

文章编号:1004-7220(2013)02-0135-07

· 论 著 ·

气溶胶颗粒在人体上呼吸道模型内沉积的实验研究

李福生¹, 徐新喜¹, 孙 栋², 赵秀国¹, 杨 猛¹, 谭树林¹

(1. 军事医学科学院 卫生装备研究所, 国家生物防护装备工程技术研究中心, 天津 300161; 2. 总后勤部军交运输研究所, 天津 300161)

摘要: **目的** 研究气溶胶颗粒在人体上呼吸道模型内的沉积规律,探索有毒气溶胶在人体上呼吸道的致病机理。**方法** 采用ABS材料制作人体上呼吸道实验模型,搭建人体上呼吸道内气溶胶颗粒沉积的实验台,开展不同呼吸流量(30、60 L/min)条件下不同粒径(0.3、6.5 μm)的气溶胶颗粒在人体上呼吸道模型中的沉积实验。**结果** 不同呼吸流量下不同粒径气溶胶颗粒在人体上呼吸道模型内沉积模式趋势一致,在咽部、喉部和气管部位沉积较多,且喉部沉积最多。**结论** 呼吸流量对模型内气溶胶颗粒沉积率影响较大,大粒径气溶胶更易沉积到模型中,惯性碰撞和湍流强度是气溶胶颗粒沉积的主要机制。

关键词: 气溶胶; 人体上呼吸道; 颗粒沉积; 呼吸流量

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Experimental study on aerosol particle deposition in human upper respiratory tract model

LI Fu-sheng¹, XU Xin-xi¹, SUN Dong², ZHAO Xiu-guo¹, YANG Meng¹, TAN Shu-lin¹

(1. National Biological Protection Engineering Center, Institute of Medical Equipment, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300161, China; 2. Institute of Military Transportation of the General Logistics, Tianjin 300161, China)

Abstract: Objective To examine the aerosol particle deposition in human upper respiratory tract model and explore the pathogenesis of toxic aerosol in human upper respiratory tract. **Methods** A human upper respiratory tract model was constructed using ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) plastic, and an experimental system was established to measure the deposition efficiency of aerosol particles with different diameters (0.3 or 6.5 μm) at different breathing intensity (30 or 60 L/min) in this model. **Results** The deposition patterns of aerosol particles with different diameters and at different breathing intensity in human upper respiratory tract model were similar. The deposition efficiency was generally higher in pharynx, larynx and trachea while being the highest in the area of larynx. **Conclusions** The breathing intensity has a major impact on aerosol deposition efficiency in the model. Larger aerosol particles are more easily to deposit in the model. Inertial impaction and turbulence intensity are the main mechanisms of aerosol particle deposition.

Key words: Aerosol; Human upper respiratory tract; Particle deposition; Breathing intensity

科技进步给人类带来丰硕成果的同时也造成大量的空气污染,严重地威胁到人类健康,致使呼吸系统疾病的发病率逐年增加,如尘肺病、癌症等^[1]。

为了深入认识有毒气溶胶在呼吸道内的传播特点、致病机理以及临床药物气溶胶的治疗效果,国内外研究人员对病毒气溶胶在呼吸道内的运动规律、沉

收稿日期:2012-09-26; 修回日期:2012-10-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31070832)。

