

# 火灾的致亡机理

作者: Karel Lambert

翻译: 橙色救援微信公众号

## 1. 引言

每名消防员都知道人们会在火灾中丧生。但是，他们通常对火灾致亡机理缺乏了解。火灾产生的浓烟和高温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，同时还探讨了这些知识对我们灭火救援行动的影响？火灾特性的变化是否会影响这两个因素？如果是，它将如何以及为什么产生影响？

## 2. 高温

燃烧会释放出热量并加热周围的环境，在这个过程中，热释放速率（HRR）是最重要的参数，火焰的 HRR 通常以千瓦（kW）或兆瓦（MW）为单位进行度量。HRR 告诉我们燃烧每秒释放多少焦耳（J）能量。

燃烧生的热释放速率（HRR）主要通过热对流和热辐射两种方式传播热量。根据统计数据，热对流传递在 HRR 中所占比例约为 70%，而热辐射则占另外 30%。

### 2.1 热对流

燃烧释放的大部分能量通过热对流的方式传递。以蜡烛为例，可清晰地阐明热对流现象。如图 1 所示，当手掌置于蜡烛火焰上方 10 厘米处时，所感受到的热量源于上升的空气（即烟气）。而若将手掌移至蜡烛火焰的侧面，保持相同距离，则能明显感觉到对流热与辐射热之间的差异。



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

对流热从火焰传递到烟气上，火焰的 HRR 越高，烟气就越热。然而，另一个关键因素亦会对烟气的温度产生影响，即烟气层的高度。如果火灾发生于普通大小房间地板上，其产生的烟气在触及天花板前会上升 2.6 米。在此过程中，空气将混入烟气中（如图 2 所示），烟气体积和质量持续增加。烟气中混入的冷空气越多，其最终温度就越低。因此，到达 5 米高仓库天花板的烟气将比 2.6 米高厨房的烟气温度低。

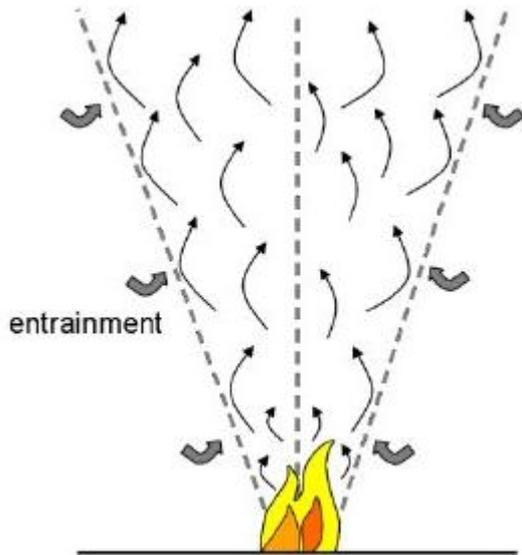


图 2：随着烟气上升，会混入越来越多的空气。这种现象称为夹带。（来源：爱德华-约翰逊 Edward Johnson）

火灾发展的下一阶段，将形成烟气层。以常见的公寓为例，当烟气层厚度达到 1 米时，烟气从地面开始只会上升 1.5 米。这意味着烟气中混入的空气相对较少，烟气温度更高。除此之外，相较于初起阶段，火焰的热释放速率（HRR）往往会有所上升。这使得热量持续积累，同时，混入火焰中的冷空气量却相应减少，这导致烟气比起火时的温度更高。

自此刻起，热烟层已转变为热源，它会将热量传递给其他物体。烟气四周被墙壁与天花板包围，温度高于后两者。烟气通过对流的方式将热量传递给墙壁和天花板，烟气自身温度有所降低，而墙壁和天花板则逐渐升温。随着它们之间温差逐渐缩小，墙壁和天花板从烟气层中吸收的热量也将越来越少。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。反过来，墙壁和天花板也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：

