

建筑防火设计与研究

建设部科技干部培训中心



前 言

随着我国经济建设的不断发展和建筑结构形式的进一步变换，建筑物防火便愈来愈成为人民所关注的问题。近年来国内许多专家、学者对高层及重要的公共和厂房建筑的防火自救问题进行了广泛地、卓有成效的研究。为了更好地推进我国建筑防火事业的发展，为了使广大的设计者和工程技术人员更重视这方面的问题，我们在参考了国内外众多的有关资料基础上，编写了此本讲义。由于参考的内容较多、较散，加之篇幅有限，所以没有详细列出具体的参考文献。本讲义共分为五个分册，每分册独立成章。由于我们的水平不高，知识面不广和成书的时间很短，所以讲义中的一些观点和看法可能会有误差。为此我们恳请广大读者予以批评指正。

编 者

目 录

第 一 分 册

第一章 概论	(1)
第一节 基本情况.....	(1)
第二节 高层建筑火灾的特点.....	(2)
第三节 建筑防火研究工作的基本内容.....	(4)
第四节 建筑物防火投资额的计算.....	(6)
第二章 建筑物火灾的基本物理和化学性能	(8)
第一节 化学性能.....	(8)
第二节 物理性能.....	(12)
第三章 外墙板的防火性能及构造处理	(22)
第一节 对外墙板进行实体试验.....	(22)
第二节 外墙板可燃质量的计算.....	(24)
第三节 《C + D》规则的应用.....	(25)
第四节 外墙板与楼板联结的一些防火构造作法.....	(26)
第四章 结构构件耐火性能的研究	(29)
第一节 结构构件的防火等级.....	(30)
第二节 高温下的砼强度.....	(31)
第三节 加热速度对砼强度的影响.....	(33)
第四节 保护层厚度对构件耐火度的影响.....	(34)
第五节 钢筋在高温下的物理性能.....	(35)
第六节 砼在火作用下的爆裂.....	(37)
第五章 建筑用材料的防火性能	(43)
第一节 材料与火灾.....	(43)
第二节 建筑用材料防火性能的检测与分级.....	(46)
第三节 材料潜在毒性的研究.....	(50)
第四节 砼的耐火性能.....	(53)
第五节 建筑防火涂料.....	(55)
第六章 建筑防火规划布局及安全疏散	(60)
第一节 规划布局.....	(66)
第二节 防火间距.....	(64)
第二节 建筑物内防火分区.....	(67)
第四节 安全疏散.....	(78)

第 二 分 册

第一节	国外高层建筑排烟排烟动向	(89)
第二节	防排烟系统	(97)
第三节	楼梯间及其前室正压送风量的计算	(107)
第四节	前室及走道排烟量的计算	(116)
第五节	风压热压作用对高层建筑防排烟设计的影响	(120)
第六节	自然排烟系统的应用和存在的问题	(126)

第 三 分 册

第一章	概述	(131)
第二章	高层建筑室内消火栓给水系统	(134)
第一节	消火栓给水系统的分区	(134)
第二节	消火栓给水系统的用水量	(135)
第三节	室内消火栓给水系统的布置	(136)
第四节	室内消火栓给水系统的安全设施	(139)
第五节	室内消防管网的水力计算	(141)
第三章	自动喷水灭火系统 (一)	
——	闭式自动喷水灭火系统	(143)
第一节	系统的组成和分类	(144)
第二节	闭式自动喷水系统的主要组件及使用要求	(149)
第三节	自动喷水灭火系统的设计与计算	(154)
第四章	自动喷水灭火系统 (二)	
——	开式自动喷水灭火系统	(160)
第一节	系统的组成和主要组件	(160)
第二节	雨淋喷水灭火系统	(161)
第三节	水幕系统	(162)

第 四 分 册

第一章	高层建筑消防监控系统	(167)
第一节	高层建筑消防监控系统综述	(167)
第二节	消防监控系统设计实例	(177)
第二章	国内报警设备	(190)
第一节	国内报警设计简介	(190)
第二节	探测器	(192)
第三节	区域报警器	(203)
第四节	集中报警器	(205)
第五节	系统配线与施工布线	(207)

第 五 分 册

第一章	高层建筑防烟、排烟设计·····	(219)
第二章	高层建筑消防给水设计·····	(255)
第三章	关于自动喷水灭火系统设计的若干问题·····	(286)
第四章	高层建筑防火设计问题解答·····	(313)
第五章	高层建筑消防给水设计问题解答·····	(329)
第六章	高层建筑安全疏散设计若干问题的探讨·····	(338)
第七章	超高层建筑防火设计的若干问题探讨·····	(344)
第八章	中国大酒店消防设施简介·····	(358)

第一章 概 论

第一节 基 本 情 况

火的使用是人类最伟大的发明之一。过去现在和将来，它都将为人类的进步和社会的发展起着无法估量的伟大作用。然而，由于人类的不慎和其它自然原因，火也给人类生活带来了无法弥补的巨大损失。火灾是各种自然灾害中最危险、最常见、最具有毁灭性的一种。火灾出现的概率之高，以及它对可燃物的敏感性和燃烧蔓延的快速性都是十分惊人的。

