

# 热源厂房通风有效性的数值分析

邹声华<sup>1,2</sup>, 翁培奋<sup>2</sup>, 张登春<sup>1</sup>, 李刚<sup>1</sup>, 段满清<sup>1</sup>

- (1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭, 411701;  
2. 上海大学 上海市应用数学和力学研究所, 上海, 200072)

**摘要:** 采用  $k-\varepsilon$  紊流模型, 利用 ANSYS 计算软件, 对某热源厂房的自然通风进行数值计算, 将生产线上的散热量作为能量方程的附加源项, 预测厂房内的速度场和温度场。预测结果表明: 降低进风口的标高以及减少通风障碍物对风流的影响, 可增加作业区的有效风量, 从而提高厂房的通风效果。厂房的通风改造实施后, 验证了数值模拟的结果。热源厂房通风的有效性可以采用能量利用系数来衡量, 也可以采用有效风量率和有效空间的速度不均匀性系数来衡量。

**关键词:** 热源; 数值分析; 温度场; 能量方程

**中图分类号:** TB126

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-7207(2007)01-0074-05

## Numerical analysis of validity of ventilation in heat workshop

ZOU Sheng-hua<sup>1,2</sup>, WENG Pei-fen<sup>2</sup>, ZHANG Deng-chun<sup>1,2</sup>, LI Gang<sup>1</sup>, DUAN Man-qing<sup>1</sup>

- (1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
2. Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** By  $k-\varepsilon$  turbulence model and ANSYS software, the natural ventilation in a heat workshop was numerically simulated. The effect of radiation was taken into account and these auxiliary heat flows were the source terms of the energy equation. The distributions of the airflow and temperature fields in the workshop were numerically predicted. The results show that lowering the altitude of inlet air and reducing the effect of ventilation obstacle on airflow can increase the effective air volume of working zone, and accordingly improve the ventilation efficiency of workshop. The simulation results are verified by ventilation reform practice. The ventilation validity of heat workshop can be measured by energy-utilizing coefficient, effective air volume rate and velocity asymmetry coefficient of effective space.

**Key words:** heat source; numerical analysis; temperature field; energy equation

在有余热和余湿的厂房, 一般采用自然通风方式<sup>[1]</sup>。自然通风的热源厂房内的热环境随季节变化而变化。若通风系统设计不当, 厂房内的工作环境就很难达到健康和卫生标准。某钢铁集团公司的某热源厂房主要生产线材, 由于该厂房通风能力有限, 厂房内环境温度高, 严重影响工人的健康和生产效率, 特别是在炎热的夏季, 车间内平均温度高达 45 °C<sup>[2]</sup>, 操作人员容易中暑。因此, 厂房的通风系统必须进行改造。

为此, 本文作者运用气流数值分析技术<sup>[3-7]</sup>选取有效的通风方案。

## 1 物理与数学模型

### 1.1 热源厂房概况

某钢铁集团公司的某热源厂房有冷、热两跨, 东

收稿日期: 2006-08-28

作者简介: 邹声华(1962-), 男, 湖南衡阳人, 教授, 博士研究生, 从事供热、供燃气、通风及空调工程的研究

通讯作者: 邹声华, 男, 教授; 电话: 13467325181(手机); E-mail: zsh199074@263.net

面是热跨, 西面是冷跨, 东西朝向, 在东、西墙体设有通风窗, 窗台距离地面 3.6 m, 常年主导方向是南、北向。热跨内的生产平台上有 2 条生产线, 生产平台的风冷段南高北低, 南端距地面 4.4 m, 北端距地面 2.4 m, 平均为 3.4 m。钢丝在进入风冷段时, 温度高达 800 °C, 沿途逐渐冷却, 有大量余热产生, 这些余热主要来自东墙通风窗的自然风排除。东面进风窗户高度为 3.6 m, 在夏季, 风流从东面进风窗进来, 通过厂房顶部的天窗(天窗高度为 4.5 m)排出。

1.2 物理和数学模型

为了便于数值计算, 对厂房进行简化。由于吊车位于厂房顶部, 不影响主要作业区, 计算时不考虑吊车对厂房内气流场和温度场的影响; 厂房上部天窗由于其内部空气的流动状况对厂房内操作平台上方的气流场和温度场影响不大, 在计算时可把它作为 1 个排风口; 为节省计算机内存、提高计算速度, 对厂房内的冷跨不作计算, 但要将冷跨和热跨的交界面处理成自由边界; 侧窗进风速度和天窗排风速度是实测结果, 平台处热源上方的空气温度由实测的温度确定。

