

火灾安全科学—— 一个新兴交叉的工程科学领域

范维澄, 刘乃安

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

[摘要] 火灾安全科学致力于揭示火灾过程的机理和规律, 并且为火灾防治提供技术原理。20世纪后期以来, 火灾安全科学的发展令人瞩目。文章介绍了火灾安全科学兴起的背景和发展史, 论述了这门学科的任务, 并系统阐述了当前火灾安全技术层面的发展重点和需要解决的重要基础问题。

[关键词] 火灾; 火灾安全科学; 交叉科学

1 引言

自人类有史以来, 火灾就成为危害人类最持久、最剧烈的灾害之一。在经济高速发展的现代社会, 火灾的科学防治已经成为社会安全保障的重要组成部分。然而, 由于火灾现象自身的复杂性, 以及科学理论和科技手段等方面的限制, 人类对火灾的科学认识在历史上长期停留在表象观察和数据统计层次上, 一直未能形成以揭示火灾复杂性本质为目标的相应学科。20世纪70年代以来的二三十年间, 迅速崛起的燃烧理论、科学计算技术、非线性动力学理论、系统安全原理、宏观与小尺度动态测量技术、以及信息技术等, 为系统地针对火灾复杂性问题进行科学攻关提供了充分的理论支持和技术手段, 从而为火灾安全科学的发展创造了良好的契机。正因如此, 世界主要发达国家在80年代后期以来都开始针对前沿性的火灾科学问题开展国家级研究和国际间合作, 各国的火灾科学研究基地不断扩大, 国际火灾安全科学学会(International Association of Fire Safety Science, IAFSS)以及各地性的火灾科学技术协会也相继成立, 致力于团结各国的研究人员协力开展前沿性火灾安全科学研究。

作为一门以火这一古老现象为基本研究对象的新兴学科, 火灾安全科学以其鲜明的前沿性、交叉性和挑战性, 已经逐步发展成为一个特色鲜明、充满生机和活力的工程科学领域。

2 火灾安全科学的任务

火灾安全科学的迅猛发展有其深刻的社会背景。20世纪中叶以来, 战后的全球在经济复苏的同时也越来越感受到火灾的威胁, 火灾的剧烈程度与经济的发达程度往往呈现出正相关关系, 经济发达地区的火灾造成的损失一般远高于经济不发达地区。以我国1999年的火灾数据为例^[1], 图1是我国在该年的火灾直接损失(direct property losses, DPL)情况(不含森林、草原、军队火灾), 其中阴影标识的省份分别是我国沿海经济发达的江苏, 浙江, 福建, 山东与广东。可以看出, 在这些经济发达地区相应的火灾损失比其它经济较不发达地区的火灾损失要大得多。以上5个省份在1999年全年共发生60 549次火灾, 导致1 017人死亡, 受伤1 582人, 并造成 5.30×10^8 元直接财产损失, 这三项损失指标分别占中国当年总损失的37.1%, 34.6%和37.0%。34.7%的特(重)大火灾发生

[收稿日期] 2000-09-18

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59336140, 59936140)

[作者简介] 范维澄(1943-), 湖北鄂州市人, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室教授

在这 5 个省份，造成的损失占全国特（重）大火灾损失的 35.5%。大规模的森林和草原火灾在造成重大生命财产损失的同时，还往往对生态环境产生恶劣影响。1997 年的印度尼西亚森林火灾所产生的污染性烟尘波及一些东南亚国家，严重影响了这些国家正常的生活节奏，大火造成的生态平衡将给东南亚气候变化带来长期影响；1987 年的大兴安岭火灾和 1996 年的内蒙古森林草原火灾，都给我

国的生态环境造成了严重破坏。无论是在当今中国还是在其它国家，减少火灾对生产、生活及资源环境的危害都已经成为国家的重大需求。要满足这一重大需求，科技减灾是必由之路。火灾科技防治的总体目标是通过发展先进的火灾防治技术，并依赖科学的火灾安全工程设计体系和火灾的科学管理与应急预案体系，来实现火灾防治有效性和经济性的科学统一。

