

# 为什么能用水来灭火？

翻译:橙色救援微信公众号

## 1 引言

纵观历史，消防员早已开始利用水来灭火。上个世纪，人们逐渐形成了通过水桶接力的形式来扑灭火灾这一固有方式，很显然这种灭火方式效率非常低。

随后，荷兰人发明了消防水泵和消防水带，灭火形式有了质的飞跃。消防员通过消防水泵和水带可以将水输送到更远的距离，并将其喷射到燃烧物上。

这样的话，水就能和可燃物充分接触，灭火效率也会有所提升。随着时代的发展，空气呼吸器（BA）问世。在空气呼吸器的协助下，消防员可以进入着火建筑内实施灭火救援，使得水能完全作用于火源表面，这意味着灭火效率的又一次提高。

最新的灭火形式是：烟气冷却灭火，该方法由瑞典学者发明，旨在为消防员进入火场内攻灭火创造一个更为安全的环境。

迄今为止，灭火方式经历了几次比较大的变革。目前，标准的灭火方式是进入火场内攻来实施灭火。在火场环境允许的条件下，内攻灭火是最有效的灭火形式。然而，很多消防员未能熟练掌握内攻灭火的机理，本文将尝试解释内攻灭火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。一般情况下，消防员实施灭火时所用水的最高温度为 20℃ 左右。众所周知，当水被加热时，其温度会升高，而将 1L 水的温度升高 1℃ 需要 4186J 的能量。同样地，当水温从 20℃ 加热到 100℃ 时，1L 水将吸收 335kJ 能量。

随后，水将以第二种方式吸收热量。通常来说，100℃ 液态水将会很快转变为 100℃ 水蒸气，相较于液态水从 20℃ 升温至 100℃ 所需要的能量，该状态变化需要的能量更多。每升水蒸发转化为水

蒸气需要 2.260kJ 能量，这意味着水蒸发所需能量大约是将水从 20°C 加热至 100°C 所需能量的 7 倍多。

水继续以第三种方式吸收热量。一旦水在 100°C 下形成了水蒸气，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，直至达到温度平衡。

假设水蒸气最终温度为 300°C，这意味着水蒸气被加热了 200°C。1L 水蒸气其温度提高 1°C 所需要的平均热能为 2.080J，而 1L 水蒸气温度提高 200°C 的过程将吸收 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 水转化为 100°C 水蒸气 | 2.260kJ/L |
| (3) 水蒸气从 100°C 升温至 300°C | 416kJ/L   |

1L 水经过一系列过程转化成 300°C 水蒸气会吸收大约 3MJ 能量，可通过 Lambert & Baaij<sup>[2]</sup> 所写的 Brandberloop 找到对该过程更为详细的解释。

现在最有趣的是，要对水从可燃物表面流走，没有发生蒸发这一情况进行分析。这种情况下，水源利用的最高效率仅为 11%。然而，在灭火救援中，通常会有大量水从可燃物表面流走，火场实际所需水量往往是理想状态下的 10 倍。

上述分析可以看出，灭火过程中确实需要高效利用水源。为了达到高效的灭火效果，灭火时，水枪射出的水至少要在火场内蒸发以此来吸收更多热量，当水得以完全蒸发时，灭火效率会上升至 86%。

常言道：一次成功有效的灭火救援行动，不应该出现水从楼梯间或房门流出的现象。

### 3 表面冷却（直接灭火）

#### 3.1 火灾是什么？

上述问题的答案很简单。火灾是可燃物和氧气之间不受控制的化学反应过程，这个过程中伴随着光和热的产生。仔细看这个定义会产生以下疑问：我们讨论的是哪种可燃物？每名消防员都应该

知道，着火并不是固体物质本身的燃烧。

经过充分加热，易燃固体会分解释放出易燃气体。在此过程中，固体物质分子被分解成更小的颗粒，且该过程是可见的。

固体物质释放烟气详见图 4.2、4.3。这种现象可通过 CFBT 集装箱进行细致的观察，这些烟气就是所说的热解气体，此过程就是热解。热解气体的输出量是由可燃物表面温度决定的，热解过程中，固体物质会受热分解产生气体，这些气体就会成为火灾发生所需的可燃物。

