

Designing and Practical Computing of Fire Isolation Belt in Large Single Story Building

Guoqing Zhu^{1,2}, Guowei Zhang^{1,2}, Weihua Wu^{1,2}

¹School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, XU Zhou, China

²The key laboratory of ministry of education on gas and fire, XU Zhou, China

Email: zgq119xz@126.com

Abstract: The building fire could be prevented spreading by arranging combustibles intensively and making a separation distance between two combustibles. Based on this idea, the model of combustible islands was established and the feasibility of setting fire isolation belt in large single story building to prevent the fire spreading was discussed. To be convenient to engineering application, the widths of fire isolation belt were computed in three typical courtyard fire conditions. The result showed that the fire power primarily affected the width of fire isolation belt. And 11.2 m wide fire isolation belt can effectively stop high-power fire spreading. When the fire power was determined, radiation from fire was much larger than the radiation from heat smoke.

Keywords: fire isolation belt; fire spread; heat radiation; combustible islands; performance-based fire protection design

单层大空间建筑内防火隔离带设计与实用计算

朱国庆^{1,2}, 张国维^{1,2}, 吴维华^{1,2}

¹中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116

²煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 徐州, 中国, 221008

Email:zgq119xz@126.com

摘 要:建筑内部可燃物集中布置, 形成各独立的可燃物岛, 通过科学设置相邻可燃物岛间距以阻止火灾蔓延。基于这一思想, 本文建立了单层大空间建筑防火隔离带理论模型并探讨了单层大空间建筑内部设置防火隔离带以阻断火灾蔓延的可行性。针对三种典型中庭火, 分别计算了净高 6 m~20 m 的高大空间建筑防火隔离带宽度, 以便于工程应用。研究结果表明: 火源功率是影响防火隔离带宽度的主要因素, 对于建筑高度超过 6 m 的单层大空间建筑火灾 (25 MW), 11.2 m 宽的防火隔离带即可以有效地阻断火灾蔓延; 在火源功率确定的前提下, 火焰对目标可燃物的直接热辐射远大于热烟气对目标可燃物的热辐射。

关键词: 防火隔离带; 火灾蔓延; 热辐射; 可燃物岛; 性能化防火设计

1 引言

伴随着经济发展, 人们对建筑的使用功能和整体外观有了新的需求, 展览馆、机场航站楼、体育馆等单层大空间建筑越来越多地出现在城市建筑群中。然而, 由于单层大空间建筑可燃物集中, 火灾荷载大, 室内空气充足, 容易发生大规模火灾。

传统的建筑防火措施是对建筑整体进行防火分区的划分。但是由于一些单层大空间建筑结构设计和使用寿命的特殊性, 无法按照防火规范划分防火分区。如果

不采取有效的防火措施, 火灾一旦发生便迅速地蔓延至整个建筑空间, 火势凶猛, 很难进行有效地扑救。对于这类建筑, 可以运用火灾安全工程学的原理与方法, 根据建筑物的结构、用途和内部可燃物分布等具体情况, 设计合理的防火方案, 为建筑物提供可靠的消防保护 [1][2]。

2 单层大空间建筑内部防火隔离带设计

2.1 建筑内部防火隔离带设计的基本思想

处方式规范关于防火分区划分的目的是将火灾产生的热和烟控制在局部范围,从而使建筑内其他区域处于安全状态,以利于控制火灾规模和保证疏散安全。基于这一思想,对于大空间建筑一些学者提出了可燃物岛的设计理念,即将可燃物集中布置,并与周围的可燃物拉开距离,形成一个个相对独立的可燃物岛。各可燃物岛之间存在的内部防火间距,使可燃物在空间上产生间断,以阻止火灾蔓延^[3]。

2.2 火灾蔓延方式

可燃物着火后,随着火势的发展,不断放出大量的热,并伴有火焰。在一定的条件下,这些热量和火焰通过一定方式传播到相邻可燃物,当满足其燃烧条件时,就会引起相邻可燃物的燃烧,从而表现为火灾从建筑物的某一部位蔓延到其它部位。从火灾蔓延角度看,蔓延的方式主要有“延烧”、“飞火”、“热对流”和“热辐射”等^[4]。“延烧”与可燃物的连续布置有关,通过可燃物之间保持一定的物理间距(防火隔离带),可以阻止火灾的蔓延。“飞火”在室外与风力有关,在室内与火羽流有关,带有很大的不确定性,因此在本文的研究中不予考虑。“热对流”方式,火源的热气流喷出后就向上升腾,对位于同一水平面的相邻可燃物的火灾蔓延影响较“热辐射”要小的多,可以次要考虑。因此,建筑内部保持一定间距的可燃物岛之间的火灾蔓延主要通过热辐射的方式传播。可见,减少可燃物间的热辐射对于控制火灾蔓延起着关键的作用。

