

张树平 郝绍润 陈怀德 编著

现代高层建筑 防火设计与施工

中国建筑工业出版社

现代高层建筑防火设计与施工

张树平 郝绍润 陈怀德 编著

中国建筑工业出版社

113

(京)新登字 035 号

图书在版编目 (CIP) 数据

现代高层建筑防火设计与施工/张树平等编著. -北京: 中国建筑工业出版社, 1998

ISBN 7-112-03590-2

I. 现… II. 张… III. ①高层建筑-防火系统-建筑设计②高层建筑-防火系统-工程施工 IV. TU976

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 13674 号

本书系统阐述了现代高层建筑防火设计与施工的主要问题, 内容包括高层建筑的火灾知识、总平面防火设计、内部装修防火、防火分区、耐火等级与耐火设计、防烟与排烟设计、安全疏散设计、电气防火与火灾自动报警系统、灭火系统、地下建筑防火设计等问题。书中结合我国现行高层建筑防火规范, 着重阐述了近年来国内外高层建筑防火设计与研究的最新成果, 具有较高的实用价值。

本书可作为建筑设计、城市规划、施工及消防管理、安全保卫等有关专业的工程技术人员和大专院校师生阅读参考。

现代高层建筑防火设计与施工

张树平 郝绍润 陈怀德 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市兴顺印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17¹/₂ 字数: 426 千字

1998 年 9 月第一版 1998 年 9 月第一次印刷

印数: 1—4000 册 定价: 29.00 元

ISBN 7-112-03590-2
TU·2775 (8841)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

高层建筑防火设计,是涉及建筑、结构、给排水、通风空调、建筑电气以及自动化等学科领域的综合性技术设计。国内外大量火灾事例说明,未做出科学合理的防火设计,或未严格按照防火设计进行施工,而留下火灾隐患,是日后造成火灾事故的起因。所以,从工程技术的角度来看,只有科学的防火设计和严格的工程施工相结合,才能为高层建筑的防火安全提供可靠保障。这正是本书编写的目的。

本书较系统地阐述了高层建筑火灾发生、发展蔓延、烟气流动、人流疏散等基础知识。同时,结合现行《高层民用建筑设计防火规范》(GB50045—95)及《建筑设计防火规范》(GBJ16—87 修订本)等规范编写,并选编了较多的图例、实例,用以阐明高层建筑总平面防火设计、防火分区设计、防排烟设计、安全疏散设计等专题。

本书由张树平、郝绍润、陈怀德编著。其中,陈怀德执笔第9章;郝绍润执笔第4章及第11章第1节;其余由张树平执笔,并主编全书。本书第11章第2节由中国建筑西北设计院屈培青副总建筑师等提供资料;陕西省消防局卞建峰高级工程师、西安建筑科技大学高羽飞教授审阅了全部书稿;贺晓兰工程师绘制了部分插图;西安建筑科技大学建筑学院周若祁教授对本书提出了宝贵意见,谨此,一并致以衷心感谢。

本书在编写中,参考、引用了其他著作中的某些内容和图表,均列入参考文献。在此谨向所有原作者致以深切谢意!

由于水平所限,书中错误和不足之处,恳请读者批评指正。

张树平

1998年元月

目 录

第1章 高层建筑火灾	1
第1节 高层建筑火灾知识	1
第2节 高层建筑火灾的蔓延	10
第3节 高层建筑火灾教训	15
第4节 旅馆火灾的统计分析	28
第2章 高层建筑总平面防火设计	34
第1节 高层建筑及其分类	34
第2节 高层建筑消防车道	37
第3节 高层建筑防火间距	40
第4节 高层建筑总平面防火设计举例	42
第3章 高层建筑内部装修防火	45
第1节 内部装修与火灾成因	45
第2节 建筑材料的耐火性能及其检测分级	47
第3节 建筑装修材料的防火性能	49
第4节 建筑防火涂料及其施工	54
第5节 高层建筑内部装修防火标准	58
第6节 高层建筑内部装修防火构造与施工	60
第4章 高层建筑防火分区	65
第1节 防火分区的设计标准	65
第2节 水平防火分区及其分隔设施	67
第3节 竖向防火分区及其分隔设施	73
第4节 高层建筑中庭的防火设计	78
第5节 防火分区的构造与施工	82
第6节 高层建筑防火分区设计举例	84
第5章 高层建筑耐火等级与耐火设计	86
第1节 火灾荷载与火灾参数	86
第2节 高层建筑耐火等级	91
第3节 混凝土结构的耐火性能	95
第4节 高层钢结构的耐火设计	98
第5节 高层钢结构防火构造与施工	108
第6节 高层建筑防火构造	112
第6章 高层建筑防烟与排烟设计	116
第1节 烟的性质及危害	116
第2节 烟在建筑物内的流动	122
第3节 烟气控制的预测	127
第4节 高层建筑防排烟设计概述	134

