

火灾过程中火源热释放速率模型及其实验测试方法

程远平, 陈亮, 张孟君

(中国矿业大学, 江苏 徐州 221008)

摘要:详细分析了目前常用的火源热释放速率模型, 并对其特点和参数范围进行对比讨论; 同时还介绍了基于氧消耗原理的热释放速率测试方法和基于质量损失速率的热释放速率测试方法, 并给出了部分实验测试结果。

关键词:火灾, 热释放速率, 模型, 实验测试方法

中图分类号:TD **文献标识码:**A

0 引言

人们问起火灾危险性的第一个问题通常是“火有多大?”。这个问题过去很长一段时期得不到定量回答, 现在我们知道这个问题实际上就是问“火灾过程中的热释放速率是多大?”。大量的火灾案例证明, 尽管火灾中的有毒气体是导致人员伤亡的主要原因, 但描述火灾最重要的参数是热释放速率, 而不是有毒气体或点燃时间。

火灾过程中火源的热释放速率是评价火灾危险性的重要参数, 也是进行火灾模拟研究的基础参数。在过去的20多年时间里, 火灾过程中热释放速率的测试方法有较大的发展, 出现了基于氧消耗原理的热释放速率测试方法, 如小尺寸热释放速率实验的ISO5660标准、全尺寸墙角实验的ISO9705标准, 一些火灾实验室还发展了基于氧消耗原理的大型热释放速率测试方法。此外, 基于质量损失速率的热释放速率测试方法可以作为基于氧消耗原理测试方法的补充。

与此同时, 基于区域模型(Zone Model)的火灾模拟方法也得到了长足发展, 目前比较著名的火灾模

拟软件有CFAST、MRFC、Jasmine、Sophie等, 部分软件已经可以在Windows9.x和Windows2000界面下运行。上述火灾模拟软件已经成为建筑火灾研究和火灾危险性评价的重要工具, 部分软件已被成功地运用于隧道火灾的研究和评价。但区域模型的核心是如何构造接近于实际情况的火源热释放速率模型。

本文详细地介绍了几种常用火源热释放速率模型的构造方法及相关参数范围、基于氧消耗原理的热释放速率测试方法和基于质量损失速率的热释放速率测试方法, 并给出了部分实验测试结果。

1 常用火源热释放速率模型

1.1 t^2 模型—CFAST软件中应用的模型

在北美地区(美国)主要采用 t^2 模型描述火灾过程中热释放速率随时间的变化过程。不考虑火灾的初期准备过程时, 其模型如下:

$$\dot{Q} = b \cdot t^2 \quad (1)$$

式中: \dot{Q} 火源的热释放速率, kW;

b 火灾发展系数, $b = \dot{Q}_0/t_0^2$, kW/s²;

t 火灾的发展时间, s;

t_0 火源热释放速率 $\dot{Q}_0 = 1\text{MW}$ 时所需要的时间, s。

火灾发展系数 b 表征火灾蔓延的快慢, 根据NFPA的分类^[1], 火灾发展阶段可分为极快、快速、中等和缓慢四种类型, 其火灾发展过程如图1所示。表1给出了火灾发展系数与NFPA标准中示例材料的对应关系。

表1 火焰水平蔓延速度参数值
Tab.1 The Parametric Values of horizontal spread rate

可燃材料	火焰蔓延分级	$b / \text{kJ/s}^2$	$Q_0 = 1\text{MW}$ 时的时间/s
没有注明	缓慢	0.0029	584
无棉制品 聚酯床垫	中等	0.0117	292
塑料泡沫 堆积的木板 装满邮件的邮袋	快速	0.0469	146
甲醇 快速燃烧的软垫座椅	极快	0.1876	73

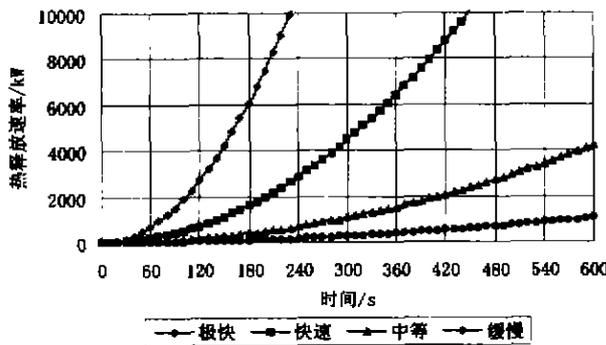


图1 热释放速率的 t^2 模型描述

Fig.1 The Description of T-squared Growth Rate Fire Model of Heat Release Rate

CEFAST(Consolidate Fire and Smoke Transport)是美国标准技术研究所(National Institute of Standards and Technology)发展的火灾与烟气在建筑物内蔓延的多室区域模拟软件^[2]。该软件在 t^2 模型的基础上,采用预先给定最大热释放速率和火灾衰减阶段的方法构造火灾发展的完整模型(见图2),其数学描述如式(2)所示:

