

译自: Dally, J. W. (1980), Experimental studies of dynamic fracture, Theoretical and Applied Mechanics (Preprints 15th ICTAM, Toronto, 17-23 August 1980): 79-89. (孟珊译)

关于火灾科学进展

Howard W. Emmons

引言

火灾是某些可氧化的结构物或材料在空气中的燃烧(通常不希望它发生)。本文限于对建筑物的火灾进行述评。我们希望把建筑物及其各个部分设计成: 1. 建筑物内的人们能够及时知道火警而逃出; 2. 建筑物本身着火及火灾蔓延的概率很低, 从而使生命财产的损失很小。

目前的许多火灾安全规范, 例如城市火灾法规, 纯粹是经验性的, 其中包含着例如一系列易燃性试验所揭示出的一些显然的矛盾(Emmons 1967, 1974)。实际安全系统的失灵, 可通过了解“火灾科学”的基本现象迅速加以改正。

问题

我们看到建筑物失火酿成火灾时, 头一个印象是, 火灾是许多化学过程和物理过程相互密切作用引起的复杂事物。科学地处理这类问题, 总是仔细研究它, 鉴别正在发生的一切过程, 把整个过程分解成一组互相分开的分现象和它们之间的相互作用。火灾科学的进展表明, 这种把火灾分解成几个分现象的作法是成功的, 其新的研究领域目前由下列两部分组成: 1. 科学地了解各个分现象及其相互作用; 2. 研究利用各个分现象的知识来了解整个火灾现象的方法。

各个分现象

首先考虑燃烧着的木块、棉布、泡沫塑料或固体塑料(如桌椅等的)。固体受热而热解, 经过厚薄不等的炭层释放出或多或少的可燃气体。热解过程产生的气体向内向外流动并扩散。气体离开固体表面后与空气混合, 在湍流卷流中完全燃烧或不完全燃烧。湍流卷流由起化学反应的热气的浮力所引起, 它向上流动, 在天花板下形成热气层。热气层逐渐加厚, 最后流出原来的房间, 进入隔壁房间或冲出门外, 形成浓烟和有毒热气。原先的房间里往往有不充足的氧和气态燃料在燃烧, 火焰到处蔓延, 终于遍及整个建筑物。

原先着火房间里所有东西都被加热, 其中小部分同热气直接接触而被加热, 大部分由于发生化学反应的火焰气体和炽热烟气的辐射而被加热, 也有一部分由于热物体的辐射而被加热。于是未着火的物体也开始热解而终于燃烧起来。既然所有物体都以大约相同的速度被加热, 所以也都大约同时着火, 并往往急剧增加气体产物, 急剧加大火焰尺寸, 急剧扩大火灾面积。于是出现消防队员称之为“跳火”的现象, 即从“一个房间

失火”一下子扩展为“整个房间卷入火海”的很难定义的有时是十分吓人的现象。

在各个分问题中包括：1.固相对加热的响应；2.气体（包括火灾产生的气体和“新鲜”空气）的流动；3.传热传质过程，特别是辐射传热；4.粒子〔包括火灾产生的浓烟和灭火剂（通常为水）的飞沫〕的运动。

复杂的化学活性当然是整个火灾过程的基本方面，但这里不打算直接叙述，因为它是上述所有四个方面都固有的内容。

火灾提出另一个问题。当我们试图求解复杂的偏微分方程组时，总是力求估计其中各项的大小，只保留各个区域中大小不相上下的那些项。这种方法也适用于分析火灾。不过，各有关科学领域的发展水平很不相同，所以，选择大小不相上下的项，相当于选择描述各种现象的不相上下的精确程度。

给定热气混合物的温度和组分，给定适当的几何形状，原则上我们能够相当精确地估算辐射通量，十分精确地进行视角因数积分，于是可以很好计算辐射传热。事实上，由于不可能精确知道气体组分，不可能知道通常无法预知的紊乱不定的火焰形状，目前要达到较大的精确度只能是个有趣的技术训练。