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

在建筑内部，当烟气通过开口处时，烟气就会流出。由于这些烟气具有一定的体积和质量，它们在从建筑流出时会带走大量的能量。

当烟气层下降到离地面约半米左右时，正在内攻的消防员部分身体将处于烟气层之中，这部分身体区域会吸收热量。具体而言，位于烟气层中的消防员身体表面积（ $A$ ）会受到与烟气层周边墙

壁相似的热作用机制。烟气层会将热量传递到内攻人员的装备上，传递热量的多少则取决于战斗服与烟气之间的温度差，随后这些热量热传导至消防员的身体上。

当烟气层蔓延下降至地板上时，身处其中的被困人员会立刻感受到热量对其身体的直接影响。他们所穿着的衣物几乎无法起到任何防护作用。对于那些站在冒着浓烟窗边，被困人员也是一样，他们也将吸收来自烟气层的热量。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因素决定，其中之一是速度。烟气流动得越快，其传递的热量就越多。

最后，烟气层会通过热辐射的方式传递大量热量至其下方的物体。

## 2.2 热辐射

辐射是一种众所周知的热传递形式。想想温暖的夏日，阳光照在脸上的感觉，每个人都能感受到辐射热的影响。在篝火或炉火旁，热辐射的现象更明显。众所周知，离热源越近，感受到的辐射热便越强烈。

火场中起火点将是辐射热的主要来源，火源及其上方的火焰都散发热量。热量沿直线辐射。任何在火源（和火焰）视线范围内的东西都将被加热。

在火场中，辐射热的主要来源是起火点，其中火源及其上空的火焰会散发大量的辐射热，热辐射的传播路径是直线的。因此任何处于火源（和火焰）视线范围内的物体都将受到热量的影响，从而被加热。

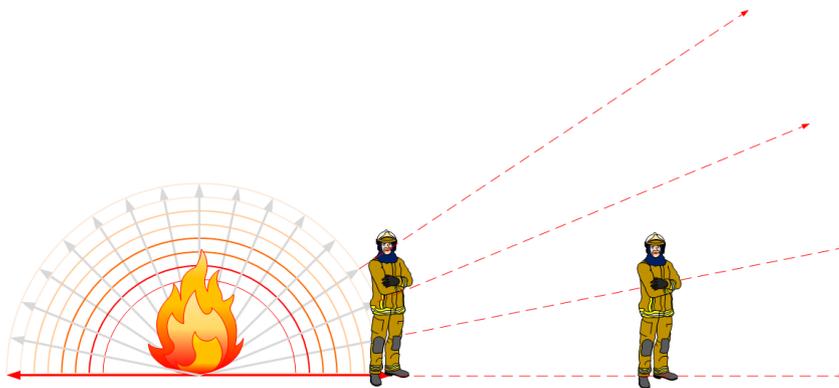


图 3：插图中的两名消防员身高相同（即使看起来并非如此），离火焰近的消防员会吸收更多的辐射热。击中他身体的箭头数量说明了这一点。离热源越远，辐射热（箭头）越少。（来源：巴特-诺延斯（Bart Noyens），根据圣何塞消防局的詹姆斯-门多萨（James Mendoza）的想法绘制）

热烟层同样会向其“视线内”的下方物体辐射热量。因此，若沙发置于火源附近，则将同时受到两个方向的热辐射。一方面，火源本身会持续释放相当大的热量，即便沙发与火源相距五米，所

受到的热量辐射依然显著。另一方面，尽管烟气层的温度不及火源或其上方的火焰，但由于其距离沙发较近（0.5 米），烟气层向沙发传递的热量可能更高。

热源与受热物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一倍，物体接受到的辐射热将减少四倍。接收到的辐射热与发出的辐射热的比例称为视角系数。定义视角系数的符号为  $\Phi$ 。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。

另一个重要参数是热源的温度，对于对流传热，传热量由热源和受热物体之间的温度差决定。对于热辐射，情况较为复杂，热源放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。开氏温度比摄氏温度高 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，它也会散发一些热量。但是很明显，与烟气层散发的热量相比，沙发辐射的热量可以忽略不计。