第5节	自然排烟设计	140
第6节	正压防烟设计	141
第7节	机械排烟设计	145
第8节	防排烟系统的构造与施工	151
第9节	高层建筑防排烟设计举例	154
第7章	高层建筑安全疏散设计	157
第1节	高层建筑安全分区与疏散路线	157
第2节	安全疏散时间与距离	163
第3节	安全出口	166
第4节	安全疏散的预测	169
第5节	疏散楼梯	173
第6节	避难层(间)	181
第7节	辅助疏散设施	183
第8节	消防电梯	187
第9节	高层建筑安全疏散设计举例	189
第8章	高层建筑电气防火与火灾自动报警系统概述	193
第1节	高层建筑消防电源与配电	193
第2节	高层建筑应急照明	196
第3节	火灾自动报警系统简介	198
第4节	火灾自动报警系统设计	200
第5节	自动消防联动控制系统简介	205
第6节	高层建筑应急广播	207
第9章	高层建筑灭火系统	209
第1节	高层建筑灭火系统设计原则	209
第2节	高层建筑灭火系统消防用水量的计算	210
第3节	高层建筑室内消火栓给水系统	211
第4节	闭式自动喷水灭火系统	218
第5节	开式自动喷水灭火系统	223
第6节	高层建筑其它灭火设施简介	226
第7节	高层建筑灭火系统施工安装与维护管理	231
第10章	地下建筑防火设计	234
第1节	地下建筑简介	234
第2节	地下建筑火灾的特点	235
第3节	地下建筑设计的防火问题	238
第4节	防排烟与安全疏散	241
第5节	适合地下建筑的消防设备	247
第11章	现代高层建筑防火设计实例	250
第1节	北京京广中心大厦防火设计	250
第2节	陕西信息大厦防火设计	261
参考文献		274

第 1 章 高层建筑火灾

第 1 节 高层建筑火灾知识

1 概 述

所谓建筑火灾，是指烧损建筑物及其容纳物品的燃烧现象。高层建筑火灾，是指高层建筑内某一空间燃烧起火，进而发展到某些防火分区或整个高层建筑的火灾。由于高层建筑空间高大，人员、物资集中，火灾在烟囱效应作用下发展蔓延快，消防救助困难，因而具有极大的危险性。

在某一防火分区或建筑空间，可燃物在刚刚着火、火源范围很小时，由于建筑空间相对于火源来说，一般都比较大，空气供应充足，所以，燃烧状况与开敞的空间基本相同。随着火源范围的扩大，火焰在最初着火的可燃物上延烧，或者引燃附近的可燃物，当防火分区的墙壁、屋顶等开始影响燃烧的继续发展时，一般说来，就完成了—个发展阶段，即火灾初期。建筑防火分区火灾一般可分为三个时间区间（图 1-1）：

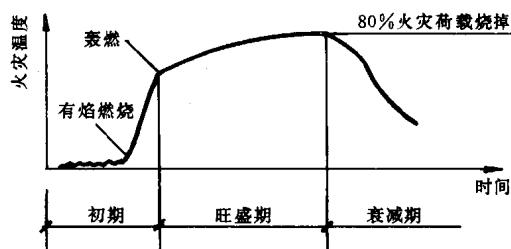


图 1-1 火灾的发展过程

1.1 初期火灾（轰燃前）

防火分区内的可燃物，因某种原因被引起燃烧，一边消耗分区内的氧气，一边扩大燃烧范围。若燃烧范围进一步扩大，火灾温度就会急剧上升，并发生轰燃。

初期火灾时，着火分区的平均温度低，而且燃烧速度较低，对建筑结构的破坏为也比较低。

在火灾的初起阶段，虽然火灾分区的平均温度低，但在燃烧区域及其周围的温度较高。在局部火焰高温的作用下，使得附近可燃物受热分解、燃烧，火灾规模扩大，并导致火灾分区全面燃烧，一般把火灾由初期转变为全面燃烧的瞬间，称为轰燃（Flash over）。轰燃经历的时间短暂，它的出现，标志着火灾由初期进入旺盛期，火灾分区内的平均温度急剧上升。若在轰燃之前在住人员逃不出火灾分区，就会有生命危险。

1.2 旺盛期火灾（轰燃后）

轰燃后，空气从破损的门窗进入起火分区，使分区内产生的可燃气体与未完全燃烧的可燃气体一起燃烧。此后，火灾温度随时间的延长而持续上升，在可燃物即将烧尽时达到最高。

在此期间，火灾分区内所有的可燃物全都进入燃烧，并且火焰充满整个空间。门窗玻璃破碎，为燃烧提供了较充足的空气，使火灾温度升高，一般可达 1100°C 左右，破坏力很强，建筑物的可燃构件，如木质门、木质隔墙及可燃装修等，均被烧着，并对建筑结构产

生威胁。

1.3 衰减期（熄灭）

经过火灾旺盛期之后，火灾分区内可燃物大都被烧尽，火灾温度渐渐降低，直至熄灭。一般把火灾温度降低到最高值的 80% 作为火灾旺盛期与衰减期的分界。这一阶段虽然有焰燃烧停止，但火场的余热还能维持一段时间的高温。衰减期温度下降速度是比较慢的。