在对上述厂房的通风进行数值模拟时, 由于该厂房沿走向方向的物理布置和通风条件非常接近, 因此, 可当作二维来处理。该数值模拟采用  $k-\varepsilon$  模型方程<sup>[3, 8-10]</sup>, 与连续性方程、动量方程和能量方程组成控制方程组, 其通用方程可表示如下<sup>[5]</sup>:

$$\text{div}(\rho \mathbf{v} \Phi) = \text{div}(\Gamma_{\Phi} \text{grad} \Phi) + S_{\Phi} \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为空气密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\mathbf{v}=(u, v)^T$ , 为空气速度矢量,  $\text{m/s}$ ;  $\Phi$  为因变量,  $\Phi=\{1, u, v, T, k, \varepsilon\}$ ;  $\Gamma_{\Phi}$  为对应  $\Phi$  的扩散系数;  $S_{\Phi}$  为源项;  $\Phi, \Gamma_{\Phi}$  和  $S_{\Phi}$  的具体表达式见表 1<sup>[6]</sup>。

表 1 控制方程组的源项

Table 1 Source terms of governing equations

方程	$\Phi$	$\Gamma_{\Phi}$	$S_{\Phi}$
连续	1	0	0
x-动量	$u$	$\mu_e$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x})$
y-动量	$v$	$\mu_e$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial y})$
能量	$T$	$\mu_l/Pr + \mu_l/\sigma_T$	$q/c_p$
紊流动能	$k$	$\mu_e/\sigma_k$	$G - \rho \varepsilon$
紊流动能耗散率	$\varepsilon$	$\mu_e/\sigma_{\varepsilon}$	$\varepsilon(c_1 G - c_2 \rho \varepsilon)/k$

表 1 中,  $u$  和  $v$  分别表示  $x$  和  $y$  2 个方向的速度;  $\mu_l, \mu_t$  和  $\mu_e$  分别为层流黏性系数、紊流黏性系数和有

效黏性系数,  $\mu_l = \rho V_{\infty} L / Re$  ( $Re$  为雷诺数),  $\mu_t = c_{\mu} \rho k^2 / \varepsilon$ ,  $\mu_e = \mu_l + \mu_t$ ;  $p$  为空气的有效压力, 当物体表面紊流动能  $k=0$  时,  $p$  为时均压力;  $q$  为热流密度,  $\text{W/m}^2$ ;  $c_p$  为空气的质量定压热容,  $\text{J/(g}\cdot\text{K)}$ ;  $Pr$  为层流普朗特数;  $G$  为紊流动能产生项;  $c_1, c_2, c_{\mu}, \sigma_T, \sigma_k$  和  $\sigma_{\varepsilon}$  为经验常数<sup>[7]</sup>, 在此  $c_1=1.44, c_2=1.92, c_{\mu}=0.09, \sigma_T=0.9, \sigma_k=1.0, \sigma_{\varepsilon}=1.3$ 。

2 数值求解方法及边界条件的处理

针对上述模型, 对某钢铁公司的某热源厂房进行模拟研究。在笛卡尔直角坐标系下划分计算网格, 网格数为  $56 \times 28$ , 分别以厂房内热跨的宽和高作为坐标的  $x$  和  $y$  方向, 以厂房侧墙和地板的交界作为坐标的原点, 采用有限单元法和交错网格对控制方程进行离散, 应用流场计算程序 FLOTTRAN 求解离散控制方程。对气、固耦合问题, 采用整体法求解; 对于厂房内工作平台等障碍物, 将障碍物处的黏性系数设为无穷大, 以保证障碍物处速度为零; 障碍物壁面及假想对称面按绝热条件<sup>[8]</sup>进行计算。

a. 将扩散项与对流项的影响系数分离, 使方程绝对稳定。

b. 把相邻单元节点的影响系数表示为对流分量与扩散分量之和, 将对流部分归入源项。

c. 对速度和压力项的求解采用 TDMA 法, 以便使各项迭代收敛。

以下侧窗进风口作为入口边界, 以天窗排风口作为出口边界, 由于厂房内的气流分布呈对称式, 为简化计算, 取宽度方向半个车间的空间作为研究区域, 将厂房中间断面处理成绝热边界。

入口边界:  $u=0.5 \text{ m/s}, v=0, k=0.002, \varepsilon=0.000 \text{ 08}; Re=25 \text{ 000};$

$$\text{出口边界: } \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0, p=p_{\text{out}}, \frac{\partial k}{\partial y} = v, \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0;$$

