

A Numerical Simulation Case on Typical Fire Process in a Gas Station

Peili Zhang¹, Jianjun Liang¹, Yufang Qin¹, Xin Du¹, Peng Wang², Yiqi Yang¹

¹Department of Fuel, Army Logistics University of PLA, Chongqing

²Unit 94652, Nanjing Jiangsu

Email: zpl612323@163.com

Received: Feb. 29th, 2020; accepted: Mar. 16th, 2020; published: Mar. 23rd, 2020

Abstract

Fire simulation software PyroSim was used to simulate the occurrence and development process of a station building fire in a gas station. The variation of key parameters, such as temperature, CO, smoke spread, visibility, flame development and heat release rate etc., in fire process were discussed briefly. From the simulation process and results, the fire software PyroSim can better simulate the process of fire occurrence and development, and its powerful post-processing function of data can also get visualized numerical results, and the calculated results are in good agreement with the fire smoke spread trend of the actual situation. The method and conclusions of this article can provide some useful references to the design of a gas station.

Keywords

Gas Station, Fire Simulation, Temperature, Smoke Spread

某加油站典型火灾过程数值模拟案例

张培理¹, 梁建军¹, 秦玉芳¹, 杜 昕¹, 王 鹏², 杨益其¹

¹陆军勤务学院油料系, 重庆

²94652部队, 江苏 南京

Email: zpl612323@163.com

收稿日期: 2020年2月29日; 录用日期: 2020年3月16日; 发布日期: 2020年3月23日

摘 要

本文运用PyroSim火灾动态模拟软件, 对某加油站站房火灾的发生、发展过程进行了数值模拟, 简要讨论了火灾过程中温度、CO、烟气蔓延、能见度、火焰发展和热释放速率等关键参数的变化规律。从模拟过程及结果来看, PyroSim火灾动态模拟软件能较好地模拟火灾发生和发展过程, 其强大的数据后处理功能, 能得到直观形象的数值结果, 计算结果与实际站房火灾烟气蔓延趋势吻合较好。本文的研究方法

与结论可为加油站火灾安全的性能化设计提供一定参考。

关键词

加油站, 火灾模拟, 温度, 烟气蔓延

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

加油站属于典型的涉危险品场所, 火灾、爆炸风险较大。加之加油站作业频繁, 流动车辆多, 人员来往复杂, 这在客观上给加油站的安全管理工作也带来了隐患[1][2]。在加油站作业过程中稍有不慎, 就可能引发火灾、爆炸事故, 从而造成人员伤亡和财产损失。

加油站站房是加油站的主要建筑物, 其火灾事故具有突发性和火势蔓延迅速等特点, 特别是站房一般距离储油区不远, 站房遭遇火灾后一旦影响至储油区, 后果将不堪设想。因此, 研究加油站站房火灾过程, 对于了解加油站火灾过程规律、应急扑救加油站火灾、减少或避免人员伤亡和财产损失具有重要的意义。

本文针对加油站站房典型火灾过程, 采用数值计算的研究方法, 运用 PyroSim 火灾动态模拟软件, 着重讨论火灾发生、发展过程关键火灾参数的变化规律。一方面, 可以为深入研究加油站火灾规律及其应急处置方案提供参考, 另一方面, 可以为安全工程专业的研究生工程中的数值方法课程提供一份工程应用教学案例。

2. 火灾模型的构建与参数设置

2.1. 物理模型

由于加油站区域面积较大, 因此本文只对核心区域进行建模, 主要为加油亭和配套办公储藏室区域, 其尺寸规格为: 加油亭长 11 m, 宽 9.7 m, 高 6.2 m; 配套办公区域长 18.5 m, 宽 6.5 m, 高 4 m, 其中左侧办公房间内布置有几组沙发、茶几和办公桌, 中间房间为辅油储藏间, 右侧房间为储藏室, 放置有若干储物柜。根据上述数据建立的物理模型如图 1 所示。

