

战乃岩,姜泽旭,尹海燕,等. 基于 FDS 地下车库火源位置对烟气蔓延特性的影响[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2024, 39(3):22-29. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.03.003

ZHAN N Y, JIANG Z X, YIN H Y, et al. Influence of Fire Source Location on Smoke Spreading Characteristics of Underground Garage Based on FDS [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(3):22-29. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.03.003

基于 FDS 地下车库火源位置对 烟气蔓延特性的影响

战乃岩*, 姜泽旭, 尹海燕, 张晓禾, 苗盼

(吉林建筑大学 应急科学与工程学院, 吉林 长春 130118)

摘要:地下车库火灾安全隐患问题一直是人们所关注的焦点.以某商场地下车库为参照,利用 FDS-Pyrosim 构建实验模拟模型,在采取机械排烟系统和自动喷淋系统联动的条件下,对地下车库单辆汽车不同位置的着火情况进行研究,分析其对发生火灾后的烟气流动规律,火场的温度、能见度和 CO 浓度的影响.模拟结果表明:在火源位置处和地下车库的角落处温度更高;在火灾前期无论火源位置在哪,其位置的能见度都比其他位置要高,火灾中后期烟气层厚度呈水平累积下沉;在火源位置处和地下车库的角落处 CO 浓度更高,同时喷淋的开启导致不完全燃烧,大幅度增加 CO 的含量.为地下车库烟气蔓延,合理规划人员逃生路线,保证人员人身安全提供了参考.

关键词:地下车库;火灾;FDS;火源位置

中图分类号:X596

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2024)03-0022-08

Influence of Fire Source Location on Smoke Spreading Characteristics of Underground Garage Based on FDS

ZHAN Naiyan, JIANG Zexu, YIN Haiyan, ZHANG Xiaohe, MIAO Pan

(School of Emergency Science and Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China)

Abstract: Taking the underground garage of a shopping mall as a reference, an experimental simulation model is built by using FDS Pyrosim. Under the condition of adopting the linkage of mechanical smoke exhaust system and automatic sprinkler system, the different fire positions of a single vehicle in the underground garage are studied, and their effects on the smoke flow law after the fire, the temperature, visibility and CO concentration of the fire site are analyzed. The simulation results show that the temperature is higher at the fire source and the corner of the underground garage. In the early stage of fire, no matter where the fire source is, the visibility at the fire source is higher than that at other locations. The CO concentration is higher at the fire source and the corner of the underground garage, and the opening of the spray will also increase the CO content.

Keywords: underground garage; fire; FDS; fire source location

近年来,随着私家车数量的大幅度增加,地上停车场明显捉襟见肘,经常引起私家车占用消防车道等事件.所以充分利用地下空间建设停车场,对缓解城市道路交通拥挤,违章停车,乱占公共区域意义重大.

大^[1].但地下车库结构具有特殊性,出入口是由地面水平坡度向下倾斜延伸,且整个格局处于地下位置,四周都是墙体,属于较为封闭的环境.一旦发生火灾,火势蔓延较快,排烟速率较慢,人员疏散较难,势必造成巨大的财产损失和人员伤亡^[2].因此,研究地下车库火灾烟气蔓延特性,合理设计排烟方案,规划人员疏散路线势在必行.

ALIAN TO 等^[3]采取机械排气扇和补充风机方式,分别讨论有无洒水装置、有无排烟系统、有无进气口的工况,得出在地下车库火灾中,使用洒水器、排烟风扇可实现最快的排烟效率;奚翠萍等^[4]通过 FDS 软件设置不同工况对地下车库的烟气蔓延规律进行分析,得出喷淋系统与机械排烟系统联合作用,会更好地控制火场的各项参数,为逃生救援工作提供有利条件;肖淑衡和梁栋^[5]基于 CFD 软件 PHEONICS,采用 SIMPLE 算法,对地下车库火灾中排烟位置进行研究;于丽娜等^[6]针对不同排烟量研究了火灾烟气流动规律;程远平等^[7]对火灾的热释放速率进行了举例和剖析,列举出多种数学模型.

以具有典型建筑结构的某商场地下车库为研究对象,采用 FDS6.0 软件建立模型并进行模拟计算;基于机械排烟系统和喷淋系统联合作用为前提,针对火源位置不同,分析地下车库火场的温度分布、CO 浓度和能见度特性参数变化规律,为地下车库设计及消防救援工作提供理论依据.

