多个房间的火灾发展特性

翻译：橙色救援微信公众号

1. 引言

每位消防员都熟知图 1 所描述的火灾发展曲线，该曲线描绘了建筑物内火灾可能的发展轨迹，但要满足这个曲线的条件，需要考虑以下几点：

- 房间内必须含有足够的可燃物。
- 可燃物的堆放方式必须允许火势的发展，以产生超过房间内发生爆炸所需的热量释放速率。
- 必须有足够的空气通风，以使火势达到所需的热释放速率。

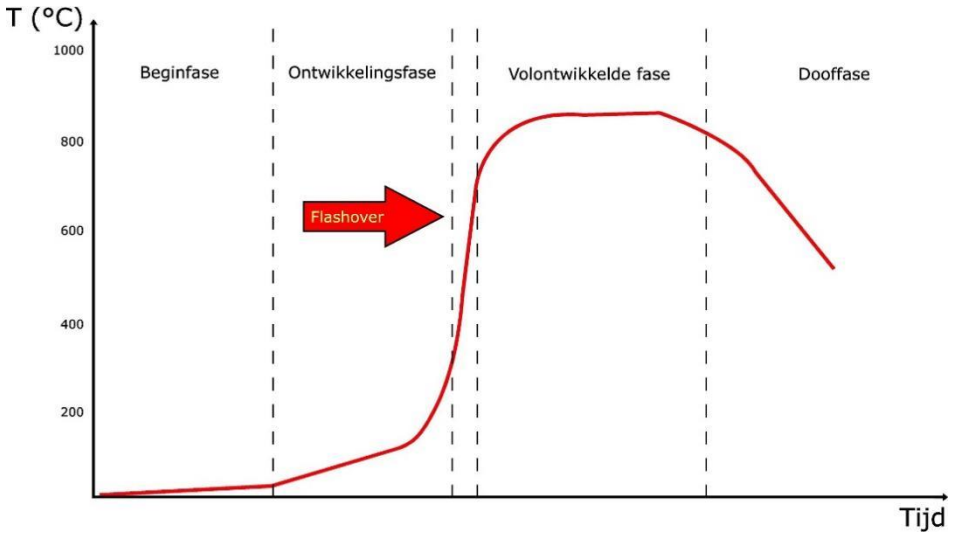

图 1 通风控制型火灾发展曲线（图:Karel Lambert）

并非所有消防员都知道火势发展曲线是描述随着时间变化温度的函数。在上述条件下，温度也可以被视为热释放速率。文章《The fire growth curve revisited》使用“时间-热释放速率”函数图[2]来研究在不同变量（如房间通风、可燃物负荷）下热释放速率的影响。

