

烟气冷却：一种新方案

作者：Karel Lambert

翻译：橙色救援微信公众号

2012年8月，我参加了在瑞典雷文格（Revinge）举办的MSB烟火特性课程。这门课程中涉及很多室内火灾扑救的内容，其中一个主题引起很多人关注：烟气冷却在室内火灾扑救中的应用。随后在2012年9月，位于弗拉芒布拉班特市的省教育培训学院（PIVO）举办了三期培训，教授CFBT教员使用T型真火训练设施。来自澳大利亚的教官约翰·麦克多诺出席并发表了关于烟气冷却技术的看法。与比利时相比，这两个国家（瑞典和澳大利亚）都将烟气冷却提升到了一个新高度，本文将试图介绍这些新发展。

1 发展阶段的火灾

1.1 问题出在哪？

目前的消防员基础课程中，在烟气冷却上花费了大量时间和精力。毕竟，消防员进入满是浓烟的房间存在危险，因为烟气可能因轰燃，通风诱导型轰燃，回燃等而被点燃。在火灾发展阶段，房间内可以分成两个独立区域，在天花板处形成了一层烟气层。随着火灾发展，烟气层会变得越来越黑、越来越热、越来越浓。在烟气层下面存在含有空气相对新鲜的区域，这里的空气温度与外界温度相差不大。烟气层内能见度几乎为零，而在它下面视野则比较清晰。消防员使用3D射水技术，不仅能够冷却烟气，还能够保持两层之间界限分明，这可以保持烟气层下方的能见度。

1.2 3D射水技术的应用

当使用3D射水技术时，水以脉冲的形式进入烟气层（参见[2]和[3]）。在水枪口处，雾状射流的喷射角度为40-60°。水枪与地面的夹角最好是45°或更大。这样做是为了让水枪手将几次短脉冲射水射向烟气层的不同位置，从而横向覆盖整个房间（见图1.1和图1.2）。图1.1和图1.2分别展示了3个位置的脉冲射水，在实际火场中，脉冲射水的次数需要根据房间的宽度来调整，射流中的水分通常会在烟气层内蒸发，然而现实情况是，一部分水最终会附着在墙壁或/和天花板表面上蒸发。只有训练有素的水枪手能够实现将大部分水在烟气层内蒸发掉。

1.3 3D射水技术的优势

这种烟气冷却方式有双重作用。首先，水温升高和蒸发需要吸收能量，新形成的蒸汽将进一步被加热。在蒸汽的位置，经过冷却的烟气和被加热的蒸汽之间必然会达到平衡。有兴

趣进一步了解这一特殊过程的读者可以查阅参考书目中的文献(参见[4]第 151 页和[3]第 2 章)。水转化为水蒸汽的能量来自烟气层。冷却的烟气层被点燃的可能性更低。此外，烟气层向其下方物体(桌子、椅子、沙发、橱柜等)辐射的热量也会减少，这也降低了发生轰燃的风险。

