

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.047

地下车库火灾消防措施的数值模拟分析

张淑慧, 苏 华

(西华大学 能源与环境学院, 成都 610039)

摘 要:采用 FDS 的大涡模拟和并行运算方法,以汽车表面覆盖燃料为火源,对某大型地下车库排烟系统和自动喷淋灭火系统的消防效果进行数值模拟分析。结果表明:排烟系统主要降低烟气浓度,有效改善能见度。水喷淋主要降低热释放速率,较好的控制火场温度,并能把烟气控制在顶棚附近,且与排烟系统联合作用时,能够更好地控制火势发展,有效扑灭初期火灾。为防火设计和方案评估提供参考依据,对减少火灾造成的人员伤亡和财产损失具有重要的意义。

关键词:地下车库;FDS;消防措施;数值模拟

中图分类号:X45 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)S1-0209-03

Numerical Simulation Analysis on Fire Facilities in an Underground Garage

Zhang Shuhui, Su Hua

(Department of Energy and Environment, Xihua University, Chengdu 610039, P. R. China)

Abstract: The article uses the large Eddy simulation of Fire Dynamics Simulator (FDS) and parallel computing methods to numerical simulation on fire facilities in an underground garage. The main research is the effects of exhaust system and automatic sprinkler system in fire scene. Results show that: exhaust system can discharge high temperature and toxic gases, reduce smoke concentration and improve visibility effectively. Automatic water spray equipment mainly reduces heat release rate, and make smoke flow near the ceiling, which control the fire temperature very well. Combined with mechanical smoke exhaust system, it can better control the development of fire and effectively put out the initial fire. This study provides reference for fire safety design and assessment, which is of great significance to reduce casualties and property losses caused by the fire of underground garage.

Key words: FDS; underground garage; fire facilities; numerical simulation

由于经济的发展和城市规模的不断扩大,当前中国的汽车保有量持续增加,城市中的停车位愈加紧张,为解决停车难问题,并考虑充分利用地下闲置空间,大量地下车库兴起。但与此同时,也带来了一系列的火灾问题。由于地下车库处于相对封闭状态,出入口少,空气流通性差,与地面建筑相比,更易发生火灾。火灾具有发烟量大、火场温度高、泻爆能力差、人员疏散困难等特点^[1-2],造成大量的人员伤亡和财产损失,严重影响了社会的安定和经济的稳步发展。因此,对地下车库的火灾研究受到人们的广泛关注。

目前对地下车库火灾的研究已经取得很大的成果。对地下车库火灾的研究主要有试验方法和计算机模拟方法。对小汽车进行现场试验,不但耗费大而且周期长,且容易受环境的影响。近年来随着计算机的发展,采用数值模拟方法既简单又方便,计算结果也比较精确。文献[3]采用实验方法,得到了汽车火灾燃烧现象、火场温度、热释放速率等随时间的变化规律。试验表明,汽车起火后前 15 min 内是人员安全逃生和灭火救灾的最有利时机。Yamana^[4]等对以甲醇为燃料火源强度为 1.3KW 进行比较模型试验,研究不同排烟

方式对排烟效果的影响。文献[5]使用 CFD 数值模拟软件对地下车库火灾烟气运动进行模拟,得出在相同条件下顶排系统的排烟作用明显高于侧排系统的结论。文献[6]利用 FDS 软件对大型地下车库的火灾情景进行数值模拟,得出当隔烟卷帘和水喷淋联合作用时,消防效果更佳,而排烟系统的启用要慎重,否则会加剧火灾的蔓延。

机械排烟系统和自动喷淋装置是控制火灾的最有力手段,研究它们对火灾的影响及其联合消防效果,有助于防火设计和消防工程的方案评估。在上述研究的基础上,利用火灾动力学模拟软件 FDS^[7],对某大型地下车库在不同工况下的火灾场景进行数值模拟研究。得到热释放速率、烟气浓度、温度和能见度等火灾参数随时间的变化特点,重点讨论排烟口和水喷淋对火灾的控制效果。

