

火灾发展曲线图的再认识

作者：橙色救援微信公众平台

1 引言

每一名消防员都知道消防基础知识中所教的火灾发展曲线，以前我们只教一条火灾发展曲线，现在有两条。一条是旧的曲线，定义为“通风良好的火灾”（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：

- 足够的火灾荷载且起火点位于房间的适当位置
- 良好的通风

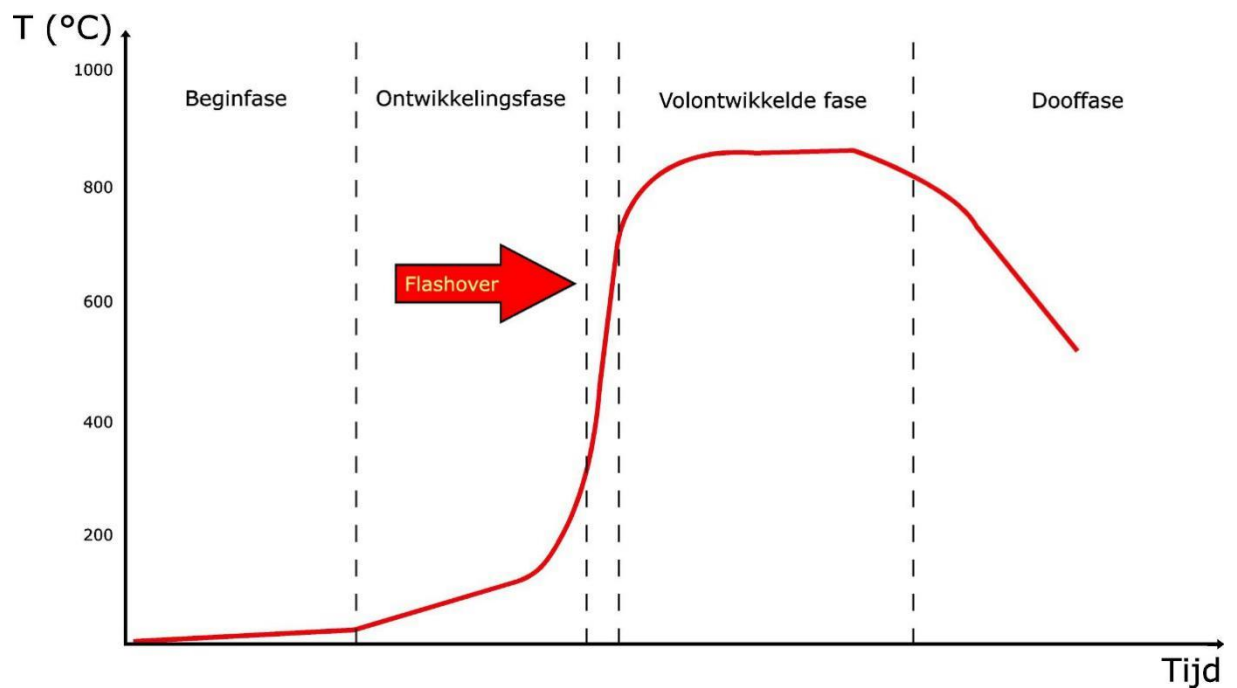


图1 通风良好的火灾发展曲线（图：Karel Lambert）

通常情况下，由于最初起火的可燃物无法产生足够高的热释放率，无法点燃附近的另一个可燃物，火灾便会自行熄灭。在这些情况下，经常有很多烟但几乎没有热。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 的消防队就处理了一起这样的火灾，一幢房子燃起熊熊烈火，一家人都被困在了二楼。到场后，整栋楼都被浓烟笼罩。浓烟挡住了住户们的逃生路线，除此之外，一楼的窗户都是单层玻璃的。消防员判断此时火场通风不足，若强行打破窗户可能引入大量空气，导致轰燃。

他们使用 45mm 水带进行火场内攻，随着救援工作的进行，消防员们发现客厅里的烟气温度并不高。这些冷烟气可能就是通风控制型火灾产生的，由于缺乏空气，火灾的热释放率非常低（见图 2），几乎没有热量产生。

通过热成像仪，消防员找到了起火的位置。起火源是一块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。平衡车完全烧坏了，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，消防员把烟从楼里排出，救出了这一家人。烟雾温度不高，但毒性很强，在没有呼吸器的情况下想逃离烟雾是不可行的。

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板箱，平时里面存放着平衡车。这个纸板箱旁边有一个三个座位的大沙发。假设平衡车放置在盒子的内部或顶部，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。到达后，消防队将面临一楼全面燃烧的大火，所产生的烟气流到二楼，温度会高出 10 倍。我们只能期待，卧室的门是否能保护这个家庭直至救援人员到达。

