

回燃及其对腔室火灾过程的影响

宋卫国, 范维澄

(中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230027)

摘要:从火灾中的两种特殊火行为—轰燃和回燃的发生机理出发,着重讨论了回燃在整个火灾过程中的作用以及回燃对轰燃的影响。结果表明,由于回燃和轰燃同为火灾全过程中的分过程,并且由于二者发生机理的相似性,因而,它们可以建立联系。当具备合适的热解产物浓度时,回燃过程可以使火灾系统的状态突变到完全发展状态,即引发轰燃。

关键词:火灾科学;特殊火行为;回燃;轰燃

中图分类号:X45 TK121 **文献标识码:**A

0 前言

在一个受限空间中的发生的火灾称为腔室火灾。腔室火灾的发展过程如图1所示。在理想条件下,腔室火灾可以被分为五个阶段:点燃、发展期、轰燃期(也有可能是一个准稳态、低强度的火灾状态,对应图中实线下部的虚线)、完全发展的火灾、熄灭。在发展期火势相对较小,火灾是局部的、低强度的。轰燃就是从发展期快速转变到完全发展火灾的过程,它在建筑火灾中是一个非常重要的特殊火行为。随着社会的发展、城市化的加快和现代化材料在建筑中日渐广泛的使用,轰燃的发生机率和危害程度都在增大。Thomas等^[1]开展了轰燃现象的理论研究,提出了经典的热爆炸理论基本原理在内的理论框架。S. R. Bishop等^[2~3]、T. L. Graham等^[4]对轰燃进行了进一步的研究。

回燃现象是腔室火灾中的另一个重要的特殊火行为。回燃定义为一个充满不完全燃烧产物的房间内流入氧气时发生的快速的爆燃过程。在大量的消防、培训方面的出版物中对回燃的灾难性结果进行了详细的记载。已经有人对回燃现象中的一些基本现象进行了研究。C. M. Fleischmann^[5~8]等人对回燃现象进行了一些建设性的研究,包括回燃的半尺度实验、重力流的盐水模拟模型以及与重力流相关的数值研究等。Richard W., Bukowski P. E.^[9]为一个著名的回燃案例—“62 Watts St(NY) fire”建立了模型。最近,

收稿日期:2000-05-01; 修改日期:

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59876039)

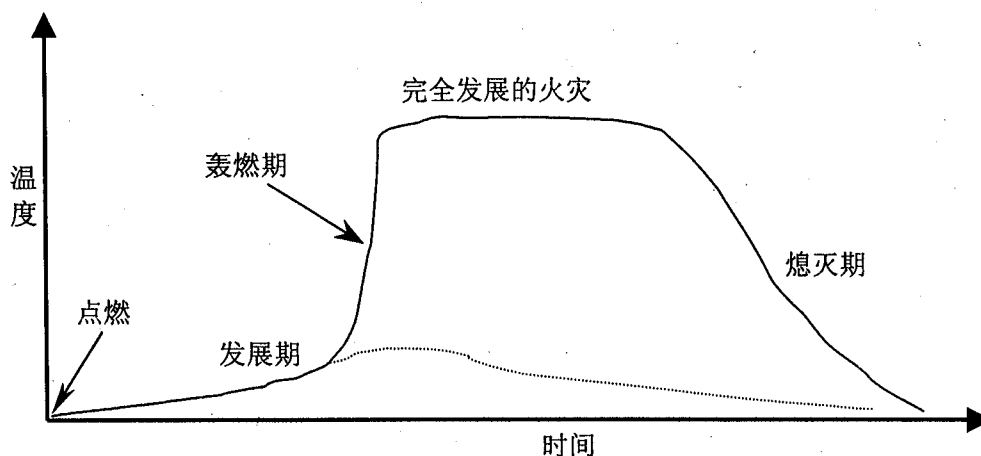


图1 腔室火灾的发展

Daniel T. Gottuk et al^[10]做了回燃的全尺度船舱实验。他们研究了向船舱内喷水对回燃的影响。所有这些为以后的回燃研究打下了基础。

但是,所有这些回燃方面的研究集中于回燃现象本身;并且至今为止,还没有回燃现象的数学模型。上面提到的实验中,都是将气态或者液态的燃料注入实验腔室中进行的。C. M. Fleischmann et al 实验中的回燃过程持续时间在1分钟量级^[5~6]。在全尺度实验中回燃的持续时间也是类似的^[10]。实验中回燃发生之后,便没有火灾存在,整个火灾过程也就结束了。这和真实的回燃案例中,回燃发生之后,火灾会持续相当长的一段时间。“62 Watts St (NY) Fire”案例中,回燃之后在消防人员扑救的情况下又持续了6分多钟^[9]。这是因为回燃是整个火灾过程的一个子过程,它对于火灾全过程是有影响的。并且,火灾中各个子过程之间可能是存在(相互)影响的。那么回燃是如何影响整个腔体火灾过程的呢?回燃和火灾的其它子过程之间存在什么样的作用?这些都是需要研究的课题。

