

静态搅浑装置对核设施送风管气溶胶分布规律影响的数值分析

冉鹏 顾卫国 聂保杰
(上海交通大学 核科学与工程学院 上海 201100)

摘要 对气载放射性流出物中的气溶胶监测是核电厂辐射监测的重要内容之一。受通风管道结构的影响,流场尤其湍流对气溶胶在管道中输运分布的均匀性具有较大影响,对辐射监测的取样代表性带来一定困难。通过优化设计实现送风管道中气溶胶的均匀分布对取样代表性具有重要意义。经过改变叶片的扭曲角度及叶片的占比面积,设计了三种结构的静态搅浑装置,并通过数值模拟方法分析了不同搅浑装置产生的空气流场及对气溶胶浓度分布规律的影响。结果表明:静态搅浑装置能形成较强的旋流,从而改善气溶胶浓度分布的均匀性;增大叶片的扭曲角度以及内叶片的占比面积都会加强产生的旋流场,进一步影响气溶胶的扩散;内叶片面积增大的静态搅浑装置有着适中的旋流强度,其搅浑效果较其他两种结构更优,气溶胶浓度的变异系数下降了30.60%。

关键词 送风管, 静态搅浑装置, 气溶胶, 数值模拟, 混合均匀性

中图分类号 TL75

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.090504

Numerical analysis of effect of static stirring device on mixing uniformity of aerosol in the air duct of a nuclear facility

RAN Peng GU Weiguo NIE Baojie

(School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 201100, China)

Abstract [Background] Due to the complex structure of the ventilation ducts in nuclear facilities, the concentration distribution of radionuclides such as aerosols in the ducts is uneven. The inhomogeneity of aerosol distribution brings great challenges to the sampling representativeness of radiation monitoring. In chemical processes, static stirring devices are commonly used to enhance the homogeneity of the product mix. However, this device has not been applied in the nuclear power field. [Purpose] Accordingly, this study aims to improve the mixing uniformity of aerosols in air supply pipelines by using static stirring devices, so as to provide a reference for the representativeness of radiation monitoring sampling. [Methods] The stirring effects of three different stirring devices were investigated through numerical simulations. The RNG $k-\epsilon$ model was used to simulate the gas phase flow field, and the discrete phase model (DPM) was employed in ANSYS CFX software to simulate the behavior of aerosol particles. Selection of the particle size of aerosols followed the recommendations in the sampling representative standards, with the specific size of 10 μm . The other boundary conditions in the simulation were based on the actual operating conditions of a nuclear power plant. As a result, the effects of different stirring devices on the flow field and aerosol concentration distribution were obtained. [Results] The static stirring device can form strong swirls, thereby

第一作者: 冉鹏, 男, 1994年出生, 2017年毕业于上海交通大学, 现为硕士研究生, 研究领域为核素的大气扩散

通信作者: 顾卫国, E-mail: guweiguo@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-04-07, 修回日期: 2023-06-01

First author: RAN Peng, male, born in 1994, graduated from Shanghai Jiaotong University in 2017, master student, focusing on atmospheric diffusion of nuclides

Corresponding author: GU Weiguo, E-mail: guweiguo@sjtu.edu.cn

Received date: 2023-04-07, revised date: 2023-06-01

improving the uniformity of aerosol distribution. Increasing the twist angle of the blades and the proportion area of the inner blades strengthened the generated vortex field, further affecting the diffusion of aerosols. The static stirring device with an increased inner blade area exhibited a moderate swirl intensity, and better stirring effect than those of the other two structures. The coefficient of variation of the aerosol concentration decreased by 30.60%. **[Conclusions]** Installing a static stirring device in an air supply duct is a feasible method to improve the mixing uniformity of aerosols. Owing to the complex structure of ventilation ducts in nuclear facilities, the concentration distribution of radionuclides, such as aerosols, in the ducts is uneven. This inhomogeneous aerosol distribution poses significant challenges to the sampling representativeness of radiation monitoring. In chemical processes, static stirring devices are commonly used to enhance the homogeneity of the product mix. However, these devices have not yet been applied in the field of nuclear power.

Key words Air supply pipe, Static stirring device, Aerosol, Numerical simulation, Mixing uniformity

送风管作为核设施通风系统的主要组成部分,其结构往往比较复杂,大量的弯头及管道形状的变化会迫使管道内部流场发生改变。目前,国内外对气溶胶粒子在弯头处的分布及扩散进行了大量的研究,受离心力及弯管形成的二次流的影响,气溶胶在管道内部的分布变得不均匀^[1-2]。核电厂的放射性气态流出物监测取样的代表性与取样位置处的气溶胶分布均匀性有着直接联系,因此,需要提升取样位置处的气溶胶混合均匀性。针对这一问题,在风管中安装静态搅浑装置是一种可行的方法。

