

冷却塔水汽扩散的 CFD 数值模拟

郭栋鹏^{1,2,3}, 姚仁太^{1,2}

(1. 太原理工大学环境科学与工程学院 太原 030024;

2. 中国辐射防护研究院 太原 030006;

3. 太原科技大学环境科学与工程系 太原 030024)

摘要: 应用 CFD(计算流体力学)软件 STAR-CD 计算了冷却塔水汽的扩散规律及其抬升与风速、水汽排放速度、水汽排放温度的关系, 计算结果用高斯烟羽模型与我国常用的计算烟气上升高度公式验证, 验证结果表明: 该软件能够较好的模拟水汽的扩散与抬升规律。

关键词: 数值模拟; 计算流体力学; 水汽扩散与抬升; 浓度场

CFD NUMERICAL SIMULATION OF WATER VAPOR DIFFUSION

GUO Dong-peng^{1,2,3} YAO Ren-Tai^{1,2}

(1. College of environment science and engineering of TUT, Taiyuan, 030024, China;

2. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan, 030006, China;

3. Department of environment science and engineering,

Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, 030024, China.)

Abstract: A CFD software (STAR-CD) was employed to simulate the performance of the nuclear power plant's cooling tower with water vapors injection in neutral atmosphere condition. A mathematical mode was established for simulating the flow in cooling tower, the N-S equations are closed with $k-\epsilon$ equations. Numerical Simulation of water vapors Diffusion and rise, After simulating water vapors diffusion and rise in a normal size and the simple condition, the authors analyzed the relation of water vapors diffusion and rise to air velocity, And then the result of the analysis has also been analyzed and compared with Gauss plume model, which proves the feasibility of this method.

Key words: Numerical simulation; computational fluid dynamics; water vapors diffusion and rise; concentration field.

0 引言

近年来,我国已在内陆地区作了大量的核电站选址工作,内陆核电站的冷却水系统工艺一般采用再循环冷却水(设置冷却塔)系统,同大型火电厂采用的冷却塔再循环冷却方式类似。该工艺在正常工况下,可能导致冷却水以汽载形式排放。Hanna^[1]指出,火电厂从冷却塔排放的能量相当于所产生电能的两倍,而所浪费的能量中有超过一半是以潜热的形式排放。冷却塔水汽对环境的影响主要有以下三方面:由于水汽中含有大量的水蒸汽,水汽将是白色不透明的,会影响视觉;水汽中水蒸汽会凝结成水滴,可能会对烟囱排放的放射性污染物产生一定的影响或冷却塔下风向形成降水,如在冬天,还可能在表面上结冰,从而对周围环境产生

较强的影响;水汽抬升到空中会形成云,如果抬升到较高的高度,和积云合并,可能促进降水。因此从环境角度看,水汽的扩散规律以及冷却塔对附近烟囱排放放射性烟羽的影响是较为关注的。

CFD(Computational Fluid Dynamics)技术,即计算流体力学技术,随着电子计算机的推广普及以及计算方法的发展,近几十年来得到了巨大的发展。相对于物理模拟与现场试验,数值模拟有其独特的优点:(1) 研究成本低,周期短;(2) 无实验仪器干扰;(3) 能获得完整的数据;(4) 能将计算情况在计算机屏幕上形象地再现。本文用CFD 软件 STAR-CD 模拟冷却塔水汽的扩散与抬升问题。

1 数值计算的几何模型以及网格生成

基金项目:国家“十一五”核能开发课题(*****)

作者简介:郭栋鹏(1978-)在读博士生,主要从事环境科学研究

姚仁太(1963-)研究员,博士生导师,主要从事环境科学研究

1.1 数值计算的几何模型

运用某拟建核电站厂址内冷却塔及其附近主要构筑物原始尺寸进行数值模拟,空间尺寸为 $5000\text{m} \times 5000\text{m} \times 3000\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),冷却塔高度为 215m ,底部进口直径为 172.5m ,顶部出口直径为 100m ,冷却塔壁厚 0.2m ,冷却塔附近主要建筑物高度分别为 65m , 50m , 39m , 37m , 30m ,具体位置详见图 1。

