

核电厂冷却塔布置对气载流出物扩散的影响

王炫^{1,2}, 魏国良³, 张亚男³, 陶威锭³, 王德忠², 王博^{3*}

1. 上海核工程研究设计院有限公司, 上海 200233
2. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240
3. 生态环境部核与辐射安全中心, 北京 100082

摘要 分析了4种可能的冷却塔平面布局方案,分别为单一冷却塔布置、矩形布置、一字型布置以及S型布置。针对不同的布置方案,应用计算流体力学软件scSTREAM提供的RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,开展污染物大气扩散模拟分析。对于单一冷却塔布置,在释放点与冷却塔之间的距离段内,其污染物分布为标准的高斯分布,同时其浓度也高出其他3种布置方案1个数量级。除了S型布置方案,其他3种方案在冷却塔背风侧均形成阶跃效应。冷却塔背风侧污染物的分布中,单一冷却塔布置方案的浓度结果小于其他3种方案,主要是因为大量污染物进入到冷却塔体,然后从冷却塔顶部排出,造成其背风侧浓度急剧下降。

关键词 CFD;大型自然通风冷却塔;大气扩散;核电厂

当前,中国已步入社会经济发展的快速轨道,与此同时,社会的各个领域对于能源的需求也越来越多,生态环境与能源匮乏之间的矛盾日益突出^[1-2]。核电作为一种清洁、稳定的能源,已被列为国家能源发展的重要规划,虽然中国已经先行在沿海发达地区批准和建造了一批核电站,但从能源分

布的角度来看,中国内陆省份对核电的需求更为紧迫^[3-4]。在世界范围内,美国和法国内陆核电厂的比例均超过沿海地区^[5-6]。据统计,美国当前共有64个在运行的核电厂,共计95台机组,其中有39个核电站(共64台机组)位于内陆,占比达到67.4%,而法国内陆核电的占比也达到69%。截至

收稿日期:2020-01-19;修回日期:2020-04-26

基金项目:国家科技重大专项大型先进压水堆及高温气冷堆核电站项目(2017ZX06004001);IAEA国际合作课题(22578);国家核应急响应技术支持中心课题(19FW160);核安全与仿真技术国防重点学科实验室2017年专项基金项目(HX2018029)

作者简介:王炫,高级工程师,研究方向为核事故应急与仿真,电子信箱:wangxuan@snerdi.com.cn;王博(通信作者),正高级工程师,研究方向为辐射防护与环境保护,电子信箱:wangbo@chinansc.cn

引用格式: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;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2021.07.012

2019年12月,根据中国核能行业协会的统计数据,中国运行核电机组共有47台,但是内陆核电机组数量依然为0^[7]。

内陆核电站与滨海核电站相比^[8],厂址的扩散条件显著不同,其中一个重要方面就是水体弥散条件的差异。相比于滨海核电厂,内陆核电站必须建在河流或者水库旁边,水体的弥散条件比滨海厂址要差,核电厂正常运行过程中产生的温排水对环境的影响成为一个亟待解决的问题。为了降低核电厂排水的水温,在中国内陆或者部分沿海厂址,均要求采用大型自然通风冷却塔的二次循环冷却系统^[9-10],在现有的工程设计中,一般采用一机一塔或一机二塔的方案,如果按照一个厂址布局4台机组进行计算,在一个核电厂址内将至少会建立4台大型自然通风冷却塔,冷却塔群对气态污染物扩散的影响不可忽视^[11]。

以CAP1400机型为例,单台自然通风冷却塔垂直高度达到200 m,底部0 m直径达到160 m^[12]。冷却塔群的存在将会使得核电厂近区风场发生改变,从而造成核电厂排放的气载放射性核素的扩散呈现极大的不规律性^[13-14]。在中国《环境影响评价技术导则 大气环境》(HJ 2.2—2018)中也明确提出^[15],大型构筑物会对下风向5倍建筑物投影高度产生影响,产生尾流影响区,对于核电厂大型自然通风冷却塔,其尾流影响区则至少达到800 m,冷却塔群的叠加影响则更加复杂。

《核动力厂环境辐射防护规定》(GB 6249—2011)(原国家环保部于2011年发布)中做出明确规定^[16],必须在核电厂的整个生命周期内考虑核电厂流出物对生态环境和公众的影响。同时,对于核电厂的环境影响评价项目,国家生态环境部也明确要求必须定量分析核电厂正常运行和事故工况下,放射性核素所造成的个人剂量,在此基础上评价核电厂运行的环境安全性。核电厂应急计划区的划分,其基本依据也来自核素扩散后在不同距离段的浓度分布。因此,提升放射性核素在大气扩散中的预测水平,研究核素的扩散规律,对于提升核电厂环境影响评价和事故应急决策的准确性,都是至关重要的。

气态污染物在大气中的扩散状态取决于风向、风速、大气湍流、气温的垂直梯度、大气热力学稳定度等气象条件和地形条件^[17]。在事故工况下,由于需要在极短时间内(通常不超过1 min)给出核素大气扩散的结果,在此要求下,高斯大气扩散模型因为其计算效率高,输入数据简单,在大部分平坦地形条件下计算结果相对准确,因此,目前在工程上常用高斯扩散模式来推算气态放射性核素羽流浓度^[18],然而在核事故工况下,释放点的高度较低,仅为10 m,此时,释放点所在的核岛与冷却塔的直线距离也仅为200 m,冷却塔群对核电厂近区流场的影响使得事故工况下气态放射性核素的扩散不再服从标准正态分布,从而使得事故后果评价中通常使用的大气扩散模型(例如传统高斯模型)赖以成立的假设条件不再适用,严重影响了事故应急决策的可靠性。

