

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.042



在建建筑火灾轰燃数值仿真研究

杨祎, 赵平

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055)

摘要:为研究在建建筑特殊火灾的轰燃现象,建立火灾能量守恒方程,基于燕尾突变理论确定突变势函数,计算出在建建筑火灾轰燃时上层烟气的临界温度。利用模拟软件 FDS 对在建建筑不同施工场景进行仿真模拟,得到火灾特征参数值。结果表明:不同施工阶段的火灾可燃物不同,发生轰燃的时间点不同;随着通风风速的增加,火灾热释放速率增长逐渐放缓,烟气可见度增长加快,一定的通风速度有助于提高排烟效率;不同火源位置火灾特征不同,狭窄空间更容易发生轰燃,未封闭楼梯间处烟囱效应明显。

关键词:在建建筑;火灾;燕尾突变;数值仿真;热释放速率

中图分类号:TU714 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)02-0159-08

Numerical simulation of fire flashover in building under construction

Yang Yi, Zhao Ping

(College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: In order to study flashover phenomenon of special fire in building under construction, a fire energy conservation equation was first established in this paper. Then, the critical temperature of thermal smoke during the flashover was determined by the catastrophe potential function based on the swallowtail catastrophe theory. Finally, the software FDS was adopted to simulate the fire flashover considering different construction scenarios, so that the corresponding fire characteristic parameters can be obtained. The results show that different fire combustible materials at different construction stages lead to different flashover time points. With the increase of ventilation velocity, the rate of fire heat release increases slowly, whereas the visibility of smoke increases rapidly. In addition, the fire characteristic parameters are highly related to the fire sources. Thus, flashover is more likely to occur in narrow space, leading to an obvious chimney effect, especially for the unclosed stairwell.

Keywords: building under construction; fire; swallowtail catastrophe; numerical simulation; heat release rate

收稿日期:2018-06-12

基金项目:陕西省自然科学基金(2014JM2-5046);陕西省科技统筹创新工程计划(2015KTCQ03-18、2015KTZDSF03-05-03)

作者简介:杨祎(1993-),女,主要从事土木工程施工与管理研究,E-mail:13488320830@163.com.

赵平(通信作者),女,教授,博士生导师,E-mail:13909208708@163.com.

Received:2018-06-12

Foundation item: Shaanxi Province Natural Science Foundation (No. 2014JM2-5046); Shaanxi Province Science and Technology Co-ordination Innovation Plan Project (No. 2015KTCQ03-18, 2015KTZDSF03-05-03)

Author brief: Yang Yi (1993-), main research interests: civil engineering construction and management, E-mail: 13488320830@163.com.

Zhao Ping (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: 13909208708@163.com.

在建筑施工过程中,工程建设周期长,多方主体的联合参与,以及复杂的工程内部结构与工作界面,导致更多消防安全隐患。与既有建筑相比,在建建筑具有三大火灾特征:一是施工过程中大量堆放的可燃与易燃材料,当接触明火等火源时,极易被引燃并产生大量浓烟;二是在建建筑楼内无消防设施,管道井、楼梯井、门窗洞口未封闭,容易发生立体火灾;三是在建建筑没有形成完整的消防喷淋、疏散指示与应急报警系统,一旦起火,将严重威胁现场工人的生命安全。综合考虑在建建筑自身的特性,与已建建筑相比,发生火灾后,热释放速率与烟气蔓延规律会存在很大区别^[1]。在建建筑火灾中,轰燃是火灾发展过程中最危险的燃烧阶段,是空间内局部火转变成整体火的突变点^[2],轰燃发生时,暴露于热辐射范围内的所有可燃物表面将同时达到可燃点^[3],预示着人员疏散逃生与消防扑救灭火将十分困难。

目前,学者们对建筑火灾进行了大量的研究^[4-8]。针对火灾轰燃的研究主要包括理论计算、实验分析与数值模拟。理论计算方面,Graham等^[9]依据双区域模型和热爆理论,研究了受限空间在单个出口下的烟气蔓延特性,认为墙壁热惯性对轰燃发生的时间参量有重要影响。陈爱平等^[10]利用混沌理论,得到通过温度变化率表征的轰燃判据。实验分析方面,陆时正等^[11]通过小规模火灾实验,提出温度分布均匀性指数,认为其最小值对应的时间是轰燃发生的时间。张磊等^[12]基于全尺寸室内实体火灾实验,建立了单室轰燃的温升模型。数值模拟方面,韩如适等^[13]验证了FDS大涡模拟研究实体建筑轰燃特性的可靠性。李镇江等^[14]利用FDS研究住宅外墙外保温火灾,当起火面窗、墙比为0.30时,起火房间有明显的轰燃现象。这些研究都推动了建筑火灾轰燃的发展,但前人的研究对象多为已建建筑,在建建筑的相关研究很少。鉴于此,本文以在建建筑火灾为研究对象,引入非线性动力学突变理论,系统分析在建建筑火灾中的轰燃行为,计算发生轰燃的临界温度,并利用数值模拟FDS软件对在建建筑不同施工阶段、不同通风风速以及不同火源点位置场景进行进一步分析,研究结果可为施工单位实施自救和消防单位灭火提供理论依据与技术支持。