1 数学模型

模型遵循质量守恒、能量守恒和动量守恒方程,采用大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)技术,应用场模型,数学方程如式(1)~式(6)所示.

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho u = 0. \quad (1)$$

式中: ρ 为燃烧气体密度; t 为燃烧时间; ∇ 为哈密顿算子; u 为烟气速度.

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \rho h u - \frac{d\rho}{dt} = q - \nabla q_r + \nabla k \nabla T + \nabla \sum_i h_i (\rho D)_i \nabla Y_i. \quad (2)$$

式中: h 为热焐值; q 为热释放速率; k 为导热系数; D 为气体扩散系数; $d\rho/dt$ 为压力的随体导数.

动量守恒方程:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \nabla) u \right) + \nabla p = \rho g + f + \nabla \tau. \quad (3)$$

式中: p 为气压值; f 为外力; τ 为黏性力.

热释放速率公式:

$$Q = \alpha t^2. \quad (4)$$

式中: Q 为热释放速率; α 为火灾增长系数; t 为火灾发展时间.

机械排烟量公式:

$$\dot{m}_e = nAH\rho_s. \quad (5)$$

式中: $\dot{m}_e$ 为机械排烟量; n 为每小时换气次数; A 为建筑空间平面面积; H 为建筑高度; ρ_s 为热烟气密度.

喷头设计流量公式:

$$q = K \sqrt{10P}. \quad (6)$$

式中: q 为喷头流量; P 为喷头处水压; K 为喷头流量系数.

2 物理模型

2.1 物理模型

物理模型如图1所示.模型长(X)70 m,宽(Y)20 m,高(Z)4.0 m,面积1 400 m².左前方设置入口,右

前方设置出口,尺寸均为长 $\times$ 高=6 m $\times$ 4 m.模拟仅对单辆汽车燃烧工况进行研究,不考虑火势蔓延的情况.

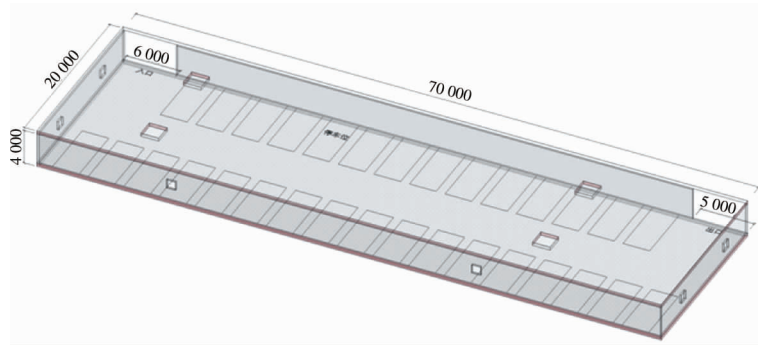


图1 地下车库物理模型(单位:mm)

2.2 参数确定

程远平等^[7]对火源热释放速率模型进行了多次试验,表明燃烧材料不同,燃烧反应就不同,火源热释放速率也不同,而火源热释放速率越大,排烟量越大.最终,程远平等^[7]基于氧消耗原理的测试方法得出小汽车的热释放速率平均在5 MW左右.所以本次室内温度设定为20℃,火源热释放速率设为5 MW,根据式(4)计算出达到最大热释放速率时间为327 s,火源燃烧起始尺寸为1 m $\times$ 1 m.根据停车库设计防火规范^[2]要求,因面积小于2 000 m²,不用设置防火分区,排烟量应不少于6次/h的换气量,在本次模拟中采用8次/h的换气量,单个排烟口的排烟量根据式(5)计算为44 800 m³/h=12.44 m³/s.顶部设置8个排烟口,每个排烟口的设计排烟量为1.555 m³/s,尺寸1.0 m $\times$ 1.2 m,机械排烟系统默认一直处于工作状态.墙壁侧面设置6个通风口,尺寸为1 m $\times$ 1 m,如图2所示.根据自动喷水灭火系统设计规范^[9],地下车库属于中级危险二级,喷淋系统应为湿式系统,当采用快速响应洒水喷头,喷水强度为8 L/(min $\cdot$ m²),响应时间指数(RTI) ≤ 50 (m $\cdot$ s)^{0.5}.地下车库采用自动喷淋时,标准覆盖面积喷头的要求是一只喷头的最大保护面积为11.5 m²,喷头与墙端的距离在0.1~1.7 m.扩大覆盖面积喷头的要求是一只喷头的最大保护面积为17.5 m²,喷头与墙端的距离在0.1~2.1 m.本次模拟采用扩大覆盖面积喷头,覆盖面积为15 m²,温感触发喷淋阈值为68℃,喷头间距大于3 m,溅水盘与顶棚距离要大于0.9 m,本次模拟设定与顶棚距离为1 m,如图3所示.由于烟气层是从上方开始积累慢慢向下沉降,而人正常行走的平均高度在1.8 m左右.如果在这个高度可以达到安全条件的话,1.8 m以下就是安全的.所以安全高度设为1.8 m,在距地面1.8 m处设置6个测点,用于探测温度,CO浓度,如图4所示.