壁面边界: 将厂房顶部及厂房侧壁面和地板等固定壁面取无滑移边界条件,  $u=0, v=0, k=0, \varepsilon=0$ , 假想对称面条件取对称条件, 其余边界条件取流线不穿透条件;

热源条件: 厂房内的热源主要为 2 条生产线上散发的辐射热, 将该辐射热作为能量方程的附加源项处理。

3 计算结果分析

对某钢铁公司某热源厂房内空气流动的速度场和

温度场进行数值计算(室外空气温度为 35 °C), 计算结果如图 1~4 所示。可见:

a. 原有自然通风系统厂房的东、西两侧均有进风窗, 东侧墙上的进风窗面积大, 距热源近, 西侧墙上的进风窗面积小, 距热源远, 再加上工作平台不在车间的中部, 而在车间的东侧, 从而造成厂房内的风流极不均匀。由图 1 可知, 在工作平台上靠近东面墙的生产线附近空气流动状况较好, 温度较低, 而东侧生产线以西的空间是一个大涡流区, 空气流动状况不好, 环境温度较高, 通风排热效果不好。

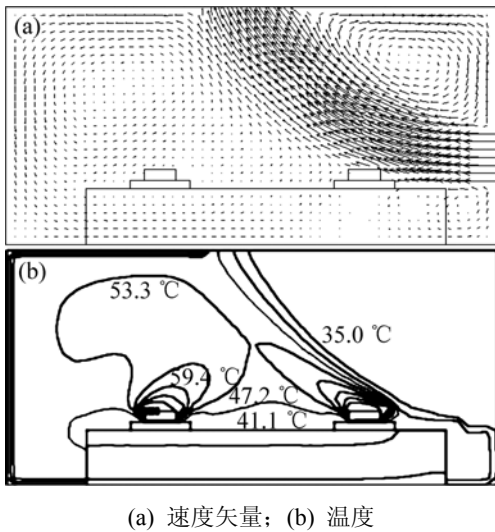


图 1 原有通风条件下厂房内计算断面的速度矢量和温度分布

Fig.1 Distribution of velocity vector and temperature in heat workshop under original ventilation condition

b. 当在 2 条热源中间的操作平台采用通风栅格板后, 2 条生产线之间的空气流动状况有明显改善, 涡流区减少(图 2), 生产平台上的有效风量增加, 从而使热源散发的热量较容易带走。对比图 1(b)和图 2(b)可以看出, 在生产平台上方的温度区域发生了明显变化, 平均温度降低约 4 °C, 低温区的面积增大, 高温区的面积减少, 通风排热效果非常明显。

c. 扩大天窗喉口面积, 厂房内的进风量和排风量增大, 通风的作用范围增大, 排热量增加(图 3), 整个车间的温度平均下降约 3 °C。但 2 条生产线之间平台上(有用空间)的空气流动状况改变不大, 操作平台上温度比原来只下降 0.2 °C, 作业区的通风排热效果不

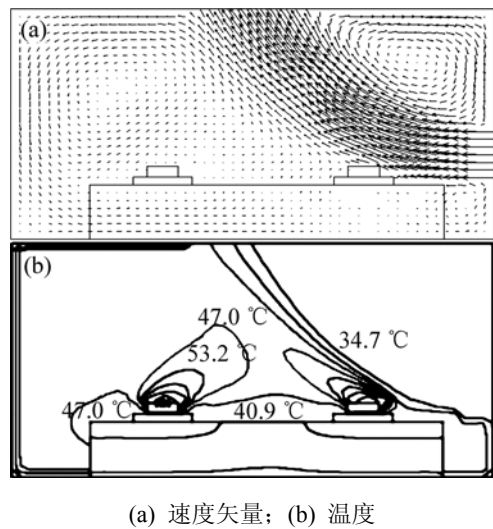


图 3 扩大天窗喉口面积时厂房内速度矢量和温度分布  
Fig.3 Distribution of velocity vector and temperature in heat workshop when dormer areas are enlarged

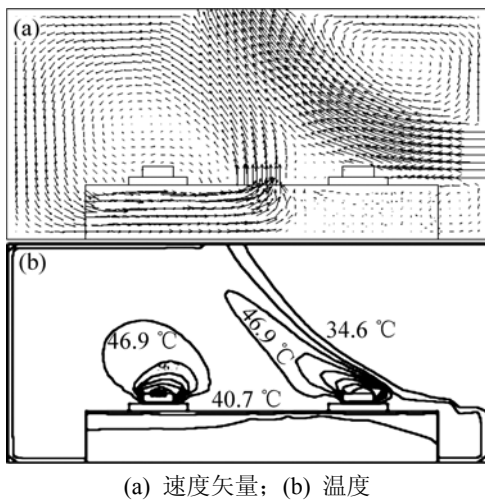


图 2 在操作平台采用通风栅格时厂房内速度矢量和温度分布

Fig.2 Distribution of velocity vector and temperature in heat workshop when ventilation grille is employed on operating desk

