

基于火灾动力学和概率统计理论 耦合的建筑火灾直接损失预估

褚冠全, 孙金华

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

[摘要] 以火灾成长概率和火灾发生后的过火面积为评价指标, 探讨对建筑火灾过火面积的预估方法。依据火灾动力学和火灾发展过程中不同阶段的特点, 将火灾由初期发展蔓延到整个防火分区的过程划分为4个阶段, 采用概率论和事件树的分析方法, 得到了每个阶段的火灾成长概率。根据不同阶段火灾的特点, 求得了各阶段火灾的临界时间, 并以此为基础对火灾发生后建筑物平均过火面积进行了预估。

[关键词] 建筑火灾; 火灾风险评估; 事件树; 概率; 过火面积

[中图分类号] X947, TK121 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)08-0064-05

1 引言

建筑火灾是危害较大的火灾形式之一。特别是由于当今城市功能复杂的大型建筑和超大型公共娱乐场所的大量建设, 再加上城市人员集中, 建筑物密集, 人员疏散困难等原因, 一旦发生火灾就有可能造成巨大的财产损失和人员伤亡, 并造成重大的社会影响, 如1994年的克拉玛依友谊馆火灾死323人, 伤130人, 直接经济损失100万元, 2000年的洛阳东都商厦火灾死309人, 直接经济损失275万元^[1]。

由于现行规范无法解决这些大型、超大型建筑的消防设计, 所以只能借助于消防性能化设计降低火灾危险, 而合理的建筑消防性能化设计又离不开科学的火灾风险评估方法。传统的火灾风险评估方法仅能定性地对建筑物火灾风险进行分析, 虽然可以从某种程度上得到一些有用的结果, 但是这些结果在很大程度上具有一定的经验性和模糊性。国外很多学者都在开展量化的火灾风险评估方法的研究^[2,3]。这些方法比传统的方法有了很大的改进, 可以对火灾风险进行定量评估, 但是没有将火灾动

力学因素考虑到评估的过程中。除了火灾动力学因素之外, 建筑物内的防灭火设施的有效性也是影响火灾发展的重要因素。为了更加客观、准确地对建筑火灾进行风险评估, 作者在考虑建筑物内防灭火设施的情况下, 提出了以火灾动力学、概率统计理论和系统安全理论相结合的定量的火灾风险评估方法。

2 建筑火灾蔓延及风险分析方法

作者提出的火灾风险评估方法是基于火灾动力学和概率统计理论相耦合, 以火灾成长概率和火灾发生后建筑物的平均过火面积为目标函数对建筑物火灾损失进行评估。根据火灾发展过程中的不同危险程度和消防设施防灭火的效果, 将火灾由发生初期到蔓延至整个防火分区的过程分为4个阶段, 运用系统安全分析方法对每个阶段火灾风险进行分析, 得到每个阶段火灾成长概率和临界时间。

2.1 阶段1的火灾风险分析

假定火灾在建筑物内某防火分区内开始起火。阶段1是指火灾还处于初期阶段, 可以被灭火器或自动水喷淋扑灭。在阶段1能否被及时发现, 并将

[收稿日期] 2003-11-26

[基金项目] 国家重点基础研究发展规划“九七三”资助项目(2001CB409600); 中国科学院“百人计划”资助项目; 国家自然科学基金重大国际合作研究资助项目(2003-50320120156)

[作者简介] 褚冠全(1980-), 男, 河南商丘市人, 中国科学技术大学硕士研究生

火灾扑灭，主要取决于火灾探测报警系统，自动水喷淋系统和灭火器工作的有效性。作者利用事件树方法分析了在火灾探测报警系统，自动水喷淋系统和灭火器这 3 种防灭火设备的条件下，火灾在阶段 1 可能的发展情况（见图 1）。

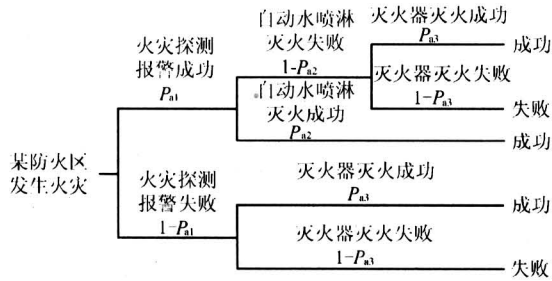


图 1 阶段 1 事件树

Fig.1 Event tree of phase 1

通过式 (1) 可以计算出火灾发展超出阶段 1 的概率：

$$P_{FPh1} = (1 - P_{a1})(1 - P_{a3}) + P_{a1}(1 - P_{a2})(1 - P_{a3}) = 1 - P_{a3} - P_{a1}P_{a2} + P_{a1}P_{a2}P_{a3} \quad (1)$$

