

火灾烟气危害性研究及其进展

黄 锐, 杨立中*, 方伟峰, 范维澄

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

[摘要] 建筑火灾中, 烟气是导致人员伤亡的最主要因素之一。较系统地说明并总结了烟气研究的实验方法和理论研究成果, 介绍了烟气危害性评价的方法与相关指标, 为进一步开展火灾烟气实验研究方案设计提供了参考。根据国外相关工作的进展, 对理论计算的对象和今后重点研究的目标提出了建议。

[关键词] 建筑火灾; 烟气; 毒性; 风险评估

[中图分类号] TU998.12 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)07-0080-06

1 引言

火灾危害主要是热量、烟气和缺氧这三种因素的作用^[1]。对于多数火灾而言, 相对于热量和燃烧造成的伤害, 烟气所造成的伤害比例最大。统计结果表明^[2], 火灾中 85% 以上的死亡者是由于烟气的影响, 其中大部分是吸入了烟尘及有毒气体昏迷后而致死的。烟气中各种有毒有害成份、腐蚀性成份、颗粒物等以及火灾环境的高温、缺氧, 对生命财产以及生态环境都造成很大破坏。

在 2000 年洛阳特大火灾中, 300 多人全部是因吸入有毒烟气重度中毒窒息而死亡的, 并且他们所处位置都远离起火源。国外也有很多类似的事例^[2,3]。严重的火灾事实使人们越发关注火灾烟气对人员的伤害, 从而就更重视火灾烟气问题。美国的防火研究机构 (FPRF) 和国家标准技术研究所 (NIST) 等国外研究机构都正在积极开展这方面研究, 并且希望借助这些工作建立相关的安全标准。我国目前也已经逐步开始此类研究工作, 但跟国外研究水平相比较, 尚存差距。

2 烟气研究的实验方法

在火灾烟气研究领域内, 已经进行了相当多的实验研究工作。按照研究方法, 主要可以分为生物效应实验、烟气成分分析实验、研究烟气物理运动规律的盐水模拟实验以及为了建立相关标准的特殊材料毒性实验等。

生物效应实验主要是将动物置于有害烟气环境中, 测量它们对烟气的生理反应。目前最主要的测量对象还是生物出现反应的时间。至今已经进行了大量的行为与生理实验, 包括梭形盒和转动笼, 其它还有转动杆、跳杆、正面反射、心电图 (EKG) 和呼吸频率测试等^[4]。如: 美国 Michigan, Dow 化学公司的 W. J. Potts 和 T. S. Lederer 主要采集其中的 CO、CO₂、O₂、N₂、NO_x、HCN 等成分进行分析, 同时还放入 7 只老鼠观测其生物效应^[5]。其他的类似工作还有美国哈佛大学 D. P. Dressler^[6]在研究中进行了死亡率与 TUF (time of useful function, 有用功能时间, 或机能失效时间) 的测量, 并对烟气中以及烟气中死亡的动物做组织

[收稿日期] 2002-02-01

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (50006012); 国家重点基础研究专项经费资助项目 (2001CB409600); 高水平大学建设重点资助项目。

[作者简介] 黄 锐 (1975-), 男, 四川邛崃市人, 中国科学技术大学博士研究生

* 联系人, 电话: 0551-3606416, 传真: 0551-3601669, Email: zxd@ustc.edu.cn

病理检查。Stanford 研究所的 J. V. Dilley 等人也发展了类似的一套实验方法^[14]。几位日本研究者已经报道了他们关于燃烧产物毒性研究的进展^[9~12]。尽管每套装置与测试程序不一样，但他们都是将燃烧气体通入每个室，并在每一单间布置动物。

烟气成分分析实验侧重其产物组成及其浓度。从这类实验数据中分析材料与产物的关系，并研究不同温度下材料分解产物的成分与浓度的变化。英国 Huntingdon 研究中心 D. A. Purser 与他的合作者们研究了由材料产生分解物质与燃烧产物对灵长目动物的剧毒性^[7,8]。Michigan 大学的 H. H. Cornish 及其合作者们发展了两套测试方法并应用他们研究分解产物的毒性^[16,17]。开展此类研究工作的还包括美国测试股份有限公司的 A. F. Grand、E. Rider 及其合作者、Tennessee 大学的 J. Autian, W. H. Lawrence 与他们的合作者等^[15,19,20,24]。

