

FPY

消防科技书

防排烟工程

赵国凌 编著



天津科技翻译出版公司

防排烟工程

赵国凌 编著

责任编辑 郑凤钦 赵丽琴

* * *

天津科技翻译出版公司出版
(天津市河西区吴家窑大街22号)

中国人民解放军第4236工厂印刷

* * *

开本787×1092 1/16 27 印张 600千字

1991年8月第1版 1991年8月第1次印刷

印数 1—5000

* * *

ISBN7—5433—0205—5/TB·9

定价: 11.00 元

内 容 提 要

本书是目前国内第一本有关防排烟工程方面的专著。

本书紧紧围绕防排烟工程原理与设计,系统地阐述了火灾烟气的性质、防排烟工程基本知识、防排烟基本原理、理论计算和工程设计,其中对正压送风防烟系统的设计计算作了较为详尽的介绍。还介绍了防排烟设备及附件、防排烟工程测试技术及验收试验等。全书分为八章,有插图 270 多幅。

本书可供从事建筑工程设计的技术人员、建筑工程施工的技术管理人员、公安消防部门和现代建筑使用单位的消防管理人员学习参考,也可作为建筑工程院校有关专业的教科书、教学参考书。

前 言

国内外大量火灾实例统计数字表明，因火灾而伤亡者中，大多数为烟害所致。因此，近二、三十年来，建筑物发生火灾时的防烟排烟问题已成为各国建筑设计和消防部门科技工作者所关注的问题，因而进行了大量的试验研究活动。建筑的防排烟工程已作为一个新的学科成为通风工程的一个分支而问世。

我国现代消防工程起步较晚，防排烟工程则更晚。1987年夏，我们在为武警技术学院消防工程系“建筑防火”和“灭火工程”两个专业所编写的必修课《暖通与防排烟工程》教材初稿征求意见过程中，不少同行专家建议把其中有关防排烟工程的部分提炼出来，加以充实提高，作为科技书尽快出版，以满足社会各方面的需要。为此，经过三年左右的努力，终于完成了这本书。

本书由武警学院学术研究室副教授刘万臣同志审订。在初稿的编写过程中，曾得到武警学院吴铭泉、朱吕通同志、广东省公安厅消防处赖雄林同志以及上海市公安局消防处胡海泉同志的支持和帮助。在后来的改编过程中，有关全书的章节安排曾由武警学院副院长吴建勋教授审定，还有武警学院消防工程系孙庭立、周永年以及暖通防排烟教研室的许多同志都提出不少宝贵意见，在此一一表示感谢。

由于编者本人水平所限，书中错误及不足之处在所难免，谨请广大读者批评指正。

编者 1991. 3

绪 论

随着我国现代化建设的飞速发展,高层建筑在北京、广州、上海以及全国一些大中城市象雨后春笋一样地勃起,地下建筑工程也正在兴建。我国城市建筑正在朝大型化、高层化、多功能化的方向发展。在这样的建筑中,火灾所带来的危害和严重后果是以往那种小型、低层、单一化的建筑根本无法相比的。为了确保国家和人民的财产与生命安全,建筑防火设计已成为建筑设计中不可分割的有机组成部分,而建筑防火审查又是建筑工程审批过程中的重要一环。这是国家赋予消防部门的神圣职责。在建筑防火设计和审查中,防排烟工程的设计和审查具有非常重要的意义。

国内外大量火灾实例统计数字表明,因火灾而伤亡者中,大多数是烟害所致。火灾中受烟害直接致死的约占 $1/3 \sim 2/3$,因火烧死的约占 $1/3 \sim 1/2$,而且火烧死中也是多数先受烟毒晕倒而后烧死。这足以说明火灾产生的烟气危害性是何等严重。

火灾烟气的危害性主要表现在毒害性、减光性和恐怖性三方面。火灾烟气的毒害性首先是使受灾人员或扑救人员直接中毒或窒息死亡,其次是使受灾人员或扑救人员因缺氧或一氧化碳中毒晕倒后而被火烧死。火灾烟气的减光性和恐怖性的危害在于妨碍疏散和扑救,造成火场混乱,给疏散和扑救带来很大困难。在高层建筑中,由于烟囱效应作用的影响,在地下建筑中,由于火灾产生的烟气浓黑、温度高,危害性比一般建筑更加严重。近二、三十年来,防烟排烟的问题已成为各国建筑设计和消防工作者所关注的问题,为此进行了大量的试验研究活动。建筑的防排烟设计已成为通风工程的一个分支而问世,也可称之为建筑物发生火灾条件下的通风工程,即防排烟工程。

防排烟工程的重要地位和作用在于:

首先,防排烟工程设计已成为建筑防火设计的一个重要组成部分。在建筑的防排烟设计中将从工程上解决下述一系列问题,即如何使火灾时烟气少产生甚至不产生;如何使火灾烟气控制在火灾发源地而不蔓延扩散出去;如何使火灾烟气迅速地最大限度地排除到安全的地方;如何在疏散通道上保证实现防烟安全区。