2 初期火灾

当火灾分区的局部燃烧形成之后，由于受可燃物的燃烧性能、分布状况、通风状况、起火点位置、散热条件等的影响，燃烧发展一般比较缓慢，并会出现下述情况之一。

(1) 当最初着火物与其它可燃物隔离放置时，着火源燃尽，而并未延及其它可燃物，导致燃烧熄灭。此时，只有火警而未成灾。

(2) 在耐火结构建筑内，若门窗密闭，通风不足时，燃烧可能自行熄灭；或者受微弱通风量的限制，火灾以缓慢的速度燃烧。

(3) 当可燃物与通风条件良好时，火灾能够发展到整个分区，出现轰燃现象，使分区内的所有可燃物表面都出现有焰燃烧。

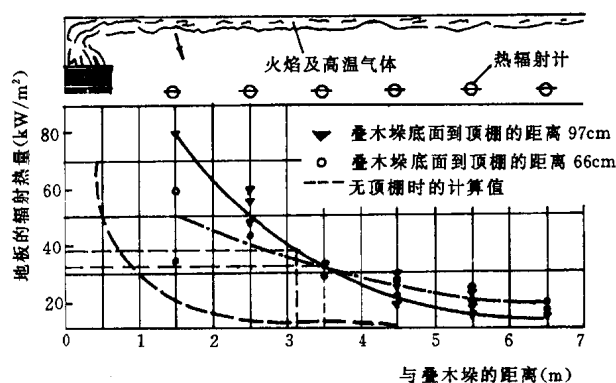


图 1-2 烟层对地面的辐射热

以木垛（木条垛）为火源，进行分区内火灾实验，测定的热辐射结果如图 1-2 所示。当火焰到达屋顶后，其表面积在屋面上急剧增大，迅速把高温烟气覆盖于整个屋顶面上。由此对分区内各点的辐射热通量也迅速增大，致使墙壁、地面及分区内其他可燃物进入热分解阶段，为发展到轰燃提供了条件。

初期火灾的持续时间，即火灾轰燃之前的时间，对建筑物内人员的疏散，重要物资的抢救，以及火灾扑救，都具有重

要意义。若建筑火灾经过诱发成长，一旦达到轰燃，则该分区内未逃离火场的人员，生命将受到威胁。国外研究人员提出如下不等式：

$$t_p + t_a + t_{rs} \leq t_u \quad (1-1)$$

式中 t_p ——从着火到发现火灾所经历的时间；

t_a ——从发现火灾到开始疏散之间所耽误的时间；

t_{rs} ——转移到安全地点所需的时间；

t_u ——火灾现场出现人们不能忍受的条件的时间。

现在，利用自动火灾报警器可以减少 t_p ，而且在大多数情况下，效果比较明显。但在住人员能否安全地疏散，则取决于火灾发展速度的大小，即取决于 t_u 。很显然，在评价某一分区的火灾危险性时，轰燃之前的时间是一个重要因素。这段时间延缓得越长，就会有更长的时间发现和扑灭火灾，并可以使人员安全撤离。

从防火的角度来看，建筑物耐火性能好，建筑密闭性好，可燃物少，则火灾初期燃烧缓慢，甚至会出现窒息灭火、有“火警”而无火灾的结果。从灭火角度来看，火灾初期燃

烧面积小, 只用少量水就可以把火扑灭, 因而是扑救火灾的最好时机。为了及早发现并及时扑灭初期火灾, 对于重要的建筑物, 最好能够安装自动火灾报警和自动灭火设备。

3 轰 燃 (Flash over)

轰燃是建筑火灾发展过程中的特有现象, 是指房间内的局部燃烧向全室性火灾过渡的现象。

国外火灾理论专家为了探明轰燃发生的必要条件, 在 $3.64\text{m} \times 3.64\text{m} \times 2.43\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高) 的房间内进行了一系列实验。实验以木质家具为燃烧试件, 并在地板上铺设了纸张。以家具燃烧产生的热量, 点燃地板上的纸张, 来确定全室性猛烈燃烧的开始时间, 即出现轰燃的时间。通过实验得出的结论是: 地板平面上发生轰燃须有约 $20\text{kW}/\text{m}^2$ 的热通量或天花板上接近 600°C 的高温。此外, 从实验中观察到, 只有可燃物的燃烧速度超过 $40\text{g}/\text{s}$ 时, 才能达到轰燃。同时认为, 点燃地板上纸张的能量, 主要是来自吊顶下的热烟气层的辐射, 火焰加热后的房间上部表面的热辐射也占有一定比例, 而来自燃烧试件的火焰相对较少。

3.1 轰燃时的极限燃烧速度

为了研究轰燃时的极限燃烧速度, 我们先用第 5 章第 1 节中将要详细讨论的一个问题的结论, 即室内木垛火灾在通风控制的条件下, 其燃烧速度 (质量) 由下式给出:

$$m = kA_w H^{\frac{1}{2}} (\text{kg}/\text{s}) \quad (1-2)$$

式中 m ——以质量消耗表示的燃烧速度 (kg/s);

A_w ——通风开口的面积 (m^2);

H ——通风开口的高度 (m);

k ——常量, 约为 $0.09 (\text{kg}/\text{m}^{5/2} \cdot \text{s})$;

$A_w H^{\frac{1}{2}}$ ——通风参数。

在 $2.9\text{m} \times 3.75\text{m} \times 2.7\text{m}$ 的房间内, 进行燃烧木垛的火灾实验。燃烧速度是通过称量可燃物的重量而进行连续监控的。以燃烧速度 m 为纵坐标, 通风参数 $A_w H^{\frac{1}{2}}$ 为横坐标, 整理实验结果如图 1-3 所示。可以发现, 这些实验中火灾的轰燃 (吊顶下烟气层温度超过 600°C , 火焰从开口或缝隙处喷出) 出现在一个确定的区域内, 即图 1-3 中阴影部分内。根据实验研究, 得出了出现轰燃现象的极限燃烧速度的经验公式如下:

$$m_{\text{极限}} = 500 + 33.3 A_w H^{\frac{1}{2}} (\text{g}/\text{s}) \quad (1-3)$$

