

# 重新认识火灾发展曲线

作者: Karel Lambert

翻译: 橙色救援微信公众号

## 1 引言

每一名消防员都知道消防基础训练中所教授的火灾发展曲线, 以前只有一条发展曲线, 而现在有两条。一条是旧的曲线, 定义为“通风良好型火灾”(见图 1)。本文将围绕这一曲线展开讨论, 它表示房间内发生的火灾具备了如下条件:

- 足够的火灾荷载放置在房间的适当位置
- 良好的通风

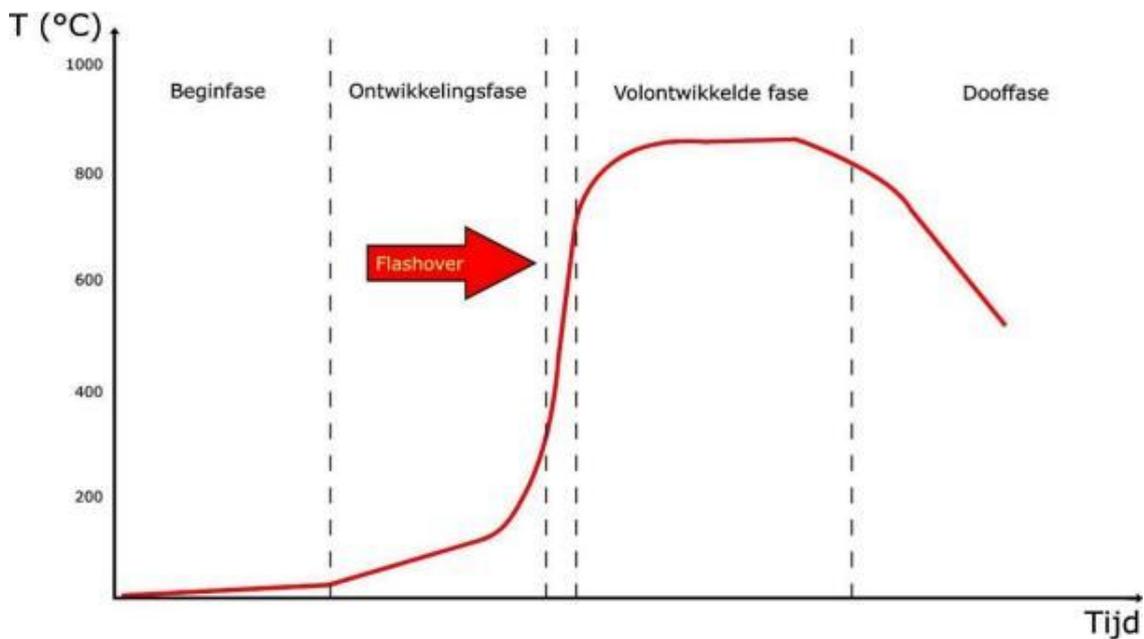


图 1 通风良好型火灾的发展曲线 (图: Karel Lambert)

由于最初起火的可燃物无法产生足够高的热释放率来点燃附近的其它可燃物, 因此火灾经常自行熄灭。这些情况通常会产生大量多烟, 但几乎没有热量。虽然有足够的可燃物可以使火灾发展到轰燃, 但可燃物的分布导致轰燃不会发生, 火在初期就熄灭了。

最近, Oostkamp 的消防队就处置了这样一起火灾, 一幢房子起火, 一家人都被困在一楼。到场后, 整个一楼都被浓烟笼罩。浓烟挡住了一楼住户们的逃生通道, 更重要的是, 一楼的窗户都是单层玻璃。此时火场看似通风不足, 消防员判断若打破窗户可能发生通风诱导性轰燃。他们使用 45mm 水带进行火场内攻, 在水带推进过程中, 客厅里的烟气温度并不高。这些冷烟气可能是通风受限火灾产生的, 由于缺乏空气, 火灾的热释放率非常低 (见

图2)，几乎没有热量积累。通过热成像仪，消防员找到了起火位置。起火点是一个一直在充电的平衡车，旁边有一个坚实的橡木橱柜。橱柜呈发黑烧焦状，但平衡车的热释放率不足以完全点燃木柜。平衡车已完全烧毁，火势进入到下降阶段。火灾产生了大量的烟，但热量很少。通过使用排烟机，烟气从楼里排出，一家人获救。尽管烟气温度不高，但毒性很强，在没有呼吸器的情况下无法逃离烟气。

