

# 印刷车间冬季分区域空调气流组织效果测试研究

申 健<sup>1</sup>, 李安桂<sup>1</sup>, 杨长青<sup>1</sup>, 张 莹<sup>1</sup>, 赵玉娇<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安科技大学能源学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 传统空调方式下印刷车间类高大空间建筑冬季热分层明显, 上部热量浪费较大。以西安某报社印刷厂车间分区域空调系统为对象, 采用温湿度记录仪及铜-康铜热电偶实地测试了冬季车间热分层、垂直温度分布和相对湿度变化情况, 并对比分析了空调未开启和空调制热两种工况。结果表明, 车间所采用的空调送风方式在冬季能有效地破坏室内温度分层现象, 有效控制印刷车间相对湿度, 提高了空调暖风的利用程度。

**关键词:** 高大空间; 热风供暖; 热分层; 气流组织; 现场测试

中图分类号: TU83

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)02-0265-06

## Field test on air distribution of multi-zone air-conditioning in a large printing house in winter

SHEN Jian<sup>1</sup>, LI Angui<sup>1</sup>, YANG Changqing<sup>1</sup>, ZHANG Ying<sup>1</sup>, ZHAO Yujiao<sup>2</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Energy and Resource, Xi'an Univ. of Sci. and Tech., Xi'an 710054, China)

**Abstract:** There is a positive vertical temperature gradient between the floor and the ceiling, especially in winter, due to the influence of buoyancy forces of warm air. During the heating season, the presence of a warm air layer below the ceiling will increase the heat losses. In order to keep comfort people in the occupied zone, more heat would be required. This paper measures the temperature profiles and thermal stratification in a large printing house either with air conditioning heating or without air conditioning. The results show that the air distribution conducted in the printing house prevents the thermal stratification effectively with a good control of humidity, which enhances the efficiency of the warm air utilization.

**Key words:** large space, warm air heating, thermal stratification, air distribution, field test

印刷厂车间属于高大空间建筑, 具有建筑体积大、内部热源体积大、发热量大、气流复杂和影响空调系统因素多等特点。采用一般空调方式下的车间热分层明显、负荷大且上部空间耗热量大, 造成很大的能源浪费<sup>[1]</sup>。在冬季, 由于高大空间室内热源在竖直方向上产生明显的热分层现象<sup>[2-3]</sup>, 导致热空气聚集在建筑顶部, 大部分热量通过顶棚散失, 而底部人员工作区的温度较低, 使得热量无法被充分利用<sup>[4-5]</sup>。Rahimi 等<sup>[6]</sup>在相同能耗条件下, 研究了房间尺寸、墙面温度等因素对热风供暖气流流动的影响和提高房间下部区域温度的方法。为了提高大空间建筑送热风时下部区域的温度和送风能量利用率, 数值模拟是一种常用的试验方法。辛峰等<sup>[7]</sup>以重庆地区某高大机械加工厂房分层空调为对象, 分析了冬季分层供暖

气流分布特性, 结果表明分层供暖可使热射流充分作用于供暖区。

樊越胜<sup>[8]</sup>采用数值模拟方法针对高大空间工业建筑采暖方式进行了对比研究, 结果表明采用热风采暖方式冬季温度梯度最大, 不利于冬季节能。钟珂等<sup>[9]</sup>则针对分层气流组织改善高大空间热风供暖的节能性和热舒适效果进行了数值模拟研究, 探讨了大空间送、回风口高度对室内热环境的影响。试验研究方面, 主要集中在地板下送风和地板辐射采暖等研究, 且一般试验和测试范围为 0.1~1.7m<sup>[10-11]</sup>。然而, 目前较少有针对高大空间热分层效果破坏方面的研究。

采用空调制热的印刷车间类高大空间建筑, 可通过合理的气流组织设计, 破坏空气温度分层, 将送风热量调配到下部工作区。针对西安某印刷

车间分区域空调气流组织方式影响下的冬季供热区域热环境进行了测试,对比分析了冬季空调未开启和空调制热两种工况下高大车间热分层、垂直温度分布和相对湿度的变化情况。

## 1 现场测试

### 1.1 车间概况及气流组织形式

印刷车间(印刷机体量大、产热大)属于具有大型热源的高大建筑空间。车间内空调的任务是为印刷机冷却降温,同时保证人员工作区的热环境。由于印刷机的摩擦散热量很大,室内冷负荷绝大部分来自于印刷机本身,加之印刷机体型高大,给兼顾冬夏季送风效果的空调气流组织形式设计带来了挑战。采用传统的分层空调方式,虽然能够满足夏季的冷风需要,但冬季由于空气在浮力的作用下上升而加剧了热分层现象。

