

文章编号: 1671-6612 (2020) 01-111-11

圆筒形地下立体停车库通风排烟形式的 数值模拟研究

彭 婷 袁艳平 袁中原 曹晓玲

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘 要】 地下立体停车库是有效解决城市停车难问题的方法之一,但其消防安全问题更值得关注。通风排烟是改善地下车库空气品质,预防及控制火灾的重要手段之一。而地下立体停车库缺乏相关设计规范,在通风排烟系统设计时可参考资料较少。因此,主要针对圆筒形地下立体停车库的结构特点,及自然通风时的火灾特性,设计了顶部排烟、着火层内车位定点排烟以及单一风口排烟三种排烟形式。选用 star-ccm⁺ 软件,对比了在不同排烟形式作用下,车库内的烟气浓度、温度分布、周围车辆热辐射变化情况。确定出排烟效果相对较好的排烟形式,以对相关车库设计规范的进一步完善提供一定的参考依据。

【关键词】 圆筒形地下立体停车库; 火灾; 数值模拟; 通风排烟系统; star-ccm⁺
中图分类号 TU926 文献标识码 A

Numerical Simulation of Ventilation and Smoke Exhaust Form in Cylindrical Underground Parking Garage

Peng Ting Yuan Yanping Yuan Zhongyuan Cao Xiaoling

(Mechanical Engineering of southwest jiaotong university, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Underground garage provides solutions to the urban parking problems, but its fire safety problem needs more attention. Ventilation and smoke exhaust is one of the most important means to improve the air quality, fire prevention and control of underground garage. However, the underground parking garage lacks relevant design specifications, and there are few references for its ventilation and smoke exhaust system. Therefore, according to the structural characteristics of cylindrical underground parking garage, and the fire characteristics with natural ventilation. This paper designs three ventilation and smoke extraction systems: top smoke exhaust system, the smoke exhaust system of parking spaces at the same height as fire source, and the smoke exhaust system with one smoke outlet. And this paper chooses star-ccm⁺ as software for calculation. By comparing the smoke concentration, temperature distribution in the garage and the thermal radiation of surrounding vehicles under different smoke exhaust systems, a better smoke exhaust form is determined. Therefore, it can provide some reference basis for the improvement of relevant garage design specifications.

【Keywords】 underground cylindrical parking garage; fire; numerical simulation; ventilation and smoke exhaust system; star-ccm⁺

基金项目: 建筑环境与能源高效利用四川省青年科技创新研究团队项目 (2015TD0015)

作者简介: 彭 婷 (1994.04-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: pengting1994@yeah.net

通讯作者: 袁中原 (1983.08-), 男, 博士, 讲师, E-mail: zhongyuan.yuan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2019-06-08

0 引言

在建筑物中,通风排烟是预防与控制火灾的重

要手段之一^[1]。地下立体停车库本身在防排烟与通风方面具有较大缺点,车库除车辆进出口外没有与外界相通的通风口,气流不畅通。发生火灾时,仅靠自然通风难以排出车库内部的高温烟气,如果不采取有效的措施对车库内进行通风排烟,势必会加剧火势。而通风排烟可以将部分热量带出车库,从而降低火场内的温度。统计数据显示,防排烟系统的不合理是导致近年来地下车库火灾频发的重要原因之一。因此,针对地下立体停车库的建筑特点,设置合理有效的通风排烟系统具有重要的工程意义。

张淑慧^[2]等人通过 FDS 计算认为:在大型地下平面式车库中,机械排烟系统可以排出火场中的有毒气体,降低烟气浓度,提高车库内能见度。机械排烟系统与喷淋系统联合作用,可以有效控制和扑灭初期火灾。奇亚^[3]对某平面地下车库中部发生火灾的场景进行了计算,结果表明:采取机械通风后,空间下部烟气浓度明显高于上层。张甫仁^[4]通过 FDS 计算认为:侧排烟的排烟效果优于下排烟,在地下车库的排烟设计时,可优先选用侧面排烟的系统形式。可以看出,机械排烟系统的地下车库火灾控制起正面作用,而不同排烟形式的排烟效果不同。因此,本文设计了三种通排烟形式,并比较其排烟降温效果。

1 模型的建立

1.1 物理模型

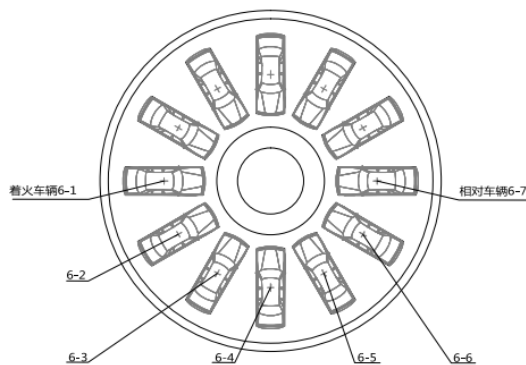


图 1 圆筒形立体停车库平面图

Fig.1 Plane graph of cylindrical underground garage

如图 1、图 2,该车库共地下 10 层,每层设有 12 个车位,共计 120 个。车库最上方为地面车辆进出口,一般来说,除设备故障与发生火灾等特殊

情况时,车库内无人员逗留。车库总直径 20.6m,高 26.6m,中部为车辆运输通道。车库内的提升设备及其运动轨道等钢架结构所占空间小,对烟气运动造成的影响可忽略不计。

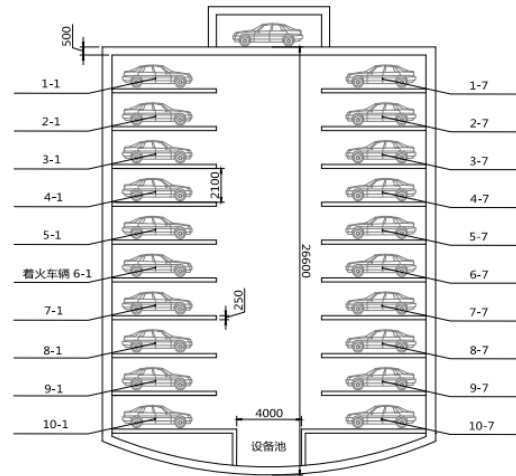


图 2 圆筒形立体停车库立面图

Fig.2 Vertical view of cylindrical underground garage

1.2 数学模型

本文选取 star-ccm+ (Computational Continuum Mechanics) 软件中的内置火灾模块用于地下立体停车库火灾的模拟计算,其流体运动与传热的基本控制方程^[5]包括:

