

口罩对呼吸实境颗粒物的防护及风险消减研究

郭杰¹, 李雪纯¹, 徐梦瑶¹, 胡钧哲¹, 黄凯²

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海新金桥环保有限公司, 上海 201201)

摘要: 为了明确口罩对实际环境颗粒物的过滤防护效果, 采用呼吸实境采样装置对办公室和企业车间环境进行现场分析, 选用3种口罩研究口罩类型、佩戴方式、吸气速率等因素对颗粒物过滤效率和风险消减的影响。结果表明, 口罩对颗粒物的过滤效率从高到低依次为: KN95口罩 > 医用口罩 > 活性炭口罩, 口罩侧面泄露对口罩的防护效果具有重要影响, 而吸气速率对口罩颗粒物过滤效率的影响不明显。自然佩戴口罩对车间内不同粒径颗粒物的过滤效率呈现随粒径变大而增加的趋势, 佩戴KN95口罩对废塑料破碎车间粗、细颗粒物在人体呼吸系统沉积通量消减率均高于93.5%, 建议工人根据车间空气状况和劳动工种合理选择不同类型的防护口罩。

关键词: 口罩; 颗粒物; 过滤效率; 沉积通量

中图分类号: X 503 文献标志码: A

Protection and risk reduction of face masks against particulate matter based on real respiratory environment

GUO Jie¹, LI Xuechun¹, XU Mengyao¹, HU Junzhe¹, HUANG Kai²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Xin Jinqiao Environmental Protection Co., Ltd., Shanghai 201201, China)

Abstract: In order to make clear the filtration efficiency of respirators on particulate matter (PM) based on real respiratory environment, three kinds of face masks were selected to study the effects of mask type, wearing mode, inspiratory rate on PM filtration efficiency and risk reduction. Results show that the general trend for PM filtration efficiencies of masks was KN95 mask > surgical mask > activated carbon mask. The air leakage from the gaps between the face and the masks played an important role in achieving high protection performance, while the effect of inspiratory rate on the filtration efficiency of the mask was not obvious. The filtration efficiency of wearing masks under real-life conditions for different size particles showed a tendency to increase with the particle size. More than 93.5% reduction rate for the deposition flux of coarse and fine particles in the human respiratory system in the waste plastic crushing workshop was obtained by wearing KN95 mask. It is suggested that workers can select different types of masks according to the air conditions and the work tasks in the workshop.

Keywords: face mask; particulate matter; filtration efficiency; deposition flux

大气颗粒物是一种重要的污染物，也是病毒、化学物质等毒害物质的重要载体。2013年，世界卫生组织（WHO）将室外空气污染和颗粒物均列为人类致癌物（一级）^[1]。大气颗粒物污染与人体健康效应的流行病学联系最为密切，空气污染（包括颗粒物等）将增加呼吸系统疾病的发病风险，包括哮喘、肺气肿及支气管炎等疾病^[2-3]。

工业企业生产车间也容易产生大气颗粒物污染，以废旧家电回收处理行业为例，企业大都采用“人工半自动拆解+机械破碎分离”的组合处理工艺，对淘汰收集的废旧家电进行资源化回收利用。一方面，废旧家电内部聚集有大量灰尘，在处理过程中容易脱落释放粉尘、颗粒物等污染物；另一方面，对物料的破碎工艺也会产生气体颗粒物。两个方面造成处理车间中的颗粒物污染，而气体颗粒物中富集有阻燃剂等有机污染物^[4-5]和重金属^[6-7]等，可通过呼吸吸入等途径对工人造成潜在危害。

佩戴口罩可以有效降低颗粒物、病毒等毒害物质对人体的暴露，是一种简便有效、经济可行的防护方法。口罩的材质以聚丙烯无纺布为主，其中间层过滤介质主要有熔喷无纺布、静电滤棉、活性炭滤纸等。以一次性平板式医用口罩为例，口罩包括3层：外层无纺布、熔喷无纺布过滤层和内层无纺布。外、内层无纺布的纤维直径较粗（20 μm左右），主要起支撑整个无纺布结构的作用，对可吸入颗粒物没太大的阻隔效果，而中间层熔喷无纺布的纤维直径较细（0.5~10 μm），熔喷无纺布纤维通过扩散、沉降截留、惯性撞击、静电等作用阻隔或捕捉大气中颗粒物等毒害物质^[8-9]。

口罩能过滤截留大气中的颗粒物，其截留消减效果取决于多种因素，包括口罩种类、佩戴方式及颗粒物的粒径分布等。但是，仍有部分颗粒物穿透口罩或从侧面边缘缝隙进入口罩内部^[10]，并在人体呼吸系统发生口鼻的吸入、颗粒物的沉积、肺泡及血液吸收等过程^[11]。根据国际防辐射委员会提供的ICRP（international commission on radiological protection）模型^[12]，将人体呼吸系统分为头部（包括鼻咽喉，head airways，HA）、气管与支气管区域（tracheobronchial region，TB）和肺泡区域（alveolar region，AL）这3个区域，颗粒物将在呼吸系统进行迁移、沉积及吸收，从而对人体造成潜在健康风险。

口罩是污染物经呼吸吸入途径进入人体的最

后一道防线，对污染物的去除和工人的健康防护至关重要。虽然口罩在出厂销售前，都会经过严格的防护指标检测，但是，口罩对大气呼吸实境中颗粒物防护效果的研究还比较少，尤其在环境或工况车间中，口罩类型、佩戴方式等因素对口罩过滤颗粒物的影响规律还不是很清楚，佩戴口罩对工人的防护效果及风险消减还有待深入研究。

本文拟采用呼吸采样装置，基于实际现场环境，模拟研究不同口罩类型、佩戴方式、吸气速率等条件下，口罩对颗粒物的截留消减效果。本文研究结果可为口罩对颗粒物的截留消减提供相应的基础数据，为佩戴口罩的防护效果及相关工作环境工人的职业暴露风险提供技术支撑。

1 实验方法

1.1 颗粒物采样实验装置

选用3种常用口罩：a. 医用外科口罩（surgical mask）：广州拜费尔空气净化材料有限公司，符合标准《医用外科口罩》（YY 0469-2011）要求。b. 活性炭口罩：安诺康品牌，DOCTOR MASK，共4层，含有外内2层防潮无纺布，中间夹有活性炭滤纸和过滤纸；其中医用口罩和活性炭口罩均为一次性挂耳式平板口罩。c. KN95口罩：Honeywell，H901型号，头戴式折叠型口罩。