不过，若是换一种情景则结果会完全不同。假设客厅的另一边放着一个纸箱，平时用来存放平衡车。这个纸箱旁边有一张三人座沙发。假设平衡车放在纸箱里面或上面，然后它着火了，沙发也很可能会被点燃。沙发会产生足够的热量，在客厅引起轰燃。到场后，消防员将面临一场全面燃烧的一楼大火。火灾中所产生的烟气流入一楼，温度将升高10倍。我们只能期望卧室的门是否能保护这个家庭足够长时间，直至救援到来。

在这两种情况下，唯一不同的变量是起火时平衡车（初始燃烧物体）的位置，客厅里的其他东西都一样。一种情况导致大量烟气损害，另一种情况导致房屋烧毁，可能还会有几名被困人员死亡。要使火灾达到轰燃，需要在合适的位置上放置足够的可燃物。

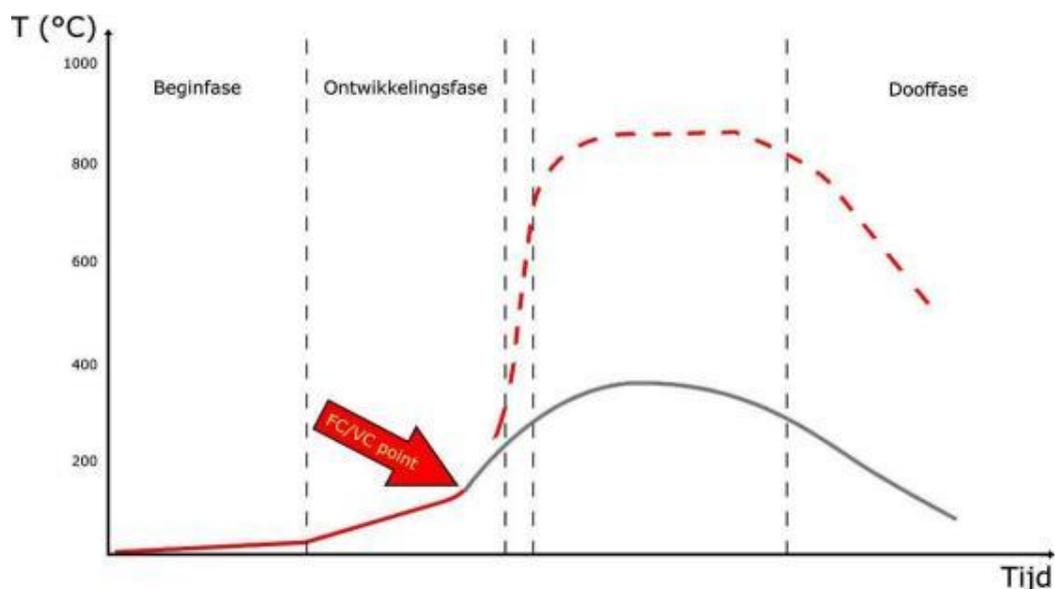


图2

当空气不足时，火灾从红线转为灰线，称为通风受限型火灾。（图： Karel Lambert）

当通风不足无法发生轰燃时，我们处置的就是通风受限型火灾。火势会维持很小的状态，直至自行熄灭，若是出现额外的通风情况，将有一个不同的曲线，如图 2 所示。

然而，本文是关于图 1 所示的通风良好火灾。大多数消防队员称之为温度发展曲线，这种曲线说明了温度随时间的变化。关于这一说法，我们可以提出几个问题：曲线究竟表示的是哪种温度？或者换言之，我们在哪个位置放置温度计才能得到上述图表所示的温度？很多消防员都回答不上来这个问题。

你知道正确答案吗？本文将不时地直接向读者发出提问。在阅读下一节之前试着仔细思考这个问题。文章是否证实了你的答案？如果答案是肯定的，那很好！如果没有，想想你的答案为什么不正确。不管怎样，你都会学到一些东西。

## 2 火灾的热释放率

每起火灾都会产生特定的热释放率，我们可以这样描述：想象有一张三人沙发，假设沙发因遗落的烟头而着火，沙发上四分之一平方的面积正在燃烧，火焰上升到距沙发约50厘米高，你能在脑海中想象出这个画面吗？

火焰的热量将大量向上流动，在那里，它会加热烟气层，一部分热量辐射回沙发，导致沙发开始热解。沙发（火灾荷载）的高温会导致沙发的一部分开始热解，这意味着，沙发失去了部分重量。如果把沙发放在秤上，我们会看到重量慢慢下降，其科学术语为质量损失率（单位为kg/s）。可燃物越热，热解气体形成的越快（天平上的重量下降的越快）。热解气体其实是气态可燃物，为火焰提供燃料，火焰通过周围空气中的氧气来燃烧热解气体。

