

基于某地下室火灾发生后通风结构的优化研究

杨淇喆，任三兵

yangqizhe@shphschool.com

摘要：在地下室的普遍设计中，很多设计对于火灾发生的可能性不够重视，导致民用地下室火灾状况层出不穷。在火灾中，很多伤亡是由烟气导致的，而非火焰。因此，本课题希望能够使用正交实验设计通过 ANSYS Fluent 软件探究地下室的通风设计，并考虑客厅窗户位置及抽风负压等三个因素，通过实验结果比较得出其最佳搭配方式。

关键词：ANSYS，正交实验设计，火灾，地下室，解决方案

Ventilation Structure Design Optimization Analysis Based on a Certain Basement

ABSTRACT

In the common designs of basement in China, a lot of them did not take much attention about the possibility of fire hazard, causing such hazards to repeat all the time. In a fire hazard situation, a lot of casualties are harmed or died from the gaseous product rather than fire itself. Therefore, this investigation hopes to use orthogonal experimental design and ANSYS Fluent software to find out the most optimized design of three different factors, including the distance between windows and the ceiling, number of windows, and the negative pressure at the ventilation, and find out their best combination in cleaning out gaseous product including carbon monoxide and carbon dioxide.

KEY WORDS

ANSYS, Orthogonal experimental design, Fire hazard, Basement, Solution

0. 前言

在目前国内的地下室设计中,有很多设计对于火灾发生的可能性不够重视,导致中国民用私人地下室火灾状况层出不穷。火灾的发生不仅破坏房屋的基本结构,还会导致居住人的窒息死亡,包括火焰的高温直接将人烧死,或是火灾产生的有毒气体,譬如一氧化碳;而且燃烧反应减少了空气中氧气的含量,致使人窒息而死。有相关报道称,火灾中窒息而死的人高达 80%。而火灾产生的原因多种多样,包括电瓶车电池放在房屋里充电、手机放在床头柜充电等导致的火灾。因此,探讨研究如何避免火灾情况下发生窒息的故事是非常必要的。

现有的中国国内对于火灾产生的有害气体主要是针对于大型民用公共地下室、大型民用密闭空间或者是大型国家级矿洞等工业化场景的研究,国外对于火灾有害气体排出的研究也仅仅是针对于人员的有效撤离。对于以上话题,国内外基本都已经得出了明确的结论和实用的结果。但对于探讨民用私人场景下的地下室火灾有害气体排出等场景研究开展并不多^[1-5]。

本课题希望能够找出地下室火灾发生时最佳的通风系统方案,尽可能减少火灾发生时出现人员窒息的故事。本课题通过 ANSYS Fluent 15 软件针对某一常见的地下室布局建立了流场和温度场模型,将影像通风效果的客厅窗户位置及抽气压力抽取三种因素研究,每个因素分别设定了三个水平,通过正交实验设计开展了针对有害气体(尤其一氧化碳)排出的最佳解决方案。在本课题研究中,我们拟通过九组正交实验找出最佳通风方案。

1. 数值模拟方法

1.1 假设

在本课题中，建立数值模型之前主要有以下几种假设：

- (1) 火灾产生烟气温度为均匀温度，设定为 1000K；
- (2) 烟气主要成分为 CO ， CO_2 以及空气，不考虑其它产物影响；
- (3) 不考虑火灾产生后其燃烧对于墙壁及家居的加热作用；
- (4) 考虑了烟气的热浮力作用。

1.2 物理模型

本课题考虑地下室模型的两个因素作为自变量，分别是窗户数量（窗户总面积保持不变）、通风口抽气压力以及窗户与天花板的距离。在本课题中，地下室被分割为两个房间和一个客厅，客厅的面积是小房间面积的两倍，其中两个小房间中各有一扇窗户，其位置及大小固定不变，而客厅的窗户位置及个数作为自变量。抽气口位于三个房间顶部交汇位置。图 1 给出了该房间的基本结构示意图。