1 在建建筑火灾能量守恒方程的构建

轰燃是火灾发展中典型的非稳态与非线性突变现象,通过分析在建建筑火灾中火源类型、烟气层厚度、壁面热物性对轰燃的影响作用,获得轰燃的演化规律。在建建筑室内发生火灾后,会在顶棚处形成热烟气层,上层热烟气层温度 T 随时间 t 的变化受热增益 G 和热损失 L 两方面影响,建立方程前,

假设:

1)火源及其周边划分为一个区域,该区域被热间断面分割为热烟气层和冷空气层两部分;

2)区域内热间断面高度不变,热烟气层密度不变,冷空气层的热物性与外界环境相当;

3)火源与烟气层之间的辐射热反馈主要来自该区域,忽略火源与其他区域的热辐射。

以该区域为研究系统建立能量守恒方程^[15]

$$\frac{dT}{dt} = \frac{G-L}{c_p m} \quad (1)$$

式中: c_p 为气体定压比热; m 为烟气层质量。

热增益 G 表示燃料燃烧所产生的热能,在建建筑施工过程中,区域内会集中堆放大量木模板、外墙保温板等可燃物,相比于平均冷空气的流入速率,可燃物的燃烧速率更快,火灾的发展属于燃料控制型。热增益 G 与可燃物的质量损失速率 \dot{m}_f 与燃烧热 Δh_c 成正比,通过引入参数燃烧效率 χ ,建立可燃物燃烧的线性函数来控制火源的热能。

$$G = \chi \dot{m}_f \Delta h_c \quad (2)$$

热损失 L 表示区域内烟气的热量损失,在建建筑内,热损失 L 由通过壁面与地面热辐射散失的热流量 Q 以及由于未封闭的门窗从当前区域流出的热流量 H 两部分之和组成。

其中, Q 可表示为

$$Q = \varepsilon A_w (T^4 - T_w^4) + h_t A_w (T - T_w) \quad (3)$$

式中: ε 为热烟层流辐射率; σ 为斯蒂芬波兹曼常数; A_w 为中性面以上壁面面积; T_w 为壁面温度; h_t 为热对流系数。

H 可表示为

$$H = \dot{m}_i c_p (T - T_0) + \dot{m}_o c_p (T - T_0) \quad (4)$$

式中: \dot{m}_o 为冷空气的流入速率; T_0 为环境温度。

根据火源特性以及区域环境对火源的热反馈,得到可燃物燃烧质量损失速率 \dot{m}_f ,可表示为

$$\dot{m}_f = \frac{A_f}{\Delta h_{vap}} [\dot{q}'' + \alpha_U(T) \sigma (T^4 - T_0^4)] \quad (5)$$

式中: A_f 为火源面积; Δh_{vap} 为可燃物的热解热; \dot{q}'' 为从火焰运输到火源的热流率; $\alpha_U(T)$ 为温度为 T 时热烟气层辐射反馈系数。

对能量方程进行化简,引入如下参数对变量进行无量纲变换: $\theta = \frac{T}{T_0}$, $\theta_w = \frac{T_w}{T_0}$, $\tau = \frac{t}{t_w}$, $t_w = \frac{mc_p T_a}{Q_0}$, $Q_0 = \frac{\chi A_f \dot{q}''}{\Delta h_{vap}}$,令 $(\theta_w - 1)/(\theta - 1) = \beta$ ^[16]。

经过上述一系列变换,得到在建建筑火灾能量守恒方程为

$$\frac{d\theta}{d\tau} = a_1 \theta^4 + a_2 \theta^3 + a_3 \theta^2 + a_4 \theta + a_5 \quad (6)$$

式中: $a_1 = -\epsilon_w(1-\beta^4) + \epsilon_{k_1} + \epsilon_{k_2}$; $a_2 = 4\epsilon_w(1-\beta)\beta^3$;
 $a_3 = 6\epsilon_w(1-\beta)^2\beta^2$; $a_4 = 4\epsilon_w(1-\beta)^3\beta - \epsilon_{w_1}(1-\beta) - \epsilon_0$;
 $a_5 = 1 - \epsilon_{k_1} - \epsilon_{k_2} + \epsilon_w(1-\beta)^4 - \epsilon_{w_1}(\beta-1) + \epsilon_f$,
 $\epsilon_{k_1} = \frac{\chi A_f \Delta h_c}{\Delta h_{vap}} a_{U_1} \sigma T_0^4 / Q_0$, $\epsilon_{k_2} = \frac{c_p A_f T_0}{\Delta h_{vap}} a_{U_1} \sigma T_0^4 / Q_0$,
 $\epsilon_f = \frac{c_p A_f T_0 \ddot{q}''}{\Delta h_{vap}} / Q_0$, $\epsilon_w = A_w \sigma T_0^4 / Q_0$, $\epsilon_0 = c_p \dot{m}_o T_0 / Q_0$,
 $\epsilon_{w_1} = A_w h_f T_0 / Q_0$.

