

文章编号:1671-6833(2013)06-0112-04

## 垂直单向流洁净室的气流流型模拟与优化

周俊杰<sup>1</sup>, 房全国<sup>1</sup>, 吴冰<sup>2</sup>, 王定标<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 三门峡市质量技术监督检验检测中心, 河南 三门峡 472000)

**摘要:** 利用 fluent 软件对垂直单向流洁净室进行了数值模拟, 得到了洁净室内的流线分布、乱流度及断面平均风速. 模拟结果表明, 在模拟范围内满布比越大, 进口旋涡越小, 流线平行度越好, 乱流度越小. 当满布比为 60% 和 70% 时, 进口处旋涡较明显. 当满布比为 80% 时, 进口处旋涡较小, 流线平行度满足单向流要求,  $X=0$  和  $Y=0$  断面的乱流度分别为 0.1 803 和 0.1 940, 均小于 0.3;  $X=0$  和  $Y=0$  断面的平均风速分别为 0.335 4 m/s 和 0.335 5 m/s, 均在 0.2 ~ 0.5 m/s 范围内, 满足单向流洁净室的设计要求.

**关键词:** 洁净室; 流场; 乱流度; CFD

**中图分类号:** TU22

**文献标志码:** A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2013.06.027

### 0 引言

洁净室是应用空气洁净技术进行污染控制的房间, 它是实现 GMP 的一个重要因素. 灌装车间是医药生产区域中的重要洁净区域, 洁净等级一般为 100 级. 根据《医药工业洁净厂房设计规范》<sup>[1]</sup>, 空气洁净度为 100 级的医药洁净室应采用单向流洁净室. 洁净室能否达到一定的空气洁净度, 能否有效控制并排除微粒的污染, 所涉及的因素较多, 其中室内的气流组织影响较大.

目前, 国内外许多学者在气流组织的模拟方面做了大量工作<sup>[2-4]</sup>. 和丽虎等<sup>[5]</sup>、钟武等<sup>[6]</sup>、向立平等<sup>[7]</sup>利用 fluent 分别对会议室、办公室、客车内的气流组织进行了模拟研究. 于楠<sup>[8]</sup>、韩何<sup>[9]</sup>利用 Phoenix 分别对体育馆、洁净室进行了模拟研究. 黄闻华等<sup>[10]</sup>运用 CFD 技术对洁净室内的气流组织进行了设计, 其主要从气流平行度方面对洁净室进行了研究, 并未考虑乱流度的要求. 仲遇程<sup>[11]</sup>对单侧回风形式的洁净室的气流进行了数值模拟, 并通过实验测定了洁净室截面的流速, 计算了乱流度参数, 但实验成本较大, 周期长. 笔者利用 fluent 软件对垂直单向流洁净室进行数值模拟, 综合考虑不同过滤面积下的流线平行度和乱流度及断面平均风速, 得出垂直单向流洁净室的最佳满布比, 使洁净室能更好的满足实际生产

的需要.

### 1 垂直单向流洁净室

垂直单向流洁净室如图 1 所示, 顶棚满布高效过滤器送风, 全地板格栅回风. 其特点: 可获得均匀的向下单向平行气流, 因而自净能力强, 能够达到最高的洁净度级别, 单向流洁净室必须满足四项特性指标: 流线平行度、乱流度、下限风速及断面平均风速<sup>[11]</sup>.

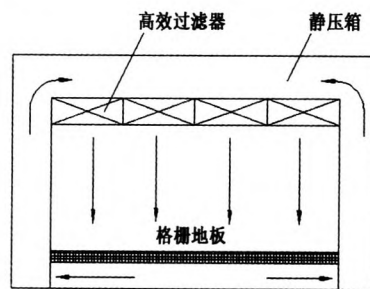


图 1 垂直单向流洁净室

Fig. 1 Vertical unidirectional flowing clean room

(1) 流线平行度. 在单向流洁净室中, 实际的流线并不是完全平行, 有一个允许的流线平行度, 如果流线是渐变流的曲线, 则其和工作区下限平面的交点与和操作人员工作区的交点之间的连线, 与水平方向的倾角应大于  $65^\circ$ .