热辐射计算公式如下：

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

辐射热也可以散发到被困人员身上，躺在地板上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，这也是为什么我们要使用过渡性进攻，扑灭火焰可以使流出的烟气温度显著降低，辐射热将很快减少 16 倍，这意味着被困人员可以在阳台上停留的时间增加了 16 倍，才能吸收相同量的辐射热，但是在此战术中需要使用适量的水。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，那些火焰实际上是高温气体。当水的蒸发从这些气体中吸收能量时，其体积将明显缩小，而气体体积的缩小反过来又为蒸发的水蒸气腾出了空间。如果更多的水流继续进入着火房间，大部分水会在接触墙壁和天花板时蒸发。此情况下，气体体积不会缩小，只会形成多余的水蒸汽。这些多余的水蒸汽将扩散至各个角落，不仅严重阻碍消防员的行动，还可能对被困人员造成伤害。因此，一旦火焰被有效扑灭，立即关闭水枪至关重要。

### 3. 烟气

烟气的产物取决于火灾的种类，从“烟气产物”的角度出发，我们可以将燃烧分为三类：阴燃、通风良好火灾和通风受限的火灾。阴燃是一种温度较低、无火焰的缓慢燃烧过程，阴燃与通风受限的火灾通常会产生大量气体（高出通风火灾的 10 倍）。在通风良好火灾中，烟气的产生量要少得

多。阴燃的处理在很大程度上取决于火势的大小及其发展。例如，一支掉落的香烟可能引发阴燃，但规模无法扩大。只要阴燃表面积较小，其产生的烟气量也会很少。

火灾烟气是一种复杂的混合物，由燃烧过程中产生的各种气体、悬浮的固体颗粒物（烟灰）以及液体颗粒所构成。其中，除热解气体外， $\text{CO}_2$  和  $\text{CO}$  在烟气中占比较高。当可燃物中含有氮元素时，还可能形成如  $\text{HCN}$  之类的物质。此外烟气中通常含有一定量的氧气，但烟气中的氧气含量显然远远低于 21%（在空气中的含量），烟气将以羽状上升到天花板处并形成烟气层。烟气层的成分不固定，始终处于动态变化之中，在烟气层内部，部分区域可能因环境温度和氧气供应情况而发生局部燃烧。烟气层中  $\text{CO}$  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

当皮肤受热时，初期会带给我们一种舒适感，想想阳光照在身上的感觉。但我们都知道什么是晒伤，若暴露在强烈的阳光下太久，这种舒适感便会转变为烧伤。事实上，在炎热的夏季，太阳的辐射强度约为  $1 \text{ kW/m}^2$ ，长期暴露在这种程度的辐射下会导致一级烧伤，即我们通常所说的晒伤。

皮肤温度可通过热对流或热辐射进一步加热。人体对热的疼痛阈值约为  $43^\circ \text{C}$ 。当皮肤温度超过这一阈值时，就会感受到明显的痛感。温度越高，受热表面积越大，疼痛感就越剧烈。这种强烈的痛感甚至会促使人们在明知会死的情况下，仍选择从窗户去。

当皮肤温度升至  $48^\circ \text{C}$  时，皮肤会发红，引起一级烧伤。当温度达到  $55^\circ \text{C}$  时，将开始形成二级烧伤，其显著特征是皮肤出现水泡。随着温度的持续攀升，将造成更为严重的三度烧伤，此时烧伤部位的皮肤将完全被破坏。

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。由于消防员经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  $\text{kW/m}^2$  为单位）中，他们往往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，显示了两种传热形式对人体的影响，该图还考虑了战斗服的保护作用。NIST 的图表虽然只是真实火场的简化模型，但它还是提供了一个很好的初步估计，消防员在特定条件下工作多长时间会被烧伤。

