

文章编号:1673-2049(2006)04-0044-05

全盛期室内火灾参数化模型的参数随机性

靳 飞¹, 李国强^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:通过总结各国在全盛期室内火灾升温的参数化模型研究领域的成果和统计国外火灾荷载调查数据,分析了模型输入参数的随机性,建立了火灾荷载密度、开口因子和房间壁面热惰性的概率分布模型,并给出了不同用途房间的火灾荷载密度均值和变异系数、开口因子模型参数的概率密度函数及不同房间壁面热惰性的范围。结果表明,火灾荷载密度服从正态分布,开口因子模型中的参数服从对数正态分布,而房间壁面的热惰性可认为是均匀分布的随机变量。

关键词:火灾;参数化模型;火灾荷载密度;开口因子;热惰性;概率分布

中图分类号:TU205 **文献标志码:**A

Parameters Randomness of Parametric Model of Fully-Developed Compartment Fire

JIN Fei¹, LI Guo-qiang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Authors analyzed the randomness of the parameters by reviewing the research field of parametric models of fully-developed compartment fire and conducting statistical calculation of data from fire load surveys of some foreign countries. The probability distribution models of fire load density, ventilation factor and thermal absorptivity of wall were established. The mean values and coefficients of variation of fire load density of different occupancies, as well as the probability density function of the parameter of the ventilation factor model and the ranges of thermal absorptivities of different types of walls were presented. It is shown that fire load density follows normal distribution and the parameter of the ventilation factor model follows log normal distribution. Thermal absorptivity of wall can be modeled as a variable that follows uniform distribution.

Key words: fire; parametric model; fire load density; ventilation factor; thermal absorptivity; probability distribution

0 引言

结构抗火设计研究可分为 4 个方面:火灾环境研究、结构在火灾下的反应研究、抗火设计方法研

究、火灾后结构的损伤评估与修复加固研究。可以说火灾环境研究是基础,这是因为火灾发生后建筑室内空气温度升高,进而引起结构构件的温度升高,才使结构构件的物理性能和力学性能发生变化,导

收稿日期:2006-11-12

基金项目:国家自然科学基金项目(50225825)

作者简介:靳 飞(1983-),男,河南镇平人,工学硕士研究生,E-mail:jeffea@tom.com。

致整个结构性能改变^[1-4]。

室内火灾是一种受限空间内的燃烧,典型的建筑室内火灾的发展可分为3个阶段,即初期增长阶段、全盛阶段及衰退阶段^[5]。在初期增长阶段和全盛阶段之间有一个标志火灾发生质变的现象——轰然。对于结构的抗火设计而言,人们更关心轰然后的火灾燃烧行为,因为这一阶段对结构和其他防火构件造成的威胁最大。火灾轰然发生以后,室内所有可燃物表面都开始剧烈燃烧,室内空气分布比较均匀,可假设室内空气温度是均匀分布的。估计火灾轰然后最大室内空气平均温度对结构的防火设计至关重要。遗憾的是这一点至今还难以准确做到。借助经验模拟的方法,对火灾的统计资料和试验所得的数据进行统计分析,可归纳总结出室内火灾的空气升温模型,这种参数化的模型是非常实用的。

随着结构抗火的概率可靠度设计研究的深入,模型输入参数的随机性也得到研究者的重视,No-tarianni^[6]论述了随机性在改进防火保护规范中的作用,指出了参数随机性的影响,但没有给出相关参数的概率特性。本文中笔者介绍了室内火灾升温的参数化模型,并对升温模型的参数进行了分析,提出火灾荷载密度、开口因子和房间壁面的热惰性是火灾升温过程的主要随机性参数,在对国外火灾荷载调查数据进行统计分析的基础上,给出了火灾荷载密度的概率分布模型,建立了开口因子和房间壁面的热惰性概率分布模型。

