

# 火灾的致亡机理

翻译：橙色救援微信公众平台

## 1 简介

每名消防员都知道，人们会在火灾中丧生。但是，他们通常对火灾如何致人死亡的机理缺乏了解。火灾会产生浓烟和高温，两者都是导致人类死亡的潜在因素。

本文对此进行了深入的研究，同时，还探讨了知晓这些知识对我们灭火救援行动的开展有何影响。火场态势的任何变化是否会影响这两个因素？如果是，它将产生什么样的影响？

## 2 高温

燃烧产生热量，加热周围的环境。最重要的因素是热释放率（HRR）。火焰的 HRR 通常以 kW 或 MW 为单位。HRR 告诉我们，燃烧每秒产生多少能量（以 J 为单位）。

燃烧的 HRR 主要通过热对流和热辐射传递。通常情况下，70% 的 HRR 通过热对流传递，而热辐射占 30%。

### 2.1 热对流



图 1：在蜡烛上方，可以感受到火焰产生的对流热。  
(照片来源：Szymon Kokot-Góra)

燃烧产生的能量，绝大部分是通过热对流来传导的。使用蜡烛可以很好地解释热对流现象。如图 1 所示，将你的手放在蜡烛火焰上方 10 厘米处。你感觉到的热量来自于上升的空气（烟气）。通过将手放在蜡烛火焰的侧面（同样距离），你可以感觉到对流热和辐射热之间的差异。

首先，对流热从火焰传递到烟气上。火焰的 HRR 越高，烟气将越热。

但是，还有一个因素也会影响烟气的温度，那就是烟气层的高度。普通大小房间地板上的家庭火灾所产生的烟气，在撞上天花板前需要上升 2.6 米。在上升过程中，空气将混入烟气中（如图 2），导致烟气的体积和质量不断增加。

烟气中混入的冷空气越多，烟气的最终温度将越低。因此，与 2.6 米的厨房相比，到达 5 米高仓库天花板的烟气温度肯定要低一些。

火灾的下一阶段，会形成烟气层。假设在典型的公寓中，烟气层厚度为 1 米，那么烟气从地面开始只会上升 1.5 米。这意味着混入的空气较少，烟气会更热。

除此之外，与起火阶段相比，火焰的 HRR 通常会增加。因此，热量在增加的同时，混入的冷空气也减少了。这会导致烟气比起火时的温度更高。

从此时起，热烟层已成为热源。它会将热量传递到其他物体上。烟气层的周围就是墙壁和天花板，温度也比后两者要高。烟雾中的热量通过对流的形式传递到墙壁和天花板上。当烟雾流动时，它将部分冷却。同时墙壁和天花板会变热。随着温度的不断升高，它们从烟层吸收的热量会越来越少的。