通信作者:徐新喜,研究员,博士研究生导师, E-mail: xuxx1@sohu.com。

积模式以及在相应部位沉积的剂量-健康效应进行研究^[2-6],其中多数采用数值模拟方法,如 Zhang 等^[7]对口腔气管内微颗粒输运沉积的研究结果表明,中、高强度呼吸水平下发生在气管收缩部位后的湍流可以加强颗粒在气管内接近喉部位置的沉积;赵秀国等^[8]使用上呼吸道完整模型对循环呼吸模式下气溶胶的沉积部位及沉积规律进行数值模拟;Kleinstreuer 等^[9]综合考虑惯性力和重力对微米颗粒沉积的影响,对微米颗粒在人体呼吸系统较小支气管内的沉积进行数值模拟研究;Luo 等^[10]对非对称人体气管支气管内的瞬态气溶胶沉积进行研究,指出非对称气管支气管的结构对气流运动和气溶胶沉积具有非常重要的影响;Farkas 等^[11]发现非对称的气流分离和复杂的几何模型会导致明显不同的气溶胶沉积模式;Ghalati 等^[12]运用欧拉两相流和拉格朗日颗粒轨迹两种方法对真实人体上呼吸道内的颗粒沉积进行研究,发现颗粒在鼻腔内的沉积要高于咽、喉及气管部位;Alexopoulos 等^[13]对鼻腔至支气管模型内的颗粒输运沉积进行仿真,发现颗粒沉积率与颗粒粒径和流量密切相关;Zhang 等^[14]对综合有口腔-鼻腔-咽喉-气管模型内的气流组织和颗粒沉积进行数值仿真研究,发现呼吸入口的改变对于粒径小于 5 μm 的细小颗粒来说,不仅影响其在口腔、鼻腔内的沉积数量,对其在咽喉及气管内的沉积影响也非常大;Broday 等^[15]研究不规则形状煤灰在人体上呼吸道内的沉积,发现煤灰颗粒在肺泡内的沉积主要发生在休息时,且颗粒越小沉积越明显;

Scheckman 等^[16]对二氧化硅粉尘在人体上呼吸道模型中的沉积进行实验,发现粉尘的物理尺度、流场结构及流场速度对二氧化硅粉尘的沉积有直接影响;Tian 等^[17]运用随机路径模型研究由吸入器吸入的药物气溶胶在人体口喉模型及气管支气管内的沉积状况,发现瞬时吸入对颗粒在口喉至前 3 级支气管模型中的沉积影响较大,而对其在第 4 级以下支气管中的沉积影响较小;Zhang 等^[18]对不同成分烟草燃烧物在人体口腔至第 9 级支气管的粒径变化及其沉积进行研究,发现由于颗粒物成分不同而导致其吸湿性成长有所差异,最终将影响其在呼吸道内的沉积。然而上述研究也存在着不足,主要表现在:①使用的生物力学模型与实际情况有差距,多数为简化模型;②目前的研究在计算机仿真层面较多,而实验则相对较少;③关注整体沉积率较多,局部沉积少。基于此,本研究通过对正常人体上呼吸道进行扫描,建立从口腔到前 3 级支气管的完整真实人体上呼吸道规范模型^[19],并依据此实验模型,从实验的层面对不同呼吸流量条件下不同粒径的气溶胶颗粒在人体上呼吸道内沉积开展研究,分析人体上呼吸道模型内气溶胶颗粒沉积的主要沉积机制。

