

通风受限火灾详谈

作者: Karel Lambert

翻译: 橙色救援微信公众号

随着通风受限型火灾的频繁发生,近年来对该类火灾的研究逐年增加,这些研究使我们了解了很多关于此类火灾特性的知识。在本文中,我们将深入了解通风受限型火灾的火灾特性。

1. 通风型火灾和通风受限型火灾的区别

当火灾发生在有正常燃料负荷的建筑物内时,在某个时间点火灾将受通风控制——火势大小取决于能够流入起火房间的新鲜空气量。

1.1 通风型火灾的发展过程

当窗户敞开时,大量空气会进入起火房间,使火势迅速发展。在不受外力影响的情况下,室内火灾将发展为轰燃,也就意味着火灾从初起阶段过渡到全面发展阶段,此时室内所有可燃物都将开始燃烧,对新鲜空气的需求将大幅增加。开口(门窗)已无法为火灾提供足够的新鲜空气,此时火灾变为通风控制型。火灾从燃料控制转变为通风控制的时刻被称为燃料控制/通风控制点(FC/VC)。

在发生轰燃过程中变为通风控制燃烧的这被称为通风型火灾。因为此类火灾一开始就有足够的空气使其发展到轰燃。

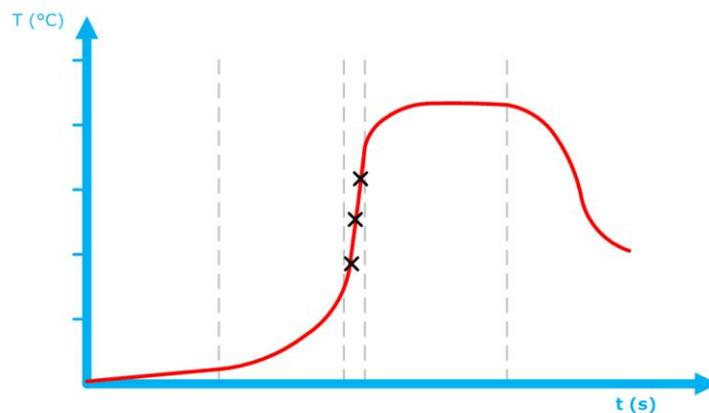


图 1 通风型火灾的燃料控制/通风控制点的大致位置【图表: 巴特·诺因斯 (Bart Noyens)】

图 1 为通风火灾曲线图。实际上,我们不知道 FC/VC 点在这类火灾发展中的确切位置。它在轰燃阶段的某个地方,但没有人确切地知道在哪里。一些专家认为 FC/VC 点甚至可能位于更早的位置,略早于轰燃开始前。他们把火势发展比作海上的船,关闭发动机后,它仍会

继续向前漂一会儿。因此他们认为，在房间接近火灾发展阶段末端时，必须释放足够的能量才能发生轰燃。每个“x”标记 FC/VC 点的可能位置。对于通风型火灾，FC/VC 点的确切位置并不重要，重要的是消防员能够区分火灾发展阶段和全面燃烧阶段，因为不同阶段火灾采取不同的战术。除此之外，消防员能够识别即将发生轰燃的征兆也非常重要：

- 来自烟气层高温
- 滚燃前兆：烟气汹涌滚动
- 迅速下降或已经很低的烟气层
- 烟气紊流（旋涡流动）
- 室内可燃物突然热解。

1.2 通风受限型火灾的发展过程

对于通风受限型火灾，FC/VC 点的位置非常重要，在通风受限型火灾中，它位于轰燃之前，因为此类火灾没有足够的空气发展成轰燃。火灾想要遵循通风型火灾发展曲线(图 1)，但由于没有足够的空气，热释放速率将降低。我们可以把这一现象比作正在进行维修的高速公路，当限速降低至 70Km/h，通常情况下司机看到这个标志，就会把车速从 120Km/h 降至 70Km/h，这个标志限制了其速度，就像火灾因室内空气不足不能产生更多能量。



图 2 施工中的高速公路限速 70Km/h，类比通风控制型火灾：因缺少空气，火想烧却烧不起来。

房间大小和室内通风情况将决定火灾何时从燃料控制型过渡到通风控制型燃烧，图 3 显示了通风受限型火灾和通风型火灾之间的几种不同情况，这些火灾的区别在于每种火灾都比前一种晚一点变为通风控制型，“绿色”首先转为通风控制燃烧，而“黄色”则代表有更多空气可用的情况，这类火灾将保持燃料控制型约一分钟后，转变为通风控制型。“x”代表每种火灾的 FC/VC 点。哪种火灾最危险呢？