燃气炉是通过打开阀门来操作的，排出的气体被火花点燃，通过控制阀门，可以形成或大或小的火焰。在真实的火灾中，阀门的功能被传递到可燃物上的热量所取代。可燃物越热，每秒释放的热解气体越多，火灾的热释放率越高。

上述部分仅适用于燃料控制型火灾，在此类火灾中，空气（氧气）充足，火灾的热释放率取决于热解气体的量（质量损失率）。当火灾变成通风控制型时，这意味着没有足够的空气来燃烧所有的热解气体，这些气体一部分流入到烟气层中，这意味着未燃烧的颗粒不断在烟气层中聚集，火灾的热释放率受到可用空气的限制。如图2所示，火灾曲线从红色线切换到灰色线。图1中也出现了这种情况，曲线达到水平最高点之前，火灾已经变成了通风控制。两条火灾曲线都有一个通风控制段。

图1也可以描述为热释放率-时间图，该图显示了火灾初起阶段热量释放率是如何随时间变化的。初期是燃料控制阶段，其特点是热释放率非常有限，火势在发展阶段仍由燃料控制，但在轰燃过程中变为通风控制。全面发展阶段的火灾是由通风控制，在全面发展阶段，由于只有有限的空气可以通过通风口进入房间，所以曲线趋于水平。

### 3 从火灾曲线中可以获取哪些信息？

图3所示的火灾显然是一场全面发展的火灾，火从两扇相邻的窗户里窜出来，两扇窗户的高度和表面积相同。

假设这些窗户与客厅相连，并且客厅的门是关着的，这两扇窗户将是图片中唯一的通风口。客厅里有大量的可燃物：沙发、咖啡桌、装满书的柜子、电视……很明显整个房间都着火了，火灾热释放率受进入房间的空气量限制，这是一个典型的通风控制型火灾案例。

这场火灾开始的时候规模当然很小。为简单起见，我们假设两扇窗户在开始时都是打开的。假定火灾是从一张三人座沙发开始的，一开始热释放率有限，随着火势的发展，热释放率将增加。

图4显示了热释放率随时间的是如何变化的。火灾开始很小，然后慢慢增长，达到轰燃和全面发展阶段（水平线）。过了一段时间，可燃物大大减少，大部分可燃物已经烧尽，这意味着由于质量损失率，剩下的可燃物非常少。大量的可燃物转化为热解气体。可以合理地推断，当70%的

可燃物燃烧完后，将进入下降阶段。由于几乎没有多余的可燃物，热解气体的量（每秒）会减少。在某一时刻，又会有充足的空气通过通风口流入，燃烧所有的热解气体，火灾再次受燃料控制。随着热解气不断减少，热释放率也随之降低，一段时间后，火就会自行熄灭。产生的热解气体变少，将无法再支持燃烧。剩下的可燃物将继续阴燃，但随着时间的推移，燃烧物冷却，火将完全熄灭。



图3 两个窗口通风的火灾全面发展阶段图。（图：www.nufoto.nl

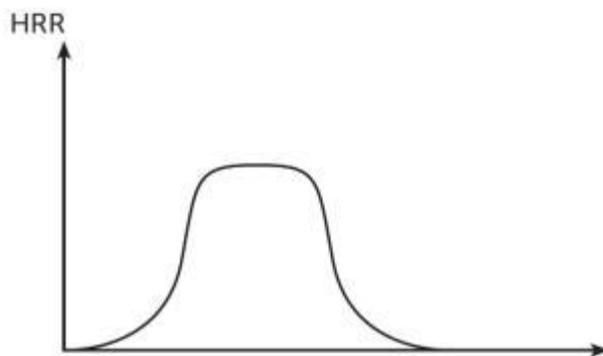


图4 在通风良好火灾中热释放率随时间的变化。（图：Karel Lambert）

假设火灾发生在另一间与前面客厅完全相同的房间里，火灾荷载也相同，并且所有部件（沙发、桌子等）都在完全相同的位置，起火原因都是沙发上遗落的烟头，一切都与第一个场景完全相同，除了一个区别：只有一个窗口而不是两个，窗户的表面积是上次火灾的一半。这对热释放率有什么影响？火势会比有两扇窗户时发展得慢吗？还是以某种方式发展得更快？

