

巷道磁黄铁矿尘在人体呼吸道的沉积规律模拟研究

廖慧敏, 朱逸龙, 苏红, 李明

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 为揭示磁黄铁矿尘在施工现场人体呼吸道的沉积规律, 以安徽某金属矿采样巷道磁黄铁矿矿样为研究对象, 运用 Fluent 等软件, 建立人体呼吸道三维模型, 对不同作业区域运输和铲装 2 种不同工艺流程下、不同质量浓度的磁黄铁矿尘在人体呼吸道的颗粒沉积进行模拟。结果表明, 不同呼吸强度、不同工艺、不同粒径下的磁黄铁矿主要沉积在人体的咽喉以及气管部分, 当矿尘粒径大于 $5.456 \mu\text{m}$ 时, 即作业人员在巷道中距离风口较近的作业区域作业时, 矿尘将全部沉积在人体呼吸道中。人体呼吸道的总颗粒沉积率随颗粒质量浓度的上升出现先下降而后波动稳定的规律, 随颗粒粒径与呼吸强度的增加而增加, 距运输巷道风口越远总沉积率越小。基于磁黄铁矿尘在人体呼吸道沉积规律及实际工况, 提出了相应的防护措施。

关键词 磁黄铁矿尘; 人体呼吸道; 沉积规律

我国金属矿产丰富, 从业人员众多, 在掘进、运输、采样等巷道进行采矿工艺过程中产生的颗粒物会引起作业人员急性鼻炎、咽炎、上呼吸道刺激及支气管哮喘等疾病^[1-4]。解剖和病理研究表明, 颗粒物对人体健康的影响主要取决于颗粒物在人体呼吸系统的沉积部位与沉积量^[5]。研究者对空气颗粒物及气溶胶对呼吸道健康影响做了较多研究, Zhang 等^[6]研究人体呼吸道几何结构对颗粒沉积的影响, 发现气道收缩会显著提高颗粒的沉积率。

Chen 等^[7]研究发现准确预测气道内的温度和相对湿度分布对预测吸湿性颗粒的吸湿生长和沉积规律至关重要。Ahookhosh 等^[8]研究发现呼吸流量造成的气流结构如湍流的开始、逆流、涡旋以及喉射流现象是沉积模式的决定因素。Li 等^[9]研究发现微米级颗粒在上呼吸道的沉积率远大于纳米级, 且受呼吸强度和粒径的影响显著。但国内对金属矿矿尘在人体呼吸道的沉积规律方面的研究较少, 李志^[10]对铀矿井下典型作业场所环境中的铀矿尘进

收稿日期: 2022-03-15; 修回日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51704328, 51674289); 国家重点研究发展计划项目(2017FFC0805204)

作者简介: 廖慧敏, 副研究员, 研究方向为安全认知与职业防护, 电子信箱: liaohuimin201@csu.edu.cn

引用格式: 廖慧敏, 朱逸龙, 苏红, 等. 巷道磁黄铁矿尘在人体呼吸道的沉积规律模拟研究[J]. 科技导报, 2022, 40(15): 64-76; doi:10.3981/j.

issn.1000-7857.2022.15.007

行了监测,并模拟了铀矿尘粒子在人体呼吸道前三级支气管内的沉积规律。段莉等^[11]对冶炼粉尘在人体呼吸道沉积进行了模拟,发现粒子沉积部位主要在分叉面及分支内壁上。

基于金属矿矿尘对作业人员呼吸道造成的影响与损伤及国内外对于颗粒物在人体呼吸道沉积规律的研究现状,以安徽某金属矿采样巷道磁黄铁矿尘为研究对象,对不同呼吸强度、不同工艺流程下、不同质量浓度矿尘在人体呼吸道各部位的沉积规律进行模拟仿真,并分析巷道中不同作业区域矿尘颗粒物粒径特征在人体呼吸道的沉积规律,以期对金属矿矿尘防护提供理论支持。

1 样本采集与测量

金属矿的钻孔、爆破、铲装、卸载、运输等工艺流程会产生高浓度的粉尘,其中采场爆破的粉尘浓度甚至可达 3500 mg/m^3 ^[11]。本研究采用某磁黄铁矿采样巷道为模拟地,巷道总长为 68.6 m ,截面宽为 4.43 m ,侧高 1.74 m ,中间高 3.3 m 的圆弧拱顶,共5个采样矿洞,采样矿洞截面为高 3 m 的拱形矿洞,进深 6 m ,采样巷道末端连接着运输巷道。选取6处作业区域作为采样区域,分别为采样区域I、II、III、IV、V、VI,每个采样区域采用五点采样法采取样矿,相邻两取样点长宽间距均为 0.5 m ,采样区域I在采样巷道起始位置,其他5个采样区域依次选取在各采样矿洞截面中间位置,采样巷道示意如图1所示。由于采样需求,该巷道并没有配备排风与送风管,主要气流通风来源于与之相连的运输巷道,该巷道环境为本次模拟人体呼吸外部环境。矿道现场图、现场取样图以及矿样图见图2、图3和图4。

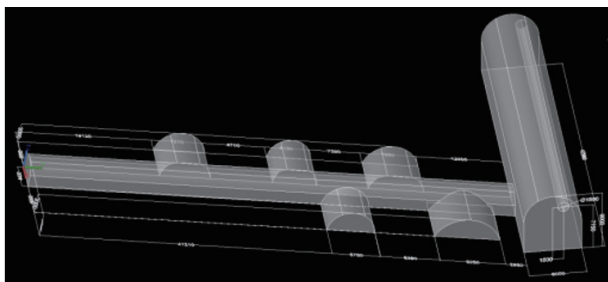


图1 采样巷道示意



图2 巷道现场



图3 现场采样



图4 矿样

将巷道采回的磁黄铁矿经干燥、过筛处理后,使用马尔文3000激光粒度分析仪测量矿尘样本的粒径,将每个采样区域的样本重复测量5次,取5次测量的平均值,测量数据见表1。各个采样区域的粒径有所差异,且采样区域的颗粒粒径随离运输巷道风口距离的增大呈现出下降的趋势,这可能是由于巷道中的小颗粒粉尘会随气流做漂移运动,颗粒粒径越小,沉降的距离越远^[12]。《GBZ 2.1—2019 中华人民共和国国家职业卫生标准》规定:金属矿物粉尘(不含石棉和有毒物质且游离 $\text{SiO}_2 < 10\%$)短间接接触容许浓度不得超过 8 mg/m^3 ^[13]。实际现场作业人员在运输与铲装工艺时接触的总粉尘浓度最高可达 $16.0\sim 30.8\text{ mg/m}^3$ ^[14],远高于国家标准,会对作业人员呼吸道造成极大伤害。

2 几何模型与数值模拟基础

2.1 人体呼吸道模型

人体呼吸道模型主要包括口鼻、咽喉、气管和支气管。口喉模型参考了Zhang等^[15]的高度理想化模型,气管模型参考Weibel^[16]模型,并优化了各级支气管的连接部分,使用ANSYS软件建立人体呼吸道模型(图5)。

表1 各采样区域粒径测量数据

采样区域	粒径/ μm					
	测量1	测量2	测量3	测量4	测量5	测量6
I	2.02	2.07	2.08	2.24	2.26	2.134
II	2.97	2.97	2.96	3.14	3.08	3.024
III	2.55	2.53	2.55	2.54	2.54	2.542
IV	4.17	4.16	4.13	3.84	3.79	4.018
V	4.38	4.41	4.43	4.53	4.63	4.476
VI	5.85	5.52	5.39	5.29	5.23	5.456

