

文章编号: 1001-1455(2010)06-0622-06

# 基于混沌理论的室内轰燃判据\*

陈爱平<sup>1</sup>, 宋 飞<sup>2</sup>

(1. 中国人民武装警察部队学院消防工程系, 河北 廊坊 065000;

2. 上海市消防总队特勤支队, 上海 200335)

**摘要:** 根据混沌理论, 在研究大量小规模室内火灾实验结果的基础上, 得到了一种新的、通过温度变化率表征的轰燃判据; 利用大规模室内火灾的实验结果, 对该判据的实用性进行了初步验证。结果表明: 这一判据可以应用于预测大规模实际室内火灾中轰燃的发生。

**关键词:** 爆炸力学; 轰燃判据; 混沌理论; 室内火灾; 温度变化率

**中图分类号:** O381

**国标学科代码:** 130·35

**文献标志码:** A

## 1 引言

近年来, 造成群死群伤的恶性火灾事故屡有报道<sup>[1]</sup>。研究发现, 火灾在发展过程中很多都发生了破坏性极强的轰燃现象。准确预测轰燃发生的可能性, 已成为国际火灾学术界特别关注的热点问题, 为此人们提出了很多方法<sup>[2]</sup>。轰燃是一个非线性、非稳定的热动力学过程, 可以利用混沌理论进行研究, W. K. Chow<sup>[3-4]</sup>在这方面做了一些工作, 但目前尚缺乏深入、系统的研究。根据混沌理论, 室内火灾发展过程的随机性源自其非线性的作用; 将这一过程视为离散的动态系统, 并用非线性混沌动力学模型加以描述, 能较准确地反映其运行及规律<sup>[5-6]</sup>。燃料被点燃前, 室内处于相对稳定状态; 燃料被点燃后, 室内将逐渐进入较为波动的状态; 随着火势增长, 一旦满足某些条件, 室内就可能进入混沌状态, 即可能发生轰燃。室内气体平均温升的变化, 与轰燃发生与否则有直接关系<sup>[2,4]</sup>。在轰燃发生时, 室内气体温度会产生突变, 与此同时温度变化率( $dT/dt$ )会达到峰值。由此, 可利用  $T_{n+1} - T_n$  ( $T_{n+1}$ 、 $T_n$  为室内火灾在不同时刻的温度) 和  $dT/dt - T_n$  点图, 结合  $dT/dt$  数据, 判断室内轰燃发生的可能性。

## 2 小规模室内火灾实验结果

利用 SNHZ-01 实验装置<sup>[2,7-8]</sup>, 分别用有机玻璃和煤油作为燃料, 做了大量不同条件下的小规模室内火灾实验。实验数据会受到许多环境和人为因素影响, 如燃料被点燃后开始采集数据的时间可能不一致、强轰燃产生的强火焰可能会造成实验箱内顶棚下方热电偶的瞬时不稳定等。为确保研究的可靠性, 下列情况的数据不予采用<sup>[9-10]</sup>: (1) 燃料的热释放速率小于 10 kW 时, 火焰较小, 室内上方的热烟气流层尚未形成, 点燃后 30 s 内记录的所有数据或燃料质量损失速率未达到 0.06 g/s (有机玻璃) 或 0.233 g/s (煤油) 时记录的所有数据; (2) 根据极限绝热火焰温度物理意义, 符合以下不等式的所有数据

$$\frac{\Delta T}{\dot{Q}/(\dot{m}_g c_p)} > 1.0 \quad (1)$$

式中:  $\Delta T$  为室内热烟气和环境空气间的温度差,  $\dot{Q}$  为燃料的热释放速率,  $\dot{m}_g$  为热烟气从实验箱流出的速率,  $c_p$  为热烟气的比定压热容。

热烟气层温度随时间的变化曲线如图 1、2 所示。从图中可看出, 根据峰值温度 ( $T_p$ ), 热烟气层温

\* 收稿日期: 2009-08-31; 修回日期: 2009-11-24

基金项目: 公安部应用创新计划项目(2009YYCXWJXY004)

