

文章编号:1000-582X(2009)09-1093-05

古建筑性能化防火设计中火灾场景的设置

王厚华,刘希臣

(重庆大学 城市建设与环境工程学院,重庆 400030)

摘要:针对中国目前尚无古建筑的防火规范,提出了古建筑火灾场景设置中应注意的问题,特别是火灾蔓延问题。结合某古建筑的性能化设计,探讨了场景设置的原则和步骤,提出了火灾场景设计的完整步骤应包括:起火点位置的设定、热释放速率的确定和火灾蔓延特性分析。并着重分析了火灾的蔓延性,提出了古建筑火灾蔓延的 2 种途径。

关键词:古建筑;火灾;性能化防火;火灾场景;热释放速率;火焰蔓延

中图分类号: TU998.1; X932

文献标志码: A

Setting of fire scenarios in performance-based fire safety design for ancient buildings

WANG Hou-hua, LIU Xi-chen

(College of Urban Construction and Environmental Engineering,
Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: China has no fire protection regulation about the ancient buildings, and the research on this issue is limited in China. This paper proposes some very important issues in the setting of fire scenarios for ancient buildings, especially the spread of fire. It discusses the criterion and process of fire scenario setting. The integrity procedure of fire scenario setting includes the fire position set, the fire development curve set and the fire spread analysis. Two ways of the fire spread are proposed.

Key words: ancient buildings; fire hazards; performance-based fire safety design; fire scenarios; heat release rate; fire spread

古建筑是祖先留给后人的一份宝贵的遗产,具有非常重要的精神价值、文化价值和实用价值,应当对其进行很好的保护。由于中国现存的古建筑中绝大部分是木材建造的,因此其受到火灾的威胁是相当大的。近年来国外已在古建筑防火保护方面做了许多研究工作,有些方面已取得了很大突破。如从 20 世纪 70 年代起,法国就已开展古建筑的防火保护研究,并取得一定成果。1984 年法国在卢浮宫扩建的防火设计中,采纳了美籍华人建筑师贝聿铭的设计方案:修建 2 万 m² 的地下室,地面上

是玻璃金字塔形状的双层入口。并对古建筑内易燃物表面进行防火阻燃处理,降低材料的易燃性,提高材料的耐火极限以减少火灾隐患^[1]。1996 年,美国罗尔夫·詹森及其股份有限公司也针对古建筑的防火领域进行了研究,并取得一定进展;英国方面,在 20 世纪 60 年代,在古建筑的材料阻燃技术、报警、消防设备、人员安全疏散及火势控制和烟气的移动等方面也进行了大量的研究工作。2002 年英国巴斯大学对古教区、教堂防火保护的消防安全评估方法进行了研究,根据各个教堂的实

收稿日期:2009-04-06

基金项目:科研院所社会公益研究专项(2005DIA2J007)

作者简介:王厚华(1952-),男,重庆大学副教授,主要从事建筑节能方向的研究,(Tel)023-65121647;

(E-mail)whhxinxiang@yahoo.com.cn。

际结构及其设施、物品的布局,评估和确定教堂消防安全的“可接受水平”的结构。在 20 世纪 70 年代末日本对古建筑防火保护进行了许多研究,如 1986 年日本对古建筑“姬路城堡”进行了防火消防安全保护方面的研究,在 1/25 的城堡模型实验中测试了火灾发生后火势和烟气在主体塔楼中的移动情况^[2]。中国对古建筑火灾研究比较少,当前一些消防部门和研究机构也提出一些针对古建筑的防火保护措施,基本是一些条文式的规定,根本不能揭示古建筑火灾发生及烟气蔓延规律。目前国内外古建筑火灾研究中,都没有考虑火源蔓延情况,而在实际火灾中,火源蔓延是不可忽略的因素,也是造成火灾扩散的重要原因之一,必须加以考虑。在目前研究的基础上,将主要讨论火灾场景设置中火源蔓延情况。

对古建筑,性能化设计方法能充分考虑到其特殊性。性能化设计就是根据建筑物的结构、用途、内部可燃物的具体布置情况,对建筑的火灾危险性进行定量的预测和评估,从而得出最优化的设计方案,为建筑物提供最合理的火灾保护。以重庆某古建筑为例,分析了古建筑火灾的特殊性,重点阐述了古建筑的性能化设计及火源蔓延。

