

多层线路板洁净厂房气流组织的CFD数值模拟

任 杉

(深圳市新城市规划建筑设计有限公司, 广东 深圳 518012)

摘 要: 以CFD为辅助工具, 对印制线路板工序的关键车间涂覆房ISO7级洁净室进行气流组织模拟设计, 并用Airpak软件对其进行求解, 对模拟数据与实测数据进行比较。结果表明, 由于人流和物流的影响, 模拟数据虽有一定偏差, 但基本准确。数值模拟有助于设计师选择合适的气流组织和温湿度场。

关键词: 洁净厂房; 气流组织; 数值模拟; CFD

中图分类号: TB115; TU834.8+2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2011)04-0086-05

CFD Numerical Simulation for Multilayer PCB Clean Workshop Air Flow

Ren Shan

(Shenzhen New Land Tool Architectural Design Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518012, China)

Abstract: With CFD as auxiliary tool, conducts an analog design for ISO7 clean airflow in the key coating workshop of PCB process, uses the software of Airpak for the solution and compares the simulated data with the measured data. The results show that due to the impacts of people and logistics flows, the simulation data deviates from the measured, but it is basically accurate. Numerical simulation helps designers to choose the right air flow and temperature-humidity field.

Keywords: cleaning workshop; air flow; numerical simulation; CFD

1 工程简介

本工程位于江苏省江都市, 总占地面积39 618 m², 轻钢屋面结构, 建筑面积32 480 m², 多层线路板产量约10 000 m²/月。各生产车间布局如图1所示。

辊干膜工艺是印制线路板的一道关键工序, 辊

干膜工艺是在铜板表面贴上一层感光材料(干膜), 然后进行曝光。影响曝光成像质量的因素除干膜光致抗蚀剂的性能外, 还有曝光时间(曝光量)、室内洁净度、温湿度等因素。各车间生产环境控制要求见表1。

表1 车间环境参数

Table 1 The workshop environmental parameters

车间名称	面积/m ²	层高/m	温度/℃	相对湿度/%	净化级别	工作人数/人	噪声强度/dB
内层涂覆房	150	3.0	22 ± 2	60 ± 5	ISO 7	20	≤ 60
内层曝光房	393	3.0	22 ± 2	60 ± 5	ISO 7	40	≤ 60
菲林房	22	3.0	22 ± 2	60 ± 5	ISO 7	2	≤ 60
更衣室	17	3.0	24 ± 2	60 ± 5	ISO 8	2	≤ 60

收稿日期: 2011-05-01

作者简介: 任 杉(1980-), 男, 湖南岳阳人, 深圳市新城市规划建筑设计有限公司工程师, 主要研究方向为暖通空调设计,

E-mail: rensa_2000@163.com

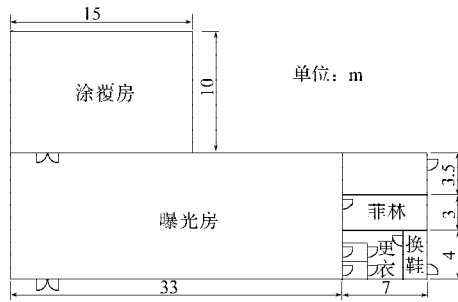


图1 车间平面图

Fig. 1 The layout for workshop

2 厂房气流组织设计原则

气流组织原则是^[1]:

1) 净化空调系统的送风气流应以最短距离, 不受污染地直接送到工作区, 并且尽量覆盖工作区, 使污染物在扩散之前就被携带到回风口;

2) 尽量减少涡流, 避免把工作区以外的污染物带入工作区;

3) 尽量控制上升气流的产生, 防止灰尘的二次飞扬, 以减少对工件的污染;

4) 工作区的气流力求均匀, 工作区的气流速度应满足生产工艺和卫生的要求。

洁净室的气流受洁净室的几何形状, 送风和回风的相关参数, 送风口、回风口的布局和敷设方式等因素影响。在不同的气流组织形式以及送回风参数条件下, 室内洁净度、温湿度都会有不一样的表现形式。本设计采用上送下回的气流组织方式, 通过送出空气的不均匀扩散来稀释室内尘埃, 以保证室内洁净度。由于房间进深较小, 设计采用单侧回风。