实验中发现, 如果燃烧速度小于约 $80\text{g}/\text{s}$ 时, 木垛火灾就不会出现轰燃, 可见木垛火灾出现轰燃的燃烧速度, 是纸张出现轰燃燃烧速度的 2 倍。而且, 当通风参数 $A_w H^{\frac{1}{2}}$ 值小于 $0.8\text{m}^{\frac{5}{2}}$ 时, 也不会出现轰燃。

上述研究证明, 燃烧速度必须超过一个极限值, 而且很可能要维持一段时间后, 才能发生轰燃。从实验中观察到, 可燃家具在燃烧速度很高时, 就会发生轰燃, 例如, 在高度为 2.8m 的房间内, 燃烧一个聚氨酯泡沫的椅子, 280s 后即达到轰燃 (地板上的热通量为 $20\text{kW}/\text{m}^2$, 最高燃烧速度为 $15\text{g}/\text{s}$), 皮革椅子会出现 $112\text{g}/\text{s}$ 的最高燃烧速度, 很快就达到轰燃指标。

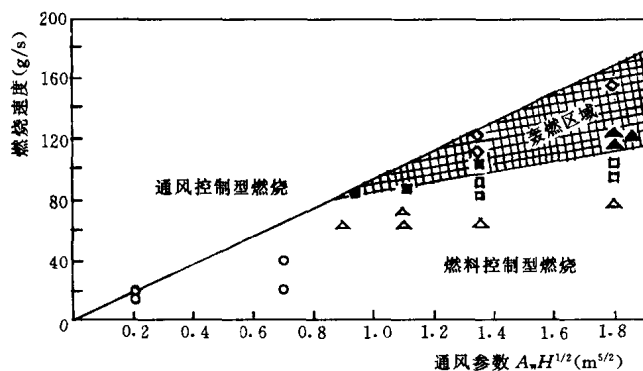


图 1-3 室内燃烧速度与通风参数

木垛质量: 18~36kg (○), 45~55kg (△), 60~74kg (□); 80~91kg (▲), 98~103kg (◆)
阴影区表示火焰从门口喷出和吊顶处烟层温度 $\geq 600^{\circ}\text{C}$

3.2 轰燃时的临界放热速度

根据托马斯等人关于轰燃表示了一个热不稳定性的观点, 人们进行了火灾模型试验研究, 并提出了计算轰燃临界放热速度的实验公式。

$$Q_{FO} = 610(h_K A_T A_w H^{\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}} \quad (\text{kW/s}) \quad (1-4)$$

式中 h_K ——有效热系数 ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$);

A_T ——火灾房间的内表面积 (m^2);

Q_{FO} ——在吊顶下产生大约 500°C 的热烟层所需的放热速度 (kW/s)。

利用公式(1-4), 可以对实际房间发生轰燃所必须具备的火灾规模, 做出比较保守的估计, 为此, 还要掌握有关物质和建筑中常见物品在燃烧时的放热速度。

实验证明, 临界放热速度 Q_{FO} 是随起火点位置的变化而变化的, 如表 1-1 所示。

Q_{FO} 随着火灾位置的变化

(房间: $3\text{m} \times 3\text{m} \times 2.3\text{m}$) 表 1-1

起火点位置	Q_{FO} (kW/s)
在中心	475
靠近墙壁	400
在一角	340

3.3 影响轰燃的因素

为了掌握影响轰燃的因素, 人们进行了大量实际规模的建筑火灾实验和模型试验, 发现轰燃的出现, 除了前述建筑物及其容纳物品的燃烧性能、起火点位置之外, 还与内装修材料的厚度、开口条件、材料的含水率等因素有关。图 1-4 是内部装修为 5.5mm 的胶合板, 火源木垛长度为 18cm 时, 不同开口率与轰燃时间的关系。图 1-5 是内部装修为难燃胶合板, 厚度为 5.5mm, 火源木垛长度为 18cm, 可燃物的含水率不同时与轰燃时间的关系。

4 分区火灾的旺盛期

室内火灾经过轰燃后, 整个房间立即被火焰包围, 室内可燃物的外露表面全部燃烧起来。由于轰燃之际, 门、窗玻璃已经破坏, 为火灾提供了比较稳定的、充分的通风条件, 所以, 在此阶段的燃烧将发展到最大值, 并且可产生高达 1100°C 左右的高温。在此高温下, 房间的顶棚及墙壁的表面抹灰层发生剥落, 混凝土预制楼板、梁、柱等构件也会发生爆裂剥