本文基于计算流体动力学(CFD)软件,研究核电厂冷却塔不同布置方案下气态污染物的扩散规律,说明冷却塔群对气态污染物扩散影响的过程。

1 基于scSTREAM的CFD模拟

采用CFD数值模拟通用软件scSTREAM4.0(以下简称scSTREAM)模拟核电厂大型自然通风冷却塔大气扩散的流场和浓度场。scSTREAM是一款通用的结构化网格(直角或圆柱)热流体分析软件,于1984年首次在日本发布,为Cradle公司的主要产品之一,scSTREAM目前主要应用于建筑物的环境控制分析,该分析可以包括影响环境的室内外空气以及热场分析。scSTREAM采用基于压力的有限体积法和结构化网格坐标系(笛卡尔坐标系或圆柱坐标系),同时还采用了Cutfcell和四面体单元。由于网格结构的独特特性,scSTREAM具有出色的网格划分速度和计算速度,它广泛应用于电子、建筑和制造行业^[19]。

2 湍流模型的验证

选取中国某核电厂址开展室内风洞实验研究,

并对 scSTREAM 软件中标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型、RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型以及 MP $k-\varepsilon$ 湍流模型的有效性进行验证, 分析比较各湍流模型与实验结果的吻合性, 在此基础上推荐最优的湍流计算模型。

1) 实验设计。室内风洞实验厂址的总平面布置图见图 1, 释放点高度 75 m, 释放速率 11.4 m/s。

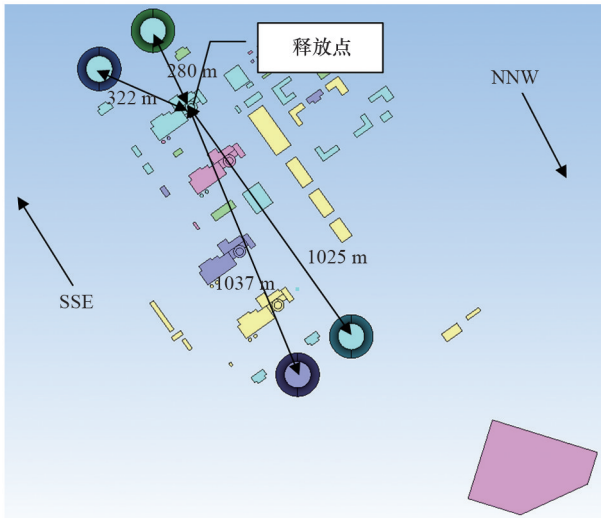


图 1 风洞实验厂址总平面布置

验证过程考虑中性天气条件(即 D 类稳定度), 相应的 $k-\varepsilon$ 湍流模型中施密特数取 0.6。实验在中国辐射防护研究院环境风洞实验室完成, 图 2 给出了风洞模拟设备示意图。如图所示, 该风洞为直流下吹式, 风洞洞体全长 36 m, 风速范围 0.2~9 m/s, 其试验段顶板可调节, 以减小纵向压力梯度。

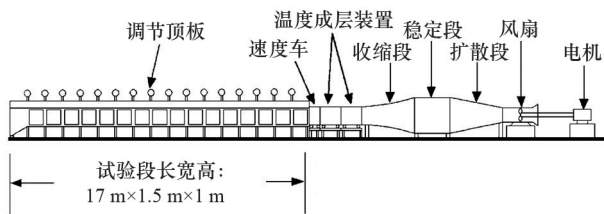


图 2 风洞模拟设备示意

根据模拟对象、模拟范围、几何相似和排放条件相似确定实验的模型缩比。山体和反应堆建筑物群体的模型缩比为 1:1500。模型表面具有适当

粗糙度, 维持边界条件和固壁粗糙条件相似。图 3 展示风洞实验的缩比物理模型。

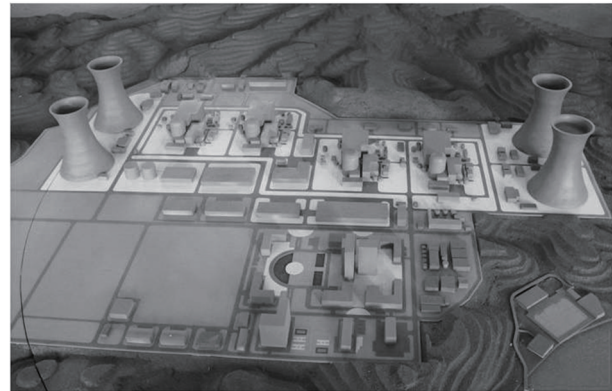


图 3 风洞实验缩比模型

2) 测量仪器。本次风洞实验涉及的主要仪器包括流场测量仪、CO 测量系统。实验中流场风速测量仪采用 StreamLine 热线风速仪, 生产厂家为丹麦 DANTEC 公司, 在测量仪中配置有 1 维和 2 维热线探头。室内风洞实验的示踪气体采用 CO, CO 的释放采用专用的释放装置进行, 通过释放细管连接流量监测仪, 来保证 CO 的均匀释放。此外还包括 CO 样品收集系统, 采用红外气体分析仪来测量样品收集器内 CO 的浓度。

