

CFD技术在高级别电子半导体洁净室的应用

杨军 刘林 陈展 王层层 季亚振

中建三局第一建设工程有限责任公司 湖北 武汉 430040

摘要: 本文通过对青岛某大型高级别半导体洁净室的气流组织情况进行CFD模拟,探索CFD模拟技术在大型工业厂房应用的可能性,分析了其洁净室气流组织对精密工艺生产的影响,同时总结了模拟过程中遇到的问题及解决方法,可为其他工业厂房洁净室的气流组织模拟提供可借鉴的宝贵经验。

关键词: 高等级半导体厂房; 洁净室; 气流组织; CFD

电子洁净厂房的建设目的是为了保证工艺设备在生产过程中所处的环境始终维持在洁净度等级要求范围内,洁净室内是否有污染物颗粒将直接影响到所生产的电子产品质量和稳定性的高低,因此洁净室的洁净度控制是极其重要的。

洁净室的气流组织设计需要根据所要求的洁净室级别,确定采用何种总回风形式和洁净室的换气次数,送风速度,高效送风口、回风口的布置,室内设备的排布等^[1]。

本次研究项目是青岛某半导体洁净厂房F2-8寸洁净室,建筑面积约2000平方米。洁净空调系统主要采用FFU (FanFilterUnit风机过滤单元)+DCC (DryCoolingCoil干冷却盘管)+MAU (MakeruoAirUnit集中新风)的系统形式,洁净室内的气流组织形式为上送下回的垂直单相流,如下图所示:

维持洁净室内热舒适性和洁净度等级的重要部分就是温湿度场和风速场的分布情况,风速场将直接影响室内气流组织情况进而影响洁净室内的洁净效果。本次模拟将从室内热湿环境和气流组织两大方面对洁净室的实际效果进行评价,具体评价准则如下:

- (1) 洁净室内温度场是否满足设计要求。
- (2) 洁净室内湿度场是否满足设计要求。
- (3) 洁净室内是否存在通风死角,风口射流是否到达人员活动区域。
- (4) 洁净室内风速场是否满足设计要求,是否存在局部风速过大或过小的情况。
- (5) 净室内气流组织是否合理,是否存在局部乱流。

1 CFD模拟工具介绍及模型参数设置

1.1 模拟软件介绍

本次CFD仿真计算所采用的软件为Fluent,Fluent软件是目前国际领先的计算流体力学(CFD)软件,以其先进的物理建模和准确性而闻名。Fluent于2006被ANSYS公司收购,目前已集成于ANSYS软件平台内,凡是和流

体、热传递和化学反应等有关的工业均可使用。它具有丰富的物理模型、先进的数值方法和强大的前后处理功能,在暖通空调、航空航天、汽车设计、石油天然气和涡轮机设计等方面都有着大量的应用。

Fluent模拟一般包括模型建立、网格划分、求解计算和后处理这4个关键步骤。首先根据项目实际建立模拟仿真对象的物理模型,模型建立完成后需要对模型进行网格划分生成计算网格,以上过程通常被称为前处理。前处理工作完成后设定好流体的数学模型参数和边界条件,给定解算的初始值和设定必要迭代步数,就可以进行控制方程的求解计算。解算完成后,可得到算例的case和data文件,但这些结果为数据文件无法直观地呈现人们想要的过程与结果,需要通过后处理将计算结果数据可视化,生成相应的云图、矢量图、轨迹图、曲线等,通过这些后处理图像即可直观地分析和验证温度场、湿度场、速度场以及颗粒物浓度场是否达标。

1.2 模拟边界条件

在合理简化分析的基础上,设置洁净室模拟房间边界条件如下:

- (1) 假设墙体无热量损失,设置为绝热条件;
- (2) 设备设置为热源项(Source Terms),根据负荷计算书设定其散热量,其壁面设置为耦合壁面(Coupled);
- (3) 室内人员设置为复合换热边界(Mixed);
- (4) 室内水蒸气及颗粒物释放浓度均根据相关文献设定;
- (5) 进口选定为速度入口,风速根据设计总说明选定为0.4m/s;
- (6) 根据设计要求将室内压力设置为101345Pa,根据相关文献设定出口为压力出口,出口压力设置为大气压101325Pa;
- (7) 根据地板的栅格工艺将其设定为porous jumps(多