静态搅浑装置不仅可以用于固相和气相的混合,还可以用于其他多相之间的掺混,且对比其他混合方法,静态搅浑装置具有低维护成本、高混合效率及不需额外传动元件等优点。最早被商业化用于化工领域的是美国的Kenics型装置。我国对于搅浑装置的研究起步于20世纪70年代,衍生至今已经有较多的类型,但机械工业部将其归纳为5种标准类型^[3]。国内外学者在静态搅浑器上做了很多工作,部分学者研究了静态搅浑装置对流动阻力的影响^[4-6],还有一部分学者对其传热性能做了分析^[7]。对于静态搅混装置的混合性能,国内有学者通过简化的数学模型分析了旋流混合器对瓦斯的混合性能^[8],另有学者通过数值计算的方法对分析了静态搅浑装置中元件个数、元件间隙以及元件的其他参数对于混合性能的影响^[9-10],也对不同搅浑装置的混合性能进行了对比^[11]。研究表明,采用静态搅浑装置能改善管道内部物质的混合均匀性^[12]。因此,本

文结合旋风式旋流混合器,设计了一种旋流静态搅浑装置,并在原本设计的基础上对装置的叶片宽度、叶片偏转角度进行调整,得到两种不同的结构。可以看到,送风管中气溶胶的分布均匀性在这种装置的作用下得到明显改善,能够大大提高核设施的放射性气态流出物取样监测的准确性。

本文针对核电厂的通风管道模型,采用数值模拟的方法,分析了三种不同结构的静态搅浑装置对流场以及气溶胶粒子分布规律的影响。

1 物理模型与模拟方法

1.1 物理模型

送风管模型如图1所示,管道整体由0.4 m×0.4 m的方形管道、90°弯头、0.5 m×0.5 m的方形管道和直径为0.45 m的圆管组成。在空气入口处设置气溶胶粒子注入口,注入口的半径为10 mm。

静态搅浑装置如图2所示,搅浑装置原型为结构1,叶片分为内外两层,内层叶片逆时针扭曲,外层与之相反。结构2只增大内外叶片的扭曲角度,结构3只增加内层叶片与外层叶片的面积比。搅浑装置的具体参数信息如表1所示,其安装位置在圆管90°弯头下游,如图1所示。

1.2 模拟方法与边界条件设置

本文对送风管道及搅浑装置均采用ANSYS ICEM CFD进行网格划分,网格类型为非结构网格。为进行网格无关性验证,计算了送风管的网格数量

表1 静态搅浑装置结构参数
Table 1 Structural parameters of static stirring device

结构 Structure	叶片扭曲角度 Blade deflection angle / (°)	内层半径 Inner radius / mm	外层半径 Outer radius / mm	内层与外层面积之比 Ratio of inner and outer blades
1	32.00	300	450	0.80
2	41.12	300	450	0.80
3	32.00	340	450	1.33

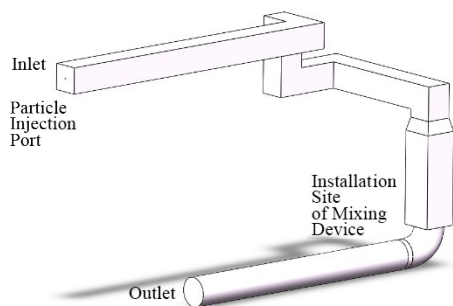


图1 送风管物理模型示意图
Fig.1 Diagram of physical model of air supply pipe

分别为100万、400万和1500万时同一位置处的风速(表2),对比发现,当网格数量为400 W时,具有较高的求解精度和求解效率。因此,送风管道的网格数量选择为400万,最大尺寸为30 mm,并划分三层边界层;搅浑装置最大网格尺寸为8 mm,网格总数量约为15万,如图3所示。

本研究使用 ANSYS CFX 软件进行模拟,气相流场选用对二次流和旋流等复杂流动有着较高求解精度的 RNG $k - \epsilon$ 模型。空气速度入口设置为亚音速速度入口(Normal Speed),参照某核电厂实际运

表2 不同网格数量下的风速对比

Table 2 Comparison of wind speed under different grid numbers

网格数量 Grid numbers / 万个	风速 Wind speed / $m \cdot s^{-1}$
10 000	6.562
40 000	6.525
150 000	6.525

行工况,将风速大小定为 $6.4657 m \cdot s^{-1}$ 。根据取样标准中的推荐,模拟采用的气溶胶粒子是粒径大小为 $10 \mu m$ 、密度为 $1000 kg \cdot m^{-3}$ 的液滴^[13]。在注入口均匀注入 1×10^5 个气溶胶粒子,为防止气溶胶注入时对流场的干扰,将粒子注入的初始速度设为 $0.5 m \cdot s^{-1}$ 。出口设置为静压出口,压力等于大气压。重力方向沿着 $-y$,重力加速度为 $9.8 m \cdot s^{-2}$ 。离散相采用离散粒子模型(Discrete Phase Model, DPM)进行计算,由于固相体积分数低于10%,故选择单向耦合方式。对于小粒径且低体积分数的球形粒子,除考虑粒子受到的重力与浮力外,需要将 Drag Force 设置为 Schiller Nuemann,同时考虑 Non-drag Force 中的 Turbulence Dispersion Force 项。壁面设置为无滑移壁面,同时设置粒子撞击到壁面后被完全吸附。