气相现象

长期以来已经了解同依赖于温度的化学反应速率相互作用的能量反馈机制（Mallard & Le Chatelier 1883），但直到Hirshfelder et al（1953）和von Karman（1955）的著作发表后，才知道真正正确的理论是表述预混混合气体中的相当简单的火焰速度问题。由于没有精确的化学机制知识及化学动力学反应速率知识，目前仍使用预混燃料混合物的层流火焰传播的精确计算。氢、氧和惰性气体的混合物的火焰表明了化学复杂程度，它需要8种物质间的20个化学动力学方程来求得接近实验精确度的火焰速度计算值（Stephensen & Taylor 1973）。Wilson et al（1969）的实验工作揭示出各种物质经过火焰后的增减情况，但几乎未把这些结果同现有火焰理论作细致的比较。在火灾中，大多数气体反应发生在湍流扩散火焰内（气体未预混），后者有强烈辐射作用。因此对于超出我们现有能力的难题，这只增加了极有限的一点化学动力学知识。

在燃料表面，强迫对流和自由对流边界层内的层流扩散火焰问题已经解决（Spalding 1960, Emmons 1956, Kim et al 1971）。Fernandez-Pello & Williams（1977）提出了固体表面上火焰传播的近似理论，与实验很一致；Carrier & Fendell（1979）提出了简化条件下火焰顺风传播的精确理论。有辐射传热的边界层燃烧尚无精确解，只有有限的经验性研究工作（Fernandez-Pello 1977, Williams 1976, Hirano & Tazawa 1978）。

当可燃气体离开热解的燃料而在卷流火焰中燃烧时，所产生的火焰高度通过无量纲自变量关联起来（Thomas 1963, Becker & Liang 1978）。直接的理论计算推广了Morton, Taylor & Turner（1956）的古典卷流理论。Stewart（1970）的理论作了求解的第一次尝试，所得结果用来求无量纲关联数，但未满足要求。Lockwood & Naguib（1975）和Tamanini（1977）首次试图利用最新的湍流模拟方程好象有些希望，但有非常复杂的湍流模拟过程并需大量计算时间。目前研究湍流计算的新的数值

方法非常活跃 (Launder & Spalding 1972, Rubesin 1977), 但目前文献中各不相同的大量复杂的特殊假设众说纷纭, 这种研究还处于初期阶段。

现有火灾卷流理论尚未触及许多重要问题。最初的热解气体在非正常火焰中混合及燃烧。火焰由于含有炽热浓烟 (基本上是元素碳) 而发光。浓烟形成的化学知识还不足以根据已知的燃料预测产生的烟量。此外, 火焰上方的气体中究竟还有多少浓烟和燃料气体没有燃烧, 也无可以预测的理论。火焰中有较多可以利用的氧时为什么不全部烧掉? 估计这可能是因为粒子辐射的能量, 要比它们从周围环境中接收的能量快, 或者要比由化学反应产生的能量快。要是这种估计正确, 浓烟淡烟就都是辐射传热同湍流混合供氧之间相互作用的结果。

最近的工作中, Pagni & Shih (1977) 计算了层流边界层火焰中各种不同程度燃烧的燃料百分数, 但未解决火焰为什么只是部分燃烧的更困难问题。Tewarson (1979) 在小型装置中发现, 火焰燃烧只烧掉燃料的有限百分数。例如聚苯乙烯泡沫塑料只烧掉热解质量的 50% 左右, 其余部分是浓烟和未燃烧的燃料气体——聚苯乙烯部分燃烧的热解气体。Magnussen & Hiertager (1977) 着手去了解这些过程。他们利用基于湍流平均量的浓烟形成量和燃烧速率, 但略去浓烟的辐射。笔者则认为浓烟辐射对燃烧过程来说起着关键作用。

当卷流气体由于其浮力而上升到天花板处时, 它们将折回并作为天花板射流向外流出。火灾开始阶段浮力很小, 卷流在房内产生一般三维环流。而当浮力大些时, 天花板处的热气便不能下降, 于是只在墙壁处折转, 流回到天花板处顶层气流的下面, 实际上形成一层热气层。天花板处的热气层由于对流到天花板以及由于辐射到所有下面的物体而失去热量。因此, 在相对于热气层的形成决定有多大的室内环流 (从天花板到地板) 发生时, 房间的大小很重要。究竟是什么准则决定有浮力流动的发生? 提出此问题很容易, 回答却难。至今还没有什么准则, 根据它能够已知火灾规模和房间大小时判断一般环流的重要作用。经验启示我们, 在大多数火灾情况下, 热气层的形成最重要, 而且它是在一着火时就马上发生的。

对于定比热的理想气体, 每单位体积的能量与给定压力下的温度无关。在火灾中, 压力为大气压, 只是有相当小的浮力差。因此, 当火将一些能量 (以及一些质量) 加进房内气体中时, 其他气体必然要流走。在密封房间里压力将危险地升高 (阿波罗登月舱因此爆炸), 而在一切普通房间里则有相当多的气体流出。