孔跳跃)边界,孔板和盲板的布置按照设计图设置。

2 CFD 模型建立

2.1 模拟区域划分

为便于对洁净区内各个房间的热湿环境和洁净度情况单独观测,将整个洁净区按房间功能划分为12个区域

区域	面积	体积	CLASS		FFU		FFU循环风量	
					覆盖率	过滤效率	循环风量	换气次数
	m ²	m ³	ISO	FED	%	%	CMH	1/hr
描绘区-东侧	296	1065.6	4	10	54%	100.00%	258941	243
基板储存区	70	252	4	10	60%	100.00%	67651	268
描绘区-西侧	202	727.2	5	100	36%	100.00%	116640	160
检验区-东侧	821	2955.6	5	100	35%	100.00%	466560	158
检验区-西侧								
出货间	20	72	4	10	58%	100.00%	18662	259
化学品储存区	38	136.8	4	10	38%	100.00%	23328	171
载具清洗储存区	17	61.2	5	100	34%	100.00%	9331	152
清洗区	95	342	4	1	91%	100.00%	139968	409
装裱上膜区	36	129.6	4	1	86%	100.00%	50155	387
化学品及维修区	65	234	5	100	53%	100.00%	55987	239
制程区	195	702	4	10	51%	100.00%	160963	229
备品间	70	252			31%	100.00%	34992	139

2.3 模拟初始条件

初始条件设置主要依据为原始设计图纸,室内环境设计初始温度设置为22℃,房间室内相对湿度为45%,计算房间水蒸气质量分数为0.00763。房间通过吊顶布置的FFU对室内进行送风,送风温度为20.8℃,水蒸气质量分数为0.00763,送风风速设置为0.4m/s。回风依据房间情况,设置为压力出口。

3 室内空气组织影响因素探索

3.1 孔板与盲板布置对气流组织的影响

如图3-1所示,图中截面设备的右侧部分气流水平方向偏转较大有引起工作台面附近污染物扩散的风险需重点解决,截面的右上方存在一处涡流但此位置非工作区对洁净室整体的影响较小。

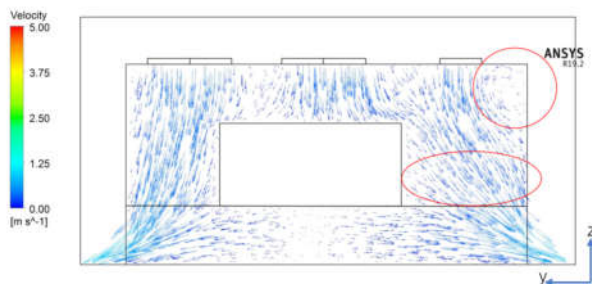


图3-1 描绘区-东侧X=16m截面速度矢量图

进行单独模拟。

2.2 模拟区域参数

洁净室模拟房间的参数包括面积、体积、分级水平、FFU参数以及循环风量,各模拟区域参数如下表所示:

结合描绘区-东侧地面孔板与盲板布置图(图3-2)来看,该房间的问题出现在设备旁的盲板附近,此处设备尺寸较长且设备边缘与墙面距离较近,而设备旁的盲板阻碍了气流的向下流动从而发生了向右侧的偏转。由于设备安装在地板上方本身相当于盲板阻碍了气流的流动,因此设备附近应尽量减少盲板的布置。优化方案在不改变FFU布置的前提下,对容易操作的高架地板盲板于孔板的位置进行更改以达到室内气流组织的最优形式,如图3-2所示(图中粉色方块为盲板、白色方块为孔板、阴影部分为设备、蓝色线框内为优化调整区域):

图3-2(a)是该房间高架地板原始的布置方案,(b)是进行优化后的布置方案。

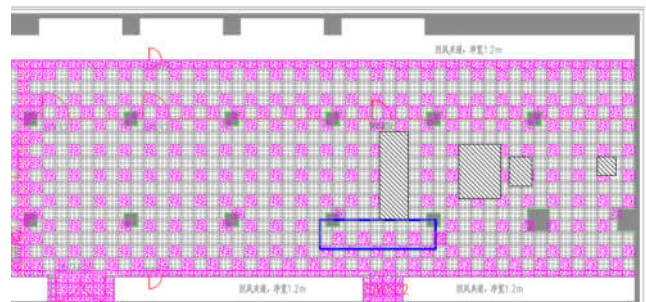


图3-2(b) 优化布置方案

优化方案模拟结果如图3-3所示,从图中可以看出,在X=16m处YZ截面处,经过优化后的截面设备右下方靠

墙区域的气流组织整体良好，气流倾角角度得到明显改善。截面右上方墙角处的涡流得到了一定改善但并未完全消除，由于此处的涡流发生在顶部送风口靠墙面处，与房间工作区距离较远，因而不会对房间工作区的洁净度造成不利影响。总体而言优化方案消除了原方案中工作区气流横向偏移造成的污染物扩散的潜在风险，使房间的气流组织满足了设计要求。

