

文章编号: 1671-6612 (2022) 01-092-06

# 绍兴某印染厂染色厂房冬季自然通风数值模拟分析

郑现昱<sup>1</sup> 狄育慧<sup>1</sup> 郝振东<sup>2</sup>

(1. 西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710048;  
2. 西安工程大学柯桥纺织产业创新研究院 绍兴 312030)

**【摘要】** 利用 fluent 软件对绍兴市某印染厂染色厂房冬季自然通风进行模拟分析, 讨论不同通风口位置、热源强度对其厂房内部的温度和气流分布的影响。结果表明, 冬季工况下热源强度达到 60°C 和 80°C 时染色工作 B 区温度高于 28°C 的区域面积较大, 不能满足相关规范要求; 通风口高度降低仅在染色 1 区小面积区域上改善了周围温度和风速, 并且导致染色 1 区和染色 2 区之间走廊中心区域温度上升以及风速下降; 分布密集的染色机周围空间狭窄, 风速过低, 形成高温区。该厂房冬季自然通风时, 北墙尽量少开窗, 部分区域可以采用局部通风。

**【关键词】** 印染厂; 送风口位置; 自然通风; 数值模拟

中图分类号 TU834.1 文献标识码 A

## Numerical Simulation Analysis of Natural Ventilation in the Dyeing Workshop of a Shaoxing Printing and Dyeing Factory in Winter Zheng Xianyu<sup>1</sup> Di Yuhui<sup>1</sup> Hao Zhendong<sup>2</sup>

(1. School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048;  
2. Keqiao Textile Industry Innovation Institute, Xi'an Polytechnic University, Shaoxing, 312030)

**【Abstract】** The fluent software was used to simulate and analyze the natural ventilation of the dyeing workshop of a printing and dyeing factory in Shaoxing City in winter, and discuss the influence of different vent positions and heat source intensity on the temperature and airflow distribution inside the workshop. The results show that when the heat source intensity reaches 60°C and 80°C in winter, the area where the temperature of dyeing work zone B is higher than 28°C is larger, which cannot meet the requirements of relevant regulations; the height of the vent is only reduced in the small area of dyeing zone 1. The surrounding temperature and wind speed are improved, and the temperature in the central area of the corridor between the dyeing zone 1 and the dyeing zone 2 is increased and the wind speed is reduced; the densely distributed dyeing machine has a narrow space around the dyeing machine, and the wind speed is too low, forming a high temperature zone. When the plant is naturally ventilated in winter, the north wall should have as few windows as possible, and partial ventilation can be adopted in some areas.

**【Keywords】** Printing and Dyeing Factory; Air outlet location; natural ventilation; Numerical Simulation

基金项目: 西安工程大学(柯桥)研究生学院产学研协同创新项目(19KQZD05)

作者简介: 郑现昱(1996-), 男, 在读研究生, E-mail: 821059302@qq.com

通讯作者: 狄育慧(1964-), 女, 教授, E-mail: yuhui\_di@163.com

收稿日期: 2021-06-03

## 0 引言

印染厂印染过程中各工序都不同程度地使用蒸汽、燃气, 其染色厂房中密集排布的高温热源染

色机, 更容易导致温度分布不均和空气流通不畅。南方印染厂在冬季一般停用机械通风, 采用自然通风<sup>[1]</sup>。自然通风是利用室内外温差造成的热压或风

力作用造成的风压来实现通风换气, 作为一种经济节能的通风方式被广泛应用在各类建筑中。

万鑫等探究了具有内热源的工业厂房自然通风系统进风口离地高度等建筑结构参数对自然通风的影响<sup>[2,3]</sup>。折倩娜等研究了不同热源条件下通风口面积对自然通风的影响<sup>[4]</sup>。Wang 等研究了对流和辐射作用对工业厂房热压通风的影响<sup>[5]</sup>。赵福云等认为科学合理的通风口位置不仅使厂房获得良好的通风效果, 同时还能保障工作人员健康, 降低企业生产成本<sup>[6,7]</sup>。目前对具有内部热源工业厂房的研究大多是在夏季通风方面, 对于冬季通风研究较少。

