

教学楼火灾场景人员疏散仿真研究

杨裕明¹, 沈斐敏¹, 刘毅², 罗凌燕¹

(1.福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350116; 2.福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 基于性能化防火设计的研究思路,以A教学楼为例,讨论了教学楼现有疏散设施是否符合火灾场景下人员疏散要求。运用火灾模拟软件 PyroSim 建立火灾模型,得出影响疏散的温度、能见度、烟气的运动规律,选取最不利因素,确定可用安全疏散时间(ASET)。通过人员疏散软件 Pathfinder 模拟人员疏散路径,得出所需安全疏散时间(RSET)。研究表明,PyroSim 与 Pathfinder 能有效的模拟火灾下人员疏散规律,A教学楼不能满足疏散要求,并提出改进方案以确保疏散安全。

关键词: 教学楼; 性能化防火; 模拟; ASET; RSET

中图分类号: X932

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2016)06-0575-06

Research on teaching building evacuation simulation under fire scenario

Yang Yuming¹, Shen Feimin¹, Liu Yi², Luo Lingyan¹

(1.College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2.College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: The fireproof condition of the existing evacuation facilities of a school building at certain university in Fuzhou under fire scenario was discussed in the perspective of performance-based fire-proof design. Fire dynamic simulation software PyroSim was used to formulate an evacuation model. The effects of temperature, visibility and the movement of fume (flue gas) on the evacuation were obtained. The most unfavourable factor was selected to determine available safe evacuation time (ASET). The evacuation path of the personnel was simulated via personnel evacuation software Pathfinder, and the required safe evacuation time (RSET) was determined. The results show that PyroSim and Pathfinder can effectively simulate personnel evacuation under fire scenario. The improvement scheme for the evacuation of the school building was proposed to ensure safe evacuation.

Keywords: school building; performance-based fire-proof; simulation; available safe evacuation time (ASET); required safe evacuation time (RSET)

教学楼是高校人员最密集场所之一,在正常上课时间,公共教学楼内每间教室里都达到满员。每当课间需要更换教室时,楼梯口就会出现“成拱”现象,在客流量未达到高峰的情况下需要5~10 min才能疏散完毕。一旦出现火灾,产生高温、高烟气浓度、低能见度等影响疏散的不利因素,楼内师生必然会产生恐慌心理,会大大增加疏散时

间,甚至造成“拱塌”,导致踩踏事件的发生,严重危害师生的生命安全。因此,进行教学楼火灾场景人员疏散仿真研究具有极其重要的现实意义。

PyroSim 与 Pathfinder 是两款现阶段比较成熟的数值仿真软件,并在众多工程实例中得到广泛应用^[1-4]。如潘长城等人运用 FDS 与 Pathfinder 软件对学生食堂火灾与人员疏散进行了

研究,为学校食堂火灾疏散提供了理论依据^[5];王研运用 PyroSim 对高校宿舍火灾数值进行了仿真研究,分析了烟气、温度、能见度等因素对于逃生的影响,并根据分析给出合理的建议^[6];赵宇宁等人运用 Pathfinder 对教学楼应急疏散演练方案进行了改进研究,发现当所有出口的利用率近乎相同的时候整个教学楼的疏散时间是最短的,所以在制定疏散方案的时候,应该遵循所有出口利用率一致的规律^[7]。但同时运用 PyroSim 与 Pathfinder 对教学楼火灾场景人员疏散的仿真研究却依然较少。研究中首先运用 PyroSim 软件分析教学楼中发生火灾时烟气运动规律,得出可用安全疏散时间(ASET),再运用 Pathfinder 软件分析得出所需安全疏散时间(RSET),对比得出 A 教学楼是否符合安全疏散要求,针对不符合要求的节点,分析原因并提出改进方法。

1 软件介绍

PyroSim 是由美国 Thunderhead 公司开发的一款火灾模拟软件,是一款图形界面软件,最大的特点就是界面友好,为用户提供了三维图形化操作界面。可自定义墙壁、通道、通风口、可燃物、燃烧特性等,可实现条件控制。PyroSim 内含的 Smokeview 可对其结果进行三维立体化输出,在 PyroSim 也可以实现对火灾过程中烟气运动、温度、能见度等因素的监控。