1 FDS 模拟技术及数学模型^[8]

FDS 是一个对火灾引起流动的流体动力学计算模型,采用数值计算方法求解一系列描述热驱动、低速流动的 Navier-Stokes 方程,主要计算火灾导致的热烟传播过程。FDS 提供

收稿日期:2013-04-10

作者简介:张淑慧(1988-),女,主要从事地源热泵,暖通空调等研究,(E-mail)zhangshuhui123@126.com。

了 2 种数值模拟方法,即大涡模拟和直接数值模拟。由于大涡模拟是研究湍流流动和燃烧过程中的瞬态发展信息的有效方法,而火灾问题通常是低马赫数下的燃烧过程。该软件利用大涡模拟方法处理火场流体的紊流流动,根据质量守恒、动量守恒和能量守恒的偏微分方程来近似有限差分,追踪预测火灾气体的产生和移动。

FDS 预测火灾导致的热环境依赖于各种经验模型来描述各种消防检测设备的激活。其中自动消防喷淋的温度传感元件是根据 Heskestad 和 Bill^[9] 所提出的热探测器激活运算法则

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{\sqrt{|U|}}{RTI} (T_g - T_1) - \frac{C}{RTI} (T_1 - T_m) - \frac{C_2}{RTI} \beta |U| \quad (1)$$

式中: T_1 表示临界温度, T_g 是气体温度, T_m 是喷头温度, RTI 和 C 由试验决定, C_2 为定值 $6 \times 10^6 \text{ K}/(\text{m/s})^{1/2}$ 。当温度达到设定温度(一般是 68°C)时,喷头开始响应喷水,进而控制火灾发展。利用 FDS 可按下面的流程图^[10]进行数值模拟研究。

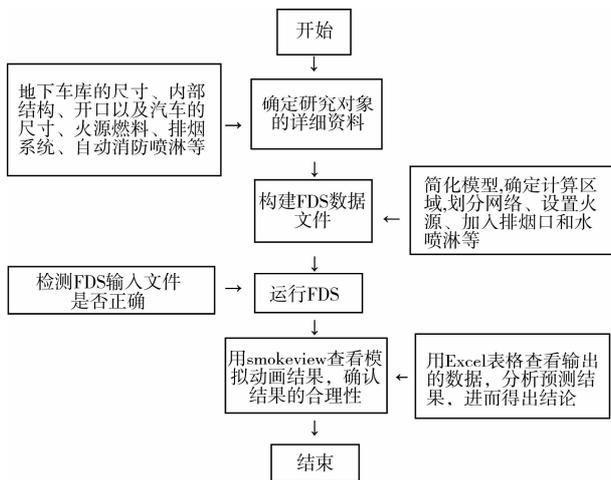


图 1 FDS 应用流程图

2 地下车库火灾模拟过程及结果分析

2.1 物理模型的建立及火源的设置

以成都市一个建筑尺寸为 $72 \text{ m} \times 24 \text{ m} \times 3.6 \text{ m}$ 的大型地下车库为例。车库内设有 60 个车位,车辆尺寸为 $4.8 \text{ m} \times 1.9 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$,2 个出入口,尺寸均为 $4.0 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$ 。在本文中,起燃车位位于车库中间,火源根据汽车表面覆盖的固体燃料设定。火源燃料主要成分是庚烷,密度为 $688 \text{ kg}/\text{m}^3$,燃烧热和蒸发热分别为 $46\,112$ 和 $316 \text{ kJ}/\text{kg}$ ^[11]。其它车辆表面温度超过 200°C ,汽车就会被引燃。设定室内环境温度为 20°C ,火灾场景的模拟工况如表 1 所示。根据防火设计规范^[12-13],换气次数为 6 次/h,车库内布置 10 个排烟口,排烟系统采用顶排;自动消防喷淋选择下垂型喷头,在停车位的上方均匀布置 160 个喷头,以保证灭火效果。一般网格划分越细计算结果越精确,通过反复模拟验证比较,确定该研究的模型网格大小为 $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 。模拟时间设定 50 min。地下车库几何模型如图 2 所示。