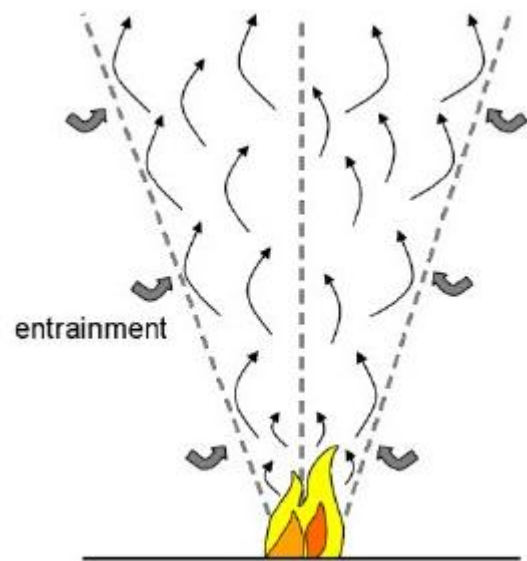


图 2：随着烟雾上升，会混入越来越多的空气。这种现象被称为夹带。（来源：Edward Johnson）

实际上，对流传热率与烟气层和墙壁、天花板之间的温度差（ $\Delta T$ ）成正比。随之而来的是，墙壁和天花板会通过热辐射和热传导传递热量。

---

热对流传递的热量计算公式如下：

$$\dot{Q} = h \times A \times \Delta T \quad [\text{千瓦}]$$

---

当建筑内流动的烟气遇到开口时，烟气将流出。这些有一定体积和质量的烟气，同时会带走相当大一部分能量。

当烟气层距离地面约半米高时，内攻的消防员有部分身体是在烟气层内——这一部分会吸收热量。实际上，消防员位于烟气层中身体的表面（A），与烟气层周边墙壁所受到的作用方式相同。烟气层会将热量传递到内攻人员的战斗服上。传递热量的多少，取决于战斗服和烟气之间的温度差。随后，热量将通过热传导传递到消防员的身体上。

如果烟气层扩散到地板上，躺在那里的任何被困人员将立即感受到热量传递到他们身上所带来的影响。他们所穿的衣服几乎无法提供任何防护。对于站在窗户边（烟气流动路径上）的被困人员来说，情况也是如此。他们还将从烟气层中吸收热量。

其次，热对流传热率取决于上文公式中的系数“ $h$ ”所代表的烟气流动速度。（对流传热系数由许多不同的系数决定，其中之一是速度。）烟气流动的速度得越快，它将传递的热量就越多。

最后，烟气层在流动过程中，会通过热辐射传递大量热量到位于其下方的物体上。

## 2.2 热辐射

辐射是一种众所周知的热传递形式。想一想温暖的夏日里，阳光照在脸上的感觉。每个人都可以感受到热辐射的影响。在篝火或炉火旁，这一现象变得更加明显。大家都知道，随着到热源的距离变小，辐射热会增加。

在火场上，起火点将是辐射热的主要来源。火源及其上方的火焰将散发辐射热。热辐射沿直线移动。任何在火源（和火焰）视线范围内的东西都将被加热。

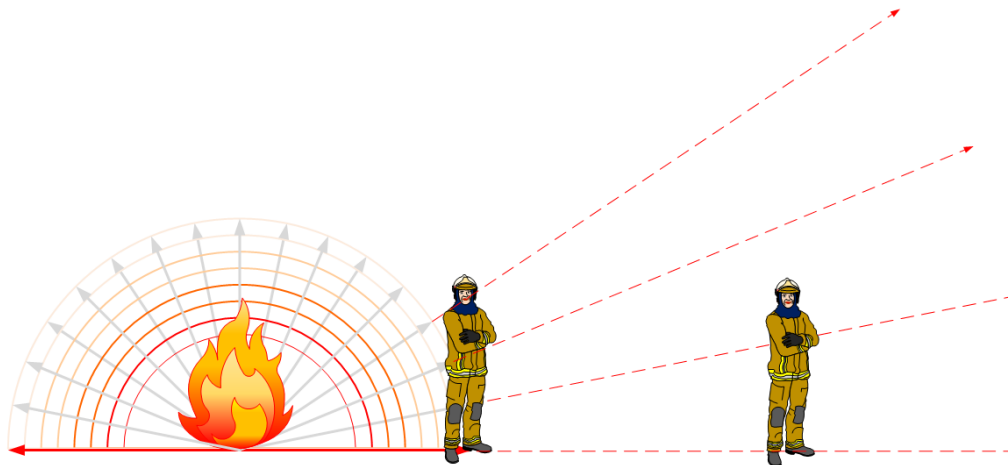


图 3：插图中的两名消防员身高相同（即使看起来并非如此），最靠近火焰的消防员将吸收更多的辐射热。击中他身体的箭头数量说明了这一点。离热源越远，辐射热（箭头）越少。（来源：Bart Noyens——基于圣何塞消防局的 James Mendoza 的想法）

热烟层也会将热量辐射到视线中的下方物体上。这意味着，如果一座沙发位于靠近火源的地方，它将收到两个方向的辐射热。其一，火源辐射出热量。就算火点到沙发的距离有五米，从这里辐射出的热量也

