



火灾烟气毒害分析

胡定煜 编著

HUOZAI YANGQI DUHAI FENXI

中国建材工业出版社

火灾烟气毒害分析

胡定煜 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

火灾烟气毒害分析/胡定煜编著. —北京: 中国
建材工业出版社, 2015. 10
ISBN 978-7-5160-1277-2

I. ①火… II. ①胡… III. ①火灾—烟气—气体分析
IV. ①TU998.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 208326 号

内 容 简 介

本书以火灾烟气为主要研究对象, 对其产生、危害特性、采样分析方法、成分分析技术、毒性评估方法、产烟规律、毒性分级管理等进行了较深入的分析, 并在此基础上探讨了火灾烟气的控制与管理措施。

本书可供广大聚合物材料和建筑材料的开发人员、火灾科学与消防工程的研究人员、建筑工程设计人员、消防监督管理人员, 以及高等院校和科研院所相关专业的师生参考使用。

火灾烟气毒害分析

胡定煜 编著

出版发行: **中国建材工业出版社**

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 11.5

字 数: 300 千字

版 次: 2015 年 10 月第 1 版

印 次: 2015 年 10 月第 1 次

定 价: **48.00 元**

本社网址: www.jcbs.com.cn 微信公众号: [zgjcycbs](https://www.weixin.com/qzjcgycbs)

本书如出现印装质量问题, 由我社网络直销部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

火灾危害主要来源于三个方面，即火焰辐射热量、低氧状况以及火灾烟气。而火灾烟气是火灾事故中造成人员伤亡的重要因素之一。随着材料工业的发展，新型材料不断涌现，火灾烟气中的毒物品种及数量变得更为复杂，发生火灾烟气毒性伤害的概率大为增加。近年来，特别重大火灾如洛阳“12·25”东都商厦火灾、深圳“9·20”舞王俱乐部火灾、上海“11·15”教师公寓火灾、吉林德惠“6·3”火灾、河南“5·25”鲁山养老院火灾等灾难性事故的发生，均造成了巨大的人员伤亡和财产损失。火灾烟气毒性危害问题已经成为当今消防亟待解决的重大课题之一。

世界各国都非常重视材料的燃烧产烟及烟气毒性方面的研究工作。美国、英国、德国、日本、加拿大等国以及欧洲的一些研究机构就此开展了大量的研究，并出台了許多相应的标准。著名学者 Zapp、Hartzell 等更是拓展了燃烧毒理学研究领域，出版了《Combustion Toxicology: Principles and Test Methods》、《Advances in Combustion Toxicology》等极具影响的学术专著。国内《建筑材料及制品燃烧性能分级》(GB 8624—2012)和《材料产烟毒性危险分级》(GB/T 20285—2006)等一些相关标准对材料燃烧烟气毒性等提出明确的要求，并制定了分级管理措施。清华大学、中国科技大学、公安部四川消防研究所、天津消防研究所等一些科研院所在火灾烟气毒性研究方面走在了同行的前列，并发表了许多极具价值的学术论文。但令人遗憾的是，关于火灾烟气毒性分析的研究内容多散存于火灾科学研究诸多著作的章节之中或期刊杂志的论文之中，而专门性的学术著作或教材在国内仍是空白。

基于此，在参阅、引用国内外文献资料的基础上，笔者编写了此书。本书以火灾烟气为主要研究对象，对其产生、危害特性、采样分析方法、成分分析技术、毒性评估方法、产烟规律、毒性分级管理等进行了较深入的分析，并在此基础上探讨了火灾烟气的控制与管理措施。全书共8章。第1章为绪论，主要介绍了火灾烟气的危险性和研究现状；第2章介绍了火灾烟气的主要危害特性及定量描述方法；第3章重点阐述了火灾烟气组分的毒害作用及其机理；第4章以FTIR分析技术为重点，着重介绍了火灾烟气的采样及分析技术；第5章详细介绍了烟气毒性的分级管理标准和毒性评估模型及方法；第6章重点介绍了烟气毒性的动物试验评估方法和手段；第7章介绍了火灾烟气生成的影响因素以及组分间的相互作用；第8章着重介绍了火灾烟气危害的控制与管理。