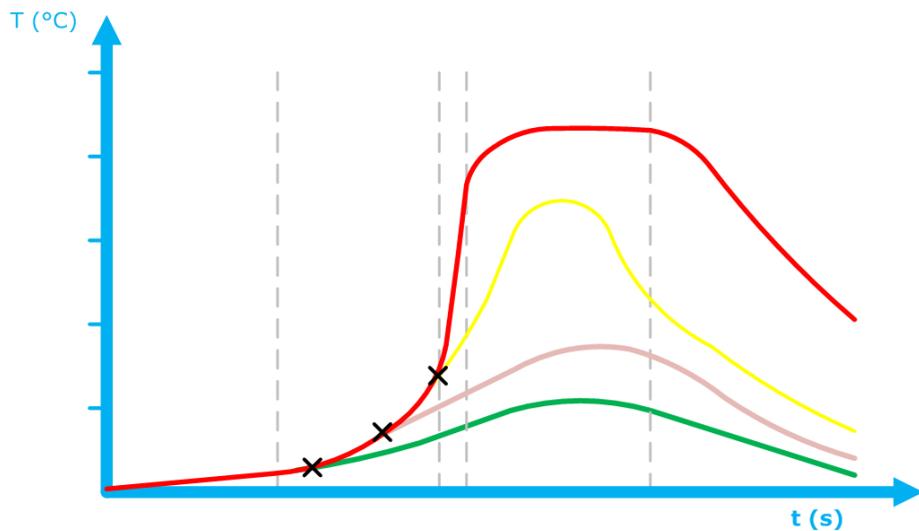


图 3 红线表示通风型火灾的发展情况。其他三条线描绘了三种不同的通风受限型火灾。绿线表示在隔热密封的建筑物中发生的火灾，这导致火灾在初期就受到通风控制；粉线表示空气稍多的火灾；黄线表示在轰燃之前变成通风受限的火灾。【图表：巴特·诺因斯（Bart Noyens）】

答案显而易见，黄线所示的火灾最危险，这类火灾从燃料控制转变为通风控制燃烧时间最晚，这意味着相比其他火灾，它在 FC/VC 点时温度最高。

如果室内温度很低，那么消防员面临的风险也随之降低。如果绿线的温度不超过 200°C ，那么就不会产生太多热解气体——达不到使大量可燃物发生热解。可燃物的热解温度在很大程度上取决于材料类型。经验表明，高于 300°C 时会产生大量热解气体。靠近火点的物体因受辐射热影响会迅速升温。

只有当房间内的温度足够高并形成烟气层时，房间内较远的物体才会开始热解。辐射热将主要来自烟气层，被烟气包围的物体也会因热对流而开始升温。

因此 FC/VC 点在火灾发展曲线图上的位置非常重要，当燃烧受通风控制时，随着温度升高，火灾将变得越危险。

火灾造成的危险也随时间的推移而变化。任何火灾都会产生一定的能量，这称为热释放率（HRR），即每秒钟产生的能量（以焦耳为单位）。不过，能量也会损失。在封闭的房间中，能量通常因墙壁传导而损失。这意味着基本上每秒钟都有一定能量离开房间。火在产生能量的同时，能量也会通过墙壁流失。在燃料控制型火灾中，火灾产生的热释放率会增加，这一热释放率将大于通过墙壁流出的热释放率。

当每秒产生的能量大于损失的能量时，温度就会升高。在达到 FC/VC 点之后不久，温度还将继续上升一段，热释放率随后停滞甚至下降，几秒钟后通过墙壁损失的能量超过火灾

产生的能量，温度将开始下降。

船的类比可以再次帮助解释这一现象，发动机停的动力虽然有限，但船还是可以向前漂一段时间。火灾的热释放率虽然有限，但温度将持续上升，虽然产生的热量有限，但仍比损失的热量多。

能量损失的速度取决于室内温度、室外温度和墙壁温度。除此之外，建筑材料的某些特性（导热性、密度和比热容）也起着重要作用，墙壁各层（如墙、砖、隔热材料）的厚度也很重要。