Pathfinder 同样也是由美国 Thunderhead 公司开发,是一款人员疏散软件,支持标准 CAD 文件与 Pyrosim 输入。在 Pathfinder 中包含 SFPE 与 Steering 两种基本模式。在 SFPE 模式中,通过指定空间内人群的密度以及出口的宽度决定行走速度和出口人流量,该模式下人们会自动选择最近的出口进行疏散,并根据人员的密度进行速度的调整。这种模式下后期的疏散速度会因为人员集中在某个较近的出口而大幅增加疏散时间,与实际情况偏差较大^[8]。Steering 模式使用路径规划指导机制与碰撞处理相结合来控制人员的运动,当人员之间的距离或者到最近出口的路径超过某一阈值时,就会自动生成新的路径,以适应当前的环境,使得疏散过程更加符合实际^[9-10]。

2 模型建立

2.1 模型结构的创建

该教学楼最大长度为 79.5 m,最大宽度为 18 m,最大高度为 22.5 m,总面积约为 1 132 m²。该教学楼共由 4 个出口组成,分别为 1、2 号走廊及 1、2 号楼梯出口。共由 5 层组成每层层高 4.5 m。各层结构一致,由 5 间房间(4 间大教室及一间管理室)、两条走廊通道、两个楼梯间和卫生间组成。因为该教学楼为不规则建筑,所以在构建网格的时候,将其分为 4 个相互接触的网格,分别为:网格 1(01 教室与 1 号走廊),其长宽高为 12 m×18 m×22.5 m;网格 2(02、03、04、05 教室、2 号走廊与 2 号楼梯),其长宽高为 67.5 m×12 m×22.5 m;网格 3(1 号楼梯),其长宽高为 8.5 m×3.5 m×22.5 m;网格 4(卫生间),其长宽高为 8.5 m×4.5 m×22.5 m。综合考虑减少运算时间、保证网格有效连接、便于模型建立等因素,将最小网格确定为 0.5 m×0.5 m×0.5 m。

该教学楼为非规则建筑,经过合理简化,教学楼三视图及三维视图如图 1 所示(为了更好的表示教学楼的几何形状,三视图与三维视图均已隐藏外墙)。该教学楼的平面结构图如图 2 所示。

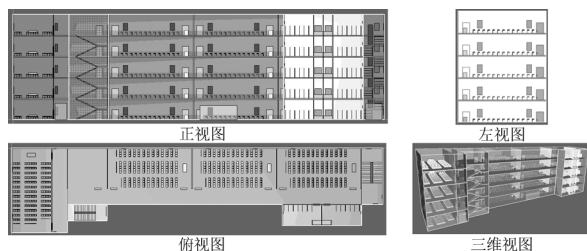


图 1 教学楼三视图与三维视图

Fig.1 Three views and 3D view of a school building

2.2 火源位置的选择

各层中 01、03、04、05 房间均为公共教室,公共教室中电气线路简单,可燃物主要为课桌,无书本堆积,不易起火,且面积较大,起火扑灭难度小。各层 02 房间中除 102 房间为电气设备间,其余均为教师休息室,教室休息室中也仅有座椅,结构简单,不易起火,起火扑灭难度小。102 电气设备间中线路复杂,发生火灾可能性大,且一旦发生火灾容易蔓延,电气火灾不能用水扑灭,扑灭难度相对较大。102 房间位于出口 2 旁,发生火灾可能导