本文以浙江省绍兴市某印染厂染色厂房为研究对象, 利用 Fluent 软件研究该厂房冬季采用自然通风在不同通风口位置、不同热源强度条件下的温度与气流分布情况。

## 1 物理模型及模拟方法

### 1.1 物理模型及控制方程

以绍兴市某印染厂染色厂房为研究对象(见图 1), 厂房占地面积 12160m<sup>2</sup>, 空间尺寸为 160m×76m×7.7m (长×宽×高)。该厂房通风系统的几何参数如表 1 所示。

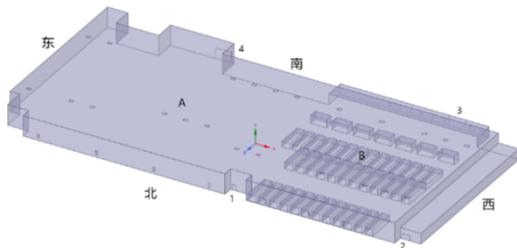


图 1 染色厂房三维物理模型

Fig.1 3D physical model of dyeing workshop

表 1 染色厂房通风系统的几何参数

Table 1 Geometric parameters of the ventilation system of the dyeing workshop

名称	几何尺寸 (m×m)	数量 (个)
北墙进风窗	1.4×0.7	7
南墙进风窗	1.4×0.7	10
北墙门 1	1.5×2	1
北墙门 2	3×2	1
南墙门 3	6×4	1
南墙门 4	6×4	1

屋顶排风口	1.4×0.7	23
-------	---------	----

厂房沿 x 方向分为两个区域, 东侧为白胚存放 A 区, 西侧为染色工作 B 区。将染色工作 B 区的染色机简化为矩形形状<sup>[8]</sup>, 其中染色 1 区(见图 2)和染色 2 区的染色机尺寸为 11m×3m×2.5m (长×宽×高), 染色 3 区的染色机尺寸为 10m×3m×2m (长×宽×高), 染色 4 区的染色机尺寸为 6m×3m×3m (长×宽×高)。进风窗底部距地面高度为 1m。

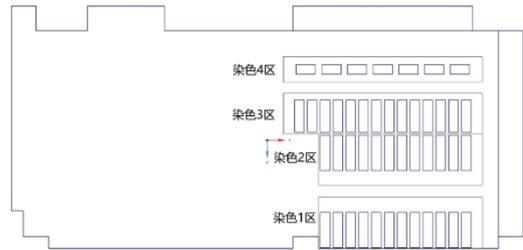


图 2 染色区域划分

Fig.2 Division of dyeing area

自然通风情况下厂房内不可压缩空气流动和传热问题满足流体力学控制方程<sup>[9,10]</sup>组:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g + F_i$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} (k + k_t) \frac{\partial T}{\partial x_i} + S_h$$

式中:  $\rho$  为空气密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\tau$  为时间, s;  $x_i$  和  $x_j$  为速度  $u$  分量的方向;  $u_i$  和  $u_j$  为速度  $u$  在不同方向上的分量, m/s;  $p$  为平均压力, Pa;  $\tau_{ij}$  为应力张量, Pa;  $g$  为自由落体加速度, m/s<sup>2</sup>;  $F_i$  为浮升力, Pa/m;  $h$  为流体比焓, J/kg;  $k$  为导热系数, W/(m·K);  $k_t$  为湍流脉动动能, W/(m·K);  $T$  为流体的热力学温度, K;  $S_h$  为用户自定义的体积热源项, W/m<sup>3</sup>。

### 1.2 数值模拟方法

本文利用计算流体力学软件 Fluent 对模型进行模拟计算。计算模型采用 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型<sup>[4]</sup>, 由于温差引起的浮升力的影响, 选用 Boussinesq 假设<sup>[11]</sup>; 近壁面采用标准壁面函数法; 考虑到热源

对周围空气有存在辐射作用，因此选用 Rosseland 辐射模型<sup>[12]</sup>。选择 SIMPLEC 算法进行求解，方程的离散选用二阶迎风格式。计算区域采用非结构网格，网格在进风口、排风口及染色机热源处进行加密处理，网格总数为 230 万。