落的破坏现象，在高温热应力作用下，甚至发生断裂破坏。在此阶段，铝制品的窗框被熔化，钢窗整体向内弯曲，无水幕保护的防火卷帘也向加热一侧弯曲。

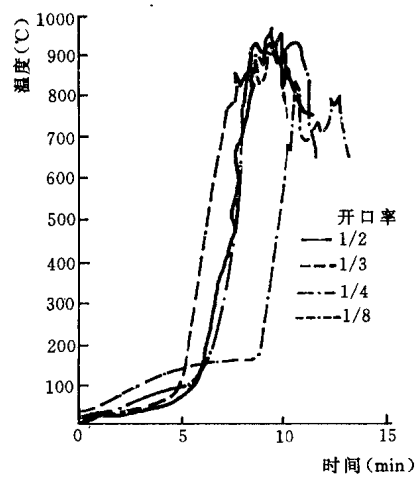


图 1-4 开口率与轰燃时间

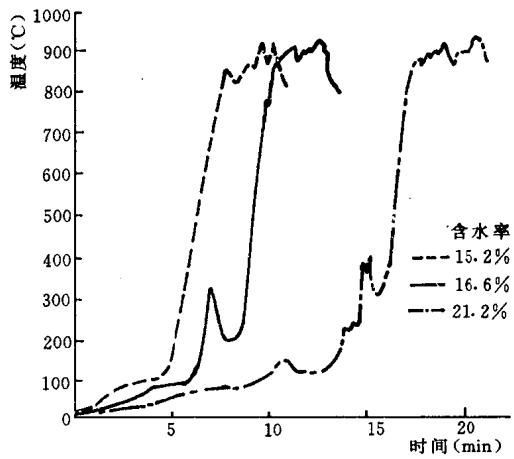


图 1-5 材料含水率与轰燃时间

火灾旺盛期随着可燃物的消耗，其分解产物渐渐减少，火势逐渐衰减。室内靠近顶棚处能见度渐渐提高；只有地板上堆集的残留可燃物，如大截面木材、堆放的书籍、棉制品等，还将持续燃烧。

本节主要讨论耐火结构建筑火灾旺盛期的燃烧速度和温度。

4.1 火灾旺盛期的燃烧速度

在本世纪 40 年代末，日本的川越和关根等学者，为了对室内火灾的状态进行系统的研究，对实际房间和小模型房间进行了多种实验。在实验中，设定不同通风开口面积，测定室内可燃物——木垛的燃烧速度。为了导出燃烧速度与开口面积的关系，首先提出如下假设：

- (1) 可燃物是纤维系列材料组成的；
- (2) 燃烧速度是由开口处的通风量控制的，即通风控制型火灾；
- (3) 火灾分区内气体温度是均匀的。

这样，所研究的火灾分区就简化为如图 1-6 所示的研究模型。若火灾分区内部与外部压力为已知，则在开口处流出和流进的气体流量，可由伯努利方程来计算。

在火灾分区中性平面上方 y 处任取 1 点（如图 1-6 中点 1），则该点的压力为：

$$P_1 = P_0 - \rho_F g y \quad (1-5)$$

式中 P_0 ——中性面处（即 $y=0$ 处）的压力；
 ρ_F ——火灾分区的气体密度。

在通风开口外边点 2 处，涌流出的气体压力等于该平面处的大气压力：即

$$P_2 = P_0 - \rho_0 g y \quad (1-6)$$

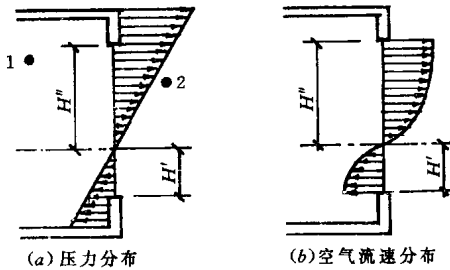


图 1-6 燃烧速度计算模型

式中 ρ_0 ——室外空气密度。建立关于点 1 与点 2 的伯努利方程：

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} \quad (1-7)$$

式中 v_1 与 v_2 是点 1 和点 2 处的水平流速。当分区内各处温度均匀时，就没有浮力，因而也不会有气流运动，故 $v_1=0$ ，把公式 (1-5)、(1-6) 代入公式 (1-7) 中，可得：

$$\frac{P_0 - \rho_F g y}{\rho_1} = \frac{P_0 - \rho_0 g y}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} \quad (1-8)$$

假设从开口流经点 2 处的气体与点 1 处具有相同的温度，则有 $\rho_1=\rho_2$ ，代入公式 (1-8)，并整理得：

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(\rho_0 - \rho_F) g y}{\rho_1}} \quad (1-9)$$

我们采用下标 “F” 代表火灾分区内气体，用下标 “0” 代表环境空气，于是公式 (1-9) 可写成：

$$v_F = \sqrt{\frac{2(\rho_0 - \rho_F) g y}{\rho_F}} \quad (1-10)$$

公式 (1-10) 为计算火灾分区流出分区外气流速度的公式，同理可得计算流入火灾分区气流速度的公式：

$$v_0 = \sqrt{\frac{2(\rho_F - \rho_0) g y}{\rho_0}} \quad (1-11)$$

根据实验测定，火灾分区开口处气流流出与流入的速度一般约为 5~10m/s。火灾分区开口处的质量流速，可按下述公式求得：

$$\text{流入: } m_0 = \alpha B \rho_0 \int_0^{-H'} v_0 dy \quad (1-12)$$

$$\text{流出: } m_F = \alpha B \rho_F \int_0^{-H''} v_F dy \quad (1-13)$$

式中 α ——流通系数；

B ——开口的宽度；

m ——质量流速 (kg/s)；

H' ——中性面至开口下边缘的距离；

H'' ——中性面至开口上边缘的距离。

因此有

$$H' + H'' = H$$

将公式 (1-10)、(1-11) 分别代入公式 (1-12)、(1-13)，并积分，可得出：

$$m_0 = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{H'^3} \rho_0 \sqrt{\frac{2g(\rho_0 - \rho_F)}{\rho_0}} \quad (1-14)$$

$$m_F = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{H''^3} \rho_F \sqrt{\frac{2g(\rho_0 - \rho_F)}{\rho_F}} \quad (1-15)$$

从中性面到开口的上、下边缘的高度 H'' 、 H' ，可由火灾分区内的质量守恒来确定。在稳定燃烧状态下（轰燃之后），若不计分区内热分解产生的气体，则有：

$$m_0 = m_F \quad (1-16)$$

由此可得出：

$$\frac{H''}{H'} = \left(\frac{\rho_0}{\rho_F} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1-17)$$