1 实验设备及仪器

如图 1 所示,建立人体上呼吸道模型气溶胶沉积实验系统。该实验系统主要包括人体上呼吸道模型、气溶胶发生系统、气溶胶监测系统、气路系统和测量系统。

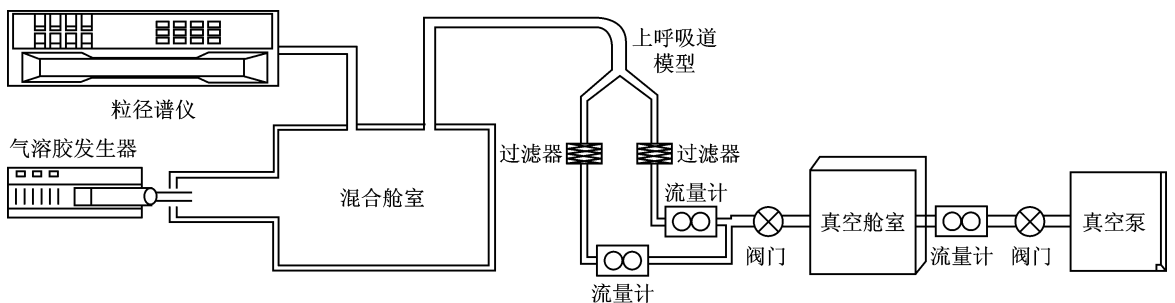


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experiment setup

1.1 人体上呼吸道模型

基于正常人体上呼吸道 CT 扫描图像,运用高级图像处理技术三维重构人体上呼吸道模型并进行

规范化处理,将规范化的真实人体上呼吸道模型数据输入 SPS600 快速成型机,采用激光快速成型技术和 ABS 材料,制作真实人体上呼吸道气溶胶实验模

型(见图2)。为便于实验和仿真对比研究,模型假设壁面光滑。模型包括口腔、悬雍垂、咽部、会厌、喉部、声门、梨状窝、气管和前3级支气管;模型口腔进口简化为圆形,口腔腔体为拱形,口腔进口沿水平方向,舌后区高度为33.55 mm;悬雍垂在口腔上壁靠近咽部前壁处,高度为6.14 mm;咽部形状不规则,矢状位大于冠状位,咽部和口腔底部平滑连接;模型喉部下方有声门开口,会厌在咽的内部突起,会厌与声门通过管型连接,会厌后区高度41.92 mm;梨状窝位于喉部底端两侧;声门与气管平滑连接;主气管分别连接两个2级支气管,2级支气管分别连接长度和数目不同的3级支气管,主气管长134.69 mm,各级支气管长短不一。上述气管平滑连接而成,支气管相对于主气管非对称分布。



图2 真实人体上呼吸道气溶胶沉积实验模型

Fig.2 Experiment model of simulating aerosol particle deposition in the real human upper respiratory tract

1.2 气溶胶发生系统

气溶胶发生系统由气溶胶发生器、高纯氮气组成。实验采用的气溶胶发生器为美国TSI公司生产的CMAG3475型凝聚式单分散气溶胶发生器,可以产生浓度大于 10^6 个/ cm^3 的高度单分散气溶胶,且粒径为 $0.1 \sim 8 \mu\text{m}$ 的球形和几乎电中性的固体或液体粒子(取决于颗粒物的材料),颗粒物大小和浓度可以改变。

CMAG3475型凝聚式单分散气溶胶发生器利用蒸发冷凝法(即凝聚法)发生气溶胶。蒸发冷凝技术分为同相凝结和异相凝结,前者在冷凝过程中没有另外提供凝结核,故蒸汽冷凝环境差异较大,单分散性也较差;后者有凝结核供蒸汽均匀地冷凝,能够发生单分散性更好的气溶胶,故得到广泛的应用^[20]。而凝聚式单分散气溶胶发生器的发生原理

为可控的非均相异核凝结技术,凝结核源一般为固态氯化钠结晶粒子,它可以在高浓度的情况下确保气溶胶的发生量保持恒定和高度单分散(见图3)。

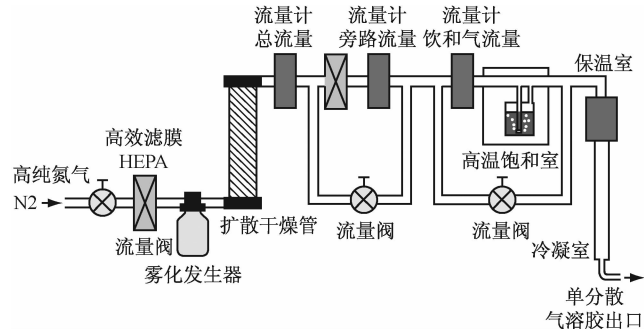


图3 气溶胶发生原理图

Fig.3 Schematic diagram of the aerosol generator

在图3中,3475型凝聚式单分散气溶胶发生器使用可调控的凝聚技术来产生单分散气溶胶。基于Sinclair-LaMer原理,此操作主要是将蒸汽凝聚在凝结核上。以洁净高纯氮气作为载气,经调压阀调压后以一定的压力和流量通过仪器内部装有无机盐溶液的喷雾器产生低浓度的水溶性氯化钠雾滴。液滴通过干燥室,结晶成高浓度的细小固体氯化钠粒子作为气溶胶凝结核,凝结核通过可调温的饱和室和低挥发性物质的蒸汽混合,如癸二酸二异辛酯(DEHS)、邻苯二甲酸二辛酯(DOP)、金刚砂3004、石蜡或巴西棕榈蜡。载气、凝结核和蒸发物质从饱和室进入保温室,保温室确保气溶胶原料完全蒸发。在保温室中,凝聚核和蒸汽进入空气冷却的凝结室,通过设定过饱和度,可控的非均相凝结过程开始,产生高的单分散气溶胶。

