

受限空间火灾模型研究进展

郑 昕, 袁宏永

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027)

[摘要] 火灾模型是从工程科学的角度出发, 分析研究火灾的发生、发展, 烟气蔓延以及火灾对周围环境诸如建筑设备、森林植被及大气环境等影响的数学模型。介绍了广泛应用于建筑物内部受限空间的场、区域、网模型以及经验模型的理论思想与数学方程, 分析了4种模型在相应环境下应用的合理性, 并对火灾模型的发展做出了展望。

[关键词] 受限空间; 场模型; 区域模型; 网模型; 场区网模型; 经验模型

[中图分类号] TK477 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)03-0068-07

1 引言

近几十年来, 伴随着计算机技术的迅速发展, 有效的数学分析、数理方法与计算机的结合, 使得一些理论模型能够应用于火灾科学研究以及安防工程实践中。

火灾过程是可燃物在热作用下发生的复杂物理化学过程, 与周围的环境有着密切的相互作用。任何一种火灾模型都是以对实际火灾过程的分析为依据, 各种火灾模型的有效性取决于对实际过程分析的合理性。由于火灾规律自身的双重性: 确定性与随机性, 火灾模型可以分成确定性模型与随机性模型两类。文中内容主要涉及受限空间火灾发生、发展与烟气传播规律的确定性模型。

作者主要阐述以场、区、网模型为主体的受限空间火灾模型的学术思想、数学模型与典型应用以及在工程计算领域应用较为广泛的一些经验模型, 至于与各种模型相关的数值计算方法, 在此不作探讨。

2 场模型

场是多种状态参数(如速度、温度与组份浓

度)的空间分布。场模型是通过计算这些状态参数的空间分布随着时间的变化来描述火灾发展过程的数学方程集合。

场模型本质上是一种复杂的湍流力学模型^[1], 理论依据是自然界普遍成立的质量守恒(连续性方程)、动量守恒(Navier-Stokes方程)、能量守恒(能量方程)以及化学反应定律等。通过将受限空间划分成有限个控制体, 利用以上的普遍规律构造各个控制体内部及控制体之间相互关联的基本方程组, 其张量形式如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = S. \quad (1)$$

其中 t 是密度, ρ 是流体密度, U 是控制体的流体速度, 方程右边 S 是源项, 在大多数情况下 $S=0$, 而在有化学反应存在或发生相变并生成新物质情况下, 该项为物质生成率。

Navier-Stokes 方程:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = B + \nabla \sigma, \quad (2)$$

$$\sigma = -p\delta + \mu[\nabla U + (\nabla U)^T]. \quad (3)$$

[收稿日期] 2003-06-17; **修回日期** 2003-11-17

[基金项目] 国家科技攻关项目科技奥运专项基金资助项目(2001BA904B10)

[作者简介] 郑昕(1979-), 男, 福建邵武市人, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室硕士研究生

其中 B 是体积力, 包括浮力、重力等, σ 是表面力, 包含压力与粘性力。

能量方程:

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \nabla(\rho UH) - \nabla(\lambda \nabla T) = \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (4)$$

$$H = h + 1/2U^2. \quad (5)$$

其中 H 是总焓, h 是相对初始温度的焓差。以上式 (1)、式 (2) (x, y, z 3 个方向上的动量方程) 及式 (4) 5 个方程与以下式 (6)、式 (7) 两个热力学状态方程:

$$\rho = \rho(p, T), \quad (6)$$

$$h = h(p, T), \quad (7)$$

共 7 个方程构成了闭合方程组, 理论上解析解是存在的, 但在大多数情况下, 导出以上方程的严格解析解是非常困难的。通常, 人们是基于计算流体力学 (CFD) 方法给出特定条件下方程的数值解。

真实火灾环境下发生的可燃物燃烧、烟羽流上升以及顶棚射流现象都是湍流过程, 因此需要对以上基本方程进行雷诺分解与平均, 才能够从整体上准确地求解火灾过程。长期以来人们对该问题的解决做出了多种的尝试, 主要体现在建立了受浮力影响的湍流流动模型与湍流燃烧模型等分过程模型。此外对于火灾过程中伴随的一些重要现象如辐射放热与碳黑生成, 也建立了相应的模型。限于篇幅, 对于这些分过程模型不一一介绍, 相关内容请参阅专著^{①[2,3]}。

