



建筑火灾安全技术

李炎锋 李俊梅 编著
刘朝贤 审

中国建筑工业出版社

建筑火灾安全技术

李炎锋 李俊梅 编著
刘朝贤 审



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑火灾安全技术/李炎锋, 李俊梅编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2009
ISBN 978 - 7 - 112 - 10622 - 6

I. 建… II. ①李…②李… III. 建筑物 - 防火系统 - 安全技术 IV. TU892

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 009864 号

本书结合作者在建筑火灾安全领域的研究成果以及国内外现行的建筑防火设计规范的发展, 全面系统地介绍了有关建筑防火与消防工程的理论、技术以及研究进展。具体内容涵盖了建筑火灾动力学基础以及主要研究方法、建筑火灾中烟气扩散规律、性能化消防设计等。本书重点放在描述大空间建筑和地下建筑火灾特点、烟气扩散规律、相应的通风和防排烟系统的设计要求。简要介绍了建筑火灾的被动防治和主动防治技术, 重点分析了水喷淋系统和细水雾系统的原理以及工程应用。本书还系统介绍了性能化防火设计与火灾中人员疏散等内容。

本书可以作为建筑防火设计相关专业包括安全工程与技术、建筑环境与设备工程专业(暖通)、给水排水、建筑学、建筑工程专业的研究生和高年级的本科教学、科研使用, 可以作为以上专业及其相近专业进行注册工程师和继续教育的培训资料, 也可供建筑防火设计、火灾安全咨询与评估、防火安全检查与管理方面的技术人员参考。

* * *

责任编辑: 朱首明 齐庆梅
责任设计: 赵明霞
责任校对: 安 东 陈晶晶

建筑火灾安全技术

李炎锋 李俊梅 编著
刘朝贤 审

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
北京嘉泰利德公司制版
北京市铁成印刷厂印刷

*

开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 12½ 字数: 305 千字
2009 年 4 月第一版 2009 年 4 月第一次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978 - 7 - 112 - 10622 - 6
(17553)

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

随着我国国民经济和城市化建设的快速发展，建筑行业已成为主要的经济产业领域，如雨后春笋，方兴未艾。但随着建筑业的发展和建筑功能形式的多样化，大型复杂的现代建筑物越来越多地涌现，地下建筑和城市交通隧道（地铁、城市地下快速路）得到快速发展。建筑防火安全面临很多新的问题。近年来，我国的火灾形势比较严峻，重大和特大火灾连续发生。如何采取有效的消防措施以减少火灾造成的人员伤亡和财产损失已成为社会关注的重大课题。近年来，国内外在火灾安全科学和消防工程方面的研究非常活跃，不断有新的研究成果公布。目前，国内出版的标准建筑的防火以及防排烟研究设计的书籍较多。但对于大空间建筑以及地下建筑的火灾安全技术，则缺少系统全面地介绍这类建筑火灾规律研究的书籍。在吸收学习国外最新研究成果的基础上，结合自己多年来的研究心得撰写了本书。

本书从火灾科学应用基础理论出发，介绍火灾动力学基础和火灾研究模型及其相关理论，对建筑（主要针对大空间建筑和地铁系统）火灾中烟气扩散规律研究进行了系统而详细的阐述。总结了建筑防排烟系统的设计、火灾防治技术（主动和被动防治技术）。重点介绍目前卤代烷灭火剂的替代技术细水雾灭火系统的研究。作为一门应用科学，火灾科学的根本目的是解决工程中存在的主要问题，而性能化设计、人员疏散以及火灾风险评估研究对于采取合理有效的防火措施，防治火灾发生发展，降低火灾造成的人员伤亡和财产损失的社会需求具有重大意义。

本书共分七章。第一章主要讨论了当前的建筑火灾的特点以及分类，建筑火灾安全体系的构成、建筑火灾安全学科发展的趋势。第二章具体描述了建筑室内火灾的发展阶段特征，不同形式烟气羽流和火焰高度的计算表达式、建筑火灾研究区域模型和场模型的理论。第三章重点研究建筑火灾烟气的扩散规律。重点介绍大空间建筑发展以及烟气在大空间建筑内的扩散模式，同时介绍地铁站发生火灾的危害特点以及火灾场景中的烟气扩散规律。第四章介绍了大空间建筑（以中庭和体育场馆为主）、地铁系统的防排烟设计。第五章简要阐述了建筑火灾的防治技术，首先介绍被动防治火灾技术，然后从控制火灾发展的角度简要分析了主动消防对策的作用。重点说明了火灾自动报警系统、水喷淋系统和细水雾系统研究和发展情况。第六章讨论性能化防火设计发展，介绍性能化防火设计概念、国外相关建筑防火规范比较。讨论人员在火灾中的安全疏散。第七章对我国火灾安全科学研究以及发展性能化设计的工作进行了讨论。本书还在对国内外防火设计规范比较的基础上提出了大空间以及地下建筑火灾安全、细水雾灭火系统的研究一些看法，希望与业内人士进行讨论，以便通过交流，共同提高认识。

本书由李炎锋教授负责撰写第一、三、五、七章并负责全书统稿，李俊梅副教授负责撰写第二、四、六章。在第四章第四节地铁站火灾烟气扩散规律和第四章第四节地铁站内防排烟系统设计与分析撰写中得到樊洪明副教授的指导。在本书的撰写过程中引用了