其次,防排烟工程设施为安全疏散提供了前提条件。人员的安全疏散是发生火灾后的首要任务。防排烟工程设施可以减少火灾烟气的毒性,降低烟气温度,保证人们的视距,使受灾人员有足够的时间和基本的活动能力逃离火场。

第三,烟气控制为消防人员的扑救活动创造了条件。消防人员在火场作业中,同样需要时间和基本的活动能力,因此借助防排烟工程设施,进一步减小烟气的毒性,降低烟气温度,维持一定的视距,以保证灭火战斗的顺利进行。

火灾时,防止烟气的大量产生和迅速蔓延对确保疏散安全、改善扑救条件是至关重要的。火灾时防止烟气的产生和蔓延可从三个方面着手。第一是杜绝烟源,即考虑建筑物和家具的非燃化。所谓非燃化是指建筑材料和室内家具、装修材料等尽量采用非燃烧材料或难以燃烧的材料制成,室内的书籍、衣物等也采用壁柜或钢制橱柜装放,从而把火灾烟气的生成量降低到最小限度。第二是扼杀烟源,就是在建筑物一旦起火时,能迅速而有效地投入防排烟设施,断绝起火房间内新鲜空气的供给,使火熄灭,把火灾扼杀在初始阶段。第三是切断烟源,就是在建筑物某房间一旦起火时,迅速且有效地切断着火区域和非着火区域的一切联

系，从而确保疏散通道的安全。切断烟源的具体措施很多，如对建筑物平面划分防烟分区，在各防烟分区之间设置防火防烟门等；对通风空调等管道的材料和管道穿墙处的结构采取防烟措施，管道采用非燃烧材料制作，保温材料采用非燃烧材料或难燃烧材料，在垂直管道和水平管道的交接处设置防火阀，在管道穿越防火墙或防火分区楼板的空隙四周应用非燃烧材料填塞严密等。

尽管采取了一系列防止烟气产生和蔓延的措施，一旦起火，由于种种原因，浓烟仍能大量产生并迅速蔓延开来。所以，起火后，应迅速排除火场烟气，这是防止烟气蔓延扩散的积极措施。换句话说，在积极防烟的同时，还应积极排烟。防烟和排烟是不可分割的两个环节，缺一不可。只有防排并重，防排结合，才能取得良好的效果。

综上所述，防排烟工程设计的根本目的任务在于：如何最大限度地减少火灾时烟气的生成量；如何使火灾时产生的烟气迅速排除，从而有效地防止烟气从着火区向非着火区蔓延扩散，特别是防止烟气侵入作为疏散通道的走廊，楼梯间及其前室，以确保有一个安全的疏散通道和安全疏散所需的时间。

我国的现代消防工程起步较晚，防排烟工程更是刚刚起步。已建成的相当一部分高层建筑没有防排烟工程设施，或者很简单，很不完善；正在兴建的高层建筑也还没有一个较成熟的防排烟设计方案；地下建筑的防排烟问题虽已提到议事日程上来，但没有很好地解决；有关防排烟的试验数据更是一个空白。形势逼人，刻不容缓。我们从事防排烟工程设计、研究、审查的技术人员应奋起直追，结合我国的具体情况，研究制定出适合我国国情的防排烟工程的蓝图，为消防事业贡献自己的智慧和力量。

目 录

绪论	
第一章 火灾烟气的生成和性质	(1)
第一节 火灾烟气的形成和组成	(1)
第二节 火灾烟气的危害性	(3)
第三节 火灾烟气的基本状态参数	(7)
第四节 火灾烟气的浓度	(10)
第五节 着火房间的烟气温度工况	(15)
第二章 防排烟工程基本知识	(24)
第一节 烟气扩散与控制区域划分	(24)
第二节 防排烟的方式	(28)
第三节 自然排烟	(34)
第四节 负压机械排烟	(40)
第五节 正压送风防烟	(45)
第六节 全面通风排烟	(51)
第七节 排 烟 口	(54)
第八节 送风口与进风口	(62)
第三章 防排烟计算理论基础	(67)
第一节 通过开口的流量计算	(67)
第二节 排烟中性层理论	(71)
第三节 烟 囱 效 应	(80)
第四节 风 压 作 用	(88)
第五节 燃烧特性与火灾烟气生成量的计算	(99)
第六节 发烟特性与火灾烟气光学浓度的计算	(112)
第七节 火灾烟气的扩散流动计算	(120)
第八节 全面通风排烟微分方程式	(130)
第九节 吹吸气流流动特性和空气幕的计算	(137)
第四章 正压送风防烟系统的设计计算	(149)
第一节 正压送风防烟系统的构成和分类	(149)
第二节 气流通路的基本形式	(150)
第三节 气流通路的计算	(155)
第四节 正压送风系统送风量计算的基本方法	(161)
第五节 正压 防烟楼梯间的送风量计算	(166)
第六节 正压送风系统送风量计算方法综述	(179)
第七节 正压送风防烟系统设计中的几个问题	(186)
第八节 正压防烟楼梯间加压送风的简易算法	(195)

