

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.06.012

# 逆流湿式自然通风排烟冷却塔的数值模拟

牛冉<sup>1</sup>, 李林敏<sup>1</sup>, 闻学宇<sup>2</sup>, 李宝宽<sup>1</sup>

(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国能源建设集团 辽宁电力勘测设计院有限公司, 辽宁 沈阳 110179)

**摘要:** 基于气液两相传热传质及流动理论, 针对冷却塔内不同区域的工作特性, 建立了加入烟道后逆流湿式自然通风冷却塔三维数学模型. 采用欧拉-拉格朗日方法对塔内连续相和离散相运动进行分析, 考察了烟道对冷却塔性能的影响, 同时研究不同侧风速度下排烟冷却塔的工作状态, 将所得结果与传统冷却塔进行对比. 结果表明: 常规冷却塔内加入排烟管会增强冷却塔的冷却效果; 侧风会减小冷却水在冷却塔中的温降且不利于塔口烟气排放; 侧风会加剧冷却塔上部内壁面腐蚀情况.

**关键词:** 烟冷却塔; 数值模拟; 多相流; 传热传质; 侧风

**中图分类号:** TK 121      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2017)06-0819-04

## Numerical Simulation of Counter Flow Natural Draft Wet Cooling Tower with Flue Gas Injection

NIU Ran<sup>1</sup>, LI Lin-min<sup>1</sup>, WEN Xue-yu<sup>2</sup>, LI Bao-kuan<sup>1</sup>

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Liaoning Electric Power Survey and Design Institute Ltd, China Energy Engineering Group, Shenyang 110179, China. Corresponding author: LI Bao-kuan, E-mail: libk@smm.neu.edu.cn)

**Abstract:** Aiming at working characteristics of different zones in cooling tower, a three-dimensional numerical model of counter flow natural draft wet cooling tower with flue gas injection was established based on the theories of heat/mass transfer and flow between air and water. The motion of continuous and dispersed phases in cooling tower was investigated by Euler-Lagrange approach and the effect of cooling performance by setting up flue gas injection had also been taken into account. Meanwhile, the working performance of cooling tower under diverse crosswind velocities was analyzed, in contrast with that in a traditional cooling tower without flue gas injection. The results showed that the setup of flue gas injection had positive effect on the working efficiency of cooling tower. The crosswind decreased the drop degree of cooling water, which was harmful to gas emission. Moreover, crosswind could also increase corrosion drastically near the tower outlet.

**Key words:** cooling tower with flue gas injection; numerical simulation; multiphase flow; heat and mass transfer; crosswind

冶炼厂及热电厂产生的废烟气经烟囱排入大气, 为达到环保标准, 烟气在排放前需加热到一定温度以确保其扩散高度, 这需要消耗更多能源. 德国开发了一种将待加热的烟气通过烟道引入冷却塔, 利用冷却塔排出的湿热空气对烟气进行抬升的技术, 即“烟塔合一”技术. 研究发现, 这一方法排放烟气扩散效果好且节能<sup>[1-2]</sup>. 近年来, “烟塔合一”技术在我国也逐渐得到应用. 在逆流湿式排烟冷却塔中, 冷却水经喷淋喷洒到填料区, 在填

料区底面汇聚形成雨滴, 直至滴落到冷却塔底部的集水池<sup>[3]</sup>. 冷空气从塔底部进风口进入, 与向下运动的冷却水直接接触换热同时进行质量和动量的传递, 形成湿热空气. 湿热空气裹携伸入冷却塔的烟道排出的烟气, 经塔筒由塔口排出.

国内外现有研究主要针对常规冷却塔, 对排烟冷却塔这一新技术的研究较少. Eldredge等<sup>[4]</sup>考察了烟气流速、温度、烟道所在位置以及方向对冷却性能的影响, 发现烟气温度对冷却水温度变

收稿日期: 2015-12-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574068).

作者简介: 牛冉(1990-), 女, 辽宁阜新, 东北大学博士研究生; 李宝宽(1963-), 男, 辽宁辽阳人, 东北大学教授, 博士生导师.

