

口腔诊疗喷溅颗粒物涡旋式集除方法研究

艾正涛^{1,2†}, 刘芳^{1,2}, 邢超杰^{1,2}

[1. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082;

2. 国家建筑安全与环境国际联合研究中心(湖南大学), 湖南长沙 410082]

摘要:口腔诊疗过程伴随着大量喷溅颗粒物的产生, 医护人员长时间暴露于高浓度颗粒物中可能会产生职业健康问题. 为了对喷溅颗粒物实施高效去除进而降低医护人员暴露风险, 本研究提出了一种具有长距离、高作用效益的新型涡旋排风罩. 首先采用数值模拟方法, 分析涡旋排风罩的流动及颗粒物去除特性, 并与传统顶吸式排风罩进行对比; 继而通过分析送排风速度比、水平和垂直送风角度对涡旋排风罩轴线速度、压力分布以及颗粒物去除效率的影响, 探索涡旋排风罩最佳工作条件; 然后在理想气流参数情况下, 分析两种排风罩对不同喷溅速度的颗粒物的控制效果, 探明涡旋排风罩的应用优势. 结果表明, 涡旋排风罩在送排风速度比为 1、水平和垂直送风角度为 0° 时达到最佳工作条件, 颗粒物去除效率可达 65.9%, 优于顶吸式排风罩 47% 的去除效率. 本研究证实了涡旋排风罩在口腔诊疗中的应用潜力, 为口腔诊疗过程局部源头控制提供了新方法, 对诊疗微环境防控措施的构建具有参考价值.

关键词:口腔诊室; 喷溅颗粒物; 空气涡旋; 排风罩; 数值模拟

中图分类号:TH787.1

文献标志码:A

Study on the Vortex-type Collection Method of Spatter Particles in Dental Practice

AI Zhengtao^{1,2†}, LIU Fang^{1,2}, XING Chaojie^{1,2}

[1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. National Center for International Research Collaboration in Building Safety and Environment (Hunan University), Changsha 410082, China]

Abstract: Dental practice procedures are accompanied by the production of large amounts of spattered particles, and prolonged exposure of healthcare workers to high concentrations of particles may lead to occupational health problems. To effectively remove spatter particles and reduce the exposure risk of medical staff, this study proposed a novel vortex exhaust hood with long-distance and high-action benefits. Numerical simulation was used to analyze the vortex exhaust hood's flow and particle removal characteristics, comparing it to the traditional top-suction exhaust hood. The optimal working conditions of the vortex exhaust hood were explored by analyzing the effects of the velocity ratio of air supply and exhaust, horizontal and vertical air supply angles on the axis velocity, pressure distribution, and particle removal efficiency of the vortex exhaust hood. Under the condition of ideal airflow

* 收稿日期:2024-05-26

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(812202301191), Natural Science Foundation of Hunan Province (812202301191)

作者简介:艾正涛(1986—),男,湖南长沙人,湖南大学教授

† 通信联系人, E-mail: zhengtaoai@hnu.edu.cn

parameters, the control effect of two kinds of exhaust hoods on particles with different splashing speeds was analyzed, and the application advantages of the vortex exhaust hood were explored. The results showed that the vortex hood achieved the best working conditions when the air supply and exhaust velocity ratio was 1 and the angle of horizontal and vertical air supply was 0° , respectively. The removal efficiency of particulate matter can reach 65.9%, which was better than that of 47% of the top-suction hood. This study confirms the application potential of the vortex exhaust hood in dental practice, provides a new method for local source control in dental procedures and has a reference value for the construction of prevention and control measures for the treatment micro-environment.

Key words: dental office; spatter particle; air vortex; exhaust hood; numerical simulation

口腔诊疗操作过程中,使用超声波刮治机、三用喷枪和空气/水喷射器等器械会产生飞溅颗粒物^[1],其中包含多种细菌和真菌^[2],可能会污染医护人员的口腔、呼吸道和眼睛黏膜^[3],最终导致医护人员的职业暴露,如流感、肺结核和军团病等^[4].因此,为减少医患交叉感染以及医护人员的职业暴露,有必要采取有效措施控制飞溅颗粒物的扩散.

室内通风是口腔诊室内常见的控制措施,但在疫情防控期间表现出通风量不足、对近距离短期暴露的控制效率低下、能耗高等缺陷^[5].空气净化设备也能够有效限制诊室内气溶胶的扩散^[6],但其效率受放置位置影响^[7],而口腔诊室空间狭小,空气净化设备不能达到理想的控制效果.此外,上述室内通风和净化方法均依赖于全空间稀释,去污时间长.强吸设备作为源头控制措施,已被证明能够显著减少患者和医护人员呼吸区的气溶胶数量^[8],但其控制效果易受医护人员操作熟练程度影响,因此有必要采用额外的感染控制措施,以减少医护人员之间的交叉感染.

近年来,在工业和厨房场景中,研究人员提出基于柱状涡旋原理的污染物控制方法,以从源头捕获污染物,避免污染物逃逸到环境中.刘荣华等^[9]提出一种增设环形射流送风口的新型涡旋排风罩并采用数值模拟方法分析其流场和污染物分布.潘毅等^[10]通过实验证明了此种涡旋排风罩能在远距离实现以较小排风量排出有害物的效果.Cao等^[11]提出一种局部排气系统,研究了不同半径比及升力比对污染物流场分布的影响.Yan等^[12]证明增大升力角会减小龙卷风规模,对污染物控制有积极效果,并推荐最佳升力角在 $10^\circ \sim 20^\circ$ 之间.Cao等^[13]设计了一种基于柱状

涡旋原理的空气分配系统,并确定该系统比底部供应系统具有更快的污染物去除速度和更高的去除效率.在此基础上,Cao等^[14]评估了此形式空气分配系统对具有集中污染源的大空间建筑的污染物去除性能,并采用数值方法分析研究了其在大纵横比工业建筑中的应用效果^[15],结果表明^[14-15],新型空气分配系统存在明显的负压梯度和较大的轴向速度,具有更好的污染物去除效果.柱状涡旋由于其高速气流屏蔽作用,在风冷数据中心也有应用^[16].综上所述,基于柱状涡旋原理的排风方式具有控制距离远、控制速度大等优点,在污染物去除方面具有巨大潜力,但在口腔诊室中未见应用.

现有涡旋排风控污方式通过增设四根送风立柱提供涡旋排风所需的切向力,与房间排风口构成涡旋排风系统,占用空间大,且主要针对位于柱状涡旋内部的污染源,而口腔诊疗过程中,医护人员与患者近距离、面对面接触,加上牙科椅、口腔灯等物品的限制,可使用空间狭小,且诊疗操作及物品的放置会影响涡旋的形成,因此现有涡旋排风控污方式不适用于口腔诊所.

