

核电厂冷却塔水汽扩散影响因素的数值模拟

The Influencing Factors Numerical Simulation of Water Vapor Diffusion Regulation of The Nuclear Power Plant's Cooling Tower

郭栋鹏 徐向军 姚仁太

(中国辐射防护研究院 太原 030006)

摘要: 应用 $k-\epsilon$ (RNG) 湍流模型与拉格朗日离散相模型 (DPM) 相结合对 Chalk point 电厂冷却塔附近流场以及该冷却塔水汽抬升与扩散规律进行了相关的验证, 并与 SACTI 模式预测冷却塔水汽抬升与扩散规律以及 Meroney 采用 CFD 方法的计算结果进行比较。基于该验证结果, 分别对不同环境风速、环境温度、环境湿度、冷却塔水汽排放温度对水汽扩散的影响进行了相关的研究。结果表明, 环境风速与环境温度对冷却塔水汽扩散的影响较大, 而环境湿度对冷却塔水汽扩散的影响次之, 冷却塔水汽排放温度对水汽扩散的影响较小。并且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也逐渐增大; 随着冷却塔水汽排放温度的增大, 水汽地面沉积浓度也略降低。

关键词: 冷却塔 拉格朗日两相流 水汽抬升与扩散 影响因素

Abstract: The relevant validation of the flow field near the Chalk point power plant cooling tower as well as its water vapor uplift and diffuse law is carried out which apply the combination of $k-\epsilon$ (RNG) turbulence model and Lagrange discrete phase model (DPM), and compare with the predicted results of water vapor uplift and diffuse law of cooling tower which is used of SACTI model and Mooney's calculated results using CFD method in this paper. Based on the validation results, the author take the related research on the impact of the water vapor diffusion respectively of different ambient wind speed, ambient temperature, ambient humidity and temperature on the water vapor emissions from cooling tower. The results show that, ambient wind speed and ambient temperature have a lager impact on the cooling tower's water vapor diffusion, ambient humidity's impact followed, and the temperature on the water vapor emissions from cooling tower is less affected. Furthermore, with the increase of ambient wind speed and ambient temperature, the concentration of water vapor ground deposition of cooling tower decrease; with the increase of ambient humidity, the concentration of water vapor ground deposition of cooling tower also increase; with the increase of temperature on the water vapor emissions from cooling tower, the concentration of water vapor ground deposition of cooling tower decrease slightly.

Keywords: Cooling tower; Lagrange two phase flow; water vapor rise and diffusion; Influencing factors

1 引言

近年来,我国已在内陆地区作了大量的核电厂址选址工作,与沿海核电厂址相比,由于内陆核电厂址受环境水资源的限制较大,大多数内陆核电厂址考虑使用自然通风冷却塔二次循环散热方式,而在冷却塔内部冷空气与热水进行交换冷却的过程中,随着空气的上升,会产生大量水汽,并排放到大气环境中。由于冷却塔排放水汽与周围环境空气存在一定温度差,在水汽与环境空气进行热交换的过程中,凝结成的液滴可能会对附近烟囱排放的放射性污染物产生一定的影响或在冷却塔下风向形成降水,如在冬天,还可能在表面上结冰,会导致放射性核素湿沉积,在近场增加地面沉积外照射的风险。

在国外,关于冷却塔水汽的扩散做了大量的研究工作,其最初的研究目的同样是关心核电厂冷却塔排放水汽对附近烟囱排放放射性污染物的影响^[1,2],在我国,关于冷却塔水汽的扩散的研究一直处于空白。

国外关于冷却塔排放水汽对大气环境的影响主要关注以下几方面:1、冷却塔排放水汽对可见度的影响;2、冷却塔排放水汽与盐的沉积;3、近地面云雾与结冰;4、水汽形成的阴影;5、冷却塔附近环境湿度的影响。所有这些均对局地环境产生一定的影响,因此预测冷却塔排放水汽的抬升与扩散就成为一个基本的环境问题。并且一些国家要求其设计与拟建核电站必须对冷却塔对附近环境的影响进行相关的环境影响评价报告^[2]。

