

# 火灾科学的更远期历史

[美]哈佛大学 H. W. Emmons

在祝贺 Howard Emmons 的火灾研究学术会议（美国首都华盛顿，1983）上的报告。

我的“火灾科学的历史”<sup>1)</sup>是从20世纪中期开始描述300年以前的历史的。我选择这样的开始时间，是因为在那时公众对火灾已经有了很严肃认真的了解，并且已经有了城市火灾的法规和各种各样已被批准的试验和标准。诚然，所有这些几乎完全是经验的，但是，对于用科学方法来开展火灾基础研究的重要性的认识正在发展，并且计算机（当时正处于发展初期）正在使定量火灾理论有了可能。

对我们来说，在今天要去了解在那个早期的社会火灾问题的状况非常困难。当然，今天，当发生任何重大的火灾时，特别是如果有人丧生时，我们都感到震惊。在20世纪，差不多在每个城市中几乎没有一天没有严重火灾的报告，并且每年都有成千上万人死于火灾。

在那个时候，消防工作不过是通过详细规定什么必须做，什么一定不能做这样一些城市建筑法规来予以控制而已。它们是一些**规定性**的法规（specification codes），显然是很不满足要求的。第一批**性能性**的火灾法规（performance fire codes），一直到2000年时也不会制定，要到火灾知识和积累的有关火灾经验数据对一般建筑物的火灾能作出足够准确的预测时，才会出现这种性能性的火灾法规。

到20世纪中期，经典动力学、经典量子化学和计算机都已经进展到第一次有可能解决较简单的火灾科学问题的地步。大量的塑料和其他新的材料已在用于制造家具、设备和用具。这些材料中许多是由当时的丰富天然石油供应品制成的。它们除去阻燃物外，全都是非常易燃的。而许多阻燃物，卤素，磷酸盐和铵等都有带来高温分解或放出火灾有毒气体的问题。

不久前刚刚发现石棉是致癌物质，而在今天如此普遍的无数不可燃的矿物基硬泡沫材料和软泡沫材料则尚未发现。

化学反应的性质、化学计算法和热力学已经发展得相当令人满意，但化学动力学（chemical kinetics）在那时却是一个前沿研究领域。尽管那时的量子化学能够“原则上”解决上述这些问题。但还完全不足以说出什么对火灾科学有用的东西。因此对高温分解和燃烧的浅薄的了解基本上全部是经验的。那时的火灾法规规定了各种称为易燃性的试验，好象易燃性是一种材料特性而不是一种系统特性。一点也不令人感到意外的是，小尺度的易燃性试验是真实火灾有名的蹩脚的仿真，而较大尺度的试验、角隅试验或房间试验，充其量也仅

1) 为祝贺 Philip Thomas 的贡献而举行的学术讨论会上的论文（见 Emmons 1981），简要地综述了历史的黎明时期至1980年火灾科学的进展。

仅是应用性有限的一些火灾模型。

到1980年已经知道，火灾发展的大部分过程是由动力学控制的，各种分问题<sup>1)</sup>的基本情况在某种实用程度上已经解决了。无燃烧的自由飘缕(plume)，热气层的发展，通过孔口的强制流动和浮力流动，都有了采用适当的经验系数来把实际理论中未包括的粘性效应和湍流效应考虑进去的切实可行的解。实际上，合适的物理定律及其以多组分流动方程予以具体化已经是完善的，不过湍流仍然是一个未解决的问题，以致在实用理论中的系数尽管“原则上”可能计算，但实际上是不能计算的。

已知辐射传热在大火灾的火势蔓延中是能量反馈的主要方式。事实上，如果化学物质、温度和压力分布是已知的，那就足以把辐射和物质的相互作用知识提高到能对辐射传热作高精度计算的水平。然而，关于火焰的统计性质，则甚至在经验上也基本是一无所知的。甚至火焰平均性质的测量，也只在非常有限情况下进行，以致对真实火灾只能作粗略的推测。从理论的目的来看，火焰通常是均匀温度均匀发射率的圆锥体或圆柱体。在已知成分的污染大气中，对于给定的燃烧塑料，其温度和发射率都不能精确得知。并且事实上，通常不论是对材料还是对周围情况，二者都不能精确地知道。