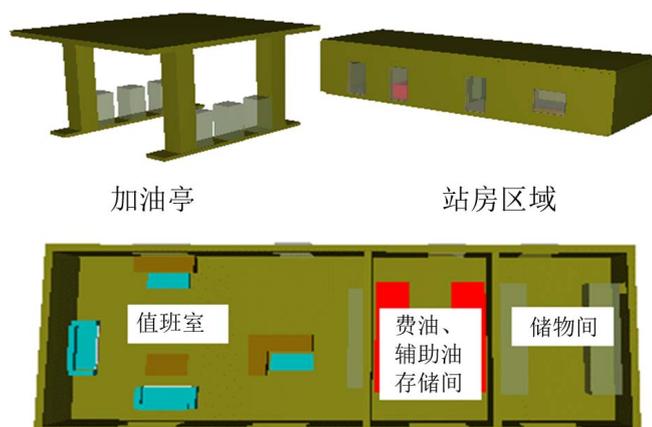


Figure 1. Physical model

图 1. 物理模型

2.2. 火灾情景与参数设置

经广泛调研发现,明火和电气两个因素是加油站站房火灾发生的主要原因[2] [3]。本文着重模拟电气火灾过程,着火房间为上述值班室内,火灾工况如下:

火灾情景: 由于电器设备老化、短路、接线不规范或电器使用不当等引起的电气火灾。

值班室内可燃材料参数设置[4]:

1) 沙发: 聚氨酯泡沫, 密度 40 kg/m^3 , 比热 $1.0 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$, 导热系数 $0.05 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 化学反应热 1500 kJ/kg ;

2) 沙发靠垫、脚垫: 纺织物, 密度 100 kg/m^3 , 比热 $1.0 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$, 导热系数 $0.1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 化学反应热 3000 kJ/kg ;

3) 茶几、办公桌: 松木, 密度 640 kg/m^3 , 比热 $2.85 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$, 导热系数 $0.14 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 化学反应热 3350 kJ/kg 。

起火位置: 如图 2 所示。

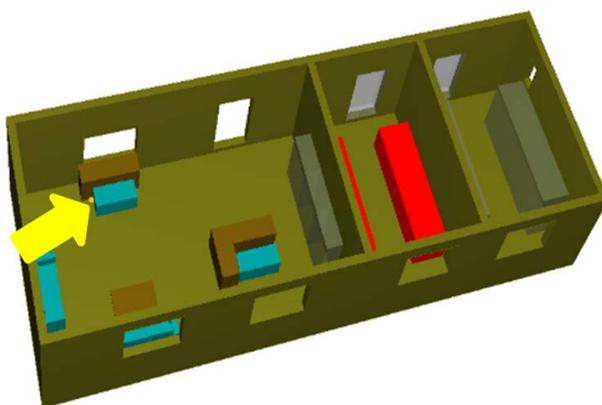


Figure 2. Ignition location
图 2. 起火位置

为了模拟办公室内火灾发展过程,分别在值班室地面以上 1.0 m , 2.0 m 和 3.0 m 位置处布置了温度、能见度、CO 浓度监测点,用以监测室内火灾环境;分别在 $Z = 1.0 \text{ m}$ 、 $Z = 2.0 \text{ m}$ 、 $Z = 3.0 \text{ m}$ 处布置了温度、能见度、CO 浓度切片。

2.3. 计算网格的设定

数值模拟计算中,网格精度对计算结果精确性有很重要的影响。FDS 提供了一种计算方法来确定相应的网格尺寸,计算公式如下[5]:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (3.1)$$

式中: D^* ——为火源特征直径(m), Q ——为总的热释放速率(KW), ρ_∞ ——为空气密度(kg/m^3), C_p ——为环境空气比热 $\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$, T_∞ ——为环境空气温度(K), g ——为重力加速度(m/s^2)。

由公式(3.1)可知,影响网格精度的因素主要为 Q 热释放速率。考虑到值班室内火灾情况与室内可燃材料性质自身有关,与参考文献[6] [7] [8] [9] [10]中预先设定的固定火源情形不同,本文模型预先并不能确切了解模型究竟会形成多大的火灾规模。综合考虑计算模型精度、计算机性能、计算时间成本等因素,

通常通过公式(3.2)计算选择合适的网格尺寸大小[9]。

$$\frac{D^*}{\delta_x} \in (4, 16) \quad (3.2)$$

式中： D^* 为火源当量直径； δ_x 为实际模拟中方向上单个网格大小。

由此计算得出本文可选用的网格精度在 0.2~0.8 m 之间，本文模拟最终选取网格尺寸为 0.2 m × 0.2 m × 0.2 m，可以同时满足公式(3.1)和公式(3.2)的要求，同时也能平衡了计算时间成本。