3) 相似准则的处理。根据核电厂址百米铁塔气象资料, 厂址地区环境风速较低, 10 m 高度处的年平均风速为 1.5 m/s, 70 m 高度处的风速为 2.2~2.3 m/s。当现场风速较低时, 基于根本茂相似准则推算出的实验风速很低, 仪器探测存在一定难度。因此, 根据雷诺数自准准则的动力相似判据, 风洞内的风速按照公式(1)来调节。据此调节风洞实验中冷却塔出口处风速为 1.24 m/s。

$$U_r = \frac{Re_c \cdot v}{L} \quad (1)$$

式中, U_r 为特征速度 (m/s), 即风洞中冷却塔排放口处的实验风速; Re_c 为临界雷诺数 (无量纲), 当 $Re_c > 11000$ 时实现雷诺数自准; L 为特征长度 (m), 取风洞中冷却塔的高度; v 为粘性系数 (m^2/s)。

4) 数据处理。由于本文主要用风洞实验的浓度场测量数据来验证湍流模型的有效性, 因此, 对

风洞实验获得的浓度场数据处理方法进行说明。用释放点浓度(Mass Fraction, MF)表示测量的浓度数据:

$$MF = \frac{C \cdot U_{\infty}}{Q \cdot U_p \cdot (L_p/L_m)^2} \quad (2)$$

式中, C 为样品采集系统中采集的浓度(g/m^3); U_{∞} 为物理风洞实验中释放点高度处的风速(m/s); U_p 为现实大气环境中释放点高度处的风速(m/s); Q 为风洞实验模拟的释放源强(g/m^3); L_p/L_m 为风洞实验

的缩放比。

5) 实验验证。风洞实验一共开展 NNW 和 SSE 2 个风向方位, 其中 NNW 风向下, 冷却塔刚好位于释放点的上风向, 而 SSE 风向下, 释放点位于冷却塔的上风向, 冷却塔会对污染物形成阻挡作用, 所以在这 2 个风向下, 冷却塔对污染物大气扩散的影响最大。针对 D 类稳定度条件下不同风向的 CFD 模拟计算结果, 分别与风洞实验的测量结果进行比较, 如图 4 所示, 其中 WT 为风洞实验。

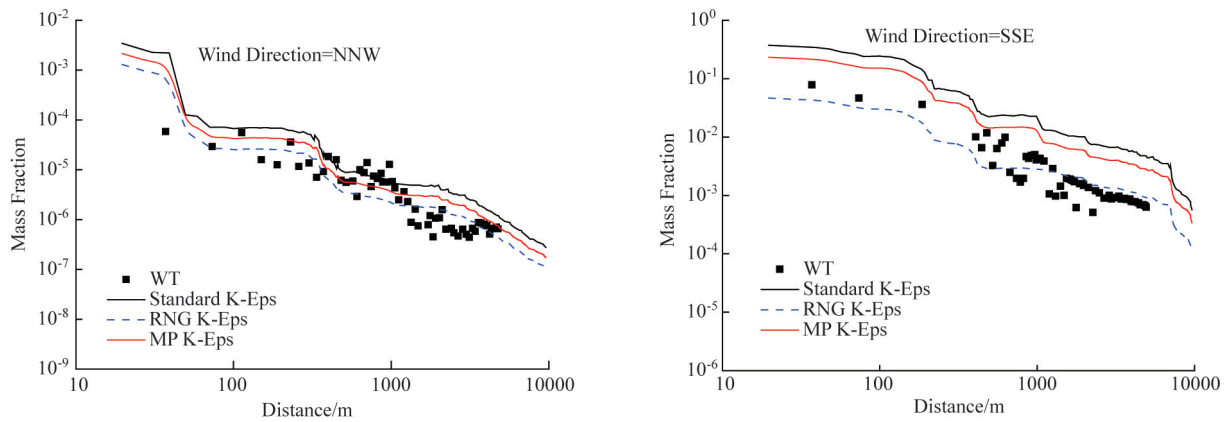


图4 CFD模拟结果与风洞实验比较

由图4的比较结果可以看出, 总体上 CFD 数值模拟结果与风洞实验结果能表现出一致的变化趋势, 对比 3 种湍流计算模型与风洞试验的结果, 可以看出, RNG $k-\varepsilon$ 模型的模拟结果与实验结果最为接近。在 NNW 风向条件下, 3 种湍流计算模型的计算结果与风洞实验的数据吻合均较好, Standard $k-\varepsilon$ 模型和 MP $k-\varepsilon$ 模型的结果均略微偏高, 在 300~1000 m 的范围内, MP $k-\varepsilon$ 模型的计算结果与风洞实验的数据吻合最好, 但是到了 1000 m 以外的距离段, MP $k-\varepsilon$ 模型的结果明显高于风洞实验的测量数据。在 SSE 风向条件下, Standard $k-\varepsilon$ 模型和 MP $k-\varepsilon$ 模型结果明显高于风洞实验的测量结果, RNG $k-\varepsilon$ 模型的模拟结果与风洞实验最为接近, 说明将 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型应用于冷却塔对污染物扩散模拟的分析是合理可行的。

3 计算方案

结合工程项目的实际特征, 建立了 4 套冷却塔

三维模型, 分别为单一冷却塔布置、矩形布置(4 个冷却塔)、一字型布置(4 个冷却塔)、S 型布置(4 个冷却塔), 如图 5 所示, 黑色的小点为释放点位置, 距离最近的冷却塔中心点的距离为 200 m, 箭头代表来流风向, 风速取 3 m/s, D 类稳定度。

借助于 CFD 模型强大的网格运算和求解能力, 利用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流计算模型模拟核电厂大型构筑物对厂址近区风场的影响, 研究不同布置方案条件下, 冷却塔自然通风对气态污染物扩散的规律。释放烟囱的内径为 2.5 m; 烟囱出口排气介质为 CO, 速率为 11.3 m/s, 源强为 1 kg/s; 烟囱出口温度为环境温度, 在模拟过程中不考虑温度的影响, 忽略重力作用。计算域的选择遵循来流到构筑物的距离大于 3 倍建筑物高度、尾流到出口距离大于 10 倍构筑物高度、两侧与构筑物的距离大于 5 倍构筑物高度、模拟高度大于 3 倍构筑物高度等准则^[20], 本文构筑物最大高度(冷却塔)为 215 m, 因此, 模拟范围为 5.0 km×2.0 km×1.0 km, 共生成 120 万个多面体网格, 其中, 冷却塔网格分辨率为