$$\begin{cases} \dot{Q} = b \cdot t^2 & 0 \leq t \leq t_1 \\ \dot{Q} = \dot{Q}_{\max} & t_1 \leq t \leq t_2 \\ \dot{Q} = b' \cdot (t - t_3)^2 & t_2 \leq t \leq t_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: b' 火灾衰减阶段的系数, $b' = \dot{Q}_{\max} / (t_2 - t_3)^2$, W/s^2 ;

\dot{Q}_{\max} 火源的最大热释放速率, W ;

t_1 火源热释放速率达到最大值 \dot{Q}_{\max} 时所需要的时间, s ;

t_2 火源热释放速率开始衰减时所需要的时间, s ;

t_3 火源热释放速率衰减至0时所需要的时间, s 。

1.2 MRFC 软件中应用的模型

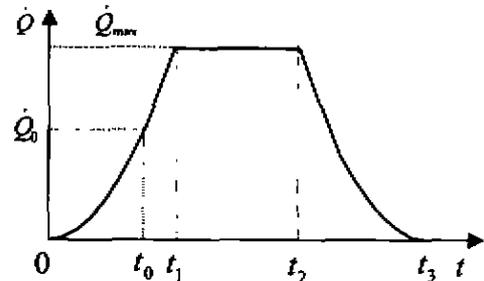


图2 CEFAST 应用模型图示

Fig.2 The Diagrammatic View of CEFAST Application Model

MRFC(Multi-Room-Fire-Code)是奥地利维也纳工业大学建筑材料、建筑物理及火灾防护研究所(Institut fuer Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz der Technischen Universitaet Wien)发展的火灾与烟气在建筑物内蔓延的多室区域模拟软件。该软件中运用可燃物火焰蔓延速度及其燃烧特性参数计算热释放速率,其计算公式为^[3]:

$$\dot{Q} = r_{sp} \cdot H_u \cdot A_f \cdot \chi \quad (3)$$

式中: r_{sp} 单位面积上的质量损失速率, $\text{kg/m}^2\text{s}$;

H_u 可燃物的平均热值, kJ/kg ;

χ 可燃物的燃烧效率, %;

A_f 火源燃烧面积, m^2 , $A_f = X \cdot Y$, 对于矩形

火源 $X = a_0 + v_x \cdot t$ 及 $Y = b_0 + v_y \cdot t$,

对于圆形火源 $A_f = \pi \cdot R^2$,

$R = R_0 + v_x \cdot t$;

a_0 沿 X 方向的点燃长度, m ;

b_0 沿 Y 方向的点燃长度, m ;

R_0 点燃面积的半径, m ;

R 火源燃烧面积的半径, m ;

v_x 火焰沿 X 方向的蔓延速度, m/s ;

v_y 火焰沿 Y 方向的蔓延速度, m/s;

t 火灾的发展时间, s。

根据文献[4,5]提供的纸卷、原木、木板材和甲醇的燃烧参数(见表 2),取平均值代入式(2)得到火灾发展阶段热释放速率随时间的变化,如图 3 所示。式(3)中令 $A_f = (v \cdot t)^2$,在充分燃烧的条件下取 $\chi = 100\%$,代入式(1)得:

$$v = \left(\frac{b}{r_{sp} \cdot H_u} \right)^{1/2} \quad (4)$$

式中: v 火焰的蔓延速度, m/s。

根据研究经验,单位面积上的平均热释放速率为 100 kW/m^2 、 300 kW/m^2 和 800 kW/m^2 分别对应表 1 中火灾蔓延分级中等、快速和极快三个等级。将上述参数代入式(4)得出对应的火焰蔓延速度分别为 10 mm/s 、 12.5 mm/s 和 15 mm/s 。在火焰蔓延极快的条件下,蔓延速度 15 mm/s 太小,表 2 中甲醇火焰的蔓延速度为 40 mm/s 。根据文献[6]的研究成果,火灾蔓延分级缓慢、中等、快速和极快四个级别所对应的火焰蔓延速度分别为 5 mm/s 、 8 mm/s 、 $12 \text{ mm/s} - 20 \text{ mm/s}$ 和 $30 \text{ mm/s} - 50 \text{ mm/s}$ 。在火灾轰然阶段,火焰蔓延速度将达到 $80 \text{ mm/s} - 120 \text{ mm/s}$ 。