综 合 例 题.....	(206)
第五章 防排烟系统的管路计算	(212)
第一节 流动阻力及其形式.....	(212)
第二节 摩擦阻力的计算.....	(216)
第三节 局部阻力的计算.....	(222)
第四节 管路计算.....	(237)
第五节 管路的压力分布.....	(241)
第六节 管道设计的基本要求和主要技术问题.....	(248)
第六章 防排烟工程设计	(255)
第一节 建筑物地上部分防排烟工程设计基本要求.....	(255)
第二节 房间、堂馆的防排烟设计.....	(257)
第三节 走廊的防排烟设计.....	(260)
第四节 楼梯间及其前室的防排烟设计.....	(263)
第五节 高层建筑的防排烟设计.....	(269)
第六节 地下建筑的防排烟设计.....	(280)
第七节 借用服务电梯井作送风竖井的正压防烟楼梯间的设计探讨.....	(287)
第八节 空气幕在防排烟工程上的应用.....	(297)
第七章 防排烟设备及附件	(305)
第一节 风 机.....	(305)
第二节 管 道.....	(320)
第三节 气体的进出口.....	(327)
第四节 阀 门.....	(339)
第五节 防火隔烟装置.....	(347)
第六节 移动式防烟排烟装置.....	(356)
综 合 例 题.....	(358)
第八章 防排烟工程测试技术	(361)
第一节 烟风温度的测量.....	(361)
第二节 烟风压力的测量.....	(365)
第三节 烟风流速和流量的测量.....	(373)
第四节 防火阀的密封性能试验.....	(381)
第五节 防排烟工程验收试验.....	(385)
第六节 建筑物防排烟热态试验.....	(393)
第七节 相似模型试验技术.....	(396)
参 考 文 献.....	(409)
附 录.....	(410)
(1) 全国一些城市的大气压力.....	(410)
(2) 通风管道统一规格.....	(412)
(3) 离心式通风机性能表.....	(414)

第一章 火灾烟气的生成和性质

通常所说烟气是指燃烧过程的一种产物。凡可燃物质，无论是固态、液态或气态物质燃烧时，都会产生烟气。

可燃物与氧化剂作用发生的放热反应称为燃烧，燃烧反应通常伴有火焰、发光和发烟现象。在物质燃烧过程中往往还伴随着热分解反应（简称热解）。热解是物质由于温度升高而发生无氧化作用的不可逆化学分解。在一定的温度之下，燃烧反应的速度并不快，但热分解的速度却很快。这种热分解反应没有火焰和发光现象，但却有发烟现象。热分解出来的产物往往和燃烧产物掺混在一起，我们很难把这两种产物截然分开。

建筑发生火灾的过程正是建筑构件、室内置放的物品、家具、装修材料等热解和燃烧的过程，火灾烟气则是发生火灾过程中因热解和燃烧作用而形成的一种产物。

第一节 火灾烟气的形成和组成

由燃烧或热解作用所产生的悬浮在气相中的可见的固体和液体微粒称为烟或烟粒子，含有烟粒子的气体称为烟气。火灾过程所产生的烟气叫做火灾烟气。所以，火灾烟气是火灾时所生成的气体和悬浮在其中的烟粒子的总称。由此可以得出，烟气是燃烧和热解产物的混合物。

烟气的成分和性质首先取决于发生热解和燃烧的物质本身的化学组成，其次还与燃烧条件有关。所谓燃烧条件是指环境的供热条件、环境的空间时间条件和供氧条件。

对于正常的燃烧工况，例如在各种经过专门设计制造的燃烧设备（锅炉、工业窑炉、反应器、发动机等）中所进行的燃烧，燃烧条件得到良好的保证，燃烧一般进行得比较完全，所生成的气体都不能再燃烧，这种燃烧称为完全燃烧，其燃烧产物称为完全燃烧产物。但是在专门设计制造的燃烧设备中也有非正常燃烧工况发生，如在燃料质量低劣或负荷急剧波动的情况下。尽管如此，就其主体部分来看，还是完全燃烧的。

对于非正常的燃烧工况，如在专门燃烧设备的事故工况和建筑物的火灾情况下。这些燃烧工况是人们所不希望和预料之外的，不可能有良好的燃烧条件，燃烧进行得很不完全，称为不完全燃烧，相应的燃烧产物称为不完全燃烧产物。

由于火灾时参与燃烧的物质比较复杂，尤其是发生火灾的环境条件千差万别，所以火灾烟气的组成相当复杂。不过，就总体而言，火灾烟气由热解和燃烧所生成的气（汽）体、悬浮微粒及剩余空气三部分组成。