表 1 不同工况设置情况

工况	机械排烟系统	水喷淋装置
1	×	×
2	V	×
3	V	V

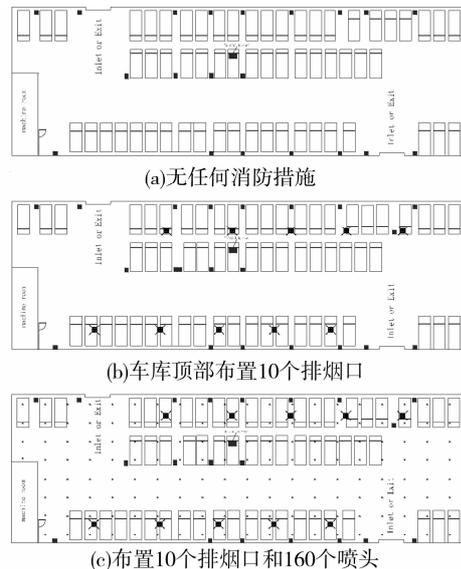


图 2 地下车库几何示意图

2.2 热释放速率随时间变化规律

热释放速率反应火源释放热量的快慢和大小,是评价火灾发展程度的重要参数,也是火灾模拟必需的基础数据。图 3 是各工况下汽车燃烧的释热率曲线随时间的变化,所有工况中热释放速率在 $0 \sim 300 \text{ s}$ 随火势的发展而增大, $300 \sim 600 \text{ s}$ 缓慢减小,随后迅速增加,15 min 达到最大值,之后随着可燃物的消耗而不断减小。由于起燃车位位于车库中间,无任何措施时,火势会同时向周边蔓延,大大增加了火灾危害性。而在自动喷淋的作用下,图 3 中 case3 的释热率明显低于 case1 和 case2。可见喷淋能够减小火源释放的热量,有效控制火灾发展。

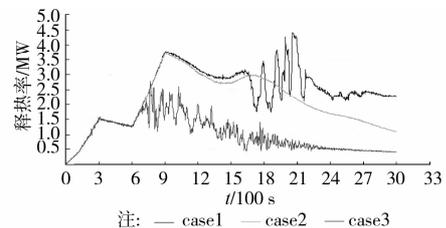


图 3 单车燃烧释热率随时间的变化

2.3 温度随时间变化规律

对比图 3、4 可知,温度随时间的变化形态与火源释热率曲线形态类似。火灾发生后,烟气迅速扩散,温度迅速升高,随后逐渐降低直至燃料反应完全。图 4 是地下车库火源附近顶棚温度随时间的变化。顶棚温度在火灾发生后约 15 min 达到最大值,且 case1 和 case2 的温度均超过 $1\,000^\circ\text{C}$ 。此种情况下,屋顶的承重构件容易受到破坏,使其发生变形甚至

坍塌,对消防人员需做好特殊防护。喷淋 sprinkler_86 在 1 min 后最先响应,随后其它喷头达到一定温度也开始响应喷水,case3 最高温度不超过 400℃,表明喷淋能够有效的降低火场温度。

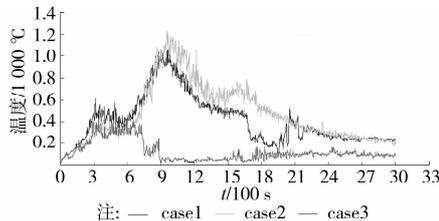


图 4 火源附近顶棚温度随时间变化

2.4 烟气浓度随时间的变化

烟气浓度通常以减光率(或称遮蔽度)来计算,其指的是光线被烟雾阻挡而影响的程度。减光率是定义在 1 m 的距离上,其单位为 %/m。

火灾发生后,燃烧产生的烟气不断弥漫整个车库,烟气中的粒子遮蔽了可见光,使室内光强度减弱,能见距离缩短,而且由于烟的毒性刺激使眼睛流泪或睁不开,看不见逃生的路,严重影响人员的逃生速度和救援工作。图 5 是烟气浓度随时间的变化。随着火势发展,case1 烟气最大遮蔽度约 45%/m,室内光线明显变暗。与其它工况相比,case3 遮蔽度最小。可见水喷淋和排烟系统共同作用明显降低烟气浓度,利于人员的逃生疏散。