其中， P_{FPh1} —火灾发展超出阶段 1 的概率； P_{a1} —火灾探测报警成功的概率； P_{a2} —自动水喷淋灭火成功的概率； P_{a3} —灭火器灭火成功的概率。

为了对发生火灾后建筑物进行火灾风险评估，需要得到每个阶段的临界时间。如果火灾经过一段时间发展，其热释放速率超过灭火器灭火能力的极限，火灾就会超过阶段 1 而继续发展。阶段 1 的临界时间就是灭火器刚好可以将火灾扑灭时，火灾发展经历的时间。影响灭火器灭火的因素是火源的热释放速率，火灾初期的热释放速率可以用下面的二次方程^[4]表示：

$$Q = \alpha(t - t_0)^2,$$

式中： α —火灾增长系数 (kW/s^2)； t_0 —开始有效燃烧所需的时间 (s)。

开始有效燃烧所需的时间 t_0 ，就是火灾发生到火灾探测报警的时间。根据文献[5]，在火源的热释放速率没有超过 950 kW 的时候，火灾可以被灭火器扑灭。那么，火源热释放速率达到 950 kW 时所对应的时间即是火灾可以被灭火器扑灭的临界时间，可由式 (2) 得到：

$$t_{950} = \sqrt{\frac{950}{\alpha}} + t_{fa} \quad (2)$$

式中： t_{950} —火灾可以被灭火器扑灭的临界时间 (s)； t_{fa} —火灾发生到探测报警的时间，取 60 s。

阶段 1 的临界时间 t_{FPh1} 就等于火灾可以被灭火器扑灭的临界时间，即：

$$t_{FPh1} = t_{950} \quad (3)$$

2.2 阶段 2 的火灾风险分析

如果灭火器和自动水喷淋系统灭火失败，就会导致火灾进一步发展，这时灭火器或自动水喷淋系统已经不能有效地控制、扑灭火灾，火灾就会超过阶段 1 而发展到阶段 2。阶段 2 是指人们可以使用室内消火栓将火灾扑灭的阶段。在这个阶段影响火灾发展的主要因素是室内消火栓和排烟设备的工作状况。在阶段 2，火灾处于发展阶段，室内温度逐渐升高，同时会产生大量高温、有毒的烟气，这些高温、有毒的火灾烟气对人员使用室内消火栓扑救火灾十分不利。所以，排烟设备的及时启动是保证人员使用室内消火栓成功扑灭火灾的关键。图 2 所示的事件树在考虑排烟设备和室内消火栓的情况下，分析阶段 2 火灾发展的可能结果。

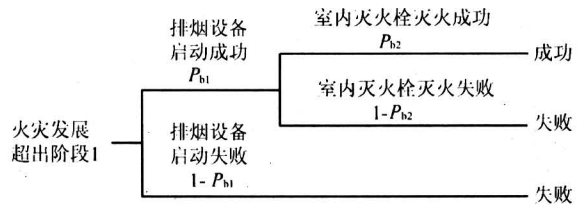


图 2 阶段 2 事件树

Fig.2 Event tree of phase 2

在阶段 2，火灾进展与否主要受排烟设备能否有效启动，室内消火栓能否有效灭火的影响，通过对图 2 的事件树进行分析，火灾发展超出阶段 2 的概率可由式 (4) 得到：

$$P_{FPh2} = P_{FPh1}[(1 - P_{b1}) + P_{b1}(1 - P_{b2})] = P_{FPh1}(1 - P_{b1}P_{b2}) \quad (4)$$

其中， P_{FPh2} —火灾发展超出阶段 2 的概率； P_{b1} —排烟设备启动成功的概率； P_{b2} —室内消火栓灭火成功的概率。

在阶段 2，火灾发展过程中会产生一些高温、有毒的烟气，当这些高温、有毒的烟气下降到对人有危害的高度时，就会影响人使用室内消火栓灭火。烟气层的厚度随时间的变化可以通过美国国家标准与技术研究所 (NIST) 开发的 CFAST 火灾区域模拟软件计算得到。烟气层降到对人有危害高度