为了求解一个具体问题, 必须给出方程组相应的边界条件与初始条件, 例如受限空间环境下, 需要全面考虑壁面边界对于火灾过程的影响, 包括壁面对近壁流体速度的影响、壁面剪切力与墙壁热导性等。此外, 门、窗以及其他形式的通风口也是边界条件的重要组成部分, 需要给出相应的流体速度、温度等参数。在许多情况下, 边界条件呈现出某种对称的形式, 例如在一个四方体受限空间的底面中央发生的火灾过程, 周围的边界条件以空间中心轴对称分布, 这种情况能够大大减少数值求解的计算量。

近年来, 人们开发了许多应用软件来计算特定条件下方程组的数值解。一类是以 Spalding^[4] 等人开发的 PHOENICS^[5] 为代表的通用型软件, 通过模型嵌入的方式给出场模型的数值解。此外目前应用广泛的 FLOW3D^[6] 与 FLUENT^[7] 也是属于该类型的通用软件。另一类是专门针对受限空间火灾场

模型开发的专用软件, 比较著名的有 BF3D^[8-12], UNDSAFE^[13,14] 与 JASMINE^[15], 关于应用软件更详细的内容可参阅文献^[16]。

3 区域模型

源于受限空间火灾发展过程中呈现内部物理特征 (温度、浓度) 相对均匀的烟气层分布现象, 自 20 世纪 70 年代中期, 区域模型逐渐发展成为目前安全工程领域应用最为广泛的模型之一。

20 世纪 80 年代, Fowkes^[18] 在与他人的合作中, 率先依据质量、动量和能量守恒原理, 运用数学分析方法描述了火灾过程, 奠定了区域模型的理论基础。

区域模型将研究的受限空间划分为不同的控制体 (即区域), 假定各个控制体内部的物理参数均匀分布。通常情况下, 对于受限空间划分是两控制体形式, 如图 1 所示, 即上层热烟气层与下层冷空气层。

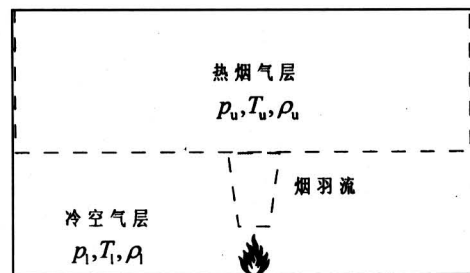


图 1 区域模拟示意图

Fig.1 Sketch of zone model

此外, 区域模型还有如下假定:

- 1) 各个控制体内的气体被认为是理想气体, 并且气体的相对分子质量与比热视为常数;
 - 2) 受限空间内部压力均匀分布;
 - 3) 不同控制体之间的质量交换主要由羽流传递作用与出口处卷吸作用造成;
 - 4) 能量传递除部分由质量交换造成外, 还包括辐射与导热换热;
 - 5) 受限空间内部物质的质量与热容相对墙壁、顶棚与地板可以忽略;
 - 6) 忽略烟气运动的时间, 认为一切运动过程在瞬间完成;
 - 7) 忽略壁面对流体运动的摩擦阻碍作用。
- 基于以上假设, 依据能量守恒与质量守恒定律, 作者给出了两控制体划分方式的基本方程组:

① 范维澄, 万跃鹏, 刘晓东. 建筑火灾常见过程计算专家系统. 中国科学技术大学火灾实验室研究报告, 1991

质量方程

$$\frac{dm_u}{dt} = \sum_i \dot{m}_{i,u}, \quad (8)$$

$$\frac{dm_l}{dt} = \sum_i \dot{m}_{i,l}, \quad (9)$$

其中 m 是进出控制体的质量流率, 下标 u, l 分别代表上层热烟气区与下层冷空气层。

能量方程

$$C_p m_u \frac{dT_u}{dt} = V_u \frac{dP_u}{dt} + \dot{Q}_u + \sum_i h_{i,u} \dot{m}_{i,u}, \quad (10)$$

$$C_p m_l \frac{dT_l}{dt} = V_l \frac{dP_l}{dt} + \dot{Q}_l + \sum_i h_{i,l} \dot{m}_{i,l}; \quad (11)$$