基于双股射流理论,结合气流组织末端特性,本研究提出了一种采用下层旋流风口破坏热分层<sup>[12]</sup>,上层侧送百叶风口降低并阻止热空气流失的分区空调气流组织形式。该气流组织形式既能满足夏季高大印刷机上部冷却降温的需要,又能保障冬季高大厂房内人员作业区域的热环境。

本文测试的印刷车间为联合车间,主要由印刷车间、纸库、更衣室和材料库等组成。整个印刷车间长40.0 m,宽18.0 m,最高点距地面15.5 m,总建筑面积为10 089.25 m<sup>2</sup>。设备散热量由工艺提供,为136 kW/台。环境控制的主要对象为印刷部,层高13 m。

印刷部采用单侧分区域空调送风方式,上层采用双层百叶风口送风,保证对印刷机上部的冷却,风口底标高距地面8.0 m,下层采用45°旋流风口送风,风口底标高距2层地面4.5 m。回风采用异侧上下部分层回风方式,上层回风口底标高距地面3.2 m,下层回风口底标高距地面0.2 m。本测试主要研究印刷部的温度及相对湿度分布情况。

### 1.2 测点布置

2015年11月11日及11月20日分别对该印刷厂室内温度及相对湿度进行连续测试,测试时间为每晚11:30至次日04:30(工作时间)。分别在两个印刷机两侧及中间三个位置的0.1~8.1 m的高度范围内布置3组测点,高度间隔为1.0 m。采用的测试仪器为:温湿度自记录仪及铜-康铜热电偶,仪器精度的温度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 $\pm 1\%$ ,并已校核。风口位置及测点布置如图1

所示。

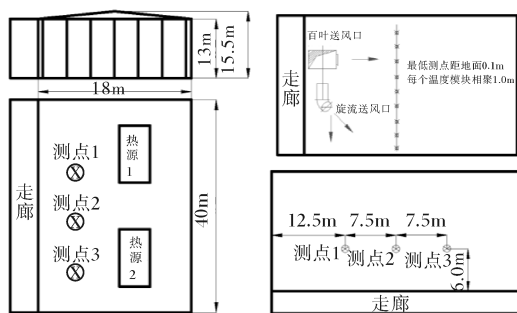


图1 建筑尺寸及现场实测测点布置示意

Fig. 1 Floor plan of the printing house and layout of the thermocouple trees

## 2 测试结果及分析

### 2.1 冬季空调未开启工况

测试期间室外温度及相对湿度随时间变化的情况如图2(a)。可以看出,室外温度随时间变化整体呈现下降趋势。测试期间,室外最高温度为 $10.13^{\circ}\text{C}$ 出现在测试开始后20min(23:50 p.m.),最低温度为 $9.1^{\circ}\text{C}$ 出现在测试开始后270 min(04:00 a.m.)。而室外相对湿度则出现先增大后减小,与温度变化相反的趋势。室外相对湿度的最大值为92%,出现在温度的第一个下降拐点,即测试开始后50min(00:20 a.m.);而最小值为80%,出现在测试开始后120min(01:30 a.m.)。

对于图2(b)所示的热电偶树1,每个时段内的最低温度均出现在0.1 m高度,温度范围为 $17.5\sim 18.0^{\circ}\text{C}$ ,最高温度均出现在8.1 m高度,温度范围为 $18.6\sim 21.3^{\circ}\text{C}$ 。对于图2(c)所示的热电偶树2,每个时段内的最低温度亦都出现在0.1 m高度,温度范围为 $17.3\sim 17.7^{\circ}\text{C}$ ,最高温度均出现在8.1 m高度,温度范围为 $18.5\sim 21.1^{\circ}\text{C}$ 。对于图2(d)所示的热电偶树3,每个时段内的最低温度均出现在0.1 m高度,温度范围为 $17.9\sim 18.6^{\circ}\text{C}$ ,最高温度均出现在8.1 m高度,温度范围为 $18.4\sim 21.3^{\circ}\text{C}$ 。对比三组热电偶树同一高度同一时段内的温度,相差不超过 $1.2^{\circ}\text{C}$ 。由此说明同一时段不同水平位置温度较均匀,温差主要存在于垂直方向。从厂房整体高度来看,垂直温度梯度同样随着时间推移而逐渐增大,出现不同程度的热分层现象。特别是02:31~03:30以后,整体垂直温差明显增大。