本研究提出了一种基于柱状涡旋原理的新型涡旋排风罩,通过在排风罩的侧壁设置四个送风口提供切向力,可以随医护人员诊疗需要移动,且具有微型、可以控制罩外污染物的优势;研究采用数值方法分析涡旋排风罩的气流流动特性,并与传统顶吸式排风罩进行对比,分析了不同送排风速度比和送风角度对中轴线速度、压力分布和去除效率的影响,得到涡旋排风罩最佳工作条件,同时,考虑到口腔诊疗过程颗粒物飞溅速度的不确定性,研究了涡旋排风罩对不同颗粒物飞溅速度的去除效率.本研究以期对未来涡旋排风罩在口腔诊室中的应用提供重要参考价值.

1 数值模拟

1.1 几何模型

为了探寻口腔诊室内涡旋排风罩的特性,利用基于有限体积法的商业软件 ANSYS FLUENT 进行数值模拟.如图 1 所示,由于研究主要目的是探索涡旋排风罩的最优性能参数,诊室内通风系统的气流组织形式仅作为研究的背景,湖南省长沙市口腔医院作为长沙地区重点大型口腔医院之一,其通风系统布局尽管可能存在不合理之处,但具有实际代表性,因此本研究基于该医院诊室气流组织形式进行建模,构建尺寸为 4.5 m(长)×3.4 m(宽)×3.6 m(高)的单一口腔诊室环境.诊室内通风方式为顶部送风、顶部排风,风口尺寸均为 0.3 m×0.3 m.使用计算热模型(CTM)代表患者和牙科医生,其中红色 CTM 指躺在牙科椅上的患者,蓝色 CTM 代表坐在患者旁边的医护人员.在患者头部斜前方放置涡旋排风罩.涡旋排风罩在侧壁上设置四个送风口,其排风原理为涡旋排风,可有效减小轴向速度衰减.传统式顶吸式排风罩依靠负压排风,且结构上只有负压排风口,具有轴向速度衰减快的缺点.考虑到口腔诊疗空间狭小,排风罩尺寸不宜过大,罩口尺寸设计为 0.2 m×0.2 m,风罩高度为 0.15 m,排风罩送、排风口尺寸均为 0.06 m×0.06 m.研究^[17]表明,柱状涡旋的生成需要上升气流和下部角动量气流共同作用,上升气流由涡旋排风罩的排风口提供,下部角动量气流由位于排风罩侧壁的四个送风口提供.潘毅等^[10]通过实验证明,在普通吸口边缘设置环形射流口并采取加旋措施可以实现小型装置产生涡旋气流排风.虽然本研究通过位于排风罩侧壁的四个垂直送风口送风提供柱状涡旋气流所需的切向力,但两项研究的涡旋形成原理均是柱状涡旋原理,故本研究的装置实际上应能实现小型化涡旋气流排风.

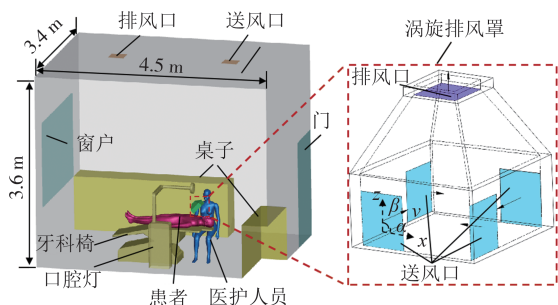


图1 计算域示意图

Fig.1 Schematics of the computational domain

1.2 气流相模型

假设气流流动为非定常流动且不可压缩,对于涡旋排风罩,柱状涡旋的形成使流体呈现出强烈的湍流特性,因此湍流模型选择至关重要.本研究选用 The realizable $k-\varepsilon$ 模型,该模型已在包括旋转均匀剪切流动、包括射流和混合层的自由流动、边界层流动以及分离流动中得到了验证^[18].此外,此模型在轴对称射流以及平面射流的扩散速率方面计算效果良好^[19].模型的输运方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\kappa u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + \\ &G_\kappa + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_\kappa \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \\ &\rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{\kappa + \sqrt{\nu\varepsilon}} + C_1 \frac{\varepsilon}{\kappa} C_3 G_b + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (1)$$

式中: G_κ 为平均速度梯度产生的湍流动能; G_b 为浮力作用产生的湍流动能; Y_M 表示可压缩湍流中波动膨胀对总耗散率的贡献; S_κ 和 S_ε 为用户自定义的源项; C_1 、 C_2 、 C_3 为经验常数; σ_κ 和 σ_ε 分别为 κ 和 ε 的湍流普朗特数.本研究选择基于压力的求解器求解控制方程,并采用 SIPMLe 算法求解速度场和压力场的耦合问题.采用 PRESTO! 格式对压力方程离散化,其他方程采用二阶迎风格式离散化.收敛性标准为控制方程的残差低于 10^{-3} 且迭代过程中所有被监测变量随时间变化波动趋于稳定.

1.3 离散相模型

根据欧拉-拉格朗日方法,选择离散相模型(DPM)对口腔诊室颗粒物轨迹进行跟踪.本研究采用单向耦合^[20]方法模拟颗粒物在空气中的传播,不考虑颗粒物对气流的影响.根据牛顿第二定律,作用在颗粒物上的外力应等同于惯性力.考虑颗粒的大小和密度,一些附加力可以忽略不计,因此,只考虑重力、热泳力和萨夫曼力^[21].在本研究中,由 The realizable $k-\varepsilon$ 模型求解的时间平均流场决定了粒子的平均轨迹,而瞬时流场决定了粒子在平均轨迹上的湍流扩散^[22],因此,采用离散随机游走模型(DRW)模拟流场中瞬时速度波动对颗粒物运动的影响.

通过液滴颗粒的扩散模拟口腔喷溅颗粒物的扩散.Xing等^[23]通过激光光散射技术和粒子图像测速技术得到口腔诊疗过程中口腔周围液滴的喷溅特性,根据其测量结果,颗粒物范围设置为 10~200 μm ,

根据 Rosin-Rammler 粒径分布^[24],液滴的平均粒径为 54.96 μm,具体颗粒物参数见表 1.