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_{Mx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_{My} \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_{Mz} \quad (4)$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial (\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i \mathbf{u}) = \text{div}(k \cdot \text{grad} T) - p \text{div}(\mathbf{u}) + \Phi + S_i \quad (5)$$

式中: ρ 为流体的密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; \mathbf{u} 为速度矢量, m/s ; u, v, w 为流体在 x, y, z 坐标方向的分量; S_{Mx}, S_{My}, S_{Mz} 为流体源, W ; Φ 为

由于粘性作用而使机械能转换为热能的部分,即耗散源项, W ; i 为流体内能, J 。

该火灾模块采用 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) 方法,即雷诺时均方程对湍流流动进行模拟计算。同时,选取基于上述 RANS 方法的 VHS 体积热源模型 (Volumetric Heat Source Model) 作为燃烧模型,即把火源设定为一个热释放速率恒定且体积固定的热源,而不考虑火源内部某一位置的具体燃烧情况^[6]。

2 计算参数设置

2.1 火源参数设置

(1) 火源功率设置

目前,对于火灾发展过程的描述,多采用 t^2 模型^[7],即:

$$Q = \alpha t^2 \quad (6)$$

式中: Q 为热释放速率, kW; t 为时间, s; α 为火灾增长系数, kW/s。

程远平^[8]教授所做小汽车火灾实验表明:小汽车的热释放率最大值为 4.08MW。Tohir^[9]认为:单辆客车的热释放率均值为 4.7MW。上海市 DGJ 08-88-2006《建筑防排烟技术规程》^[10]中建议:车库内有喷淋时,车辆热释放取值为 1.5MW,无喷淋时为 3MW;英国标准建议^[11]:有喷淋时为 4MW,无喷淋时为 8MW。综合上述数据,并结合目前学者常用数据,确定小汽车最大热释放速率为 5MW。

(2) 火源增长系数设置

程远平教授的实验结论得出:火源的发展规律为: $Q=0.0097t^2$,即火灾类型位于慢速火与中速火之间。实验中,车辆的起火点为车内装饰物,如果起火原因为油箱爆炸,则火源增长的速度会更快。因此,目前常将汽车火灾定为快速火,即将汽车火灾增长系数定为 $\alpha=0.04689\text{kW/s}^2$ 。

(3) 火源位置设置

以火源位于负六层为例,对机械通风条件下的火灾场景进行模拟计算。由于车库横截面的对称性,仅需对同一楼层内半数车辆及车位的实际情况进行监测。为方便数据分析,以着火车辆为起点,按逆时针方向对同层内一半的车辆进行顺序编号,具体编号按“楼层数—层内车辆号”进行,以负一层为例,图 1、图 2 展示了具体编号方式及火源分布位置。

2.2 初始条件与边界条件

车库维护结构和楼板的材料均为钢筋混凝土,厚度为 0.5m,导热系数为 $1.28\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,比热容为 $880\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,密度为 $2200\text{kg}/\text{m}^3$ 。车库上部车辆进出口处设为开口,默认风速为 $0\text{m}/\text{s}$ 。将模拟地点选在笔者所在的成都地区,中国统计年鉴数据^[12]显示,成都地区年平均温度为 16.9°C ,因此,将初始温度定为 16.9°C 。

3 防排烟系统设计

3.1 设计依据

《汽车库、修车库、停车场设计防火规范》^[13] (以下简称《车规》)在总则中指出,该规范“适用于新建、扩建和改建的汽车库、修车库、停车场防火设计”,因此,对于本文的地下圆筒形立体停车库,以《车规》作为通风排烟相关设计的主要参考资料。

3.2 防烟分区与防火分区的划分

《车规》第 5.1.1 条指出,地下汽车库中一个防火分区所允许的最大建筑面积为 2000m^2 ,如果车库内设有自动灭火系统,则可扩大到 4000m^2 。在本文的立体停车库中,建筑面积共 2718.58m^2 。而第 7.2.1 明确指出,机械式汽车库应设置自动喷水灭火系统,因此默认该车库中设有自动喷水灭火系统,相应的,可将防火分区的面积扩大到 4000m^2 。因此,将整个车库划分为一个防火分区即可。

对于防烟分区的划分,《车规》第 8.2.1 条规定,除敞开式汽车库、建筑面积小于 1000m^2 的地下层汽车库和修车库外,汽车库、修车库应设排烟系统,并应划分防烟分区。防烟分区的建筑面积不宜超过 2000m^2 ,一般来说,排烟系统不同时负担两个防烟分区,且防烟分区不应跨越防火分区。本文的车库建筑面积大于规范中的临界值,但由于停车设备的运动需求,需保持车库内各层空间贯通,不适宜用梁或隔墙划分防烟分区,因此可将整个车库空间划分为一个防烟分区。

3.3 系统形式的设计

由于圆筒形地下立体停车库特殊的结构形式,无法确定普通的上排下补,或上排上补的排烟系统形式是否适用。因此,本文探讨了在三种不同排烟系统形式下,车库内发生火灾时各点温度和各车辆所受热辐射的变化情况。通过与自然通风条件下的状态相对比,寻求最适合该类型车库的排烟系统形

式。

(1) 顶部排烟系统

因高温烟气向上进行热运动, 烟气产生后会持续上升至建筑物顶棚, 因此, 对于现有的车库, 工程上多将排烟口设在建筑物的上部, 一般为建筑顶棚处或侧墙的顶部。以此为参考, 设计第一种适用于圆筒形地下立体停车库的通风排烟系统, 即顶部排烟。

将排烟口设在车库本体的最上方, 风口以车库横截面中点为圆心呈环形分布, 补风口设在车库下部设备通道, 沿外墙呈环形分布, 具体系统形式如图3与图4所示。共计排烟口12个, 补风口6个。当车库内某车发生火灾时, 通过消防联动系统或人工手动打开排烟系统, 顶部所有排烟口启动, 着火车辆燃烧产生的高温烟气自然上升, 到达车库上部后被排烟口抽走。同时利用车库下部的补风口满足补风量不小于排烟量50%的工程需求。