国内外同行的相关研究成果，北京工业大学建筑工程学院建筑环境与设备工程系研究生石勃伟、赵德朝、蔡娜、孙成雷、牛满坡、黄槐荣、王鲁鹏、端木祥玲、侯丛兰、杨超、付成云、刘叶、甘莉斯、朴春君、胡世阳、赵明星、王超、隋婧等还参加了部分章节的撰写、校核和修改工作，在此一并向他们表示感谢。本书是所有作者在香港理工大学期间进行火灾研究和近几年开展防火科研项目研究成果的结晶，得到北京工业大学“211工程”专项经费资助（2005年度）、科技部“十一五”支撑项目“城市地下空间建设技术研究与工程示范”（2006BAJ27B04）、“村镇防火和抗火技术与示范”（2006BAJ06B06）、北京市自然科学基金项目（8082004）和国家自然科学基金面上项目（50878012）的资助，在此表示衷心感谢。

中国建筑西南设计研究院的刘朝贤教授在本书审稿过程中提出了宝贵的意见和建议，对于提高本书的水平大有裨益。作者进行了认真的修改，在此对刘朝贤教授表示衷心感谢。

虽然作者在撰写过程中尽了最大的努力，但由于水平有限、时间仓促，错误和疏漏在所难免，敬请读者及同行不吝指教，以臻完善。

目 录

第一章 总论	1
第一节 建筑火灾的特点与分类	1
第二节 建筑火灾安全学科研究的发展形势	4
第三节 本书的主要内容	7
第二章 火灾动力学基础及火灾研究	9
第一节 室内火灾发展的基本过程	9
第二节 烟气羽流和火焰高度	12
第三节 烟气在通风良好建筑内的流动	18
第四节 火灾研究的基本模型	25
第三章 建筑火灾中烟气扩散规律的研究	49
第一节 烟气扩散守恒方程和烟气填充描述	49
第二节 烟气在多房间的扩散过程	59
第三节 大空间建筑烟气扩散规律的研究	64
第四节 地铁车站内烟气扩散规律的研究	80
第四章 建筑防排烟设计	92
第一节 建筑防排烟系统分类和要求	92
第二节 大空间建筑防排烟系统的特点	99
第三节 大空间建筑防排烟系统研究	110
第四节 地铁车站防排烟系统设计与分析	117
第五章 建筑火灾防治技术	130
第一节 建筑火灾被动防治技术	130
第二节 建筑火灾主动防治技术	135
第三节 水系统在建筑灭火中的应用	146
第六章 性能化防火设计与火灾中人员逃生研究	162
第一节 性能化设计的基本概念与基本要求	162
第二节 国内外建筑防火规范比较	166
第三节 建筑火灾中人员的疏散	172
第七章 建筑火灾安全技术研究展望	181
参考文献	184

第一章 总论

第一节 建筑火灾的特点与分类

火灾是一种由失去控制的燃烧所造成的危害。相对于水灾、风灾、旱灾、地震而言，火灾显然是危害面最广、发生几率最高的一个灾种。近年来，在全球范围内，每年发生的火灾有 600 万 ~ 700 万起，每年有 7 万人左右死于火灾。火灾防治是人类社会的一项长期而重要的任务。根据发生的场合火灾可以分为建筑火灾、森林火灾、工矿火灾和交通运输工具火灾等。各类建筑物是人们生产、生活主要场所，同时建筑物也是财产集中处，因此建筑设计考虑的重要问题之一是如何保证发生火灾时建筑物内人员和财产的安全。

一、建筑火灾的特点

建筑火灾与其他火灾相比，具有火势蔓延迅速、扑救困难、容易造成人员伤亡事故和经济损失严重等特点。

1. 火势蔓延迅速

由于烟气流的流动和风力的作用，建筑火灾的火势蔓延速度是非常快的。发生火灾时产生的大量烟和热会形成炽热的烟气流，烟气流的流动方向往往就是火势蔓延的方向，烟气流的流动速度往往就是火势蔓延速度。烟气的流动主要与火灾现场的发热量有关。发热量越大，烟气温度越高，流动的速度也就越快；发热量越小，烟气温度越低，流动的速度也就越慢。另外，烟气的流动还和建筑高度、建筑结构形式、周围温度、建筑内有无通风空调系统等因素有关。

2. 火灾扑救困难

由于建筑物的面积较大，垂直高度较高，一旦着火，扑救难度较大。从总体上讲，目前城市的消防力量是有限的，尤其是中小城市，消防的整体力量还难以满足大型建筑重大火灾的扑救。另外，消防设备的供水能力、登高工作高度也难以满足高层建筑的消防要求。我国目前使用较多的解放牌消防车能直接供水扑救的最大工作高度约为 24m，大多数登高消防车的最大工作高度均在 24m 以内，这些设备和器材难以保证高层建筑的消防需要。

3. 容易造成人员伤亡事故

建筑物一旦着火，火灾现场就会产生大量的烟尘和各种有毒有害气体，这些烟尘和有毒有害气体对人体危害很大，而且，流动的速度很快，一旦充满安全出口，就会严重阻碍人们的疏散，进而造成人员伤亡。火灾案例表明，在火灾伤亡事故中，被烟气熏死的人数占死亡人数的半数左右，有时甚至可以高达 70% ~ 80%。

4. 经济损失严重

在各种火灾中，发生概率最高、损失最为严重的当属建筑火灾。建筑火灾所造成的损

失不仅是建筑本身的价值，而且还包括建筑内各种物质的经济损失。

二、建筑火灾的分类^[1]