2.3 热烟气层温度

热烟气层温度与火源功率大小和建筑净高等因素有关,在忽略维护结构热量损失的前提下,热烟气层温度变化值 ΔT_s 可由式(1)近似计算^[5]:

$$\Delta T_s = \frac{Q_c}{m_p c_p} \quad (1)$$

式中: Q_c ——对流热流量, kW, 取为 $0.7Q$;

m_p ——烟缕流质量流量, kg/s;

c_p ——空气比热, 取 $1.02 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

对于轴对称型烟缕流质量流量^{[6][7]}:

$$Z_0 > Z_1 \quad m_p = 0.071 Q_c^{1/3} Z_0^{5/3} + 0.0018 Q_c \quad (2)$$

$$Z_0 \leq Z_1 \quad m_p = 0.032 Q_c^{3/5} Z_0 \quad (3)$$

$$Z_1 = 0.166 Q_c^{2/5} \quad (4)$$

式中: Z_0 ——燃料面到烟层底部的高度, m;

Z_1 ——火焰极限高度, m。

2.4 建筑内部防火隔离带物理模型

基于可燃物岛的设计理念,建立建筑内部防火隔离带数学物理模型,计算某可燃物岛发生火灾时,相邻可燃物岛接受到的辐射热量,以进一步求出可燃物岛之间的安全距离,也即防火隔离带的临界安全宽度。

2.4.1 模型建立

假设可燃物岛 A (岛 A) 发生火灾,研究相邻的可燃物岛 B (岛 B) 所接受到得热辐射。岛 B 内目标可燃物接受到的热辐射主要来自岛 A 内火焰的热辐射和热烟气层的热辐射两部分,如图 1。

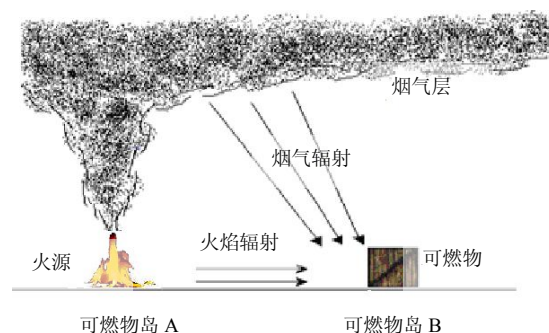


Figure 1. Thermal radiation between two combustible islands

图 1 热辐射示意图

即,岛 A 发生火灾时岛 B 内目标可燃物接受到得总辐射通量可表示为:

$$q = q_s + q_f \quad (5)$$

式中: q_s ——热烟气层对目标可燃物的辐射通量, kW/m^2 ;

q_f ——火焰对目标可燃物的直接辐射通量, kW/m^2 。

2.4.2 火焰对目标可燃物的直接热辐射

火源生成的火焰锋面在几何形状上呈不规则状,很难使用经典的辐射换热计算公式确定其辐射通量大小。在消防安全工程领域通常将火源假设成一个具有辐射发射性的几何点,称为点火源^[8],如图 2 所示。

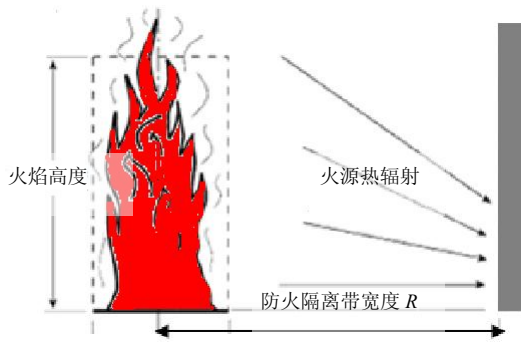


Figure2. Fire flame radiation

图2 火焰热辐射示意图

这种假设可以大大简化火源辐射的计算模型，且计算精确度较高，已被广大的学者所接受。点源模型假设辐射能量是从火源中心位置释放出来的。辐射通量随着与火源的水平间距增大而减少，美国消防协会(NFPA)出版的 NFPA92B 中给出了可燃物接受的火焰热辐射与火源的热释放速率的关系^[9]:

$$q_f = \frac{Q}{12\pi R^2} \quad (6)$$

式中: Q ——火源热释放速率, kW;