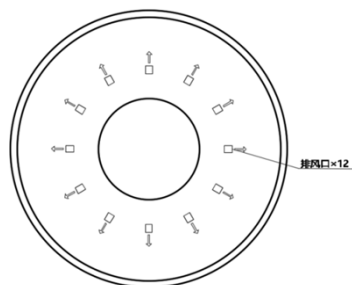


图3 顶部排烟系统平面图

Fig.3 Plane graph of top smoke extraction system

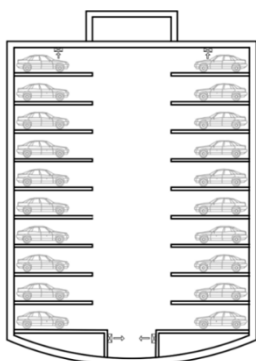


图4 顶部排烟系统立面图

Fig.4 Vertical view of top smoke extraction system

(2) 着火层内车位定点排烟系统

根据笔者前期对自然排烟条件下的火灾场景分析, 火源产生的高温烟气主要集中于起火车辆所在的停车层空间内。基于此结论, 设计出第二种适

用于圆筒形地下立体停车库的通风排烟系统, 在着火层内对烟气进行排出, 即着火层内车位定点排烟系统。

这一排烟系统是将排烟口设在每个车位外墙的上部, 补风口设在车库下部设备通道, 车库内共设排烟口120个, 补风口6个。每个楼层的12个排烟口由一套排烟系统进行控制, 当车库内某车发生火灾时, 启动着火车辆所在楼层的12个排烟口, 布置形式如图5与图6所示。火灾发生后, 着火车辆产生的高温烟气由着火层处的排烟口直接抽走, 同时利用车库下部的补风口进行新鲜空气的补充。

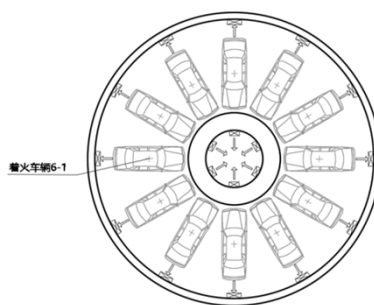


图5 着火层内车位定点排烟系统平面图

Fig.5 Plane graph of smoke extraction system in fire layer

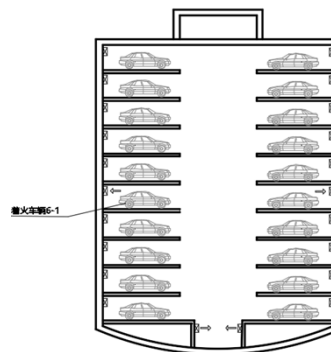


图6 着火层内车位定点排烟系统立面图

Fig.6 Vertical graph of smoke extraction system in fire layer

(3) 单一风口定点排烟系统

考虑到当车库某车发生火灾时, 仅开启离着火车辆最近的一个风口, 或可最大效率地直接抽走火源产生的烟气。因此, 设计第三种排烟形式。这一排烟形式是在第二种排烟系统的基础上, 仅启动着火车辆附近的一个排烟口进行排烟。同样的, 在车库最下部开设补风口, 满足补风需求。风口开启示意如图7和图8。

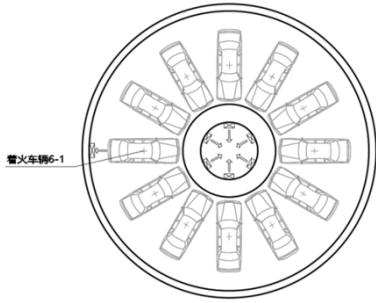


图 7 单一风口定点排烟系统平面图

Fig.7 Plane graph of smoke extraction system with one outlet

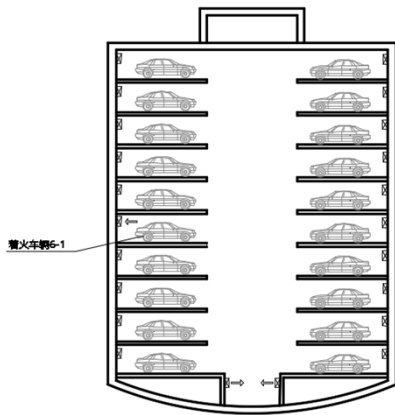


图 8 单一风口定点排烟系统立面图

Fig.8 Vertical graph of smoke extraction system with one outlet

3.4 最小排烟量的确定

综合各标准, 将排风量与排烟量的确定方法汇总于表 1。

表 1 风量计算表^[14]

Table 1 Air volume calculation table

地下车库	风量计算	限制风速 (m/s)		
		风口	风管	
平时	送风	$n \geq 5$ 次/h	5	12
	排风	$n \geq 6$ 次/h	5	12
消防排烟	排烟	$n \geq 6$ 次/h	10	20
	补风	\geq 排烟量的 50%	7	20

表 2 通风形式的讨论

Table 2 Discussion on ventilation form

排烟形式	排风量 (m ³ /h)	排风			补风			风速 (m/s)
		风口尺寸 (mm×mm)	排风口数量	风速 (m/s)	补风量 (m ³ /h)	风口尺寸 (mm×mm)	补风口数量	
自然通风	无	无	无	无	无	无	无	无
顶部排烟		400×300	12					
着火层内车位定点排烟	51840	400×300	12	10	25920	800×600	6	2.5
单一风口排烟		2400×600	1					

通过表 1 可以看出, 系统的排风与排烟量均按换气次数法进行计算, 且均需大于 6 次/h。当换气次数 $n=6$ 次/h 时, 计算所得排烟量为:

$$V_{air}=6Sh=6 \times \pi \times 9.82 \times 24.25=43900.26\text{m}^3/\text{h}$$

《车规》中表 8.2.4 规定, 车库净高超过 9 米的车库, 每个防烟分区排烟风机的排烟量不应小于 40500m³/h。取上述两值的较大值为该车库排烟量的最小取值, 即为 43900.26m³/h。