### 1.3 边界条件

冬季工况下实测室外环境温度为 7.4℃，气压为 1 个标准大气压；厂房南北两侧门窗均开启，为自然通风的进风口，设置为速度入口边界条件，进风口风速取测试平均值（门风速 1.53m/s、窗风速 2.2m/s）；屋顶排风口的边界条件设置为压力出口；染色机热源设为定壁温边界条件，取现场测量平均值 45.8℃。

### 1.4 模型验证

选择该厂房生产工作者操作和经常停留地点作为测量点位置，其中立姿作业高度为 1.5m。厂房内部测量点如图 3 所示。

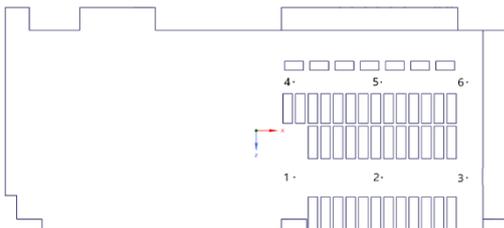


图 3 高度 1.5m 处染色工作 B 区测量点布置

Fig.3 Layout of measurement points in dyeing work area B at a height of 1.5m

在通风口位置不变的情况下，对染色厂房内部进行数值模拟，并将各个测量点的模拟空气温度值与实际测量数据进行对比验证及误差分析。由图 4 可知，模拟温度变化规律基本与实际测量值一致，最小相对误差为 0.55%，最大相对误差 7.21%，平

均误差为 4.95%，误差处于可接受范围内，因此本文模拟方法是比较可靠的。

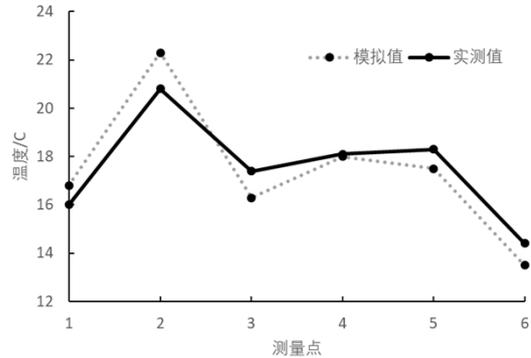


图 4 模拟值与实测值对比

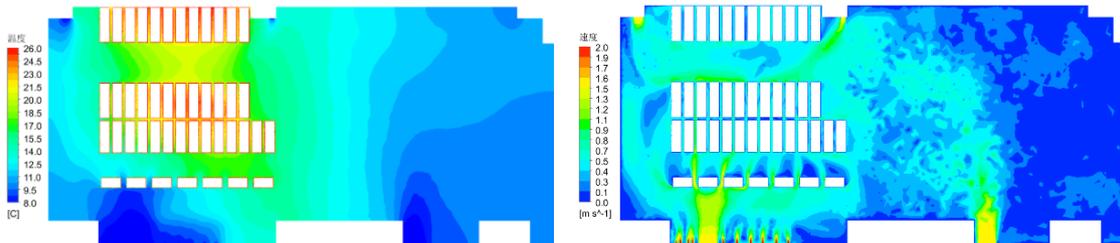
Fig.4 Comparison of simulated and measured values

## 2 模拟结果分析

在通风口面积不变的前提下通过控制变量法改变厂内热源强度及进出风口高度差，研究不同工况下高度 1.5m 处截面上各点的温度和气流分布。根据染色布料种类不同以及工艺不同，依次设定热源强度为 40℃，60℃，80℃；由于受到厂房结构限制通过改变北墙进风窗高度位置来改变进出风口中心高度差，进出风口中心高度差依次为 2m，4m，6m。

### 2.1 进出风口中心高度差为 2m 不同热源强度下的模拟结果

冬季工况下实测室外温度为 7.4℃，当北墙进出风口中心高度差为 2m，热源强度从 40℃到 80℃时，高度 1.5m 截面上的温度云图、速度云图如图 5 所示。可以看出高温区（温升大于 3℃）主要集中在染色 1 区和染色 2 区之间的走廊，染色 3 区和染色 4 区之间的走廊以及染色机周围。