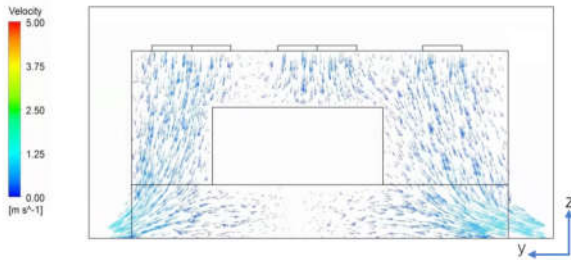


图3-3 X=16m处YZ截面优化后的速度矢量图

3.2 高效过滤器（FFU）布置对气流组织的影响

如图3-4左侧所示，原始方案中制程区房间FFU布置率为51%，根据初始的模拟结果，减少少量FFU（图左红圈位置），优化后的FFU布置率为48%。通过模拟分析与原始方案做对比，目的为降低成本的情况下，仍能满足房间整体的工作环境要求。

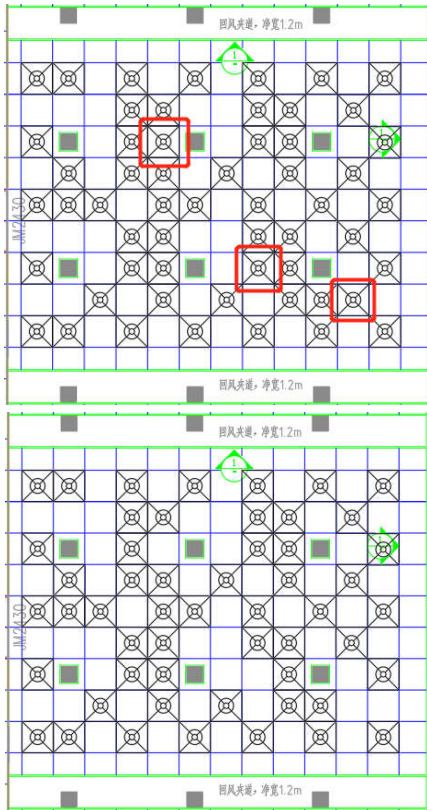


图3-4 制程区FFU原始布置（左）与优化布置（右）

选取Y=10m截面，通过图3-5对比可以清晰的发现，虽然该截面减少了FFU的布置但是房间的整体气流组织分布并没较大变化，房间内气流组织良好无明显湍流，气体流向均为垂直向下，可以高效的带出室内产生的颗粒物。因此，适当降低调整制程区房间FFU布置率，降低置48%仍能满足房间工作要求，同时也可以降低成本，提升整体经济性。

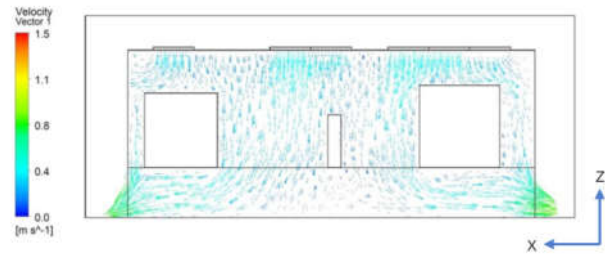


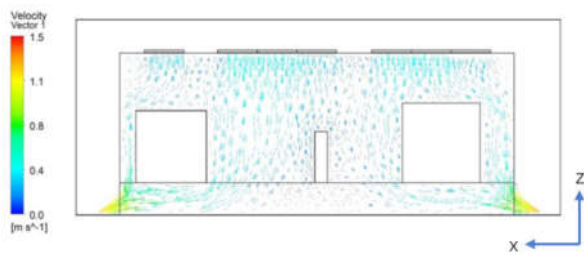
图3-5 制程区Y=10m 截面FFU优化布置后速度矢量图

因此，从典型房间制程区进行的优化方案模拟结果来看，现有的设计方案已经可以高效的维持室内气流组织合理分布和洁净室等级要求，若综合考虑经济因素，可以如图3-5右侧的优化布置图所示，适当降低FFU布置率，进而降低项目经济费用。