由于我们不可能生活在只有非燃烧性材料的环境中，因此我们有必要更进一步的了解火的燃烧过程，以便更好地防止火灾的发生，延缓偶然性火灾的蔓延的速度，控制火势，从而减小火灾的损失。火灾可分为《大自然火灾》和《建筑物火灾》两大类。所谓大自然火灾是指在森林、草场等一类自然区发生的火灾。这类火灾的起因有两种，一种是由大自然的物理和化学现象引起的，例如：雷、电或堆积物的长期化学变化所产生的热。另一种是由人类自身行为的不慎所引起的。这类火灾爆发的次数并不十分多，但其火势一般都较大，难于扑灭。例如最近在国际上和国内大兴安岭发生的森林火灾等。而建筑物火灾是指发生于各种人为建造的房屋之内的火灾。事实证明，最常见、最危险、对人类生命和财产造成损失最大的火灾还是这类发生于建筑物之中的火灾。引起这类火灾源的主要物体是：火柴或打火机（占10%）；香烟（占10%），取暖设备（占22%）；电器设备（占21%）以及其它原因等。而在各种建筑物中，居住建筑物的火灾又是最重要的。据国外近年的统计，居住建筑物中火的分布情况为：厨房火灾占25%；居室火灾占10%；客厅火灾占10%；家用贮藏室火灾占15%；垃圾道火灾占12%；走廊楼梯火灾占8%；烟道火灾占5%；其它火灾占15%。例如在法国、英国和西德等西方工业大国每年每个国家死于火灾的人数约为800~1000人（见表1），而这些人中的85%是死于居住建筑物之中。法国一年遭受火灾的直接损失为80亿法郎左右，约占法国工业总产值的3%，并且有关部门认为火灾直接损失的比数仍在以8%的值上涨。正是由于火灾所固有的毁灭性和经常性，西方各经济大国对它的防治都是非常的重视。例如目前西欧、美国、加拿大、日本、苏联诸国都设有实力雄厚的建筑防火研究机构。并且在一些较为重要的公共建筑设计中，用于防火设施的费用占建筑物总投资的30%左右。

我国人民与火灾的斗争同样有着悠久的历史。据《左传》记载，春秋时代的人就懂得通过给主要房屋涂泥并拆除相临易燃附属小屋的办法来防止火灾的蔓延。目前我国每年火灾的次数和直接财产损失虽远低于发达的国家，但绝对数值仍是触目惊心的。据有关统计资料报导，1978~1982年全国共发生火灾27万多起，直接经济损失10多亿元人民币。随着社会的不断进步，火灾给人类带来的灾害也会愈加强烈。因此更好地研究火灾的生成条件和扑灭它的办法，便成为社会的一个十分重要的研究课题。在人类同火灾的斗争中发现，一场火灾的燃烧过程被熄灭可有三种方式：1.火灾在某一局部生成，但整个环境不具备可充

西欧各国每年死于火灾的人数

表1—1

国 名	每百万居民死于火灾的数
瑞 士	6.1
意 大 利	7.8
卢 森 堡	9
西 德	11.8
荷 兰	12.7
挪 威	18.1
法 国	19
比 利 时	19.6
丹 麦	20.3
瑞 典	20.4
英 国	20.8
芬 兰	23.5

分燃烧的条件，于是火灾被自动地中止了。2.火灾出现并可继续蔓延，此时由人类通过一定的消防设备去扑灭燃烧。3.火灾由自然气候来扑灭，如雨、雪等。当然这种现象出现的非常少。由此，我们可以概括地说：人类的防火工作首先就是创造一个使火不容易充分燃烧的设计空间，继尔就是生产一些有效的防火和灭火的专用设备。

第二节 高层建筑火灾的特点

由于社会、土地和人口诸因素的影响，高层和超高层建筑不可避免地越来越多地出现在各国大、中、小城市之中。高层和超高层建筑的出现是对传统的建筑施工工艺和某些工业生产部门的一种革命，它推动了社会生产力的发展。但它也给社会环境、城市规划和居民生活带来了相应的问题。尤其它给建筑防火设计和消防灭火工作带来了十分严重的困难。而当今的建筑防火研究和消防灭火设备就要重点解决高层建筑的防火设计问题。综合分析国内外高层建筑火灾之后，人们可概括出高层建筑物火灾的如下特点：

(1) 火势蔓延快、途径多

高层建筑内的普通楼梯间、安全楼梯间、电梯或及各种通风管道已事实上形成了“烟囱效应”。一旦建筑物起火，烟雾和火苗便会通过这些部位迅速蔓延到其它各层。据测试，火灾时烟气水平流速约为0.3~0.8米/秒，垂流速约为2~4米/秒。且室外的自然风速是随着离地面的高度而加大的。例如巴西圣保罗市的31层安德劳斯大楼的火灾就是发生在室外风速8米/秒的气候中。火灾从通风井进入第四层后便沿着敞开的楼梯向上发展到7层，之后高温击碎了外墙窗的玻璃，四个着火层的火焰同时喷出并形成一个焰峰，火焰的辐射热又引着了上边楼层的可燃物。由于更多的楼层被火卷入，火势更大，其火焰达40

米宽、100多米高，伸向街道至少有15米远。在这次大火中，每秒8米的风速产生的通风效果使大量的燃烧能量以火焰的形式扑向窗外，而火焰轻易地触及街道一米的距离。当建筑顺风 and 背风方面的窗被辐射热炸裂后，穿过楼层空间的抽力就增加了。而室内装饰物燃烧的火舌使街对面30米远处的两栋公寓受到严重损坏。另外，在其它的一些高层建筑火灾中同样也表现出各“构造竖井”和“建筑高度”的重要影响。根据有关火灾现场实测，一场火灾能在30分钟时间内由底到顶地蔓延一栋30层的大楼。