虽然已知不完全燃烧的有毒产物是火灾造成死亡的主要原因，但是，不论是关于有毒气体的产生和输运，或是关于它们的生理效应的详细细节等知识，都还处于最初期的研究状态。在以下几方面仍然存在着基本争论：材料应该怎样被高温分解或燃烧，各种老鼠是否应该作为试验生物体，支架弯曲或轮子转动是否应该是优先选择的试验方法。复合材料的真实火灾效应一点也没有研究，而当火灾气体聚集在天花板上，燃烧和流出门外并且最终进入太平通道时，这些气体的有毒性质如何变化，这方面没有得到任何资料。

到了80年代，已经知道现有火灾试验方法的局限性，角隅试验和房间试验已开始被采用，并且有了需要什么样的新型式试验方法的讨论。然而，要到1995年，才能普遍地首次获得新的试验方法，这种方法能提供火灾蔓延速率、高温分解速率和提供高温分解、阴燃及有焰燃烧所产生的粗略成分( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $(\text{CH}_2)_x$ )的数据。这些试验包括控制外部辐射，但对大气的污染则控制不了多少。

这样，在70年代末开始的火灾的实用数学模拟，到1990年，在某种实用程度上已经能充分地推广到多层建筑上，但这种数学模拟还不能支持性能性的火灾法规，因为没有足够的有关家具用品项目的经验数据。计算机代码正在快速发展，并且被用于各种研究的目的和用在偶然的火灾讼争中。

很清楚，到2000年时，不但需要有高度精确的计算机代码，还需要有许多满足特殊目的的实用代码。这些实用计算机代码是一些粗略的分区模型，在那时，如同今天是正确的一样，对它们的设计目的来讲是充分精确的。只有高度精确的代码，才能不断以最新的和最好的资料来予以完善。

因为可获得的经验数据有限，所以实用代码的应用非常有限。而精确的代码则受到可获得的数据和当时最好计算机的计算能力二者的限制。

20世纪的最后25年，在火灾的分现象的进展方面是一个给人以深刻印象的时期。这是一

1) 参看: Emmons HW, 关于火灾科学进展, 力学进展, 11, 3 (1981): 278—285.——译者

个必要的预备工作，因为如果没有对火灾的各个组成单元的足够的定量了解，那就不可能把它们综合起来研究整个火灾现象本身。

已经发展了包括高温分解、阴燃、火焰蔓延和炭化的固体方面火灾扩大的模型，目的是把各种材料的经验数据在某种有用的、预言性的程度上组织在一起。这项工作对火灾的实用分区模型来说是必不可少的。然而，缺少热分解和燃烧化学的详细知识，就不可能对火灾扩大、燃烧和气体毒性作出足够精确的定量预测。

尽管有根本性的困难，但在了解火灾扩大方面已取得了很大进展。对处于水平的（地板），垂直的（墙）和水平的（天花板）位置上的燃料表面，全都进行了研究。各种基本经验数据的关系式使得用大量经验系数来作预测有了可能。最重要的贡献是发展了预测炭化材料性质的满足要求的理论。这些炭化材料不但包括天然塑料和木材，而且包括当时应用的大多数塑料。

已经经验地阐明了在房间天花板上和自通风口喷出的火焰中，污染的火灾气体的着火和燃烧并作了预测。另外，已经发现了靠近地板处出现的空中火焰，这种空中火焰自通风口喷出而加入受充分通风控制的房间火灾中，并且已经证明它的行为就象在顶部向外流动的火焰一样。