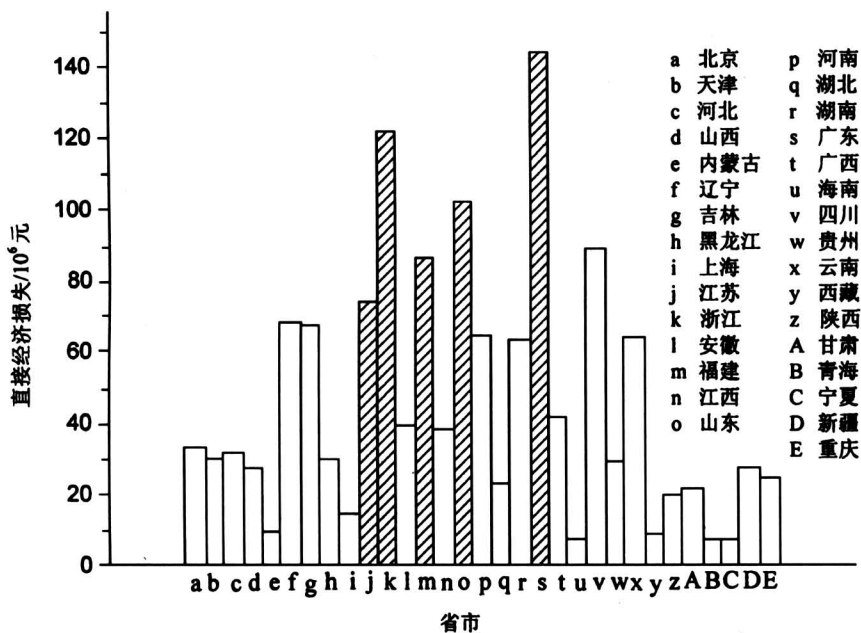


图 1 1999 年中国各省、自治区、直辖市火灾直接财产损失比较

Fig.1 Comparison of the fire induced DPL for all provinces in China (from the data of 1999)

火灾过程是一种具有复杂性本质的科学研究对象，其孕育、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，是一种涉及物质、动量、能量和化学组份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；该动力学过程还与作为外部因素的人、材料、环境及其它干预因素等发生相互作用。火灾的复杂性包括两方面的内容：①火灾确定性动力学系统的复杂性。这里所说的确定性，是指所考察的火灾动力学系统其环境条件和火源条件均已给定，从而对该系统火蔓延过程和烟气运动的动力学描述在数学上是确定的。这种确定性火灾动力学系统在物理和数学上表现出来的复杂性源于火灾系统自身各构成要素之间的耦合性和时空的非均匀性等非线性作用，以及火灾系统与其外部因素的耦合构成的非线性作用。②火灾的

随机性。当火灾被作为一种灾害事故来看待时，从总体上看，其发生原因、发生形式、发生环境、可燃物种类及其分布等诸多因素是不确定的，这就形成了火灾发生和发展的随机性。随机性是构成火灾复杂性的另一方面重要内容，也是一般灾害现象共有的特征。

对火灾的科学认识实际上就是对火灾的确定性和随机性这两种复杂性的深入认识。认识这两种复杂性的科学手段截然不同。研究火灾确定性规律的手段是模拟，包括实验模拟和计算模拟，描述方法是运用体现质量、动量、能量以及化学反应基本规律的微分方程或其简化形式；研究火灾随机性规律的手段是统计，描述方法是概率论。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，就是火灾安全科学的任务。

火灾安全科学作为一门交叉科学,它所具备的多学科交叉性是火灾双重复杂性在学科体系方面的具体体现。在基础自然科学方面,火灾安全科学直接与微分方程定性理论和数值方法,概率与统计,非线性动力学,流体力学,固体力学,及爆炸力学等数理学科,化学动力学和热化学等化学学科,以及生物质的热解与燃烧和生物体受热、烟、毒的损伤等生命科学的内容紧密相关;在工程技术学科方面,安全工程,工程热物理(热流体,单相和多相传热与燃烧),材料科学(热过程对材料性能的影响,敏感材料与元件,阻燃剂/材料的设计,合成与评价),及信息科技(计算机视觉,模式识别,人工智能,可视化技术,网络—远距—无线传输,资源的优化配置与调度)等,均是火灾安全科学必须与之紧密协同的学科;此外,火灾防治的科学管理有赖于从管理科学当中汲取营养。由此可见,火灾安全科学是一个涉及基础自然科学、工程技术科学和管理科学的多学科大跨度的交叉领域。

3 火灾安全科学的发展概况

3.1 燃烧学与火灾安全科学的关系

在火灾安全科学的发展进程中,现代燃烧理论理所当然是最重要的科学支撑之一,因为火灾现象本身实际上就是失去控制并造成危害的燃烧。20世纪70年代以来,随着燃烧基本理论,数学模型和激光诊断技术的发展,燃烧学由描述性的、半经验性的科学走向了严密科学。然而,基于化学流体力学的现代燃烧理论在成功地解决工程燃烧问题的同时,对于复杂的火灾问题却成效不大。工程燃烧学研究的课题主要致力于清洁、高效和经济地利用燃料,其研究对象的初始条件和边界条件是人为设计和控制的,环境条件也是容易控制的;而火灾安全科学则主要致力于环境条件不断变动的失控燃烧现象,即火灾现象。就火灾体系的可燃物和几何条件的复杂性与多变性、火灾体系受环境和气象因素影响的程度、火灾体系与灭火手段的相互影响、以及火灾体系与人的行为的相互影响等方面而言,火灾过程要比一般动力装置中的燃烧过程复杂得多,火灾系统所包含的非线性因素比工程燃烧系统要多很多。使用燃烧学中的化学流体力学方法来考察火灾问题一般要通过对火灾系统建立完整的(但往往是简化的)数学模型,然后通过数值计算等方法求解。这种方法在历史上形成了火灾现象的一种模拟