(a) 高度 1.5m 处热源 40℃时温度场和速度场

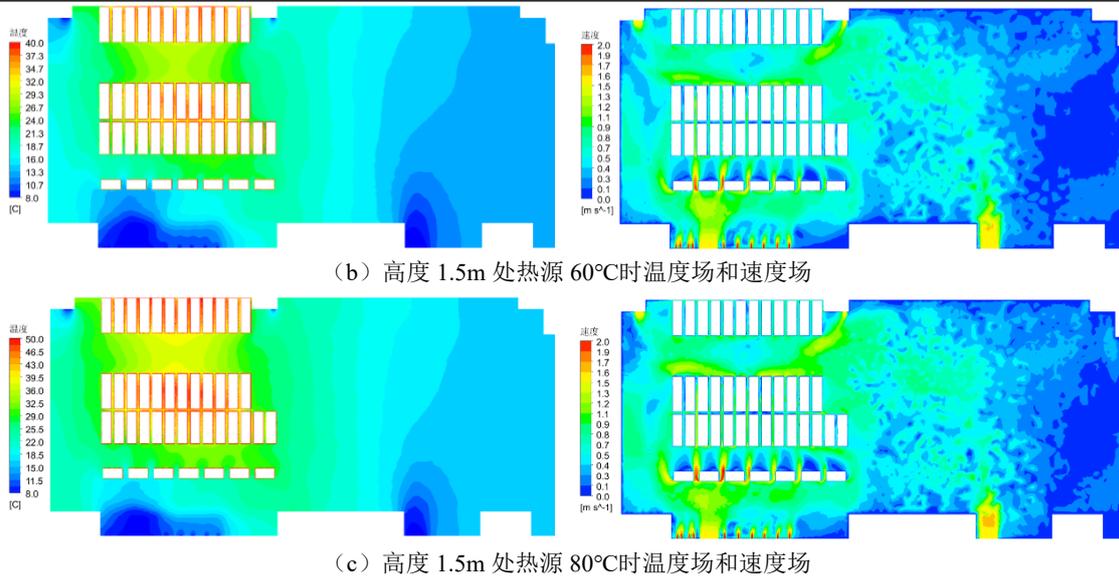


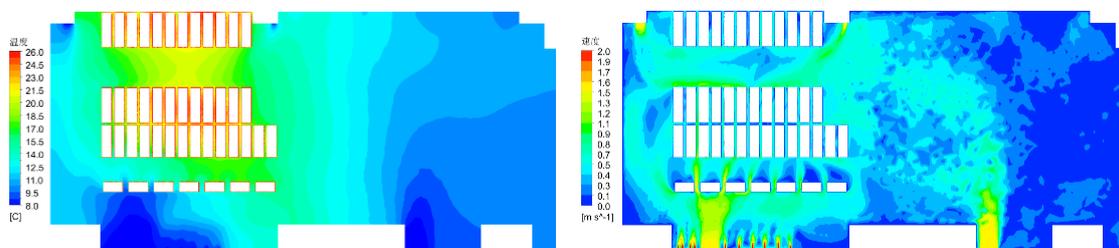
图 5 进出风口中心高度差为 2m 时的模拟结果

Fig.5 Simulation results when the center height difference between inlet and outlet is 2m

从速度云图中看出, 染色 1 区中间位置空气流速低于 0.3m/s。当热源强度为 40°C 时, 染色 1 区和染色 2 区之间走廊的中心区域的气流速度低于 0.4m/s, 空气流通性较差, 出现流通死区, 走廊大部分区域温度在 16.2~20.7°C 之间, 随着热源强度的提高, 空气流通得到一定改善, 但热源强度为 80°C 时, 走廊大部分区域温度高于 32.5°C, 中心区域温度更是超过 36°C, 较大的温度梯度, 给工作人员带来极大的影响。由于受到染色 4 区染色机设备的阻挡, 染色 3 区和染色 4 区之间走廊的空气流速较低, 大部分区域的空气流速低于 0.4m/s, 局部空气流速低于 0.1m/s, 导致该区域温度较高。分布密集的染色机容易阻碍空气的流动, 热源产生的大量热量不能及时被带走, 当热源强度为 80°C 时, 染色机之间形成了 43°C 以上的局部高温区。染色工作 B 区东西两侧走廊温度分布比较合理, 高温区域主要分布在染色机周围。