作者简介: 陈爱平(1964—), 男, 博士, 教授。

度变化曲线明显地分为 3 个区域。在以前的研究中,也发现了类似结果<sup>[2,8]</sup>。在固体燃料条件下,这 3 个区域对应的峰值温度分别为:  $T_p > 650^\circ\text{C}$ 、 $550^\circ\text{C} < T_p < 650^\circ\text{C}$  和  $T_p < 550^\circ\text{C}$ ;在液体燃料条件下,对应的峰值温度分别为:  $T_p > 550^\circ\text{C}$ 、 $450^\circ\text{C} < T_p < 550^\circ\text{C}$  和  $T_p < 450^\circ\text{C}$ 。另外,在其他条件相同时,相对于液体燃料,固体燃料引燃后温度开始急剧上升的时间和火灾持续的总时间较长,这主要是由于固态燃料的蒸发潜热较高、而可燃蒸气挥发及燃烧速率较低所致。

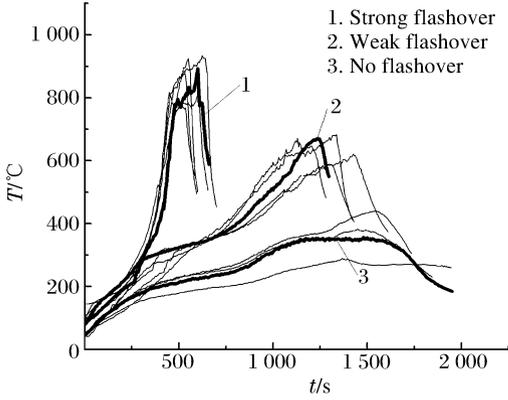


图 1 固态燃料条件下热烟气层温度变化曲线(有机玻璃)  
Fig. 1 Hot gas layer temperature histories of PMMA

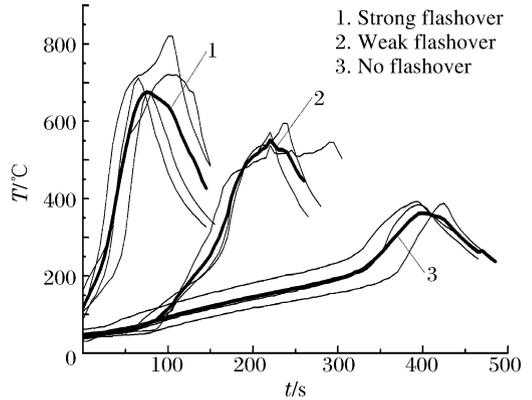


图 2 液态燃料条件下热烟气层温度变化曲线(煤油)  
Fig. 2 Hot gas layer temperature histories of kerosene

尽管对轰燃及其判据众说纷纭<sup>[2]</sup>,但有一点得到了普遍认可,即:如果室内出现了火焰覆盖顶棚或者火焰从开口处喷出的现象,则认为发生了轰燃。从实验现象中可以发现,上述 3 个区域与 3 类火灾相对应。在第 1 个区域中,几乎所有的火灾出现了猛烈的火焰喷出现象,因此认为室内发生了强轰燃,如图 3 所示;在第 2 个区域中,几乎所有的火灾出现了火焰喷出但不猛烈的现象,因此认为室内发生了弱轰燃,如图 4 所示;在第 3 个区域中,几乎所有的火灾没有出现火焰喷出,因此认为室内没有发生轰燃。



图 3 强轰燃实拍照片  
Fig. 3 Practical photo of strong flashover



图 4 弱轰燃实拍照片  
Fig. 4 Practical photo of weak flashover

### 3 小规模室内轰燃判据

#### 3.1 特征曲线

从图 1、2 中可以看出,在强、弱和无轰燃情况下各自的温度曲线(特别是温度陡升部分)十分相近。考虑到火灾初期人为和环境等因素(如每次数据记录不同步、环境温度不同等)的影响,出现这种情况不难理解。为消除这些因素对火灾曲线的影响,对相同燃料、相同轰燃情况的曲线进行加和平均,即对同

一时刻同类所有曲线的温度值进行求和平均得到若干数值点,用平滑曲线连接这些点,得到一条代表性曲线(图1、2中的加粗曲线),这里将其定义为特征曲线。下面根据特征曲线,运用混沌理论研究轰燃及其判据。