呼吸实验采样装置的主要仪器：便携式气溶胶粒径谱仪（Grimm-1.109，德国Grimm），根据光散射原理，可实时检测颗粒物的粒径范围为0.25~10 μm，共24个通道（0.25/0.28/0.30/0.35/0.40/0.45/0.50/0.58/0.65/0.70/0.80/1.00/1.30/1.60/2.00/2.50/3.00/3.50/4.00/5.00/6.50/7.50/8.50/10.00 μm），粒径谱仪的气流采样流量为1.2 L/min。为便于讨论，将颗粒物直径 $D_p \leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物定义为细颗粒物（PM_{2.5}），将颗粒物直径范围2.5~10 μm的颗粒物定义为粗颗粒物（PM_{2.5-10}）；微型泵（FZB 8682，成都海霖科技有限公司）；玻璃转子流量计（LZB-10，上海微况测控技术有限公司）。具体的采样装置示意图如图1所示，人体真实呼吸过程包括吸气和呼气2个过程，其过程相对复杂，因而本实验仅进行连续稳定的吸气过程模拟。

1.2 呼吸实境采样环境

呼吸实验采样装置分别在2个实际环境进行现场采样分析，每组实验采样10 min，选取其中

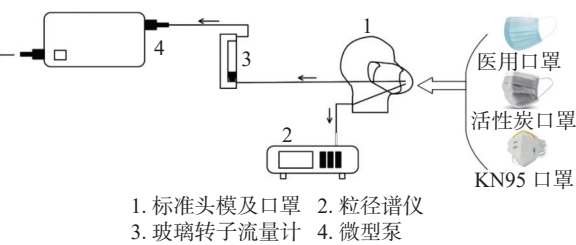


图1 呼吸实境采样装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of respiratory sampling device

颗粒物浓度变化稳定的5 min 数据进行分析。

a. 学生办公室：房间长宽高的尺寸为5 m×4 m×3 m左右，实验期间开启空调，房间颗粒物相对稳定；将不同类型口罩佩戴在头模上，分别考虑2种佩戴方式(自然佩戴和侧面密封方式)、3种吸气速率(13, 30, 46 L/min)等因素对口罩截留颗粒物的影响效果。其中，自然佩戴是模拟真实佩戴口罩情景，将口罩佩戴至头模，按压鼻夹和边缘贴面，其侧面边缘不作密封处理；侧面密封是指头模上的口罩侧面边缘用透明胶带作密封处理，模拟测试口罩无边缘泄漏时对颗粒物的截留效果。

b. 企业车间：选择上海市一家废旧家电回收处理企业进行现场呼吸实境采样实验，分别在废电视机拆解车间、废电路板破碎分选车间、废塑料破碎车间等区域进行采样分析。废电视机拆解车间主要是通过人工将废电视机拆解得到塑料、显示器、电路板、电线、喇叭等产物，实验采样装置放置在距离中间工位2 m处位置；废电路板破碎分选车间主要是将废电路板及边角料进行“机械破碎+风力分选”的处理，可以得到铜颗粒和废电路板基板树脂粉；废塑料破碎车间主要是将废电视机拆解得到的塑料外壳进行机械破碎处理，得到粒径为10 mm左右的塑料颗粒。为了不影响工人的生产操作，将实验采样装置放在距离废电路板处理线出料口和塑料破碎机出料口2 m左右位置。分别选用3种不同类型口罩，采取自然佩戴方式和30 L/min 吸气速率的采样条件。

1.3 口罩对颗粒物的过滤效率

过滤效率是指在规定的检测条件下，口罩滤除目标颗粒物的百分比，是表征口罩防护性能的关键指标。本实验口罩对颗粒物过滤效率

$$P = (C_1 - C_2) / C_1 \times 100\%$$
 (1)

式中： C_1 为口罩外(不带口罩时)颗粒物质量浓度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ； C_2 为口罩内颗粒物浓度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

2 结果与讨论

2.1 口罩类型和佩戴方式对颗粒物的消减效果

图2~4分别显示了不同口罩类型、佩戴方式、吸气速率条件下，3种口罩对办公室室内不同粒径颗粒物的质量浓度、数量浓度和过滤效率的

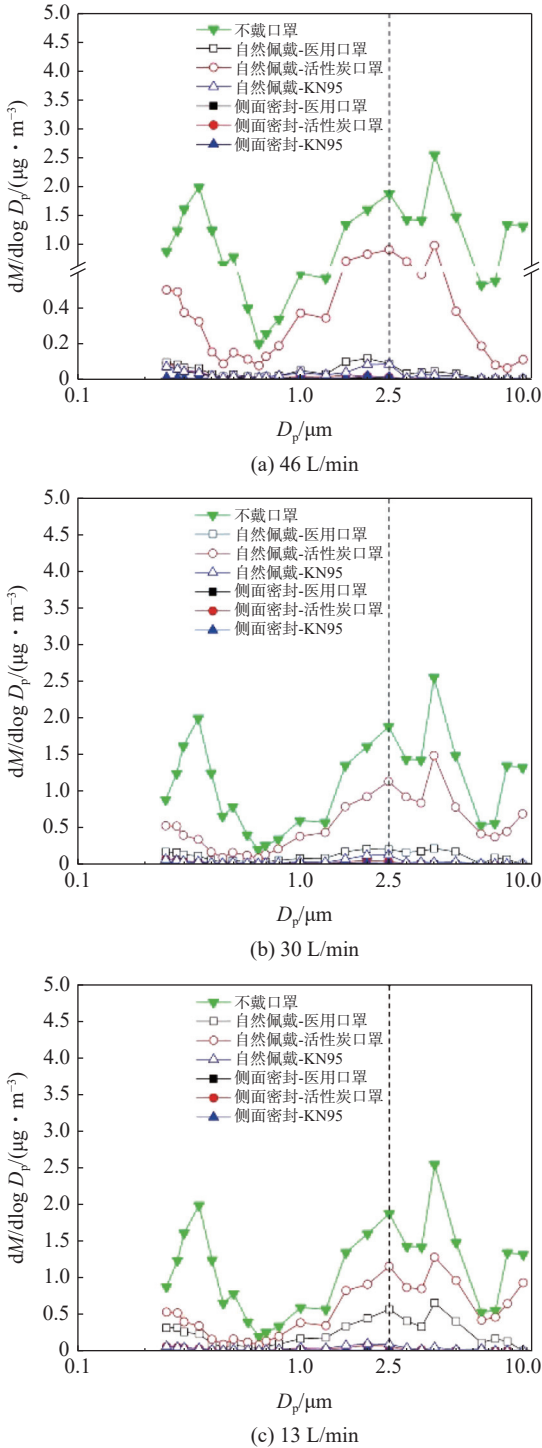


图2 口罩佩戴方式和吸气速率对口罩内颗粒物质量浓度的影响
Fig. 2 Effects of mask wearing mode and inspiratory rate on particulate matter mass concentration

