

文章编号:1671-6833(2022)05-0084-07

# 地下车库排烟口朝向对排烟效果的影响

钟委<sup>1</sup>, 田英<sup>1</sup>, 韩宁<sup>1</sup>, 高子鹤<sup>2</sup>, 章恒<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 力学与安全工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 为了比较开口朝向不同的3种排烟系统的排烟效果,以地下车库的一个防烟分区为例,建立FDS物理模型,对3种排烟系统进行数值模拟。通过对比3种排烟系统的流场和温度分布以及排热量和排烟效率,分析3种排烟系统的特点及排烟效果的差别。结果表明:从流场和温度分布来看,3种排烟系统的流场分布存在较大差异,温度分布却很相似;从排烟效率和排热量来看,排烟口向上的机械排烟系统相对于开口向下的系统,排烟效率要高4%左右,排热量要高10%左右;从排烟口高度不同时的排热量变化情况来看,开口向下的排烟系统,排热量随着排烟口高度的升高明显增加,而开口向上的排烟系统,排热量随着排烟口高度的升高变化不明显。对于向上开口的排烟系统,排烟口高度在4.5 m以下时,随着排烟口向上高度的增加,排烟效率在逐渐增加,但是在排烟口高度超过4.5 m后,由于排烟口太接近顶棚,排烟受到顶棚的干扰,排烟效率反而降低。

**关键词:** 地下车库火灾; 机械排烟; 排烟口; 排烟效率

**中图分类号:** N39; TU962; TU926 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2022.05.010

## 0 引言

近年来,城市汽车的数量快速增加,汽车的存放成了一个交通管理的问题,为了减少占地面积,地下车库开始普及使用。然而,地下车库在极大地解决了汽车存放问题的同时,也带来了许多安全问题,其中的消防问题尤为值得关注。由于地下车库特殊的扁平状结构,一旦发生火灾,有毒和高温烟气在极短时间内就会上升到顶棚并快速蔓延至每个地方,阻碍人员疏散和火灾扑救<sup>[1]</sup>。而且车库与其上部建筑是一个相连的整体,一般地下车库顶部会存在大量的梁结构,这些梁结构对排烟也会有一定的影响,因此,高效的排烟方式对于安全疏散非常重要<sup>[2]</sup>。通常的排烟方式有两种,一种是自然排烟,另一种是机械排烟。自然排烟的排烟效率低,还容易受到环境的影响<sup>[3]</sup>,所以,地下车库通常采用机械排烟的方式排烟。

前人对于地下车库机械排烟的研究主要是机械排烟和自然排烟效率的比较以及排烟速度对排烟效率的影响。赵猛超等<sup>[4]</sup>利用FDS对机械排烟和自然排烟的效率进行比较。结果表明,在地

下车库中火源功率较小时,采用机械排烟效果好。Ji等<sup>[5]</sup>做了一系列的燃烧实验,来研究排烟速度和排烟口高度对机械排烟效率的影响。结果表明,排烟口高度的增加或者适当减小排烟速度,可以提高排烟效率。周志忠等<sup>[6]</sup>建立了一种缩尺寸扁平空间模型进行燃烧实验,研究了机械排烟速度对排烟效率的影响。结果表明,排烟速度小于0.3 m/s时,机械排烟和自然排烟的效果相差不大;排烟速度为0.3~1.85 m/s时,排烟效率逐渐升高至85%;再继续增加排烟速度,对排烟效率影响不大。

也有学者对排烟口的分布和朝向对排烟的影响进行了研究。Hsu等<sup>[7]</sup>利用FDS进行了排烟口布局对车库内烟气流动影响的模拟研究。结果表明,排烟口的有效布局可以有效延长逃生时间。张梅红等<sup>[8]</sup>利用FDS研究了排烟口朝向对排烟效果的影响。结果表明,在相同的排烟管道条件下,排烟口朝上开启更容易排出烟气。李英等<sup>[9]</sup>采用数值模拟的方法对排烟口高度以及朝向不同的机械排烟系统进行对比研究。结果表明,对于开口向下的排烟系统,排烟口高度越高,排烟效果

收稿日期:2022-01-13;修订日期:2022-04-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52076198);河南省科技攻关重点资助项目(182102310007);河南省优秀青年科学基金资助项目(222300420078)

作者简介:钟委(1978—),男,重庆江津人,郑州大学副教授,博士,主要从事地下建筑火灾防治及化工安全技术研究,E-mail:zhongwei@zzu.edu.cn。