颗粒物的中值粒径取决于蒸汽的凝聚速率,故通过控制蒸汽浓度,调整饱和室温度和通过保温室的流量来选择颗粒物的粒径^[21]。本实验采用的3475型凝聚式单分散气溶胶发生器技术参数见表1。氯化钠试剂,天津市福晨化学试剂厂;DEHS,上海国药集团化学试剂有限公司生产。

1.3 气溶胶监测系统

气溶胶稀释器:在高浓度的气溶胶分析时,能够降低颗粒物的入口浓度,使颗粒物的入口浓度在仪器操作最敏感、精度最高的范围内。

便携式粒子计数器:对气溶胶发生器发出的气

表1 CMAG3475型凝聚式单分散气溶胶发生器技术参数
Tab.1 Technical parameters of condensation monodisperse aerosol generator (model 3475)

运行模式	改良的 Sinclair-LaMer 发生器	
颗粒物类型	液体	DEHS(无毒)、DOP 或金刚砂 3004
	固体	巴西棕榈硬蜡、石蜡或硬脂酸
粒径范围	DEHS、DOP	0.1~8 μm
	巴西棕榈硬蜡	0.1~4 μm
	硬脂酸	0.1~9 μm
几何标准偏差		<1.10 粒子范围(0.5~8 μm)
		<1.25 粒子范围(0.1~0.5 μm)
颗粒物浓度		>106 个/cm ³
流量		3.5~4.0 L/min
对压缩气源要求		1.14 MPa 或 0.6 MPa(高纯氮气)
辐射或荧光标记		可能
均匀单级荷电		可能
电源要求		110/220VAC, 50/60 Hz
尺寸		250 mm × 300 mm × 550 mm
重量		17 kg

溶胶粒子进行采样分析,测定气溶胶粒子粒径分布范围。

气溶胶储存箱:用以储存气溶胶,具有稀释气溶胶浓度和缓冲作用,将气溶胶预混到合理的浓度。

1.4 气路系统

气路系统包括管路、真空泵、流量计、调节阀、高效过滤器。各元器件通过软管相连接,连接处加装喉箍并用热熔胶进行密封,保证整个气路具有良好的气密性。真空泵用以模仿人体肺部进行吸气,流量计用以观测流量,调节阀用来调节流量,过滤器将通过模型而未沉积的气溶胶颗粒过滤下来。

1.5 测量系统

测量系统为电子天平,采用上海精密科学仪器有限公司生产的型号为 Adventure 的奥豪斯电子天平,精度可达到 0.1 mg。

2 实验方法和程序

本实验模型的构建程序在文献[19]中已有详细描述。一般人体呼吸道研究分为稳态呼吸模式和循环呼吸模式,目前世界公认的3种稳态呼吸模式是:休息状态(呼吸流量 15 L/min)、轻微运动状态

(呼吸流量 30 L/min)、剧烈运动状态(呼吸流量 60 L/min)^[22]。实验测量在稳态呼吸模式、呼吸流量分别为 30、60 L/min 条件下进行,即保证模型的入口流量保持恒定。产生的气溶胶颗粒粒径分别为 0.3、6.5 μm,真空泵模拟人体肺部吸气的抽吸时间为 1 h。