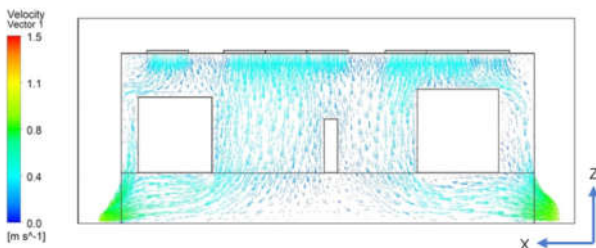
3.3 架空地板高度对气流组织的影响

由于房间整体高度固定，不同地板夹层高度会造成室内风速和气流组织发生较明显的变化，本次模拟通过改变地板夹层高度，通过分析房间各截面风速分布矢量图，对比选取最优地板夹层高度。原制程区房间地板夹层高度为1.5m，本次模拟分布采用地板夹层高度为2m与1m两种情况与原方案进行对比分析。

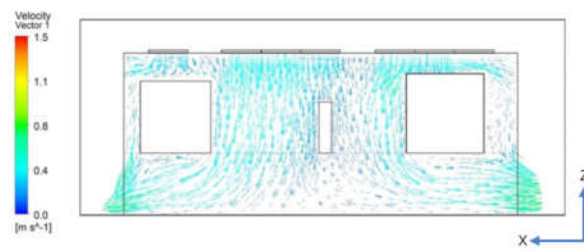
如图3-6所示，房间原有高度不变的条件下，三种情况的有着明显差异。虽然三种工况下房间整体气体流动方向均为竖直向下，但是其中地板夹层高度为1m时，房间工作区域风速较小，回风区域风速过大，回风角度偏大，且房间居中区域送风流向存在偏角，有无法保证人体工作产生的颗粒物无法被及时排除，流向其他区域的风险；地板夹层高度为2m时，工作区域风速较大，回风角度较小，房间上方有明显湍流。综合对比分析，原方案地板夹层高度为1.5m时，室内气流组织分布最为合理，房间工作面区域流速适中，房间工作区域整体风向竖直向下，确保颗粒物无法向室内其他区域扩散，及时排除。



地板夹层高度1m



地板夹层高度1.5m



地板夹层高度2m

图3-6 不同地板夹层高度方案Y=10m截面矢量图

3.4 孔板开孔率对气流组织的影响

地面孔板采用较高的开孔率有利于气流的垂直流动,避免由于流动受阻而引起气流偏转、反流的问题。但开孔率也并非越高越好,过高的开孔率会导致通风压差过低影响洁净区的正压要求,同时高开孔率的孔板也会增加工程的成本。制程区原设计方案中采用开孔率为25%的孔板,本次模拟将房间主体区域孔板开孔率调整17%进行模拟对比,结果如图3-7所示:

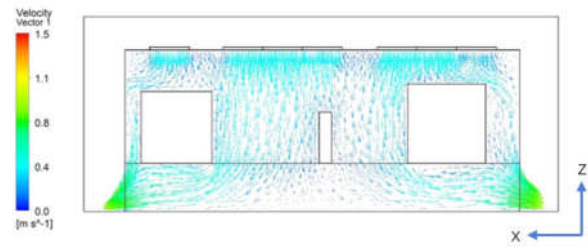
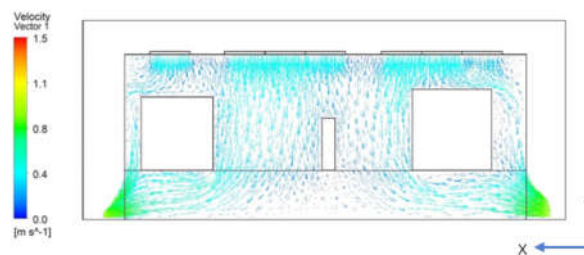


图3-7 Y=10m截面开孔率25% (上)与开孔率17% (下)速度分布矢量图

从图中对比可以看出,采用开孔率为17%的孔板与原方案中开孔率为25%时的气流组织情况十分相似,无明显区别。整个区域气流自上而下垂直流动,气流平行度较好,无明显偏转和涡流现象,气流组织良好,说明适当降低孔板开孔率仍可满足洁净室的设计要求。

4 总结和展望

此次数值模拟工作为实际施工提供了有力的理论支撑,模拟结果较好地印证了设计方案的科学性与合理性。从模拟结果中也可以看到洁净室的气流组织设计仍存在一定的优化空间可供未来的工程设计参考,主要表现在:

4.1 洁净室内的设备往往会占据较大的地面空间,阻碍气流流动,因此在设备附近特别是设备之间的间隙处应布置少布置盲板而采用开孔率较高的孔板。在FFU的布置上,应在整个区域内尽量均匀布置避免局部布置过多或过少的情况。