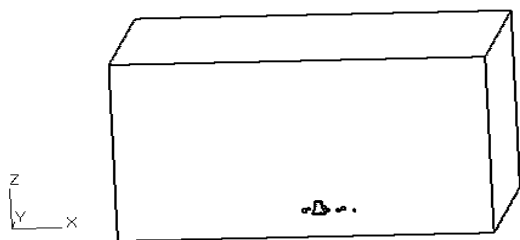


图 1 冷却塔及其主要构筑物布置图

1.2 数值计算网格生成

由于冷却塔体型比较复杂,对计算区域进行网格划分时采用具有良好拓扑性的非结构四面体网格,使其适应冷却塔复杂的形状。建筑物附近的空气分离流动大致是沿着建筑物的表面,由于采用的贴体网格与建筑物的形状相似,因此与空气流动的方向基本一致,可以有效地减少数值耗散引起的误差。本次数值模拟采用密度较高的网格划分,得到的冷却塔网格数为 2560237,模拟区域总的网格数为 3192480。图 2 给出了单个冷却塔及主要构筑物网格划分俯视图,图 3 给出了模拟区域整个网格划分俯视图。

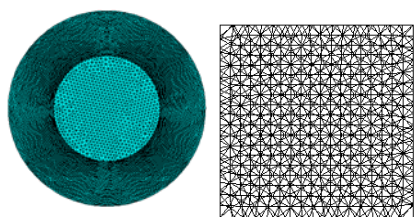


图 2 冷却塔及主要构筑物的网格划分俯视图

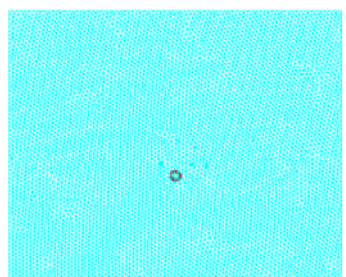


图 3 模拟区域整个网格划分俯视图

2 数值计算的物理模型及边界物理参数

2.1 模型方程

水汽扩散区域以冷却塔地面中心为原点,风向为轴,是一个平面对称区域。在实际过程中,该区域的流动是一种三维、非定常、可压缩黏性流体的流动。本次计算模型针对整个3D空间,体现大气速度和温度特性。另外,在模拟计算过程中,在误差允许范围内根据实际情况对模型作适当简化:大气条件为夏季高湿度天气,空气湿度接近饱和,不考虑液气交换、相变以及太阳辐射的影响,但满足布辛聂斯克(Bousinesq)假设;

在实际工作条件下,大气状况对流场的影响是缓慢而且连续的,气体流动各参数与时间的关联度可以忽略,同时忽略气流的振荡对流场的影响;由于气流中持液量较小,通常可以忽略液滴对气体流动的影响;本文研究的是携带水汽的热湿空气和大气的混合流动行为,将冷却塔内部空间作为一个对大气开放的混合区域,冷却塔出口相对于大气来说可看作一个放射状喷射源。本文对流体采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型封闭 N-S 方程进行计算^[2,3]。

1、质量守恒方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

2、动量守恒方程

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f_x - \frac{\partial p}{\rho \partial x}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = f_y - \frac{\partial p}{\rho \partial y}$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = f_z - \frac{\partial p}{\rho \partial z}$$

3、标准 $k-\varepsilon$ 流动方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \frac{u_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \frac{u_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

方程中 G_k —由层流速度梯度而产生的湍

流动能； G_b —由于浮力影响引起的湍流动能； Y_M —在可压缩湍流中，过度的扩散产生的波动； $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ —模型常量； $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ — k 方程和 ε 方程的湍流 Prandtl 数。