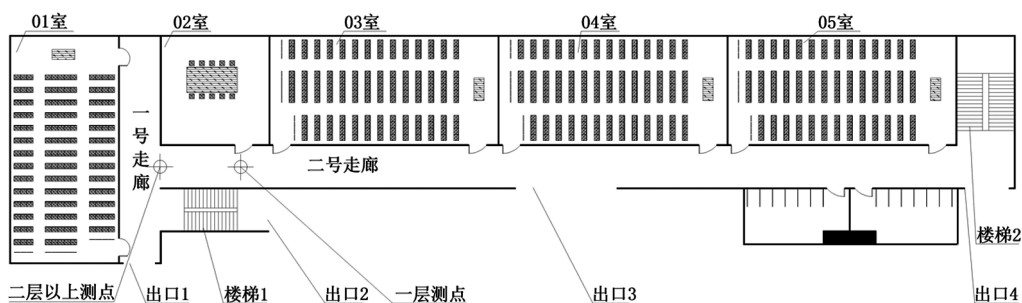


图2 教学楼平面结构图

Fig.2 Plane structure of school building

致出口2封闭,影响疏散。为了最大程度模拟火灾发生后对人员疏散产生的影响,选取火灾后果最严重——位于出口2旁的电气设备间为起火点。

2.3 状态设置

电气设备间门窗常态为关闭状态,故初始状态设为关闭。电气设备间中设有点型定温感火灾探测器,布置位置采用四周加中央的五点探测,当探测温度超过 $57\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,总控室警报响起,并立即指派工作人员到现场确认是否为误报。若确认火灾,即拉响警报,教学楼中人员开始疏散。这里设定火灾发生后 $t_1\text{ s}$ 时刻传感器探测到火灾,电气设备间门从 $(t_1+10)\text{ s}$ 时刻由关闭变为打开, 10 s 为检测到火灾之后开门的延迟时间(工作人员确认火灾真实情况的时间);火灾警报也从 $(t_1+10)\text{ s}$ 时刻响起(火灾确认之后立刻拉响警报)。

2.4 参数选取

2.4.1 Pathfinder 疏散软件参数选取

因教学楼中的人群主要由 $18\sim 25$ 岁之间人员组成,根据《中国成年人人体尺寸》(GB1000-88), $18\sim 25$ 岁男性平均肩宽取 42.7 cm , $18\sim 25$ 岁女性平均肩宽取 39.1 cm ^[11]。根据实验显示,男性学生群体人员疏散速度为 1.35 m/s 。女性学生群体人员疏散速度为 1.15 m/s ;人员密集场所紧急状态下,人员疏散速度会受到影响,此时男性学生的疏散速度为 1.05 m/s ,女性疏散速度为 0.85 m/s 。

模型中各区域人数按最大人数设置,各教室为120人,各教师休息室为两人,各层走廊为5人,每层卫生间为2人,共2443人。

根据第1节中对Pathfinder中两种疏散模式的对比,本次疏散选取Steering模式。

所需疏散时间为报警时间、疏散反应时间、运动时间三者之和。需要自定义的时间是疏散反应时间,报警时间和运动时间分别由Pyrosim和pathfinder中模拟所得。参考文献[12]考虑到高校教室中装备火灾自动报警系统,在火灾情况下有人员进行疏散指导,教室中人员受教育程度相对较高,所以疏散反应时间选取该文中时间较短的一次。本次模拟中人员开始疏散时间如表1。

表1 疏散反应时间

Tab.1 Evacuation reaction time

时间段/s	开始人数百分率/%	时间段/s	开始人数百分率/%
0~10	0	40~50	16
10~20	6	50~60	26
20~30	24	60~70	12
30~40	10	70~80	6

2.4.2 Pyrosim 火灾模拟软件参数选取

模型几何结构参数的确定,依据2.1中的阐述,此处不赘述。教学楼中墙体和楼板分别为砖砌结构和钢筋混凝土结构,不可燃;门窗表面类型均选择OPEN,即自然通风,无强制通风设施;天花板为PVC材质,可燃;电缆为绝缘材料包裹导线,一定温度下可燃;课桌为木质结构,可燃;化纤类窗帘,可燃。火灾的发展过程分为增长阶段、稳定燃烧阶段、减弱阶段,在疏散模拟阶段,只经历前两个阶段。

综上所述,根据可燃物的种类,查阅相关文献^[13-15],老化PVC点燃温度为 $282\text{ }^{\circ}\text{C}$,考虑最不利情况,即设备间电缆在热辐射作用下全部引燃。设备间有3个长 5 m 的配电箱,每个3层,每层电

缆宽约 0.2 m,加上进出设备间电缆槽,宽 0.2 m,长约 5 m,总电缆面积为 $3 \times 3 \times 0.2 \times 5 + 0.2 \times 5 = 10 \text{ m}^2$ 。热释放速率(HRR)采用分段平均法确定,即假定 HRR 在某个相对短的时间内为定值。火灾热释放速率表如表 2 所示,需要说明的有两点:一是在《建筑中常见 PVC 材料的燃烧特性》中^[13],电缆的热释放速率随时间变化曲线中的减弱阶段是由于实验试件有限,而纵观已发生的火灾,在进入稳定燃烧阶段并不会迅速进入减弱阶段,而是保持稳定燃烧甚至引燃周围可燃物,导致火势增长。本次模拟设定火灾进入稳定燃烧阶段之后一直保持恒定的热释放速率;二是假定初始有热释放速率为 30 kW 的火源,前 50 s 未点燃电缆,故热释放速率为 30 kW,之后点燃电缆进入火灾增长期,撤走火源,热释放速率各时段值见表 2。本次模拟时间设定为 800 s。