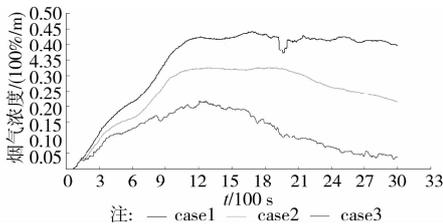


图 5 车道中心烟气浓度随时间的变化

2.5 能见度随时间的变化

能见度指物体能被正常视力看到的最大距离,是影响人员逃生最重要的参数。火灾发生后,为保证人员安全疏散,2.2 m 高度以下要求能见度值应不少于 10 m,且温度不能超过 60℃^[14]。图 6 中显示沿车道中心出口附近 1.8 m 高处能见度随时间变化规律。case1 能见度最先下降,15 min 后低于 10 m;case2 和 case3 能见度 15 min 后才开始下降,且保持在 15 m 以上。表明机械排烟和自动喷淋共同作用大大提高了能见度,而且 15 min 之前是人员逃生和消防扑救的最佳时机。

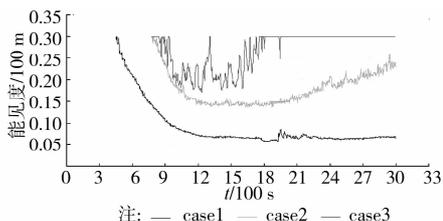


图 6 车库出口附近 1.8 m 高处能见度随时间的变化

2.6 烟气层高度随时间的变化

图 7 中显示各工况车道中心附近烟气层高度随时间的变化。

变化。火灾发生后,烟气层高度迅速下降,case1 烟气层可降至 1.0 m 以下,使人员暴露在烟气中,严重威胁人员生命。在排烟系统的作用下,case2 烟气层保持在 2.0 m 以上。机械排烟并非要排除所有的烟气,只需排除部分烟气,使人员处在一定的清晰空间,便于人员安全疏散即可。否则排出过多的烟气会使室外的空气补充加快,从而加剧火灾发展。case3 则表明水喷淋能够把烟气控制在顶棚附近,有利于能见度的改善。

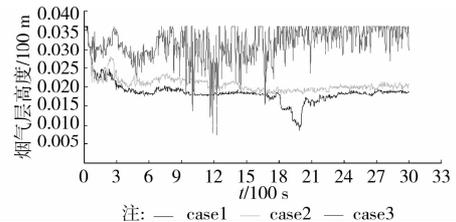


图 7 车道中心烟气层高度随时间的变化

3 结论

通过对大型地下车库单车燃烧火灾场景的 FDS 数值模拟,得到的试验结果为建筑防火设计提供条件,并为消防工程的方案评估和火灾调查提供参考。

1) 汽车燃烧过程中火源附近顶棚的温度很高,屋顶结构的强度易受到破坏,结构发生变形,严重时可能出现坍塌现象,因此消防人员救灾时需要做好人身特殊防护。另外,起燃车辆位于车库中间且无任何措施时,火源附近的车辆被引燃,火势从中间向两边蔓延,大大增加了火灾的危险性。

2) 安全可靠的机械排烟系统能够直接排出火灾中产生的高温有毒气体,降低烟气浓度,并使烟气层保持在一定的高度,较好的改善能见度,利于人员的疏散。因此,在地下车库必须设计合理的排烟系统。

3) 自动消防喷淋系统的主要作用是降低火场温度,并能够把烟气控制在顶棚附近,使能见度大大增加。而且它和机械排烟系统联合作用,能够更有效地控制、扑灭初期火灾,为人员逃生和消防扑救工作提供有利条件。

参考文献:

- [1] Li Y M, Hao Z. On the characteristics of fires in the underground buildings and the measures against them [J]. Journal of the Chinese People's Armed Police Force Academy 2003; 19(6):27-28.
- [2] Li Y. Assessment of vehicle fires in New Zealand parking buildings [R]. Fire Engineering Research Report, 2004.
- [3] 程远平, John R. 小汽车火灾试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(6): 557-560.
- [4] Takeyoshi T, Toshi Y. Smoke control in large spaces-part 2: smoke control in large scale spaces [J]. Fire Science a Technology, 1985, 5(1):41-40.
- [5] 肖淑衡. 地下车库火灾烟气运动的数值模拟[J]. 安全与环境工程, 2005, 12(2): 83-85.
- [6] 张晓鸽, 郭印诚. 地下车库火灾过程与消防措施的研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(2).

