

燃烧极限

翻译：橙色救援微信公众号

火场会形成烟气层，烟气层的成分相当复杂，由多种不同的气体混合而成。有时候，烟气层会出现火焰。烟气层为什么会燃烧？为什么在特定的时间燃烧？为什么在那个位置会发生燃烧？答案其实很简单，那就是在那个时间点具备了“燃烧三要素”。作为燃料的气体与氧气的混合气，达到了自燃的温度。许多消防队员对这一概念很不解。到底是如何燃烧的？为什么某些混合气体起初过于稀薄，后来又变得太浓？下面本文将试图以可理解的方式来解释这一切。

1. 燃烧极限或爆炸极限

燃烧极限或爆炸极限是很重要的概念，有助于全面理解火场特性。在火场中，由于热分解产生可燃气体，这些热解气体可以与周围的其他气体混合。当产生充足的可燃气体时，爆炸下限就达到了。爆炸下限（LEL）和燃烧下限（LFL）是同一原理的两种不同的表达。许多消防队员可能已经在复合气体检测仪（“测爆仪”）上看见过 LEL 这个缩写了。在本文中，我将使用燃烧下限这个术语，因为它更符合本文所要表达的含义。当烟气和空气的混合比例达到燃烧下限时，它就可以被点燃。假如某房间的卧室存在混合气，而混合气比例恰巧略高于燃烧下限，则不会发生爆炸。最多会发生缓慢燃烧。需要记住的事实是，这篇文章实质上是关于火和烟气的。烟气所含的能量比甲烷少，本文中多次所提及的烟气，就是用来解释燃烧极限原理的。



图1 煤气和空气的混合气燃烧情况。左图显示，燃烧刚刚发生，火焰正以圆形向四周蔓延。右图则显示了火焰体积在扩大。（照片由 Karel Lambert 提供）

后来，随着可燃气体的量增加，可燃气体在混合气体中的比例将增大。在某个时刻，可燃气体的量再增加将会导致混合气体不能被点燃。这就是所谓的爆炸上限（UEL），或者更确切地说是燃烧上限（UFL）。

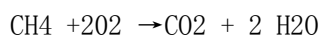
位于这两个极限之间的氧气和可燃气体的混合气体是可以燃烧的。它们可以被点燃（参见图1和图2）。介于这两个极限之间的是理想的混合气体状态。

这种混合状态能引起最猛烈的爆炸。本文将以甲烷爆炸极限为例进行解释。虽然，火场产生的烟，是由许多不同种类的气体组成的。不过，甲烷是描述燃烧极限原理的最合适的气体。

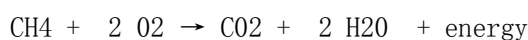


图2 这些图片显示了图1之后的反应过程。左图显示火焰进一步蔓延。右图也显示了这一点。这样，火焰就在整个充满处于可燃范围内的混合气体的空间内蔓延。（照片由 Karel Lambert 提供）

下面给出了描述甲烷燃烧的化学方程式。甲烷（CH₄）是天然气的学名。厨房炉灶里使用的就是这种气体。当氧气存在时，甲烷会被点燃。通常，这两种物质都是气态的。在这个特定的方程式中，一个甲烷分子与两个氧分子发生反应。反应发生后，不再有甲烷或氧气。生成一个二氧化碳（CO₂）分子和两个水分子（H₂O）分子。如果混合气中所有的氧气和所有的燃料都被燃烧完，这种混合气被称为化学当量混合气，这是理想混合气的另一种叫法。



然而，这两种物质并不是反应的唯一产物。甲烷燃烧是放热反应，这就意味着会产生能量。假设混合气是由甲烷和氧气混合而成，在混合气中，甲烷分子与氧分子的比例是 1:2。假设，总共有 1kg 甲烷燃烧，将会产生 50 mJ（毫焦）的能量。如果想要深入研究的话，可以从消防燃烧学中获得相关信息。



然而，这种反应本身是不会自行发生的。如果你打开家里厨房的天然气管道阀门，泄漏的天然气管道会和空气混合，但混合气不会自行起火燃烧，因为需要点火能。氧气和天然气的温度大约在 20° C 左右，点火能量会使温度升高到一个特定值，在对应的温度下才开始发生反应，这个对应的温度称为燃点。两种气体的初始温度越高，所需的点火能量就越低。换言之，在冬天室外零下 20° C 点燃混合气体，比在夏天室外 30° C，需要更多的点火能量。毕竟，在冬天混合气体需要额外加热 50° C。这一点很重要，因为火场产生的可燃烟气，在温度上也有极大的不同。烟气的温度越高，点燃烟气所需的能量就越少，这种能量称为活化能（AE）。

