

文章编号: 1004-7220(2023)04-0670-07

不同环境温度对人体呼吸道内颗粒物沉积规律的影响

冯亚宁, 崔新光

(华中科技大学 航空航天学院, 武汉 430074)

摘要:目的 探究环境温度对人体呼吸道内气体流动和颗粒物沉积规律的影响。方法 采用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法模拟具有黏液层的人体呼吸道内的气固两相流; 考虑 6 种不同环境温度 (-25、-15、0、15、26.7、45 °C) 和 8 种不同粒径 (1~8 μm) 的颗粒物。结果 气流流速与 6 种温度下平均气流流速的差异可达 39.42%; 气流湍流动能与 6 种温度下湍流动能平均值的差异可达到 11.59%; 气流温度变化与 6 种温度下气流温度变化平均值的差异可高达 82.4%。颗粒总沉积率与 6 种温度下总沉积率平均值的差异可达 14.72%; 颗粒局部沉积率与 6 种温度下局部沉积率平均值的差异可达到 37.08%。结论 环境温度差异会影响人体呼吸道内部的气流流场性质, 进而会影响颗粒物在呼吸道内的沉积规律。因此, 获得精准的颗粒物在人体呼吸道内的运动沉积规律, 有必要考虑环境温度的影响。

关键词: 环境温度; 人体呼吸道; 气体流动; 颗粒物沉积

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.04.005

Effects of Ambient Temperature on Particle Deposition in Human Respiratory Tract

FENG Yaning, CUI Xinguang

(School of Aerospace Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: **Objective** To investigate the effects of ambient temperature on airflow and particle deposition patterns in human respiratory tract. **Methods** The gas-solid two-phase flows in human respiratory tract with mucus layer were simulated using computational fluid dynamics (CFD) method. Particles with 8 different sizes (1-8 μm) in human respiratory tract under six different ambient temperatures (-25, -15, 0, 15, 26.7, 45 °C) were considered. **Results** The difference between the flow velocity and the average flow velocity under six temperatures could reach 39.42%. The difference between the air flow turbulent kinetic energy and the average turbulent kinetic energy under six temperatures could reach 11.59%. The difference between the change of airflow temperature and the average change of air flow temperature under six temperatures could reach 82.4%. The difference between the particle total deposition rate and the average value of the total deposition rate under six temperatures was 14.72%. The difference between the particle local deposition rate and the average value of the local deposition rate under six temperatures could reach 37.08%. **Conclusions** The ambient temperature will have an impact on the properties of the airflow field, and further affect the properties of particle deposition in human respiratory tract. Therefore, it is necessary to consider the influence of ambient temperature when accurately predicting patterns of particle transport and deposition in human respiratory tract is required.

Key words: ambient temperature; human respiratory tract; airflow; particle deposition

收稿日期: 2022-06-23; 修回日期: 2022-08-19

通信作者: 崔新光, 副教授, E-mail: xinguang_cui@hust.edu.cn

空气中悬浮的大量颗粒物与人们的生命健康息息相关。人们讲话、咳嗽、打喷嚏等行为都会产生大量颗粒物。附着在这些颗粒物上的病毒通过呼吸进入体内会造成人体感染,进而引起呼吸道疾病的广泛传播,给人们生命健康和生产生活造成了巨大破坏^[1-2]。根据世界卫生组织统计,2020年爆发的新冠疫情已在全球造成了超过5亿人感染,约600万人死亡^[3]。因此,研究颗粒物在人体呼吸道内的输运沉积规律具有重要意义。

由于人体真实呼吸道几何结构复杂,故在早期研究中主要采用简化的呼吸道模型。随着医学影像技术的发展,人们越来越多地采用基于图像的真实人体呼吸道模型。此外,呼吸道壁面纤毛的存在会对附着在壁面的颗粒产生清除作用,但纤毛作用机制比较复杂,故目前大多数研究仍然假设呼吸道壁面为固体壁面,忽略了呼吸道壁面传热作用以及壁面纤毛运动^[4-7]。Chen等^[4,8]采用简化的人体口腔模型,研究考虑壁面黏膜传热作用下的呼吸道内流场分布与颗粒物输运沉积规律;同时,该研究团队在真实的下呼吸道模型中考虑了壁面传热的作用^[9]。一项研究采用真实人体呼吸道探讨不同气流随机扩散作用下呼吸道内流场分布与颗粒物输运沉积规律^[10]。但以上研究均未深入分析温度对呼吸道内流动规律和颗粒物沉积规律的影响。

