

通风口与火灾

作者：Karel Lambert

翻译：橙色救援微信公众号

消防部门在灭火救援过程中开辟或使用通风口时存在许多困惑。在比利时，正压通风（PPV）一般在火灾扑灭后才会进行，因为这样通风不会影响火灾的特性。但在其他国家，通常是在灭火过程中甚至在内攻之前就开始进行通风，这种操作方法可能会影响火灾发展。即使只进行自然通风，火势也会受到影响，所以消防部门必须认识到，开门就等于进行了自然通风，这意味着即使是比利时这种在火灾扑救后进行的通风（不使用正压通风）也会影响火灾发展。

1. 通风口对火灾特性的影响

要了解通风口对火灾特性的影响，首先必须了解火灾特性本身。火灾特性一般分为两种情况，一种是“通风控制型”，另一种是“通风受限型”。要懂得这两个术语，本文将先分析燃烧的两种状态：燃料控制态和通风控制态。

1.1 燃烧状态

刚起火时只有少量可燃物参与燃烧反应，有足够氧气供小火发展。材料（燃料）的特性及其在室内的分布情况将决定火势的进一步走向。重要的因素包括火焰蔓延（火焰在物体表面传播速度）和热释放率（燃料释放能量的速度）。在火灾的初起阶段，燃料控制着火势的发展，这就是它被称为“燃料控制态”的原因。

随着时间推移，火势逐渐变大，温度升高的同时氧气浓度降低；且形成的烟气层在一段时间后会点燃（滚燃现象），此时烟气层下的可燃材料受到的辐射热将显著增加，从而发生轰燃。发生轰燃需要足够的氧气，这意味着门窗需要是开启状态或窗户（如单层玻璃）在火灾发展过程中破裂。

轰燃发生之后，整个房间都将陷入火海，各种开口都在吸入氧气。通常情况下，大火还会从建筑物中喷出，这是因为从开口处吸入的氧气已经不足以满足大火的需要。室内的缺氧环境还会导致一部分烟气在室外燃烧起来。

此时火势大小不再取决于燃料多少，而是由通风（氧气）决定的，因此称为“通风控制态”燃烧。实验表明每 1kg 氧气进入燃烧房间，大约可以产生 13.1 兆焦耳（MJ）的能量；也就是说 1m³ 空气可释放 3MJ 的能量，当空气以 1m/s 的流速流经 2 m² 的门洞时，可供 6MW

的火燃烧。

1.2 两种火灾特性

1.2.1 “通风型”火灾特性

“通风型”火灾特性由5个阶段组成。火灾从初起阶段开始，逐渐演变成发展阶段，这两个阶段的火势都受燃料控制；紧接着将发生轰燃，这一阶段的火势从燃料控制过渡到通风控制；第四阶段是全面发展阶段，这一阶段的火势由通风控制。随着房间内的燃料耗尽，火势将会减弱，同时对氧气的需求也会下降，即在某个阶段，火势会恢复到受燃料控制状态。