书稿编写过程中，得到了中国人民武装警察部队学院、北京理工大学领导、专家、同行的大力帮助，在此一并致以衷心的感谢。同时，特别感谢武警学院材料与火灾科学

教研室舒中俊教授在书稿编写过程中的悉心指导。此外，本书参阅、引用了大量国内外文献和其他资料，在此特对被引用材料的作者和单位致以深切的谢意。

由于时间仓促，编者水平有限，书中存在不足之处，乃至缺点错误也实属难免。本书一旦出版希望得到更多专家教授、同行的批评和指正，以便通过今后的教学、科研实践不断修改完善。

胡定煜
2015年10月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 火灾烟气的危险性	1
一、火灾烟气的危害性	1
二、火灾烟气的毒性作用	3
第二节 火灾烟气研究现状	4
一、材料产烟模型	5
二、烟气成分分析	5
三、动物暴露染毒	6
四、烟气毒性评估	7
五、其他相关研究	7
第三节 烟气毒性研究发展方向	7
一、烟气组分间的相互作用	8
二、烟气毒物的迁移规律	8
三、毒性数据库的完善	8
第二章 火灾烟气毒性分析基础	9
第一节 火灾烟气的生成与产率	9
第二节 火灾烟气的性质与危害	12
一、火灾烟气的物理特性与危害	12
二、火灾烟气的化学特性与危害	16
第三节 火灾烟气浓度表述方法	19
一、烟气浓度与能见度	19
二、烟密度	20
三、材料产烟量	23
第三章 火灾烟气毒害作用及机理	25
第一节 气态组分的毒性作用	26
一、一氧化碳 (CO)	26
二、二氧化碳 (CO ₂)	28
三、氮氧化物 (NO _x)	28
四、氯化氢 (HCl)	30
五、氰化氢 (HCN)	31

六、硫化氢 (H ₂ S)	32
七、二氧化硫 (SO ₂)	34
八、丙烯醛	36
九、光气	37
十、其他	38
第二节 低氧状况与颗粒物危害	39
一、低氧状况	39
二、颗粒物	39
第四章 火灾烟气成分分析技术	43
第一节 火灾烟气采样与分析技术	43
一、烟气采样器技术条件	43
二、FTIR 技术对烟气采样及分析的要求	45
第二节 火灾烟气常用检测技术	51
一、傅里叶变换红外光谱分析仪	51
二、锥形量热仪	54
三、热重分析法	56
四、色谱分析法	58
第三节 燃烧源细颗粒物分析技术	60
一、燃烧源细颗粒物采样方法	60
二、燃烧源细颗粒物分析方法	66
第五章 火灾烟气毒性评估方法	70
第一节 烟气毒性评估方法	70
一、材料试验方法	70
二、烟气毒性评估模型	73
三、烟气毒性计算机模拟	87
第二节 燃烧毒性风险评估	89
一、烟气毒性风险评估方法	89
二、烟气毒性风险评估模型	90
第三节 烟气危害评估应用领域	91
一、材料燃烧产烟毒性危险评价	91
二、建筑安全性能化评估	92
第六章 烟气毒性动物试验评估技术	93
第一节 基本概念及术语	93
一、毒性与毒效应	93
二、毒性参数	96
三、剂量和剂量-反应关系	98

四、毒理学常用的研究方法·····	101
第二节 动物试验技术基础·····	102
一、实验动物基础知识·····	102
二、动物试验基本操作技术·····	109
第三节 急慢性毒性试验方法·····	113
一、急性毒性作用试验·····	113
二、短期、亚慢性和慢性毒性作用试验·····	117
第七章 火灾烟气的生成及其相互作用 ·····	124
第一节 火灾烟气毒性的影响因素·····	124
一、燃烧产物的形成条件·····	124
二、动物暴露染毒条件·····	129
第二节 火灾烟气中的燃烧产物·····	130
一、燃烧产物的产率·····	131
二、燃烧产物的生成速率·····	131
三、燃烧产物的生成效率·····	132
四、通风状态对燃烧产物生成效率的影响·····	133
五、发烟点对燃烧产物产率的影响·····	134
第三节 火灾烟气的相互作用·····	135
一、联合作用分类·····	135
二、火灾烟气的联合作用·····	136
第八章 火灾烟气毒害控制技术 ·····	140
第一节 材料产烟毒性分级管理·····	140
一、部分术语解释·····	140
二、实验动物的要求·····	141
三、动物染毒过程·····	142
四、毒性危害判断·····	142
五、毒性分级试验·····	143
第二节 清洁阻燃技术·····	144
一、阻燃剂分类·····	144
二、典型的阻燃剂·····	145
第三节 燃烧颗粒物污染控制技术·····	145
一、生物质燃烧颗粒物形成·····	145
二、细颗粒物排放控制的政策法规·····	147
三、燃烧源细颗粒物控制技术的研究现状·····	148
第四节 火灾烟气蔓延控制技术·····	150
一、火灾烟气的流动·····	150
二、火灾烟气的控制·····	155