建立相关标准的特殊材料毒性实验，主要是针对特定场合或特定材料毒性的研究。其代表有 McDonnell-Douglas 公司所属 Douglas 飞机公司的 J. G. Gaume 等发展的两套不同的动物实验系统^[13]，这些系统可用来进行实验室与大尺度火灾实验中材料燃烧产物的毒性研究。美国西南研究所 (SwRI) 的火灾技术部门进行了评价刺激性燃烧产物气体危害性的研究工作^[4]。Utah 大学的 G. E. Hartzell, S. C. Packham, D. G. Farrar 和 I. Einhorn 也提供相关方法测试评估材料燃烧产物的毒性^[21,22,23]。瑞典 LUND 大学火灾安全工程系研究了一些化学物质在燃烧中产生的燃烧产物，特别是含 N、S、P、Cl 等元素的有机物^[25]。

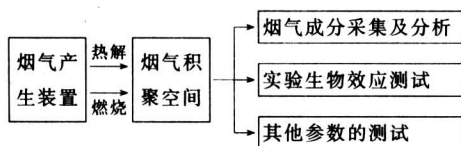


图1 火灾烟气实验图解

Fig.1 Schematic of some experiment systems of fire smoke

已有的烟气实验方法可以归纳如图1，主要思想是控制烟气产生方式，从而控制不同条件下的成分组成，然后分析成分组成及其浓度或测量有关动物对烟气的各种反应。他们的共同点是实验设备都

由一套烟气产生装置和一个烟气聚集空间组成。不同点是产生烟气使用不同的控制方式，使材料热解或燃烧；再就是在烟气聚集空间测量的对象和方式各有不同。

3 火灾烟气的计算模拟

3.1 火灾烟气理论与计算模型的进展

火灾理论研究的主要方法就是结合相应的实验通过计算机模拟对火灾烟气进行定量研究。目前的计算机模拟包括经验模拟、半物理模拟和物理模拟^[1]。就数值模拟的进展来看，对于大多数问题，要做到完全物理模拟都是不现实的，其间涉及许多细节问题，这些问题的理论解释，也可能各种各样。关于火灾烟气的理论研究已发展了较多的计算程序，它们以描述烟气运动传播规律居多，以区域模拟和场模拟为主^[26,27]。而火灾烟气在运动过程中发生的各种化学反应的计算则研究得较少。

目前在国际上已经发展的区域模拟模型中，一些单室及多室的模型可以处理复杂的可燃物分布和通风口流动，能考虑室内火灾中的各种传热方式，还能计算火灾中烟尘与毒性气体的浓度及对人员的危害等等^[1,26]。这些理论研究中，以美国的 CFAST (Consolidated Fire And Smoke Transport) 程序较著名，程序计算多室火灾烟气运动，并详细考虑了通风口流动和火灾过程中室内压力的变化^[26]。

场模拟是利用计算机求解火灾过程中状态参数的空间分布及其随时间变化的模拟方式。但烟气方面的工作还不够多。另外，国内还进行了场区 (FZ) 和场区网 (FZN) 模拟研究^[1]。

化学反应的计算目前在其它领域有一些相关的报道^[28,29]，要用之于烟气危害性研究则还需要做一些工作。对烟气中化学反应过程有少量讨论，目前所用计算模型还比较粗糙。

3.2 烟气计算应用模型的发展思路

预测火灾行为的分析模型发展得比较早，它对火灾中各部分具体过程建立了不同的相关模块，把它们集合到一起，就形成一个复杂综合的计算程序。这些模型中有一部分涉及烟气分布的计算。

归纳这些烟气计算方法可以发现，在进行烟气计算的时候，都先要针对实际现象找到计算的重点部分；由于烟气运动及其化学变化是一个综合作用过程，需要用到各个物理化学过程计算所必需的参