通过分析得到,在各个参数中, ϵ_{k_1} 、 ϵ_{k_2} 、 ϵ_f 与在建建筑中可燃物的燃烧特性直接相关, ϵ_w 、 ϵ_{w_1} 受壁面及地面热辐射的影响, ϵ_0 受未封闭门窗的影响。考虑在在建建筑中,建筑结构中的楼板、剪力墙等多以现浇混凝土为主,混凝土作为热惯性较大的蓄热材料,参数 β 可近似取值为 0.1。

2 在建建筑火灾轰燃突变分析

2.1 构建在建建筑火灾轰燃突变模型

从系统安全学的角度,在建建筑发生火灾轰燃事故的原因:施工现场堆积大量可燃、易燃施工材料;未封闭门窗洞口带来的空气补给以及无消防喷淋设施,导致有限空间内热辐射集聚。所以,在建建筑火灾是否发生轰燃,主要取决于 3 个控制变量,分别表示为 u 、 v 和 w , 突变理论中的燕尾突变与之相符。燕尾突变的势函数为^[17]

$$V = x^5 + ux^3 + vx^2 + wx \tag{7}$$

对燕尾突变势函数进行求导并令其等于 0,得到燕尾突变的平衡曲面表达式为

$$5x^4 + 3ux^2 + 2vx + w = 0 \tag{8}$$

对平衡曲面方程求导,得到分岔集方程表达式为

$$20x^3 + 6ux + 2v = 0 \tag{9}$$

联立式(8)和式(9),即可得到燕尾突变分岔集的方程组

$$\begin{cases} v = -10x^3 - 3ux \\ w = 15x^4 + 3ux^2 \end{cases} \tag{10}$$

根据在建建筑火灾轰燃的特性以及拓扑学原理,将式(6)的能量守恒方程转换,求解燕尾突变势函数。根据 $\frac{dV}{d\theta} = \frac{d\theta}{d\tau}$, 对式(6)进行积分,自定义微分同胚项为

$$\theta = x + k, k = -\frac{a_2}{4a_1} \tag{11}$$

化简整理后,得到在建建筑火灾轰燃燕尾突变势函数表达式,即

$$V = \frac{a_1}{5}(x^5 + ux^3 + vx^2 + wx) \tag{12}$$

式中: $u = \frac{5}{a_1}(\frac{a_3}{3} - \frac{a_2^2}{8a_1})$; $v = \frac{5}{a_1}(\frac{a_4}{2} - \frac{a_3 a_2}{4a_1} + \frac{a_2^3}{16a_1^2})$;

$$w = \frac{5}{a_1}(\frac{a_3 a_2^2}{16a_1^2} - \frac{3a_4^2}{256a_1^3} - \frac{a_4 a_2}{4a_1} + a_5)$$

2.2 在建建筑火灾轰燃理论分析

根据式(6),带入参数 β 值,实际状态下的在建建筑火灾大多受燃料控制,因此, $\epsilon_{k_1} > \epsilon_w$, $\epsilon_{k_2} > \epsilon_w$, $a_1 = \epsilon_{k_1} + \epsilon_{k_2} - 0.9999\epsilon_w > 0$, $a_2 = 0.0036\epsilon_w > 0$, $a_3 = 0.0486\epsilon_w > 0$, 得到 $a_1/a_2 > 1$, 所以, $u > 0$ 。当 $u > 0$ 时, v 是 x 的奇函数, w 是 x 的偶函数, 由于 x 仅在 $> a_2/4a_1$ 才有意义, 因此, 当 $u > 0$ 时, $v < 0$, $w > 0$ 。

取 $u > 0$ 时的任一值,可以得到燕尾分叉集曲线,如图 1 所示。曲线将 $v-w$ 空间分成两个区域,第 1 区与第 2 区,取处于第 1 区的点 $(-1\ 000, 5\ 000)$, 其势函数曲线 V 如图 2 所示。图 2 所示曲线有两个临界点,其中 A 点为极大值点,当 x 大于极大值点 A 时,系统势函数曲线会迅速滑落到点 B, 由此可知, A 点为不稳定点,即火灾轰燃的临界点, B 点为稳定点,即火灾进入完全发展的稳定阶段^[18], 所以, 第 1 区为轰燃区。

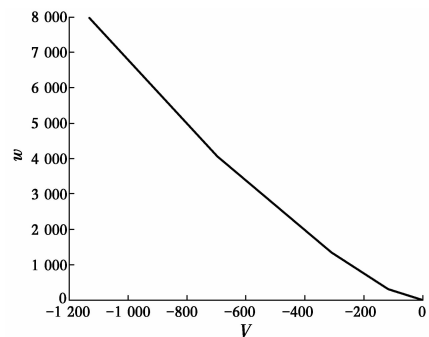


图 1 燕尾突变分叉集曲线 ($u=5$)

Fig. 1 Swallowtail catastrophe bifurcation set curve ($u=5$)