当天花板处的热气层加厚, 达到其下的孔口 (门窗等) 顶部时, 浮力使热气以较大速度运动。事实上, 热气层变得足够厚时, 浮力引起的气流将把较能量释放率要求还多的气体带出, 于是外面的气体 (空气) 便从孔口底部流进房内, 最后, 气流不再随热气层的深度而变化, 这时热气和冷气的交界面便下降到窗台下面。

这些流动原则上可以作为三维层流流动在大型计算机上求解。实际流动是湍流, 并有冷边界层和流动分离。对于火灾气体来说, 正如对于通常的孔口和喷嘴一样, 更实用的是导出水力学类型方程, 然后应用一些经验的流动系数。这是 Prahl & Emmons (1975) 提出的方法。

虽然对大多数火灾分析来说, 具有流动系数的二层水力学流动理论已够用了, 但在

下面两种情况下此理论可能有严重错误。

1. 火灾开始不久时, 三维室内环流将改变孔口流动。虽然这种情况科学上有趣, 但对火灾来说并不太重要。

2. 迅速燃烧物体的卷流很接近孔口, 以致各种相互作用都重要。迄今尚无此问题的的工作。

当我们考虑整个大建筑物内的火灾气体流动时, 我们用不同热气层厚度和密度来寻求关联各房间的各种大小孔口。如果用两个房间的每一房间里所有可能的二层密度分层来考虑孔口、窗台、拱腹的位置的所有可能的组合, 那就总共有70个不同的流动条件需要鉴别和计算。我们可以对这些情况的每一个导出特殊的一些流动方程, 或者利用孔口中每一流动层(可能有6个之多)在流动时具有线性铅直压力降的事实。Prah! & Emmons(1975), Tanaka(1978), Kubota & Zukoski(1978)曾利用特殊方程的方法(只研究了所要求情况的70个中的小部分)。第二种方法笔者正在进行研究。

不管怎样对待每个孔口(哪个方法更实用尚不清楚), 把孔口性能与建筑物中有关房间的流动效应如何结合起来还是一个问题。已经这样地做了: 利用各房间之间的压力降(比如以地板为准)写出房间的质量守恒方程, 然后调节压力直至守恒得到满足。最容易看清这种方法的原理的, 是考虑单层建筑物, 其中每个房间大小相同, 都是方形, 每道墙都有同样大小的一个孔口。如果假定(并非真实的)条件为每个孔口流动都与压力差成正比, 则质量守恒将导出 $\rho_0 \Delta_1 P + \rho_0 \Delta_2 P + \rho_0 \Delta_3 P + \rho_0 \Delta_4 P = 0$, 或

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 - 4P_0 = 0 \quad (1)$$

其中房间0被房间1, 2, 3, 4所包围。

方程(1)可认为是Laplace方程的有限差分形式。对这种建筑物, Laplace方程的解可能是所希望的有限差分组解的近似值, 而不是通常情况所希望的Laplace解, 并且有限差分方程是数值近似的。

把工程技术问题化为科学问题的第一步, 是得到适当的数学模型。在Hirshfelder et al(1954)的著作中可找到适当的气相多组分方程, Williams(1965)作了介绍。然而, 火灾科学中不精确度的对比提示我们要作许多简化。一般说来, 比热、热导率、粘性系数、扩散系数的常用值, 对所有气体及混合气体来说都是足够精确的。因此, 最有用的一些方程的形式为

$$\left. \begin{aligned} \text{连续性} \quad & \rho \frac{dY_s}{dt} + (\rho DY_{s,i})_i = W_s \\ \text{动量} \quad & \rho \frac{dU_i}{dt} = -P_{,i} + \tau_{ji,j} - \rho g_i \\ & \tau_{i,j} = \mu (v_{i,j} + v_{j,i} - \frac{2}{3} \mu v_{k,k} \delta_{ij}) \\ \text{能量} \quad & \rho \frac{dh}{dt} + \left(\frac{\lambda}{C_p} h_{,i} \right)_{j,i} + Q_r + Q_{rad} = 0 \\ \text{反应速率} \quad & W_s = AY_F^{\nu_F} Y_O^{\nu_O} \exp[-E/(RT)] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中下标 r , F , O 分别表示反应、燃料、氧气。