对于建筑火灾，可以按燃烧对象、火灾损失严重程度或起火直接原因等进行分类。通常采用美国国家消防协会（National Fire Protection Association 简称 NFPA）按燃烧对象分类方法。即将火灾划分为 A 类火灾、B 类火灾、C 类火灾和 D 类火灾。

(1) A 类火灾 是指普通固体可燃物燃烧而引起的火灾。这类火灾燃烧对象的种类极其繁杂，包括木材及木制品、纤维板、胶合板、纸张、棉织品、化学原料及化工产品、建筑材料等。A 类火灾的燃烧过程非常复杂，其燃烧模式一般可分为四类：①熔融蒸发式燃烧，如蜡的燃烧；②升华式燃烧，如萘的燃烧；③热分解式燃烧，如木材、高分子化合物的燃烧；④表面燃烧，如木炭、焦炭的燃烧。

(2) B 类火灾 是指油脂及一切可燃液体燃烧而引起的火灾。油脂包括原油、汽油、煤油、柴油、重油、动植物油等；可燃液体主要有酒精、乙醚等各种有机溶剂。这类火灾的燃烧实质上是液体的蒸气与空气混合进行燃烧。根据闪点的大小，可燃液体被分为三类：闪点小于 28℃ 的可燃液体为甲类火险物质，如汽油；闪点大于及等于 28℃，小于 60℃ 的可燃液体为乙类火险物质，如煤油；闪点大于及等于 60℃ 可燃液体为丙类火险物质，如柴油、植物油。

(3) C 类火灾 是指可燃气体燃烧而引起的火灾。按可燃气体与空气混合的时间，可燃气体燃烧分为预混燃烧和扩散燃烧。可燃气体与空气预先混合好后的燃烧称预混燃烧；可燃气体与空气边混合边燃烧称扩散燃烧。根据爆炸下限（可燃气体与空气组成的混合气体遇火源发生爆炸的可燃气体的最低浓度）的大小，可燃气体被分为两类：爆炸下限小于 10% 的可燃气体为甲类火险物质，如氢气、乙炔、甲烷等；爆炸下限大于及等于 10% 的可燃气体为乙类火险物质，如一氧化碳、氨气、某些城市煤气。可燃气体绝大多数是甲类火险物质，只有极少数才属于乙类火险物质。

(4) D 类火灾 是指可燃金属燃烧而引起的火灾。可燃的金属有锂、钠、钾、钙、锶、镁、铝、钛、锌、铅、钍、铀、钷等。这些金属在处于薄片状、颗粒状或熔融状态时很容易着火，而且燃烧热很大，为普通燃料的 5~20 倍，火焰温度也很高，有的甚至达到 3000℃ 以上。另外，在高温条件下，这些金属能与水、二氧化碳、氮、卤素及含卤化合物发生化学反应，使常用灭火剂失去作用，必须采用特殊的灭火剂灭火。正是因为这些特点，才把可燃金属燃烧引起的火灾从 A 类火灾中分离出来，单独作为 D 类火灾。应该指出，虽然建筑物中钢筋、铝合金在火灾中不会燃烧，但受高温作用后，强度会降低很多。在 500℃ 时，钢材抗拉强度会降低 50% 左右，铝合金几乎失去抗拉强度，这一现象在火灾扑救时应给予足够的重视。

对于各类火灾，均有适用于不同可燃物性质的灭火方法。例如 A 类火灾需用水冷却加以扑灭。但因水具有导电性，故对于 C 类火灾即不适用。对 C 类火灾，应采用气体系统等不具导电性的灭火剂为宜。对于 B 类火灾，则应设法将空气与燃烧物质隔离，以抑制可燃性气体从燃烧物质中释出。至于 D 类火灾，则应采用不至于与燃烧金属起化学反应的吸热式灭火剂加以抑制。

此外，按火灾损失严重程度可分为特大火灾、重大火灾和一般火灾。

(1) 特大火灾。死亡 10 人以上 (含 10 人), 重伤 20 人以上; 死亡、重伤 20 人以上; 受灾 50 户以上; 烧毁财物损失 100 万元以上。

(2) 重大火灾。死亡 3 人以上, 受伤 10 人以上; 死亡、重伤 10 人以上; 受灾 30 户以上; 烧毁财物损失 30 万元以上。

(3) 一般火灾。不具备重、特大火灾的任意一项指标。

三、我国目前的建筑火灾严峻形势

我国建筑火灾一直比较严重, 这与我国的建筑结构形式、人民的生产和生活特点、我国的地理位置、气候条件、社会习俗等诸多因素有关。建筑物发生火灾时产生大量的烟雾, 烟雾中有毒有害气体是火灾伤亡的最主要原因。在火灾中, 材料分解产生大量的热量, 引起建筑物内温度升高, 混凝土在一定温度下将分解成无粘结力的石灰和二氧化碳, 从而造成了楼层坍塌, 使建筑物遭受灾难性的毁坏。造成当前建筑火灾比较突出的因素是多方面的。应当注意, 其中有不少因素与目前我国经济快速发展的状况有着密切关系。