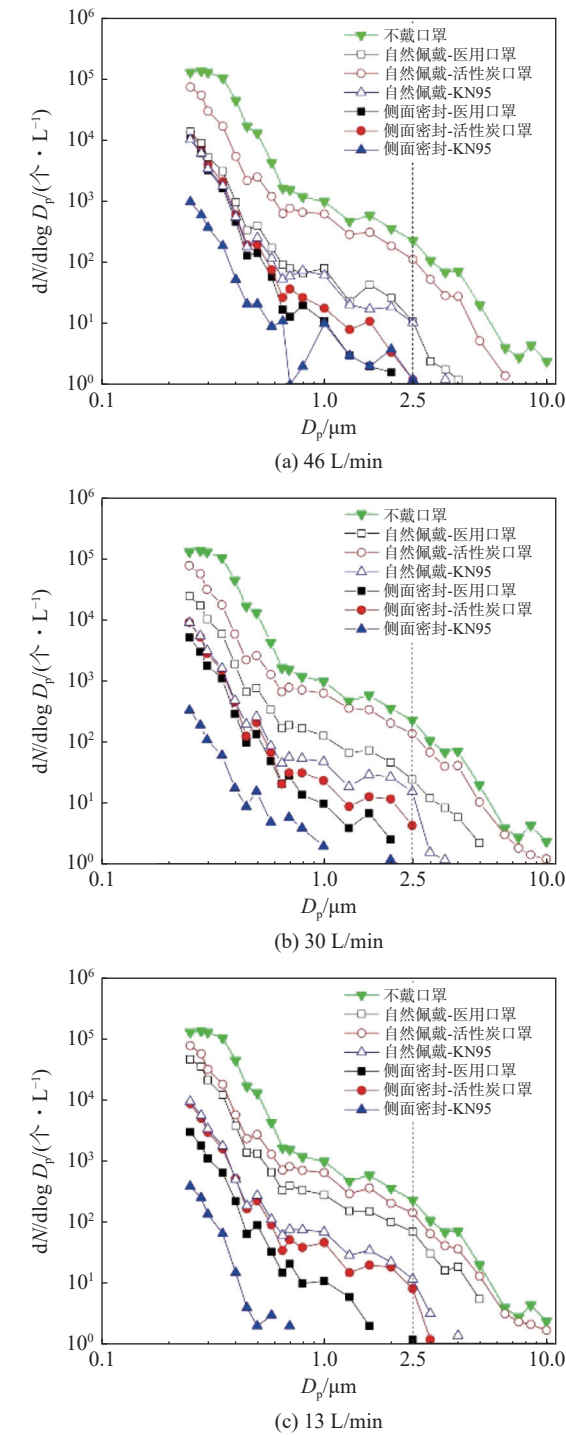


图3 口罩佩戴方式和吸气速率对口罩内颗粒物数量浓度的影响
Fig. 3 Effects of mask wearing mode and inspiratory rate on particulate matter number concentration

影响规律。 $dM/d\log D_p$ 为不同粒径粒子质量的对数分布， $dN/d\log D_p$ 为不同粒径粒子数量的对数分布。

口罩对颗粒物的过滤效果与口罩的材质(口罩类型)、口罩与脸部的贴合程度(佩戴方式)、吸气速率及颗粒物粒径分布等因素有关^[13-15]。不同吸气速率条件下，佩戴口罩都可以在一定程度降低口

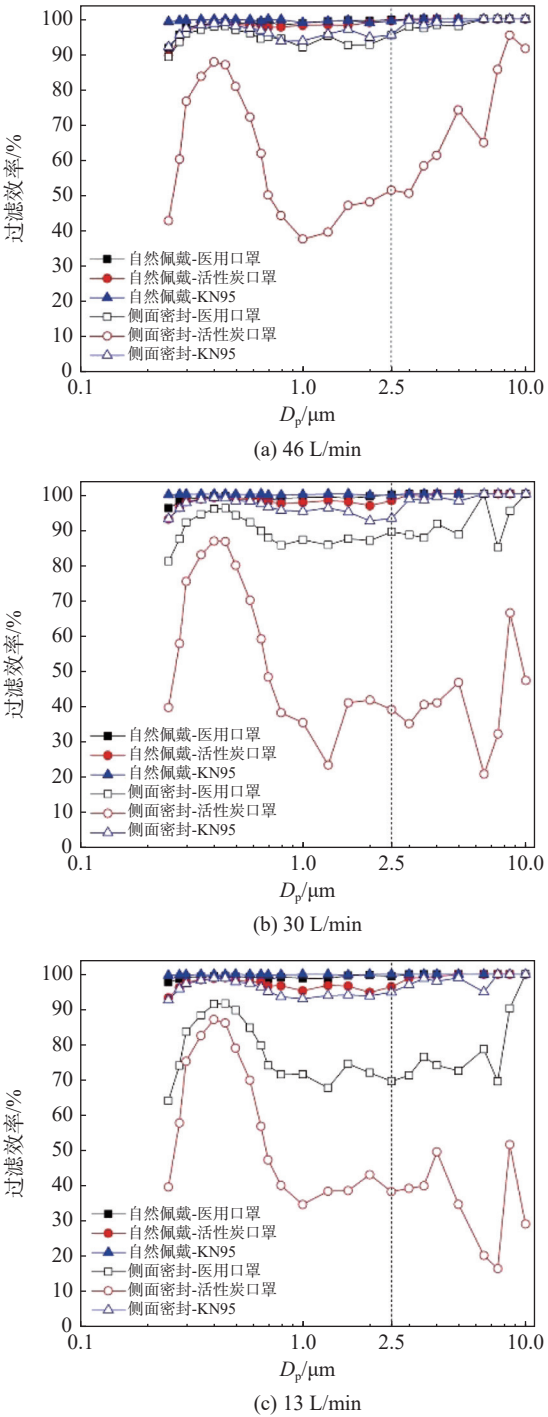


图4 口罩佩戴方式和吸气速率对颗粒物过滤效率的影响
Fig. 4 Effects of mask wearing mode and inspiratory rate on particulate matter filtration efficiency