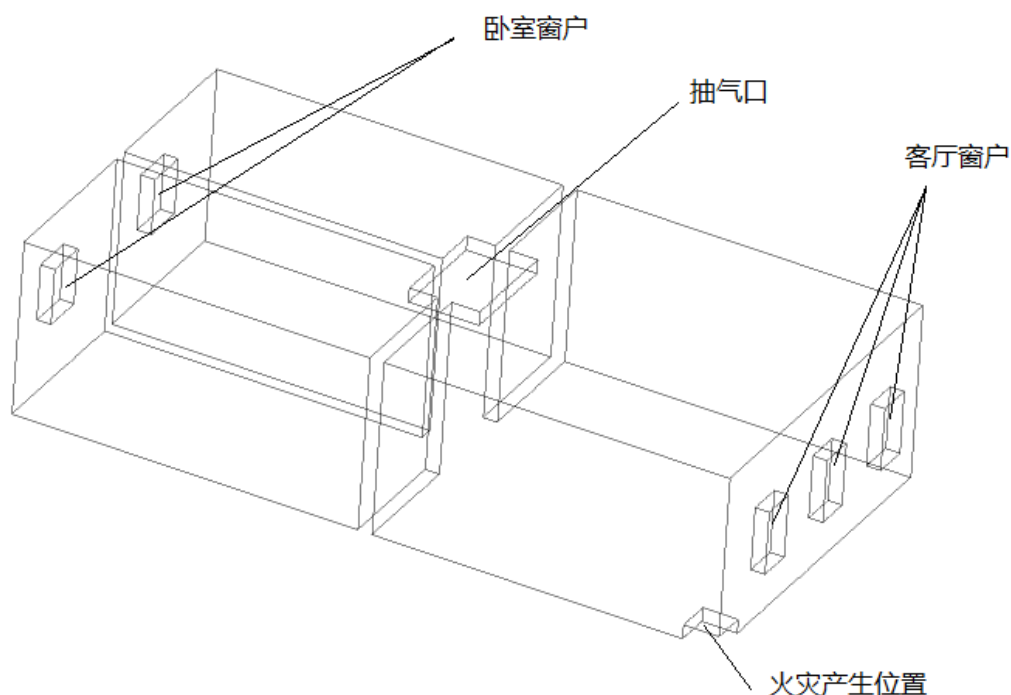


图 1 典型的地下室模型设计

1.3 火灾产生形成烟气后与窗户通风过程的流场及温度场数值模型

(1) 连续性方程:

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

(2) 动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]_i - \frac{\partial p}{\partial x_j} \quad (2)$$

(3) 描述湍流运动的 $k - \varepsilon$ 双方程模型:

$$k \text{ 方程: } \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\varepsilon \text{ 方程: } \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \left[\frac{C_{\varepsilon 1} G \varepsilon}{k} - \frac{C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon^2}{k} \right] \quad (4)$$

$$\text{其中, } G = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right); \text{有效粘度 } \mu_{eff} = \mu_l + \mu_t = \mu_l + \rho C_\mu k^2 / \varepsilon; \quad (5)$$

模型中的常数采用 Spalding 所推荐的如下数据[5]:

$$C_{\varepsilon 1} = 1.43, C_{\varepsilon 2} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

$$(4) \text{ 能量方程: } \frac{\partial (\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + S_T \quad (6)$$

其中, u_i 为用张量表示的速度, 单位为 m/s, $i=1,2,3$, 分别代表 x, y, z 方向的速度。

S_T 为源项。 $\Gamma_{eff} = \frac{\mu_{lam}}{Pr_{lam}} + \frac{\mu_{tur}}{Pr_{tur}}$ 。 Pr_{lam} 为层流 Prandtl 数, 其值为 1.0; Pr_{tur} 为湍流的

Prandtl 数, 其值为 0.9; μ_{lam} , μ_{tur} 分别为层流和湍流的粘度系数, 单位为 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。

1.4 网格划分及边界条件

针对图 1 的几何模型在不同的实验设计中分别进行了计算。其中图 2 给出了其中一个

案例的网格剖分结果。在整个实验的流程中，9 组不同的正交试验设计的模型应用了相似的网格划分规律。在窗户、抽气出口、火灾发生位置等都进行了网格单独划分，采用了更小的网格尺寸，而在其它空间采用较大的网格尺寸来减小计算时间。在 9 个不同的模型中，每个模型大致具有 35000 个节点和超过 200000 个网格。