越好;侧向开口的系统排烟口高度对排烟效果影响较小。

对于地下车库排烟,中国现行规范中有相关规定:有机械排烟地下车库内要有防烟分区的划分,每一个防烟分区面积不宜超过 2 000 m<sup>2</sup>;在每一个防烟分区都应该设置排烟口<sup>[10]</sup>。虽然规范中给出了最小排烟量,但并未明确规定机械排烟系统中排烟口的朝向。现在大部分地下车库机械排烟系统使用的是排烟口向下开口,如图 1(a)所示;还有一部分采用侧向开口,如图 1(b)所示;另外很少一部分是向上开口,如图 1(c)所示。

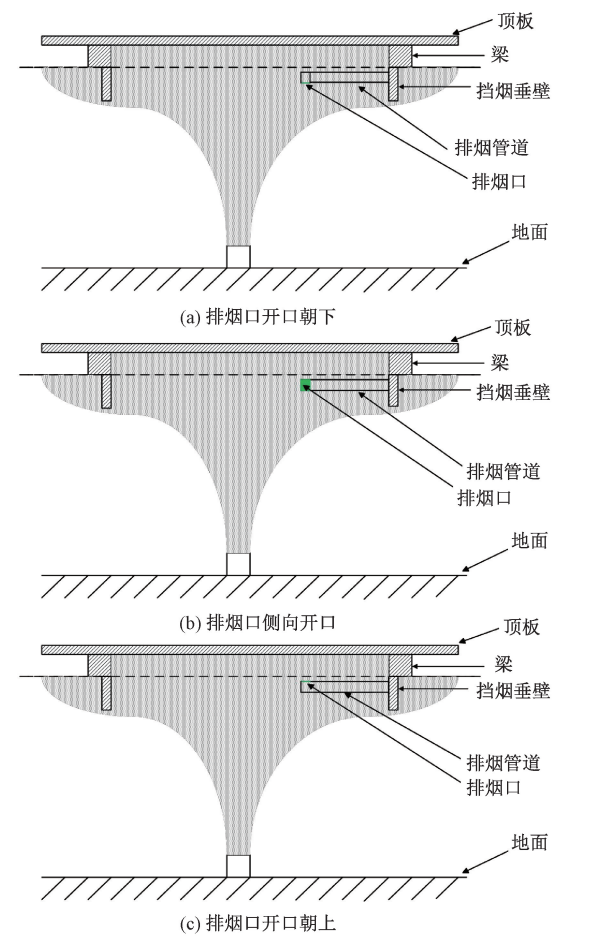


图 1 排烟口不同朝向示意图

Figure 1 Schematic diagram of different orientations of smoke exhaust outlet

本文对地下车库排烟口朝向不同的排烟系统进行了数值模拟研究,对比 3 种朝向的排烟口在火灾中的温度与流场分布、排热量以及排烟效率,可以给以后地下车库的通风排烟系统设计提供一定的参考。

1 数值模拟

本文所用模拟软件为 FDS (fire dynamics sim-

ulator),是一款由美国国家标准与技术研究院 (NIST)研发的专门用于对火灾场景进行仿真模拟的火灾计算分析软件<sup>[11-12]</sup>。已有研究表明<sup>[13]</sup>,FDS 可以准确地模拟出实际火灾发生后的烟气流动特征,也可以模拟火灾中的排烟场景。

本文以一个地下车库的某一个防烟分区建立模型,如图 2~4 所示。模型分为两个区域,一个区域用来产生烟气,即起火间;另一个区域起到蓄烟作用,即防烟分区。之所以采用两个区域是因为在这样的情况下,防烟分区内的机械排烟系统对火源燃烧的影响可以忽略,保证给防烟分区提供一个稳定烟气源<sup>[14]</sup>。

