

# 直接空冷体系挡风墙体型系数研究

吴耀鹏, 白国良

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 空冷凝汽器是我国大型火力发电厂采用的新型冷却水装置. 以国内某大型火电厂直接空冷体系为原形, 应用 Fluent 软件建立数值模型, 研究并确定挡风墙的体型系数, 并将数值结果与试验结果进行对比分析. 结果表明, 数值结果与试验结果较接近, 变化趋势相同, 基本满足工程要求. 另外, 研究表明设置挡风墙是直接空冷体系有效的防风措施, 且挡风墙越高散热越有利. 研究结果可以为直接空冷体系的抗风设计提供依据和参考.

**关键词:** 直接空冷体系; 体型系数; 挡风墙; 数值模拟

**中图分类号:** TU398.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2014)06-0805-05

直接空冷凝器装置利用周围的空气作为介质进行冷却, 因而其周围的风场必然对空冷凝器的效率及正常运行有较大影响<sup>[1-2]</sup>. 直接空冷凝器的支撑体系属于典型的竖向刚度和质量分布极不均匀的高柔结构, 下部较空旷, 风荷载主要作用于挡风墙上, 并对下部结构产生较大作用. 由于结构体系的特殊性和复杂性, 直接空冷体系在进行抗风设计时, 其风荷载取值不能直接应用现有荷载规范, 通常需借助风洞试验确定其体型系数、风振系数等<sup>[3-5]</sup>. 风洞试验在实验室内完成, 数据较精确. 不过风洞试验也有缺点, 比如风洞本身造价昂贵, 动力消耗大, 试验周期长, 模型利用率低, 存在洞壁干扰等.

随着湍流模型的不断发展和完善, 应用计算机模拟风洞试验的技术日趋成熟, 已逐渐成为结构风工程研究的有力手段. 应用计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 模拟建筑物周围的风场变化并求解结构表面风压, 即 CFD<sup>[6-7]</sup>数值模拟方法, 已成为国际工程界的热门研究课题. 本文基于 CFD 方法研究直接空冷体系挡风墙的体型系数, 并将数值结果同试验结果进行对比分析, 验证模型的有效性.

## 1 基本方程

### 1.1 流体控制方程

流体运动所遵循的规律为物理学三大守恒定律, 即质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律. 各控制方程的因变量不同, 但均反映了单位时间、单位体积内物理量的守恒性质. 若用  $\phi$  表示通用变量, 则控制方程可以表示为如下通用形式. 即

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

式 (1) 中各项依次为瞬态项、对流项、扩散项和源项. 其中,  $\phi$  为通用变量,  $\Gamma$  为广义扩散系数,  $S$  为广义源项.

理论上, 根据控制方程可以求解任意流动问题, 但由于受计算条件的限制, 实际上无法实现.

### 1.2 湍流方程

在实际工程中, 几乎所有的流动都是湍流, 结构风工程的研究对象即为大气边界层中的湍流过程. 湍流的瞬时控制方程, 为非线性多变量偏微分方程组, 在数学上难以得到解析解, 需寻求数值方法求解.

RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) 方法不直接求解瞬时的 N-S (Navier-Stokes) 方程, 而是求解时均化的雷诺应力方程, 这样可以避免计算量过大的问题. RANS<sup>[8-9]</sup>方法在实际工程应用中已取得较好效果, 是目前应用最广泛的湍流数值计算方法, 也是本文所采用的数值方法.

依据 RANS 理论, 任一变量  $\phi$  的时间平均值为

$$\bar{\phi} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \phi(t) dt \quad (2)$$

流动变量的瞬时值为平均值与脉动值之和, 即

$$\begin{cases} u_i = \bar{u}_i + u'_i \\ p = \bar{p} + p' \end{cases} \quad (3)$$

雷诺方程为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} \quad (4)$$

式中:  $i, j=1, 2, 3$  分别代表  $x, y, z$  方向;  $u$  为速度;  $t$  为时间;  $\rho$  为密度;  $f$  为体积力;  $p$  为表面力;  $\nu$  为动粘性系数。