表 2 火灾热释放速率表
Tab.2 Heat release rate of fire

时间段/s	热释放速率/kW	时间段/s	热释放速率/kW
0~50	30	70~80	1 200
50~60	400	80~90	1 600
60~70	800	90~800	2 000

考虑到环境风向对模拟结果有较大影响,结合气象局相关数据,该地区属于亚热带季风性湿润气候,受该地区地形和海洋气候影响,全年盛行东南风,全年各月平均风力等级为二级轻风(1.6

~3.4 m/s)。所以,本次研究中环境风向确定为东南风,风速取二级轻风中间值 2.5 m/s。该教学楼朝向为西南方向。

3 结果分析

3.1 PyroSim 模拟结果分析(ASET 获得)

火灾中烟气层高度、能见度、热辐射温度对疏散安全影响较大。根据事先设置的温度探测器探测各点热辐射温度值,除了 102 房间门口和 2 号出口处,在开门后温度上升至 115 ℃ 以上,随后稳定在 60 ℃ 左右,其余各层、各出口温度都在 40 ℃ 以下。考虑热辐射温度的影响,将 102 房间门口及 2 号出口处疏散通道由 (t_1+10) s 时刻(模拟所得为 65 s)变为切断状态。

根据《建筑防火工程》中规定,安全疏散中对建筑物不熟悉的人群能见度应达到 13 m,对建筑熟悉的人群能见度要到达 5 m^[16]。教学楼结构相对简单,师生对教学楼结构熟悉,根据模拟结果,能见度不会下降到 5 m 以下。因而对比烟气层高度和能见度,前者的重要程度较大,所以重点分析烟气层高度产生的影响。

考虑 2 号楼梯的“烟囱效应”;1 号走廊和 2 号走廊相交处一段距离内有外墙,为相对密闭空间;相交处在疏散时人员密集程度大。综合以上几个原因,1 层 02 房间门口为最不利测点,2 层以上 1 号走廊与 2 号走廊相交处最不利测点,故选取以上两处(见图 2 中测点)作为各层烟气层高度的测点。各楼层烟气层高度如图 3 所示。

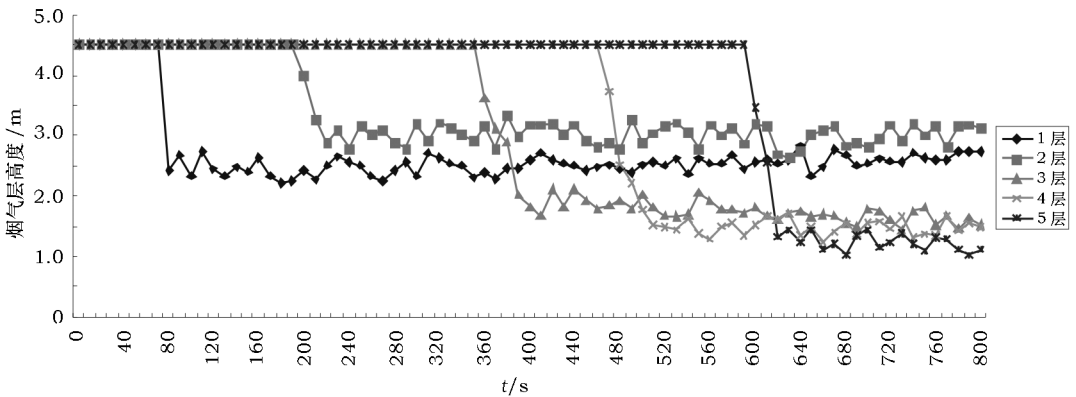


图 3 各楼层烟气层高度

Fig.3 Height of smoke of each storey

各层烟气层高度随时间的增加逐渐降低并趋于稳定;除着火楼层之外,随着楼层的增高,各层稳定后的烟气层高度逐渐降低。1层稳定后的烟气层高度在2.5 m左右,对疏散产生的影响不大;2层稳定后的烟气层高度在3.0 m左右,对疏散产生的影响不大;3层在403 s烟气层高度第1次降至1.8 m以下,此后稳定在1.6~2.0 m;4层在496 s烟气层高度第1次降至1.8 m以下,此后稳定在1.5 m左右;5层在611 s烟气层高度第1次降至1.8 m以下,此后稳定在1.2 m左右。