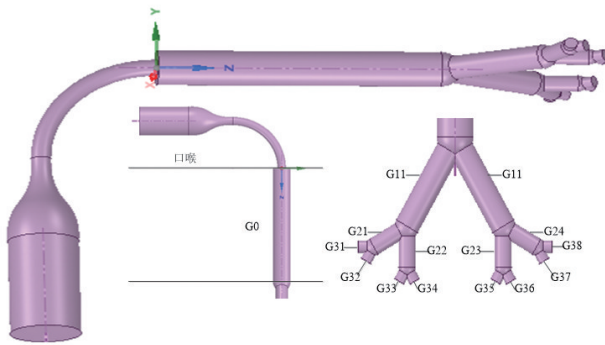


图5 人体呼吸道模型

入口简化为一个直径为 30 mm 的圆, 口腔为一个长为 50 mm 的圆柱体, 鼻腔为一个长为 45 mm 的曲面圆台, 咽喉简化为一个半径为 50 mm 的 1/4 圆环, 圆环直径为 8.5 mm。气管 G0 直径为 18 mm, 长度为 120 mm; 第一级支气管 G11—G12 直径为 12 mm, 长度为 47.6 mm; 第二级支气管 G21—G24 直径为 8.3 mm, 长度为 19 mm; 第三级支气管 G31—G38 直径为 5.6 mm, 长度为 7.6 mm, 各级支气管利用与管径相同的半球结构进行连接。

2.2 控制方程

1) 流体控制方程。

任何流动问题都必须满足质量守恒定律。质量守恒定律可表述为: 单位时间内流体微元体中质量的增加, 等于同一时间间隔内流入该微元体的净质量。按照这一定律, 可以得出质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中, ρ 是空气密度, kg/m^3 ; t 是时间, s ; u, v, w 分别是速度矢量在 x, y, z 方向上的分量, m/s 。

质量守恒方程也称作连续性方程, 其矢量表达式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (2)$$

$$\text{div}(\mathbf{U}) = 0 \quad (3)$$

牛顿第二定律是动量方程的本质, 微元体在 3 个坐标方向上应用牛顿第二定律 ($F=ma$) 在流体流动中的表现形式, 并引入牛顿切应力公式 Stoke 表达式, 对于不可压缩流体, 可得速度分量的动量方程为

$$\nu \frac{\partial u}{\partial t} + \text{div}(u\mathbf{U}) = \text{div}(\nu \text{grad}u) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \text{div}(v\mathbf{U}) = \text{div}(\nu \text{grad}v) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \text{div}(w\mathbf{U}) = \text{div}(\nu \text{grad}w) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (6)$$

式中, ν 为流体的运动黏度, m^2/s ; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; \mathbf{U} 为速度矢量; u, v, w 分别是速度矢量在 x, y, z 方向上的分量, m/s 。

上式称为 Navier-Stokes 方程。

2) 离散相控制方程。

单个粒子在流体相中的流动轨迹是通过作用在该粒子的力平衡方程积分来计算的。力平衡方程为

$$\frac{du_i^p}{dt} = F_D(u_i^g - u_i^p) + \frac{g(\rho_p - \rho_g)}{\rho_p} + S_i \quad (7)$$

$$F_D = \frac{18\mu_g C_D Re}{\rho_p d_p^2} \quad (8)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (9)$$

$$Re = \frac{\rho_g d_p |u^p - u^g|}{\mu} \quad (10)$$

式中, F_D 表示单位粒子质量的阻力, N ; C_D 为阻力系数; a_i 为光滑球形粒子所用的常数; u^p 为颗粒速度,

m/s ; u^s 为空气速度, m/s ; ρ_p 为颗粒密度, kg/m^3 ; ρ_g 为空气密度, kg/m^3 ; μ 为空气动力黏度, $Pa \cdot s$; p 为颗粒离散相; g 为流体连续相; D 为阻力; i 为第 i 个颗粒。

2.3 数值模拟参数

利用流体动力学模拟软件 Fluent 分别对低、中、高呼吸强度(呼吸流量 30、45、60 L/min)^[17]稳态呼吸状态下人体呼吸道模型内的气流运动特性进行仿真模拟。在进行数值仿真计算时,做出了以下假设:(1) 假设颗粒为球形,且运动过程中不会出现破裂、变形等现象。(2) 模型壁面采用无滑移避免条件,假设壁面为刚性。(3) 空气中颗粒相的体积分数较小,远小于 8%,为稀相,所以不考虑颗粒之间的相互碰撞问题,由于颗粒相比气流连续相的体积分数小得多,所以不考虑颗粒相与连续相的相互影响,采用单向耦合。(4) 单个颗粒在流场中运动时,只考虑重力、Stokes 阻力、Saffman 升力以及压力梯度力。颗粒不受热泳力的影响,由于本次模拟颗粒的粒径大于布朗运动的影响范围,故不考虑布朗力^[18-19]。(5) 由于本次模拟使用的磁黄铁矿暴露在空气中其表面会自发氧化还原反应,在其表面生成疏水性物质 S 元素、金属硫化物(CuS),属于非吸湿性颗粒物^[20],故采用统一气道温度并忽略湿度的假设条件^[7]。

在计算中采用分离隐式求解方法,对于压力速度耦合采用 SIMPLE 算法,湍流模型采用 RNGk- ϵ 模型。口腔为气流的入口,采用速度入口为入口边界类型,气流入口速度由各呼吸强度的呼吸流量确定,分别为 0.707、1.061、1.414 m/s,入口速度计算公式如式(11)所示。第三级支气管的 8 个支气管为出口,边界类型为自由流动边界。加入颗粒之后,颗粒进入速度与气流入口速度保持相同,颗粒的投入方式为面投入,模型入口与出口的离散相边界类型为“逃逸”,壁面的离散相边界类型设为“捕获”,颗粒密度为 4650 kg/m^3 ^[21]。

$$v = \frac{Q}{A} \quad (11)$$

式中: v 为入口速度, m/s ; Q 为呼吸流量, L/min ; A 为入口面积, m^2 。

2.4 网格划分与颗粒质量浓度

网格划分采用自动划分法,以四面体网格和棱

柱网格为主,网格质量符合计算要求。计算中使用 4.0×10^5 、 5.0×10^5 、 7.0×10^5 左右的网格进行网格无关性检验。结果表明,使用 4.0×10^5 的网格进行模拟时,得到的静压、总压、速度和剪切力的大小与分布均未达到最值与稳定;当使用 5.0×10^5 和 7.0×10^5 的网格数进行模拟时,发现在网格数为 5.0×10^5 时,各项指标达到最值;在网格数为 7.0×10^5 时,各项指标数值与分布基本不再变化。但由于网格数目较多,计算至收敛所需时间较多,故选择选取网格数目为 5.0×10^5 个网格。

颗粒采用面入射的方法注射,使用该方法入射颗粒,颗粒的质量浓度与入射数目和入口网格数目呈正相关,在满足气流参数不变的情况下,通过增加入口网格数目来改变颗粒质量浓度与颗粒入射数目。金属矿山生产过程中主要产生尘岗位有凿岩、爆破、铲装、放矿、卸矿、筛分、转运、装运等。运输过程中颗粒质量浓度一般较低,为 $10.9 \sim 21.74 \text{ mg/m}^3$ ^[14,22];铲装过程中的颗粒质量浓度一般可达到 $24.62 \sim 37.13 \text{ mg/m}^3$ ^[14,23](表 2)。

表 2 颗粒质量浓度与颗粒入射数

颗粒质量浓度/($mg \cdot m^{-3}$)	工艺流程	颗粒入射数目
10.90	运输	16140
13.31		19720
15.97		23660
18.69		27700
21.74		32220
24.62	装裁	36500
26.84		39800
29.62		43920
32.67		48440
37.13		55060