1 参数化模型

Babrauskas、Law 最早给出了估计火灾轰然后室内空气升温过程的参数化模型^[7];欧洲规范在对瑞典曲线进行近似模拟的基础上给出了火灾升温模型的近似公式;美国土木工程师协会(ASCE)编制的结构防火手册也介绍了一种室内火灾温度发展模型^[8],该模型通过对大量的试验数据进行统计分析,并利用热力学理论方法结合参数分析,提出了一个确定建筑室内火灾空气升温过程的经验公式。此外,马忠诚也提出了一种室内火灾全盛期升温过程的计算模型^[9]。在此介绍两个具有代表性的参数化模型。

1.1 马忠诚模型

马忠诚通过对20世纪70、80年代国际上进行过的几次比较大的火灾试验所得的数据进行统计分析,提出了一种室内火灾全盛期升温过程的计算模型。该模型中室内温度的计算公式如下

$$\frac{T_g - T_0}{T_{gm} - T_0} = \left[\frac{t}{t_m} \exp\left(1 - \frac{t}{t_m}\right) \right]^\delta \quad (1)$$

式中: T_g 为在时间 t 时的室内平均空气温度; T_0 为火灾发生前的室内空气平均温度; T_{gm} 为火灾过程中的最大室内空气平均温度; δ 为参数,当 $t \leq t_m$ 时,取 $\delta=0.8$,当 $t > t_m$ 时,取 $\delta=1.6$, t_m 为室内平均空气温度达到最大值的时间。 T_{gm} 及 t_m 的确定与室内火灾的类型有关。

对于通风控制型火灾

$$T_{gm} = 1\,240 - 13.37/\eta \quad (2)$$

$$t_m = \frac{0.112\,5G_0}{A_v \sqrt{H_v}} \quad (3)$$

式中: A_v 为房间开口面积; H_v 为房间开口高度; G_0 为室内可燃物折合成标准木材的总质量; η 为开口因子, $\eta = A_v \sqrt{H_v}/A_t$, A_t 为火灾房间壁面(墙、顶棚和楼板,不包括开口)的面积之和。

对燃烧控制型火灾

$$\frac{T_{gm}}{T_{gmcr}} = \sqrt{\frac{\eta_{cr}}{\eta}} \quad (4)$$

$$t_m = 1.587\,6 \frac{G_0}{A_f} \quad (5)$$

$$\eta_{cr} = 0.069\,7 \frac{A_f}{A_t} \quad (6)$$

$$T_{gmcr} = 1\,240 - 13.37/\eta_{cr} \quad (7)$$

式中: A_f 为燃料表面积。

1.2 欧洲规范模型

欧洲规范给出了一个参数火灾模型^[10],该模型根据火灾荷载、流通率和围护材料的热属性等给出时间-温度曲线。欧洲规范的参数火灾模型是根据瑞典曲线进行近似模拟得到的,因此对瑞典曲线的燃烧阶段提供了一个很好的近似表达式。

升温段($t^* \leq t_h^*$)

$$T_g = 20 + 1\,325 \left[1 - 0.324 \exp\left(-\frac{0.2}{60} t^*\right) - 0.204 \exp\left(-\frac{1.7}{60} t^*\right) - 0.472 \exp\left(-\frac{19}{60} t^*\right) \right] \quad (8)$$

降温段($t^* > t_h^*$)

$$T_g = \begin{cases} T_{gm} - \frac{625}{60} (t^* - t_h^*) & t_h^* \leq 30 \text{ min} \\ T_{gm} - \frac{250}{60} (3 - t_h^*/60) (t^* - t_h^*) & 30 \text{ min} < t_h^* < 120 \text{ min} \\ T_{gm} - \frac{250}{60} (t^* - t_h^*) & t_h^* \geq 120 \text{ min} \end{cases} \quad (9)$$

