

典型核电厂址大型自然通风冷却塔 对扩散的影响规律初探

张俊芳^{1,2}, 李若洁^{1,2}, 李云鹏^{1,2}, 吕明华^{1,2}, 赵丹^{1,2},
潘妍慧^{1,2}, 吕思博^{1,2}, 姚易辰^{1,2}, 姚仁太^{1,2}

(1. 中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006; 2. 核环境模拟与评价技术重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要: 近海核电厂采用二次循环冷却供水方式, 配逆流式大型海水自然通风冷却塔。由于冷却塔作为高大建筑物以及冷却塔排放的雾羽对烟囱排放污染物扩散会造成影响, 因此, 需要针对工程布局, 开展核电厂址大型自然通风冷却塔对扩散的影响规律研究。本研究联合风洞实验与数值模拟技术, 发现核电厂大型冷却塔卷吸效应对放射性物质迁移途径和分布特征有显著影响。研究结果表明, 无论是否排放雾羽, 大型自然通风冷却塔都存在卷吸效应, 烟囱排放的气载污染物会通过冷却塔底部进风口进入冷却塔, 作为高架源进行二次排放。相比不排放雾羽, 排放雾羽时的卷吸效应更加显著, 通过冷却塔二次排放的污染物浓度显著增加。

关键词: 自然通风冷却塔; 卷吸效应; 气载污染物; 扩散影响

中图分类号: TL7

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2024)10-2058-10

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0408

Preliminary Study on Effect of Large Natural Ventilation Cooling Towers on Diffusion at Typical Nuclear Power Plants

ZHANG Junfang^{1,2}, LI Ruojie^{1,2}, LI Yunpeng^{1,2}, LYU Minghua^{1,2}, ZHAO Dan^{1,2},

PAN Yanhui^{1,2}, LYU Sibo^{1,2}, YAO Yichen^{1,2}, YAO Rentai^{1,2}

(1. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China;

2. Key Laboratory of Nuclear Environment Simulation and Evaluation Technology, Taiyuan 030006, China)

Abstract: The offshore nuclear power plant site adopts a secondary circulation cooling water supply method, equipped with large countercurrent seawater natural ventilation cooling towers. Due to the effect of cooling towers as tall buildings and the mist plume emitted from cooling towers on the diffusion of airborne radioactive substances, it is necessary to conduct research on the effect of large natural ventilation cooling towers on the diffusion of nuclear power plant sites based on the engineering layout. The effects of cooling towers and their plumes on the diffusion of airborne radioactive substances through wind tunnel experiments and numerical simulations were summarized in this study. According to the characteristics of wind distribution on representative nuclear power plant sites, in combination with the distribution of residential areas, the dominant wind direction E, the secondary dominant wind direction N, and the wind direction W from the cooling tower to the nuclear island were

used as the experimental wind directions. The influence of cooling tower air inlet during the experiment was considered. The site is comprehensively affected by buildings and mountains, and the effect of buildings such as cooling towers on the site is dominant. No matter whether the thermal plume is discharged or not, the large natural ventilation cooling tower has entrainment effect, and the airborne pollutants discharged from the stack will enter the cooling tower through the air inlet at the bottom of the cooling tower and act as an elevated source for secondary discharge. The entrainment effect with hot plume discharge is more significant than that without hot plume discharge, and the concentration of pollutants discharged through the cooling tower significantly increases. The wind tunnel experiment results show that when the chimney is discharged at a height of 75 meters, the entrainment fraction of the large natural ventilation cooling tower is 29.8% when it is working, and 1.2% when it is not working. The numerical simulation results show that when the chimney is discharged at a height of 75 meters, the entrainment fraction of the large natural ventilation cooling tower is 25.28% when it is working, and 0.75% when it is not working.

Key words: natural ventilation cooling tower; entrainment effect; airborne pollutant; diffusion

积极安全有序发展核电是我国构建清洁低碳安全高效能源体系的重要措施,目前,我国滨海核动力厂址正快速趋于饱和,开发距海岸 10 km 以上的近海厂址是核能可持续发展的关键。由于近海核电厂多采用二次循环冷却供水方式,需要配逆流式大型自然通风冷却塔。而大型自然通风冷却塔高达 200 m,作为高大建筑物以及冷却塔排放的雾羽会对烟囱排放污染物扩散造成影响,因此,需要针对工程布局,开展核电厂大型自然通风冷却塔对烟囱排放污染物的流动扩散影响规律研究。

随着大型计算机技术的快速发展和各种湍流模式的不断改进,计算流体力学(CFD)软件越来越多地应用于复杂建筑物周围气载污染物的流动扩散等问题。CFD 不仅能准确模拟巨型冷却塔的结构特征,还能模拟其对周围风场以及污染物扩散的影响^[1-5]。Cai 等^[6]利用 CFD 模拟了多个冷却塔对大气流动和湍流结构的影响。Klimanek 等^[7]使用 CFD 研究了冷却塔内部排出雾羽的特性。Lu 等^[8]研究了冷却塔排放的旋转雾羽对污染物扩散的影响,并提出了旋转雾羽的模拟方法。Ashrafi 等^[9]使用 RANS 和 LES 数值方法研究了湍流对冷却塔雾羽上升的影响。王炫等^[10-13]采用数值模拟和风洞实验两种方法研究了核电厂近区大型自然通风冷却塔的大气扩散特性,并模拟了冷却塔塔体、自然通风效应、释放点高度、位置以及冷却塔群布置对污染物扩散的影响。郭栋鹏