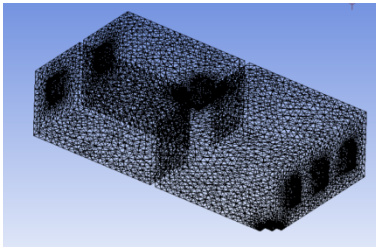


图 2 典型网格划分

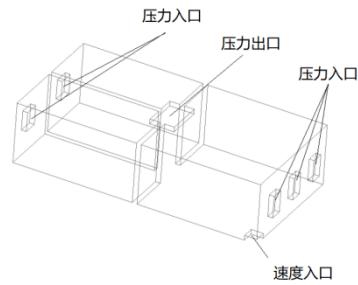


图 3 边界条件设置图

针对该模型设定的边界条件如图 2 所示，窗户作为压力入口，顶部的抽气口作为压力出口，给定的压力为负压抽吸；火灾发生位置设定为速度入口，火灾产生后其烟气以一定的速度喷出。

2. 试验方案以及结果

2.1 因素、水平及正交实验表的选取

火灾发生时，地下室的不同通风设计会对烟气的扩散造成不一样的影响。在本课题中，我们选取窗户数量、窗户与天花板间距以及抽风口风压 3 个因素作为主要影响因素，每个因素有 3 个水平。