研究方法——场模拟(field modeling)方法。然而,由于火灾问题的复杂性,到目前为止,对场模拟理论的研究还基本上局限于学术界,而在实际应用中很少采用。而火灾安全科学是一门应用背景很强的学科,人们希望它的理论成果能够在较短时期内发挥作用。如果要等到解决了湍流化学流体力学问题,再去解决实际火灾问题,就如同先解决Navier-Stokes方程再去解决实际的水力学问题一样,是没有意义的。因此,火灾安全科学必须开辟独立的研究方法。

3.2 火灾安全科学基础研究的三个发展阶段

纵观火灾安全科学的发展史,其研究方法的发展大致可分为三个阶段。

第一阶段为火灾数据统计与分析阶段。这个阶段的理论基础是人们承认火灾的随机性规律。人们通过整理和分析大量的火灾原始资料,归纳出火灾发生的统计性规律,例如说明在什么季节、什么时间、哪些区域、哪些行业容易失火,并将研究结果用各种图表或曲线的形式表示出来。

第二阶段为火灾的统计分析模拟研究独立发展阶段。火灾研究开始与现代科学技术紧密结合,人们一方面继续运用先进的概率与统计理论来分析火灾数据的内在随机规律性,另一方面则通过火灾的模拟,研究火灾在一定条件下孕育、发生和发展的机理与规律。模拟研究的理论基础是承认火灾过程遵循确定性的规律,这种规律既可以在模拟实验中再现,也可以抽象成控制火灾过程的数学表达式(微分方程或代数方程)。模拟研究的意义在于,可以通过简化和近似,逐个研究影响火灾的各个分过程和各主要因素的作用,逐步揭示火灾的机理和规律。例如,用小型受限空间中的烟气运动模拟室内火灾烟气的运动,用燃料床在热风洞内的燃烧模拟在一定环境下的林火行为,等等。模拟研究的成果有较大的普遍性,因为模拟研究常常是针对火灾中的共性问题而开展的。但是,小尺寸模拟实验研究毕竟是在某种近似的条件下进行的,由于火灾过程的复杂性,严格的相似准则往往很难建立,实验模拟方案所包含的近似必然导致研究结果与实际的偏离。这种近似会带来多大的误差?带有误差的研究结果有没有实际意义?是否有更合理的近似?这些令人感兴趣的问题都需要在实体实验与模拟研究的对比中寻求答案。模拟研究与实体试验对火灾科学研究都是必不可少的研究手段。

另一种模拟研究方法是计算机模拟^[2~6]。在计算模拟理论方面，作为三种主要的火灾烟气流动模拟方法，区域模拟（zone modeling）、场模拟（field modeling）和场区网模拟（field-zone-network modeling）的研究都已经获得了很大的进步，其中前两项模拟理论已经相当完善。20 世纪 70 年代初，美国哈佛大学的 Emmons 教授将质量守恒、动量守恒、能量守恒和化学反应原理巧妙地运用到建筑火灾的研究上，发展了建筑火灾烟气区域模拟思想。这种模拟方法是将被研究的火灾区域划分为较少的几个部分进行简化模拟，目前基于这种方法的多个通用性程序已经发布，并已开始付诸应用。这种方法的缺点是无法得到流场的细节，同时对诸如气体卷吸等现象予以考虑相当困难。它的优点是对燃烧系统进行较大简化的同时，有可能保留火灾燃烧系统的复杂性机制，从而使得我们有可能以较小的计算代价来揭示火灾系统的复杂性特征。这一点早已经为很多的研究实例所验证。对于场模拟而言，模拟算法本身的复杂性和计算机能力的限制，使这种方法在理论上仍存在不少困难，难以在工程实际当中完全采用这种方法来模拟火灾过程。在国家自然科学基金委八五重点项目“火灾过程和防治中的热物理问题研究”当中，我国火灾科学家针对区域模拟和场模拟各自的不足，创造性地提出了分析建筑火灾烟气流动的场—区—网模拟思想^[7]，即对强火源或强通风的区域采用场模拟，对其邻近的区域采用区域模拟，而对相隔较远的区域采用网络模拟。这种模拟思想相对于区域模拟来说提高了模拟的精确性，而相对于场模拟来说降低了算法复杂性，因而被国内外学者认为是适合于高层建筑火灾烟气运动模拟的一种很有前途的方法，并已被英国和日本等国的相关研究机构采用。