1 火灾场景的设置

在性能化防火设计中,最重要、最基础的一项工作就是火灾场景的设置。火灾场景(Fire Scenario)设置是对火灾发展的具体描述,它不是真实的火灾,但是却能反映出火灾发生发展及蔓延的过程。火灾场景设置主要包括 2 方面的内容,一个是火灾本身设置,包括火源形式、起火原因、火焰的传播、烟气流动、一次可燃物、二次可燃物等。另一个就是火灾发生时其周围环境的设置,包括建筑的材料、布局、室内陈设、通风条件、人员情况,以及室外温度、风速风向等等。设置时应考虑最不利原则,选择最不利的火灾场景进行设置。

目前进行的性能化设计中,通常设计火源时都没有考虑其蔓延性,认为着火点是固定不变的,这种假设对于现代建筑具有可行性,因为现代建筑主要由钢筋混凝土等不燃材料构成,在短时间内火源不会蔓延。但对于全木结构的古建筑,这种假设是不可行的。古建筑的结构都是木的,整个建筑相当于一个巨大的可燃物,在火灾场景设置中,应考虑火源蔓延问题。古建筑中火焰蔓延有 2 种方式,一种是火焰在燃烧体上直接蔓延,另一种是通过辐射作用蔓延,进行场景设置时应综合考虑这 2 种方式,将其

影响结果进行叠加。

1.1 设置火灾发生的位置

设置火灾发生的位置时^[3],应考虑火灾发生频率高,发生火灾后危害大的区域,按危险源辨识中取最危险状态的原则,选取几个典型的功能单元,根据式(1)计算火灾荷载密度^[4]

$$q = \sum \frac{m \cdot \Delta u}{A}, \quad (1)$$

式中: q 为火灾荷载密度, MJ/m^2 ; m 为单个可燃物的质量, kg ; Δu 为单个可燃物的有效质量内能, MJ/kg ; A 为地板面积, m^2 。

1.2 热释放速率的确定

在火灾场景设置中,核心问题是对热释放速率进行设置,对火灾进行性能化的分析是以热释放速率曲线的变化为基础展开的,因此,要对其进行准确的设置,以便得到可靠的结果。

火灾的发展过程分为燃烧初期,增长期,轰燃期,旺盛期,衰减期。其中,增长、轰然到旺盛这一阶段在性能化分析中应重点考虑。

1.2.1 增长期的热释放速率

目前^[5],国内外通常用稳态和非稳态两类模型来描述火灾发展,稳态模型把整个火灾过程的热释放速率看成定值,或者不同时间段内按不同定值计算,这种处理是将火灾过程理想化。非稳态过程把热释放速率整理成燃烧时间的函数, t^2 火是非稳态模型的典型代表。实际的燃烧过程是由一个初期缓慢增长的孕育期和随后的显著增长期组成的发展过程。在火灾的增长阶段, t^2 火以式(2)的关系表达为

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

式中: Q 为热释放速率(MW); α 为火灾增长系数; t 为火灾发生的时间; t_0 为达到有效燃烧所需要的时间。

性能化设计中一般不用考虑达到有效燃烧所需要的时间,所以可以取 $t_0 = 0$,这样方程可以简化为 $Q = \alpha t^2$ 。当室内可燃物不同时,不仅燃烧值不同,火灾增长系数也将大不相同,一般把 t^2 火的增长速度分为慢速、中速、快速、超快速 4 种类型,分别对应不同的火灾增长系数。除此以外,火灾增长系数还可以综合考虑可燃物荷载密度及墙和吊顶的影响,其计算方法如下

$$\alpha = \alpha_f + \alpha_m, \quad (3)$$

式中: $\alpha_f = 2.6 \times 10^{-6} \cdot q^{\frac{5}{3}}$; q 为火灾荷载, MJ/m^2 ; α_m 是与装修材料和可燃物等级有关,其值可以通过表(1)查得。