化影响最大. Al-Waked 等<sup>[5]</sup>研究了不同工作状态下常规冷却塔内传热传质效果,发现喷嘴数量越多、水滴直径越小,冷却塔的冷却效果越好. 陈凯华等<sup>[6]</sup>对湿热烟气与大气的混合过程的流场进行了研究,湿热空气对净烟气具有携带和包覆效果. Klimanek 等<sup>[7-8]</sup>对塔内多相流区采用欧拉-欧拉模型进行计算,指出将烟道加入常规冷却塔中有利于冷却塔的热力性能,同时证实随着外界风速的增大,冷却水出水温度升高.

本文根据大连甘井子热电厂实建排烟冷却塔,建立了逆流湿式自然通风排烟冷却塔三维模型. 采用欧拉-拉格朗日方法计算塔内两相流的传热传质,对加入烟道后烟气排出对冷却塔各区冷却性能的影响进行研究,同时考虑在不同环境风速下冷却塔冷却效果的变化,并对侧风可能产生塔筒腐蚀区域进行预测.

## 1 数学模型

### 1.1 几何模型

冷却塔物理模型如图 1 所示. 该冷却塔外形为双曲线形,塔高 120 m,塔出口直径 48 m,空气入口处塔径 78.2 m,烟气从距离塔底 33.1 m 高度处的直径为 6.4 m 的烟道进入. 其整体结构如图 1b 所示. 塔内部由上到下分为喷淋区、填料区和雨区,其内部结构如图 1a 所示.

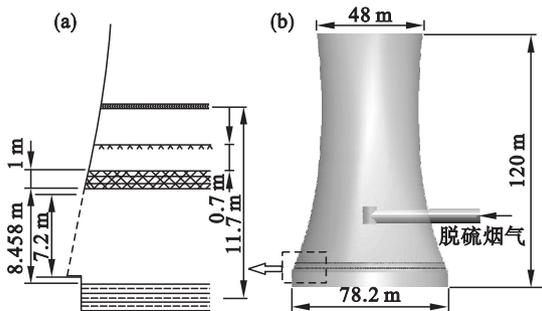


图 1 排烟冷却塔结构图

Fig. 1 Structure of cooling-tower with flue gas injection

### 1.2 控制方程

#### 1.2.1 连续相控制方程

塔内湿空气为连续相,采用欧拉方法,其质量、动量及能量守恒方程可统写为

$$\nabla \cdot (\rho_a u \varphi - \Gamma_\varphi \nabla \varphi) = S_\varphi. \quad (1)$$

式中: $\rho_a$  为湿空气密度; $\varphi$  为各参数的标量; $S_\varphi$  为气液相互作用产生的质量源项、动量源项和能量源项.

#### 1.2.2 离散项控制方程

采用拉格朗日方法对离散相水滴进行跟踪.

冷却水滴在塔内运动时,会受到重力、曳力、虚拟质量力和升力. 根据牛顿第二定律,冷却塔中水滴的运动方程为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g}{\rho_p}(\rho_p - \rho_a) + F. \quad (2)$$

式中: $u, u_p$  分别为连续相与离散项液滴的速度; $F_D$  为曳力系数; $\rho_p$  为液滴密度; $F$  为连续相对水滴的源项作用力. 计算中未考虑液滴的碰撞、破碎及合并.

#### 1.2.3 相间传热传质

考虑相间质量传递、动量传递以及能量传递. 单位面积水滴摩尔蒸发量为

$$S_m = k(c_p - c_a). \quad (3)$$

式中: $k$  为传质系数; $c_p$  为液滴表面蒸汽浓度; $c_a$  为湿空气中蒸汽浓度.

相间传热量由两部分构成,分别为气液两相对流换热量以及离散相蒸发潜热:

$$S_h = h(T_p - T_a) + S_m c_p (T_p - T_a). \quad (4)$$

式中: $h$  为两相间传热系数; $T_p, T_a$  分别为液滴和空气的温度; $c_p$  为液滴比热容.