(通常工程上取 1.5 m) 的时间即是阶段 2 的临界时间 t_{FPh2} 。

2.3 阶段 3 的火灾风险分析

室内消火栓或排烟系统的失效就会导致火势的进一步发展到阶段 3, 即盛期的阶段。时这, 火势发展较快, 并有可能发生轰燃, 只能依靠消防队扑救。火灾发展超出阶段 3 的概率可由式 (5) 得到:

$$P_{\text{FPh3}} = P_{\text{FPh2}}(1 - P_f) \quad (5)$$

式中: P_{FPh3} —火灾发展超出阶段 3 的概率; P_f —得到消防队及时有效扑救的概率。

阶段 3 的临界时间即是火灾从开始发展到盛期经历的时间。一般认为当着火室烟气层的温度达到 300 °C (房间的装修材料为可燃物) 或 600 °C (房间的装修材料为非可燃物) 时就会发生轰燃, 此时火灾所经历的时间即为火灾发展到盛期的时间。火灾轰燃之前的烟气层温度可由文献 [6, 7] 提出的公式计算。

$$\theta_{\text{ht}} = 0.0236 Q^{\frac{2}{3}} (h_k A_T \sqrt{H})^{\frac{1}{3}} T_{\infty} + \theta_0 \quad (6)$$

$$h_k = \sqrt{k\rho C/t} \quad (7)$$

其中, θ_{ht} —烟气层温度 (°C); Q —热释放速率 (kW); h_k —室内墙壁的有效传热系数 (kW/m²·K); A_T —房间内表面积 (m²); A —房间开口面积 (m²); H —房间开口高度 (m); T_{∞} —环境温度 (K); θ_0 —房间初始温度 (°C); k —内衬材料的导热系数 (kW/m·K); ρ —内衬材料的密度 (kg/m³); C —内衬材料的比热容 (kJ/kg·K); t —火灾燃烧特征时间 (s)。

根据不同室内装修材料确定烟气层温度, 结合式 (6), (7) 可以得出阶段 3 的临界时间 t_{FPh3} , 即

$$t_{\text{FPh3}} = t \quad (8)$$

2.4 阶段 4 的火灾风险分析

火灾发展到盛期之后, 就会向同一防火分区内的其他房间蔓延, 造成火灾在防火分区内蔓延。为了防止火灾蔓延出防火分区, 需要及时关闭防火卷帘及消防队的及时有效的扑救。否则, 火灾可能进一步蔓延出防火分区。阶段 4 是指火灾由起火室蔓延到整个防火分区。图 3 所示的事件树是在考虑防火卷帘和消防队的影响下, 分析阶段 4 火灾发展的可能结果。

图 3 从防火卷帘关闭的有效性和消防队及时扑救的有效性的角度, 利用事件树分析了火灾蔓延出

防火分区的可能性, 通过阶段 4 的事件树, 火灾发展超出阶段 4 的概率可以由式 (9) 得到:

$$P_{\text{FPh4}} = P_{\text{FPh3}}(1 - P_{\text{cl}})(1 - P_f) \quad (9)$$

其中, P_{FPh4} —火灾发展超出阶段 4 的概率; P_{cl} —防火卷帘关闭成功的概率。

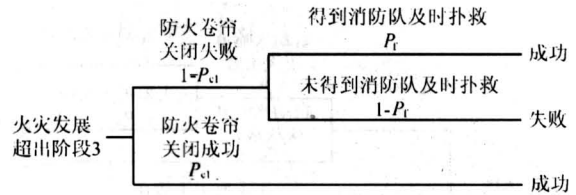


图 3 阶段 4 事件树

Fig.3 Event tree of phase 4

2.5 阶段 4 之后的火灾风险分析

由于起火室所在防火分区的防火卷帘关闭失效且未得到消防队的及时有效扑救, 导致火灾蔓延出防火分区至相邻的防火分区, 这时火灾在相邻的防火分区能否得到有效控制与扑救取决于该防火分区防灭火设备工作的有效性以及消防队扑救的有效性。