表1 α_m 与建筑装饰材料可燃等级

墙面装饰材料等级	$\alpha_m / (\text{kW} \cdot \text{s}^{-2})$
A 不燃性材料	0.003 5
B1 准燃性材料	0.014 0
B2 缓慢燃烧材料	0.056 0
B3 木材或类似材料	0.350 0

1.2.2 充分发展段的热释放速率

对于火灾的充分发展阶段,热释放速率可认为是常数,主要由计算公式计算得出,其计算方法如下^[6](主要适用于纤维可燃物,木材或木制品)

$$Q = \begin{cases} 1.6xA_{\text{fuel}}, & x \leq 0.081, \\ 0.13A_{\text{fuel}}, & 0.018 < x \leq 0.1, \\ [2.5x\exp(-11x) + 0.048] \times A_{\text{fuel}}, & x > 0.1, \end{cases} \quad (4)$$

式中: x 为燃烧类型指数, $x = A_{\text{op}}(H_{\text{op}})^{\frac{1}{2}}/A_{\text{fuel}}$; $A_{\text{op}}(H_{\text{op}})^{\frac{1}{2}}$ 为着火房间开口因子; A_{fuel} 为公式给出的燃料表面积,如下式

$$A_{\text{fuel}} = 0.26q^{\frac{1}{3}}A_r + \sum \varphi A_f,$$

其中: q 为单位面积的火灾荷载密度, MJ/m^2 ; A_r 为着火房间的地板面积, m^2 ; $\sum \varphi A_f$ 为墙面和吊顶上面可燃装修材料的有效暴露面积。

2 火灾蔓延

古建筑火灾场景设置时要考虑火灾蔓延问题,蔓延会产生新的火源,这些火源的释热速率叠加在一起,最后导致建筑轰然、烧毁。古建筑火灾蔓延主要有两种:辐射间接蔓延和火焰直接蔓延。

2.1 辐射间接蔓延

在古建筑中,往往一件物品着火,然后通过辐射热将相邻区域内的木制品或木梁、木柱等引燃,再经过一段时间后,被引燃的可燃物产生的辐射又将临近的可燃物点燃。可燃物着火以后,会在房间顶部形成温度较高的热烟气层,烟气层对房间内的物体也具有辐射作用,火焰的辐射和高温烟气层的辐射叠加在一起,当物体接收的总辐射能量达到一定程度时就会被引燃。随着时间的推移,卷入火灾的可燃物将会成倍增加,火势也随之不断的增长。

2.1.1 火源辐射

火源的总热释放速率与目标可燃物的单位辐射热流的关系如下^[7]

$$q'' = \frac{X_r Q}{4\pi R^2}, \quad (5)$$

式中: q'' 为对目标可燃物的单位辐射热流量, kW/m^2 ; R 为与目标可燃物的距离, m ; X_r 为热辐射

效率,根据不同的燃料类型在0.2~0.6内取值; Q 为火源的总热释放速率, kW ;对于一般的可燃物,上式中的辐射效率 X_r 取 $\frac{1}{3}$,即火源 $\frac{1}{3}$ 的能量以辐射热的方式传递出去。因此,上式可以转换为

$$Q = 12\pi R^2 q'' \quad (6)$$

2.1.2 烟气辐射

物体接收到的烟气层辐射流用式(7)计算

$$q' = \epsilon \sigma T_s^4 F_s, \quad (7)$$

式中: ϵ 为热烟气层的发射率,一般取1; σ 为史蒂芬-波耳兹曼常数,为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_s 为热烟气层温度, K ; F_s 为热烟气层相对可燃物的辐射角系数; q' 为被引燃物接收到的烟气层辐射热流量, kW/m^2 。

计算出烟气层的高度,根据被引燃物的高度及水平位置,可以根据式(8)及(9)计算烟气层对可燃物的角系数^[8],见图(1)所示。

$$F_s = F(a, b) + F(a, W - b) + F(L - a, b) - F(L - a, W - b), \quad (8)$$

$$F(a, b) = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\frac{a}{\sqrt{a^2 + (H_s - H)^2}} \tan^{-1} \left(\frac{b}{\sqrt{a^2 + (H_s - H)^2}} \right)}{\frac{b}{\sqrt{a^2 + (H_s - H)^2}}} \right] + \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\frac{b}{\sqrt{b^2 + (H_s - H)^2}} \tan^{-1} \left(\frac{a}{\sqrt{b^2 + (H_s - H)^2}} \right)}{\frac{a}{\sqrt{b^2 + (H_s - H)^2}}} \right], \quad (9)$$