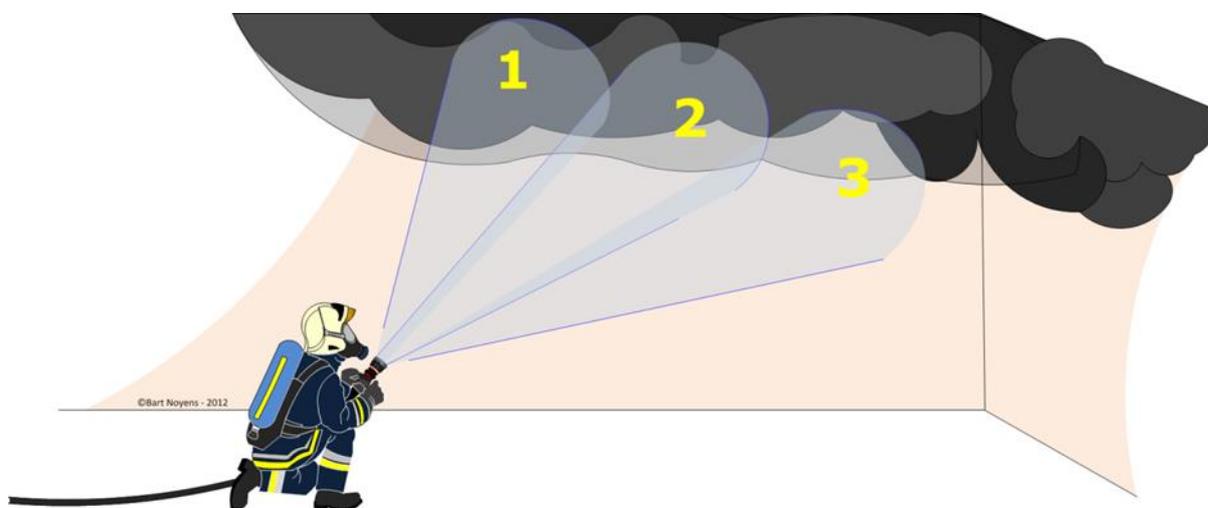


图 1.1 在火灾发展阶段，水枪手正在冷却烟气层中的烟气，他使用了几次短脉冲射水射向烟气层。第一次向左边，第二次向中间，第三次向右边。(图片来源:Bart Noyens)

3D 射水技术改善火场环境的第二种方式是水蒸气仍然存在于烟气层内，当水滴蒸发时会产生大量的水蒸汽，同时挤占烟气空间，形成可燃气体和水蒸汽的混合气体。与烟气相反，水蒸汽是不可燃的，降低了烟气层的可燃性，这种情况称为烟气层的“惰化”。

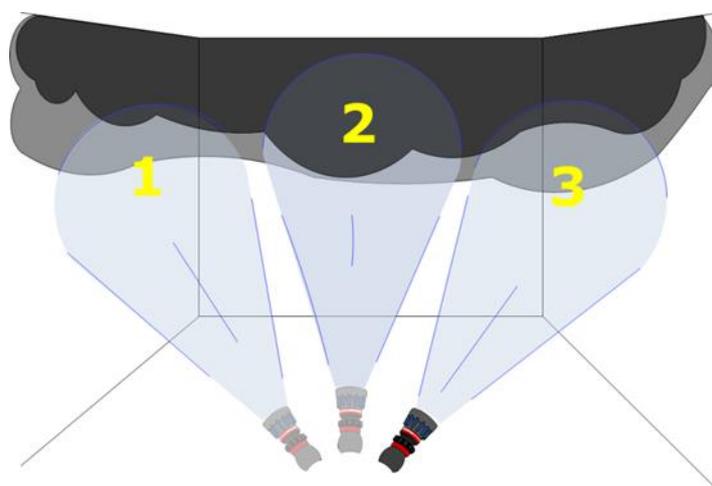


图 1.2 水枪手视角的 3D 射水技术。(图片来源:Bart Noyens)

使用脉冲射水的用水量很少，不管是高压软管还是低压水枪，每次射水只消耗一到两升水，与使用两支 150-200L/min 流量的水枪冷却效果相同。这种方式可以防止过量用水造成水渍损失，也能将消防车中的水节省下来用于扑灭火灾。

最后值得一提的是，3D 灭火技术还能保持烟气层的“稳定性”，使用该技术后，两个

独立的区域仍然存在。一个是天花板附近充满热烟气、不透光的区域，而底部仍然是充满凉爽、新鲜空气和能见度高的区域。如果使用连续射流，烟气层将被完全破坏，两个独立的区域将会混在一起，这将导致消防员所处火场环境恶化，房间底部温度上升，能见度也会降低，此外房间里所有被困人员生存几率大大降低。

1.4 长脉冲射水

几乎每次讲授 3D 射水技术时，都要讨论短脉冲射水。短脉冲使有限的水进入烟气层中蒸发，这种方法可以有效保证火灾发展阶段内攻推进的安全。然而，这种技术的冷却能力相当有限。澳大利亚的指挥员约翰·麦克多诺(John McDonough)恰当指出，穿过走廊向一处全面燃烧的卧室推进时，使用短脉冲没什么效果。尽管大部分热量会从窗户排出，但热烟气也会进入走廊，用短脉冲射水不可能吸收如此多的热量。在澳大利亚，除了短脉冲，还提倡使用长脉冲射水。



图 1.3 & 1.4 左图为短脉冲射水，水枪与地面夹角为 45° ，雾化角在 40° 到 60° 之间。右图为长脉冲射水。水枪与地面夹角约为 30° ，雾化角也为 30° 。(图片来源:Geert Vandamme)

长脉冲射水与短脉冲或 3D 射水有一些不同，水枪与地面夹角减小到约 30° ，雾化角也减小到 30° (见图 1.3 和图 1.4)，水枪不再像短脉冲射水那样快速开启和关闭，而是先快速开启水枪，然后在 2 秒后缓慢关闭，这样增加了射水量。除此之外，长脉冲的覆盖范围更广，水枪手可以在更远的距离冷却热烟气。当处理高温烟气时，效果优于短脉冲，短脉冲射出的水离开水枪后很快就完全蒸发，在高温烟气流入走廊或房间时，长脉冲可以提高安全性。