然而，该曲线只说明了单个房间的情况。

当涉及到多个房间时，火势会如何发展呢？

在本文中，我们仔细研究了火灾在多个房间中的发展情况。虽然我们无法面面俱到，但重点关注的是一个房间内的火灾如何通过门廊蔓延到第二个房间。

2. 烟气是关键

火场烟气对火势的蔓延至关重要，因为烟气本身携带着三种对消防员非常重要的物质：

1、能量

2、可燃物

3、有毒物质

在接下来的内容中，我们将更详细地介绍烟气的蔓延过程以及其可能带来的后果。

2.1 烟气的蔓延

燃烧过程中会产生碳烟微粒、气溶胶和气体，这些物质组成了烟气，其中大部分是空气。

烟气产生于火源，其中热释放速率对烟气蔓延起着重要作用。较高的热释放速率会使火势将烟气推离自身更远。

烟气的初始温度取决于可以流动到火源的空气量，火源轮廓的大小也影响烟气温度。火源轮廓越大，产生的烟气温度就越低，前提是热释放速率相同。

烟气上升的原理类似于热气球的上升，因为烟气比周围的空气热，所以会上升。

但是，在火灾中，烟气上升时会不断混合周围的空气，导致烟气温度下降、质量增加，烟气上升速度也变慢。这些变化随着烟气上升而发生（见图 2）。

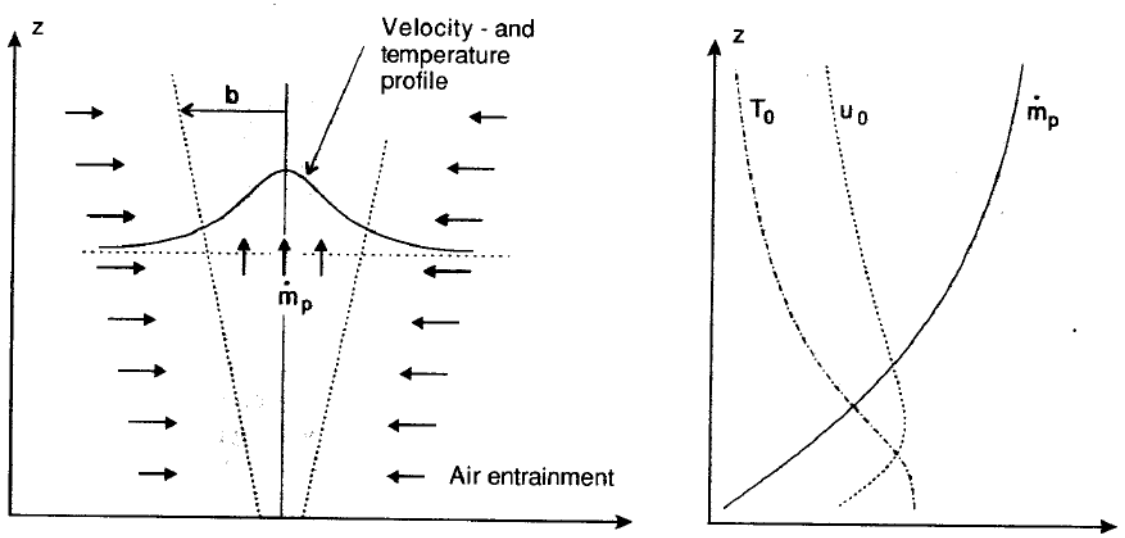

图 2 描绘了烟羽流的示意图，随着烟气的上升，烟羽流会变宽，中间的温度和流速最高，而两侧则相对较低。整个烟羽流的温度（T）和速度（u）随着烟气的上升而逐渐降低，同时烟羽流的质量（m）会增加。这些变化可以从图中看出。

消防员都知道，在房间内发生火灾时，首先会产生一个烟柱，烟柱形成烟层。随着烟气飘到天花板，它会水平扩散，直到与墙面接触。由于受限于房间的墙壁和天花板，烟雾层会变得更厚(即膨胀

和下降)。这将导致烟气从火点到烟层所需的垂直移动距离减少，中途混入的空气更少。这意味着烟羽的冷却效率会降低，流入烟层的烟气温度会更高。

因此，房间的高度在这一现象中起着重要作用。例如，在一间 8 米高的仓库里，烟羽在进入烟层之前就会冷却下来。另外，烟层的厚度和体积由房间的面积决定。房间越大，形成一米厚烟层所需的时间就越长，这也是一种“缓冲”。

此外，墙壁上的开口也非常重要。如果墙上存在打开的窗户，当烟层飘到窗户顶部时就会逸出房间。此时，烟气既会融入烟层(从烟羽中)，也会流出房间(通过窗户)。

从理论上讲，当这种情况发生时，有三种可能的后果：

1、流入烟层的烟比逸出的多，烟层将继续变厚、下降。

2、烟气逸出的速度与流入烟层的速度完全相同。烟层的高度将保持不变。

3、流入的烟气比逸出的少。烟雾层的厚度将缩小。例如，在可燃物控制型火灾中打开天花板上的排烟口时，可能会发生这种情况。

因此，许多因素会影响烟羽和烟层的现象，包括火灾的热释放速率、着火点的大小（轮廓尺寸）、房间的高度、房间的面积以及是否存在开口。

火灾是一个非常复杂的系统，其中的一切都在不断地发生变化。

烟羽在起火点和烟层之间形成了一座桥梁，通过它可燃物、能量和有毒颗粒进入烟层。由于烟气中含有可燃物和能量，所以如果烟层中的空气达到可燃极限，烟层将变成一个燃烧区域，形成所谓的“烟层火”。这种情况下，火势的发展将更加剧烈，烟气中的可燃物将继续燃烧，同时也会不断产生更多的烟气。