2.1 实验方法

气溶胶颗粒的种类、沉积部位以及沉积数量和浓度,决定了其对人体的危害程度或治疗效果。目前,文献中常用的评价气溶胶颗粒在人体上呼吸道内各部位沉积的指标是沉积率(deposition fraction, DF)^[23]:

$$DF = \frac{N_{\text{part}}}{N_{\text{all}}} \times 100\%$$

式中: N_{part} 为上呼吸道中某一部位的气溶胶颗粒的沉积数量, N_{all} 为进入人体上呼吸道内所有气溶胶颗粒的数量。而在气溶胶沉积实验中,气溶胶颗粒沉积数量往往难以获得,故本文采用称重的方法来计算气溶胶颗粒的沉积率,其计算公式为:

$$DF = \frac{m_{\text{part}}}{m_{\text{all}}} \times 100\%$$

式中: m_{part} 为沉积到上呼吸道中某一部位的气溶胶颗粒的质量, m_{all} 为进入人体上呼吸道内所有气溶胶颗粒的质量。

实验后,将模型分解为如图4所示的口腔、咽、喉、气管和支气管5个部分,并分别进行称重,高效清洗后再进行称重,便可得每个部位气溶胶颗粒的沉积量,进而求得每个部位的气溶胶颗粒沉积率。



图4 人体上呼吸道模型分解图

Fig.4 Decomposition of the human upper respiratory tract model

2.2 实验过程

准备阶段:①清洗人体上呼吸道内表面;②涂抹硅油模拟呼吸道壁面黏性,防止已沉降气溶胶颗粒脱落,称量模型、滤膜原始重量;③连接模型及管路,

并进行密封;④旋转流量计调节流量,安装滤膜;⑤调试气溶胶发生器,用粒径质谱仪监测粒径分布情况,直至达到预定浓度。

实验步骤:①启动气溶胶发生器,通氮气,将发生的气溶胶引入气溶胶储存箱中;②粒径质谱仪测量储存箱中气溶胶粒子的浓度及粒径分布情况;③开启真空泵,利用真空泵的抽吸作用模拟人的吸气过程,同时开始计时;④定时用粒径质谱仪对储存箱中的气溶胶进行监测;⑤1 h后关闭真空泵、气溶胶发生器和氮气;⑥分解模型,取出滤膜,分别对模型、滤膜进行称重;⑦高效清洗分解后的模型,再进行称重;⑧分析计算测量结果。

3 实验结果及分析

3.1 不同呼吸流量对气溶胶颗粒沉积的影响

图5、6分别为同种粒径(0.3、6.5 μm)的气溶胶颗粒在不同呼吸流量(30、60 L/min)条件下在人体上呼吸道不同部位沉积率的实验结果。虽然气溶胶受到呼吸流量的影响在人体上呼吸道内各部位的沉积率有所不同,但其沉积模式却非常相似。总体看来,气溶胶颗粒在口腔的沉积较少,而在咽、喉以及气管内沉积较多,且喉部沉积最多。分析其原因,一方面是由于气流在流入咽喉部位流向发生改变,截面积迅速减小,造成气流速度增加,气溶胶颗粒在高速气流的夹带下惯性碰撞增多,冲击上气道壁面而造成沉积;另一方面是由于咽喉部位几何结构复杂,且随着咽部和喉部声门截面积影响会产生两次射流,导致气流在咽喉部位的湍流强度较强,且产生异常复杂的涡量分布形式,致使气溶胶颗粒的湍流扩散增多,沉积率也相对较高。当气流进入气管的直气道内,流速迅速减慢,湍流强度随之降低,因而沉积较少。从不同呼吸流量下气溶胶颗粒沉积率对比中可以看出,随着呼吸流量的增大,更多的气溶胶在人体上气道内沉积,其原因是气溶胶颗粒在上气道内沉积的主要机制是惯性碰撞,呼吸流量的增加将直接导致气溶胶颗粒的惯性碰撞增多。

3.2 不同粒径对气溶胶颗粒沉积的影响

图7、8分别为同一呼吸流量(30、60 L/min)条件下,不同粒径(0.3、6.5 μm)的气溶胶颗粒在人体上呼吸道不同部位沉积率的实验结果。气溶胶受到颗粒粒径的影响在人体上呼吸道内各部位的沉积各