一、热解和燃烧所生成的气（汽）体

大部分可燃物质都属于有机化合物，其主要成分是碳（C）、氢（H）、氧（O）、硫（S）、磷（P）、氮（N）等元素。在一般温度条件下，氮在燃烧过程中不参与化学反应而呈游离状态析出，而氧作为氧化剂在燃烧过程中消耗掉了。碳、氢、硫、磷等元素则与氧化合生成相应的氧化物，即二氧化碳（ CO_2 ）、一氧化碳（CO）、水蒸气（ H_2O ）、二氧化硫（ SO_2 ）和五氧化二磷（ P_2O_5 ）等。此外，还有少量氢气和碳氢化合物产生。

旧式的建筑结构中，木材是主要的可燃物质。但在近代建筑中，除了一些室内家具和门窗采用木质材料外，其余大量的装修、家具和用品，则采用高分子合成材料，如塑料贴面、

钙塑板吊顶、聚苯乙烯泡沫塑料保温材料、尼龙地毯、环氧树脂绝缘层、化纤制的家具、沙发和床上用品等等。这些高分子合成材料的燃烧和热解产物比单一的木质材料要复杂得多。近年来，国外有些专家从火灾现场和燃烧实验所获得的烟气试样中分析发现，火灾烟气中有一组叫做游离基的中间气态物质。这种游离基是在有机物热分解和不完全燃烧情况下产生的，有些物质甚至在水的沸点（100℃）温度下就开始分解出游离基，游离基的浓度可达CO的三倍之多。有时，在火灾扑灭之后，游离基的浓度能在十几分钟内保持不变。

火灾在发生、发展和熄灭各阶段中所生成的气体是不同的。日本在1962年和1975年先后两次进行的实体火灾实验所得到的着火房间内的气体成分如图1-1所示。显而易见，在爆燃的最盛期，CO的浓度可达到5%以上。但是在爆燃之前，CO的浓度几乎少到可以忽略不计。相应的O₂在爆燃最盛期只有3%左右，但在爆燃之前，O₂的浓度一直保持在20~21%左右。CO的出现、增长总是伴随着O₂的减少而发生的，而且O₂的下降总是先行的。

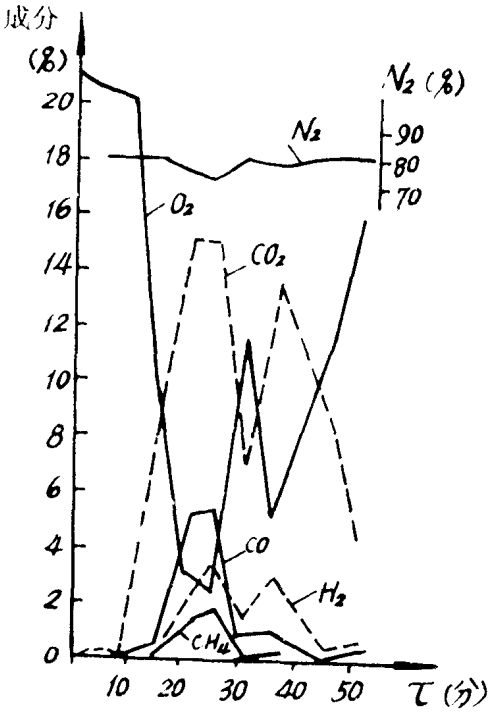
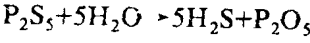


图1-1 着火房间内气体成分变化曲线

在火灾扑救过程中，由于采取不同的措施和灭火剂，也相应产生一些不同的气体。一般情况下采用水流扑救时，只产生大量的水蒸气。但如果燃烧物质本身与灭火剂能起化学反应时，就会产生一些其它有害物质，如H₂S等，严重时会造成扑救人员中毒伤亡事故，这在历史上是有沉痛教训的。1961年我国某市铁路货场发生一起重大火灾事故，消防人员采用大水流扑救，结果引起爆燃，烟雾更浓，火势更猛，中毒人员达110余人。事后查清，原来是堆放的五硫化二磷长期堆积自燃，在遇水时迅速吸潮分解产生剧毒的气体H₂S所致，即



二、热解和燃烧所生成的悬浮微粒

烟气中飘流的热解和燃烧所生成的悬浮微粒，习惯上称为烟粒子。这些微粒通常有游离碳（炭黑）、焦油类粒子和高沸点物质的凝缩液滴等。这些固态或液态的微粒，悬浮在气相中，随其飘流。

火灾烟气中悬浮微粒的直径一般为0.01~10μm，有的也可达到几十μm。由于烟粒子的性质不同，所以在火灾发展的不同阶段，烟气的颜色亦不同。在起火之前的阴燃阶段，由