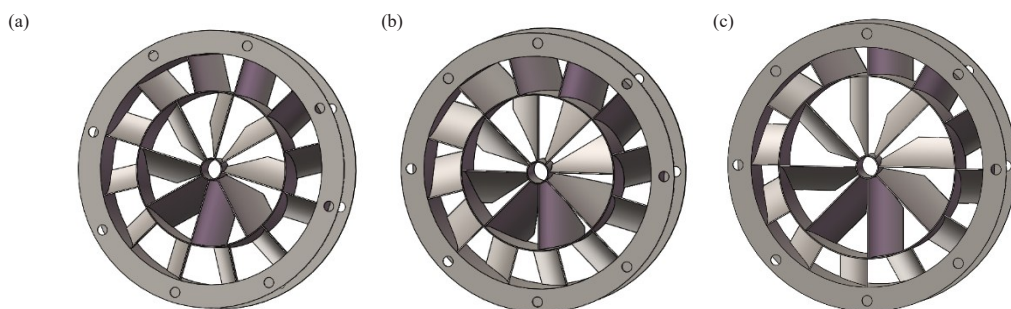


图2 静态搅浑装置模型 (a) 结构1, (b) 结构2, (c) 结构3
Fig.2 Model of static muddy device (a) Structure 1, (b) Structure 2, (c) Structure 3

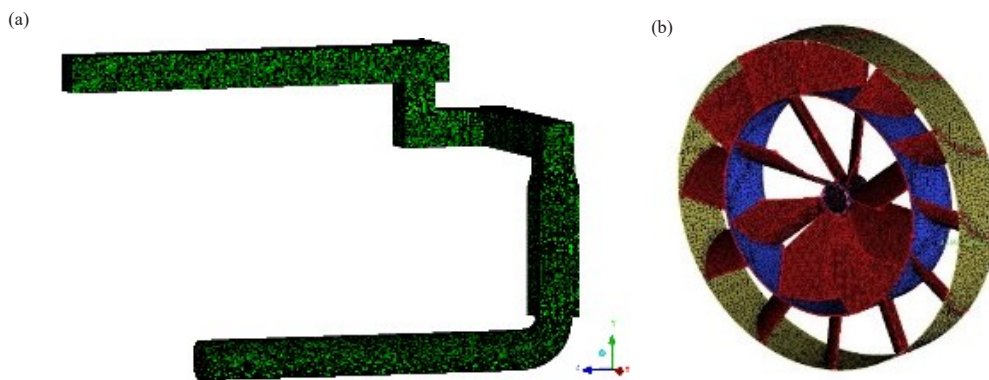


图3 模型网格 (a) 管道网格, (b) 搅浑装置网格
Fig.3 Mesh (a) Pipe, (b) Mixing device

2 计算结果

2.1 圆管段气溶胶分布特性

图4为管道中的流线图。从流线图分析得知,该管道流体受直角弯头的影响,流动形态发生变化。管道初始的4个弯头距离较近,流体的方向改变剧烈从而形成了旋流,旋流沿管道发展较均匀后经直角弯头进入更大的方管,流体区域向外扩展后撞击到管道壁面形成部分回流。此后管径收缩,流体经90°弯头进入圆管区域,最后达到出口。

本研究结合该模型实际取样区域,主要关注圆管段气溶胶粒子的分布特性。圆管段截面速度分布矢量图如图5所示(以下所有图中的距离均指管道截面到搅浑装置出口的垂直距离),从图5中可以看出,受上游弯头影响,流体在进入圆直管段后分布并不对称,呈现出往管道下侧和右侧集中的趋势,随着管道高度的发展,在左上方区域形成一个涡,并逐渐向管道中心区域移动,流场的不均匀性虽有所改善,但右侧流场仍较左侧更为集中。粒子在流场中的运动受诸多因素的影响,本研究管道的初始雷诺数约