表 1 颗粒物参数	
Tab.1 Particulate matter parameters	
名称	参数
粒径尺寸范围	10~200 μm
平均直径	54.96 μm
扩散参数	1.35
温度	37 ℃
锥体半角	15°
质量流量	30 mL/min,0.000 5 kg/s

实际口腔诊疗过程中,从患者口腔向外喷出的颗粒物会在空气中迅速蒸发.为准确模拟颗粒物大小随时间的变化,本研究考虑蒸发过程,采用物种输运模型对水汽和空气混合物的扩散进行研究.Basu 等^[25]研究表明咳嗽释放的液滴核大小约液滴初始直径的 26%,而口腔诊疗过程中蒸发比例未知.因此,本研究借鉴上述结果,确定液滴模型由 98.2% 的水($\rho=998\text{ kg/m}^3$)和 1.8% 的盐($\rho=2\text{ }170\text{ kg/m}^3$)组成.

1.4 边界条件

房间的送风口设置为速度入口边界条件,温度为 22 ℃.房间出风口设置为自由出流边界条件,排风罩排风口及送风口采用速度边界条件,其湍流强度设置为 5%.所有固体壁面都施加了防滑绝热条件.由于颗粒物无法克服室内表面的附着力,只能沉积在表面而无法反弹或重新悬浮^[26],因此,所有固体表面的 DPM 边界均被设置为“捕捉”.根据以往研究^[27],将人体表面温度设置为 32 ℃,患者鼻腔气流速度设置为用户自定义函数(User-Defined Function,UDF),式(3)展示了一个呼吸周期中呼吸流量的变化.由于呼吸气流相对排风罩内气流比较小,且排风罩放置

位置比较远,呼吸气流对涡旋排风罩气流分布影响有限,因此各研究工况的稳态情况均未考虑呼吸气流,仅在瞬态时加入呼吸气流边界,以符合实际情况.具体边界条件如表 2 所示.

$$\text{呼吸流量} = \begin{cases} 2.96\sin(1.256\ 6t), & 0 < t < 5 \\ 0, & 5 < t < 6 \end{cases} \quad (3)$$

式中: t 为时间,s.

表 2 边界条件		
Tab.2 Boundary condition		
名称	边界条件	DPM 边界
诊室送风口	速度入口,换气次数为 6/h,	反射
	相对湿度为 60%,湍流强度 5%,	
	温度 22 ℃	
诊室排风口	自由出流	逃逸
排风罩送、排风口	速度入口,湍流强度 5%	逃逸
患者鼻腔	速度入口,呼吸速度的 UDF	捕捉
患者/牙医身体	32 ℃	捕捉
所有固体壁面	无滑移,绝热	捕捉

1.5 模拟方案

为了评估涡旋排风罩对颗粒物的去除效率,设置三组工况,考虑参数包括涡旋排风罩送排风速度比、送风口水平送风角度以及送风口垂直送风角度.根据标准《牙科学 中央抽吸源设备》(YY/T 0629—2021)^[28],抽吸系统最小空气流量为 250 NL/min,为了接近此值,将排风口速度设置为 12 m/s,其中涡旋排风罩送排风速度比(以下简称速度比)为四个送风口总送风速度与排风口排风速度的比值.如图 1 所示,水平送风角度为 α ,垂直送风角度为 β ,具体研究工况设置如表 3 所示.

1.6 评价指标

为了表征涡旋排风罩对口腔诊疗过程中产生飞溅

表 3 工况表					
Tab.3 Simulated cases					
方案	送风速度/(m·s ⁻¹)	排风速度/(m·s ⁻¹)	速度比	水平送风角度/(°)	垂直送风角度/(°)
Case 1-1	0	12	0	0	0
Case 1-2	1	12	1/3	0	0
Case 1-3	1.5	12	1/2	0	0
Case 1-4	3	12	1	0	0
Case 1-5	6	12	2	0	0
Case 2-1	3	12	1	10	0
Case 2-2	3	12	1	20	0
Case 2-3	3	12	1	30	0
Case 3-1	3	12	1	0	10
Case 3-2	3	12	1	0	20
Case 3-3	3	12	1	0	30

颗粒物的控制效果,采用累积去除效率进行结果分析:

$$E_c = \frac{N_c}{N_s} \quad (4)$$

式中: N_c 为涡旋排风罩捕获颗粒数量; N_s 为入射颗粒总数量.

2 模型验证

2.1 网格独立性验证

网格划分决定数值模拟的计算速度及计算精确程度,网格太密导致计算速度下降并浪费计算资源,而网格太疏导致计算精度不足,从而导致计算结果不准确.为了确定合适的网格大小,使用三种网格数量(390万、500万和640万)进行网格独立性验证.如图2所示,在涡旋排风罩排风速度为12 m/s、送风口送风速度为3 m/s的情况下,通过对比患者口腔上方1 m长垂直线上压力和速度分布进行网格独立性验证.结果表明,390万网格与500万网格的数值模拟结果差异较大,当网格数量从500万增加到640万时,网格细化略微改变数值结果,其平均相对误差小于5%.因此,综合考虑计算精度和成本,本研究后续所有计算均在500万网格基础上进行.

2.2 强旋流验证

为了评估 The realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型预测涡旋排风罩中强涡旋流动的可靠性,通过模拟的方法与 Yu 等^[29]在柱状涡旋通风系统中实验测量数据进行对比.其形成涡旋的主要结构是在房间排风口周围布置四根送风立柱构成涡旋排风系统,本研究提出的新型涡旋排风罩主要结构是在顶吸式排风罩的侧壁增设送风口构成小型化涡旋排风装置.由于本研究模拟中涡旋形成原理同样采用柱状涡旋,故采用其实验数据进行强旋流模拟验证具有合理性和可靠性.不同气幕出口速度对应的最大涡核半径的实验和数值模拟结果如图3所示,排风量为23.44 m³/h时,随着气幕出口速度的提升,实验结果中最大涡核半径变化趋势与数值模拟结果趋势一致且计算结果比较吻合,平均相对误差小于10%.这种误差可能是由测量仪器侵入干扰流场造成的.综上,本研究采用的湍流模型能够准确预测涡旋排风罩的强涡旋流动.