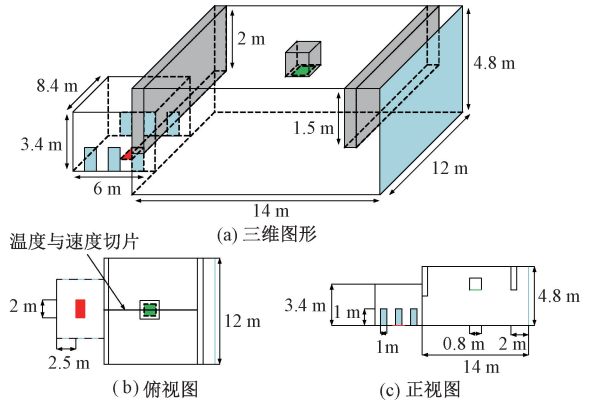


图 2 排烟口朝下布置示意图

Figure 2 Schematic diagram of downward layout of smoke exhaust outlet

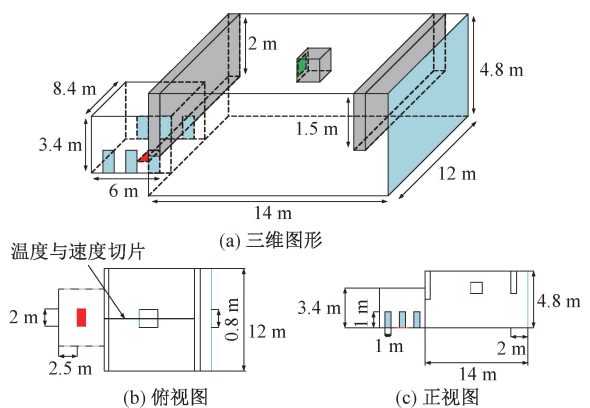


图 3 排烟口侧向布置示意图

Figure 3 Schematic diagram of lateral layout of smoke exhaust outlet

该模型的起火间长 8.4 m,宽 6 m,高 3.4 m,在其前后两侧底部各有 3 个尺寸为 1 m×1 m 的补气口,火源位于房间中央,尺寸为 1 m×2 m。防烟分区长 14 m,宽 12 m,净高 4.8 m,防烟分区的左端与起火间相连,右端开口,挡烟垂壁设置在右端,高度为 1.5 m,挡烟垂壁距离右端开口有 2 m 的距离。火源功率为 4 MW,模拟小汽车发生火灾<sup>[15]</sup>。为了缩短模拟时间,火源设置起火即达到

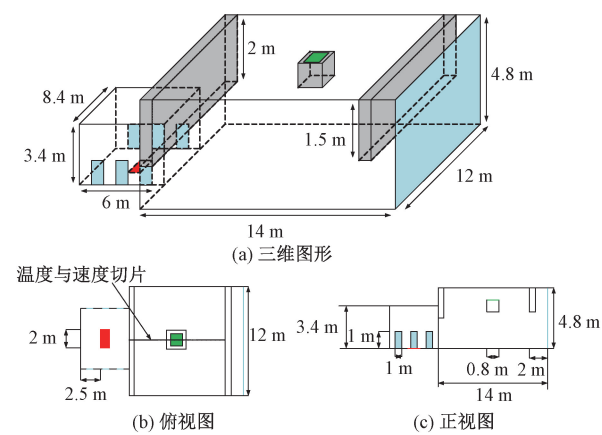


图 4 排烟口朝上布置示意图

Figure 4 Schematic diagram of upward layout of smoke exhaust outlet

最大设定功率。3 种排烟口大小形状完全一致,都设置为 0.8 m×0.8 m 的正方形排烟口,排烟口始终处于开启状态,排烟口均位于防烟分区中心。

3 种机械排烟系统的排烟速度均以 1 m/s 为间隔从 1 m/s 增大到 10 m/s,模拟工况介绍见表 1。在过排烟口中心位置设置了温度与速度切片(图 2~4);在排烟口的平面处监测热流量和 CO 质量流率。根据模拟结果可知,模拟 70 s 之后烟气充满防烟分区且烟气层相对稳定,将模拟时间设定为 200 s。环境温度的起始温度为 20 ℃。起火间和防烟分区顶棚、地面和挡烟垂壁的表面均设置为混凝土。地下车库中的环境压力为 101.325 kPa,环境中氧气的质量分数为 0.232。计算域中的相对湿度约为 40%<sup>[16]</sup>。

表 1 模拟工况表

Table 1 Simulation conditions

工况	火源功率/ MW	排烟口朝向	排烟速度 $v$ / ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1~11	4	侧向	0~10
12~67	4	向上	0~10
68~123	4	向下	0~10

FDS 中的计算单元是网格,网格的大小决定了模拟结果的准确性。选择网格大小的标准就是当量火源直径  $D^*$ ,确定网格是否合理可以通过火源的当量直径与网格尺寸的比值  $D^*/\delta x$  来判断, $D^*$  的计算公式如下所示<sup>[17]</sup>:

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_0 c_p T_0 g} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

式中: $\dot{Q}$  为火源的热释放速率,kW; $\rho_0$  为空气密度,取值为 1.2 kg/m<sup>3</sup>;  $c_p$  为空气比热容,取值为