3 CFD 数值模拟

3.1 物理模型

本文只对涂覆车间热环境进行 Airpak 数值模拟, 车间尺寸为 15 m × 10 m × 3 m, 见图 1。车间设 8 个送风口置于车间顶棚, 风口几何尺寸为 0.9 m × 0.6 m; 5 个回风口, 置于车间长边一侧, 底边离地面高度为 0.2 m, 几何尺寸为 0.6 m × 0.4 m。墙体用 0.05 m 厚岩棉夹芯彩钢板作隔热处理, 近似看作是绝热墙体。车间内部布局见图 2。计算车间总送风量为 14 400 m³/h, 各风口风量为 1 800 m³/h, 送风口参数: 速度为 0.925 m/s, 温度为 12.6 °C, 相对湿度为 80%。

3.2 数学模型

基于对室内不可压缩气体的连续性、动量、能量守恒微分方程的离散化处理及其数值解析, 用 Two Equation 作为紊流附加方程^[2]。

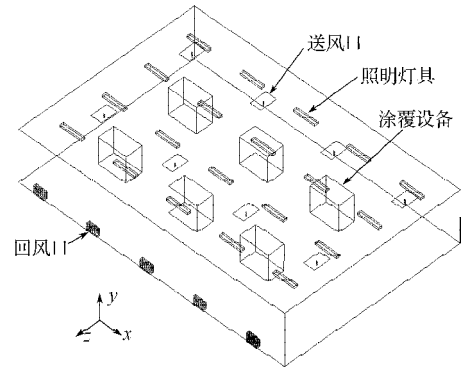


图2 模型立面图

Fig. 2 The model elevation

1) 连续性方程

对不可压缩性的流体, 其密度为常数, 连续性方程简化为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

式中 u_i ($i=1, 2, 3$) 分别表示空气速度在 x, y, z 方向的分量。

2) 动量方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i, \\ \tau_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right], \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; p 为静压; g_i 为 i 方向的重力加速度; F_i 是污染源引起的源项; μ 为黏度; τ_{ij} 为应力张量; δ_{ij} 为常数。

3) 能量守恒方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i h) = \frac{\partial p}{\partial x_i} (k + k_t) \frac{\partial T}{\partial x_i} + S_h, \\ k_t = \frac{C_p \mu_t}{Pr_t}, \end{cases} \quad (3)$$

式中: h 为比焓;

k 为分子热导率, k_t 为湍流扩散热导率;

T 为流体温度;

S_h 为体积热源项;

C_p 为质量定压热容;

μ_t 为湍流黏度;

Pr_t 为湍流普朗特常数。

3.3 计算网格划分

网格单元最大 x, y, z 尺寸分别为 0.4, 0.2, 0.4, 为提高计算速度和计算精度, 模拟送风口网格局部加密, 网格总数约 15.4 万个。压力、动量、温度松弛

