

# 什么是空气流动路径？

作者：Karel Lambert

翻译：橙色救援微信公众号

## 1. 引言

二十一世纪初，澳大利亚的山-拉斐尔 (Shan Raffel) 提出了 SAHF 模型，经过与同行们的多次讨论，并受到美国人埃德-哈廷 (Ed Hartin) 影响后，该模型升级为 B-SAHF，这也被称为“火场辨识”。它成为用于在火场中确定火灾类型的工具。B-SAHF 各字母分别代表建筑物、烟气、空气流动路径、热量和火焰，本文将详细阐述“空气流动路径”这一参数。

## 2. 空气流动路径

### 2.1 烟气为什么会流动？

#### 2.1.1 阿基米德定律（浮力定律）

流体力学非常复杂，其中涉及许多物理参数，本文将尝试分析火灾时发生了什么。

火灾中，起火点至关重要，热烟气在此产生，这些烟气的温度比周围空气高。众所周知，物体受热会膨胀，固体和液体的膨胀是有限的，但气体（烟气）升温会急剧膨胀。气体发生膨胀后密度会减小，也就是说单位体积的气体质量会减少。比如温度为  $315^{\circ}\text{C}$  的烟气密度相当于  $20^{\circ}\text{C}$  时空气密度的一半，所以温度升高会导致密度降低。

那么这种密度上的差异有什么重要意义呢？我们可以通过一个思想实验来理解这一定。想象把一个乒乓球按在装有水的浴缸底部，然后将其松开，乒乓球会浮到水面上来，原因是乒乓球和水之前存在密度差，水对乒乓球施加了一个向上的力，这就是阿基米德定律。向上的浮力与乒乓球的体积以及乒乓球和水之间的密度差成正比，乒乓球的重力比水施加的浮力小，所以它会上浮。

由于烟气的密度低于周围空气的密度，所以烟气会上浮。当烟气上浮时，会与周围空气混合，这使烟气温度下降。由于烟气温度下降，其与空气的密度差也随之减小，烟气所受浮力也会减小。当烟气冷却到与周围空气的温度相同时，烟气就会停止上浮，我们可以在满是吸烟者的房间里观察到这种现象。

与乒乓球不同，我们面对的不是单个烟气粒子，而是连续不断流动的烟气。与浴缸不同的是，这里没有水面，空气的边界由天花板构成。因此烟气无法无限上浮，就像我们在鱼缸底部释放几十个乒乓球，过一会儿，浮到顶部的乒乓球会把已经在那里的球推到一边，烟气也是如此，烟气上升天花板后，将沿着天花板水平流动。

## 2.1.2 压力差

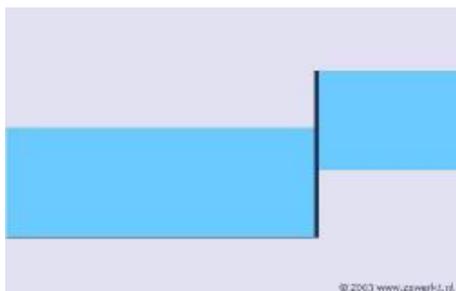


图 1 大坝示意图

另一种理解空气流动路径的方法是观察两个区域之间的压力差，一个众所周知的例子就是水坝，水坝的建造是为了使一边水位较高，另一边水位较低，因此一边的压力也比另一边大。水面下可以打开一个管道，让水从一边流到另一边，水总是会从高压区流向低压区，以使两侧压力平衡，当两侧压力平衡后，

水流才停止。压力差越大，水流越剧烈。

气体流动也会出现同样的现象，消防员使用的空气呼吸器（BA）就是一个众所周知的例子。气瓶内的空气压力是周围空气压力的数倍，当打开 BA 时，空气会从瓶口排出，过量的压力会释放出来。空气流出的速度相当快，会发出很大的噪音，这是因为气瓶内的空气与外部大气存在巨大压力差。空气逐渐从 BA 中排出会使其内部压力降低，空气流出的速度也会随之下降，噪音也将逐渐减弱。然而气流还将继续，直到瓶内气压与外部气压相同后才会停止。在火灾中，某个区域处于超压时，当此区域有开口时，会在开口处产生气流。大自然会设法消除压力差。

## 2.2 烟气流动后会发生什么？

进一步的发展取决于火灾规模，如果火势发展并蔓延，释放的能量就会增加。在这种情况下，产生的烟气也会增加。

卡尔森（Karlsson）和昆蒂埃尔（Quintiere）在他们的著作《室内火灾动力学》（Enclosure Fire Dynamics）中描述了火灾的发展过程，书中的描述虽然比较简略，但却能非常好地了解真实情况。书中描述了火灾从初起阶段到猛烈燃烧阶段的四种不同压力曲线，在火灾初起阶段，产生的烟气会使室内形成超压，烟气将会受热膨胀。这一过程受到周围空气的阻碍，只会造成轻微的超压，如果此时在房间内开个口，压力就会相应地降低。