近年来, 随着我国经济建设的快速发展, 导致火灾的因素也大量增加, 火灾形势日趋严峻。据统计, 1998~2002 年的五年内, 全国共发生火灾 986565 次, 造成死亡 12881 人, 受伤 21076 人, 直接财产损失 73.3 亿人民币 (以上统计数字均不包括港、澳、台地区和森林、草原、军队、矿井地下发生的火灾, 下同), 火灾次数逐年增多, 火灾损失也呈日趋上升趋势。仅 2002 年, 全国就发生火灾 258315 次, 死亡 2393 人, 受伤 3414 人, 直接财产损失 15.4 亿元。2004 年发生火灾 25.3 万起, 死 2558 人, 伤 2969 人。2005 年, 火灾 23.6 万起, 死 2496 人, 伤 2506 人。最近一二十年来, 我国处于火灾形式严峻的时期, 建筑火灾次数和损失居高不下, 容易出现群死群伤事件。如 2001 年 12 月 20 日的洛阳东都商厦火灾造成 309 人丧命。2003 年 11 月 3 日湖南衡阳特大火灾导致衡州大厦坍塌, 14 名消防员死亡, 另有 6 人失踪。2004 年 2 月 15 日吉林中百商厦火灾, 造成 54 人死亡, 70 多人受伤。2005 年 12 月 15 日辽宁辽源市中心医院火灾事故, 39 人死亡, 数百人受伤。这些事故引起政府和社会的高度关注。如何防止建筑火灾的发生已经成为目前迫切需要认真研究的课题。

四、未来我国火灾的发展趋势

随着我国城市化水平的迅速提高, 建筑业得到了突飞猛进的发展, 不仅各种建筑物的数量大大增加, 而且出现了许多新型、大型、高层的特殊类型建筑, 如高层建筑、地下建筑、体育场馆及大型商场、剧场、仓库、车间、候车厅等。这些建筑的使用功能和所使用的建筑材料也发生了巨大的变化, 由于建筑物内使用的电力、热力设施大大增加, 从而使火灾危险程度发生了很大变化。在城市 (镇) 迅速膨胀过程中, 容易出现规划上的缺陷, 这主要表现在城市的市政工程、安全防灾设计和设施、环境保护等方面存在先天不足, 或严重滞后于城市的发展; 在经济起步时期, 企业的经营者容易滋生片面追求利润而忽视安全思想, 另一方面保证正常生产与生活的安全设施不足, 加上人们的安全意识薄弱, 这便为火灾的发生开了方便之门。因此, 需更加重视火灾安全科学的发展、开发新型建筑消防技术手段。同时, 非常有必要对危险场合进行火灾风险评估, 并开展性能化防火分析和设计, 以降低其危险性, 从而达到减少火灾发生次数及降低火灾损失的目的。

第二节 建筑火灾安全学科研究的发展形势

一、火灾科学研究的任务和内容^[2]

火灾安全科学的任务就是科学地认识火灾系统的复杂行为，并发展相应的技术原理以对这种复杂性行为加以合理的控制与利用。

火灾过程是一种涉及物质、动量、能量和化学组分在复杂多变的环境条件下相互作用的三维、多相、多尺度、非定常、非线性、非平衡态的动力学过程。火灾的孕育、发生和发展包含着湍流流动、相变、传热传质和复杂化学反应等物理化学作用。该动力学过程还与作为外部因素的人、材料、环境及其他干预因素等发生相互作用。火灾的复杂性包括火灾确定性动力学系统的复杂性以及火灾的随机性。

火灾科学研究的最终目标是为社会服务。经过科学家和工程师们的共同努力，火灾科学的应用研究目前已经成为火灾科学体系的一个重要领域，它包括火灾防治技术学和火灾安全工程学两个方面的内容。

1. 火灾防治技术学

火灾防治技术学有两种研究类型。一类是针对具体的火灾防治要求所提出的单项技术研究；另一类是针对火灾过程全面防治所提出的防治系统研究。火灾防治技术学是研究如何将火灾科学基础理论与现代技术科学完善结合，达到有效防治火灾之目的。具体分解目标是：如何有效防止火灾的发生；如何早期发现并及时有效控制火灾；如何有效扑灭火灾。

火灾防治技术学研究有两个终极目标：其一是“火灾的智能探测与扑救”，主要针对火灾的突发性和危害性。其二是“洁净化灭火”，主要针对环境的保护。如含卤聚合物虽可阻燃，但在高温下会产生大量浓烟及有毒、有害气体，并且其中的卤化氢遇水后极易形成酸性物，腐蚀物品，造成酸雨。为了保护大气的臭氧层，卤代烷系列气体灭火剂已经逐步被淘汰。

2. 火灾安全工程学

火灾安全工程学研究如何将火灾科学基础理论及火灾防治技术与社会经济有机结合，以期达到火灾防治的科学性、有效性和经济性的完美统一。它包括：火灾安全工程设计、火灾系统科学管理和火灾防治方案决策。火灾安全工程学的主要目标是：在进行建筑物的设计、使用和管理时，应优先保证人员在火灾中的安全，同时考虑如何减少火灾的发生和火灾造成的损失，防止火灾大面积蔓延，并最大限度地降低火灾对财产、环境和文化遗产的破坏等。

火灾安全工程设计着重研究火灾科学基础理论与工程设计的结合，其最终目标是将公共消防工作建立在性能化火灾设计（以火灾风险评估和火灾过程模拟为依据）的基础上。也就是说，根据可燃物分布情况、火灾系统环境情况等有关因素，就能预报火灾发生时财产与人员的损失及火灾的严重程度。如：新建筑尚在设计阶段，就有预报居住者的安全和预估火灾损失程度的能力。火灾系统科学侧重研究火灾科学基础理论与消防安全行政管理的结合，其目标是建立科学合理的火灾安全日常管理体系。火灾防治方案决策侧重研究火