1 轰燃现象的简化模型

正如 P. H. Thomas et al 所认为的,火灾发展过程可以用一个能量方程和一个特征温度来描述。考虑一个如图2所示的腔室火灾中热烟气层(上层)的理想能量平衡:

$$c \frac{d(mT)}{dt} = G(T, t) - L(T, t) \quad (1)$$

这里, m 是热烟气层(上层)中烟气的质量; c 是上层烟气的比热; T 是其温度; G 和 L 代表首能量的获得与损失。 G 和 L 可以写为温度 and 时间的函数,而 T 本身又是与时间有关的。在物理上,火灾发展可以看作是一个准稳态过程。也就是说, $d(mT)/dt = 0$ 的解可以给出腔室火灾中的平衡状态。

能量损失包括:以通过腔室开口的传质产生的能量损失、通过开口的辐射损失、通过腔体壁的热传导损失,即:

$$L = (\dot{m}_a + \dot{m}_f)c(T - T_0) + UA(T - T_0) \quad (2)$$

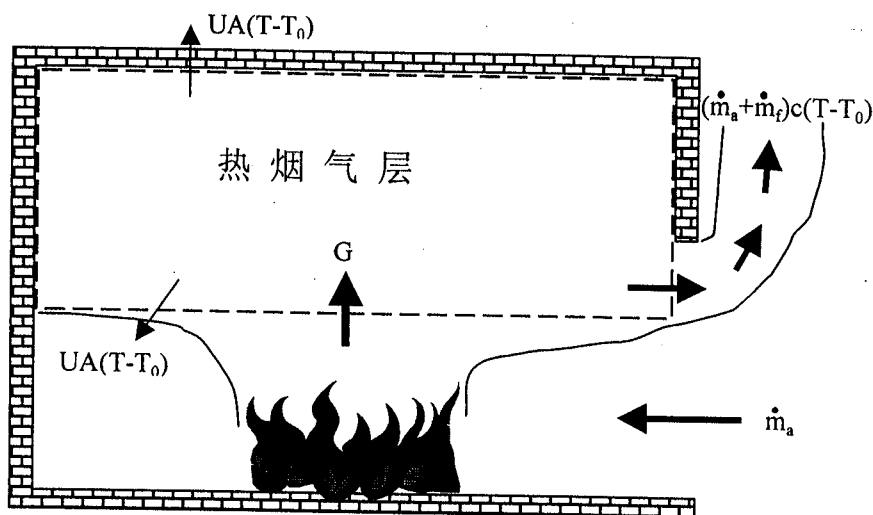


图2 腔室火灾中热烟气层(上层)的能量平衡

这里： $\dot{m}_a$ 是空气的质量流率，下标 a 代表空气； $\dot{m}_f$ 燃料的质量流率； U 是有效热传导系数； A 是有效热传导面积。下标 0 代表环境。从这里我们可以看到，热损失是和温度是近似线性相关的。

能量的获得与空气和燃料的供应速率有关，可以写为下面形式：

$$G = (1 - f) \dot{m}_{f,r} \Delta h_c \quad (3)$$

这里： Δh_c 是效燃料热； f 是燃料燃烧热中没有辐射到热烟气层中的部分所占的分数； $\dot{m}_{f,r}$ 是腔体中燃料的燃烧速度。

在过量空气的条件下的燃烧称为“燃料控制火灾”，此时有：

$$\dot{m}_{f,r} = \dot{m}_f \left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \geq r \right) \quad (4)$$

在空气不足的情况下的火灾称为“通风控制火灾”，此时有：

$$\dot{m}_{f,r} = \frac{\dot{m}_a}{r} \left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} < r \right) \quad (5)$$