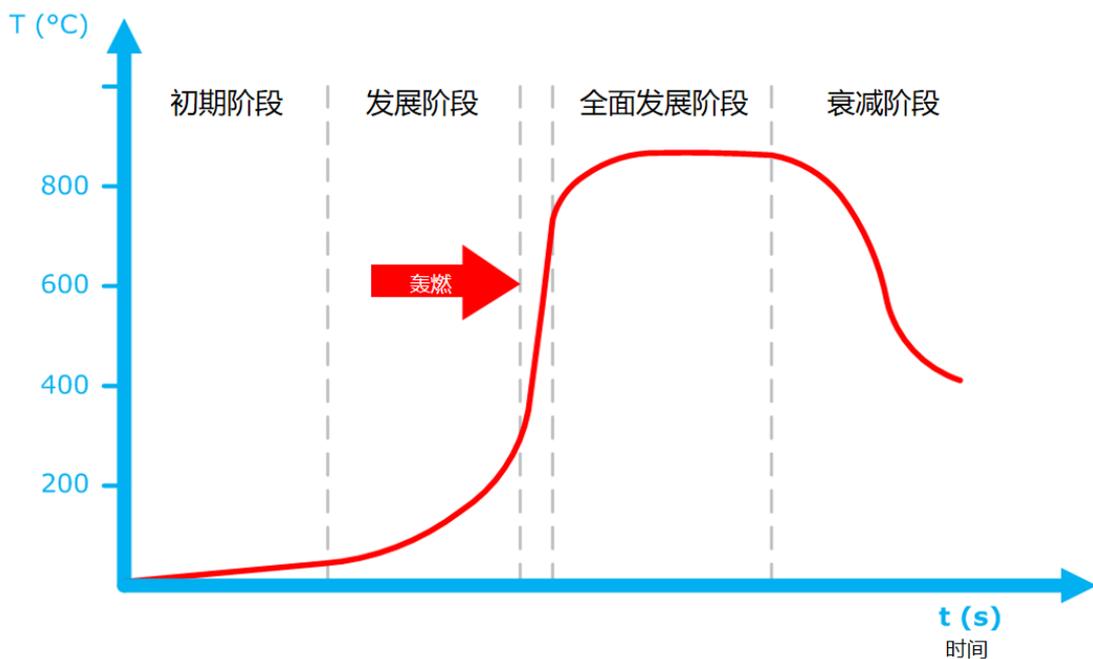


图1 通风型火灾特性【制图：卡雷尔·兰伯特 (Karel Lambert)】

“通风型”火灾特性从“燃料控制态”燃烧开始，然后过渡到“通风控制态”燃烧，随后又以“燃料控制态”燃烧结束。

1.2.2 “通风受限型”火灾特性

通风受限型火灾是指在轰燃之前通风已受到控制的火灾，该火灾特性一开始与“通风型”火灾特性相同，在初起阶段，火势由燃料控制，在发展阶段也是如此。与“通风型”火灾特性不同之处在于有无通风口，“通风受限型”火灾没有通风口，氧气浓度会迅速下降，所以在发生轰燃之前，火势就会受到通风控制，在火熄灭或被消防员扑灭之前，将一直处于通风控制的燃烧。