当通风开口的高度为 $H = H' + H''$ 时，则有：

$$H' = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_0}{\rho_F} \right)^{\frac{1}{3}}} H \quad (1-18)$$

$$H'' = \frac{\left(\frac{\rho_0}{\rho_F} \right)^{\frac{1}{3}}}{1 + \left(\frac{\rho_0}{\rho_F} \right)^{\frac{1}{3}}} H \quad (1-19)$$

将公式 (1-18) 代入 (1-14)，可得：

$$m_0 \approx \frac{2}{3} \alpha \rho_0 A_w H^{\frac{1}{2}} \sqrt{2g} \cdot \sqrt{\frac{(\rho_0 - \rho_F)/\rho_0}{[1 + (\rho_0/\rho_F)^{1/3}]^3}} \quad (1-20)$$

对于分区火灾旺盛期来说，比值 ρ_0/ρ_F 一般情况下为 1.8~5 之间，取 $\rho_0/\rho_F=3$ 则：

$$\sqrt{\frac{(\rho_0 - \rho_F)/\rho_0}{[1 + (\rho_0/\rho_F)^{1/3}]^3}} = 0.21$$

取 $\rho_0=1.2\text{kg/m}^3$ ，对于门窗洞口来说，一般取 $\alpha=0.7$ ， $g=9.81\text{m/s}^2$ ，空气流入的速度可近似为：

$$m_0 \approx 0.52 A_w \sqrt{H} \text{ (kg/s)} \quad (1-21)$$

式中 A_w ——通风口面积；

H ——通风口的高度；

$A_w=BH$ ，数组 $A_w \sqrt{H}$ 叫做通风参数。

如果分区内发生了化学计量的燃烧，而 1kg 木材化学计量燃烧需要的空气量约为 5.7kg ，所以对于木材来说，其燃烧速度为：

$$\begin{aligned} m_0 &= \frac{0.52}{5.7} A_w \sqrt{H} = 0.09 A_w \sqrt{H} \text{ (kg/s)} \\ &= 5.5 A_w \sqrt{H} \text{ (kg/min)} \end{aligned} \quad (1-22)$$

公式 (1-22) 最初由日本学者川越博士提出，其形式是 $m=k \cdot A_w \sqrt{H}$ ，其中 k 为不确定系数，根据实验研究，其值约在 5.5~6.0 之间，公式 (1-22) 在推导过程中做了一些假设，但与原川越公式是相符合的。燃烧速度 m 与通风参数 $A_w \sqrt{H}$ 的关系，如图 1-7 所示。

应该指出的是，公式 (1-22) 是在通风控制型火灾的条件下导出的，故不适合于非通风控制型火灾。因为当开口达到某一程度时，分区内的燃烧速度将不再受开口大小的影响，而是取决于可燃物的表面积和燃烧性能。经试验研究发现，从通风控制型到燃料控制型火灾的转变，主要取决于可燃物的表面积。例如，分区内木垛火灾在轰燃后的稳定燃烧阶段，分解可燃物的能量主要是来自木垛内木炭的表面氧化。对于分区内纤维质（主要是木质）可

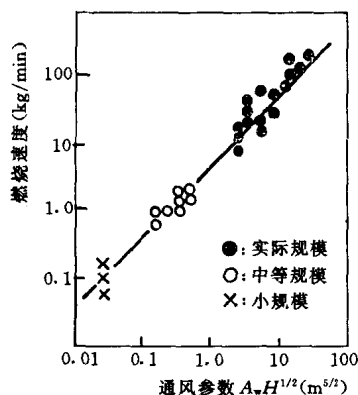


图 1-7 通风参数与燃烧速度

燃物的火灾，鉴别火灾类型的实验公式如下：

通风控制型：

$$\frac{\rho A_w \sqrt{gH}}{A_F} < 0.235 \quad (1-23)$$

燃料控制型：

$$\frac{\rho A_w \sqrt{gH}}{A_F} < 0.290 \quad (1-24)$$

过渡区间：即 $0.235 \leq \frac{\rho A_w \sqrt{gH}}{A_F} \leq 0.290$ ，其火灾型式是不确定的。式中 A_F 为可燃物的表面积。

从大量火灾实验和实际火场的直观经验来说，燃料控制型火灾一般燃烧不太猛烈，燃烧速度较低，温度也比较低。

4.2 旺盛期火灾的温度

为了研究轰燃之后分区内旺盛期火灾对建筑物的破坏作用，以便进行防火设计和火灾后建筑物的技术鉴定、加固，需要建立旺盛期火灾温度的预测模型。由于轰燃前初期火灾平均温度相对较低，对建筑结构的破坏作用较小，故可忽略不计。下面的计算中， $t=0$ ，是以轰燃为起点的。