综合热辐射温度、烟气层高度影响,各层ASET时间为:1层无要求,但从 (t_1+10) s时刻起(模拟所得为65 s),102房间门口处和2号出口处疏散通道转为切断状态;2层时间无要求;3层为403 s;4层为496 s;5层为611 s。

3.2 火场下疏散结果分析(RSET获得)

RSET时间由报警时间、反应时间、运动时间构成。其中报警时间由探测器探测时间与确认火灾时间构成,在Pyrosim中模拟得到电气设备间中定温温感火灾探测器55 s时刻探测到温度大于57℃,工作人员确认火灾需要10 s,即报警时间为65 s。疏散反应时间见表1,运动时间由Pathfinder软件模拟得到。最终各层ASET和RSET对比如表3所示。

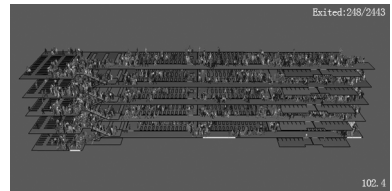
表3 火场下ASET与RSET对比表

Tab.3 Comparison between ASET and RSET under fire scenario

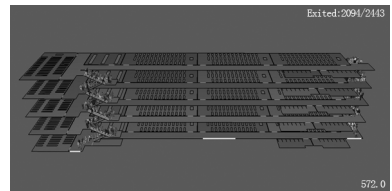
楼层	ASET/s	RSET/s
5	611	572.0
4	496	603.8
3	403	631.3
2	无要求	653.5
1	102门口、2号出口处 从65 s断开,其余无要求	677.6

报警时间为65 s,由2.3节中内容可得,电气设备间房门也从65 s时刻由关闭状态变为打开状态。开启后,热辐射会影响2号出口的疏散安全,所以2号出口从65 s时刻即为关闭状态。在火场紧急情况下,人员因拥挤疏散速度变得更加缓慢,加上2号出口封闭,导致更多的人必须从1号出口疏散,总疏散时间为677.6 s。火场下各层

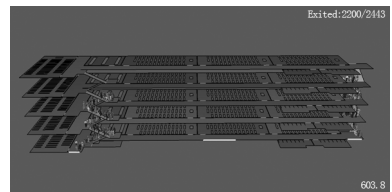
人员疏散结束时间节点示意图如图4所示。从5层到1层各层人员疏散结束时间为572.0,603.8,631.3,653.5,677.6 s。根据表3(火场下ASET与RSET对比表)对比分析,3层、4层不能按时间完成疏散,将会产生危险。



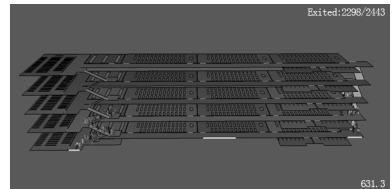
(a) 疏散过程



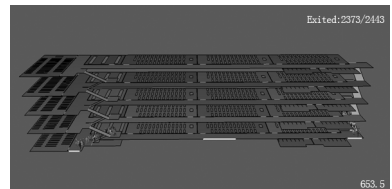
(b) 5层人员疏散结束时刻



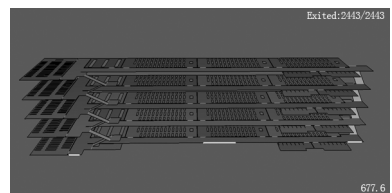
(c) 4层人员疏散结束时刻



(d) 3层人员疏散结束时刻



(e) 2层人员疏散结束时刻



(f) 全部人员疏散结束时刻

图4 火场下模拟疏散示意图

Fig.4 Evacuation simulation under fire scenario

4 结论

(1)以 A 教学楼为例,借助 Pyrosim 软件,从热辐射温度、能见度、烟气层高度等方面对疏散的影响入手,确定了所需疏散时间(ASET),并基于 Pyrosim 软件的火灾模拟结果,利用 Pathfinder 软件模拟了所需疏散时间(RSET),探讨了 A 教学楼现有疏散设施在火灾场景下是否满足人员疏散要求,得出了 A 教学楼不满足相应疏散要求,应作改进。该思路可为研究其他教学楼现有疏散设施是否符合火灾场景下人员疏散要求提供借鉴意义。