等^[14-15]应用商业 CFD 计算软件 STAR-CD 研究了冷却塔雾羽的抬升规律,并基于 Chalk point 电厂的观测数据对计算结果进行了验证。结果表明:随着环境风速与环境温度的增大,冷却塔水汽地面沉积浓度逐渐降低;随着环境湿度的增大,冷却塔水汽地面沉积浓度逐渐增大;随着冷却塔水汽排放温度的升高,水汽地面沉积浓度略有降低。

之前对冷却塔的研究大多将冷却塔作为高大建筑物,未考虑冷却塔底部自然通风效应的影响。本文针对大型自然通风冷却塔是否排放雾羽对污染物扩散的影响,通过 CFD 数值模拟及风洞实验两种手段,并考虑大型自然通风冷却塔的自然通风效应,开展大型自然通风冷却塔对大气流动及污染物扩散的影响研究,以揭示自然通风对污染物卷吸扩散的影响规律。

1 研究方法

1.1 大气边界层风洞实验模拟

本实验中使用的的大气边界层环境风洞洞体全长 71.1 m,风洞结构示意图如图 1 所示。该风洞为直流下吹式风洞,实验段长 28 m、宽 5 m、高 3.5 m,实验段风速为 0.2~20 m/s。在实验段入口处设置尖塔及粗糙元,用于在实验段产生所需要的速度廓线和湍流强度分布。在实验段中设有三维移测机构,移动范围为:轴向(x 向),0~24 m;横向(y 向),0~3.4 m;垂向(z 向),0~3.0 m。三维移测机构定位精度为: x 向,±3 mm; y 向,±3 mm; z 向,

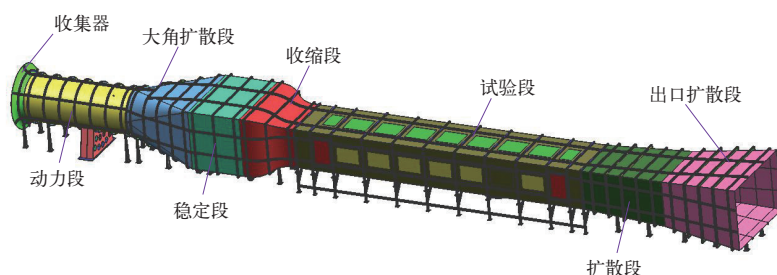


图1 风洞结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wind tunnel structure

± 1 mm。将探测传感器安装在移测机构的支杆上,可以探测到实验段中的任一位置。

要在风洞中再现大气中的流动和扩散,必须保证风洞(模型)和现场(原型)这两个系统的大气流动和扩散是相似的,即模型和原型流动相似满足几何相似、运动学相似、动力学相似以及边界条件相似。1) 几何相似:实验模型按同一缩尺制作,本实验中几何缩比为1:800。2) 运动学相似:实验中维持风洞模拟的风速廓线及湍流强度分布与现场一致。3) 动力学相似:实验中维持试验雷诺数与实际一致,维持模型冷却塔排放热羽的动量通量比和弗劳德数与实际一致。4) 边界条件相似:实验模型表面具有适当的粗糙度,维持边界条件和固壁粗糙条件与实际相似。

1.2 数值模拟

本文以某近海核电厂址为研究对象,数值模拟的水平区域为 $10\text{ km}\times 10\text{ km}$,模型垂直方向自地面至3000 m高度,模拟区域采用非结构化网格划分方法,采用近密远疏的原则处理网格,以建筑物为中心,在建筑物周围对网格进行加密。建筑物周围网格最小分辨率为 $0.78\text{ m}\times 0.78\text{ m}$ 。地面网格最大分辨率为 $6.25\text{ m}\times 6.25\text{ m}$ 。最小网格位于排放口位置,网格分辨率为 $0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}$,模拟区域内网格总数约为1760万。计算的气象观测资料主要来源于厂址地面气象站观测数据。选取的来流风速为该厂址的年平均风速,风速廓线幂指数为0.17(D类大气稳定度)。厂坪主要建筑物示意图如图2所示,其中冷却塔(CT)高度为230 m,烟囱(S)高度为75 m。

2 有效性验证

为了验证CFD数值模拟结果有效性,与风洞实验结果进行了比较。CFD数值模拟与风洞实验

边界输入条件一致,对比烟囱轴线归一化速度廓线、湍流强度廓线以及地面轴线归一化浓度。

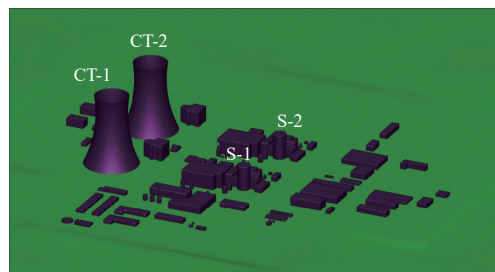


图2 厂坪主要建筑物

Fig. 2 Main buildings of site

2.1 流场的模拟与实验对比

图3为E风向、年均风速模拟算例与风洞实验相同条件下归一化风速($u/U_{\max}$, u 和 $U_{\max}$ 分别代表流场中某一点的局部速度和最大速度)的比较,其中CFD代表数值模拟,WT代表风洞实验。图3中, $z=0\text{ m}$ 为模拟区域的最低点,以所取点位地形或建筑物最低点开始沿垂向逐个提取。 $x=0\text{ m}$ 为烟囱所在位置, $x=-980\text{ m}$ 在烟囱上风向来流方向上, $x=120\text{ m}$ 为烟囱轴线下风向机组建筑上的某点。 $x=216\text{ m}$ 处50 m高度以下CFD模拟的速度衰减与风洞实验结果相比更明显,上风向建筑物带来的扰动更加明显。 $x=632\text{ m}$ 位于冷却塔下风向,250 m以下冷却塔影响较大。通过与风洞实验数据对比可知,数值模拟能够较好地模拟复杂建筑物群对风速廓线的影响,局部略有差异,主要归因于风洞实验中采用热线风速仪测量风速,由于热线风速仪的特性,只能测量正向的速度,而CFD可以模拟出回流区包括尾流范围内的负向速度。