表 1 课题采用的因素和水平

水平	A (通风口负压/Pa)	B (窗户天花板间距/m)	C (窗户数量/个)
1	-50	1.2	1
2	-100	1.4	2

3	-150	1.6	3
---	------	-----	---

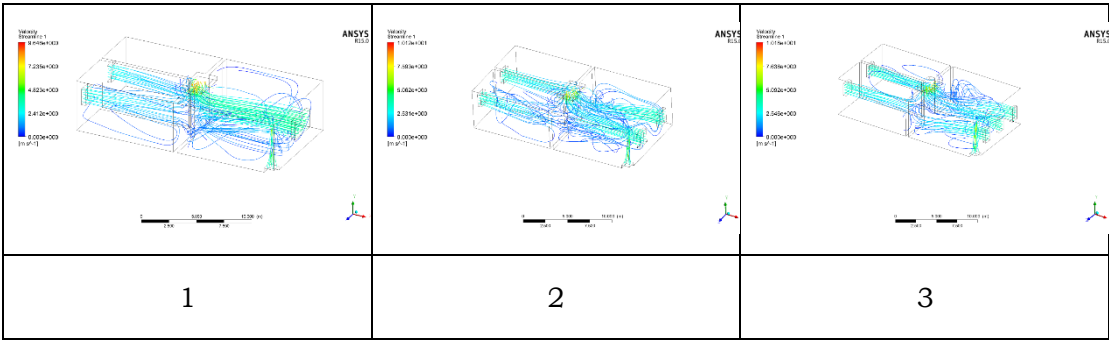
通过 Minitab 软件，我们设计得到了以下正交实验表：

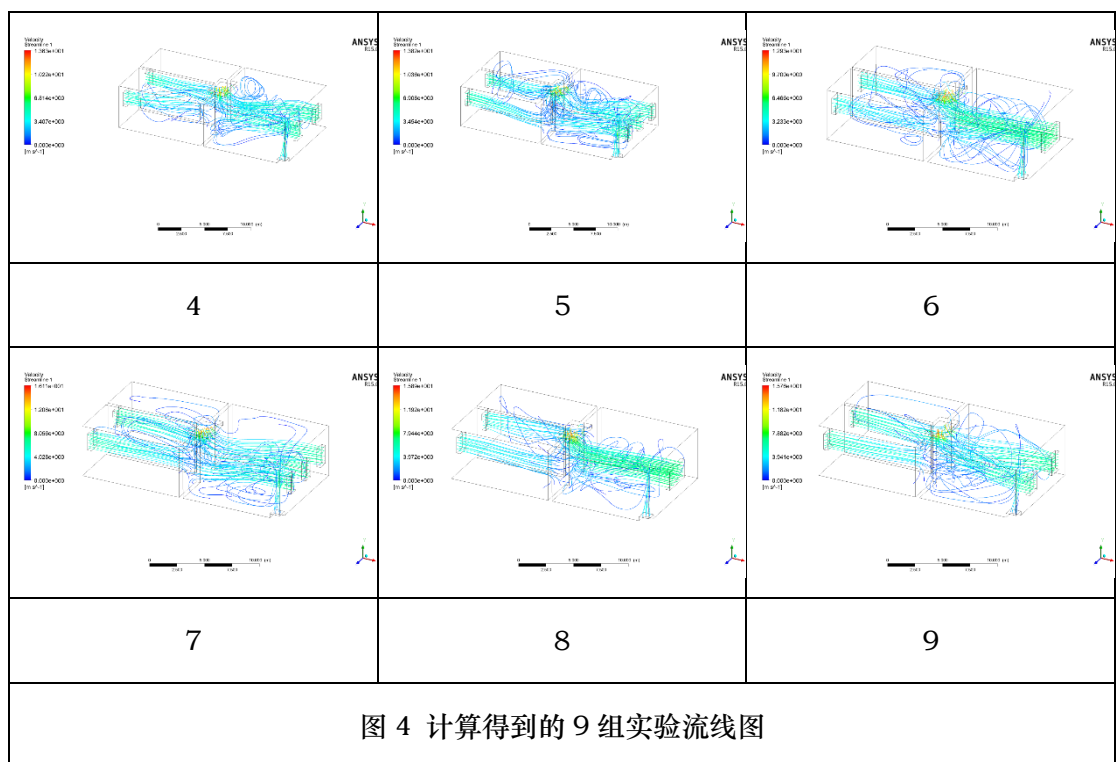
表 2 设计得到的正交实验表

	A（通风口负压/Pa）	B（窗户天花板间距/m）	C（窗户数量/个）
1	-50	1.2	1
2	-50	1.4	2
3	-50	1.6	3
4	-100	1.2	2
5	-100	1.4	3
6	-100	1.6	1
7	-150	1.2	3
8	-150	1.4	1
9	-150	1.6	2