国外过去预测冷却塔水汽的扩散规律,应用较多的是 ISC3(Industrial Source Complex Short Term Model 3)与 SACTI(Seasonal Annual Cooling Tower Impact)模式。SACTI 模式是美国 Argonne 国家实验室环境影响研究中心的一些学者对 Chalk Point、Paradise 等电厂的 39 组单冷却塔现场试验数据和 Neurath、Amos 等电厂 26 组多冷却塔现场试验数据的基础上,总结了之前已有的 ORFAD、KUMULUS 等 16 种“第一代”冷却塔环境影响模型,发展的“第二代”冷却塔运行环境影响的预测模式。并且美国 NRC(核管会)推荐采用该计算模式对冷却塔环境影响进行预测计算,同时美国多家核电厂均使用 SACTI 模式对冷却塔的可见水汽的长度与抬升高度、水汽与盐沉积和结冰进行评价。

而这些模式均没有考虑附近建筑物与地形的影响,当冷却塔附近的建筑物与地形较复杂时,大多选择风洞试验或现场试验对冷却塔水汽的扩散进行研究。然而,它们或因成本原因或因预测精度不能满足要求在实际应用中存在一定局限性。并且风洞试验能够较好的模拟建筑物流场与气态污染物的扩散规律,而对于按一定粒径谱分布的粒子扩散与沉积规律的模拟研究合理性较差。

Kennedy、Fordyce^[3]和 Jain、Kennedy^[4]通过风洞试验研究了机械通风冷却塔水汽与风向的关系,Takenobu^[5]等人在风洞试验室用示踪气体代替机械通风冷却塔水汽的手段研究了冷却塔水汽的扩散范围及其热转换规律。Hanna^[6]等人报道了 1976 年美国对 Chalk Point 电厂冷却塔进行的水汽粒径谱的颜料示踪试验研究,结果表明:自然通风冷却塔的水汽直径大约在 10~1800 μm 范围,其中,10~70 μm 直径范围约占总质量的 56%。

随着计算流体力学(CFD)的不断发展,国外一些学者用CFD技术模拟整个空间范围内受复杂建筑物与地形影响时,冷却塔附近流场及其污染物扩散规律的研究。Bender^[7]使用CFD技术研究了二围范围内理想情况下冷却塔对周围流场的影响,Takata^[8]使用CFD技术研究了风对冷却塔排放水汽的影响,对三种不同尺度的冷却塔求解动量、能量、和湿度方程,并将计算的水汽尺度和冷却塔水汽照片进行对比。Meroney^[9]用CFD技术模型验证了Chalk Point电厂冷却塔排放水汽的扩散与沉积规律,并且取得了较好的一致性。

本研究的主要目的有:(1)使用CFD技术验证Chalk Point电厂冷却塔对流场的影响以及冷却塔排放水汽抬升与扩散规律;(2)使用CFD技术研究环境风速、环境温度、环境湿度以及冷却塔水汽排放温度对排放水汽扩散的影响。

2 模拟方法

2.1 数值模拟方法

本文以雷诺平均N-S方程为控制方程,以 $k-\epsilon$ (RNG)模型为湍流模型,用拉格朗日离散相模型(DPM)对水汽混合过程气液两相流动进行数值模拟。采用拉格朗日观点描述液相场液滴的运动,液滴的轨迹跟踪由DPM模型完成;采用的SIMPLE算法进行气相场计算。

湍流模式理论中应用最广泛的模型是 $k-\epsilon$ 系列模型,在该系列模型中又以标准 $k-\epsilon$ 模型最著名,但是因为标准 $k-\epsilon$ 模型采用了湍流各向同性假设,因此在不满足各向同性假设的湍流区,该模型不能准确的模拟^[10]。针对标准 $k-\epsilon$ 模型出现的不准确性问题,Yakhot和Orszag^[11]于1986年提出 $k-\epsilon$ (RNG)模型的原始模型。1992年2月,Smith和Reynolds^[12]指出 $k-\epsilon$ (RNG)模型在推导过程中的错误。同年5月,Lam^[13]对 $k-\epsilon$ (RNG)模型的物理概念进行了解释。7月,Yakhot和Orszag^[14]用双向拓展法(double expansion technique)得到目前被广泛使用的 $k-\epsilon$ (RNG)模型。1994年Yakhot和Orszag^[15]针对 $k-\epsilon$ (RNG)模型的奇异解问题进行了研究,并给出粘性参数的取值范围,以避免出现奇异解。