这里的 r 是空气对燃料的化学当量比。

为了考虑热反馈的影响，我们假定：

$$\dot{m}_f = \frac{A_f \dot{q}''(T)}{\Delta h_{vap}} \quad (6)$$

这里： A_f 是被热解的燃料的表面积； Δh_{vap} 是燃料的有效气化热； $\dot{q}''(T)$ 是流至燃料表面的净热流。此外有：

$$\dot{q}''(T) = \dot{q}''(T_0) + \alpha(T) \sigma (T^4 - T_b^4) \quad (7)$$

T_b 是火灾中燃料基的温度，它是近似不变的。因此， $G(T, t)$ 在“燃料控制火灾”中与温度的四次方有关，而在“通风控制火灾”中则与温度无关。

图3显示出， G 曲线和 L 曲线可能有三类交点，A类、B类、C类。C类交点代表典

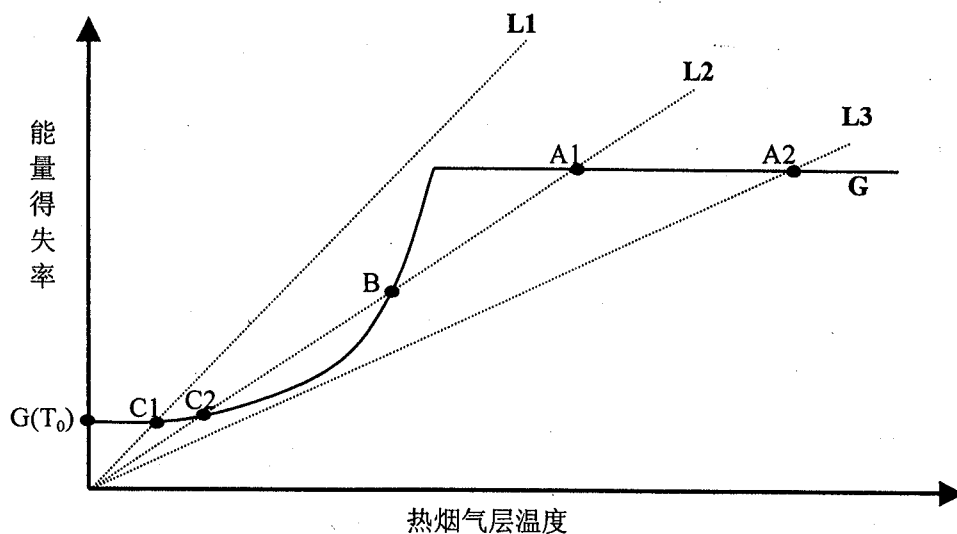


图3 能量得失速率曲线的可能交点

型的小型、低强度火灾。A类和B类交点对应大型、完全发展的火灾。A类和C类交点代表稳定的状态,一个小的扰动不会影响它们的状态。A类和C类交点的微小温度上升会使L曲线大于G曲线,从而使火灾状态返回它的初始状态;同样,微小的温度下降则会使G曲线大于L曲线,火灾状态也会返回初始位置。但是,一个微小的温度变化会使火灾状态偏离B类交点,发展到A类和C类交点。