罩内颗粒物的质量浓度(图2)和数量浓度(图3)，其中，侧面密封佩戴方式的口罩比自然佩戴口罩对颗粒物质量浓度和数量浓度的降低程度更明显，而吸气速率对不同粒径颗粒物质量浓度和数量浓度的影响不大。

对比侧面密封和自然佩戴两种佩戴方式，3种口罩侧面封闭佩戴方式对不同粒径颗粒物的过滤

效率都能超过 90%,且侧面密封的口罩对颗粒物的过滤效率明显高于自然佩戴方式,说明侧面泄露,即口罩侧面边缘与脸部的贴合程度,对口罩的防护效果具有重要影响。一般地,口罩的漏过率由口罩所用滤布的透过率和口罩的侧漏率两部分组成。侧面密封的佩戴方式主要体现了口罩滤布材质对颗粒物透过率的影响,而自然佩戴方式则会产生滤布透过和侧面泄露两种现象^[16-17]。口罩的柔软度、可塑性等因素将影响口罩侧面边缘与脸部的贴合程度,活性炭口罩含有活性炭层、过滤纸及内外无纺布层等 4 层,口罩材质比医用口罩的硬,自然佩戴时容易出现侧面边缘泄露的问题,根据流体力学原理,气流将直接穿过缝隙而进入口罩内部,从而降低了口罩对颗粒物的过滤效率,这是导致活性炭口罩对颗粒物过滤效率较低的主要原因^[18]。

对于侧面密封的佩戴方式,吸气速率对颗粒物的过滤效率没有太大影响,3 种口罩对不同粒径颗粒物的过滤效率都大于 95%。而自然佩戴方式的口罩过滤效率随口罩类型和吸气速率的变化而变化,其过滤效率从高到低依次为:KN95 口罩 > 医用口罩 > 活性炭口罩。由于 KN95 口罩采用头戴式上下两个松紧带固定,其侧面边缘密闭性较好,所以,吸气速率对 KN95 口罩过滤效率的影响不大。对于医用口罩和活性炭口罩,均采用耳挂式固定方式,侧面边缘存在较多的缝隙,随着吸气速率的增大,医用口罩对颗粒物的过滤效率逐渐升高,这可能由于吸气速率增大,增加了口鼻附近处(即口罩正面中央位置)的通气量,从而增加了滤布材料对颗粒物的截留量。Zou 等^[19]进行了多种口罩的密封和自然佩戴的过滤实验,得出不同吸气速率下,口罩的防护效果由强到弱依次为: N95 > 医用口罩 > 活性炭口罩,与本研究结果一致。而王雷瑶等^[20]也研究了口罩材质和佩戴方式(边缘作密封处理和边缘不作密封处理)对颗粒物的去除效果,发现 5 种口罩对 $PM_{2.5}$ 的防护效果由好到差依次为: N95 > $PM_{2.5}$ 口罩 > 棉布口罩、活性炭口罩 > 医用一次性口罩,其研究结果与本实验有点差别。这主要由于本实验所采样活性炭口罩材质较硬,与头模脸部的贴合程度较差,容易出现较多的缝隙,从而降低了活性炭口罩对颗粒物的消减效果。

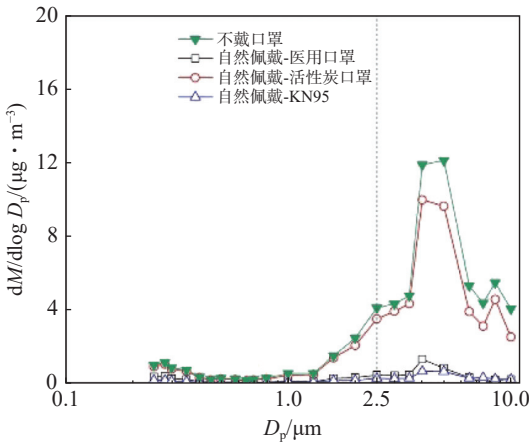
从图 4 可以看出,活性炭口罩对 $PM_{2.5}$ 的过滤

效率不随吸气速率的变化而变化,而对 $PM_{2.5-10}$ 的过滤效率随吸气速率的增大而增大。这可能有以下 2 个原因: a. 随着吸气速率的增加,容易使口罩内产生较大的负压,使口罩拉向头模表面,从而减少了侧面边缘泄露的空间^[18],尤其对粗颗粒物侧面泄露量减少明显,即口罩正面部分的滤层材料可以发挥截留粗颗粒物的作用; b. 侧面泄露是一个复杂的撞击过程,颗粒物通过口罩与面部之间的缝隙时,由于面部的高低不平 and 狭缝的宽窄不一,颗粒物运动的速率和方向不断改变。当吸气速率较高时,粗颗粒物更容易撞击在人的面部或口罩的内层上(或者被缝隙截住),而细颗粒物却容易通过缝隙被吸入。换句话说,吸气速率较大时,其通气阻力越大,粗颗粒物从口罩正面透过或侧面缝隙进入口罩内部时,容易被口罩滤布材料截留,而细颗粒物则容易通过侧面缝隙处进入口罩内部^[21]。

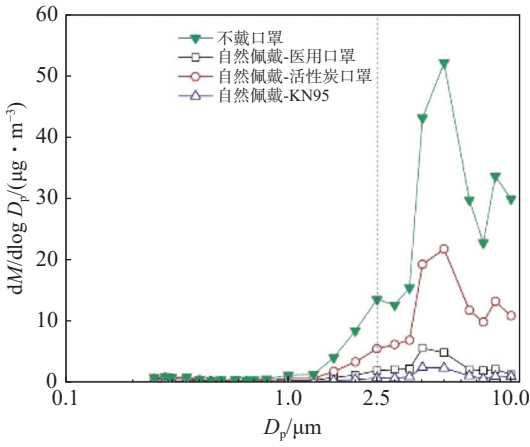
2.2 企业车间实境下口罩对颗粒物的消减效果

图 5~7 分别显示了自然佩戴 3 种口罩、吸气速率为 30 L/min 的条件下,对 3 个废旧家电处理车间不同粒径颗粒物的质量浓度、数量浓度和口罩过滤效率的影响规律。