2.2 模型的建立

本文物理模型基于美国Chalk Point电厂自然通风冷却塔排放水汽现场示踪试验数据,该冷却塔高度为124m,底部直径114m,顶部出口直径54.8m,该电厂周围三面环海,周围地形结构简单,周围地形见图1。水汽排放温度315.3T,环境温度295.3T,环境相对湿度93%,水汽排放速率4.5m/s,水汽粒径谱分布见图1,试验期间测量100m处环境风速为8m/s。50m处环境湍流强度为0.1。水汽地面沉积测量点的位置位于以冷却塔为圆心,以0.5km与1.0km为半径,下风向35°的圆弧上每隔5°布一个点^[9]。



图1 Chalk Point电厂冷却塔及周围地形

本次数值模拟区域以冷却塔为中心，在冷却塔下风向取5km，冷却塔上风向取2km，左右两侧分别取1.5km，高度为1.5km。模拟区100m以上环境风速采用常数8m/s，环境湍流强度、100m以下环境风速、温度与环境湿度均使用相应的廓线，见图2。

由于液滴的粒径分布对气液两相流计算的影响比较大，并且冷却塔水汽混合过程中，液滴直径大约分布在10-1800 μm 之间^[9]。为了较真实地模拟实际情况，本文采用Rosin-Rammler模型模拟液滴的粒径分布。

Rosin-Rammler模型中，某一粒径 d 的液滴的质量分数为 $M = \exp(-(d/d_{\text{mean}})^n)$ ，其中 d_{mean} 为平均直径， n 为散布指数，本次计算 $d_{\text{mean}} = 0.09\text{mm}$ ， $n = 0.65$ ，水汽粒径谱分布见图1。

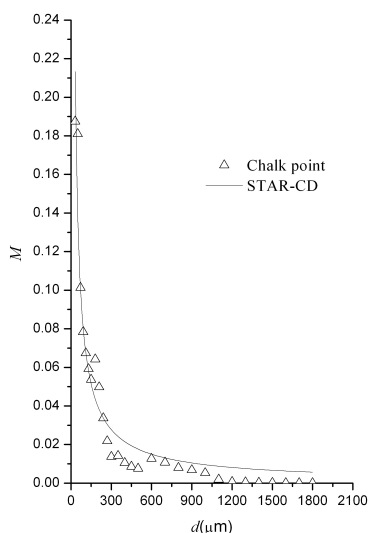


图1 冷却塔排放水汽粒径谱分布

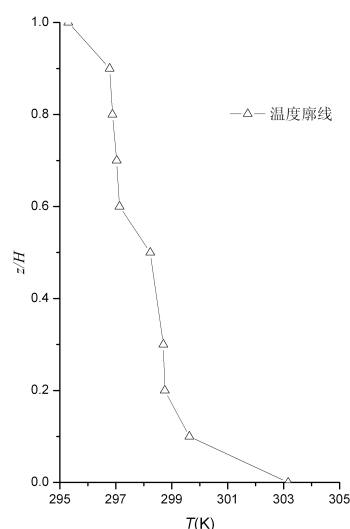
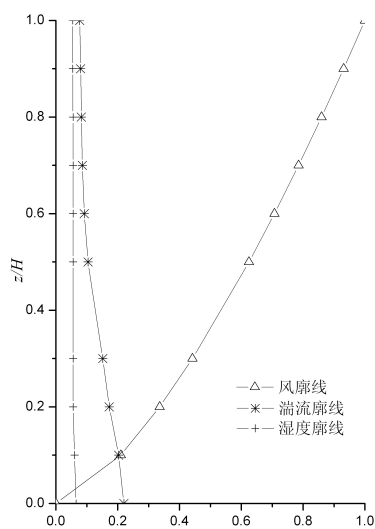


图2 数值模拟边界条件

(注：图1中M表示不同粒径粒子所占比例，图2中风速廓线横坐标为 U/U_0 ，湿度廓线横坐标单位为 kg/kg)

3 模拟方法的有效性分析

选用STAR-CD自带的 $k - \varepsilon$ (RNG)模型计算了Chalk point电厂冷却塔附近流场的变化，结合DPM模型验证了该电厂冷却塔示踪试验结果，并与SACTI模式计算的水汽抬升高度与地面沉积浓度以及Meroney应用其它CFD软件的计算结果进行比较。