### 1.3 计算网格及边界条件

取直径 200 m,高 300 m 的圆柱区域为环境区域. 烟道口为速度入口,环境区域侧面分别为压力入口与压力出口. 计算区域网格截面及边界条件如图 2 所示. 喷淋面为离散相水滴入口,水滴直径取 5 mm,离散相注入簇的个数与喷淋实际数目一致. 考虑侧风时,风速值随大气高度变化而变化,侧风速度可描述为

$$u = u_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^m. \quad (5)$$

式中: $u_0$  为测量风速值; $z_0 = 2$ ;  $m = 0.1$ . 周围大气环境视为等温<sup>[9]</sup>.

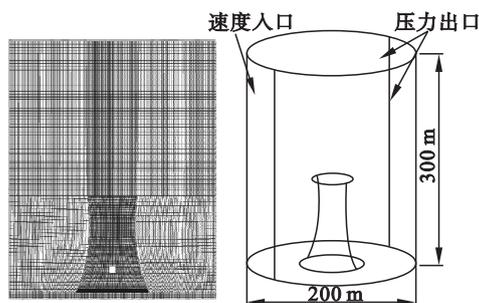


图 2 网格及边界条件示意图

Fig. 2 Schematic of mesh and boundary conditions

## 2 结果与讨论

### 2.1 模型验证

出水温度是冷却塔冷却性能的标志,本文采

用文献[9]中实际测量的排烟冷却塔的出水温度验证数学模型,测量的三种工况如表1所示.计算得到的冷却水温降与实际测量值对比如表2所示,计算值与测量值吻合较好,最大误差在7.5%以内,验证了采用该模型对排烟冷却塔内的传热传质进行计算的可行性.计算值小于测量值是由于测量塔尺寸稍大于该模型塔的尺寸,造成冷却效果上的差别.

表1 实际测量的三种不同工况

Table 1 Three measured operating conditions

工况	环境干球温度/℃	环境湿球温度/℃	风速 m·s <sup>-1</sup>	冷却水流量 kg·s <sup>-1</sup>	入水温度/℃
C1	7.1	3.4	1.60	14 876	29.2
C2	9.2	4.1	1.49	14 876	30.0
C3	9.1	4.1	1.55	14 876	29.7

表2 计算值与测量值的比较

Table 2 Comparison of measured and calculated value

工况	测量值/℃	计算值/℃	差值百分比/%
C1	10.0	9.3	7.5
C2	10.1	9.6	5.2
C3	9.9	9.7	2.1

### 2.2 烟气对冷却效果的影响

在验证该模型计算的可行性后,利用该模型对烟气温度为70℃,冷却水入塔温度为40℃,环境温度为15℃下排烟冷却塔内温度场及流场进行计算.通过气液两相耦合对液相进行分析,得到不同侧风风速下排烟冷却塔的出水温度.所得结果与传统无烟道冷却塔进行对比,结果如图3所示.在相同运行工况下,“烟塔合一”的冷却水温降大于传统冷却塔的冷却水温降,在风速为5 m/s时,两者之差达到最大,为0.24 K.分析是由于烟气的加入增加了塔筒中气流的总流量,同时高温烟气增大了出口处与大气环境密度差,增大了塔筒对空气的抽力,因此增强了塔内的传热传质效果.

### 2.3 侧风对冷却效果的影响

随着环境侧风风速的增大,冷却塔的出水温度不断提高,可见外界气流的作用会影响排烟冷却塔内部的冷却效率.图4为塔内冷却水的温降随风速的变化规律.可以发现,温降随风速增大而减小.这是由于侧风使塔口排出的烟雾混合物在塔口背风侧形成一定区域的停滞及回流,使塔口压力升高,从而阻碍热量的排出.大部分温降发生在填料区,冷却水流经填料区的温降随着风速的增大而减小,但其温降维持在总温降的60%左右.雨区温降随风速的增大而增大,说明侧风加强了雨区换热,喷淋区温降则受侧风风速的影响较

小.流经烟塔的气体流量是影响其换热强度的主要因素,图5为不同风速下塔筒内流体质量流量.研究发现,随着风速的增大,塔筒内的流量不断减小,且在风速大于3 m/s后,减小程度更为显著.这是由于风速越大,空气在塔底进气口处的动量损失就越大<sup>[10]</sup>,因而造成流经塔筒的流量减小.