(2) 乱流度. 单向流洁净室要求室内为均匀

收稿日期: 2013-05-30; 修订日期: 2013-07-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51276173)

作者简介: 周俊杰 (1974-), 男, 河南太康人, 郑州大学副教授, 博士, 研究方向为数值计算技术及其在过程设备中的应用, E-mail: zhoujj@zzu.edu.cn.

流,速度场的均匀对于单向流洁净室是很重要的.不均匀的速度场会增加速度的脉动,促进流线间质点的掺混.速度场的均匀性可用乱流度 $\beta_n$ 来衡量.对于单向流洁净室,设计上一一般取 $\beta_n$ 不大于0.25~0.30.

当断面有 $n$ 个网格时,其速度的平均值 $V_p$ 和乱流度 $\beta_n$ 分别为

$$V_p = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \tag{1}$$

$$\beta_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_p - V_i)^2}{n - 1}} \cdot \frac{1}{V_p} \tag{2}$$

式中: $V_p$ 为平均风速,m/s; $V_i$ 为第 $i$ 网格节点的风速,m/s; $n$ 为网格数; $\beta_n$ 为乱流度.

(3) 下限风速:垂直单向流洁净室内没有明显热源时,下限风速取0.12 m/s.

(4) 断面平均风速:断面平均风速的取值关系到净化系统的投资和运行费用,以及空气洁净度等级.《洁净厂房设计规范》规定100级单向流洁净室的断面平均风速为0.2~0.5 m/s.

2 垂直单向流洁净室数值模拟

2.1 控制方程

笔者所研究的洁净室内气流速度很小,断面风速小于0.5 m/s,故室内气体可视为不可压缩均质流体.由于100级的洁净室的换气次数多,其送风温差不超过2°,大部分区域的温度场是均匀的,此处不考虑能量方程.流动过程中的控制方程主要是连续性方程和动量方程:

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \tag{3}$$

式中: $u,v,w$ 表示速度在 $x,y,z$ 方向上的分量.

(2) 动量方程

$$\frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \tag{4}$$

式中: $x_i(i=1,2,3),x_j(j=1,2,3)$ 为坐标系坐标; $u_i(i=1,2,3)$ 为沿 $i$ 方向的速度分量; $f_i$ 为沿 $i$ 方向的质量力; $p$ 是静压; $\rho$ 为空气密度.

2.2 模型建立

洁净区的尺寸为:长×宽×高=9 m×6 m×3 m.在模拟研究的过程中,人员活动情况及工作设备台都尚未进入,即空态洁净室内的状况模拟.

在洁净室的气流设计中,采用顶棚布置高效过滤器、格栅地板回风方式.下面就该种方式对上述的洁净室进行模拟,满布比(末级过滤器净面积与布置末级过滤器截面的总面积的比值)分别取100%、90%、80%、70%和60%,分析比较各自的气流组织的优劣,不同的满布比对应的送风风速大小(其中不同满布比下的空气流量相同)和过滤器的尺寸见表1.图2为满布比为70%的洁净室模型,坐标原点为底面矩形的中心.

网格划分采用六面体网格,网格数为200 250.边界条件设置:进口为Velocity-inlet,出口为Outflow,其他边界默认为Wall,计算区域设为fluid.计算区域及边界条件如图2所示.