3.5 机械排烟下的模拟工况设置

根据前文的讨论, 在各工况下, 应确保风量不小于 43900.26m³/h, 并保证排风口的风速小于等于 10m/s。查询常用风口尺寸表, 与本文的模型尺寸进行比对, 最终确定顶部排烟系统与着火层内车位定点排烟系统中的排烟风口尺寸为 400mm×300mm, 设定排烟风口风速为 10m/s, 其排风量为:

$$V_{out1,2}=3600 \times n \times S_{out} \times v_{out}=3600 \times 12 \times 0.4 \times 0.3 \times 10=51840\text{m}^3/\text{h}$$

确定单一风口排烟系统中的排风口尺寸为 2400mm×600mm, 设定排烟风口风速为 10m/s, 其排风量为:

$$V_{out3}=3600 \times n \times S_{out} \times v_{out}=3600 \times 1 \times 2.4 \times 0.6 \times 10=51840\text{m}^3/\text{h}$$

由此保证三个排烟系统下的排风量相同, 且均满足 3.4 中对最小风量的讨论值。同时, 确定三种排烟系统中补风口尺寸为 800mm×600mm, 设定补风风速为 2.5m/s, 以满足最小 50%的补风量需求, 补风风量的具体计算公式为:

$$V_{in}=3600 \times n \times S_{in} \times v_{in}=3600 \times 6 \times 0.8 \times 0.6 \times 2.5=25920\text{m}^3/\text{h}$$

同时, 加入自然通风作为对比。将上述讨论中各排烟系统下的排(补)风量、风口尺寸、风口数量、风口风速等值汇总于表 2。

4 分析指标与结果讨论

4.1 分析指标

当某物体表面所受的热辐射超过某一临界值，将被引燃。在地下车库中，主要考虑因热辐射引起的火灾蔓延情况，当车辆所受热辐射超过其表面材料能承受的最大值时，将会被引燃。火源附近车辆所受的热辐射可依据下式进行计算^[16-18]：

$$I = \frac{Q/3}{4\pi x^2} \quad (7)$$

式中： I 为火源周围物体表面热辐射， kW/m^2 ； Q 为热释放速率， kW ； x 为着火汽车中心到相邻汽车表面的距离， m 。

贾春芬等人认为，汽车表面所受辐射热流量的临界值为 $I=16\text{kW/m}^2$ ，一旦超过该值车辆即被引燃。根据上述火灾蔓延分析指标的讨论，对于不同排烟系统形式下的排烟降温效果主要从车库的内部的烟气浓度分布、温度分布以及车辆表面的热辐射值展开。

4.2 模拟结果分析

(1) 库内烟气浓度分布

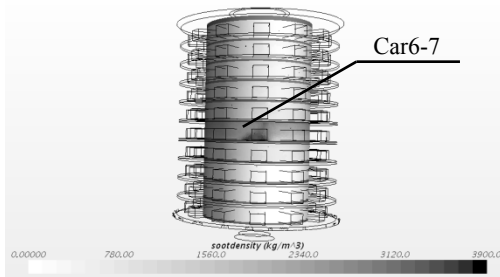


图9 自然通风烟气浓度分布

Fig.9 Soot density with natural ventilation

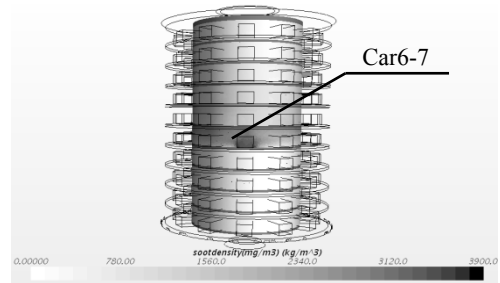


图10 顶部排烟烟气浓度分布

Fig.10 Soot density with top smoke extraction system one outlet

对比四种不同排烟形式下，火场达到稳定状态后，车库内部环形截面的烟气浓度分布云图9至图12可以看出：加设机械排烟系统后，车库内的浓

烟仍主要聚集在相对车位处。在顶部排烟下，相对车位处有明显的烟气沉降，车库内的烟气浓度最高可达 3829mg/m^3 ，而自然排烟下，车库内烟气浓度的最高值为 3958mg/m^3 ，二者相差不多。在着火层内车位定点排烟系统下，可以看到，相对车位内的烟气浓度明显降低。对比具体数值，车库内烟气浓度的最高值为 2119mg/m^3 ，较自然通风条件下下降了 1839mg/m^3 ，下降幅度约为 46.5% 。而单一风口定点排烟系统的排烟效果介于上述二者之间，车库内烟气浓度最大值为 2785mg/m^3 ，与自然通风相比下降了约 29.6% 。

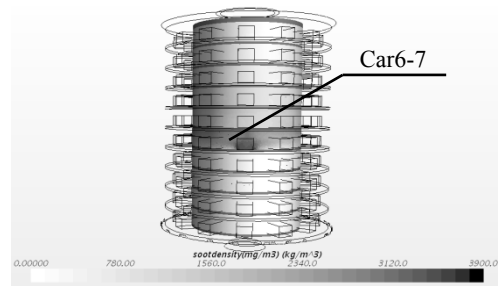


图11 着火层内车位定点排烟烟气浓度分布

Fig.11 Soot density with smoke extraction system in fire layer

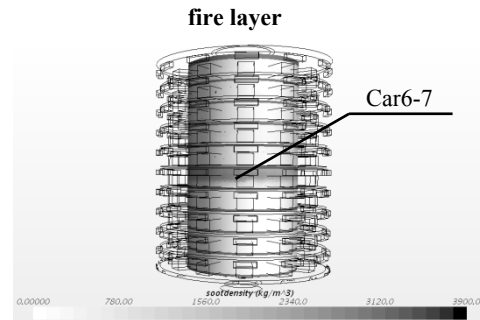


图12 单一风口排烟烟气浓度分布

Fig.12 Soot density with smoke extraction system with

同时，对比上层车位中的烟气浓度，紧邻着火层的5-1车位中，顶部排烟时的烟气浓度为 1318mg/m^3 ，着火层内车位定点排烟时为 183mg/m^3 ，单一风口排烟时为 256mg/m^3 ，而自然通风时该值为 1192mg/m^3 ，着火层内车位定点排烟和单一风口排烟时分别能达到 84.6% 和 78.5% 的降幅。可以认为，着火层内车位定点排烟系统和单一风口排烟系统都可以有效减少向上层蔓延的烟气。而顶部排烟系统因其排烟口位置在车库上部，受顶部风口的抽吸作用，浓烟向上运动，反而使上部空间内的烟气浓度稍有上升。