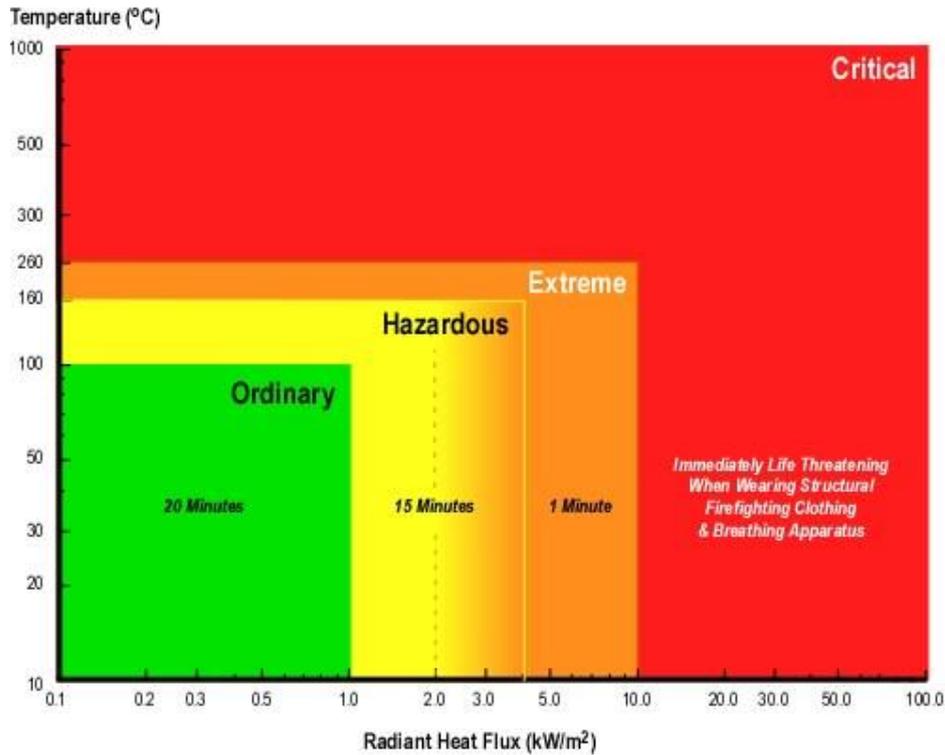


图 4 X 轴标示辐射热通量，Y 轴标示环境温度，他们与暴露时间极限的关系。（来源：NIST）

#### 4.2 烟气的影响

火灾中产生的热烟气，实际上包含数百种不同物质。尽管如此，我们仍可通过观察分析某些关键气体以及这些气体之间的相互作用，来阐释烟气对人体的具体影响。

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（CO，CO<sub>2</sub>，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。高浓度时，它们会引起极大的疼痛。更为关键的是，烟气具有阻光性，导致人们难以透过烟气看清前方。随着烟气浓度的增加，人们的视野范围就越小。这些因素共同作用，使人们很难穿过烟气。在火灾中，被困人员的身体状况也有有一定影响。相较于身体健康的成年人，老年人和儿童更容易受到化学刺激物的影响。此外，患有反应性呼吸道疾病的人暴露于火灾烟气中时，会比健康人群更快出现身体问题。

在暴露于刺激性气体的人，即使离开火灾烟气环境，仍可能面临一系列健康风险。事实上，即便从浓烟环境中被救出，他们依旧处于危险之中。在暴露后的最初 24 小时内，这些人可能发生致命的肺部炎症。若能此类炎症得到充分治疗或完全预防，大多数被困人员会在 3 个月内能完全康复。

只有当被困人员安全离开医院，我们才能真正说我们成功挽救了一条生命。通常是消防部门和医疗部门共同努力，消防部门救出被困人员，医务部门确保他们生命。

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，该浓度已非常高。CO 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，其作用类似于一组从肺部向身体其他部位运送氧气的卡车。当一辆卡车装满 CO 时，它就不能再运输氧气了。如果携带 CO 的卡车过多，将导致向身体其他器官供应的新鲜氧气大幅减少。CO 的量用%COHb 来量化。血液中的 CO 含量过高是被困火场人员死亡的主要原因。人体对于 CO 的吸收同样适用哈勃定律，CO 中毒取决于暴露时间以及所处环境中 CO 的浓度。具体而言，在 1,000 ppm 的浓度下暴露 5 分钟，与在 500 ppm 的浓度下暴露 10 分钟，人体所受到的影响是相同的。