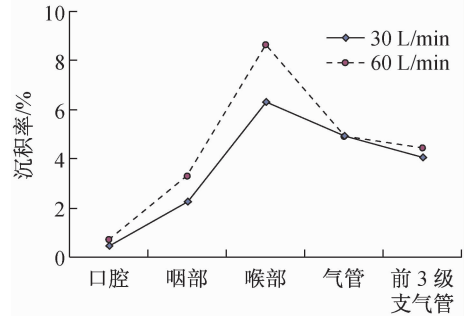


图5 粒径为0.3 μm 的气溶胶不同呼吸流量沉积结果

Fig. 5 Deposition result of aerosol particles with diameter of 0.3 μm at different breathing intensity

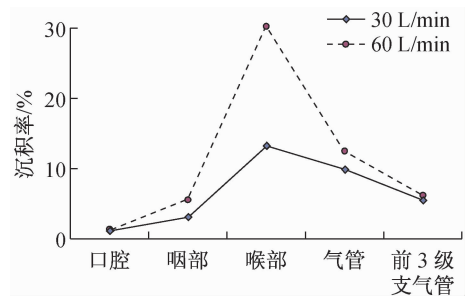


图6 粒径为6.5 μm 的气溶胶不同呼吸流量沉积结果

Fig. 6 Deposition result of aerosol particles with diameter of 6.5 μm at different breathing intensity

异,粒径越大沉积越多,但总体趋势一致,即气溶胶颗粒在口腔的沉积较少,而在咽、喉以及气管内沉积较多,且喉部沉积最多。且在呼吸流量较大的情况下,粒径较大的颗粒在喉部沉积要远大于粒径较小的颗粒。从不同粒径气溶胶颗粒沉积率的对比中可以看出,6.5 μm 气溶胶颗粒在上气道不同部位的沉积率要明显高于0.3 μm 气溶胶,说明较大的气溶胶颗粒在上呼吸道内沉积的机率要大于较小的气溶胶颗粒,而较小的气溶胶颗粒则更容易通过人体上呼吸道进入支气管甚至肺泡内。

3.3 其他因素对实验结果的影响

3.3.1 模型材料的影响 实验中采用ABS材料运用快速成型技术参照真实人体上呼吸结构数据制作人体上呼吸道实验模型,假设壁面是光滑的,而实际人体上呼吸道内部有无数的纤毛结构,这无疑会极大影响颗粒物的沉积。理论上实验中的颗粒沉积结果应小于实际人体上呼吸道中颗粒沉积结果。

3.3.2 操作水平的影响 由于制作水平和操作的限制,模型内表面会存在一定的粗糙度,导致流场情

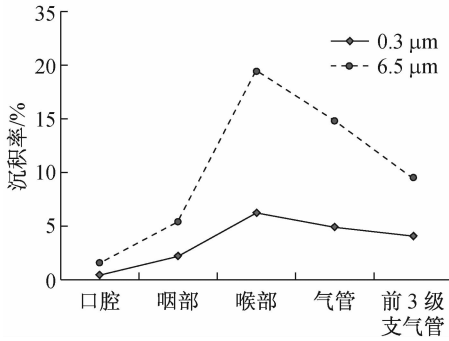


图7 呼吸流量 30 L/min 时气溶胶颗粒沉积率

Fig. 7 Deposition efficiency of aerosol particles at breathing intensity of 30 L/min

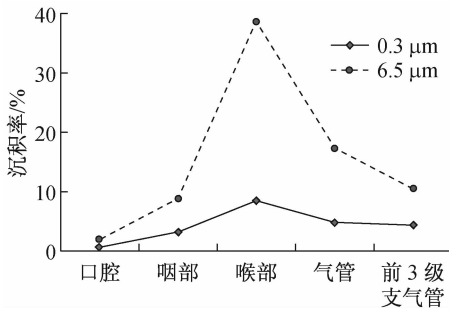


图8 呼吸流量 60 L/min 时气溶胶颗粒沉积率

Fig. 8 Deposition efficiency of aerosol particles at breathing intensity of 60 L/min