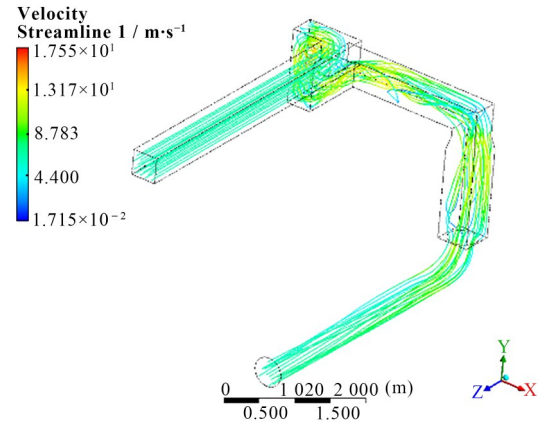


图4 送风管流线图

Fig.4 Flow diagram of air supply pipe

为1.7万,此时粒子主要跟随流场湍流扩散而运动,其他因素影响较弱。图6为对应截面的粒子浓度分布图,由图所示粒子浓度分布与流场特性较为一致。同时,随着管道高度的变化,越来越多的气溶胶粒子与管道壁面形成碰撞而被吸附,导致无粒子浓度的区域逐渐增多,粒子的总体浓度有所下降。

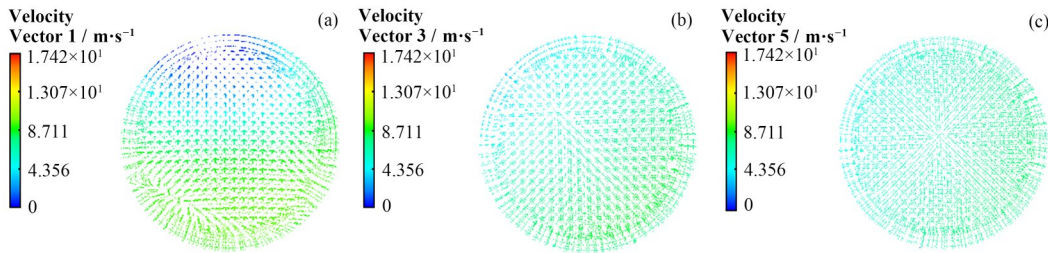


图5 圆管截面切向速度分布矢量图 (a) 距离0.2 m, (b) 距离1.4 m, (c) 距离3.0 m

Fig.5 Tangential velocity distribution vector diagram of circular tube section with vertical distance (from the cross-section of the pipeline to the outlet of stirring device) of (a) 0.2 m, (b) 1.4 m, (c) 3.0 m

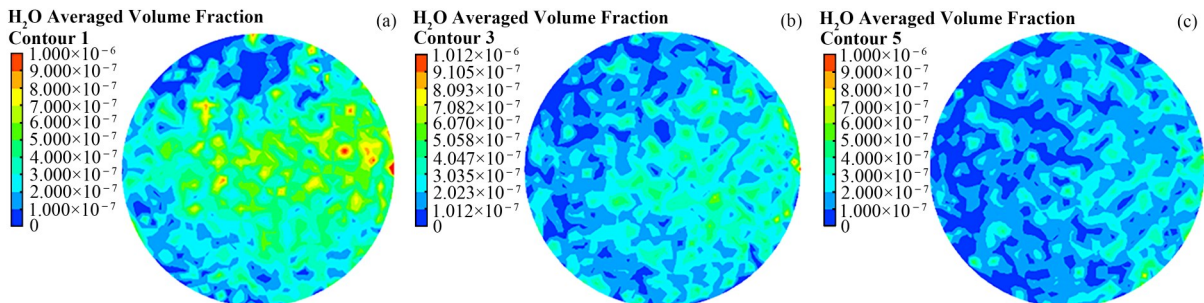


图6 气溶胶浓度分布图 (a) 距离0.2 m, (b) 距离1.4 m, (c) 距离2.6 m

Fig.6 Aerosol concentration distribution with vertical distance (from the cross-section of the pipeline to the outlet of stirring device) of (a) 0.2 m, (b) 1.4 m, (c) 2.6 m

在取样代表性研究的标准^[14],对于粒子浓度分布的均匀性有了量化的标准,即COV,计算方式如下:

$$\text{COV} = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

COV值越小代表粒子浓度分布越均匀。图7为

圆管段气溶胶COV随管道高度变化的趋势图,由图可知,气溶胶浓度COV在一开始随着流场不均匀性的改善有所降低,但在后续截面上由于粒子与壁面撞击导致零浓度区域的增多使得浓度COV随距离的增加而升高。

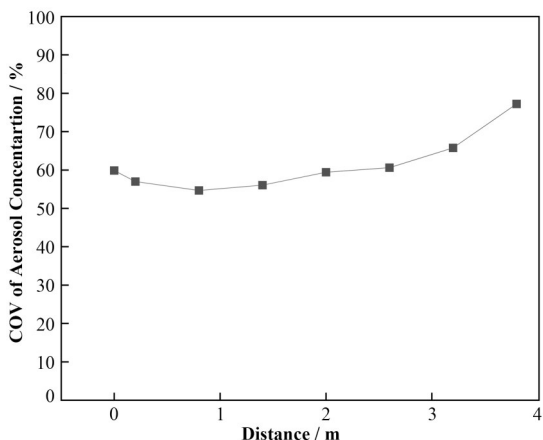


图7 浓度COV-距离变化曲线
Fig.7 COV of concentration vs. distance

2.2 静态搅浑装置对气溶胶分布的影响

图8为安装了结构1的静态搅浑装置后不同高度截面的切向速度矢量图。从图8可以看出,在距离搅浑装置出口较近的截面处产生了强烈的涡流,由于搅浑装置内外叶片的偏转方向不同,内外产生