灾科学基础理论、火灾防治技术与经济的结合，其目标是消防安全工程投资方案、火灾扑救方案的决策。

二、建筑防火安全系统的构成

大量事实证明，最常见、最危险、对人类生命和财产造成损失最大的是建筑火灾。人类在同火灾的斗争中发现，一场火灾的燃烧过程被终止有以下三种方式。

(1) 火灾在某一局部生成，但整个环境不具备可充分燃烧的条件，于是火灾自动终止。

(2) 火灾出现并可继续蔓延，此时由人通过一定的消防设备去终止燃烧。

(3) 火灾由于天气的变化（如雨、雪等）被终止。

由此，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，继而就是生产出一些有效的防火与灭火专用的高效能设施。

建筑物的防火性能是房屋设计、建造和使用者十分关心的问题。在建筑设计中考虑防火功能始于19世纪末期。1900年，德国人公布了第一批研究成果，但一直到20世纪四五十年代，由于新工艺学的发展，才使人们有可能在建筑设计中系统地引入防火工程。一般来说，建筑防火设计主要考虑以下三个原则^[3]。

(1) 从设计上保证建筑物内的火灾隐患降到最低点。

(2) 最快地知晓火情，最及时地依靠固定的消防设施自动灭火。

(3) 保证建筑结构具有规定的耐火强度，以利于建筑内的居住者在相应的时间内，有效地安全疏散。

而所谓的建筑防火安全系统，就是根据上述基本原则建立起来的一整套用于防范建筑火灾的建筑设计构造和各类自动与手动设施。

从理论上，又可以将建筑防火安全系统分成主动防火安全系统和被动防火安全系统两大部分。

主动防火安全系统的基本功能是早期发现和扑灭火灾、保障人员安全疏散和减少烟气的伤害。它主要由以下设备组成^[4]。

(1) 消防给水系统。包括消防水池、消火栓和消防水泵等。

(2) 火灾自动报警系统。包括各类火灾探测器和控制器等设备。

(3) 自动灭火系统。包括气体、水、泡沫和水喷雾等多种形式的灭火设备。

(4) 消防电源和安全疏散诱导系统。包括消防电源、应急照明、事故广播和疏散线路指示等设施。

(5) 防、排烟系统。由防、排烟管道，各类阀门，送、排风机等组成。

被动防火安全系统的基本功能包括：①需尽量将火势及烟气蔓延限制在起火居室内，以减少生命及财产损失；②需防止建筑物结构体提前崩塌；③需防止火势蔓延至邻近区域或防止火势从邻近区域延烧过来；④与主动防火系统实现有机的互补。主要技术包括采用阻燃或者难燃材料；采用防火涂料；设置防火分区和防烟分区；划分建筑物耐火等级；使用各种管道孔洞的封堵与防火封堵材料；合理设计安全疏散线路。

三、建筑火灾安全学科的发展^[5-9]

在新型、大型与特殊建筑防火实践中反映出来的问题要求人们更加深入地了解火灾的发生、发展的规律和特点，尤其要求人们能够对火灾的发展过程给出定量的描述。这种重大的社会需求大大推动了火灾科学与消防技术研究的发展。从 20 世纪中叶起，很多发达国家越来越重视依靠科技来防治火灾，许多国家还建立了国家级的火灾防治研究机构，在很多企业和大学中也建立了不同形式的火灾科研组织，大批与火灾防治相关学科领域的科技人员纷纷加入到火灾研究的行列。火灾防治亦逐渐开始了从单纯着眼于火灾扑救向系统探讨火灾机理和规律，并根据科学理论指导火灾防治工作的转变。通过系统而深入的实验研究和理论研究，人们已经取得了大量新成果。

火灾模化技术是定量研究火灾发展规律、发展防灭火新技术的一种新的基本手段，也是火灾安全工程学的重要组成部分。一般说，模化可分为物理模化和数学模化两种基本形式。物理模化指的是通过各种实验来认识火灾规律，包括全尺寸实验、缩小尺寸实验及水力模拟实验等。应该注意到，火灾实验是一种毁坏性实验，许多物品一旦燃烧便完全丧失使用功能，尤其是全尺寸实验，其花费相当大。数学模化则是从流体流动、传热与传质的基本定律出发，建立火灾发展和烟气流动的数学方程，其中有代数方程，也有微分方程，可通过计算机求解一些重要参数在火灾过程中的变化。火灾安全工程学既重视物理模型（即重视火灾模化实验的结果），也重视数学模型（即重视利用计算机进行火灾过程模拟计算的结果）。

从 20 世纪 60 年代起，日本东京理科大学的川越邦雄（Kawagoe）教授等人对单个房间火灾过程进行了系统研究。他们提出了一种简化的室内火灾单层区域模型，自此开创了火灾过程数学模化的先河。此后随着计算机的快速发展，火灾数学模化得到了迅速发展，并可联立求解复杂的微分方程。美国哈佛大学的埃蒙斯（Emonse）教授等在发展火灾过程数学模化方面作出了突出贡献。自 20 世纪 80 年代初起，他领导的研究小组发展了一系列的火灾模型，通称 HARVARD 系列模型，其中有的模型可描述单个房间的火灾发展，有的也可描述多个房间的随时间变化的火灾。此后，其他科研人员也陆续开发出若干独具特色的火灾模型。