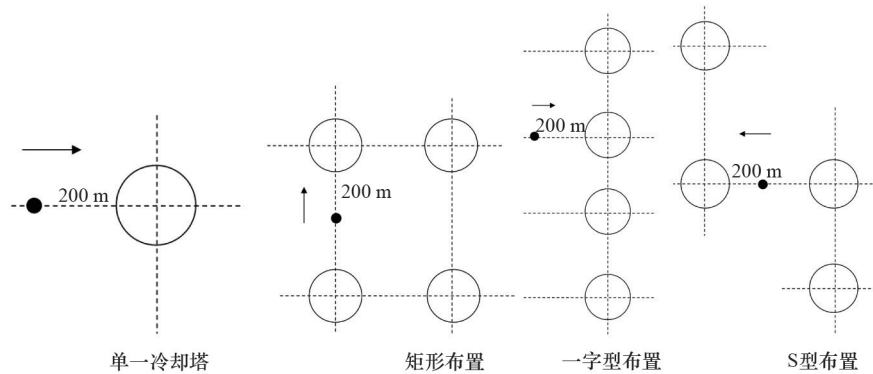


图5 冷却塔布置方案

4 m, 烟囱网格分辨率为0.5 m, 其他区域最小网格20 m, 平均40 m, 如图6所示, X 轴为东西方向, Y 为南北方向, Z 为竖直方向, 计算区域和冷却塔的边界条件如图7所示。在模拟过程中, 10 m高度风速取3 m/s, 风向为西风, 假设流场为稳态, 大气为不

可压缩流体, 不考虑地面粗糙度, 边界入口风速服从指数分布。将污染物扩散视为单纯的物理扩散过程, 不考虑污染物的干湿沉降和化学变化, 采用MF来表示气态污染物的空气浓度。

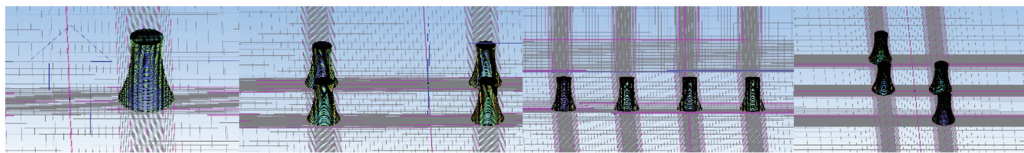


图6 冷却塔三维建模及网格划分

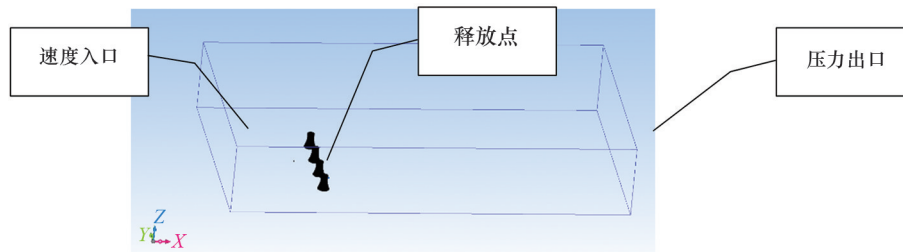


图7 计算边界设定

4 计算结果分析

4.1 不同布置方案污染物轴线分布比较分析

图8展示不同冷却塔布置方案条件下, 污染物的扩散轴线浓度分布曲线, 其中MF表示污染物的质量分数。可以看出, 对于单一冷却塔布置、矩形布置、一字型布置, 其污染物的轴线浓度变化趋势

基本一致, 均在冷却塔背风侧形成不同程度的阶跃下降的过程, 形成明显的阶跃效应。对于S型布置, 其污染物的轴线浓度变化是一个缓慢下降的过程, 在冷却塔附近形成很小的上升峰, 之后又开始缓慢下降。从图8可以看出, 对于单一冷却塔布置方案, 释放点的浓度从初始10 m处的 3.68×10^{-1} 降到300 m处的 1.53×10^{-4} , 降低了3个数量级。受冷

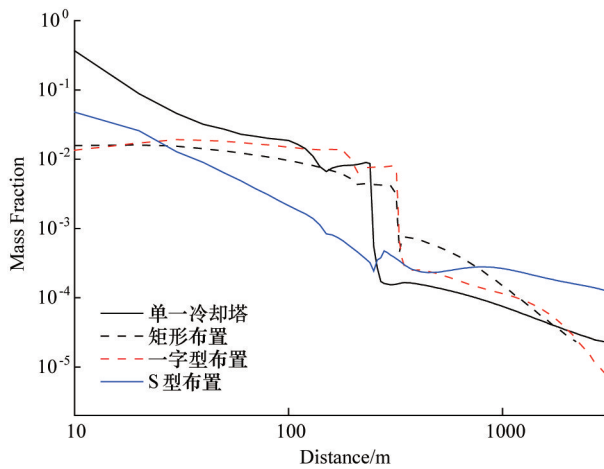


图8 不同布置方案下污染物的扩散轴线浓度分布

却塔自然通风效应的影响,污染物在冷却塔背风侧的浓度相比于迎风侧的浓度降低了1.5个数量级。

通过4种不同的布置方案的模拟结果可以看出,单一冷却塔布置方案,由于其释放点位置无任何大型构筑物的阻挡,气流平稳,所以其初始的轴线浓度在释放点下风向30 m的距离内比其他3种布置要高1个数量级,随着下风向距离增加,轴线浓度的下降速度也要显著高于矩形布置和一字型布置,这主要是由于释放的污染物直接进入冷却塔内部,从冷却塔顶部排出,造成冷却塔背风侧污染物浓度水平急剧下降。矩形布置和一字型布置