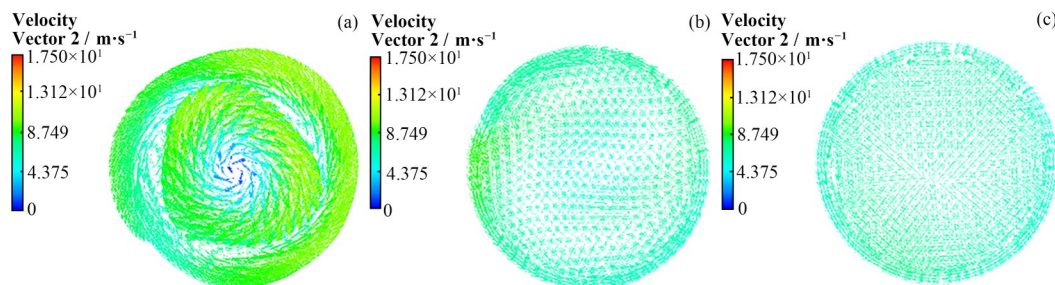


图8 结构1搅浑后不同距离截面速度分布 (a) 距离0.2 m, (b) 距离1.4 m, (c) 距离2.6 m
Fig.8 Velocity distribution of cross-section at different distances after mixing in structure 1 (a) 0.2 m, (b) 1.4 m, (c) 2.6 m

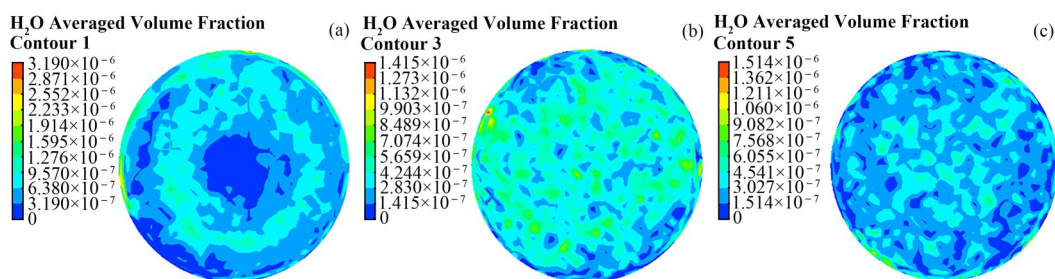


图9 结构1搅浑后不同距离截面气溶胶浓度分布 (a) 距离0.2 m, (b) 距离1.4 m, (c) 距离2.6 m
Fig.9 Aerosol distribution of cross-section at different distances after mixing in structure 1 (a) 0.2 m, (b) 1.4 m, (c) 2.6 m

图11为3种结构在距离0.2 m的截面处旋涡强度。从图中可以看出,增大搅浑装置的叶片扭曲角度以及内叶片所占的面积比均对旋涡强度有增强作用,其中结构2产生的旋涡强度最强,旋涡强度将直接影响气溶胶粒子的掺混效果。

加装搅浑装置前后气溶胶浓度COV如图12所示(以下图中No Str为无搅浑装置, No.1、No.2、No.3分别对应结构1、结构2、结构3)。从图12中可以看

出,搅浑效果最好的装置为结构3,说明旋涡强度在一定程度上会增加会持续改善气溶胶浓度COV,但过大的旋涡强度会降低装置的搅浑效果,因为强旋流场会使粒子与壁面的碰撞加剧,从而导致粒子损失。同时,取样截面设置在搅浑装置下游1~3 m内效果最好,在距离为2 m的截面处其COV值较未安装搅浑装置时分别下降了23.17%、18.16%和30.60%。

旋涡的方向也不同。随着距离的增加,中心区域的旋涡向外扩张后与外侧的旋涡发生碰撞,形成3个强度较弱的涡旋,最终混合均匀,形成左右两侧较为对称的速度分布。中心区域的气溶胶粒子随着向外扩展的旋涡也向着管壁运动,在与外围的气溶胶掺混后又随气流向中心区域扩散,从而改变了气溶胶分布的均匀性,如图9所示。

