,溶液的质量分数为 60%. 通入雾化器内的压缩空气将溶液吸入气体喷嘴内,在喷嘴内溶液被修剪成为小液滴. 随后,小液滴依次进入 Nafion 干燥器和离子发生器内形成干燥的电中性小颗粒. 小颗粒与稀释空气在混合室内混合,通过调节稀释空气的流量可以调节颗粒物的计数浓度. 最后,气溶胶颗粒被空气携带,通过管道从气溶胶进口 (见图 2)送入人工气候室内. 图 4 显示了气溶胶发生器发出的气溶胶颗粒的粒径分布,粒径分布数据在气溶胶发生器出口处测得.

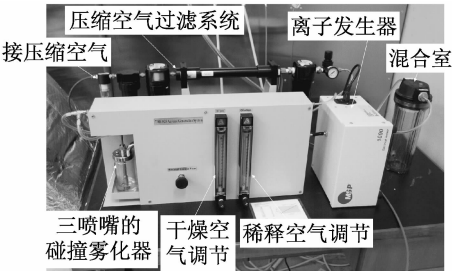


图 3 气溶胶生成系统
Fig.3 Configuration of the aerosol generator system

人体正常呼吸的呼气流量约为 6 L·min⁻¹^[5]. Grymer 等^[9]得出的人体鼻腔的平均面积为 1.32 cm²,折合直径约为 13 mm 的圆形面积. 本实验中输送气溶胶的管道直径为 10 mm,面积小于人体鼻腔的面积. 为保证射流的动量与人体呼出气流的动量大体相等,本文采用的空气流量为 4.3 L·min⁻¹,平均射流速度约为 0.9 m·s⁻¹.

采用气溶胶光谱仪 (Grimm 1.108)测量气溶胶颗粒物垂直以及水平方向的分布. 气溶胶光谱仪具有 15 个通道,可以实时测量 0.5~20.0 μm 粒径范围的颗粒物的计数浓度. 其采样流量为 1.2 L·

min^{-1} ,同时测量 15 个通道时的最小采样时间为 6 s. 本实验测量颗粒物的计数浓度(以下简称颗粒物浓度),在进行测试之前,对仪器进行了校准.

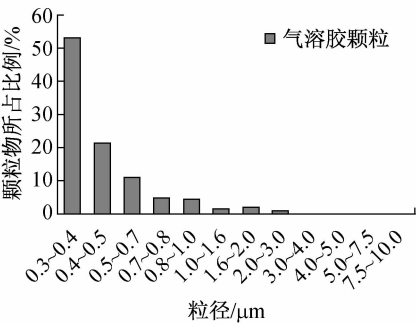


图 4 气溶胶粒径分布

Fig.4 Size distribution of the generated aerosol

1.3 温度场及流场测试设备

实验采用压差计 (ADM-870, Shortridge Instruments Inc)测量人工气候室内外的压力差,以评估人工气候室的密封性;采用 CO_2 示踪气体衰减法测量换气次数(7001, Telaire Inc);采用一套 K 型热电偶测温系统(测温误差约为 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$)测量壁面、送风口以及排风口的温度;采用两台 Midi logger GL400 数据采集仪(Gaaphtec Inc)进行温度的数据采集(每台 20 个通道);采用 HOBO U10 Temp/Humidity Data Loggers 测量垂直温度分布以及室内相对湿度;速度分布则由热球风速仪(Dantec 5-4N50 型)测定^[10],其测量范围为 $0.05\sim 5.00\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

2 实验步骤

实验开始前,调节风机风量以及阀门开度,将送风量控制在满足典型室内换气次数要求的范围内.风量稳定后,采用压差计测量人工气候室内、外压差,并采用 CO_2 浓度衰减法测量人工气候室换气次数.