很高。其二，烟气层的温度虽然不及火源或其上方的火焰，但是由于离沙发较近（1.5 米），从烟气层传递到沙发上的辐射热可能更高。

热源与受体之间的距离是辐射热传递中的重要参数。辐射热（以 kW /m<sup>2</sup>量化）与距离的平方成反比。这意味着，与热源的距离每增加两倍，受体接受到的辐射热将减少四倍。接收到的辐射热相对于发出的辐射热的比例称为视角因子。定义视角因子的符号为  $\phi$ 。图 3 清楚地表明，靠近热源消防员比远处的消防员收到更多的热辐射。

第二个重要参数是热源的温度。对于对流传热，传热量由热源和受体之间的温差决定。对于热辐射，情况更为复杂。热源散发出的热量与其开氏温度的四次方成正比。

这有点难以理解，因为一般来说，当开尔文温度翻倍时，辐射热量会增加 16 倍。开尔文的温度比摄氏温度高 273（400 开氏温度等于 127°C，800 开氏温度等于 527°C）当烟气层的温度从 127°C 升高到 527°C 时，来自该烟气层的热辐射将增加 16 倍。

每个物体都会散发辐射热。当沙发表面的温度达到 77°C（350 K）时，它还会散发一些热量。但是很明显，与发烟层发散的热量相比，沙发产生的热量可以忽略不计。

---

热辐射计算公式如下：

$$\dot{Q} = \sigma \times \epsilon \times \phi \times T^4 \quad [\text{千瓦/平方米}]$$

---

辐射热也可以发散到被困人员身上，躺在地板或站在阳台上的被困人员会收到来自烟气层和火焰的热辐射。在实际火场上，我们经常发现一些逃到阳台上的被困人员，他们不再受到烟气的影响，但是热辐射（例如：从玻璃推拉门上涌出的火焰）仍会导致（严重）烧伤，这就是为什么我们要使用过渡性进攻。

通过击退火焰，流出的烟气温度将显著降低。辐射热将很快减少 16 倍，这意味着，被困人员在吸收相同量的辐射热之前，在阳台上停留的时间增加了 16 倍。但是，在此策略中使用适量的水很重要。

进入燃烧房间的前几十升水将蒸发并从火焰中吸收大量能量，那些火焰实际上是超热气体。当水的蒸发从这些气体中吸收能量时，其体积将大大收缩，而水蒸气则会占据这些腾出的空间。

之后，如果有更多的水射入着火的房间，则大部分水会在墙壁和天花板上蒸发。这次，由于没有缩小体积的气体腾出的空间，水流只是形成了额外的水蒸汽。多余的水蒸汽会散布到各处，并严重阻碍消防员甚至伤害被困人员。因此，在击退火焰后立即关闭水枪非常重要。



### 3 热烟气

烟气的产物取决于火灾的种类，从“烟气产物”的角度来看，我们可以区分三种燃烧方式：阴燃，通风良好和通风受限的火灾。阴燃是指温度较低且无火焰的缓慢燃烧过程，阴燃和通风受限火灾一般会产生大量气体（比通风火灾高 10 倍）。在通风良好的情况下，烟气的产生量要低得多。阴燃在很大程度上，取决于火的大小及其发展的过程。例如，一支掉落的香烟会引发阴燃，但无法形成更大规模的燃烧现象（只要阴燃表面积较小，其产生的烟气量也将保持在较低水平）。

火灾烟气包括燃烧产生的各种气体、悬浮的固体（烟灰）和液体颗粒所共同组成的混合物。除热解气体外，CO<sub>2</sub> 和 CO 在烟气中占量较高。当可燃物中存在氮时，也会形成诸如 HCN 之类的物质。放入，烟雾中通常会留有少部分氧气。

烟气中的氧气含量显然远远低于 21%（在空气中的含量），烟气将以团状上升到天花板处，并形成烟气层。烟气层的成分不固定，它在不断地变化。在烟气层内部，某些部位会发生局部燃烧。这取决于环境温度和可用的氧气。