方案下污染物的轴线浓度变化趋势基本一致,在释放点与冷却塔之间的距离段内,污染物浓度的下降速度非常平缓,但是经过冷却塔后,其发生陡降,之后浓度开始迅速下降。对于S型布置和单一冷却塔布置方案,在释放点与冷却塔之间的距离段内的变化趋势比较一致,都存在一个持续快速下降的过程,但是在经过冷却塔之后,对于S型布置方案,污染物轴线浓度的下降趋势就变得平缓很多,说明S型布置方案下,冷却塔自然通风过程对污染物的扩散影响较小。

图9表示不同布置方案下污染物地面浓度分布,可以看出无论是何种布置方案,只要污染物到达冷却塔附近,均有大量的污染物进入冷却塔内部,这主要是由于冷却塔的自然通风过程,造成扩散到冷却塔底部进风口的污染物被吸入到塔体中,又从冷却塔顶部排出,相当于抬升了释放高度,降低了地面污染物浓度。由于矩形布置和S型布置,在释放点的上风向存在冷却塔的阻挡,所以污染物在地面的分布略有不同。从S型布置方案污染物的地面浓度分布图上可以明显地看出,由于释放点上风向冷却塔对流场的阻挡,造成释放点与冷却塔之间的气流扰动,污染物的扩散发生偏转,其分布轨迹发生变化,不是一个典型的正态分布。

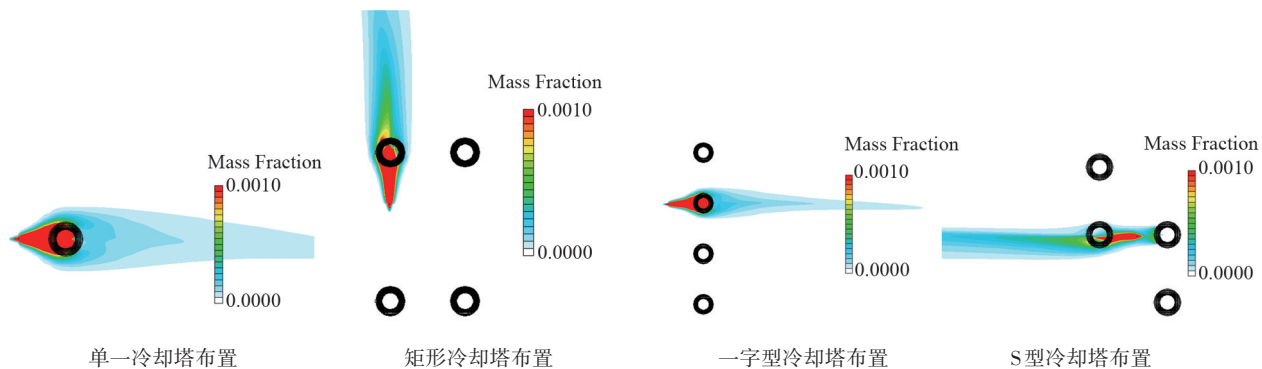


图9 冷却塔不同布置方案下污染物的扩散轨迹

4.2 不同布置方案污染物横向和垂向分布比较分析

1) 单一冷却塔布置方案。图10给出了单一冷却塔布置方案下,释放点不同距离处污染物的横向和垂向浓度分布情况。可以看出,在单一冷却塔布置方案下,污染物的横向浓度分布服从正态分布

规律,在释放点下风向300 m处,出现对称的2个峰,主要是由于污染物在冷却塔两侧聚集。从污染物的垂向分布来看,在冷却塔迎风侧,污染物浓度随着高度的增大而降低,最大浓度点基本位于释放高度附近。在冷却塔背风侧,污染物的浓度随着高

度的增加呈现先降低后升高再降低的分布规律,整体上呈现出S型分布特征,主要原因包括2个方面,一是由于冷却塔迎风面的建筑物下洗作用,造成冷却塔背风侧污染物浓度下降。二是由于污染物从