在进行实验前,为了使实验室达到热稳定状态,运行人工气候室的空调系统 12 h 以上,当气候室内温度、速度场相对稳定后,进行室内温度、速度测量(约 5 h).然后,进行气候室内颗粒物背景浓度测试.打开气溶胶发生器,监测排风口处颗粒物浓度,当排风口处的颗粒物浓度达到稳定后,进行气溶胶竖直(水平)分布的测量.完成颗粒物浓度测量后,关闭气溶胶发生器,同时,通风空调系统继续运行,以排除室内的气溶胶.

进行下一工况实验,重复上述步骤.

3 结果与分析

3.1 气候室内外压差及换气次数

在测量换气次数及风量之前,首先使用压差计测量了人工气候室内外的压力差,测得人工气候室内外的压差为 9.33 Pa,小于 10 Pa.由于气候室气密性较好,可以认为其漏风量较小,相比于送风量可忽略.本实验进行了两次 CO_2 示踪气体浓度衰减测试,得到的换气次数数值比较一致,最终结果取两次实验的平均值,计算得到气候室的换气次数为 8.64 h^{-1} ,风量为 $0.078\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.本实验模拟办公室内的人均送风量在 Skistad^[11]等推荐的置换送风要求范围内,每小时 8.64 次的换气次数也满足 ASHRAE 手册^[12]对办公室每小时 4~10 次的要求.所以,该人工气候室可以较好地模拟实际使用的办公室工况.

3.2 温度边界以及温度、速度垂直分布

实验测量了除天花板外其他 5 个壁面的温度,每个面上均匀布置 6 个热电偶测点.同时,测量了送风口以及 3 个回风口的温度:送风口布置 3 个热电偶;每个回风口布置 2 个热电偶.

实验结果显示,4 个壁面及地板的平均温度分别为 $20.6, 21.6, 22.1, 22.7, 20.0\text{ }^\circ\text{C}$,各个壁面 6 个测点的温度最高值与最小值之差不大于 $2.0\text{ }^\circ\text{C}$,同面各个测点温度测量值的标准差均小于 $0.3\text{ }^\circ\text{C}$.人工气候室送风平均温度为 $14.9\text{ }^\circ\text{C}$,排风平均温度为 $22.6\text{ }^\circ\text{C}$.通过能量平衡计算可以得出,在室内热源散热全部由排风带走的情况下,出口温度约为 $22.1\text{ }^\circ\text{C}$.计算得到的出口温度与本实验测量得到的出口温度比较接近,说明实验中围护结构隔热良好,冷负荷基本来自室内热源.

图 5a 显示了在测量线 A 及测量线 B 处,温度沿高度方向的垂直分布,图中的误差线表示温度的标准差.从图中可以看出,在本实验工况下,室内的温度出现明显的下低上高的垂直分层现象,符合置换送风的典型温度分布规律^[10-11].在坐姿人体的呼吸区高度($1.0\sim 1.5\text{ m}$),温度梯度约为 $1.6\text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$.测量线 A 与测量线 B 处的温度分布趋势相同,而在每个高度下,测量线 A 处的温度比测量线 B 处的温度低 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,这是因为测量线 A 距离送风口较近.

图 5b 显示了在测量线 A 及测量线 B 处,速度沿高度方向的垂直分布,图中的误差线表示速度的标准差.从图中可以看出,速度沿高度方向的分布较

为均匀,室内风速主要集中在 $0.1\sim0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,满足 ASHRAE 手册^[12]对人员活动区域风速的要求.从图中还可以看出,速度的标准差较大,说明测点速度的波动较大.这一方面是因为室内速度波动本身较为剧烈;另一方面是因为当测量较小的速度时,热球风速仪的测量误差较大.Chen 等^[10]采用热球风速仪测量置换送风房间内速度分布时也遇到了同样的问题,他们使用测量的速度波动作为测定室内湍流强度的指标.