为了使雷诺方程封闭, 需对雷诺应力作出各种假设。根据对雷诺应力所作的假定和处理方式不同, 湍流模型可分为雷诺应力模型和涡粘模型两类。  $k-\varepsilon$  模型是典型的两方程涡粘模型, 目前在结构风工程中应用最广泛。本文采用 Realizable  $k-\varepsilon$  模型对直接空冷体系进行数值仿真分析。

## 2 数值模拟

### 2.1 计算模型及网格划分

以国内某电厂直接空冷体系为原形, 选取其中一个机组建立数值模型并进行数值仿真分析。管柱用半径 1.9 m, 高 36.8 m 的圆柱体模拟, 共 16 根; 考虑到网格划分及网格质量, 建模时对钢桁架进行简化, 在保证透风率一致的前提下, 用中间开孔的长方体等效替换; 空冷平台用 91.2 m( $x$ ) $\times$ 92.4 m( $y$ ) $\times$ 1.0 m( $z$ ) 的长方体模拟; 原形中风机半径为 4.75 m, 考虑到风机叶片的阻挡作用, 实际建模风机半径取 3.3 m; A 型支架顶部管道用半径 1.8 m 的圆柱体模拟, 原形中 A 型支架散热片空隙非常小, 实际建模无法实现, 在保证透风率为 40% 的前提下, 以每隔一定距离开长条孔的长方体模拟 A 型支架散热片; 挡风墙及周围建筑物根据实际尺寸用长方体模拟。计算模型如图 1 所示。

计算域取为 1 300 m $\times$ 1 800 m $\times$ 450 m, 模型置于来流方向( $y$  轴)前 1/3 处, 模型的最大阻塞度为 2.8%, 满足数值模拟外部绕流场中小于 3% 的原则。由于直接空冷体系体型复杂, 数值分析时采用非结构化网格对计算模型进行网格划分。对空冷凝汽器、汽轮机房和锅炉房等模型的表面采用三角形网格进行划分; 对计算域体网格划分时采用 Size Function 方法, 实现网格由密到疏过渡, 从而得到质量较好的非结构化四面体网格。网格划分如图 2 所示。

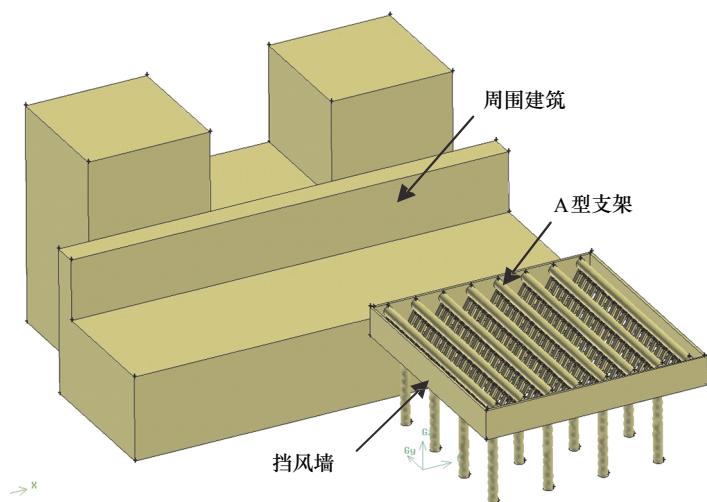


图1 计算模型  
Fig.1 Calculation model

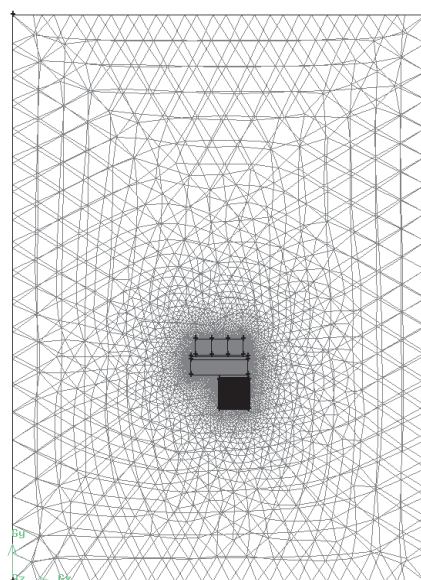


图2 网格划分  
Fig.2 Mesh generation

### 2.2 数值计算

计算模型每隔 45° 设置 1 个风向角, 共有 8 个风向角, 挡风墙选取更有代表性的 A、B 两个分区作为研究对象, 如图 3 所示。A 型支架从左至右共分 8 个区, 如图 4 所示。