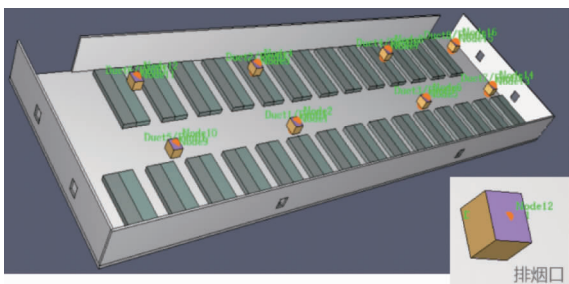


图2 地下车库排烟口及送风口位置

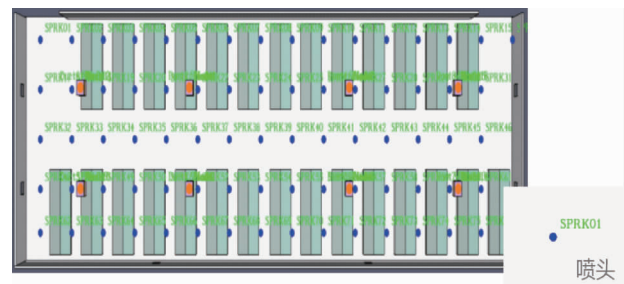


图3 地下车库喷淋位置

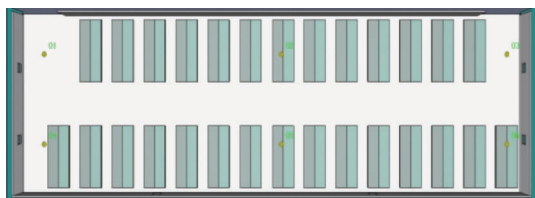


图4 地下车库测点位置

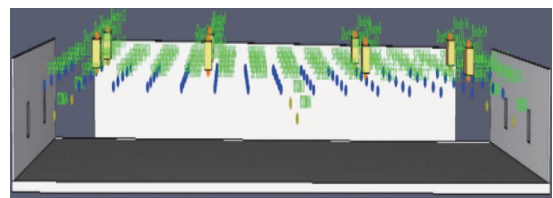


图5 地下车库剖面

2.3 计算方法

利用 Pyrisom 建立模型,网格尺寸设置过大或过小都会导致计算结果偏离实际.因为李大燕^[12]实验模拟的地下车库模型包含 2 个防火分区,其中单个防火分区与本文模型类似,所以本次模拟参考其所设定网格尺寸,确定网格尺寸为 0.25 m×0.25 m×0.25 m,共 572 544 个网格,开放两侧及下方边界.

2.4 计算工况

为探究火源位置不同对火场温度、能见度和 CO 浓度的影响,模拟针对火源位置不同的 3 个计算工况来进行对比研究,如表 1 和图 6 所示.