与烟气运动直接相关的火蔓延过程，其计算模拟理论已经走过了从统计模型（statistical model）到经验性模型（empirical model），再到物理性模型（physical model）的科学发展历程^[8]。统计模型只对火灾实验进行统计描述；经验性模型则基于能量守恒原理建立火灾系统的数学描述，但不考虑火灾过程中动态的传热传质过程；物理性模型则要详细考虑控制火灾过程的热传导、热对流、热辐射、可燃物热解、质量输运和着火过程。

第三阶段为火灾的统计研究与模拟研究有机结合的阶段。火灾的规律既有确定性的一面，又有随

机性的一面。例如：给定环境和火源条件的室内火灾烟气的运动规律是确定的，这个规律可以通过模拟研究逐步认识，但是在实际的火灾过程中，众多因素（如风向与风速等环境因素）常常变化，而且这种变化往往带有随机性，从而导致了实际火灾发展过程的随机性。起火过程也是如此。人们不可能预测在一片森林的何处何时一定起火，因此起火研究的目标只能是给出起火的几率（可能性）随可燃物和气象等条件的变化趋势，而不是试图预报在一片森林或一个城市起火的确切地点和时间。在火灾系统这个时空范围内，众多影响火灾过程的因素的变化都不可避免地带有随机性，这就决定了火灾发生和发展规律的随机性。火灾具有确定性和随机性这双重规律性，决定了火灾安全科学在随机性研究和确定性研究彼此分立很长时期以后，必定要走向统一。而今，火灾安全科学的研究已经逐渐步入这个阶段，在这方面研究的深度和广度正不断扩大。

3.3 火灾安全技术层面研究的发展概况

火灾安全科学的任务不仅是为了科学地认识火灾过程的规律，而且还要为火灾的科学防治提供先进的技术原理。原理的提出一方面要基于对火灾过程的科学认识，另一方面要合理地利用和发展现有的其它工程学科的技术研究成果。在第 83 次香山科学会议的主题评述报告“火灾科学的新理论及洁净、智能防灭火技术”中^[9]，我国学者根据当前火灾防治技术的国际发展趋势，明确提出“智能与洁净”是火灾防治技术在新的发展阶段所应该追求的目标。所谓“智能化”，是从火灾的防治特性的角度来提出的。火灾发生的随机性与突发性，和火灾发展的迅猛性与破坏性，决定了火灾防治必须具备如下特性：①火灾监测的长期性和可靠性；②火灾探测的及时性和准确性；③火灾扑救的有效性和经济性。由此，火灾防治技术系统的特征应当是：①各种技术在火灾系统中所体现的综合性；②技术之间存在的相互关联性；③各种技术依据火灾规律而动作的有序性。研究能够实现这些特征的火灾防治技术系统，其目标必定是具备智能化功能的系统。“洁净化”是从火灾的环境特性的角度提出的。火灾是一个开放系统，与周围的环境存在着能量和质量的交换，这种交换的必然结果是人类生存环境受到污染。直接由火灾造成的污染称为“一次性环境污染”，而对“一次性环境污染”进行控制的手段不当造成的新的污染称为“二次性环境污染”。

洁净化火灾防治技术致力于在有效地进行火灾防治的过程中不产生或少产生这两种污染。

已经发展和正在发展的火灾安全技术原理贯穿火灾发生和发展的全过程。例如,从防止火灾发生和发展的角度进行洁净的阻燃和防火材料的研究,和从火灾扑救过程的角度进行洁净灭火剂的研究,等等。含卤聚合物在阻燃技术发展中曾发挥过很大作用,但因燃烧时产生大量的有毒、有害气体,并且其中的卤化氢物质遇水后极易形成酸性物,造成酸雨,因此是容易造成“二次性环境污染”的一种阻燃技术。低卤阻燃抑烟化技术就成为了目前洁净火灾防治技术的前沿性研究课题。再例如,在灭火剂中,因产生“二次性环境污染”而受到普遍关注的哈龙灭火剂,已经被世界上不少国家限制使用甚至停止生产和使用。要根除灭火剂所造成的“二次性环境污染”,最彻底的方法是采用不发生化学反应的防火或灭火物质。目前认为,最理想的这类物质可能就是水。先进的水喷淋灭火技术和水雾灭火技术是当前的热门研究课题。

除了火灾防治技术原理的研究之外,火灾安全工程设计方法学也是火灾安全科学在技术层面上的重要研究课题。由于火灾过程的复杂性,火灾作为灾害事件的偶发性,以及现有信息资料和理论知识的不完备性,使得火灾风险评估体系不能期望建立在对灾害自身确定性规律的完备认识的基础上,风险评估本身既涉及确定性又涉及不确定性,而其不确定性既包含随机不确定性又包含模糊不确定性。迄今,火灾风险评估的方法学已成为火灾科学基础研究中的另一重要课题,其研究内容同时涉及到灾害的自然属性和社会属性两个方面。在火灾机理和规律已有知识的基础上,运用数值模拟技术,统计理论,随机过程理论和模糊数学理论的火灾风险评估方法已经开始受到学术界的广泛重视,其基础理论方面的研究方兴未艾。