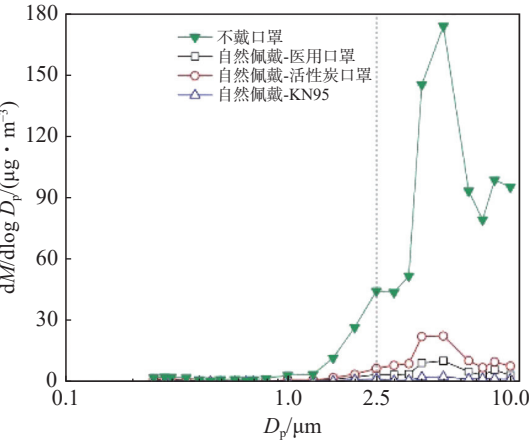
对比 3 个车间大气颗粒物的质量浓度(图 5)发现,不同处理工艺产生颗粒物污染状况不同,车间颗粒物的污染状况从高到低依次为:废塑料破碎车间 > 废电路板破碎分选车间 > 废电视机人工拆解车间,其车间颗粒物累积质量浓度分别为 885.7, 274.7, 67.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。3 个车间颗粒物污染主要以粗颗粒物为主,粒径范围 3.50~7.50 μm 间粗颗粒物的质量浓度较高。车间颗粒物的污染状况与处理对象、处理工艺的除尘设施,以及车间的通风状况等因素有关^[22]。废电视机拆解处理车间空间大、通风效果好,车间粉尘主要来自电视机内部的灰尘颗粒,且操作台上面配置了集尘罩,可以一定程度降低颗粒物污染状况。废电路板破碎分选处理线配备了多级旋风除尘器进行细物料的收集分离,可以降低车间内颗粒物的污染,且对破碎机和风力分选装置进行了隔声降噪处理,也一定程度起到了隔离粉尘的作用。废塑料破碎车间空间较小,且通风较差,破碎时物料间的摩擦、剪切、冲击等过程造成塑料表面黏附灰尘的脱落及细小物料的产生,从而造成塑料出料口附近的颗粒物污染较重。



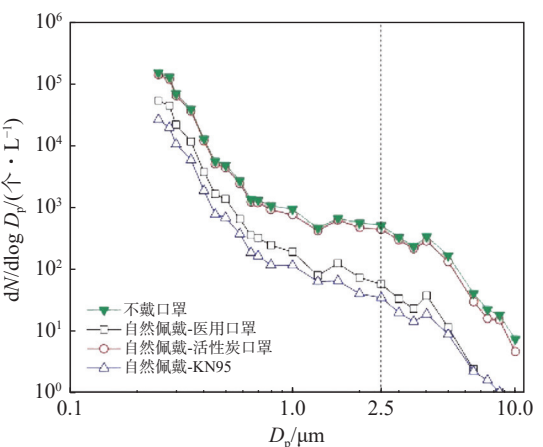
(a) 废电视机拆解车间



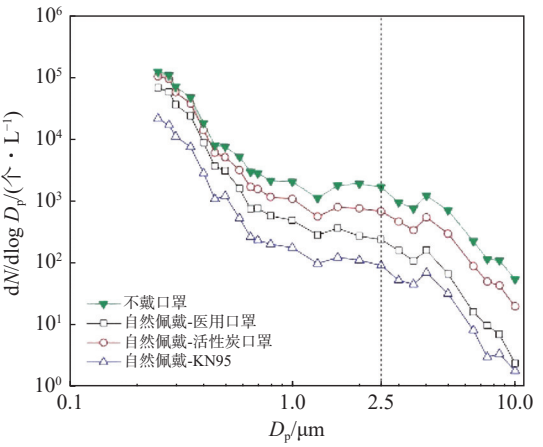
(b) 废电路板破碎分选车间



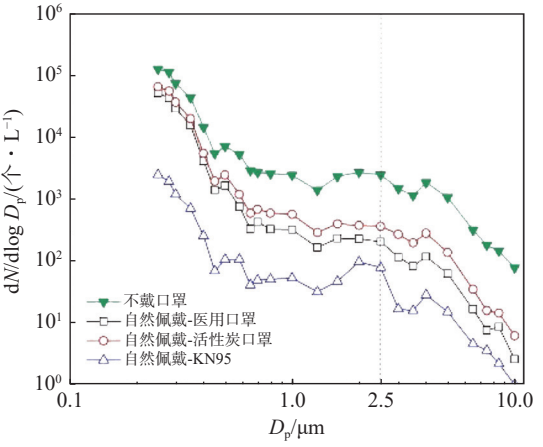
(c) 废塑料破碎车间



(a) 废电视机拆解车间



(b) 废电路板破碎分选车间



(c) 废塑料破碎车间

图 5 自然佩戴口罩后对不同车间颗粒物质量浓度的影响

Fig. 5 Effects of wearing masks under real-life conditions on particulate matter mass concentration in different workshops

3 个车间不同粒径颗粒物的数量浓度呈现随颗粒物粒径增大而减小的趋势(图 6)。对于废电视机拆解车间,医用口罩和 KN95 口罩对颗粒物的数量浓度减少明显;对于废电路板破碎分选车间,医用口罩和活性炭口罩对细颗粒物的数量浓度消减

图 6 自然佩戴口罩后对不同车间颗粒物数量浓度的影响

Fig. 6 Effects of wearing masks under real-life conditions on particulate matter number concentration in different workshops

效果差不多,而医用口罩对于粗颗粒物的数量浓度的消减效果更好;对于废塑料破碎车间,KN95 口罩对细颗粒物的数量浓度降低最有效,对粒径小于 1 μm 的颗粒物的数量浓度从 2396~110400 个/L 降低到 52~1898 个/L,表明 KN95 口罩对细颗粒