在数值模拟计算中,通过改变颗粒吸入颗粒数、颗粒粒径以及吸入气流速度的数值,模拟研究磁黄铁矿尘在不同采矿工艺流程、不同作业区域以及不同呼吸强度下在人体呼吸道的沉积规律。

2.5 沉积参数

处理颗粒沉积数据对于揭示颗粒在人体呼吸道的沉积规律十分重要。利用局部沉积率 DE_l 与总沉积率 DE_t 来表示吸入的颗粒在气道模型中的分布以及沉积效果。局部沉积率决定了颗粒在人体呼吸道中各个区域的沉积效果,总沉积率表示为

在呼吸道沉积的颗粒占总吸入颗粒数的比例,可以通过下式计算:

$$DE_1 = \frac{N_r}{N_d} \quad (12)$$

$$DE_1 = \frac{N_d}{N_i} \quad (13)$$

式中, N_r 、 N_d 、 N_i 分别表示区域沉积的颗粒数、模型中沉积的总颗粒数和吸入的总颗粒数。

3 数值模拟结果

3.1 颗粒物总沉积率变化规律

3.1.1 不同工艺流程下颗粒沉积率的变化规律

为研究颗粒吸入浓度对颗粒物在人体呼吸道内沉积率影响,以作业区域I(颗粒粒径 $d=2.134 \mu\text{m}$)为例模拟了颗粒物在2种工艺流程、3种呼吸强度以及10种颗粒吸入浓度的条件下在人体呼吸道的沉积情况。其中,矿石运输工艺中颗粒质量浓度为 $10.9\sim 21.74 \text{ mg/m}^3$,铲装工艺过程中的颗粒质量浓度为 $24.62\sim 37.13 \text{ mg/m}^3$ 。图6所示为当颗粒粒径 $d=2.134 \mu\text{m}$,呼吸强度为低呼吸强度时,颗粒物沉积率随颗粒质量浓度的变化规律。由图6可以看出,颗粒物颗粒在呼吸道的沉积率随颗粒质量浓度的增大呈现出先下降而后波动稳定的规律。这是由于随着颗粒质量浓度的增大,同一时间入射进入人体的颗粒数也随着增大,此时颗粒所受惯性作用增大,更多的颗粒物进入更深层的支气管中,导致呼吸道沉积率下降,但受颗粒粒径的影响与限制,颗

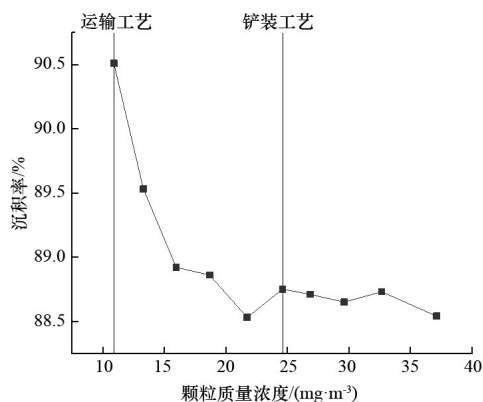


图6 颗粒物总沉积率随颗粒质量浓度变化的规律($d=2.134 \mu\text{m}$,低呼吸强度)

粒物的沉积率下降到一定程度后基本保持稳定。出现较大波动的点,是工艺流程改变的时候,这可能是由于工艺流程不同,空气中粉尘空气流的特性不同从而导致沉积率突增,对比两种不同工艺流程发现,在运输过程中,颗粒物沉积率随颗粒质量浓度的增大而下降,变化趋势明显。在铲装工艺过程中,颗粒沉积率整体上呈现出下降的趋势,但是变化趋势不明显,这是由于当颗粒沉积率下降到一定程度,逃逸到下级支气管的颗粒物会受到颗粒粒径的限制,不会持续降低。

3.1.2 不同颗粒粒径下颗粒沉积率的变化规律

图7为6个作业区域不同粒径的颗粒物在低呼吸强度、颗粒质量浓度 $\rho_{\text{颗粒}}=10.9 \text{ mg/m}^3$ 的条件下在人体呼吸道的沉积情况。可以看出,当 $2.134 \mu\text{m} \leq d \leq 4.476 \mu\text{m}$,颗粒物的沉积率随颗粒粒径的增加而增大,当 $d \geq 5.456 \mu\text{m}$ 时,颗粒物的沉积率达到了100%,这与蒋仲安^[1]得出的粒径为 $5\sim 10 \mu\text{m}$ 的粉尘由于惯性碰撞和重力沉降的机理沉积在呼吸道中的结论相符。在相同粉尘浓度环境下,颗粒物在呼吸道的沉积率随作业区域离风口距离的增大而减小,对呼吸道的损伤也随距离的增大而增强。作业人员在作业区域V和VI劳作时,颗粒物几乎全部沉积在呼吸道中。作业人员在作业区域I、II、III、IV劳作时,颗粒物沉积率随作业区域离运输巷道风口距离的增大而减小。图8为6个作业区域不同粒径的颗粒物在10种颗粒质量浓度下的颗粒沉积变化规律。在 $d=2.134、2.542、3.024 \mu\text{m}$ 颗粒粒径较小时,颗粒物沉积率随浓度变化的沉积规律基本相同,随着颗粒质量浓度的增大先下降后波动稳定。纵向来看,发现颗粒物沉积规律的显著程度随着颗粒粒径的减小而增加。在 $d=4.018、4.476、5.456 \mu\text{m}$ 时,此时颗粒物完全沉积在人体呼吸道中,沉积率几乎达到100%,并不会随着颗粒质量浓度的改变而变化,说明随着颗粒粒径的增加,颗粒质量浓度对沉积率的影响逐渐降低。综上所述,颗粒沉积率随颗粒粒径的增加而增加,当粒径大于 $5.456 \mu\text{m}$ 时完全沉积在呼吸道中。且在颗粒粒径与颗粒质量浓度因素共同影响颗粒沉积率时,随着粒径的增加,颗粒粒径因素对沉积率的影响逐渐增大。

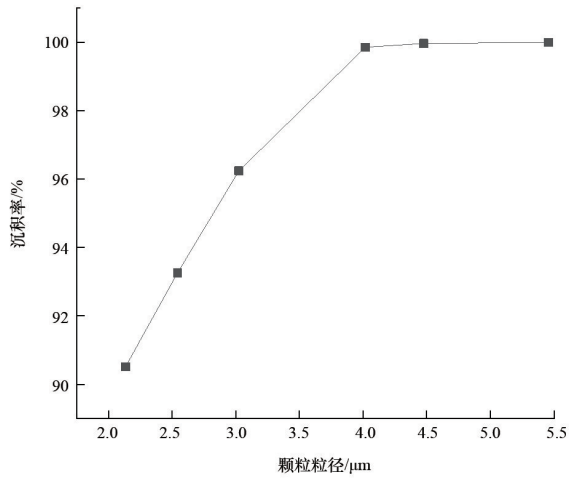


图7 颗粒物总沉积率随颗粒粒径变化的规律 ($\rho_{\text{颗粒}}=10.9 \text{ mg/m}^3$,低呼吸强度)

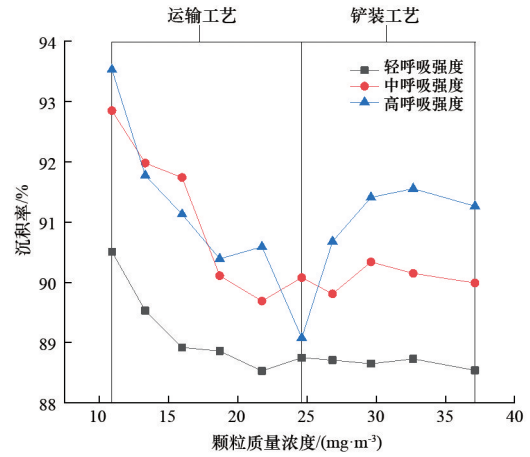


图9 不同呼吸强度下颗粒物总沉积率随颗粒质量浓度变化的规律($d=2.134 \mu\text{m}$)