$$t^* = \Gamma t \quad (10)$$

$$t_h^* = \Gamma t_h \quad (11)$$

$$\Gamma = \frac{(\eta/0.04)^2}{(\sqrt{\lambda\rho c}/1\,160)^2} \tag{12}$$

式中： $\sqrt{\lambda\rho c}$ 为火灾房间壁面的热惰性； λ 、 ρ 、 c 分别为材料的导热系数、密度、比热容，当房间壁面由不同材料组成时，按面积取加权平均值； t_h 为升温持续时间，当 $0.02\text{ m}^{1/2} \leq \eta \leq 0.2\text{ m}^{1/2}$ 、 $100\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}\cdot\text{K}^{-1} \leq \sqrt{\lambda\rho c} \leq 2\,200\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}\cdot\text{K}^{-1}$ 且 $50\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2} \leq A_{\text{R}}q/A_{\text{t}} \leq 1\,000\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 时，可用式(13)计算

$$t_h = 0.012 \left(\frac{A_{\text{R}}}{A_{\text{t}}} q \right) / \eta \tag{13}$$

式中： A_{R} 为房间面积； q 为火灾荷载密度。

2 参数的随机性

第 1 节中介绍的室内火灾温度发展模型均为参数化的模型，工程设计人员在确定房间几何尺寸、火灾荷载密度、开口因子和房间壁面特性等参数之后，可以利用这些模型方便地得到升温曲线；然而现代结构设计以概率可靠度为目标，且火灾的发生、发展，以及结构在火灾中的反应都存在许多不确定因素，因此结构抗火采用概率可靠度设计的方法是必要的也是合理的。为实现结构抗火采用概率可靠度设计，必须考虑火灾升温过程的随机性。

欧洲规范火灾模型输入参数包括：火灾荷载密度 q 、开口因子 η 、火灾房间壁面的热惰性 $\sqrt{\lambda\rho c}$ 、房间面积 A_{R} 和房间壁面面积 A_{t} 等。一个已知几何尺寸的房间空气升温曲线的随机性取决于火灾荷载密度 q 、开口因子 η 和火灾房间壁面的热惰性 $\sqrt{\lambda\rho c}$ 的随机性。

2.1 火灾荷载密度

目前，世界上一些国家已经针对结构抗火的概率可靠度设计方法进行了调查和统计，得到了一些有价值的研究成果^[11]。英国、美国、瑞典、瑞士等国家较早开展了建筑物火灾荷载调查工作^[12-13]，其中瑞士和美国的火灾荷载调查结果与瑞典的统计结果大体上属于同一数量级。印度对 Kanpur 市 8 栋总面积 11 720 m² 的办公建筑进行了大规模的火灾荷载调查工作^[14]，分析了火灾荷载的影响因素（房间面积、房间用途和房间所在的楼层等），并把调查结果和其他国家的调查数据进行了比较，发现和英国的统计结果大致相同。日本也在 20 世纪 90 年代初对各种类型建筑物的可燃物数量和分布情况进行了详细的调查分析。这些调查工作一般都给出了火灾荷载密度的平均值，有的还给出了最大值和标准差，

为建立建筑物火灾荷载密度的概率模型奠定了基础。

目前，中国尚未有火灾荷载密度的统计资料。由于种种原因，要获得国外火灾荷载调查的原始数据十分困难，因此，笔者选择了从公开发表的文献上直接获取数据的方法。事实上，由于各国社会经济发展水平的不同、民族习惯和宗教的多样性以及评估和抽样方法的差异，使得不同来源的调查结果差别很大。

