

# 为什么水能灭火？

作者：Karel Lambert

翻译：橙色救援微信公众号

## 1 引言

纵观历史，消防员一直使用水来灭火。在过去的几个世纪里，人们通过排队水桶接力的形式来扑灭火灾，很显然这种灭火方式的效率非常低。荷兰人简·范德海登（Jan Vanderheyden）发明消防水泵和消防水带后，灭火有了质的飞跃，人们可以将水输送更远的距离，并将其喷射到火上。这样使更多的水进入起火建筑，从而提高了灭火效率。又过了几个世纪，空气呼吸器（BA）问世，这个装备使消防员可以进入着火建筑内部，将水作用于着火点，这意味着灭火效率的再次提升。最近一次的巨大进步是烟气冷却技术的使用，该方法由瑞典同行发明，旨在为背空呼内攻的消防员创造一个更安全的环境。

迄今为止，灭火技术已经有了很大发展。目前标准的灭火方式是进入火场内攻灭火，在火场条件允许的情况下，这是最有效的灭火方式。然而，很多消防员并没有掌握内攻用水灭火的原理，本文将试图解释所涉及到的相关原理。

## 2 水是如何吸收热量的？

水吸收热量的方式有三种。消防员灭火所用的水最高温度约为 20°C 左右。当水被加热时，温度会升高，要使 1L 水的温度升高 1°C 需要 4186J 的能量（焦耳 J 是能量单位）。当 1L 水从 20°C 加热到 100°C 时，将吸收 335 千焦（kJ）能量。

随后，水将以第二种方式吸收热量。100°C 的液态水将会转变为 100°C 的水蒸气，这比水从 20°C 加热到 100°C 需要更多的能量。每升水蒸发转化为水蒸气需要 2260kJ 能量，这意味着水蒸发所需能量大约是将水从 20°C 加热到 100°C 所需能量的 7 倍。

水继续以第三种方式吸收热量。一旦在 100°C 形成了水蒸气，它将吸收周围烟气的热量。当烟气温度高于 100°C 时，热量将从烟气转移到水蒸气中，直至温度达到平衡。假设水蒸气最终温度为 300°C，这意味着水蒸气被加热升高了 200°C（300°C-100°C）。1L 水蒸气温度升高 1°C 所需的平均热能为 2080J，1L 水蒸气升高 200°C 将吸收 416kJ 能量。

总而言之，水会在 3 个不同阶段吸收热量：

- |                            |          |
|----------------------------|----------|
| (1) 水从 20°C 升温至 100°C      | 335kJ/L  |
| (2) 100°C 液态水转化为 100°C 水蒸气 | 2260kJ/L |

(3) 水蒸气从 100°C 升温至 300°C

416kJ/L

1L 水转化成 300°C 水蒸气吸收大约 3MJ 能量，可在 Lambert & Baaij 所写的 [《Brandvberloop》](#) 找到对该过程更为详细的解释。

现在有趣的是，要对水从可燃物表面流走，且没有蒸发这一情况进行分析。这种用水方式的最效率为 11%。在灭火过程中，经常会有大量水从可燃物表面流走的情况，这时火场实际用水量为所需水量的 10 倍。

上述分析可以看出，灭火过程中确实需要更加高效利用水源。Youtube 上有相当多的视频显示，消防员显然无法理解建筑物的屋顶是用来防水（挡雨）的，“屋顶也不知道自己着火了”。为使水达到合适的灭火效果，他至少需要蒸发。当水蒸发时，灭火效率会上升至 86%。因此常言道：高效的灭火不应让水从楼梯或门口流出来。

### 3 表面冷却（直接灭火）

#### 3.1 火灾是什么？

上面这个问题的答案很简单。火灾是可燃物和氧气之间不受控制的化学反应，过程中产生光和热。仔细研究一下这个定义会产生以下疑问：我们说的是哪种可燃物？现在每名消防员都应该知道，并不是固体物质本身在燃烧。可燃固体经充分加热会分解释放出可燃气体。在此过程中，固体物质分子被分解成更小的颗粒，该过程是可见的。固体物质释放烟气（见图 4.2 和 4.3），这种现象可在 CFBT 训练柜中进行细致的观察，这些烟气就是热解气体，此过程就是热解。热解气体的量由可燃物表面温度决定，热解过程中，固体物质会受热分解产生气体，这些气体成为燃烧所需的可燃物。