况和真实人体上呼吸道必然会存在差异,实验结果也相应地存在差异,但气溶胶颗粒在上呼吸道模型内离体实验的沉积规律同样能够反映出实际人体上呼吸道内的气溶胶沉积模式,对于探索有毒气溶胶在人体上呼吸道的致病机理以及临床药物气溶胶的治疗效果具有非常重要的意义。在后续研究中,应进一步提高模型制作精度和实验人员的操作水平,使离体实验结果更加真实可靠。

4 结论

对不同呼吸流量条件下不同粒径的气溶胶颗粒在人体上呼吸道模型内的沉积进行实验研究,分析气溶胶颗粒沉积的影响因素,得出结论如下:

(1) 呼吸流量对气溶胶颗粒在模型内的沉积影响较大,随着呼吸流量的增加,气溶胶颗粒在人体上呼吸道模型内不同部位的沉积率随之变大;

(2) 不同粒径气溶胶颗粒在模型内沉积模式相似,但对沉积率影响较大,大颗粒气溶胶在模型内沉

积率较大,而细微颗粒更易沉积在支气管甚至进入肺泡当中;

(3) 气溶胶颗粒在人体上呼吸道模型内沉积主要受惯性碰撞和湍流强度的影响,湍流强度较大的部位更易造成气溶胶颗粒的沉积。

参考文献:

- [1] 尹景娟. 颗粒物在人体上呼吸道内运动沉降规律的研究 [D]. 北京: 北京交通大学硕士学位论文, 2007.
- [2] Inthavong K, Choi LT, Tu J, *et al.* Micron particle deposition in a tracheobronchial airway model under different breathing conditions [J]. *Med Eng Phys*, 2010, 32 (10): 1198-1212.
- [3] Huang JH, Zhang LZ, Yu SY. Modeling micro-particle deposition in human upper respiratory tract under steady inhalation [J]. *Particology*, 2011, 9(1): 39-43.
- [4] Xi JX, Si XH, Kim JW, *et al.* Simulation of airflow and aerosol deposition in the nasal cavity of a 5-year-old child [J]. *J Aerosol Sci*, 2011, 42(3): 156-173.
- [5] Morawska L, Johnson GR, Ristovski ZD, *et al.* Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities [J]. *J Aerosol Sci*, 2009, 40(3): 256-269.
- [6] Alföldy B, Giechaskiel B, Hofmann W, *et al.* Size-distribution dependent lung deposition of diesel exhaust particles [J]. *J Aerosol Sci*, 2009, 40(8): 652-663.
- [7] Zhang Z, Kleinstreuer C, Kim CS. Micro-particle transport and deposition in a human oral airway model [J]. *J Aerosol Sci*, 2002, 33(12): 1635-1652.
- [8] Zhao XG, Xu XX, Tan S, *et al.* Characteristic of gas-solid two-phase flow in the human upper respiratory tract model [C]//The 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Beijing: [s. n.], 2009: 1-6.
- [9] Kleinstreuer C, Zhang Z, Kim CS. Combined inertial and gravitational deposition of microparticles in small model airways of a human respiratory system [J]. *J Aerosol Sci*, 2007, 38(10): 1047-1061.
- [10] Luo HY, Liu Y. Modeling the bifurcating flow in a CT-scanned human lung airway [J]. *J Biomech*, 2008, 41 (12): 2681-2688.
- [11] Farkas A, Balóshózy I. Simulation of the effect of local obstructions and blockage on airflow and aerosol deposition in central human airways [J]. *J Aerosol Sci*, 2007, 38 (8): 865-884.
- [12] Farhadi Ghalati P, Keshavarzian E, Abouali O, *et al.* Numerical analysis of micro- and nano-particle deposition in a