数, 所以就在各自的模型中根据自己的特点做出不同的简化处理。

总的计算框架如图 2:

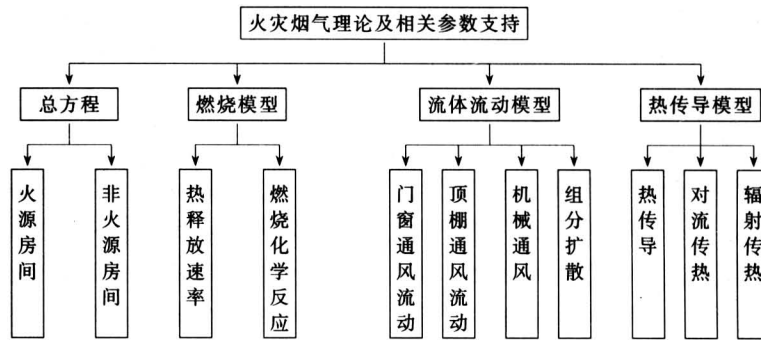


图 2 火灾烟气计算模块

Fig.2 Calculation model of fire smoke

不同的计算软件包括上面不同的某几部分, 针对要研究的主要问题, 在某一部分重点突破。通用软件则基本要包含上面的各个模块, 如 CFAST 以及最近的 FDS 等。在应用区域模拟模型计算时, 还要把火源房间分为上层热烟气层和下层冷空气层。

4 火灾烟气的危害性评价

4.1 烟气危害性评价方法的发展

早期研究烟气毒性问题的方法主要是分析烟气的不同成分, 并用它们的浓度为依据进行毒性评价^[3]。但对于人员短时期处于烟气环境中所产生的相关效应, 能利用的数据相当有限。因此, 火灾毒性的评价通常依据最低限值法 (threshold limit value) 或其他工业工作间的标准。但对更复杂的情况, 这种方法对火灾环境的限制条件就使其显得不适用了。

很多研究人员都采用测定生物对烟气的反应来评价其危害性, 主要以啮齿类动物作为研究对象。不过, 由于被采用的燃烧装置以及烟气与动物接触的机理各不相同, 因此较难对他们的分析方法进行比较。随着火灾烟气危害性研究的发展, 人们认识到火灾中人员在死亡之前有较长一段时间处于失去活动机能的状态, 这种状态是由于火灾烟气中一种或多种燃烧产物引起的。于是评价烟气毒性的问题就转向评定实验室动物“失去机能”的研究。

目前判定某材料毒性的主要指标是 EC_{50} (effect concentration of 50%), 即 50% 的生物在特定时间内产生某种反应时的烟气浓度。当反应表现

为死亡时, 就是 LC_{50} (lethality concentration of 50%); 当反应表现为丧失机能时, 就是 IC_{50} (incapacitation concentration of 50%)。

化学分析也能较准确地确定中毒反应由哪种燃烧产物引起, 这可以利用已测得火灾烟气各种成分的可信数据, 也可以基于已有知识在一定范围内预测毒性效力。在这一工作领域, 目前已发展了 N-气体模型和 FED 评价指标等^[31]。考虑到火灾的更复杂因素, 通过化学分析数据对烟气危害性进行评价的方法还需进一步发展。

4.2 烟气危害性评价理论方法

迄今研究重点大都放在有毒成分上, 因此在评价中主要考虑的情况如下: 1) 部分丧失机能反应出现时间, 这种反应的结果是耽误逃生; 2) 完全丧失机能反应出现时间, 这种反应的结果是阻碍逃生; 3) 在火灾环境中与烟气接触的情况将决定人员伤亡程度或死亡。

依据不同尺寸实验与数值模拟得到的数据, 一些评价方法基于以下几种指标^[30,31]建立:

- 1) LC_{50} 指标值;
- 2) 有害气体成分分析数据;
- 3) 毒性气体范围 (确定危害性评价指标的几种气体, 如 CO , CO_2 , O_2 , HCN , HCl , HBr 及 NO_x);
- 4) N-气体模型预测值;
- 5) 说明伤亡情况 (发生在气体接触过程中还是过程后)。