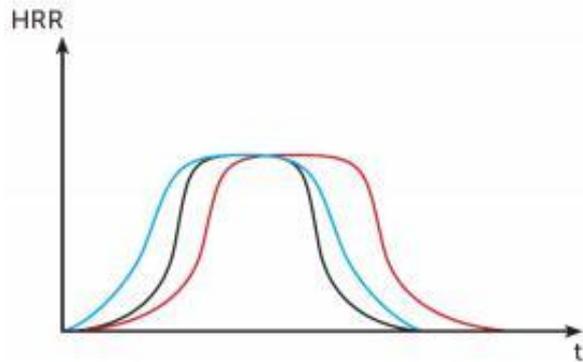


图5 只开一扇窗户时两种可能的火灾热释放率曲线。(图:Karel Lambert)

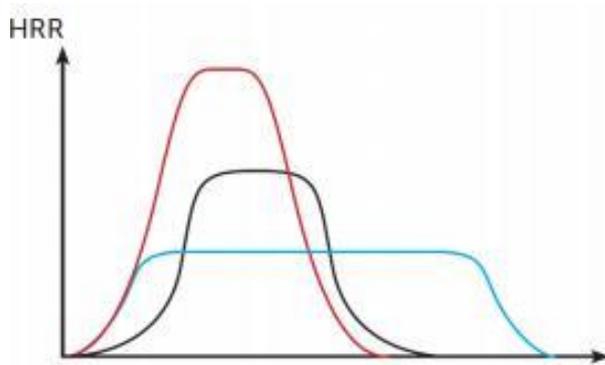


图6 只有一扇窗户时，火灾热释放率的其他两个可能结果。(图:Karel Lambert)

图5的黑线代表当两扇窗户打开时火势是如何发展的。

蓝线表示发展较快的火灾。

红线表示发展较慢的火灾。 哪一个正确的？或者它们都错了？

试着想出证据来支持你的观点。

也有可能得出另外两条火灾进程更快的曲线，但一个热释放率较高，另一个热释放率较低。图6显示了这两条曲线，黑线仍然代表着两扇窗户都开着时客厅里的火，蓝线表示火灾发展得更快，但也很快停止增长，并以较低的热释放率继续燃烧，火灾在这一阶段持续较长时间。

红线表示火灾发展更快，并且达到更高的热释放率，这使它燃烧的时间更短。这两条曲线中有开着一扇窗户的客厅火灾的正确表示吗？再次想出证据支持你的观点。

图7显示了图6的变化。这一次，红色和蓝色的曲线表示火灾的发展速度比客厅开两扇

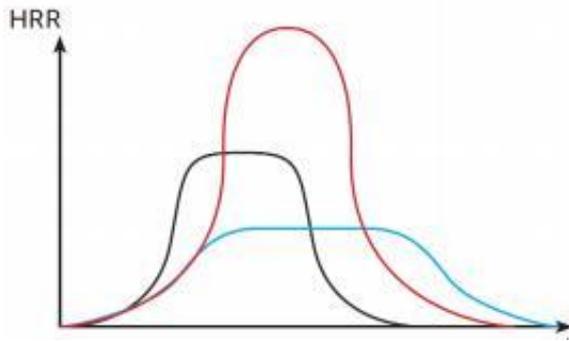


图7 同一火灾的两个新的可能变化。(图: Karel Lambert)

窗户（黑线）中的火灾发展慢。如图6所示，蓝线的最高热释放率比黑线低。红线的热释放率比黑线高，其中有可能正确的那条吗？这取决于你批判性的思考，并给出答案。

图5、图6和图7都表示火灾的发展速度比黑线所描绘的更快或者更慢。然而，火灾的发展也可能根本不受第二扇打开窗户的影响。图8显示了其中的两种可能性。蓝线和黑线在初始阶段完全一样，这意味着火势以完全相同的方式发展。不过火灾在后期变得不那么剧烈（峰值热释放率较低）。红线与黑线也有相同的发展，但最终的热释放率峰值比开两扇窗户的火灾高。也许这才是正确的图表？或许还有另一种可能还没有出现。想想你的答案，为什么你认为它是正确的？

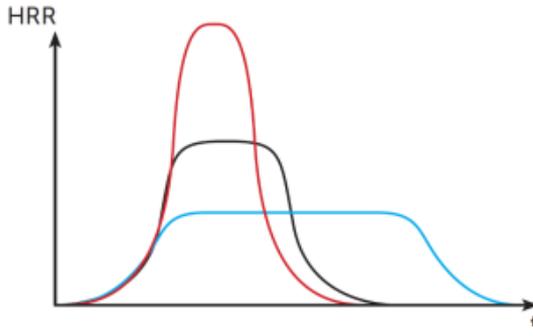


图8 开一扇窗户时，火灾的两种可能热释放率表示方式。(图: Karel Lambert)