3. 火灾动态模拟结果与分析

3.1. 温度分布

假定人员平均身高为 2 m，讨论 $Z = 2$ m 处的各项参数，对于分析人员逃生时间、扑救火灾有效利用时间等具有重要意义。图 3 为 $Z = 2.0$ m 高度处不同时刻火场内温度分布图。图 3 表明，在 $Z = 2.0$ m 高度处最高温度达到了 370℃。由于火灾发生在封闭空间内，高温烟气被限制在室内，没有冷空气进入降低火灾温度，因此该火灾情景下的温度要比一般明火火灾情形高约 200℃ [11]。从图 3 可以看出，在本文的模拟工况下，火场温度变化非常迅速，150 s 时 $Z = 2.0$ m 切面平均温度约为 100℃，而 600 s 时已迅速升高至 230℃ 以上，此时的火场温度已对室内人员构成严重威胁。

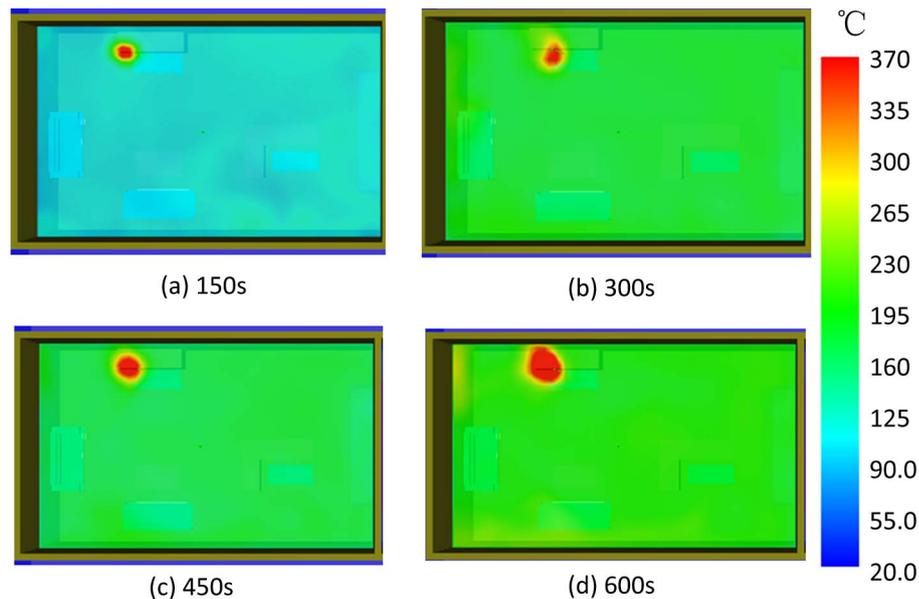


Figure 3. Temperature distribution at the height $Z = 2$ m of the burning room

图 3. 着火房间 $Z = 2$ m 高度处温度分布图

3.2. CO 浓度分布

火灾中的燃烧过程会产生很多物质，如烟固体颗粒、多种有毒有害气体和液体。火灾中对人员安全疏散影响较大的主要是有毒有害气体和一些窒息性气体。火场中常见的有毒气体主要是一氧化碳。一氧化碳的密度与空气相近，容易与空气均匀混合，人体吸入过量的一氧化碳就发生中毒昏迷，甚至死亡。

图 4 为电气短路火灾工况下，不同时刻火场 $Y = 4.85$ m 平面切片上的 CO 浓度分布。从图 4 可以看出，由于火灾情景是室内封闭空间，CO 不断从着火点产生，在 600 s 时室内 CO 浓度最高甚至达到了 1500

ppm。由于高温烟气被限制在室内，并且没有冷空气补入稀释室内 CO 浓度，此时人员在此环境中 2~3 分钟就会发生意识不清甚至昏迷的情形。因此，封闭环境下的电气短路火灾对人员的安全疏散会造成严重威胁。从相同时刻不同时刻 CO 分布还可以看出，室内空间仅仅在 300 s 之后就已经被 CO 完全弥漫，而且浓度已达到对人体造成伤害的 500 ppm。