那么消防员何时开门变得至关重要，消防员一打开门，新鲜空气就会涌入，烟气就会流出。新鲜空气会导致热释放速率上升，空气进入的速度越快，火灾就越会危险。

当我们再看一下图 3 就会发现，时机的把握在火场上极为重要，如果消防员在黄线达到峰值时开门，风险将远远大于粉线达到峰值时开门。从图中也可以清楚看到，峰值后温度会很快下降。如果没有人注意到或报告火情，消防员在 FC/VC 点后一个小时或更长时间才打开门，火可能已经自行熄灭。通常情况下室内温度不会很高，空气流速也有限，粉色线条的峰值要比热量全部散失的黄色线条更加危险。

为了评估风险，我们必须考虑两点：

- 火灾何时变为通风控制的？（当时有多热？）
- 消防员开门时的室内温度？

2. 压力

在通风受限型火灾中，室内会出现特殊的压力模式。火灾会使温度上升，烟气的温度远远高于周围环境的温度。任何受热的东西都会发生膨胀，如果起火房间的门是开着的，那么烟气就会流出，由于存在较大开口（如门的面积约为 2 m^2 ），起火房间将无法累积压力。

如果门窗紧闭，则会出现不同模式。室内温度升高，房间内逐渐充满烟气，这将导致室内压力也随之升高。只要有足够的空气，热释放速率就会持续增加，室内温度也会相应升高。随着室内氧气开始耗尽，达到 FC/VC 点，产生的热量随之减少，而通过墙壁损失的能量基本保持不变。因能量损失高于能量产生，温度将在达到峰值后迅速下降。

2015 年 1 月，我在芝加哥参加了美国保险商实验室消防员安全研究所 (UL FSRI) 的一系列新测试。多年来，美国保险商实验室 (UL) 一直在进行高质量的消防研究。他们每年都会在一座大型测试设施中建造两座房屋，然后反复点火烧这些房子，目的是在安全和可重复的条件下研究新的灭火战术。

一月份的测试研究目的是评估正压进攻(PPA)的效率，即灭火前使用正压通风。

如图 4 所示，火灾使温度升高，但由于房间内的氧气逐渐耗尽，在 FC/VC 点后温度将大幅下降。在点火之后有一个初起阶段，大约 1.5 分钟后可以看到形成热烟气层：绿线表示距地面 2.1 米的温度；大约 2.5 分钟后，此点温度开始上升。这意味着烟气层已经下降到 1.5 米以下；不久之后，温度从 200°C(400°F) 上升到 982°C(1800°F)，所有这些都发生在测试开始的四分钟内。然而，一分钟后温度又降到了 200°C(400°F)，温度下降的速度受隔热系数和材料特性的影响。

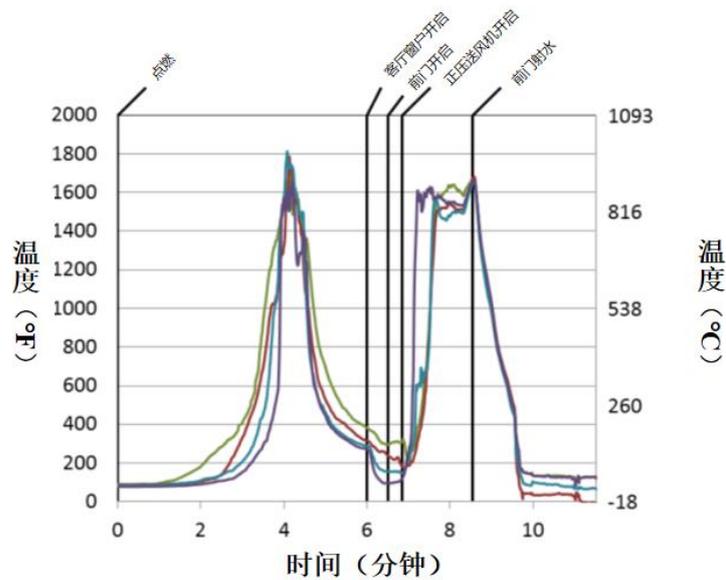


图 4 UL 测试的温度曲线图。图中显示的温度是在起火房间内测得的，不同颜色表示不同的测量高度：绿色：2.1m；红色：1.5m；蓝色：0.9m；紫色：0.3m。很明显温度先上升后下降。【图：美国保险商实验室消防员安全研究所（UL FSRI）】

在火灾发生后的最初四分钟内，房间内的压力持续上升。图 5 说明了压力上升的重要意义，室内的压力达到 150Pa，这相当于每平方米受 15 公斤力。如果房间内有一扇面积为 2 m²的门，热烟气将对门板施加 30 公斤力，国外曾有居民因室内高压导致无法开门逃生的案例。