式中: L 为着火房间长度, m ; W 为着火房间宽度, m ; a 和 b 分别为被引燃物体在房间长度方向和宽度方向上的位置, m ; F_s 为烟气层对被引燃物的辐射角系数; H_s 为烟气层距地板的高度, m ; H 为被引燃物上表面距地板的高度, m 。

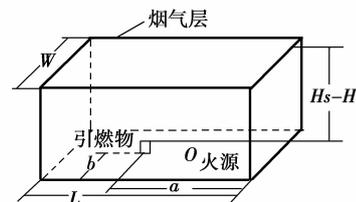


图1 烟气层对引燃物辐射角系数计算示意图

当烟气层温度很高,则烟气层对被引燃物的辐射就不可以忽略,被引燃物接收到的总的辐射热流量即为火源辐射热流量加上烟气层的辐射热流量,如式(10)所示。

$$q = q' + q'' \quad (10)$$

对于特定的可燃物,被引燃的热辐射通量可以通过

试验手段测定,也可以查相关的试验数据。在工程计算中,通常根据被引燃的难易程度将可燃物分成 3 类,如表 2^[9]。

表 2 可燃物被引燃难易程度的粗略分类

可燃物类别	单位面积可燃物表面单位时间内引燃所需要的辐射热流/(kW·m ⁻²)
易引燃	10
一般可引燃	20
难引燃	40

古建筑中大部分的可燃物都是木材,木材的最小引燃热流量为 10~13 kW/m²。

2.2 火焰直接蔓延

由于古建筑的木结构在一处发生火灾时,火焰可以沿着柱、梁等构建进行蔓延。古建筑内部可燃物种类比较单一,大部分都为木材,火焰蔓延速度简化为匀速来处理,可以根据火灾蔓延公式(11)^[10]来计算火焰的直接蔓延。

$$L = vt, \quad (11)$$

式中: L 为 t 时刻火焰前端位置,m; v 为火焰蔓延速率,m/s; t 为火灾发生的时间,s。

3 古建筑火灾场景设置实例

在火灾场景设置中,热释放速率曲线的确定是核心问题,所以在本实例场景设置中,重点分析了热释放速率曲线的确定,并考虑了由火源辐射及烟气辐射造成的火灾蔓延问题,最终将蔓延产生的新火源与原火源的热释放速率进行叠加。该古建筑位于重庆,为庭院式居住建筑,建筑内房间间隔众多,柱、梁等主要构建都为木质,受火灾的威胁非常大,其平面简化图见图 2,取房间 1 进行场景设置,房间 1 的示意图见图 3。

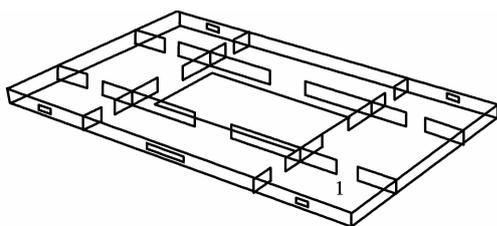


图 2 古建筑简化图

房间 1 的长为 17 m,宽 12 m,高 3.15 m,假设火源的位置位于房间的正中,火源按照快速 t^2 火设计,火灾增长系数为 0.046 9^[11],根据《民用防排烟技术规程》中关于最大热释放速率的规定,古建筑火灾荷载大、且没有喷淋设置,其最大热释放速率比较大,取 15 MW 比较合适^[2]。假设在距火源距离 6 m