1 kJ/(kg·k); $T_0$  为空气温度,取值为 293 K; $g$  为重力加速度,取值为 9.81 m/s<sup>2</sup>。

FDS 用户手册<sup>[18]</sup>指出, $D^*/\delta x$  的值在 4~16 之间时数值模拟结果较好,经计算得出,火源功率为 4 MW 时,火源特征直径为 1.672 m,网格尺寸为 0.105~0.418 m。因此,选择了 0.1 m×0.1 m、0.2 m×0.2 m 和 0.3 m×0.3 m 3 种不同的网格尺寸进行比较。如图 5 所示,随着网格密度的增加,温度随高度变化趋势大致保持一致。网格尺寸为 0.1 m 和 0.2 m 的模拟结果差别不大,考虑到计算时间以及结果的准确性,选择网格尺寸为 0.2 m×0.2 m 进行模拟。

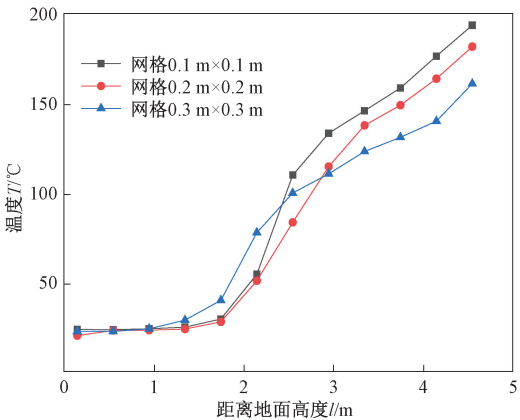


图 5 不同网格尺寸时温度随高度的变化

Figure 5 Variation of temperature with height at different grid sizes

## 2 结果与讨论

### 2.1 温度场分布

#### 2.1.1 温度分布

图 6 为 3 种不同朝向的排烟系统在排烟速度为 6 m/s 时的温度流场分布。如图 6 所示,因为有挡烟垂壁的影响,起火间产生的热烟气在防烟分区内聚集,自上向下烟气温度逐渐降低,烟气层厚度达到一定程度后,越过挡烟垂壁逸出。这和实际情况的防烟分区内烟气聚集情况相同。在防烟分区上部,热烟气的最高温度超过 200 ℃,在防烟分区的下部区域,温度等于环境温度。

从侧向开口的排烟系统中(图 6(a))可以看出,排烟口可以排出包括防烟分区上部的高温热烟气和中部的热烟气,而且排烟口下部的低温烟气也受到排烟口的吸力的影响,有一个向上的凹陷。

从开口朝下的排烟系统中(图 6(b)、图 6(c))可以看出,当排烟口高度较低时,高温烟气一直存在于防烟分区上部,不会被排烟口排出,排烟口排出的主要是中部的烟气。排烟口上方的烟



气受排烟口干扰很小,排烟口下方的烟气层则受到一定程度的扰动。随着排烟口高度的升高,排烟口吸入的烟气温度逐渐升高,同时,排烟口对下层的低温烟气层的干扰越来越小。

从开口朝上的排烟系统中(图 6(d)、图 6(e)、图 6(f))可以看出,当排烟口高度较低时,虽然高温烟气在排烟口正上方,但是由于烟气层

在防烟分区内聚集的较厚,高温烟气无法被排出。和开口向下的系统一样,排烟口排出的主要是中部的烟气。随着排烟口高度的升高,排烟口吸入的烟气温度逐渐升高;但是,在升高到一定程度后,由于和顶棚之间的距离减小,顶棚和排烟口之间的烟气流动受到限制,排烟口吸入的烟气包含了排烟口后方的烟气。