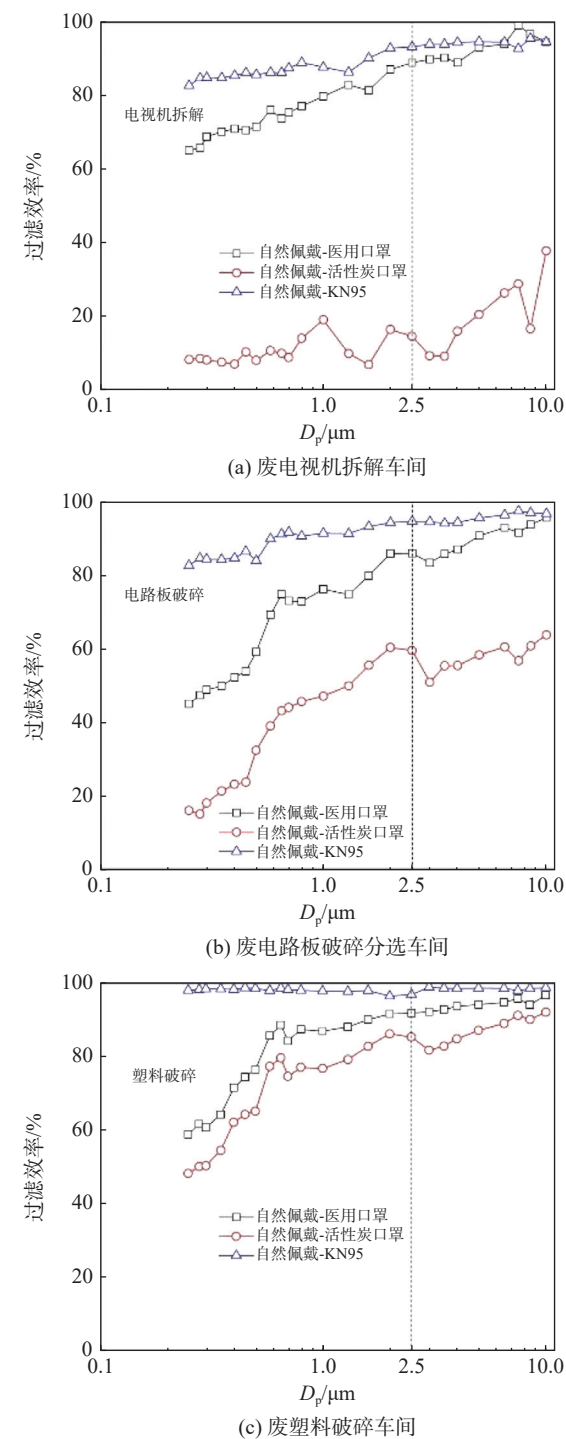


图 7 自然佩戴口罩对不同车间颗粒物过滤效率的影响
 Fig. 7 Effects of wearing masks under real-life conditions on particulate matter filtration efficiency in different workshops

物的防护效果明显。

在 3 个车间的实际环境中, 自然佩戴口罩的过滤效率呈现随颗粒物粒径变大而增加的趋势(图 7)。KN95 口罩的过滤效率最高, 对不同粒径颗粒物的过滤效率均大于 80%, 其次是医用口

罩, 医用口罩的熔喷无纺布中间过滤层, 可通过扩散、沉降截留、惯性撞击、静电等作用截留粗细颗粒物, 其对废电视机拆解、废电路板处理及废塑料破碎车间中不同粒径颗粒物的过滤效率分别为 65.1%~99.1%, 45.0%~95.6%, 58.9%~96.7%。活性炭口罩对颗粒物的过滤效率最低, 在废电视机拆解处理车间, 活性炭口罩对不同粒径颗粒物的过滤效率仅为 7.1%~37.8%, 这说明活性炭口罩与脸部的贴合效果不好, 侧面泄露比较严重。

2.3 口罩对颗粒物呼吸系统健康风险的消减

颗粒物经穿透滤布或侧面泄露而进入口罩内部后, 将被人体吸入, 并在呼吸系统不同区域发生沉积、迁移等过程, 给人体健康造成潜在风险^[23]。由于不同粒径颗粒物在人体呼吸系统具有不同的沉积特征, 本文参照 ICRP 的颗粒物沉积模型, 计算比较不同口罩过滤后不同粒径颗粒物在呼吸系统不同区域(HA, TB 和 AL)的沉积通量及消减率, 从而评估口罩对颗粒物健康风险的消减作用。现介绍 ICRP 的具体计算公式^[12]。

不同粒径颗粒物在呼吸系统的沉积部分 DF 计算如下:

头部的颗粒物沉积部分

$$DF_{HA} = IF \left[\frac{1}{1 + \exp(6.84 + 1.183 \ln D_p)} + \frac{1}{1 + \exp(0.924 - 1.885 \ln D_p)} \right] \quad (2)$$

式中, IF 为颗粒物的可吸入部分。

$$IF = 1 - 0.5 \left[1 - \frac{1}{1 + 0.00076 D_p^{2.8}} \right] \quad (3)$$

气管及支气管区的颗粒物沉积部分

$$DF_{TB} = \left(\frac{0.00352}{D_p} \right) \left[\exp(-0.234(\ln D_p + 3.40)^2) + 63.9 \exp(-0.819(\ln D_p - 1.61)^2) \right] \quad (4)$$

肺泡区颗粒物的沉积部分

$$DF_{AL} = \left(\frac{0.0155}{D_p} \right) \left[\exp(-0.416(\ln D_p + 2.84)^2) + 19.11 \exp(-0.482(\ln D_p - 1.362)^2) \right] \quad (5)$$

式中, D_p 为 Grimm 粒径谱仪测试不同粒径颗粒物的直径, μm 。

不同粒径颗粒物在人体呼吸系统不同区域沉积通量 F 按式(6)计算。

$$F_j = \sum (DF_{j,i} C_i) V \tag{6}$$

式中： $DF_{j,i}$ 为不同粒径颗粒物 F_j 在人体呼吸系统的沉积部分(j 表示HA, TB和AR)； C_i 为不同粒径颗粒物的浓度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ； V 为工人的呼吸速率，根据美国环保署(USEPA)的2011版暴露参数手册，工人(41~51岁，不限性别)中等强度工作状态下的呼吸速率的平均值和95%百分点(95th percentile)分别为28 L/min和39 L/min^[24]，故本文在工厂实境的呼吸速率设定为30 L/min是合乎实际的。

人体呼吸系统对颗粒物具有自我净化保护作用，例如，人体头部的鼻毛及咽喉等器官能阻挡

一部分大粒径颗粒物，而进入气管的大粒径颗粒物(大于2 μm)容易被捕集在气管及支气管等呼吸道粘液中，通过纤毛活动进入咽喉部，随咳痰排出^[11]。对于细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)，一般能够顺利地通过头部(鼻腔至咽喉)，而进入气管及支气管，甚至到达肺泡区。因此，颗粒物在人体头部、气管支气管部及肺泡等不同部位沉积，与颗粒物的形态特征、粒径分布及在粘液中的团聚沉降性能等因素相关^[25-26]。