因子分别为 0.7, 0.3, 1.0, 其他求解参数均为默认值, 多次进行求解运算约 500 次后达到收敛。

3.4 模拟分析

在上述物理模型、数学模型及相应的初始条件和边界条件下, 用 CFD 软件 Airpak 对温度、湿度和气流进行数值仿真模拟。模拟结果见图 3~6。



图3 模拟温度云图

Fig. 3 The simulated temperature cloud

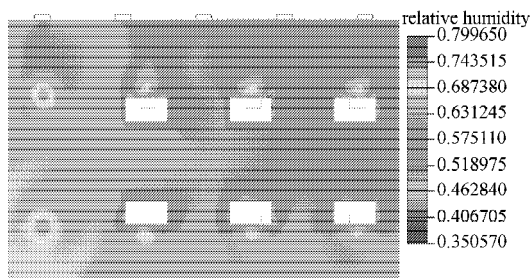


图4 模拟相对湿度云图

Fig. 4 The simulated relative humidity cloud

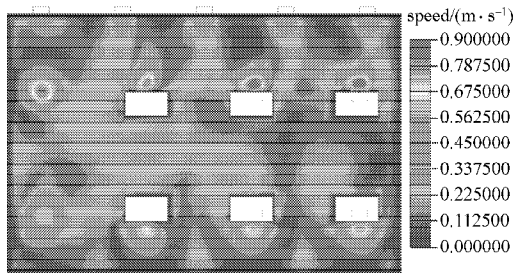


图5 模拟气流速度场云图

Fig. 5 The simulated flow velocity cloud

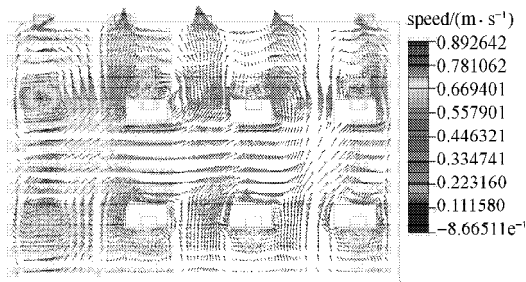


图6 模拟气流速度场矢量图

Fig. 6 The simulated flow velocity vector

由图 3~6 可知, 车间内设备产生的热量对气流组

织影响不大, 但对温湿度影响较大。车间内离地面 1.2 m 处温度和相对湿度基本保持在设计范围内: 温度 20~24℃, 相对湿度 55%~65%。但是, 有设备区域和无设备区域温差约有 1℃, 相对湿度约有 5% 的差别。由于设备和风口参数对气流的影响, 气流速度场并不均匀, 见图 5 和图 6。由于风口是采用孔板送风口直接下送风, 当风口恰好在工作人员正上方时, 送风气流衰减较慢, 在 1.2 m 高处, 气流速度达 0.7~0.8 m/s, 会造成工作人员不适。且过高的送风速度会使室内涡流区扩大, 导致污染物随气流扩散到更大区域。在一些人员较多的组装车间, 由于设计人员没有考虑送风口和工作人员的操作位置, 或者由于业主任意调整工艺布局, 使得风口下面的工作人员有吹风感。洁净工程公司为节约成本, 高效送风口设计风速为 0.8~1.2 m/s, 在出风口未设置散流装置, 这也会导致工作区局部风速过大, 温湿度不均匀。

4 测试

4.1 测量仪器

温湿度测试仪 DT-321S, 华盛昌机械实业有限公司生产; 风速计 AVM03, 台湾泰仕电子工业股份有限公司生产; 尘埃粒子计数器 227A, American Met One Instruments Inc 生产; 声级计 Center329, Taiwan Center Technology Corp 生产。

4.2 测试方法

根据 GB50591-2010^[3] 在车间选取 20 个测试点 (见图 7), 用尘埃粒子计数器测量空气中粒径为 0.5 μm 和 5.0 μm 的粒子数, 采样速率为 2.83 L/min, 测试数据见表 2。在车间选取 9 个代表性的测点 (见图 8), 用温湿度测试仪在工作面上 (离地 1.2 m) 测量车间温度和湿度, 测试数据和 CFD 仿真数据对比见表 3。在有代表性的工作面和送风口中心各设置一个风速测点, 用风速计测试风速。在车间中心工作面设置一个噪声测点。风速测点和噪声测点均离地 1.2 m。

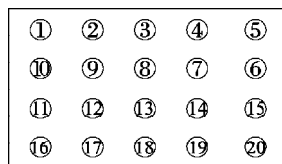


图7 洁净度测点
布置平面图

Fig. 7 The layout plan for
measured points of
cleanliness

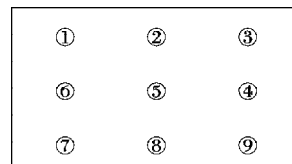


图8 温湿度测点
布置平面图

Fig. 8 The layout for the
measured points of
temperature-humidity

表2 实测尘埃粒子数密度					
Table 2 Measured number density of dust particles 个/m ³					
测点	粒径/μm		测点	粒径/μm	
	0.5	5.0		0.5	5.0
1	7 410	0	11	9 530	0
2	9 350	350	12	8 800	0
3	9 530	0	13	15 200	0
4	10 300	0	14	18 400	350
5	14 830	10	15	9 200	350
6	36 000	700	16	9 500	0
7	38 800	700	17	12 000	350
8	32 500	350	18	28 200	700
9	32 800	350	19	28 000	700
10	4 240	0	20	13 000	350

表3 温湿度对比数据										
Table 3 Comparison of temperature and humidity data										
测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
温度 / °C	实测	21.5	21.3	22.0	22.8	21.0	22.7	22.8	22.3	22.1
	仿真	23.2	23.8	23.9	24.1	23.5	23.0	22.5	23.3	23.6
湿度 / %	实测	63	62	61	59	61	58	60	57	58
	仿真	65	65	58	57	60	65	65	60	63