温度随时间的变化则更清晰地反映了这一特征。以热电偶树1为例,如图3,温度整体趋势都随着时间的推移而增大。与室外温度的变化相比,

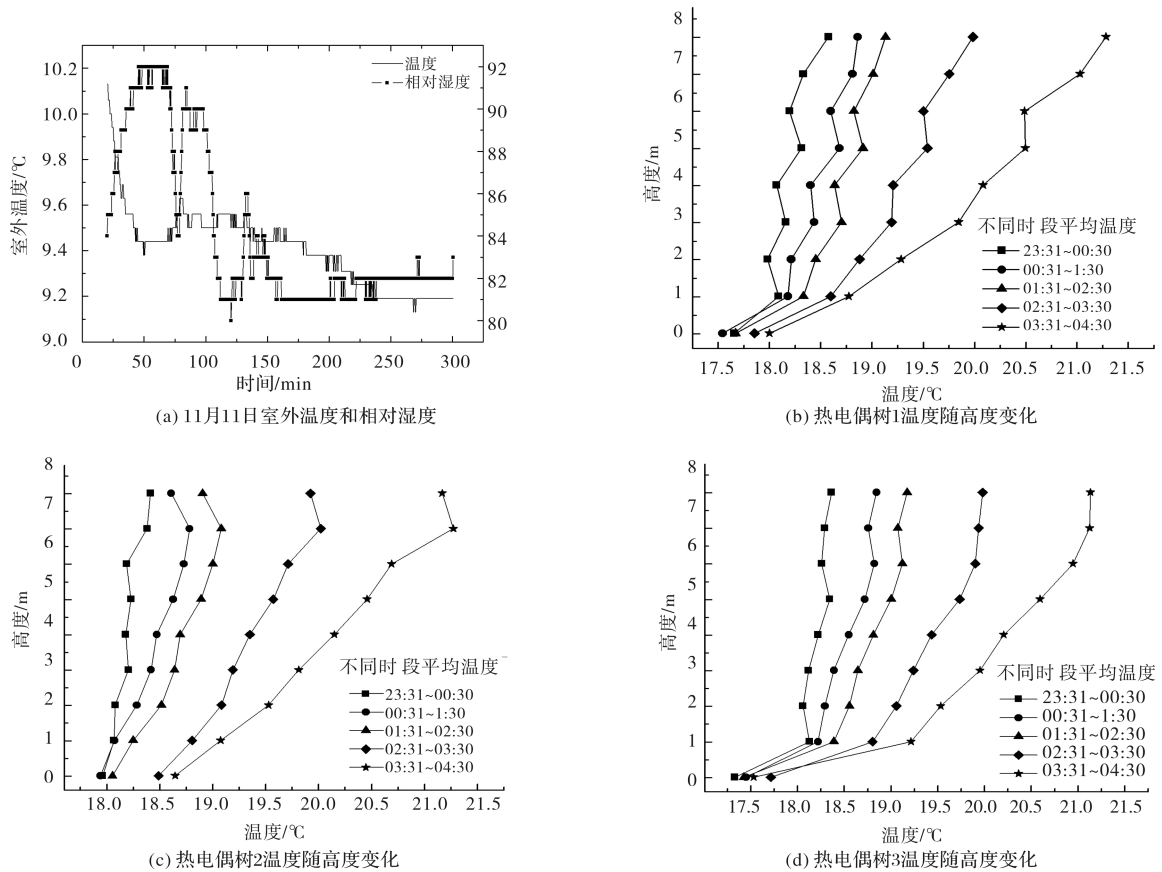


图2 冬季空调未开启工况热电偶树1~3温度随高度变化及对应室外温湿度变化

Fig. 2 The variation of temperature for different heights of thermocouple tree 1~3 without air-conditioning in winter and the related outdoor temperature and relative humidity

变化趋势相反,说明维护结构保温的良好性能使室内温度受到室外温度的影响不大,起主导作用的是室内热源的强度和工作特点。不同高度处的温度随时间增加而升高。测试开始至180 min(2:30 a.m.)时温度增加缓慢,各高度测点温度增大幅度的范围为0.2~0.8℃,之后各高度测点(除0.1m处)温度升高幅度明显增加,范围为0.3~2.4℃,高度越高温度增幅越大。原因在于测试开始后180 min,即02:30 a.m.印刷厂房内的运行机器由一台变为两台,热源数量的增加导致室内进一步快速升温。

厂房内的相对湿度变化同样受到机器运行的影响,以测点树1为例,其相对湿度整体趋势都随着时间的推移而增大,如图4所示。与室外相对湿度的变化趋势不同的是,室内相对湿度第一次升高稍滞后于室外相对湿度升高;而室内相对湿度第二次升高时,特别是3.1 m以上高度处的相对湿度测试值明显呈快速上升趋势,而此时室外相对湿度基本保持不变。说明室内相对湿度同样并未受制于室外相对湿度的变化。另外,室内相对