于干馏热分解，主要产生的是一些高沸点物质的凝缩液滴粒子，烟色常呈白色或青白色；而在起火阶段，主要产生的是炭黑粒子，使烟色呈黑色，形成滚滚黑烟。

三、剩余空气

在燃烧过程中，没有参与燃烧反应的空气称为剩余空气或过剩空气。如果把理论上单位质量物质完全燃烧时所必需的空气量称为理论空气量 V_0 ，那么，燃烧时所供给的实际空气量 V 与理论空气量 V_0 之比，则称为剩余空气率或过量空气系数 α ，即

$$\alpha = \frac{V}{V_0} \quad (1-1)$$

显然，当 $\alpha > 1$ 时，空气过剩，而 $\alpha < 1$ 时，空气不足。

实际上，参与燃烧的那部分空气中，消耗掉的仅仅是氧气，氮气并不能助燃，且在一般温度条件下也不会与氧气发生反应，因而氮气以游离状态分离出来而掺混到燃烧的气态产物中去。这部分氮气不应看作是剩余空气的组成部分，而应看作燃烧生成气体的一部分。所以，这里所说的剩余空气是指仍然保持大气中的空气组成的空气。

着火房间中的燃烧过程往往是在氧气不足的情况下进行的。如果由于某种因素而改善其供氧条件，火势就会扩大。所以，在扑救活动中，控制供氧甚至隔绝氧气是经常采用的措施。这就是说，着火房间内产生的烟气在一般情况下并没有剩余空气。但是，一旦门窗玻璃破碎或房门打开，大量空气涌进着火房间时，就会存在剩余空气。

应当指出，当着火房间内烟气窜出房门流到走廊或其它没有发生火灾的房间时，将很快与周围的空气混合，成为烟气与空气的混合气体，这部分空气不应看作火灾烟气生成过程中的剩余空气。

第二节 火灾烟气的危害性

火灾烟气会造成严重危害，其危害性主要有毒害性、减光性和恐怖性。火灾烟气的危害性可概括为对人们生理上的危害和心理上的危害两方面，烟气的毒害性和减光性是生理上的危害，而恐怖性则是心理上的危害。

一、火灾烟气的毒害性

火灾烟气的毒害性具体表现在四个方面。

首先，烟气中含氧量往往低于人们生理正常所需要的数值。当空气中含氧量降低到 15% 时，人的肌肉活动能力下降；降到 10~14% 时，人就四肢无力，智力混乱，辨不清方向；降到 6~10% 时，人就会晕倒。所以，对于处在着火房间内的人们来说， O_2 的短时致死浓度为 6%。这就是说，当着火房间内气体中的含氧浓度低于 6% 时，在短小时内人们将因缺氧而窒息死亡。即使含氧量在 6~14% 之间，虽然不会短时死亡，但也会因失去活动能力和智力下降而不能逃离火场最终被火烧死。在实际的着火房间中 O_2 的最低浓度可达到 3% 左右，可见，在发生火灾时，人们要是不及时逃离火场是很危险的。

其次，烟气中含有各种有毒气体，而且这些气体的含量已超过了人们生理正常所允许的最低浓度，造成人们中毒死亡。火灾时各种可燃物质燃烧生成的有毒气体的种类、毒性、人们生理正常所允许的浓度和火灾时疏散条件浓度如表 1-1、1-2 列示。

表 1-1 各种可燃物质燃烧时生成的有毒气体

物 质 名 称	燃 烧 时 产 生 的 主 要 有 毒 气 体
木材, 纸张	二氧化碳、一氧化碳 (CO ₂) (CO)
棉花, 人造纤维	二氧化碳、一氧化碳 (CO ₂) (CO)
羊 毛	二氧化碳、一氧化碳、硫化氢、氨、氰化氢 (CO ₂) (CO) (H ₂ S) (NH ₃) (HCN)
聚四氟乙烯	二氧化碳、一氧化碳 (CO ₂) (CO)
聚苯乙烯	苯、甲苯、二氧化碳、一氧化碳、乙醛 (<chem>c1ccccc1</chem>) (<chem>c1ccccc1C</chem>) (CO ₂) (CO) (CH ₃ CHO)
聚氯乙烯	二氧化碳、一氧化碳、氯化氢、光气、氯气 (CO ₂) (CO) (HCl) (COCl ₂) (Cl ₂)
尼 龙	二氧化碳、一氧化碳、氨、氰化物、乙醛 (CO ₂) (CO) (NH ₃) (XCN) (CO ₂ CHO)
酚 树 脂	一氧化碳、氨、氰化物 (CO) (NH ₃) (XCN)
三聚氢胺—醛树脂	一氧化碳、氨、氰化物 (CO) (NH ₃) (XCN)
环氧树脂	二氧化碳、一氧化碳、丙醛 (CO ₂) (CO) (<chem>CC=O</chem>)

表 1-2 各种有毒气体的毒性及其许可浓度

毒 性 分 类	气 体 名 称	长期允许浓度	火灾疏散条件浓度
单纯窒息性	缺 O ₂	/	<14%
	CO ₂	5000	3%
化学窒息性	CO	50	2000
	HCN	10	200
	H ₂ S	10	1000
粘膜刺激性	HCl	5	3000
	NH ₃	50	/
	Cl ₂	1	/
	COCl ₂	0.1	25

注: 表中未注明浓度单位为 PPM.