在化学反应过程中产生的能量，会使反应产物的温度高于初始反应气体的初始温度。甲烷中所含的化学能已转化为热能。事实上，在反应过程中能量释放比能量产生的表述更为准确。因为在反应过程发生之前，能量是被储存在甲烷气体中的。通常，我们简单地说，能量产生了。本文中使用了这一措辞。

释放出的能量分布在反应产物二氧化碳和水中。

当混合气体中某处着火时，就会产生热量。这种热量会扩散到邻近的分子上，并作为邻近分子的活化能。这将引起链锁反应。火焰会在混合气体中蔓延（见图 1 和图 2）。

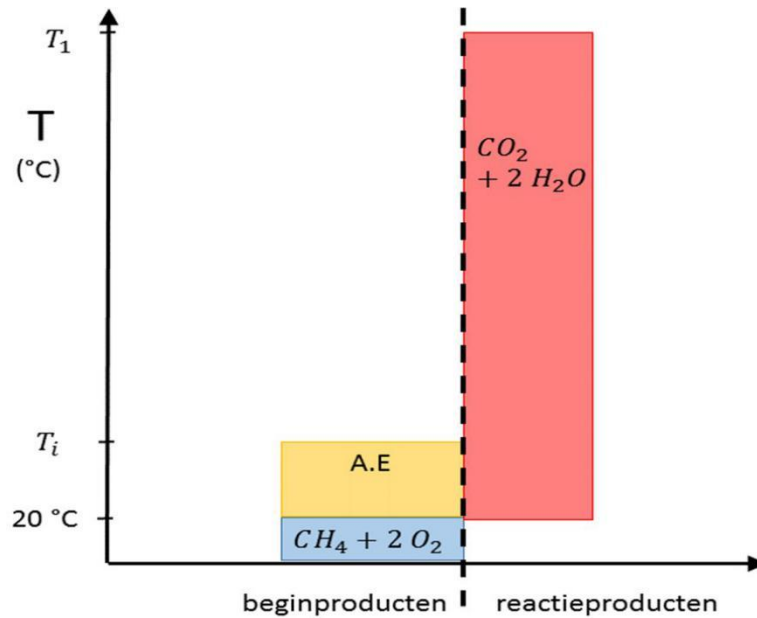


图 3, 甲烷在纯氧中进行理想状态燃烧的示意图。这两种物质(甲烷和氧气)大约在室温(20°C)左右。加入一定的活化能, 反应开始。反应产物被加热到最终温度。(Karel Lambert 绘制)

可以通过图示说明这一点。图 3 纵轴上显示温度。初始气体甲烷和氧气用蓝色表示。在这种特定的情况下, 初始物质的温度为 20° C, 这也是反应的初始温度。蓝色矩形的区域代表了两种气体中储存的能量。这意味着 X 轴不代表能量。能量大小用面积表示。X 轴虚线的左侧是初始反应物, 虚线右侧是反应产物。

如上所述, 气体要燃烧, 需要在混合气中加入一定量的活化能。为此, 我们需要点火源。这可以是一个火花, 一个火柴, 一个受热的表面, ……需要添加的能量, 用橙色矩形来表示。

只有在初始的物质达到一定温度后, 增加能量才能发生反应。这个最低温度就是燃点 T_i 。反应本身用黑色虚线表示。再次重申一下, 虚线的左侧是初始反应物, 右侧是反应产物。在反应过程中, 产生了大量的能量。产生的能量加热了反应产物。图 3 显示产物二氧化碳和水的温度比初始温度高得多。反应产物的温度在图上用 T_1 表示。

反应产生的能量用红色矩形的表面积表示。这是燃烧过程产生的热能。需要指出的是, 纵轴不是按真实比例绘制的。如果红色矩形按真实大小绘制, 它将是几米高, 而不是现在所绘的几厘米。这意味着后面所有的插图显示的反应产物温度远远低于实际温度。

我们回头再来看厨房的炉灶, 一种与上面描述不同的情况正在发生。厨房里, 甲烷不会在纯氧中燃烧。实际混合气体中除了甲烷和氧气外, 还含有氮气。我们环境的空气是由 21%