第五节 职业健康安全管理.....	158
一、职业健康安全管理体系的产生与发展.....	158
二、消防员职业健康标准.....	159
第六节 烟气毒性相关标准及网络资源	162
一、烟气毒性测试相关技术标准.....	162
二、美国医学图书馆的毒理学网络.....	163
三、管理毒理学相关机构和网址.....	164
参考文献	166

第一章 绪 论

第一节 火灾烟气的危险性

火灾是火失去控制而蔓延的一种灾害性燃烧现象，是人类社会威胁较大的灾害之一。火灾往往会造成大量的人员伤亡和巨额财产损失，以及环境污染等，影响社会稳定。火灾危害主要来源于三个方面，即火焰辐射热量、低氧状况以及火灾烟气。在多数火灾中，辐射热量、低氧状况对火灾中人员造成的伤害远不及火灾烟气吸入对人员造成的伤害大。据美国消防协会（NFPA）对历年毒性烟气致死人数和受害者死亡地点的统计数据表明，每年由于烟气吸入中毒死亡的人数占火灾死亡人数的 $2/3 \sim 3/4$ ，而其中 $60\% \sim 80\%$ 的人员均在远离火源的位置死亡。这一现象说明毒性气体本身及其在火灾现场空间的传播是火灾事故中造成人员伤亡的重要因素之一。

一、火灾烟气的危害性

火灾中，可燃物质燃烧或不完全燃烧以及高分子化合物高温分解产生的气体和固体物质的混合物统称为烟气。美国试验与材料学会（ASTM）对烟气的定义是：某种物质在燃烧或分解时散发出的固态或液态悬浮微粒和高温气体。在已有文献中，关于“烟气”有多种不同的定义。常见的有如下三种：①烟气是燃烧中产生的一种气溶胶状物质；②烟气是可燃物燃烧产生的可见挥发物；③烟气为在不完全燃烧过程中所产生的、由大量微粒所组成的可见云团，其包括燃烧物释放的高温蒸气或气体、未燃的分解物和冷凝物以及被火焰加热的空气等。尽管对“烟气”的定义各有不同，但有两点是统一的。一是烟气的产生与燃烧有关；二是烟气的成分一般都非常复杂，是由多相物质组成的混合物。总体而言，火灾烟气是由以下三类物质组成的具有较高温度的混合物，即气相燃烧产物，未完全燃烧的液、固相分解物和冷凝物微小颗粒，以及未燃的可燃蒸气和卷吸混入的大量空气。火灾烟气中含有多种有毒、有害、腐蚀性气体成分和颗粒物等，加之火灾环境高温缺氧，必然对生命财产和生态环境造成极大的危害。

聚合物材料是火灾中毒性烟气的重要来源。有机类聚合物材料因其质轻、防水、耐腐蚀、价格便宜及加工方便等优点，在建筑内装饰中得到广泛应用。建筑内装饰材料是指建筑结构主体完成后，在建筑内进行顶棚、墙面、楼地面、隔断等部位装饰装修用的各种材料。随着生活水平的提高，人们对装修的标准越来越高，有时为了达到某一装饰效果，往往采用可燃甚至易燃的装饰材料，大大增加了建筑的火灾危险性。表 1-1 是常见聚合物材料在建筑内装饰上的应用。