3.1 流场特征

图3给出了沿风向轴线距冷却塔不同距离处的速度和湍流强度随高度的变化情况, 计算结果基本上反映了冷却塔对流动的影响。冷却塔顶上有气流加速现象, 靠近塔顶的风层中, 速度廓线变得较均匀, 几乎没有垂向风切变。从冷却塔顶开始的下风向, 尾流区(包括回流区)风速明显减小, 湍流强度显著增大, 并且在下风向 $1.0H(H$ 为冷却塔高度)处速度亏损达到最大, 其速度仅为相应来流的20%~30%, 湍流动能也达到最大, 湍流强度增大到0.8左右。然后随着下风距离的增大, 气流混合逐渐均匀, 湍流强度逐渐减小, 速度廓线与湍流强度的垂向分布趋近于来流状况。湍流强度较大的区域主要出现在回流区附近。

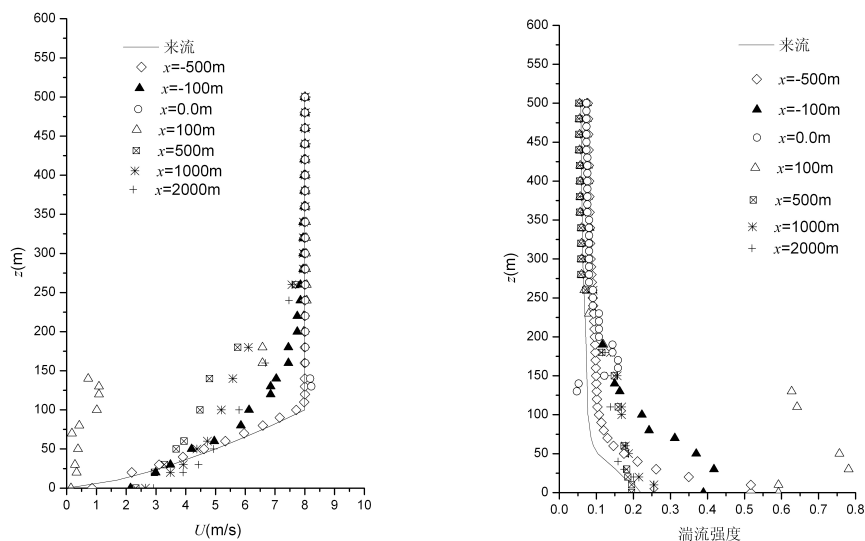


图3 冷却塔不同距离处速度和湍流强度随高度(z)的变化

3.2 水汽抬升高度验证

为了验证采用CFD技术对Chalk point电厂冷却塔示踪试验水汽抬升模拟的合理性, 本文分别引用了该电厂冷却塔下风向不同距离处的水汽高度的观测值^[6], 同时与Meroney应用其它CFD软件对Chalk point电厂冷却塔示踪试验关于水汽抬升高度的验证结果以及Hanna使用Briggs烟羽抬升公式得计算结果进行比较^[9], 并且与SACTI模式的计算结果进行相互验证。验证结果见图4。