关于火灾荷载密度的分布模型，大多数调查结果认为服从正态分布，也有的认为服从对数正态分布。本文中采用正态分布模型。

表 1 为各国住宅火灾荷载密度统计数据的比较，其中火灾荷载密度平均值 $\mu(q)$ 最大为 780 MJ·m⁻²，最小为 500 MJ·m⁻²，差别较大，原因可能是不同国家人民居住条件及生活习惯的差异；而火灾荷载密度标准差 $\sigma(q)$ 在 80~100 MJ·m⁻²，变异系数 $V(q)$ 分布在 0.1~0.2 之间，离散性不大，这说明由于住宅房间功能单一，在同一国家人们居住条件是很相似的。鉴于中国现阶段人民生活水平和各国火灾荷载调查结果具有很大的相似性，因此取表 1 中各国统计数据的均值是合理的。在此建议住宅火灾荷载密度均值取 622 MJ·m⁻²，变异系数取 0.15。

表 1 住宅火灾荷载密度比较

数据来源	火灾荷载密度 $q/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2})$			变异系数 $V(q)$
	最大值	$\mu(q)$	$\sigma(q)$	
瑞典		554	81	0.15
CIB W14		780	85	0.11
JCSS-VROU-12-03-97		500	100	0.20
日本	1 104	653		
均值		622	89	0.15

注： $\mu(q)$ 、 $V(q)$ 的均值为算术平均值； $\sigma(q)$ 的均值为均方根；表 2、3 同。

表 2、3 分别为办公室和学校火灾荷载密度调查的结果。由表 2 可以看出，办公室火灾荷载密度的变异系数在 0.30~1.00 之间，离散性很大，这是由办公室使用功能的多样性引起的。

采用和住宅建筑相同的统计方法，得到办公室、学校、医院及旅馆等常见用途的建筑物火灾荷载密度概率(表 4)，以供参考。

在中国尚未有火灾荷载密度统计资料的情况下，利用公开发表的文献进行统计分析，不失为一种可行的办法，但其结果并不能代表中国现阶段的真实情况。本文中的有关数据有待通过系统的火灾荷载调查进行对比和更正。

表 2 办公室火灾荷载密度比较

Tab. 2 Comparison of Fire Load Density of Offices

数据来源	火灾荷载密度 $q/(MJ \cdot m^{-2})$			变异系数
	最大值	$\mu(q)$	$\sigma(q)$	$V(q)$
美国	9 690	664	664	1.00
瑞典		456	158	0.35
印度	1 860	348	262	0.75
CIB W14		420	149	0.35
JCSS-VROU-12-03-97		600	180	0.30
日本	1 299	672		
加拿大		920		
均值		600	583	0.55

表 3 学校火灾荷载密度比较

Tab. 3 Comparison of Fire Load Density of Schools

数据来源	火灾荷载密度 $q/(MJ \cdot m^{-2})$			变异系数
	最大值	$\mu(q)$	$\sigma(q)$	$V(q)$
瑞典		322	94	0.29
CIB W14		285	74	0.26
JCSS-VROU-12-03-97		350	70	0.20
日本	736	690		
均值		412	80	0.25

表 4 火灾荷载密度概率特征

Tab. 4 Probability Characteristics of Fire Load Density

建筑物 用途	火灾荷载密度 $q/(MJ \cdot m^{-2})$		$\beta \cdot \alpha^{-1}$	γ	V
	α	β			
住宅	622	89	0.14	0.15	0.15
办公室	583	343	0.59	0.55	0.59
学校	412	80	0.19	0.25	0.25
医院	385	135	0.38	0.38	0.38
旅馆	389	76	0.20	0.27	0.27

注: α 为 $\mu(q)$ 的算术平均值; β 为 $\sigma(q)$ 的均方根; γ 为 $V(q)$ 的算术平均值; V 为 β/α 和 γ 中的较大值。

2.2 开口因子

开口因子 η 被定义为

$$\eta = \frac{A_v \sqrt{H_v}}{A_i}$$

式中: $H_v = \sum A_i H_i / A_v$, $A_v = \sum A_i$, A_i 为第 i 个开口的面积, H_i 为第 i 个开口的高度。