在这两种情况下，唯一不同的变量是在起火时，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衰减，另一种情况导致房屋烧毁，可能还会有几名被困人员死亡。为了使火灾达到轰燃，需要在合适的位置上放置足够的可燃物。

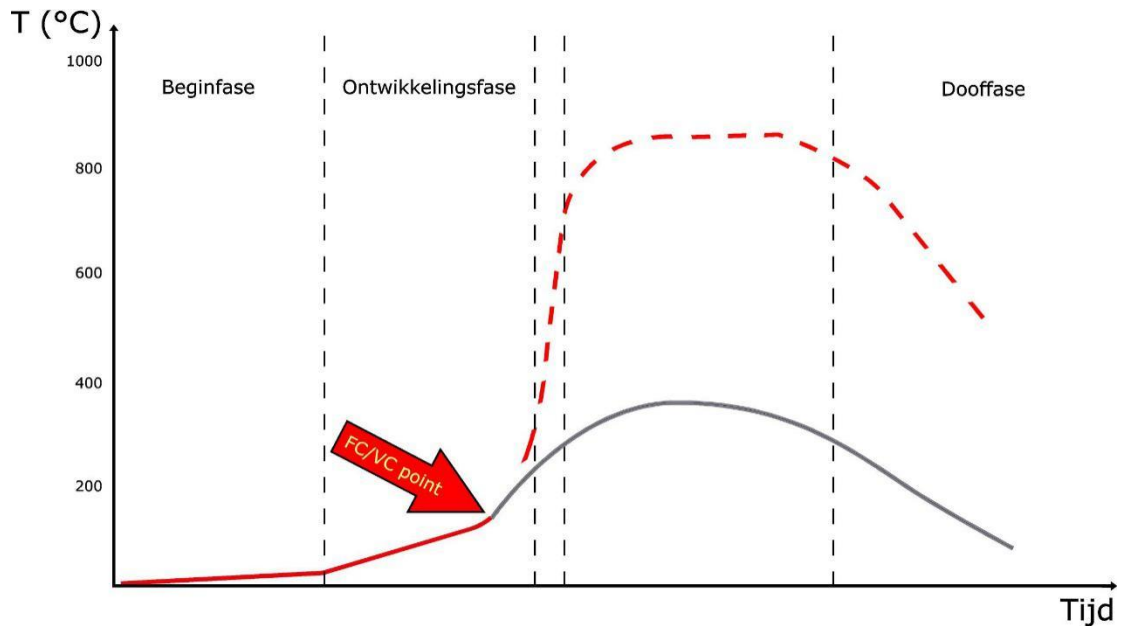


图 2 当空气不足时，火灾从红线转为灰线，称为通风控制型火灾。（图：Karel Lambert）

当通风不足导致无法发生轰燃时，属于通风控制型火灾。火会维持很小的状态，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 所示的通风良好的火灾。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，我们可以问几个问题：曲线究竟表示的是哪个温度？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？很多消防员不能回答这个问题。

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。文章证实你的答案了吗？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 火灾的热释放速率

每一起火灾都有特定的热释放速率，我们可以这么描述：想象有一个三个座位的沙发，假设沙发因一只遗落的烟头而着火，沙发的四分之一面积正在燃烧，火焰距沙发高约 50 厘米。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，使沙发发热。沙发（可燃物负荷）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，我们会看到质量慢慢下降，其科学术语是质量损失率（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）。热解气体其实是气体可燃物，火焰是由这些热解气体产生的，火焰通过周围空气中的氧气来燃烧热解出的气体。

我们知道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，每秒热解气体越多，火灾的热释放速率越高。

以上部分仅适用于燃料控制型火灾，在这样的火灾中，空气（氧气）充足，火灾的热释放率取决于热解气体的数量（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，而未燃烧的颗粒则不断在烟气层中聚集，火灾的热释放速率受到空气的限制。如图 2 所示，火从红色线切换到灰色线。图 1 中也出现了这种情况，曲线突变之前，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速率-时间图，显示了初期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，其特点是热释放速率 HRR 非常有限，火势在整个发展阶段仍为燃料控制，但在轰燃过程中，变为通风控制。

全面发展的火灾是由通风控制的，在全面发展阶段，由于只有有限的空气可以通过通风孔进入房间，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火灾通风孔。客厅里有大量的可燃物：沙发、咖啡桌、装满书的橱柜、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。

这场火灾当然是小规模。为简单起见，我们假设两个窗户在开始时都是打开的。假定火灾是从一个三个座位的沙发开始。一开始热释放速率有限，随着火势的发展，热释放速率将增加。