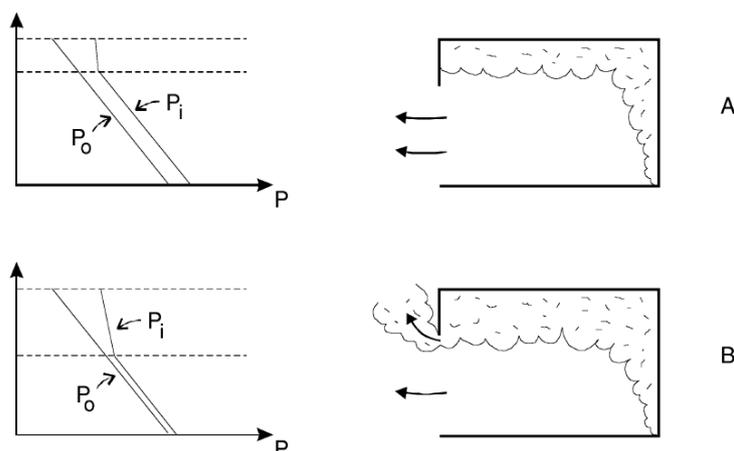


图 2 中的 A 描述了火灾初起阶段的情况，起火点产生的烟气上浮，在天花板处形成烟气层。

起火后房间内的部分冷空气会被排到室外，会使室

图 2 A、B 两种情况下的压力曲线【图表：卡尔森（Karlsson）和昆蒂埃尔

内产生轻微的超压。图 2 左侧是 A、B 两种情形下的压力曲线，横轴表示压力，向右逐渐增加；纵轴表示高度。标有  $P_o$  的直线表示大气压，海拔越高，空气越稀薄，气压也就越低，这条线的倾斜度有些夸大了，目的是为了更清楚地说明这一现象。标有  $P_i$  的曲线表示室内压力，从图中可以看出， $P_i$  线更偏向右侧，说明室内压力比室外压力稍高一些，且这条线与  $P_o$  直线基本平行，表明室内空气温度与室外空气温度大致相同。同样地，室内压力也会随着海拔高度的增加而减小，当  $P_i$  与烟气层接触时，它的斜率就会发生改变。这是因为烟气层的温度远高于周围空气的温度，密度也相对较低，这意味着烟气的质量比周围空气的质量轻。如果在这种环境中，随着室内海拔高度的升高，压力下降的会慢一些。

随着火势增长，接下来会发生几件事。烟气层会逐渐下降，这意味着  $P_i$  发生转变的高度也会降低。随着空气的排出，超压也会有所降低。 $P_i$  曲线将向左移动并靠近  $P_o$  直线，后者仍然代表外部气压，这条线在整个火灾发展过程中都保持不变。简而言之， $P_o$  线的变化不是因为火灾引起的，而是受大气条件的影响。

随后，当烟气层下降到门的高度以下时，室内压力将符合第二个压力曲线，称为曲线 B，但仅持续片刻。在这一阶段，冷空气和热烟气都流经门口，这将迅速消除室内的超压状态，这是一个过渡阶段，只是为了便于理解接下来的发展。

### 2.3 发展阶段和猛烈燃烧阶段的火灾

火灾进入发展阶段后，烟气层已经大幅下降，烟气温度也已大幅上升。起火点正在消耗大量空气。由于房间内的空气不足，室外空气会被吸入房间满足火灾持续燃烧的需要，室内压力变化如图 3 的压力曲线 C。

$P_i$ （室内气压）曲线进一步向左移动，现在的室外气压已大于室内气压。

由于烟气层进一步下降，与图 B 相比  $P_i$  的转折点愈发靠下。此时，火场内部两个独立区域可以清楚的区分开来。烟气层下方的区域温度与室外温度大致相等，

在这一区域两条线平行。气体密

度随海拔高度升高而减小，气压也是如此。由于室内气压小于室外气压，因此形成了从外向内的空气流动路径，这是维持火灾燃烧的气流。

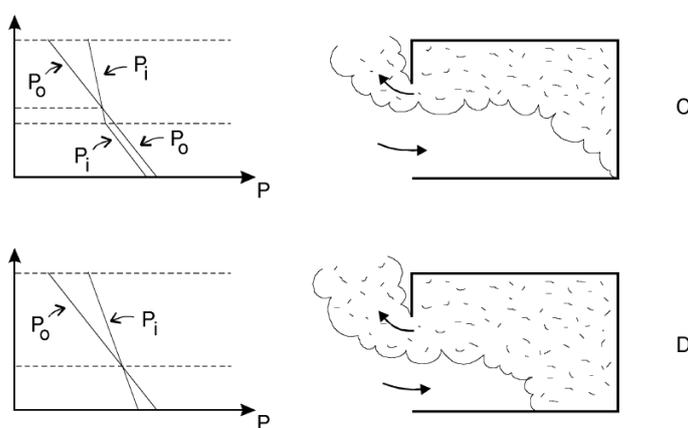


图 3 压力曲线 C 和 D【图表：卡尔森 (Karlsson) 和昆蒂埃尔 (Quintiere)】

第二个区域由烟气层构成，在烟气层内部， $P_i$  曲线发生了变化，这意味着内部压力和外部压力的差在减小，在某一点时，代表内部压力的 ( $P_i$ ) 与代表外部压力 ( $P_o$ ) 两条线相交，此时内部压力等于外部压力，这被称为中性层。通常，中性层位于烟气层底部上方约 10cm 处。这种区别对消防员来说并不重要，在实际中，烟气层底部就能很好地作为中性层的参考。