R ——火源与目标可燃物之间的距离, 也即防火隔离带宽度, m。

2.4.3 热烟气层对目标可燃物的热辐射

单层大空间建筑内可燃物着火后, 在较短的时间内建筑顶棚下将形成温度较高的热烟气层。随着火势地发展, 烟气层逐渐增厚, 温度逐渐增高。温度较高的热烟气层具有较强的辐射性, 对目标可燃物有热辐射。根据四次方定律, 实际物体的辐射力:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (7)$$

顶棚下单位面积目标可燃物所接受到的来自烟气层的有效辐射通量为:

$$q_s = \varepsilon \sigma T_s^4 \times A_1 \times F_0 / A_2 \quad (8)$$

根据角系数的相对性:

$$A_1 \times F_0 = A_2 \times F_s \quad (9)$$

将(9)式带入(8)式, 得到顶棚下的目标可燃物所接受到的来自烟气层的辐射通量:

$$q_s = \varepsilon \sigma T_s^4 F_s \quad (10)$$

式中: ε ——烟气层的发射率, 一般取 1;

σ ——史蒂芬玻耳兹曼常数;

T_s ——烟气层温度, K;

F_0 ——烟气层对可燃物的辐射角系数;

F_s ——可燃物对烟气层的辐射角系数;

A_1 ——烟气层表面积;

A_2 ——可燃物的表面积。

由公式(10)可知, 辐射角系数 F_s 对烟气辐射通量 q_s 的影响比较大, 假定可燃物的底面积远小于烟气层的底面积, 在已知烟气层高度、可燃物高度及水平位置后, 可以使用公式(11)、(12)计算可燃物对烟气层的辐射角系数^[10]。

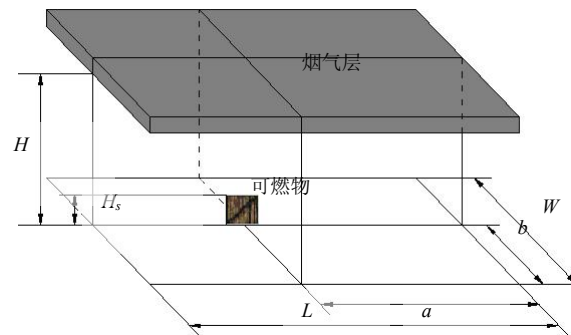


Figure3. The smoke radiation

图3 烟气辐射计算图示

$$F_s = F(a, b) + F(a, W - b) + F(L - a, b) + F(L - a, W - b) \quad (11)$$

$$F(x, y) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + (H_s - H)^2}} \tan^{-1} \frac{y}{\sqrt{x^2 + (H_s - H)^2}} + \frac{y}{\sqrt{y^2 + (H_s - H)^2}} \tan^{-1} \frac{x}{\sqrt{y^2 + (H_s - H)^2}} \right) \quad (12)$$

式中: L ——烟气填充区域的长度, m;

W ——烟气填充区域的宽度, m;

H ——可燃物高度, m;

$F(x, y)$ ——可燃物对长度为 x 宽度为 y 的烟气层的辐射角系数;

2.5 临界辐射通量安全判据

当可燃物接受到的总辐射通量达到引燃可燃物表面的最小辐射通量时, 物体即被引燃, 最小辐射通量也称为临界辐射通量。NFPA 对不同材料的临界辐射通量进行了实验研究, 结果表明:

对易燃物(如新闻用纸), 其临界辐射通量为 10

kW/m^2 ;

对一般材料（如装潢家具），其临界辐射通量为 20 kW/m^2 ;

对难燃材料（如厚度超过 25 mm 的木料），其临界辐射热通量为 40 kW/m^2 。

同时，美国 SPFE 手册中规定，引燃可燃物的最小辐射热流为 10 kW/m^2 ^[11]。这一辐射通量标准通常被认为引燃纸张、薄片木板等可燃物所需要的最小值。

3 高大空间建筑内部防火隔离带宽度计算

3.1 设计案例

某会展中心为单层高大空间建筑，建筑高 10 m ，当自动喷水灭火系统失效时市场可能发生火灾的最大功率约为 25 MW 。由于使用功能的原因，无法采用传统的防火分隔措施进行防火分区的划分。为了控制火灾在空间上的燃烧范围，建议在会展中心内设置一定宽度的防火隔离带以阻止火灾蔓延。