### 3.2 根据 $T_{n+1}-T_n$ 和 $dT/dt-T$ 点图得到的轰燃判据

图5(a)、(b)分别是固体和液体燃料燃烧时在3种轰燃情况下的  $T_{n+1}-T_n$  点图,图中相邻2个温度  $T_{n+1}$ 、 $T_n$  之间的时间间隔为30 s。可以看出:无论是强轰燃还是弱轰燃,都存在一个温度突变阶段(图中虚线部分),而且强轰燃时的温度变化斜率(约3.4)明显大于弱轰燃时的温度变化斜率(约2.1);没有发生轰燃(即  $T_p < 550^\circ\text{C}$ )时,所有点基本趋于一条直线,没有出现突变现象。

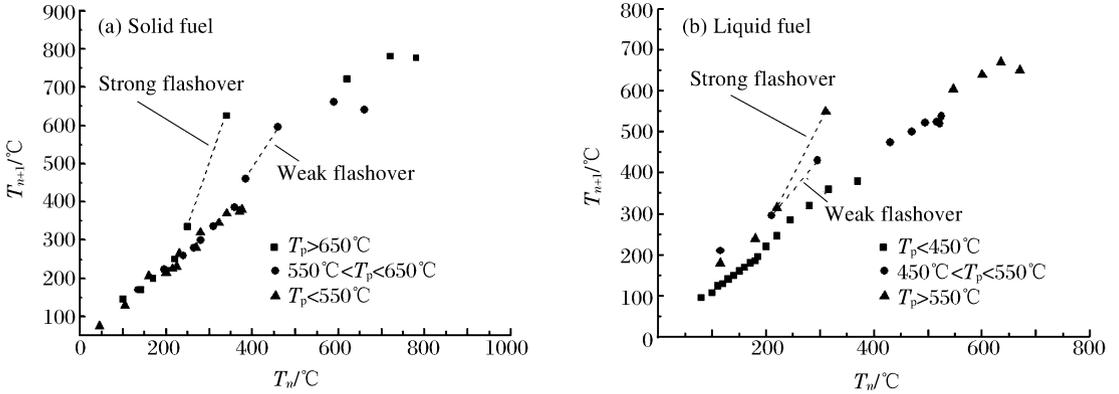


图5  $T_{n+1}-T_n$  点图

Fig. 5 Point diagram of  $T_{n+1}-T_n$

分析实验数据以及与该图进行比较,并结合实验现象,发现发生强轰燃的区域处于图中虚线所标示的区间内。图6是强轰燃情况下的  $dT/dt-T$  点图。其中,热烟气层温度变化率( $dT/dt$ )定义为

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_i \approx \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \quad (2)$$

式中: $\Delta t$  为数据采集时间间隔,下标  $i$  和  $i-1$  分别表示  $i$  和  $i-1$  时刻对应的数值( $i=1, 2, \dots, t_p/\Delta t$ , 其中  $t_p$  为室内火灾温度达到峰值时对应的时间)。

可以看出:虚线标示区间的温度变化率在整个火灾过程中处于最大值,达到  $6.2^\circ\text{C/s}$ ,而且该温度变化率明显高于其他区间内的值。同样可分析得出:在弱轰燃情况下,轰燃阶段的温度变化率最高,达到  $2.3^\circ\text{C/s}$ ,而且明显高于其他阶段,但比强轰燃情况下低得多;在没有发生轰燃时,温度变化率的最大值只有  $0.9^\circ\text{C/s}$ ,远低于2种轰燃情况下的温度变化率峰值;对于液体燃料,在这3种情况下,最高温度变化率分别为  $11.5$ 、 $6.8$  和  $3.0^\circ\text{C/s}$ ,分别高于固体燃料相应的情况。

### 3.3 根据 $(dT/dt)_{\text{peak}}-T_p$ 点图得到的轰燃判据

为了得到适用性更广泛的轰燃判据,需要根据混沌理论对所有实验的火灾曲线进行研究。图7所示为固体燃料燃烧在强轰燃情况下的  $(dT/dt)_{\text{peak}}$