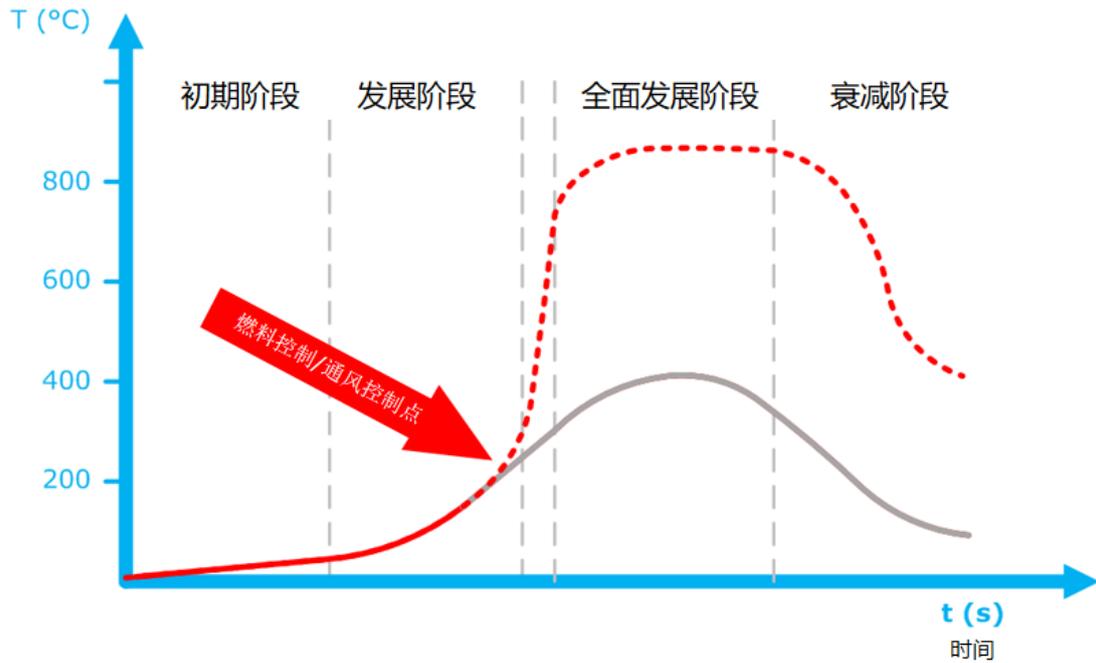


图 2 “通风受限型”火灾特性：红线表示两种火灾特性相同的部分。红色虚线表示“通风型”火灾特性，灰色虚线表示“通风受限型”火灾特性。【制图：卡雷尔·兰伯特（Karel Lambert）】

“通风受限型”火灾一开始也是由燃料控制的，但进入通风控制状态的时间要早得多，因为这种转变发生在轰燃之前，而且将一直保持到火熄灭或被扑灭。

1.3 通风的影响

美国消防的灭火救援行动中习惯于进行通风排烟，通常是开辟额外的通风排烟口，现场可以通过打破窗户（水平通风）和屋顶开孔（垂直通风）来完成。大多数情况下这些方法都是自然通风，并不需要使用正压送风机。网络上有非常多的通风导致火灾失控的视频。

为了在灭火行动中消除烟气，美国消防员本杰明·富兰克林（1706-1790 年）发明了这一策略。多年来，这种战术曾取得了良好的效果，这是因为过去的火灾有所不同，以前房屋中的可燃物主要是由自然产品构成，而现在的可燃物主要是石油衍生品。史蒂夫·凯伯（Steve Kerber）的研究表明，如今发生轰燃的时间已经大大缩短。在上世纪 50 年代，发生轰燃的时间约为 30 分钟，而现在已缩短至 3 至 4 分钟，即现在火灾受燃料控制的时间比过去短得多。

在燃料控制型火灾中进行通风，对火势的影响并不大，毕竟火势的发展是由燃料的特性决定的，所以美国长期以来将通风都作为必要的战术行动，直到 20 世纪后期，这都是一种非常好的战术。

但在现代建筑中，火灾很快就会演变成受通风控制的状态，如果在轰燃前就转为“通风

控制态”燃烧，那么我们所面对的就是“通风受限型”火灾，这种火灾最近发生得越来越多。其发生时，如果对房间的墙壁进行开口，热释放速率就会迅速上升，即通风决定了这种火灾的发展。根据开口的面积和高度，有不同的计算最大功率的公式，打开一扇高 2m、宽 0.9m 的门，可使房间内热量增至 3 或 4MW。破开一扇高 1.5m、宽 2m 的窗户，可供 4.7 至 5.5MW 的火燃烧。

因此在处置“通风受限型”火灾时，通风必须非常谨慎，开口后的热释放速率肯定会增加，美国的消防员逐渐意识到这一点，甚至还增设了“看门人”岗位，即这名消防员要确保入口处的门尽可能关闭。通过应用这一原则，可以限制火灾的热释放速率增加。

2. 通风口的效率

另一个重要的问题是通风口大小，关于这个问题，已有相关文献进行了论述。美国认为 4x4 英尺（1.2mx1.2m）的通风口是标准尺寸——相当于一个 1.44 m²的洞。但最近该尺寸被认为已经小了，目前更多使用的是 4x8 英尺（1.2mx2.4m）的通风口——2.88 m²。

在欧洲，屋顶开口通风的做法并不常见，通常是打开或打破窗户进行通风，所以在这种方式下，通风口的大小取决于窗户的大小。其次开窗比破窗更好，因为如果打开窗户后导致了不必要的通风，通常还可以再次关闭，但窗户如果是被打破，那就不能进行关闭。