表 1-1 聚合物材料在建筑装饰装修上的应用

类别	主要制品	材料
墙面材料	墙纸、墙布	PVC
	墙面砖	PS、PVC、PP
	护墙板	PVC、MF
地面材料	地面砖和卷材	PVC、PMMA
	涂布地板	UP、EP、PU、AC、PC
	地毯	PA、PP、PAN
顶棚材料	吊顶	PVC
线材	踢脚线、顶角线和窗帘盒	PVC、PS
衬设	门窗、窗帘、幕布、床罩、沙发罩和家用电器外壳	PET、PAN、PVA、PS、UF、PF
隔热材料	泡沫塑料	PS、PU、UF、PF
其他	隔断、广告牌、玻璃钢等	PE、PS、PVC、PMMA

随着材料工业的发展,新型材料不断涌现,建筑用装饰装修材料也从传统的木材、石材向聚合物材料转变。火灾烟气中的毒物品种及数量变得更为复杂,发生火灾烟气毒性伤害的概率大为增加。由于烟气毒性的威胁,阻碍了人员安全疏散和消防队的灭火救援行动,由此造成巨大的人员伤亡和财产损失。近二十年来,特别重大火灾时有发生。火灾烟气毒性危害问题已经成为当代消防急需解决的重大课题之一。

1993年2月14日唐山林西百货大楼火灾,经法医鉴定死亡的80人中,除一人属高空坠落死亡外,其余全部死于有毒烟气。

1994年11月27日13时28分,辽宁阜新艺苑歌舞厅发生大火,因易燃的化纤布(棉丙交织布)燃烧时分解产生大量有毒气体,加上出口狭窄,人员较多,最终造成200余人中毒窒息死亡。

1994年12月8日新疆克拉玛依友谊馆大火,死亡325人,其中95%以上死于烟气中毒。

1996年11月20日下午4时47分,香港弥敦道嘉利大厦发生火灾,火灾燃烧了21小时,造成40人死亡,81人受伤。

2000年12月25日,洛阳东都商厦发生特大火灾,死亡人数达309人。事后统计表明,这309人全部是因为吸入有毒烟气重度中毒窒息而亡。

2003年2月28日,南通市某家具公司发生了火灾,参与救火的50多名人员事后不久陆续出现头昏、恶心、四肢乏力等症状,入院治疗后全部痊愈。经调查,初步确定为由火灾引发的烟气吸入性中毒事故。

2003年12月12日上午8点左右,温州市区发生一起特大火灾。共造成21人死亡。其中,2楼的新艺苑舞厅因烟气窒息中毒死亡19人。

2008年9月20日23时许,深圳龙岗区舞王俱乐部因使用自制礼花弹手枪发射礼花弹,引燃天花板从而引发一起特大火灾事故,造成43人死亡,88人受伤。

2009年1月31日晚11时55分左右,福建省长乐市区吴航街道郑和中路178号的“拉

丁”酒吧，因桌面上燃放的烟花引燃了天花板，造成重大火灾事故，15条鲜活的生命在火灾中逝去，22人受伤。

2009年2月9日晚21时许，在建的央视新台址园区文化中心发生特大火灾事故，大火持续六小时，火灾由烟花引起。央视新台址北配楼火势猛烈时火焰高近百米，浓烟滚滚，一度将正月十五的圆月完全遮蔽。从发生火灾的大楼上掉落下来的灰烬像雪片一样落在1km范围内。建筑物过火、过烟面积21333m²，其中过火面积8490m²，造成直接经济损失16383万元。

2010年11月15日，上海静安区胶州路的教师公寓发生火灾。由于电焊引燃了违规使用的大量聚氨酯泡沫等易燃材料，导致大火迅速蔓延，事故最终造成58人遇难，71人受伤，直接经济损失1.58亿元。

2011年2月3日，沈阳皇朝万鑫酒店发生火灾，起火原因是燃放礼花引燃外墙表面装饰材料，事故虽没造成人员死亡，却带来巨大的经济损失。

2012年6月30日15时41分，天津蓟县莱德商厦发生火灾。商厦内可燃物大量堆积，造成较大的火灾荷载，且燃烧速度快，发生火灾后短时间内迅速形成大面积燃烧。化妆品、塑料制品等有机物质燃烧释放出大量有毒高温烟气，笼罩整个大厦，形成立体式燃烧。火灾造成10人死亡、16人受伤，过火面积6800m²。