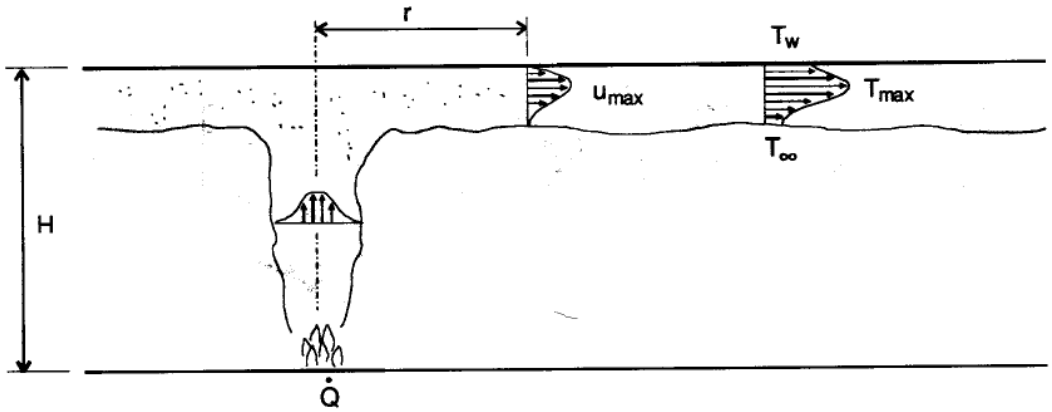

FIGURE 4.17 An idealization of the ceiling jet flow beneath a ceiling.

图 3 展示了烟羽进入烟层的简化图，"天花板涌流"是在烟层中形成的，其流速（u）和温度（T）可以分为不同部分。当火灾的热释放速率升高时，这两个变量都会增加；当房间变高时，这两个变量都会减小

烟层与墙壁和天花板直接接触。火灾开始时，墙壁内部温度与室内环境温度大致相同，但一旦接触到热烟，就会开始升温。烟层中的一部分能量会被转移到墙壁上。

一旦烟层高度达到连接相邻隔间的门开口顶部以下，烟雾就会开始流入第二个房间——这伴随着能量、可燃物和有毒物质的转移。

2.2 能量的扩散

流经门口的烟气将重新升回天花板，第二个房间的烟层与第一个房间的烟层形成的结论都适用于第二个房间。不同之处在于，烟层对第二个房间中的人员和物品构成了严重的威胁，将能量转移到所有温度低于其自身的物体和人员上。

与最初起火的房间一样，烟层会向下方的所有物体辐射热量，辐射量与温度成正比。在足够高的温度下，烟层下方的物体将在一段时间后开始热分解，这意味着烟层在第二个房间中形成可燃气体。

特别需要注意的是易燃的墙壁和天花板覆层。天花板与热烟层直接接触，烟层通过热对流的方式加热天花板，这是一种与热辐射不同的热量传递方式，烟气需要与较冷的物体直接接触。

因此，如果烟层接触到易燃的天花板(例如木材或易燃的隔热材料)，那么那里也会热解出易燃气体。天花板的热解更加危险，因为消防员可能会观察到家具的热解，但烟层内部的热解就没有那么明显。

最后，烟层的热量可能会导致第二个房间着火，很快，第二个房间将发生轰燃。火势的蔓延将从此开始，并很可能继续下去。

2.3 可燃物的扩散

燃烧产生的可燃气体会通过门口进入第二个房间，使其内部的空气中存在大量可燃微粒，如热解气体和一氧化碳等。这些微粒会在天花板上形成烟层，内含大量的气态可燃物。如果第二个房间内的物体开始热解，其产生的气体也会进入该烟层。

随着时间的流逝，烟层或其某些部分将达到最低可燃极限，在满足温度条件后，会开始燃烧，可能出现以下三种现象：火焰窜出第一个房间门口，烟层中可燃物颗粒的运动，第二个房间发生滚燃。

上述现象都需要可燃物，因此第一个房间到第二个房间可燃物的扩散以及第二个房间内可燃物的生成都非常重要。

当有火焰存在时，就会释放热量，这些现象都会在自身周围产生能量。此时，烟层的某些部位会被暂时加热，这将导致通过热辐射和热对流的热量传递同时增加。能量与可燃物的扩散就形成了一个自我强化的循环。更高的温度导致热解反应更加猛烈，也就产生更多的可燃物。在可燃物足够的情况下，引燃后又会产生更多的能量。