因为辐射是主要的能量反馈过程，所以在烟垢产生方面已做了广泛的工作。已经取得了许多基本的进展。但是化学动力学的复杂性及其与火灾动力学——湍流和辐射——的相互作用却妨碍了有用的定量预测。然而，这些知识提出了确定烟垢系数及其相关性的方法，这提供了有用的烟垢预测的经验基础。

因为在烟垢预测方面取得了进展，所以就有可能更精确地预测来自扩散火焰和预混火焰两方面的辐射。这些改进了的知识已用在精确的计算机代码中，但实用的代码却常使用简化的近似。

虽然精确的代码和某些实用的代码继续使用以计算为目的的系数，但对许多设计目的来说是足够好的更流行的代码，则使用了辐射率池的方法。约在1990年发展成有用形式的这种方法，假设来自所有物体的所有辐射，都被纳入一个池子内，然后按所有物体表面积的比例送到所有物体中。尽管这种方法精确度低，但发现所产生的误差与在家具及设备的易燃性、位置和数量方面所允许的实际变化量是同一量级。这种方法今天并未使用，因为现代城市火灾法规要求说明和限制公共建筑物的许可火灾负荷<sup>1)</sup>，并且要求所有购置物品的火灾指标允许每个住户限制住宅的易燃性。当然，对发生住宅火灾的罚款使执行火灾指标成为现实。

在2000年前已经充分发展了无火焰飘缕的实用了解。对自由飘缕、墙旁飘缕、逸出通风口的飘缕、床旁飘缕和桌下飘缕等等的广泛实用理论和测量全都进行了研究，并且都已归结为合理精确的预测方法。

虽然在发展有火焰飘缕的理论方面已经做了若干努力，但此问题与化学动力学、湍流和辐射交换如此紧密相连，以致到2020年还不能得到能够应用的结果。因而还必须采用粗略的近似，这些近似是经验的热释放率形式的近似，对于飘缕计算，热的释放假设发生在燃料表面上。

1) 火灾负荷指建筑物一定空间内可燃材料所具有的潜热。——译者

在接近20世纪末的时期,对有关着火、灭火和抑制火灾的问题给予了很大的注意。尽管对这些问题,特别是喷水灭火系统,进行了大量根本性的基础工作,但逐渐搞清楚了,化学动力学起着基本的作用,因此真正的根本性解决由于化学的复杂性和缺乏基础量子化学而受到了阻碍。

在这同一时期,有关毒性的工作跨出了试验单一材料的小烟炉,而变成了预测在远距离太平通道中免受火灾气体之害的较大的安全问题。注视遍及建筑物的每一种已知的有毒化合物随时间变化的明显思想,正受到了确定火灾气体的毒性指数和注视气体到处乱窜和起反应时毒性指数的增大和减小的思想的挑战。在20世纪末,在火灾的有毒物的生理效应方面几乎什么工作也没有做,而没有这方面的知识,在毒物学家之间的各种争论都不可能得到解决。

我们可以考虑把1950—2000年划为一个时期,在此时期,已经发展了火灾科学的基本思想,鉴别了所有基本的火灾分现象,搞清了它们的基本特性。已经认识到,必须把公共消防工作建立在性能性火灾法规(这种性能性火灾法规是通过预测的计算机火灾代码估计出的)的基础上,并且在付诸实施方面已走出了第一步。已经发展了一些解决三维火灾问题的方法,但还没有用于少数特定研究课题以外,因为现有的计算机还太慢和太小,以致不能在大多数经费预算所能达到的范围内进行这样的计算。

计算机受到了基本开关元件尺寸的限制,它的尺寸约为 $10000\text{ \AA}$ ,并且所需要的功率提出了严重的传热问题。事实上,20世纪90年代中主要的进步是并行计算,因而在基本计算速度方面仅仅提供了约 $10^9$ 次/秒的计算。

然而,在此时期,火灾纪录继续得到改进,但只从科学方面取得极微小的帮助。经验继续指出途径以得到更好的规定性法规,更好的、更符合实际的试验和在新建筑结构中实施的更好方法。但真正的改善要等待到性能性法规实际应用的时候。