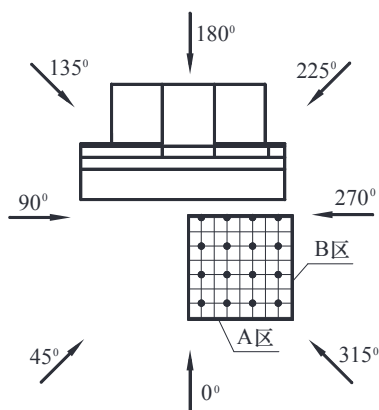


图3 风向角

Fig.3 Wind direction angle

取挡风墙高度为 11 m, 参考点风速 25.9 m/s, 并考虑周围建筑物的影响. 以 0° 风向角为例, 直接空冷体系的风压分布及速度矢量图分别如图 5~6 所示.

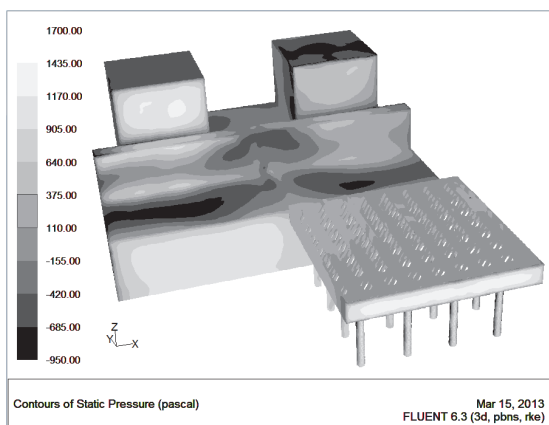


图5 风压分布

Fig.5 Wind pressure distribution

Fluent 计算结果后处理时, 首先设置参考点, 然后在 report 选项中读出该参考点的风压和风速, 并将其值输入到参数设置对应项中, 利用公式得出无量纲风压系数  $C_{Pr}$ .

$$C_{Pr} = \frac{p - p_{r\infty}}{p_{r0} - p_{r\infty}} = \frac{p - p_{r\infty}}{q_r} \quad (5)$$

式中:  $p$ 、 $p_{r0}$  和  $p_{r\infty}$  分别为测点处的风压、参考点的总压和静压,  $q_r$  为参考点处的动压.

结构原形所在场地为 B 类风场, 梯度风高度 350 m. 因此, 数值计算时取参考点高度  $Z_0=350$  m, 地表粗糙度系数  $\alpha=0.32$ , 在 Fluent 自定义函数对话框内定义公式 (6) 计算体型系数.

$$\mu_{si} = \left[ \frac{350}{Z} \right]^{0.32} C_{p_{mean}} \quad (6)$$

式中:  $\mu_{si}$  为体型系数;  $Z$  为测点高度;  $C_{p_{mean}}$  为平均风压系数.

### 3 结果分析

本文所引用的试验数据来源于风洞试验, 该试验在长安大学 CA-1 大气边界层风洞中进行. 风洞试验以国内某大型火电厂直接空冷体系为原形, 由白国良教授课题组共同完成. 本文所建立的数值模型与试验模型相对应. 为了达到相互补充和验证的目的, 现将数值模拟和风洞试验两种方法得到的体型系数进行对比分析. 文中体型系数均为空冷体系某一分区体型系数的加权平均值.

#### 3.1 挡风墙体型系数

考虑周围建筑物的影响, 挡风墙 A 区在不同风向角时体型系数的数值结果与试验结果对比如图 7 所示, 挡风墙 B 区在不同风向角时体型系数对比如图 8 所示.