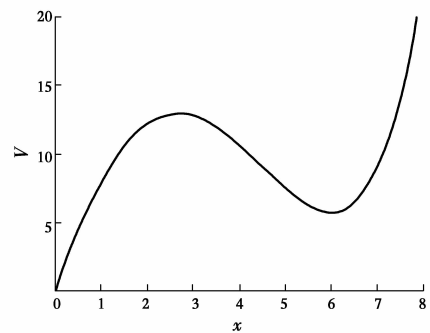


图 2 点 $(u, v, w) = (5, -1\ 000, 5\ 000)$ 的势函数曲线

Fig. 2 Potential function curve at $(u, v, w) = (5, -1\ 000, 5\ 000)$

取处于第 2 区的点 $(-400, 6\ 000)$, 如图 3 所示, 其势函数曲线 V 没有临界点, x 没有实根, 所以, 第 2 区为非轰燃区。因此, 可以通过系统参数处于哪个区来判断在建建筑火灾是否发生轰燃现象。

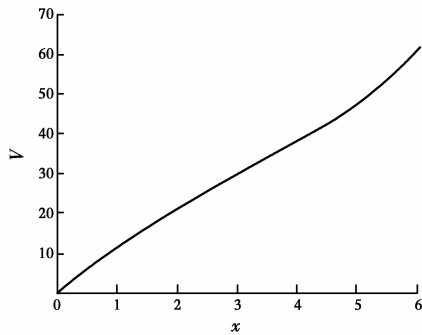


图 3 点 $(u, v, w) = (5, -400, 6\ 000)$ 的势函数曲线
Fig. 3 Potential function curve at $(u, v, w) = (5, -400, 6\ 000)$

2.3 实例计算

选取西安市某在建商住楼为研究对象。项目主体为现浇混凝土剪力墙结构,占地面积约 1 243.44 m²,建筑高度 61.4 m。建筑地上 1 层为商业,层高 4.2 m,门尺寸为 2.1 m×3 m,窗尺寸为 1.5 m×2.4 m。2~20 层为住宅,层高 3 m,门尺寸为 0.9 m×2.1 m,窗尺寸为 1.5 m×1.8 m。当施工处于装饰、装修施工阶段时,由于用火不慎,点燃室内集中堆放的保温板,导致火灾的发生。在建建筑无喷淋和机械排烟系统,门窗均未安装,为自然排烟状态。为了验证在建建筑火灾轰燃的可能性,列出在建建筑火灾的基本参数如表 1,表中参数分为热传递参数、材料燃烧参数与建筑模型参数 3 类,热传递参数参考加利福尼亚大学的腔室火灾轰燃热辐射研究结果^[19],材料燃烧参数参考中国建筑科学研究院对于建筑材料的研究^[20],建筑模型参数取于实例模型计算数据。

表 1 在建建筑火灾的基本参数

Table 1 The basic fire parameters of construction building

气体定压比热容 $c_p /$ ($J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$)	热烟层流辐 射率 ϵ	燃烧效率 χ
1 003.2	0.45	0.73
斯蒂芬波兹曼常数 $\sigma /$ ($W \cdot (m^{-2} \cdot K^{-4})$)	冷空气的流入速率 $\dot{m}_o / (kg \cdot s^{-1})$	热对流系数 $h_c /$ ($W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$)
5.67×10^{-8}	2.83	6
可燃物的质量损失速 率 $\dot{m}_f / (kg \cdot s^{-1})$	从火焰输运到火源的 热流率 \dot{q}'' / W	燃烧热 $\Delta h_c /$ ($kJ \cdot kg^{-1}$)
5.8×10^3	8.1×10^5	2.05×10^4
火源面积 A_f / m^2	环境温度 T_0 / K	可燃物的热解热 $\Delta h_{vap} /$ ($kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}$)
6.5	293.15	1 350
中性面以上壁面 面积 A_w / m^2	热烟气层辐射 反馈系数 $\alpha_U (T)$	
33.84	0.4	

根据表 1 的数据计算得到, $a_1 = 0.002\ 6, a_2 = 0.002\ 4, a_3 = 0.005\ 1, a_4 = -0.773, a_5 = 1.99, u = 2.74, v = -746.30, w = 4115.42$ 。当 $u = 2.74$ 时,点 $(-746.30, 4\ 115.42)$ 位于燕尾分叉突变集的第 1 区(轰燃区),判断此在建建筑火灾会发生轰燃现象,相应的燕尾突变微商曲线如图 4 所示。

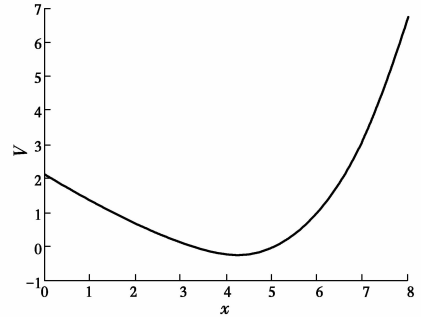


图 4 实例的燕尾突变势函数微商曲线

Fig. 4 Differential coefficient curve of potential function

由图 4 可知,燕尾突变势函数曲线存在奇点 A 与奇点 B,其中 A 点为火灾轰燃的临界点,B 点为火灾进入完全发展的稳定点,此时 $x_A = 3.27, x_B = 4.93$,根据式(11),得到 $k = -0.230\ 8, \theta = 3.039\ 2$,根据 $\theta = T/T_0$,得到火灾轰燃时上层热烟气层温度 $T = 890.94\ K$,即当上层热烟气层的温度达到 617.79 °C 时,在建建筑将会发生轰燃。