## 2.2 进出风口中心高度差为 4m 不同热源强度下的模拟结果

当北墙进出风口中心高度差为 4m, 热源强度从 40°C 到 80°C 时, 高度 1.5m 截面上的温度云图、速度云图如图 6 所示。此工况下高温区与进出风口高度差 2m 工况下高温区分布规律基本相同。北墙进风窗高度的降低, 使附近区域温度有所降低, 当热源强度为 80°C 时, 染色 1 区温度超过 43°C 的高温区临近进风窗的周围出现温度低于 39.5°C 以及局部空气流速小于 0.4m/s 的区域; 染色 1 区和染色 2 区之间走廊中心区域温度高于 37.5°C 的面积较大。染色机之间狭窄的空间导致的高温区依旧存在。从速度云图中看出, 随着热源强度的减小, 染色 1 区和染色 2 区之间走廊空气流速低于 0.4m/s 的区域面积逐步增大, 染色 B 区东西两侧走廊和染色 4 区周围空气流通性也逐渐降低。



(a) 高度 1.5m 处热源 40°C 时温度场和速度场

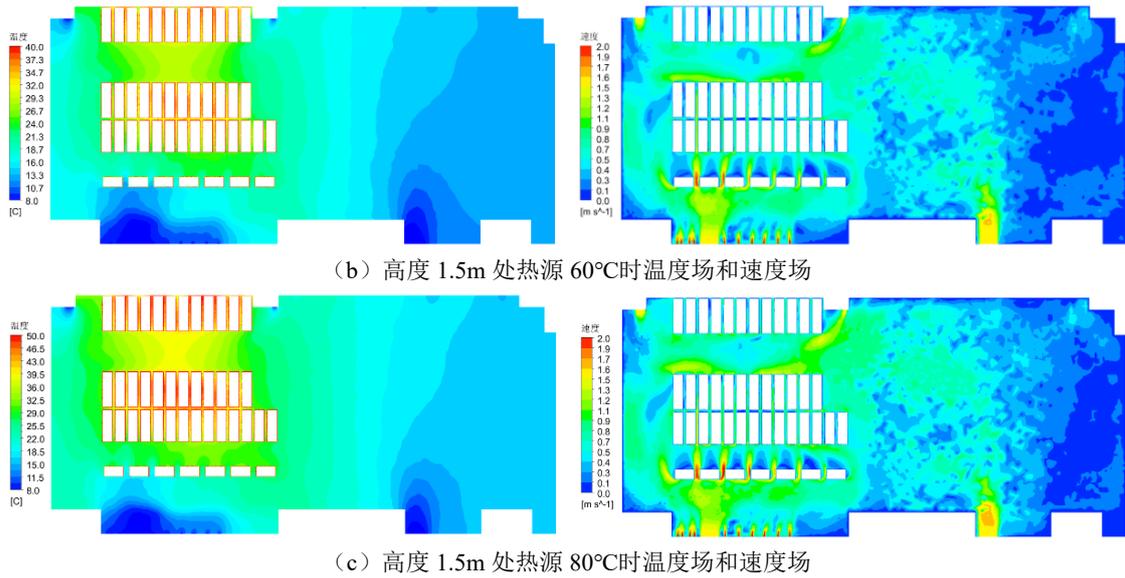


图 6 进出风口中心高度差为 4m 时的模拟结果

Fig.6 Simulation results when the center height difference between inlet and outlet is 4m

### 2.3 进出风口中心高度差为 6m 不同热源强度下的模拟结果

当北墙进出风口中心高度差为 6m，热源强度从 40°C 到 80°C 时，高度 1.5m 截面上的温度云图、速度云图如图 7 所示。该工况下高温区域与前两种工况下分布规律基本相似。北墙进风窗中心距地面高度为 1.7m（底部距地面高度为 1m），染色 1 区靠近进风窗口处空气流速高于 1.2m/s，局部温度小于 16°C，远离窗口的染色机周围出现大面积空气