目前火灾危害性评价的方法还在继续发展与完善中。典型评价方法的流程如图 3:

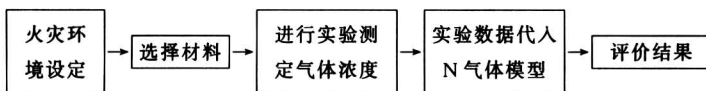


图3 烟气毒性评价方案

Fig.3 The evaluation method of smoke toxicity

美国 NIST 计划发展烟气危害评价更科学的方法^[32], 包括了以下任务: a. 积累毒性数据; b. 烟气输运数据; c. 生物行为数据; d. 常规火灾数据; e. 危险性计算; f. 材料反应产物; g. 社会经济分析; h. 防护方案及应用推广。国内今后还需加强这方面的研究工作。

5 对目前烟气研究方法的总结

从目前火灾烟气的研究进展来看, 实验方法与计算机模拟仍然是主要的研究方法, 并利用实验与计算结果对烟气危害性做出评价。

从实验研究的内容来看, 主要是不同尺度的生物测定实验与化学分析实验, 以及部分烟气物理性能模拟实验。

生物测定实验主要是观察动物丧失活动机能的时间或死亡时间。但是方法尚存不足, 如测试动物丧失机能时间, 有些方法是将动物放在转动笼中。当动物丧失活动能力时, 可以是烟气毒性伤害造成的, 也可以是动物疲累造成的, 不足以准确表示动物受烟气毒性伤害的因素。

化学分析实验主要是分析烟气中的各种成分。在分析测试方法方面, 目前存在一个问题就是成分分析的有效性。虽然大多数文献都提到使用色谱联用仪分析烟气成分, 但对于 CO, CO₂, NO_x, HCN 等无机气体成分, 气相色谱分离效果存在一些问题。这是因为, 虽然气相色谱对多数有机物的分离效果较好, 但对无机气体混合物, 由于组分间的相对保留值的差较小, 这将影响色谱峰的分​​离效果。

除了测试仪器问题外, 对烟气成分动态分析也存在问题。在实验过程中, 烟气的成分组除了燃料热解或燃烧反应产生的物质, 还有系统内热解或燃烧产物之间的反应, 以及这些产物在空间迁移过程中与壁面材料之间可能的反应。而这些反应随着时间的推移, 可能呈现不同的特点, 直接表现为成分的变化, 如果单采用气相色谱离散采样将造成分析上的一些困难。

再就是多点同时采样测量也是一个重大的技术

难题。在远离火源的位置, 烟气的成分与同时期火源产生的气体成分相比, 发生了哪些变化, 也是需要认真考虑的问题。

另外, 烟气在扩散过程中和墙壁壁面的物质可能发生化学反应。但这些化学变化的检测难度很高, 目前表面化学研究的问题较多集中在颗粒物表面反应。对于大平面表面物质与气体之间的反应研究, 文献相对较少。而且, 这种反应更可能是烟气传热造成的材料热解。这样的分析检测也应设计相关实验方案解决。

从计算机模拟的内容来看, 对烟气的研究主要集中在烟气的物理运动规律上, 对其间的化学反应过程报导相对较少。另一点就是大多数的计算机模拟建立在实验规律和经验公式的基础上, 完整的理论模型不多。由于实际火灾过程中受限空间的几何形状与大小以及通风作用对火与烟气的发展影响很大, 所以在计算机模拟研究的发展中, 需要把火灾随机性的计算和确定性的计算相结合。这也是计算机模拟研究的一个发展重点。