烟气层中一氧化碳的含量在燃料控制型火灾中与温度成正比，在通风控制的火灾中与温度成反比。烟气层中，不同气体的含量也在不断变化。这是一个非常复杂的过程。

## 4 火灾对人体的影响

### 4.1 热的影响

当我们的皮肤受热时，我们首先会觉得舒服。打个比方，想象自己站在太阳下面。如果在阳光下呆太久，舒服的感觉也会导致我们皮肤一级烧伤（就是众所周知的晒伤）。在炎热的夏天，来自太阳的辐射热约为 1 kW / m<sup>2</sup>。长时间暴露于这种水平的热辐射下，会导致一级灼伤。

皮肤的温度可以通过上文提到的热对流或热辐射，来进一步加热。人对热的疼痛阈值约为 43°C。（当皮肤上的温度超过此值时，人会感到疼痛）温度越高、受热的表面积越大，引起的疼痛更剧烈。这种痛苦甚至可以导致人在明知会摔死的情况下，仍然选择跳出窗户。

当皮肤温度达到 48°C 时，会造成一级烧伤，皮肤会泛红。当温度达到 55°C 时，将开始形成二度烧伤，这种烧伤的特征是产生水泡。随着温度持续升高，将造成三度烧伤，此时，烧伤部位的皮肤被完全破坏。

当然，人的皮肤和烟气之间存在温度差异。再由于传热（热辐射或热对流），皮肤会被再次加热。



由于消防员通常在特定温度的烟气中工作，同时又暴露在一定量的辐射热（以  $\text{kW}/\text{m}^2$  为单位）中，他们会受到热对流与热辐射的共同作用。美国国家标准与技术研究院（NIST）绘制了一张图表，指出了两种传热形式对人体造成的影响，该图还考虑了战斗服的保护作用。