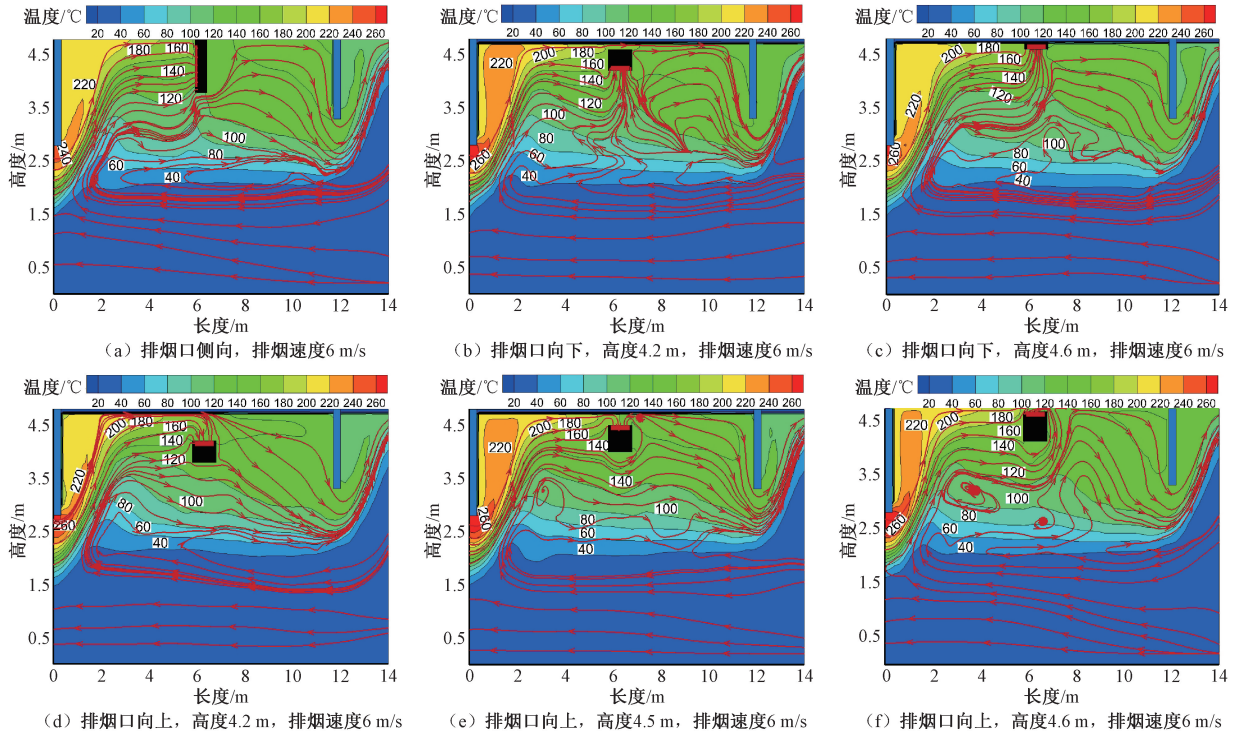


图 6 不同朝向排烟系统温度流场分布

Figure 6 Temperature and flow field distribution of smoke exhaust system in different directions

从温度分布云图中可以看出,由于挡烟垂壁对烟气有蓄积作用,3 种排烟系统的烟气层厚度均保持在 3 m 左右。

2.1.2 流场分布

3 种排烟系统下的烟气吸入方式和流场分布有很大的不同。首先就烟气吸入方式来说,3 种排烟系统下的烟气吸入方式有较大差别;侧向开口排出的是排烟口正前方的烟气,包括了起火房间直接流出的烟气和烟气层卷吸的空气;排烟口向下排出的烟气主要是排烟口正下方的烟气,包括了起火房间直接流出的烟气和烟气层卷吸的空气;排烟口向上排出的烟气主要是排烟口正上方的烟气,其中的大部分是起火房间直接流出的烟气和少量的烟气层卷吸的空气。

其次,通过比较 3 种排烟系统的流场分布可知,排烟口高度相同时,向上和侧向开口的排烟系统流场相对更稳定,随着排烟口高度的增加,向下开口的排烟系统流场也变得相对稳定。

2.2 排热量

地下车库在发生火灾后,会产生大量的烟气和热量,对 3 种排烟系统下的排热量进行对比,结果如图 7 所示。

以模拟时间 200 s 内排出热量的平均值来表示机械排烟口的排热量。3 种排烟系统的排热量均随排烟速度的增加而升高。如图 7(a)所示,在排烟口高度相同时,排烟口的排出热量从大到小顺序为向上开口、侧向开口、向下开口,而且可以通过向上开口排出热量-向下开口排出热量/向上开口排出热量,计算出向上开口比向下开口多排出 10%左右的热量。说明排烟口同等高度时,开口向上的排烟系统排热效果更好。如图 7(b)所示,对于开口向下的排烟系统,排热量随着排烟口高度的升高明显增加。如图 7(c)所示,对于开口向上的排烟系统,排热量随着排烟口高度的升高变化不大,排烟口高度在 4.5 m 以下时,排热量随着排烟口高度的升高逐渐增大,在高度继续增