（2）难于疏散，人员恐慌、伤亡严重。

高层建筑发生火灾时，人员产生极度恐慌和伤亡的主要原因之一是撤离人员所需的时间较长，而在楼梯间和楼内远离着火的其它地方形成难以忍受的烟雾状况所需的时间则较短。一般地说，撤离所需时间大致与建筑高度成正比。在加拿大进行的实验表明：一幢11层楼房的疏散时间需要6½分钟，一幢18层楼房需要7½分钟，而50层的高楼需要2小时11分钟。但在实际火灾中，人员撤离的速度并非如此令人乐观。这是因为正常的撤离途径往往不再畅通和人类求生本能所产生的恐慌心理等原因造成的。当然还存在着老年人、儿童及残疾人等特殊问题。例如在美国米高梅大楼（共23层）火灾中，许多房客在无人帮助情况下，有的从楼梯跑了出去，有的受不住烟熏而躲回房间。许多人只好破窗呼救或呼吸新鲜空气。最后在消防队的帮助下，全部房客用了4个小时才撤离此建筑。由此，有关专家提出：高层建筑是一种立体的居民区，由于内部功能复杂、人口较多及垂直或水平的行走线路较长，因此在发生火灾时将人员按规定时间及时地撤离出去是不可能的。故高层建筑的全体住户必须在建筑内部受到保护。为此将火灾局限在小范围内，并使处于火灾区域的人们有可能迁移到建筑内的其它安全地点。

（3）火灾难于扑灭

高层建筑还给消防人员造成若干特殊困难，首先是灭火人员如何迅速、顺利地到达着火层，其次是怎样用现有的设备有效地阻止和消灭在高空中飞舞的火焰。一般地说，火是沿着垂直和水平两个方向发展的。并且火灾又可分在建筑内发展和在建筑外发展二类。所谓“内发展”就是指火主要是通过建筑内部的各种水平和垂直通道蔓延。而所谓的“外发展”是指火炸碎建筑外墙窗的玻璃后，沿外墙板向垂直和水平方向蔓延开去。当高层建筑火灾是“外发展”型时，消防人员往往因为消防云梯高度不够和供水不足而无法扑灭不断向高空升腾的火焰。而当高层建筑火灾是“内发展”型时，消防人员又会因电梯中断，烟雾迷漫，而无法徒步自携相应的器材设备攀登几十层的高度，这样势必要拖延时间，延误战机，造成更大的火灾损失。

（4）易燃合成材料的大量使用

为了减轻结构自重，方便建筑上的空间布局和室内装饰的美观，在高层建筑物中大量使用了可燃、易燃的建筑材料和涂料。同时大量的合成及塑料材料的家具也逐步地取代了传统的家用布置。正是由于这些泡沫塑料的存在更增加了原本就具有可燃性的电缆、天花板、隔墙及空调设备的火灾危险性。因此可以称在塑料时代建筑起来的这些高层建筑为“半可燃性”的建筑。1987年新年前夕，波多黎各首府圣胡安的杜邦广场旅馆发生火灾，死亡96人。事故的起因主要与塑料及其它合成材料的家具有关。此旅馆中采用的地毯、室内装璜、帘子、镜子、电线、甚至自动售货机外壳所采用的材料燃烧时均有毒气体放出。有关人员认为，杜邦广场旅馆内突然出现高热时，90多个死亡者中的许多人是在出现烟雾

的几秒钟内立即死亡的。

(5) 结构局部容易失稳

现有高层建筑一般采用钢筋砼结构(40层左右)和钢结构(40层以上)。但不管采用那种结构形式,在高温作用下,结构构件均会因强度和刚度的破坏而失稳、倒塌。我国现用的圆孔预应力板其耐火极限均不超过1小时,有些甚至不到半小时便会让火烧穿。当这些构件被用于高层建筑时,它们就无法与高层建筑所要求的耐火规定相适应。可以设想在一场大的火灾中,当某一局部的构件被火烧坏后,就会导致水平或垂直的交通中断,使消防救护工作和人员疏散工作无法进行。严重的情况下,甚至会导致整体结构的连续倒塌。纽约第一贸易办公大楼是栋钢结构,各结构构件均涂有石棉纤维保护层。70年8月此大楼的33层出现火灾,在第33层筒体中心南部和西部的钢框架横梁被烧扭曲10厘米左右,造成连接销折断,使横梁的某些部分仅靠大梁翼缘支持。而在34层的钢横梁被严重地烧成挠曲。幸亏消防队扑救及时和作用在钢结构上的温度仅有800℃,否则此栋钢结构的倒塌是不可避免的。

(6) 电、煤气设备的大量应用和相互间的通讯困难

高层建筑使设计者和使用者逐渐抛弃了传统的家用生活用具,如用煤炉子烧饭取暖等。而大量的煤气瓶或管道、各种电器产品和固定的电器设备密布在高层建筑物内的各个空间。而上述的各种电器所用线路相互交叉且耗电量很大,一旦设计不合理和使用不当就会因漏电和短路现象而引起火灾。例如南朝鲜的大然阁旅馆就因液化石油气引起火灾而导致163人死亡,60人受伤。另外,由于高层建筑垂直方向的行程较长,这就造成了相互间通讯联系的困难。例如往往下边的楼层已经大火弥漫,而上边的房客却毫无知晓。

综上所述,高层建筑的防火问题是一个十分重要急待解决的问题,目前在世界范围内都在探讨解决它们的有效途径。

第三节 建筑防火研究工作的基本内容

建筑物的防火性能是房屋的设计、建造和使用者十分关心的问题。一栋使用功能极佳且外观十分漂亮的建筑物往往会因为对防火要求考虑的不周,而在原本不大的火灾中全部化为灰烬。毫无疑问这是人们极不希望得到的后果。为此许多国家投入了大量的人力物力用于火灾的研究和设防,《火灾安全学》就是近期发展起来的一门新学科。