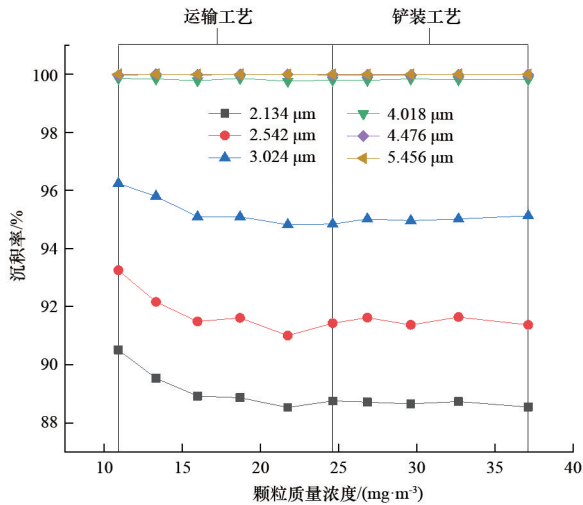


图8 颗粒物总沉积率随颗粒粒径和颗粒质量浓度变化的规律(低呼吸强度)

3.1.3 不同呼吸强度下颗粒沉积率的变化规律

图9所示为颗粒粒径 $d=2.134 \mu\text{m}$ 时,颗粒物沉积率随颗粒质量浓度与呼吸强度的变化规律。由图可见,颗粒沉积率会随着呼吸强度的增大而增大,在低中呼吸强度下,颗粒物在呼吸道的沉积率呈现出相同的规律,随颗粒质量浓度的增大呈现出先下降而后波动稳定的规律。出现较大波动的点,是工艺流程改变的时候,这可能是由于工艺流程不同,空气中粉尘气流的特性不同从而导致,在高呼吸强度下,这种波动现象尤为明显。对比2种不同工艺流程发现,在运输过程中,无论何种呼吸强度,

颗粒物沉积率都随颗粒质量浓度的增大而下降。在铲装工艺过程中,在低中呼吸强度下,颗粒沉积率会有一些波动,但是整体上呈现出下降的趋势,但在高呼吸强度下,颗粒沉积率会出现先上升后下降的规律。这说明颗粒质量浓度越大,进入下级支气管的颗粒物比例越高,对呼吸道系统的危害越大,且在铲装工艺过程中,呼吸强度对颗粒沉积率造成的影响更为明显。图10为6个作业区域不同粒径的颗粒物在3种呼吸强度,颗粒质量浓度 $\rho_{\text{颗粒}}=10.9 \text{ mg/m}^3$ 的条件下在人体呼吸道的沉积情况。

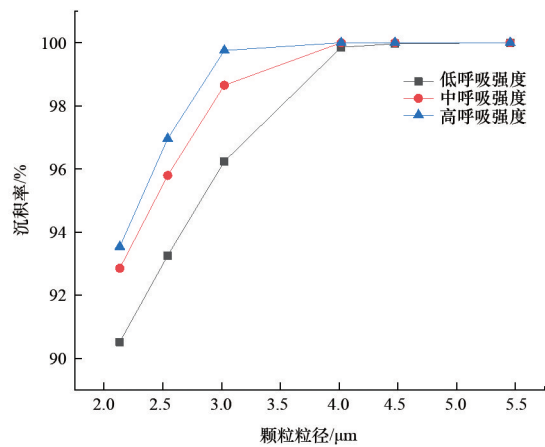


图10 不同呼吸强度下颗粒物总沉积率随颗粒粒径变化的规律($\rho_{\text{颗粒}}=10.9 \text{ mg/m}^3$)

可以看出,不同呼吸强度下,颗粒物沉积率随颗粒粒径的变化规律相同,呼吸强度越高,颗粒物

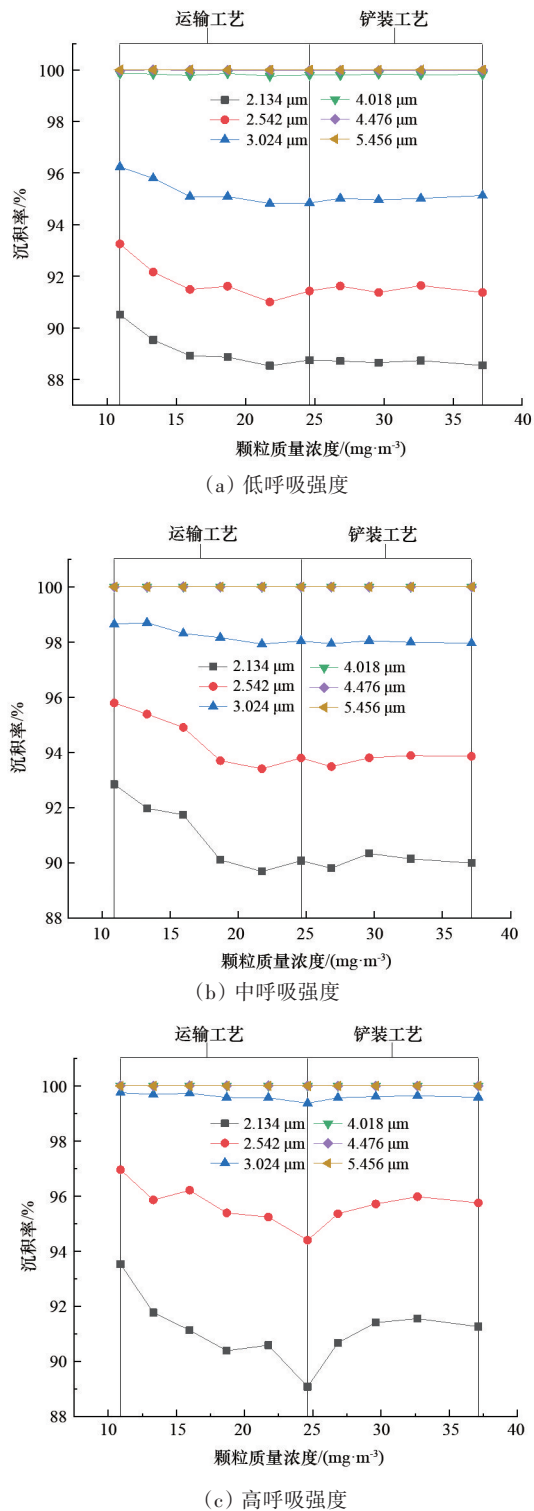


图 11 不同呼吸强度下颗粒物总沉积率随颗粒粒径和颗粒浓度变化的规律

的沉积率越大。这是由于高呼吸强度会带来高速含尘气流,从而使同浓度环境与同粒径颗粒物所获惯性更大,喉管喷射现象更明显,颗粒物在咽喉与

气管部位的沉积率更大。图 11 为 6 个作业区域不同粒径的颗粒物在 10 种颗粒质量浓度及 3 种呼吸强度条件下的颗粒沉积变化规律。不同呼吸强度下展现出的沉积规律基本相同,在 $d=2.134$ 、 2.542 、 $3.024 \mu\text{m}$ 时,颗粒物沉积随质量浓度变化的沉积规律基本相同,随着颗粒质量浓度的增大先下降后波动稳定,其中在高呼吸强度下的波动现象最为明显。在 $d=4.018$ 、 4.476 、 $5.456 \mu\text{m}$ 时,3 种呼吸强度下的颗粒物完全沉积在人体呼吸道中,沉积率几乎达到 100%。综上所述,颗粒沉积率随呼吸强度的增加而增加。