1) 火焰对目标可燃物的直接热辐射:

根据公式(6)，会展中心目标可燃物接受得来自火焰的直接热辐射通量为:

$$q_f = \frac{Q}{12\pi R^2} = \frac{25000}{12\pi R^2} \quad (13)$$

2) 热烟气层对目标可燃物的热辐射:

美国 NFPA 2B 给出了烟流直径近似公式:

$$D_p = \frac{Z_0}{2} \quad (14)$$

对于建筑净高小于 20 m 的单层大空间建筑，烟流直径小于 10 m 。

考虑到目标可燃物正上方 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 方形区域以外的区域烟气稀薄，烟气温度较低，且辐射角系数较小，在计算辐射通量时可忽略不计。根据上述假设，计算会展中心内目标可燃物正上方 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的方形区域内热烟气对目标可燃物的热辐射。计算得到目标可燃物对烟气的辐射角系数 $F_s = 0.2396$ ，热烟气层温度 $T_s = 439.56 \text{ K}$ 。

热烟气对目标可燃物的辐射通量:

$$q_s = \varepsilon \sigma T_s^4 F_s = 5.67 \times 10^{-11} \times 439.56^4 \times 0.24 = 0.51 (\text{kW/m}^2) \quad (15)$$

3) 防火隔离带宽度计算:

目标可燃物接受的总的辐射通量:

$$q = q_s + q_f = 0.51 + \frac{25000}{12\pi R^2} \quad (16)$$

根据 10 kW/m^2 的辐射通量的安全判据，计算得出 $R=8.36 \text{ m}$ 。

3.2 实用防火隔离带宽度查询表

为了便于工程应用，以 10 kW/m^2 的辐射通量为安全判据，计算了不同建筑高度的单层大空间建筑三种典型的火源功率（火灾强度分别为 2 MW 、 10 MW 、 25 MW ）所对应的防火隔离带宽度，见表 1。

计算时，选取火源相邻区域的目标可燃物作为研究对象，研究各典型火源功率下火焰对目标可燃物的直接热辐射以及目标可燃物正上方 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的方形区域内热烟气对目标可燃物的热辐射。

Table1. The practical width table of the fire isolation belt

表 1 防火隔离带宽度一览表

H_s	F_s	火源功率 2 MW				火源功率 10 MW				火源功率 25 MW			
		T_s	q_s	q_f	R	T_s	q_s	q_f	R	T_s	q_s	q_f	R
6	0.4642	368.18	0.48	9.52	2.36	466.71	1.25	8.75	5.51	547.28	2.36	7.64	9.32
7	0.3896	353.03	0.34	9.66	2.34	437.81	0.81	9.19	5.37	510.96	1.51	8.49	8.84
8	0.3289	342.13	0.26	9.74	2.33	415.42	0.56	9.44	5.30	483.71	1.02	8.98	8.60
9	0.2795	334.03	0.20	9.80	2.32	397.79	0.40	9.60	5.26	459.12	0.70	9.30	8.44
10	0.2396	327.85	0.16	9.84	2.32	383.73	0.29	9.71	5.23	439.56	0.51	9.49	8.36
11	0.2067	323.01	0.13	9.87	2.32	372.34	0.23	9.77	5.21	423.18	0.38	9.62	8.30
12	0.1798	319.15	0.11	9.89	2.32	363.01	0.18	9.82	5.20	409.36	0.29	9.71	8.26
13	0.1575	316.03	0.09	9.91	2.31	355.27	0.14	9.86	5.19	397.62	0.22	9.78	8.24
14	0.1389	313.45	0.08	9.92	2.31	348.77	0.12	9.88	5.18	387.58	0.18	9.82	8.22
15	0.1233	311.30	0.07	9.93	2.31	343.27	0.10	9.90	5.18	378.92	0.14	9.86	8.20
16	0.1101	309.49	0.06	9.94	2.31	338.57	0.08	9.92	5.17	371.42	0.12	9.88	8.20
17	0.0988	307.95	0.05	9.95	2.31	334.53	0.07	9.93	5.17	364.88	0.10	9.90	8.18

18	0.0891	306.63	0.04	9.96	2.31	331.02	0.06	9.94	5.17	359.14	0.08	9.92	8.18
19	0.0807	305.45	0.04	9.96	2.31	327.95	0.05	9.95	5.16	354.08	0.07	9.93	8.17
20	0.0735	304.48	0.04	9.96	2.31	325.26	0.05	9.95	5.16	349.60	0.06	9.94	8.17