在中性层上方，两条压力曲线继续沿着各自的路径变化，这就在室内和室外之间产生了新的压力差，室内压力大于室外压力，这种压力差随着高度的增加而增大，中性层上方高度越高，压力差就越大。而中性层以下的情况则不同，在那里，内外压力差都保持不变。在中性层上方会发生烟气流动，当烟气温度升高并上浮至高于中性层时，烟气流动的速度也会增加。在图 C 中，下方的新鲜空气向内流动，上方烟气向外流动，这将一直持续到发生轰燃。发生轰燃所需的时间取决于火场燃烧荷载和室内具体情况，如前几篇文章所述，发生轰燃的时间在过去几十年里已大大缩短，通常只需要 3 到 4 分钟。经验告诉我们，火灾荷载的分布方式或由于开口过小造成的供氧不足都会延迟轰燃发生。



图 4 室内火灾的双向流动，烟气从门顶部流出，空气从门底部流入。【照片：尼克·斯皮勒斯 (Nico Speleers)】

发生轰燃后，室内不再存在温度不同的两个独立区域，整个房间的温度大致相同，不再有明确的烟气分层，但新鲜空气仍从开口底部吸入到室内。和发展阶段清晰分明的烟气层不同，现阶段烟气已完全充满整个房间，且已经被点燃。图 3 中的 D 描述了这一阶段的压力分布，外部气压  $P_o$  保持不变，内部的压力曲线  $P_i$  则有了新的变化。因为整个房间内的温度大致相同，所以代表这一压力的曲线不再有拐点。室内的温度比室外高得多，这意味着室内的密度比室外小很多，这

反过来导致室内压力随高度升高下降的更慢。两条压力线的交点表示中性层，这一点内外压力相等。在中性层以下，空气向内流动；而在中性层以上，烟气（和火焰）向外流动。

### 3. 实际应用

上文首先描述了压力差和空气流动路径是如何形成的。然后讨论了室内火灾在不同发展阶段的压力分布情况。在火场辨识时，可以实际应用这些知识。烟气从起火点到外部的轨迹称为流动路径，对该路径进行观察判断，并结合火灾发展的相关知识，可以获得大量火场信

息。不过要认识到这仅适用于较小面积的室内火灾(房间面积小于 70 m<sup>2</sup>,且高度不超过 4m)。

### 3.1 烟气层高度

从烟气层高度可以判断火势发展程度,如果天花板处烟气层较薄,那么火灾可能还处于初起阶段。不过也不能百分百确定这一点,因为如果在房间上方的某处有通风口,这将影响烟气层正常厚度。

如果烟气层厚度达到 1 米左右,那么火灾已进入发展阶段。最近的研究表明,通风良好火灾达到轰燃所需时间约为 2 到 4 分钟,随着火灾进一步向轰燃发展,烟气层会逐渐下降。

当烟气层下降到离地面 1 米左右时,火灾已经非常接近轰燃。因此烟气层(以及位于稍高位置的中性层)高度的变化是一个很好的指标,可用来评估火灾发展的速度和发生轰燃的风险。

### 3.2 烟气流速

本文开头介绍了温差如何产生气流的。温差越大,流速就越快。当烟气开始快速流动时,能够清楚看到烟气的湍流状态。通过观察烟气的流动速度,可以评估火灾强度。火势越猛烈就会产生越多的热量,这些热量会导致更大的温差,进而导致烟气流动更快。因此可以从烟气流速推断出火灾是否正在快速发展,这也是判断火灾发展到哪个阶段的标志。

### 3.3 起火点位置

通过空气流动路径还能获取有关起火点的信息,烟气会从起火点向外流动。当观察烟气时(可以通过热成像仪),可以确定烟气流动方向,如果顺着烟气逆流而上,就会到达起火点。

除此之外,还可以得出结论:当打开房门进入一个房间,发现烟气没有明显移动时,可能意味着起火点和该房间没有什么关系。

当然,在开门之前必须考虑到人员不要处于烟气流动路径上。打开门,烟气就开始流动。这样虽能够判断起火点位置,但同样需要重视的是,这条新形成的空气流动路径将为火灾发展提供额外的氧气。

## 4. 参考书目

- [1] *Enclosure fire dynamics*, Bjorn Karlsson & James Quintiere, 2000
- [2] *Binnenbrandbestrijding*, Koen Desmet & Karel Lambert, 2008 & 2009
- [3] *Shan Raffel*, [www.cfbt-au.com](http://www.cfbt-au.com)
- [4] *Ed Hartin*, [www.cfbt-us.com](http://www.cfbt-us.com)