冷却塔底部进风口进入冷却塔体内部并从冷却塔顶部排出,造成冷却塔背风侧的地面污染物浓度值大幅下降。

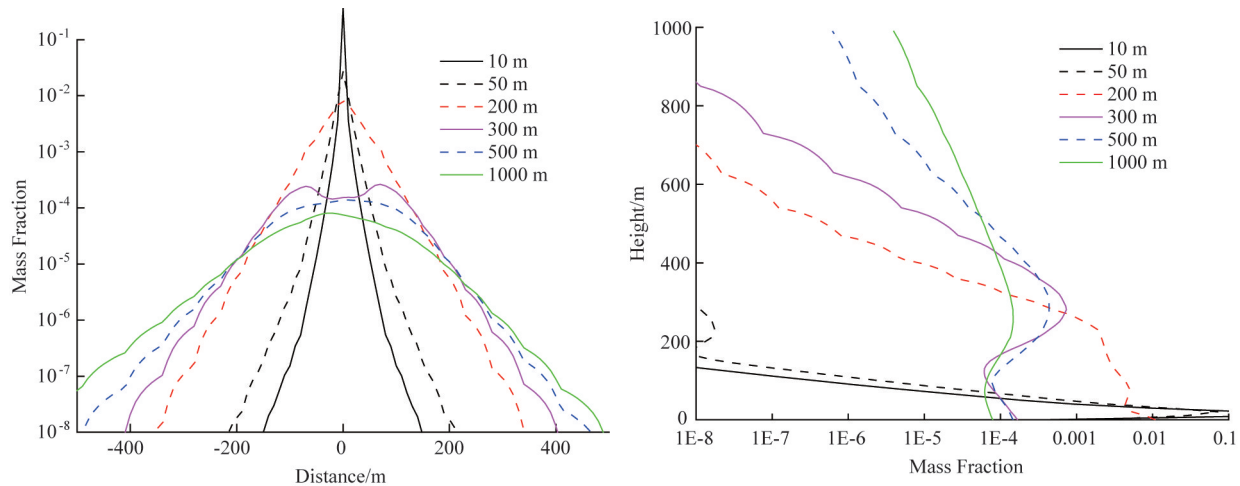


图10 单一冷却塔布置方案污染物的横向和垂向浓度分布

2) 矩形布置方案。图11给出了矩形冷却塔布置方案下,释放点不同距离处污染物的横向和垂向浓度分布情况。可以看出,污染物在横向上基本服从正态分布,在释放点下风向300 m处形成一个尖峰,分布形状与其他距离段略有不同,随着下风

距离的增加,污染物的分布峰值不在位于释放点正下方,而是发生一定的偏转。污染物在垂向上的分布与单一冷却塔布置方案较为接近,依然在释放点下风向300 m后,存在S型分布特征。

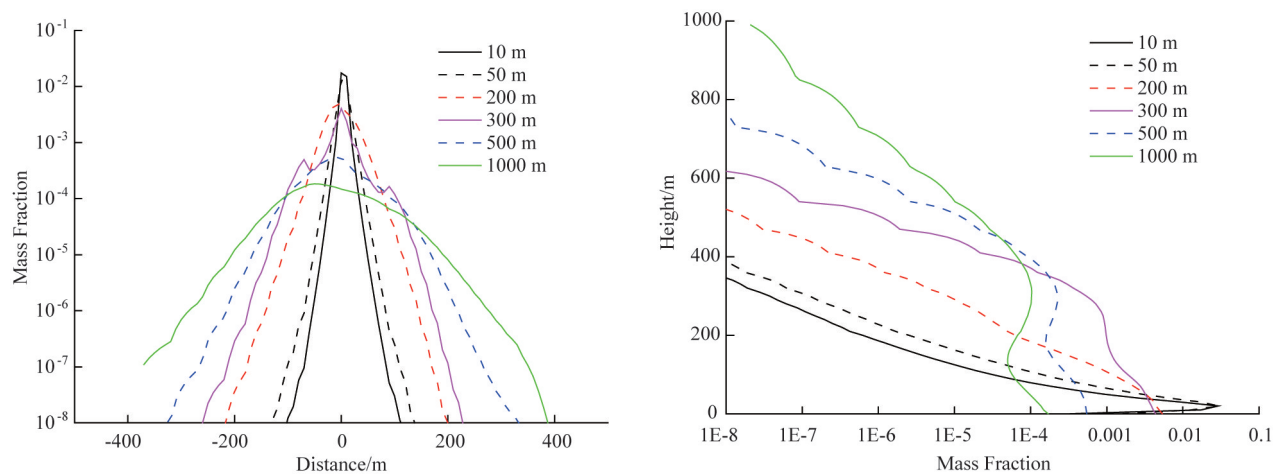


图11 矩形冷却塔布置方案污染物的横向和垂向浓度分布

3) 一字型布置方案。图12给出了一字型冷却塔布置方案下,释放点不同距离处污染物的横向和垂向浓度分布情况。可以看出,由于释放点下风向相邻冷却塔的影响,污染物的横向分布均出现2

个明显的峰值,一个在释放点下风向,一个在相邻冷却塔下风向,主要是由于释放的污染物在近区扩散中,有部分污染物进入到相邻冷却塔内,从而造成污染物在下风向不同距离段的横向分布出现双

