

# Analysis on Numerical Simulation and Structural Design of Dry-Dedusting Evaporative Cooling Tower

Yonghong Niu<sup>1</sup>, Wenfei Wu<sup>2</sup>, Guang Jin<sup>3</sup>, Linlin Huang<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup>Energy Resources and Environment Engineering School, UST Inner Mongolia, Baotou, China

<sup>4</sup>Beris Engineering and Research Corporation, Baotou, China

Email: yonghong\_niu@126.com, niuyonghong@imust.cn

**Abstract:** Firstly introduces the tower structure and its working principle of the evaporative cooling tower system, A 3D numerical model of cooling tower for the fluid flow is built for the fluid flow and heat and mass transfer with the simplifying assumptions. Then the flow numerical simulation is done with Fluent software. Predicted results about the fluid field and temperature field is present. And analyses the structural designing method of evaporative cooling tower, summarizes and puts forward the relevant optimization parameter of design.

**Keywords:** dry-dedusting; evaporative cooling tower; structural optimization; flowing model; numerical simulation

## 干法除尘蒸发冷却塔数值模拟与结构设计分析

牛永红<sup>1</sup>, 武文斐<sup>2</sup>, 金光<sup>3</sup>, 黄琳琳<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup>内蒙古科技大学能源与环境学院, 包头, 中国, 014010

<sup>4</sup>中冶东方工程技术有限公司, 包头, 中国, 014010

Email: yonghong\_niu@126.com, niuyonghong@imust.cn

**摘要:** 介绍了蒸发冷却塔系统组成及其工作原理, 对塔内流体流动与热质交换过程进行简化和假设的基础上建立了蒸发冷却塔三维流体流动模型。利用 Fluent 流体分析软件进行了模拟计算, 得到了蒸发冷却塔内的流场、温度场分布。并对蒸发冷却塔的结构设计进行了分析, 总结并提出了相关优化设计参数。

**关键词:** 干法除尘; 蒸发冷却塔; 结构优化; 流动模型; 数值模拟

### 1 引言

钢铁厂转炉生产过程中产生的大量高温含尘烟气在回收利用生产煤气前需进行冷却和除尘处理。干法除尘蒸发冷却技术以其热交换效率高, 能耗少、利于环保的特点在转炉烟气处理过程中得到普遍应用<sup>[1,2]</sup>, 利用该技术处理转炉高温烟气降低了转炉的工序消耗, 同时省去了湿法除尘系统的污水处理和污泥处理设施及大量用水, 系统耗电比湿法除尘系统大大降低, 节能效果显著, 解决了湿法除尘系统污泥压滤、运输过程中产生二次污染的问题。该技术的关键设备是蒸发冷却塔, 除烟道冷却外, 烟气冷却整个过程主要在蒸发冷却塔内完成, 塔内工作过程复杂, 为受传热和传质控制的, 在多

相流内部始终存在着质量、动量和能量传递以及相互作用的多相湍流物理过程<sup>[3]</sup>。塔内采用喷嘴喷射高压雾化水, 利用雾滴蒸发吸收热量的原理和高温烟气直接进行热量交换, 将高温烟气降低到除尘设备所适合的温度范围且不产生机械水。蒸发冷却的效果及运行正常与否, 主要取决于雾化喷嘴的喷雾效果、塔体的结构以及塔内流场的分布。目前该技术以国外引进为主, 国内对其理论研究和技术开发并不成熟。本文根据蒸发冷却塔的结构和塔内流体流动的特点, 对蒸发冷却塔结构设计进行了一定的简化和假设, 建立了蒸发冷却塔的小型模型, 应用 CFD 方法建立了冷却塔内流体流动的控制方程并应用 Fluent 等流体分析软件对塔内的流体流动与换热进行了数值模拟<sup>[4]</sup>, 得到了蒸发冷却塔内的流场、温度场分布。在模拟分析的基础上进

基金项目: 内蒙古科技大学青年基金项目 (KJ200639); 内蒙古高校科学研究项目 (NJ09085)。

一步对蒸发冷却塔的结构设计进行了分析，提出了系统相关优化设计参数。

## 2 干法除尘蒸发冷却塔系统

### 2.1 塔体系统组成

转炉高温烟气在蒸发冷却塔内完成烟气冷却和预除尘过程。蒸发冷却塔系统主要包括塔体、烟气入口、喷雾装置、供气供水及仪表控制系统、烟气出口弯管及卸灰装置等构件（见图 1）。其中塔体结构和喷雾装置是塔体系统的重要组成部分，其塔体及喷嘴结构的合理设计和喷雾参数直接影响系统工作效率和系统能耗。