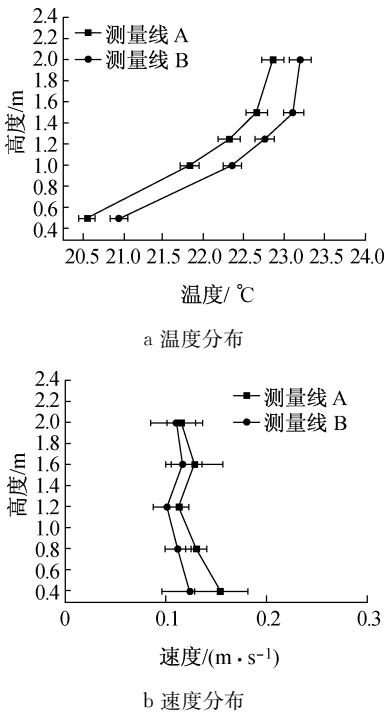


图 5 温度和速度沿高度方向分布
Fig.5 Temperature and velocity distributions along the room height

3.3 颗粒物浓度分布及人员暴露

在正式测量室内颗粒物浓度分布之前,首先测量了人工气候室内的背景颗粒物浓度.当气候室内温度场、速度场稳定后,测量了测量线 B 处沿高度方向 5 个测点的背景颗粒物浓度.背景颗粒物浓度的测量重复 3 次,取结果的平均值.表 1 给出了不同高度处小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒总数(PM10)的背景物颗粒浓度.同时,给出了当打开颗粒发生器时,测量线 B 处的颗粒物浓度的数值作为对照.从表中可以看出,室内的背景颗粒物浓度较低,说明系统高效过滤器的过滤效果良好.同时,同一测点的背景颗粒物浓度比测量颗粒物浓度至少低 2 个数量级,所以测量结果的数据可以忽略背景颗粒物浓度的影响.

图 6 显示了测量线 A 以及测量线 B 处,颗粒物浓度沿高度方向的分布.采用实验中最大颗粒物浓

表 1 测量线 B 处背景颗粒物浓度与测试颗粒物浓度

Tab.1 Background and measured particle concentration at measuring line-B

高度/ m	背景颗粒物 浓度/(个·m ⁻³)	测试颗粒物 浓度/(个·m ⁻³)	背景颗粒物浓度/ 测试颗粒物浓度
0.4	5.51×10^2	6.67×10^4	8.25×10^{-3}
0.8	4.81×10^2	8.34×10^4	5.76×10^{-3}
1.2	3.34×10^2	2.25×10^6	1.48×10^{-4}
1.6	8.76×10^2	6.25×10^6	1.40×10^{-4}
2.0	3.68×10^2	4.71×10^6	7.81×10^{-5}

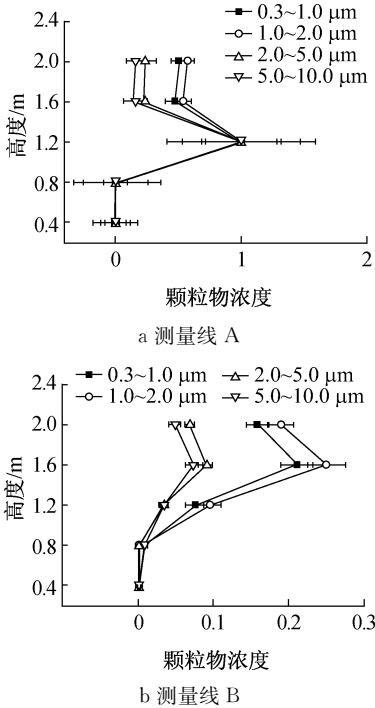


图 6 量纲一颗粒物浓度沿高度方向分布
Fig.6 Normalized particle concentration distribution along room height

度值(位于测量线 A 处,1.2 m 高度测点)为基准,对两根测量线各测点的颗粒物浓度值以及标准差进行量纲一化处理.