在国外,有关防火性能的试验起源于19世纪的末期,在1900年,德国公布了第一批防火研究成果。第一次世界大战后,人们对建筑材料的防火力学性能进行了大量的分析,但这些试验的温度一般都在100℃以下。一直到第二次世界大战后的40和50年代,由于新工艺学的发展,才使人们有可能系统地进行这方面的研究工作。

建筑物中火灾的发展主要取决于3个因素即:a.可燃氧气的状况(它包括空间的体积大小和通风状况);b.可燃体的热能参数(热的惯性、初始水的能量);c.可燃体的分布和性质。由于在火与建筑物之间具有一种相互的作用效用,所以在建筑防火设计与研究中就必须考虑下述诸问题:

(1) 建筑物的总体布置,防火区段的合理划分;

(2) 最初火源有可能出现的位置及其与相邻空间的联结关系;

- (3) 建筑物内固定设备和家具的可燃情况；
- (4) 在火势增大的情况下，建筑物上各排烟进气口的状态及整个排烟系统的功能；
- (5) 建筑物自身防护的作用（如选用抗燃性能好的建筑材料，备有防火防烟的自动关闭门等）；
- (6) 房屋占有者的智力与体力素质（例如居住者的文化程度，年龄大小和有否残疾等因素）；
- (7) 警报系统的功能（探测器的选型，集中或区域报警系统的建立）；
- (8) 消防水源的供给装置及自动喷淋系统。

当然，除了上述诸条之外，尚应考虑各地区人们的生活方式及恶劣的气候条件等因素。总之防火研究是一个涉及面广，所用学科较多的研究领域。仅就建筑防火研究而言，在世界范围内，人们主要进行了三方面的工作：

1. 在建筑物中，对“火灾安全”进行验算研究和估价；
2. 对火灾生成的化学物理现象进行分析；
3. 对建筑物的构件和材料的耐火性能进行研究和确定。

由此，一个较大的防火研究所，一般总要具体地开展如下几个领域的研究工作：

1. 建筑用材料的防火试验研究。任何建筑物都是用各种建筑材料构成的，而任何用于建筑物建造和室内布置的材料都因其自身构成的成分不同而具有不同的热能。为此必须对它们的热性能进行鉴定、评价和改造。这是一部分最基本的防火研究工作。

2. 结构构件的防火试验研究。这部分研究工作的主要目的在于了解各结构构件在高温下其强度和变形的变化规律。并由此通过力学和概率的理论去计算整体结构在火灾下的稳定问题。

3. 排烟通风的试验研究。火灾必然导致浓烟，在实际火灾调查中发现，烟是火灾中妨碍人们正常撤离并窒息人生命的最主要的因素。所以在高层和体型复杂的建筑物中总是十分重视排烟通风的功能。在此范围内，人们在对气流运动的理论分析和模拟试验的基础上，通过自然和机械两种排烟方法去探求一种最佳的送气排烟循环。

4. 警报和喷淋控制系统的研究。此系统的基本功能就在于及早地发现火情并及时地将其扑灭。由于高层建筑具有前边所说的那些特点，所以应该尽可能早的在火灾未进一步蔓延前便中止它。这类研究的两个主要问题便是，探测器的灵敏度及质量和控制系统的合理化问题。

5. 电子计算机模拟火灾的研究。由于火灾的突发性，不定性及人类在此时的恐慌状态等因素，致使防火的研究工作变得十分复杂了。无疑，人们可以进行一些实物试验，但由于它们均属毁坏性的试验，所以即使是在发达的工业国家，这也几乎是不可能的。随着社会进步和电子计算机的广泛应用，人们借助电子计算机把实际存在的大量火灾现象和试验资料进行力学和数学模拟，以给出一些更清楚、更灵活、更全面、更具有复合性、相关性的新概念、新方法。目前这门新学科已被用于诊断整栋建筑物的安全设计合理与否，局部火灾的简单模式；火的发展和人员疏散的关系；用图状网络法揭示建筑物内各空间在热作用下的关系及烟的走向等。

6. 火灾中毒气的研究。火灾是一种物理现象，同时更是一种化学热学现象。烟之所以能窒息人的生命，是因为其中含有有毒的化学成份。燃烧可以生成氮、氧、二氧化碳、一

氧化碳、碳氢化合物、甲醛醋酸等。在所有的化学成份中，一氧化碳是最危险，对人体毒害最大的。一氧化碳的生成是烟气中氧气量急剧减少的结果。对火灾毒气研究的目的，主要是搞清楚各种火灾生成物的成份以及比重和条件，以保证人类生命在火灾中的最大存活率。

下面，简单提及一下几个常碰到的名词：

火：火是一种热的发散，它伴随着烟和可燃瓦斯（有毒）。

燃烧：燃烧是一种物体（各种可燃的热能产品）和助燃剂（空气中的氧）所产生的热反应。这种反应伴随着火苗、炽热以及烟。

火苗：火苗是处于气体阶段的燃烧区，它具有一种发散光。

白炽热：白炽热是在热光形式下的一种能的发射现象，是一种固体或液体热刺激的结果。

第四节 建筑物防火投资额的计算

在一些工业发达的国家中，都对不同类型的建筑物明确地规定了防火等级，即确定了其要投入的防火费用。在我国目前尚未有一本完整、科学、实用的城市规划和建筑设计的防火规范。究竟在总的建设投资中拿出多少比例的钱用于防火是合适的，我们认为这其间要考虑三个主要因素：1. 社会的现有经济实力；2. 建筑物的重要程度；3. 火灾后可能出现的修复工作费用值。很显然，带有“不会着火”的侥幸心理去削减甚至根本不考虑建筑物的防火费用，将会导致极大的隐患。但为了达到较高防火要求而消耗巨款，那么由于避免了大火灾而保全的财产又无法与这笔额外的投资相平衡，这自然也是不明智的。为此，必须要进行具体的分析，以得出一个较为科学的比例数值。