图4为E风向、年均风速模拟算例与风洞实验相同条件下湍流强度的比较。烟囱近处受建筑

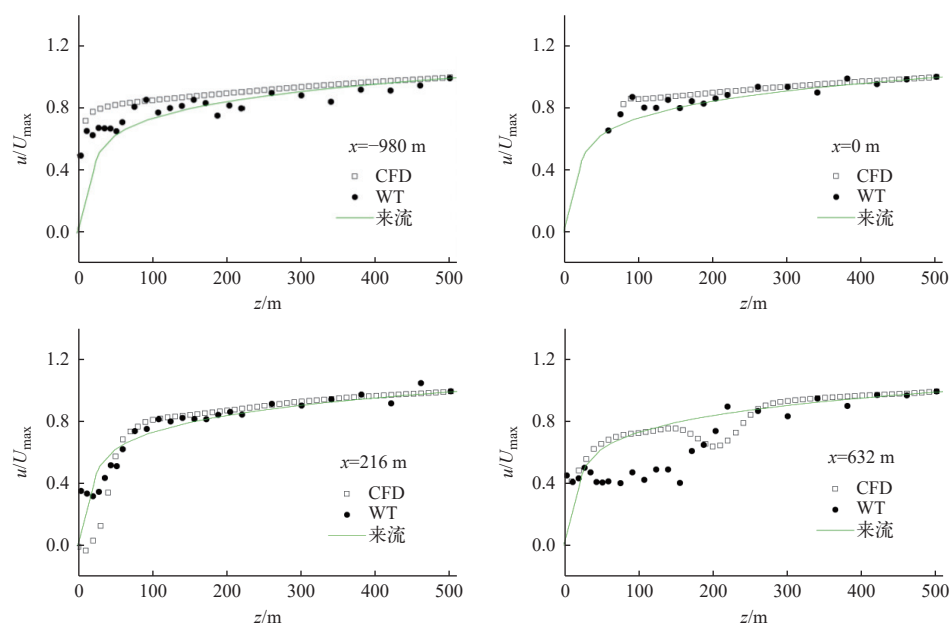


图3 E风向下归一化速度风洞实验与数值模拟结果对比

Fig. 3 Comparison of normalized velocities of wind tunnel experiment and numerical simulation results under E wind direction

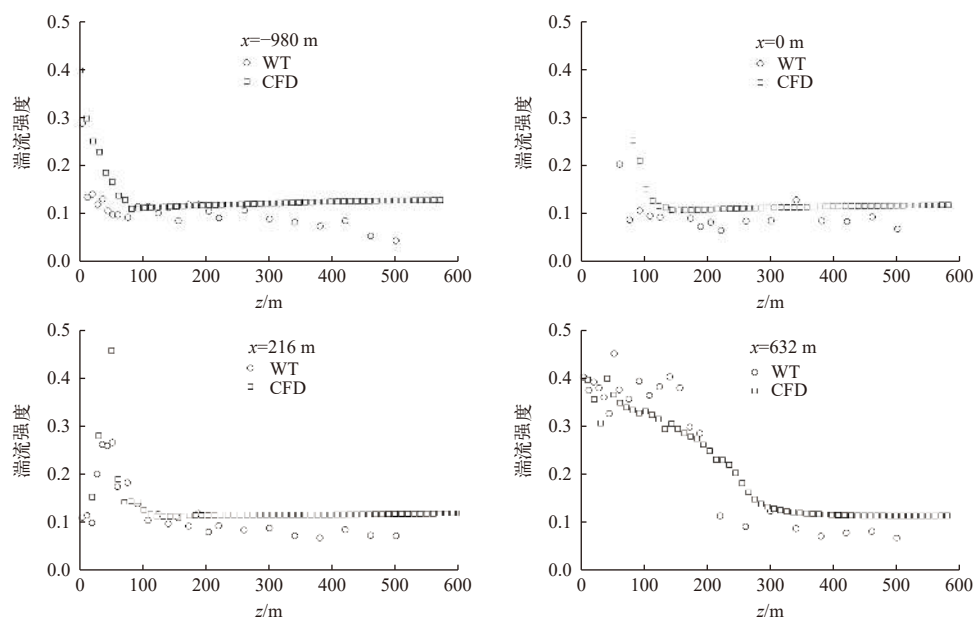


图4 E风向湍流强度风洞实验与数值模拟结果对比

Fig. 4 Comparison of turbulence intensities of wind tunnel experiment and numerical simulation results under E wind direction

物影响 CFD 结果大于风洞实验结果,远距离平坦地形下,由于 CFD 解方程时主要关注气流传输而非气流扩散,未区分 x 、 y 、 z 三个方向湍流强度,不能体现纵向湍流强度,因此 CFD 结果大于风洞实验结果。由图 4 可知, $x=-980$ 、 0 、 216 m 时,同一高度下 CFD 模拟结果约为风洞实验结果的 1~2 倍,CFD 模拟与风洞实验所得湍流强度随高

度变化的分布形态一致。模拟结果与风洞实验结果吻合较好。 $x=632$ m 位于冷却塔下风向,与风洞实验结果相比,CFD 模拟结果低估了冷却塔下风向尾流区湍流强度,冷却塔高度以下 CFD 模拟结果约为风洞实验结果的 0.9 倍。