表 1 计算工况

工况	火源位置
工况一	入口处
工况二	中心处
工况三	角落处

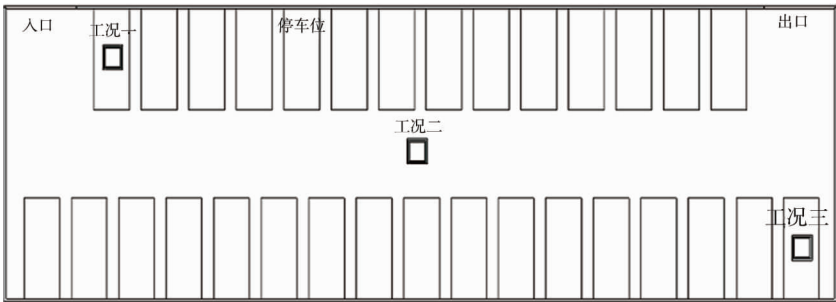


图 6 工况火源具体位置

3 模拟结果与分析

分别针对火源位置在入口处、中心处、角落处这 3 种工况进行模拟,以下称工况一~工况三,分别监测如图 4 所示的 6 个测点处的温度、能见度和 CO 浓度.

3.1 对温度数值分布的影响

3 种工况 6 个测点处的温度曲线如图 7 所示.工况二在地下车库 1.8 m 处,不同时刻的温度分布云图如图 8 所示.据调查,人体承受环境温度在 42 ℃ 左右.

工况一(图 7a):测点 1 和测点 4(火源最近位置)的温度最先升高,由于烟羽流^[11]的影响,烟气冲向顶部开始向四周蔓延,温度也会随着烟气的流动开始变化,在火灾发生 200 s 时,烟气从顶棚蔓延至车库另一侧并开始累积烟气,测点 6 处(距离火源最远处)的温度大幅增加;在 325 s 时,喷头温度达到阈值,喷淋系统开始作用,温度变化呈现波动且逐步降低;在 500 s 时测点 1 温度最大,测点 5 由于位置处于靠近墙壁中间,温度最小.测点 1、测点 3、测点 6 分别在 340、360、300 s 左右突破 42 ℃,其余测点位置温度较为安全.

工况二(图 7b、图 8):测点 2 与测点 5(火源最近位置)的温度最先升高,所有测点温度均逐步上升.200 s 后,两侧烟气开始累积,温度增加;357 s 时喷淋开始,温度开始剧烈波动,缓慢下降;500 s 时测点 2 位置靠近喷淋附近,温度最低,出入口处温度接近.测点 1、测点 3、测点 4、测点 6 在 300 s 以后在 42 ℃ 上下波动;测点 2、测点 5 分别在 360、350 s 时突破 42 ℃ 随后下降保持在安全范围内.

工况三(图 7c):由于测点 6 设置在工况三中火源位置的上方,所以可以发现,在工况三中,同时在机械排烟和喷淋的作用下,测点 6 温度的波动幅度比其他测点更大.测点 6 在 100 s 后温度远远高于 42 ℃;测点 1、测点 4 在 325 s 之后温度高于 42 ℃;测点 2、测点 3、测点 5 在 400 s 左右接近 42 ℃,但危险程度较小.