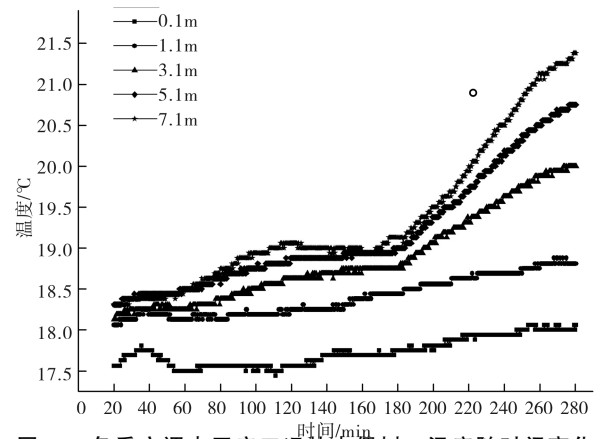


图3 冬季空调未开启工况热电偶树1温度随时间变化

Fig. 3 The variation of temperature for different time of thermocouple tree 1 without air-conditioning in winter

湿度与室内温度的相对变化并未出现相反趋势,甚至出现与温度变化趋势一致的情况(测试开始180 min后),而区别于室外的情况。不同高度的相对湿度随时间增加而升高。测试开始至112 min(01:22 a.m.)左右,相对湿度第一次增大,峰值范围为77%~83%,之后各高度测点相对湿度略有下降,波谷值范围为74%~80%,直至180 min

后相对湿度再次升高达到测试过程中各个高度测点处的最大相对湿度,其范围为78%~100%。需要指出,0.1 m和1.1 m高度测点相对湿度变化平稳,几乎未出现的快速增长阶段。对于0.1 m和1.1 m高度的测点,测试全过程相对湿度值的均方差分别为0.89和1.58。后期室内相对湿度出现快速增长的原因同样与机器运行数量增加有关。虽然印刷设备本身没有敞开的湿表面,但印刷完成的新报纸使室内的相对湿度增大。同时,相对湿度在高度上出现类似于温度的分层,这是由于水蒸气的分子量小于空气的平均分子量,相比之下受到更大的浮力而聚集在高度较高的位置,从而使水蒸气分压力增大。

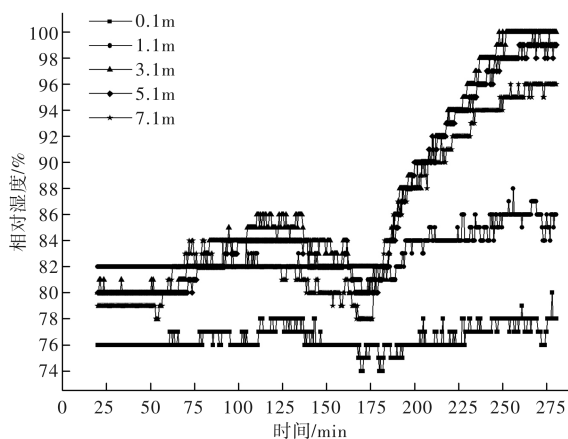
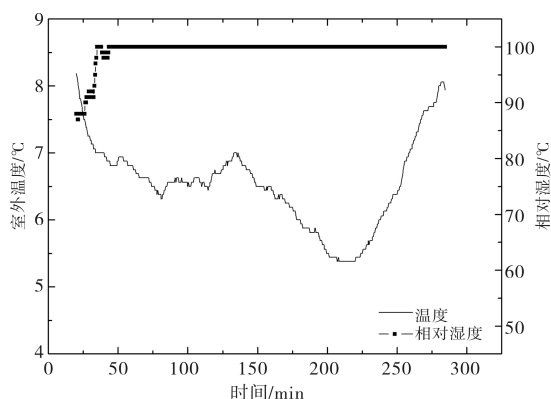


图4 冬季空调未开启工况测点树1相对湿度随时间变化

Fig. 4 The variation of relative humidity for different time of thermocouple tree 1 without air-conditioning in winter

## 2.2 空调制热工况

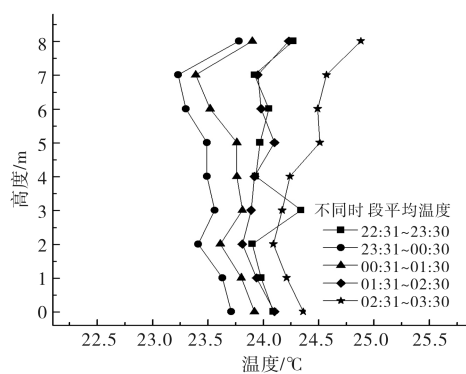
在空调制热工况的测试当天,同样监测了同时段室外温度及相对湿度随时间变化的情况,如图5(a)所示。可以看出,室外温度随时间变化整体呈下降趋势。测试期间,室外最高温度为8.2℃出现在测试开始后第20 min(23:50 p. m.),最低