目前,颗粒粒径、呼吸强度等因素对呼吸道内气体流动和颗粒物沉积规律的影响已经有了比较清晰的认识,而环境因素(如环境湿度和环境温度)对呼吸道内两相流动力学规律影响的研究还比较缺乏。如果不考虑液滴颗粒在空气中的蒸发和吸湿现象,多数研究均忽略了环境湿度对呼吸道内两相流动的影响^[6-7,10]。许笑羽^[11]研究火灾烟气高温情况下人体呼吸道内颗粒物的沉积规律,然而该研究并未考虑低温情况。我国幅员辽阔,不同季节、不同城市的气温差异很大^[12]。在不同环境温度下,人体口腔的吸入气流温度不同,则颗粒物沉积规律也有所不同,进而病毒的传播规律也会不同。因此,有必要深入研究温度对颗粒物在人体呼吸道沉积规律的影响。

本文基于电子计算机断层(computed tomography, CT)扫描技术构建真实人体呼吸道3级支气管模型,考虑呼吸道黏液层的传热作用,采用

ANSYS Fluent软件中考虑转捩的雷诺平均剪切应力输运(RANS-Transition-SST)模型结合颗粒离散相模型(discrete particle model, DPM)方法,探究不同环境温度对人体呼吸道内流场分布和颗粒物沉积规律的影响。

1 研究方法

1.1 呼吸道几何模型与网格

本文在课题组现有基于CT图像的人体呼吸道模型基础上增加黏液层,构建可以考虑呼吸道黏膜传热的人体呼吸道模型[见图1(a)]。此呼吸道3级支气管树模型包括口、咽、喉、主气管和3级支气管。本文以1 mm厚度固体薄壁层代表真实人体呼吸道的黏液层以及呼吸道表层组织。假设呼吸过程中黏液层的厚度和形状不发生改变;黏液层最外侧温度为人体恒定体温37℃^[4,8]。在呼吸道内部,采用六面体网格;在呼吸道表面,采用多面体网格,设置10层边界层网格;在黏液层区域,设置6层边界层网格[见图1(b)]。采用多套网格进行网格无关性验证。

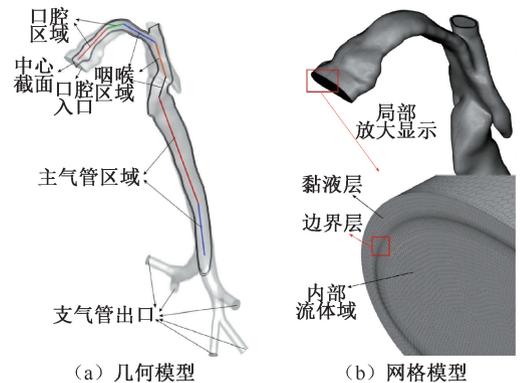


图1 人体呼吸道模型

Fig. 1 Models of human respiratory tract

(a) Geometric model, (b) Mesh model

1.2 呼吸道内两相流的控制方程

1.2.1 流体相方程 假设空气为理想气体,物理性质满足理想气体状态方程,其流动方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u'_i u'_j}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j H) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k_f}{c_p} \frac{\partial H}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

式中： t 为时间； ρ 为空气密度； u 和 x 分别为速度和位移；下标 i 和 j 表示笛卡尔坐标系下不同方向上的分量； k_f 为空气热导率； μ 为空气动力黏度系数； H 为空气焓变； c_p 为空气比热容。

1.2.2 颗粒相动力学方程 假设颗粒物为球形，忽略颗粒物的自身旋转运动以及颗粒间的聚集与破碎现象，不考虑颗粒的相变，仅考虑颗粒物受到曳力 F_D 和重力 $m_p g$ 作用，根据牛顿第2定律，颗粒物运动方程可表达为^[13-14]：