火灾过程的计算机模化是根据基本数理定律来定量算出特定火灾的发展过程，因而有助于人们全面、深入地认识火灾的性能。近几十年来，火灾过程的计算机模化一直是火灾科学基础研究的前沿，并逐渐成为定量分析建筑物火灾发展特征的重要工具。

随着 20 世纪高强建筑材料与先进的建筑体系等高新技术高速发展，人们提出“智能化”建筑的概念，并开始关注智能建筑防火系统这样的一些子系统的问题。所谓的智能防火系统就是在建筑中采用一种完全综合的方式控制防火安全系统的各种功能。火势的发展与蔓延、消防队的反应以及安全疏散的状态等都将由相应的传感器来警戒。最初的智能防火系统是 1984 年应用于日本一个叫 Tokyo Dome 的大型棒球馆中。该系统包括红外线火灾扫描仪和水炮，这两种仪器都由计算机锁定，计算机可以计算测量火情的大小并自动决定水枪喷水的多少。之后，人们开始应用视觉纤维传感系统，它是用硬的金属线传播信号给传感器。由于金属线传播的资料有限，尚无法包容整栋建筑的信息。随着信息多媒体技术的发展，人们已经不再满足于只是文字数据和声音的信息传输，人们更渴望看到实时的图

像传输，众多美、欧、日电子生产厂家，纷纷生产出大量的多媒体产品，多媒体信息的传输是未来信息传输的主要发展趋势。人们正在等待更精密的智能防火系统的出现。

2001年9月11日美国世界贸易中心的倒塌是唯一以火灾为主要诱因导致大型建筑倒塌的案例。这使得人们开始注重大型建筑物热-力耦合作用的基础研究。近三年来，中国火灾研究机构的实验室与美国建筑与火灾研究实验室（National Institute of Standard and Technology - Building and Fire Research Laboratory）合作开展了建筑防火设计规范、建筑火灾模拟、结构的火响应以及人员疏散模拟等专题研究，这方面研究仍将是未来火灾基础研究的重点。

经过我国火灾科技工作者的共同努力，火灾科学的研究虽然发展迅速，但仍满足不了社会的要求，需要火灾科研工作者继续深入地开展研究、探索与交流。与此同时，作为多层次和综合性的火灾科研体系，它的研究成果的推广和应用，也需要各方的有效协调。

第三节 本书的主要内容

随着国民经济和城市建设的迅速发展，建筑火灾问题引起人们的广泛关注。目前在我国的建筑防火设计工作中，存在大量的工程问题需要研究解决。目前，防火设计规范主要是由国家有关行政主管部门组织编制的，但火灾科研人员和消防安全工程师有责任对如何发展规范提出意见和建议。国内外许多建筑火灾的经验教训告诉我们，如果在建筑设计中，对建筑防火设计以及运行管理阶段缺乏考虑或者考虑不周密，一旦发生火灾，就会造成严重的伤亡和财产损失。

目前，虽然已经出版许多关于普通建筑火灾安全技术的著作，但是缺少对特殊建筑中火灾规律、消防安全设计进行详细系统介绍的文献。因此，本书结合作者多年的研究成果，主要围绕两类特殊建筑（大空间建筑以及以地铁系统为代表的地下建筑）的防火安全分析和设计展开论述。本书的撰写思路是从火灾动力学基础理论入手，利用相关理论模型研究分析建筑火灾中烟气扩散规律，相应提出对应的防排烟系统设计和运行策略，进而扩展到建筑防火的所有技术措施（包括主动防治和被动防治）。根据前面建筑火灾的特点引出建筑防火设计性能化问题，最后对火灾安全科学研究以及发展性能化设计工作今后的发展进行分析和展望。

第一章简要讨论了当前的建筑火灾的特点以及分类，建筑火灾安全体系的构成、建筑火灾安全学科发展的趋势。指出有关研究机构应当密切关注有关研究进展，积极推进和发展以科学理论指导火灾防治工作的理念。

第二章具体描述了建筑室内火灾的发展阶段特征，不同形式烟气羽流和火焰高度的计算表达式。着火房间的压力的分布，描述单室火灾研究的区域模型和场模型的基本理论。指出对于单室火灾，利用区域模型来估算建筑开口处烟气流率可以为工程的初步设计提供参考。另外，目前性能化防火设计中经常采用的手段是场模型。

第三章重点研究建筑火灾烟气的扩散规律。火灾烟气是危害人们生命安全的主要因素，在此讨论如何根据计算出火灾过程的参数来确定火灾烟气的临界危险状况。对于人员在火灾中的行为特点也做了简要介绍，进而讨论了如何进行人员疏散时间的计算。对于单室内火灾估算烟气层的沉降有利于分析排烟系统的效果。烟气在相邻房间内扩散规律有助

于分析与设计控制烟气扩散途径。本章重点介绍大空间建筑基本概念以及烟气在大空间建筑内的扩散模式。最后介绍地铁车站发生火灾的危害特点，在总结现有的研究成果基础上，综合分析得出地铁车站火灾烟气扩散规律。

第四章介绍了大空间建筑（重点是中庭类建筑和体育场馆）的防排烟设计。基于大空间建筑特点，防排烟系统与普通建筑的消防系统的设计思路有较大区别。比较了自然排烟以及机械排烟两种排烟方式在大空间的应用场合和效果，提出采用性能化防火设计思路。最后介绍了地铁系统防排烟设计的要求和国内外相关的设计规范。