(下转第 226 页)

参考文献:

- [1] 朱思明. 铀矿通风与降氡[J]. 铀矿冶, 1992(4): 25-29.
- [2] Frédeéric Perrier, Patrick Richon, Umesh Gautam, et al. Seasonal variations of natural ventilation and radon-222 exhalation in a slightly rising dead-end tunnel [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2007, 97: 220-235
- [3] 李韧杰. 氡析出率的测定及其影响因素的探讨[J]. 铀矿冶, 2000, 19(1): 56-61.
Li R J. Determination of radon reduction rate and exploration on its influence factors[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2000, 19(1): 56-61.
- [4] 吴慧山. 氡测量及实用数据[M]. 北京: 原子能出版社, 2001.
- [5] 赵以蕙. 矿井通风与空气调节[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.
- [6] 杜卫新. 矿井通风技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009.
- [7] 叶勇军, 丁德馨, 周星火, 等. 铀矿井独头巷道最大掘进长度的研究[J]. 核科学与工程, 2009, 29(2): 188-192.
Ye Y J, Ding D X, Zhou X H, et al. Study on the maximal driving length of dummy drift in uranium mines[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2009, 29(2): 188-192.
- [8] André Unger, Stefan Finsterle, Gudmundur S. Bodvarsson. Estimating large-scale fractured rock properties from radon data collected in a ventilated tunnel [C]//Proceedings Tough Symposium[C]. Lawrence Berkeley Lab, Berkeley, Calif. 2003: 1-7.
- [9] 周漠仁. 流体力学泵与风机[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.
- [10] 朱思明. 国外铀隧道风量计算方法[C]//中国核学会矿山辐射环境学术讨论会, 1994.
- [11] 刘永, 张新华. 铀矿开采中氡及其子体的渗流与控制[J]. 中国矿业, 2004, 13(4): 62-65.
Liu Y, Zhang X H. Permeation and control of radon and its radiation products in underground mining of uranium deposits [J]. China Mining Magazine, 2004, 13(4): 62-65.
- [12] 李明, 张新华, 刘永. 隧道工程中氡的迁移规律及其控制研究[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(1): 33-35.
Li M, Zhang X H, Liu Y. Research on the regularity of emission and dispersion of radon in tunnel construction [J]. Modern Tunneling Technology, 2005, 42(1): 33-35.
- (编辑 彭建国)
-
- (上接第 211 页)
- [7] Kevin Mc Grattan, Randall McDermott. Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide [M]. NIST Special Publication 1019, Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2007.
- [8] Kevin McGrattan, Simo Hostikka. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide [M]. NIST Special Publication 1018-5, National Institute of Standards and Technology, 2007.
- [9] Heskestad G, Bill R G. Quantification of thermal responsiveness of automatic sprinklers including conduction effects [J]. Fire Safety Journal, 1988, 14: 113-125.
- [10] 陈展. 某教学建筑地下车库火灾 FDS 数值模拟分析[J]. 中外建筑, 2012.
- [11] Zhang X G. Numerical simulations on fire spread and smoke movement in an underground car park [J]. Building and Environment, 2007, 42: 3466-3475.
- [12] GB 50067-97. 汽车库、修车库、停车库设计防火规范[S].
- [13] GB 50084-2001. 自动喷水灭火系统设计规范[S].
- [14] 徐洪涛, 肖瑞雪, 杨莱, 等. 地下车库火灾产烟量对能见度影响的模拟分析[C]//中国工程热物理学会学术会议论文, 2012.
- (编辑 侯湘)