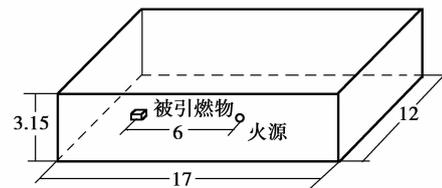


图 3 房间 1 示意图

处有一 1 m×1 m×1 m 的木制引燃物,火源热释放速率曲线如图 4。

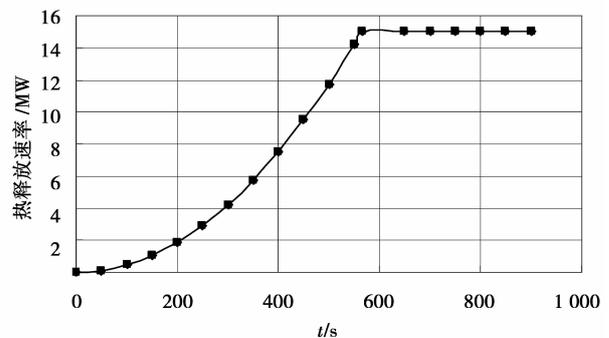


图 4 热释放速率曲线

当火灾发生时,引燃物同时受到火源及上部烟气的辐射作用,当引燃物接收到的总辐射能达到其引燃的临界辐射热流时,就会被引燃,导致火灾发生蔓延。

使用 fluent 软件对火灾过程进行模拟^[12-15],燃烧刚开始时,热烟气还没有到达顶棚,没有形成明显的烟气层,当燃烧过程进行 100 s 时会产生明显的顶棚射流^[16-17]。根据模拟结果,得到烟气层的平均温度及高度随时间变化的曲线如图 5、6 所示。

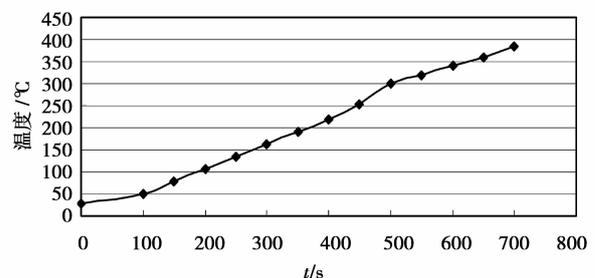


图 5 烟气层温度变化

当火灾发展到 500 s 时,根据图 5、6 可得烟气层平均温度为 300 °C,烟气层高度为 2.52 m,根据式(11)、(12)及(13),此时被引燃物接受到的烟气层的辐射热流密度 $q' = 2.93 \text{ kW/m}^2$,根据式(5),被引燃物接受到的火源辐射热流密度 $q'' = 8.64 \text{ kW/m}^2$,接受到总辐射热流密度 $q = 2.93 + 8.64 = 11.57 \text{ kW/m}^2$,由表(2)可知,木材被引燃的临界辐射热流为 10~13 kW/m²,所以当火灾进行到 500 s 时,被引燃物接

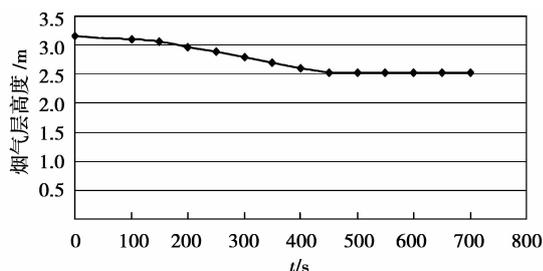


图6 烟气层高度变化

受到的辐射热流密度将会使引燃物点燃,产生新的火源,新火源的热释放速率与原火源的热释放速率进行叠加,得到火灾蔓延的综合热释放速率。假设新火源的热释放速率按照慢速的 t^2 火进行发展,则新火源与原火源的叠加情况见图7。

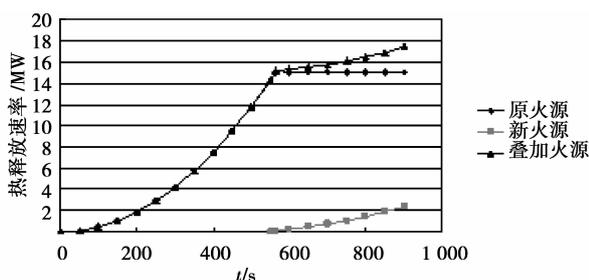


图7 火源热释放速率叠加情况

4 结 论

火灾场景的设置是性能化防火设计定量计算的基础,它对烟气运动和火灾的发展有着重要的影响。主要探讨了古建筑中火灾场景的设置问题,重点分析了热释放速率的确定方法。并着重强调了古建筑中火灾的蔓延,提出了火焰蔓延的两种途径。并结合实例简单的介绍了如何对古建筑进行火灾热释放速率的确定,在分析及场景设定中,没有考虑到灭火因素的影响,相关的研究正在进行中。