其中 h 是相对初始温度的焓差, V 为控制体的容积。

状态方程

$$P_u = \rho_u R T_u, \quad (12)$$

$$P_l = \rho_l R T_l. \quad (13)$$

状态方程中的压力 P 通常被视为已知量, 若以地面的气压为参考值, 则竖直方向上的压力可表示为:

$$P(z) = P(\text{floor}) - \int_0^z \rho g dz, \quad (14)$$

取 $P(\text{floor}) = 10^5 \text{ Pa}$, $0 \leq z \leq 4 \text{ m}$, 则可得出 $P(4 \text{ m})$ 与 $P(\text{floor})$ 之压差为 40 Pa 。一般而言, 静压力 $\rho g dz$ 相对于参考压力 $P(\text{floor})$ 是极小量, 只有在计算交界面处压强分布时才予以考虑, 因此区域模型的假设 2 是合理的, 进而导出以下辅助条件:

$$P_u = P_l, \quad (15)$$

$$V = V_u + V_l = \text{const}. \quad (16)$$

以上式 (8) ~ 式 (16) 构成了一个封闭方程组。与上述的场模型基本方程组相比, 缺少了动量守恒方程。因为区域模型通过一些简化性的假设, 给出了相关的约束条件, 满足了方程组封闭的要求。结合具体研究对象的初始条件、边界条件与一些物性参数, 便可求出热烟气层的状态和高度随时

间的变化。

目前世界各国开发了许多基于区域模型的计算软件, 如 ASET, COMPBRN III, COMPF2, CSTBZI, FIRST, FPETOOL, CFAST, WPI/FI, LAVENT 等, 其中应用最广泛的是 NIST 发布的 CFAST 软件, 相关详细内容参阅文献 [19]。

4 网模型

随着建筑结构朝着大型化、复杂化方向发展, 引入高层建筑火灾过程研究的新领域。目前, 若对于大型建筑物的每个受限空间都应用场模型, 需要的巨大计算量, 远远超出了现有计算机的能力, 即使是区域模型带来的计算量也是难以承受的。此外, 区域模型成立的基础是受限空间的烟气分层现象, 而在许多情况下, 这个前提并不成立, 如果依旧采用区域模型, 必然产生较大的误差。

网模型就是在这样的背景下于 20 世纪后期发展起来的一种更为简化的物理模型, 其基本思想是将建筑物内部每个受限空间视为一个单元节点, 设这些单元节点内部的状态参数 (温度、浓度等) 均匀分布, 这样, 建筑物内各个受限空间火灾发展过程就表现为各单元节点的状态参数随时间的变化。网模型的基本思想决定了网模型仅适用于建筑物内远离火源的区域, 因此, 网模型需要与其他模型结合使用以模拟火源及其相邻区域的火灾发展过程。

大量实际应用表明, 网络模型与场模型、区域模型构成场区网复合模型模拟大型复杂受限空间火灾发展过程能够获得精度与效率的较好统一。一般而言, 模拟复杂空间的火灾过程, 在包含火源的受限空间应用场模型, 给出状态参数的空间分布及其随时间的变化; 对相邻的区域采用区域模型, 构造出控制体的状态参量和高度变化的定解问题; 最后, 对于远离火源的受限空间, 视为一个网络节点, 应用网模型, 计算节点状态参量随时间的变化, 如图 2 所示。

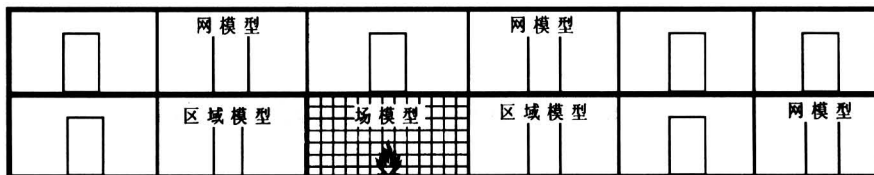


图 2 场区网模型应用示意图

Fig.2 FZN (field-zone-network) model application in building

场区网模型的关键在于合理地处理场模型与区域模型、区域模型与网络模型之间的界面连通问题，在物理上就是要合理地给出通过交界面的气体状态参数。下面简要地给出了区网通风口交界面的关系方程，详尽内容参阅文献 [2]。