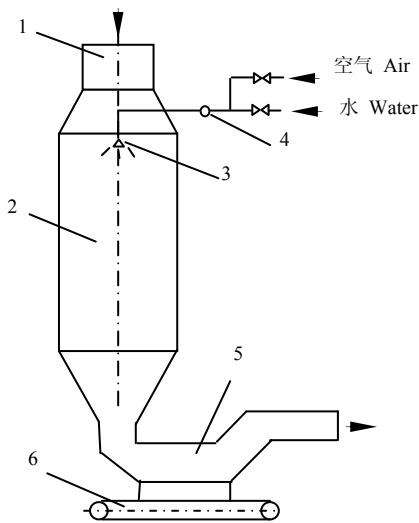


Figure 1. The evaporative cooling tower

(1.Smoke inlet 2.Tower column 3.Sprayer device 4.Instrument control system of water and air 5.Bend pipe of smoke outlet 6.Ash unload facility)

图 1. 蒸发冷却塔

(1.烟气入口 2.塔体 3.喷雾装置 4.气水控制仪表 5.烟气出口弯管 6.卸灰装置)

### 2.2 塔内工作过程概述

转炉高温烟气在进入冷却塔时温度可达到 1000℃左右，为防止二噁英生成及受后续除尘设备材料和结构等条件的限制，冷却塔烟气出口处的温度应控制在 200℃左右。由于烟气处理量较大，因此需要在进入蒸发冷却塔内流动的短暂时间内得到冷却。其工作过程是将一定压力的汽水混合物通过输水管路送到喷

雾装置喷嘴处，被充分雾化成微细颗粒并直接喷入塔内，雾化水在与高温烟气接触的瞬间吸收烟气显热，迅速蒸发并被烟气再热而形成一种不饱和的过热蒸汽，同时高温烟气得到冷却。蒸发冷却塔还使烟气在进入电除尘器之前进行了一次预处理，起到了调节比电阻和进行预除尘的作用，为后续转炉煤气回收工作奠定了基础。

## 3 塔内流动、传热与传质的数值模拟

### 3.1 蒸发冷却塔模型的建立

建立合理的物理模型是进行数值模拟计算的前提。在建立蒸发冷却塔三维模型的过程中，参考某钢铁厂转炉干法除尘系统蒸发冷却塔结构尺寸，按几何相似原理建模，对塔体结构和喷雾系统进行了简化，喷嘴数设计为四个。其模型结构如图 2 所示。采用有限容积法，四面体非结构网格进行网格生成，对喷嘴处空间进行局部网格细化处理。网格模型如图 3 所示。

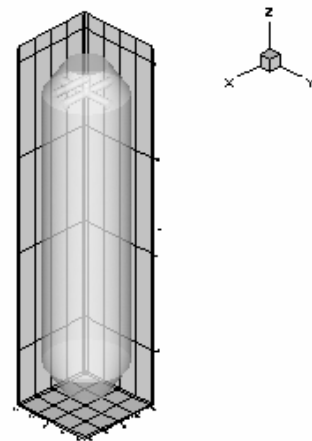


Figure 2. 3D model of evaporative cooling tower

图 2. 蒸发冷却塔三维模型

### 3.2 数值模拟计算与结果分析

#### 3.2.1 数值模拟计算

转炉高温烟气在蒸发冷却塔内与高压雾化水完成热交换，存在着质量、动量和能量传递以及相互作用，塔内流体流动为湍流，流体流动与换热过程可用混合项的连续性方程、混合的动量方程、混合的能量方程、

时均 N-S 方程、湍动能  $k$  输运方程和湍动能耗散率  $\epsilon$  输运方程 ( $k-\epsilon$  方程) 来描述。因此, 计算过程中采用气液多相流混合模型, 用分离式求解器隐式方案进行三维稳态求解。得到蒸发冷却塔模型三维流场及温度场的数值解。