表 2 可燃物燃烧参数表

可燃材料	热值 /MJ/kg	单位面积上的质量损失速率 /kg/(m ² ·min)	蔓延速度 /mm/s
纸卷	13.68	0.45	4.5
原木	15.48	0.90	8
板材	15.48	0.90	16
甲醇	27.00	0.93	40

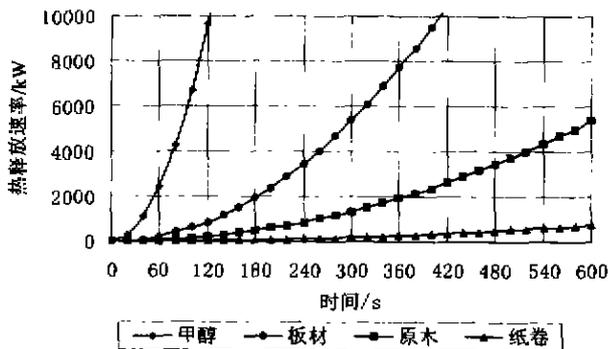


图 3 热释放速率的 MRFC 模型描述
Fig.3 The Description of MRFC Model of Heat Release Rate

1.3 FFB 应用的模型

FFB(Forschungsstelle fuer Brandschutztechnik)是德国卡尔斯鲁厄大学火灾研究所。该研究所拥有一个 $30 \times 15 \times 12 \text{ m}$ 的多功能火灾实验大厅,实验大厅内设有火灾图像摄录系统、数据采集系统、烟气测试系统及大型基于氧消耗原理的热释放速率测试系统。在该实验大厅内已完成了卧室火灾及灭火实验、各种结构的工业货架仓库的火灾及灭火实验、工业轻顶结构的耐火检验、玻璃帷幕结构建筑的火灾及烟气蔓延实验、多层木结构建筑的火灾及烟气蔓延实验、汽车火灾实验、以及各种灭火剂的灭火实验。在大量实验的基础上,得出如下热释放速率发展模型[7]。

$$\dot{Q} = \dot{Q}_0 \cdot e^{\alpha t} \quad (5)$$

式中: α 火灾增长阶段的系数, s^{-1} , 根据实验结果 $\alpha = 0.0055 \cdot \text{s}^{-1}$;

\dot{Q}_0 初始火源的热释放速率, kW;

t 火灾的发展时间, s。

图 4 给出了初始火源热释放速率 \dot{Q}_0 为 2.0 MW 、 1.0 MW 和 0.5 MW 条件下热释放速率随时间的变化。但该模型没有给出初始火源热释放速率 \dot{Q}_0 与火源蔓延速度之间的分级对应关系。

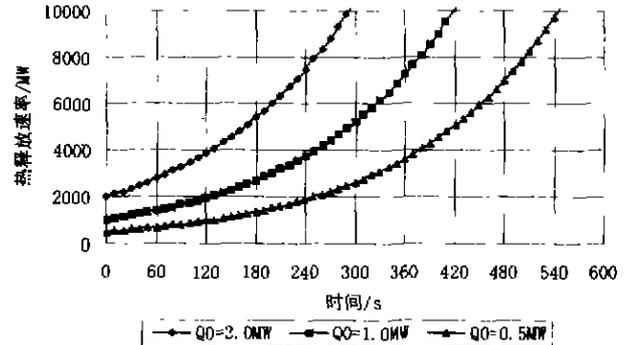


图 4 热释放速率的 FFB 模型描述

Fig.4 The Description of FFB Model of Heat Release Rate

2 火源热释放速率的实验测试方法

2.1 基于氧消耗原理的测试方法

氧消耗原理是指大多数固体材料完全燃烧每消耗一单位质量的氧气所释放的热量基本相同 ($13.1 \pm 0.05 \text{ MJ/kg O}_2$)。通过测定设在烟气排放干管内的烟气流经孔板前后的压差和孔板处的烟气温度利用式(6)计算烟气的质量流量。

$$\dot{m}_e = C \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \quad (6)$$

式中： \dot{m}_e 管道中烟气的质量流量，kg/s；
 Δp 气体经过孔板后压力的变化，Pa；
 T_e 气体在孔板处的温度，K；
 C 孔板流量计的标定常数。