对火灾烟气中烟和毒性气体开展研究已成为当今世界消防科学研究的重要课题。美国毒物学家洛理博士发现，火灾烟气中所存在的游离基中间气态物质，其危害性比 CO 还要大。人或动物吸入游离基，肺部将发生游离基反应，肺表面迅速扩张从而降低肺的吸氧功能，导致缺氧。火灾受害者的游离基反应将持续至少两个星期，长者可达两个月左右。

近年来，随着高分子合成材料在建筑、装修以及家具制造中的广泛应用，火灾所生成的毒性气体的危害更加严重。1981 年 2 月，爱尔兰首都某舞厅发生火灾，由于室内装修材料、沙发、泡沫座垫等物品迅速燃烧产生大量毒性气体，造成 44 人当场死亡。1982 年我国民航客机“202”着火事故中，由于客舱中高分子装修材料和座椅燃烧，产生大量毒气，使 58 名旅客中有 25 名丧生，死者衣冠整齐，肤体完好。据新华社报道，1990 年 1 月 14 日凌晨，西班牙东北部名城萨拉戈萨的一家迪斯科舞厅发生火灾，当时该舞厅中有 100 多人，等到大火扑灭后，发现有 43 人当场死亡，其中大多数都是坐在凳子上死去的，他们似乎来不及作出反应就稀里糊涂地死去了，据专家们分析，推测是大火引燃了舞厅中的某些塑料制品，释放出一种有毒的氢氰酸气体，从而导致那么多人立即死亡。这些火灾案例足以说明毒性气体的严重危害。

第三，烟气中的悬浮微粒也是有害的。危害最大的是颗粒直径小于 $10\mu\text{m}$ 的飘尘，它们肉眼看不见，能长期飘浮在大气中，少则数小时，长则数年。粒径小于 $5\mu\text{m}$ 的飘尘，由于气体扩散作用，能进入人体肺部粘附并聚集在肺泡壁上，可随血液送至全身，引起呼吸道病和增大心脏病死亡率，这是飘尘的直接危害。另一方面，当大气中的飘尘的浓度达到一定程度时，由于微粒对太阳紫外线的遮蔽作用，将使紫外线辐射强度降低。如当大气中的飘尘浓度达到 $1.1\text{mg}/\text{m}^3$ 时，地面太阳紫外线辐射强度将降低 5%，易使儿童患软骨病，使老年人呼吸道系统及心血管病患者病情恶化。当然，火灾时所产生的这种飘尘毕竟是有限的，飘尘的主要来源是成年累月的工业排放。

第四，火灾烟气具有较高的温度，这对人们也是一个很大的危害。在着火房间内，烟气温度可高达数百度，在地下建筑中，火灾烟气温度可高达一千度以上。

人们对高温烟气的忍耐性是有限的。在 65°C 时，可短时忍受；在 120°C 时，15 分钟内就将产生不可恢复的损伤；烟气温度进一步提高，损伤时间更短， 140°C 时约为 5 分钟， 170°C 时约为 1 分钟；而在几百度的高温烟气中是一分钟也无法忍受的。

为了研究火灾时生成的烟和毒性气体对人体的危害，美国 Hraland 教授曾对 110 名火灾遇难者尸体进行生理解剖发现，死者的呼吸道中有大量烟灰，有一半死者的血液中 CO 达到致死浓度，一些死者体内含有氰化氢等毒性气体。

综上所述，火灾生成烟气的毒性可归纳为八个字，即缺氧、毒害、尘害、高温。烟气的毒害性则是发生火灾时引起大量人员伤亡的重要因素。早在本世纪三十年代，人们就开始认识这一点，半个世纪以来，大量的试验研究和火灾实例也证明了这一结论。

表 1-3、1-4 分别为日本和英国两个国家有关火灾死亡原因的部分统计。由表可见，因中毒和火烧死亡率达 90% 以上，其中中毒死亡和火烧死亡的百分率几乎相当。实际上，火烧死亡者中大多数是先中毒晕倒后再被火烧死的。这里列举的仅仅是日英两国的部分统计分析，但它具有代表性，这些数字充分说明火灾烟气毒害的严重性。