在图 6 中,为了保证颗粒物浓度计数的统计稳定性,颗粒物按粒径范围被划分为 4 档,分别为 $0.3\sim1.0\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.0\sim2.0\text{ }\mu\text{m}$ 、 $2.0\sim5.0\text{ }\mu\text{m}$ 以及 $5.0\sim10.0\text{ }\mu\text{m}$.从图 6a 中可以看出,在测量线 A 处,颗粒物浓度在 1.2 m 高度处达到最大值;同时,1.2 m 高度以上的颗粒物浓度大于 1.2 m 以下的.在本实验中,气溶胶是由 1.2 m 高度处,20 °C 的射流送入气候室内(见图 2 中的气溶胶入口).测量线 A 到气溶胶进口的距离大约为 1.7 m,根据大空间射流核心速度衰减的经验公式,由直径 0.01 m 送入的速度为 $0.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的等温射流到达测量线 A 处的核心速度衰减为约 $0.038\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.从图 5 中的速度分布可以看出,在测量线 A 处,1.2 m 高度处速度

的大小在 $0.1\sim0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间. 所以, 气溶胶射流核心对测量线 A 处, 1.2 m 高度颗粒物浓度的直接影响不是很显著.

由于射流的温度低于室内空气温度, 颗粒在室内不会由浮升力的作用而上升. 同时, 由于置换通风具有垂直方向的温度分层(见图 5), 在呼吸区高度温度梯度达到 $1.6\text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$, 其也会抑制携带颗粒物的射流向上运动^[11]. 这就造成了颗粒物浓度在气溶胶送入高度处达到最大值, 而高于及低于 1.2 m 高度处的颗粒物浓度均低于最大值. 这一现象被有些学者称为颗粒物在置换通风呼吸区高度的“自锁现象”^[5, 13].

从图 6a 中还可以看出, 各个粒径范围颗粒物的分布性质类似, 在 1.2 m 高度以上, $2.0\sim5.0\text{ }\mu\text{m}$ 以及 $5.0\sim10.0\text{ }\mu\text{m}$ 的大颗粒物浓度低于小颗粒物浓度. 这主要是由于大颗粒受到较大的重力作用. 颗粒物浓度在 1.2 m 处的标准差较大, 说明在该处颗粒物浓度波动较大. 这是因为现有的气溶胶发生器很难保证十分稳定的颗粒物浓度输出, 这一现象与 Zhang^[14] 的实验结果一致.

图 6b 显示了测量线 B 处, 颗粒物浓度沿高度方向的分布. 在远离颗粒发生源的测量线 B 处, 颗粒物浓度沿高度方向的分布类似于从热源释放的气态污染物下低上高的两区分布^[11]. 这主要是由于测量线 B 位于远离气溶胶发生器的暖体假人 B 附近, 颗粒物在该处受到人体热羽流以及电脑的热羽流的作用带动上升, 同时, 由于本实验中发生的颗粒物以小颗粒为主, 所以其分布性质也类似于气态污染物.

图 6 说明, “自锁现象”出现的位置与距离污染源的距离有关系. 在距离污染源近的地方(如测量线 A 处)有“自锁现象”出现; 在距离污染源远的地方(如测量线 B 处)是典型的两区分布. 在面积比较大的开放式办公气候中, 即使某一水平方向上局部出现了“自锁现象”, 颗粒物不向上运动而是沿着水平方向扩散, 当其遇到其它热源的热羽时, 由于获得了上升的动力, 颗粒物会随热羽流向上运动, 从而出现典型的两区分布.

图 7 显示了 1.2 m 高度处, 气溶胶颗粒物浓度的水平分布. 本文测量了 1.2 m 高度处 9 个测点的颗粒物浓度值, 测点为 3×3 等距排列, x 方向间距 1.0 m , y 方向间距 0.7 m . 图 7 中的颗粒物浓度采用距离颗粒发生源最近测点的颗粒物浓度并进行量纲一化处理. 如图所示, 距离颗粒发生源越远的测点, 颗粒物浓度越小. 不同粒径范围的颗粒物浓度分布基本一致. 在整个平面内, 各个测点的颗粒物浓度最

大相差 1 个数量级左右. 而垂直高度方向, 同一测量线处, 不同高度相同粒径的颗粒物浓度相差可达 2 个数量级.