(2)一楼的安全出口为 4 个,即使在火场情况下也能保证有 3 个疏散出口。而对于 2 层以上,只有两个疏散楼梯。在紧急情况下,两个疏散楼梯并不能满足疏散需求,楼梯口易出现“成拱现象”。对于 2 楼以上的楼层应该考虑增设疏散通道,考虑到增设楼梯的可行性不大,而往往高校

中的教学楼并不止一栋,可以在设计时设计为教学楼群,在各教学楼之间每层架设天桥。这样在发生火灾时 2 层以上的师生可以通过天桥转移疏散到另一栋教学楼中,加快了疏散效率,并且也方便了师生平时在各教学楼中的走动。

(3)根据 Pyrosim 中模拟显示,烟气的蔓延原因是由于电气设备房门打开。可以在房内设置喷 CO₂、惰性气体装置或是联动干粉灭火器以及设置防爆窗、防爆门。根据视频监控判断火情大小,若是火情很小,能够迅速扑灭,可以打开房门,迅速扑灭火灾;若是火情已经不可控制,切勿盲目开门,可以喷射 CO₂、惰性气体除氧或是喷射干粉控制火情。

(4)本次模拟是基于师生对逃生通道都很了解的情况上进行的,在实际中还存在一小部分师生对教室建筑结构不够了解,对逃生通道不熟的情况。学校应该定时组织师生进行应急疏散演练。

参考文献:

- [1] Rajendrama A, Khanb F, Garaniyaa V. Modeling of fire risks in an offshore facility[J]. Fire Safety Journal, 2015, 71: 79-85.
- [2] Riascos M, Palmiere L A, Eduardo S. Energy efficiency and fire prevention integration in green buildings[J]. Latin America Transactions, 2015, 13(8): 2608-2615.
- [3] Silviu C, Valeriu P, Daniela P, et al. Study and improvement of road tunnels fire behavior using pyrosim[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 657: 790-794.
- [4] 段鹏飞.面向校园疏散的均衡模型与疏导优化方法研究[D].武汉:武汉理工大学, 2013.
- [5] 潘长城,郭建中.基于 FDS 与 Pathfinder 的学生食堂火灾与人员疏散研究[J].价值工程, 2014(5): 300-301.
- [6] 王妍.基于 PyroSim 的高校宿舍火灾数值仿真[J].中国科技纵横, 2014(19): 209-210.
- [7] 赵宇宁,党会森.教学楼应急疏散演练方案改进研究[J].中国公共安全(学术版), 2011(3): 52-55.
- [8] 党会森,赵宇宁.基于 Pathfinder 的人员疏散仿真[J].中国公共安全(学术版), 2011(4): 46-49.
- [9] 成琳娜.基于 Pathfinder 的地铁站火灾应急疏散仿真研究[D].兰州:兰州交通大学, 2014.
- [10] 赵哲,陈清光,王海蓉,等.基于 Pathfinder 的公众聚集场所的应急诱导疏散[J].消防科学与技术, 2013(12): 1327-1330.
- [11] 国家技术监督局.中国成年人人体尺寸:GB/T 10000-1988 [S].北京:中国标准出版社, 1988.
- [12] 纪洪.基于人工神经网络的人员安全疏散反应时间研究[J].武警学院学报, 2012(12): 5-7.
- [13] 王金广,叶茂昌.建筑中常见 PVC 材料的燃烧特性[J].消防科学与技术, 2016(1): 26-28.
- [14] 李在辉,胡源,宋磊,等.聚氯乙烯电缆料老化前后的火灾危险性研究[J].火灾科学, 2011(1): 56-61.
- [15] 钟委,霍然,史聪灵.热释放速率设定方式的几点讨论[J].自然灾害学报, 2004, 13(2): 64-69.
- [16] 李引擎.建筑防火工程[M].北京:化学工业出版社, 2004: 238-241.