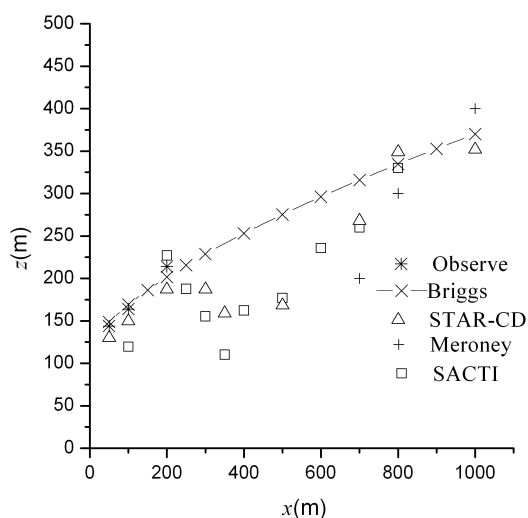


图4 Chalk point电厂冷却塔水汽高度比较

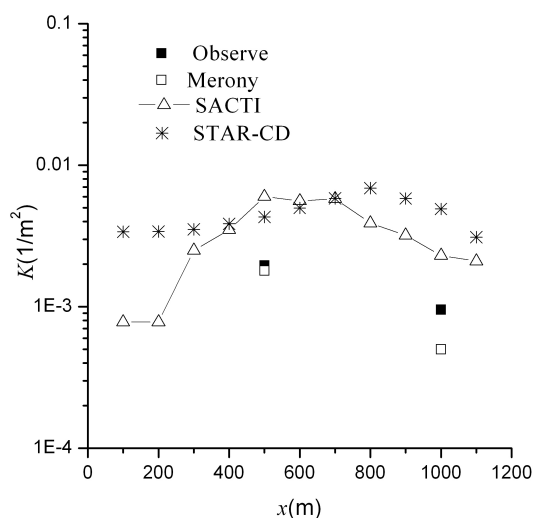


图5 Chalk point电厂冷却塔水汽地面沉积浓度比较

由图可知, 本文数值模拟结果与Chalk point电厂冷却塔示踪试验水汽抬升观测高度(50–200m范围)以及Hanna使用Briggs烟羽抬升公式($H=1.6F^{1/3}x^{2/3}/U$, 其中 $F=2100\text{m}^4/\text{s}^3$, $U=8\text{m/s}$)^[9]的计算结果近距离处比较吻合, 在远距离处有一定偏差, 在整个计算区域范围内与SACTI模式的计算结果比较吻合。

在远距离存在偏差的主要原因可能是由于Briggs抬升公式没有考虑水汽的沉积、环境湿度与水汽粒子之间的相互作用对水汽抬升得影响。Meroney应用其它CFD软件对Chalk point电厂冷却塔示踪试验验证的过程中没有考虑环境湿度对水汽抬升的影响^[9], 所以在远距离处Meroney的计算结果与Briggs烟羽抬升公式的预测结果比较吻合。

3.3 水汽沉积浓度验证

Chalk point电厂冷却塔示踪试验分别在下风向地面轴线0.5km、1.0km处测量地面浓度, 本文分别选用CFD模拟结果与SACTI模拟结果以及Meroney^[9]的计算结果进行比较, 为方便比较采用归一化浓度 $K = \frac{c^* \cdot u}{Q}$ 计算地面浓度值, 其中 c^* 为下风向不同距离处的体积浓度值, U 为环境风速, Q 为源强(水汽的体积排放速率), 详见图5。

由图5可知, 与SACTI模式相比, 本文数值模拟计算结果整体变化趋势与之一致, 但是最大值出现的距离比SACTI远约200m, 并且本文数值模拟结果地面沉积浓度最大值是SACTI模式计算地面沉积浓度最大值的1.3倍, 主要原因可能本次数值模拟考虑了粒子之间的相互作用以及粒子本身的物理变化。

与Chalk point试验结果以及Meroney模拟结果相比, 0.5km处本文数值模拟计算地面浓度值与Chalk point试验结果比较接近, 而与Meroney模拟结果有一定差异, 本文数值模拟计算地面浓度值比Meroney计算地面浓度值计算地面浓度值大0.5倍, 1.0km处本文数值模拟计算地面浓度值与Chalk point试验结果以及Meroney模拟结果差异较大, 主要原因是由于本次试验考虑了环境湿度以及粒子本身的物理变化对水汽沉积的影响, 而Chalk point试验与Meroney模拟均没有考虑环境湿度对水汽沉积的影响。

3.4 验证结果分析

由上述分析表明, $k-\epsilon$ (RNG) 湍流模型能够较好的模拟冷却塔对附近流场的影响, 该模型结合拉格朗日轨迹模型能够较好的模拟水汽的扩散规律, 并且模拟结果能与Chalk point电厂冷却塔示踪试验结果以及SACTI模拟结果较好吻合。

4 环境条件对冷却塔排放水汽扩散的影响

由于冷却塔水汽的扩散过程中伴随着质量、动量和热量转移, 并且水汽的扩散规律与环境条件的关系比较密切, 一般情况下影响冷却塔水汽扩散的因素主要有环境风速、温度等。风速的大小, 决定着湍流扩散的强弱。一般认为, 风速越大, 水汽的蒸发率越高。温度主要控制环境空气湿度,

间接影响水汽蒸发。与一般大气污染物的扩散相比，水汽的扩散主要包括蒸发、扩散以及一些水汽所特有的物理化学相变而引起其自身浓度的变化，而一般大气污染物在短期的扩散过程并没有包括其自身的蒸发以及物理化学相变。

本文同时对环境风速、环境温度、环境湿度以及水汽排放温度的变化对冷却塔水汽的扩散规律进行了研究（保持其他三种条件不变的情况下，改变另外一种条件），然后采用归一化浓度计算地面浓度值。图6分别给出了本次计算条件下风廓线与温度廓线。