不同结构的搅浑装置对管道内流场的影响并不一致,为判断其影响,对不同结构产生的速度分布进行对比。图10为结构2和结构3在不同截面处的速度矢量分布图,在距离为0.2 m的截面处,结构2与结构3均在中心区域产生了较结构1(图8)面积更大的涡。结构3在距离为1.4 m的截面中心区域速度更大,并且形成了较为明显的涡,可以较好促进气溶胶粒子在管道中心区域的掺混。而结构1和结构2在此截面处壁面附近区域速度更大,粒子在管道近壁面处的运动更为剧烈,增加了粒子与壁面碰撞的可能性。此后,速度分布随着距离增加变得更为均匀。

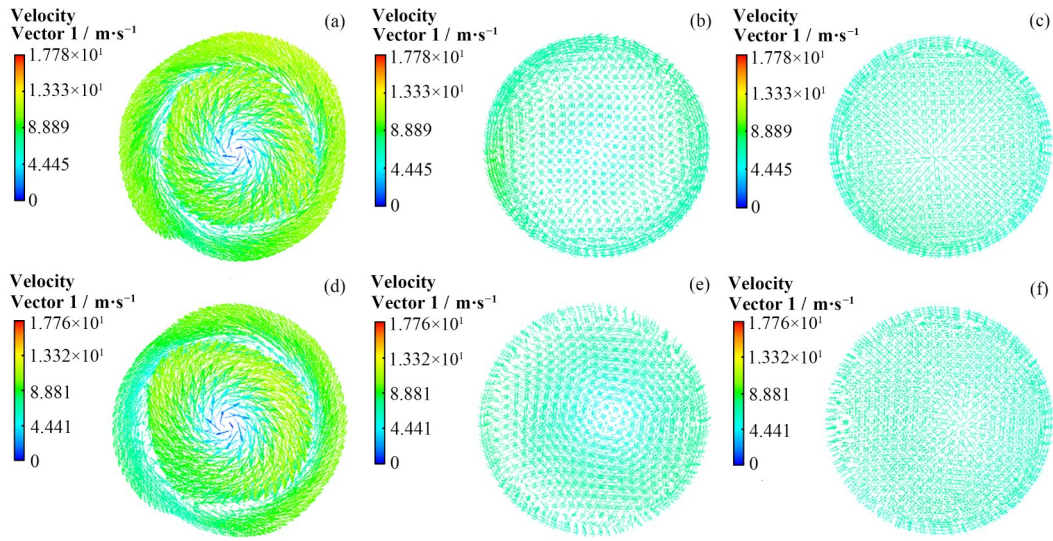


图 10 结构 2(a,b,c)与结构 3(d,e,f)在不同距离截面处的速度分布 (a, d) 距离 0.2 m, (b, e) 距离 1.4 m, (c, f) 距离 2.6 m
 Fig.10 Velocity distributions of structure 2 (a,b,c) and structure 3 (d,e,f) at cross sections with different distance of (a, d) 0.2 m, (b, e) 1.4 m, (c, f) 2.6 m

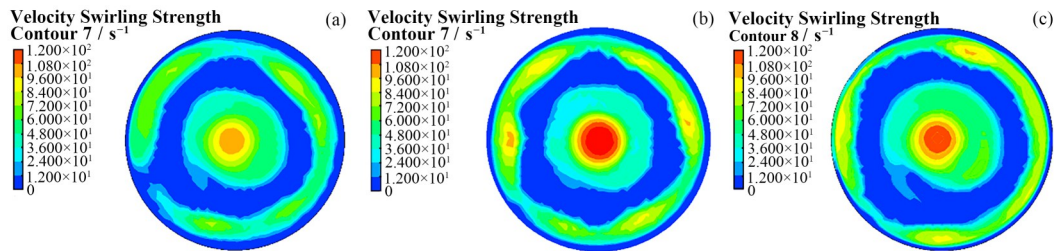


图 11 不同结构在 0.2 m 截面处产生的旋涡强度 (a) 结构 1, (b) 结构 2, (c) 结构 3
 Fig.11 Swirling strength generated by different structures in section at distance of 0.2 m (a) No.1, (b) No.2, (c) No.3

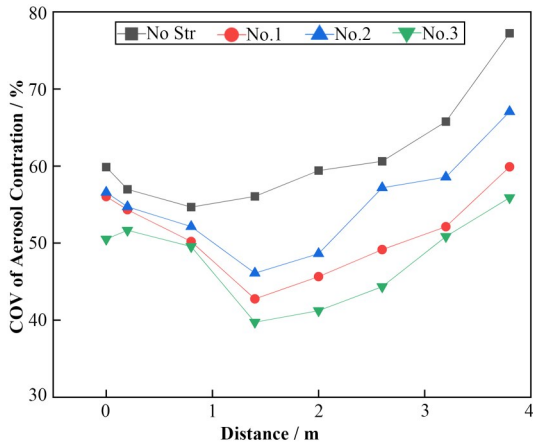


图 12 气溶胶浓度 COV 随距离变化关系
 Fig.12 Variation of COV of aerosol concentration with distance