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_D + m_p g \quad (4)$$

$$F_D = \frac{3}{4} \frac{\mu C_D Re_p}{\rho_p d_p^2} (\mu - \mu_p) \quad (5)$$

式中： m_p 、 u_p 、 ρ_p 、 μ_p 分别为颗粒的质量、速度、密度和动力学黏度； g 为重力加速度。颗粒曳力系数 C_D 以及颗粒雷诺数 Re_p 的计算公式为：

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_d} + \frac{a_3}{Re_d^2} \quad (6)$$

$$Re_p = \frac{\rho_p d_p |u - u_p|}{\mu} \quad (7)$$

式中： d_p 为颗粒物直径； a_1 、 a_2 、 a_3 分别为对应系数。
1.2.3 黏膜层传热方程 由于黏液层的流动速度为 $91.6 \mu\text{m/s}$ ，因此其可被视为静止固体壁面，并假设其具有和水相同的物理性质^[15-16]。黏液层的热量传递控制方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m h) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_m \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (8)$$

式中： T 为黏液层的温度； k_m 为热导率； ρ_m 为密度； h 为焓变。

1.3 计算方法

本文采用 ANSYS Fluent 软件中的 Simple 算法对控制方程进行稳态计算。设置呼吸道入口处为速度入口边界。入口边界处的湍流度为 5%。设置呼吸道出口边界为压力出口边界。在入口边界处，同时射入 1×10^4 个颗粒。采用单向耦合、稳态颗粒追踪的方法追踪颗粒的运动轨迹。假设颗粒一旦触碰到呼吸道黏液层壁面即发生沉积。

1.4 算例设置

根据中国天气网公布的相关统计数据，我国典型

城市如哈尔滨、北京、深圳的月平均最低温度分别为 -24.15 、 -8.15 、 $12.85 \text{ }^\circ\text{C}$ ，最高温度分别为 27.85 、 30.85 、 $31.85 \text{ }^\circ\text{C}$ ，部分城市夏季甚至会出现 $45.85 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上的高温天气^[12]。本文考虑了 6 种不同的典型环境温度，即 -25 、 -15 、 0 、 15 、 26.7 、 $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 。同时，假定人体呼吸道壁面温度为 $36.85 \text{ }^\circ\text{C}$ ，考虑人在中等运动强度下的呼吸流量 30 L/min 和 8 种不同粒径的颗粒物 ($1 \sim 8 \mu\text{m}$)，颗粒物密度为 1000 kg/m^3 。

2 结果与讨论

2.1 网格无关性验证

本文分别采用 $(4.0, 6.0, 8.0, 9.5) \times 10^6$ 网格对上述模型中的气流进行数值计算，并沿着气流运动方向提取呼吸道中心的速度，进行网格无关性验证。结果表明，随着网格数量的增加，各个网格计算的流动速度值也不断接近[见图 2(a)]。当网格数由 8.0×10^6 增加至 9.5×10^6 ，提取线上的速度值变化趋势基本一致。因此，在综合考虑计算精度与计算效率后，最终选择 8.0×10^6 数量的网格进行后续计算。

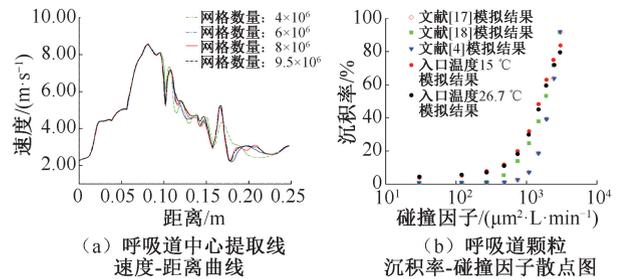


图2 网格无关性验证与颗粒沉积率验证^[4,17-18]

Fig. 2 Verification of mesh independence and particle deposition fraction^[4,17-18]

(a) Velocity-distance curve of the center extraction line in the respiratory tract, (b) Scatter diagram of particle deposition fraction-impact factor in respiratory tract