(a)11月20日室外温度和相对湿度

温度为5.4℃出现在测试开始后207 min(02:57 a. m.).而室外相对湿度则出现先减小后增大,与温度变化相反的趋势。室外相对湿度的最大值为100%,出现在温度下降后,即测试开始后35 min(00:05 a. m.);而最小值为88%,出现在测试开始后20 min(23:50 p. m.).

印刷车间在冬季采取空调供暖,送风温度为29.0℃。不同时段室内平均温度随高度的变化如图5(b)-(d)所示。可以看出,热电偶串测试结果均反映出室内不同时段内平均温度随高度的增加有较大的差异。对于图5(b)所示的热电偶树1,不同时段温度分布规律不同。00:30 a. m.以前,最低温度均出现在7.1 m高度,温度范围为23.2~23.9℃,最高温度均出现在8.1 m高度,温度范围为23.8~24.3℃。00:30至01:20 a. m.之间,最低温度均出现在2.1 m高度,温度为23.6℃,最高温度均出现在3.1 m高度,温度为23.8℃。01:30 a. m.以后,最低温度均出现在2.1 m高度,温度范围为23.2~24.1℃,最高温度均出现在8.1 m高度,温度范围为24.2~24.9℃。对于图5(c)所示的热电偶树2,每个时段内的最低温度亦出现在7.1 m高度,温度范围为22.5~24.0℃,对于23:30~01:30时段最高温度出现在5.1 m高度,温度范围为24.0~24.1℃。其他时段最高温度出现在8.1 m高度,温度范围为24.0~25.1℃。对于图5(d)所示的热电偶树3,每个时段内的最低温度均出现在4.1~5.1 m高度,温度范围为23.2~24.4℃,最高温度均出现在7.1~8.1 m高度,温度范围为23.8~25.0℃。对比三组热电偶树同一高度同一时段内的温度,相差不超过1.0℃。由此说明同一时段不同水平位置温度均匀。从厂房整体高度来看,垂直温度梯度同样随着时间推移而波动,并未出现逐渐增大的情况,说明垂直方向温度也较均匀。



(b)热电偶树1温度随高度变化

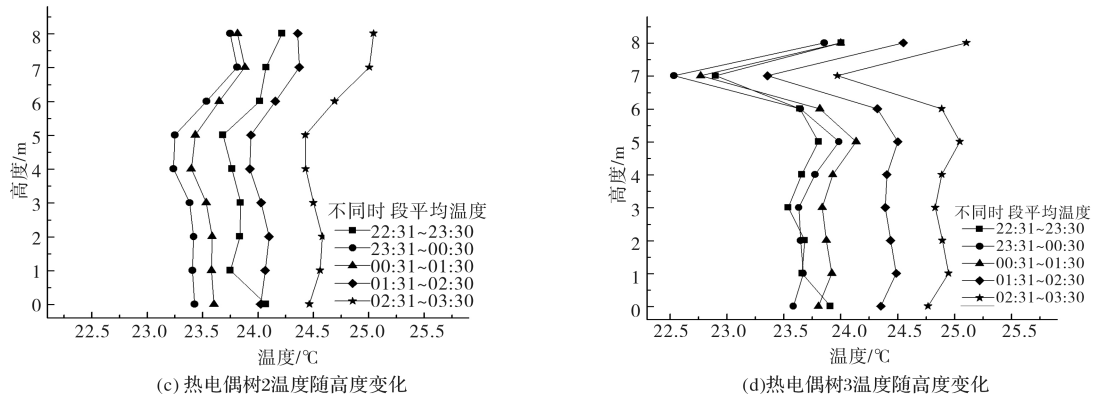


图5 空调制热工况热电偶树1~3温度随高度变化及对应室外温湿度变化

Fig. 5 The variation of temperature for different heights of thermocouple tree 1~3 with airconditioning heating and the related outdoor temperature and relative humidity

从温度随时间的连续变化的角度分析,温度整体趋势都随着时间的推移先减小后增大.与室外温度的变化相比,变化趋势相反,说明室内温度并没有受到室外温度的影响,起主导作用的是室内热源的强度和工作特点.以热电偶树1为例,如图6可以看出,不同高度的温度随时间增加而整体呈现先降低后缓慢升高的趋势.测试开始后,各高度测点温度逐渐降低,最低值温度范围为 $23.1\sim 23.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ .测试开始至 $40\text{ min}$ ( $23:05\text{ p.m.}$ )温度明显增加,各高度测点温度增大幅度的范围为 $0.8\sim 1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,高度越高,测点温度增幅越大.