区域模型空间：

$$p_{1z} = p_1 \exp\left(-\frac{\rho_o T_o}{T_1 p_o} g z\right), z < h_r - h_o, \quad (17)$$

$$p_{1z} = p_1 \exp\left[-\frac{\rho_o T_o}{T_1 p_o} g (h_r - h_o)\right] \cdot \exp\left[-\frac{\rho_o T_o}{T_u p_o} g [z - (h_r - h_o)]\right], \quad (18)$$

$$h_r - h_o \leq z < h_r$$

区域模型空间高度 h_r ，上层热烟气层厚度 h_o ，网络模型节点温度 T_r ，区域模型 Z 空间与网模型 N 节点的参考压强分别为 p_1, p_2 ，Z 空间与 N 节点之间的通风口高度为 h_v ，式 (17)、式 (18) 是区域模型空间的压强分布。

网模型空间：

$$p_{2z} = p_2 \exp\left(-\frac{\rho_o T_o}{T_r p_o} g z\right). \quad (19)$$

为了计算交界面上的质量与能量交换，将其沿高度划分为 n 个窄条，对于每一个窄条：

$$m_s = C_d B_v \frac{h_v}{n} (2\rho | p_{2z} - p_{1z} |)^{1/2} \text{sign}(p_{2z} - p_{1z}). \quad (20)$$

上式 sign 是符号函数，取值如下：

- sign = 1, 当 $p_{2z} - p_{1z} > 0$;
- sign = -1, 当 $p_{2z} - p_{1z} < 0$ 。

式 (20) 的质量流叠加就得到经过通风口的总质量流，同理，能量流亦可用类似的方法求得。

从目前的发展状况看，场区网模型（包括“场区模型”）中的一些处理方法尚需进一步研究，并且需要通过实践的检验。目前还没有基于场区网模型的商用软件可以使用，作为一种新兴的模型，场区网模型还处于不断完善的过程中。

5 经验模型

相对于区域模型、网模型的简化以及场模型对计算能力的要求，一些形式简单、源于工程实践的经验模型由于其准确性高并对计算能力的要求较低，在许多典型工程环境下取得了广泛的应用。不同于理论模型能够对火源空间以及关联空间的火灾发展过程进行估计，现有的经验模型通常局限于描

述火源空间的一些特征物理参数，如烟气温度的变化、浓度、热流密度等随时间的变化，因此经常被称为“本地模型” (local model)，其中最为著名的是计算烟羽流温度的 Alpert 模型以及计算火焰长度的 Hasemi 模型，下面将予以简单介绍。

Alpert model:

Alpert model^[20]是工厂公共实验中心 (Factory Mutual Test Center) 以其建立人 Alpert 命名的用以估计顶棚射流温度随时间变化的经验模型。由于现代消防系统的各种火灾探测设备几乎都布置在室内顶棚，因此 Alpert 模型对于辅助消防系统设计以及评估系统性能有着重要的实际意义。

在室内火灾发展过程中，燃烧过程生成的烟气羽流到达顶棚后成为水平方向传播的顶棚射流，并逐步传播至整个顶棚面，然后烟气向下充填，在室内上层空间形成热烟气层。实验测量发现顶棚射流的温度近似半高斯正态分布，即过烟羽流中轴线作顶棚射流的横截面，在截面上任一垂直于顶棚的直线上烟气温度的在直线与顶棚交点处达到最大值并随着 Y 值的增加而降低 (参见图 3)，温度满足高斯正态分布，由于 $Y \geq 0$ ，因此称为半高斯正态分布。

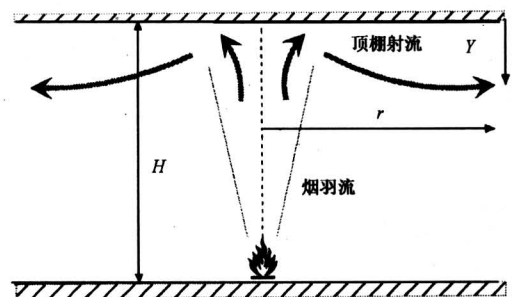


图 3 Alpert 顶棚射流示意图

Fig.3 The plume and its interaction with a ceiling

Alpert 基于以上特点以及烟气羽流的相关特性，总结出如下经验公式：

$$T_{\max} - T_{\infty} = 5.38 \cdot \frac{(\dot{Q}_c / r)^{2/3}}{H}, r > 0.18H \quad (21)$$

$$T_{\max} - T_{\infty} = \frac{16.9 \cdot \dot{Q}_c^{2/3}}{H^5}, r \leq 0.18H \quad (22)$$