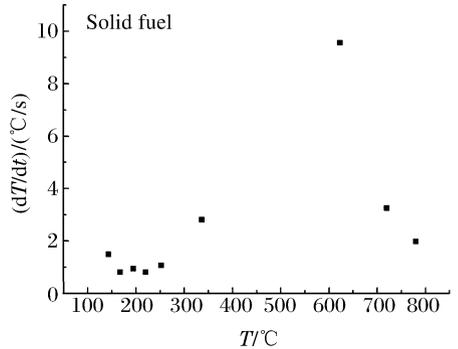


图6 强轰燃情况下的  $dT/dt-T$  点图

Fig. 6 Point diagram of  $dT/dt-T$  in the case of strong flashover

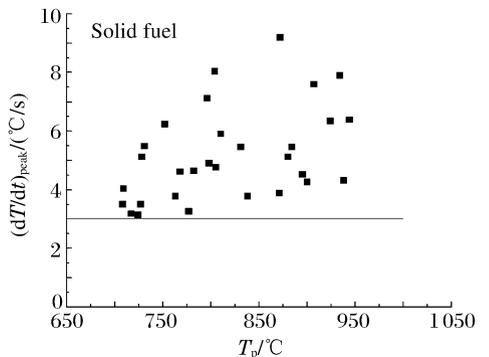


图7 强轰燃情况下  $(dT/dt)_{\text{peak}}-T_p$  点图

Fig. 7 Point diagram of  $(dT/dt)_{\text{peak}}-T_p$  in the case of strong flashover

$T_p$  点图。其中,热烟气层温度变化率峰值定义为

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_{\text{peak}} = \max\left(\frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t}\right) \quad (3)$$

从图7中可以看出,在固体燃烧火灾中,所有强轰燃情况下的温度变化率峰值(即 $(dT/dt)_{\text{peak}}$ )均不低于 $3.0\text{ }^\circ\text{C/s}$ 。同样可得到:在弱轰燃情况下, $(dT/dt)_{\text{peak}}$ 均介于 $1.3\sim 3.0\text{ }^\circ\text{C/s}$ 之间;而在不轰燃的情况下, $(dT/dt)_{\text{peak}}$ 均不高于 $1.3\text{ }^\circ\text{C/s}$ 。因此,在一般情况下,常见固体火灾要发生轰燃,温度变化率峰值必须达到 $1.3\text{ }^\circ\text{C/s}$ 以上。还可得到:所有火灾实验条件下的温度变化率峰值均高于 $0.9\text{ }^\circ\text{C/s}$ 。这说明:在用有机玻璃作为燃料时,若温升速率达不到 $0.9\text{ }^\circ\text{C/s}$ ,即便引燃了,但由于火焰规模较小,无法给空间内的热烟气提供足够的热量,火焰本身、上层热烟气以及顶棚对于燃料表面通过辐射、对流等形式的热反馈不足以保证火焰持续燃烧,致使无法发展成规模火灾。

对于液体燃料,通过类似的分析可得到:所有强轰燃情况下的温度变化率峰值均高于 $10.0\text{ }^\circ\text{C/s}$ ;在弱轰燃情况下,这一峰值介于 $5.0\sim 10.0\text{ }^\circ\text{C/s}$ 之间;而在不轰燃的情况下,这一峰值均低于 $5.0\text{ }^\circ\text{C/s}$ ;能够发生火灾的温度变化率峰值的最小值为 $3.0\text{ }^\circ\text{C/s}$ 。

以上结果表明:液态燃料火灾发生轰燃的临界温度变化率峰值为固态燃料情况下该值的约3倍,而发生强轰燃时的判别值也基本满足3倍关系。燃料的热释放速率越大,室内的温度变化率也就越高。煤油和有机玻璃的燃烧热分别为 $42.89\text{ MJ/kg}$ 和 $16\text{ MJ/kg}$ 左右,约成2.7倍关系。根据文献[11],常见液态燃料(汽油、柴油、航空燃油等)的燃烧热均在 $40\sim 45\text{ MJ/kg}$ 之间,而常见固态燃料(木材、天然纤维、褐煤等)燃烧热基本介于 $16\sim 18\text{ MJ/kg}$ 之间,再考虑到固、液态燃料在蒸发、燃烧等方面的差别,上述3倍左右关系可以理解。这从另外一个方面说明了该轰燃判据具有相当广泛的应用范围。

#### 4 大规模室内轰燃实验验证

以上轰燃判据是在分析小规模实验数据的基础上得到的,是否适用于大规模火灾,需要验证。为此,进行了大规模室内轰燃实验。实验房间为 $4\text{ m}\times 3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 的砖混结构,其中一面墙有 $2\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 的开口;使用的燃料为 $1\text{ }095\text{ kg}$ 木材,均匀铺设于地面;用48个热电偶记录了房间上部不同位置的温度值,在分析时取其平均值作为热烟气层温度。选取其中的一组实验数据进行分析,热烟气层温度变化曲线如图8所示。