据文章《How do people die in fires?》[9]所述，辐射热与绝对温度的四次方成正比。根据该原理，在烟层中的火焰发出的辐射热是温度为 200℃的烟气的 16 倍。因此，当烟层的一部分被点燃时，辐射热会猛增 16 倍。

2.4 有毒物质的扩散

第三个与烟气传播相关的问题是有毒颗粒的扩散。对于佩戴空呼的消防员来说，这并不是大问题。即使房间内的有毒气体浓度达到很高的水平，只要气瓶里有空气，他们就可以正常呼吸。

但对于被困人员来说情况就不同了，他们可能位于另一个房间，但是当门被打开后，烟气会将大量有毒物质携带至该房间中。据 UL 的研究表明，这很快就会导致致命的毒性。在标准住宅中，被困者的预计存活时间只有 5 分钟。然而，当这些被困者处在另一个关着门的房间里时，这一时间可能被延长至 30 分钟。

这对于室内火灾的搜救小组来说也具有战术意义：当小组成员位于充满浓烟的房间（例如厨房或客厅）时，他们在开门时务必慎重。在烟气弥漫的客厅打开一扇门，很有可能通往未受烟气影响的卧室。门一打开，烟气就会流入卧室，那里可能有身体机能良好的被困人员。毕竟，卧室里还剩下足够质量的空气。一旦门打开，就没有屏障阻挡烟气，情况就会迅速发生改变。这种可能危及被困者安全的行为，与搜救小组的目标背道而驰。

因此，搜救小组在开门之后发现房间内没有烟雾时，最好马上关门。由于该房间内被困者并没有迫在眉睫的危险，搜救的选项之一是留下一名消防员告知并安抚，不立即转移。与此同时，扑灭火势，正压式排气扇清除烟气。这样，被困者疏散时经过的房间内的大部分火灾烟气已被清理。在实施此战术时，搜救人员必须与他们的指挥员进行明确的沟通。

记住，这种办法并非适用于每种情况。如果火势需要一段时间才能被控制，烟气总会扩散到相邻的房间里。即使房间通过防火门隔开，仍然会有烟气渗透进来——大多数防火门都不是完全防烟的。

布鲁塞尔消防部门曾经在一栋高层建筑的 12 楼发生火灾时遇到过类似的情况。整个单元几乎完全被火覆盖，消防员面临着各种不同的问题（例如供水故障、燃烧荷载非常大、消防通道被堵塞等），花费很长时间才将火扑灭。

在 12 层走廊的尽头，有一位母亲和四个年幼的孩子被困在单元房内。走廊里充满了浓浓的黑烟，消防员最初的想法是让他们留在单元房里，让他们“安然度过”大火。但是，45 分钟后，烟气渗透的情况变得非常严重，必须进行疏散。因此，消防员使用了救援面罩（参见图 4）。

有多种型号的救援面罩：过滤器或使用气瓶。当使用过滤型面罩时，环境中必须有足够的氧气才能安全疏散人员。使用气瓶的面罩则没有这个限制。若是温度足够低，哪怕烟气非常浓，被困人员也可以使用这些救援面罩撤离。

有可能，搜救人员开门进入的房间内烟气比他们原先所在的地方少，但仍足以对里面的被困人员造成安全威胁。在火灾扑救过程中，很少有一刀两断、非黑即白的问题。救援人员必须尽其所能评估采取何种策略。

图 4 所示为可戴于受害者头部的救援面罩，必须连接调节器或肺活量阀，并最好使用加长的软管，以便受害者和消防员能够同时轻松移动。（图:Bart Noyens）

3. 第二个房间起火：一些可能的函数曲线

消防员需要了解图 1 中通风房间火灾的温度曲线，当火势蔓延到第二个房间时，该曲线会如何变化？

图 5 用红线再次说明了图 1 中的火灾，例如卧室的火灾。由于卧室门是开着的，烟气会从卧室流到相邻的房间（例如客厅）。一旦烟层厚度达到门口顶部，就会流入客厅。根据本文前面的分析，热烟气会将热量辐射到其下方的任何物体上，例如客厅的沙发。