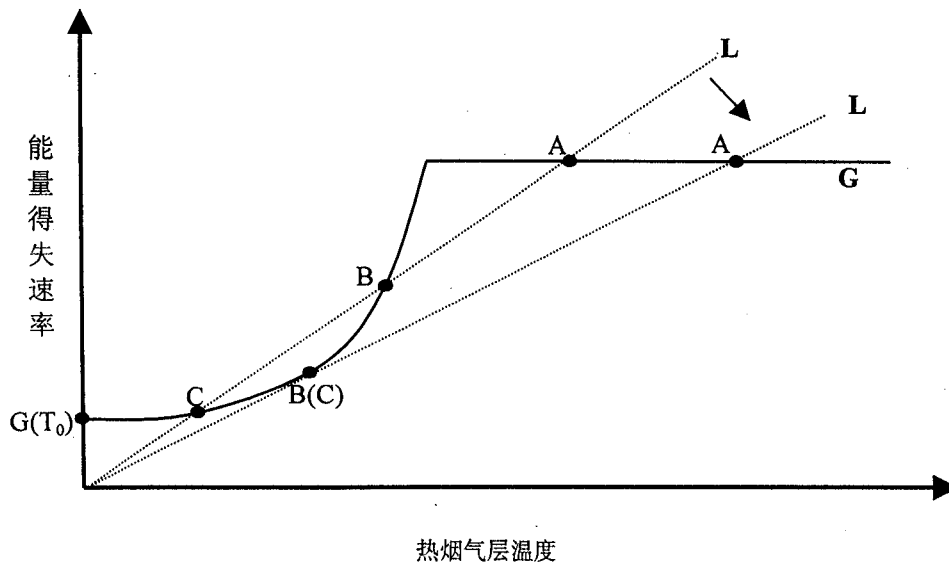


图4 能量得失曲线随时间的演化

图3中显示的能量获得和损失速度曲线是在一个时刻的火灾“快照”。实际上这两条曲线—G和L,会随着燃烧状况、通风状况等的改变而变化,即随着时间变化,如图4所示。假定这种曲线随时间的变化与热烟气层的能量平稀速度相比是缓慢的,所以火灾在

任意给定时刻处于稳定状态(准稳态假定)。图三中的 B 点和 C 点会随着时间的变化而在 G 曲线上变化,当能量损失曲线和能量获得曲线相切的时候, C 点和 B 点相遇了。这会造成一个从 $B(C)$ 点到 A 点的突然的跃迁,引起热烟气层温度的突然上升。这种突然的温度和燃烧速度的上升就是一轰燃。

2 回燃对火灾的影响和回燃引起的轰燃

回燃的发生需要两个条件:1)前导燃烧,2)通风条件的改变。图5描述了一个腔室火灾过程。 GO 和 LO 曲线代表了差的通风条件下的能量获得和能量损失,此时门和窗户关闭,唯一的通风途径是通过腔体的小孔、裂缝等的泄漏。 G 曲线和 L 曲线代表在正常通风条件下的能量得失速度。

前导燃烧是一种差通风条件下的腔室火灾燃烧。考虑一个密闭腔室,其唯一的通风是通过泄漏进行的。当火灾加热腔室内部时,腔室边界的气体向外泄漏,使内外的压力差减小甚至被平衡掉。当热烟气层下降时,可用的氧气不断减少,燃烧效率不断下降。过剩的热解产物积聚在上层,形成了富含燃料的热烟气层。如图5中的 GO 曲线所示,如果通风条件不得到改善,前导火灾会随着时间而减弱,最后熄灭。能量产生获得速度会下降直到没有能量产生。然后由于腔室通过热传导和对流向环境散热,直到腔室内外温度相同。

如果,当前导火灾还未完全熄灭时,门、窗或其它通风口打开或者破裂了。冷的、富含氧气的空气进入了腔室,以重力流的形式向内传播。如果此时没有点火源,重力流会在到达门对面的腔室壁后向回反射,重又回到门口。一个由富含燃料的上层烟气和富含氧气的新鲜空气混合而成的新的下层形成并不断发展。在腔室火灾中,点火源包括阻燃余烬、红热的金属制品、小火焰等等。如果空气进入时点火源存在,火灾会在新的通风条件下继续发展。

如果不考虑前导燃烧产生的热解产物,火灾会象普通腔室火灾那样,会发展到 C 点(小型、低强度火灾)或者 A 点(如果在 A 点的左侧 G 曲线始终大于 L 曲线),它们都处于稳定的火灾状态。如果火灾发展到 A 点,那就是普通的轰燃过程。现在,我们假定是第一种情况,即小型、低强度的火灾。

由于过剩热解产物的存在,能量获得速度会大增加,变为:

$$G_1 = G_{fuel} + G_{pyro} \quad (8)$$

这里: G_{fuel} 是由燃料提供的能量获得速度,见方程(3)。 G_{pyro} 是由过剩的热解产物产生的能量获得速度。

过剩的热解产物由热解气体和固体小颗粒组成。当它与进入腔室的新鲜空气混合并由点火源点燃后,会发生剧烈的、高速的燃烧。所以 G_{pyro} 的值是相当大的,虽然它只可以持续比较短的时间。如此大的能量获得速度使得腔室温度在极短时间内大幅度升高。根据前导火灾发生的过剩过解产物浓度的不同,火灾会到达不同的新状态。在很短的时间内,过剩的热解产物就消耗完了,火灾的能量获得又回到了 G 曲线上。如果初始热解产物的浓度相对较低,火灾状态可能会跳到介于 B 和 C 之间的某一点,然后到达 G 和 L 曲线稳定的交点 C 。否则,火灾状态会跳到超过 B 的某一点,然后到达 G 和 L 曲线稳定的交点 A 。这说明回燃可以使火灾过程出现了个能量爆发。当热解产物的浓度比较低,能