一般地说，建筑物越大、越高、越豪华，则投入的防火费用所保全的财产价值就越大。我们可以选定一栋旅馆式的建筑作为具体的研究对象。为了便于研究，将每一个楼层均看成为是一个独立的防火单元，并假定在每个单元上的着火概率是相等的。由此，一栋 n 层建筑物就有 n 个防火单元，其着火的概率将是单层建筑着火概率的 n 倍。如果在火灾中整栋楼都受到损失，则它是仅有一层楼的建筑物损失的 n 倍。因此， n 层建筑物由于火灾而产生的总损失率是 n^2 。这也就是说，如果我们为一栋十层高的建筑物进行有效的防火处理，则可以预计其在火灾中少损失的金额是单层建筑少损失金额的 100 倍。从经济角度而言，此笔金额是随楼层数而以平方速度增长的。下面我们可以通过一个简单的例子而进一步说明上述问题。

设此旅馆为 n 层，且每层的面积相等，试分析此楼的有关防火费用问题。假定此楼建筑每一楼层的建设投资为 A ，则整栋建筑的总投资就是 nA 。根据我国有关规范的规定，设计基准期 T 为 50 年。可认为在火灾中所损失的室内设施和管理费用是与楼层的面积成比例

的，则设每层楼内的设施和管理费用为 B 。另外设每层每年的失火概率为 $\frac{1}{500}$ ，即拥有 n

个楼层的建筑物每年的失火概率为 $\frac{n}{500}$ 。假设在火灾中，火灾的损失范围为整栋楼，则如

果火灾发生在建筑物落成使用的第一年，其损失为 $\frac{n}{500} (nA + nB)$ 。而在第2年发生火灾时，就要考虑建筑物折旧的因素，即折减掉 $\frac{1}{50}$ 的建筑投资。故在上述相同假设下发生火灾时，其损失额计为 $\frac{n}{500} (\frac{49}{50}nA + nB)$ 。以此类推，在50年内总的火灾损失预计为：

$$\frac{n}{500} (25nA + 50nB) = n^2 \left(\frac{A}{20} + \frac{B}{10} \right)。$$

根据一般旅馆的情况，设：A = 2B，则建筑物在50年的设计基准期内由于失火而引起的总损失可能达到总造价的 $\frac{1}{10}n$ 倍。

由以上分析可知，当人们对整栋建筑的各层进行了防火处理时，就可以保证各层失火时，火不致蔓延或较晚地蔓延到其它楼层上去。在这种情况下，尽管仍然存在火灾损失，但相对来说要小得多，即其损失仅为总损失的 $\frac{1}{n}$ 倍，它相当于整栋建筑总投资的 $\frac{1}{10}$ 倍。可见，总的节约效果是总投资的C倍， $C = \frac{n-1}{10}$ 。于是便出现了如何确定防火投资总数D的问题。由于附加了防火设施，整体建筑的投资就要被相应地增加。根据我国的现状，假定基建贷款的利率为7%，则50年后防火投资D就变成了30D。从防火的经济效益看，30D应该小于C，或 $D < \frac{n-1}{300}$ 。在上例中， $D < \frac{n-1}{300}$ 倍的总投资。

如果我们准备建造一栋21层的中档旅馆，则根据上式，花费总投资的6—7%用于防火是很经济的。假如楼房是31层，则用于防火的最佳投资是10%的总投资。用此法来计算其它类型的建筑同样也是有效的，但需注意调整A与B之间的比值。

此方法是一种大致的估算法，尽管它还没有考虑许多可能涉及到的参数和没有确切地统计失火的概率，但它仍可为人们综合考虑建设投资的效益提供一种较为科学的帮助。

第二章 建筑物火灾的基本物理和化学性能

火灾导致了一些极为复杂的物理和化学现象，目前还没有一种好的方法去科学地预测这些现象。空气热力学是一门最新的，正在发展之中的学科，它的进一步完善将会为火灾的预防与研究提供一重要的手段。

火灾中的一切化学和物理现象均起源于燃烧，它所涉及的燃烧学是一门介于物理和化学之间的科学。我们所定义的燃烧实际上就是一种活跃的氧化作用。除了某些非常特殊的材料外，燃烧必须要具备三个必要的条件：

1. 非常有机可燃体的存在；
2. 助燃剂（氧）的存在；
3. 热能量交换。

据有关资料介绍，在新鲜空气中氧的体积含量为20.8%。但在火灾中，由于燃烧本身的消耗，空气中的氧含量急剧下降。此现象常常意味着两个结果：1是窒息人的生命；2是自动中止燃烧。当然，氧气含量的变化实质上标志着各种燃烧生成物的混合产生。例如当氧气下降到5%以下，就会产生一氧化碳（CO）。而氯（P.V.C.）和“烟子”也会成比例的增长，处于火灾中的人会因为过多的吸入“烟子”而增加了死亡的概率。下面将就建筑火灾中由于燃烧而出现的一些化学和物理现象进行一些机理方面的初步探讨。