图 3 两个窗口通风的火灾全面燃烧阶段图。（图片来源：www.nufoto.nl）

图 4 显示了随着时间的推移，我们可以看到热释放速率是如何变化的。火开始很小，然后慢慢增长，达到轰燃和全面发展阶段（水平线）。再过一段时间，可燃物大大减少，大部分可燃物已经被耗尽。

这意味着由于质量损失率，剩下的可燃物很少。大量的可燃物被转化为热解气体。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）减少了。

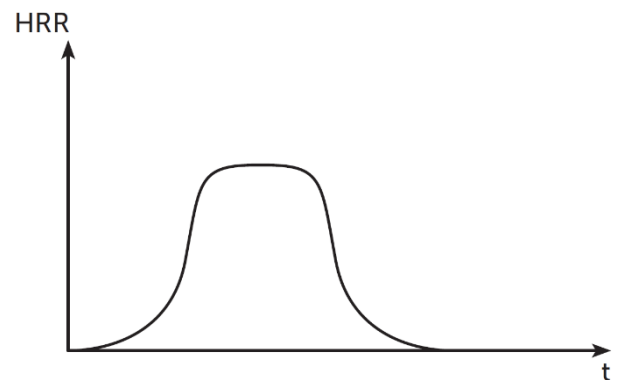


图 4

在某一时刻，充足的空气通过通风口流入，将燃烧掉所有的热解气体，火灾再次成为燃料控制型。随着热解气不断减少，热释放速率也将进一步降低。过一段时

间，火就会自行熄灭。热解气体的产生速率过小，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。

假设火灾是从另一个客厅开始的，客厅的大小相同，火灾荷载相同，并且各部件（沙发、桌子……）在完全相同的位置，起火原因都是由于沙发上遗落的一根烟头。

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。

这对热释放速率有什么影响？火势会比有两扇窗户时发展得慢吗？或者它会以某种方式发展得更快？

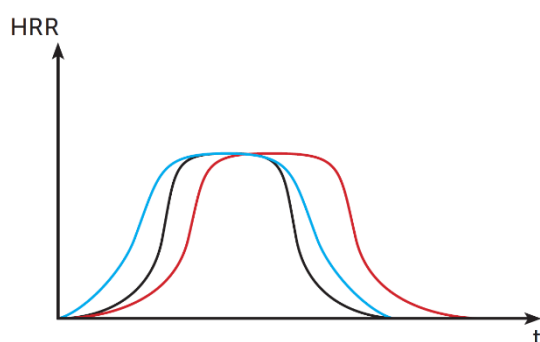


图 5 的黑色曲线代表了当两扇窗户打开时，火是如何发展的。

图 5

蓝线表示火灾发展较快的火灾，红线表示火灾发展较慢的火灾，哪一个是正确的？或者它们两个都错了？

试着想一些论点来支持你的观点。

也有可能得出另外两条曲线，火灾进展更快，但一个热释放速率较高，另一个热释放速率较低。图 6 显示了这两个图，黑线仍然代表着两扇窗户都开着时客厅里的火，蓝线描述的火灾，火势发展得更快，但也很快停止增长，并以较低的热释放速率持续燃烧，火灾持续时间很长。

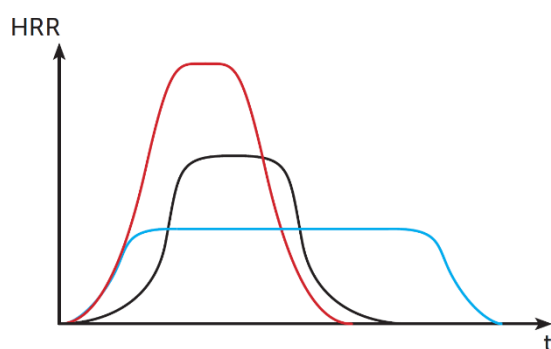


图 6

红线表示的火灾发展更快，并且达到更高的 HRR，燃烧的时间更短。

这两张图中，有开着一个窗户的客厅火灾的正确表示吗？

仔细想想支持你推理的论点。

图 7 显示了图 6 的变化。这一次，红色和蓝色的曲线代表了火灾的发展速度比客厅有两扇打开的窗户（黑色线）中的火灾要慢。如图 6 所示，蓝线的 HRR 比黑线低。红线的 HRR 比黑线高，图中有可能是正确的那条吗？这取决于你进行批判性思考，制定一个答案。