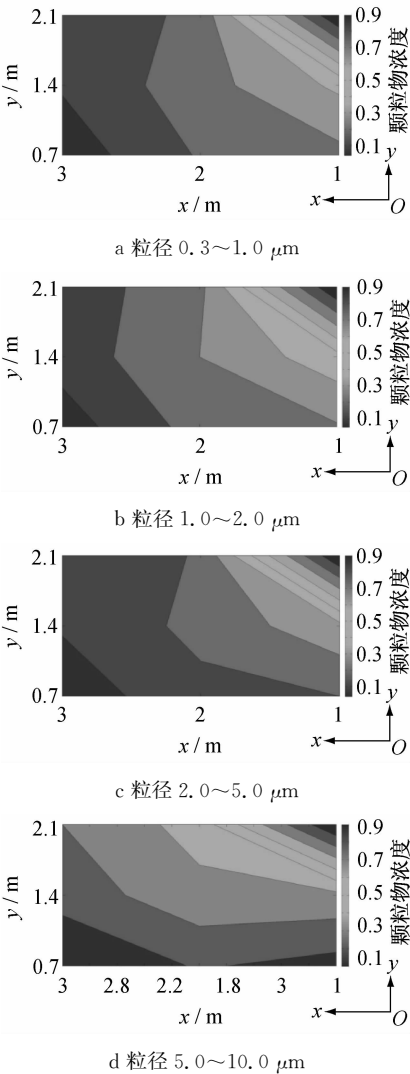


图 7 1.2 m 高度处量纲一化颗粒物浓度的水平分布
Fig.7 Horizontal normalized particle concentration distribution at 1.2 m room height

图 8 显示了两个暖体假人呼吸区的颗粒物浓度值以及各自附近测量线 1.2 m 高度处测点的颗粒物浓度值比较. 其中, 呼吸区的颗粒物浓度指距离暖体假人鼻腔 15 mm 处的颗粒物浓度. 在本实验中, 坐姿暖体假人呼吸区的高度大约为 1.2 m . 从图中可以看出, 由于颗粒物浓度在水平方向的分布存在差异(图 7), 人体对颗粒物的暴露量与人体距离颗粒发生源的位置有关. 距离颗粒发生源越远, 人体的暴露量越小. 暖体假人 B 呼吸区的颗粒物浓度比暖体假人 A 呼吸区的颗粒物浓度低 1~2 个数量级左右. 从图 8 可以看出, 人体呼吸区的颗粒物浓度明显低于各自附近测量线 1.2 m 高度处的颗粒物浓度

值.呼吸区内各个粒径颗粒物的浓度比相应测量线 1.2 m 高度处的颗粒物浓度低 1~2 个数量级. Brohus 和 Nielsen^[4]采用示踪气体研究得出的结论认为,人体周围上升的热羽流会卷吸房间下部洁净的空气并带动其上升,一定程度上可以阻挡呼吸区高度的来流中携带的颗粒向人体呼吸区的运动并减小人体对颗粒物的暴露量.本实验结果得出的结论与 Brohus 和 Nielsen^[4]的观点相一致,可以初步解释图 8 中的结论,详细的原因还需要进一步更加详细的实验分析才能证实.

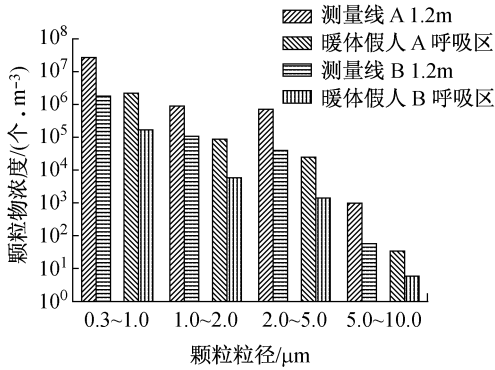


图 8 人体呼吸区颗粒物浓度及 1.2 m 高度颗粒物浓度对比
Fig.8 Comparison of particle concentration at thermal manikin's breathing zone and at 1.2 m room height