2.3 蒸发验证

为了验证液滴蒸发模型,在诊室空气温度为25℃、相对湿度为90%时模拟初始直径为10 μm和100 μm的液滴在室内的蒸发情况,并将数值模拟结果与 Li 等人^[30]的测量结果进行比较.模拟过程中,初始

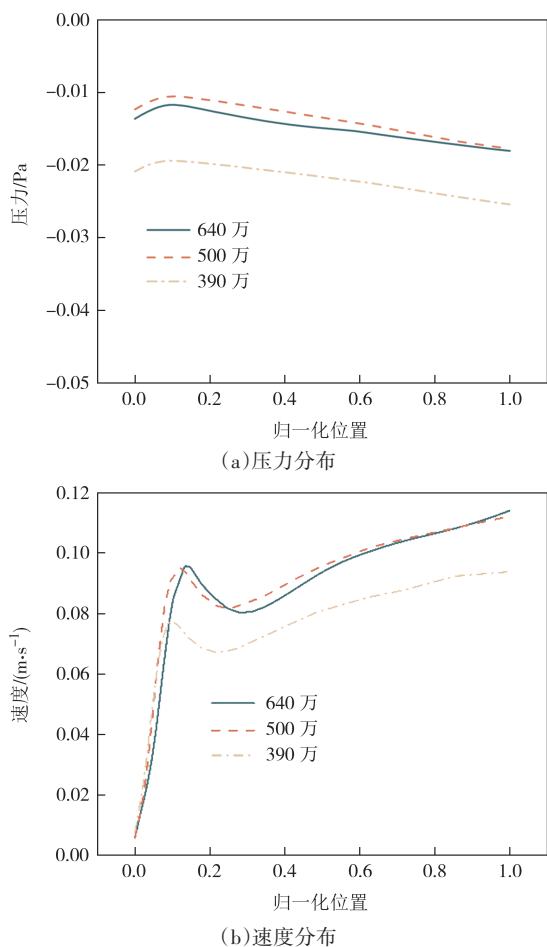


图2 网格独立性验证

Fig.2 Grid independence validation

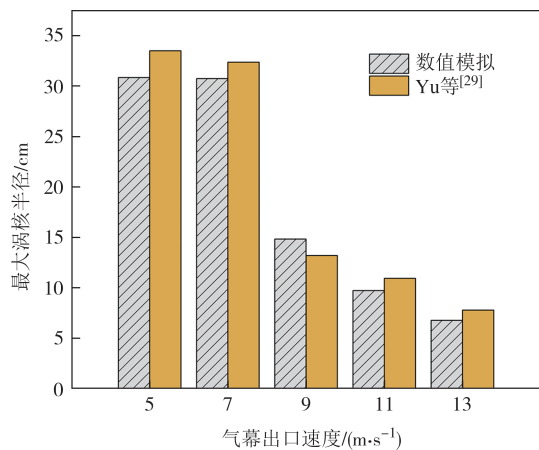


图3 强旋流验证

Fig.3 Strong cyclonic validation

温度为37℃的单个液滴依次释放,其中直径为10 μm和100 μm液滴的质量流量分别为5.24×10⁻¹¹ kg/s和5.24×10⁻⁸ kg/s.液滴直径的时间演变过程如图4所示,数值模拟结果与 Li 等人^[30]的结果一致.因此,蒸发模型得到了验证.此外,还应注意到直径为100 μm的液滴蒸发速度低于10 μm液滴.

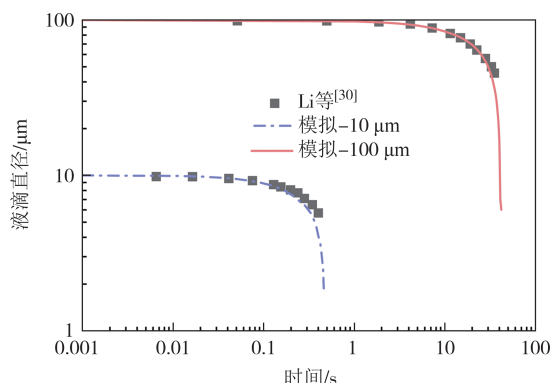


图4 蒸发验证

Fig.4 Evaporation verification

3 结果和讨论

3.1 流场分布

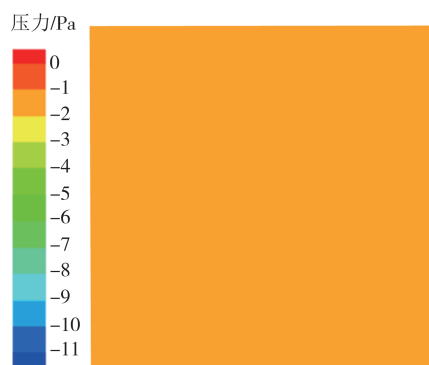
本节任选排风速度 12 m/s、送风速度 3 m/s、水平和垂直送风角度均为 0° 的工况为涡旋排风罩的典型案例进行分析。

图 5 显示了两种形式排风罩送风口中心截面压力及速度分布云图。如图 5(a) 所示,顶吸式排风罩压力梯度小,罩口截面压力分布比较均匀,大小在 $-2 \sim -1$ Pa 之间。从图 5(b) 可以看出,涡旋排风罩中存在明显负压梯度,从中心沿径向逐渐增加。图 5(c) 显示,顶吸式排风罩中气流分布均匀,没有明显旋涡的产生,而涡旋排风罩气流流场[图 5(d)]有明显不同,位于侧壁四个送风口提供切向力,使气流沿逆时针方向汇聚到中轴线附近形成涡旋。

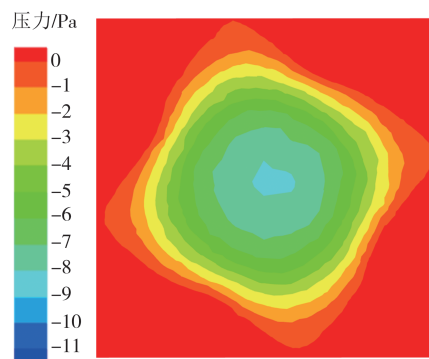
排风罩截面上压力和速度分布如图 6 所示。图 6(a) 表明,顶吸式排风罩压力梯度小,负压分布主要局限在排风罩排风口附近。此外,罩口中心负压值为 -0.8 Pa,颗粒物飞溅位置负压值为 -0.04 Pa。而涡旋排风罩[图 6(b)]负压区域充满绝大部分排风罩,最远负压区达到排风罩外部,有向患者头部方向延伸的趋势。从图 6(c) 可知,受排风作用的影响,顶吸式排风罩速度分布为汇流流动,气流速度衰减快,在罩口处,气流速度衰减为排气速度的 $1/12$,为 1.05 m/s。如图 6(d) 所示,在罩口处,气流速度为排气速度的 $1/4$,为 3 m/s,较大的轴向速度使罩外及罩口气流迅速运动至排气口排出。

3.2 速度比的影响

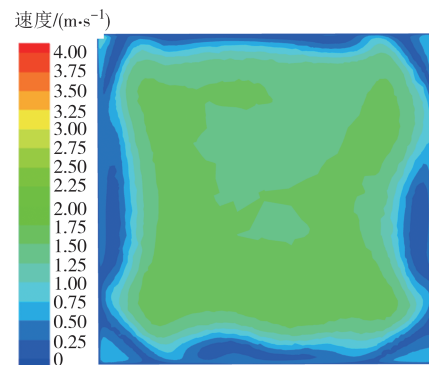
涡旋的形成依靠排风和送风共同作用。排风风量固定时,若送风风量过小,则无法提供涡旋形成所需的切向力,而送风风量过大又会导致能源浪费,因