消防员的基本课程会简要介绍与气相燃烧相关的主题，参训人员都知道，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位置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，水分会很快蒸发并吸收可燃物表面能量，可燃物温度也会因此下降。当其温度降低到一定程度时，热解过程会减弱，可燃气体的供应便会中止。

这种灭火机制就是直接灭火（见图 4.6），直接灭火的实现是基于充分冷却固体可燃物表面来切断可燃气体供应的这一原理。为了实现对火势的控制，可能会使用其他灭火形式。然而灭火的本质在于降低火点位置的温度，若不能有效降低火场温度，很有可能会出现复燃的情况。

### 3.2 关于表面冷却的几个问题

对于可燃物表面的冷却来说，必须考虑几个重要的问题。当消防员射水灭火时，目的是让水尽可能接触到燃烧物表面。离开水枪的水滴首先必须要穿过热烟气层，其中一部分液滴会在到达可燃物之前蒸发掉。

如果水滴粒径过小，其会在接触明火前完全蒸发。这种情况下，可燃物表面温度不会降低，且热解也不会停止。因此，在进行表面冷却灭火时，液滴粒径应足够大以确保大部分液滴在燃料表面蒸发吸热。

其次，将水全面覆盖整个可燃物表面也是灭火救援工作中一项重要内容。在灭火过程中，整个热解可燃物表面都需要冷却，否则会出现部分可燃物表面火焰被扑灭而相邻位置仍存在明火的现象。

因为，这种情况下，辐射热将导致已冷却的燃烧物表面再次升温，热解再次开始；随后，热解释放的可燃气体受高温作用会被点燃，使得火灾扑救回到原点。同样地，该现象可通过 CFBT 集装箱

进行观察。

最后，冷却燃烧表面所用水量的合理性选择对于火灾扑救来说至关重要。在空气呼吸器问世之前，传统的灭火方式是采用过量水来扑救火灾。这是因为消防员在没有任何防护装备的前提下，无法靠近火点位置进行射水灭火。

当前，由于火场内不稳定性因素，我们仍面临这类无法实施内攻的火灾，譬如工业火灾。然而，类似于住宅火灾，则可通过内攻得到有效抑制，再使用过量水进行扑救显然不太可取。

当消防员将水喷射到可燃物表面，大量液滴与可燃物接触会导致其表面温度下降，热解不久便会停止。这之后，所有液滴会撞击可燃物表面的相同位置，造成水渍损失。

相比于火灾本身造成的损失，灭火过程中因水的过量使用，造成更大损失的火灾场景时有发生。一把可调流量水枪可以起到控制水量的作用。

## 4 蒸汽的产生（间接灭火）

消防员利用蒸汽灭火时，水是以气体抑制剂形式应用于整个灭火过程。这种灭火机制取决于蒸汽挤压空气的原理，称为间接灭火。当室内存在蒸汽时，房间内氧气浓度会下降。一旦房间内一半空间充满蒸汽时，明火将会消失（见图 4.5）。

但这并不意味着火已经被扑灭，只是暂时受到抑制。随着蒸汽逐渐从室内排出，新鲜空气会进入到房间内，出现复燃现象。为了完全扑灭火灾，需要中止可燃物的热解过程（见上文）。

为了实现产生最大量的蒸汽，水要尽可能接触到燃烧物表面。理想情况下，可通过使用开花水枪，将水喷射到墙壁和吊顶处来达成这一目标。

由于液滴接触到墙壁前，要穿过火焰层，因此，火势全面发展阶段，会造成大量液滴蒸发。消防员采用间接形式灭火，需要关闭通往相邻房间的防火门，以此来保证着火空间内一定的蒸汽浓度。