4.3 测试结果及分析

由表3数据可知,实测平均温度为22.1℃,实测平均相对湿度为59.8%;仿真平均温度为23.4℃,仿真平均相对湿度为62.1%。实测温度与仿真温度偏差为5.8%,实测相对湿度与仿真相对湿度偏差3.9%。这是因为实测时,设备的发热量、人员流动、设备摆放都与模型中有差异,从而导致温湿度偏差较大。

在高效送风口下方实测风速与模拟风速接近,平均约为0.75 m/s,车间内涡流区较多。由于气流没有得到有效混合,车间中间区域和四周角落尘埃粒子较多。由于风口风速较大,出风温度较低,此工位的员工感觉不舒服。测试点8和9温度偏高是由于此处设备阻挡了气流,此处处于涡流区,循环不畅,风速偏低,如果两面均加回风口会有良好的气流组织。

为使工作区获得低而均匀的含尘密度,需最大限度地减少涡流,使射入气流经过最短流程尽快覆盖工作区,气流方向能与尘埃的重力沉降方向一致,使回流气流能有效地将室内尘埃排至室外。单侧回风会增加乱流洁净室涡流区,增加交叉污染机会;由于无回风口一侧处于有回风口一侧的上风方向,前者成了后者的污染源。

5 模型改进

考虑到单侧回风的弊端,对模型进行改进,将单侧回风改为双侧回风,并将原回风口尺寸0.6 m ×

0.4 m改为0.4 m × 0.3 m,数量由5个增加到10个,并建模分析温度、湿度和气流模拟,模拟结果见图9~12。由图可知,采用双侧回风后温度分布、速度分布、相对湿度更加均匀,而成本增加很少,可忽略不计。因此,采用双侧回风比单侧回风更加合理可取,在工程中宜优先采用双侧回风。

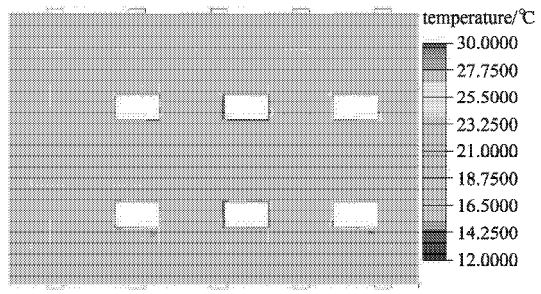


图9 改进后模拟温度云图
Fig. 9 The improved simulated temperature cloud

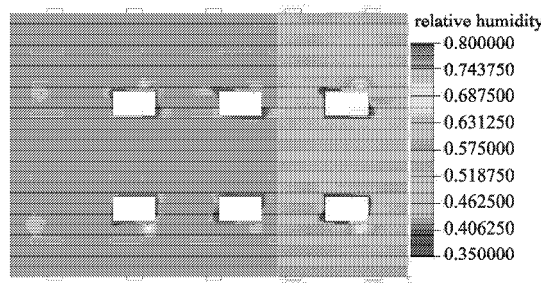


图10 改进后模拟相对湿度云图
Fig. 10 The improved simulated relative humidity cloud

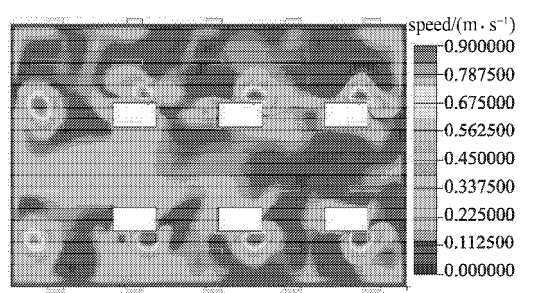


图11 改进后模拟速度场云图
Fig. 11 The improved simulated velocity cloud

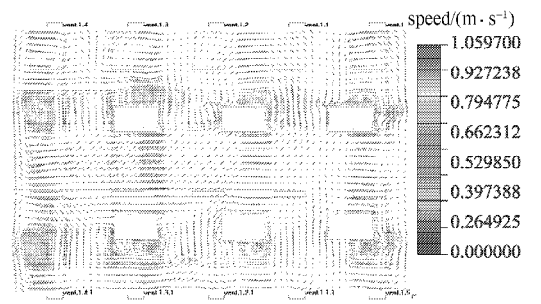


图12 改进后模拟速度场矢量图
Fig. 12 The improved simulated velocity vector

6 结语

涂覆车间于 2007 年底已安装施工完毕,运行 4 年多来,虽然温湿度、洁净度、噪声、压差均达到业主要求,但也存在一些问题。由于没有考虑人流和物流对车间洁净度和湿度的影响,模型和实际情况有些偏差,在进行动态测试时局部洁净度超标,不过温湿度仍在设定范围内。