## 21 世纪

城市性能性火灾法规的出现开创了一个新时代。21世纪是以相当好的实用计算机火灾代码开始,这代码最大的局限性是缺乏家具的火灾数据。然而,批准这样的城市火灾法规的必要性,强迫工业界负责它的产品的试验(就象上世纪的风洞试验和其他试验)费用。这样,在21世纪最初的25年中,实用计算机代码相当快地变得更加有力了。

科学,特别是火灾科学,将继续在湍流及化学动力学方面作重大的努力,同时在这儿或那儿取得一些小收益,但在精确的火灾代码方面却没有能提供什么大的改进。而因为精确代码没有大的改进,所以为了使许多实用代码有效,就需要许多试验工作,特别是具有全尺寸建筑物的试验工作。

实用的性能性法规的核心是,当所提出的新建筑物尚在设计阶段时,就有预报居住者安全的能力和预报火灾损失程度的能力。很清楚,只有非常强大的计算机才可能计入所有复杂的几何形状、物理的和化学的相互作用,这些对火灾的扩展是关键的。

以下四个方面需要作预报:

- ①警告所有居住者发生紧急情况的火灾探测器的响应时间。
- ②在所有太平通道中温度和有毒气体的随时间变化情况。
- ③直接由火灾毁坏造成的财产损失。
- ④由烟垢和吸收火灾气体气味造成的财产损失。

早期的性能性法规很多年来考虑的只是居住者的安全。但恰恰是这一部分消防工作问题要求许多火灾科学的知识。反馈的能量自然会产生更多的火灾气体。如果燃料是一种液体或升华的固体,则这火灾气体流量由汽化热引起,并且是容易计算的,因为燃料表面温度是已知的。对于炭化固体或复杂的流体,则表面温度和热损失是未知的,因此一些化学的率关系同样必须与热环境和动力学环境同时被应用。

为了把这些详细的基本数据供给计算机,要求大大扩大经验性试验和把数据关联起来的工作。已经测量了大批经验化学动力学数据。不幸的是火灾产物的性质随着氧的局部可得性而有很大变化。因此在21世纪的前半世纪要求对建立计算机火灾数据库作出很大努力。

穿过大建筑物的火灾气体的流动包括穿过门和窗的,穿过房间和沿着走廊的有浮力的湍流流动。声速如此之大,以致压力的暂态变化按火灾扩展的尺度来看实质上是瞬时的。因此,在没有浮力时,流量-压力关系是连续的定常状态。另一方面,浮力使 Froude 数的暂态值几乎到处都很重要。无浮力流动的简单的水力损失系数和摩擦系数不能再直接应用,而必须作相当大的修正以便能预报浮力驱动的暂态过程。进入21世纪后能充分正确估计这些效应和充分测量相应的系数就很好了。

建筑物坍塌的预报问题甚至要到约2020年才会考虑。这是可以理解的,一方面是因为热结构问题非常复杂,同时还因为居住者早就被转移到安全地或参加了救火,以及建筑物几乎已经无价值了。然而,对预估消防队员的安全来说,预报坍塌是重要的。因此,到2050年,相当好的热结构理论才能被增加到火灾预报的程序中去,以使消防队官员有可能得到备用的计算资料,帮助他或他的队员的安全问题作出关键性的决定。

就在火灾科学一开始时就已经知道了火灾辐射的光谱性质的重要性。然而,当对火焰的温度、成分、位置和尺寸的了解非常贫乏时,并不认为利用这些知识是有理由的。当火焰动力学知识增长时,火焰辐射的光谱性质受到了重新考查。因为烟垢是主要的火灾辐射源,并且多数材料在火灾温度下烧成了炭,所以多数火灾辐射是合理地近似看作灰色——几乎是黑色——辐射。这时在火灾试验中光谱性质很重要。在火灾试验中应用外部辐射的普通的和方便的方法,是用电来调节辐射源的温度。然而,这不仅调节了辐射强度,而且还调节了可能不是所希望的光谱分布。