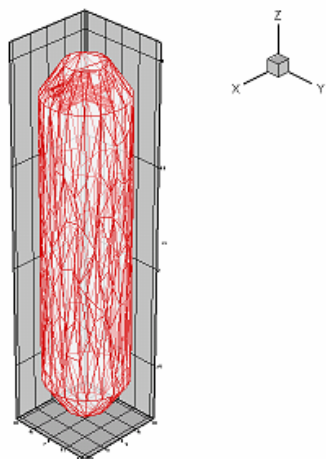


Figure 3. 3D model mesh of evaporative cooling tower  
图 3. 蒸发冷却塔三维网格模型

### 3.2.2 计算结果的可视化处理与分析

数值模拟所得蒸发冷却塔模型内烟气与水雾湍动及热交换过程中的速度场和温度场, 能够从冷却塔腔体整体角度分析塔内流体流动状况和相态变化, 从而进一步研究塔高等塔体尺寸对速度分布和温度分布的影响规律。对计算结果进行可视化处理, 图 4 为蒸发冷却塔模型内部烟气及高压雾化水流场分布图 (速度单位  $10^{-1}m/s$ ), 可以清楚地看出该断面上烟气流动及水雾从喷嘴喷出后速度迅速衰减的过程。

图 5 为蒸发冷却塔入口、出口及塔内坐标  $Z=-0.3m$ 、 $-0.6m$ 、 $-0.9m$ 、 $-1.2m$  时横截断面 (XY) 的速度场分布图形 (速度单位  $10^{-1}m/s$ ),  $Z=-0.3m$  断面给出了喷嘴出口不远处塔体断面的流体流速分布, 可见由于高压作用, 喷嘴处液体以高速出流到塔体空腔内, 因而形成高速水雾射流, 受周围烟气的作用速度发生迅速衰减, 当到达  $Z=-0.6m$  断面时, 雾化蒸汽速度已得到很大衰减, 当  $Z=-1.2m$  到与烟气流速已基本相同, 在塔体出口处, 雾化水变为蒸汽与已得到冷却的烟气成为一体, 速度达到一致。

图 6 为蒸发冷却塔内温度场分布 (温度单位为 K)。烟气入口温度约  $1000^{\circ}C$  左右, 在冷却塔内得到

有效冷却, 出口温度约  $200^{\circ}C$ 。

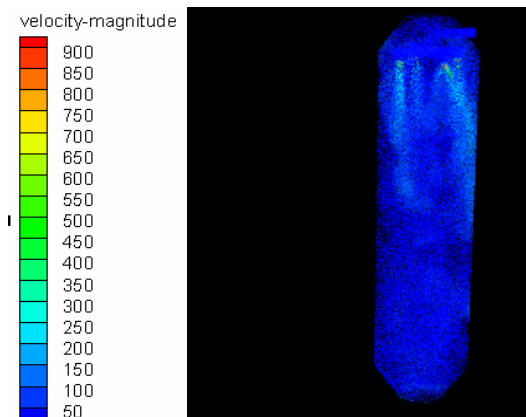


Figure 4. The fluid field of evaporative cooling tower  
图 4. 蒸发冷却塔内流场分布图

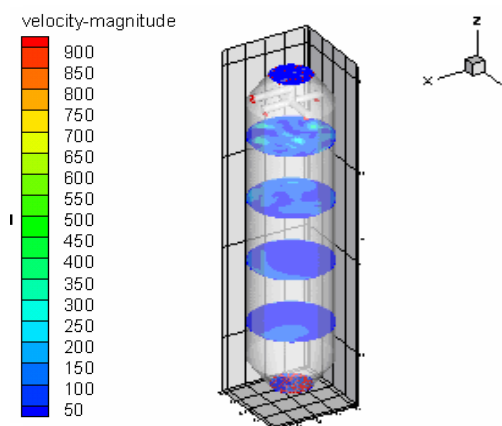


Figure 5. The fluid field of Section of evaporative cooling tower  
( $Z=0,-0.3m,-0.6m,-0.9m,-1.2m,-1.7m$ )  
图 5. 蒸发冷却塔内切面速度场分布  
( $Z=0,-0.3m,-0.6m,-0.9m,-1.2m,-1.7m$ )

图 7 为冷却塔入口及出口, 塔内坐标  $Z=0$ 、 $-0.3m$ 、 $-0.6m$ 、 $-0.9m$ 、 $-1.2m$  时塔体横截断面 (XY) 断面的温度场分布图形, 由于塔体入口处烟气温度较高, 烟气与水雾发生强烈热交换, 烟气迅速降温, 当  $Z=-0.3m$  时, 温度场局部存在高温烟气, 当  $Z=-0.9m$  时温度场已基本均匀, 在出口处, 烟气已实现充分降温, 达到  $200^{\circ}C$  左右, 伴随着冷却过程雾化水则完全转化为  $200^{\circ}C$  左右的过热蒸汽, 不产生任何机械水。同时, 由于烟气中加入了一定的水蒸汽, 除起到降温作用外, 还使烟气在进入电除尘器之前进行了一次预处理, 起