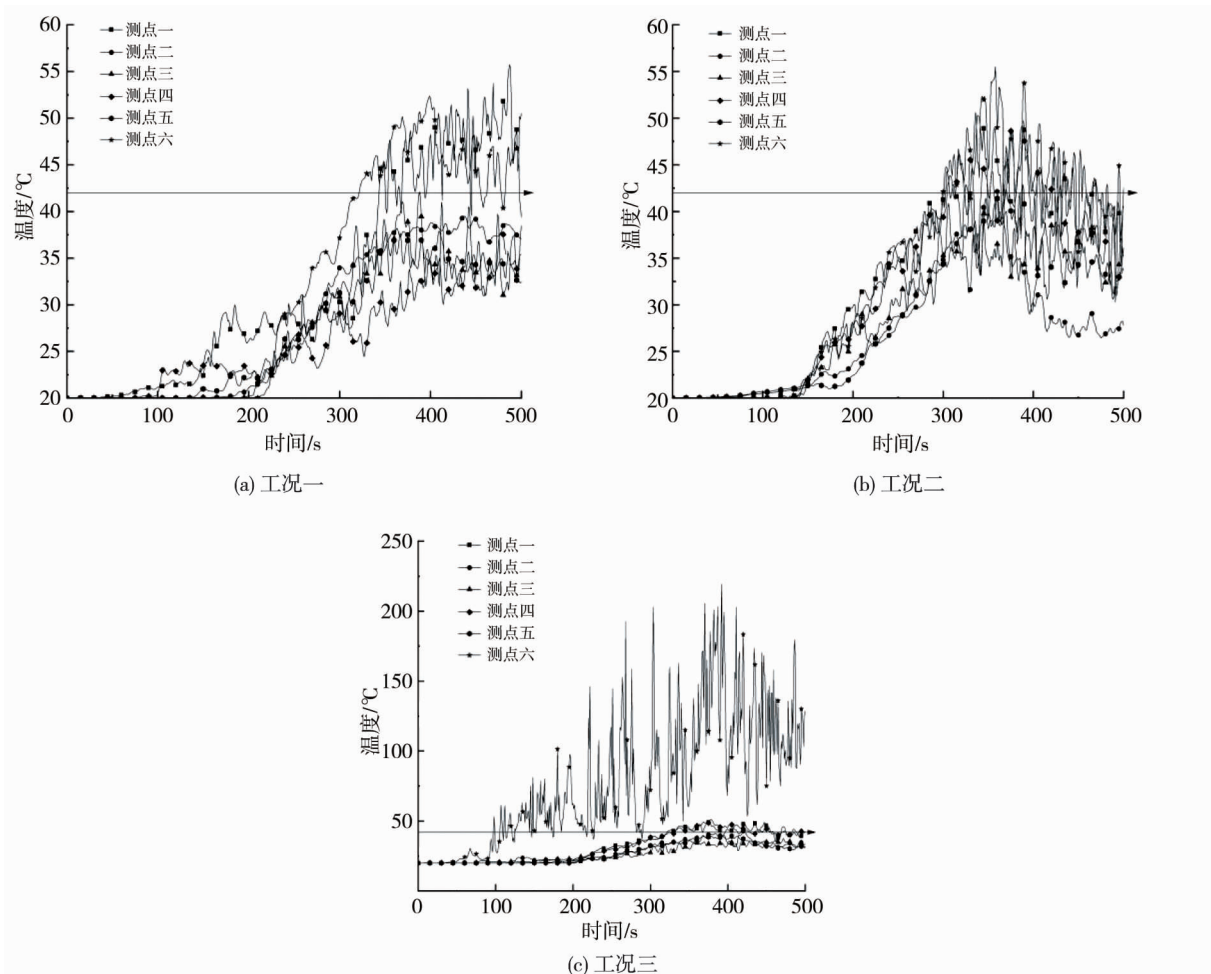


图 7 不同工况下的温度曲线

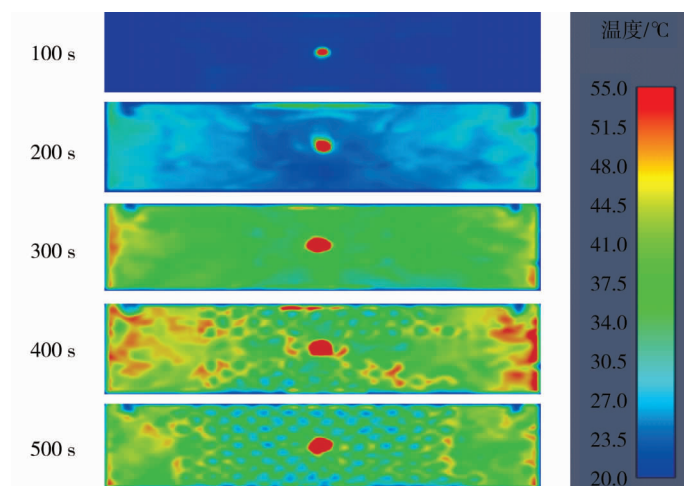


图 8 工况二的温度分布云图

综上,根据 3 个工况的结果可以总结出,在地下车库发生火灾时,最好在 200 s 之前撤出火场,环境温度低于 42 °C,若在火灾 300 s 之前无法安全撤离,也应尽量避免在角落的位置长驻.在火场 300~500 s 期间,工况一的情况下人们应趋向测点 5;工况二的情况下人们应趋向测点 2 和测点 5;工况三的情况下人们应趋向测点 2、测点 3、测点 5 处靠近等待救援.

3.2 对能见度分布的影响

3 种工况下烟气蔓延情况如图 9 所示.因为人体平均身高在 1.7~1.8m.所以当烟气层厚度距离地面 1.8 m 时,能见度达到临界点,对人员正常逃生造成困难.