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，其毒性是 CO 的 25 倍。如果烟气中存在 HCN，被困人员会在更快失去意识。这进一步缩短了被困人员撤离的时间。值得注意的是，哈勃定律不适用于 HCN，如果空气中 HCN 的浓度达到 200 ppm 以上，人类无法存活太长时间。

烟气中的二氧化碳含量也很高，这种气体会导致人体过度呼吸。我们身体的自然目标是将 CO<sub>2</sub> 从血液中排出，然而高浓度的 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显著下降，有时甚至接近于零，这种低氧环境极为危险。在房屋火灾中，靠近地面区域的氧气含量通常仍可以维持生存，但在烟气层内部，检测到的氧气浓度仅为 1%。再加上烟气层的高温，人体若吸入这种高温烟气，基本无生还机会。有多起案例表明，当人们打开着火房间的门时，瞬间被涌出的浓烟所包围，即便仅吸入少量浓烟，也会迅速丧失意识倒在地上。

烟气中还包含许多其他气体，例如氮氧化物，但这些气体通常影响不大。

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，甚至会导致被困人员昏倒。

2、被困人员所接触的气体（主要的是 CO 和 HCN）浓度会导致他们迷失方向、失去意识甚至死亡。

3、就算被困人员从火场中被救出，也会因吸入高浓度的刺激性气体而引起肺部炎症和肺水肿甚至导致死亡。

因吸入烟气而死亡被困人员中，有 75% 不是在起火房间发现的，所以有毒烟气是火场第一杀手。戴维-普尔瑟（David Purser）教授开发了一个模型来计算烟气对人的影响，他得出人体吸收烟气量的近似值：有效剂量分数（FED）。他指出，人体在 CO<sub>2</sub> 浓度为 1000 ppm 的环境中能够短暂存活半秒钟，在 CO<sub>2</sub> 浓度为 100 ppm 的环境中却难以坚持十分钟。当环境中的 FED 超过预设的安全值时，被困人员将会失去意识。随着 FED 的持续升高，被困人员将面临死亡。

## 5. 先救人还是先灭火？

上文详细阐述了火场烟气对被困人员的影响，明确指出提高被困人员生存几率的最有快方法是将他们从烟气中撤离。要实现这一目标，必须先找到被困人员，这一步通常非常困难，特别是在较大的空间。

第二种提高被困人员生存率的方法是消除烟气。为此，消防部门必须进行通风。通过引入新鲜空气稀释烟气，能够有效降低刺激性气体和有毒气体浓度，同时提升氧气浓度。但必须注意的是，在火灾尚未得到有效控制的情况下，过量的氧气可能会加剧火势，产生更为严重的后果。

因此，通风在现代火场中可能成为一种具有潜在风险的策略。唯有在处理小规模阴燃火灾时，通风才能相对安全地实施。对于其他类型的火灾（无论是通风良好还是通风受限），重要的是在通风之前实施灭火。通常很难保证灭火工作的成功，火灾扑救行动开始时，火点的确切位置通常不（完全）清楚。如果在未对火灾进行任何初步处理的情况下盲目进行通风，很可能助长火势的蔓延，使被困人员因高温而死亡。

为了挽救生命，必须消除烟气，通风是解决该方法的方法。但为了在通风时，不会因引入氧气而使火势明显扩大，必须先灭火，这就是我们拯救生命的方式。由于火场条件发生了变化（与 50 年前相比），我们无法在灭火之前救人。因此，必须先灭火，以便我们能够通风救人。

首先，扑灭大火！

## 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, 2de editie