消防员基础课程简要涉及灭气相火相关的内容，参训人员接受指导，扑灭这类火灾最好的方式是切断气体供应（关闭阀门）。该原理同样适用于扑救室内火灾，即切断火场中可燃气体的供应。消防员可通过向火点射水来降低可燃物表面温度，从而达到切断气体供应的目的。这一过程中，水会蒸发并吸收可燃物表面能量，可燃物温度会下降。当温度降到一定程度时，热解会减弱，可燃气体的供应就被切断。这种灭火机制称为直接灭火（见图 4.6），它是基于充分冷却固体可燃物表面的原理，每场火灾都要应用这一原理。为了实现对火势的控制，可能会使用其它灭火原理。然而灭火的本质在于冷却着火点，若不这样做，一段时间后很可能会复燃。

#### 3.2 表面冷却的要点

对于冷却可燃物表面，必须考虑几个要点。当消防员射水灭火时，目的是让水到达火点。离开水枪的水滴首先要穿过热烟气，一部分水滴在到达火点前就已经蒸发了。如果水滴太小，它们会在到达火点前完全蒸发。这种情况下，燃烧物表面温度不会降低，热解也不会停止。因此，在进行表面冷却灭火时，水滴要足够大，以确保大部分水滴在燃烧物表面蒸发。

其次，燃烧物表面被水全面覆盖是一项重要内容。在灭火过程中，整个热解表面都需要冷却，否则会出现部分表面火焰被扑灭而相邻位置仍存在明火。这种情况下，火焰辐射热将使已被冷却的燃烧物表面再次升温，不久后热解重新开始，随后，释放的热解气体被点燃，火灾又回到原点。同样，这种现象可在 CFBT 训练柜内很容易观察到。

最后，冷却燃烧物表面合理选择用水量至关重要。用大量水灭火是过时的技术，这可以追溯到空气呼吸器问世之前。那时消防员想靠近火点射水几乎不可能。现今我们仍面临这类火灾，譬如工业建筑火灾，由于结构稳定性问题，我们无法进入建筑内部。然而，在住宅火灾中，过度用水扑救相对简单的火灾显然是不可取的，这类火灾可通过内攻轻松解决。

当消防员将水喷射到燃烧物表面时，最初的水滴使表面温度下降，热解不久便会停止。在这之后所有到达同一位置的水滴，都在没有有效利用的情况下流走，并造成水渍损失。相比于火灾本身造成的损失，因过量用水造成更大损失的火灾也时有发生。对水枪的出色控制会导致不同的结果。

## 4 产生蒸汽（间接灭火）

当使用蒸汽时，水是以气体抑制剂的形式应用于灭火。这种灭火机制依靠蒸汽将空气排出的原理，称为间接灭火。当形成蒸汽时，房间内氧气浓度降低。一旦一半房间充满了蒸汽，火焰将会消失（见图 4.5）。但这并不意味着火已经扑灭，只是暂时受到抑制。蒸汽一从室内排出，新鲜空气就会回来，火焰会重新燃气。为了完全扑灭火灾，需要中止可燃物的热解过程（见上文）。

为了产生最多蒸汽，水要接触燃烧物表面。理想情况下，通过水枪喷射雾状水，将水喷射到墙壁和天花板上。在猛烈燃烧阶段，由于水滴必须穿过火焰，在接触墙壁前大量水滴就会蒸发。间接灭火后，需要将房门关闭，以保证房间内的蒸汽浓度。

在封闭房间内使用间接灭火最有效，这种灭火机制可应用在无法内攻灭火或比较困难的情况。在不进入房间情况下，通过使用“眼镜蛇”灭火系统或穿刺水枪在室内产生蒸汽。在发生回燃可能性较高的情况下，外部间接灭火是不错的解决方案。

当在室内用水枪使用这种技术时，要注意留一个开口，使多余蒸汽排出，否则进入房间的门将成为蒸汽的出口。当多余的蒸汽从门排出时，热蒸汽会不可避免地经过火场内消防员所在位置，这意味着消防员有严重烧伤的风险。当室内有第二个开口（例如窗户）时，风险会大大降低，开口最好是火源后面。这种情况下，可以创造一条空气流通路径，从门开始穿过火点通向窗户。这条空气流通路径将蒸汽从窗口排出，而不影响内攻消防员。