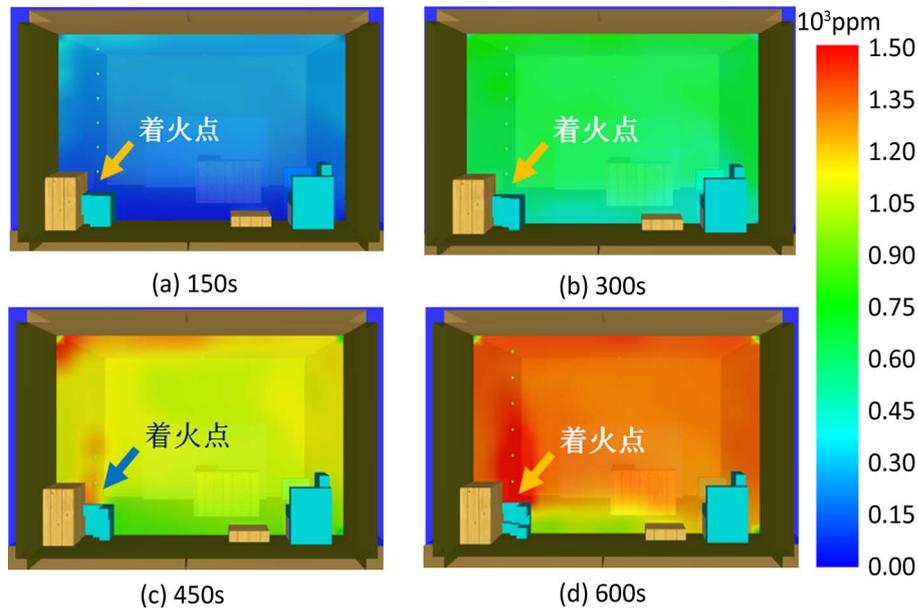
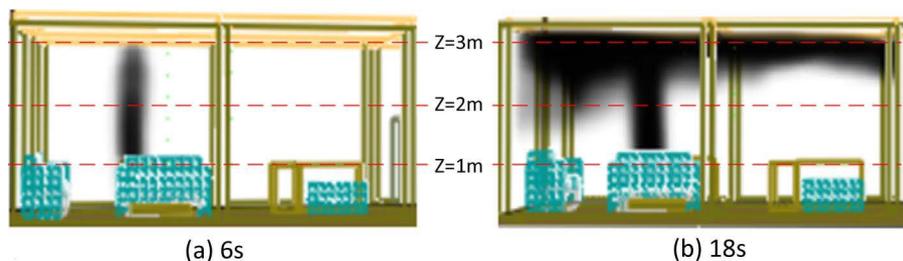


Figure 4. CO concentration distribution at plane section of $Y = 4.85$ m
图 4. $Y = 4.85$ m 平面切片 CO 浓度分布

3.3. 烟气蔓延速度

图 5 为火灾在初始工况(火源的热释速率为 1000 kW/m^2 ，火源面积为 $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$)下，烟气蔓延情况图。从图 5 可以看出，在设定工况下，烟气蔓延速度非常快，仅 6 s 烟气即从着火点窜至站房顶部天花板，由于站房高为 4 m，因此烟气上浮速度约为 0.67 m/s 。在约 18 s 后烟气就由屋顶向下蔓延至 $Z = 2 \text{ m}$ 高度处，此时烟气的下降蔓延的速度在约为 0.09 m/s ，远远小于，上升阶段的蔓延速度。这主要是因为上升的烟气遭遇天花板后迅速向四周扩散，在此过程中热烟气的浮力导致烟气下降蔓延的速度大大降低[7] [8] [9]。约 30 s 后大量烟气就由屋顶向下蔓延至 $Z = 1 \text{ m}$ 高度处，在约 2 分钟后站房就充满了黑烟。从模拟结果可以看出，假设人员平均身高为 2 m，那么此种工况下，从火灾发生到人员发现的时间约为 18 s 左右，而留给人员逃生、扑救火灾的时间约为 2 分钟。在 200 s 之后，室内完全被热烟气灌满，已超过了人体能够承受的极限。这也说明门窗封闭的情况下，烟气难以排出导致迅速积聚，此时的火灾更加危险。