第五章简要阐述了建筑火灾的防治技术，首先介绍被动防治火灾技术，然后从控制火灾发展的角度简要分析了主动消防对策的作用。重点说明了火灾自动报警系统、水喷淋系统和细水雾系统，强调后者是替代卤代烷技术的重要手段，具有广阔的应用前景。

第六章讨论性能化防火设计发展，介绍性能化防火设计概念、国外相关建筑防火规范的比较。讨论人员在火灾中的安全疏散。在性能化防火安全设计中，一般均应以保证人员安全作为建筑防火设计的最主要的目的。

第七章对我国火灾安全科学研究以及发展性能化设计的工作进行了讨论。强调建筑火灾研究结合建筑设计理念的发展，火灾研究要以服务社会为最终目标。考虑到我国人口众多、经济水平和建筑业的发展状况，发展性能化防火设计应当循序渐进。迫切需要建设和完善设计规范和标准，规范从业人员资质，建立合理、有效的评审机制。

此外，本书还在对国内外防火设计规范比较基础上提出了大空间以及地下建筑火灾安全研究的一些看法，希望与业内人士进行讨论，以便通过交流，共同提高认识，为更好地改进我国建筑物的防火设计方法，提高其对火灾的综合防御能力并为最终减少建筑火灾损失作出贡献。

第二章 火灾动力学基础及火灾研究

建筑火灾中最重要的方面是火灾的热释放速率，火灾中的烟气的温度和产烟量与热释放率直接相关。当人们描述火灾有多大时，通常指的是热释放率的大小，在一些火灾预测模型中，热释放率通常作为火灾大小的输入参数。当然也有用火源的尺寸以及火源的周长来描述，但它们在火灾模型中描述火灾大小时都不及热释放率有更高的接受度。火灾大小的确定是防排烟系统设计的关键。本章将就有关火灾的大小以及火灾的蔓延的基本知识进行介绍，以对火灾有更深入的了解。

设计火灾可以是稳态火灾也可以是非稳态火灾，稳态火灾在现实中是不存在的，但使用稳态火灾作为设计火灾可以得到相对保守的设计，同时会大大简化设计分析。

第一节 室内火灾发展的基本过程

一、火灾发展的阶段描述^[1,2]

室内火灾通常用火灾的发展阶段来描述。一般整个火灾过程大体上可以概括为起火阶段（ignition）、增长阶段（growth）、轰燃阶段（flashover）、充分发展阶段（fully - developed）和衰退阶段（decay）。火灾的发展阶段的划分在讨论分析火灾时非常重要，但由于燃料燃尽或者是灭火系统动作，许多火灾并不能经历所有的火灾发展阶段。

1. 起火阶段

起火过程可以认为是一个温度快速增加的放热反应过程。它可以通过引燃或自燃发生，伴随的燃烧过程可以有焰燃烧或阴燃。一般防排烟系统的设计只关心起火后火灾发展的情况，对起火的原因并不关心。

2. 增长阶段

火灾发生后，火势以较慢或较快的速度增长，增长的速度取决于燃烧的类型、燃料的类型、周围的环境状况以及是否有足够的氧气供给。如果发生的是阴燃火灾，则可能会产生大量的有毒气体，但其释放的能量相对比较低，这种火灾的增长阶段可能非常长，也可能由于通风不足而逐渐熄灭。但如果发生的是有焰燃烧时，则火灾的增长过程可能会非常快，初始燃烧所释放的热流足以引燃相邻的燃烧物，如果燃烧物充足且通风良好，火灾将迅速增大，起火房间内的温度也随之迅速上升。通风充足条件下发生的燃烧称为燃料控制的燃烧。

3. 轰燃阶段

当起火房间温度达到一定值时，室内所有的可燃物都可发生燃烧，这种现象通常称为轰燃。轰燃是火灾从成长阶段到充分发展阶段的过渡，它标志着火灾充分发展阶段的开始。此后室内温度可升高到 1000℃ 以上。火焰和高温烟气能够从房间的门、窗窜出，致使

火灾蔓延到其他区域。在轰燃之前还没有从建筑物中逃出的人员将会有生命危险。

确定发生轰燃的临界条件对火灾防治具有重要的意义。目前，判断轰燃是否发生的临界条件主要包括：着火房间内的烟气层的温度是否达到 $500 \sim 600^{\circ}\text{C}$ ；或着火房间的地板所接受到的辐射热通量是否达到 $15 \sim 20\text{kW}/\text{m}^2$ ；或着火房间的开口处是否有火焰喷出。影响轰燃发生的主要因素包括燃烧物的种类，燃烧物的方位、位置，着火房间的几何结构，房间的顶部状况等。当然，目前有关轰燃的判定条件仍存在许多争论，相关的研究也在不断地进行中，读者有兴趣自己可以去查阅相关的最新研究成果^[3,4]。

4. 充分发展阶段

在充分发展阶段，火灾中释放的能量达到某一最大值，同时室内温度也升至某一最大值，通常可达 $700 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 。在中小规模的着火房间，该阶段的释热量取决于房间的通风状况，此时的燃烧为通风控制的燃烧。与氧气充足时发生的燃烧相比，通风控制的燃烧中可能会产生更多的挥发性气体，由于进入室内的空气量不足以支持充分燃烧，这些未燃的气体积聚于室内的上部空间，当其从开口处流出时，遇到新鲜的空气则会发生燃烧，使得开口处有火焰窜出。对于非常大的房间而言，通风控制的燃烧可能从来都不会发生。充分发展阶段的火灾通常的表现表现为不充分的燃烧和高的 CO 产生量。