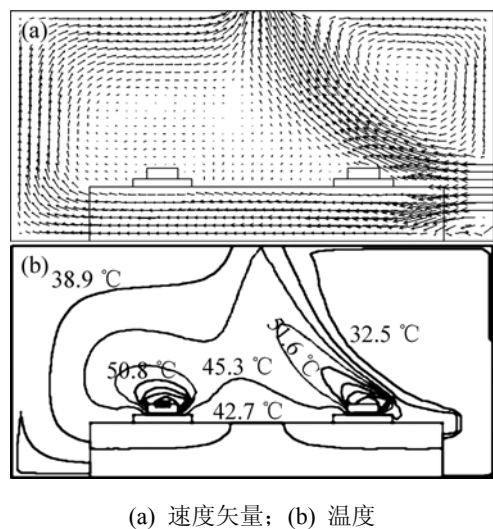


图 4 降低进风口位置时厂房内速度矢量和温度分布  
Fig.4 Distribution of velocity vector and temperature in heat workshop when supply air location is lowered

明显。

d. 当降低侧窗进风口位置后, 厂房内工作平台下部空气的流动状况有明显改善, 而且2条生产线中间平台的温度降低约2℃(图4)。这说明降低进风口的位置, 一方面使热压增大, 从而增加自然通风的作用压力, 导致通风量增加, 排热量也增加; 另一方面, 厂房内的主风流平行流经作业平台, 增加了平台上的风量。

由此可见, 将降低侧窗进风口位置和2条热源中间的操作平台采用通风栅格板2种措施结合起来, 对改善厂房的热环境非常有利, 特别是对降低操作平台上的温度有明显效果。

## 4 热源厂房通风的有效性

由以上分析可知, 对于热源厂房通风, 衡量其通风的有效性<sup>[11]</sup>并非指整个空间通风量和气流分布的均匀性, 而是指厂房内有效空间(主要为作业区)内的风量和风速及其分布, 可以采用能量利用系数<sup>[12]</sup>来衡量, 也可以采用有效风量率和有效空间的速度不均匀性系数来衡量。能量利用系数用下式计算:

$$\eta_t = \frac{t_p - t_0}{t_n - t_0} \quad (2)$$

式中:  $t_p$ ,  $t_n$  和  $t_0$  分别为厂房排风温度、工作区空气的平均温度和厂房的进风温度。

凡对作业空间起作用的风流(即作业区和过渡区的风流)称为有效风流, 通过作业区的风量为有效风量。有效风流和有效风量不一样, 有效风量一定是有效风流, 但有效风流不一定是有效风量。厂房内有效风量  $Q_e$  与总进风量  $Q_z$  的比值为有效风量率。有效风量率越高, 通风效果越好。有效风量率用下式计算:

$$\eta_q = \frac{Q_e}{Q_z} \quad (3)$$

在工作区内选择  $n$  个点, 测量各点的速度  $v_i$  后, 求出平均速度  $v_p$  和速度均方根偏差  $\sigma_v$ , 用下式可计算速度不均匀性系数, 速度不均匀性系数越小, 气流分布越均匀。

$$k_v = \frac{\sigma_v}{v_p} \quad (4)$$

采用不同的方法对该某热源厂房的通风进行有效性分析, 计算结果如表2所示。

在研究厂房通风的有效性时, 不论采用何种有效性参数, 都必须对厂房的空间进行分区。通常工人操作与设备放置的地方(在操作平台上方2m内)为作业区, 作业区空间内的风流(风量和风速)状况是通风有

表2 不同通风方案的有效性指标值

Table 2 Effective indexes of different ventilation ways

通风方案	能量利用系数	有效风量率	速度不均匀性系数
原通风方案	0.677	0.556	0.620
操作平台设通风栅栏(开孔率为30%)	0.725	0.785	0.333
扩大天窗出口面积(增加20%)	0.695	0.583	0.548
降低进风口的位置(降低2m)	0.802	0.500	0.441

效性的标志; 厂房的排风天窗和安设排风风机的区域为排风区; 排风区和作业区之间为过渡区, 过渡区的进风流对排热和稀释有害气体和粉尘浓度是有利的, 虽然它不直接通过作业区, 但通过对流和扩散间接地改善作业区环境。排风区的进风流称为短路风流, 短路风流在工业厂房通风中是应该避免的。因为排风区进风不但不能改善作业环境, 而且会增加排风阻力, 阻碍厂房内风流的流动。