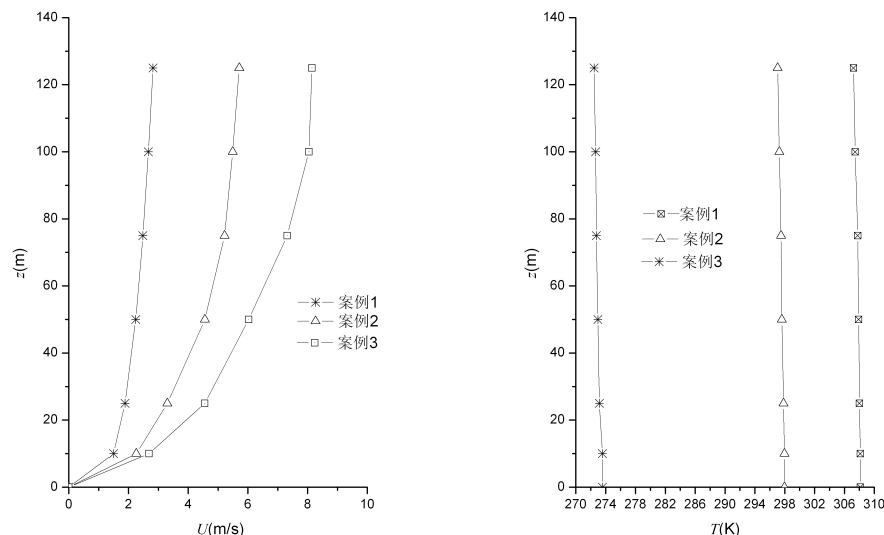


图6 不同计算条件下风廓线与温度廓线

4.1 环境风速的影响

不同风速条件下 ($U_{100}=2.6\text{m/s}$, 5.5m/s , 8m/s)，冷却塔下风向不同距离处地面轴线浓度值计算结果见图7。

由图7可知，数值模拟水汽的扩散符合正态分布规律。不同风速情况下，最大地面浓度值均出现在冷却塔下风向 $0.5\text{km}-1.0\text{km}$ 区域的范围内，随着风速的增大，水汽的蒸发率越大，下风向地面浓度值逐渐降低，并且最大值出现的距离较远。所以风速越大，越有利于水汽的扩散。

4.2 环境温度的影响

环境温度对水汽扩散的影响主要有水汽蒸发和扩散的两个过程，水汽蒸发主要表现在当液滴内部水分子处于连续运动状态时，环境温度越高，液滴表面的一些分子得到的动能大于其他水分子对它的吸引力，就逸出到大气环境中；温度对水汽扩散的影响主要由于温差而引起的下层暖湿空气上升和上层冷干空气的下沉。