对烟气危害性的评价, 主要是生物评价与化学评价方法。目前, 尚缺乏具有较强说服力的判据, 评价的方法多种多样, 并且还在继续发展中。如美国 NIST 最新进行的项目 SEFS (international study of the sublethal effects of fire smoke on survival and health) 就把烟气危害性评价列为研究重点^[32]。因为目前很多评价都将主要对象集中在烟气中的毒性成分上, 而且 CO 被作为关注重点。这使得这种评价在过去一直被称为毒性评价。但实际上火灾烟气危害是多种物质的综合效应, 它主要包括了 1) 毒性效应 (CO、HCN 等) 引起人员昏迷, 丧失意识能力, 以及缺氧引起人体机能失常; 2) 窒息性效应 (CO₂ 等) 使人员缺氧, 并引起呼吸频率加快, 从而加速毒性效应; 3) 刺激性效应 (SO₂, HCl 等) 使呼吸道疼痛和呼吸困难, 喉部痉挛与支气管收缩以及数小时后肺部开始发炎等; 4) 灼伤性效应 (高温颗粒物) 使皮肤裸露部分与上呼吸道灼伤, 或放热造成过热环境阻碍逃生。

由此可见, 对烟气危害性的评价, 除了要评价

烟气体系的毒性, 还应考虑其中的多种因素, 这对加强评价方法的科学性起到重要的作用。

6 结束语

火灾事故中烟气是主要的伤害生命因素。通过发现与掌握火灾烟气对人体的伤害作用机制, 建立适当的评价指标, 可以对减少火灾损失, 保护人员生命起到积极的作用。目前在研究烟气的危害作用方面, 已经做了较多工作, 并且还在继续发展和更新。作者在已有研究成果基础上, 总结发现了各种还有待解决的问题, 同时对火灾烟气工作的研究方向提出了一些新的想法。

参考文献

- [1] 范维澄, 王清安, 姜冯辉, 等编著. 火灾简明学教程 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社. 1995
- [2] Levin B C, et al. Further Development of the N-Gas Mathematical Model [M]. Baithersburg, MD 20899: National Institute of Standards and Technology. Chapter 20
- [3] Vandsburger U, Richard J R. Dynamics, transport and chemical kinetics of compartment fire exhaust gases [R]. NIST-GCR-96-688. Issued June 1996
- [4] Harold L K, Arthur F G, Gordon Hartaell E. Combustion Toxicology Principles and Test Methods [M]. TECHNOMIC Publishing Co Inc. 1983
- [5] Potts W J, Lederer T S. A method for comparative testing of smoke toxicity [J]. Journal of Combustion Toxicology, 1977, 4: 114~162
- [6] Robinson R S, Dressler D P, Dugger D L, et al. Smoke toxicity of fire-retardant television cabinets [J]. Journal of Combustion Toxicology, 1977, 4: 435
- [7] Purser D A, Grimshaw P. The Incapacitative effects of exposure to the thermal decomposition products of polyurethane foams [A]. INTERFLAM 82, Conference Workbook [C], Guildford, England: University of Surrey, 1982. 71~80
- [8] Purser D A, woolley W D. Biological studies of combustion atmospheres [A], Conference on Smoke and Toxic Gases from Burning Plastics [C]. Queen Mary College of Industrial Research, Ltd, Fire Research Station, 1982
- [9] Tsuchiya Y. New Japanese standard test for combustion gas toxicity [J]. Journal of Combustion Toxicology, 1977, 4: 5~7
- [10] Saito F. Evaluation of the toxicity of combustion products [J]. Journal of Combustion Toxicology, 1977, 4: 32
- [11] Yamamoto K, Acute toxicity of the combustion products from various kinds of fibers [J] Z Rechtsmedizin, 1975, 76: 11~26
- [12] Kishitani K, Nakamura K. Toxicities of combustion products [J]. JFF/Combustion Toxicology, 1974, 1: 104~120
- [13] Gaume J G, Reibold R C, Spieth H H. Initial test of the combined ECG/T animal systems using carbon monoxide exposure. Journal of Combustion Toxicology, 1981, 8: 125~134
- [14] Dilley J V, Martin S B, Mckee R, et al. A smoke toxicity methodology. Journal of Combustion Toxicology, 1979, 6: 20~29
- [15] Rider E., Inhalation Toxicological Hazard Procedure [R]. Paper published by United States Testing Company, Incorporated, Hoboken, NJ.
- [16] Cornish H H, Barth M L, Hahn K J. Comparative Toxicology of Plastics During Thermo decomposition [R]. Department of Environment & Industrial Health, The University of Michigan.
- [17] Cornish H H, Hahn K J, Barth M L. Experimental toxicology of pyrolysis and combustion hazards [J]. Environmental Health Perspectives, 1975, 11: 191~196
- [18] Hartung R, Ball G L, et al. The performance of rats on a rotorod during exposure to combustion products of rigid polyurethane foams and wood [J]. Journal of Combustion Toxicology, 1977, 4: 506
- [19] Lawrence W H, Rage R R, Singh A R, et al. Toxicity of pyrolysis products: influence of experimental conditions. The MSTL/UT and NASA/JSC procedures [J]. Journal of Combustion Toxicology, 1978, 5: 39~53
- [20] Nunez L J, Hung G W, Autian J. Toxicity of fabric combustion products [J]. Journal of Combustion Toxicology, 1976, 3: 371~380
- [21] Einhorn I N, Packham S C, et al. The physiological and toxicological consequences of smoke produced during the combustion of polymeric materials [A]. 33rd Annual Technical Conference (ANTEC) of the Society of Society of Plastics-Engineers [C]. Atlanta, Georgia. 1975
- [22] Farrar D G, Galster W A. Biological end-points for the assessment of the toxicity of the products of combustion of materials. Fire and Materials, 1980, 4 (1): 50~58
- [23] Hartzell G E, Packham S C, et al. Physiological and