到了凝并粉尘、调节比电阻和进行粗除尘的作用。

计。

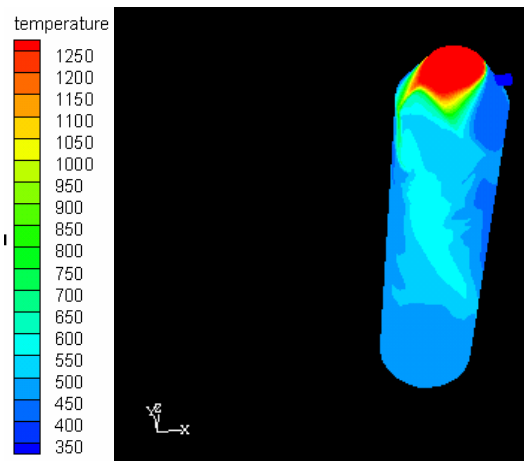


Figure 6. The fluid temperature field of evaporative cooling tower  
图 6. 蒸发冷却塔内温度场分布图

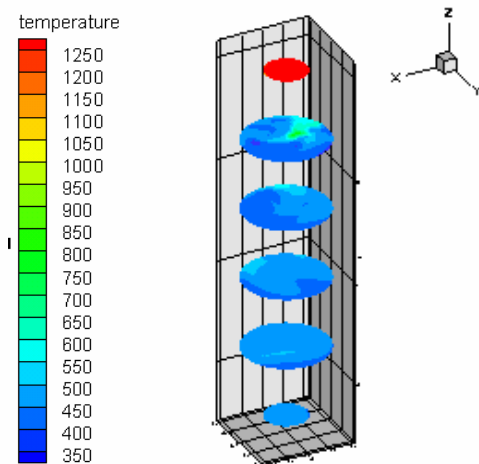


Figure 7. The fluid temperature field of Section of evaporative cooling tower  
(Z=0,-0.3m,-0.6m,-0.9m,-1.2m,-1.7m)  
图 7. 蒸发冷却塔内切面温度场分布  
(Z=0,-0.3m,-0.6m,-0.9m,-1.2m,-1.7m)

#### 4 蒸发冷却塔塔体结构设计分析

从对蒸发冷却塔内流场和温度场模拟仿真计算分析可以确定, 烟气进出口温度、断面流速、塔筒体直径、塔体高度、系统喷水量及完全蒸发直接影响烟气冷却和预处理效果。实践环节中发现, 烟气粉尘粒径也是影响因素之一。本文进一步对蒸发冷却塔塔体高度和系统喷水量的设计参数进行了分析, 利于塔体结构的优化设计。

#### 4.1 蒸发冷却塔塔体高度的确定

一般情况下, 塔内断面烟气流速度控制在 4m/s 以下, 通常取 1.5~2m/s<sup>[5]</sup>。若气流速度增大, 则必须增大塔体的有效高度, 以便使烟气在塔内有足够的停留时间, 达到雾化水滴充分转化为过热蒸汽的要求。而蒸发时间取决于水滴的大小和烟气的进出口温度。例如经水和压缩空气双相流喷嘴所产生的水雾粒径分布, 通常在 50~300μm 范围, 冷却塔烟气的进出口温度在 1000~200℃ 范围, 水雾完全汽化时间约为 0.2~3.0s。在蒸发冷却塔的容积确定时则应考虑使水雾完全蒸发所需要的时间并留有一定的余量, 系统设计控制停留时间一般为 5s 以上。因此, 蒸发冷却塔的高度约 10~20m 较为合理。若考虑现场空间限制及设备布置、施工等特殊原因需降低塔的高度, 也必须考虑使水雾完全蒸发所需要的时间, 以满足干法除尘系统正常运行的要求。结合仿真计算分析, 塔体高度应设计在 12m 以上。

蒸发冷却塔筒体直径的确定则可根据烟气流量和塔内烟气断面流速确定。流速越低, 则需设计塔筒体直径越大, 同时在一定的塔体高度下, 蒸发冷却效果越好。相反, 适当增大设计流速, 则相应的塔筒体设计直径可减小。