表 1-3 日本火灾死亡原因统计表

年别	死亡人数 与百分比	中 毒	火 烧	其 它	合 计
1968	人 数 (人)	685	346	35	1066
	百分比 (%)	64.3	32.4	3.3	100
1969	人 数 (人)	793	372	43	1208
	百分比 (%)	65.6	30.8	3.6	100
1970	人 数 (人)	785	541	124	1450
	百分比 (%)	54.1	37.3	8.6	100
1971	人 数 (人)	654	521	88	1263
	百分比 (%)	51.7	41.3	7.0	100
1972	人 数 (人)	625	790	56	1471
	百分比 (%)	42.5	53.7	3.8	100
1973	人 数 (人)	684	866	36	1586
	百分比 (%)	43.1	54.6	2.3	100
1974	人 数 (人)	465	787	71	1323
	百分比 (%)	35.1	59.5	5.4	100
1975	人 数 (人)	517	713	70	1300
	百分比 (%)	39.8	54.8	5.4	100
历年平均	人 数 (人)	651	617	65	1333
	百分比 (%)	48.8	46.3	4.9	100

表 1-4 英国火灾死亡原因统计表

年别	死亡人数 与百分比	中 毒	火 烧	其 它	合 计
1962	人 数 (人)	150	480	37	667
	百分比 (%)	22.5	72	5.5	100
1967	人 数 (人)	382	322	75	779
	百分比 (%)	49.1	41.3	9.6	100
1970	人 数 (人)	425	358	56	839
	百分比 (%)	50.6	42.7	6.7	100
1972	人 数 (人)	502	459	117	1078
	百分比 (%)	46.6	42.6	10.8	100
四年平均	人 数 (人)	365	405	71	841
	百分比 (%)	43.4	48.2	8.4	100

二、火灾烟气的减光性

可见光波长为 $\lambda = 0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ ，一般火灾烟气中烟粒子粒径 d 为几 μm 到几十 μm ，即 $d > 2\lambda$ ，这些烟粒子对可见光是不透明的，即对可见光有完全的遮蔽作用。当烟气弥漫时，可见光因受到烟粒子的遮蔽而大大减弱，能见度大大降低，这就是烟气的减光性。同时，加上烟气中的有些气体对人的肉眼有极大的刺激性，如 HCl 、 NH_3 、 HF 、 SO_2 、 Cl_2 等等，使人睁不开眼，从而使人们在疏散过程中的行进速度大大降低。

普通人的视力所能达到的范围称为能见距离或视程。当发生火灾时，疏散通道上的能见距离在整个疏散过程中都应给予保障，这个保证安全疏散的最小能见距离称为极限视程 (D) ， (D) 决定于人们对建筑物的熟悉程度，即

熟悉者 $(D) = 5\text{m}$

不熟悉者 $(D) = 30\text{m}$

但是，由于烟气的减光性，在发生火灾时的疏散通道或火场上，实际能达到的能见距离将远小于极限视程。表 1-5 所列为各个不同的烟气光学浓度 C_s 时人们的能见距离 D 值。由于火灾时所产生的烟气光学浓度据实测约为 $25 \sim 30\text{m}^{-1}$ ，由表 1-5 可见，人们在火灾烟气中的能见距离只有几十厘米，这就使人们在火灾烟气中的行进速度大大降低。所以，烟气的减光性不仅妨碍安全而迅速的疏散活动，而且也妨碍正常的扑救活动。

火灾烟气的减光性使人们不能迅速地逃离火场，增加了中毒或烧死的可能性，所以火灾烟气的减光性是毒害性的帮凶。

表 1-5 不同 C_s 的烟气中人们的能见距离 D (m)

烟气光学浓度 C_s (m^{-1})	地下建筑 (停电时)	地上建筑	
		反射型标志及门	发光型标志及窗
2	0	1~2	2.5~5
5	0	0.4~0.8	1~2
10	0	0.2~0.4	0.5~1
15	0	0.13~0.27	0.33~0.67
20	0	0.1~0.2	0.25~0.5
25	0	0.08~0.16	0.2~0.4
30	0	0.07~0.13	0.17~0.33

三、火灾烟气的恐怖性

发生火灾时，特别是发生爆燃时，火焰和烟气冲出门窗孔洞，浓烟滚滚，烈火熊熊，使人们产生了恐怖感，常常给疏散过程造成混乱局面。使有的人失去活动能力，有的甚至失去理智，惊慌失措。所以，恐怖性的危害也是很大的。

第三节 火灾烟气的基本状态参数

气态物质在某瞬间所呈现的宏观物理状况称为状态，表征状态的物理量称为状态参数。常用的状态参数有压力、温度、比容或密度、内能、焓、熵等，其中压力、温度、比容或密

度为基本状态参数。

在一般情况下，火灾烟气中的悬浮微粒的含量是很少的，所以就总体而言，可近似地把烟气当作理想混合气体对待。那么，正如一切气态物质那样，火灾烟气的基本状态参数也是压力、温度、比容或密度三个。