表 1 不同满布比下的风速大小和过滤器尺寸  
Tab.1 Air velocity and filter size of different ratio of blowing area

| 满布比/% | 送风风速/(m·s <sup>-1</sup> ) | 过滤器尺寸/m   |
|-------|---------------------------|-----------|
| 100   | 0.300                     | 9.00×6.00 |
| 90    | 0.333                     | 8.54×5.69 |
| 80    | 0.375                     | 8.05×5.37 |
| 70    | 0.428                     | 7.53×5.02 |
| 60    | 0.500                     | 6.97×4.65 |

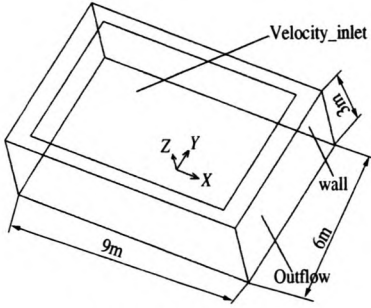


图 2 洁净室模型  
Fig.2 Clean room model

2.3 求解参数设置

- ①流体为空气,密度和黏度恒定,密度 $\rho$ 为1.225 kg/m<sup>3</sup>,黏度 $\mu$ 为1.789×10<sup>-5</sup> kg/(m·s).
- ②求解器选择 COUPLED IMPLICIT SOLVER,选择稳态计算.
- ③为了提高计算精度,差分格式采用二阶迎风格式.
- ④速度场和压力场的求解基于SIMPLE算法,压力松弛因子取0.3,动量松弛因子取0.7.
- ⑤湍流模型选择 $k-\epsilon$ 标准湍流模型,壁面区域采用标准壁面函数.

3 模拟结果及分析

(1) 流线分布.模拟得出满布比分别为100%、90%、80%、70%和60%时洁净室的流场

分布. 将计算的数据导入 tecplot 中后处理分别得到  $X=0$  断面、 $Y=0$  断面(坐标位置见图 2)的流线分布情况及速度分布情况, 结果表明两个断面

的分布情况相似.  $X=0$  断面的流线分布情况及速度分布情况如图 3 所示.

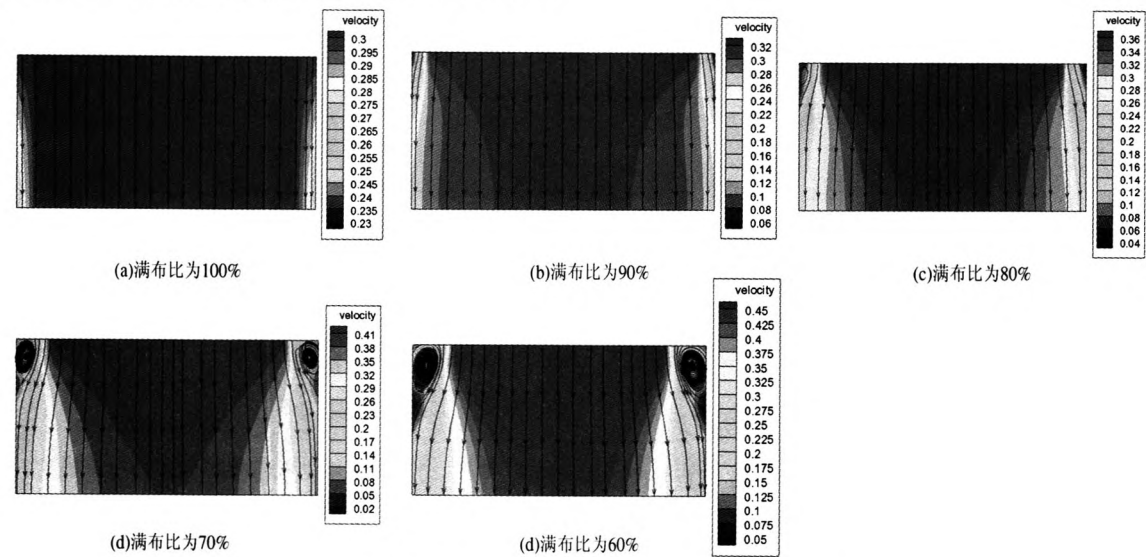


图 3  $X=0$  断面不同满布比下的流线及速度分布

Fig. 3 Streamline and velocity distribution of different ratio of blowing area for the section x equal to zero

由图 3 可以看出, 过滤器的满布比越大, 出口处的流线平行度越好, 进口处的旋涡越小. 当满布比为 60% ~ 80% 时, 洁净室的主体流动仍是单向平行流, 在出口靠近墙面处, 流线是渐变流的曲线, 流线与水平方向的倾角都大于  $65^{\circ}$ . 从流线平行度的角度出发, 满布比大于 60% 的洁净室满足单向流洁净室要求.