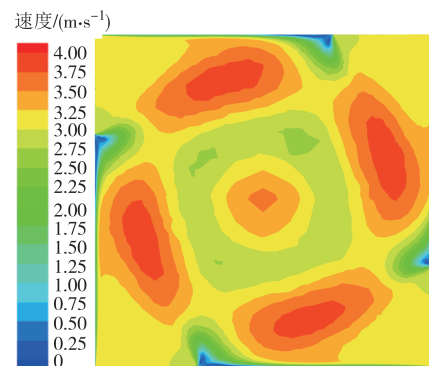
(a) 顶吸式排风罩压力分布云图



(b) 涡旋排风罩压力分布云图



(c) 顶吸式排风罩速度分布云图



(d) 涡旋排风罩速度分布云图

图5 送风口中心截面压力及速度分布云图

Fig.5 Pressure and velocity distribution in the center plane of the air supply outlet

此,合适的速度比对涡旋排风罩最优性能以及能耗至关重要。

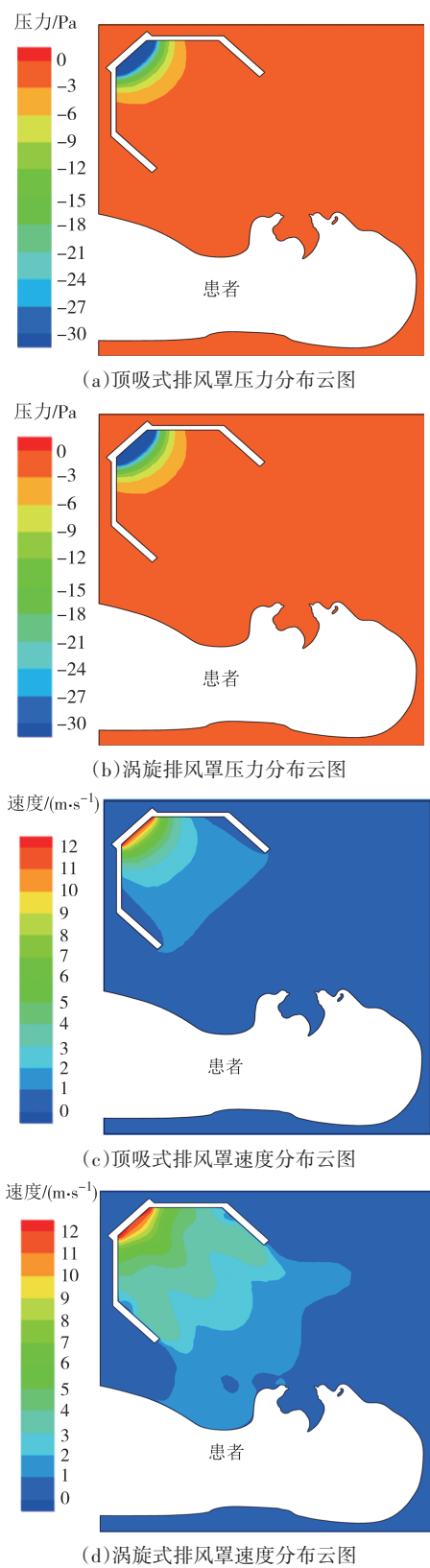


图6 排风罩截面上压力和速度分布

Fig.6 Pressure and velocity distributions on exhaust hood cross-section

顶吸式排风罩和不同速度比下涡旋排风罩沿中轴线的压力和速度分布如图7所示. Case 1-2 和 Case

1-3 与顶吸式排风罩 (Case 1-1) 的气流速度和负压梯度并无明显差异, 这说明速度比较小时, 送风无法提供足够的切向力以在排风罩内部形成类似龙卷风的涡旋. 随着速度比进一步增大 (Case 1-4 和 Case 1-5), 涡旋逐渐形成, 使颗粒物向排风口移动的过程中被负压梯度限制而难以向周边环境逃逸, 从而提高了涡旋排风罩对颗粒物的去除效率.

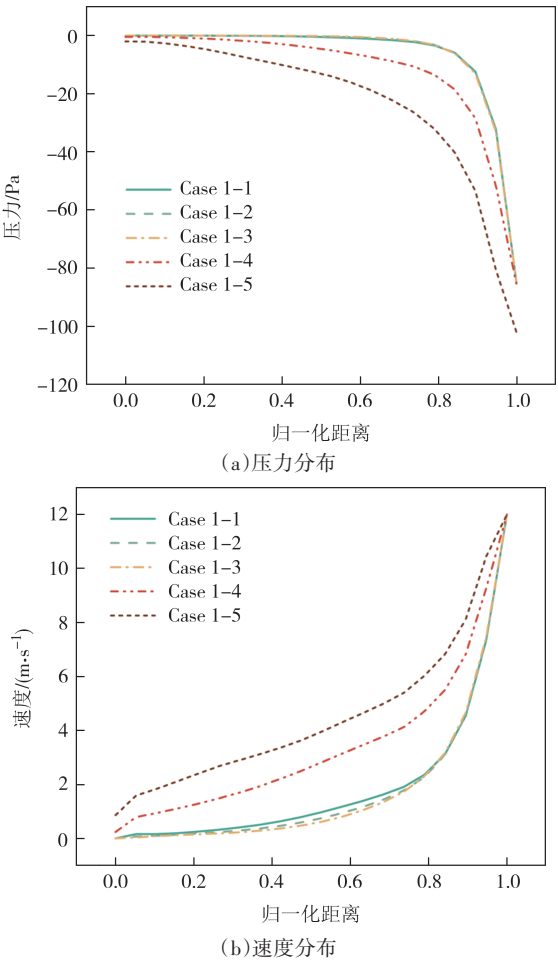


图7 不同速度比下排风罩中轴线压力和速度变化曲线对比
Fig.7 Comparison of pressure and velocity in the central axis of the exhaust hood with different velocity ratios

顶吸式排风罩和不同速度比下涡旋排风罩的颗粒物去除效率比较如图8所示. 随着速度比的增加, 涡旋排风罩的去除效率呈现先降低后增加再降低的趋势. 当速度比从0增加到1时 (Case 1-1 至 Case 1-3), 去除效率由47%降低至31.8%, 原因是当速度比较小时, 涡旋排风罩中轴线速度与顶吸式排风罩无明显差异, 但送风使罩口排污区域减小, 阻碍颗粒物排出, 因此去除效率降低. 随着速度比的进一步增大, 形成稳定柱状涡旋, 此时控制速度变大, 控制距离变长. 当速度比为1时, 去除效率最高, 达到65.9%.