第一节 化学性能

一般地说，建筑用材料可分为无机材料，有机材料和复合材料三大类。就防火研究而言，对有机材料主要是分析其的化学变化；对无机材料主要是研究其的物理力学性能；对复合材料则根据其的具体情况综合研究。在任何情况下，只要在材料中出现了有机成分就会在火的作用下发生化学变化并出现烟气或毒性气体。当然对许多有机化合物来说，其在火焰中的化学反应非常复杂。即根据反应键的发展和断裂情况，可能出现各种不同的反应。在某些情况下，这种反应会随温度出现非常奇怪的变化。例如，许多碳氢化合物及醚在很低的温度下能出现冷火焰，而当温度较高时却没有明显的反应。当温度更高时则发生正常的着火。

事实上，我们可以由一个总的平衡方程式去表征一次完全燃烧的化学反应：

1 公斤的可燃体 + γ 公斤的空气 = $(\gamma + 1)$ 公斤 (CO_2 , H_2O , N_2 ……)

式中的 γ 为化学计算中的比值，它因可燃体的性质和燃烧所释放的热量而有很大的变化。人们可以用材料的发热量去表征每公斤可燃体释放的热量。

其实可以把发热量分成两种，当燃烧所释放出的水被重新冷凝时，称为“高”热量；当假定燃烧所释放出的水处于蒸汽状态时，称为“低”热量，这是在众多火灾中普遍存在

的一种现象。燃烧热量是一个变化范围相当大的值，对于好的可燃体有如下一些试验值：

甲烷	50 ^{KJ} /克	木材	17~20 ^{KJ} /克
聚乙烯	43.3 ^{KJ} /克	苯	40.15 ^{KJ} /克
聚碳酸酯	29.7 ^{KJ} /克	纤维素	16.1 ^{KJ} /克
棉花	15.55 ^{KJ} /克	煤	35.2 ^{KJ} /克

但要说及的一点是，对于大量的材料而言，其的燃烧热量与 γ 的比值的变化的变化是很小的。自1917年THORNTON 就发现燃烧热比值（与所消耗的氧化量有关）对大量的有机化合物而言是稳定的，其值约为12.7^{KJ}/克O₂。国外一些研究者近期对一些复合型材料也做了试验并测得它们的平均燃烧热比值为13.0^{KJ}/克O₂，可见变化不大。由此，在试验中人们可以通过量测氧气在燃烧中的体积损失量比较精确地计算出热的流量值。

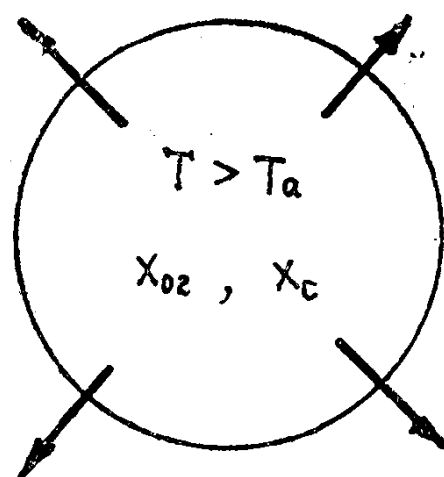
1. 材料的匀质燃烧

对火灾而言，各可燃材料具有不同的燃烧形式。我们可以把这些燃烧形式大致分为三类即：气体燃烧；固体燃烧；液体燃烧。由于液体燃烧的过程十分短促，它会很快地向气体阶段转化，所以本文将不对其做讨论。

所谓气体燃烧是指处于气化状态的燃料而言的。这种燃料所导致的燃烧反应是被称为匀质的。这是因为可燃体和助燃剂（氧）都是处于同一状态下，且它们之间相当容易被混合。可以定性地说，匀质燃烧所导致的热反应速度是十分高的。为了更明确地说明这一现象，我们假设四周的空气是匀质的，其温度为 T_a ；而在此匀质的空气中存在着一个小的可燃气体包（见图2—1），此气包内的温度为 T ，氧气的含有量为 $X_{O_2}\%$ ，可燃气体C的含有量为 $X_C\%$ ，为此，我们可以用下式来计算这个可燃气体包的氧化（燃烧）速度：

$$V_o = X_{O_2}^p \cdot X_C^q f(T, X_{O_2}, X_C \dots \dots)$$

可见，所谓的氧化速度是会随着温度的升高而以非常快的速度向上增长的，并且会一直趋向到高温的限值。上式表明，如果 X_{O_2} 或 X_C 之一变为零，则氧化速度即被解除。下面可以写出小瓦斯包的热平衡方程式为：



$$\text{热损失} = K(T - T_a)$$

图2—1

$$m c_p \frac{dT}{dt} = (P.C.I.) \times V_o - K(T - T_a) \quad (1)$$

式中：

C_p = 比热； m = 可燃气体团；

$P.C.I.$ = 燃烧热； $K(T - T_a)$ = 热损失。

由式（1），如果 $P.C.I. \times V_o > K(T - T_a)$ ，则温度增高且燃烧反应一直加速到O₂或C被消耗掉为止。此时由于燃烧反应自动猛烈的加速与温度强烈的上升将导致瓦斯气的蔓延，即燃烧是延续的并具有所谓的“爆炸式”的速度。此现象我们可以经常地在可燃气体的火灾中看见。

反之，如果 $P.C.I. \times V_o < K(T - T_a)$ ，则温度降低并且燃烧反应中止。因此在实际

工程的设计中，对于一个给定了温度的环境条件，就需要定出一个最小的局部临界发热量来。这样可以保证不出现火情或火情不致增大和蔓延。所谓的局部发热一般是因点燃的明火，与比较热的物体相接触，或是喷射来的热瓦斯等因素造成的。