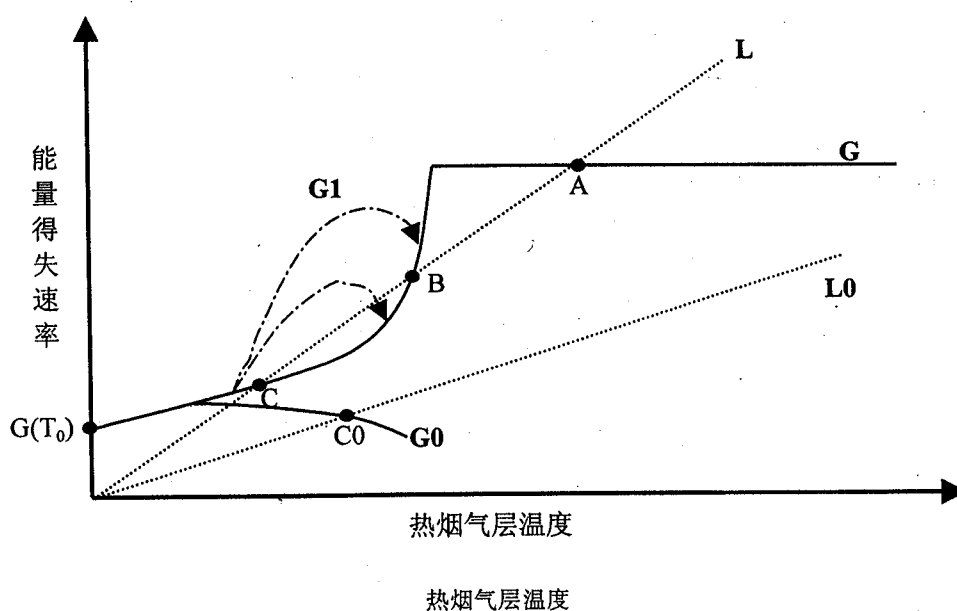


图 5 回燃对腔室火灾过程的影响

量爆发的强度比较小时,火灾状态不会出现太大的变化;而当热解产物浓度比较高、能量爆发的强度较大时,可以使火灾状态出现一个从低功率、缓慢的火灾状态到完全发展火灾的跳跃,也就是引发了轰燃。

3 结论

回燃和轰燃是腔室火灾中典型的两种特殊火行为,虽然对它们已进行了大量的研究和实验。但是,回燃对整个火灾过程有什么样的影响?回燃和轰燃有什么样的联系?这些方面研究还比较少。本文研究了在差的通风条件下的腔室火灾发展过程。基于轰燃的简化的数学模型,阐述了回燃对整个火灾过程的影响。当回燃发生时,腔室温度迅速升高。如果过剩热解产物的浓度比较低,那么火灾过程在回燃发生之后会稳定在图 5 中的 C 点,即小型、低强度的火灾。如果过剩热解产物的浓度比较高,那么腔室温度在回燃发生之后会升至 A 点和 B 点之间甚至 A 点右面的某一点,然后稳定到 A 点,对应完全发展的火灾。火灾系统从小型火灾到完全发展火灾的快速突变就发生了轰燃。也就是说,在合适的热解产物浓度条件下,回燃可以引发轰燃。

参 考 文 献

- [1] P. H. Thomas and M. L. Bullen. "Flashover and Instabilities in Fire Behavior"[J]. Combustion and Flame, 1980, 38: 159~171.
- [2] S. R. Bishop et al. "Dynamic modelling of building fires"[J]. Appl. Math. Modelling, 1993, 17: 170~183.
- [3] S. R. Bishop et al. "Nonlinear Dynamics of Flashover in Compartment Fires"[J]. Fire Safety Journal, 1993, 21: 11~45.