分区火灾温度的预测模型如图 1-8 所示，为了简化计算，提出假设条件如下：

- (1) 火灾分区的燃烧是完全的，温度是均匀的；
- (2) 形成分区的内表面的热工性能是相同的；
- (3) 分区边界的导热是一维的，边界是“无限大平板”。

研究图 1-8 所示火灾分区模型的热平衡，可以列出方程如下：

$$Q_H = Q_B + Q_L + Q_W + Q_R \quad (1-25)$$

式中 Q_H ——火灾分区燃烧放热速度；

Q_B ——从开口的辐射热损失速度；

Q_L ——从开口空气对流的热损失速度；

Q_W ——火灾分区边界导热损失速度；

Q_R ——使火灾分区内气体升温的热损失速度（忽略不计）。

公式 (1-25) 各项计算如下：

4.2.1 火灾分区燃烧放热速度 Q_H

对于通风控制型火灾，其燃烧放热速度可由下式计算：

$$Q_H = m \cdot C = 0.55 A_w \sqrt{H} \cdot C \quad (1-26)$$

式中 C ——可燃物的燃烧比热。在燃烧放热计算中，要把其它可燃物换算为木材，即求“当量木材”放热速度，木材的 C 值常取 18.8 kJ/g 。

用公式 (1-26) 计算可燃物的放热速度时假定了从开始（即轰燃后的瞬间）直到所有可燃物被烧尽， Q_H 保持常数。此外，还应该指出，如果火灾房间的燃烧为燃料控制型时，计算出的放热速度偏高。但是，对于防火设计来说，该公式已经能够满足工程设计的精度要

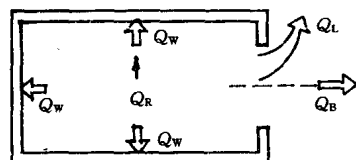


图 1-8 火灾房间的热平衡

求了。

4.2.2 从开口的辐射热损失速度 Q_B

通过开口的辐射热损失速度，可根据斯蒂芬-波尔兹曼定律求得：

$$Q_B = A_w \epsilon_F \sigma (T_F^4 - T_0^4) \quad (\text{kW}) \quad (1-27)$$

式中 $A_w = \sum_{i=1}^n A_{wi}$ ，总的开口面积 (m^2)；

T_F ——火灾分区内的气体温度 (K)；

σ ——斯蒂芬-波尔兹曼常数， $\sigma = 5.67 \text{W/m}^2 \text{K}^4$ ；

T_0 ——环境温度 (K)；

ϵ_F ——火灾分区内气体有效辐射率，由下式求得：

$$\epsilon_F = 1 - e^{-kX_F} \quad (1-28)$$

式中 X_F ——火焰厚度 (m)；

k ——辐射系数 (m^{-1})，对于木材为主要荷载的火灾，取 $k = 1.1 \text{m}^{-1}$ 。

因为 $T_F \gg T_0$ ，为了简化计算， T_0 可忽略不计，这时公式 (1-27) 可写为：

$$Q_B = A_w \epsilon_F \sigma T_F^4 \quad (\text{kW}) \quad (1-29)$$

4.2.3 从开口对流引起的热损失速度 Q_L

$$Q_L = m_F C_P (T_F - T_0) \quad (1-30)$$

式中 m_F ——燃烧气体流出速度，由公式 (1-15) 求出。

假设 $m_F \approx m_0$ 则有：

$$m_F = m_0 = k A_w \sqrt{H}$$

所以： $k = m_0 / (A_w \sqrt{H})$ ，设 $k = 0.5 \text{kg}/(\text{m}^{5/2} \cdot \text{s})$ ，则有：

$$\begin{aligned} Q_L &= k A_w \sqrt{H} \cdot C_P (T_F - T_0) \\ &= k \cdot C_P (T_F - T_0) A_w \sqrt{H} \end{aligned} \quad (1-31)$$

4.2.4 分区边界导热损失速度 Q_w

分区墙壁与楼板的热量损失速度，取决于分区内气体的温度 (T_F) 和内表面的温度 (T_i)。为了简化计算，对于耐火建筑来说，我们假设火灾分区的边界导热性是相同的。当火灾发展到旺盛期，火灾分区壁体的导热状况可以看作是无限大板的一维不稳定导热。用一阶差分方程的数值解法，给出 Q_w 值的计算公式如下：

$$Q_w = (A_t - A_w) \left(\frac{\Delta x}{k} \right)^{-1} (T_F - T_0) \quad (1-32)$$