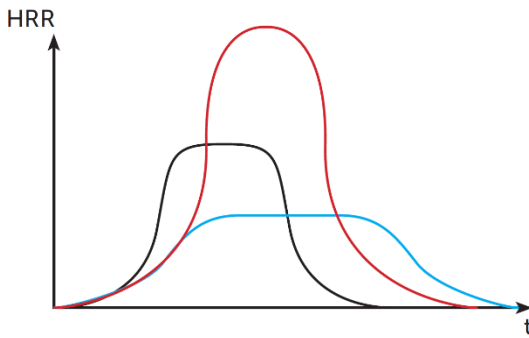


图 7

图 5、图 6 和图 7 都表示火灾的发展速度比黑线所描绘的火灾快或者慢。然而，火灾的发展也可能根本不受第二扇打开的窗户的影响。图 8 显示了其中的两种可能性。蓝线和黑线在初始阶段是完全一样的。这意味着火势正以完全相同的方式增长。

然而，火灾在后期变得不那么强烈（低峰值 HRR）。红线与黑线也有相同的初始增长，但最终的 HRR 峰值比两扇开着窗户的火灾高。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。

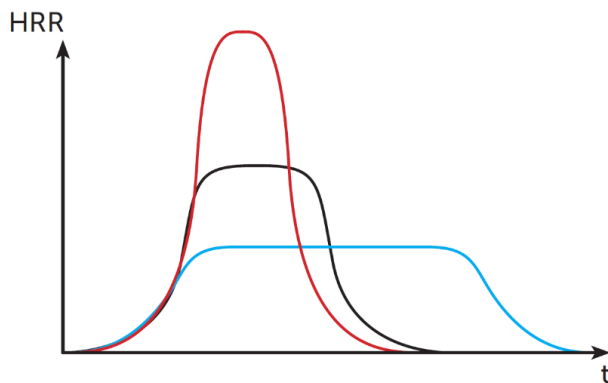


图 8

4 一扇窗户而不是两扇窗户的效果

上图中，黑线代表了一场火灾的 HRR 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期和发展阶段。当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。如果要增加通风孔的尺寸，这不会影响火势的发展，毕竟，已经有足够的空气了。

在火灾的开始阶段，减小通风孔的尺寸也不会产生影响。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，这意味着没有增加通风的影响。

一个燃料控制型火灾在开始阶段，不会因为开口个数而改变热释放速率。两条火灾（开两扇窗户和一扇窗户的情况）曲线是一致的。

开着一扇窗户的客厅里的火也会发展成轰燃，有足够的空气从开着的窗户进入房间，使火势得以蔓延。请记住，打开的窗口的表面积必须大于可让火场达到轰燃的最小尺寸，因为客厅的火必须要能发展到一定的 HRR 值，才能在房间内实现轰燃。

假设图 3 中的两个窗口被原窗口 1/4 表面积的一个窗口替换，那么在发生轰燃之前，火灾可能会变成通风控制型，即通风不足的火灾。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。这意味着第二次火灾产生的 HRR 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 HRR）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有多少空气可以进入，因此，它们决定了最大的 HRR 是多少。蓝线水平部分的高度必须正好是黑线的一半。如果要打开四个窗口而不是两个，那么图 8 中的红线就是正确的，达到黑线两倍的 HRR。

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 中的蓝色线比黑色线长（而红色线更窄）。当 HRR 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 HRR 减半了），炉子里的木头量将可持续燃烧两倍于未减半的时间，这在图 9 中可以清楚地看到。

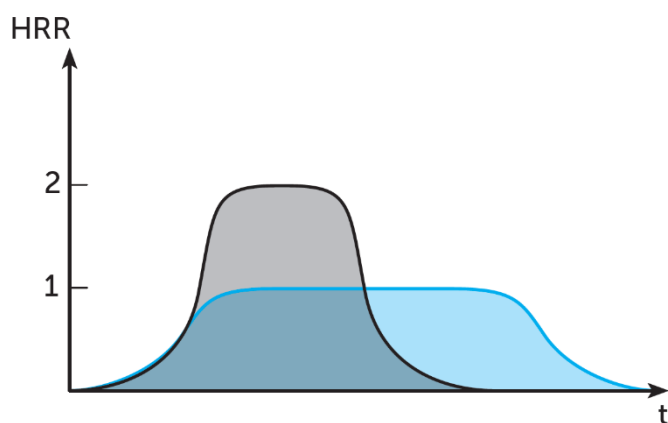


图 9 蓝图产生的热释放速率只有黑图最大值的一半，由于可燃物燃烧的更慢，因此燃烧的持续时间，差不多有黑图的两倍（图：Karel Lambert）

灰色标记的表面积必须等于蓝色标记的表面积。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为一半（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*