4.2 地板夹层高度的变化对室内工作区风速具有明显影响进而对室内气流组织产生影响,建议在未来的类似项目设计中重点对地板夹层高度进行CFD模拟校核以避免不合理的设计影响实际使用。例如本项目中1.5m的地板夹层高度最为合适,调高和调低地板夹层高度都会对室内的风速场和气流组织产生不利影响。

4.3 地板开孔率与FFU布置率在一定的范围内对室内气流组织无明显影响,在未来的设计优化中可通过CFD模拟校核对这两项指标进行优化,在保证设计指标与使用功能的前提下降低成本、节省工期。例如本项目中典型房间制程区将FFU布置率降低至48%仍能满足设计要求,地面孔板开孔率由原设计中的25%降低至17%仍能满足设计要求。

本次模拟过程中也遇到了一些困难,特别是由于房间数量多、风口密集、监测指标多所带来的计算量巨大、计算难以收敛的问题,占用了大量的时间与服务器计算资源。通过对模拟参数及过程的优化调整有效改善了这些问题,在保证模拟准确度的前提下减少了计算时

间,主要方法总结如:

4.3.(1)先模拟典型房间再推广到其它相似房间。本项目中将整体空间划分为12个独立的区域,每个区域所观测的指标相同,各区域的模拟具有相似性。因此先对典型房间进行模拟,对发现的问题进行调整和优化,再将调整优化后的参数推广到其它房间,这样在其它房间的模拟过程中就可以避免出现很多共性问题从而提高了整体工作进度。

4.3(2)优化网格质量。在网格划分时,网格数量越多计算精度越高但计算量也越大。对网格质量进行独立性检验,逐渐降低网格质量,观察不同网格数量下监测指标的计算结果,找到对监测指标影响不显著的较低的网格数,以此作为最终模拟所选用的网格数,这样就可以在保证模拟结果准确度前提下提高计算速度。本次模拟中经过独立性检验和优化调整,洁净区模拟房间网格数量在50万-70万之间可实现计算精度和计算速度的最佳平衡。

4.3(3)优化时间步长。在模拟参数设置时,计算的时间步长越小计算精度越高但计算时间也越长。对时间步长进行独立性检验,逐渐增大时间步长,观察不同时间步长下监测指标的计算结果,找到对监测指标影响不显著的较大的时间步长,以此作为最终模拟所选用的时间步长,这样就可以在保证模拟结果准确度前提下缩短计算时间。本次模拟中经过独立性检验和优化调整,洁净区模拟时间步长设置为0.01、步数设置为30000,可实现计算精度和计算速度的最佳平衡。

4.3(4)调整松弛因子。松弛因子可控制收敛速度和改善收敛状况,松弛因子越小越有利于收敛但收敛速度越慢。一般模拟中都使用软件默认的松弛因子设定值,但当网格数和时间步长均合理而系统仍出现计算不收敛的

问题时,可尝试调整松弛因子以改善系统的收敛情况。

4.3(5)关注计算过程。Fluent求解计算时常常会耗费大量时间,但这段时间内作为工程技术人员不应坐等计算机结果。事实上,软件通过不断迭代进行计算求解,小的计算偏差经过迭代可能逐渐扩大最终导致计算不收敛。关注软件计算过程,发现计算结果异常或者计算残差出现扩大的趋势时就应当及时暂停和调整计算,这样提前发现问题进行调整可避免问题不断扩大而浪费时间和资源。

5 结束语

CFD模拟技术在洁净室的设计和施工的作用越来越重要,在电子厂房,特别是半导体等高级别洁净室的推广应用,必将有效降低设计缺陷风险,加快施工进度,提升工艺产品的良品率。本次研究对高级别大空间的洁净室的气流组织进行了模拟尝试,虽然取得了较好的应用效果,但是也存在模型过大,计算单元过多,导致求解过程漫长,难以满足项目前期对工期的要求,同时Fluent软件与Revit深化软件的结合度不高等问题,相信随之今后的软件技术的更新,这些问题都将得以解决,为气流组织模拟技术在电厂厂房的设计和建设中大规模的推广应用奠定技术基础,这也必将有力推动高端电子产品行业更快更好地发展。

参考文献:

- [1]黄闻华,魏琪,卢启明.CFD技术在洁净室气流组织设计中的应用[J].洁净与空调技术,2006,(2):7.
- [2]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.中华人民共和国建设部.洁净厂房设计规范,GB50073-2001.
- [3]魏学孟.气流洁净室数值模拟与实验研究.暖通空调,1997(2).