相对湿度随时间的变化整体趋势都随着时间的推移而波动,以测点树1为例,如图7所示,主要集中在 $50\%\sim 66\%$ 之间,与室外相对湿度的变化趋势并不一致.室内相对湿度自开始测试后出现3次峰值,而室外相对湿度在 $50\text{ min}$ 内迅速达到峰值 $100\%$ ,在后续测试过程中保持不变.说明室内相对湿度同样并未受制于室外相对湿度的变化.另外,室内相对湿度与室内温度的相对变化并未出现相反趋势,甚至出现与温度变化趋势一致的情况(测试开始 $230\text{ min}$ 后),而区别于室外的情况.测试开始至 $40\text{ min}$ ( $00:10\text{ a.m.}$ )左右,相对湿度第一次增大,峰值范围为 $58\%\sim 66\%$ ,而后至 $145\text{ min}$ ( $01:45\text{ a.m.}$ )左右,各高度测点相对湿度略有下降,波谷值范围为 $50\%\sim 56\%$ ,直至 $170\text{ min}$ 后相对湿度第二次升高达到峰值,其范围为 $54\%\sim 64\%$ .而后至 $200\text{ min}$ 左右,各高度测点相对湿度略有下降,波谷值范围为 $52\%\sim 58\%$ ,直至 $220\text{ min}$ 后相对湿度第三次升高达到峰值,其范围为 $56\%\sim 67\%$ .需要指出, $0.1\text{ m}$ 高度测点相对湿度与其他高度处的相对湿度趋势一样,但其值降低 $2\%\sim 6\%$ .

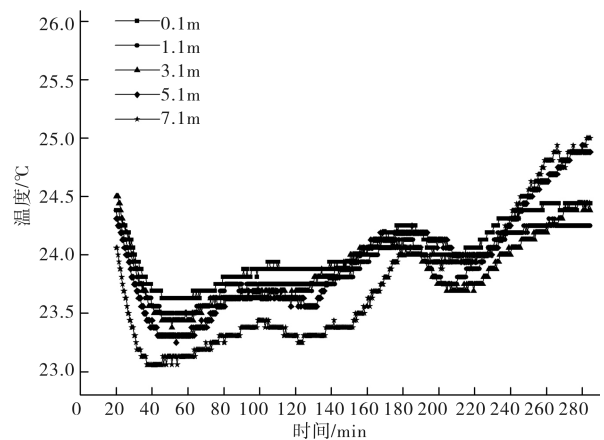


图6 空调制热工况热电偶树1温度随时间变化

Fig. 6 The variation of temperature for different time of thermocouple tree 1 with air-conditioning heating

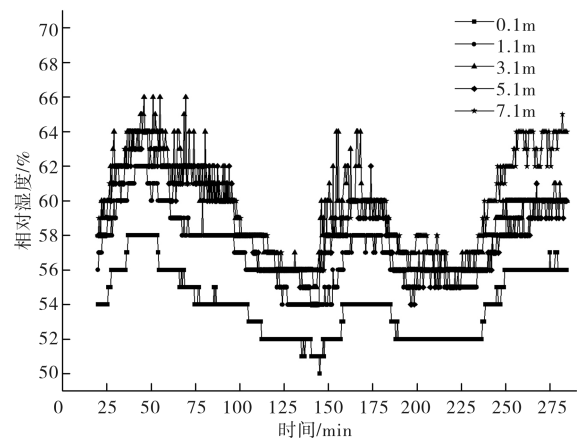


图7 空调制热工况测点偶树1相对湿度随时间变化

Fig. 7 The variation of relative humidity for different time of thermocouple tree 1 with air-conditioning heating

### 2.3 两种工况垂直温差对比

对比两种工况如图8所示,对于空调未开启工况,三个热电偶树最大的垂直温差分别为 $3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,均出现在时段5,即 $03:31\sim 04:30\text{ a.m.}$ 时段内.主要原因是印刷设备的分时段运行.在测试开始时,仅有一台设备运行(机器2),

而在 02:31a.m. 之后第二台机器也开启, 两台机器同时运行. 对比 3 组热电偶树最大温差随时段的变化可以发现, 热电偶树 1 和热电偶树 2 的最大温差比较接近, 热电偶树 2 略高于热电偶树 1; 而热电偶树 3 在各时段的最大温差均小于另外两组热电偶树的测值. 从工作区的头脚温差来看, 头脚温差最大值为  $2.0^{\circ}\text{C}$  出现在时段 03:31~04:30a.m. 内. 从以上分析可以看出, 热源数量的增加直接增大了垂直温差(包括整体垂直温差和头脚温差), 导致热分层情况更加明显.