总体而言,CFD 模拟结果可以较好地模拟复杂建筑物群对流场结构的影响。

2.2 浓度场的模拟与实验对比

对相同实验条件下的 N、E、W 风向年均风速时 CFD 数值模拟与风洞实验 75 m 排放高度冷却塔排放、不排放时烟囱下风向地面轴线扩散因子 (C) 进行比较, 结果示于图 5~7, 其中 C 代表冷却塔不排放, NDCT 代表冷却塔排放。

由图 5 可知, N 风向时 CFD 数值模拟结果与风洞实验结果总体吻合较好, 局部略有差异, 随着

下风向距离的增大, 数值模拟结果与风洞实验结果逐渐接近。在冷却塔不排放状态, 近区 1 000 m 内 CFD 数值模拟结果略低于风洞实验结果, 地面轴线扩散因子随距离增大先增大后减小。1 000~5 000 m 数值模拟结果与风洞实验结果基本一致。冷却塔不排放雾羽时, CFD 下风向轴线地面扩散因子最大值为 $3.1 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$, 风洞实验下风向轴线地面扩散因子最大值为 $4.6 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$, 冷却塔排放

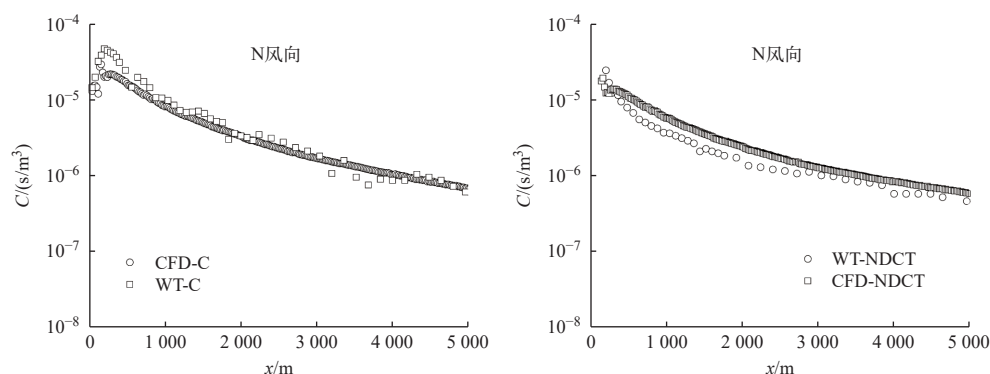


图 5 75 m 排放高度下 N 风向地面轴线扩散因子对比

Fig. 5 Comparison of ground axis diffusion factors under N wind direction at height of 75 m

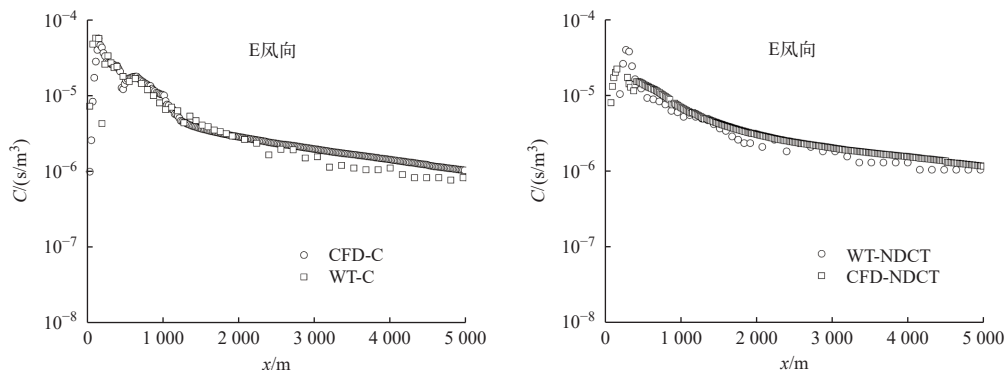


图 6 75 m 排放高度下 E 风向地面轴线扩散因子对比

Fig. 6 Comparison of ground axis diffusion factors under E wind direction at height of 75 m

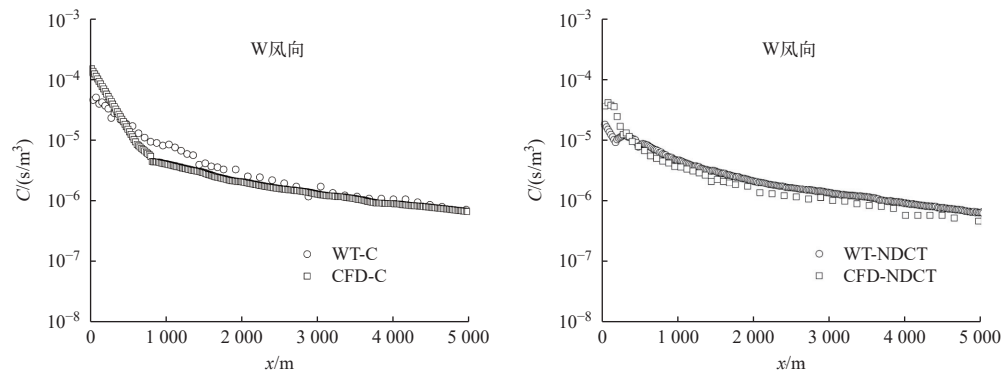


图 7 75 m 排放高度下 W 风向地面轴线扩散因子对比

Fig. 7 Comparison of ground axis diffusion factors under W wind direction at height of 75 m

雾羽时, CFD 下风向轴线地面扩散因子最大值为 $1.9 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$, 风洞实验下风向轴线地面扩散因子最大值为 $2.6 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$ 。