3 在建建筑火灾数值仿真模拟

3.1 FDS 计算模型与火灾场景的构建

3.1.1 模型的网格划分与初始参数设定 数值仿真模拟方法因速度快、成本低而被广泛采用,已有研究表明,利用 FDS 模拟建筑火灾情况取得的结果与全尺寸火灾试验的结果具有较好的一致性。FDS 模拟采用与理论计算相同的在建建筑模型,考虑模型房间之间通过门洞、窗洞相通,并且没有消防扑救及自动灭火系统,如果某一房间发生火灾,则很有可能发生轰燃。研究表明,轰燃发生有 3 个判据:室内接近顶棚热烟气温度超过 600 °C;室内地板平面辐射热通量超过 20 kW/m²;火焰沿室内顶棚开展,并喷出开口。考虑与火灾试验的结果一致性,采用 $Q = \alpha t^2$ 的火灾模型来确定火灾热功率。对于 α 的设定,参考欧洲《结构抗火设计规范》、中国《建筑火灾荷载》等建筑中常用材料燃烧热数据。按室内可能出现的最大热释放速率场景,选取模型火源分别设定在一层大厅与一层东侧楼梯口,面积为 1.0 m×1.0 m,热功率 1 s 内增长至最大值,计算得到模型火源

热功率参数约为 1 MW。模型采用均匀网格划分法,经美国国家标准与技术研究所(NIST)试验验证,网格尺寸 d 为火灾特征直径 D^* 的 $1/16 \sim 1/4$ 倍时,模拟结果与试验结果比较吻合,计算得到 D^* 为 0.96。选取网格尺寸 $d=0.2$ m,得到模型的网格总数为 2 145 000 个。火源、温度探测点以及烟气可见度探测点平面位置布置如图 5 所示,探测点高度设置在 $h=3.5$ m 处,火源布置在可燃物表面,模拟时间设置为 600 s。

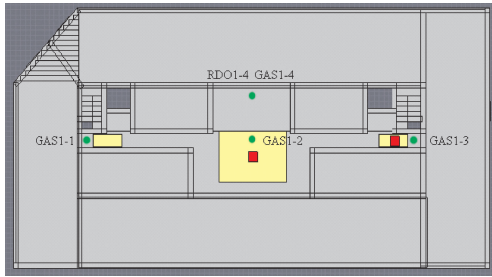


图 5 火源点及探测点位置

Fig. 5 Location of ignition point and detection point

3.1.2 火灾场景 对在建建筑进行 FDS 仿真模拟时,最重要的是对火灾热释放速率进行估算,火灾热释放速率的大小不仅与可燃物本身的性质直接相关,也受通风条件与着火点位置的影响。通风条件和通风因子 $A \sqrt{H}$ 与通风风速相关,其中, A 表示通风口面积, H 表示通风口高度。当火灾处于燃料控制阶段时,通风因子的改变对火源基本没有影响,考虑与理论计算结果形成对比,数值仿真以燃料控制阶段为研究对象。因此,模拟变量考虑了可燃物、通风风速与着火点位置,对在建建筑的不同施工阶段、不同通风风速以及不同火源点位置设置了对比场景,以研究不同因素对在建建筑的火灾热释放速率的影响,模拟场景如表 2 所示。

表 2 火灾场景设计表

Table 2 Fire scene design

火灾场景	施工阶段	火源点位置	通风风速/($m \cdot s^{-1}$)
场景 1	主体结构阶段	一层大厅	5.0
场景 2	装饰装修阶段	一层大厅	0.0
场景 3	装饰装修阶段	一层大厅	2.5
场景 4	装饰装修阶段	一层大厅	5.0
场景 5	装饰装修阶段	一层大厅	7.5
场景 6	装饰装修阶段	一层大厅	10.0
场景 7	装饰装修阶段	一层大厅	12.5
场景 8	装饰装修阶段	一层东侧楼梯口	5.0

3.2 模拟结果及数据分析

3.2.1 不同施工阶段的模拟对比分析 在建建筑火灾中,由于施工阶段不同,存放的主要可燃物不同,导致燃烧程度不同,热释放速率也不同。其中,主体结构阶段的主要可燃物为木模板,装饰装修阶段的主要可燃物为保温板,不同施工阶段的燃烧场景如图 6 所示。

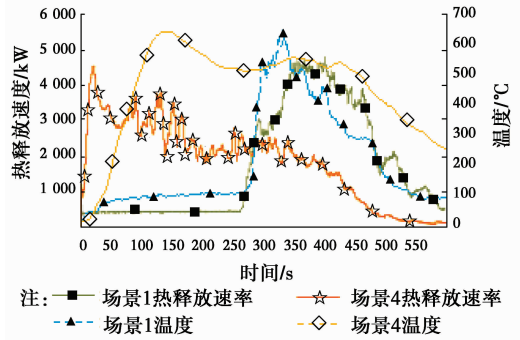


图 6 不同施工阶段的热释放速率与温度对比曲线

Fig. 6 Comparison curves of heat release rate and temperature in different construction stages