3.2 颗粒物在呼吸道区域的分布规律

3.2.1 不同工艺流程下颗粒区域沉积率的变化规律

区域沉积率也是了解颗粒沉积特性的重要参数之一。图 12 为低呼吸强度下不同工艺流程口腔区域不同粒径的颗粒物沉积率随颗粒质量浓度的变化情况。由图可见,口腔区域颗粒沉积率较小且随着颗粒质量浓度的增大缓慢下降,不同粒径具有相同的变化趋势。这是由于口腔区域结构简单,气流平稳,沉积率受颗粒粒径与颗粒质量浓度的影响不大,沉积率随着颗粒质量浓度的增加而缓慢下降,是由于进入口腔区域的颗粒物增加,颗粒物运动过程中所受惯性增大,更多颗粒物会进入咽喉区域。图 13 为低呼吸强度下不同工艺流程咽喉区域不同粒径颗粒物沉积率随颗粒质量浓度变化的情况。由图 13(a) 可以看出,当颗粒粒径为 2.134 、 2.542 、 $3.024 \mu\text{m}$,颗粒粒径较小时,2 种工艺流程下的颗粒沉积率变化情况并不显著,基本保持不变;当颗粒粒径为 4.018 、 4.476 、 $5.456 \mu\text{m}$ 时,沉积率随着颗粒质量浓度的增大而增大(图 13(b)),所以作业人员在作业区域 I、I、III 劳作时,咽部颗粒沉积率随颗粒质量浓度变化较小,在作业区域 IV、V、VI 劳作时,咽部颗粒沉积率随颗粒质量浓度的增大而增大。图 14 和图 15 为不同工艺流程气管和支气管区域不同粒径下颗粒物沉积率随颗粒质量浓度的变化情况,这 2 个区域颗粒沉积率随颗粒质量浓度变化的规律性都不强,且当颗粒粒径 $d \geq 4.018 \mu\text{m}$ 时,这 2 个区域的颗粒沉积率几乎为 0。这是由于大量颗粒物沉积在了口喉区域,进入气管支气管的颗粒

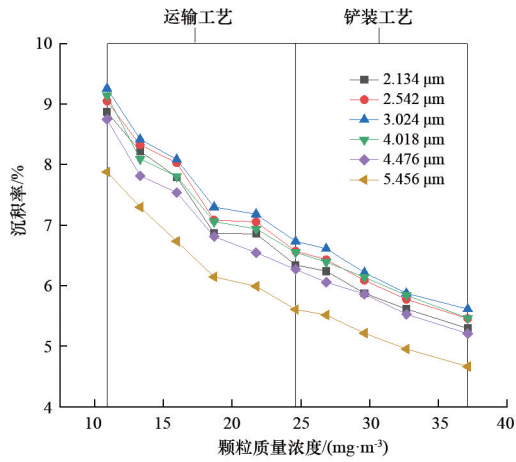
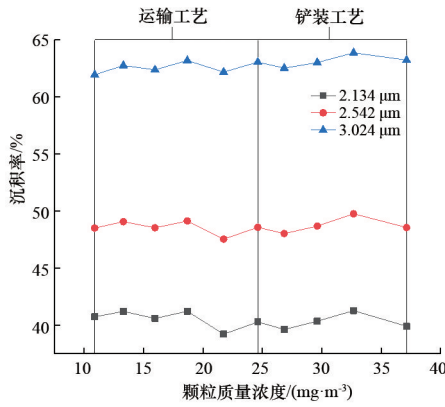
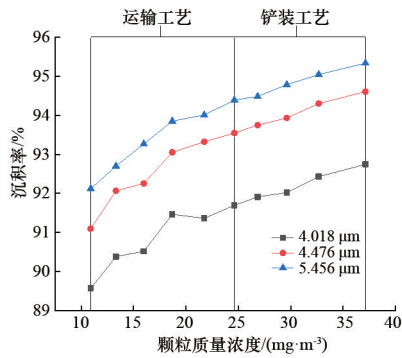


图12 不同工艺流程口腔区域不同粒径颗粒物沉积率的变化规律(低呼吸强度)



(a) 颗粒粒径 $d=2.134, 2.542, 3.024 \mu\text{m}$



(b) 颗粒粒径 $d=4.018, 4.476, 5.456 \mu\text{m}$

图13 不同工艺流程咽喉区域不同粒径颗粒物沉积率的变化规律(低呼吸强度)

物相对较少,颗粒质量浓度对颗粒物沉积造成的影响相对较弱。对比各区域的颗粒沉积发现,不同颗

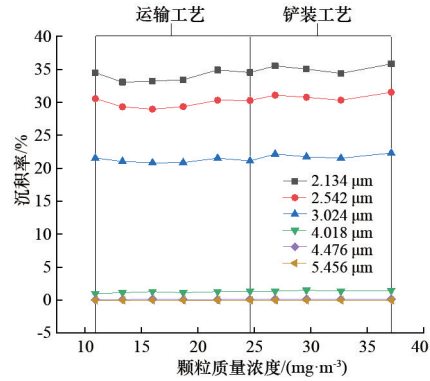


图14 不同工艺流程气管区域不同粒径颗粒物沉积率的变化规律(低呼吸强度)

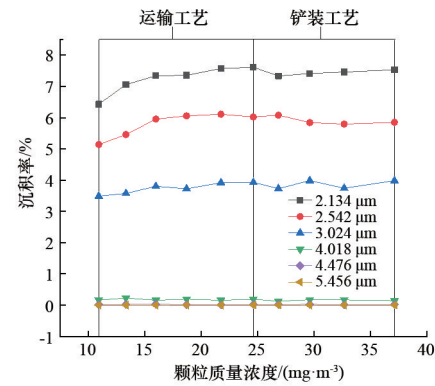


图15 不同工艺流程支气管区域不同粒径颗粒物沉积率的变化规律(低呼吸强度)

粒质量浓度与颗粒粒径下,颗粒沉积最多的区域都在咽喉区域。

3.2.2 不同粒径下颗粒区域沉积率的变化规律

图16为低呼吸强度下 $\rho_{\text{颗粒}}=10.9 \text{ mg/m}^3$ 时,各区域颗粒沉积率在不同粒径下的变化规律。由图可见,不论颗粒粒径如何变化,颗粒沉积最多的区域总在咽喉区域。口腔区域的颗粒沉积率基本不随颗粒粒径的变化而变化。咽喉区域的颗粒沉积率随颗粒粒径的增加而增大,这是由于咽喉区域的几何结构导致的高湍流效应,颗粒粒径的增大,增加了颗粒的惯性,导致颗粒物在此区域沉积率增大。气管区域的颗粒沉积率随颗粒粒径的增加而减小,并且当 $d \geq 5.456 \mu\text{m}$ 时,颗粒物完全沉积在口腔区域,这是由于随着粒径的增加,更多颗粒物已经沉积在了咽喉区域,进入气管的颗粒物更少导致其沉积率不断下降。支气管区域颗粒沉积率随颗

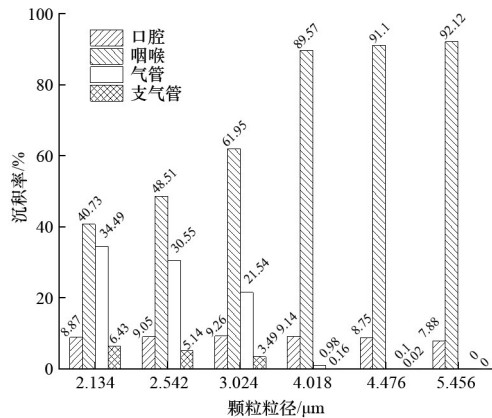


图 16 不同沉积区域颗粒沉积率随颗粒粒径的变化规律($\rho_{\text{颗粒}}=10.9 \text{ mg/m}^3$, 低呼吸强度)