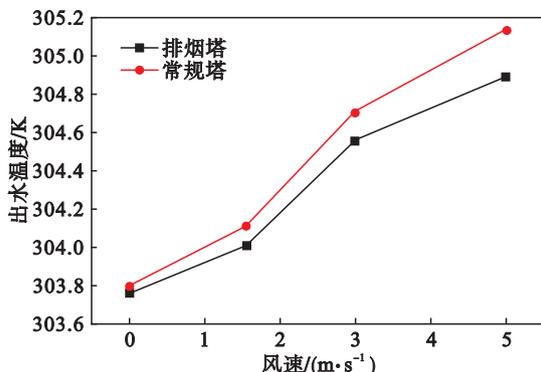


图3 侧风下排烟冷却塔与传统冷却塔的比较

Fig. 3 Comparison of cooling performance between cooling towers with and without flue gas injection

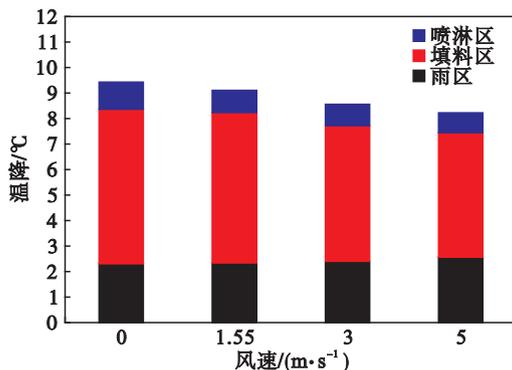


图4 侧风对冷却塔内各区域的影响

Fig. 4 Influence of crosswind on each part of cooling tower

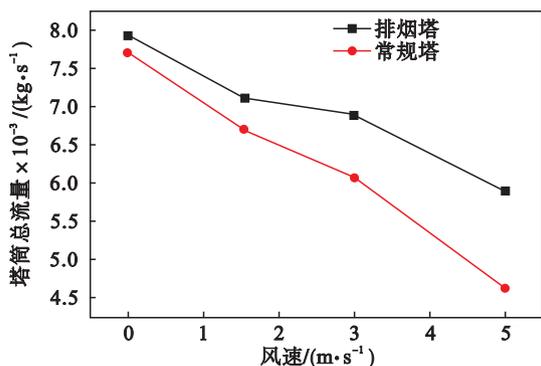


图5 不同风速下冷却塔内总通流量

Fig. 5 Total flux through cooling tower under various crosswind velocities

### 2.4 侧风对烟气排放的影响

图6为侧风下塔周及塔底进气口空气对烟气作用流线,反映出空气对烟气的运动影响.同时考

考虑侧风下空气对冷却塔出口与入口的湍流作用,研究了不同风速下塔内流场.图 7 为在侧风速度 3 m/s 时冷却塔内的温度分布.冷却水与空气换热且发生相变后,塔内温度趋于均匀分布.从图中还可观察到从排烟冷却塔出口排出的上升“烟雾”在侧风作用下的扩散形态,混合热蒸汽改变原有竖直排放状态向风向扩散,削弱了向上的动力,因而排放的“雾羽”抬升高度受到影响,可见侧风不利于烟气的高空排放.

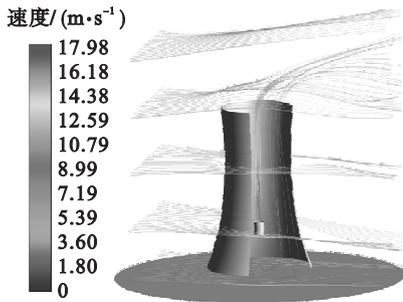


图 6 侧风 3 m/s 时不同高度处的流体流线

Fig. 6 Streamlines released at various elevations for crosswind velocity of 3 m/s