2013年6月3日，位于吉林省长春市德惠市的吉林宝源丰禽业有限公司主厂房发生特别重大火灾爆炸事故，最终酿成121人死亡的悲剧，直接经济损失1.82亿元。

上述各起火灾事故中，大量的人员伤亡均与火灾烟气毒性具有密切的联系。火灾烟气的危害性已经引起了消防从业人员及科研人员的高度重视。

二、火灾烟气的毒性作用

燃烧毒理学是研究暴露于火灾氛围对健康的不利影响。火灾氛围指所有材料或产品在有焰或阴燃燃烧条件下热分解产生的产物，在火灾现场所形成的区域环境。燃烧毒理学的目标是识别那些潜在的能够通过燃烧或热降解产生有害产品的材料，确定有毒产品以及毒性程度的最佳测量识别方法，以确定暴露在不同火灾毒性氛围中对健康的影响，并分析和研究此类产品燃烧产物对有机体的生理作用机制。这一领域研究的最终目标是减少因吸入浓烟而导致死亡的人类火灾死亡人数，强化或有针对性地开展对于幸存者的有效治疗，以及预防由火灾烟气吸入造成的不必要伤亡。因此，从1970年左右开始，燃烧产物毒性研究一直成为火灾科学中持续关注 and 辩论的话题。测量燃烧产物成分和浓度并进行毒性评估具有重要的安全意义。火灾烟气毒害分析是燃烧毒理学领域的一项重要研究课题。

目前，已知火灾中有毒烟气的成分有数十种，主要分为无机类毒害气体和有机类毒害气体。无机类毒害气体包括CO、CO₂、NO_x、HCl、HBr、H₂S、NH₃、HCN、P₂O₅、HF、SO₂等，有机类毒害气体包括光气、醛类气体等。有时也将火灾产生的细颗粒物、烟雾和可能产生的重金属粉末归入火灾产生的有毒有害物质。烟气成分的毒害作用主要体现在窒息作用和刺激作用两个方面。

1. 窒息作用

CO和HCN是火灾中足以引起明显窒息作用的毒性气体。CO由于比O₂更容易与血液中的血红蛋白结合，从而降低了血液运输O₂的能力，致人缺氧而窒息，严重者则死亡。HCN是所有氰化物中中毒最快、毒性最强的一种，可以使人缺氧，抑制人体中酶的生成，

阻止正常的细胞代谢,造成机体组织内窒息。当 HCN 与 CO 同时存在时,两者的毒性呈现相加作用,其中 HCN 的毒性比 CO 剧烈得多,毒性约为 CO 的 20 倍。

氧气通常占空气体积的 20.9%,人类呼吸及神经系统的所有功能均已适应此浓度。当氧气浓度稍微下降时,就开始出现生理反应。对于不同的个体,实际效应可能千差万别,而且受年龄和总体生理状况影响。火灾现场经常出现缺氧状况,导致人员因缺氧而窒息。

另外,CO₂的浓度会影响人的呼吸速率,空气中 CO₂的正常浓度为 0.03%,火灾烟气中 CO₂的浓度总是大于此值,有时可高达 10%。CO₂浓度的增加会迫使肺的换气作用加倍,呼吸速率越快,吸入的包括 CO、HCN 在内的有毒气体就越多,这是一种间接的中毒。

火灾烟气中常见窒息剂的毒性数据见表 1-2。

表 1-2 火灾烟气中常见窒息剂的毒性数据

窒息剂	5min 暴露		30min 暴露	
	失能浓度/ppm	致死浓度/ppm	失能浓度/ppm	致死浓度/ppm
一氧化碳	6000~8000	12000~16000	1400~1700	2500~4000
氰化氢	150~200	250~400	90~120	170~230
低氧	10%~13%	<5%	<12%	6%~7%
二氧化碳	7%~8%	>10%	6~7%	>9%

说明:低氧和二氧化碳浓度指体积百分浓度。

2. 刺激作用

由于新型建筑材料的大量使用,使得火灾中硫氧化物、氮氧化物、氰化氢、氯化氢、固体和液体颗粒等毒性组分大量生成。这些物质能刺激人的某些感官或功能系统,使人不适。刺激性主要体现在两个方面:一种是刺激神经,主要是毒物在眼和上呼吸道引起的反应;另一种是刺激肺,主要是毒物在下呼吸道引起的反应。绝大多数的火灾中,烟气的两种刺激效应是共存的。