3.4 小结

作为火灾安全科学的两项主要内容,科学地认识火灾过程,与科学地发展火灾防治技术,这两方面迄今都已经得到了很大的发展,在发展过程中它们始终保持相互依赖与促进的关系。一方面,对火灾过程的科学认识是发展火灾防治技术的基础,同时也是发展火灾安全工程设计方法和建立火灾系统的科学管理与决策体系的前提。基础层面的理论成果能不断提供新技术发展所必需的新思想和新的理

论方法,为技术原理的发展提供科学依据;另一方面,实际的火灾防治不断通过技术层面的研究内容对基础研究提出要求,从而刺激和推动火灾安全基础研究的发展。基础研究建立的理论和方法,也必须通过技术层面的研究,进而通过实际的技术应用,在实际的火灾防治当中去得到检验与修正。

4 当前火灾安全技术层面的发展重点

当前,全球对火灾科学防治越来越高的要求促使火灾安全工程在技术层面上必须发生以下三个转变:

(1)由被动式的灾害防治技术向以“清洁阻燃、智能探测、清洁快速定位”为主要环节的主动式灾害防治技术的转变;

(2)由传统的“处方式”设计向科学的安全工程设计的转变;

(3)由火灾防治的传统管理模式向科学管理和应急预案模式的转变。

这三个革命性转变的实现依赖于在火灾安全工程关键技术环节上的创新。火灾安全工程的关键环节主要包括以下六个方面:①火灾危险源和隐患的辨识与评价;②阻燃;③早期、迅速、准确地探测;④灭火和救援;⑤火灾安全工程性能设计;⑥火灾防治的日常管理与应急预案。

4.1 以量化和动态为特征的火灾危险性评估

火灾的双重性规律决定了科学的危险性评估方法应该既考虑确定性规律又涉及不确定性(包含随机不确定性和模糊不确定性)规律,这就决定了火灾危险性评估的发展趋势为:①建立评价危险源的指标体系和量化方法,并利用模糊数学和信息扩散理论等建立基于不完备样本的风险评估统计模型。②利用数据库技术,综合考虑所考察对象的环境因素,建立基于火灾确定性规律的动态风险评估模型。

4.2 “清洁阻燃、智能探测和清洁快速高效定位灭火”的新一代火灾防治技术

清洁高效阻燃技术应保证在尽可能降低阻燃材料的可燃性、提高其耐火性的同时,在阻燃材料的生产、使用过程中无毒,不产生大量烟气;性能稳定、耐用。无卤清洁复合阻燃剂和聚合物/层状无机物纳米复合材料是这方面发展的重点。

实践中发现,以单一物理参量阈值型的方式进行火灾监测,常常是传统火灾探测中误报警的根

源。解决误报警问题已成为提高火灾探测准确性的关键所在。重点需要发展基于神经网络、模糊逻辑的多信号、多判据探测技术，其中，对气体的探测技术，无线探测与预警技术，图象模式识别型感火、烟和感过热技术是发展的重点^[10]。在监控技术方面，应重点发展火灾监控与楼宇安全及管理的系统集成技术。

现代社会对抑制灾害的方法提出更高的要求，即：快速响应，灭火高效，对环境和逃生人员安全，对扑救和防护对象无破坏作用，特别是能迅速应付特殊灾害行为的挑战。对于灭火剂来说，哈龙灭火剂的替代物是当前的发展重点，诱导疏散的声光技术等也须得到重点发展。

4.3 以危险性评估和灾害动力学演化理论为基础的性能设计

火灾安全工程设计的最终目标是，将公共消防工作建立在性能化火灾法规（这种性能化火灾法规以火灾危险性评估和火灾过程模拟为依据）的基础上。性能设计是对传统的“处方式”建筑防火设计体系的改革和补充。这方面需要重点发展的技术和方法包括：①“安全性能”的量化评估方法；②常用材料与建筑结构在常规及灾害环境中的安全性能数据库；③火灾动力学演化过程的计算机模拟仿真技术；④经济性分析方法；等等。

4.4 以3S (GIS、GPS、RS) 和火灾确定性规律为基础的安全科学管理和应急预案

城市火灾安全工程综合管理系统包括基于地理信息系统、管理科学、人工智能、软件工程等领域先进成果的城市火灾安全工程地理信息超媒体数据库，基于地理信息系统并结合火灾虚拟现实、GIS、GPS和RS技术的城市消防和救援指挥调度技术，以及基于地理信息系统的空间分析功能和路网分析功能的消防力量的优化配置技术等。

5 火灾安全科学的重要基础研究问题

针对以上的火灾安全技术层面的发展重点，当前火灾安全科学需要研究的重要基础问题包括：

(1) 可燃物动力学系统成灾的突变

可燃物动力学系统火灾的形成在数学上对应于该系统在一定的参数条件下所发生的突变过程，对该过程的研究是揭示火灾形成机理的关键问题。这方面的研究重点包括两方面内容：①凝固相可燃物动力学系统由无焰氧化向灾害转化的突变机理；②