综合上文的结论可得：在本文提出的三种排烟

形式中,当排风量与补风量相同时,利用顶部排烟口排烟几乎没有起到降低车库内部烟气浓度的效果。在上述排烟形式下,大量的浓烟仍聚集在着火层内,且相对车位处情况最为严重,着火汽车上部空间内也有浓烟分布。仅对着火层所在空间进行定点排烟,对降低库内烟气浓度,排出火源产生的浓烟效果较好。而开启着火车辆附近单一排烟口时,其排烟效果介于上述两系统之间。

(2) 库内温度场分布

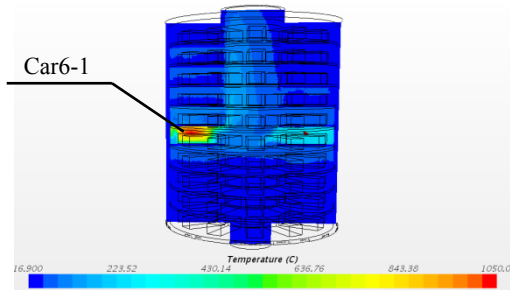


图 13 自然通风温度分布

Fig.13 Temperature distribution with natural ventilation

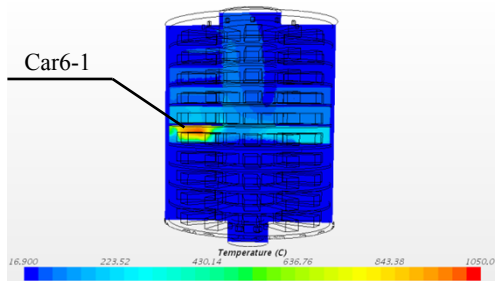


图 14 顶部排烟温度分布

Fig.14 Temperature distribution with top smoke extraction system

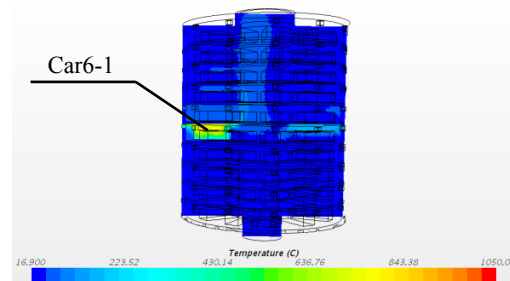


图 15 着火层内车位定点排烟温度分布

Fig.15 Temperature distribution with smoke extraction system in fire layer

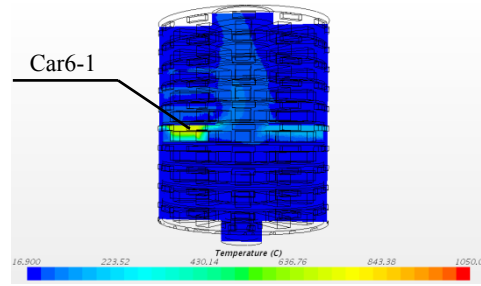


图 16 单一风口排烟温度分布

Fig.16 Temperature distribution with smoke extraction system with one outlet

四种排烟形式下车库竖向截面的温度分布云图 ($t=400s$) 如图 13 至图 16, 可以看出, 在顶部排烟系统作用下, 着火层内的温度较高, 车库中部的设备通道也处于高温环境。对于处在着火层上部的各停车位, 受火源和烟气的影响, 其温度出现不同程度的上升。分析具体数值, 顶部排烟系统下车库内的最高温度约为 $1027.1^{\circ}C$, 而自然排烟下, 车库内温度的最高值约为 $1047.3^{\circ}C$ 。顶部排烟系统使温度最值下降了 $20.2^{\circ}C$, 下降幅度仅为 1.9% 。通过通风排烟能达到的降温效果很小。同使, 由于顶部排烟系统将高温烟气抽至车库顶部, 导致火源上部空间均有大量高温烟气充斥。张晓鸽^[9]等人认为, 火源附近的油箱温度达到 $200^{\circ}C$ 即可认为该车辆被引燃。在该排烟形式下, 5-1 车位油箱高度处的温度为 $202^{\circ}C$, 可能使原本未燃烧的 5-1 车辆发生油箱爆炸。

在着火层内车位定点排烟系统下, 车库内各点的温度明显降低, 上部空间发生大幅度温升的点也明显减少。车库内温度的最高值为 $736.9^{\circ}C$, 与自然通风的情况相比, 下降了 $310.4^{\circ}C$, 下降幅度为 29.6% , 其降幅远远大于顶部排烟系统。在单一风口排烟系统下, 车库内的最高温度值最小, 为 $807^{\circ}C$, 可达到 23% 的降幅。

因单一风口排烟时, 着火车位附近的排烟量最大, 从而使火源附近的温度降低, 车库内的温度极值为三个系统的最低值。但就车库内部温度的总体分布情况而言, 在着火层内车位定点排烟系统下, 车位竖向的温度分层较为明显, 车库中部竖向通道的温度值也较低。

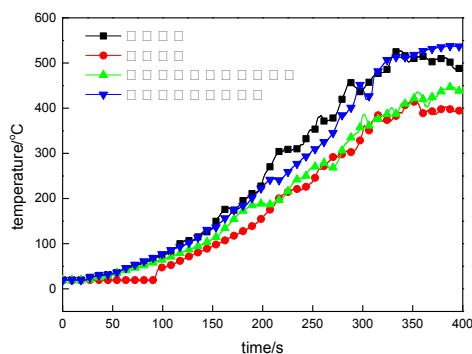


图 17 6-1 车位顶棚温度

Fig.17 Temperature of 6-1 parking space

对比着火点附近顶棚温度在不同通风排烟形式下的变化情况，首先是 6-1 点。顶部排烟时，火源正上方顶棚温度（见图 17）的上升幅度较自然通风时有所放缓，但在计算时间 400s 时刻，该点温度可达 913℃，与自然通风条件下的 920℃相差较小，降幅仅为 0.76%。而当仅有着火层内车辆附近的排烟口开启时，该点的温度值较自然通风条件下降低了近 200℃，降幅约为 22%，且温度的上升速率更慢。单一风口排烟时该点的温度值变化情况与之接近。