5. 减弱阶段

随着可燃物的消耗，火灾的燃烧强度逐渐减弱，释热量和房间的温度逐渐降低，在该阶段内，燃烧从通风控制的燃烧逐渐转变为燃料控制的燃烧。

在消防安全工程中，将火灾的发展阶段简单地分为轰燃前阶段（pre-flashover）和轰燃后阶段（post-flashover）。轰燃通常被用作区分轰燃前阶段和轰燃后阶段的分界点。将火灾控制或扑灭在初期增长阶段即轰燃前阶段是减少火灾损失最有效的途径。在轰燃前阶段，消防安全的重点在于人员安全，此时火灾负荷通常用热释放率曲线来表示。为了有针对性地采取防治措施，应当清楚地了解火灾的早期特征。在轰燃后阶段，消防安全的目标在于确保建筑结构的稳定性以及消防人员的安全，一般给出的火灾负荷为温度随时间的变化曲线，此时了解充分发展阶段火场温度随时间的变化至关重要。

着火区的平均温度是反映火灾燃烧状况的重要参数。一般用着火区温度随时间的变化来表示上述这几个阶段，图 2-1 给出了一个火灾曲线示例。

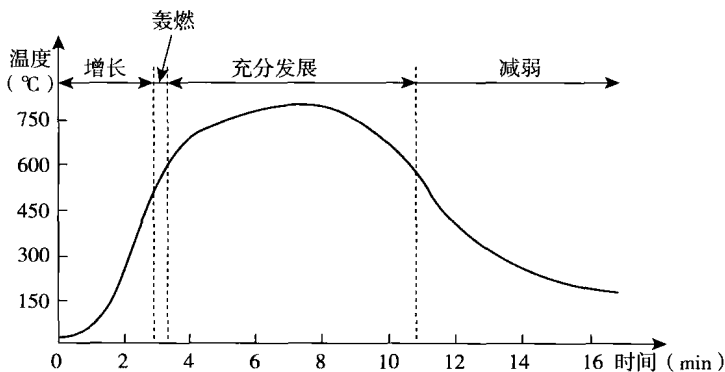


图 2-1 室内火灾的发展过程

以上描述的是火灾的自然发展过程。实际上人们是不会听任火灾自由发展的，总会采取各种可行的措施来控制或扑灭火灾。不同的措施可以在火灾的不同阶段发挥作用。例如，在火灾早期，启动喷水灭火装置可以有效控制温度的升高，使得室内不能发生轰燃，并且火灾也会较快地被熄灭。图 2-2 给出了喷水灭火情况下的着火房间温度变化示意图。

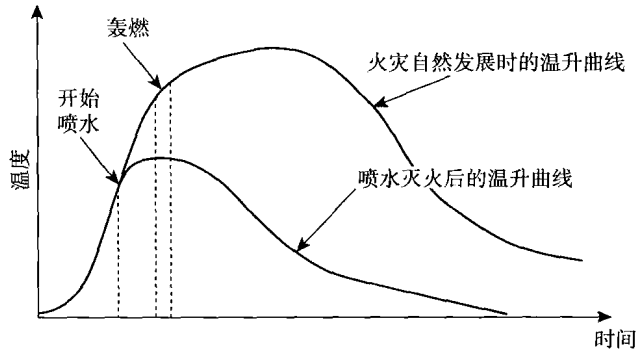


图 2-2 启动喷水灭火系统后对火灾过程的影响

将火灾控制或扑灭在初期增长阶段是减少火灾损失最有效的途径。为了有针对性地采取防治措施，应当清楚地了解火灾的早期特征。同时，了解火灾的早期特征对于组织人员安全疏散也具有重要意义。

二、影响室内火灾发展的因素

影响室内火灾发展的主要因素可以分为两大类：与建筑结构有关的因素；与可燃物有关的因素。这些因素主要包括：

- (1) 引火源的位置和尺寸；
- (2) 燃烧物的类型、数量、位置、间距、方位以及表面积；
- (3) 着火房间的几何结构；
- (4) 着火房间开口的位置和尺寸；
- (5) 着火房间围护结构的材料特性。

三、建筑火灾热释放率的设定^[5]

在设计建筑或者分析现有建筑火灾安全状况时，建筑物内可能发生火灾的热释放率是决定火灾发展以及火灾危害的主要参数，也是采取消防对策的重要依据。由于这些建筑物内没有发生火灾，所以释放热量状况是人们根据火灾燃烧的认识尤其是对可燃物特性的认识假定。因此，热释放率假定越合理，所用的消防实施的有效性和经济性越好。这项工作称为设定火灾功率或者火源场景设定 (Design Fire)。

根据前面的分析过程，火灾初期的热释放率是控制火灾的主要关心问题之一。根据目前试验的多种物品的热释放速率曲线可见，从起火到充分燃烧阶段，热释放速率大体按指数规律增长。Heskestad 提出利用二次方程描述，其模型示意图见图 2-3。图中 α 为火灾增长系数 (kW/s^2)， t 为点火后的时间 (s)， t_0 为开始有效燃烧所需要的时间。在不考虑