2.2 颗粒物沉积率验证

颗粒沉积率的表达式如下：

$$DE = \frac{N_{\text{deposition}}}{N_{\text{total}}} \times 100\% \quad (9)$$

式中： $N_{\text{deposition}}$ 为呼吸道壁面沉积的颗粒物数量； N_{total} 为由口腔进入呼吸道的颗粒物数量。

微米颗粒物在呼吸道内的沉积率主要受颗粒物惯性冲击的影响，故本文采用碰撞因子 $d_p^2 Q$ (d_p 为

颗粒物直径, Q 为流量) 作为自变量来表达颗粒物的沉积特性^[11]。结果显示, 本文的数值方法可以获得和文献中的实验数据比较一致的结果 [见图 2(b)]。由于本文采用的呼吸道模型与对比文献中的模型不同, 因而沉积率也存在一定差异。后续计划采用此模型进行颗粒物沉积实验, 对本文采用的数值方法进行更加直接的验证。总之, 本文采用的模拟方法可用于进一步研究环境温度对颗粒物在人体呼吸道内沉积规律的影响。

2.3 环境温度对呼吸道内气流流场与温度场的影响

口腔区域内随着呼吸道直径的小幅度缩小, 气流在软腭后部开始加速, 但总体仍处在层流状态, 随后气流在口咽部位存在一个“射流”过程, 最大流速达到 9 m/s。气流在咽喉区域存在一定的涡结构, 在气管部位存在回流现象, 当流体到达各级支气管处时, 流速逐渐减小至 1 m/s 左右, 这种流动差异主要是由呼吸道外形结构造成 [见图 3(a)]。

对比这 6 种温度下的速度云图可以发现, 流动的差异主要体现在咽喉部位的涡结构以及主气管部位回流区域面积大小的不同。相较于 45、26.7、15 °C 环境温度, 0、-15、-25 °C 环境温度情况下呼吸道中心截面上的速度高于 5 m/s 的区域要更多。

此外, 环境温度的不同可以影响呼吸道内流体的速度分布和湍动能分布。入口环境温度越低, 呼吸道内流体的流速和湍流动能的波动程度越大, 环境温度 -25 °C 时的气流速度波动程度和湍流动能波动程度要明显高于其他环境温度情况 [见图 4(a)、

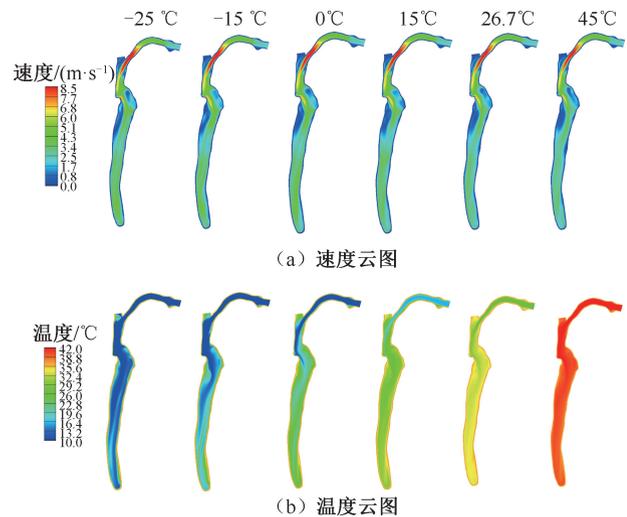


图 3 不同环境温度下人体呼吸道中心截面上速度和温度云图

Fig. 3 Velocity and temperature contours at mid-plane of human respiratory tract under different temperatures

(a) Velocity contours, (b) Temperature contours

(b)]。例如, 在口咽区域 (中心线上距离 85 mm 位置处), 6 种环境温度下的平均速度为 8.67 m/s; 45 °C 环境温度下的最大流速为 8.40 m/s, 其与 6 种入口温度下速度平均值的差异为 3.06%; 而 -25 °C 环境温度下的最大流速可达 8.95 m/s, 其与速度平均值的差异可达 3.86%。在主气管区域 (中心线上距离 185 mm 位置处), 6 种入口温度下的平均速度为 2.83 m/s。入口温度 -25 °C 时速度与平均速度的差异为 39.42%, 且为 6 种环境温度下的速度差异最大值。对湍流动能而言, 在咽喉区域 (中心线上距离 115 mm 处), 6 种入口温度下的平均湍流动