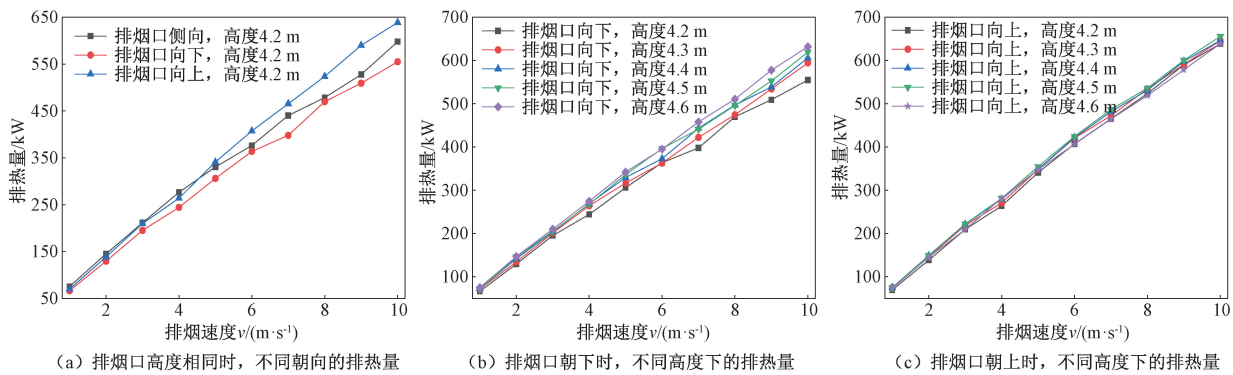


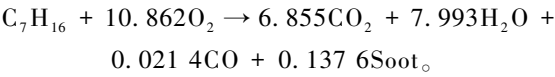
图 7 不同排烟系统下的排热量

Figure 7 Heat exhaust of different smoke exhaust systems

加到 4.6 m 时,排热量比 4.5 m 高度时有所减小。

2.3 排烟效率

选用的火源为庚烷,庚烷不完全燃烧反应方程式为<sup>[19]</sup>



从反应方程式得知,庚烷不完全燃烧的产物有 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、CO 和碳烟粒子,为了减小环境对模拟结果的干扰,选择测量排烟口处的 CO 量进行计算。

排烟效率是衡量火灾发生后地下车库排烟效果的重要指标<sup>[19]</sup>。将排烟速度为 0 时排烟口处的 CO 浓度作为基准浓度,排烟效率  $\eta$  定义为实际排烟时排出的烟气量与理想状况下排出的烟气量的比值<sup>[14]</sup>,即

$$\eta = \frac{V_{fact}}{V_{ideal}} = \frac{V_v C_i}{V_v C_0} = \frac{C_i}{C_0} \times 100%。$$
 (2)

式中:  $V_{fact}$  为实际不同排烟速率下排出的烟气量, m<sup>3</sup>/s;  $V_{ideal}$  为理论上应该排出的烟气量, m<sup>3</sup>/s;  $V_v$  为机械排烟量, m<sup>3</sup>/s;  $C_0$  为基准 CO 浓度, kg/m<sup>3</sup>;

$C_i (i=1,2,\cdots,10)$  为不同排烟速率下排烟口处的 CO 浓度, kg/m<sup>3</sup>。

根据式(2)计算出 3 种排烟系统在不同排烟口高度下的排烟效率随排烟速率的变化趋势如图 8 所示。从图 8 可知,3 种排烟方式的排烟效率均随排烟速度的增大而下降,随着排烟口高度的升高,排烟效率有所提高。如图 8(a) 所示,在相同高度下,排烟口向下的排烟系统的排烟效率总是小于排烟口向上的排烟系统,而且可以通过向上开口排烟效率-向下开口排烟效率/向上开口排烟效率,计算出向上开口比向下开口排烟效率高 4% 左右;如图 8(b) 所示,对于向上开口的排烟系统,随着高度的增加,排烟效率呈现出了先增加后减小的趋势;如图 8(c) 所示,对于向下开口的排烟系统,随着高度的增加,排烟效率逐渐增加,而且增加的趋势逐渐变缓。排烟口高度相同时,结合排热量考虑 3 种排烟系统的排烟效率从大到小顺序为向上开口、侧向开口、向下开口。随着排烟口高度的增加,向下开口排烟系统的排烟效率会逐渐超过侧向开口的排烟系统。