2 通风受限火灾

2.1 究竟什么是通风受限火灾？

由于建筑方式的变化(隔热性增强、特别是密封性变得更好)，消防员面临越来越多的通风受限火灾。

“通风受限火灾是指火势在轰燃发生前已被通风情况所控制的火灾。”

这类火灾的特点是严重缺氧,在较新的建筑中很少有漏风现象,这意味着当门窗关闭时,只有很少的新鲜空气会进入建筑物。因此,火势因缺氧而停止发展。当火势在轰燃发生前停止发展时,我们将会面临一起通风受限火灾。从这时起,火灾如何发展就取决于建筑特点。如果窗户破裂,新鲜空气流向起火部位,火势重新开始发展,会发生通风诱导型轰燃。

大多数情况下,消防员到场时发现的是一栋建筑里几个房间都充满浓烟,烟气从缝隙中被挤出。这类火灾烟很大,但几乎没有火焰。当消防员打开房门时,形成一股双层对向气流。在顶部,烟气向外流出;在底部,新鲜空气流入。极度缺氧的火灾甚至会产生隧道效应,形成一个新鲜空气的进入通道,而门的其余部分用来排出烟气。

2.2 风险

史蒂夫·科伯(Steve Kerber)的研究表明,在一幢单层房屋中,通风受限火灾大约80秒发展成通风诱导型轰燃。而在双层房屋中,通风受限火灾需要160秒才能形成这种现象(见[5])。细究这些时间数字没有意义,所需时间取决于房屋布局、起火位置以及进风口的位置,不过这些数字能够表明,给通风受限火灾通风,火势很快就会失控。

消防员到达通风不足火场后通常会发生以下一系列情况。消防员打开门或破拆进行内攻,新鲜空气进入房间,火势增强。很可能发生的情况是火势发展太快,消防队员找不到火点,他们被迫撤出,火灾将发展为通风诱导型轰燃。曾经很多案例记录,当消防员在充满烟气的房间里前进时,突然被火焰包围,他们不得不爬行保命,有些人从窗户跳了出去。消防员对火势发展得如此突然和迅速感到出乎意料,然而这类火灾的发展不应该让消防员感到惊讶。当向通风受限火灾提供空气时,火势会增强。如果没有向火点射水,就会发生通风诱导型轰燃。

2.3 解决方案

与发展阶段的火灾一样,可以通过冷却烟气解决。烟气冷却降低烟气的热量,同时水蒸汽使其惰化,这样做可以争取些时间。火灾发展放缓,消防员有了更长的时间来完成任务。不过只要水没有射到火点,情况仍旧非常危险。

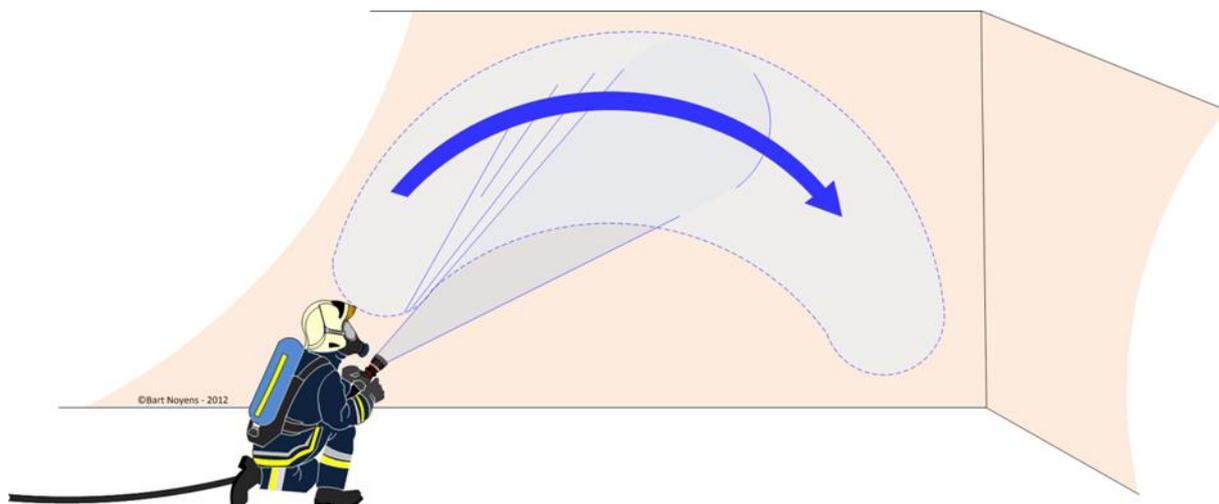


图 2.1 水枪手正在通风受限火灾中冷却烟气。他开启水枪，并将其从左向右摆动形成一个弧形，整个动作应在最多 3 秒内完成。
(图片来源: Bart Noyens)