峰的情况。从污染物的垂向分布来看,在冷却塔附近(200 m),污染物的垂向分布变化差异非常大,

呈现的S型也非常明显,而其他距离段比较接近单一冷却塔布置方案。

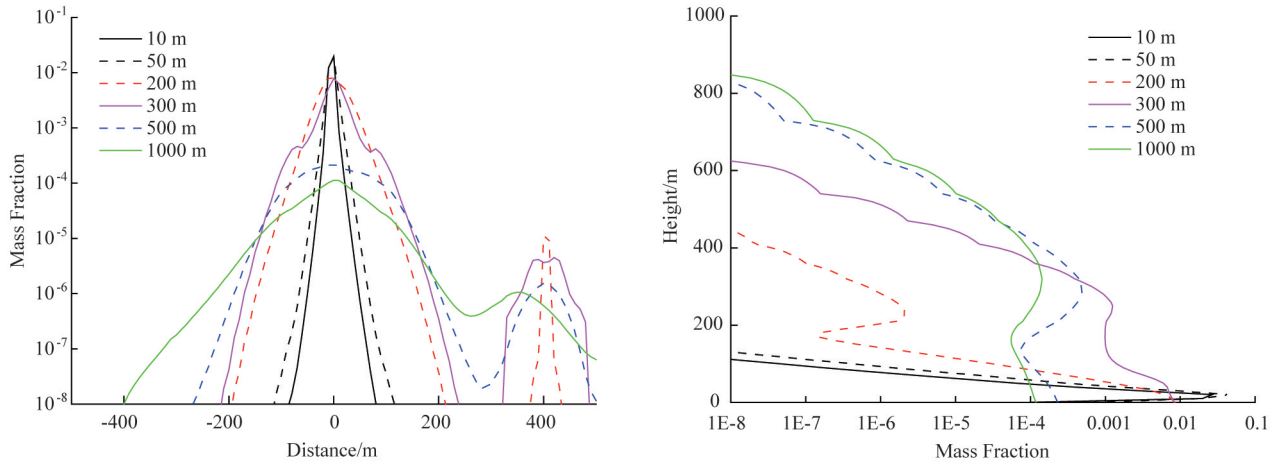


图12 一字型冷却塔布置方案污染物的横向和垂向浓度分布

4) S型布置方案。图13给出了S型冷却塔布置方案下,释放点不同距离处污染物的横向和垂向浓度分布情况。可以看出,污染物的横向分布峰值出现的位置发生偏离轴线,主要是由于释放点上风

向的冷却塔阻挡作用,造成流场偏转产生的,总体来看,其横向分布符合正态分布规律,与单一冷却塔布置方案较为接近。其污染物的垂直分布也符合一般的正态分布特征。

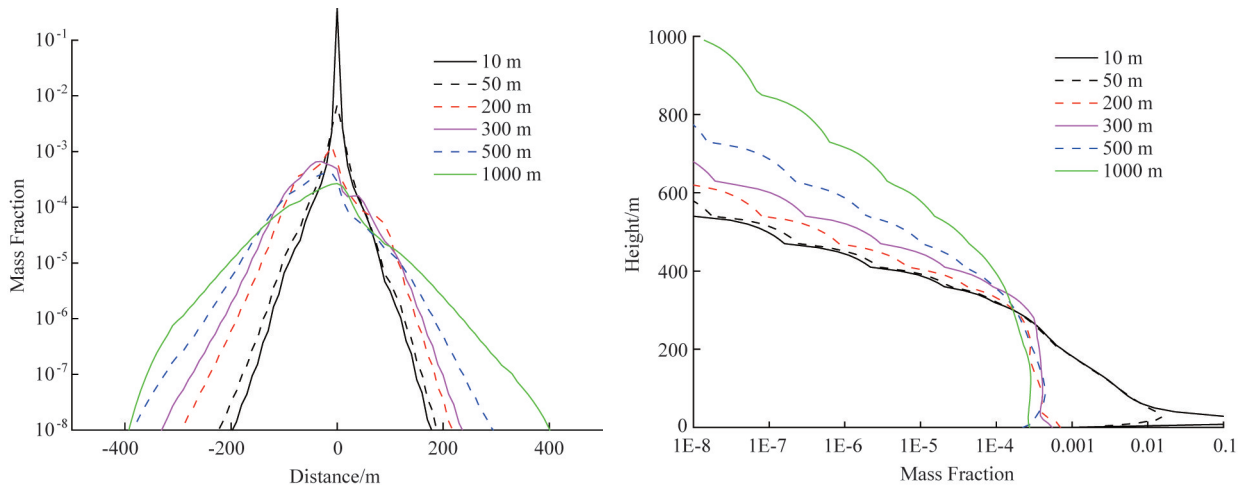


图13 S型冷却塔布置方案污染物的横向和垂向浓度分布

4.3 与高斯烟羽模型计算结果比较分析

将不同布置方案下释放点下风向轴线浓度变化与高斯烟羽模型的计算结果进行比较,如图14所示。

可以看出,单一冷却塔布置方案中,在释放点

与冷却塔之间的距离段,CFD的模拟结果与高斯烟羽模型的计算结果基本一致,但是,在冷却塔附近以及其背风侧附近,单一冷却塔、矩形布置以及一字型布置,污染物的浓度要高于高斯烟羽模型。随着下风距离的增加,污染物的浓度又逐渐低于高斯

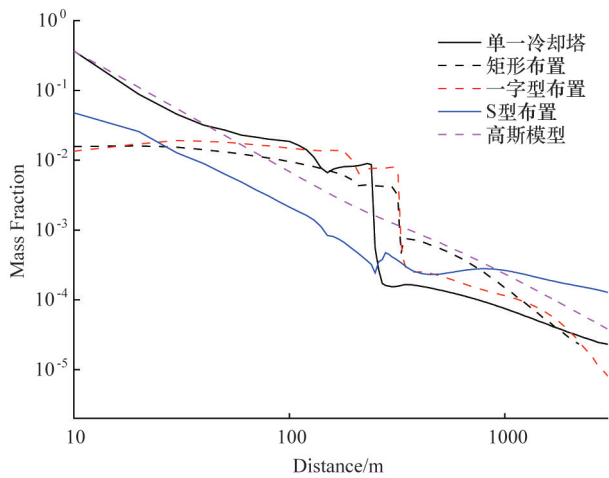


图14 与高斯烟羽模型比较分析

烟羽模型。对于S型布置,在释放点下风向1000 m的范围内,其污染物浓度均低于高斯烟羽模型,到了1000 m以外,其污染物浓度逐渐高于高斯烟羽模型。

5 结论

结合中国核电厂工程设计,给出了4种可能的冷却塔平面布局方案,分别为单一冷却塔布置、矩形布置、一字型布置以及S型布置,基本涵盖了大部分核电厂址。针对不同的布置方案,开展污染物大气扩散模拟分析。对于单一冷却塔布置,在释放点与冷却塔之间的距离段内,其污染物分布为标准的高斯分布,同时其浓度也显著高于其他3种布置方案。除了S型布置方案,其他3种方案在冷却塔背风侧均形成阶跃效应。冷却塔背风侧污染物的分布中,单一冷却塔布置方案的浓度结果小于其他3种方案,主要是因为大量污染物进入到冷却塔体,然后从冷却塔顶部排出,造成其背风侧的浓度急剧下降。