火灾发生时,门窗等房间开口不一定是敞开的,而且普通的窗玻璃在火灾轰然后可能破碎,这些都是引起开口因子随机性的因素;然而,在大多数情况下,可以获得开口因子 η 的最大值 η_{\max} ,从而 η 可以表示为

$$\eta = \eta_{\max} (1 - \epsilon) \tag{14}$$

式中: ϵ 为随机变量,服从对数正态分布。

因为开口因子 η 值不能为负,故 $0 \leq \epsilon < 1$ 。JC-

SS-VROU-12-03-97 建议 ϵ 的均值取 0.2,标准差取 0.2,由此推导出其概率分布函数如下

$$\varphi(\epsilon) = \frac{1}{0.832 \ 6 \epsilon \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln \epsilon + 1.956 \ 0)^2}{1.386 \ 3}\right] \tag{15}$$

2.3 房间壁面的热惰性

火灾房间壁面的热惰性 $\sqrt{\lambda \rho c}$ 的确定涉及到 3 个参数:壁面材料的密度 ρ 、导热系数 λ 和比热容 c 。有关研究认为,对于常见墙体材料如加气混凝土砌块^[15]、粘土砖^[16]和轻骨料混凝土,导热系数 λ 和密度 ρ 成正相关关系,即

$$\lambda = k\rho + b \tag{16}$$

比热容 c 的变异性不明显,可认为是确定性参数。表 5 为从相关国家标准中查到的部分材料的主要技术性能参数。

表 5 部分材料的主要技术性能参数

Tab. 5 Main Technical Performance Parameters of Some Materials

壁面材料	密度 $\rho/$ ($kg \cdot m^{-3}$)	比热容 $c/$ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	导热系数 $\lambda/$ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
各种粘土砖	1 700	1 000	≤ 0.43
粘土空心砖	1 200~1 400		≤ 0.43
加气混凝土砌块	400~700	1 000~1 200	0.12~0.25
C20 混凝土	2 200~2 400	900~980	1.00~2.00

由于缺乏上述参数的概率分布数据,本文中假定 ρ 服从均匀分布,相关文献^[17]中给出的数据显示 $b \ll \lambda$,故

$$\lambda = k\rho + b \approx k\rho \tag{17}$$

从而

$$\sqrt{\lambda \rho c} \approx \sqrt{k \rho^2 c} = \rho \sqrt{k c} \tag{18}$$

由式(18)可见,火灾房间壁面的热惰性 $\sqrt{\lambda \rho c}$ 亦服从均匀分布,通过对各国相关数据的统计整理,得到了常见建筑材料的热惰性变化范围,见表 6。

表 6 常见建筑材料的热惰性

Tab. 6 Thermal Absorptivity of Common Building Materials

壁面材料	各种粘土砖	加气混凝土砌块	木材(干燥)	C20 混凝土
$\sqrt{\lambda \rho c}/(J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1/2} \cdot K^{-1})$	800~950	220~460	175~350	1 405~2 170

3 结 语

(1)从结构抗火设计实际需要的角度,总结了各国在全盛期室内火灾温度发展模型研究领域的成

果,这些参数化的模型应用起来非常方便,适合工程设计人员使用。为使结构抗火能采用概率可靠度设计,对模型输入参数进行分析,提出了火灾荷载密度和开口因子是火灾升温过程的主要随机性参数。

(2)在对国外火灾荷载调查数据进行统计分析的基础上,建议火灾荷载密度服从正态分布,并给出了住宅、办公室、学校、医院和旅馆的火灾荷载密度的平均值和变异系数。开口因子 η 可用其最大值和一个随机变量 ϵ 表示,即 $\eta = \eta_{\max}(1 - \epsilon)$,同时给出了 ϵ 的概率分布模型。热惰性可认为近似服从均匀分布。参数随机特性的建立为研究升温过程的随机性奠定了基础,由于参数化模型表达式复杂,升温过程的随机性还有待于进一步研究。