3 建筑物发生火灾时平均过火面积预估

在阶段 1, 阶段 2, 阶段 3, 即从起火到旺盛燃烧阶段, 由于火源的热释放速率随时间成 t^2 规律增长, 故可以认为火焰是以着火点为圆心, 以圆形向四周蔓延, 并引燃其他可燃物。过火面积是指火焰蔓延达到的区域的面积。这样, 对于前 3 个阶段的过火面积就可以通过式 (10) 进行计算。

$$A_i = \pi [v(T_{\text{FPhi}} - t_{\text{fa}})]^2 \quad (10)$$

式中: A_i —火灾发展到阶段 i 时, 建筑物的过火面积 (m²) ($i=1, 2, 3$); T_{FPhi} —阶段 i 的临界时间 (s); v —火灾蔓延速度 (m/s), 其大小取决于火灾场景可燃物的特性。

对于阶段 4, 由于火灾已经蔓延至整个防火分区, 此时的过火面积 A_4 应为起火室所在防火分区的面积。

火灾发生后起火室所在防火分区的平均过火面积受以下 2 个因素的影响: 每个阶段的火灾成长率和发展到每个阶段时建筑物的过火面积。通过式 (1), (3), (4), (5), (8), (9), (10), 可以得到火灾发生后起火室所在防火分区的平均过火面积为:

$$A_{FZ} = \sum_{i=1}^3 (A_i \times P_{FPh_i}) + A_4 P_{FPh_4} \quad (11)$$

式中： P_{FPh_i} —火灾发展超出阶段 i 的概率 ($i=1, 2, 3$)； A_{FZ} —起火室所在防火分区的平均过火面积 (m^2)。

4 工程算例

以大型办公楼为工程算例，起火室尺寸为 $20\text{ m} \times 15\text{ m}$ ，层高为 4 m ，有 2 个高 2.1 m ，宽 4 m 的门与走廊相通，起火室所在防火分区的面积为 $1\ 000\text{ m}^2$ 。考虑到该建筑是办公楼，设定为快速增长型火灾，起火室内墙壁不燃或难燃装饰材料，其热惯性取值为混凝土的热惯性。考虑在有和没有安装自动水喷淋灭火系统的 2 种情况下，对建筑物发生火灾时平均过火面积进行预估。各个阶段防灭火设备实施的概率均参照文献 [5] 的相关统计数据。建筑物起火室的相关数据如表 1 所示。

表 1 起火室的相关数据

Table 1 Related data of fire room

起火室的面积/ m^2	20×15
层高/ m	4
开口高度/ m	2.1
开口宽度/ m	4
房间温度/ $^{\circ}\text{C}$	25
环境温度/ K	293.15
火灾成长系数/ $\text{kW}\cdot\text{s}^{-2}$	0.046 89
热惯性/ $\text{kW}^2\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-4}\cdot\text{K}^{-2}$	2
火灾蔓延速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.006

表 4 阶段 3 火灾风险分析的初始条件和计算结果

Table 4 Initial condition and result of fire risk analysis in phase3

初始条件							计算结果				
$\theta_{hi}/^{\circ}\text{C}$	$k\rho C/\text{kW}^2\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-4}\cdot\text{K}^{-2}$	A_T/m^2	A/m^2	H/m	T_{∞}/K	$\theta_0/^{\circ}\text{C}$	P_{FPh2}	P_f	P_{FPh3}	T_{FPh3}/s	A_3/m^2
600	2	880	16.8	2.1	293.15	25	0.09	0	0.09	794	60.94

表 5 阶段 4 火灾风险分析的初始条件和计算结果

Table 5 Initial condition and result of fire risk analysis in phase4

初始条件			计算结果
P_{cl}	P_f	P_{FPh3}	P_{FPh4}
0.91	0.97	0.09	0.000 24

结合表 1 中建筑物起火室的相关数据和式 (1), (3), (4), (5), (8), (9), (10), (11), 在有自动水喷淋的情况下, 各阶段火灾风险评估的初始条件和计算结果如表 2, 3, 4, 5 所示。

表 2 阶段 1 火灾风险分析的初始条件和计算结果

Table 2 Initial condition and result of fire risk analysis in phase1

初始条件					计算结果		
P_{a1}	P_{a2}	P_{a3}	$\alpha/\text{kW}\cdot\text{s}^{-2}$	t_{fa}/s	P_{FPh1}	T_{FPh1}/s	A_1/m^2
0.94	0.81	0.51	0.04689	60	0.12	202	2.28