其中 T_{\max} 是顶棚处的烟气温度， T_{∞} 是环境温度， \dot{Q}_c 是释热速率， r 是距离烟羽流中心轴的径向距

离, H 即火源表面距离顶棚的垂直高度, 各参数的实际意义参考图 4。

Alpert 适用于热烟气层尚未在受限空间上部形成的火灾发展的早期阶段, 对于热烟气层已经形成的情况, Davis 与 Notarianni^[22]拓展了 Alpert 模型:

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\infty} = \frac{C}{r^{\gamma}}, \quad r > 0.18H; \quad (23)$$

$$C = k \cdot r_o^{\gamma} \cdot \Delta T_p; \quad (24)$$

$$k = [0.68 + 0.16 \cdot (1 - e^{-\frac{y_1}{y_1}})]; \quad (25)$$

$$r_o = 0.18 \cdot H; \quad (26)$$

$$\gamma = \frac{2}{3} - \alpha \cdot (1 - e^{-\frac{y_1}{y_1}}). \quad (27)$$

其中 r 是距离烟羽流轴线的径向距离, ΔT_p 是烟羽流轴线位置的温度与环境温度差, y_1 是实验观测的热烟气层厚度^[21], y_1 是通过区域模型软件 FPETool 或 CFAST 软件计算出的热烟气层高度, k 是实验测定的常数, α 通常取 0.44。而对于 $r \leq 0.18H$ 的区域, 位于烟气羽流的倒锥形区域内, 其温度分布受烟气羽流的影响较大, 实验发现温度分布近似均匀, 如式 (22)。在 Alpert 模型的发展过程中, 基于顶棚射流的速度、浓度等分布与温度分布的近似性, Yamauchi^[22]拓展了 Alpert 模型, 使之能够计算顶棚射流的烟气浓度分布随时间的变化, 扩大了模型的应用范围, 详细内容请参考文献 [23]。

Hasemi model:

Hasemi 模型^[24]主要用来计算竖直或者水平火焰长度, 与 Alpert 模型一样, 也是一个以其建立人命命名的本地经验模型, 如图 5 所示。

$$L_f = 3.5 \cdot \dot{Q}^{*n} \cdot D. \quad (28)$$

其中, $n = \frac{2}{5}$, $\dot{Q}^* > 1.0$; $n = \frac{2}{3}$, $\dot{Q}^* < 1.0$; L_f 是火焰高度, 指火焰未到达顶棚的开放式燃烧状态下的火焰顶端距离燃料表面的垂直距离; \dot{Q}^* 是无量纲热流密度; D 是火源直径。参数的实际意义参考图 4。

为了方便处理, 通常将火源虚拟为一个点源, 称为虚火源, 其相对实火源位置可用如下公式计算:

$$Z = 2.4 \cdot D \cdot D(\dot{Q}^{*\frac{2}{5}} - \dot{Q}^{*\frac{2}{3}}), \quad \dot{Q}^* < 1 \quad (29)$$

$$Z = 2.4 \cdot D \cdot D(1 - \dot{Q}^{*\frac{2}{5}}), \quad \dot{Q}^* \geq 1 \quad (30)$$

在火焰增长直至到达顶棚后, 火焰将沿顶棚面

水平传播, 该阶段的水平火焰长度 (自竖直火焰轴线位置起的火焰峰面径向距离) 的计算公式如下:

$$L_{HB} = H_B \cdot (2.3 \cdot \dot{Q}_{HB}^{*0.3} - 1), \quad (32)$$

$$L_{HC} = H_C \cdot (2.9 \cdot \dot{Q}_{HC}^{*0.4} - 1), \quad (33)$$

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_a \cdot c_p \cdot T_a \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot H_{C,B}^{\frac{5}{2}}}. \quad (34)$$

其中 L_{HB} 是顶棚突起如横梁底部的火焰长度, L_{HC} 是顶棚面下水平火焰长度, H_B 为顶棚突起底部距离火源表面的垂直距离, H_C 是顶棚距离火源表面的垂直距离, \dot{Q}_{HC}^* 与 \dot{Q}_B^* 分别是相应高度的热流密度。