由图6可知, E 风向时 CFD 地面轴线扩散因子模拟结果与风洞实验结果吻合较好。CFD 模拟计算结果地面轴线扩散因子均在 200~300 m 范围(冷却塔位置)降低, 这是由于烟囱污染物在冷却塔前端受到卷吸的影响, 排放雾羽时, 会使得烟囱下风向冷却塔附近浓度升高。而冷却塔后端出现排放雾羽时的地面轴线扩散因子小于不排放雾羽时的扩散因子, 是由于排放雾羽时, 自然通风效应的增强使得进入冷却塔的污染物量增加, 这部分污染物通过冷却塔进行二次排放。烟囱释放时, 冷却塔不排放雾羽时 CFD 模拟给出的地面轴线最大扩散因子为 $5.7 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$, 风洞实验地面轴线最大扩散因子为 $5.7 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$; 当冷却塔排放雾羽时, CFD 模拟给出的地面轴线最大扩散因子为 $2.2 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$, 风洞实验地面轴线最大扩散因子为 $3.9 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$ 。

由图7可知, W 风向时 CFD 地面轴线扩散因子模拟结果与风洞实验结果吻合较好。冷却塔不同工况烟囱污染物地面轴线扩散因子随距离增大变化趋势相同, 均随着距离增大而逐渐减小。冷却塔排放时烟囱下风向 400 m 内 CFD 模拟结果小于风洞实验结果。主要原因是 W 风向时, 冷却塔位于烟囱上风向, CFD 高估了冷却塔排放时尾流区包括回流区的范围, 使得烟羽扩散形态发生了改变。风洞实验与 CFD 数值模拟地面轴线扩散因子在烟囱排放点附近达到最大值。冷却塔不排放雾羽时, 下风向轴线地面扩散因子最大值 CFD

模拟结果为 $1.4 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$, 风洞实验结果为 $5 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$; 冷却塔排放雾羽时, 下风向轴线地面扩散因子最大值 CFD 模拟结果为 $1.8 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$, 风洞实验结果为 $4 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$ 。

3 结果分析与讨论

本文针对大型自然通风冷却塔排放雾羽与否对污染物扩散的影响, 通过 CFD 数值模拟及风洞实验两种手段, 考虑大型自然通风冷却塔自然通风效应, 开展冷却塔雾羽对流场及扩散的影响及大型自然通风冷却塔卷吸效应的影响, 揭示自然通风对污染物卷吸扩散的影响规律。

3.1 冷却塔雾羽对大气流场的影响

根据场坪布局选取 1 号冷却塔为研究对象, 选择 W 特征风向对流场进行分析, 以冷却塔为原点, 下风向为 x 正向, 采用 D 类稳定度、年均风速时冷却塔下风向不同位置处风速随高度的变化, 结果如图8所示。图9为下风向为 x 正向, 采用 D 类稳定度、年均风速时, 冷却塔下风向不同位置处的湍流强度结果。从冷却塔后的不同下风向距离、不同高度处的垂直流场可以看出, 越过复杂地形各测点的速度廓线和湍流强度分布复杂多变。300 m 高度以下的气流受冷却塔的影响很大, 冷却塔雾羽对大气流动也有较大的影响, 在雾羽经过的区域, 速度明显减小, 呈现出速度双亏损区。随距离增大, 下风向风速廓线逐渐恢复到来流。冷却塔雾羽的排放对下风向流场的影响主要为下风向 1 000 m 范围, 影响高度范围为 500 m 以下。由于冷却塔与雾羽的存在, 冷却塔雾羽对湍流强度有较大的影响, 使得局地湍流强度明显增

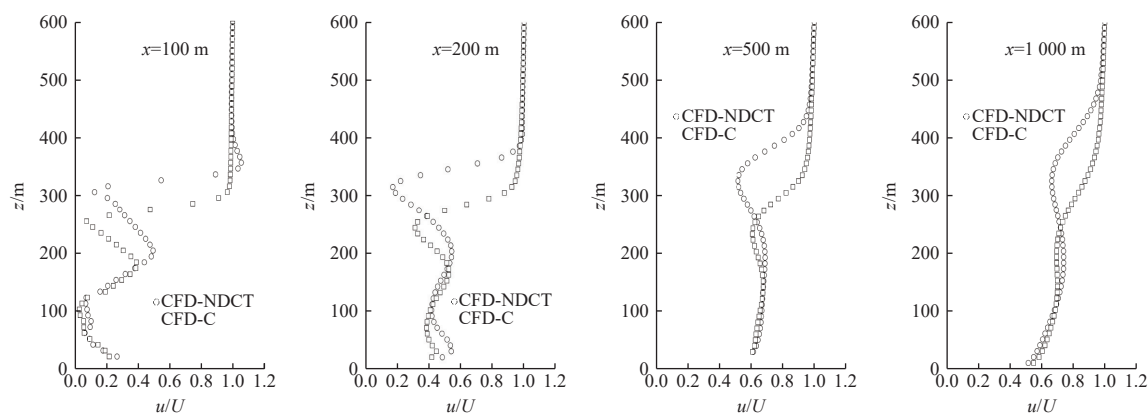


图8 冷却塔下风向不同位置处环境风速随高度的变化

Fig. 8 Velocity varies with height at different positions under wind direction of cooling tower