粒径的增加而减小,沉积率下降的原因与气管区域类似。所以作业人员在各作业区域劳作时,口腔区域颗粒沉积率基本不变,但是咽喉区域颗粒沉积率会随作业区域离风口距离的增大而减小,气管和支气管区域颗粒沉积率随作业区域离风口距离的增大而增大。

3.2.3 不同呼吸强度下颗粒区域沉积率的变化规律

图 17 为 3 种呼吸强度下, $\rho_{\text{颗粒}}=10.9 \text{ mg/m}^3$, $d=2.134 \mu\text{m}$ 时,不同流程区域颗粒物沉积率的变化情况。由图可见,口腔区域颗粒沉积率较小且随呼吸强度的增大而增大,但相差并不大。这是由于口腔区域结构简单,气流平稳,呼吸强度对口腔区域颗粒沉积率的影响并不大。咽喉区域颗粒沉积率随呼吸强度的增大而增大。这是由于咽喉区域的几何结构较为复杂,呼吸强度越大,气流越为紊乱,颗粒物更易撞击到咽喉内壁形成沉积。气管区域颗粒沉积率随呼吸强度的增大而降低。这是由于呼吸强度的增大导致更大比例的颗粒物沉积在了咽喉区域,进入气管的颗粒物占比逐步降低。支气管区域颗粒沉积率最小且几乎不随呼吸强度的变化而变化。这是由于大量颗粒物已沉积在了口喉以及气管区域,呼吸强度对支气管区域的颗粒物沉积造成的影响相对较弱。对比各区域的颗粒沉积发现,不同呼吸强度下,颗粒沉积最多的区域都在咽喉区域,且当颗粒粒径与颗粒质量浓度一定时,各区域颗粒物沉积规律在不同呼吸强度下基本一致。

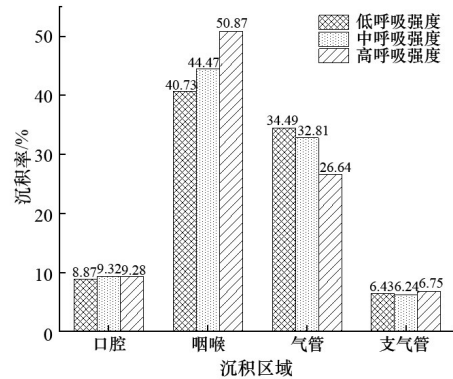


图 17 不同呼吸强度下不同沉积区域颗粒沉积率的变化规律($\rho_{\text{颗粒}}=10.9 \text{ mg/m}^3$, $d=2.134 \mu\text{m}$)

3.3 颗粒逃逸数规律

3.3.1 不同工艺流程下颗粒逃逸数的变化规律

逃逸到下级支气管的颗粒数目是衡量矿尘对作业人员健康造成影响程度的重要参数之一。图 18 和图 19 为低呼吸强度下颗粒粒径 $d=2.134 \mu\text{m}$ 时,左右支气管各逃逸出口颗粒逃逸数目随颗粒质量浓度的变化情况。如图所示,2 种工艺流程中支气管各出口逃逸的颗粒数随着颗粒质量浓度的增加而增加。且无论颗粒质量浓度如何变化,左支气管各出口逃逸的颗粒数目大小顺序总是 $G33>G32>G34>G31$,右支气管各出口逃逸的颗粒数目大小顺序总是 $G36>G37>G35>G38$ 。观察图 5 人体呼吸道模型发现,左右支气管各出口逃逸的颗粒数目大小排序是对称的,说明支气管逃逸的颗粒数目排序与颗粒质量浓度无关,而与模拟所用的几何模型有关。

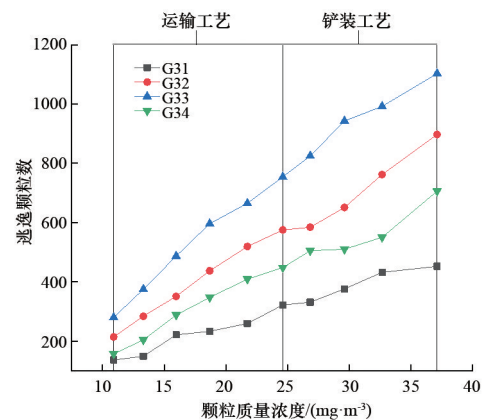


图 18 左支气管各出口逃逸颗粒数随颗粒浓度的变化规律($d=2.134 \mu\text{m}$, 低呼吸强度)

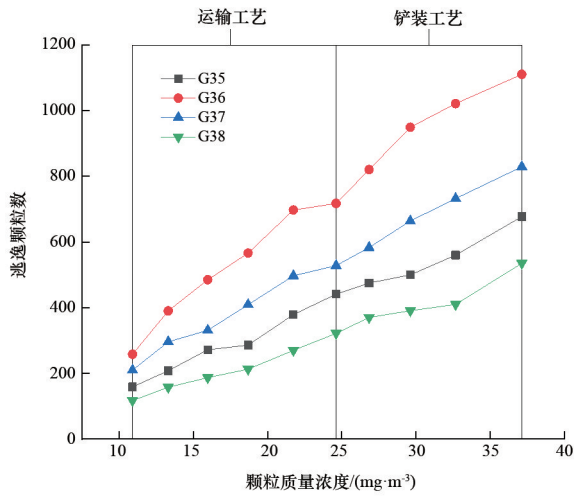


图19 右支气管各出口逃逸颗粒数随颗粒质量浓度的变化规律($d=2.134 \mu\text{m}$,低呼吸强度)

3.3.2 不同颗粒粒径下颗粒逃逸数的变化规律

图20和图21为低呼吸强度下颗粒质量浓度 $\rho_{\text{颗粒}}=10.9 \text{ mg/m}^3$ 时,左右支气管各逃逸出口颗粒逃逸数目随颗粒粒径的变化情况。如图所示,左右支气管各出口逃逸的颗粒数随着颗粒粒径的增加而下降,这说明距离运输巷道越远的作业区域,逃逸至人体更深层次的矿尘越多,对作业人员肺部损伤越严重。左支气管各出口逃逸的颗粒数目大小顺序总是G33>G32>G34>G31,右支气管各出口逃逸的颗粒数目大小顺序总是G36>G37>G35>G38,不随颗粒粒径的变化而改变。观察图5人体呼吸道模型发现,左右支气管各出口逃逸的颗粒数目大小排序是对称的,说明支气管逃逸的颗粒数目排序与颗粒粒径无关,与模拟所用的几何模型有关。

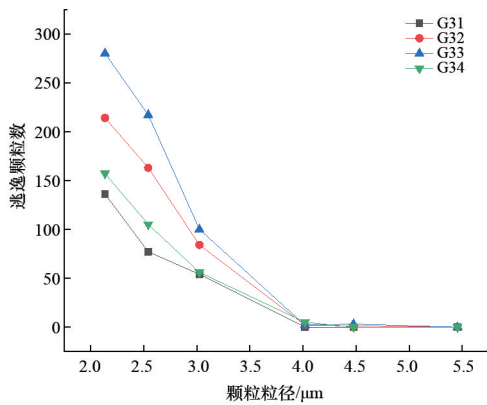


图20 左支气管各出口逃逸颗粒数随颗粒粒径的变化规律($\rho_{\text{颗粒}}=10.9 \text{ mg/m}^3$,低呼吸强度)