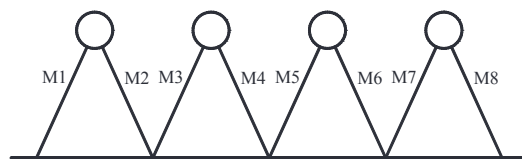


图4 A型支架分区

Fig.4 Partition of "A" bracket

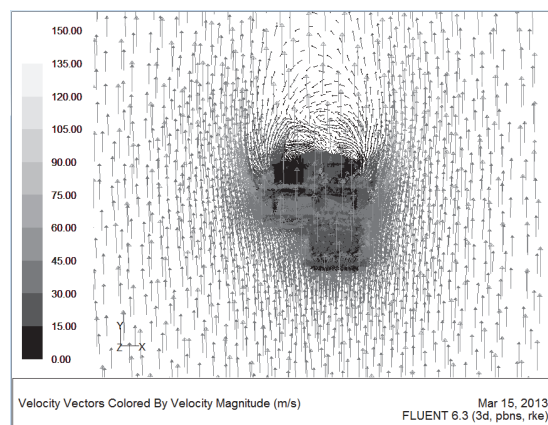


图6 速度矢量场

Fig.6 Velocity vector field

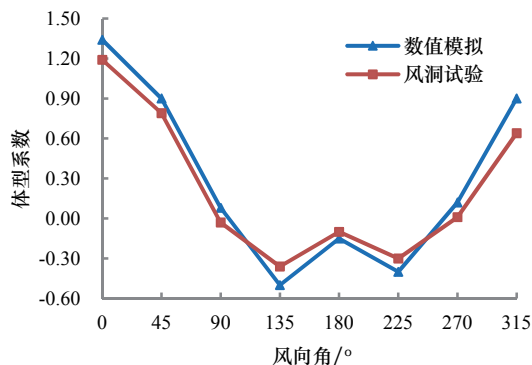


图7 挡风墙A区体型系数

Fig.7 Region A wind wall shape factor

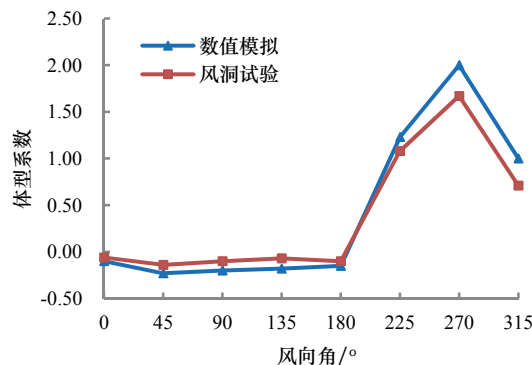


图8 挡风墙B区体型系数

Fig.8 Region B wind wall shape factor

结果表明,挡风墙迎风时体型系数最大.  $0^\circ$  风向角时挡风墙A区为迎风面,数值模拟时最大体型系数为1.3,试验结果为1.2;  $270^\circ$  风向角时挡风墙B区为迎风面,数值模拟时最大体型系数为2.0,试验结果为1.7. 由于周围建筑物的影响,挡风墙A区最大体型系数小于B区.

A区挡风墙:  $90^\circ$ 、 $270^\circ$  风向角时体型系数近似为0;  $135^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $225^\circ$  风向角时体型系数为负值,由于周围建筑物的遮蔽效应,  $180^\circ$  风向角时体型系数绝对值较小.

B区挡风墙:  $0^\circ \sim 180^\circ$  风向角时体型系数均为负值,且均接近于0;  $225^\circ$ 、 $270^\circ$ 、 $315^\circ$  风向角时体型系数均为正值,由于周围建筑物的遮蔽效应,  $225^\circ$  风向角时体型系数较  $315^\circ$  风向角时大.

数值模型为理想刚性模型,风洞试验为近似刚性模型,故数值模拟得到的体型系数绝对值较风洞试验值大. 总体而言,二者结果较接近,变化趋势相同,基本满足工程要求.