间接灭火形式应用到封闭空间内是最有效的，这种灭火机制也可应用在内攻灭火实施起来比较困难的情形下。在不进入室内情况下，可通过使用穿孔水枪来产生室内蒸汽。

针对可能发生回燃的火灾现场，外部间接灭火的形式会是一种不错的方案。

消防员通过水枪采用这种灭火技术时，需要注意的是，要留有一个开口将多余蒸汽排到外部空

间。如若不然，消防员进入房间的门将成为多余蒸汽的出口。当多余的蒸汽沿门向外扩散时，热蒸汽会不可避免地经过火场内消防员所在位置，这意味着消防员存在被严重烧伤的风险。

当然，当室内第二个开口（例如窗户）打开时，火场内危险等级会降低，而且开口最好是火源下游方向。这种情况下，可以开创一条从门开始的空气流向，并引导火焰朝向窗户发展。这条空气流动轨迹将携带蒸汽从窗口流出，而不会影响到内攻消防员。

在具有一个或多个开口的着火房间内采用间接灭火时，新鲜氧气通过开口进入房间后，可能会出现复燃的现象。燃烧物表面温度升高，发生热解并释放可燃气体。

为防止热解产物复燃，间接灭火后，需要对可燃物进行表面冷却，使燃烧物表面热解值降至热解阈值以下（见图 4.6 和 4.7）。这种情况下，由于缺少足够热解产物，新鲜氧气的补充不会造成复燃的发生。

下面的一系列照片，显示了火灾试验中火灾发展情况。该火灾场景着火点位于客厅，火势蔓延迅速并达到全面发展阶段。

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，然后水枪开关调至直流射水来灭火。



图 4.1 客厅着火（照片：新南威尔士州消防和救援服务）



图 4.2 火灾发展阶段。烟气层被点燃，由于火源热辐射，热解物在靠近右侧沙发处清晰可见。书架底部也显示出火势蔓延的迹象。（照片：新南威尔士州消防和救援服务）



图 4.3 发生轰燃。整个房间内充满火焰，沙发右侧的热解产物清晰可见，地板上的地毯正处于热解状态。（照片：新南威尔士州消防和救援服务）



图 4.4 火灾达到全面发展阶段。由于室内没有前墙，火焰相对房间来说就非常高。这表明火灾测试要比真正室内火灾需要更多氧气供应。（照片：新南威尔士州消防和救援服务）



图 4.5 消防员开始实施灭火工作。抑制效果主要是通过雾化蒸汽实现，与图 4.4 有所区别。（照片：新南威尔士州消防和救援服务）



图 4.6 火焰熄灭后，消防员切换至直流射水模式，采用较低水流量对燃料表面进一步冷却防止可燃物复燃。（照片：新南威尔士州消防和救援服务）



图 4.7 水蒸气清除之后，隔室内能见度逐渐恢复。（照片：新南威尔士州消防和救援服务）

## 5 气体冷却

第三种水源利用方式是在消防员内攻推进灭火时，构建一个安全区域。起初，火灾产生的热烟



气会在天花板下方积聚，烟气的温度和密度逐渐增加，会对消防员人身安全造成一定威胁。某个时间点，烟气层被点燃（滚燃），烟气产生辐射热会急剧增加（见图 4.3），轰燃随之而来。

这时，可采用气体冷却方法来避免这种情况的发生，即在烟气层中射入适量的水。一方面，水会蒸发并吸收烟气层热量；另一方面，水蒸发形成的蒸汽（部分）会保留在烟气层内，改变烟气的燃烧极限，使其难以被点燃。

上文指出，液滴粒径足够大才能满足到达可燃物表面的要求。但是，当利用气体冷却技术灭火时，目的是避免液滴撞击到墙壁和天花板。相反地，气体冷却技术应该让水在烟气层内完全蒸发吸热。

Paul Grimwood 提出液滴最佳尺寸为 300 微米<sup>[4][5]</sup>，该尺寸下液滴比较厚重足以进入到烟气层内部。如果液滴尺寸过小，那它们重量太小可能无法进入到烟气层内部；如果液滴过厚，则一部分液滴会在热烟气中蒸发，剩余部分将穿过烟气层到达热壁并在热壁上蒸发，就无法达到构建安全区域的目的。

## 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*