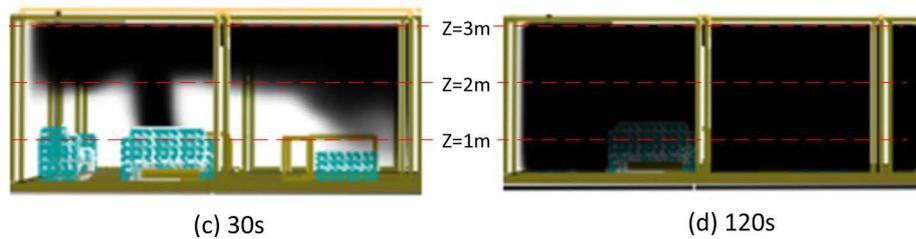


Figure 5. Smoke spread process
图 5. 烟气蔓延情况

3.4. 能见度分布

图 6 为不同时刻 X 方向火场能见度分布图。图 6 显示，在室内火灾发生的 600 s 时间内，随着火灾持续时间延长，室内火场中的能见度分布迅速降低，因为火灾工况是封闭的，烟气环境变得更加危险，烟气难以排除并且迅速积聚，在 200 s 之后，室内完全被热烟气灌满，能见度参数降低至 0 m，已超过了人体能够承受的极限[4]。

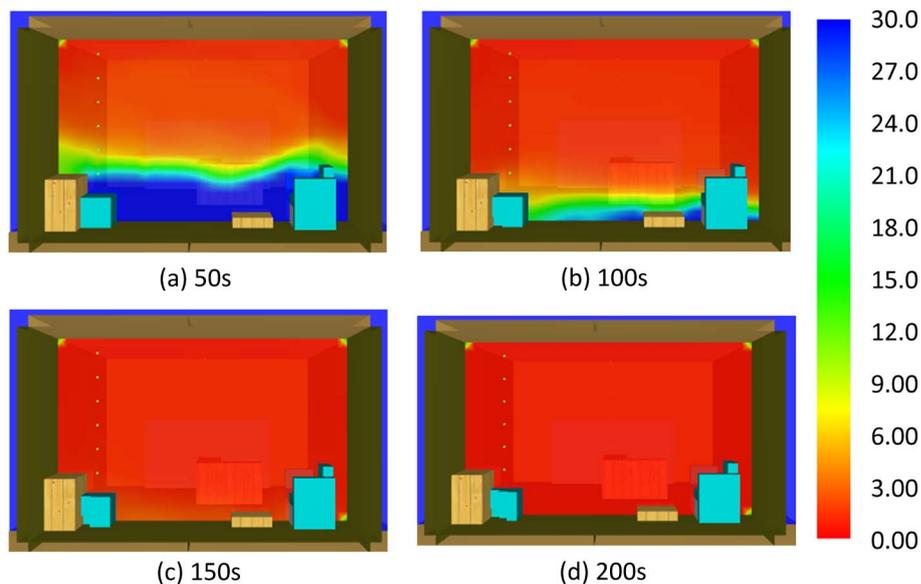


Figure 6. Visibility distribution at X-direction
图 6. X 方向能见度分布图

3.5. 火焰蔓延情形

图 7 为电气短路火灾工况下，不同时刻火焰蔓延的情形。从图 7 电气短路引起周边可燃物发生燃烧的火焰分布图上可以看出，在 150 s 时，沙发首先被引燃，并且可燃物少量燃尽，同时可燃材料燃烧释放的热量继续引燃了旁边的可燃物，在火灾发生了 10 分钟后，可燃物燃尽了大部分，并且附近办公桌也被点燃。

3.6. 火灾发展过程分析

图 8 为电气短路火灾房间中间位置地面以上 $Z = 1.0\text{ m}$ 、 $Z = 2.0\text{ m}$ 和 $Z = 3.0\text{ m}$ 高度位置的温度曲线，从图上可以看出以下规律：1) 相同高度位置的温度，电气短路火灾温度较高，电气火灾的温度达到了 230°C ；2) 电气火灾引燃时间较长，在约 30 s 左右材料才开始燃烧，但是电气火灾发展速度较快，整体