在第一个房间发生轰燃后，卧室的火焰将通过门进入客厅，客厅的温度将开始显着上升，同时热辐射急剧上升（与绝对温度的四次方成比例），导致客厅起火。

蓝线描述的是第二起火灾。该线也有发展阶段和轰燃。对于消防员来说，意识到不同房间的两起火灾可能处于不同的阶段至关重要。卧室的火灾可能处于全面发展阶段（轰燃后），而客厅的火灾仍可能处于发展阶段（轰燃前），并不意味着后者不会发生轰燃。

换句话说，内攻小组在向完全发展阶段的火灾前进时，所处的房间可能会发生轰燃。

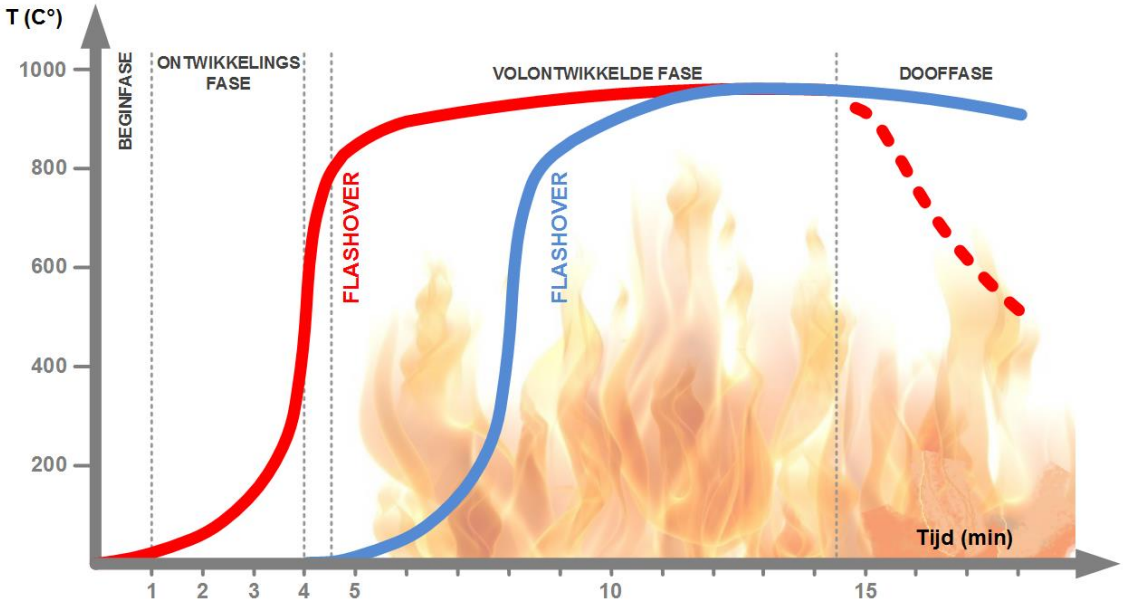

图 5 展示了多个房间火灾的发展情况。红线描绘了起始火灾房间的火势发展。在火灾完全发展阶段，火焰通过门的开口进入第二个房间，这些火焰的辐射热将引燃第二个房间（蓝线）。几分钟后，第二个房间将发生轰燃。（图：Bart Noyens 和 Karel Lambert）