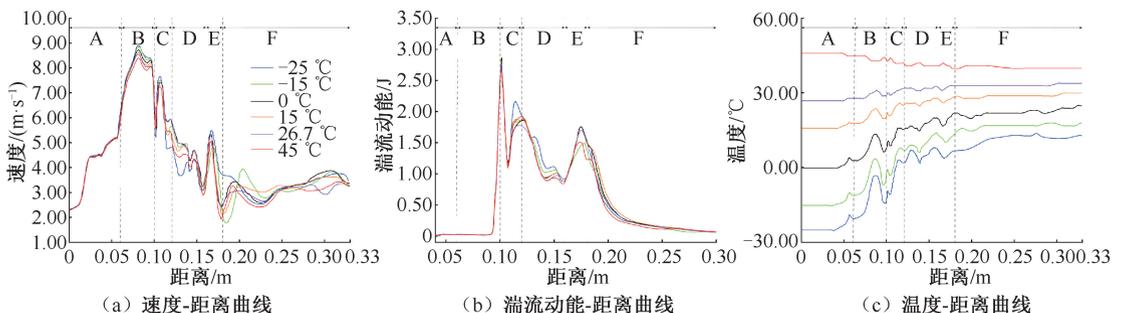


图 4 不同环境温度下人体呼吸道中心提取线上的速度、湍流动能、温度结果

Fig. 4 Results of velocity magnitude, turbulent kinetic energy and temperature in the extracting lines under different temperatures (a) Velocity magnitude-distance curve, (b) Turbulent kinetic energy-distance curve,

(c) Temperature-distance curve

注: A 代表口腔区域, B、C 代表咽喉区域, D、E、F 代表主气管区域。

能为 1.88 J;当入口温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,该处湍流动能与 6 种温度下平均湍流动能的差异达到最大值 11.59%,且此时的湍流动能差异值为中心提取线上的最大值差异值。

人体呼吸道对吸入气流温度具有一定的调节作用,这离不开呼吸道内复杂的流体流动。入口环境温度越低,气流在呼吸道内的温度波动幅度越大,呼吸道对气流温度的调节作用越明显。例如, $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度下,口腔入口处气流与呼吸道壁面的最大温差接近 $62\text{ }^{\circ}\text{C}$,为 6 种环境温度情况下气流温度与呼吸道壁面温度间的最大温差,气流经过呼吸道后温度升高了 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,为 6 种环境温度下呼吸道内温度波动幅度的最大值;而 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度下,口腔入口处气流温度与呼吸道壁面温度的最大温差在 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,气流流经呼吸道后温度只降低了 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。在呼吸道咽喉区域以及气管内的回流区,由于涡结构的作用,气流的热传导作用更加强烈。因此,存在 1 个气流高度混合区,气流动能转换为湍流动能,最终以热能的形式耗散。气流温度在口腔内的变化比较平缓,但是进入咽腔以后,一直到气管区域,温度变化梯度都比较大,并且温度曲线存在数个波峰和波谷。在主气管 F 区域,气流温度变化比较平缓[见图 3(b)、图 4(c)]。

2.4 颗粒物沉积规律

在相同环境温度下,不同粒径颗粒物的总沉

积率以及在呼吸道内各个分区域的局部沉积率不同。气流在呼吸道内的流动存在层流-湍流-层流的流动变化过程,受气流携带作用的影响和颗粒自身惯性冲击的作用,颗粒粒径对于颗粒物运动沉积的影响作用明显。颗粒物粒径越大,自身惯性作用越大,越容易发生沉积,并且颗粒物主要沉积分散在呼吸道内口腔、咽喉和气管部位。以 1、3、6、8 μm 粒径的颗粒物为例,在 6 种温度下颗粒物在呼吸道内的平均沉积率分别为 4.07%、7.50%、32.03%、62.66%,该结果与文献[4,8]中的规律一致。