由于保温板材料具有较大的热解速率,场景 4 在燃烧初期的热释放速率曲线急剧上升,可燃物在短时间内快速燃烧,达到最大热释放速率 4 746.39 kW,之后,可燃物继续燃烧分解,燃烧生成的高温烟气在顶棚下积聚,形成上部的热烟气层,热烟气层随着顶棚射流在流动过程中不断加厚,导致温度越来越高。选取温度探测点 RDO1-4(如图 5)的数据,其烟气层最高温度达到 643.43 °C,超过轰燃的临界温度(617.79 °C)。观察烟气流动模型,在 120 s 时,空间内发生局部火向整体火的转变。通过场景 1 的热释放速率曲线可以看出,火灾初期木模板一直在小范围内燃烧,经历了较长时间的阴燃阶段,烟气层慢慢积聚。起初,温度一直保持在 100 °C 左右,但在 265 s 时,可燃物的热释放速率曲线与烟气温度曲线突然发生突变,在 50 s 内,烟气层最高温度达到 648.46 °C,最大热释放速率达到 4 564.71 kW,此时,可燃物被全部引燃。观察烟气流动模型,门窗洞口喷出大量烟气,在建建筑发生火灾轰燃。根据模拟结果可以得到,火灾的可燃物无论是保温材料还是木模板材料,当上层烟气温度超过理论计算的临界轰燃温度时,均会发生火灾轰燃现象,验证了突变理论模型的可靠性。由于可燃材料特性的不同,导致发生剧烈燃烧的时间点不同。所以,当在建建筑发生火灾时,施工单位应先清楚施工所处的阶段、火灾发生的原因、燃烧材料等,准确对火灾部位采取灭

火隔离措施,防止发生火灾轰燃现象。

3.2.2 不同通风条件的模拟对比分析 考虑在建建筑火灾处于燃料控制型阶段,建筑物门窗均未安装,因此,不同的通风风速将会对在建筑火灾中的热释放速率与烟气可见度产生较大影响,直接影响在建建筑火灾的发展。6 种常见风速的燃烧场景如图 7 所示。

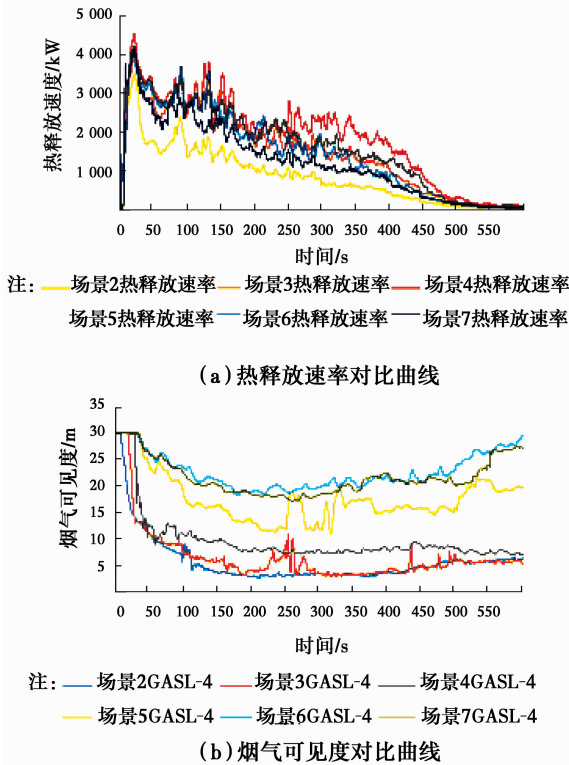


图 7 不同通风风速的热释放速率与烟气可见度对比曲线

Fig. 7 Comparison curves of heat release rate and smoke visibility under different ventilation conditions

场景 2 至场景 7 的风速呈梯度增长,当通风风速为 0、2.5、5 m/s 时,对比图 7(a)中热释放速率曲线可以看出,峰值随着风速的增长逐渐增大。对比位于大厅的 GAS1-4(如图 5)探测点测得的烟气可见度曲线,3 个场景曲线稍有不同。说明当通风风速小于 5 m/s 时,随着风速的不断增长,火灾热功率逐渐接近最大值,持续进入的空气维持着可燃物的燃烧,使得烟气可见度较低。当通风风速为 5、7.5、10 m/s 时,在燃烧初期,3 个场景热释放速率曲线基本一致,均在短时间内达到 4 000 kW 以上,当燃烧持续一段时间后,场景 5、场景 6 的热释放速率曲线下降幅度大于场景 4,说明当火灾功率达到最大值后,热释放速率增长幅度随着通风风速的增加而减缓。对比场景 4 至场景 7 在 GAS1-4 探测点处的烟气可见度曲线可知,增大通风风速可以明显改善烟

气可见度,增加排烟效率,但是,当通风风速增大至 10 m/s 时,继续增大通风风速,排烟效果逐渐趋于一致。因此,在在建建筑火灾中,当建筑物中已经烟气弥漫时,可以利用未封闭的门窗与竖井,给予 10 m/s 的高压通风,提高排烟能力。

3.2.3 不同火源位置的模拟对比分析 火源位置不同,火源附近区域内热释放速率与烟气浓度分布不同,火灾烟气中含有大量有毒气体,如 CO、SO₂ 等,会导致施工人员因烟气中毒而昏迷,以至死亡。不同火源位置的燃烧场景如图 8 所示。