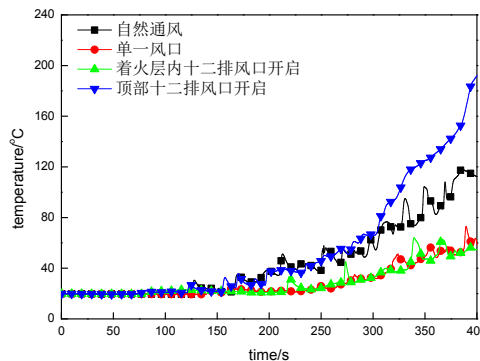


图 20 5-1 车位顶棚温度

Fig.20 Temperature of 5-1 parking space

与火源同层的其余各车位顶棚温度在三种通风系统形式下的变化规律与 6-1 点相似，其中在着火层内车位定点排烟系统和单一风口排烟系统的作用下，各点的温度上升速率均变慢，且终温均有不同程度的降低。如相邻车位 6-2 点温度（见图 18）下降了约 60℃，相对车位 6-7 点（见图 19）下降了 81℃。单一风口排烟时，6-2 点温度比着火层内车位定点排烟系统更低 40℃。但与之不同的是，在顶部排风系统下，上述两点的温度与自然通风时相比，没有降低反而有继续上升的趋势。特别地，在自然通风下，相对车位油箱高度处（距下层楼板约 0.7m）的空气温度约为 244℃。而在着火层内车位定点排烟下，该点空气温度约为 154℃。单一风口排烟时稍高，为 162℃。根据由温度引发的油箱爆炸相关理论，上述两值均低于引发油箱爆炸的温度，可以使相对车辆避免因温度过高而引发的油箱爆炸危险。

对于处在火源上方空间各点的温度变化情况，以 6-1 车辆正上方的 5-1 车辆顶棚处为例（见图 20）。当开启顶部的排风口时，该点的温度上升速率加快，且达到的温度最大值也升高。在计算时间 400s 时刻可以达到 191℃，比自然通风时上升了约 78℃，且仍有继续上升的趋势。与前文对烟气浓度的讨论结果相似，本文认为顶部排烟系统会将火源产生的烟气带至火源上部空间，使得上部空间各点的温度反而有较大幅度的上升。同时，顶部排烟系统的抽吸作用会加剧烟气的运动速度，使上部各点温度的上升速率也变快。当仅开启着火层内的全部排烟口和着火车辆附近的单一风口时，该点的温度最高值约 67℃，下降了 46℃。总的来说，顶部排烟系统对火源上部空间不利，其顶部排烟口的抽吸

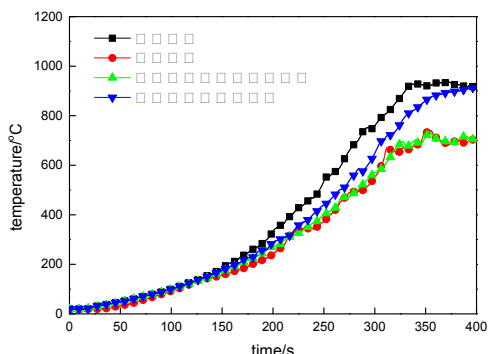


图 18 6-2 车位顶棚温度

Fig.18 Temperature of 6-2 parking space

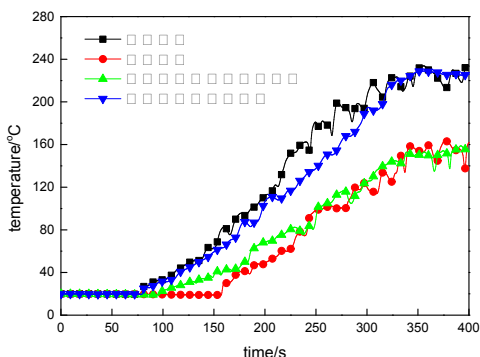


图 19 6-7 车位顶棚温度

Fig.19 Temperature of 6-7 parking space

作用使高温烟气更多的运动到上部空间各点, 从而导致温度的上升。

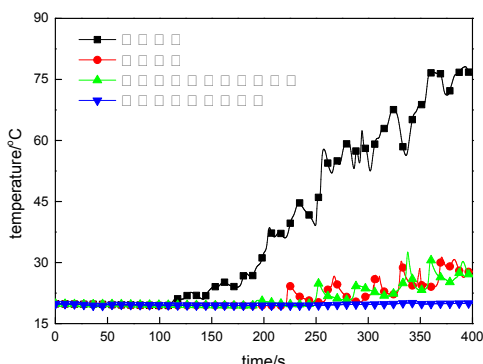


图 21 7-1 车位顶棚温度

Fig.21 Temperature of 7-1 parking space

对于处在火源下方空间各点的温度变化情况, 以 6-1 车辆正下方 7-1 车辆顶棚 (见图 21) 为例, 与自然排烟相比, 三种机械通风排烟形式下该点的温度值均有不同程度的降低, 且温度的上升速率均放缓。在着火层内排风口开启和单一风口开启时, 该点的温度值下降了 52℃ 左右。而在顶部排风排烟系统下, 在计算时间内, 该点的温度值基本保持初始温度不变, 可以使下部空间各点基本不出现升温。由此可以认为, 顶部排烟系统的抽吸作用将高温烟气抽至车库上部, 使得下部空间温度受火源的影响达到最小, 对火源下部的排烟降温效果最好, 而着火层内车位定点排烟系统和单一风口排烟系统的效果次之。