- behavioral responses to fire combustion products [A]. 4th SPI International Cellular Plastics Conference [C]. Montreal, Canada. 1976. 264~270
- [24] Grand A F. Toxicity of polymer combustion products-impact on the construction industry [A]. The Fire Retardant Chemicals Association [C]. San Francisco, California. 1978
- [25] Andersson B, et al. Simulated fires in substances of pesticide type [R]. Report 3087. Lund 1999
- [26] Richard D P, Glenn P F, Paul A R, et al. CFAST, the consolidated model of fire growth and smoke transport [R]. NIST Technical Note 1299
- [27] Fu Z, Hadjisophocleous G. A two-zone fire growth and smoke movement model for multi-compartment buildings[J]. Fire Safety Journal, 2000, 34:257~285
- [28] William M P, Application of thermodynamic and detailed chemical kinetic modeling to understanding combustion product generation in enclosure fires [J]. Fire Safety Journal, 1994, 23: 271~303
- [29] William M P. An algorithm for estimating carbon monoxide formation in enclosure fires [R]. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899 USA
- [30] Vytenis B, Richard H H, et al. The role of bench-scale test data in assessing real-scale fire toxicity [R]. NIST Technical Note 1284. 1991
- [31] Recharad G G, Vytenis B, Emil B, etc. Toxicity data for Fire harzard analysis [R]. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, 1994
- [32] Recharad G G, Jason D A, etc. International Study of the Sublethal Effects of Fire Smoke on Survival and Health (SEFS): Phase I Final Report [R]. NIST Technical Note 1439. 2001

Progress in study of Hazard Analysis of Fire Smoke

Huang Rui, Yang Lizhong, Fang Weifeng, Fan Weicheng

(State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230026, China)

[Abstract] In building fires, smoke is one of the primary factors which result in death. This paper summarizes the researches on experiment and theory about the smoke toxicity, and introduces the method for evaluation of smoke toxicity. Some suggestions on smoke toxicity research are also presented in this paper.

[Key words] building fires; smoke; toxicity; risk analysis

(cont. from p. 50)

Application of Mobile Agent in Intelligent Transportation System (ITS)

Zhang Yunyong, Liu Jinde

(MCI, Computer College of University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

[Abstract] The history and architecture of intelligent transportation system is reviewed. After the excellence of mobile agent is introduced, the application of mobile agent in intelligent transportation system is focused from the following fields: network management, wireless communication, traffic control system, simulation system and graphics information system.

[Key words] intelligent transportation system (ITS); mobile agent; traffic control system; graphics information system (GIS); agent communication language (ACL); agent transfer protocol (ATP)