速度比从1增加至2时(Case 1-4至Case 1-5),去除效率降低24.1%,说明送风速度的继续增大会使湍流强度过大,可能会导致排风罩边缘颗粒物大量逸出,因此去除效率降低.综上所述,速度比为1时涡旋排风罩达到最佳工作条件,去除效率为65.9%,高于顶吸式排风罩(47%).

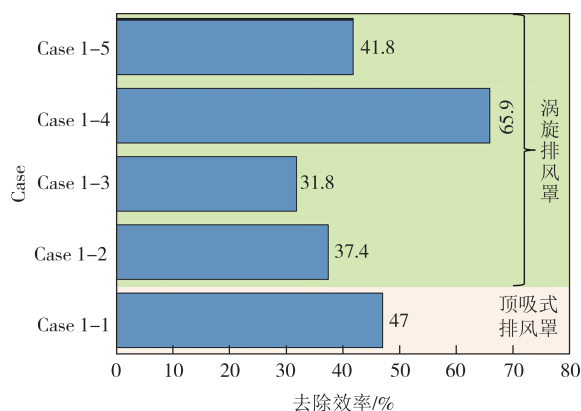


图8 不同速度比下去除效率的比较

Fig.8 Comparison of removal efficiencies of exhaust hoods with different velocity ratios

3.3 送风角度的影响

Cao等^[11]发现,送风气流容易产生干涉甚至是碰撞的情况.为了减少送风之间的干涉和碰撞,本节讨论不同送风角度对涡旋效果和颗粒物去除效率的影响.

3.3.1 水平送风角度的影响

顶吸式排风罩和不同水平送风角度下涡旋排风罩沿中心轴的压力和速度变化曲线如图9所示.送风角度增大导致中心轴的压力值减小、速度降低,逐渐接近顶吸式排风罩对应的数值,说明水平送风角度增大无法在涡旋排风罩内形成稳定涡旋.此外,当水平送风角度过大时,罩口附近中心轴的速度分布出现波动,原因可能是送风气流发生碰撞.

顶吸式排风罩和不同水平送风角度下涡旋排风罩的颗粒物去除效率如图10所示.三种水平送风角度下(Case 2-1~Case 2-3)涡旋排风罩的去除效率均低于送风角度为 0° 时涡旋排风罩(Case 1-4)的去除效率(65.9%),这说明水平送风角度的增加不利于去除效率的提升.顶吸式排风罩(Case 1-1)的颗粒物去除效率为47%,而当水平送风角度大于 0° 时,最高去除效率仅为41.7%,低于顶吸式排风罩去除效率,说明水平送风角度的增加不利于提高涡旋排风罩去除效率.因此,推荐设置水平送风角度为 0° .

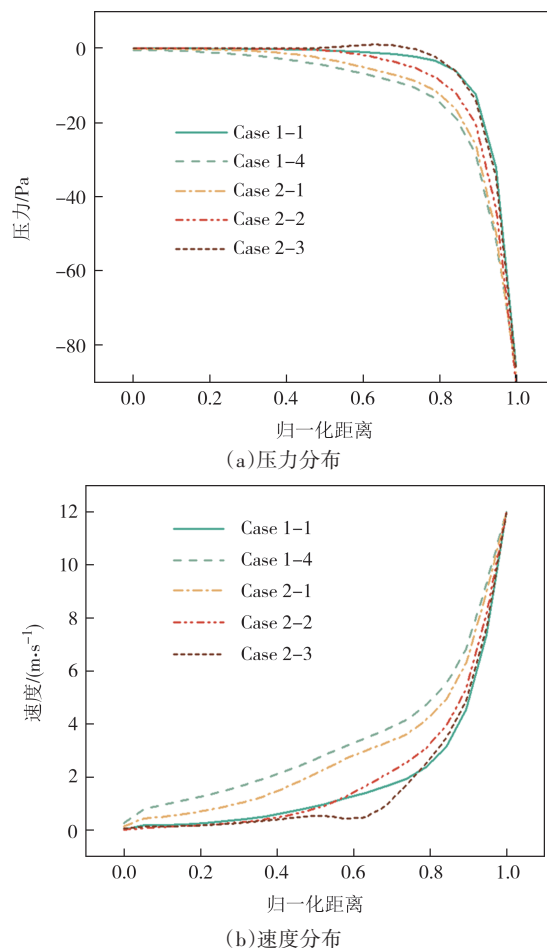


图9 不同水平送风角度下排风罩中轴线压力和速度变化曲线对比

Fig.9 Comparison of axis pressure and velocity in the central axis of the exhaust hood with different horizontal air supply angles

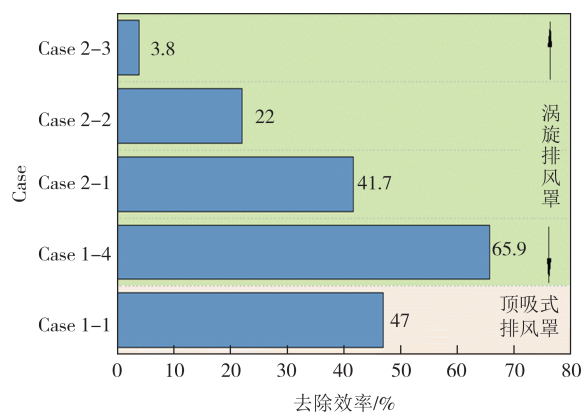


图10 不同水平送风角度下排风罩去除效率的比较

Fig.10 Comparison of removal efficiencies of exhaust hoods with different horizontal air supply angles

3.3.2 垂直送风角度的影响

图11显示了顶吸式排风罩和不同垂直送风角度下涡旋排风罩沿中心轴的压力和速度变化曲线对比.由图1可知,当 $\beta \neq 0^\circ$ 时,一部分送风分量提供上

升力,一部分分量提供涡旋形成所需的切向力,此时送风提供的角动量不足以形成类似龙卷风的涡旋,因此随着垂直送风角度的增大,压力和速度分布均减小,并逐渐趋向于顶吸式排风罩.