新的比较便宜的、高精度的化学分析设备,约于2010年开始出现在火灾试验方法中。因此,就可获得高温分解、阴燃和燃烧过程中发射的化学性质方面的充足的经验数据。这样,就可能精确地把火灾不可避免的过度高温分解予以定量确定,并且很快发展了采用控制污染的试验方法。因此所研究的范围包括提供实用火灾预报所需要的所有经验火灾数据,这种实用火灾预报是制定城市性能性火灾法规所要求的。

石油价格上涨和石油供应减少给消防问题带来了第一次重大突破。油页岩、煤的合成物和农业废物占了重要地位,而以便宜石油为基础的塑料时代结束了。因此,产生一种全矿物的硬泡沫塑料和软泡沫塑料的多次努力开始收效。第一种这样的材料出现在2025年,接着会很快出现许多其他这种材料。

第二次突破出现在2030年,那时,制造一种全光计算机使其开关元件的尺寸更小并且计算机所需能量更少的努力已获得了成功。这样,接着便来了第二次高速的革命性计算机的发展。我们要指出,紧跟在20世纪50年代晶体管发明后的第一次高速发展阶段,到2000年时其

发展速度已经缓慢到几乎停止了。新的光学元件在50年这样的一个时段中逐渐减小其基本开关元件的尺寸到  $100 \text{ \AA}$ ，即尺寸减小为原来的  $1/100$ 。这样，存储面积将增为原来的  $10000$  倍。但是，更重要的是所需功率的大大降低导致减轻了严重的传热问题，结果，元件叠放不制在表面上而是元件可以在体积范围内组装。这样，到2080年就可获得在给定计算能力下，是限体积为今天的强大计算机的  $1/10^6$ ，而速度快  $10^8$  倍的强大计算机。

在2030—2080年这50年中，已全面地改进了火灾科学的理论基础。在这时期的开始阶段，通过各种半经验近似法，某些湍流和某些化学动力学问题原则上都已经可能解决了。随着计算能力的改善，越来越多的这些问题实际上已经可能解决了。因此，逐渐已有可能了解和计算许多以前是由经验来决定的系数。飘缕混合系数，各种通风口流量系数和走廊流量系数都已可能计算得比可能测得的更精确。飘缕中的火焰和热气层的熄火都已经能够用三维湍流模型和详细的化学动力学预测来预报。

这样，精确的火灾代码已开始被当作有效的各种新的专用用途的实用代码来应用。精确代码包括了各种三维的分计算方法，但是那时的计算费用和现在一样，表明在实际工作中应用精确代码并不是合理的。

当通过性能性法规来预报火灾的要求增长和火灾行为的知识总的来说得到改进时，毒性试验大大地扩大了，生理学研究阐明了火灾气体的许多短期和长期的效应。它还显示了为什么发生各种协合效应。这些知识使引入新的和更快的试验方法有了可能，也使学会如何最好地使用这些结果有了可能。

在试验方法上，各种老鼠已用一系列细菌和特殊的化学试验来代替。通过合适的选择，已经可以实时分别估算许多人体的生理效应。因此以前不能得到的非常重要的新数据已经可能在真实火灾中测得。

采用注视火灾中所有已知毒性物质随时间变化的方法对于实际应用来说太复杂。关于毒性指数已经可以用于火灾预报的论点，已被证明是太不精确了。在2030—2040年之间已经逐渐变得很清楚，必须详细探索一些特殊的化学物质，特别是  $\text{CO}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{CH}_2 = \text{CHCHO}$ 。除了这些少数物质之外，还有大量的系列有机物质的毒性效应出现在火灾气体中，这些毒性效应可以用毒性指数来适当地研究。