要使通风的效率尽可能高，可以将气流的进出量维持在一个特定的比例——确保通过开口的气流量最大。

要确定这一比例，必须区分自然通风和正压式通风（PPV），以下段落阐述的是一个开口完全用作进风口，另一个开口完全用作排烟口的情况，如垂直通风。在实际火场上，水平通风后的情况相对复杂，很多时候，水平通风开口处的气流都是双向流动，要简化这种特殊现象是基本上不可能，因此以下段落中只做简要说明。

2.1 自然通风

通风排烟的基本含义是将烟气从室内排到室外，由于无法创造真空，烟气排出后必须由同等质量的空气来占位。在自然通风的条件下，烟气由于浮力会离开建筑物（产生上浮力是因为空气和烟气之间密度（温度）存在差异）。其次要使通风排烟持续进行，必须有足够的新鲜空气流入建筑物，研究表明，当进风口面积比排烟口大一倍时，排烟效率可达到约 90%；当进风口与排烟口大小相同时，排烟效率降低至 80%，如图 3 所示。

通过开口的烟气流动效率

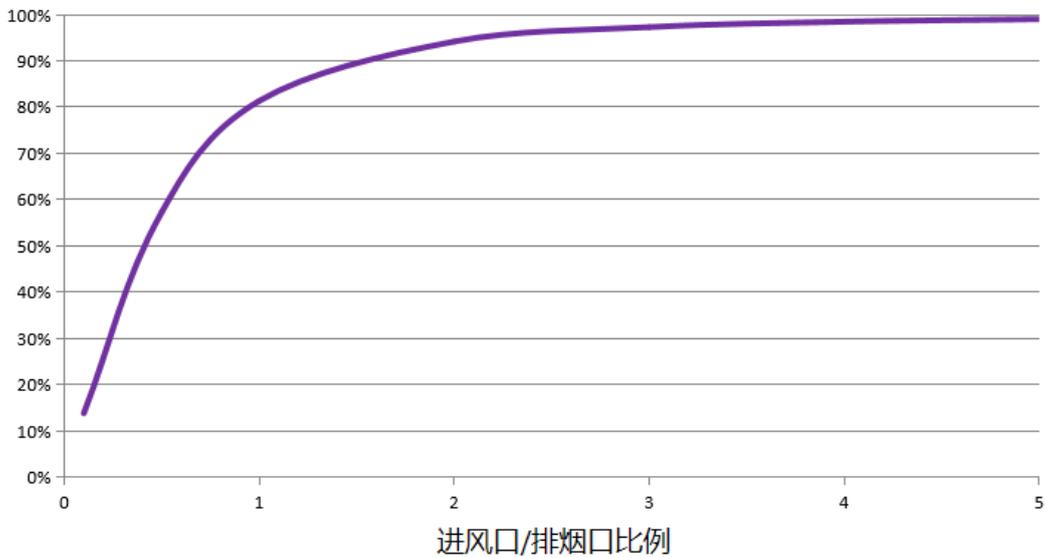


图3 温度为 300° C 的烟气，其流动效率与进风口和排烟口之间的比例有关。当进风口的大小是排烟口的两倍时，效率为 94%。当进风口与排烟口大小相同时，效率降低到 81%。