在不同的环境温度下,颗粒物在人体呼吸道内的沉积分布形态不同,在人体呼吸道的不同位置呈现不同的分布规律,这些差异主要体现在咽喉区域以及主气管区域(见图 5)。可以直观地看到,3 μm 粒径颗粒物在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度下在呼吸道内的沉积分布形态要比 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度下更加分散。同时, $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度下 3 μm 粒径颗粒物在口腔、咽喉、主气管、支气管 4 个区域内的局部沉积率分别为 2.30%、3.17%、1.53% 和 0.53%,最大局部沉积率发生在咽喉区域,主气管和支气管部位的局部沉积率较小。本文推测,在不同的环境温度下,由于吸入气流自身密度、黏度等物性的改变,导致其在呼吸道内的流动规律发生变化,进而影响颗粒的受力情况,最终导致颗粒物的运动和沉积规律产生差异。

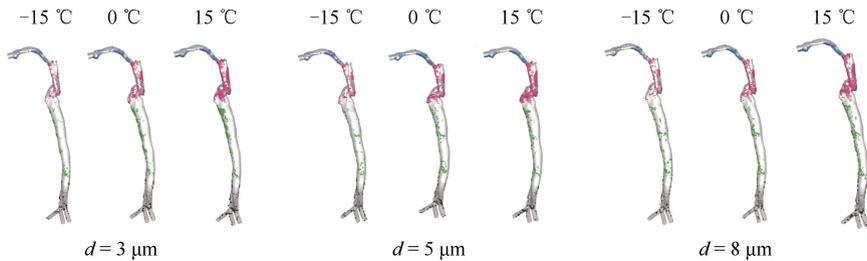


图 5 不同温度下不同粒径(d)颗粒物在人体呼吸道中的沉积分布图

Fig. 5 Deposition distribution of particles with different sizes in human respiratory tract under different temperatures

注:蓝色、红色、绿色和黑色颗粒分别代表沉积在口腔区域、咽喉区域、主气管区域和支气管区域内的颗粒。

其次,在不同的环境温度下,颗粒物在人体呼吸道内的总沉积率和局部沉积率明显不同,低温及高温环境对颗粒物在人体呼吸道内总沉积率和局部沉积率的影响作用明显(见图 6)。在总沉积率方面,以 5 μm 粒径颗粒物为例,6 种环境温度下 5 μm

粒径颗粒物总沉积率的平均值为 19.56%。环境温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,5 μm 粒径颗粒物的总沉积率最大,为 21.25%,总沉积率与 6 种环境温度下总沉积率平均值的差异为 8.65%。环境温度为 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,5 μm 粒径颗粒物的总沉积率为 16.68%,且此时总