核电厂大型自然通风冷却塔群的存在,显著改变了近区气态污染物的扩散规律,传统的高斯烟羽模型在厂址近区已无法适用,需要对计算模型进行重新修正,以满足核事故后果评价以及环境影响评价的计算分析要求。

参考文献(References)

- [1] Sadekin S, Zaman S, Mahfuz M, et al. Nuclear power as foundation of a clean energy future: A review[J]. Energy Procedia, 2019, 160: 513-518.
- [2] Peng L H, Zhang Y, Li F, et al. Policy implication of nuclear energy's potential for energy optimization and CO₂ mitigation: A case study of Fujian, China[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2019, 51(4): 1154-1162.
- [3] Liu P, Chu P H, Hou J C. Accommodation issue of nuclear power in China: Status quo, barriers and solutions[J]. Energy Strategy Reviews, 2018, 22: 166-178.
- [4] Xiao X J, Jiang K J. China's nuclear power under the global 1.5 °C target: Preliminary feasibility study and prospects[J]. Advances in Climate Change Research, 2018, 9(2): 138-143.
- [5] NRC 运行机组数据统计[EB/OL]. (2019-10-21)[2020-05-12]. <https://www.nrc.gov/reactors/operating.html>.
- [6] 英国石油公司(BP)世界能源统计年鉴(2019年)[EB/OL]. (2019-06-12)[2020-05-12]. <http://mp.ofweek.com/ecep/a245683926116>.
- [7] 2019年1-12月全国核电运行情况[EB/OL]. (2020-02-12)[2020-05-12]. <http://www.china-nea.cn/site/content/36862.html>.
- [8] Ke Y, He G W, Gan P J, et al. R&D of emergency measures for water environment protection under severe accident of inland nuclear power plants[J]. Fusion Engineering and Design, 2017, 125: 653-658.
- [9] 牛华寺, 杨若冰, 陆程, 等. 某滨海核电厂循环水系统采用直流冷却和二次循环冷却方案比选[J]. 给水排水, 2018, 54(增1): 1-4.
- [10] 魏新渝, 张琨, 党煜钦, 等. 美国滨海核电厂温排水及生态影响分析和启示[J]. 科技导报, 2017, 35(23): 94-102.
- [11] Lee J. Evaluation of impacts of cooling tower design properties on the near-field environment[J]. Nuclear Engineering and Design, 2018, 326: 65-78.
- [12] Lin F, Li Y, Gu X L, et al. Prediction of ground vibration due to the collapse of a 235 m high cooling tower under accidental loads[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 258: 89-101.
- [13] Chahine A, Matharan P, Wendum D, et al. Modelling atmospheric effects on performance and plume dispersal from natural draft wet cooling towers[J]. Journal of Wind

- Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 136: 151-164.
- [14] Adam K, Michał C, Ryszard B. 3D CFD modeling of natural draft wet-cooling tower with flue gas injection[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 91: 824-833.
- [15] 环境影响评价技术导则大气环境(HJ 2.2-2018)[S]. (2018-12-01)[2020-05-12]. http://www.mee.gov.cn/yw-gz/fgbz/bz/bzwb/other/pjjsdz/201808/t20180814_451386.shtml.
- [16] 核动力厂环境辐射防护规定(GB6249—2011)[S]. [2011-09-01]. http://www.mee.gov.cn/yw-gz/fgbz/bz/bzwb/hxxhj/fsxhjbz/201103/t20110309_201577.htm
- [17] Beatriz S, Jose L S, Alberto M, 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.
- [18] Ghaemi far S, Aghaie M, Minuchehr A, et al. Evaluation of atmospheric dispersion of radioactive materials in a severe accident of the BNPP based on Gaussian model [J]. Progress in Nuclear Energy, 2019, 113: 114-127.
- [19] scSTREAM User's Guide Operation Manual[R/OL]. (2018-04-26)[2020-05-12]. <https://www.cradle-cfd.com/product/scstream.html>.
- [20] 薛箐箐, 郭建侠, 汤志业, 等. 基于CFD的单个建筑物风场模拟参数选择[J]. 气象科技, 2014, 42: 712-718.

Impact of large natural draft cooling tower layout on atmospheric dispersion of airborne effluent from nuclear power plant

WANG Xuan^{1,2}, Wei Guoliang³, ZHANG Yanan³, TAO Weiding³, WANG Dezhong², WANG Bo^{3*}

1. Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute CO., LTD, Shanghai 200233, China
2. School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
3. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100082, China

Abstract In terms of engineering design of nuclear power plants, four possible cooling tower layout schemes are given: single cooling tower layout, rectangular layout, inline layout and S-shaped layout, which cover most of the nuclear power plant sites. The RNG $k-\varepsilon$ turbulence model in scSTREAM is used to simulate and analyze atmospheric diffusion of pollutants for different layout schemes. For a single cooling tower arrangement, the concentration distribution is a standard Gaussian distribution in the distance between release point and cooling tower, and its concentration is also significantly higher than those of the other three arrangements. In addition to the S-shaped arrangement, the other three solutions form a steep drop effect on the leeward side of the cooling tower. In the distribution of pollutants on the leeward side of the cooling tower, the concentration results of the single cooling tower arrangement are smaller than those of the other three schemes, mainly because a large amount of pollutants enter the cooling tower body and then discharge from the top of the cooling tower, causing a sharp concentration decrease on the leeward side.

Keywords CFD; large natural draft cooling tower; atmospheric dispersion; nuclear power plant ●



(责任编辑 祝叶华)