但当满布比为 60% 和 70% 时, 进口处旋涡均较明显, 当满布比为 90% 或更大时, 虽然进口处没有旋涡, 但满布比越大, 建造所需顶棚高效过滤器及风机的数量越多, 顶层用于布置照明及过滤器边框的空间越小, 这样会增加建造成本及建设难度; 当满布比为 80% 时, 进口处虽有旋涡, 但旋涡较小, 且流线平行度也满足单向流要求. 综合考虑, 选择满布比为 80% 的洁净室较合适.

(2) 乱流度及断面平均风速. 在 fluent 中将  $X=0$  断面、 $Y=0$  断面的速度值导出为 ASCII 文件, 再将该文件导入 matlab 中处理, 得到断面上所有节点的速度值, 利用式(1)和式(2)计算得出  $X=0$  断面、 $Y=0$  断面的乱流度, 断面的平均风速如图 4 和图 5 所示.

由图 4 和图 5 可以看出, 随着满布比的减小, 乱流度逐渐增加, 断面平均风速增加; 当满布比为 60% 时,  $X=0$  断面的乱流度为 0.322 0,  $Y=0$  断面的乱流度为 0.342 4, 均大于 0.3, 已不符合要求. 当满布比为 80% 时,  $X=0$  断面的乱流度为

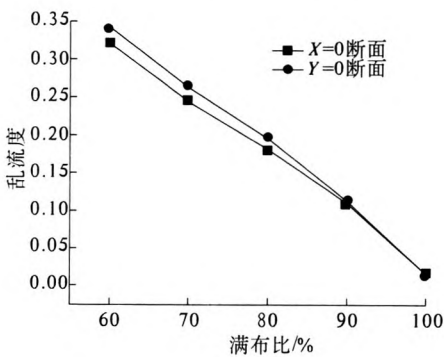


图 4 乱流度与满布比的关系

Fig. 4 Correlation between undistributed degree of velocity and the ratio of blowing area

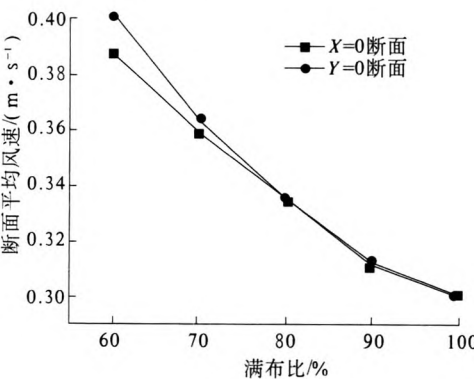


图 5 断面平均风速与满布比关系

Fig. 5 Correlation between section average velocity and the ratio of blowing area

0.180 3,  $Y=0$  断面的乱流度为 0.194 0, 都小于 0.3;  $X=0$  断面的平均风速为 0.335 4 m/s,  $Y=0$

断面的平均风速为 0.335 5 m/s,均在 0.2 ~ 0.5 m/s 范围内.由此可以看出,选择满布比为 80% 的设计方案符合洁净室的设计要求.

#### 4 结论

在典型的送风方式下对垂直单向流洁净室模型进行了数值模拟,在不同满布比下分析比较了它们各自的气流组织的优劣.通过模拟得出:

(1)满布比越大,出口处的流线平行度越好,进口处的旋涡越小.当满布比为 60% ~ 80% 时,洁净室的主体流动仍是单向平行流,在出口靠近墙面处,流线是渐变流的曲线,流线与水平方向的倾角都大于 65°.从流线平行度的角度出发,满布比大于 60% 的洁净室满足单向流洁净室要求.