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 为湍流模型常数，其值见表1。

表1 湍流模型常数

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_{3\varepsilon}$	σ_k	σ_ε
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

2. 2边界条件设置

自然风入口—velocity inlet (第一类)

冷却塔出口—velocity inlet (第一类)

$H_2O + \text{air}$ (H_2O 质量百分比浓度为22.12%)

$$\text{冷却塔壁} \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\text{烟囱壁} \quad \frac{\partial T}{\partial xi} = 0, \frac{\partial C}{\partial xi} = 0$$

$$\text{地面} \quad \frac{\partial T}{\partial xi} = 0, \frac{\partial C}{\partial xi} = 0$$

$$\text{其余出口面} \quad \frac{\partial T}{\partial xi} = 0, \frac{\partial C}{\partial xi} = 0$$

3 扩散规律的分析

由于水气的扩散规律与许多因素有关，Hanna^[4]等人报道，直径小于200 μm 的液滴，受大气湍流的影响强烈，其运动可以用高斯烟羽扩散模型处理，据美国马里兰州Chalk Point电厂冷却塔进行的颜料示踪试验中观测到的水滴尺度谱分布可知，水滴直径小于200 μm 的粒子占总粒子的85.5%，所以，根据由正态分布得出的高斯烟羽模型及其他相关理论，一般情况下，下风向某点的浓度主要与水汽排放速度 V_{fume} （即排烟量、源强）、风速 V_{air} 、冷却塔高度 H 及水汽温度 T_{fume} 有关。而冷却塔的高度直接涉及到模型的几何尺寸。本文做了风速、水汽速度、水汽温度3个影响因素对其水汽抬升的影响。

3.1 实用理论基础

由正态分布假设下得出的高斯基本扩散方程

$$C(x, y, z, H) = \frac{q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

式中 H 为有效源高， H 等于烟囱的实体高度 H_s 和水汽的上升高度 H 之和，即

$$H = H_s + H \quad (9)$$

在实体高度不变的情况下，有效源高只与烟气的上升高度 H 有关。现阶段，关于水汽的抬升的高度还没有统一的计算公式，本文根据我国“制定地方大气污染排放标准的技术原则和方法”中给出的计算烟气上升高度 H 公式来计算冷却塔水汽的抬升高度。

当 $Q_h < 2100\text{kW}$ 或 $(T_s - T_a) < 35\text{K}$ 时：

$$\Delta h = 2 \left(\frac{1.5v_s D + 0.01Q_h}{u} \right)$$

$$\text{其中 } Q_h = c_p V_0 (T_s - T_a)$$

烟气的上升高度随风速的增加而降低，随烟气流速的增加而增加，随烟气温度的增加而增加。

3.2 风速的影响

在水汽出口温度、速度不变的情况下，改变风速，输入STAR-CD算例，得到风速对水汽扩散的影响。3个工况的设置情况如表2。

表2 工况参数

	$V_{\text{air}}(\text{m/s})$	$V_{\text{fume}}(\text{m/s})$	$T_{\text{fume}}(\text{K})$	$T_{\text{air}}(\text{K})$
工况1	1.65	4.5	303	293
工况2	5.4	4.5	303	293
工况3	8.01	4.5	303	293

不同风速冷却塔水汽下风向水汽浓度图见图4-图6，不同风速下冷却塔水汽抬升情况及其与我国“制定地方大气污染排放标准的技术原则和方法”中给出的计算烟气上升高度的计算结果见图7。