NIST 的图表当然是真实火场的简化版模型。但其仍然可以很好地初步估计，消防员在被烧伤前在特定条件下，可以安全工作多长时间。

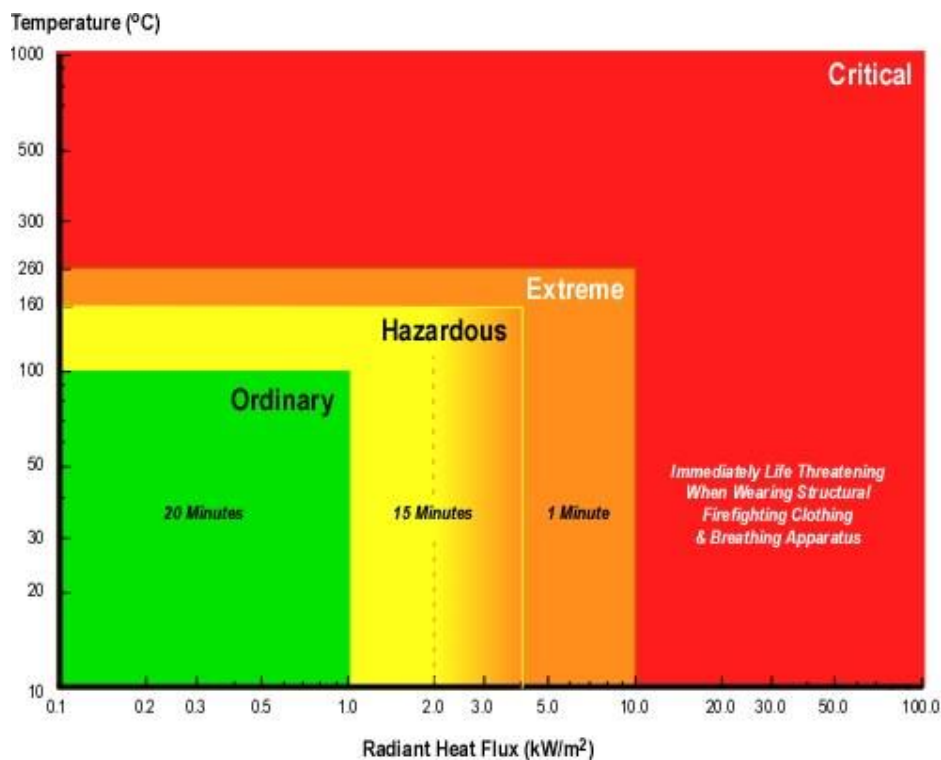


图 43X 轴标示辐射热通量，Y 轴标示环境温度，他们与暴露极限的关系。

(来源: NIST)

## 4.2 烟气的影响

火灾中的热烟气，实际上是由数百种不同的物质组成的。尽管如此，我们仍可以通过观察某些特定气体，以及这些气体之间的相互作用来说明烟气对人体的影响。

烟气会给人类带来各种各样的问题：

- 烟气部分由刺激物组成。
- 烟气部分由窒息物（ $\text{CO}$ ， $\text{CO}_2$ ， $\text{HCN}$  等）组成
- 烟气降低了氧气含量。



烟气中的刺激性气体，会对眼睛和肺产生负面影响。在高浓度时，它们会引起极大的疼痛。最重要的是，光线无法穿过烟气，这意味着你不能很好地看透烟气。烟气越浓，视野越少。所有这些特征，使人们很难走出烟气弥漫的区域。

火灾中，被困人员的身体素质也扮演了很重要的角色。与身体状况良好的成年人相比，老年人和小孩更容易受到于刺激物的影响而倒地。当然，患有反应性气道疾病的人，暴露在火灾烟气中后会比身体健康的人更快地遇到身体上的问题。

暴露于刺激性气体的人，即使在离开火灾烟气中后，仍会出现许多健康上的问题。可以这样说，就算离开火场，他们也没有完全脱离危险，在暴露后的最初 24 小时内，他们可能会患上致命性的肺部炎症。在得到充分治疗或完全预防此类炎症后，大多数被困人员会在 3 个月内完全康复。

只有当火灾被困人员离开医院时，我们才能真正地挽救了一条生命。通常的流程是如下：消防部门救出被困人员→医务部门确保他们存活。

烟气中还有部分 CO，在火灾中，CO 含量通常达到 5,000 至 10,000 ppm。这个浓度就很高了。CO 自身附着在血液中的血红蛋白上。血红蛋白是红细胞中运输氧气的蛋白质。血红蛋白可以看作是一组从肺部向身体其他部位运送氧气的卡车。当一辆卡车装上一氧化碳时，它就再也无法运输氧气。如果携带一氧化碳的卡车过多，则新鲜氧气对身体其他器官的供应将大大减少。

CO 的量以 %COHb 定量，血液中 CO 含量过高是火灾中被困人员的主要死因。人体适用于哈伯定律，一氧化碳中毒取决于暴露时间和空气中一氧化碳含量。也就是说，人在 1,000 ppm 的 CO 浓度下暴露 5 分钟与在 500 ppm 的 CO 浓度下暴露 10 分钟所受到的作用相同。

烟气中通常还含有氰化氢。在火灾情况下，HCN 浓度可能达到 1,000 ppm。HCN 是剧毒气体，其毒性比 CO 高 25 倍，其对人体造成的伤害远高于 CO。如果烟气中存在 HCN，被困人员会在更短的时间内失去意识。这进一步缩短了被困人员自主疏散的时间。

最后，值得注意的是，哈伯定律不适用于 HCN。如果空气中 HCN 的浓度达到 200 ppm 以上，就有致命的危险。

烟雾中的二氧化碳含量也很高，由于人体的自然目标是将二氧化碳从血液中排出，高浓度的 CO<sub>2</sub> 会导致人体过度换气。从而导致被困人员更快地吸入其他有毒气体。