根据ICRP模型计算得出不同粒径颗粒物的沉积通量和消减率如表1所示，定义沉积通量消减率 R 为佩戴口罩后颗粒物沉积通量减少量与佩戴口罩前的沉积通量值之比。在塑料破碎车间不带

表 1 不同车间中颗粒物在人体呼吸系统的沉积通量和消减率

Tab.1 Deposition flux and reduction rate of particulate matter in human respiratory system in different workshops

车间	口罩类型	颗粒物	沉积通量/($\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$)			消减率/%		
			HA	TB	AL	HA	TB	AL
废电视机拆解	无口罩	$\text{PM}_{2.5}$	10.4	0.96	2.59			
		$\text{PM}_{2.5-10}$	78.7	3.94	5.34			
	医用	$\text{PM}_{2.5}$	1.47	0.14	0.47	85.9	85.4	81.9
		$\text{PM}_{2.5-10}$	5.67	0.32	0.45	92.8	91.9	91.6
	活性炭	$\text{PM}_{2.5}$	8.97	0.83	2.26	13.8	13.5	12.7
		$\text{PM}_{2.5-10}$	63.0	3.25	4.42	19.9	17.5	17.2
	KN95	$\text{PM}_{2.5}$	0.84	0.08	0.25	99.2	74.0	61.7
		$\text{PM}_{2.5-10}$	4.39	0.22	0.30	99.7	92.4	81.3
	无口罩	$\text{PM}_{2.5}$	32.0	2.94	6.82			
		$\text{PM}_{2.5-10}$	362	16.3	21.7			
废电路板破碎分选	医用	$\text{PM}_{2.5}$	5.15	0.48	1.32	83.9	83.7	80.6
		$\text{PM}_{2.5-10}$	33.5	1.73	2.36	90.7	89.4	89.1
	活性炭	$\text{PM}_{2.5}$	13.5	1.24	3.12	57.8	57.8	54.3
		$\text{PM}_{2.5-10}$	151	6.98	9.35	58.3	57.2	56.9
	KN95	$\text{PM}_{2.5}$	1.93	0.18	0.48	99.4	83.7	85.4
		$\text{PM}_{2.5-10}$	15.2	0.76	1.02	99.8	93.7	95.4
	无口罩	$\text{PM}_{2.5}$	100	9.20	20.6			
		$\text{PM}_{2.5-10}$	1180	53.9	72.0			
	医用	$\text{PM}_{2.5}$	8.97	0.83	2.19	91.0	91.0	89.4
		$\text{PM}_{2.5-10}$	65.8	3.23	4.36	94.4	94.0	93.9
废塑料破碎	活性炭	$\text{PM}_{2.5}$	15.4	1.42	3.60	84.6	84.6	82.5
		$\text{PM}_{2.5-10}$	144	7.26	9.83	87.8	86.5	86.3
	KN95	$\text{PM}_{2.5}$	3.08	0.28	0.60	99.7	93.5	95.2
		$\text{PM}_{2.5-10}$	17.4	0.79	1.04	99.9	98.1	98.6

口罩的情景下, $PM_{2.5-10}$ 的沉积通量最大, 在头部、气管及支气管、肺泡区域的沉积通量分别达到了 1180, 53.9, 72.0 $\mu\text{g}/\text{h}$ 。通过自然佩戴 KN95 口罩后, 其 3 个区域的 $PM_{2.5-10}$ 的沉积通量下降到了 17.4, 0.79, 1.04 $\mu\text{g}/\text{h}$, 即 3 个区域的 R 值均超过了 98.1%。另外, KN95 口罩对废塑料破碎车间 $PM_{2.5}$ 在呼吸系统 3 个区域的 R 值均超过了 93.5%, 即 KN95 口罩对粗、细颗粒物均达到了良好的防护效果。在塑料破碎车间, 自然佩戴 KN95 口罩后, 呼吸系统 3 个区域的颗粒物沉积通量值与废电路板破碎车间自然佩戴 KN95 口罩的沉积通量值相当。对于废电视机拆解车间, 比较自然佩戴医用口罩和 KN95 口罩后颗粒物的沉积通量值发现, 佩戴医用口罩后, $PM_{2.5}$ 和 $PM_{2.5-10}$ 在人体呼吸系统的沉积通量值略微大于 KN95 口罩, 其值与废电路板破碎分选、废塑料破碎车间佩戴 KN95 口罩后颗粒物的沉积通量值相当。因此, 考虑到电视机拆解工人需要搬抬电视机, 劳动强度较大、工作时间长, 佩戴 KN95 口罩后, 容易引起呼吸不畅, 从颗粒物的截留去除和沉积特征角度出发, 佩戴医用口罩对电视机拆解工人也可以取得较好的颗粒物防护效果。

2.4 研究的不足及建议

本研究实验仅模拟了呼吸速率稳定的吸气过程, 由于人体呼吸存在吸气和呼气 2 个过程, 且呼吸速率是会发生变化的, 所以, 实际情况要比本模拟实验复杂得多。但是, 该呼吸实境模拟结果可作为人体对颗粒物呼吸暴露量的最大值, 为操作工人的暴露风险提供限值参考。另外, 本文实验属于实境模拟实验, 而工人佩戴口罩的现实情况更加复杂, 有诸多实际因素影响着口罩对颗粒物的过滤消减, 如工人佩戴口罩是否规范、是否遮住口鼻, 每个工人的脸型都不一样, 同款口罩与每个工人脸部的贴合程度也不尽相同。因此, 还应进行更加符合现实的实验设计, 如让工人佩戴口罩, 然后对比分析使用前后的口罩, 从而科学合理地评价口罩对颗粒物的实际消减效果。

从职业安全防护的角度出发, 基于车间空气污染状况和劳动工种, 工人可以选择佩戴不同类型的防护口罩。例如, 废电视机拆解车间颗粒物污染较轻, 拆解工人的劳动强度大、工作时间长, 不宜佩戴 KN95 口罩, 且佩戴医用口罩也可达到较好的颗粒物防护效果。废电路板破碎分选车