火灾烟气中常见刺激性气体的毒性数据见表 1-3。

表 1-3 火灾烟气中常见刺激性气体的毒性数据

窒息剂	5min 暴露		30min 暴露	
	失能浓度/ppm	致死浓度/ppm	失能浓度/ppm	致死浓度/ppm
丙烯醛	95~100	500~1000		50~135
氯化氢	75~11000	12000~16000		2000~4000
氟化氢	极限取量 50			
溴化氢	致死剂量 500 (10min)			
氮氧化物	极限取量 50~1000			

第二节 火灾烟气研究现状

在诸多灾害中,火灾的发生频率最高。近年来,随着国民经济的快速发展,我国的火灾形势呈现出愈演愈烈之势。火灾对人和财产造成很大的危害,通常可分为两类:热辐射引起

的危害和非热因素引起的危害。对于火灾中热辐射的危害已经有较多的研究成果了，而对于非热因素引起的危害则研究得不多，特别是对其中烟气毒性的研究最为缺乏。几乎所有火灾都会产生大量的烟气。在烟气的各种成分中，一氧化碳是唯一已被证实造成火灾中人员大量死亡的气体，并且已引起足够的注意。但对其他成分的了解不是很多，如 HCN 和丙烯醛等。一些毒物成分对人的影响同样不可忽视，如人在浓度为 30ppm 的丙烯醛环境中滞留 5~10min 即可致命。因此，研究可燃物在火灾中产生的作用十分关键。尤其在现代建筑物中，使用了大量的新材料，而新材料的使用对火灾烟气毒物的产生起着重要的作用。关于火灾烟气毒性的研究现状，主要体现在以下几方面。

一、材料产烟模型

火灾烟气毒性测试通常采用小尺度试验方法。小尺度试验的基础理念是：借助温度、有无火焰和供氧量等参数改变，在小尺度试验装置中得到火灾不同类型、不同阶段的化学反应环境；在这些情况下，材料火灾烟气毒性与全尺寸试验相应阶段相似。小尺度试验是在特定的加热和通风情况下，对材料的烟气毒效测试的方法。根据国外现有的情况来看，采用的小尺度物理火灾模型不统一，有 15 种之多。国际标准化组织于 1985 年邀请 20 位火灾工程专家结合评价体系对 15 种小尺度火灾模型进行评价。评价较高的模型是：德国 DIN 53436 管式炉，美国 NBS 杯炉、NBS 锥形炉和辐射炉。1996 年，ISO 形成了第一个关于火灾烟气毒性的国际标准《火焰气流物致命毒性强度的评估》(ISO 13344)。在小尺度模型装置方面，ISO 13344 推荐了 8 种模型，没有做进一步的筛选。

我国于 1987—1990 年间进行了材料产烟毒性试验方法学基础的研究，解决了材料产烟毒性试验的定量化、重复性、再现性等技术问题；建立了我国独特的材料产烟毒性试验方法和装置，其产烟原理参照德国标准 DIN 53436 管式炉，与小鼠暴露染毒相结合，适用于各种材料的不同产烟情况下进行不同染毒时间的动物染毒评价，现已成为国家防火建材质检中心对防火建材毒性分级的标准检测装置。

二、烟气成分分析

采用化学分析的方法对火灾烟气有毒成分进行分析测试，有利于研究烟气中各毒性组分产生的毒性作用，综合分析毒性产生的原因和机理。一般采用气相色谱、气-质联用、NDIR、磁氧分析、离子色谱、比色分析等传统分析方法测试火灾烟气毒性组分。但由于传统的成分分析法主要是根据不同的火灾烟气成分的特性采用不同的分析方法，操作程序烦琐，且大多只能采取间歇取样分析，无法对整个燃烧过程的火灾毒性烟气成分进行在线实时分析。因此，1997—1999 年由欧盟出资，芬兰、英国等 6 个国家 10 个科研机构联合开展了“用傅里叶变换红外光谱技术 (FTIR) 分析火灾烟气成分”的 SAFIR 计划。该计划属于欧盟标准化研究项目，并为 CEN、ISO、IEC 和 IMO 制定烟气成分分析标准做准备。ISO/TC92 在 2002 年年会上首次提出了工作草案 ISOWD 19702 “火灾气流物毒性试验——用 FTIR 技术对火灾烟气成分的分析”，并进一步完善成为国际标准。