式中 A_t ——边界表面的总面积 (墙面、屋顶和地板)，包括通风开口面积 A_w ；

T_F ——火灾分区的气体温度 (K)；

T_0 ——环境温度 (K)；

k ——界面材料的导热系数 ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)；

Δx ——火灾分区封闭界面分割为 n 层时，每一层的厚度 (m)。

4.2.5 $T_F(t)$ 的计算

将 Q_B 、 Q_L 、 Q_w 的值代入公式 (1-25)，并整理后，可求出 T_F 如下：

$$T_F \cdot \Delta T = \Delta t(Q_H - Q_B - Q_L - Q_W)VC_P + T_0 \quad (1-33)$$

式中 $T_F(t)$ ——时间的函数；

V ——火灾分区的容积；

C_P ——定压比热；

T_F ——由数值积分进行迭代计算求得的。

由公式 (1-33) 计算求得的火灾气体温度 T_F 与实验测定的 T_F 的值是极相符合的。

应该注意的是，当通风口的面积和高度不同时，通风参数由下式计算：

$$A_w \sqrt{H} = \sum_{i=1}^n A_{wi} \sqrt{H_i} \quad (1-34)$$

第 2 节 高层建筑火灾的蔓延

1 高层建筑火灾蔓延的方式

1.1 火焰蔓延

初始燃烧表面的火焰，将可燃材料燃烧，并使火灾蔓延开来。火焰蔓延速度主要取决于火焰传热的速度。火焰蔓延速度可由下式求得：

$$\rho V \Delta H = Q \quad (1-35)$$

式中 ρ ——可燃物的密度；

V ——火焰蔓延速度；

ΔH ——单位质量的可燃物从初温 T_0 上升到相当于火焰温度 T_F 时的焓的增量；

Q ——火焰传热速度。

公式 (1-35) 称为火灾蔓延的基本方程，实质上是反映火灾蔓延的一个能量方程。

1.2 热传导

火灾分区燃烧产生的热量，经导热性好的建筑构件或建筑设备传导，能够使火灾蔓延到相邻或上下层房间。例如，薄壁隔墙、楼板、金属管壁，都可以把火灾分区的燃烧热传导至另一侧的表面，使地板上或靠着隔墙堆积的可燃、易燃物体燃烧，导致火场扩大。应该指出的是，火灾通过传导的方式进行蔓延扩大，有两个比较明显的特点，其一是必须由导热性好的媒介，如金属构件、薄壁构件或金属设备等；其二是蔓延的距离较近，一般只能是相邻的建筑空间。可见传导蔓延扩大的火灾，其规模是有限的。

1.3 热对流

热对流是建筑物内火灾蔓延的一种主要方式。建筑火灾发展到旺盛期后，一般说来窗玻璃在轰燃之际已经破坏，又经过一段时间的猛烈燃烧，内走廊的木质户门被烧穿，或者门框之上的亮窗玻璃被破坏，导致烟火涌入内走廊。一般耐火建筑可达 $1000 \sim 1100^\circ\text{C}$ 左右高温，木结构建筑更高一些。这时，火灾分区内外的压差更大，遇到冷空气，使之温度降低，压差减少，失去浮力，流动速度就会降下来。若在走廊里放可燃、易燃物品，或者走廊里有可燃吊顶等，被高温烟火点燃，火灾就会在走廊里蔓延，再由走廊向其它空间传播。

除了在水平方向对流蔓延外，火灾在竖向管井也是由热对流方式蔓延的。

1.4 热辐射

热辐射是相邻建筑之间火灾蔓延的主要方式之一。建筑防火中的防火间距，主要是考虑防止火焰辐射引起相邻建筑着火而设置的间隔距离。要搞清楚火焰辐射对火灾蔓延的机理，首先必须搞清楚两个问题，即，点燃可燃材料所需的辐射强度是多少？建筑物发生火灾时能够产生多大的辐射强度？简要介绍如下。

在建筑物中，经常采用木材或类似木材的可燃的构件、装修或家具等，因此，木材在建筑中是主要的火灾荷载。世界各国都特别注意对木材火灾的研究。工业发达国家把 12.6kW/m^2 做为木材点燃的临界辐射强度。在这一辐射强度下烘烤 20min，无论在室内还是在室外，火场飞散的小火星就可引燃木材。而引起木材自燃的临界辐射强度是 33.5kW/m^2 。表 1-2 是各种辐射强度下木材的反应。

各种辐射强度下木材的反应 表 1-2

辐射强度 (kW/m^2)	反应情况
33.5	可使室外木材自燃
20.9	照射 1s 后即出现焦糊
12.6	木材点燃，照射 2s 后即出现焦糊
1.05	长时间照射而无焦糊的极限强度

建筑火灾产生的辐射强度由公式 (1-29)

求出：

$$Q_B = A_W \epsilon_F \sigma T_F^4$$

设发烟量为 V (m^3)，烟层面积为 A (m^2)，则 X_F ，烟层厚度可近似由下式计算：

$$X_F = 4 \frac{V}{A} \quad (1-36)$$

在建筑火灾的热辐射计算中，一般假定建筑表面为灰体。如图 1-9，设建筑火灾的火焰辐射面积为 A_1 ，相邻受辐射的建筑面积为 A_2 ，并取火焰辐射的微元面积为 dA_1 ，受辐射微元面积为 dA_2 ，则从 dA_1 辐射到 dA_2 的总热量 Q_{12} ($C_s V_s$) 为：

$$Q_{12} = \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \int_{A_2} \int_{A_1} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 \quad (1-37)$$

式中 φ_1 —— dA_1 的法线与两微元面连线 r 的夹角；

φ_2 —— dA_2 的法线与 r 的夹角；

T_1 、 T_2 ——分别为两表面的绝对温度。

若令 F_{12} ，为 A_1 对 A_2 的角系数， F_{21} 为 A_2 对 A_1 的角系数，则：

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21} = \int_{A_2} \int_{A_1} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 \quad (1-38)$$

由公式 (1-38) 求出角系数之后，公式 (1-37) 就可写为：

$$Q_{12} = \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma (T_1^4 - T_2^4) F_{12} A_1 = \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma (T_1^4 - T_2^4) F_{21} A_2 \quad (1-39)$$

角系数 F_{12} 、 F_{21} 纯系几何参数，只取决于火灾建筑辐射源的形状、面积以及火源建筑和被辐射建筑之间的相对位置。为了简化角系数的计算，可以假设辐射源是长方形的，被辐射建筑是平行于辐射源的。

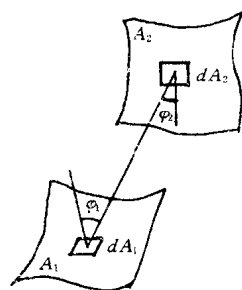


图 1-9 两个面之间的辐射传热

2 高层建筑火灾的蔓延途径

高层建筑内某一房间发生火灾，当发展到轰燃之后，火势猛烈，就会突破该房间的限制。当向其它空间蔓延时，其途径有：未设适当的防火分区，使火灾在未受任何限制的条件下蔓延扩大；防火隔墙和房间隔墙未砌到顶板底皮，导致火灾在吊顶空间内部蔓延；由