间和废塑料破碎车间中的颗粒物污染较重, 其处理工艺机械化程度高、工人劳动强度较低, 建议工人佩戴 KN95 口罩, 从而有效地降低颗粒物的暴露风险。

3 结 论

a. 口罩对颗粒物的过滤效率从高到低依次为: KN95 口罩 > 医用口罩 > 活性炭口罩。采用侧面封闭的佩戴方式, 3 种口罩对不同粒径颗粒物的过滤效率都能超过 90%。自然佩戴口罩时, 侧面泄露对口罩的防护效果具有重要影响, 其中, 活性炭口罩的侧面泄露最严重, 然后是医用口罩和 KN95 口罩。吸气速率对口罩颗粒物过滤效率的影响不明显。

b. 废旧家电不同处理车间颗粒物具有不同的浓度水平和粒径分布, 车间颗粒物的污染状况从高到低依次为: 废塑料破碎车间 > 废电路板破碎分选车间 > 废电视机人工拆解车间, 车间空气中 3.50~7.50 μm 粒径范围粗颗粒物的质量浓度较高。在 3 个车间环境中, 自然佩戴 KN95 口罩对车间不同粒径颗粒物的过滤效率最高(大于 80%), 且自然佩戴口罩的过滤效率呈现随颗粒物粒径变大而增加的趋势。

c. 根据 ICRP 模型计算得出, 在塑料破碎车间不带口罩的情景下, $PM_{2.5-10}$ 的沉积通量最大, 通过自然佩戴 KN95 口罩后, 对粗、细颗粒物在人体呼吸系统沉积通量消减率分别高于 98.1% 和 93.5%, 即 KN95 口罩达到了良好的防护效果。基于车间空气污染状况和劳动工种, 建议工人可以选择佩戴不同类型的防护口罩。

参考文献:

- [1] LOOMIS D, GROSSE Y, LAUBY-SECRETAN B, et al. The carcinogenicity of outdoor air pollution[J]. *The Lancet Oncology*, 2013, 14(13): 1262-1263.
- [2] 阚海东, 陈秉衡. 我国大气颗粒物暴露与人群健康效应的关系 [J]. *环境与健康杂志*, 2002, 19(6): 422-424.
- [3] TURNER M C, ANDERSEN Z J, BACCARELLI A, et al. Outdoor air pollution and cancer: An overview of the current evidence and public health recommendations[J]. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 2020, 70(6): 460-479.
- [4] GUO J, LIN K F, DENG J J, et al. Polybrominated diphenyl ethers in indoor air during waste TV recycling

- process[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 283: 439–446.
- [5] DIE Q Q, NIE Z Q, HUANG Q F, et al. Concentrations and occupational exposure assessment of polybrominated diphenyl ethers in modern Chinese e-waste dismantling workshops[J]. *Chemosphere*, 2019, 214: 379–388.
- [6] FANG W X, YANG Y C, XU Z M. PM₁₀ and PM_{2.5} and health risk assessment for heavy metals in a typical factory for cathode ray tube television recycling[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(21): 12469–12476.
- [7] CEBALLOS D, BEAUCHAM C, PAGE E. Metal exposures at three U.S. electronic scrap recycling facilities[J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2017, 14(6): 401–408.
- [8] 陈凤翔, 翟丽莎, 刘可帅, 等. 防护口罩研究进展及其发展趋势 [J]. *西安工程大学学报*, 2020, 34(2): 1–12.
- [9] TUÑÓN-MOLINA A, TAKAYAMA K, REDWAN E M, et al. Protective face masks: current status and future trends[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(48): 56725–56751.
- [10] 刘博羽, 沈国铎, 陶澍. 基于呼吸实境模拟的口罩防护效果影响因素研究 [J]. *生态环境学报*, 2019, 28(4): 786–794.
- [11] [英] 皮帕·麦高恩, 安格斯·杰弗里斯, 安德鲁·特利. 呼吸系统 [M]. 上海交通大学医学院翻译组, 译. 上海: 上海世界图书出版公司, 2006.
- [12] HINDS W C. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [13] SHEN H Z, LIU B Y, CHEN Y L, et al. Individual and population level protection from particulate matter exposure by wearing facemasks[J]. *Environment International*, 2021, 146: 106026.
- [14] FARZANEH S, SHIRINBAYAN M. Processing and quality control of masks: a review[J]. *Polymers*, 2022, 14(2): 291.
- [15] HE X J, REPONEN T, MCKAY R T, et al. Effect of particle size on the performance of an N95 filtering facepiece respirator and a surgical mask at various breathing conditions[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2013, 47(11): 1180–1187.
- [16] HARIHARAN P, SHARMA N, GUHA S, et al. A computational model for predicting changes in infection dynamics due to leakage through N95 respirators[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 10690.
- [17] CAPPAS D, ASADI S, BARREDA S, et al. Expiratory aerosol particle escape from surgical masks due to imperfect sealing[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 12110.
- [18] 姜玫婕, 张鹏, 宫继成. 基于实际大气颗粒物环境的口罩防护作用研究 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 2022, 58(2): 354–360.
- [19] ZOU Z L, YAO M S. Airflow resistance and bio-filtering performance of carbon nanotube filters and current facepiece respirators[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2015, 79: 61–71.
- [20] 王雷瑶, 王立鑫, 李喆. 日常防护型口罩对 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的防护效果研究 [J]. *环境与健康杂志*, 2018, 35(11): 1004–1007.
- [21] 何军, 严繁晃, 路正辉, 等. 通气流量对平面口罩 NaCl 颗粒物过滤性能的影响 [J]. *质量技术监督研究*, 2021(4): 28–31.
- [22] CHEN Z Y, LUO X J, ZENG Y, et al. Polybrominated diphenyl ethers in indoor air from two typical E-waste recycling workshops in Southern China: emission, size-distribution, gas-particle partitioning, and exposure assessment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 402: 123667.
- [23] HOFMANN W. Modelling inhaled particle deposition in the human lung—a review[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2011, 42(10): 693–724.
- [24] United States. Environmental Protection Agency (EPA). (2011) Exposure Factors Handbook: 2011 Edition. National Center for Environmental Assessment, Washington, DC; EPA/600/R-09/052F. Available from the National Technical Information Service, Springfield, VA[EB/OL]. [2022-07-02] <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/efh-frontmatter.pdf>.
- [25] ZHOU Q H, WANG L X, CAO Z Y, et al. Dispersion of atmospheric fine particulate matters in simulated lung fluid and their effects on model cell membranes[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 542: 36–43.
- [26] LUO Z, LI S X, XU Y, et al. Extracting pulmonary surfactants to form inverse micelles on suspended graphene nanosheets[J]. *Environmental Science: Nano*, 2018, 5(1): 130–140.

(编辑: 石 瑛)