100 s(图 9a)时,工况一的火源位置靠近左边墙壁,烟气冲上顶棚,一边向左边墙壁开始积累一边向右侧蔓延;工况二处于中间位置,遵循双向线性烟羽流规律,烟气向两侧蔓延,前后触碰到墙壁开始累积;工况三类似于工况一的情况,烟气一边向右边墙壁开始积累,一边向左侧蔓延.此时烟气层厚度在安全范围内,能见度很高.

200 s(图 9b)时,工况一左侧上方烟气积累一定厚度,右侧上方靠近墙壁处较稀少;工况二同样因为烟羽流的影响,随着烟气流动,两侧上方烟气均积累较多,火源位置处的烟气反而较少;工况三的火源点在墙角位置,所以烟气蔓延情况较在入口位置的工况一相比要严重一些.此时烟气层厚度达到离地 1.8m 的阈值,基本充满上层空间,对人员疏散造成影响,能见度较低.

300 s(图 9c)时,工况一和工况三除火源位置外,烟气基本充满地下车库;工况二中的烟气层厚度相同,比其他工况的厚度要大一些,基本充满地下车库.此时烟气层厚度很大,能见度很低.

500 s(图 9d)时,此时喷淋系统已经开启,由于不完全燃烧,烟气生成量大大增加,3 个工况中的烟气均完全蔓延至整个地下车库.此时能见度极低.

综上,在发生火灾 100 s 时,烟气蔓延程度较小,安全逃生时所需的能见度足够.若可以在 200 s 之前逃生,工况一和工况三的情况下应尽量向火源位置相反的出口逃生,能见度相对较大;工况二的情况可以在靠近火源位置处寻找工具俯身逃生或等待救援.300 s 之后随着喷淋的开启,烟气慢慢完全充满空间,能见度降到最低,极大程度影响人员疏散,带来身心恐慌.

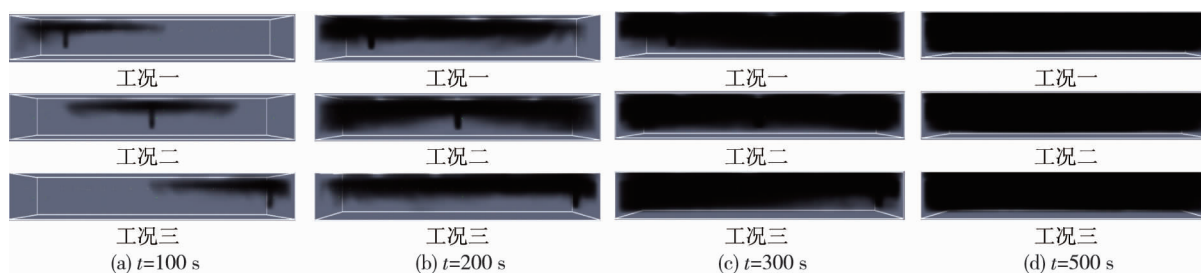


图 9 不同工况下烟气的蔓延

3.3 对 CO 浓度数值分布的影响

3 种工况 6 个测点处的温度曲线如图 10 所示.据调查,在火灾中 CO 体积分数达到 50×10^{-6} 以上,人体就会产生中毒等症状造成损伤.

工况一(图 10a):CO 气体随着烟气的蔓延向四周流动,测点 1 和测点 4 在喷淋开启后,可燃物由完全燃烧变为不完全燃烧,CO 体积分数开始增加,400~500 s 时烟气充满空间,测点 6 处于火源对角位置,烟气中的 CO 一直向测点 6 流动,所以 CO 体积分数持续在 50×10^{-6} 左右波动.同时 CO 也在向测点 3 和测点 4 流动,500 s 时测点 3 和测点 4 处的 CO 体积分数也逼近危险阈值.而测点 1 处因靠近火源,靠近入口,导致在其位置附近的 CO 浓度含量相对较少一些.测点 1~测点 5 处 CO 体积分数一直处于 50×10^{-6} 以下.

工况二(图 10b):同样由于烟气一直蔓延流动,CO 也一直在随其流动,所以测点 2 和测点 5 处的气体体积分数比其他 4 个测点位置变化较慢.测点 2 在喷淋开启后,气体体积分数开始大幅增加,460 s 后突破 50×10^{-6} .处于角落的测点 4 和测点 6 的 CO 体积分数有数次峰值接近 50×10^{-6} ,靠近出入口处的测点 1 和测点 3 的气体体积分数相对较低,低于 50×10^{-6} .