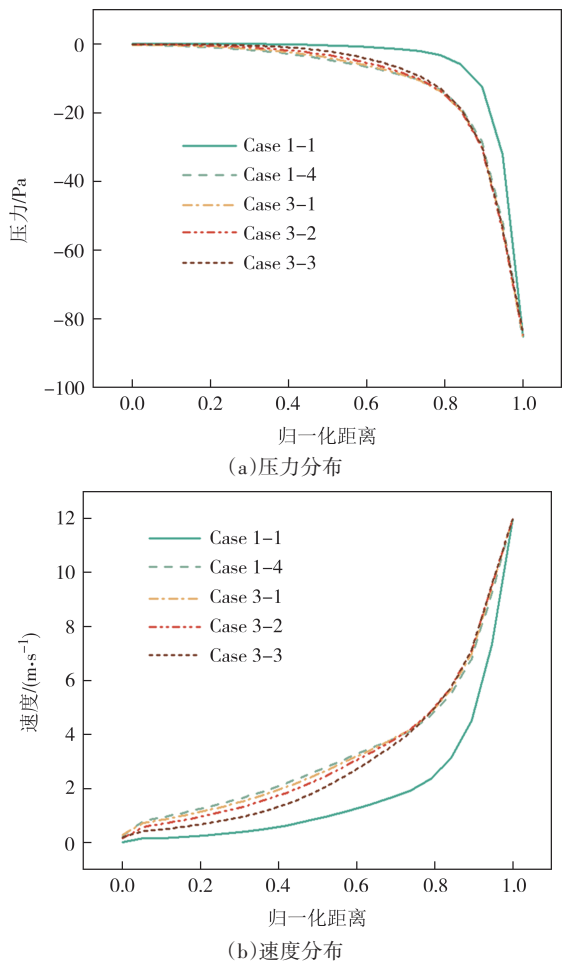


图 11 不同垂直送风角度下排风罩中轴线压力和速度变化曲线对比

Fig.11 Comparison of pressure and velocity in the central axis of the exhaust hood with different vertical air supply angles

图 12 为顶吸式排风罩和不同垂直送风角度下涡旋排风罩的去除效率.随着送风角度从 0° (Case 1-4)增加到 10° (Case 3-1),去除效率从 65.9%降低到 64.8%,原因是送风角度的改变使涡旋形成所需的切向力减小,导致中心轴上速度降低,捕获颗粒物的能力也因此降低.随着送风角度从 10° 增加到 30° (Case 3-1 到 Case 3-3),去除效率略有降低且基本保持在 40% 以上.此外,垂直送风角度的过度增加使涡旋排风罩的去除效率低于顶吸式排风罩 47% 的去除效率.因此,推荐设置垂直送风角度为 0° .

3.4 不同喷溅速度颗粒物的去除效率

根据 Xing 等^[23]研究结果,口腔诊疗过程中颗粒

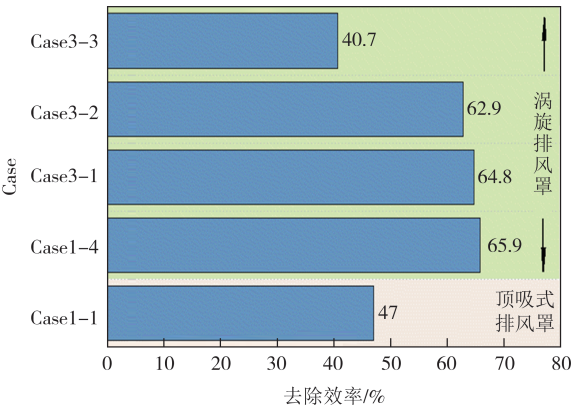


图 12 不同垂直送风角度下排风罩去除效率的比较

Fig.12 Comparison of removal efficiencies of exhaust hoods with different vertical air supply angles

物喷溅速度范围主要是 0.8~3.4 m/s.为了证明涡旋排风罩在实际情况下的通用性和可行性,有必要考虑实际情况下颗粒物喷溅速度对去除效率的影响.因此,本节选择在最佳工作条件下分析涡旋排风罩和顶吸式排风罩对不同喷溅速度颗粒物的去除效率,结果如图 13 所示.

由图 13 可知,随着颗粒物喷溅的速度增大,两种排风罩的去除效率迅速提升.当喷溅速度从 0.8 m/s 增加到 3.15 m/s 时,涡旋排风罩的去除效率始终高于顶吸式排风罩的去除效率,两者最大相差 18.9%,这意味着涡旋排风罩在去除低速喷溅颗粒物方面更有优势.当喷溅速度增加到 3.15 m/s 时,两种形式排风罩的去除效率均趋于稳定(98%).当颗粒物喷溅速度进一步增大时,顶吸式排风罩对颗粒物的去除效率略高于涡旋排风罩但相差不大,差距不超过 1%.综上所述,涡旋排风罩比顶吸式排风罩更具有应用潜力.

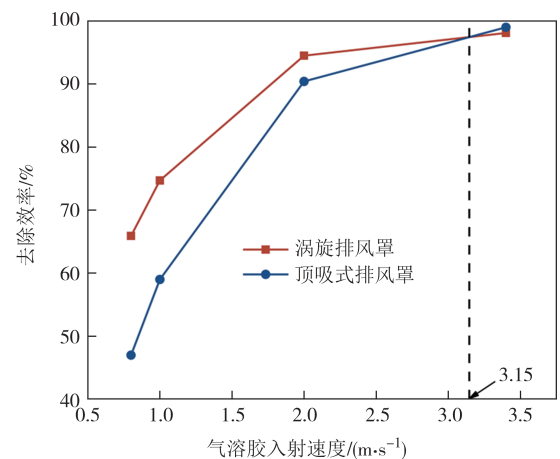


图 13 不同颗粒物喷溅速度下两种排风罩的去除效率

Fig.13 Removal efficiency of two forms of exhaust hoods with different particle splash velocities

4 结论

本研究提出了一种基于柱状涡旋原理的新型涡旋排风罩,并采用数值模拟方法研究涡旋排风罩的流场特性和影响涡旋排风罩颗粒物去除效率的因素,并与顶吸式排风罩进行对比,所得结论如下:

1) 涡旋排风罩与顶吸式排风罩的流场特性存在显著差异. 涡旋排风罩气流向中心旋转上升形成柱状涡旋,与顶吸式排风罩相比,中心轴负压梯度大,排出气流速度高,能更有效控制口腔诊疗过程产生的飞溅颗粒物.

2) 涡旋排风罩的去除效率随速度比的增加先降低后增大再降低. 速度比为1时涡旋排风罩达最佳工作条件,此时去除效率最高,为65.9%,比同风量顶吸式排风罩去除效率高18.9%.

3) 水平送风角度和垂直送风角度的增大不利于涡旋排风罩去除效率的提高. 送风角度增加时,涡旋排风罩的去除效率低于顶吸式排风罩47%的去除效率. 水平和垂直角度均为 0° 时,涡旋排风罩达到最高去除效率,为65.9%. 因此,推荐涡旋排风罩的水平和垂直送风角度为 0° .