### 3.2 挡风墙高度

设置挡风墙是直接空冷体系的主要防风措施<sup>[10-12]</sup>. 结构体系的风荷载主要作用在挡风墙上,且空冷体系的散热效率也与挡风墙密切相关. 风洞试验时,仅制作了高度为11 m的挡风墙缩尺模型,故此处仅讨论数值结果. 取挡风墙高度分别为9 m、11 m、13 m,且考虑周围建筑物的影响.

对于A型支架,  $90^\circ$  风向角时风向与A型支架垂直,且M1为近风端, M8为远风端,此处仅讨论  $90^\circ$  风向角时A型支架体型系数的变化情况,如图9所示. 对于挡风墙,仅讨论挡风墙高度对A区体型系数的影响,如图10所示.

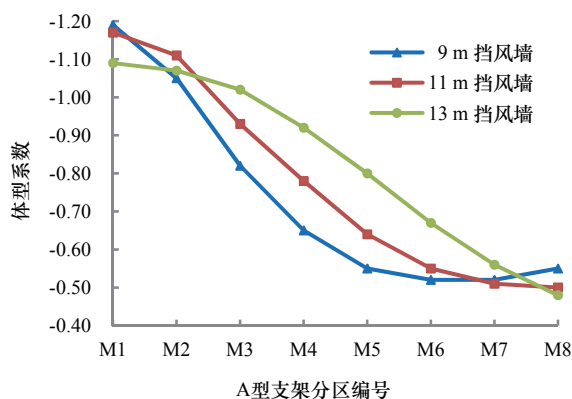
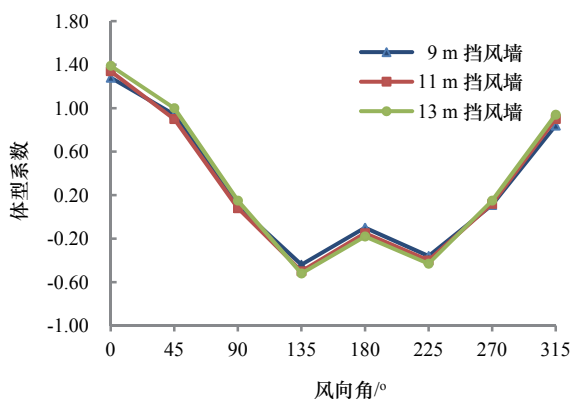
图9 A型支架  $90^\circ$  风向角时的体型系数Fig.9 Shape factor of "A" bracket at  $90^\circ$  wind angle

图10 挡风墙A区体型系数

Fig.10 Region A wind wall shape factor

由图9可知,由于挡风墙的遮挡作用,A型支架体型系数均为负值,数值在-1.2~0.5范围内,且近风端的体型系数绝对值较大,远风端较小;对于A型支架的M1分区,挡风墙高度越大体型系数绝对值越小,对于M8分区则刚好相反;除近风端和远风端外,A型支架中间大部分区域的体型系数绝对值均随挡风墙高度的增加而增大. A型支架负风压越大,则整个空冷体系的散热效率越高.

由图10可知,挡风墙高度对挡风墙自身的体型系数影响不大.

## 4 结论

(1) 挡风墙迎风时体型系数最大,挡风墙A区数值模拟时最大体型系数为1.3,试验结果为1.2,挡

风墙 B 区数值模拟时最大体型系数为 2.0, 试验结果为 1.7; 由于周围建筑物的影响, 挡风墙 A 区最大体型系数小于 B 区。

(2) 数值模型为理想刚性模型, 风洞试验为近似刚性模型, 故挡风墙体型系数的数值结果均较试验结果大, 但总体而言, 二者结果较接近, 变化趋势相同, 基本满足工程要求。

(3) 由于挡风墙的遮挡作用, A 型支架体型系数均为负值, 有利于体系散热; 除近风端和远风端外, A 型支架中间大部分区域的体型系数绝对值均随挡风墙高度的增加而增大; 挡风墙高度对挡风墙本身的体型系数影响不大。