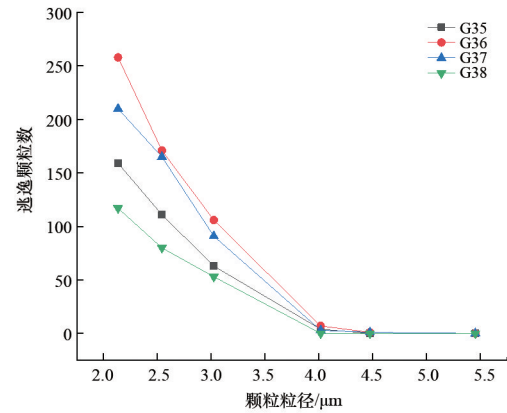


图21 右支气管各出口逃逸颗粒数随颗粒粒径的变化规律($\rho_{\text{颗粒}}=10.9 \text{ mg/m}^3$,低呼吸强度)

3.3.3 不同呼吸强度下颗粒逃逸数的变化规律

图22为3种呼吸强度下颗粒质量浓度 $\rho_{\text{颗粒}}=10.9 \text{ mg/m}^3$,颗粒粒径 $d=2.134 \mu\text{m}$,支气管各出口逃逸颗粒数的变化规律。由图22可见,3种呼吸强度下,各出口逃逸颗粒数的变化规律相同,呈对称型,这与所使用的人体呼吸道模型相对应,且左右支气管各出口逃逸的颗粒数目大小顺序总是G33>G32>G34>G31与G36>G37>G35>G38,不随呼吸强度的变化而改变,说明支气管逃逸的颗粒数目排序与呼吸强度无关。随着呼吸强度的增大,各出口逃出的颗粒数降低,这是由于随着呼吸强度的增大,更多的颗粒物会沉积在人体呼吸道,这是由于颗粒物在呼吸道沉积的主要机制是惯性碰撞^[8],呼吸强度的增大会导致颗粒物的惯性碰撞增多,从而形成更多的沉积,导致颗粒逃逸数的下降。

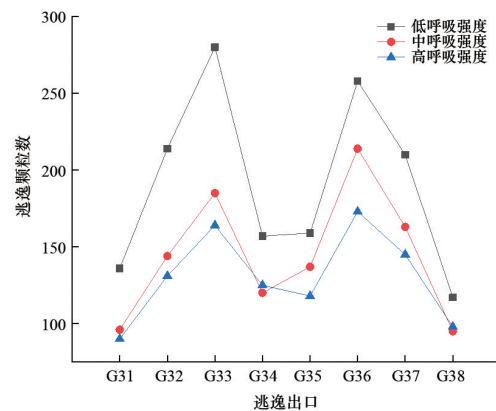


图22 不同呼吸强度下支气管各出口逃逸颗粒数的变化规律($\rho_{\text{颗粒}}=10.9 \text{ mg/m}^3$, $d=2.134 \mu\text{m}$)

4 讨论

考虑到在空气中对矿尘采样的设备要求较高,且矿尘在空气中分布不均匀,每次采集的样本粒径相差较大。此次采样方式采用环境静置后的地表采样法,不仅降低了设备要求,采集的数据也较为稳定,但不足的是,由于重力因素影响,地表采样方式获得的磁黄铁矿粉尘较工作状态下的空气中矿尘粒径略大,这表明由模拟结果获得的防护策略偏向保守。

气道的湿度对颗粒物沉积的影响主要在于颗粒物能够与水蒸气发生相互作用而吸湿增长^[24],影响颗粒物的粒径大小。由于本次模拟使用的磁黄铁矿为非吸湿性颗粒物,针对非吸湿性颗粒物,一般采用忽略湿度的假设条件,且在忽略湿度与真实气道环境下所得到的沉积规律相同^[7],故在模拟过程中为简化计算,忽略含气道湿度对矿尘沉积的影响而带来的误差。但磁黄铁矿尘进入呼吸道后,还是会发生一定的粘连现象,使得呼吸道内矿尘的粒径较测量粒径值偏大,因此呼吸道内水蒸气会使矿尘的沉积率较本研究的结果产生一定的偏高影响。

研究人员也做了许多体外实验来验证研究人体呼吸道颗粒沉积规律。赵秀国等^[25]构建实验平台,发现气溶胶颗粒在咽、喉和气管位置沉积较多,且喉部沉积最多。李福生等^[26]通过体外实验研究发现,呼吸强度与颗粒粒径对颗粒沉积率造成的影响较大,且高呼吸强度与大粒径颗粒物更易沉积到模型中。徐新喜等^[27]通过体外实验研究发现,小粒径颗粒物更易进入更深层次的支气管,大粒径颗粒物受惯性碰撞的影响较大。磁黄铁矿在人体呼吸道颗粒沉积规律的数值模拟结果与上述实验结果基本符合,说明采用数值计算方法虽然和实验方法存在一定误差,但是能够较好地对颗粒物的沉积形态与规律进行模拟,结论可靠性较高。

在矿样运输过程中,粉尘大多沉积在呼吸道中,但在运输过程中车辆颠簸等情况会造成粉尘浓度突增,此时颗粒总沉积率会显著下降。在此工艺过程中,若作业人员处于中高呼吸强度或颗粒粒径较大的作业环境中,磁黄铁矿尘沉积在咽喉区域的

数量会更多,从而引起呼吸道疾病。因此,对于运输工或在运输巷道旁进行中高强度工作的作业人员应更加注意个人防护,作业人员建议佩戴自吸过滤式、负压式半面罩等指定防护因数相对较小的防护用具,运输车辆经过时及时回避,车辆运输全过程多时段喷洒抑尘剂,作业人员结合换岗轮班制,以及时利用人体清除功能排出矿尘,防止长期定岗作业导致气道内大量磁黄铁矿尘的沉积,实现安全、有效、经济的个体防护。在矿石铲装过程中,铲装和翻斗等行为会使矿样堆、岩壁以及地上的灰尘扬起,粉尘浓度较高,粉尘在下级支气管的沉积率增大,对人体肺部器官的伤害更大。在此工艺过程中,若作业人员处于低呼吸强度或颗粒粒径较小的作业环境中,磁黄铁矿尘进入下级支气管区域的数量会进一步增大,大量从底段支气管进入肺部组织的矿尘易造成以尘斑为主的肺铁末沉着症。所以在铲装过程中,可持续对铲车进行喷雾,从而加速微颗粒的沉降与破坏矿石碰撞的冲击气流防止二次扬尘,由于磁黄铁矿表面的亲水性较差,还应在喷雾中添加抑尘剂溶液加速矿物沉降,并且作业人员应佩戴携气式负压式全面罩等防护因数较大的防护用品。

微小粒径矿尘的吸入会对人体的呼吸道系统造成严重损伤,10 μm 以下的矿尘颗粒会沉积在肺部中杀死大量肺细胞,使肺部产生纤维性病变^[28]。在采样巷道中距离运输巷道风口越远的地方沉积的颗粒粒径越小,颗粒物在人体呼吸道总沉积率越低,逃逸到人体肺部深处的颗粒数越多,对肺部损伤越严重。所以针对巷道中在作业区域 I、II、III 处工作的作业人员,应加强个人防护措施,如佩戴微米级粉尘防护设备,采用重离子微孔膜作为滤料的口罩^[29]等,并且避免在此区域环境粉尘浓度较高时处于低呼吸强度状态。

5 结论

1) 颗粒物的总沉积率随颗粒质量浓度的增加,出现先下降而后波动稳定的规律,在转换工艺时出现波动现象,且波动现象的显著程度随呼吸强

度的增加而增大。颗粒总沉积率随颗粒粒径与呼吸强度的增加而增加,且在粒径大于 $5.456 \mu\text{m}$ 时完全沉积在呼吸道中。颗粒物在呼吸道总沉积率随作业区域离运输巷道风口距离的增大而减小。作业人员在作业区域 V 和 VI 劳作时,颗粒物几乎全部沉积在呼吸道中。作业人员在作业区域 I、II、III、IV 劳作时,颗粒物沉积率随作业区域离运输巷道风口距离的增大而减小。