工业过程可燃混合物动力学系统的突变机理。无焰氧化包含常温氧化和阴燃。中国是以煤为主要能源的大国，而常温氧化现象引起我国煤田自燃年损失优质煤达1000万吨；森林大火很多也都是由于林地可燃物发生常温氧化引起的；常温氧化现象还引起我国大型粮库发生自燃和微爆现象，损失巨大。阴燃是另一种无焰氧化现象。相对于常温氧化来说，阴燃的温度一般很高。阴燃是造成火灾的最常见原因之一。工业可燃混合物的火灾与爆炸现象紧密相关，我国每年因瓦斯、煤尘、气云和其它粉尘的爆炸造成巨大的人员伤亡。所有这些典型的成灾过程，它们的共性科学问题是可燃物动力学系统由一般稳定态向灾害突变的机理，因此需要重点研究典型可燃物常温确定性动力学系统解的结构，稳定性变化和突变机理。

(2) 大规模森林火灾的预测

大规模森林火灾临界危险状态及重灾年、季的早期辨识和预测，对有效地预防和能动地控制森林火灾具有极为重要的意义。迄今，基于元胞自动机和分形学的森林火灾模型已经成为研究自然系统的一般相变现象和自组织临界性的最佳模型^[11~14]。当前这方面研究正试图综合运用非平衡态统计热力学、耗散结构自组织理论、突变理论、相变理论、动力系统理论、分形学和元胞自动机理论等，探索大规模森林火灾的自组织临界性形成机理，及其作为非线性非平衡复杂系统所具有的自组织临界行为的规律，从而揭示大规模森林火灾气象环境模态、成因规律，林火重灾年、季的成因机理，以及大规模森林火灾与全球气候变化的关系，最终建立森林火灾的早期跟踪、辨识和预测理论。

(3) 火蔓延和烟气运动的模拟理论

火的蔓延速度和强度是造成灾害损失大小的关键因素，而烟气常常是致人于死地的罪魁祸首，因此火蔓延和烟气运动的机理是火灾发展过程的研究重点。这方面研究主要包括：

① 凝固相火蔓延和烟气运动的模拟方法；

主要研究典型固液可燃物表面（油品、森林和草原）火蔓延过程的机理和规律，以及大坡度、峡谷地形和地理气象环境因素对火蔓延过程的影响，建立在这种影响下的火行为模型；研究火灾烟气在开放、受限和网络空间中的运动规律。

② 特殊火行为的非线性动力学^[15]

特殊火行为如建筑物中的轰燃和热烟气回燃、

高山峡谷中林火的蔓延、矿井火灾中通风网络风流紊乱等,往往危害极大,而迄今人们对这些现象机制的认识还很肤浅。这方面研究着重于探索树冠火、飞火、火旋风、轰燃、回燃以及网络空间烟流滚退、逆转与节流等特殊火行为的特征及其非线性动力学机理。特殊火行为的复杂性源于它的非线性,控制其演化的微分方程组也是多维的和非线性的,但目前的通用数值方法(离散化方法和离散化得到的代数方程组的求解方法)是线性化的,从而在求解过程中破坏、掩盖和抹杀了原控制方程组及火灾体系的非线性特征。随着非线性动力学的发展,目前就某些特定的简化了的体系可以建立其特有的控制方程和数值方法,得到能反映其非线性特征的数值解,但具有一定通用性的非线性理论模型及能反映其非线性特征的数值方法还远未建立。

(4) 火灾风险评估方法学中的基础问题

① 基于火灾确定性规律的危险性统计评价方法。

传统的风险评估方法只是从统计学的角度来构建其理论体系。如何结合确定性动力学演化理论与统计理论来发展建立在对火灾演化机理和规律现有认识基础上的事件树分析和故障树分析等危险性统计评价方法,是火灾风险评估方法学的重要研究课题。

② 火灾风险的动态模型。

对火灾风险分析而言,基于统计理论的分析方法总体上是一种静态分析方法。运用随机过程模型构建评价火灾风险的动态模型,借此研究某一系统特定条件下发生火灾后风险概率的时间分布,发展体现火灾随时间传播过程的风险评估理论,也是值得深入研究的课题。

③ 小样本火灾事件的风险评估。

样本有限是火灾等灾害现象共同的特点。在灾害事件样本有限的情况下,如何对火灾风险进行分析,是现实中经常遇到的问题。研究的重点在于运用信息扩散等模糊数学处理方法优化利用火灾样本模糊信息,研究的重要工具是仍在不断发展的小样本统计理论。