在实验过程中，同时测定孔板处烟气的组分，用下式计算材料在燃烧过程中的热释放速率^[8,9]。

$$\dot{Q} = 1.10 \cdot E \cdot \dot{m}_e \cdot \frac{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}{1.105 - 1.5 \cdot X_{O_2}} \quad (7)$$

式中： E 材料燃烧消耗单位质量氧气放出的能量，13.1 MJ/kg；

$X_{O_2}^0$ 进入系统空气中 O_2 的摩尔分数；

X_{O_2} 烟气中 O_2 的摩尔分数。

图5给出了小汽车火灾热释放速率的实验结果，图6给出了部分家具火灾热释放速率的实验结果^[10]。

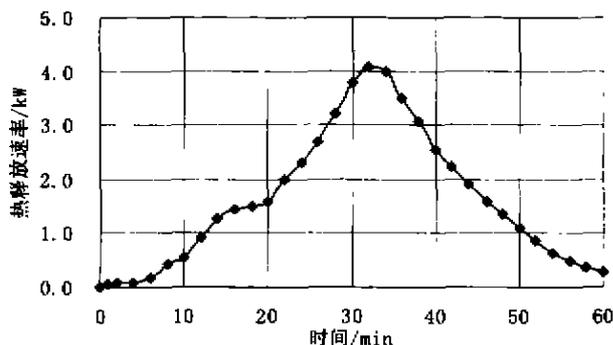


图5 小汽车火灾热释放速率的实验结果(氧消耗原理)

Fig.5 The Experimental Result of Heat Release Rate of The Car Fire (Oxygen Consumption Theory)

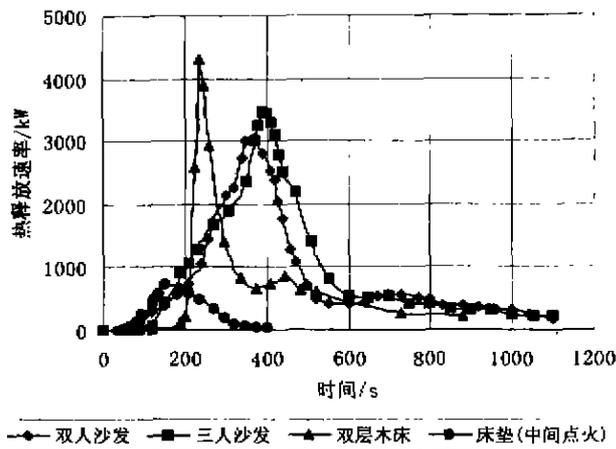


图6 家具火灾热释放速率的实验结果(氧消耗原理)

Fig.6 The Experimental Result of Heat Release Rate of The Furniture Fire (Oxygen Consumption Theory)

2.2 基于质量损失速率的测试方法

在火灾实验中将可燃物放置在电子秤上，这样在实验过程中通过数据采集系统可以直接测定可燃物质量随时间的变化，并换算为可燃物的质量损失速率 \dot{m} ，运用下式计算可燃物的热释放速率。

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot H_u \cdot \chi \quad (8)$$

对于混合可燃物可采用下式计算可燃物的平均热值^[11]。

$$H_u = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot H_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot H_i \quad (9)$$

式中： H_i 第 i 种可燃物的热值，kJ/kg；

P_i 第 i 种可燃物所占的比例，%；

n 混合可燃物中可燃物的种类。

图7为一 20m² 居室内，用 336 kg 木垛进行燃烧实验的质量损失速率实测结果。图中的热释放速率曲线是运用式(8)的计算结果^[12]。

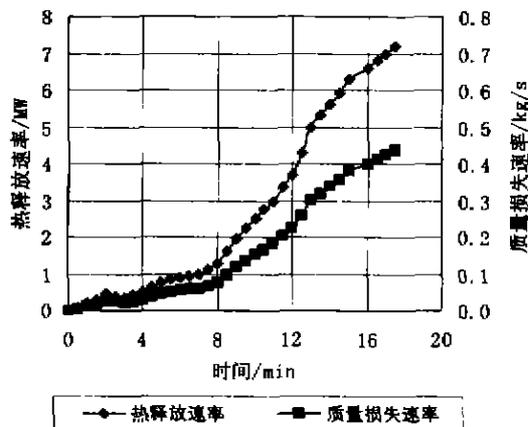


图7 木垛火灾热释放速率的实验结果(质量损失速率)