图 13 与图 14 为速度 COV 随距离的变化关系及平均气旋角的变化关系。在未安装搅浑装置时, 气体速度 COV 较大, 随着距离的增加呈下降趋势, 安装搅浑装置后, 速度 COV 在较短的距离内有着明显的改善, 受出口影响, 速度 COV 在较远距离的截面处有所上升, 几种结构最后趋于一致, 总体仍低于未

装置时。同样的, 在距离为 2 m 的截面处, 速度 COV 分别下降了 53.26%、60.04% 和 64.30%。而在安装搅浑装置后, 搅浑叶片产生的强旋流使得平均气旋角在靠近装置处较未安装时剧烈增大, 但随着距离的增加, 内外气旋发生碰撞, 平均气旋角陡然下降, 最终几种结构的结果几乎相同, 但总体仍高于未安装装置时。

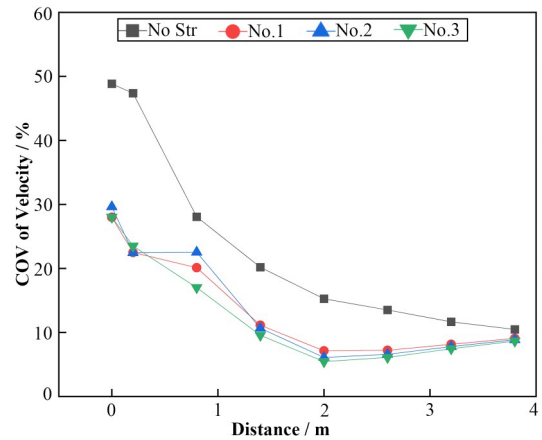


图 13 速度 COV 随距离变化关系
 Fig.13 Change in COV of velocity with distance

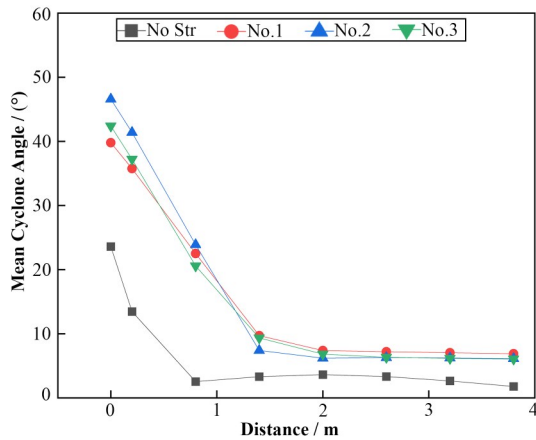


图14 平均气旋角随距离变化关系

Fig.14 Variation of mean cyclone angle with distance

3 结语

本文针对核设施通风系统送风管中的气溶胶行为进行了数值模拟,对不同结构的静态搅浑装置产生的影响进行了研究,得出如下结论:

1)管道结构的复杂性导致内部流场的特殊性,直角弯头以及管径变化等能引起流场激变的行为会影响气溶胶的扩散运动,同时可能会造成管道内气溶胶分布的不均匀性。

2)气溶胶浓度分布的均匀性并不随着管道距离的发展而提升,粒子与管壁的碰撞形成的零浓度区域的增加亦可能导致其分布不均。

3)静态搅浑装置能在出口处产生强烈的涡,不同结构产生的涡强度不同。旋涡强度过大会降低气溶胶粒子分布的均匀性。

4)静态搅浑装置能明显改善气溶胶分布的均匀性,其中增大内叶片所占面积的结构3效果最好,在距离为2 m的截面处气溶胶浓度COV较未安装时下降了30.60%。

本文针对改善核设施通风管道中气溶胶浓度分布均匀性这一问题,设计了静态搅浑装置,并分析总结了搅浑装置对气溶胶浓度分布规律的影响,双层旋流的静态搅浑装置能够有效提高气溶胶浓度分布的均匀性,可以为辐射监测取样提供参考和依据。

作者贡献声明 冉鹏负责搅浑装置设计、数值模拟及文章起草;顾卫国负责总体研究思路,搅浑装置设计改进,文章修订;聂保杰负责数据分析,文章修订。

参考文献

1 Erragroughi F Z, Feddi K, El Maakoul A, *et al.* Prediction of particle deposition efficiency in a 90° turbulent bend pipe flow—a numerical study[C]//

International Conference on Electronic Engineering and Renewable Energy. Singapore: Springer, 2021: 809 - 817. DOI: 10.1007/978-981-15-6259-4_85.

2 王明昊. 方形风管90°弯头内颗粒物运动与沉积特征研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020. DOI: 10.27157/d.cnki.ghzku.2020.003287.

WANG Minghao. Study on particle movement and deposition characteristics in 90° elbow of square air duct [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020. DOI: 10.27157/d.cnki.ghzku.2020.003287.