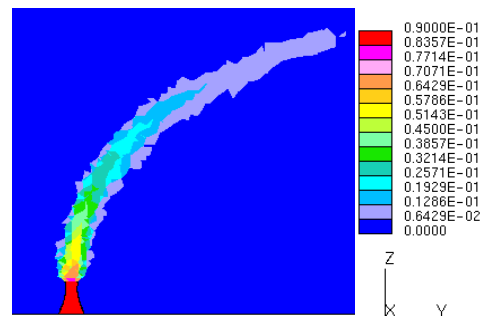


图4 工况1下风向轴线平面浓度分布图

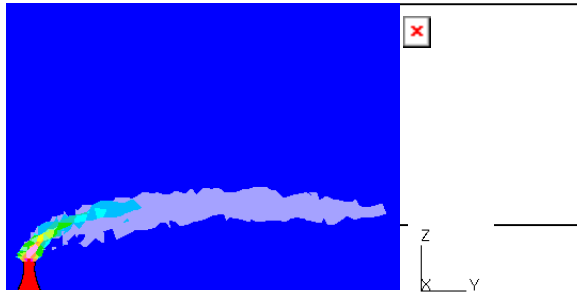


图5 工况2下风向轴线平面浓度分布图

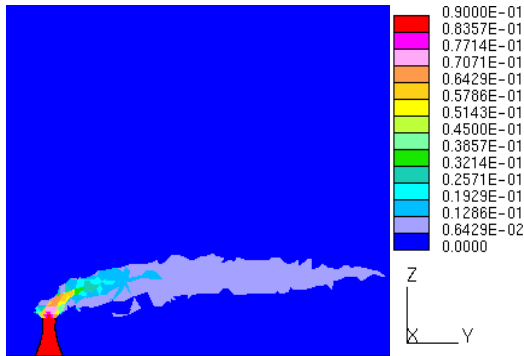


图 6 工况 3 下风向轴线平面浓度分布图

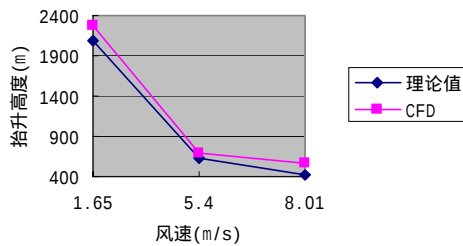


图 7 水汽抬升高度与风速关系

由图 7 可见，由 CFD 计算的水汽抬升高度值的变化规律与用烟气抬升计算式计算水汽抬升高度值的变化规律基本一致，均是随着风速的增大，水汽的抬升高度逐渐降低。

3.3 烟气速度的影响

当水汽出口温度、空气风速不变时，改变水汽出口速度，输入STAR-CD算例，得到排汽速度(即排汽量)对水汽扩散的影响。汽速越大，源强越大，各点浓度值也正比增大同时，汽速越大，烟气上升高度也增加，见图8。

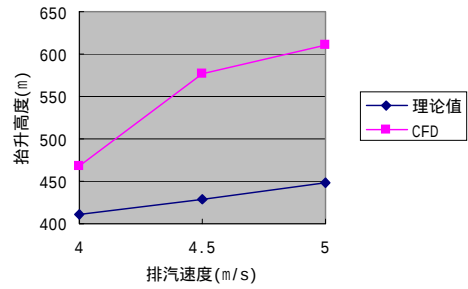


图 8 水汽抬升高度与烟气速度关系

3.4 排烟温度的影响

当水汽出口速度及风速不变，改变烟气出口温度，输入STAR-CD算例，得到排汽温度改变时对水汽抬升的影响。由图9可看出，水汽温度越高，水汽上升高度 H 越大，这与我国现行的计算烟气抬升高度基本一致。