公安部四川消防研究所于 2003 年开展了分析火灾烟气成分的新方法研究，建立了 FT-IR 分析烟气多组分的方法，实现了对烟气多组分的在线实时测量。

表 1-4 中所示的是空气流速 $50\text{dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时采用红外光谱法测得的一些材料的燃烧气体产物。

表 1-4 一些材料在空气中燃烧时的气体产物

材料 \ 燃烧产物 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	CO_2	CO	COS	SO_2	N_2O	NH_3	HCN	CH_4	C_2H_4	C_2H_2
聚乙烯	502	195						65	187	10
聚苯乙烯	590	207						7		
尼龙-6,6	563	194				4	26	39		
聚丙烯酰胺	783	173				32	21	20		
聚丙烯腈	630	132					59	8		
聚氨酯甲酸酯	625	160					11	17	37	6
环氧树脂	961	228					3	33	5	6
脲-甲醛树脂	980	80					22			
三聚氰胺-甲醛树脂	702	190			27	136	59			
雪松	1397	66						2	1	

在烟气成分分析中,关于毒气混合物(成分、浓度等)是怎样在室内随漂移距离而变化的,以及这些毒性气体与装饰材料之间如何产生化学反应等问题都是值得深入研究的重要课题。

Galloway 等曾对 HCl 气体在室内传播规律进行了研究。实验研究表明, HCl 和大多数建筑材料的反应特别迅速,如水泥板、石膏板等。在火灾中测得的 HCl 最高浓度通常比计算得出的材料燃烧释放 HCl 的值要小很多,并且 HCl 很快会从其最高值下降,直至完全从空气中消失。Galloway 等利用 5 个火灾场景实验研究了空气中 HCl 气体的自发迁移规律,建立了一个考虑到对流传质、表面吸收平衡和表面消失速率的空气中的 HCl 衰减模型。模型研究结果表明, HCl 浓度的减少,主要是由于 HCl 迁移到墙壁并和墙壁发生反应,而不是在流动(物理过程)中损失。因此火灾时 HCl 的相对毒性在有迁移运动的烟气层中比没有运动时的要小。

火灾中由聚合物分解释放的 HCl 毒性已引起广泛重视。目前在大部分模型中, HCl 通常被认为是一种随着其他燃烧产物一起扩散的不会损失的气体。但研究表明 HCl 在火灾环境下的空气中不会停留很长时间,化学反应会使其浓度降低,其降低速率和外部环境有关,化学反应主要发生在气-固交界面。

HCl 的衰减现象很重要,因为它是目前广泛应用的建筑材料的主要燃烧产物。在火灾气体抽样分析中, HCl 的体积约占 1/3,所以在考虑火灾危害特别是含有 PVC 材料的危害时, HCl 的衰减就应特别注意,以避免过高估计其危害。

三、动物暴露染毒

成分分析与动物暴露染毒是目前国际上评估火灾烟气毒性的两种主要技术途径。动物染毒法有利于对烟气总体毒效的评价。动物实验一般是在特殊的实验箱中进行的,它们大致可分为静态和动态两种。

衡量标准有 LC_{50} (Lethal Concentration)、 IC_{50} (Incapacitation Concentration) /RD

(Respiratory Depression)、 EC_{50} (Effete Concentration) 等。 LC_{50} 是在一定暴露期和后观察期内 50%的烟气暴露动物死亡时对应有毒气体 ($\times 10^{-6}$) 或者材料火灾烟气 (g/m^3) 的浓度,暴露时间有 10min、30min、60min、140min 和 240min 不等。后期观察有 5min、7min、7d 和 14d 不等。与此类似,定义丧失能力的浓度 IC_{50}/RD 是对呼吸系统造成损害的评价参数。最常用的评价指标是 LC_{50} 。有一种计算燃烧或裂解产物的生物毒性指数 (TX) 的标准,它是根据在不同时间内的急性死亡率 m_i 和致死系数 K_i 计算出来的,可由下式表示:

$$TX = \frac{\sum K_i m_i}{\sum K_i}$$

式中, m_i 为时间 i 时的总的死亡率; K_i 为时间 i 时的致死系数。

引起早期死亡的材料的 TX 一般很高,但随时间增加而减小。

四、烟气毒性评估

火灾烟气毒性评价与预测是解决火灾烟气毒性危害问题的关键。国外在火灾烟气毒性评价和预测方面仍不断进行深入研究,如欧盟的“COMBUSTTON”项目、“TOXFIRE”项目,美国消防研究基金会(FPRF)、美国国家标准和技术研究所(NIST)和美国消防协会(NFPA)于2000年开始的“火灾烟气对逃生和健康的非致死影响的国际研究(SEFS)”项目等,进而建立了大量的毒性评估数学模型。火灾烟气毒性评价与预测已成为消防安全工程的重要研究内容。