温度更高; 3) 不同火灾工况下, 热电偶位置越高, 温度越高, 这是由于热烟气密度较小, 先聚集在楼板处再慢慢沉降原因所致; 4) 在 $Z = 2.0 \text{ m}$ 处, 温度已经达到了 180°C , 远远大于人体能够承受的温度极限, 可见电气短路的封闭室内火灾的危险性更大。

图 9 为电气短路火灾热释放曲线。从图上可以看出电气火灾的最大热释放速率约 0.9 MW 。一般来说, 明火火灾初始火源面积大, 火源功率大, 随着火源附近的可燃物被引燃, 火灾曲线缓慢发展, 热释放曲线相对电气火灾来说较为稳定, 然而, 从图 9 可以看出, 模拟工况下电气火灾的热释放曲线释放波动性较大, 这主要是由于可燃材料在火灾中不断被引燃蔓延并且出现可燃物燃尽的现象。即曲线上出现的热释放突然下降反映了此时刻部分可燃物已燃尽。

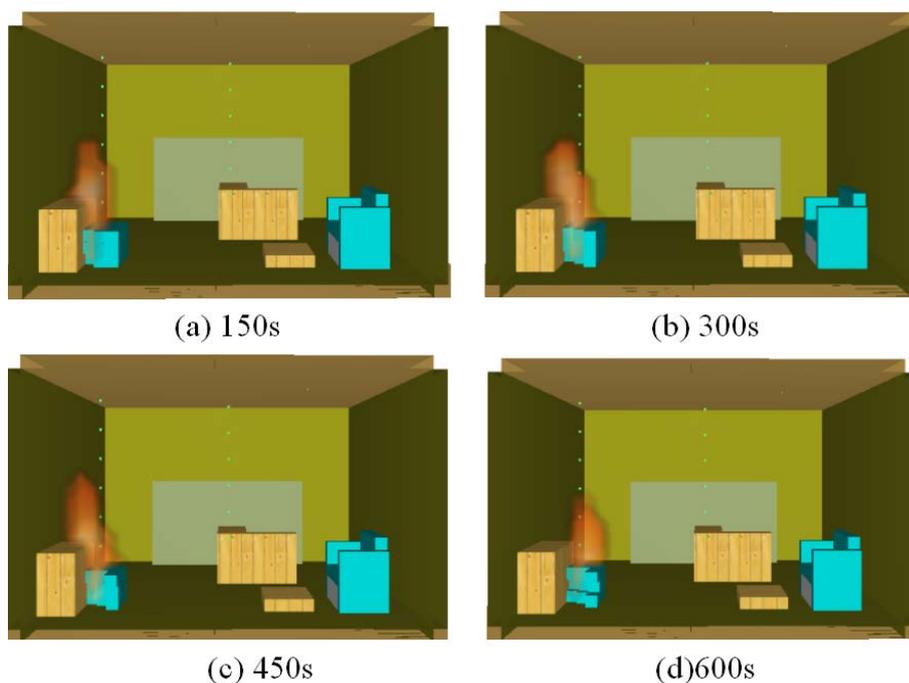


Figure 7. Flame distribution at X-direction
图 7. X 方向火焰分布图

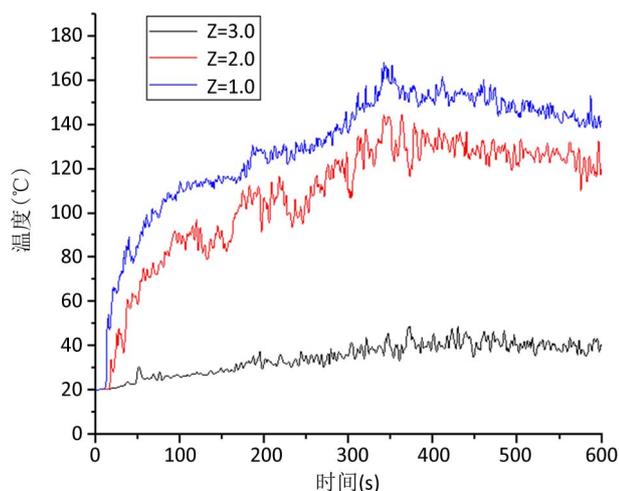


Figure 8. Temperature curves for thermocouples at different heights in the middle of the room
图 8. 房间中部不同高度热电偶曲线