其中: H_s ——空间建筑净高, m; F_s ——可燃物对烟气层的辐射角系数; T_s ——烟气层温度, K; q_s ——热烟气层对目标可燃物的辐射通量, kW/m²; q_f ——火焰对目标可燃物的辐射通量, kW/m²; R ——防火隔离带宽度, m。

4 结论:

1) 单层大空间建筑内, 由于特殊原因而无法进行防火分隔时, 可根据可燃物的种类、数量和分布, 并综合考虑建筑的使用功能, 通过设置内部防火隔离带进行合理的防火区域划分, 以有效阻止火灾的蔓延。

2) 火源功率是影响防火隔离带宽度的主要因素。在火源功率确定的前提下, 火焰对目标可燃物的直接热辐射远大于热烟气层对目标可燃物的热辐射, 且随着建筑空间净高的增加, 热烟气对目标可燃物的热辐射通量迅速下降。对于单层净高超过 15 m 的高大空间建筑, 热烟气对目标可燃物的热辐射较小, 可以忽略不计, 计算防火隔离带宽度时可以只考虑火焰对目标可燃物的直接热辐射。

3) 考虑到 1.2 倍的安全系数, 对于大空间小功率火灾 (2 MW 为例), 2.8 m 宽的防火隔离带可以有效地阻止火势的蔓延; 对于中等火灾 (10 MW 为例), 6.6 m 宽的防火隔离带可以有效地阻止火势蔓延; 对于大功率火灾 (25 MW 为例), 11.2 m 宽的防火隔离带既可以有效地阻止火灾蔓延。

4) 燃烧物岛之间的防火隔离带可作为人员疏散和灭火救援的通道, 对减少人员伤亡和财产损失, 开展灭火救援等均具有积极的意义。但是, 由于采用内部防火间距仅能对火势在一定时间内的蔓延进行控制, 却无法阻止烟气的流动, 因此在实际应用时, 必要的火灾探测报警系统、灭火和排烟系统仍然是必须的。

References (参考文献)

[1] Li Ying-qing. Building fire performance-based design[M]. Beijing:

Chemical Industry Press, 2005: 1-3.

李引擎. 建筑防火性能化设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 1-3.

- [2] Zhu Guo-qing, Cheng Yuan-ping. Numerical Simulation for Fire Smoke Flow in a High-rise Building with Patio Space[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(1).
朱国庆, 程远平. 含吹拔空间的高层建筑火灾烟气流动数值模拟[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(1).
- [3] You Yu-hang, Huo Ran. A Stochastic Analysis of Fire Spread Among Non-continuous Objects[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2003, 33(5).
游宇航, 霍然等. 非连续物体间火灾蔓延过程的随机分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2003, 33(5).
- [4] Yang Jian-ming. The Technical Measures of Fire Spread Preventing in High-rise Civil Building[J]. Fire Technique and Products Information, 2005, 7.
杨建民. 预防高层民用建筑火灾蔓延的技术措施[J]. 消防技术与产品信息, 2005, 7.
- [5] Yang Shi-ming, Tao Wen-quan. Heat Transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
杨世铭, 陶文全. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [6] DGJ08-88-2000. Technical code for smoke control and extraction of civil buildings [S]. Shanghai: The Office of Shanghai Engineering Construction Standardization, 2000.
DGJ08-88-2000, 民用建筑防排烟技术规程[S]. 上海: 上海市工程建设标准化办公室, 2000.
- [7] Drysdale D. An introduction to fire dynamics [M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2002: 26-28.
- [8] Custer R.L.P. MEACHAM B J. Introduction to performance-based fire safety [M]. Boston, MA, USA: Society of Fire Protection Engineers, 1997.
- [9] Xie Fei, Chu Xin-ying. Discussion on Using Fire Isolated Belt to Divide Fire Compartment in Large Scale Exhibition Hall[J]. Fire Science and Technology, 2008, 27(6).
谢飞, 褚新颖. 谈大型展厅利用防火隔离带划分防火分区[J]. 消防科学与技术, 2008, 27(6).
- [10] Bai Xin-ai. Calculation of Radiation Heat Transfer Angle Coefficient[J]. Infrared, 2008, 29(8).
白心爱. 辐射换热角系数的计算[J]. 红外, 2008, 29(8).
- [11] BEYLER C L. Fire dynamics [C].// DINENNO P J. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Third Edition. Quincy, MA, USA: The National Fire Protection Association, 2002.