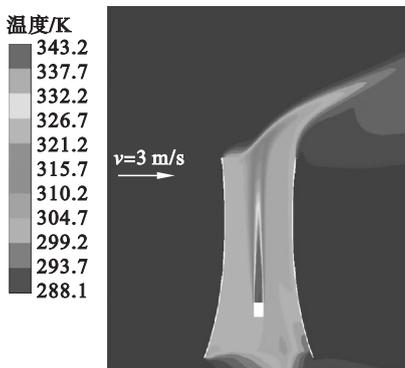


图 7 侧风 3 m/s 时排烟塔温度分布

Fig. 7 Contour of temperature in cooling-tower for crosswind velocity of 3 m/s

侧风会使烟塔出口处组分分布发生变化,图 8 为不同风速下冷却塔口  $\text{SO}_2$  的质量比云图.在侧风作用下,塔内及塔口气流受到扰动,使烟气分布发生变化.随着风速增大,内壁迎风面侧  $\text{SO}_2$

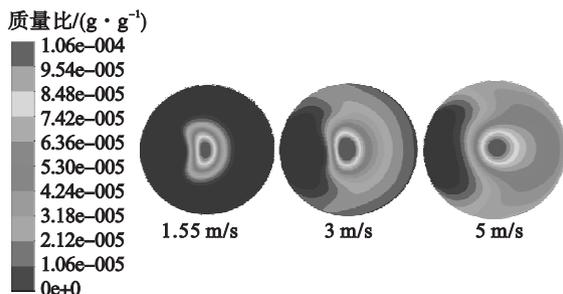


图 8 不同风速下塔口的  $\text{SO}_2$  质量比

Fig. 8  $\text{SO}_2$  mass ratio of tower outlet under various crosswind velocities

浓度增大,在风速增大到 3 m/s 时,烟气就与塔筒内壁有局部区域的接触.水蒸气与烟气混合形成腐蚀性物质,与塔壁接触会腐蚀塔壁,因此在该区域塔内壁应加强防腐措施.

### 3 结 论

1) 冷却塔加入排烟管道后,可增强冷却塔的冷却效果,降低出水温度.

2) 侧风减弱排烟冷却塔冷却效果,冷却水温降随风速增大而减小,塔内通风量随风速增大而减小.排烟冷却塔受侧风影响小于常规冷却塔.

3) 侧风降低“烟雾”排放高度,侧风风速达到 3m/s 时,烟气中的酸性气体与塔内壁接触,会对塔壁造成腐蚀,需要采取防腐措施.

### 参考文献:

- [1] Tan C Y, Zhu H, Hu H H, et al. Analysis on the technical solutions of the heat source of the geothermal heat pump system [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 953/954 (6): 650 - 654.
- [2] Jahangiri A, Golneshan A. Feasibility study of the thermal performance improvement of natural draft dry cooling towers due to flue gas injection [J]. *World Apply Science*, 2011, 12 (4): 568 - 575.
- [3] Heidarnejad G, Karami M, Delfani S. Numerical simulation of counter-flow wet-cooling towers. [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2009, 32(5): 996 - 1002.
- [4] Eldredge T V, Benton D J, Hodgson J W. An investigation of the effects of flue gas injection on natural draft cooling tower performance [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1997, 119(2): 478 - 484.
- [5] Al-Waked R, Behnia M. CFD simulation of wet cooling towers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26 (4): 382 - 395.
- [6] 陈凯华, 宋存义, 李强. 烟塔合一烟气排放的数值分析 [J]. *电站系统工程*, 2008, 24(2): 12 - 14. (Chen Kai-hua, Song Cun-yi, Li Qiang. Numerical analysis of aerodynamic field in cooling tower with flue gas injection [J]. *Power System Engineering*, 2008, 24(2): 12 - 14.)
- [7] Klimanek A. Numerical modelling of natural draft wet-cooling towers [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2013, 20(1): 61 - 109.
- [8] Klimanek A, Cedzich M, Bialecki R. 3D CFD modeling of natural draft wet-cooling tower with flue gas injection [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 91(12): 824 - 833.
- [9] 郑水华. 超大型冷却塔内气液两相流动和传热传质过程的数值模拟研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012. (Zheng Shui-hua. Numerical simulation of gas-liquid flow, heat and mass transfer process in super-large cooling tower [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.)
- [10] Al-Waked R, Behnia M. Enhancing performance of wet cooling towers [J]. *Energy Conversion & Management*, 2007, 48(10): 2638 - 2648.