3D 射水不太适合这些情况，它的目标是让少量水进入烟气层以保持其稳定，并避免将水射到滚热的墙壁或物体表面上。在处理通风受限火灾时，不再有界限分明的两个独立区域，烟气层已经到达地面，整个房间充满浓烟。消防员不再需要担心水渍损失，因为烟气使每面墙都需要重新粉刷。

这并不意味着可以过量用水，只是脉冲射水已不再合适。射水最好呈弧形(见图 2.1、2.2)，打开水枪后，呈弧形横向摆动，随后关闭水枪。与 3D 射水(或短脉冲)的情况一样，流量限制在 150-200L/min，雾化角设置为 40 - 60°。这种气体冷却方法水枪开启约 2-3 秒。当使用这种技术时，会产生大量湍流，烟气与水蒸汽混合在一起。由于一开始能见度就很低，这将不会造成任何实际影响。

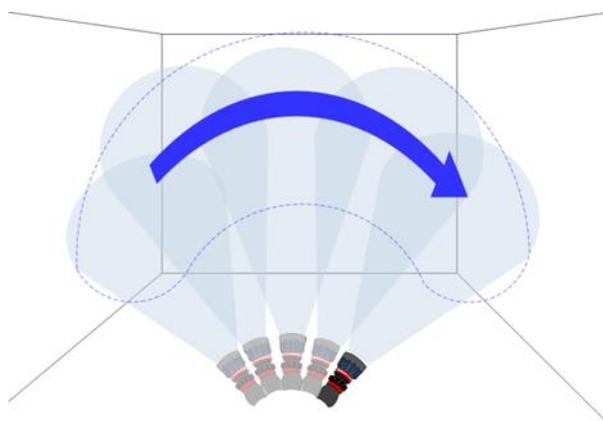


图 2.2 在左侧开启水枪，随后以弧形向右摆动水枪，在右侧关闭水枪。(图片来源: Bart Noyens)

在火灾发展阶段，铺设好水带后立即进行 3D 射水。当处置通风受限火灾时，在进入房间后要使用替代技术。如果烟气的温度仍然太高而无法前进，则继续进行冷却。由于使用了弧形射水，可以确保房间在水平方向上被完全覆盖了。通风受限火灾实际上无法确认房间大

小，发展阶段火灾能从烟气层下方看到屋内情况，因此通风受限火灾在评估整个房间冷却范围方面更加困难。

3 替代方法

1973 年第一次石油危机后，瑞典人开始改变他们建造房屋的方式。瑞典冬天的气温比利时低很多，当房屋隔热性能相同时，瑞典的房屋要提供更多的热量才能和比利时的室温相同。瑞典人很快意识到，传统的建筑方式(空心墙内没有隔热层，单层玻璃，大量缝隙和漏风)从长远来看不再可行。如今在瑞典，三层玻璃是标配，新的施工方法导致比利时现今出现的问题，瑞典自 80 年代以来就一直存在。多年来，我们的瑞典同行提出了许多解决这些问题的办法。

3.1 热成像仪、眼镜蛇水切割系统和通风

2010 年，我参加了一个冷却切割灭火装置，也就是眼镜蛇（Cobra）的介绍课程。该设备在水中添加一种研磨物质，在非常高的压力下(300 巴)喷射，可以在门、墙壁、地板上切割出几毫米的小孔。小孔形成之后，将水射入并渗透后面的房间。由于高压产生了非常细的水雾，这很适合冷却烟气，流量相当有限，为 60L/min，因此这并不足以完全灭火。但它提供了一种手段来重新控制全面发展的室内火灾或惰化通风受限火灾的热烟气。

眼镜蛇本身并不是一个系统的灭火手段。在瑞典，IC（现场指挥员）总是会对事故进行全面评估。当他评估现场时，内攻也同时做好准备。评估包括现场烟火特性，借助热成像仪（TIC）确定“起火点”的位置。在这些位置可以使用眼镜蛇，IC（现场指挥员）可以通过观测烟气的温度变化来评估其使用效果。在多个不同位置使用眼镜蛇，确保烟气已经冷却，每次通过小孔向房间内射水，水会在短时间内雾化。