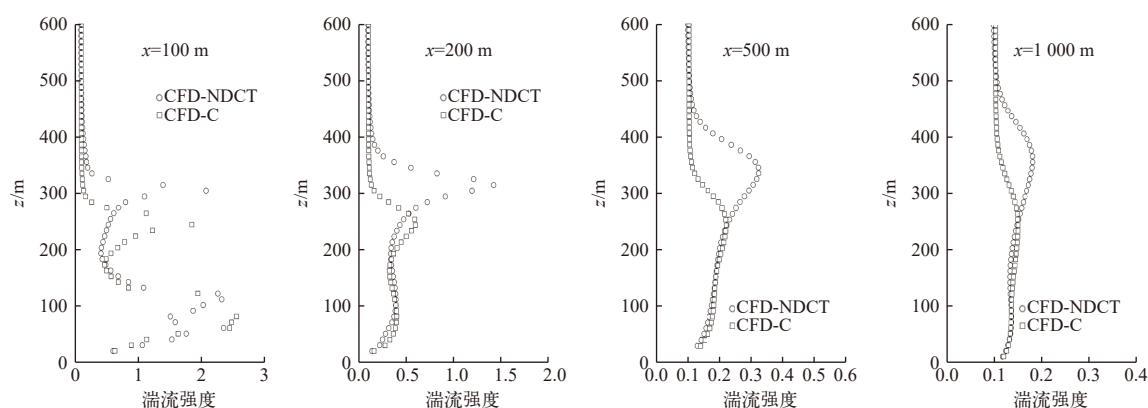


图9 冷却塔下风向不同位置处湍流强度随高度的变化

Fig. 9 Change of turbulence intensity with height at different positions under wind direction of cooling tower

加。不排放雾羽时,冷却塔对湍流的影响主要集中在下风向 500 m 范围内。而当冷却塔排放雾羽时,下风向 1 000 m 处冷却塔雾羽排放对湍流强度仍有显著影响。

3.2 冷却塔雾羽对排放烟羽大气扩散的影响

为了直接观测冷却塔及其局地环流对放射性烟羽扩散的影响,选择 D 类稳定度, N、E、W 风向下烟囱 75 m 排放高度的地面轴线扩散因子进行

比较,结果如图 10 所示。N 风向时,冷却塔位于烟囱上风向侧向;E 风向时,冷却塔位于烟囱下风向;W 风向时,冷却塔位于烟囱上风向。

N 风向时,冷却塔雾羽排放时烟囱下风向轴线扩散因子小于冷却塔雾羽不排放时。冷却塔排放时,地面轴线扩散因子最大值为 $1.9 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$;冷却塔不排放时,地面轴线扩散因子最大值为 $3.1 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$ 。

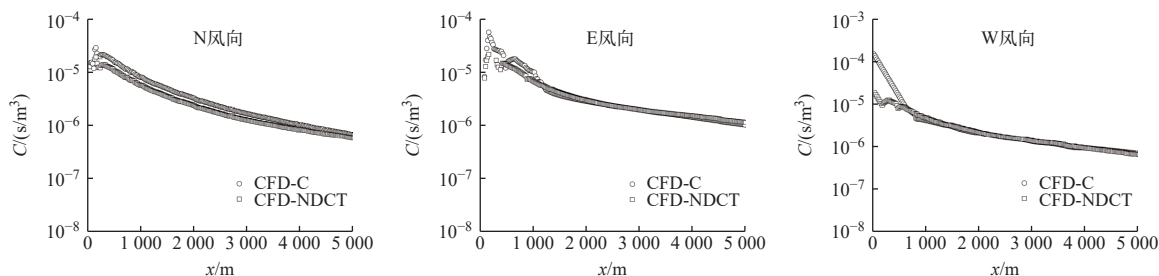


图10 不同风向下的地面轴线扩散因子

Fig. 10 Ground axis diffusion factor under different wind directions

E 风向时,冷却塔雾羽的排放使地面轴线扩散因子在冷却塔附近降低,通过冷却塔后逐渐增大,冷却塔雾羽的排放主要影响烟囱下风向 1 km 范围,地面轴线扩散因子最大值为 $2.2 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$,冷却塔不排放时地面轴线扩散因子在下风向 160 m 左右达到最大值,为 $5.7 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$ 。

W 风向冷却塔雾羽排放时,近距离处冷却塔雾羽排放状态烟囱地面轴线扩散因子小于冷却塔雾羽不排放,500 m 后冷却塔雾羽的排放对烟囱污染物扩散基本没有影响。冷却塔排放时,地面轴线扩散因子最大值为 $1.8 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$,冷却塔不排放时地面轴线扩散因子最大值为 $1.4 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$ 。

图 11 为 E、N、W 风向垂直剖面截面扩散因子。可看出,N、W 风向冷却塔排放对烟囱污染物(CO)扩散的影响较小,E 风向时冷却塔排放时受冷却塔卷吸效应的影响,从垂向剖面图观察到烟囱排放的气载污染物会通过冷却塔底部进风口进入冷却塔,作为高架源进行二次排放。

3.3 大型自然通风冷却塔的卷吸效应

图 12 示出了 E 风向、烟囱 75 m 高度排放、冷却塔排放/不排放雾羽时,冷却塔内部不同高度(z)处烟囱排放污染物的浓度分布,其中 Q 为烟囱出风量(m^3/s)。表 1 列出了冷却塔排放/不排放雾羽时,冷却塔出口处的卷吸份额。风洞实验结果