#### 4 一扇窗户而不是两扇窗户的效果

黑线表示火灾热释放率与时间的关系，对于一个开着两扇窗户的客厅来说，这条线的第一部分代表了火灾的初起和发展阶段，此时火势是由燃料控制的。这意味着有足够的空气来燃烧正在产生的热解气体，如果要增加通风口的尺寸，也不会影响火势的发展，毕竟已经有足够的空气了。在火灾的初起阶段减小通风口的尺寸也不会产生影响，因为此时只要有足够的空气通过开口进入，就会燃烧正在形成的热解气体，火灾将受到可燃物控制，这意味着增加通风没有影响。

一个燃料控制型火灾，在开始阶段不会因为开口数量的多少而改变燃烧速度，两条火灾曲线（开两扇窗户和一扇窗户）是一致的。

开一扇窗户的客厅火灾也会发展成轰燃，有足够的空气从开着的窗户进入房间，使火势蔓延。请记住，打开窗口的表面积必须大于某一最小尺寸，因为客厅火灾必须要达到一定热释放率才能在房间内实现轰燃。假设图3中的两扇窗口替换为原窗口表面积1/4的一扇窗口，那么在发生轰燃前，火灾可能会变成通风控制，即通风受限型火灾，图2可能是这个场景的一种体现。

当第二个场景中客厅窗户的表面积是第一个场景的一半时，只有一半的空气可以进入。

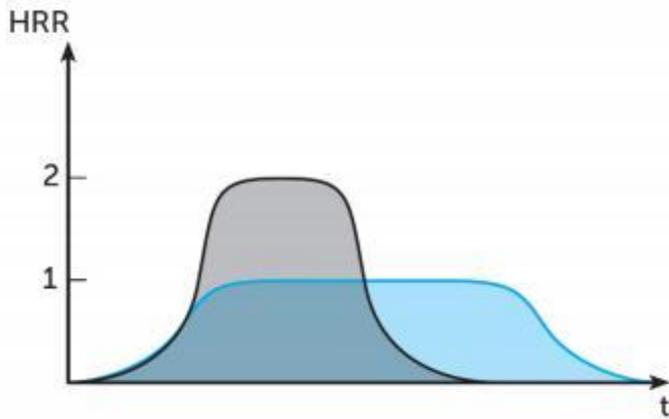


图9 蓝图产生的热释放率只有黑图最大值的一半，由于可燃物燃烧的更慢，因此燃烧的持续时间，差不多有黑图的两倍（图：Karel Lambert）

这意味着第二次火灾产生的热释放率将是第一次火灾的一半。图8中的蓝线说明了正确的答案，水平线的高度（峰值热释放率）由打开窗户的总表面积决定。它们决定了在任何给定的时间进入的空气量，从而决定了最大热释放率是多少。蓝线水平部分的高度必须正好是黑线的一半。如果要打开四扇窗口而不是两扇，那么图8中的红线就是正确的，恰好达到黑线两倍的热释放率。

好达到黑线两倍的热释放率。

最后，必须认识到曲线下的面积代表的是火灾荷载。这就是为什么图8中的蓝线比黑线长（红线更窄）。当热释放率只有黑线的一半时，在任何给定的时间内，只有一半的可燃物被燃烧，这意味着可燃物的燃烧将持续两倍的时间。举一个木炉的经典例子。炉子里可以放许多木头来生火，但当进风口减半时，炉子产生的热量就会减少（因为热释放率减半了），炉子里的木头可以燃烧两倍时间。

这在图9中可以清楚地看到，灰色标记的面积必须与蓝色标记的面积相等。毕竟它们代表完全相同的火灾荷载。在黑线所代表的火灾中，可用的空气量是原来的两倍，因此，可燃物消耗的速度是原来的两倍，这将导致火灾持续时间减半（但火灾强度变为两倍）。

## 5 参考文献

- [1] Lambert Karel, *Baaij Siemco (2018) brandverloop: technisch bekeken, tactisch toegepast, 2nd edition, Sdu*
- [2] Lambert Karel (2009-2019) *CFBT-instructor course for the Attack cell, CFBT-BE*
- [3] McDonough John (2009-2019) *personal talks*
- [4] Grimwood Paul (2008-2019) *personal talks*