本文在相同大气稳定度 (D类) 下分别计算了三种不同环境温度条件下冷却塔水汽的扩散规律，同时选取冷却塔下风向不同距离处地面轴线浓度值进行比较，结果见图8。

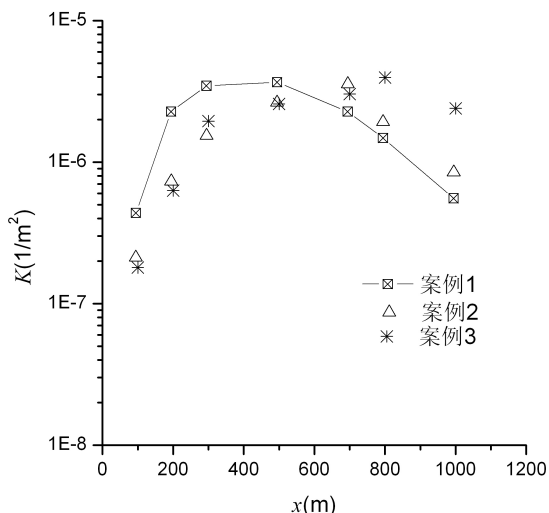


图7 不同风速条件下地面轴线浓度

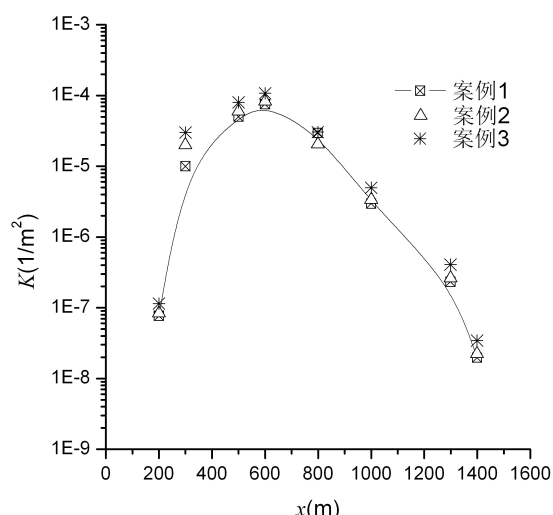


图8 不同温度条件下地面轴线浓度

由图 8 可知，随着环境温度的增大，排入大气环境中水汽的蒸发量也随之增大，所以沉积到地面的水汽浓度值随之降低。主要原因是由于在环境湿度相同的情况下，随着干球温度的升高湿球温度同时升高，并且环境温度越高，排入大气环境中的水汽与周围环境空气之间蒸汽压差值越大，而蒸汽压差值越大，水汽蒸发量越大。所以在湿度相同的情况下，环境温度较高时，下风向地面水汽沉积浓度较低。

4.3 环境湿度的影响

保持环境风速、温度等因素不变的条件下，本文对环境湿度的影响作了研究，结果见图 9。

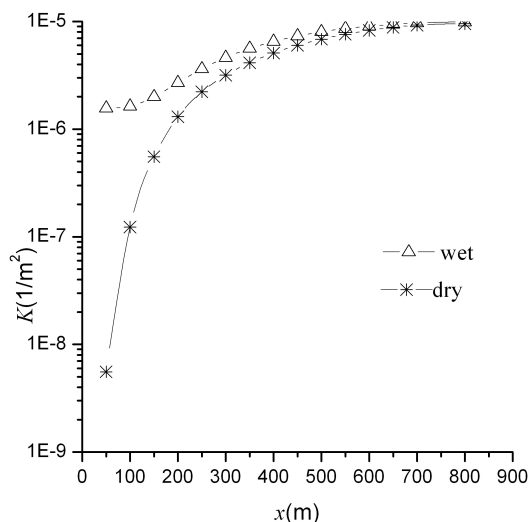


图9 不同湿度条件下地面轴线浓度

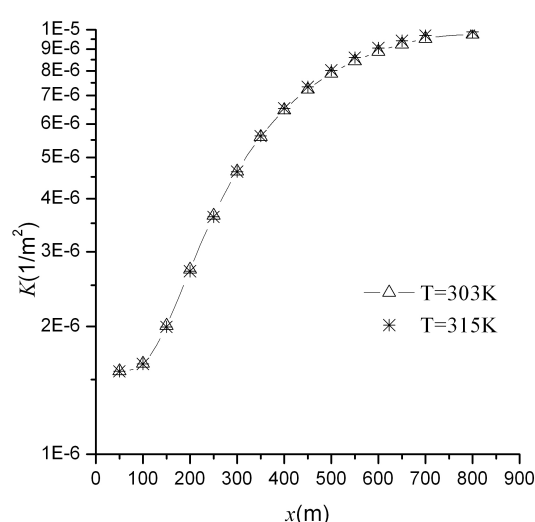


图10 不同排放温度条件下地面轴线浓度

(注：wet 表示计算过程中考虑环境湿度，dry 表示计算过程中不考虑环境湿度)

如图 9 所示, 不考虑环境湿度的情况下, 蒸发量比较大, 所以地面的沉积浓度较小; 反之, 地面的沉积浓度较大。

主要原因是由于在不同位置处, 排入大气中水汽表面与周围环境空气存在的蒸气压差异, 从而导致不同的蒸发量, 并且环境湿度不同, 受冷却塔影响的区域也存在差异。总之, 环境湿度越大, 冷却塔下风向地面水汽沉积浓度越大, 受冷却塔影响的区域越大。

4.4 冷却塔水汽排放温度的影响

保持环境条件不变的情况下, 本文研究了冷却塔排放水汽温度对水汽地面沉积浓度的影响, 见图 10。由图 10 可知, 冷却塔排放水汽温度对水汽地面沉积浓度的影响不大, 当排放水汽温度不同时, 排放水汽与周围环境空气的蒸气压差不同, 并且排放温度越高, 蒸气压差越大, 水汽蒸发量越大, 所以冷却塔排放水汽温度较低时, 下风向地面轴线沉积浓度略大。而此过程主要发生在排放水汽与周围环境空气的热交换过程, 并且排放水汽与周围环境空气的热交换过程在较短的时间内可达平衡, 所以, 水汽的排放温度对下风向水汽沉积浓度的影响较小。