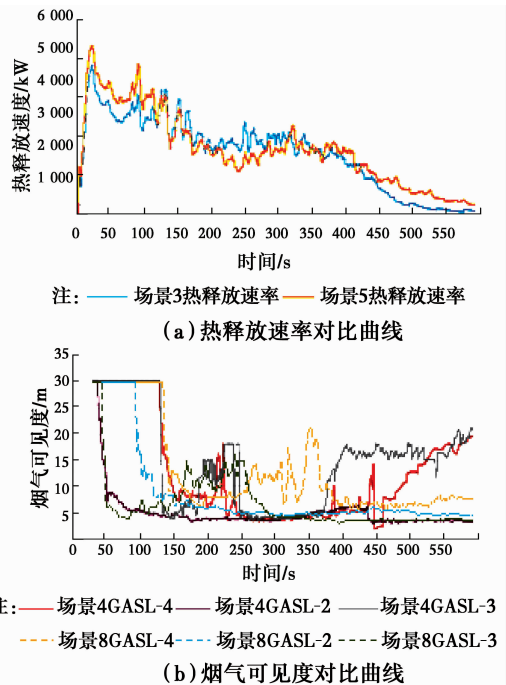


图 8 不同火源位置的热释放速率与烟气可见度对比曲线

Fig. 8 Comparison curves of heat release rate and smoke visibility at different fire locations

对比热释放速率曲线可以看出,两场景均在短时间内快速增长到 4 500 kW 以上,但是,由于火源位置不同,曲线最大热释放速率不同。位于一层东侧楼梯口处的火源,受到墙壁热辐射的影响,热量更容易集聚,热释放速率更大,更容易发生轰燃,而位于一层大厅处的火源,遮挡结构较少,通风环境良好,火灾热释放速率相对较低。相比于热释放速率曲线,不同火源位置对烟气流动也会产生很大影响。当火源位于一层大厅处时,燃烧烟气在顶棚聚集后沿着走廊向水平方向对称扩散,在 200 s 时场景 4 的 GAS1-1 与 GAS1-3(如图 5)探测点测得的烟气可见度突然增大,说明烟气通过开敞竖井向上蔓延,由于受到走廊尽头开敞门洞的影响,当烟气层厚度达到门洞上方垂壁高度后,烟气顺着门洞溢出。在燃烧

后期,烟气可见度渐渐增大,施工人员可从两端出口分流疏散。当火源位于一层东侧楼梯口时,高温区域向东侧楼梯口偏移,由于未封闭楼梯间等开敞竖井内、外压力的不同,燃烧烟气首先会竖向流动,形成烟囱效应,场景8的GAS1-3曲线在100s时发生较大震动,说明楼梯间起到了明显的分烟流作用。由于火源对走廊西侧的辐射作用较弱,场景8的GAS1-1测点测得的最终烟气可见度稍大,判断从西侧出口进行撤离最佳。所以,在火灾发生以后,施工单位组织施工人员逃生时,必须清楚火源发生的位置,根据不同的位置采取不同的疏散方式。

4 结论

以在建建筑为研究对象,建立火灾燃烧的能量守恒方程,将系统动力学理论中的燕尾突变理论引入在建建筑火灾轰燃现象的研究中,计算了轰燃临界温度取值。运用火灾数值模拟软件FDS对在建建筑不同施工阶段、不同通风风速以及不同火源位置进行仿真模拟,得到以下结论:

1)不同施工阶段可燃材料燃烧特性不同,导致轰燃发生的时间点不同,应根据不同场景分别采取灭火措施。

2)当通风风速较小,火灾热功率尚未达到最大值时,增大风速容易增加火灾热释放速率,造成可燃物的剧烈燃烧。继续增加通风风速,火灾热功率达到最大值后,通风风速能明显改善在建建筑内的烟气可见度。

3)不同火源位置最大热释放速率以及烟气流动规律不同,位于空旷位置的火源不易发生轰燃,当火源附近有遮挡结构时,热量更容易集聚,热释放速率更大。由于烟气容易向压强小的空间蔓延,在建建筑中,未封闭的楼梯间处烟囱效应更加明显。

参考文献:

[1] 杨跃奎,吴蕾. 在建建筑火灾烟气流动影响因素分析[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(1): 46-49.
YANG Y K, WU L. Research on the influence factors on the fire smoke movement in building under construction [J]. Fire Science and Technology, 2016, 35(1): 46-49. (in Chinese)

[2] 倪天晓. 高速铁路隧道列车火灾烟气蔓延规律及控制特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
NI T X. Study on spread laws and control characteristics of train fire smoke in high-speed railway tunnel [D]. Changsha: Central South University,

2013. (in Chinese)

[3] National Fire Protection Association. Auide for fire and explosion investigations: NFPA 921:2004 [S]. Quincy Massachusetts, 2004.

[4] IOANNOU I, ASPINALL W, RUSH D, et al. Expert judgment-based fragility assessment of reinforced concrete buildings exposed to fire [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 167: 105-127.