表 3 阶段 2 火灾风险分析的初始条件和计算结果

Table 3 Initial condition and result of fire risk analysis in phase2

初始条件			计算结果		
P_{b1}	P_{b2}	P_{FPh1}	P_{FPh2}	T_{FPh2}/s	A_2/m^2
0.72	0.38	0.12	0.09	295	6.25

通过表 2, 3, 4, 5 对阶段 1, 2, 3, 4 的火灾风险分析的结果, 可以得出有自动水喷淋的情况下, 该建筑物发生火灾时的平均过火面积。同理, 可以求出没有自动水喷淋的情况下火灾超出各阶段的概率和发生火灾时的平均过火面积, 表 6 是在这 2 种情况下, 该建筑物发生火灾时火灾超出各阶段的概率和平均过火面积的比较。

图 4 是在有和没有自动水喷淋灭火系统 2 种情况时, 对火灾超出各个阶段的概率的比较。

其中 A 表示在没有安装自动水喷淋灭火系统

表 6 两种情况下火灾超出各阶段的概率和平均过火面积

Table 6 Fire growth probability and average burned area under two conditions

	P_{FPh1}	P_{FPh2}	P_{FPh3}	P_{FPh4}	A_{FZ}/m^2
有自动水喷淋系统	0.12	0.09	0.09	0.000 24	6.56
没有自动水喷淋系统	0.49	0.36	0.36	0.001	26.31

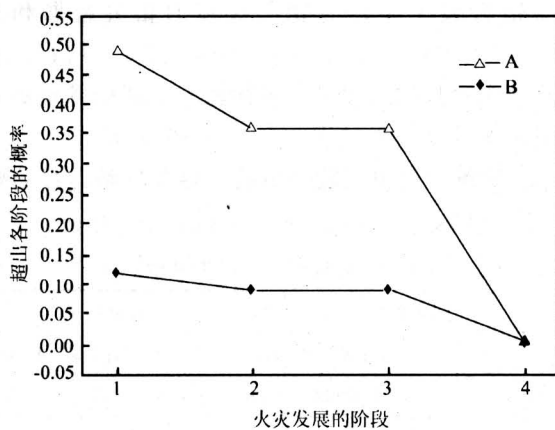


图4 火灾超出各个阶段的概率

Fig.4 Fire growth probability in every phase

的条件下, B是安装有自动水喷淋灭火系统的条件下。通过图4可以看出, 安装有自动水喷淋灭火系统时, 火灾发生的概率降低了很多。

5 结论

结合该评估方法, 参考相关统计数据, 针对办公楼进行了火灾风险分析。结果表明, 当办公楼

安装自动水喷淋系统时, 火灾发生后的平均过火面积仅为 6.56 m^2 , 如果没有安装自动水喷淋系统, 其平均过火面积可达 26.31 m^2 。

参考文献

- [1] 公安部消防局. 中国火灾统计年鉴 2001 版 [M]. 北京: 中国人事出版社, 2001
- [2] Johansson H. Investment appraisal using quantitative risk analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2002, 93: 77~91
- [3] Frantzich H. Risk analysis and fire safety engineering [J]. *Fire safety Journal*, 1998, 31: 313~329
- [4] 霍然, 袁宏永. 性能化建筑防火分析与设计 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2003
- [5] 东京消防庁火災予防審議會. 建築物の防災特性に応じた防火安全性の総合評価 [M]. 平成 13 年 3 月
- [6] Mccaffrey B J, Quintiere J G, Harkleroad M F. Estimating room temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations [J]. *Fire Technology*, 1981, 17 (2): 98~119
- [7] 陈爱平. Mccaffrey 等估计轰燃前火灾温度方法的改进 [J]. *火灾科学*, 2003, 12 (2): 58~64

Building Fire Direct Loss Evaluation Based on Fire Dynamics and Probability Statistics Theory

Chu Guanquan, Sun Jinhua

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

[Abstract] Based on fire growth probability and burned area, the method for evaluating burned area in building fire is presented in this paper. According to fire dynamics and different characteristics in fire growth process, the process is divided into four phases. By means of probability theory and event tree analysis, fire growth probability and critical time of every phase are calculated. Average burned area of building can be evaluated.

[Key words] building fire; fire risk evaluation; event tree; probability; burned area