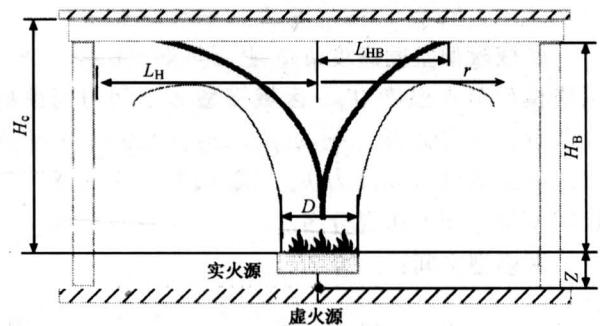


图 4 Hasemi 火焰示意图

Fig.4 Hasemi's method

6 总结

受限空间火灾模型是火灾科学研究中的重要领域。作者介绍的场模型、区域模型、网模型以及经验模型代表了不同层次受限空间火灾模型的发展水平。这 4 种模型有各自的优缺点、发展方向与应用领域, 共同丰富着火灾科学的研究内容。

场模型通过将受限空间划分为有限个控制体, 依据自然界的普遍规律建立封闭方程组, 通过计算方程组的数值解, 提供了一条认识火灾发展过程参数详细分布及其变化规律的途径。场模型是当前最为精确的受限空间火灾模型, 但是其对计算能力的要求限制了它的应用范围。

区域模型是一种半经验化的理论模型, 与经验规律的结合, 一方面大大简化了理论模型, 降低了对计算能力的要求, 另一方面, 经验规律不适用的场合, 区域模型成立的前提不复存在, 应用区域模型必然会带来较大的误差。以上特点决定了区域模型能够以一种较为简单的方式描述受限空间的火灾发展过程, 给出烟气层状态和高度的变化规律, 在适用范围内定性合理。

网模型虽然理论上是一个完整的模型,但是由于其节点化的高度简化假设,导致其在实际应用中必须与场模型、区域模型结合构建场区网模型才能模拟受限空间的火灾发展过程。网模型的出现为实现高层建筑内部火灾过程的计算机模拟提供了新的思想、模型与方法,有待进一步发展。

经验模型来源于实验,在类似实验的环境下,经验模型能够取得与实际过程吻合的计算结果,但经验模型向相异环境的拓展需要经过实验的验证。在工程应用领域,需要一些简单的方法能够快速给出预测,经验模型为该应用提供了选择,随着实验领域的不断扩大,经验模型的内容也将随之丰富,准确性也将不断提高。

7 展望

受限空间火灾模型的研究目前处于蓬勃兴起的发展阶段,并且已在火灾安全工程领域有着成功的初步应用,作者结合研究工作,认为以下几点将会是未来火灾过程研究及应用的发展方向:

1) 场模型有赖于基础理论的进步与完善,尤其是湍流流动与湍流燃烧、辐射传热、凝聚相可燃物的热解及燃烧、碳黑生成等各个分过程的理论模型与相互作用模型的进一步发展。此外,计算能力的提高能够从侧面推动模型研究的深入。

2) 区域模型对于复杂几何形状受限空间的表述方法需要深化,经验规律有待改进与完善以拓展适用范围。在大型空间与复杂空间应用领域,兼顾经济性与准确性的场区或场区网复合模型理论研究与工程应用应该成为进一步探索的方向。

3) 火灾过程自身规律的双重性,需要我们将确定性模型与随机性模型相互融合,建立真实、完整的火灾过程双重规律性模型,为防火设计、安全性及经济性评估、扑火决策及指挥等提供有力工具。

4) 研究发展火灾模型的最终目的是应用于火灾安全工程;理论模型与专家系统的结合能够促使各种理论贴近实际应用;今后日趋完善的专家系统能够更好地为这一目的服务。

参考文献

[1] 范维澄,万跃鹏.湍流流动模型[A].见:流动及燃烧的模型与计算[M],合肥:中国科学技术大学出版社,1992.68~151

[2] 范维澄,王清安,姜冯辉,等.火灾过程的计算机模拟[A].见:火灾学简明教程[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1995.408~415

[3] Thomas P H. Testing products and materials for their contribution to flashover in rooms [J]. Fire and Materials, 1981, 5: 103~111

[4] Spalding D B. A general-purpose computer program for multi-dimensional one- and two-phase flow [J], Mathematics and Computers in Simulations, 1981, XXIII. 267