(3)鉴于中国尚无相关资料,笔者在研究火灾荷载密度随机性和开口因子的随机性时,使用的是国外数据,尚待在中国未来的调查研究工作中更正。

参考文献:

References:

- [1] 李国强,吴波,韩林海. 钢结构抗火研究进展与趋势[J]. 建筑钢结构进展,2006,8(1):1-13.
LI Guo-qiang, WU Bo, HAN Lin-hai, Development of the Research on Fire-Resistance of Steel Structures[J]. Progress in Steel Building Structures, 2006, 8(1):1-13.
- [2] 霍小平,葛翠玉. 建筑室内热环境测试与分析[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(2):75-81.
HUO Xiao-ping, GE Cui-yu. Analysis and Test of Thermal Environment Data in Buildings[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2):75-81.
- [3] 余志武,唐国庆,丁发兴. 三面受火钢筋混凝土梁温度场非线性分析[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(4):11-14.
YU Zhi-wu, TANG Guo-qing, DING Fa-xing. Nonlinear Analysis of Temperature Field of Reinforced Concrete Beam with Three Surfaces Exposing to Fire[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4):11-14.
- [4] 宋晓勇,邹银生,涂文戈,等. 受火钢筋混凝土柱截面极限承载力研究[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(4):61-64.
SONG Xiao-yong, ZOU Yin-sheng, TU Wen-ge, et al. Research on Ultimate Load Capacity of Cross Section of Reinforced Concrete Columns Exposing to Fire[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4):61-64.
- [5] 李国强,蒋首超,林贵祥. 钢结构抗火计算与设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.
- LI Guo-qiang, JIANG Shou-chao, LIN Gui-xiang. Fire Resistance Analysis and Design of Steel Structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999.
- [6] NOTARIANNI K A. The Role of Uncertainty in Improving Fire Protection Regulation[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2000.
- [7] DINENNO P. SPFE Handbook of Fire Protection Engineering[M]. Quincy: National Fire Protection Association, 1988:134-147.
- [8] LIE T T. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 78, Structural Fire Protection[M]. New York: American Society of Civil Engineers, 1992.
- [9] 马忠诚. 火灾下钢筋混凝土结构损伤评估与抗震修复[D]. 哈尔滨:哈尔滨建筑大学,1997.
MA Zhong-cheng. Damage Evaluation and Aseismic Repair of RC Structures After Fire[D]. Harbin: Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1997.
- [10] EN 1991-1-2; 2002, Basis of Design and Actions on Structures—Actions on Structures Exposed to Fire[S].
- [11] HARMATHY T Z. Fire Safety Design and Concrete[M]. London: Longman Scientific & Technical, 1993: 210-211.
- [12] CIB W14, Design Guide/Structural Fire Safety Journal[S].
- [13] JCSS-VROU-12-03-97, Probabilistic Model Code Part 2-Load Models[S].
- [14] SUNIL V S, KAMESWARA R. Fire Loads in Office Buildings[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(3):365-368.
- [15] 刘敬中,颜敏. 加气混凝土的性能与工程应用[J]. 山东建材,2005,26(2):46-48.
LIU Jing-zhong, YAN Min. Properties and Application of Aerated Concrete[J]. Shandong Building Materials, 2005, 26(2):46-48.
- [16] MICHELE D, FRANCESCA M, PAOLO P, et al. Thermal Conductivity of Clay Bricks[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(1):8-14.
- [17] 段军,丁建彤,郭玉顺. 1 000~1 400 级轻骨料混凝土的密度与强度及保温性能的关系[J]. 墙材革新与建筑节能,2005,10(11):44-47.
DUAN Jun, DING Jian-tong, GUO Yu-shun. The Relation Between Density, Strength and Heat Insulation Property of 1 000~1 400 Light Weight Aggregate Concrete[J]. Wall Materials Innovation & Energy Saving in Buildings, 2005, 10(11):44-47.