超压会导致烟气从裂缝中排出，由于烟气的排出，压力的增加也是有限的。当燃烧达到最高温度，烟气的膨胀就会停止，烟气不再被继续加热。当室内温度下降时，烟气也会随之冷却。只要室内超压，烟气就会不断被排出，这将导致超压状态逐渐减弱，就像自行车轮胎慢慢瘪下去一样。

气体受热后会膨胀，相反冷却会收缩。当气体收缩时，超压会进一步减弱，因为冷却后的气体所占的体积会减少。由于部分烟气已被排出，剩余的冷却气体将不再充满整个房间，冷却使房间变为负压状态。本实验测得的低压为 50Pa，紧接着新鲜空气将从相同的缝隙被

吸入，直到室内外压力相同。

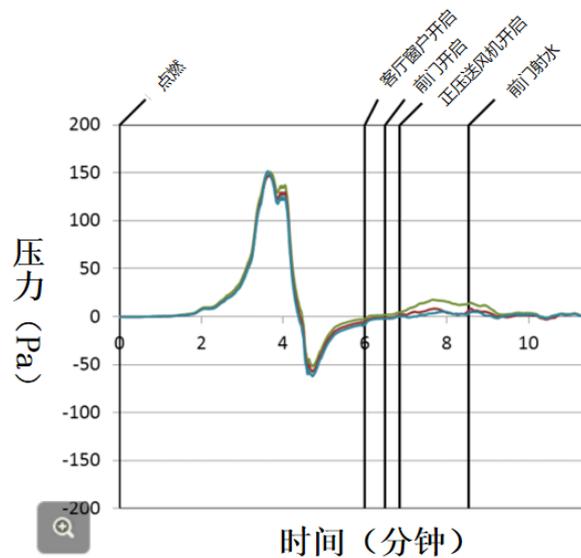


图 5 实验中的压力变化。压力的增加与温度的升高有关，温度达到峰值后，压力开始下降。【图：美国保险商实验室消防员安全研究所（UL FSRI）】

如果我们将图 4 和图 5 放在一起看，可以很容易的发现两种现象是相互关联的。温度升高，压力增大。实验录像显示，烟气从所有裂缝中逸出。过了 FC/VC 点，温度开始降低，同时压力也开始下降。录像显示，向外逸出的烟气突然停止，肉眼无法看到的新鲜空气向内吸入。

最后需要注意的是，上面的图表只表明本次测试，其他测试会产生其他压力模式，压力和温度的变化取决于许多参数，所以某些图表可能与上图完全不同。

3. 现场处置

现在我们必须问自己：“我们如何在实战中运用上述知识？”

到达火场后，每个人都必须了解着火建筑内的情况，尤其是大队/站两级指挥员，他们必须正确掌握现场情况。通过观察通风口的大小和位置，消防员也可以尝试确定他们面对的是通风火灾还是通风受限火灾，如果门开着，烟气向外流出，则很可能是通风火灾。



图6 烟气正从窗户流出，通过观察颜色、流速等判断情况的严重程度。【照片：瓦尔·圣日耳曼（Warre St-Germain）】

如果消防员面临的是一栋完全封闭的建筑时，情况就完全不同。当所有门窗都关闭时，就没有足够的空气使火灾充分发展，但这需要在正确的背景下加以考虑。在现代住宅中，室内空间较小，火势可能无法突破窗户或在建筑外墙强行开口。消防员可以假定在他们进入前，通风状况保持不变。但是在体积较大的工厂厂房中，火势很可能在变为通风控制前就猛烈蔓延，因为大型厂房中有大量空气可用。此外墙壁（如大门）或屋顶（如透明波纹板）上的塑料构件会熔化，这会形成一个开口进行通风。

不过在考虑建筑物大小的同时，也可以通过观察墙壁和屋顶的开口来评估是通风火灾还是通风受限火灾。

3.1 FC/VC 点后不久的通风受限火灾

在没有开口的情况下，我们需要观察逸出的烟气。前段我们说明了室内火势越大，压力就越大，超压状态会使烟气从裂缝和缝隙中排出：压力越大，流出的烟气就越多、速度也越快。

烟气的逸出表明室内处于超压状态，这意味着室内温度很高。如果此时开门进入室内，就会产生强烈的气流，烟气会被猛烈喷出，空气会被吸入。通常开口上部用于排出烟气，底部则出现空气进入通道。但这种情况不会持久太久，由于开口较大，超压会减弱。仍有空气流入和烟气排出，但这种情况将迅速发展，随后很可能会出现通风诱导型轰燃，极个别情况下会发生回燃。