(3) 车辆表面所受热辐射值

对于热辐射值的变化, 主要关注着火点的相邻车辆、相对车辆与上方车辆。对于相邻车辆与相对车辆, 顶部排烟系统对车辆所受热辐射的降低效果不理想。与自然通风相比上升速率稍有变小, 但最终值却有所增加。而着火层内车位定点排烟系统和单一风口排烟系统作用时, 各车辆表面的热辐射变化情况几乎一致。在上述两排烟系统作用下, 相邻车辆 6-2 所受热辐射值的最大值 (见图 22) 约为 24700kW/m², 下降了 12100kW/m², 降幅约为 32.9%。同时, 相对车辆 6-7 的热辐射 (见图 23) 峰值为 6000kW/m², 下降了 10000kW/m², 降幅约为 37.5%。而顶部排烟时, 6-2 车辆的热辐射值为 40914.5kW/m², 比自然通风时上升了 11.2%。总的来说, 着火层内车位定点排烟系统和单一风口排烟系统对降低火源同层各车辆所受热辐射值的效果

较好。

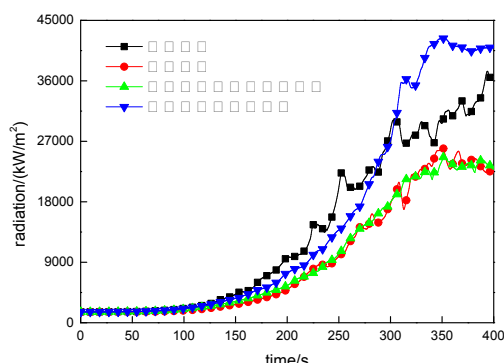


图 22 6-2 车辆表面热辐射

Fig.22 Thermal radiation value of 6-2 vehicles

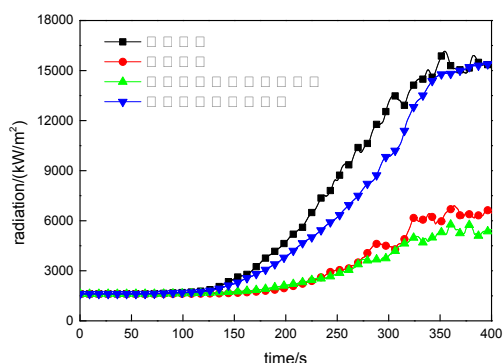


图 23 6-7 车辆表面热辐射

Fig.23 Thermal radiation value of 6-7 vehicles

而正上方 5-1 车辆的热辐射变化情况如图 24 所示, 三种机械排烟系统下, 该车的热辐射上升速率均有所下降, 但开启顶部排烟口时, 该车热辐射的终值反而有所上升, 其值为 25621.9kW/m², 且存在进一步上升的趋势。而在其余两系统作用下, 该车所受热辐射的最大值有所降低, 约为 10500kW/m², 下降了 13300kW/m², 降幅为 55.9%。总的来说, 顶部排烟系统对降低火源上部车辆的热辐射值仍然不利, 而仅开启着火层内的排烟口或开启单一风口时, 上部车辆表面所受热辐射的最大值可以得到有效降低。

对于下部车辆 7-1 所受热辐射, 通过图 25 可以看出, 自然通风下该值最高, 其余的依次为顶部排烟、着火层内车位定点排烟和单一风口排烟系统。在单一风口排烟系统下, 该车表面所受的热辐射值最低。较自然通风而言, 该车表面热辐射值达到峰值的时间最少推迟了 64s, 且峰值为 2150kW/m², 下降了 750kW/m² (自然通风时为 2900kW/m²)。可见, 仅开启着火车辆附近的单一排烟口对降低下部

车辆表面热辐射最为有效。

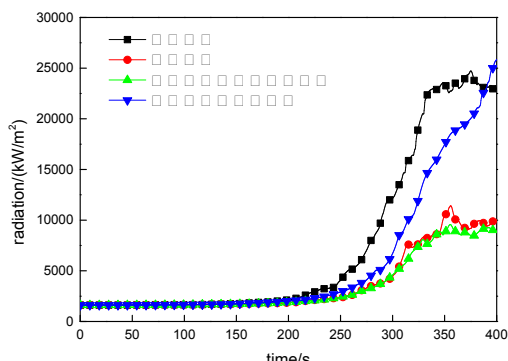


图 24 5-1 车辆表面热辐射

Fig.24 Thermal radiation value of 5-1 vehicles

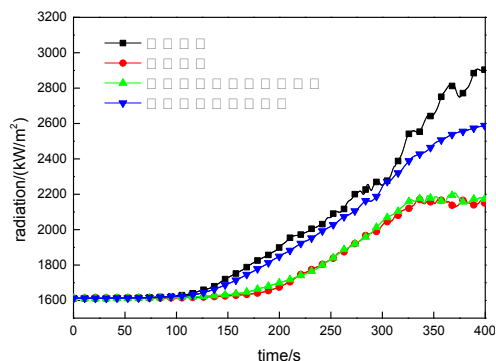


图 25 7-1 车辆表面热辐射

Fig.25 Thermal radiation value of 7-1 vehicles

4.3 通风排烟形式的确定

通过对比顶部排烟、着火层内车位定点排烟和单一风口排烟系统作用时,车库内的烟气浓度分布、温度场分布以及各车辆表面的热辐射值变化,可以发现:着火层内车位定点排烟系统和单一风口排烟系统对排出浓烟,降低车库内各点的温度,减小车辆表面热辐射值,同时延长车辆被引燃时间的效果较好,而顶部排烟系统的效果较差。

对于车库内的烟气浓度而言,与自然通风相比,三种排烟系统均可以使车库内的烟气浓度减低,但降低的幅度有所差异。顶部排烟系统作用下,库内烟气浓度降幅很小,且顶部的排烟口将烟气抽吸到上部空间,导致上部空间内的烟气浓度升高。而其余两系统可以有效降低车库内的烟气浓度,同时减少由起火层向其他停车层扩散的浓烟,且着火层内车位定点排烟系统的排烟效果更优于单一风口排烟系统。