虽然许多感兴趣的科学问题可能要求包含例如热扩散、扩散应力、耗散函数、重力功以及非定常压力变化,但它们目前不是火灾的重要问题。要是在火灾计算中不包括辐射和湍流的适当处理,则对于以当前达到的精确度来预测火灾过程,其他许多效应在定盘上就都是无关紧要的。

辐射传热

前面指出,火灾的燃烧速率取决于由火向燃料反馈的能量。虽然热传导和对流传热很重要,但实质上在所有意外的火灾中,控制传热的是辐射。目前正积极研究辐射传递能量。De Ris (1978) 刚刚发表了辐射研究工作的一般综述文章,目前的进展有下述三个方面: 1. 发展近似方法,利用这些方法,根据原子和分子辐射谱数据的广泛知识,实际上可以计算总辐射和吸收特性 (Modak 1975, Yuen & Tien 1977, Taylor & Foster 1974)。2. 测量火焰辐射特性并求得它们间的关联 (Markstein 1978, Hägglund & Persson 1974)。3. 研究火焰的尺寸和形状 (Modak 1977)。

上述这些研究工作是按对火灾科学重要性增加的顺序排列的。燃料表面的辐射特性这一显然重要的问题目前不是关键性的,因为对于大多数燃料,虽然液体熔融表面的辐射率可能稍低,但仍形成一些炭层,并且接近于黑色。

固相现象

最重要的固相现象是着火、火灾蔓延和燃烧速率。对所有这三种现象来说,燃料的热解过程都是关键性的。对聚甲基丙烯酸甲酯(有机玻璃)之类的一些固体燃料来说,热解几乎是个撕开表面的反应,即聚合物破裂成一个接一个的单基物分子而脱离很少黑炭形成的端面。可是,对大多数固体燃料来说,在化学上此过程远为复杂得多 (Parker & Lipska 1969, Broido 1976 & Bankston et al 1979, Handa et al 1978)。尚未有人试图用化学上正确的方法来计算热解产生的气体和黑炭。对火灾来说,通常假定总 Arrhenius 反应速率为调整到适合于某一组特殊实验的常数。

当大多数固体在火灾中受热开始热解时,热解阵面开始是在固体表面上,随后缓慢运动到固体内而在其后面留下带裂缝的黑炭层。可燃气体经过黑炭层(特别是裂缝)流到固体外面,并看孔隙率大小的情况也可能流回到未热解的燃料内 (Min & Emmons 1972) 而部分地冷凝下来。当热解阵面进入更深地方时,任何冷凝产物将进一步热解,从而加速未热解燃料的热解过程。

由于带裂缝黑炭层造成化学上和物理上的复杂情况,所以只对几种固体燃料进行了分析 (Min & Emmons 1972, Kung 1972, Kansa et al 1977)。可能也是由于同样复杂情况,所以尚未出现有关发烟燃烧和烈焰燃烧的精确定论。现有发烟燃烧理论 (Kinbara et al 1966, Summerfield et al 1978) 都是针对特殊特性的,不能将数据作普遍的外推。还没有从发烟燃烧过渡到烈焰燃烧的准则,反之也是如此,尽管已经有了一些经验数据 (Smith 1972, Toong et al 1978, Summerfield et al 1978)。

由于热解的科学基础尚处于混乱状况,所以毫不奇怪的是,虽然有了关于着火的热损失和热反馈理论 (Shivadev & Emmons 1974, Kindelan & Williams 1977), 但还没有一般的定量计算值。虽然已在电弧聚焦炉中作了许多纤维着火的实验研究来模

拟原子弹辐射脉冲 (Butler et al 1956), 但还没有形成一般可以应用的准则。对火灾来说, 为了阐明热解、发烟、熊熊燃烧以及它们彼此间的各种可能的转化等机制, 尚需进行大量工作。Simms (1960) 作了个特别有趣的观察 (不管最后证实与否), 如果可燃气体的运动成为湍流, 那就最易起火熊熊燃烧。于是, 如果流动成为湍流, 则在固体表面上低速对流的 (室温) 空气流就可能较早着火, 尽管事实上对流的空气流起着冷却的作用。

在挥发性固体燃料表面上产生燃料气体是气化潜热引起的吸热过程。固体在高温下烧焦也需输入热量以维持热解。现有关于纤维热解数据的解释 (Roberts 1970, Shivadev & Emmons 1974, Murty & Blackshear 1967) 表明, 对木材来说, 依试样尺寸、形状和过去历史的不同, 其变化范围从 -80 到 $+500 \text{ cal/gm}$ 。出现这种“胡言乱语”, 几乎肯定是因为用来解释数据的整个复杂动力学热解过程的理论不恰当所致。