洁净工程公司和洁净设备厂商为了节省成本,此系统设计采用单侧回风,高效送风口风速设计偏大,导致洁净区风速偏大、洁净度超标。为避免此类情况的发生,在设计施工中有 3 种改进的方法:1) 采用扩散型风口,但对洁净度会有影响^[4];2) 降低高效送风口风速,使工作面风速为 0.2~0.5 m/s^[5];3) 采用双侧回风,跨度大时,车间中间采用回风柱回风,条件允许时可采用架空地板回风。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国信息产业部. GB50073—2001 洁净厂房设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001: 21-23.
The Ministry of Information Industry of the People's Republic of China. GB50073—2001 Code for Clean

Workshop Design[S]. Beijing: China Planning Press, 2001: 21-23.

- [2] 陶文铨. 数值传热学[M]. 3 版. 西安: 西安交通大学出版社, 1988: 347-352.
Tao Wenquan. Numerical Heat Transfer[M]. 3rd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988: 347-352.
- [3] 中国建筑科学研究院. GB50591—2010 洁净室施工及验收规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 111-121.
China Academy of Building Research. GB50591—2010 Code for Clean Room Construction and Acceptance[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011: 111-121.
- [4] 冯树根. 两种高效空气过滤器送风口特性分析比较[J]. 建筑热能通风空调, 2008, 27(4): 59-61.
Feng Shugen. Comparison of HEPA Outlet's Performance between Different Forms[J]. Building Energy & Environment, 2008, 27(4): 59-61.
- [5] 中华人民共和国建设部. GB50019—2003 采暖通风与空调设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004: 28-29.
The Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB50019—2003 Code for Heating Ventilation and Air Conditioning Design[S]. Beijing: China Planning Press, 2004: 28-29.

(责任编辑: 邓光辉)

.....

(上接第 4 页)

- [11] 徐志峰, 邱定藩, 卢惠民, 等. 锌精矿氧压酸浸过程的研究进展[J]. 有色金属, 2005, 57(2): 101-105.
Xu Zhifeng, Qiu Dingfan, Lu Huimin, et al. Review on Research of Oxidic-Acidic Pressure Leaching of Zinc Concentrates[J]. Nonferrous Metals, 2005, 57(2): 101-105.
- [12] 张博亚, 王吉坤, 彭友奇, 等. 湿法炼锌过程中铟锗的综合回收[J]. 云南冶金, 2007, 36(5): 25-28.
Zhang Boya, Wang Jikun, Peng Youqi. Comprehensive Recovery of Indium and Germanium in Zinc Hydrometallurgy Process[J]. Yunnan Metallurgy, 2007, 36(5): 25-28.
- [13] 黄柱成, 蔡江松, 杨永斌, 等. 浸锌渣中有价元素的综合利用[J]. 矿产综合利用, 2002(3): 46-49.
Huang Zhucheng, Cai Jiangsong, Yang Yongbin, et al. Comprehensive Recovery of Valuable Elements from Zinc-Leaching Residue[J]. Multipurpose Utilization of Mineral

Resources, 2002(3): 46-49.

- [14] 梁田长康, 黄作仁. 饭岛冶炼厂浸出渣工序的增强[J]. 中国有色冶金, 1992(4): 44-49.
Liang Tianchang, Huang Zuoren. The Enhancement of Iijima Smelter Slag Leaching Process[J]. China Nonferrous Metallurgy, 1992(4): 44-49.
- [15] 左小红. 硫化锌精矿两段逆流氧压浸出原理及综合回收铟锗工艺研究[J]. 湖南有色金属, 2009, 25(1): 26-28.
Zuo Xiaohong. Zinc Sulfide Concentrates Oxygen Pressure Leaching Two Counter-Current Principle and Comprehensive Recovery of Gallium Germanium Technology[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2009, 25(1): 26-28.

(责任编辑: 邓光辉)