一段时间后，卧室的燃烧负载将耗尽，燃烧强度降低，进入衰变阶段。然而，客厅内的火正处于全面燃烧阶段。同样，这两场火灾的特性不同，外观也不同。

我们还可以观察火灾期间积累的热释放速率曲线，这些曲线与图 5 完全不同。需要注意的重要一点是：两个温度不能相加，但热释放速率却可以！

在图 6 中，橙色线显示了卧室火灾的热释放速率，与图 5 中的红色线进行了比较，该火灾的热释放速率经历了初始、发展和全面燃烧阶段，但未描述衰减阶段。

简单地描述热释放速率的进展：一旦火势进入全面燃烧阶段，热释放速率保持不变，火灾转为通风控制，热释放速率由流入房间的空气量决定。

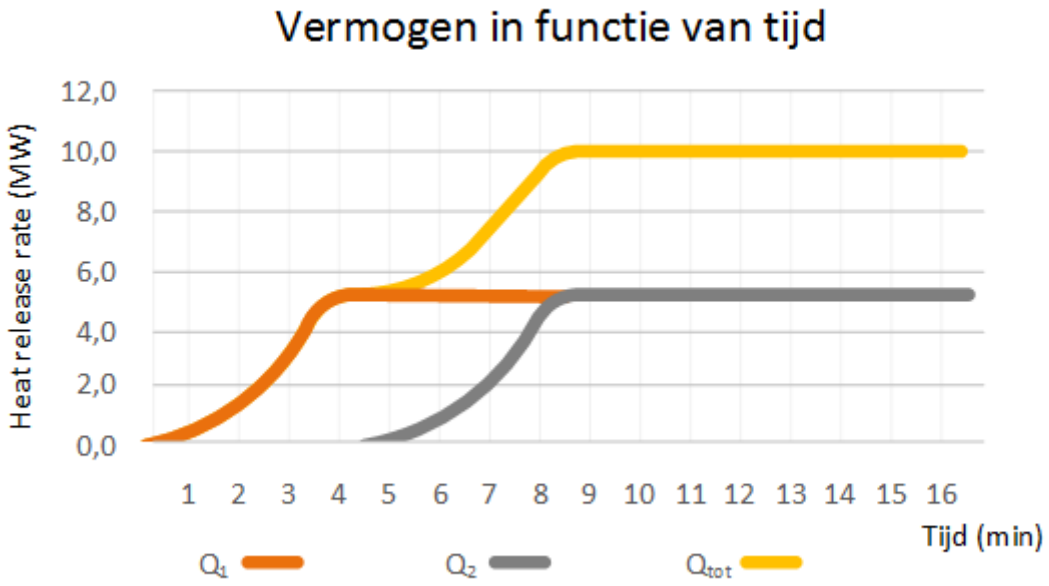

图 3 展示了火灾蔓延到第二个房间过程中，热释放速率的简化示意图（图:Bart Noyens & Karel Lambert）

其中灰线表示第二个房间的热释放速率（与图 5 中的蓝线相对比），轰燃后热释放速率保持不变。然而，这个图表并不完全准确，因为在现实中，客厅的轰燃可能会吸走大量的氧气，从而对卧室内的火灾产生影响。出于简单起见，在此表示中，忽略了这一点。

黄线描述的是热释放速率积累的总额，即另外两条线的总和。当两个房间内的热释放速率均为 5 兆瓦时，总计即为 10 兆瓦。

尽管温度是消防员熟悉的物理单位，但水带的灭火能力是以热释放速率或功率计算的。因此，为了自身的安全，消防员必须配备比火灾热释放速率更大的灭火能力，而非相当的灭火能力。

4. 结束语

消防员们对单个房间的火灾发展规律非常了解，但是适用于多个房间发生火灾的规则要复杂得多。本文旨在以简单的方式阐述重要的原则，而不是覆盖所有细节。因此，读者必须记住，现实情况远比本文所呈现的要复杂得多。

5. 参考书目

[1] *Lambert K & Baaij S (2018) Brandverloop: technisch bekeken, tactisch toegepast; 2nd edition, Sdu, Nederland*
[2] *Lambert K (2019) De brandcurve anders bekeken, De BrandweerM/V, mei 2019*
[3] *CFBT-BE (2019) Bijscholing instructeurs Attack Cell 2019*
[4] *Drysdale D (1999) An introduction to fire dynamics, 2nd edition, John Wiley & sons, England*
[5] *Merci B (2010) Active fire protection II: smoke and heat control, postgraduate studies in fire safety engineering, Universiteit Gent.*

[6] *Merci B (2011) Fire dynamics, postgraduate studies in fire safety engineering, Universiteit Gent.*
[7] *Karlsson B, Quintiere J (2000) Enclosure fire dynamics, CRC press*
[8] *Lambert K (2016) Brandbaarheidsgrenzen, De BrandweerM/V, november 2016*
[9] *Lambert K (2019) Waarom sterven mensen in een brand, De BrandweerM/V, maart 2019*