4) 颗粒物飞溅速度从0.8 m/s增大到3.15 m/s时,涡旋排风罩的去除效率从65.9%增加到98%,且始终高于顶吸式排风罩的去除效率,结果证明在低速时涡旋排风罩更有优势.

参考文献

- [1] 邢超杰,艾正涛,沈炼,等. 超声波刮治机所引发气溶胶的时空分布特性[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2023,50(1): 219-227.
- XING C J, AI Z T, SHEN L, et al. Spatiotemporal distribution of aerosols generated by using ultrasonic scaling instrument [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(1): 219-227. (in Chinese)
- [2] ZEMOURI C, DE SOET H, CRIELAARD W, et al. A scoping review on bio-aerosols in healthcare and the dental environment [J]. PLoS One, 2017, 12(5): e0178007.
- [3] VAN DER WEIJDEN F. Aerosol in the oral health-care setting: a misty topic [J]. Clinical Oral Investigations, 2023, 27(1): 23-32.
- [4] VOLGENANT C M C, DE SOET J J. Cross-transmission in the dental office: does this make you ill? [J]. Current Oral Health Reports, 2018, 5(4): 221-228.
- [5] 艾正涛,叶金军, MELIKOV A K, 等. 现有防疫通风措施及基于先进气流组织的源头控制技术应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(5): 203-214.
- AI Z T, YE J J, MELIKOV A K, et al. Present anti-pandemic ventilation measures and application of source control technology based on advanced air distribution [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(5): 203-214. (in Chinese)
- [6] HALLIER C, WILLIAMS D W, POTTS A J C, et al. A pilot study of bioaerosol reduction using an air cleaning system during dental procedures[J]. British Dental Journal, 2010, 209(8): E14.
- [7] MAURIS T, KRIESE J, FOURNIER M, et al. Effectiveness of selected air cleaning devices during dental procedures [J]. Military Medicine, 2023, 188(1/2): e80-e85.
- [8] JACKS M E. A laboratory comparison of evacuation devices on aerosol reduction [J]. Journal of Dental Hygiene, 2002, 76(3): 202-206.
- [9] 刘荣华,李夕兵,施式亮,等. 一种新型旋风气幕式排风罩数值模拟研究[J]. 环境工程, 2009, 27(4): 68-72.
- LIU R H, LI X B, SHI S L, et al. Study on numerical simulation of a new type of rotary air curtain exhaust hood [J]. Environmental Engineering, 2009, 27(4): 68-72. (in Chinese)
- [10] 潘毅,王鹏飞,王维建. 一种新型旋风气幕式排风罩实验研究[J]. 制冷与空调, 2011, 25(6): 562-565.
- PAN Y, WANG P F, WANG W J. Experimental study on the new type of rotary air curtain exhaust hood [J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2011, 25(6): 562-565. (in Chinese)
- [11] CAO Z X, WANG Y, DUAN M J, et al. Study of the vortex principle for improving the efficiency of an exhaust ventilation system [J]. Energy and Buildings, 2017, 142: 39-48.
- [12] YAN Y H, LI X D, TU J Y, et al. Characterisation and analysis of indoor tornado for contaminant removal and emergency ventilation [J]. Building and Environment, 2019, 164: 106345.
- [13] CAO Z X, WANG Y, WANG M. Comparison between vortex flow and bottom-supply flow on contaminant removal in a ventilated cavity [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 118: 223-234.
- [14] CAO Z X, WANG Y, ZHAI C, et al. Performance evaluation of different air distribution systems for removal of concentrated emission contaminants by using vortex flow ventilation system [J]. Building and Environment, 2018, 142: 211-220.
- [15] CAO Z X, ZHAI C, WANG Y, et al. Flow characteristics and pollutant removal effectiveness of multi-vortex ventilation in high pollution emission industrial plant with large aspect ratio [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 54: 101990.
- [16] XIONG X, LEE P S. Vortex-enhanced thermal environment for air-cooled data center: an experimental and numerical study [J]. Energy and Buildings, 2021, 250: 111287.

- [17] BEN-AMOTS N. Dynamics and thermodynamics of a tornado: rotation effects[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 178:320–328.
- [18] KIM S E, CHOUDHURY D, PATEL B. Computations of complex turbulent flows using the commercial code fluent [M]// *Modeling Complex Turbulent Flows*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999:259–276.
- [19] LIU Q, NIE W, HUA Y, et al. Research on tunnel ventilation systems: dust diffusion and pollution behaviour by air curtains based on CFD technology and field measurement [J]. *Building and Environment*, 2019, 147:444–460.
- [20] ZHANG Z, CHEN Q. Comparison of the Eulerian and Lagrangian methods for predicting particle transport in enclosed spaces [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(25):5236–5248.
- [21] LIU Z J, ZHANG P W, LI Y B, et al. Assessment of spatial concentration variation and deposition of bioaerosol in a dental clinic during oral cleaning [J]. *Building and Environment*, 2021, 202:108024.
- [22] ZHANG Z, CHEN Q. Experimental measurements and numerical simulations of particle transport and distribution in ventilated rooms [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(18):3396–3408.
- [23] XING C J, AI Z T, LIU Z W, et al. Characteristics of droplets emission immediately around mouth during dental treatments [J]. *Building and Environment*, 2024, 248:111066.
- [24] FERNÁNDEZ A D, GONÇALVES J A S, AZZOPARDI B J, et al. Drop size measurements in venturi scrubbers [J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(16):4901–4911.
- [25] BASU S, KABI P, CHAUDHURI S, et al. Insights on drying and precipitation dynamics of respiratory droplets from the perspective of COVID-19 [J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32(12):123317.
- [26] OWEN M K, ENSOR D S, SPARKS L E. Airborne particle sizes and sources found in indoor air [J]. *Atmospheric Environment Part A: General Topics*, 1992, 26(12):2149–2162.
- [27] AI Z T, MELIKOV A K. Airborne spread of expiratory droplet nuclei between the occupants of indoor environments: a review [J]. *Indoor Air*, 2018, 28(4):500–524.
- [28] 国家药品监督管理局. 牙科学 中央抽吸源设备: YY/T 0629—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State drug administration of the People's Republic of China. Dentistry—central suction source equipment: YY/T 0629—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [29] YU Y B, FANG L X, CUI W T, et al. Characteristics of columnar vortex airflow and dust escape prevention based on artificial tornado [J]. *Powder Technology*, 2024, 436:119502.
- [30] LI X D, SHANG Y D, YAN Y H, et al. Modelling of evaporation of cough droplets in inhomogeneous humidity fields using the multi-component Eulerian–Lagrangian approach [J]. *Building and Environment*, 2018, 128:68–76.