流速小于 0.4m/s 的区域。染色 1 区和染色 2 区之间走廊中心区域空气流通性能相对较差，三种热源强度模拟结果中，都出现了局部气流速度低于 0.1m/s 的区域，热源强度 40°C 时最为明显，当热源强度为 80°C 时，临近染色机的区域温度超过 39.5°C。当热源强度为 80°C 时，染色工作 B 区西侧走廊靠近染色 3 区的周围局部空气流速低于 0.3m/s。

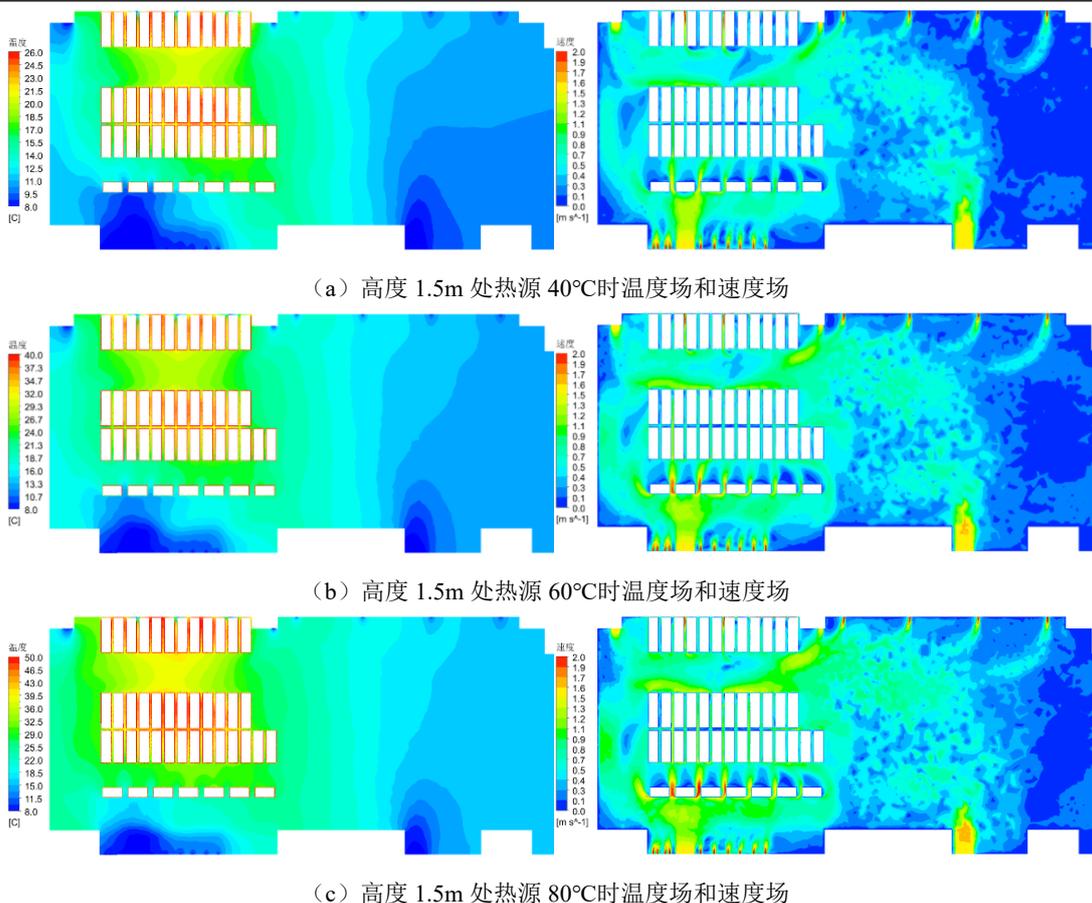


图 7 进出风口中心高度差为 6m 时的模拟结果

Fig.7 Simulation results when the center height difference between inlet and outlet is 6m