(5) 火灾防治高新技术原理中的基础问题

在阻燃材料的研究方面,阻燃聚合物分子设计、阻燃聚合物/层状无机物纳米复合材料的结构控制与阻燃原理是需要重点研究的基础课题;在探测技术基础方面,以图像火灾探测算法为代表的智

能算法代表了当今火灾探测算法的重要研究方向;在灭火技术原理方面,需要重点研究水雾和凝胶等与火相互作用的机理和规律。

(6) 多变量离散事件动态系统的优化控制理论

研究关于火灾扑救与调度指挥过程的多变量离散事件动态系统的优化控制建模与决策理论,建立基于GIS, GPS和RS技术的城市与地区火灾扑救与调度指挥优化智能控制模型。

6 结束语

在火灾安全科学作为一门学科获得国际广泛认同并得到蓬勃发展的同时,我国在火灾安全领域也相继部署了以火灾科学国家重点实验室为代表的多个国家和部委级研究基地,并已取得了令国内外瞩目的进展^[16-25]。

在火灾烟气研究中,我国学者提出并发展了场一区一网模拟理论,重点研究和解决了三种模拟方式界面的处理,并建立了体现浮力影响,碳黑的生成与运输,湍流及热辐射相互作用的综合理论模型^[17]。目前这方面的研究已成为国际火灾安全科学基础研究的热点之一。

为适应我国航天领域高科技发展的要求,我们进行了微重力条件下火灾过程的研究,首次阐明了微重力场中可燃表面热解的“表面燃料喷射效应”的重要作用,并首次实现了气固耦合燃烧的理论模型及多维非定常数值模拟,揭示了微重力条件下火焰传播的一些独特现象的机理^[18]。

在工业火灾方面,我们利用自行研制的扬沸火灾模拟实验台,通过不同尺度的模拟实验,创立了在大环境噪声条件下,扬沸前兆噪声的辨识方法^[19]。

在火灾非线性动力学方面,我国已经开始了将非线性的理论和实验方法用于火灾过程的研究。非线性问题并不是一个近期才引起重视的新问题,但将非线性科学的概念引入到火灾安全科学,在国际上还处于起步阶段。我们从理论上推导了湍流扩散火焰的分形面随表征湍流扩散的化学当量比分形截面以及湍流预混火焰传播速度的变化,首次得到了湍流扩散火焰面分形维数随化学当量比分形维数和湍流预混火焰平均传播速度的重要关系。针对矿井通风系统中经常发生的风机“喘振”、风网“激振”等失稳现象,我们利用非线性动力学分析方法建立了通风系统的非线性数学模型,初步解释了通风系

统运动和结构稳定性的变化及分岔过程。

以认识火灾早期特性为目标，我们成功地发展了描述生物质材料热解失重行为的“双组分分阶段一级反应动力学模型”^[20]，该模型为生物质着火过程和火蔓延过程的模拟提供了可靠的热解失重动力学描述。

在大空间建筑火灾的探测和扑救方面，我们针对目前普遍存在的火灾误报、漏报和报警延误等问题，通过对火灾的热、烟、色、形、光谱及运动特性的研究，提出了基于火灾早期影像特征的火灾图象多重识别模式，并首次实现了火灾的真三维定位；针对火焰遮挡问题，建立了多光束、多目标、大面积光截面感烟技术^[22]。基于这些技术原理发展的大空间火灾探测、报警及空间定位技术已经成功地应用于一些国家重要部门（如中央电视台、首都体育馆和人民大会堂）中，取得了巨大的社会和经济效益。

在过去二十年间，我国的火灾安全科技界在火灾安全基础研究和应用基础研究方面，已经取得了十分令人鼓舞的成就。火灾安全科技在中国乃至全球的发展，将有希望给人类带来一个几乎可以免受火灾危害的地球。应该看到，就整体研究水平而言，我们与发达国家还有较大差距，但无庸讳言，中国的火灾安全研究在科学积累，实验装备，信息资料积累，研究队伍建设和国内外学术合作等诸方面已经有了很好的基础，具备了在火灾安全关键科学问题上取得突破性进展的能力，在新世纪必将大有作为。

致谢：本文的完成得到国家科技部九五攻关项目“重大工业事故与建筑火灾的预防和控制技术的研究”，国家自然科学基金委重点项目“火灾防治中的热物理问题研究”（59336140）和“若干特殊火行为研究”（59936140）的资助，特此表示感谢。