## 参考文献 References

- [1] BREDELL J R, KROÖGER D G, THIART G D. Numerical investigation of fan performance in a forced draft air-cooled steam condenser[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(8/9): 846-852.
- [2] YANG L J, DU X Z, YANG Y P. Wind effect on the thermo-flow performances and its decay characteristics for air-cooled condensers in a power plant[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 53: 175-187.
- [3] 白国良, 赵更岐, 赵春莲, 等. 单跨空冷支架结构挡风墙阵风系数风洞试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(1): 1-5.  
BAI Guoliang, ZHAO Gengqi, ZHAO Chunlian, et al. Wind tunnel test for gustiness factor of wind-break wall of the single-span air-cooled condenser structure system[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2009, 41(1): 1-5.
- [4] 赵更岐, 白国良, 李晓文. 三跨空冷支架结构挡风墙阵风系数风洞试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(3): 39-42.  
ZHAO Gengqi, BAI Guoliang, LI Xiaowen. Wind tunnel test for gust factor of wind-break wall of three-span air-cooled condenser structure system[J]. Industrial Construction, 2009, 39(3): 39-42.
- [5] 刘林, 白国良, 李晓文, 等. 空冷支架结构挡风墙风压分布试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(8): 46-51.  
LIU Lin, BAI Guoliang, LI Xiaowen, et al. Test study on wind pressure distribution on wind-break wall of support structure system of air cooled condenser[J]. Industrial Construction, 2009, 39(8): 46-51.
- [6] CORONEO M, MONTANTE G, PAGLIANTI A, et al. CFD prediction of fluid flow and mixing in stirred tanks: Numerical issues about the RANS simulations[J]. Computers and Chemical Engineering, 2011, 35(10): 1959-1968.
- [7] HERZOG N, SCHREIBER M, EGBERS C, et al. A comparative study of different CFD-codes for numerical simulation of gas-solid fluidized bed hydrodynamics[J]. Computers and Chemical Engineering, 2012, 39: 41-46.
- [8] 祝志文. 高 Re 数圆柱绕流二维 RANS 模拟适用性分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(7): 98-101.  
ZHU Zhiwen. Feasibility analysis of 2-D RANS simulations for of circular cylinders aerodynamics at high Re number[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(7): 98-101.
- [9] KULYAKHTIN A, SHIPILOVA O, MUSKULUS M. Numerical simulation of droplet impingement and flow around a cylinder using RANS and LES models[J]. Journal of Fluids and Structures, 2014, 48: 280-294.
- [10] 周兰欣, 李建波, 李卫华, 等. 直接空冷机组凝汽器加装下挡风墙的数值模拟[J]. 动力工程, 2008, 28(5): 743-747.  
ZHOU Lanxin, LI Jianbo, LI Weihua, et al. Numerical simulation of direct air cooling units condenser added lower wind-break[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(5): 743-747.
- [11] YANG L J, DU X Z, YANG Y P. Influences of wind-break wall configurations upon flow and heat transfer characteristics of air-cooled condensers in a power plant[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50(10): 2050-2061.
- [12] 陈梅倩, 王玉叶, 贾鹏程, 等. 挡风墙对直接空冷风机群流体动力学特性的影响[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(1): 98-103.  
CHEN Meiqian, WANG Yuye, JIA Pengcheng, et al. Influences of the wind break wall structures upon fluid dynamics of axial flow fans in direct air-cooled system[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(1): 98-103.

## Study on the shape factor of wind-break wall of direct air-cooled system

WU Yaopeng, BAI Guoliang

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Air-cooled condenser is a new water-cooled device adopted by great fossil fuel power plant in China. Based on a direct air-cooled system prototype of domestic great fossil fuel power plant, the numerical model was set up using FLUENT software. The shape factors of the wind-break wall of direct air-cooled system were obtained, and the results of numerical simulation and wind tunnel test were compared. The results showed that the shape factors were approximately the same from two kinds of methods, which basically satisfied engineering requirement. In addition, this study showed that wind-break wall was an effective anti-wind measure and the higher wind-break wall was more beneficial to heat dissipation. The results can provide evidences and references for the wind-resistant design of direct air-cooled system.

**Key words:** direct air-cooled system; shape factor; wind-break wall; numerical simulation

(本文编辑 桂智刚)