2) 3种不同呼吸强度下各区域颗粒沉积规律基本一致。口腔区域沉积率基本不随颗粒粒径和呼吸强度的变化而变化,随颗粒质量浓度增大而减小;咽喉区域沉积率随颗粒粒径与呼吸强度的增加而增大,当颗粒粒径较小时($d \leq 3.024 \mu\text{m}$),基本不随颗粒质量浓度的改变而改变,当颗粒粒径较大时($d \geq 4.018 \mu\text{m}$),沉积率随颗粒质量浓度的增大而增大;气管区域颗粒沉积率随颗粒粒径和呼吸强度的增加而减小,随颗粒质量浓度变化不显著;支气管区域随颗粒粒径的增加而减小,随颗粒质量浓度与呼吸强度变化不显著。

3) 各支气管逃逸的颗粒数随着颗粒质量浓度的增加而增加,随颗粒粒径与呼吸强度的增加而减少,在距离运输巷道风口越远作业区域劳作时,逃逸至更深层次支气管的颗粒物越多,但支气管逃逸的颗粒数目排序与呼吸强度、颗粒质量浓度、工艺流程和颗粒粒径无关,与模拟使用的几何模型有关。

参考文献(References)

- [1] 蒋仲安,曾发镛,王亚朋.我国金属矿山采运过程典型作业场所粉尘污染控制研究现状与展望[J].金属矿山,2021(1):135-153.
- [2] 李志荣,卢凤立,周文青,等.铸造粉尘对接尘工人鼻咽部损害的调查[J].职业与健康,2007(21):1919-1920.
- [3] 张蕾,刘超群,陈燕,等.支气管肺泡灌洗液涂片检出巨噬细胞吞噬硬金属粉尘1例[J].临床检验杂志,2020,38(8):639-640.
- [4] 常家庆,乔惠平.慢性粉尘性支气管炎的研究进展[J].职业与健康,2002,18(3):5-6.
- [5] Bahmanzadeh H, Abouali O, Faramarzi M, et al. Numerical simulation of airflow and micro-particle deposition in human nasal airway pre-and post-virtual sphenoidotomy surgery[J]. Computers in Biology and Medicine, 2015, 61(3): 8-18.
- [6] Zhang W W, Xiang Y G, Lu C, et al. Numerical modeling of particle deposition in the conducting airways of asthmatic children[J]. Medical Engineering and Physics, 2018, 76(10): 40-46.
- [7] Chen X L, Ma R, Zhong W Q, 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]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 138(4): 545-552.
- [8] Ahookhosh K, Saidi M, Aminfar H, et al. Dry powder inhaler aerosol deposition in a model of tracheobronchial airways: Validating CFD predictions with *in vitro* data[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2020, 587: 119599.
- [9] Li D B, Xu Q S, Liu Y M, et al. Numerical simulation of particles deposition in a human upper airway[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6: 207938.
- [10] 李志. 铀矿尘在人体呼吸道中运动沉积及呼吸暴露风险评价研究[D]. 湖南: 南华大学, 2016.
- [11] 段莉,陈沅江.冶炼粉尘在人体呼吸系统的沉积仿真模拟研究[J].安全与环境学报,2011,11(5):198-202.
- [12] 吴应豪.巷道粉尘沉降规律与转载点喷雾降尘系统研究[D].太原:太原理工大学,2007.
- [13] 国家卫生健康委员会.中华人民共和国国家职业卫生标准:GBZ 2.1-2019[S].北京:中国标准出版社,2019.
- [14] 李刚,吴将有,金龙哲,等.我国金属矿山粉尘防治技术研究现状及展望[J].金属矿山,2021(1):154-167.
- [15] Zhang Y, Chia T L, Finlay W H. Experimental measurement and numerical study of particle deposition in highly idealized mouth-throat models[J]. Aerosol Science and Technology, 2006, 40(5): 361-372.
- [16] Weibel E R. Morphometry of the human lung[M]. New York: Academic Press, 1963: 1-3.
- [17] 欧翠云.颗粒物在人体气管支气管模型中传输与沉积的数值模拟研究[D].长沙:中南大学,2011:19-22.
- [18] Kleinstreuer C, Zhang Z. Laminar-to-turbulent fluid-particle flows in a human airway model[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2003, 29(2): 271-289.
- [19] Pourmehran O, Gorji T B, Gorji-Bandpy M. Magnetic drug targeting through a realistic model of human tracheobronchial airways using computational fluid and particle dynamics[J]. Biomechanics and Modeling in Mechanobiology, 2016, 15(5): 1355-1374.
- [20] 周利华.黄铜矿与磁黄铁矿浮选分离的机理研究及技

- 术应用[D]. 赣州: 江西理工大学, 2017.
- [21] 翁润生. 矿物与岩石辞典[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 45.
- [22] 任晓华, 殷秀文, 高志祥, 等. BS-I型乳液抑尘剂防治矿山运输路面扬尘[J]. 环境科学, 1992(4): 87-89.
- [23] 李刚, 王彦军, 汪群芳. 某金属矿山除尘系统现状分析与改造设计[J]. 现代矿业, 2017(6): 211-214.
- [24] 陈晓乐. 人体呼吸道内可吸入颗粒物的气固两相流数值模拟与仿生实验[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [25] 赵秀国, 徐新喜, 孙栋, 等. 人体呼吸道内气溶胶沉积的实验研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2011, 30(6): 904-908.
- [26] 李福生, 徐新喜, 孙栋, 等. 气溶胶颗粒在人体呼吸道模型内沉积的实验研究[J]. 医用生物力学, 2013, 28(2): 135-141.
- [27] 徐新喜, 孙栋, 赵秀国, 等. 流固耦合作用下真实人体呼吸道气溶胶扩散沉积的仿真与实验[J]. 中国生物医学工程学报, 2017, 36(3): 308-315.
- [28] Patel R R, Yi E S, Ryu J H. Systemic iron overload associated with welder's siderosis[J]. The American Journal of the Medical Sciences, 2009, 337(1): 57-59.
- [29] 梁海英, 吴振东, 刘永辉, 等. 重离子微米孔膜防尘口罩滤芯的研制[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(增刊1): 745-748.

Simulation study on deposition law of pyrrhotite dust in human respiratory tract in roadway

LIAO Huimin, ZHU Yilong, SU Hong, LI Ming

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract In order to reveal the deposition law of pyrrhotite dust in human respiratory tract at construction site, and propose effective occupational disease protection measures, we took the pyrrhotite sample in the sampling roadway of a metal mine in Anhui as research object and establish a three-dimensional model of human respiratory tract. Then, under different concentrations of pyrrhotite dust and different work areas, we simulated the particle deposition in human respiratory tract during the transportation and shoveling processes. The results showed that the pyrrhotite under different respiration intensities, processes, and particle sizes is mainly deposited in the throat and trachea of the human body. When the particle size is greater than $5.456\ \mu\text{m}$, that is, the operator is close to the tuyere in the tunnel, all the mineral dust will be deposited in the respiratory tract of the human body. The total particle deposition rate of the respiratory tract will first decrease with the increase of particle concentration and then fluctuate steadily. And the total particle deposition rate will increase with the increase of particle size and respiratory intensity. The farther the distance from tuyere in the tunnel, the smaller the total particle deposition rate. Based on the deposition law of pyrrhotite dust on the respiratory tract of the human body and actual working conditions, corresponding protective measures are proposed.

Keywords pyrrhotite dust; human respiratory tract; depositional law ●



(责任编辑 祝叶华)