- [4] T. L. Graham et al. "On the Theory of Flashover Development"[J]. Fire Safety Journal, 1995, 25: 229~259.
- [5] C. M. Fleischmann et al. "Preliminary backdraft experiments"[A]. proceedings of 12th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety[C]. 1992. 208~215.
- [6] C. M. Fleischmann et al. "Quantitative Backdraft Experiments"[A]. Fire Safety Science-Proceedings of the Fourth International Symposium[C]. 1994. 337-348.
- [7] C. M. Fleischmann et al. "Salt Water Modeling of Fire Compartment Gravity Currents"[A]. Fire Safety Science-Proceedings of the Fourth International Symposium[C]. 1994. 337~348.
- [8] C. M. Fleischmann. K. B. McGrattan. "Numerical and experimental gravity currents related to backdrafts"[J]. Fire Safety Journal, 1999, 33: 21~34.
- [9] Richard W. . Bukowski P. E. . "Modelling a backdraft incident"[J]. Fire Engineering Journal, 1996, 14~17.
- [10] Daniel T. Gottuk et al. "The development an mitigation of backdraft: a real-scale shipboard study"[J]. Fire Safety Journal, 1999, 33: 261~282.

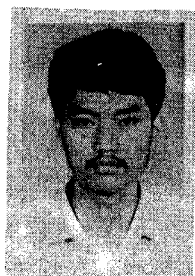
Backdraft Phenomenon and Its Effect on Compartment fire Development

SONG Wei-guo, FAN Wei-cheng

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and
Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Effect of backdraft on compartment fire is described in the paper. Existing studies to backdraft phenomenon focused on the phenomenon itself. Based on the qualitative model of compartment fire, the mechanics of the onset of backdraft phenomenon is discussed. The results indicate that under suitable pyrolyzate concentration, a backdraft can result in severe jump of compartment fire status, during which the fire can develops from a low density status to full developed fire. On the other words, a severe backdraft can result in a flashover.

Key words: fire science; special fire behavior; backdraft; flashover



作者简介 宋卫国(1973—),男,山东高唐县人,中国科技大学火灾科学国家重点实验室博士研究生。1991年考入中国科学技术大学工程热物理系,1996年起在火灾科学国家重点实验室“硕-博连读”至今。硕士阶段研究方向为:火灾信息处理、火灾控制。博士期间开始进行火灾过程中的非线性动力学研究,主要研究方向为:特殊火行为、火灾控制信号的时间序列分析。

- [4] T. L. Graham et al. "On the Theory of Flashover Development"[J]. Fire Safety Journal, 1995, 25: 229~259.
- [5] C. M. Fleischmann et al. "Preliminary backdraft experiments"[A]. proceedings of 12th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety[C]. 1992. 208~215.
- [6] C. M. Fleischmann et al. "Quantitative Backdraft Experiments"[A]. Fire Safety Science-Proceedings of the Fourth International Symposium[C]. 1994. 337-348.
- [7] C. M. Fleischmann et al. "Salt Water Modeling of Fire Compartment Gravity Currents"[A]. Fire Safety Science-Proceedings of the Fourth International Symposium[C]. 1994. 337~348.
- [8] C. M. Fleischmann. K. B. McGrattan. "Numerical and experimental gravity currents related to backdrafts"[J]. Fire Safety Journal, 1999, 33: 21~34.
- [9] Richard W. Bukowski P. E. "Modelling a backdraft incident"[J]. Fire Engineering Journal, 1996, 14~17.
- [10] Daniel T. Gottuk et al. "The development and mitigation of backdraft: a real-scale shipboard study"[J]. Fire Safety Journal, 1999, 33: 261~282.

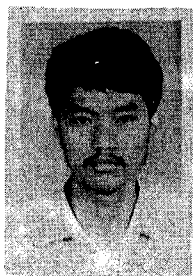
Backdraft Phenomenon and Its Effect on Compartment fire Development

SONG Wei-guo, FAN Wei-cheng

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and
Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Effect of backdraft on compartment fire is described in the paper. Existing studies to backdraft phenomenon focused on the phenomenon itself. Based on the qualitative model of compartment fire, the mechanics of the onset of backdraft phenomenon is discussed. The results indicate that under suitable pyrolyzate concentration, a backdraft can result in severe jump of compartment fire status, during which the fire can develop from a low density status to full developed fire. On the other words, a severe backdraft can result in a flashover.

Key words: fire science; special fire behavior; backdraft; flashover



作者简介 宋卫国(1973—),男,山东高唐县人,中国科技大学火灾科学国家重点实验室博士研究生。1991年考入中国科学技术大学工程热物理系,1996年起在火灾科学国家重点实验室“硕-博连读”至今。硕士阶段研究方向为:火灾信息处理、火灾检测。博士期间开始进行火灾过程中的非线性动力学研究,主要研究方向为:特殊火行为、火灾控制信号的时间序列分析。