[5] WU C D, ZARRINMEHR S, ASL M R, et al. Facilitating fire and smoke simulation using building information modeling [M]. Berlin, Heidelberg: Communications in Computer and Information Science, 2015: 366-382.

[6] GERGES M, MAYOUF M, RUMLEY P, et al. Human behaviour under fire situations in high-rise residential building [J]. International Journal of Building Pathology and Adaptation, 2017, 35(1): 90-106.

[7] UKANWAK U, SHARMA U, HICKS S J, et al. Behaviour of continuous concrete filled steel tubular columns loaded concentrically in fire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 136: 101-109.

[8] 郭震,袁迎曙. 住宅建筑内火灾高温烟气流动规律试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(4): 150-156.
GUO Z, YUAN Y S. Experimental analysis of building space constructions on hot-smoke flow in residential fire [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(4): 150-156. (in Chinese)

[9] GRAHAM T L, MAKHVILADZE G M, ROBERTS J P. On the theory of flashover development [J]. Fire Safety Journal, 1995, 25(3): 229-259.

[10] 陈爱平,宋飞. 基于混沌理论的室内轰燃判据[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(6): 622-627.
CHEN A P, SONG F. An enclosure flashover criterion based on chaos theory [J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(6): 622-627. (in Chinese)

[11] 张磊,朱国庆,赵国祥. 基于全尺寸火灾实验的单室轰燃温升模型[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(8): 821-825.
ZHANG L, ZHU G Q, ZHAO G X. Study on temperature rising model of flashover in single room based on full-scale fire experiment [J]. Fire Science and Technology, 2013, 32(8): 821-825. (in Chinese)

[12] 陆时正,何重斌,陈爱平. 室内火灾均一温度假设实验研究[J]. 消防科学与技术, 2012, 31(3): 239-242.
LU S Z, HE Z B, CHEN A P. Experimental researches on the homogeneous temperature assumption in compartment fires [J]. Fire Science and Technology,

- 2012,31(3):239-242. (in Chinese)
- [13] 韩如适,朱国庆,张国维,等. 实体建筑轰燃特性大涡模拟可靠性分析[J]. 消防科学与技术,2013,32(5):499-507.
HAN R S, ZHU G Q, ZHANG G W, et al. Reliability study on characteristics of flashover based on large eddy simulation [J]. Fire Science and Technology, 2013,32(5):499-507. (in Chinese)
- [14] 李镇江,段海娟,赵永峰,等. 窗墙面积比对高层住宅外墙外保温火灾蔓延的影响分析[J]. 防灾减灾工程学报,2014,34(4):479-484.
LI Z J, DUAN H J, ZHAO Y F, et al. Analysis of influence of window-wall ratio on exterior insulation fire spread of highrise residence [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(4):479-484. (in Chinese)
- [15] BISHOP S R, HOLBORN P G, BEARD A N, et al. Nonlinear dynamics of flashover in compartment fires [J]. Fire Safety Journal,1993,21(1):11-45.
- [16] GRAHAM T L, MAKHVILADZE G M, ROBERTS J P. The effects of the thermal inertia of the walls upon flashover development [J]. Fire Safety Journal, 1999, 32(1): 35-60.
- [17] 李乃文,王悦惠. 突变理论视角下突发群体事件演化机理研究[J]. 中国安全科学学报,2015,25(2):159-164.
LI N W, WANG Y H. Study on evolution mechanism of sudden mass incidents from perspective of catastrophe theory [J]. China Safety Science Journal, 2015,25(2):159-164. (in Chinese)
- [18] 翁文国,范维澄. 建筑火灾中轰燃现象的突变分析[J]. 火灾科学,2003,12(2):51-57.
WENG W G, FAN W C. Catastrophe analysis of flashover in building fires [J]. Fire Safety Science, 2003,12(2):51-57. (in Chinese)
- [19] YUEN W W, CHOW W K. The role of thermal radiation on the initiation of flashover in a compartment fire [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2004,47:4265-4276.
- [20] 王金平. 建筑火灾荷载[M]. 北京:化学工业出版社,2016.
WANG J P. Building fire load [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016. (in Chinese)
- (编辑 王秀玲)
-
- (上接第 146 页)
- LI G H, DENG S H, LI C G, et al. BIM conflict inspection and optimization of assembly building structure [J]. Architecture Technology, 2016, 47(7):645-647. (in Chinese)
- [14] HUANG W Q, WANG G Q. A quasi-mechanical method for solving the rectangle covering problem-An approach to tackling NP hard problems [J]. CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 1994, 56(3): 267-271.
- [15] 王竹婷,刘林,程浩,等. 改进的最低水平线搜索算法求解矩形排样问题[J]. 工程设计学报,2009,16(2):98-102.
WANG Z T, LIU L, CHENG H, et al. Study on solving rectangular packing problem by utilizing improved lowest horizontal search algorithm [J]. Journal of Engineering Design, 2009, 16(2): 98-102. (in Chinese)
- [16] 房屋修建工人技术等级标准:CJJ 26—89 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,1989:4-5.
Technical Grade Standard for Building Workers; CJJ 26-89 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1989:4-5. (in Chinese)
- (编辑 胡英奎)