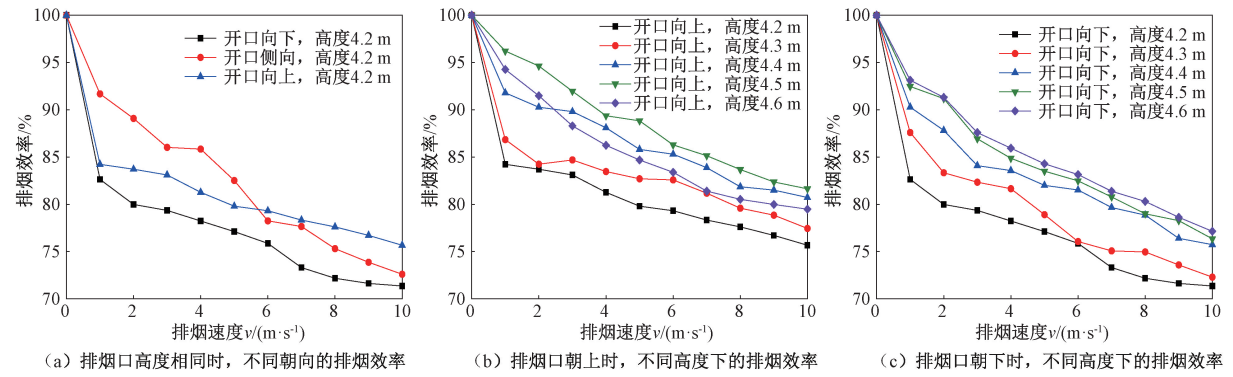


图 8 不同排烟系统下的排烟效率

Figure 8 Smoke exhaust efficiency of different smoke exhaust systems

3 结论

本文采用数值模拟的方法对地下车库火灾中

3 种排烟系统的排烟效果进行了对比,通过排烟口朝向、排烟口高度和排烟速度这些变量对排烟效果影响进行研究,得出如下结论:

(1)3 种排烟系统的排烟效率均随着排烟速度的增加而下降。在排烟口高度相同时,从排烟效率和排热量来看,排烟口向上的机械排烟系统相对于向下的系统在排烟效率上要高 4% 左右,排热量要高 10% 左右,3 种排烟系统的排烟效果从大到小顺序为向上开口、侧向开口、向下开口。

(2)开口向上的排烟系统,排烟效率先随着排烟口高度的升高而增大,在增加到 4.5 m 之后,随着排烟口高度的升高开始减小。开口向下的排烟系统,排烟效率先随着排烟口高度的升高而增大,增大的趋势逐渐变缓。

(3)开口向下的排烟系统,排热量随着排烟口高度的升高明显增加,而开口向上的排烟系统,排热量随着排烟口高度的升高变化不大。

参考文献:

[1] 吕辰. 扁平大空间地下车库火灾烟气流动数值模拟研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.  
LYU C. Study on smoke spread law in flat large space of the underground parking fire[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2015.

[2] 钟委, 刘欣, 高子鹤. 纵向通风对隧道火灾特性及竖井自然排烟效果的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(6): 46-52.  
ZHONG W, LIU X, GAO Z H. Experimental investigation on the influence of longitudinal ventilation on tunnel fire characteristics and natural smoke exhaust by shaft[J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2020, 41(6): 46-52.

[3] GANN R G. International study of the sublethal effects of fire smoke on survivability and health (SEFS)[R]. Los Angeles: National Bureau of Standards, 2001.

[4] 赵猛超, 卢森, 徐大用. 地下车辆基地排烟模式对比研究[J]. 建筑安全, 2017, 32(9): 71-75.  
ZHAO M C, LU M, XU D Y. Comparative study on smoke exhaust patterns of underground vehicle bases [J]. Construction safety, 2017, 32(9): 71-75.

[5] JI J, LI K Y, ZHONG W, et al. Experimental investigation on influence of smoke venting velocity and vent height on mechanical smoke exhaust efficiency [J]. Journal of hazardous materials, 2010, 177(1/2/3): 209-215.

[6] 周志忠, 黄亚东, 徐亮, 等. 排烟速度对扁平空间机械排烟效率影响研究[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(6): 809-811.  
ZHOU Z Z, HUANG Y D, XU L, et al. Study on the effect of mechanical smoke exhaust velocity on smoke exhaust efficiency in a flat space[J]. Fire science and

technology, 2019, 38(6): 809-811.

[7] HSU M W, LEE S K, HUANG L L, et al. The simulation of fires in underground parking floors by fire dynamic simulator[J]. Sensors and materials, 2017, 29(4): 429-443.

[8] 张梅红, 赵伟. 扁平空间排烟口朝向对排烟效果的影响[J]. 消防科学与技术, 2011, 30(3): 211-213.  
ZHANG M H, ZHAO W. Influence of the smoke vent orientation to smoke evacuation in flat space[J]. Fire science and technology, 2011, 30(3): 211-213.