热烟气层温度的最大值为 $965\text{ }^\circ\text{C}$ ,该曲线与普通火灾的温度变化曲线相符。火灾从初期经过一个温度突然上升阶段后,便快速进入到充分发展火灾的阶段。此时,房间内一片火海,并伴有强烈的火焰喷出,说明发生了强轰燃现象,如图9所示。运用混沌理论分析实验结果,其 $dT/dt-T$ 点图如图10。

从图中可以得到,火灾温度变化率峰值达到 $5.2\text{ }^\circ\text{C/s}$ ,远高于判据中固体燃料发生轰燃临界温度变

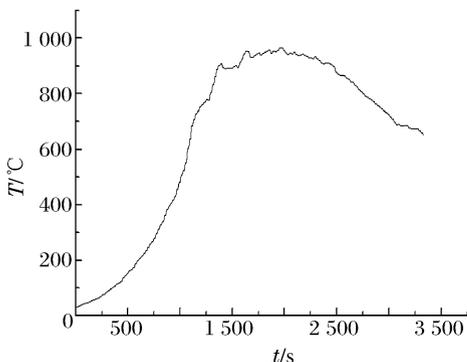


图8 大规模实验火灾热烟气层温度变化曲线  
Fig. 8 Hot gas layer temperature history of large-scale experimental fires



图9 大规模实验火灾中强轰燃实拍照片  
Fig. 9 Practical photo of strong flashover in large-scale experimental fires

化率峰值  $1.3\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ,也接近于发生强轰燃时的  $6.2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ,基本符合上述轰燃判据。

分析温度曲线上升阶段的数据,得到图 11 中的  $T_{n+1}-T_n$  点图。图中有一温度突变的区间存在,按照混沌理论,在该区间内便发生了轰燃。这进一步说明,上述轰燃判据也可在大规模实际火灾中使用。

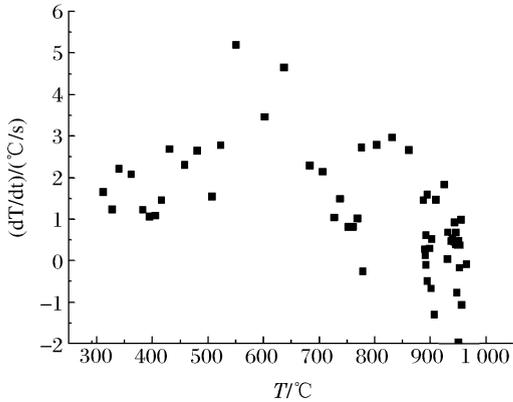


图 10 大规模实验火灾的  $dT/dt-T$  点图

Fig. 10 Point diagram of  $dT/dt-T$  of large-scale experimental fires

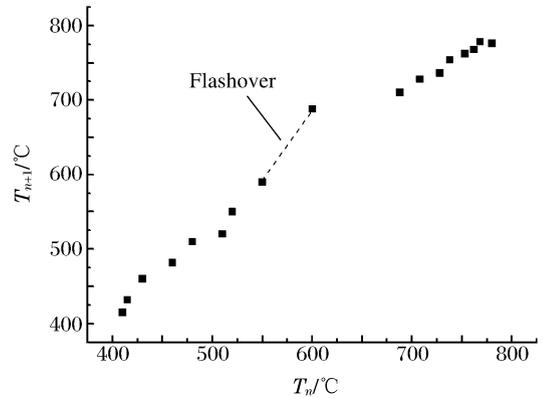


图 11 大规模实验火灾的  $T_{n+1}-T_n$  点图

Fig. 11 Point diagram of  $T_{n+1}-T_n$  of large-scale experimental fires

## 5 结 论

(1)在小规模实验火灾中,热烟气层温度变化曲线都可以明显地分为 3 个区域,分别与强轰燃、弱轰燃和不轰燃 3 种情况对应。在固体和液体燃料条件下,这 3 个区域对应的热烟气层峰值温度分别为:  $T_p > 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $550\text{ }^{\circ}\text{C} < T_p < 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $T_p < 550\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $T_p > 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $450\text{ }^{\circ}\text{C} < T_p < 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $T_p < 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2)在小规模实验火灾中得到,在固态燃料条件下,强轰燃时温度变化率达到  $6.2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 、弱轰燃时为  $2.3\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 、不轰燃时仅为  $0.9\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ (此值也是室内能够发生火灾时温度变化率峰值的最小值),而发生轰燃温度变化率峰值须达到  $1.3\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  以上;而在液态燃料条件下,这 4 个值分别为  $11.5$ 、 $6.8$ 、 $3.0$  和  $5.0\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 。