4 结论

本文实验研究了在一个边界条件完全可控的人工气候室内,置换通风情况下室内温度场、速度场的分布.同时,研究了模拟人体呼出的气溶胶颗粒物在竖直以及水平方向的分布情况以及室内人员的暴露量,主要结论如下:

- (1)在本实验工况下,室内的温度出现明显的下低上高的垂直分层现象,人体呼吸区高度(1.0~1.5 m)的温度梯度约为 $1.6\text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$.速度沿高度方向的分布较为均匀,室内风速集中在 $0.1\sim0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间.
- (2)在靠近颗粒发生源的测量线 A 处,颗粒物浓度在 1.2 m 高度处达到最大值;同时,1.2 m 高度以上的颗粒物浓度大于 1.2 m 高度以下的颗粒物浓度.颗粒物在呼吸区高度有“自锁现象”发生.而在远离颗粒发生源的测量线 B 处,颗粒物浓度沿高度方向的分布类似于气态污染物下低上高的两区分布.
- (3)在 1.2 m 高度,颗粒沿水平方向的分布较为均匀.距离颗粒发生源越远,颗粒物浓度越小.在整个平面内,各个测点的颗粒物浓度最大相差 1 个数量级左右.而垂直高度方向,同一测量线处,不同高度下同

一粒径的颗粒物浓度相差可达 2 个数量级以上.

(4)人体对颗粒物的暴露量与其距离颗粒物发生源的位置有关.距离颗粒物发生源越远,人体的暴露量越小.人体周围上升的热羽流会卷吸房间下部洁净的空气并带动其上升,从而可以阻挡 1.2 m 高度来流颗粒向人体呼吸区的运动,减小人体对颗粒物的暴露量.

参考文献:

[1] Mangili A, Gendreau MA. Transmission of infectious diseases during commercial air travel[J]. Lancet, 2005, 365(9463): 989.

[2] Tellier R. Review of aerosol transmission of influenza A virus [J]. Emerging Infectious Diseases, 2006,12(11): 1657.

[3] Richmond-Bryant J, Eisner AD, Brixey LA, et al. Short-term dispersion of indoor aerosols: can it be assumed the room is well mixed? [J]. Building and Environment, 2006, 41(2): 156.

[4] Brohus H, Nielsen PV. Personal exposure in displacement ventilated rooms[J]. Indoor Air, 1996,6(3): 157.

[5] Bjorn E, Nielsen PV. Dispersal of exhaled air and personal exposure in displacement ventilated rooms[J]. Indoor Air, 2002,12(3): 147.

[6] Cermak R, Melikov AK. Protection of occupants from exhaled infectious agents and floor material emissions in rooms with personalized and underfloor ventilation [J]. Hvac & R Research, 2007,13(1): 23.

[7] Gao N. Numerical and experimental study of personalized ventilation [D]. Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 2007.

[8] Niu J L, Gao N P, Ma P B, et al. Experimental study on a chair-based personalized ventilation system[J]. Building and Environment, 2007,42(2): 913.

[9] Grymer LF, Hilberg O, Pedersen O, et al. Acoustic rhinometry: values from adults with subjective normal nasal patency[J]. Rhinology, 1991,29(1): 35.

[10] Chen Q, Glicksman L. System performance evaluation and design guidelines for displacement ventilation[M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 2003.

[11] Skistad H, Mundt E, Nielsen PV, et al. Displacement ventilation in non-industrial premises[M]. Brussels: Rehva, 2004.

[12] ASHRAE. ASHRAE handbook-HVAC application (SI) [M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2007.

[13] Gao N P, Niu J L, Morawska L. Distribution of respiratory droplets in enclosed environments under different air distribution methods[J]. Building Simulation, 2008, 1(4): 326.

[14] Zhang Z. Modeling of airflow and contaminant transport in enclosed environments [D]. West Lafayette: Purdue University, 2007.