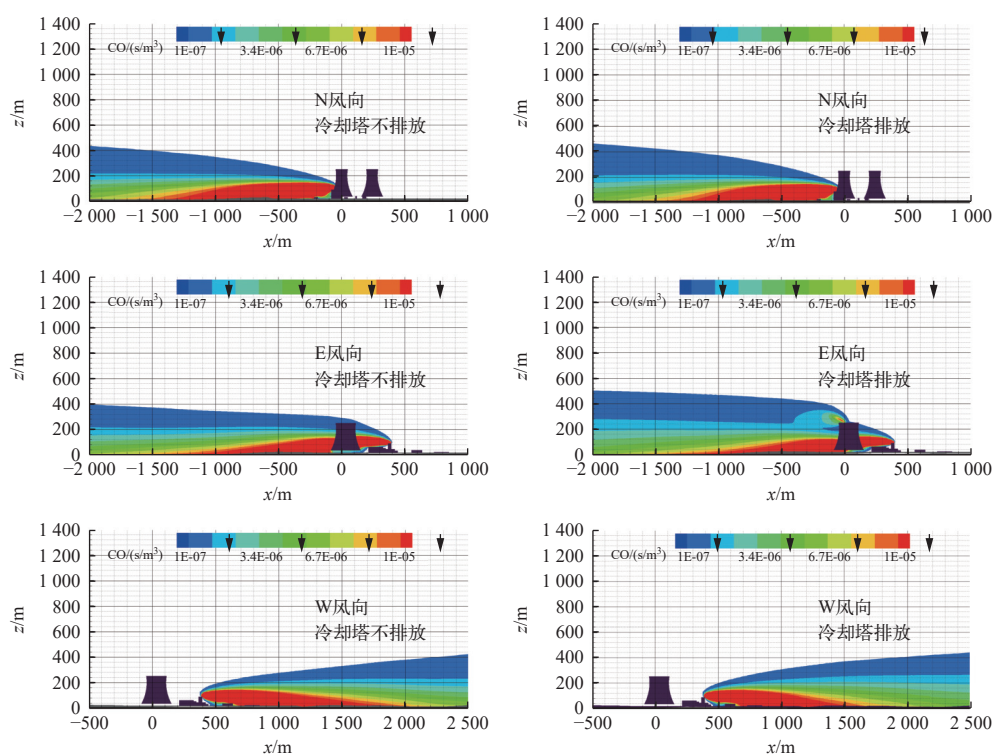


图 11 N、E、W 风向垂直剖面截面扩散因子

Fig. 11 Diffusion factor of vertical profile under N, E and W wind direction

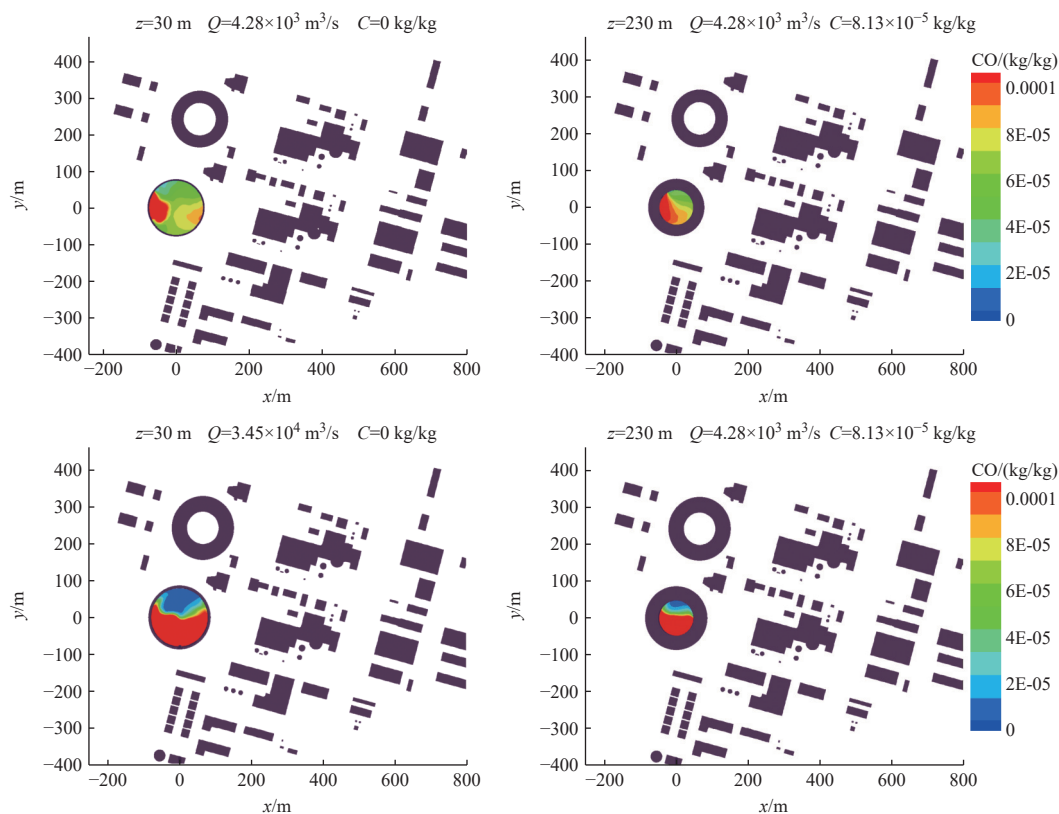


图 12 E 风向、烟囱 75 m 高度排放时冷却塔内部不同高度处烟囱排放污染物的浓度分布

Fig. 12 Concentration distribution at different heights inside cooling tower under E wind direction and chimney discharged at height of 75 m

表明: 烟囱 75 m 高度排放时, 大型自然通风冷却塔排放雾羽时卷吸份额为 29.8%, 不排放雾羽 ($C=0$ kg/kg) 时冷却塔卷吸份额为 1.2%。数值模拟结果表明: 烟囱 75 m 高度排放时, 大型自然通风冷却塔排放雾羽时卷吸份额为 25.28%, 不排放雾羽时冷却塔卷吸份额为 0.75%。在冷却塔不排放雾羽时, 受到冷却塔自然通风的影响, 冷却塔由于自然卷吸, 会夹卷一部分污染物进入冷却塔进行二次排放。在排放雾羽时, 受到雾羽升腾排放的影响, 自然通风的效果增加, 使得冷却塔通过二次排放的污染物增加, 卷吸份额增加。