根据所有上述情况, 我们会料想, 只知道所有复杂的化学和动力学热解效应的大小, 还不足以写出一组方程 (微分方程或其他方程), 其解会保证我们对多数情况有正确的定量 (或甚至是定性) 的了解。

利用热解、能量反馈及着火的某种程度的近似, 已经对火焰在固体 (或液体) 燃料上传播的现象作了计算, 并与有限范围的火灾蔓延数据作了比较。这方面的工作不久前已由 Williams (1976) 作了综述。

至于热解产物、气体及微粒体 (淡烟和浓烟), 不仅对它们的产生和燃烧, 而且对它们的输运特性及其他特性, 都提出了困难的科学问题。当微粒体运动到远离火区时, 它们聚集成较大的粒子。Baum & Mulholland (1979) 对此问题的定量描述作出了最新进展。此过程有重要的实用意义, 因为各种类型烟尘检测器对粒子大小的敏感程度各不相同。烟中气体成分和微粒成分对火灾安全问题有重要意义, 因为它们决定着毒性的性质。虽然这是个极有意义的领域, 但本文不作评述, 这既因为它主要是生理学问题, 也因为它的经验性研究还处于初期阶段。

灭火的科学

这是什么样的问题呢? 是把水泼到火上使它熄灭。这几乎是老早就普遍使用的方法。怎样“把水泼到火上”? 水与火接触时究竟起些什么作用? 有许多摆摆手式的“解释”和使用消防水龙的经验研究 (大多是定性的研究)。这样的工作可能是“进化”但并不是“科学”。Bhagat 在笔者的实验室里最近所作的研究表明, 少量小水滴 (不是蒸汽) 形式的水可使黑炭的燃烧速率增加 30%。因此, 在一个房间里用水龙喷水灭火时, 带有空气的水雾会大大增加相邻房间里的燃烧速率。显然, 水滴在灭火时所起的作用, 将是今后研究工作的富有成果领域。

怎样用水的问题稍有进展。从洒水灭火器或水龙带喷出的水滴, 不仅沿着它们喷射的总方向向前运动, 而且由于周围气体的阻力而改变它们的运动, 从而又改变气体的运动。(大多数洒水灭火器未能把大量的水洒到熊熊燃烧的火上, 是因为它们洒出的水滴太小, 以致被具有强大浮力的卷流把它们排开到旁边去了。它们能很好控制火灾, 靠的是把附近的每件东西泡湿, 于是大火无法蔓延, 只能烧掉原来的东西。)

已经写出描述水雾和周围气体相互作用的各个方程。大多数方程描述了气体速度

场,算出了水滴轨迹 (Beyler 1977)。关于水滴和空气流之间的相互作用,包括对各个流动的修正,只作了有限的工作 (Crowe et al 1977)。

M. Krook (1978, 私人通信) 已用分子运动论方法仔细导出了气体和微粒流的运动方程。如果 $f = f(t, r, v, a, T)$ 是半径为 a 的大小不同范围水滴在温度为 T , 速度为 v , 半径为 r , 时间为 t 时的分布函数, 则 f 必须满足分子运动论方程

$$f_{,t} + v_i f_{,i} + (\dot{v}_i f)_{,v_i} + (\dot{a} f)_{,a} + (\dot{T} f)_{,T} = 0$$

这里假定每个水滴与周围潮湿空气有相互作用, 但一点也不与其他水滴相互作用。如果我们考虑选择 $t = 0$ 时大小相同、速度(向量)相同、温度相同及原点相同(称为一束)的一些水滴, 则 f 可以表达为一些束的和如下:

$$f = \sum_{i=0}^N n^{(j)} \delta(v_i - v_i^{(j)}) \delta(a - A^{(j)}) \delta(T_d - T_d^{(j)})$$