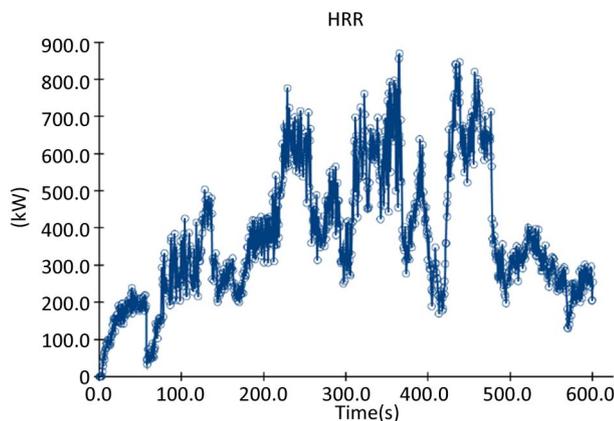


Figure 9. Heat release curve of the fire process

图 9. 火灾过程热释放曲线

4. 结论

本文针对某加油站典型火灾过程，运用 PyroSim 火灾动态模拟软件，对加油站站房电气火灾发生、发展过程进行了数值分析，定量评估了站房火灾风险性，简要讨论了火灾过程的温度、CO、烟气蔓延、能见度、火焰发展和热释放速率等关键参数的变化规律。本文的研究方法及结论，不仅可为加油站火灾安全的性能化设计提供一定参考，同时也可作为安全工程专业的研究生工程中的数值方法课程提供一份工程应用教学案例。本文的主要结论如下：

1) 在模拟工况下，火灾发展非常迅速。在 200 s 时，室内已被热烟气完全占据，能见度也降低至 0；在 300 s 时室内已被 CO 完全弥漫，且 CO 浓度已达 500 ppm；10 min 时，高度 $z = 2$ m 切面的平均温度已高达 230℃，此时附近办公桌将被点燃。

2) 从模拟结果来看，火灾过程最大热释放速率约为 0.9 MW，与一般火灾相比电气火灾引燃时间较长，但是火灾发展速度较快，整体温度更高，因此电气火灾的危险性更大。

3) PyroSim 火灾动态模拟软件能较好地模拟加油站火灾发生和发展过程，能得到形象直观的数值结果，且计算精度较高，与实际站房火灾烟气蔓延趋势吻合较好。

基金项目

本文得到国家自然科学基金(No. 51704301)、重庆市高等教育教学改革研究项目(No. 193353)、陆军勤务学院教改项目基金(No. 2019-098)资助。

参考文献

- [1] 刘旻. 化工行业危险化学品的安全管理措施分析[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(10): 193-194.
- [2] 郭绍山. 加油站安全管理现状及优化策略解析[J]. 化工管理, 2019(24): 69-70.
- [3] 吴宗子. 基于本质安全的工业事故风险管理方法研究[J]. 中国安全科学报, 2007, 17(7): 54-59.
- [4] 金静, 张金专, 王芸, 张健, 刘学屹. 易燃危险化学品火灾事故调查技术数据库构建[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(3): 423-426.
- [5] 吕淑然. 火灾与逃生模拟仿真[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [6] 贾绪平, 房庆磊, 翁扬煌. L-CNG 加气站安全评价技术体系分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(10): 129-132+136.
- [7] 张焯. 基于 FDS 的火灾模拟与应用探讨[J]. 科学与信息化, 2018(24): 58-59.
- [8] 鞠晓臣, 刘晓光, 赵欣欣, 何宇. 基于大涡模拟法的铁路桥梁火灾场景研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(6): 78-83.

-
- [9] 刘晓, 蔡治勇, 马胜杰, 范爱迪, 辛萍, 龚迎秋. 基于 FDS 的高层建筑火灾数值模拟研究[J]. 价值工程, 2019, 38(31): 131-133.
- [10] 袁春燕, 郑高凯, 郎雨佳, 王鹏飞. 考虑不同场景的砖木结构古建筑火灾特征研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(10): 158-164.
- [11] 梁军, 朱国庆. 含内天井高层住宅火灾烟气流动分析[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(11): 1527-1529.