[5] Makatos N C, Malin M R, Cox G. Mathematical modeling of buoyancy-induced smoke flow in enclosures [J], International Journal of Heat and Mass Transfer, 1982, 25(1): 63~75

[6] Burns A D, Ingrams D, Jones I P, et. Flow3D: The development and application of rebase [R]. Harwell Report AERE/R/12693, 1987

[7] Hutchings B. Solution of natural convection problems using fluent [J], Fluent Users Newsletter, 1986, 1 (1): 6

[8] Rehm R G, Baum H R. The equations of motion for thermally driven, buoyant flows [J], Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1978, 83(3): 297~308

[9] Baum H R, Rehm R G, Barnett H R, et. Finite difference calculations of buoyant convection in an enclosure, 1 the basic algorithm [J]. SIAM J. Sci. Stat. Computing, 1983, 4: 117~135

[10] Rehm R G, Barnett H R, Baum H R, et. Finite difference calculations of buoyant convection in an enclosure: verification of the non-linear algorithm [J]. Applied Numerical Mathematics 1, 1985, 1: 515~529

[11] Baum H R, Rehm R G. Calculations of three-dimensional buoyant plumes in enclosures [J]. Combustion Science and Technology, 1984, 40, 55~77

[12] Rehm R G, Baum H R, Lozier D W, et. A model of three-dimensional buoyant convection induced by a room fire [A]. 1st National Fluid Dynamics Congress [C]. 1988. AIAA-88-3723-CP

[13] Yang K T, Lloyd J R, Kanury A M, et. Modeling of turbulent buoyant flows in aircraft cabins [J]. Combustion Science and Technology, 1984, 39, 107~118

[14] Satoh K., Kuriishi T. Three-dimensional numerical simulations of fires in aircraft passenger compartments [A], 24th Jap Aviation Symp [C], 2C-8, 1

- [15] Cox G, Kumar S. Computer models for fire and smoke [J]. *Combustion Science and Technology*, 1987, 52, 7
- [16] Stroup D W. Using field modeling to simulating Enclosure fires [A], (In): *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*[M], 2th edition, 1995. 152~159
- [17] Rho J S, Ryou H S. A numerical study of atrium "res using deterministic models"[J]. *Fire Safety Journal*, 1999, 33(3): 213~229
- [18] Fowkes N D. A mechanistic model of the 1973 and 1974 bedroom test fires[R], in P. A. Croce, ed., *A Study of Room Fire Development: The Second Full-Scale Bedroom Fire Test of the Home Fire Project*[Z]. Vol II, FMRC Tech Rept No. 21011. 4, 1975. 8~50
- [19] Walton W D. Zone computer fire models for enclosures [A]. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*[M], 2th edition, 1995. 148~149
- [20] Alpert P. L., An introduction to fire dynamics[J], *Fire Tech*, 1972, 8:181
- [21] Davis W D, Notarianni K A. An algorithm for estimating the plume centerline temperature and ceiling jet temperature in the presence of a hot upper layer [R]. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6178. 1998
- [22] Juli Yamauchi, Yukio Fukui, Prediction of Response Time of Smoke Detectors in Enclosures Fires [R], National Institute of Standards and Technology, NBSIR88-3707, 1988, 1~46
- [23] Davis W D, Reneke P. Predicting smoke concentration in the ceiling Jet [R], Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6480
- [24] Hasemi Y, Yokobashi Y, Wakamatsu T, Ptchelintsev A V. Modelling of heating mechanism and thermal response of structural components exposed to localized fires: A new application of diffusion flame modelling to fire safety engineering [A]. Thirteenth meeting of the UJNR panel on fire research and safety [C], Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6030. 1996

State of the Art of Compartment Fire Modeling

Zheng Xin, Yuan Hongyong

(*State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230027, China*)

[**Abstract**] The aim of the present review is to provide the reader with a brief discussion on the mathematical modeling techniques, currently available for compartment fires. The relevant underlying physical assumptions are presented first and the conventional model performance is analyzed in the range of application. The final part of the review deals with current trends and perspective of mathematic fire models and highlights the need for extensive validation studies and interaction between theoretical and experimental investigations.

[**Key words**] compartment; field model; zone model; network model; FZN (field, zone and network) model; empirical model