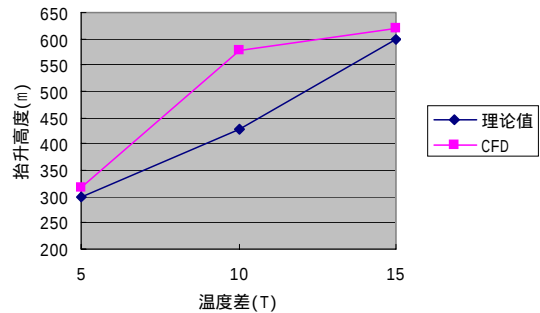


图 9 水汽抬升高度与排烟温度关系

3.5 速度场

三种不同工况冷却塔下风向的速度变化情况见图 10-图 12。

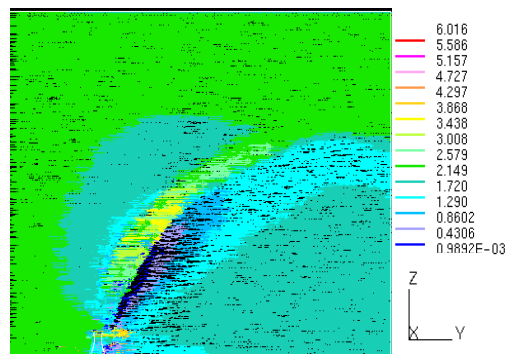


图 10 工况 1 风速对抬升的影响

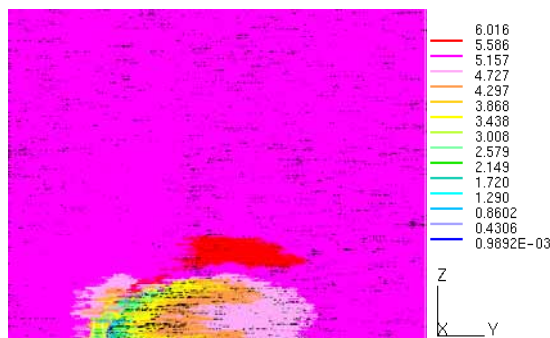


图 11 工况 2 风速对抬升的影响

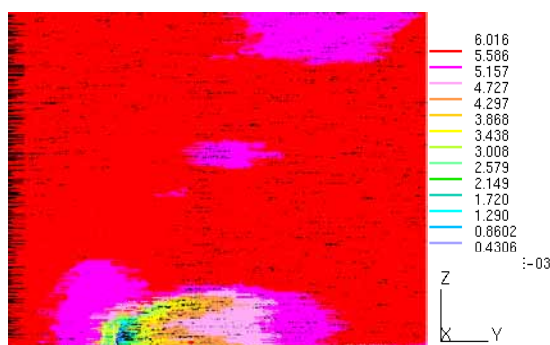


图 12 工况 3 风速对抬升的影响

从图 10-12 中可以看出,冷却塔水汽的排放速度受风速的影响非常明显,当冷却塔出口处风速大于 5.4m/s 时,场的扰动主要发生在距地较近的区域,但场的梯度明显增大。在下风向冷却塔附近塔壁方向发生局部大气回流和局部低压区,随着风速的增大,这个区域受到压制,逐渐收缩。但其强度逐渐增强。

4 结 论

分析可知,用 STAR-CD 计算所得水汽扩散与风速、汽速、水汽温度的关系与用高斯模式及其我国现用的计算烟羽抬升高度的统计规律一致。而且,STAR-CD 计算方便,便于对不同工况做比较。每次迭代约 60 次左右可达到收敛,且计算机的图形强大功能,其显示效果更为直观、形象。

参考文献:

- [1] Hanna S R. Predicted and observe cooling tower plume rise and visible plume length at the John E Amos Power Plant. Atmospheric Environment, 1976, 10, 1043-1052.
- [2] 张晓东, 郑永刚, 王清照. 空冷塔内外流场的数值分析[J]. 热能动力工程, 2000,

15(85): 52-54.

- [3] 王凯, 孙奉仲, 王伟. 自然通风湿式冷却塔空气动力场数值模拟[J]. 热力发电, 2006, 22(10): 26-29.
- [4] S.R. Hanna, G.A. Briggs, R.P. Hosker Jr., Cooling Tower Plumes and Drift Deposition, Handbook on Atmospheric Diffusion, US Department of Energy, 1982. 74-80.