对于空调制热工况, 三组热电偶树同一高度同一时段内的温度, 相差不超过  $1.0^{\circ}\text{C}$ , 厂房内垂直温度梯度同样随着时间推移而波动, 并未出现逐渐增大的情况, 说明垂直方向温度也较均匀. 对比 3 组热电偶树最大温差随时段的变化可以发现, 热电偶树 1 和热电偶树 3 的最大温差比较接近, 热电偶树 2 略高于热电偶树 1 和 3. 主要原因是热电偶树 1 和热电偶树 3 靠近印刷设备, 受机器散热影响较大.

对比空调未开启和空调制热工况的垂直温度分布情况, 可以看出, 测试对象所采用的分区域空调气流组织设计, 在空调制热工况时并没有加剧高大厂房内温度分层的时间累积效应, 反而削弱了空调未开启工况时存在的热分层现象. 空调制热工况垂直温差的平均值为  $0.8^{\circ}\text{C}$ , 仅为空调未开启工况垂直温差平均值的一半.

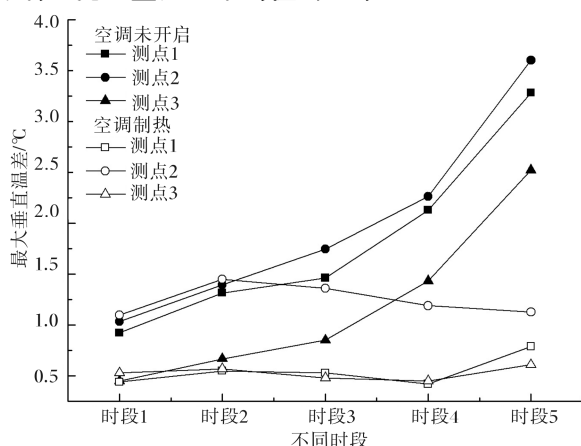


图8 空调未开启工况和空调制热工况不同时段垂直温差对比

Fig. 8 The comparison of vertical temperature for different period between with and without air-conditioning heating

### 3 结论

通过实地测试的方法, 研究了冬季报社印刷厂高大车间热分层、垂直温度分布和相对湿度的变化情况. 重点对比了空调未开启工况和空调制

热工况的车间垂直温度分布. 结论如下:

(1)对于空调未开启工况, 室内存在温度分层现象, 且随着印刷设备的持续运行, 室内温度不断升高, 热分层现象不断加强. 不同时段的垂直温差范围为  $0.5\sim 3.6^{\circ}\text{C}$ , 最大热分层为  $0.4^{\circ}\text{C}/\text{m}$ . 同时, 随着印刷产品不断产生, 室内相对湿度也出现明显增加, 相对湿度最大值可达 100%, 出现在不同测点的 3.1~4.1 m 高度.

(2)对于空调制热工况, 车间内的垂直温度分布随着时间推移而波动, 垂直方向温度也较均匀, 并无明显的热分层现象. 不同时段的垂直温差范围为  $0.4\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ . 室内相对湿度也得到了控制, 相对湿度最大值为 68%.

(3)车间所采用的空调送风方式在冬季效果良好, 有效地破坏了室内温度分层现象, 提高了空调暖风的利用程度, 可为同类型高大厂房空调设计提供参考.

### 参考文献 References

- [1] 范存养. 国外大空间建筑的空调设计. 暖通空调[J], 1996, 26(4): 39-49.  
FAN Cunyang. Large space air conditioning design abroad[J]. HV&AC, 1996, 26(4): 39-49.
- [2] SAID M N A, MACDONALD R A, DURRANT G C. Measurement of thermal stratification in large single-cell buildings[J]. Energy & Buildings, 1996, 24(2): 105-115.
- [3] CHOW W K, FUNG W Y, WONG L T. Preliminary studies on a new method for assessing ventilation in large spaces[J]. Building & Environment, 2002, 37(2): 145-152.
- [4] CIBSE guide B: Heating, ventilating, air conditioning and refrigeration[M]. Chongqing: Chongqing Univ. Press, 2008.
- [5] 胡万玲, 管勇. 空调送风角对冬季办公室气流组织影响的数值研究[J]. 兰州交通大学学报, 2009, 28(3): 151-154.  
HU Wanling, GUAN Yong. Numerical simulation of air field with different angles of wall mounted[J]. J. of Lanzhou Jiaotong Univ., 2009, 28(3): 151-154.
- [6] RAHIMI M, TAJBAKSHI K. Reducing temperature stratification using heated air recirculation for respectively thermal energy saving[J]. Energy and Building, 2011, 43(10): 2656-2661.
- [7] 辛峰, 杨燕慧, 杨德福. 高大空间分层供暖室内气流的数值模拟研究[J]. 建筑节能, 2009(4): 21-23.  
XIN Feng, YANG Yanhui, YANG Defu. Numerical simulation research on air-distribution in a stratified heating large space[J]. Heating ventilation & equipment, 2009(4): 21-23.