可是由于氧化速度取决于 X_{O_2} 和 X_C 的含量，所以只有当 X_C/X_{O_2} 是处于易燃性的上、下限值之间时式（1）才成立。例如对一种由 N_2 、 O_2 和可燃气C混合而成的类型，其在给定的温度下，燃烧只能出现在某些组合范围内（详见图2—2所示）。由图可见，当人们

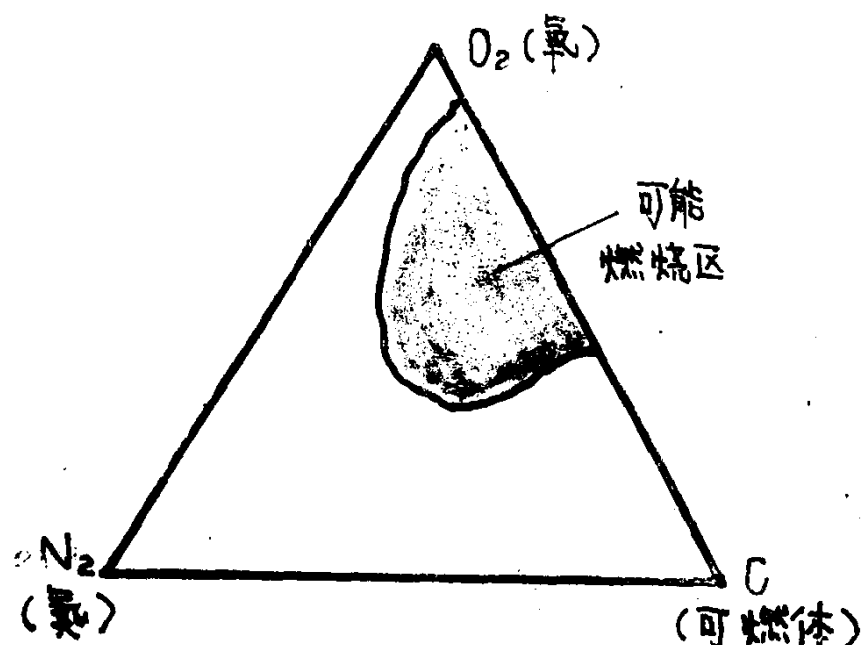
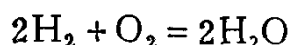


图2—2

升高温度时，下限值将向外推延，而上限值增大，即扩大了易燃性的范围。Chatelier et Bandauard 在1898年就指出常温空气中碳氧化物的下限值为15.9%；而当温度达到400℃时，此限值降为14.2%；当温度为470℃时，再降为9.3%。可见危险性在明显的增加且自混合物达到燃烧温度 T_i 值时开始，这种危险性达到了最大值。即图2—2中的燃烧区范围达到100%。假如没有出现氮或二氧化碳那样的惰性气体，则对氢而言其 X_C/X_{O_2} 。

的比值可由以下化学反应式得到2/1的结果：



(2)

需要提及的是，惰性气体在燃烧中实际上是扮演着一个减轻燃烧的角色。

表2—1中给出了几种可燃体的燃烧温度及其易燃性的上、下限值。当然在实际的生产和生活中，人们可以根据使用空间的具体情况，通过附加抑制剂的办法去改变各种材料的燃烧性限值。所谓的抑制作用就是放慢燃烧体的化学运动。当然任何形式的防火处理只能起到延缓燃烧的作用，而无法根本杜绝大火的出现。

另外值得提及的一点是，在某些工业生产中会出现一些特别微小的粉尘混合物。这些微粒如发生燃烧会导致非常大的危险。且其的燃烧形式近似于气化阶段。还有在使用喷枪的涂料车间会出现液状微粒的燃烧，但其的燃烧形式同样相似于气化状态。为此在工业厂房设计中要特别注意对上述的工业微粒采取必要的预防措施。

2. 材料的异质燃烧

当固体材料发生燃烧时，我们称其为异质燃烧，它通过氧气而使固体材料的表面层被

表2—1

种 类	体积浓度%		燃烧温度
	下限值	上限值	
氢	6	72	585
碳的一氧化物	12.5	77	650
甲 烷	5.3	16	632
乙 烷	3.0	12.5	472
丙 烷	2.1	10.1	481
丁 烷	1.8	8.4	441
乙 烯	3.1	32.0	490
甲 醇 酒 精	6.7	36.5	470
丙 酮	3.0	11.0	561

直接地氧化。此种形式的燃烧速度主要是由固体材料中的温度和氧气的扩散程度所控制。在没有强风的情况下，此种燃烧速度较之气状燃烧而言要低很多。异质燃烧将主要产生碳氧化物。

在火灾中，人们经常可以看见一些可燃材料被烧毁，而这些材料又常常是一些最有机的复杂型聚合固体材料。这些固体可燃物在常温下没有任何燃烧能力，可一旦当温度达到其被点燃的限值后便会在热效应下发生一种转变。例如某些热塑性的材料如聚苯乙烯，它会由于热熔化而出现液状的燃烧且会通过雾化的作用而导致气状燃烧。相反某些酚树脂主要表现为固体阶段的燃烧。当然，大量的有机材料尤其是以纤维素为基础的材料（木材）一般只发生两种燃烧形式即气状的和固状的。这两种燃烧现象出现的秩序（有时是同时出现的）是材料性能与周围环境条件的函数。当木纤维材料被放置在温度逐渐增高的环境中时，它最先出现的现象是失水，此时纤维材料中的温度上升很慢。尔后出现的现象是雾化期。过了雾化期段之后，材料中的温度有了新增加。当温度到达150℃时，材料开始发生破坏。从200℃时起，材料开始出现可冷凝蒸汽和瓦斯气的发散。实验证明纤维材料中的含水率是不容忽视的，例如工程木材中的水含量占体积的8~18%。这一点是它们与合成有机材料之间的重要区别点之一。