使用眼镜蛇之后，要采取以下几项行动。在靠近起火点位置开设排烟口；打开房门，启动正压送风机，将冷却后的烟气从室内排出；最后开始内攻火点。

最关键的是，这些行动必须协调一致。当使用眼镜蛇时，下一步必须做好准备，消防员需要背好空呼做好准备。眼镜蛇停水后，需要立即开始通风(送风口，排烟口和排烟机)，然后立即进行内攻灭火，这种灭火方式可以避免火势蔓延到邻近房间，造成额外的损失。

3.2 穿刺水枪：“穷人的眼镜蛇”

眼镜蛇系统非常昂贵。有一种便宜的替代品，但效果稍差。一位瑞典教官建议：“如果眼镜蛇太贵，先给自己买一把穿刺水枪。对于一些火灾，它会让你节省很多经费。将省下的钱存起来，你就可以再购买眼镜蛇了，它仍然是一个非常棒的工具。”

穿刺水枪是一支配有高压或低压接口的钢管。有一个开关水枪的阀门，前端是一个锥形，锥形尾部有几个小孔。用电钻在需要射水的房门、窗框或墙壁上钻孔，之后将穿刺水枪伸入，出水几秒钟。

由于水压较低，穿刺水枪比眼镜蛇产生的水滴大得多，雾化角也更小。因此，穿刺水枪冷却效果较差，但它操作简单，所需训练比眼镜蛇少得多。

穿刺水枪在火场的应用与眼镜蛇类似，也需要协同配合。钻孔、架设水枪、停止射水、开设排烟口、开门、启动排烟机、内攻灭火。因此，在决定采取这种战术之前，现场指挥员必须具备充足的知识来评估形势。

3.3 正压进攻 (Positive Pressure Attack, 即 PPA)

瑞典也有许多消防队在內攻前不冷却烟气，这种方法实际上与我们美国同行所说的正压进攻 (PPA) 类似。关于这方面的更多信息可以在“de Brandweerman”上发表的文章中找到 (见[7])。

但是瑞典同行在这一战术增加了一个元素。在內攻开始的同时，內攻消防员也要冷却烟气。如果执行得当，这种战术既可以快速控制火势，又可以排烟。一些瑞典同行认为，这可能会提高被困者的生存几率。必须深入研究，确定该战术是否适用于起火房间，以及与其联通的其它开门房间。斯蒂夫·科尔博 (Steve Kerber) 所做的研究 (见 b[5]) 已经表明，在房门关闭的房间里的被困者，很可能在火灾中幸存下来，消防员的快速处置可以减少被困者暴露于有毒烟气中的时间。

这种战术虽有优点，但也存在一定风险。由于新鲜空气的进入会使火势复燃，并可能发展为通风诱导型轰燃。內攻人员必须快速行动，并做好万全准备防止这种情况发生。IC (现场指挥员) 也必须有能力评估选择內攻的正确方式。很明显，2012 年比利时的指挥员 (队长级) 培训不具备这种水平。这门课程总共有 70 个小时的理论指导，没有实践训练，类似于教你如何游泳的理论课! 希望我们在未来能有更好的培训。

4 致谢

如果没有 KCCE 及其负责人 Johan Schoups 的支持，这篇文章是不可能完成的。我还要特别感谢布鲁塞尔消防局局长 It-kol Desneyder，感谢他支持我对知识的探索。最后，我要感谢卡特利消防局的 Bart Noyens 队长，他一次又一次地为我的文章提供了精美的图片。

5 参考文献

- [1] *Fire Behaviour and Fire Suppression Course for instructors, MSB, August 2012, Revinge, Zweden*
- [2] *Binnenbrandbestrijding, Koen Desmet & Karel Lambert, 2008 & 2009*
- [3] *Lambert Karel, Baaij Siemco, Brandverloop: technisch bekeken, tactisch toegepast, 2011*
- [4] *Särdqvist Stefan, Water and other extinguishing agents, 2002*
- [5] *Kerber Steve, Impact of ventilation on fire behavior in legacy and contemporary residential Construction, 2011*
- [6] www.wikipedia.org
- [7] *CCS-Cobra training program, Boras, Zweden, maart 2010*
- [8] *Lambert Karel, invoeren van ventilatie: drie verschillende benaderingen, de brandweerman, september 2012*
- [9] *CFBT Instructors course level 2: the T-cell, September 2012, Relegem, Belgium*