对于温度而言,首先是火源同层各车位的顶棚温度,着火层内车位排烟系统和单一风口排烟系统

的降温效果都较好。且对于离火源较近的点,单一风口排烟时的温度会更低。单一风口排烟系统作用时,能使同层顶棚温度有 60~101℃的降幅。而在顶部排烟系统下,各车位顶棚的温度比自然通风时相比反而稍有上升。其次是上部车位的顶棚温度,三种通风形式下的变化趋势与同层车位相同,但在顶部排烟系统下的温升更大。对于下方车辆,三种排烟系统对温度的降低以及上升速率的放缓均起正面作用,按温度降幅从高到低排序分别为:顶部排烟系统、着火层内车位定点排烟系统和单一风口排烟系统,其中在顶部排烟系统下,下部车位顶棚的温度较初始状态基本不会有变化。

对各车辆表面所受热辐射而言,着火层内车位定点排烟系统和单一风口排烟系统对各值的降低作用非常接近,而顶部排烟时各车表面热辐射与自然通风相比并不明显。其中,因排烟系统二和三的有效排烟降温,可在自然排烟下会因热辐射被引燃的 5-1 车辆不被单车起火而引燃,在一定时间内控制了火势的蔓延。而正下方的 7-1 车辆表面热辐射在单一风口排烟系统作用下最小。

综合上述对烟气浓度、温度、热辐射值的讨论,本文认为采用着火层内车位定点排烟系统和单一风口排烟系统,对降低库内烟气浓度、各点温度、各车位表面热辐射值,同时使温度、热辐射值上升速率变慢均较为有效。两系统的作用效果各有利弊对于温度变化而言,对于离火源较近的点,单一风口排烟系统可以达到更大的降幅。但在着火层内车位定点排烟系统作用下,车库内的温度分层更加明显,烟气浓度更低,能为实际工程救援提供更好的视线。

同时,在实际工程中,一个风机往往连接多个风口,风机一旦启动则带动多个风口同时启动,若仅开启一个排风口会对系统的控制提出更多要求。且风量相同时,风口风速达到标准中的最大允许值 10m/s 时,单一风口排烟系统所需的风口尺寸为 2400mm×600mm。如果风速进一步缩小,则所需风口的尺寸更大。大尺寸的风口会给系统管路的连接带来困难,同时,较高的风速也对风管的材质提出要求,从而增加工程成本。所以,工程中极少使用仅开启一个风口的系统。因此,就本文中的三种通风系统而言,着火层内车位定点排烟系统的效果较好,且设计较为合理。

5 结论

本文根据相关现行国家标准对本文的车库模型进行防排烟系统的设计,提出三种不同的排烟系统形式,分别为:顶部排烟系统、着火层内车位定点排烟系统与单一风口排烟系统。结合自然通风的计算结果,对比在同一位置发生相同功率火灾的情况下,三种通风排烟系统对降低烟气浓度和温度,延缓火灾蔓延的作用效果。在此过程中得出以下结论:

(1) 在着火层内车位定点排烟系统作用下,车库内的烟气浓度降低,各车辆表面热辐射上升速率变缓且最大值减小。同时,各车位顶棚的温度值变低,竖向温度分层更加明显。

(2) 单一风口排烟时,火源附近点的温度比着火层内车位定点排烟系统时稍低。

(3) 顶部排烟系统会使着火层上方及同层的各车位顶棚温度增加,且各车辆的热辐射值与自然通风相比变化不大。顶部排烟系统对于降低同层车位顶棚温度,减小同层车辆表面热辐射几乎没有效果。

(4) 将风口直接开设在各车附近,可以在起火后尽可能短的时间内排出烟气与热量。而同时开启着火层内各车位处的全部排烟口,其排烟效果更好。同时,为使风口风速和风管尺寸符合工程实际,选用着火层内各车位定点排烟系统更为合理。

参考文献:

- [1] 董蕾. 浅谈地下车库建筑的通风排烟消防设计[J]. 科技风,2018,(7):136-137.
- [2] 张淑慧,苏华. 地下车库火灾消防措施的数值模拟分析[J]. 土木建筑与环境工程,2013,35(S1):209-211,226.
- [3] 齐亚. 火灾时期地下停车场通风数值模拟及分析[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2014.
- [4] 张甫仁,张立,刘雪. 基于 FDS 的某地下车库火灾烟气系统优化[J]. 建筑科学,2015,31(5):110-114.
- [5] 李人宪. 有限体积法基础[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [6] 陈霖. 地铁隧道着火列车继续运行条件下的烟气特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
- [7] 徐亮,张和平,杨昀,等. 性能化防火设计中火灾场景设置的讨论[J]. 消防科学与技术,2004,(2):129-132.
- [8] 程远平,R John. 小汽车火灾试验研究[J]. 中国矿业大学学报,2002,31(6):557-560.
- [9] Mohd Tohir, Mohd Zahirasri, Michael Spearpoint. Distribution analysis of the fire severity characteristics of single passenger road vehicles using heat release rate data[J]. Fire Science Reviews, 2013,2:5.
- [10] GB 51251—2017,建筑防排烟技术规程[S].北京:中国计划出版社,2017.
- [11] 王东勋,黄晓家,张雅君,等. 汽车库火灾危险性分析与研究[J]. 消防科学与技术,2015,34(10):1397-1405.
- [12] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2014[M]. 北京:中国统计出版社,2014.
- [13] GB 50067—2014,汽车库、修车库、停车场设计防火规范[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [14] 马夏宁. 关于高层建筑地下室通风及防排烟设计的几点看法[J]. 中华民居(下旬刊),2013,(6):60-61.
- [15] 刘雪. 地下车库火灾烟气流动数值模拟及排烟研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2013.
- [16] 贾春芬,姚会兰,路世昌,等. 地下停车库火灾风险性的评价研究[J]. 火灾科学,2006,(1):6-10,55.
- [17] 姜立春,宋敏丽,陈锦添. 地下复式车库火灾风险研究[J]. 消防科学与技术,2014,33(9):1015-1018.
- [18] 赵伟,魏文君. 某地下机械式汽车库消防安全性分析[J]. 消防技术与产品信息,2016,(7):24-27.
- [19] 张晓鸽,郭印诚. 地下车库火灾过程及消防措施的研究[J]. 工程热物理学报,2006,(S2):171-174.