2.2 流场分布图分析

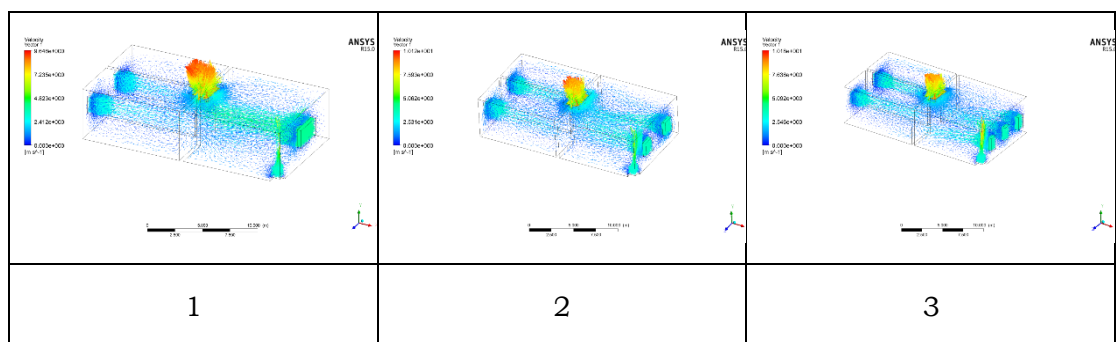
2.2.1 垂直截面 Streamline 图

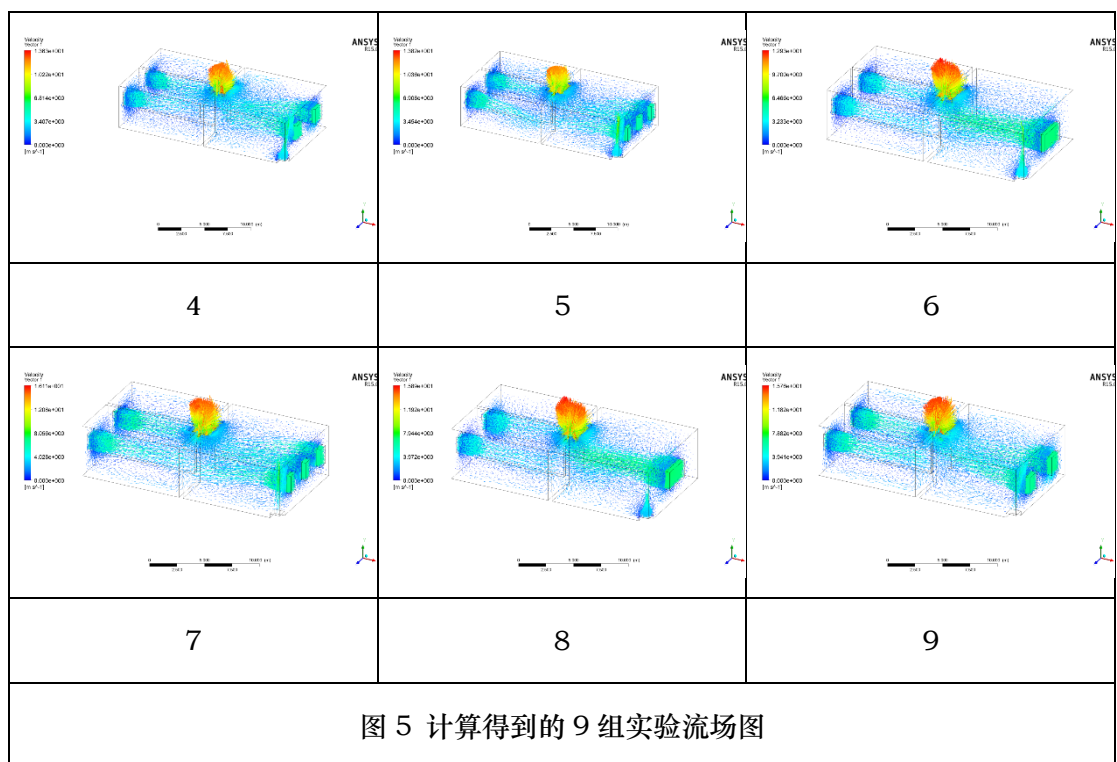




通过烟气在房间中扩散的流线（Streamline）图所示，当在房间顶部进行抽气时，从卧室窗户进入的空气直接撞击到对面的墙壁上，发生向周边散开的趋势，并不断从抽气口排除。当窗户设置的位置位于与通风口在一个方向上时，其进入的空气形成的流动方向会直接指向抽气口，如图 4（1，6，8 组），并且当客厅窗户为三个小窗户设置时，其中部的窗户也出现这样的趋势，如图 4（3，5，7 组）。烟气产生后到达顶部后随着房间内流动趋势的变化也会出现一定的变化趋势，在某些结构下，其紊乱程度明显增加，如图 4（5，6，7，9 组），说明通风结构确实对烟气的流向会产生较大的影响。