[9] 李英, 王艳. 某地下车库不同排烟口高度及朝向排烟效率数值模拟研究[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2014, 22(3): 78-82.  
LI Y, WANG Y. Numerical simulation on the mechanical smoke extraction efficiency under various venting heights and directions in an underground garage [J]. Journal of Anhui institute of architecture & industry (natural science), 2014, 22(3): 78-82.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 汽车库、修车库、停车场设计防火规范: GB 50067—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.  
Ministry of housing and urban rural development of the people's Republic of China. Code for fire protection design of garage, motor repair shop and parking area: GB 50067—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.

[11] 陈永宽. 地下车库火灾控制效果数值模拟研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.  
CHEN Y K. Numerical simulation study on fire control effect of underground garage[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2019.

[12] 钟委, 端木维可, 李华琳, 等. 火源横向位置对隧道火灾烟气分岔流动影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(1): 27-31.  
ZHONG W, DUANMU W K, LI H L, et al. Numerical investigation into the influence of different transverse fire locations on smoke bifurcation flow in tunnel fire[J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2017, 38(1): 27-31.

[13] AYALA P, CANTIZANO A, GUTIÉRREZ-MONTES C, et al. Influence of atrium roof geometries on the numerical predictions of fire tests under natural ventilation conditions[J]. Energy and buildings, 2013, 65: 382-390.

[14] 钟委. 地铁站火灾烟气流动特性及控制方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.  
ZHONG W. Study on smoke flow characters and management in subway station fire[D]. Hefei: University

of Science and Technology of China, 2007.

[15] YANG J, PAN X, WANG Z, et al. Numerical study on the smoke flow characterization and phenomenon of plug-holing under lateral smoke exhaust in tunnel fire [J]. Journal of applied fluid mechanics, 2018, 11 (1): 115-126.

[16] 刘拓, 姜学鹏. 侧向集中排烟隧道火灾烟气控制优化[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(8): 837-840, 843.

LIU T, JIANG X P. Optimization on smoke control in tunnel with lateral central extraction system [J]. Fire science and technology, 2013, 32(8): 837-840, 843.

[17] 史玉晓. 地铁站火灾烟气扩散及控制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.

SHI Y X. Study on smoke diffusion and control of subway station fire[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.

[18] MCCRATTAN K B, MCDERMOTT R, WEINSCHENK C, et al. Fire dynamics simulator technical reference guide volume 1[R]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2013.

[19] 陈建忠, 曹正卯, 张琦. 侧壁排烟模式下超宽断面沉管隧道火灾排烟效率研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(增刊1): 393-399.

CHEN J Z, CAO Z M, ZHANG Q. Study on the efficiency of smoke exhausting under lateral exhaust mode in extra-wide immersed tunnel fire[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2017, 13 (S1): 393-399.

**Influence of Smoke Outlet Orientation on Smoke Exhaust Effect in Underground Garage**

ZHONG Wei<sup>1</sup>, TIAN Ying<sup>1</sup>, HAN Ning<sup>1</sup>, GAO Zihe<sup>2</sup>, ZHANG Heng<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to examine the smoke exhaust effect of three mechanical smoke exhaust systems with different smoke outlet orientations, an FDS physical model was established by taking a smoke prevention zone of the car garage, and numerical simulations were carried out for the three smoke extraction systems. The flow field, temperature distribution, as well as the heat exhaust and smoke exhaust efficiency of the three smoke exhaust systems were compared. The characteristics of the three smoke extraction systems and the differences in the smoke exhaust effect were analyzed. The results showed that, from the perspective of flow field and temperature distribution, the flow field distribution of the three smoke extraction systems was quite different, but the temperature distribution was very similar. From the perspective of smoke exhaust efficiency and heat exhaust, the mechanical smoke exhaust system with the exhaust port upward was about 4% higher in the exhaust efficiency and about 10% higher in the heat exhaust than the system with the opening downward. From the perspective of the change of exhaust heat when the height of the exhaust port was different, for the smoke exhaust system with the downward opening, the heat exhaust increased significantly with the increase of the height of the exhaust port, while the smoke exhaust system with the upward opening, the heat exhaust increased not obviously with the increase of the height of the exhaust port. For the smoke exhaust system with the upward opening, when the height of the exhaust outlet was lower than 4.5 m, the smoke exhaust efficiency increased gradually with the increase of the upward height of the smoke exhaust outlet. However, when the height of the exhaust outlet exceeded 4.5 m, the smoke exhaust was disturbed by the ceiling due to the short distance between the smoke exhaust outlet and the ceiling, which led to the smoke exhaust efficiency reduced.

**Keywords:** underground garage fire; mechanical exhaust; smoke exhaust vent; exhaust efficiency