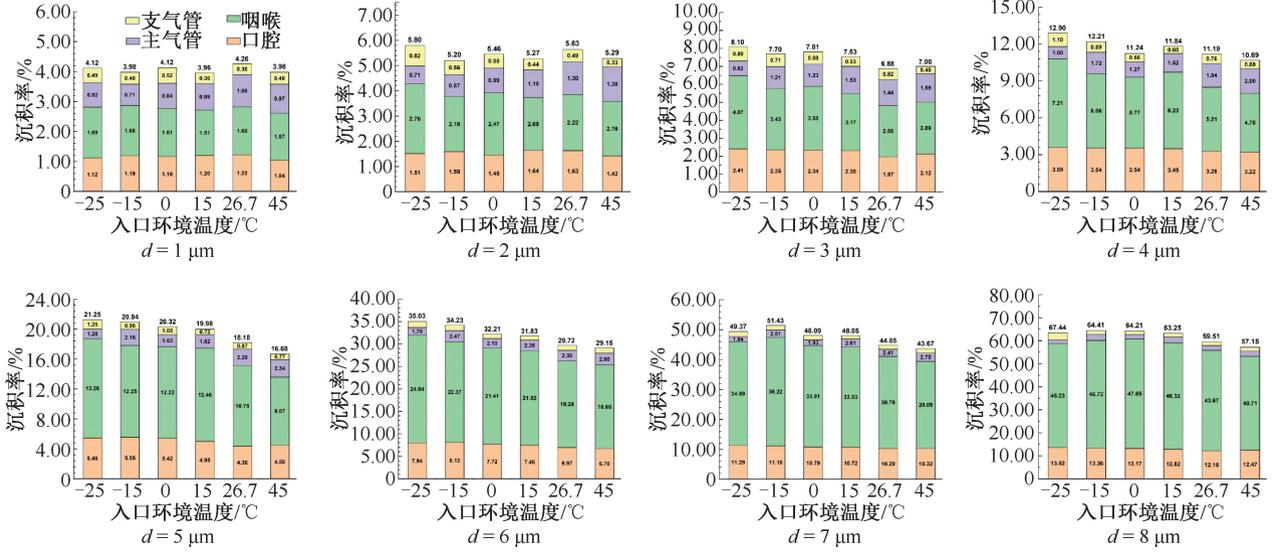


图 6 不同温度下不同粒径 (d) 颗粒在人体呼吸道各个区域内沉积率直方图

Fig. 6 Histogram of deposition fraction for particles with different sizes at different regions of human respiratory tract under different temperatures

沉积率与 6 种环境温度下总沉积率平均值的差异最大, 为 14.72%。以 $6 \mu\text{m}$ 粒径颗粒物为例, 6 种环境温度下 $6 \mu\text{m}$ 粒径颗粒物总沉积率的平均值为 32.03%。环境温度为 $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, $6 \mu\text{m}$ 粒径颗粒物的总沉积率最大, 为 35.03%, 且此温度下颗粒总沉积率与 6 种环境温度下总沉积率平均值的差异最大, 为 9.37%。对于不同环境温度下的局部沉积率, 以 $3 \mu\text{m}$ 粒径颗粒物为例, 在口腔区域内, $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境温度下颗粒的局部沉积率最大, 为 2.41%, 此温度下局部沉积率与平均沉积率的差异只有 7.19%; $26.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境温度下颗粒的局部沉积率为 1.97%, 但此温度下局部沉积率与平均沉积率的差异为 6 种温度下最大值的 12.38%。咽喉区域内, $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境温度下颗粒的局部沉积率为 4.07%, 且此温度下局部沉积率与平均沉积率的差异为 6 种温度下最大值的 22.35%。主气管区域内的局部沉积率规律与口腔区域内的沉积规律相同, $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境温度下颗粒的局部沉积率最大, 为 1.59%, 且此温度下局部沉积率与平均沉积率的差异为 21.99%; $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境温度下颗粒的局部沉积率为 0.82%, 但此温度下局部沉积率与平均沉积率的差异为 6 种环境温度下最大值的 37.08%。该结果与不同环境温度下呼吸道内的流场分布规律和颗粒受力情况密切相关。

3 结论

不同环境温度下, 人体呼吸道内流场分布与温度场分布存在的差异主要体现在咽喉以及主气管区域。受环境温度的影响, 吸入气流自身密度、黏度等物性的改变导致气流在呼吸道内的流动规律不同。入口环境温度越低, 呼吸道内流体流速的波动幅度、湍流动能的波动幅度以及温度波动幅度越大。气流流速与 6 种温度下平均气流流速的差异可达 39.42%; 气流湍流动能与 6 种温度下湍流动能平均值的差异可达到 11.59%; 气流温度的变化与 6 种温度下气流温度变化平均值的差异可高达 82.4%。这些变化进而影响了颗粒的受力情况, 最终导致颗粒物在呼吸道内的沉积分布形态、总沉积率和局部沉积率存在一定差异。颗粒总沉积率与 6 种温度下总沉积率平均值的差异可达 14.72%; 颗粒局部沉积率与 6 种温度下局部沉积率平均值的差异可达到 37.08%。因此, 在精细化研究颗粒物在呼吸道内的沉积规律时, 需要考虑环境温度的影响作用。