Fig.7 The Experimental Result of Heat Release Rate of The Stack Fire (Mass Loss Rate)

3 结束语

火灾过程中火源的热释放速率是评价火灾危险性的重要参数，也是进行火灾模拟研究的基础参数。在实际建筑(包括工业建筑)火灾中，可燃物种类繁多如木材、塑料、纺织品、橡胶、油品等，多数火灾往往是上述多种可燃物的混合。运用实验的方法研究单一可燃物和混合可燃物的燃烧过程，获得这些材料在火灾过程中的热释放速率，建立相关数据库，用于实际火灾的评价和模拟研究工作是十分必要的。目前应用较为普遍的是基于氧消耗原理的热释放速率测试方法，如小尺寸热释放速率实验的 ISO5660

标准、全尺寸墙角实验的 ISO9705 标准;一些火灾实验室还发展了基于氧消耗原理的大型热释放速率测试方法,如 FFB 实验室的测试装置。此外,基于质量损失速率的测试方法可以作为基于氧消耗原理测试方法的补充。

火灾实验是一种破坏性试验,大型火灾实验耗费往往很大。运用目前较为成熟的数学模型用于火灾模拟研究工作是切实可行的,如 CFAST 和 MRFC 软件中应用的模型,但要求使用者应具有丰富的经验。模型化的方法虽然处理问题较粗糙,但如果相关参数选用合理,也可满足相关火灾研究工作的需要。

参 考 文 献

- [1] ISO/CD 13388-Fire Safety Engineering. Design Fire Scenarios and Design Fires [DB/CD]. May 1997.
- [2] Walter W. Jones, Glenn P. Fomey. NIST TN 1431, A Technical Reference for CFAST: An Engineering Tool for Estimating Fire and Smoke Transport [R]. National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, Gaithersburg, MD 20899, March 2000: 17 ~ 77.
- [3] U. Schneider. Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz [M]. expert-Verlag, Renningen, 2001: 151 ~ 187.
- [4] DIN Deutsches Institut fuer Normung e. V. Baulicher Brandschutz im Industriebau [M]. Berlin: Kommentar zu DIN 18230. Beuth Verlag GmbH, 1999: 301 ~ 336.
- [5] ISO/CD 13393 Fire Safety Engineering. Subsystem 4. Detection, Activation and Suppression [DB/CD]. May 1997.
- [6] U. Schneider. Bewertung des Abbrandverhaltens von Stoffen und Waren [M]. Beitrag in Ingenieurmaessige Verfahren im Brandschutz (5). Koeln: VdS Schadenverhuetung. 1998: 1 ~ 32.
- [7] R. John. Rauch- und Waermeabzug bei Braenden in grossen Raeumen [J]. vfdB-Zeitschrift Forschung, Technik und Management im Brandschutz, 1988, 38(1): 21 ~ 25.
- [8] ISO 5660-1. Fire tests Reaction to fire Rate of heat release from building products [S], First edition (1993).
- [9] ISO 9705. Fire tests Full-scale room test for surface products [S], First edition (1993).
- [10] National Institute of Standards and Technology. Building and Fire Research Laboratory [EB/OL]. <http://fire.nist.gov/fire/fires/fires.html>, 2000.
- [11] D. Brein. Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermaessiger Anordnung gestapelt sind, Teil 2: Grossbrandversuche 1 [R]. Forschungsstelle fuer Brandschutztechnik an der Universitaet Karlsruhe (TH). November 1986: 1 ~ 35.
- [12] J. Kunkelmann. Verringerung der Temperaturen an Stahl-Glasfassaden im Brandfall durch thermische Entlastungsoeffnung und ortsfeste Niederdruck-Wasserbeloesanlagen [R]. Forschungsstelle fuer Brandschutztechnik an der Universitaet Karlsruhe (TH). April 2001: 29 ~ 69.

The Models and Experimental Testing Method of Heat Release Rate of Fuel During the Development of Fire

CHENG Yuan-ping, CHEN Liang, ZHANG Meng-jun

(China University of Mining and Technology,
221008 Xuzhou, Jiangsu, China)

Abstract: This paper in detail analyses the models of heat release rate of fuel usually used at present, contrasts the features of these models and discusses the parametric ranges. The testing methods of heat release rate based on the oxygen consumption theory and mass loss rate are introduced and the experimental testing results are in part given in this paper.

Key words: Fires, Heat Release Rate, Model, Experimental Testing Method