可冷凝蒸汽部分包含两个变化期：一是被称做焦油后水的水溶期，其主要包含羧酸、甲醇、甲醛、丙酮；另一是柏油期，它主要是由羧酸、树脂酸、中性树脂、苯酚等构成。焦油后水的蒸汽是从200℃起开始散发，并且在大约350℃时便停止发散。柏油的蒸汽则在更高的温度中才发散，其出现的温度为300℃，而停止发散的溫度約在400~450℃之間。至于上述的瓦斯发散流量值，一般是在350~400℃时达到最大。但一直到1000℃的时候，瓦斯仍未完全发散完。这些木纤维的瓦斯气主要含有二氧化碳、一氧化碳、甲烷和其它少量的碳氢化合物。

当一些纤维材料具有适当的热惯性量、孔隙率和质量时，燃烧热的化学反作用将是十分充分的。此时火往往由某一局部位位置开始诱发而后热能一层一层地逐渐接近材料的中心位置，一直致使其整体的损坏。由此我们便可以解释为什么一些火灾可以在某些植物有机材料中长时间地潜伏着，例如人们熟知的棉花包中的火灾生成的过程。

除了单一的天然固体可燃材料外，在建筑中有大量的合成聚合型材料被使用着。聚合材料的品种多种多样且它们热损坏的条件也是多变的。在火灾中由于高热分解的作用，这些聚合体将导致大量的基本分子量的化合物。这些化合物可以是气状的或稠状的，可燃的或非可燃的，有害的或非有害的等等。当温度从正常状态开始增加时，我们可以大致给出热塑材料随温度变化的几个阶段：

a. 首先对聚合物实行简单的加热，可以观察到它们的物理性能出现了一点变化且这种变化一直可以保持到材料出玻璃质时的温度止。

b. 由此温度起，材料的力学特性和某些化学特性会在一个相当短的时间里迅速地出现变化。这是因为聚合物已达到了粘性状态。一直到此阶段为止，材料还仅仅是发生物理上的变化。

c. 当温度到达材料大分子中那些最弱的共价联结点中断的时候，聚合体发生化学分解且这种分解是不可逆的。对木材而言，此损坏是由温度和自由氧的共同作用所致的。相反，根据不同情况，这种损坏伴随着放热效应（木材）或吸热效应。假如材料产生内热，

则温度增加的速度将更快。而在吸热损坏的情况下，由于最不利联结折断的潜热的存在，则温度的增加将被放慢。与上一阶段相比，由于热损坏仅出现在有限的化学键上，所以材料此时的变化仍很小，例如仅使材料出现部分的脱色。

d. 当温度继续增加到其它的化学共价键也达到了中断点时，聚合质量的外形便被改变了，但聚合体的分子变种是有着多种性能的。例如当聚甲醛树脂等被解聚时，聚丙烯腈承受第一类转变。如果聚合物含有多种联结形式，则与这些联结相适应的各温度范围是合适的且材料损坏与分解现象是可区分的。表2—2给出了某些聚合物的温度范围值。

一般地说，聚合物的分解同样具有稠密状和气状两个阶段：——处于稠密阶段的聚合分解体可以是固状的也可以是液状的。固状体由含碳的膨胀残渣构成。液状体则由分离的单体构成，它能够导致整体的解聚。——至于气状阶段则是由此基本大分子重量更小的分子所组成。这是由于某些共价连接键的断裂而产生的大分子地分解。在给出某些聚合物的元素组合时，人们发现在此阶段，含碳氢的分子与空气一接触便形成了可燃混合体。

总之热损坏性是所有有机材料所共有的特性。只要外部温度合适，这些有机体便会成为可燃瓦斯和蒸汽的发生器。热损坏同时还将使有机体留下一些碳状的膨胀残渣，而这些残渣仍是可燃的。另外需要注意的是，在可燃生成物产生的过程中将需要一种高温分解热，而这种分解热对可燃瓦斯的产生速度起到了一种非常重要的作用。

表2—2

名 称	温度范围	备 注
聚 氯 乙 烯	200~300	°C
聚醋酸乙烯	213~325	°C
聚 甲 醛	222	°C
聚 醇 乙 烯	250	°C
聚 丙 烯 腈	250~280	°C
三酸纤维素	250~310	°C
聚 氧 丙 烯	270~355	°C
聚 同 丁 烯	288~425	°C
聚丁酸乙烯	300~325	°C
聚 苯 乙 烯	300~400	°C
尼 龙 6	310~380	°C
聚 氧 乙 烯	324~363	°C
聚 丙 烯	325~410	°C
聚 乙 烯	335~450	°C
聚 氟 乙 烯	372~480	°C

第二节 物理性能

要研究建筑物在火灾中出现的诸多物理现象，首先需要了解火灾中火的发生、发展与转移这一连续过程中各具体阶段的热物理特点。

1. 事故火的点燃

此时建筑物内的原始材料开始燃烧，即它标明在此建筑空间出现了火灾。形成火灾的火源一方面来自其它失去控制的火源，另一方面是由于各可燃体被非正常加热至超过其临界温度而自燃。但不论是那一种情况，要在事前预见它们都是十分困难的，因为火灾事故发生的形式与地点是极其复杂和可变的。可燃体的临界温度（即点燃温度）各不相同，这是一个非常重要的物理量。在实际火灾中，可燃体自身的热性能、尺寸、方位和所处的空间环境均影响着其是否能达到被点燃的临界温度。