烟气中的氧气浓度已经很低，有时候几乎没有。氧气含量低很危险。在房屋着火期间，靠近地板的氧气含量通常仍可使人存活。但在烟雾层内部，氧气测到过的浓度为 1%。

此上几点外，烟气层的温度很高。吸入这些烟气会大大降低人的生存机会。有多起案例表明，有人在打开着火房间的门后被冒出的浓烟裹住，即使在浓烟中只吸了一口气，他们也会丧失意识倒在地板上。

烟气中还包含许多其他气体，例如  $\text{NO}_x$ ，但是这些气体通常影响意义没有前几个大。

一般来说，烟气对人体有三种影响：

- 1、刺激性气体严重阻碍了人员疏散。眼睛开始流泪，呼吸道开始疼痛。直至被困人员昏倒。
- 2、被困人员所接触的有毒气体（最主要的是  $\text{CO}$  和  $\text{HCN}$ ）浓度的高低，造成的影响包括方向感迷失、失去知觉甚至死亡。
- 3、就算被困人员从火场中被救出，由于吸入高浓度的刺激性气体而引起肺部炎症和肺水肿也会导致其死亡。

死于烟气吸入的被困人员中，有 75% 是倒在了起火点以外的房间。所以，有毒烟气是火场中的第一杀手。David Purser 教授开发了一个模型来计算烟气对人的影响，他得出一个人吸收烟气量的近似值：有效分数 ( $FED$ )。

他指出，人可以在二氧化碳浓度为 1000 ppm 的环境中待半秒，却不能在二氧化碳浓度为 100 ppm 的环境中待十分钟。一旦  $FED$  升至设定值以上，被困人员就会失去知觉。当  $FED$  进一步上涨时，被困人员就会死亡。

## 5 先救人还是先灭火？

上面的文章，说明了火场中的有毒烟气是如何影响被困人员，增加被困人员生存几率的最快方法是将他们从烟气中移走。要实现这一目标，必须首先找到被困人员。这通常非常困难，尤其是在建筑结构十分复杂时。

提高被困人员生存率的第二种方法是消除烟气。为了实现这一目标，必须进行通风作业。通过用新鲜空气稀释烟气，让刺激性气体和有毒气体的浓度下降，而氧气浓度将上升。但是，在火灾尚未扑灭的情况下，多余的氧气可能对火灾的发展产生严重后果。





因此，通风可能成为现代火场上的危险策略——只有在处理（小）阴燃火灾时，才能相对安全地进行。对于其他火灾（通风良好和通风不畅），重要的是在通风之前就先进行火灾扑救。我们通常很难保证灭火工作会绝对成功。火灾扑救开始时，火点的确切位置通常不（完全）清楚。如果不先对火灾进行任何处理，盲目通风，很可能引起火势增长，从而导致被困人员受到热作用而身亡。

为了挽救生命，必须消除有毒烟气，通风是解决该问题的方法。但是，为了在通风作业引入新鲜空气的同时，不造成火势蔓延，必须先对火焰进行射水，这就是我们可以挽救生命的方式。

由于火场条件发生了变化（与 50 年前相比），我们无法在射水之前救人。因此，首先必须扑灭大火，以便我们能够通风并挽救生命（或挽救生命并通风）。

首先，扑灭大火！（译者注：大家应根据火场情况和建筑情况，选择适合的技战术）

## 6 参考文献

- [1] *Merci B (2010) Active fire protection: Smoke and heat control, course of the Post graduate Studies in Fire Safety Engineering, UGent*
- [2] *Gottuk D, Lattimer B (2016) Effect of combustion conditions on species production, in SFPE Handbook of fire protection engineering*
- [3] *Purser D (2016) Combustion toxicity, in SFPE Handbook of fire protection engineering*
- [4] *Galea E (2011) Human behavior in fire, course of the Post graduate Studies in Fire Safety Engineering, UGent*
- [5] *Lambert K, Baaij S (2018) Brandverloop: Technisch bekeken, tactisch toegepast, 2<sup>de</sup> editie*