工况三(图 10c):测点 6 位置在火源上方,所以在机械排烟和喷淋的作用下,CO 体积分数较高且一直处于大幅度波动状态.200 s 后,烟气蔓延至另一侧墙壁处,角落处的测点 1 和测点 4 位置 CO 体积分数开始涨幅.400~500 s 期间测点 1 和测点 4 在 50×10^{-6} 上下波动.500 s 时测点 4 和测点 6 突破 50×10^{-6} ,测点 2、测点 3、测点 5 位置的气体体积分数一直处于安全范围内.

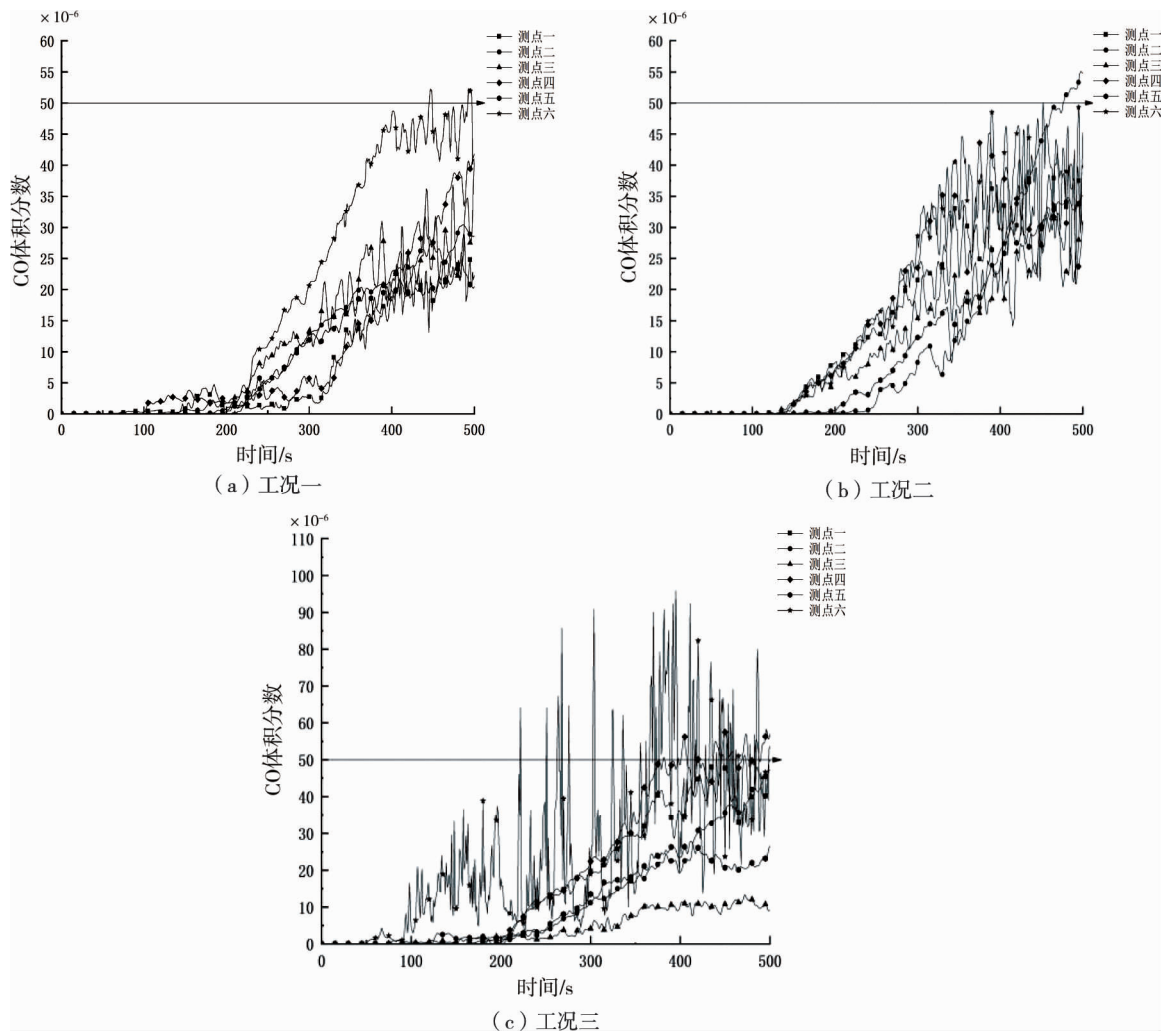


图10 不同工况下CO浓度的曲线

综上所述,在火灾发生200 s之前,地下车库的CO含量在安全高度内基本没有,300~500 s期间,CO体积分数开始增加,喷淋开启后,涨幅速度变快.所以最佳的安全逃生时间是在火灾发生的200 s之内.若因特殊原因无法及时逃生,为避免CO中毒,在工况一的情况下,趋向测点1~测点5处;工况二的情况下,趋向测点1和测点3处;工况三的情况下,趋向测点2、测点3、测点5处,使危险降到最低,保障人身安全.

4 结论

1) 当火源位置处于靠近入口时,在火灾发生200 s之前,地下车库内的温度、烟气层厚度、CO浓度都处于安全范围内;300 s之后,火源位置和车库的角落位置温度更高,短暂时间内火源位置附近的烟气层厚度较其他位置更安全些,逃生能见度更高,火源对角落位置CO体积分数达到 50×10^{-6} 危险阈值.

2) 当火源位置处于中间时,在火灾发生200 s之前,地下车库内的温度、CO浓度处于安全范围内,但车库出入口处烟气层的厚度却已积累较多,反因烟羽流的影响,火源位置附近烟气层厚度相对更安全;300 s后,车库温度在角落处最高,出入口处的温度稍低,烟气层厚度将达到影响人员撤离的程度,CO浓度在车库角落处的含量在危险阈值上下波动,测点二处因喷淋的开启,出现不完全燃烧,温度虽然降低,但CO含量增加,成为车库内浓度最大的位置.

3) 当火源位置处于右侧角落时,在火灾发生200 s之前,地下车库内的温度、CO浓度处于安全范围内;300 s之后,火源位置和车库左侧的温度更高,短暂时间右侧烟气层厚度较中间和左侧更薄一些,能见度高一些,火源位置和车库左侧的CO浓度含量突破危险阈值.

综上所述,无论何种工况条件下,当地下车库发生火灾时应尽量在200 s之前撤离火场,200~300 s之

间温度、能见度、有毒气体浓度均处于较为安全范围内.若无法及时撤离,火灾 300 s 之后应针对火源位置的不同来趋向相对更加安全的区域等待逃生或救援.

参考文献:

- [1] 消防安全常识二十条.http://www.safehoo.com/Live/Live/Fire/201302/302412_4.shtml.