表 1 E 风向、烟囱 75 m 高度排放时冷却塔卷吸份额
Table 1 Entrainment share of cooling tower under E wind direction and chimney discharged at height of 75 m

状态	模拟方法	出风量 $Q/(m^3/s)$	份额/%
排放雾羽	数值模拟	3.45×10^4	25.28
不排放雾羽	数值模拟	4.28×10^3	0.75
排放雾羽	风洞实验	3.66×10^4	29.80
不排放雾羽	风洞实验	4.80×10^3	1.20

4 结论

本文通过风洞实验与 CFD 数值风洞混合模拟的手段, 探究了大型自然通风冷却塔自然通风效应, 研究了自然通风对污染物卷吸扩散的影响。结果表明: 冷却塔位于烟囱下风向时, 冷却塔排放受冷却塔卷吸效应的影响, 烟囱排放的气载污染物会通过冷却塔底部进风口进入冷却塔, 作为高架源进行二次排放。排放雾羽时的卷吸效应更加显著, 通过冷却塔二次排放的污染物浓度显著增加。烟囱 75 m 高度排放时, 风洞实验结果表明大型自然通风冷却塔排放雾羽时卷吸份额为 29.8%, 不排放雾羽时冷却塔卷吸份额为 1.2%。数值模拟结果表明, 大型自然通风冷却塔排放雾羽时卷吸份额为 25.28%, 不排放雾羽时冷却塔卷吸份额为 0.75%。以上结果可为修订辐射环境影响评价方法、提出辐射防护管理建议提供技术支撑。

参考文献:

[1] WANG X, BAO W, HUANG X, et al. A CFD model based research on wet deposition of cooling tower in nuclear power plant[J]. *Environmental Engineering of Sus-*

tainable Landscapes, 2019, 35: 23-32.

- [2] MERONEY R N. CFD prediction of cooling tower drift [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, 94(6): 463-490.
- [3] CORTI A, CARNEVALE E. Environmental impact from wet plumes in combined-cycle power plants[J]. *Applied Thermal Engineering*, 1998, 18(11): 1049-1057.
- [4] LUCAS M, MARTÍNEZ P J, RUIZ J, et al. On the influence of psychrometric ambient conditions on cooling tower drift deposition[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(4): 594-604.
- [5] SANCHEZ B, SANTIAGO J L, MARTILLI A, et al. Modelling NO_x concentrations through CFD-RANS in an urban hot-spot using high resolution traffic emissions and meteorology from a mesoscale model[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 163: 155-165.
- [6] CAI X H, LIU X, KANG L. Numerical simulation of influence of cooling tower on atmospheric diffusion[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, 49(3): 409-416.
- [7] KLIMANEK A, CEDZICH M, BIAŁECKI R. 3D CFD modeling of natural draft wet-cooling tower with flue gas injection[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 91: 824-833.
- [8] LU Y, KLIMENKO A, RUSSELL H, et al. A conceptual study on air jet-induced swirling plume for performance improvement of natural draft cooling towers[J]. *Applied Energy*, 2018, 217: 496-508.
- [9] ASHRAFI K, ORKOMI A A, MOTLAGH M S. Direct effect of atmospheric turbulence on plume rise in a neutral atmosphere[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2017, 8(4): 640-651.
- [10] 王炫, 杜风雷. SACTI 模型在核电厂大型自然通风冷却塔对局地环境影响预测评价中的应用[J]. *辐射防护*, 2013, 33(4): 199-205.
- WANG Xuan, DU Fenglei. Application of SACTI model in environmental impact prediction and assessment of NPP's large scale natural draft cooling tower[J]. *Radiation Protection*, 2013, 33(4): 199-205(in Chinese).
- [11] 王炫. 核电厂大型自然通风冷却塔对气态污染物扩散影响研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2022.
- [12] 王炫, 杜风雷, 王德忠, 等. 核电厂大型自然通风冷却塔对气载流出物扩散的影响[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(5): 1695-1703.
- WANG Xuan, DU Fenglei, WANG Dezhong, et al. Impact of large natural draft cooling tower on atmospheric dispersion of airborne effluent from nuclear power

- plant[J]. [China Environmental Science](#), 2018, 38(5): 1695-1703(in Chinese).
- [13] 王炫, 魏国良, 张亚男, 等. 核电厂冷却塔布置对气载流出物扩散的影响[J]. 科技导报, 2021, 39(7): 102-111.
- WANG Xuan, WEI Guoliang, ZHANG Yanan, et al. Impact of large natural draft cooling tower layout on atmospheric dispersion of airborne effluent from nuclear power plant[J]. *Science & Technology Review*, 2021, 39(7): 102-111(in Chinese).
- [14] 郭栋鹏, 姚仁太. 核电厂冷却塔水汽抬升与液滴沉降规律数值模拟技术分析[J]. 辐射防护, 2010, 30(2): 102-107.
- GUO Dongpeng, YAO Rentai. Discussion on numerical simulation techniques for patterns of water vapor rise and droplet deposition at NPP cooling tower[J]. *Radiation Protection*, 2010, 30(2): 102-107(in Chinese).
- [15] 郭栋鹏, 姚仁太, 乔清党, 等. 核电厂冷却塔水汽扩散影响因素的分析[J]. [空气动力学学报](#), 2011, 29(2): 240-247.
- GUO Dongpeng, YAO Rentai, QIAO Qingdang, et al. The influencing factors analysis of water vapor diffusion regulation of the NPP's cooling tower[J]. [Acta Aerodynamica Sinica](#), 2011, 29(2): 240-247(in Chinese).