我国2001年开始的“973”项目“火灾动力学演化与防治基础”,重点解决火灾孕育、发生和发展中的关键科学问题,并对火灾防治环节中的基础问题进行系统攻关。“火灾中毒害物质的释放机理和对人体的影响”作为“火灾动力学演化与防治基础”的一个攻关项目,由清华大学、公安部四川消防研究所、解放军防化研究院、中国科技大学共同承担,拟通过火灾烟气毒性评价和预测技术探索火灾中不同类型的毒害物质分布对动物及人体的影响。

五、其他相关研究

针对火灾烟气的主要毒性组分CO,NIST于20世纪90年代初研究了CO的形成机理,认为CO的形成与火灾环境相关的流体动力学和热力学有关;Beyler和Zukoski等人采用烟罩试验方法来研究CO、CO₂、O₂的生成情况,发现它们的生成与燃料和空气的比率有关。在充分燃烧情况下,每单位质量(1kg)的燃料产生的CO约为0.2kg,与Mulholland的基于全尺寸火灾实验的结果一致。我国公安部四川消防研究所于2000年通过模拟火灾和实体火灾试验研究了地下商业街火灾中CO、CO₂、O₂的生成规律等。

第三节 烟气毒性研究发展方向

火灾烟气毒性的研究是火灾基础研究中一个不可缺少的方面,结合材料燃烧烟气毒性研究现状,烟气毒性研究发展应着重加强以下几个方面。

一、烟气组分间的相互作用

主要包括：

1. 两种不同气体间的相互作用。如 NO_2 与 CO_2 、 NO_2 与 CO 、 NO_2 与 O_2 、 NO_2 与 HCN 、 NO 与上述气体间的作用等。
2. 三种气体间的相互作用。如 NO_2 、 CO_2 与 HCN 之间、 NO_2 、 CO 与 HCN 之间等。
3. 多种气体之间的相互作用。如 5 种气体， CO 、 CO_2 、 NO_2 、 O_2 与 HCN 之间的作用。
4. 研究材料在不同条件燃烧时产生的毒害物质的组成与分布规律，火灾各阶段毒害物质形成的化学动力学机理，火灾产生的毒性组分与毒效力的相互关系等。

二、烟气毒物的迁移规律

在火灾调查分析过程中发现，多数因中毒而死于火灾的人并非死在起火房间内，而是在邻近的房间或更远的地方。这就提出了一个问题：毒气混合物（成分、浓度等）是怎样在多房间内随漂移距离的变化而变化的，同时数米之遥的漂移也可为空中悬浮毒物中的化学反应提供相当可观的时间，这一化学反应又是如何进行的。基于此，应着重研究建立描述可燃材料烟气产生速率的模型及烟气扩散的浓度变化模型，用于描述烟气毒物迁移规律。主要包括常见建筑材料及装饰材料有毒物质生成速率模型，火灾烟气毒性气体成分、浓度传播过程中的时空变化规律等。

三、毒性数据库的完善

主要包括：

1. 通过小尺寸试验、中等规模试验和全尺寸试验以及各种现场火灾分析，获取能包括不同试验条件、不同燃烧材料等的大量数据，获取更多的试验数据（包括不同的试验条件、不同的可燃材料等），以此完善现有火灾烟气毒性数据库。
2. 考察不同年龄、体质的人受烟气毒性影响状况的差异，以及建立能将动物试验数据外推到人的方法，建立火灾中人员丧失逃逸能力的毒性指标和判据。
3. 研究能反映不同气体在动物或人体内生理和生化上的毒性相互作用的参数，改进现有评价模型等。
4. 对现有预测模型进行验证研究，开发可用于实际火灾的烟气毒性动态预测模型，为人员安全疏散和消防队抢险救援提供技术支持。