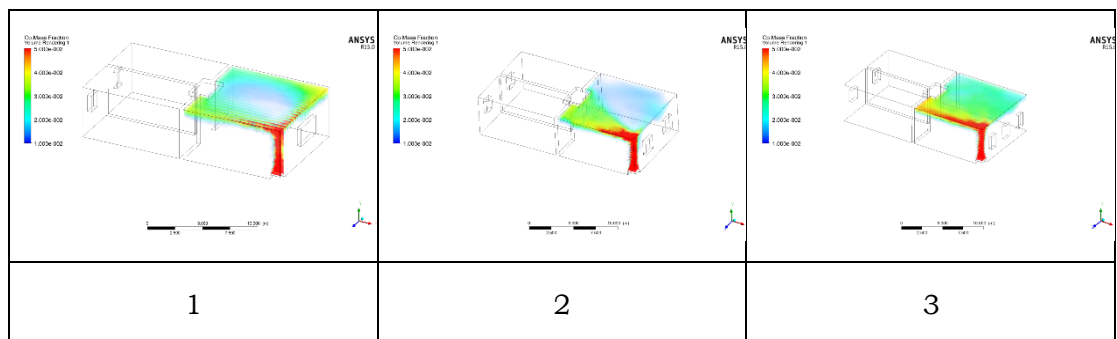
2.2.2 垂直截面 Velocity 图

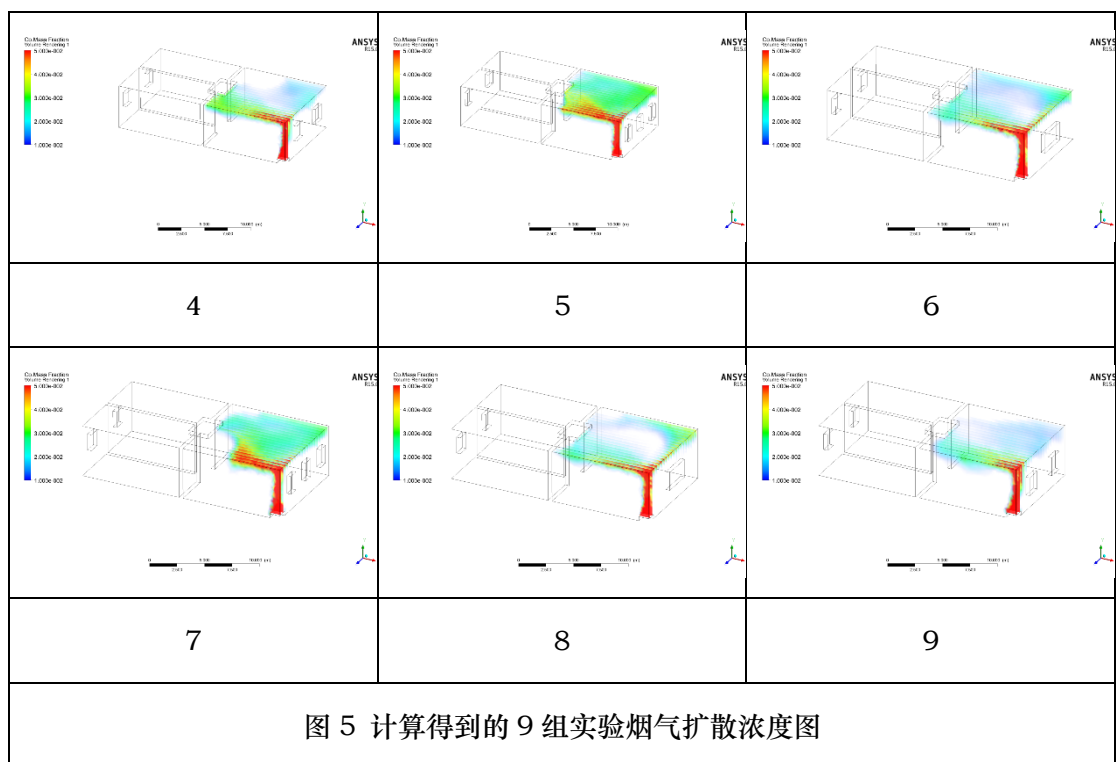




通过烟气在房间中扩散的矢量 (Vector) 图所示, 随着抽气口抽吸压力的增加, 其出口速度也逐渐增加, 如图 5 中 1, 2, 3 组至 4, 5, 6 组至 7, 8, 9 组, 说明抽气压力的影响比较大。比较明显的看出, 抽气口抽吸压力增大时, 从窗户进入的气体速度也逐渐增大, 形成到达壁面的流动趋势也更直接。随着窗户数量的增加, 当客厅窗户为 1 个时, 其流动后会带动周向的空气环绕流动, 如图 4 (1, 6, 8 组); 当客厅窗户为 2 个或者 3 个时, 其流向壁面的速度分布逐渐均匀, 如图 4 (3, 5, 7 组)。

2.2.3 垂直截面一氧化碳残余图





一氧化碳浓度在火灾发生处最高，而后形成向上后在天花板扩散的趋势。图 8 的综合残留是最少的。图 5 给出了计算得到的烟气扩散浓度图，当客厅为 1 个窗户时，由窗户指向抽气口方向的顶部烟气浓度明显低于屋顶其它部位的浓度，如图 5（1，6，8 组）；而且随着抽气口压力大的增大，整体屋顶的烟气浓度也逐渐减少，如第 1 组至第 6 组至第 8 组。