参考文献:

- [1] 刘天生. 国内木构古建筑消防安全策略分析[D]. 上海:同济大学,2006.
- [2] 朱强. 古建筑火灾烟气模拟与模型实验研究[D]. 重庆:重庆大学,2007.
- [3] 陈俊敏, 郑雪松, 付永胜. 性能化防火设计中火灾场景设计的内容和方法[J]. 西南交通大学学报 2006, 41(4):438-441.
CHEN JUN-MIN, ZHENG XUE-SONG, FU YONG-SHENG. Contents and approach of fire scenario design in performance-based fire protection [J]. Journal of Southwest Jiaotong University 2006, 41(4):438-441.
- [4] PETTERSSON O. Fire engineering design of steel structures [R]. Stockholm, Sweden: Publication No. 50. Swedish Institute of Steel Construction, 1976.
- [5] 徐亮, 张和平, 杨响, 等. 性能化防火设计中火灾场景设

计初步研究[J]. 中国工程科学 2004, 6(1):64-67.

- XU LIANG, ZHANG HE-PING, YANG YUN, et al. Study on fire design in performance-based design [J]. Engineering Science, 2004, 6(1):64-67
- [6] 徐亮, 张和平, 杨响, 等. 性能化防火设计中火灾场景设置的讨论[J]. 消防科学与技术, 2004, 23(2): 129-132.
XU LIANG, ZHANG HE-PING, YANG YUN, et al. Preparatory study on fire design in performance-based design[J]. Fire Science and Technology, 2004, 23(2): 129-132.
- [7] BUDNICK E K, NELSON H E, EVANS D D. Simplified fire growth calculations. Fire Protection Handbook. 18th Edition [M]. Batterymarch Park, Quincy, MA: National Fire Protection Association, 1997.
- [8] DAIMATSU S. 日本建筑性能化防火设计案例[M]. 公安部消防局编译. 四川:公安部四川消防研究所, 2002.
- [9] 张孟君, 程远平, 张小宏. 着火房间相邻可燃物引燃过程及其实例研究[J]. 消防科学与技术, 2004, 23(2): 107-110.
ZHANG MENG-JUN, CHENG YUAN-PING, ZHANG XIAO-HONG. Ignition of adjoining combustibles in fire room and its instance research [J]. Fire Science and Technology 2004, 23(2):107-110
- [10] 孙占辉, 姚斌, 孙金华. 火灾场景设计与火灾危险度分析在火灾性能化设计危险源识别中的应用[J]. 火灾科学, 2004, 13(2):106-110
SUN ZHAN-HUI, YAO BIN, SUN JIN-HUA. Application of design fire and fire hazard degree analysis in hazard identification of performance-based fire protection design[J]. Fire Safety Science, 2004, 13(2):106-110.
- [11] 刘芳. 建筑防火性能化设计[M]. 重庆:重庆大学出版社, 2007.
- [12] PILLER M, NOBILE E, HANRATTY T J. DNS study of turbulent transport at low Prandtl numbers in a channel flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 458(9):419-441.
- [13] WISSINK J G. DNS of separation low Reynolds number in a turbine cascade with incoming wakes [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(4):626-635.
- [14] Anon. FLUENT User's Guide [P]. Lebanon, NH: Fluent Inc, 2003.
- [15] WANG Z J. A Quadtree-based adaptive cartesianquad grid flow solver for navier-stokes equations [J]. Computers and Fluids, 1998, 27(4):529-549.
- [16] YU B, KAWAGUCHI Y, TAO W Q, et al. Be care of the checkerboard pressure predictions due to the underrelaxation factor and time step size on a non-staggered grid [J]. Numerical Heat Transfer Part B, 2002, 41(1):85-94.
- [17] VERSTEEG H K, MALASEKERA W. An Introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method[M]. New York:Wiley, 1995.

(编辑 赵 静)