(2)随着满布比的减小,乱流度逐渐增加,当满布比为 60% 时,  $X=0$  断面的乱流度为 0.322 0,  $Y=0$  断面的乱流度为 0.342 4,均大于 0.3,不符合要求.

(3)当满布比为 60% 和 70% 时,进口处旋涡较明显,当满布比为 80% 时,进口处旋涡较小,  $X=0$  和  $Y=0$  断面的乱流度分别为 0.180 3 和 0.194 0,均小于 0.3;  $X=0$  和  $Y=0$  断面的平均风速分别为 0.335 4 m/s 和 0.335 5 m/s,均在 0.2 ~ 0.5 m/s 范围内,满足单向流洁净室的要求.

#### 参考文献:

- [1] 中国医药工程设计协会. GB 50457—2008 医药工业洁净厂房设计规范[S]. 北京:中国计划出版

社,2009.

- [2] LIU Jun-jie, WANG Hai-dong, WEN Wen-yong. Numerical simulation on a horizontal airflow for airborne particles control in hospital operating room[J]. Building and Environment, 2009, 44 (11): 2284 – 2289.
- [3] MÉNDEZ C, SANJOSÉ J F, VILLAFRUELA J M, et al. Optimization of a hospital room by means of CFD for more efficient ventilation[J]. Energy and Buildings, 2008, 40(5): 849 – 854.
- [4] 卢纪富,张莉红,杨建中,等. 空调列车室内流场的数值模拟[J]. 郑州大学学报:工学版,2004,25(1): 105 – 108.
- [5] 和丽虎,罗卓英,旷金玉,等. 会议室空调气流组织形式的数值模拟研究[J]. 节能技术, 2012,30(2): 111 – 115.
- [6] 钟武. 夏季办公室空调房间气流组织的数值模拟[J]. 制冷与空调,2011,25(3):304 – 308.
- [7] 向立平,王汉青. 空调客车内气流组织与污染物浓度场数值模拟[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2010,41(5):2017 – 2021.
- [8] 于楠. 某体育馆室内气流组织 CFD 模拟研究[D]. 天津:天津大学环境科学与工程学院,2012.
- [9] 韩何. 垂直单向流洁净室气流的数值模拟与分析[D]. 上海:同济大学机械工程学院,2007.
- [10] 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 – 11.
- [11] 仲遇程. 单侧下回风式洁净室气流的数值模拟与测试[D]. 上海:同济大学机械工程学院,2007.

## Simulation and Optimization of Air Flow in Vertical Unidirectional Flowing Clean Room

ZHOU Jun-jie<sup>1</sup>, FANG Quan-guo<sup>1</sup>, WU Bing<sup>2</sup>, WANG Ding-biao<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering & Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. The Test Center of Quality Technical Detect and Examination, Sanmenxia 472000, China)

**Abstract:** Vertical unidirectional flowing clean room is simulated by using fluent software, the streamline distribution, undistributed degree of velocity and sectional average wind speed of clean room are obtained. The simulation results show that, in the range of simulation, with the ratio of blowing area increases, the inlet vortex decreases, the streamline parallel degree becomes good, undistributed degree of velocity decreases. When the ratio of blowing area is 60% and 70%, the inlet vortex is obvious. When the ratio of blowing area is 80%, the inlet vortex is small, the streamline parallel degree meets the requirements of unidirectional flow. Velocity undistributed degree of  $X=0$  plane and  $Y=0$  plane is 0.180 3 and 0.194 0, less than 0.3. The average wind velocity of  $X=0$  plane and  $Y=0$  plane is 0.335 4 m/s and 0.335 5 m/s, in the range of 0.2 ~ 0.5 m/s, meets the design requirements of unidirectional flowing clean room.

**Key words:** clean room; flow field; undistributed degree of velocity; CFD