需要注意，在有一个或多个开口的房间内间接灭火后，一旦新鲜氧气进入，就会复燃。此时燃烧物表面温度仍非常高，将继续释放热解气体。为防止这些热解产物复燃，需在间接灭火后进行直

接灭火（表面冷却），将燃烧物表面冷却至热解阈值以下（见图 4.6 和 4.7）。这种情况下，当新鲜氧气返回时，由于缺少足够的热解产物，不会发生复燃。

下面的一系列照片，显示了真火实验中火灾发展情况。实验场景为客厅起火，火势蔓延发展至猛烈燃烧阶段。随后，采用直接和间接灭火相结合的方式（重点放在间接灭火上）对火势进行压制，然后进行直接灭火。



图 4.1 实验设施内模拟客厅着火（照片：新南威尔士州消防救援局）



图 4.2 火灾发展阶段，烟气层被点燃，由于热辐射，在右侧沙发处热解物清晰可见。书架底部也有火势蔓延的迹象。（照片：新南威尔士州消防救援局）



图 4.3 发生轰燃。整个房间内充满火焰，右侧沙发的热解产物清晰可见，地板上的地毯也在热解。（照片：新南威尔士州消防救援局）



图 4.4 火灾已达到猛烈燃烧阶段。由于房间前面没有墙，火焰能量非常大。这表明比真正室内火灾有更多氧气供应。（照片：新南威尔士州消防救援局）



图 4.5 消防员开始灭火。拍摄这张照片时，他已经向房间的四分之三区域射水，从右上角开始，一直到中下部。抑制效果主要是通过水蒸汽实现，与图 4.4 区别很大。（照片：新南威尔士州消防救援局）



图 4.6 火焰被压制后，消防员切换至直流射水灭火，采用较低流量扫射，进一步冷却燃烧物表面，防止复燃。（照片：新南威尔士州消防救援局）



图 4.7 蒸汽散去后，室内能见度恢复，清理余火时扫射。（照片：新南威尔士州消防救援局）

## 5 气体冷却

第三种用水灭火的方法是构建一个安全区域。起初，火灾产生的烟气积聚在天花板下方，烟气的温度和密度逐渐增加，这对消防员构成了威胁。某个时间点，烟气层将被点燃（滚燃），烟气产生辐射热会急剧增加（见图 4.3），轰燃随之而来。

可采用气体冷却来防止这种情况的发生，即向烟气层中射入适量的水。这时会发生两件事，进入烟气层的水会蒸发并吸收烟气层热量，这降低了滚燃的风险；产生的蒸汽（部分）留在烟气层内，改变烟气的燃烧极限，使其比之前更难点燃。上文指出，水滴在穿过热烟气，到达燃烧物表面的途中会部分蒸发，因此水滴要足够大才能到达燃烧物表面。当使用气体冷却技术时，目的是避免水滴到达墙壁和天花板。相反，我们的目标是让水在烟气层内完全蒸发。保罗·格林伍德(Paul Grimwood)在一些文章中提出水滴的理想尺寸为 300 微米，这种尺寸的水滴足够厚重，可以进入到烟气层内部。如果水滴过小，那它们重量太轻可能无法进入到烟气层；如果水滴过厚，则一部分水滴会在烟气中蒸发，剩余部分将穿过烟气到达滚热的墙壁并在那里蒸发。

## 6 参考文献

- [1] *Fire Behaviour and Fire Suppression Course for instructors, MSB, augustus 2012,Revinge, Zweden*
- [2] *Lambert Karel, Baaij Siemco, Brandverloop: technisch bekeken, tactisch toegepast, 2011*
- [3] *Särdqvist Stefan, Water and other extinguishing agents, 2002*
- [4] *Grimwood Paul, Eurofirefighter, 2008*
- [5] *Grimwood Paul, Hartin Ed, McDonough John & Raffel Shan, 3D Firefighting, Training,*

*Techniques & Tactics, 2005*

[6] *CFBT instructor's course for the T-cell, CFBT-BE, september 2012*