- [2] 国家技术监督局、中华人民共和国建设部. 汽车库、修车库、停车场设计防火规范: GB 50067—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [3] ALIANTO B, ASTARI N, NARESHWARA D, et al. Modeling of smoke control in underground parking-garage fires[J]. International Journal of Technology, 2017, 8(7): 1296.
- [4] 奚翠萍, 卢平, 李镇韬, 等. 地下车库火灾烟气蔓延模拟分析[J]. 兰州工业学院学报, 2021, 28(1): 47–50.
- [5] 肖淑衡, 梁栋. 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] 于丽娜. 地下车库火灾烟气流动试验与模拟分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- [7] 程远平, 陈亮, 张孟君. 火灾过程中火源热释放速率模型及其实验测试方法[J]. 火灾科学, 2002, 11(2): 70–125, 71–74.
- [8] 李胜利, 李孝斌. FDS 火灾数值模拟[M]. 北京: 化学工业出版社. ISBN: 9787122349897.
- [9] 自动喷水灭火系统设计规范 GB50084–2017.
- [10] 詹姆士 G. 昆棣瑞. 火灾学基础[M]. 北京: 化学工业出版社. ISBN: 9787122072689.
- [11] 魏涛. 狭长地下空间火灾烟气运动物理模型及尺度准则研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
- [12] 李大燕. 地下车库火灾蔓延规律及烟气发展过程研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [13] WANG Y. Study on the smoke flow regulation in underground space based on the CFD simulation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 638/639/640: 858–863.
- [14] CHOW W K. On safety systems for underground car parks[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(3): 281–287.
- [15] 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.