参考文献

- [1] 公安部消防局主编. 中国火灾统计年鉴 2000 版 [M]. 北京: 中国人民公安大学出版社, 2000
- [2] 周力行. 燃烧理论和化学流体力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1986
- [3] 王应时, 范维澄, 周力行, 等. 燃烧过程的数值计算 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [4] Fan W C. Computer modeling of combustion processes [M]. International Academic Publishers and Pergamon Press, 1991.
- [5] Beard A. Limitations of computer models [J]. Fire Safety Journal, 1992, 18, 375~391
- [6] Cox G. The challenge of fire modelling [J]. Fire Safety Journal 1994, 23, 123~132.
- [7] 范维澄主编. 火灾科学导论 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1993.
- [8] Weber R O. Modelling fire spread through fuel beds [J]. Prog Energy Combust Sci, 1991, 17, 67~82
- [9] 范维澄, 程晓舫, 谢之康. 火灾科学的新理论及洁净、智能防灭火技术 [A]. 北京第 83 次香山科学会议主题评述报告 [C]. 1997, 16~20
- [10] 吴龙标, 袁宏永. 火灾探测与控制工程 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999.
- [11] Malamud B D, Morein G, Turcotte D L. Forest fires: An example of self-organized critical behavior [J]. Science, 1998, 281, 1840~1842.
- [12] Patzlaff H, Trimper S. Analytical approach to the forest-fire model [J]. Physics Letter A, 1994, 189, 187~192.
- [13] Grassberger P. On a Self-organized critical forest-fire model [J]. J Phys A: Math Gen, 1993, 26, 2081~2089.
- [14] Wybo J L. FMIS: A decision support system for forest fire prevention and fighting [J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 1998, 45, 127~131
- [15] Fan W C. On the nonlinear fire dynamics [A]. Proceedings of the Third Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology [C]. Singapore, 1998
- [16] 赵宪文. 森林火灾预报的新视角 [J]. 中国工程科学, 2000, (5): 66~71.
- [17] Fu Z, Fan W C. A Zone-type Model for a building fire and its sensitivity analysis [J]. Fire and Materials, 1996, 20, 215~224
- [18] Jiang X, Fan W C. Numerical prediction of flame spread over solid combustibles in a microgravity environment [J]. Fire Safety Journal, 1995, 24, 279~298
- [19] Hua J S, Fan W C, Liao G X. Study and prediction of boilover in liquid pool fires with a water sublayer using micro-explosion noise phenomena [J]. Fire Safety Journal, 1998, 30, 269~291
- [20] Liu N A, Fan W C. Modelling thermal decomposition of wood and leave under a nitrogen atmosphere [J]. Fire and Materials, 1998, 22, 103~108
- [21] 李杰, 宋建学. 城市火灾危险性分析 [J]. 自然灾害学报, 1995, 4 (2): 98~103
- [22] 袁宏永等. 大空间室内火灾早期自动探测与定位研究 [J]. 自然灾害学报, 1995, 4 (2): 104~108

- [23] 郝建春, 王乃岩. 烟火材料的自燃与对策[J]. 中国安全科学学报, 1997, 7 (4): 48~52 (6): 59~63
- [24] 蔡永乐, 侯千亮, 周心权. 均压防灭火定量分析技术研究及其应用[J]. 中国安全科学学报, 1999, 9 (3): 38~43
- [25] 董希琳, 田丽. 湿煤堆自热过程的非稳态数学模拟[J]. 中国安全科学学报, 1999, 9 (3): 38~43

Fire Safety Science

—A Promising and Interdisciplinary Engineering Scientific Field

Fan Weicheng, Liu Naian

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

[Abstract] During the past several decades, much progress has been made in fire safety science which aims at understanding the complexities of fire behavior as well as providing the technological principle for fire safety engineering. In this paper, the background and history of fire safety science are reviewed, the major fire safety technological principles to be developed are summarized, and the significant fundamental research topics are outlined in detail.

[Key words] fire; fire safety science; interdisciplinary science

《中国工程科学》2001年第3卷第2期要目预告

- | | | | |
|---------------------------|-----|-----------------------------------|------|
| 我国林产化学工业发展的新动向 | 宋湛谦 | 煤与瓦斯突出潜在危险区(带)预测 | |
| 中国海洋渔业可持续发展及其高技术需求 | | | 鲜学福等 |
| | 唐启升 | 超声血流的无创伤检测和医学信号的特征提取 | |
| 混沌工程学 | 龙运佳 | | 王威琪等 |
| 高能激光与应用光学的几个问题 | 杜祥琬 | 导弹特种装备与训练模拟系统研制 | 黄先祥等 |
| 我国天然橡胶业面临的挑战和发展 | 黄宗道 | CO气相偶联制草酸模拟放大研究 | 王保伟等 |
| 民用支线飞机发展浅析 | 陈一坚 | 半导体材料器件工艺中废气废水的综合治理方法及设备 | 闻瑞梅等 |
| 21世纪的大洋综合钻探计划即将付诸实施 | | 新一代潜在阻燃高分子材料——聚合物/无机物纳米复合材料 | 欧育湘等 |
| | 刘广志 | 我国三十烷醇研究进展及其在农业上的应用前景 | 刘德盛等 |
| 区域水资源可持续利用评价理论模型与方法 | | | |
| | 陈守煜 | | |
| 基于粗集方法的智能专家系统 | 曾黄麟 | | |