(下转第 288 页)

- (12): 47-50.
- [3] 张燕, 顾静忠. 浅析透水混凝土配合比设计技术[J]. 工程建设与设计, 2011(10): 152-154.  
ZHANG Yan, GU Jingzhong. Analysis on mixing proportion design of pervious concrete[J]. Construction & Design for Engineering, 2011(10): 152-154.
- [4] 吴丹洁, 詹圣泽, 李友华, 等. 中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J]. 中国软科学, 2016(1): 79-97.  
WU Danjie, ZHAN Shengze, LI Youhua, et al. New trends and practical research on the sponge cities with chinese characteristics[J]. China Soft Science, 2016(1): 79-97.
- [4] 张朝辉, 王沁芳, 杨江金, 等. 透水混凝土配合比研究与设计[J]. 混凝土, 2008(6): 120-122.  
ZHANG Chaohui, WANG Qinfang, YANG Jangjin, et al. Study and design on pervious concrete mix proportion[J]. Concrete, 2008(6): 120-122.
- [5] SATA V, WONGSA A, CHINDAPRASIRT P. Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates[J]. Construction & Building Materials, 2013, 42(9): 33-39.
- [6] 张娜. 透水混凝土堵塞机理试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.  
ZHANG Na. Experimental study on clogging mechanism of pervious concrete[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [7] 马保国, 朱平华. NaOH-nNa<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 激发制备碱-双渣胶凝材料研究[J]. 武汉理工大学学报, 2001, 23(5): 8-10.  
MA Baoguo, ZHU Pinghua. Research on producing alkali cement with double dregs by solid alkali activity[J]. Journal of Wuhan university of technology, 2001, 23(5): 8-10.
- [8] 蒋正武, 孙振平, 王培铭. 若干因素对多孔透水混凝土性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(5): 513-519.  
JIANG Zhengwu, SUN Zhengping, WANG Peiming. Effects of some factors on properties of porous pervious concrete[J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(5): 513-519.
- [9] YANG J, JIANG G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials[J]. Cement & Concrete Research, 2003, 33(3): 381-386.

(编辑 沈波)

(上接第 270 页)

- [8] 艾帅. 高大空间工业建筑采暖方式的对比研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.  
AI Shuai. A comparative study on heating mode of industrial buildings in high space[D]. Xi'an: Xi'an: Arch. & Tech. Univ., 2014.
- [9] 钟珂, 王新伟, 华凤皎, 亢燕铭. 高大空间风口位置高度对供暖效果的影响[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2014, 40(3): 334-338.  
ZHONG Ke, WANG Xinwei, HUA Fengjiao, KANG Yanming. Effects of the heights of air inlet and outlet on warm-air heating systems in large-height spaces[J]. J. Donghua Univ(Natural Science), 2014, 40(3): 334-338.
- [10] 林坤平, 张寅平, 狄洪发, 等. 地板下送风式相变蓄热电采暖系统[J]. 太阳能学报, 2005, 26(6): 820-824.  
LING Kunping, ZHANG Yinping, DI Hongfa, et al. Experimental study of underfloor electric heating system with latent thermal storage a air supply[J]. ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA, 2005, 26(6): 820-824.
- [11] 张东亮, 王子介, 张旭. 干式地板辐射供暖系统实验研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(7): 834-838.  
ZHANG Dongliang, WANG Zijie, ZHANG Xu. Experimental study on dry model radiant floor heating system[J]. ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA, 2010, 31(7): 834-838.
- [12] 高志宏, 张伦, 刘晓华, 等. 高大空间末端排热方式[J]. 暖通空调, 2011, 41(3): 88-92.  
GAO Zhihong, ZHANG Lun, LIU Xiaohua, et al. Terminal heat removal mode in large space buildings[J]. HV&AC, 2011, 41(3): 88-92.

(编辑 沈波)