图7 通风受限火灾中的内部温度非常高，内部超压会将烟气排出。【照片：兹比格涅夫·沃兹尼亚克（Zbigniew Wozniak）】

上图所示情况在火场上很明确，如果消防员受过通风受限火灾发展以及热量、压力积聚方面的培训，他们就能理解发生了什么、开门后会发生什么。我们可以再次用“施工的高速公路”类比说明。在进入施工区段之前，司机必须将车速降至 70km/h，大多数司机都急于尽快回到 120km/h，一旦离开施工区域，他们会经过解除限速的标志，所有司机都将加速至 120km/h。像上面描述的一样，火灾一旦获得所需的空气，就会迅速发展，将加速到目前能通过门的空气量所能达到的最大热释放速率。



图8 在施工路段尽头，限速解除。由于缺乏空气，热释放速率有限。一旦门被打开，限制被解除，火灾就会发展成通风诱导型轰燃。【照片：笔秀网（shutterstock）】

3.2 低压条件下的通风受限火灾

上述部分解释了通风受限火灾会如何自行熄灭，内部温度和压力都会降低，烟气停止向外流动。烟气通常会留下一些痕迹，在门窗周围可以看到一块块烟灰，这些烟灰痕迹可能是室内曾经或正在燃烧的唯一可见迹象。从外面看不清楚火灾是否已经到达低压阶段，或者是否已经完全熄灭。

如果消防队在夜间到达现场，因为看不到烟气，很容易忽略这些迹象。因此切勿从什么也看不见的情况中得出任何结论，这一点极为重要。美国消防员埃德·哈廷（Ed Hartin）曾

说：“无迹象就意味着什么也没有！”当消防员到场时，如果从外面看不到任何东西，大多数时候什么也没有发生，然而这可能会导致例行公事和自满情绪。只有当门被打开时，才会清楚发生了什么。

当室内处于负压状态时，开门会导致空气迅速而湍急的向内流动，同时无烟气排出。这种向内流动可能非常强烈，以至于无法再关上门。这种气流表明室内正在猛烈燃烧。图 4 和图 5 显示内部温度约为 200° C, 当时的负压为 50Pa, 如果消防员在这样的条件下打开门，将在相当短时间内（2 到 4 分钟）发生通风诱导型轰燃。

这个场景对于消防员来说再熟悉不过了，只要了解火灾发展、进入室内的开口、温度和压力之间的关系，就能很容易地解释这种情况。指挥员必须能识别这些迹象，以便能意识到发生了什么，就可以相应地调整战术，安全有效地灭火。

3.3 FC/VC 点后很久的通风受限火灾

还有第三种可能，即大火早已自行熄灭。图 3 显示了三种不同的通风受限火灾，黄线所示的火灾与图 4 的曲线相符，在缺氧产生影响之前，温度明显升高。之后温度也会迅速下降。在现代建筑中，窗户几乎不可能破裂，因此室内将一直处于封闭状态，一段时间后火就会因缺氧而熄灭，热烟气将能量传递到墙壁上，温度将在一段时间后再次达到火灾前的水平。

当消防员在这种情况下打开门时，几乎不会产生向内流动，因为此时室内外几乎没有压力差，而且烟气与外界空气之间温差几乎为零。对于消防员来说，这也是一个非常值得注意的场景，热成像仪会显示内部温度几乎没有上升，当火势完全熄灭后，温度将保持不变。因此，在进入通风受限火场时，红外热成像仪是一个非常有价值的工具，如果仍有火没熄灭且热释放速率升高，热成像仪可以让消防员在通过战斗服感受到温度升高之前就察觉到这一点。

4. 参考书目

- [1] *Study of the Effectiveness of Fire Service Positive Pressure Ventilation During Fire Attack in Single Family Homes Incorporating Modern Construction Practices, UL FSRI, resultaten verwacht in 2016*
- [2] *Impact of ventilation on fire behavior in legacy and contemporary residential Construction, Kerber Steve, 2011*
- [3] *Ventilating today's residential fires, Kerber Stephen, presentatie op FDIC, 2011*
- [4] *Fire dynamics: Technical approach, tactical application, Lambert Karel & Baaij Siemco, 2015*
- [5] *Scientific research for the development of more effective tactics, UL FSRI, Fire Department New York & NIST, 2012*