(3)根据大规模室内火灾实验结果,上述基于混沌理论提出的、通过温度变化率表征的轰燃判据,可以应用于预测大规模实际室内火灾中轰燃的发生。

## 参考文献:

- [1] 公安部消防局. 中国消防年鉴(2003~2009)[M]. 北京:中国人事出版社,2003-2009.
- [2] 陈爱平,乔纳森·弗朗西斯. 室内轰燃预测方法研究[J]. 爆炸与冲击,2003,23(4):368-374.  
CHEN Ai-ping, Francis J. Studies on predicting flashover in enclosures[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(4):368-374.
- [3] Chow W K. New inspection criteria for flashover in compartmental fires[J]. Fire and Materials, 1991,23(1):13-15.
- [4] Chow W K. Studies on flashover criteria of compartment fires[J]. Journal of Fire Sciences, 1997,15(2):95-107.
- [5] 刘云忠,宣慧玉. 混沌时间序列及其在我国 GDP(1978~2000)预测中的应用[J]. 管理工程学报,2004,18(2):8-10.  
LIU Yun-zhong, XUAN Hui-yu. Chaotic time series and its application of GDP (1978~2000) forecasting in China [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2004,18(2):8-10.
- [6] 施式亮,汤广发,刘爱华. 建筑火灾事故混沌特性及其控制方法研究[J]. 湖南科技大学学报,2005,20(1):29-33.  
SHI Shi-liang, TANG Guang-fa, LIU Ai-hua. Chaotic characteristics and controlling measures of fire accidents of buildings[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology, 2005,20(1):29-33.
- [7] 陈爱平,乔纳森·弗朗西斯. 轰燃后火焰的辐射热通量计算[J]. 火灾科学,2002,11(4):228-235.  
CHEN Ai-ping, Francis J. Calculation of radiant heat flux from post-flashover flames[J]. Fire Safety Science,

2002, 11(4): 228-235.

- [8] 陈爱平, 张云明, 张莹. 室内火灾升温速率的试验研究[J]. 火灾科学, 2004, 13(1): 57-62.  
CHEN Ai-ping, ZHANG Yun-ming, ZHANG Ying. Experimental studies of temperature rise rate of enclosure fires[J]. Fire Safety Science, 2004, 13(1): 57-62.
- [9] McCaffrey B J, Quintiere J G, Harkleroad M F. Estimating room fire temperature and the likelihood of flashover using fire test data correlation[J]. Fire Technology, 1981, 17(2): 98-119.
- [10] Drysdale D D. An introduction to fire dynamics[M]. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1999: 291-324.
- [11] 杜文锋, 伍作鹏, 陈爱平, 等. 消防燃烧学[M]. 北京: 中国人民公安大学出版社, 1997: 390-394.

## An enclosure flashover criterion based on chaos theory \*

CHEN Ai-ping<sup>1</sup>, SONG Fei<sup>2</sup>

(1. *Department of Fire Engineering, Chinese People's Armed Police Academy, Langfang 065000, Hebei, China;*

2. *Detachment of Special Services, Shanghai Fire Bureau, Shanghai 200335, China*)

**Abstract:** According to the chaos theory, based on a vast amount of primary data of small-scale compartment fire experiments, a new flashover criterion which are indicated by the temperature rise rate are put forward. By the tested results of large-scale fires, the practicality of the criterion is initially verified. The results show that this criterion can be used to predict the likelihood of flashover in large-scale real enclosure fires.

**Key words:** mechanics of explosion; flashover criterion; chaos theory; enclosure fires; temperature rise rate

---

\* Received 31 August 2009; Revised 24 November 2009

Corresponding author: CHEN Ai-ping, ap2chen@sohu.com