2.4 不同进出风口中心高度差的模拟结果对比

将冬季工况下不同进出风口中心高度差模拟结果进行比较发现: 相同热源强度条件下, 北墙进风窗中心高度降低, 染色 1 区染色机周围空气流速低于 0.3m/s 的区域面积扩大; 室外风由进风窗进入染色 1 区, 经过靠近窗口的染色机时能更好的带走热源产生的热量, 然后在染色 1 区和染色 2 区之间走廊中心区域汇聚, 并与多股气流相互干扰, 通过速度云图看出, 走廊中心区域空气流通性随进出风口中心高度差增大(进风口中心高度降低)而降低, 该区域温度也随之增加, 表 2 给出了染色 1 区和染色 2 区之间走廊区域平均温度模拟值, 说明同一热源强度条件下, 进出风口中心高度差的提升, 导致走廊温度梯度增大, 染色厂房工作环境更加糟糕。进风口中心高度降低时, 染色工作 B 区西侧走廊温度随之增高, 局部空气流速逐步降低, 但东侧走廊的温度场和速度场并未发生明显变化。染色 3 区和染色 4 区及其中间走廊区域由于远离北墙

进风窗以及染色 1 区和染色 2 区染色机设备的阻碍, 进出风口高度差的改变对该区域影响较小。

表 2 染色 1 区和染色 2 区之间走廊区域平均温度模拟值  
Table 2 Simulation values of average temperature in the corridor between dyeing zone 1 and dyeing zone 2

热源强度 (°C)	进出风口中心高度差 (m)		
	2	4	6
40	18.42	18.54	18.62
60	25.77	26.05	26.24
80	34.38	34.75	35.11

3 结论

(1) 冬季工况下采用自然通风, 热源强度为 60°C和 80°C时大片区域温度高于 28°C, 不能满足设计规范<sup>[13]</sup>要求。

(2) 增加进出风口中心高度差能够一定程度上改善染色 1 区局部区域空气流动和温度, 但扰乱

了染色 1 区和染色 2 区之间走廊中心区域的空气流动,导致该区域热量无法及时被带走,在冬季北墙应尽量少开窗。

(3) 除染色 4 区以外的其他三个染色区的染色机由于分布比较密集周围空间狭窄,小范围空气流速过低,容易出现热量堆积,形成局部高温区。

(4) 当热源强度为 60°C 和 80°C 时,可以考虑在染色工作 B 区采用局部送风,特别是染色 1 区和染色 2 区之间走廊区域,从而降低工作区温度。

#### 参考文献:

- [1] 陈安保. 印染车间的通风问题及其改进措施[J]. 暖通空调,1999,(4):55,75.
- [2] 万鑫, 苏亚欣. 建筑结构对带内热源工业厂房自然通风影响的数值研究[J].暖通空调,2009,39(11):60-64.
- [3] 万鑫, 苏亚欣, 杨艳超. 工业厂房自然通风的数值模拟及结构改进[J].中国安全科学学报,2008,(8):103-108.
- [4] 折倩娜, 孟晓静, 王怡. 单侧进风口面积对工业厂房热压通风量的影响[J].暖通空调,2018,48(11):14-17.
- [5] Yi Wang, Xiaojing Meng, Xiaoni Yang, et al. Influence of convection and radiation on the thermal environment in an industrial building with buoyancy-driven natural ventilation[J]. Energy & Buildings, 2014,75.
- [6] 曹为学. 高大空间工业厂房自然通风效果优化研究[J]. 洁净与空调技术,2016,(1):5-8.
- [7] 赵福云,刘科君,申广,等.工业建筑室内多元通风送风口位置对通风效果的影响研究[J]. 湖南工业大学学报,2019,33(2):6-11.
- [8] 黄银鹏.印染厂染色定型车间有机废气的综合治理研究[D].西安:西安工程大学,2016.
- [9] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006:202-206.
- [10] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001:1-6.
- [11] 彭兆晨, 狄育慧, 郝振东. 建筑临墙开窗对室内热压通风的模拟研究[J].制冷与空调,2021,35(1):51-57.
- [12] 秦文慧,黄亚继,曹健华,等.寒冷地区某电厂主厂房夏季通风的数值模拟分析[J]. 暖通空调,2018,48(11):29-34,98.
- [13] GB 50426-2016, 印染工厂设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社,2017.