## 22 世纪

第三次重大突破发生在2110年。新的理解，新的数学方法和一种真正强大的计算机，最终打开了通向完全了解湍流的道路。这种发展不仅已使许多正在应用的近似方法合法化，而且常常揭露出了它们的意想不到的局限性。这些新方法十分简单地把所有火灾动力学问题纳入了精确代码所能解决的范围内，但大部分代码仍继续使用目前已显示出具有高精度的近似方法。

## 23 世纪

第四次重大突破是2200年的量子化学中的发现和简化。对于化学动力学来说，这方面的成就，就象湍流所已经取得的一样。各种材料的高温分解、阴燃和燃烧数据的许多大型计算机数据汇编，已经可以直接用计算来检验。固体和液体的许多化学动力学问题的计算仍然太复杂，因而认为用基础性量子计算来替代存储材料火灾数据的计算机是合理的。然而，这样的计算对填补存储器中遗漏的数据非常有用，并且对所采用的新的可燃材料提供合适的数

也非常有用。

在21世纪和22世纪，便宜石油的让位和许多替代的矿物基产品的发现，大大减少了社会的火灾问题。到23世纪时，火灾动力学和化学已经先进得不再是振奋人心的研究领域。然而有毒火灾气体的生理学仍然需要进一步研究。在太平通道中毒性状况的实际预报，就建筑物设计目的来讲，通常是足够良好的。然而，还不时有火灾发生，并且在有些情况下，毒性预报还不是象它应该有的那么好。

当我们回顾历史时，我们发现，20世纪已经搞清楚了所有的火灾分现象的基本效应。并且第一部实用计算机火灾代码已开始使用，而且已开始出现初步的精确代码。21世纪是这样的一个时期，在此时期，充分提供了各种材料、家具、设备的热的、化学的和物理的基本经验数据。出现了矿物基泡沫材料的最早发展，并且计算机的发展近乎完善。其后，22世纪把湍流和量子化学动力学知识推进到大部分所需要的火灾知识可以根据基本原理来计算的地步，以致不再需要小的经验试验了。最后，23世纪看到了，毒理学知识达到了实用的地步，尽管许多生理学问题的最后解决要留待24世纪的到来。

因此，到2300年时，我们继承了一个伟大的工程发展，它向我们保证了一个几乎没有火灾的生活。当我们回顾上述这些进展时，可以看出，在社会发展火灾科学时，只要社会通过政府了解科学的过程，并提供完成工作（这些工作在当时已知是必需的）所需要的资金，那么，很多进展可能已经在它们实际出现之前的数十年就能获得。

谁也不能预言一场重要的革命性进展即将出现，但只要花在其他科学问题上的资金的很微小的一部分用于推进火灾科学，那么，在这些进展中的进步就可能快许多倍。

### 参 考 文 献

Emmons, H.W. (1981). The growth of fire science. *Fire Safety Journal*, **3**, 95.

程屏芬译自: *Combustion Science and Technology*, **40**, 1—4 (1984); 167—174. (董务民校)

(上接第 552 页)

总之，迭代设计过程每一阶段的基本问题变得易于处理了，因为，①通过连接和/或基底减缩减少设计变量数；②由区域化和“抛弃”减少约束数；③构成作为设计变量函数的保留约束的代数显式近似值。原来的数学规划问题（见(2.1)和(2.2)）减缩成了一系列如下形式的小的显式问题：求  $\delta$  使

$$h_q(\delta) \approx \tilde{h}_q^{(p)}(\delta) \geq 0; q \in Q_k^{(p)} \quad (2.41)$$

$$W(\delta) \rightarrow \text{Min} \quad (2.42)$$

式中  $W(\delta)$  和  $\tilde{h}_q^{(p)}(\delta)$  都是广义设计变量  $\delta$  的显式函数，但不一定是线性函数。

蔡荫林（哈尔滨船舶工程学院）译自：NASA CR-2552 (Mar. 1976): 3—52.

(计重远 董务民校)