5 结论与讨论

对 Chalk Point 电厂冷却塔流场研究表明: 冷却塔的存在引起流场的空气动力学畸变, 这种畸变场的特征是随着距冷却塔的距离的增加而逐渐衰减, 并且冷却塔使得湍流强度和湍流尺度增加。

对 Chalk Point 电厂冷却塔水汽的抬升与扩散的验证结果可知, DPM 模型与 $k - \varepsilon$ (RNG) 湍流模型能较好的模拟水汽的扩散与抬升, 并且本数值模拟结果与 SACTI 计算结果可较好的吻合, 但是与 Meroney 的计算结果有一定的差异, 主要原因是由于 Meroney 在模拟过程中没有考虑环境湿度对冷却塔水汽抬升与扩散的影响, 这可能是导致与本模拟结果差异的主要原因。与 Meroney 的计算结果相比, 其他条件相同的情况下, 考虑环境湿度时, 近距离处水汽的抬升高度增加了 25%, 并且近距离处水汽的地面沉积浓度增大了约 0.5 倍; 随着距离的增加, 抬升高度的计算结果逐渐相同, 地面沉积浓度略有不同, 因此, 本文认为, 在预测冷却塔排放水汽对大气环境的影响时应考虑环境湿度对水汽扩散的影响。

从环境条件对水汽扩散的影响计算结果可知: 环境条件的变化对冷却塔水汽的扩散均有一定影响, 相对于环境湿度与水汽排放温度对水汽扩散的影响, 环境风速与环境温度对冷却塔水汽扩散的影响较大。环境风速的越大, 水汽的最大落面浓度越低, 并且最大落地浓度距排放源的距离也越远; 环境温度越高, 排放水汽的蒸发量越大, 从而导致地面沉积浓度越小, 下风向的影响区域越小; 环境湿度越高, 水汽的地面沉积浓度越大, 并且影响区域也越大; 冷却塔排放水汽的温度越高, 地面沉积浓度略有降低, 但是影响区域有一定的增大。

6 参考文献

- [1] M. Lucas, P. J. Martínez, On the influence of psychrometric ambient conditions on cooling tower drift deposition[J]. Heat and Mass Transfer. 2010, 53: 594 - 604.
- [2] A J Policastro, W E Dunn. A model for seasonal and annual cooling tower impacts[J]. Atmospheric Environment. 1994, 28, 3: 379-395.
- [3] Kennedy, J. F, Fordyce. Plume recirculation and interference in mechanical-draft cooling tower [J], Cooling Tower Environment. 1974, 58
- [4] Jain, S. C, Kennedy, J. F, Modeling near-field behavior of mechanical draft cooling tower plumes environmental effects of cooling tower plumes[J]. WRRRC Special Report. 1978, 9: 13.
- [5] Takenobu Michioka, Ayumu Sato, Wind tunnel experiment for predicting a visible plume region from a wet cooling tower[J], Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2007, 95: 741-754.
- [6] S. R. Hanna, A simple drift deposition model applied to the chalk point dye tracer experiment[J], Symposium on Environmental Effects of Cooling Tower Plumes. 1978. 9: 105-118.
- [7] D. J. Bender, D. Kerksen, K. S. Rezkallah, Numerical study of wind flow over a cooling tower[J], Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1993, 47: 657 - 664.
- [8] K. Takata, K. Nasu, H. Yoshikawa, Prediction of the plume from a cooling tower[J], Cooling Tower Institute Annual Conference. 1996, 27.
- [9] R. N. Meroney, CFD prediction of cooling tower drift[J], Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2006, 94: 463 - 490.
- [10] David C Wilcox, Turbulence Modelling for CFD, Second Edition, DCW Industries. 1994.
- [11] V. Yakhot, S. A. Orszag, Renormalized Group Analysis of Turbulence: I Basic Theory[J], Scientific Computing. 1986, 1: 3-5.
- [12] Smith, L M; Reynolds, W C, On the Yakhot-Orszag renormalization group method for deriving turbulence statistics and models[J], Physics of Fluids. 1992, 4: 364-390.
- [13] Lam, S H, On the RNG theory of turbulence[J], Physics of Fluids. 1992, 4: 1007-1010.
- [14] V Yakhot, S A Orszag, S Thangam, Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique[J], Physics of Fluids. 1992, 4: 1510-152.
- [15] V Yakhot, I Staroselsky, S. A. Orszag, Asymptotic behavior of solutions of the renormalization group K-epsilon turbulence model[J], AIAA Journal. 1994, 32: 1087-1089 .