其中求和包括所有的束 (j), 而 n, v_i, A, T_d 为 r, t 处该束变量的当时值。对于每一束, 分子运动论方程化为

$$n_{,t} + (v_i U)_{,i} = 0$$

$$U_{,t} + U_k U_{,k} = (\dot{v}) = (j) \quad \text{水滴被气体阻力加速}$$

$$A_{,t} + U_k A_{,k} = (\dot{a}) = (j) \quad \text{水滴被蒸发改变半径}$$

$$T_{d,t} + U_k T_{d,k} = (\dot{T}) = (j) \quad \text{水滴被能量平衡改变温度}$$

气体的运动由方程 (2) 决定, 只是每个方程右边需加一项: 连续方程需加上从各水滴蒸发的质量速率; 动量方程需加上对水滴的阻力(为负); 能量方程需加上传到各蒸发水滴的热量。对这些方程尚未求得二维或三维分析解。已经知道相当多有启发性的—维解, 这将是今后论文的主题。

刚才所讲的又是尚未解决问题的领域, 它提供许多鼓舞人的值得钻研的课题。

结构物问题

火灾扩大时可以烧毁结构物构件而使其坍塌, 或加热不能燃烧的构件而使结构物强度降低, 最后依然坍塌。已知火灾周围情况时, 孤立结构物构件的受热情况可通过发展得比较成熟的传热技术算出 (Bresler 1976)。可燃构件的强度降低和破坏, 要求在固体燃料的热解理论中加上应力分析 (Bresler et al 1976)。但除对散裂问题外很少作过别的工作。几乎未对窗玻璃的热应力破坏问题作过什么科学工作。我把此问题留待今后再谈。

火灾

一旦有了对火灾各个分现象的定量描述, 就有可能把适当的方程和基本数据汇编成计算程序, 把火灾情况从开始到终了都计算出来。火灾科学正达到这种可能性的开始阶段, 并正作各种努力建立这种计算程序。几乎所有这些程序都利用积木式方法, 这里我指的是有限个分现象的每个方程均可写出, 并可算出相互作用。于是火灾发展时就可能及时前进。在非常实际但非传统的意义上看, 这种方法是处理问题的有限元法, 否则就会是毫无希望的复杂三维时间相关问题。Quintiere (1976) 提出把火灾看成一系列

定常状态的模型。此模型正确描述了一些火灾的某些阶段。不过，它遇到实际火灾及其瞬态描述都是平滑通过的一些大的过渡问题。Pape & Waterman (1977) 首先提出一种火灾蔓延的概率模型，但尽可能转换为决定论处理的方法。目前它是不完全的模型，因为某些重要输入来自预测过程中的实验。Reeves & MacArthur (1976) 提出一种编码，利用从常规试验 (Smith 1972) 得到的确定的燃烧速率数据，计算火灾在飞机壁座位和壁上蔓延的情况。Emmons et al (1977) 正研究一种火灾计算机编码，最终目的是要根据建筑物设计图和建筑物内设备布置图来计算火灾在大建筑物内的发展情况。目前已能利用理论和基本数据计算单一房间的火灾情况，不必作什么调节便能使之符合预测的实验值。这种程序有很高的精确度 (Emmons 1978, 1979)，正在把它推广到计入流过大建筑物的火灾气流情况，前面气相现象一节对此已作简要介绍。

结论

就每座建筑物来说，火灾现象把化学、热力学、传热学、空气动力学结合成一个整体。多年来在有关各领域中一直在加强研究此领域的许多现象。然而，提出了许多新问题，许多老问题也从新的方向提出，以致同其他某些大领域（如基于对问题的怎样发生和为什么发生有彻底了解的工程领域）相比，火灾问题要能获得一席之地还需完成大量研究工作。目前已写出很特殊条件下的建筑法规，不应当把这事实看成是或者火灾安全因此有了保障，或者火灾现象的科学了解好象相当充分了。类似地，正在制订用于计算建筑物火灾扩展情况的计算机程序，并不表示搞清楚了火灾的各个分现象。猜测和贫乏的经验知识，暂时只好用于对一些事情缺乏了解的情况。只有发展火灾科学，才能使我们今后的世界免于火灾的威胁。

参考文献 (略)

译自：Emmons, H.W. (1980), Scientific Progress on fire, Ann. Rev. Fluid Mech., 12: 223—236.

(董务民译)

孤 立 波 (下)

John W. Miles

6. 准一维孤立波

一维孤立波 (1.2) 可以看作是在均匀矩形槽中传播的。因此，研究水槽宽度、深度、截面形状等的变化的效应是很自然的。Peters (1966)，Peregrine (1968, 1969, 1972)，Fenton (1973) 和 Grimshaw (1978) 已经考察了非矩形截面槽中的孤立波，这些问题在工程上很重要。还提出了一些尚未解决的课题，本文不作进一步介绍。