- realistic human upper airway [J]. *Comput Biol Med*, 2012, 42(1): 39-49.
- [13] Alexopoulos AH, Karakosta P, Kiparissides C. Particle transfer and deposition using an integrated CFD model of the respiratory system [J]. *Comput Aided Chem Eng*, 2010, 28: 211-216.
- [14] Zhang Z, Kleinstreuer C. Computational analysis of airflow and nanoparticle deposition in a combined nasal-oral-tracheobronchial airway model [J]. *J Aerosol Sci*, 2011, 42(3): 174-194.
- [15] Broday DM, Rosenzweig R. Deposition of fractal-like soot aggregates in the human respiratory tract [J]. *J Aerosol Sci*, 2011, 42(6): 372-386.
- [16] Scheckman JH, McMurry PH. Deposition of silica agglomerates in a cast of human lung airways: Enhancement relative to spheres of equal mobility and aerodynamic diameter [J]. *J Aerosol Sci*, 2011, 42(8): 508-516.
- [17] Tian G, Longest WP, Su GG, *et al.* Development of a stochastic individual path (SIP) model for predicting the tracheobronchial deposition of pharmaceutical aerosols: Effects of transient inhalation and sampling the airways [J]. *J Aerosol Sci*, 2011, 42(11): 781-799.
- [18] Zhang Z, Kleinstreuer C, Hyun S. Size-change and deposition of conventional and composite cigarette smoke particles during inhalation in a subject-specific airway model [J]. *J Aerosol Sci*, 2012, 46: 34-52.
- [19] 孙栋, 李功杰, 李福生, 等. 人体上呼吸道模型三维重建及规范化研究[J]. *生物医学工程与临床*, 2012, 16(2): 127-131.
- [20] 陈亮, 张振中, 江峰, 等. 蒸发冷凝法气溶胶发生方法研究综述[J]. *环境污染与防治(网络版)*, 2007, 8: 1-9.
- [21] 刘志军, 王智超. 凝聚式单分散气溶胶发生技术的探讨[J]. *中国粉体技术*, 2007, 13(2): 31-36.
- [22] 孙栋, 徐新喜, 李福生, 等. 人体上呼吸道中气流涡结构特征数值仿真研究[J]. *医用生物力学*, 2011, 26(3): 262-268.
- Sun D, Xu XX, Li FS, *et al.* Simulation study on characteristics of the vortex structure in human upper respiratory tract [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(3): 262-268.
- [23] Li Z, Kleinstreuer C, Zhang Z. Particle deposition in the human tracheobronchial airways due to transient inspiratory flow patterns [J]. *J Aerosol Sci*, 2007, 38(6): 625-643.

· 致读者 ·

关于图表的要求

表和图的设计应科学、简洁、合理,有自照性,均分别按其正文出现先后次序连续编号,并冠以图(表)序号和题目。说明性的资料应置于图(表)下方注释中,并在注释中标明图标中使用的全部非公知公用的缩写及表中的统计学处理。均采用三线表,表内数据同一指标有效位数一致,均数及标准差小数点后保留位数一致。图题、表题及图注、表注均应中、英文对照书写。

黑白图片必须清晰度及对比度良好,层次分明,彩色照片要求色彩鲜明,图像清晰。图片或照片大小要基本一致。图不宜过大,最大宽度半栏图不超过 7.5 cm,通栏图不超过 16.5 cm,高与宽比例以 5 : 7 为宜。图注应附于图下或文后,不要粘贴,背面用铅笔注明作者姓名、图序号,并表明上、下方向,照片中需说明的部位请以箭头或字母标注,在图注中说明。图片及照片不得折损。若刊用人像,应征得本人书面同意,或遮盖其能辨认出系何人部分(眼睛)。大体标本照片在图内最好有尺度标记。病理照片要求注明染色方法和放大倍数。

试验数据的曲线图必须根据测试数据绘制,线条必须光滑清明,有横纵坐标的统计图必须有确切的标目名称和规范的计量单位;实验装置等示意图一定要精心绘制,对图内的结构要有必要的注释,使读者一目了然;引用他人的图(表)一定要用文献角码表明出处。