一、压力

在火灾发生、发展和熄灭的不同阶段，室内烟气的压力是各不相同的。在火灾发生初期，烟气的压力很低，随着着火房间内烟气量的增加，温度上升，压力相应升高。当发生爆燃时，烟气的压力在瞬间达到峰值，而震破门窗玻璃。当烟气和火焰一旦冲出门窗孔洞之后，室内烟气的压力就很快降低下来，接近当时当地的大气压力 B 。据测定，一般着火房间内烟气的平均相对压力 P_{ys} 约为 $10 \sim 15 \text{ pa}$ ，在短时可能达到的峰值约为 $35 \sim 40 \text{ pa}$ 。那么，烟气的绝对压力 P_y 为

$$P_y = B + P_{ys} \quad [\text{pa}] \quad (1-2)$$

由于 P_{ys} 相对于 B 可忽略不计，故

$$P_y \approx B \quad [\text{pa}] \quad (1-3)$$

二、温度

火灾烟气的温度在火灾的发生、发展和熄灭各个阶段中也是不同的。在火灾发生初期，着火房间内烟气温度不高，随着火灾发展，温度逐渐上升，当发生爆燃时，燃烧很快达到高峰，室内烟气温度相应急剧上升，很快达到最高水平。试验表明，由于建筑物的内部可燃材料的种类不同，而且门窗孔洞的开口尺寸也不同，所以着火房间内最高温度也不同，低则达 $500 \sim 600^\circ\text{C}$ ，高则达 $800 \sim 1000^\circ\text{C}$ ，甚至更高些。有关着火房间内烟气温度工况将在本章第五节中专门讨论。

当烟气由着火房间窜出蔓延到走道及其它房间时，一方面迅速与周围的冷空气掺混，另一方面受到四周围护结构的冷却，烟气温度很快降低下来，若不计及围护结构对烟气的冷却作用，混合后的烟温为

$$t_y = \frac{V_{yo} t_{yo} + V_k t_k}{V_{yo} + V_k} \quad [^\circ\text{C}] \quad (1-4)$$

式中 V_{yo} ——着火房间窜出的烟气量 (m^3/s)；
 t_{yo} ——着火房间窜出的烟气温度 ($^\circ\text{C}$)；
 V_k ——走道或其它非着火房间内与烟气掺混的冷空气量 (m^3/s)；
 t_k ——与烟气掺混的冷空气温度 ($^\circ\text{C}$)。

然而，走道和其它房间内与烟气掺混的冷空气量是很难确定的，所以国外通常采用经过实验确定的经验公式来计算掺混后的烟温，即

$$t_y = \alpha_1 \cdot t_{yo} \quad [^\circ\text{C}] \quad (1-5)$$

式中 α_1 ——烟气的冷却系数，为经验常数，

对经过走道时, $\alpha_1 = 0.7$,

对经过走道和排烟竖井时, $\alpha_1 = 0.5$;

t_{y0} ——着火房间窜出的烟气温度, 一般可取为 500°C 。

那么, 烟气的绝对温度为

$$T_y = 273 + t_y \quad [\text{K}] \quad (1-6)$$

三、比容或密度

烟气的组成与空气不同, 所以在相同温度和相同压力下的比容也不同于空气。另一方面, 火灾烟气的组成又因燃烧物质、燃烧条件的不同而异, 所以严格地说, 在相同温度和相同的压力下, 不同条件下生成的火灾烟气的比容或密度也不同。

烟气的比容或密度可利用理想气体的状态方程式来导出, 即

$$\rho_y = \rho_y^0 \frac{273}{T_y} \frac{P_y}{P_b} \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (1-7)$$

对于火灾烟气来说, $P_y \approx B$, 故烟气的比容和密度为

$$\rho_y = \rho_y^0 \frac{273}{T_y} \frac{B}{P_b} \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (1-8)$$

$$v_y = \frac{T_y \cdot P_b}{273 \rho_y^0 \cdot B} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (1-9)$$

在海拔不高的沿海地带和平原地带, 可近似认为 $B \approx P_b$, 这样式 (1-8) (1-9) 进一步简化为

$$\rho_y = \rho_y^0 \frac{273}{T_y} \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (1-10)$$

$$v_y = \frac{T_y}{273 \rho_y^0} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (1-11)$$

式中 ρ_y^0 ——标准状态下的烟气密度, 一般可取为 $1.3 \sim 1.33 \text{ (kg}/\text{m}^3)$;

P_b ——标准大气压力, 为 101325 (pa) ;

B ——当地大气压力 (pa)。

根据一些实验测定的数据计算得到的烟气和空气密度差如表 1-6 所示。由表可见, 烟气的密度一般比空气稍大, 但最大也不超过 3%。

表 1-6 不同材料燃烧时产生的烟气与空气密度差

材 料 名 称	燃烧温度 ($^\circ\text{C}$)	剩余空气率	密度差 $\frac{\rho_y - \rho_k}{\rho_k} \times 100\%$
木 材	300~310	0.41~0.49	0.7~1.1
	580~620	2.43~2.65	0.9~1.5
氯乙烯树脂	820	0.64	2.7
苯乙烯泡塑	500	0.17	2.1
尿烷泡塑	720	0.97	0.4