3 张江伟. 静态混合器的研究进展[J]. 中外能源, 2022, 27(6): 65 - 69.

ZHANG Jiangwei. Research progress of static mixer[J]. Sino-Global Energy, 2022, 27(6): 65 - 69.

4 Kumar V, Shirke V, Nigam K D P. Performance of Kenics static mixer over a wide range of Reynolds number[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 139(2): 284 - 295. DOI: 10.1016/j.cej.2007.07.101.

5 肖世新, 高正明, 黄雄斌. 改进型Ross静态混合器牛顿流体流动的实验与数值模拟[J]. 过程工程学报, 2006, 6(1): 6 - 10. DOI: 10.3321/j.issn: 1009-606X.2006.01.002.

XIAO Shixin, GAO Zhengming, HUANG Xiongb. Experimental study and numerical simulation of Newtonian fluid flow in a modified ross static mixer[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2006, 6(1): 6 - 10. DOI: 10.3321/j.issn: 1009-606X.2006.01.002.

6 张春梅, 吴剑华, 龚斌. SK型静态混合器流体湍流阻力的研究[J]. 化学工程, 2006, 34(10): 27 - 30. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9954.2006.10.008.

ZHANG Chunmei, WU Jianhua, GONG Bin. Flow resistance researches for SK static mixer tube of turbulent flow[J]. Chemical Engineering, 2006, 34(10): 27 - 30. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9954.2006.10.008.

7 龚斌, 吴剑华, 王宗勇, 等. SK型静态混合器流体湍流时传热性能的研究[J]. 高校化学工程学报, 2008, 22(3): 384 - 388. DOI: 10.3321/j.issn: 1003-9015.2008.03.004.

GONG Bin, WU Jianhua, WANG Zongyong, *et al.* Turbulent heat-transfer performance in SK static mixer[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2008, 22(3): 384 - 388. DOI: 10.3321/j.issn: 1003-9015.2008.03.004.

8 毛明明, 刘永启, 高振强, 等. 煤矿瓦斯旋流混合器定工况下混合均匀性研究[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(4): 343 - 348. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2013.04.005.

- MAO Mingming, LIU Yongqi, GAO Zhenqiang, *et al.* Research on the mixing uniformity of coal mine methane swirl mixer under given inlet condition[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, **33**(4): 343 - 348. DOI: [10.15918/j.tbit1001-0645.2013.04.005](https://doi.org/10.15918/j.tbit1001-0645.2013.04.005).
- 9 裴凯凯. SK型静态混合器摩阻系数与混合效果的模拟研究[J]. 化工与医药工程, 2021, **42**(2): 7 - 13. PEI Kaikai. Simulation research of the friction factor and mixing effect of SK static mixer[J]. Chemical and Pharmaceutical Engineering, 2021, **42**(2): 7 - 13.
- 10 姬宜朋. 旋转式Kenics型混合器混合性能及流动特性研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2005. DOI: [10.7666/d.Y737225](https://doi.org/10.7666/d.Y737225). JI Yipeng. Study on mixing performance and flow characteristics of rotary Kenics mixer[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2005. DOI: [10.7666/d.Y737225](https://doi.org/10.7666/d.Y737225).
- 11 张硕, 王建康, 甄一毫, 等. 基于数值模拟的静态混合器混合性能对比[J]. 塑料, 2023, **52**(1): 175 - 179. ZHANG Shuo, WANG Jiankang, ZHEN Yihao, *et al.* Comparison of mixing performance of static mixer based on numerical simulation[J]. Plastics, 2023, **52**(1): 175 - 179.
- 12 苏越, 李敬法, 宇波, 等. 氢气和天然气在静态混合器中的掺混模拟[J]. 天然气工业, 2023, **43**(3): 113 - 122. SU Yue, LI Jingfa, YU Bo, *et al.* Mixing simulation of hydrogen and natural gas in static mixer[J]. Natural Gas Industry, 2023, **43**(3): 113 - 122.
- 13 蒋婧, 何玮, 徐春艳, 等. 核设施烟囱气态流出物取样代表性验证的技术要求研究[J]. 辐射防护, 2016, **36**(6): 350 - 357. JIANG Jing, HE Wei, XU Chunyan, *et al.* Study on qualification methods and technologies of sampling representativeness of airborne effluents from the stacks of nuclear facilities[J]. Radiation Protection, 2016, **36**(6): 350 - 357.
- 14 沈福, 张贞, 侯杰, 等. ISO 2889新、老标准混合均匀处取样代表性的数值分析研究[J]. 辐射防护, 2022, **42**(6): 585 - 592. SHEN Fu, ZHANG Zhen, HOU Jie, *et al.* Numerical analysis and study on the representativeness of sampling at uniformly mixed place of new and old ISO 2889 standards[J]. Radiation Protection, 2022, **42**(6): 585 - 592.