同时, 本文虽然能在一定程度上反映颗粒物在呼吸道内的运动和沉积规律, 但并未考虑人体呼吸道内复杂的生理结构, 以及颗粒物的聚集、破碎等物理现象。这些问题将在后续的研究中逐步展开。

参考文献:

- [1] GUZMAN MI. Bioaerosol size effect in COVID-19 transmission [J]. *Communication*, 2020, (4): 1-10.
- [2] BOUROUIBA L. Turbulent gas clouds and respiratory pathogen emissions: Potential implications for reducing transmission of COVID-19 [J]. *J Am Med Assoc*, 2020, 323(18): 1837-1838.
- [3] World Health Organization. WHO Coronavirus(COVID-19) Dashboard [R/OL]. <https://covid19.who.int/>.
- [4] CHEN X, FENG Y, ZHONG WQ, *et al.* Numerical investigation of the interaction, transport and deposition of multicomponent droplets in a simple mouth-throat model [J]. *Aerosol Sci*, 2017, 105(3): 108-127.
- [5] FENG Y, ZHAO JN, HAYATI H, *et al.* Tutorial: Understanding the transport, deposition, and translocation of particles in human respiratory systems using computational fluid-particle dynamics and physiologically based toxicokinetic models [J]. *J Aerosol Sci*, 2020, 151: 105672.
- [6] DENG QH, OU CY, SHEN YM, *et al.* Health effects of physical activity as predicted by particle deposition in the human respiratory tract [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 657(3): 819-826.
- [7] 崔新光, 葛海文, 宋伟, 等. 全呼吸道内的气体流动特征的大涡模拟研究[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(S): 97.
- [8] CHEN XL, KLEINSTREUER C, ZHONG WQ, *et al.* Effects of thermal airflow and mucus-layer interaction on hygroscopic droplet deposition in a simple mouth-throat model [J]. *Aerosol Sci Technol*, 2018, 52(8): 900-912.
- [9] CHEN XL, MA R, ZHONG WQ, *et al.* Numerical study of the effects of temperature and humidity on the transport and deposition of hygroscopic aerosols in a G3-G6 airway [J]. *Int J Heat Mass Transf*, 2019, 138(8): 545-552.
- [10] GHAHRAMANI E, ABOUALI O, EMDAD H, *et al.* Numerical analysis of stochastic dispersion of micro-particles in turbulent flows in a realistic model of human nasal/upper airway [J]. *J Aerosol Sc*, 2014, 67(3): 188-206.
- [11] 许笑羽. 火灾烟气在人体呼吸道的输运规律及其损伤机理研究[D]. 北京: 清华大学, 2019.
- [12] 国内城市天气数据统计. 中国天气网 [R/OL]. <http://www.weather.com.cn/>.
- [13] GOLSHAHI L, NOGA ML, Finlay WH. Deposition of inhaled micrometer-sized particles in oropharyngeal airway replicas of children at constant flow rates [J]. *J Aerosol Sci*, 2012, 49(6): 21-31.
- [14] NARAYANAN JK, LIN J, FENG YN, *et al.* Numerical study on the impact of mucus layer and inlet air-temperatures on the particle deposition in a highly idealized mouth-throat model using LES [J]. *Powder Technol*, 2022, 395(1): 455-475.
- [15] FOSTER WM, LANGENBACK EG, BERGOFSKY EH. Lung mucociliary function in man: Interdependence of bronchial and tracheal mucus transport velocities with lung clearance in bronchial asthma and healthy subjects [J]. *Ann Occup Hyg*, 1982, 26(2): 227-244.
- [16] MORSI SA, ALEXANDER AJ. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems [J]. *J Fluid Mech*, 1972, 55(2): 193-208.
- [17] ZHANG Z, KLEINSTREUER C, KIM CS. Micro-particle transport and deposition in a human oral airway model [J]. *J Aerosol Sci*, 2002, 32(12): 1635-1652.
- [18] ZHANG Y, CHIA TL, FINLAY WH. Experimental measurement and numerical study of particle deposition in highly idealized mouth-throat models [J]. *Aerosol Sci Technol*, 2006, 40(5): 361-372.