#### 4.2 蒸发冷却系统喷水量的计算

蒸发冷却系统喷水量是一个重要的系统控制参数。需要根据烟气量和烟气温度等参数的变化进行调节。喷水量可综合考虑系统工质得失热量及能量守恒分析的计算得到。

在冷却塔内喷水雾, 液态水滴吸收烟气热量, 发生状态变化, 由液滴变为水蒸气, 经再热变为过热蒸汽, 其吸收的热量  $Q_1$  可用公式 (1) 计算。

$$Q_1 = G_w [r + c_w (100 - t_w) + c_v (t_1 - 100)] \quad (1)$$

高温烟气从冷却塔烟气入口温度  $t_2$  降到出口温度  $t_1$ , 所放出的热量  $Q_2$  可用公式 (2) 表示。

$$Q_2 = \frac{V_0}{22.4} \int_{t_1}^{t_2} \bar{c}_p \Delta t = \frac{V_0}{22.4} \left[ \bar{c}_p \Big|_{t_2} - \bar{c}_p \Big|_{t_1} \right] \quad (2)$$

式中:

$G_w$ : 蒸发冷却系统喷水量 (kg/h);

$r$ : 在 100℃ 时水的汽化潜热, 为 2257 (kJ/kg);

$c_w$ : 水的质量比热, 为 4.19 (kJ/kg·℃);

$c_v$ : 在  $100^\circ\text{C}$  时水蒸汽的汽化比热, 为  $2.14$  ( $\text{kJ}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$ );

$t_w$ : 喷雾水的温度 ( $^\circ\text{C}$ );

$V_0$ : 标准状态下烟气的体积流量 ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ );

$c_p$ : 从  $0\sim t$  烟气的平均摩尔定压比热 ( $\text{kJ}/\text{kmol}\cdot^\circ\text{C}$ )。

由于蒸发冷却塔内烟气与雾化水换热能量守恒, 冷却水吸收的热量  $Q_1$  应等于高温烟气放出的热量  $Q_2$ , 则有:  $Q_1=Q_2$ 。系统喷水量  $G_w$  的计算可根据能量守恒联立式 (1)、式 (2) 求得。

## 5 结语

干法除尘蒸发冷却技术具有压力损失小、二次污染少等节能环保特点, 在工业高温烟气冷却、除尘等领域应用广泛。国内引进该技术的同时也在实践中不断地进行消化吸收并应用于工业生产和系统维护及工艺改进。本文应用在 CFD 理论, 在合理构建蒸发冷却塔数值模拟物理模型的基础上, 利用 fluent 等流体分析软件, 进行塔内流体流动与传热模拟仿真和可视化分析, 深入了解了蒸发冷却塔内流体热质交换过程。同时对蒸发冷却塔塔体高度和

系统喷水量的设计进行了分析, 给出了相关参数, 对优化塔体结构设计以及保障系统正常高效运行控制具有重要意义。

## References (参考文献)

- [1] Wang Aihua, Cai Jiuju, Li Xiuping, Affecting factors and improving measures for converter gas recovery[J], Journal of Iron and Steel Research, International, 2007,14(6), P 22-26.
- [2] Wang Yonggang, Wang Jianguo, Dry dedusting technique for converter flue gas adopted in steel works of China[J], Heavy Machinery, 2006,(2), P1-3(Ch).  
王永刚, 王建国, 转炉煤气干法除尘技术在国内外钢厂的应用[J], 重型机械, 2006,(2), P1-3.
- [3] Niu Yonghong, Jin Guang, Research and progress on mechanisms of smoke cooling in dry-dedusting evaporative cooling tower[J], Chemical Industry and Engineering Progress, 2009,28(s2), P425-426.  
牛永红, 金光, 干法除尘蒸发冷却器烟气冷却机理研究进展[J], 化工进展, 2009,28(s2), P425-426.
- [4] Ren Chengqin, Zhang Longai, Used CFD for the three-dimensions numerical simulation of the indirect evaporative cooler[J], Energy Conservation, 2005,(6), P14-17(Ch).  
任承钦, 张龙爱, CFD 方法与间接蒸发冷却换热器的三维数值模拟[J], 节能, 2005,(6), P14-17.
- [5] Wang Yongzhong, Yang Jianping, Analysis of Design and Application of an Evaporative Cooling Tower[J], Bao Steel Technology, 2004,(5), P35-38 (Ch).  
王永忠, 杨建平, 蒸发冷却塔的设计和应分析[J], 宝钢技术, 2004,(5), P35-38.