当客厅为 2 个窗户时，屋顶烟气的浓度明显分成了 2 部分，靠近火灾产生区域为浓度较大的部分，展现出扩张的现象；而在两侧窗户指向抽气口位置的屋顶，烟气浓度明显减少，呈现出烟气浓度收缩的现象。

当客厅为 3 个窗户时，屋顶烟气浓度的分布呈现出分布均匀的现象。

2.3 正交结果分析

经过 ANSYS Fluent 软件运算得到的 CO 平均浓度分布数据如下：

表 3 计算得到的正交实验结果

A	B	C	一氧化碳浓度
---	---	---	--------

-50	1.2	1	0.0025958
-50	1.4	2	0.0023801
-50	1.6	3	0.0031660
-100	1.2	2	0.0023116
-100	1.4	3	0.0032246
-100	1.6	1	0.0022721
-150	1.2	3	0.0027769
-150	1.4	1	0.0020239
-150	1.6	2	0.0024109



图 6 正交结果分析图

由以上图表可以得出以下结论，单个因素对于一氧化碳平均浓度分布的影响：

(1) 在以通风口负压为因素的情况下，一氧化碳平均浓度分布与通风口负压大小成反比，随着压力的增加浓度平均浓度逐渐减小。在上述实验中，A3 条件下的一氧化碳平均浓度最少。

(2) 在以窗户与天花板之间距离为因素的情况下，一氧化碳平均浓度于窗户天花板

距离 1.4 米时出现变化。在上述实验中，B2 条件下的一氧化碳平均浓度最少。

(3) 在以窗户数量为因素的情况下，一氧化碳平均浓度与窗户数量成反比。在上述实验中，C1 条件下的一氧化碳平均浓度最少。

2.3.2 各因素对于一氧化碳平均浓度的影响

根据图表 4 所展现的，A、B 与 C 三个因素分别在 A3、B2 与 C1 时达到最低点。其中，C 因素（窗户数量）对于一氧化碳浓度的影响最大，A 因素（通风口负压）其次，B 因素（窗户与天花板距离）最小。

2.3.3 各因素组合后的最优解

因为本研究时探讨能否在设计相仿的地下室中达成最优的通风设计，也就是尽量减少火灾后一氧化碳的平均浓度，所以 A3B2C1 是最优解，对应本正交实验为第 8 组组合方案。

3. 总结

(1) 本课题研究了地下室在火灾发生后通风设计。选取了三个不同因素及每个因素三个水平下对于一氧化碳平均浓度的影响。其中三个因素分别是通风口负压、窗户与天花板的距离以及窗户数量，三个水平分别为（-50Pa、-100Pa、-150Pa），（1.2m、1.4m、1.6m）以及（1 个、2 个、3 个）。

(2) 本课题应用了 Minitab 对以上三个因素的三个水平进行正交实验设计。

(3) 本课题应用了 ANSYS Fluent 软件建模并对九个正交实验进行模拟，得出结果和结论。

(4) 通过 Minitab 软件对正交实验得出的 CO 平均浓度进行分析，发现 A3B2C1 是最优解。

(5) 本结论可以用于大多数地下室以及房屋设计时需要考虑的火灾通风因素，通风口负

压越大越好，窗户数量在保证面积一样的时候应该越少越好，窗户与天花板的距离需要进一步计算以找出最优解。

4. 参考文献

- (1) 晓吾,《烟在火灾中对人的影响》,《安徽消防》1993 年第 9 期;
- (2) 上海市民防办公室,上海市地下空间管理联席会议办公室,《城市地下空间灾害事故案例选编》,同济大学出版社,2008 年;
- (3) Lehua Wang and Gang Xu, Numerical Investigation of Fire Dynamic Behavior for a Commercial Building Basement, Advanced Materials Research (Volumes 594-597), 2012;
- (4) Mahmood Tabaddor, Majji Trinath Rao and Sachin Rai, Modeling of Basement Fire Under Different Ventilation Scenarios, www.ul.com 2019;
- (5) 张春阳,《盐城中央广场地下室机械排烟防火灾的数值模拟》,东华大学,2011 年;