一些数值可以进一步说明，当烟气温度为 300° C，假设需要通风的房间有一扇高 2m、宽 1m 的门和四扇面积为 1 m² 的窗户。如果打开一扇窗户作为排烟口，而门作为进风口，则进风口与排烟口的比例为 2，那么排除烟气效率为 94%（相对于最大理论流量），即每秒钟将有 2.67Kg 烟气排出建筑物。如果打开第二扇窗户，入口/出口比率将降至 1，每扇窗户的效率降低至 81%。但是两排烟口的总表面积增加了一倍，这意味着可以达到单个窗口最大理论排烟量的 1.61 倍，即每秒可排出 4.81Kg 烟气。这反而比采用一个窗口排烟的效率高 0.94 倍。当四扇窗户全部打开时，进风口/出气口比例降至 0.5，现在每扇窗户的排烟效率为 57%，但现在四扇窗户全部打开，这意味着排烟量将达到了单个窗口最大理论排烟量的 2.28 倍，即每秒可排出 7.26Kg 烟气。如果打开更多的窗户，每个窗户的排烟效率将进一步下降，如果排烟口尺寸是进风口尺寸的 3 倍，那么多开窗就毫无意义了。

综上所述，进风口/出气口比例为 2/1，排烟效果最好。开窗越多，每扇窗的效果越低，但总通风量变大。当达到 1/3 的比例时，再开窗就没用了。但这仅适用于垂直通风，即门（进风口）完全位于中性面下方，窗户（排烟口）位于中性面上方完全用于排气。

2.2 正压通风

对于正压通风，进风口和排烟口之间的比例有所不同。要达到最佳排烟流量，那么这一比例与自然通风相反。换句话说，要达到最佳流量，排烟口面积需要是进风口的两倍。在上面的例子中，这意味着当四扇窗户都打开时，通风效果最佳。那么进风口与排烟口的比例就

是 1/2。烟气的流动不是由烟气和空气之间的温差产生的，而是由送风机的风扇转动产生的，所以也可以通过打开更多的窗户来增强通风排烟效果，正如自然通风的情况一样，开口比例在 1/3 以下是毫无意义的。



图 4 两台正压送风机的 V 形部署。(照片:)【照片: 弗兰克·莫里斯 (Frank Meurisse)】

3. 自然风

在上面的章节中，我们在不考虑任何现场条件的情况下探究了单个开口的排烟效率。但这并不符合实际，因为在打开任何通风口之前，我们必须侦察是否有风以及风的方向。

在自然通风的情况下，风的影响很大。因此必须根据风的方向进行通风，这也就意味着进风口应设在上风方向（迎风面），排烟口最好设在下风方向（背风面），即使是在倾斜的屋顶上排烟，也最好遵循这一规则。如果无法做到这一点，则应尽量提高排烟口的有效性（见上文）。

而正压通风对自然风的依赖性较小，可以在一定限度内尝试逆向通风。进行逆向通风时，排气口可以较小，因为会使得室内压力增大。在风速较小的情况下，室内压力的增大就可以克服风压。如果无法在下风方向开口，这种方法就非常有用，但必须认识到，这种手段受限非常严重，研究表明，消防车上的正压送风机可以产生 26Pa 的压力，这大约相当于 20km/h 的风速所产生的压力，所以只有在风速很低的情况下，逆向通风才会起作用。一些资料提到该阈值为 10km/h，即风速低于这一速度时，逆向通风排烟才是有效的，现场超过这个风速，那么排烟效率会迅速下降。

4. 参考书目

- [1] *Lambert Karel, New insights into ventilation, De brandweerman, May 2011*
- [2] *Hartin Ed, www.cfbt-us.com*
- [3] *Kerber Steve, Impact of ventilation on fire behavior in legacy and contemporary residential Construction, 2011*
- [4] *Kerber Steve, Analysis of changing residential fire dynamics and its implications on firefighter operational timeframes, Fire Technology, vol. 48, p 865-891, 2012*
- [5] *Merci Bart, Active fire protection II: smoke and heat control, postgraduate studies in fire safety engineering, Universiteit Gent, 2010*
- [6] *Svensson Stefan, Fire Ventilation, Swedish Rescue Services Agency, 2000*
- [7] *Christian Gryspeert, personal communication, 2014*
- [8] *Kerber Steve, Madrzykowski Dan & Stroup David, Evaluating positive pressure ventilation in large structures: high-rise pressure experiments, NISTIR 7412, Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology, 2007*

Karel Lambert