## 5 结论

a. 对于某热源厂房, 采用合理的自然通风方式, 不但要考虑厂房的全面通风量, 还要考虑厂房的空气流动状况以及厂房内空气和温度分布情况, 合理地组织气流, 提高通风的有效性。

b. 衡量热源厂房的通风效果必须研究厂房内有效空间(主要为作业区)内的风量、风速及其分布, 可用能量利用系数来衡量, 也可以用有效风量率和速度不均匀性系数来评价其通风效果。

c. 提高通风的有效性, 就是要让主导风流经过工作区。对本研究中的热厂房, 在2条热源中间的操作平台采用通风栅栏和降低侧窗进风口位置等措施, 就是增加了通过热量散发点的风量(即增加了厂房内的有效风量), 使排热效果增加, 从而可有效地改善该厂房的热环境。在室外环境温度均为35℃的情况下, 操作平台采用开孔率为30%的通风栅格板和进风窗的标高降低2m这2种措施结合, 使厂房的有效风量大幅度增加, 使得操作平台上作业区的平均温度比改造前下降约5℃。

d. 工业厂房通风设计时应该提高有效风量, 增强有效风流, 避免短路风流。

## 参考文献:

[1] 张吉光, 邢秀强. 热车间内有局部排风时自然通风量的计

- 算[J]. 暖通空调, 1996, 26(3): 58-60.
- ZHANG Ji-guang, XING Xiu-qiang. Air rate calculation of natural ventilation in the workshop with a partial air discharge system[J]. Heating Ventilation and Air Conditioning, 1996, 26(3): 58-60.
- [2] 邓高翔, 张登春, 邹声华, 等. 高大厂房热车间自然通风数值模拟与实验研究[J]. 建筑热能通风空调, 2004, 23(1): 70-73.
- DENG Gao-xiang, ZHANG Deng-chun, ZOU Sheng-hua. Numerical simulation and experimental research of natural ventilation in heat workshop[J]. Building Energy and Environment, 2004, 23(1): 70-73.
- [3] Teodosiu C. Experimental and numerical prediction of indoor air quality[C]//Proceedings of Room Vent 2000: Ventilation for Health and Sustainable Environment. Reading: Elsevier, 2000.
- [4] 倪正顺, 帅词俊, 钟 掘. 热挤压模具热力耦合三维数值分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(1): 86-90.
- NI Zheng-shun, SHUAI Ci-jun, ZHONG Jue. Three-dimensional coupled thermal-mechanical numerical analysis of hot extrusion dies[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2004, 35(1): 86-90.
- [5] 张登春, 于梅春, 王海桥. 空调列车室内流场的数值模拟[J]. 湘潭矿业学院学报, 2002, 17(1): 69-72.
- ZHANG Deng-chun, YU Mei-chun, WANG Hai-qiao. Numerical simulation of air distribution in air-condition[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 2002, 17(1): 69-72.
- [6] Chen Q. Comparison of different model for indoor air flow computations[J]. Numerical Heat Transfer: Part B, 1995, 28: 350-375.
- [7] 徐 丽, 翁培奋. 三种通风方式下的室内气流组织和室内空气品质的数值模拟[J]. 空气动力学学报, 2003, 27(6): 5-9.
- XU Li, WENG Pei-fen. Numerical analysis of indoor air distribution and indoor air quality on three ventilation patterns[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2003, 27(6): 5-9.
- [8] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- TAO Wen-quan. Numerical heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988.
- [9] 卞伯绘. 辐射换热的分析与计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- BIAN Bo-hui. Analysis and calculation of radiant heat exchange[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.
- [10] 马仁民. 通风有效性与室内空气品质[J]. 暖通空调, 2000, 30(5): 23-25.
- MA Ren-min. Ventilation effectiveness and IAQ[J]. Heating Ventilation and Air Conditioning, 2000, 30(5): 23-25.
- [11] 金招芬, 朱颖心. 建筑环境学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- JIN Zhao-fen, ZHU Ying-xin. Building environment course[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.
- [12] 邹声华, 张登春. 半封闭某热源厂房通风改造方案的研究[C]//张国强. 首届室内环境安全与可持续发展国际论坛. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- ZOU Sheng-hua, ZHANG Deng-chun. Study on ventilation reform for heat-source workshop[C]//ZHANG Guo-qiang. Proceedings of the 1st International Forum on Indoor Environment Safety and Sustainability. Beijing: China Environmental Science Press, 2003.