的氧气和 79%的氮气组成的。这意味着，有一个氧气分子，就有 3.76 个氮气分子。空气中甲烷燃烧的化学方程式如下：

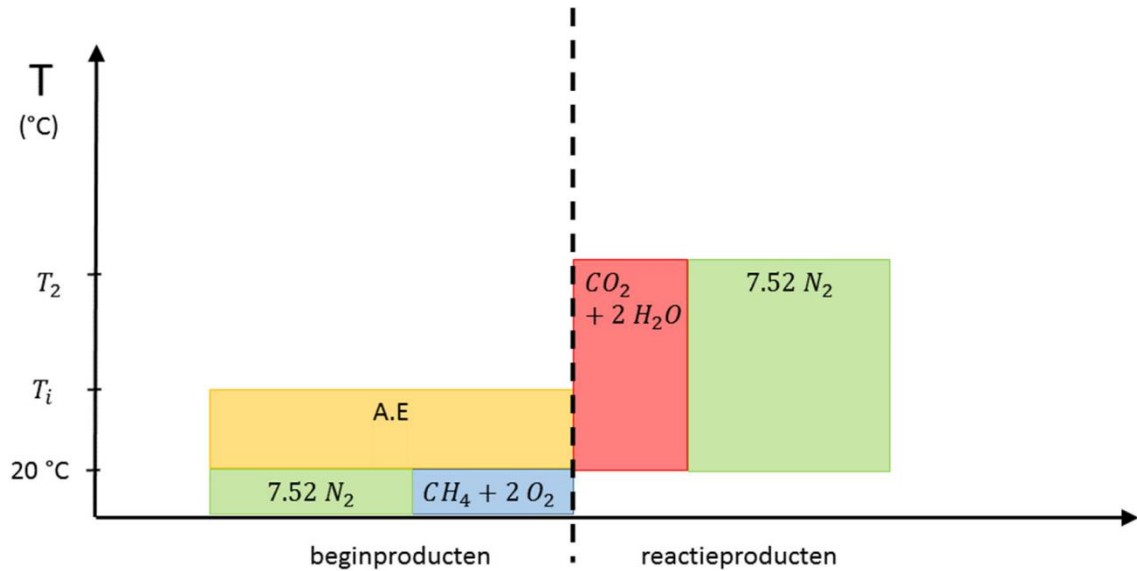
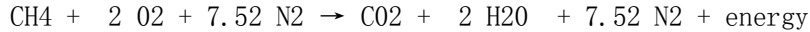


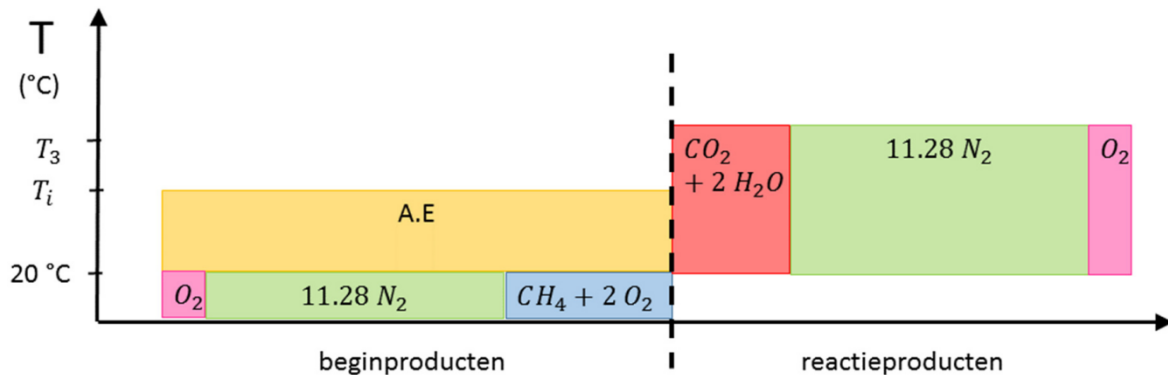
图 4 反映了甲烷在空气中燃烧的理想状态。不参与燃烧过程的氮气用绿色矩形表示，虚线右侧的反应产物温度比上一张图的温度低。虚线右侧红色和绿色矩形的面积之和代表热能。
(Karel Lambert 绘制)

这个反应的示意图也发生了变化。在两种物质发生化学反应后，增加了一个额外的元素。图 4 中，两个绿色矩形表示氮气。燃烧发生之前氮气就存在，即使不参与化学反应，它仍然需要被加热到 T_i 。毕竟，自然界中万物几乎都努力保持温度平衡。如果我们想点燃混合气体（或者说：如果我们想把混合气体加热到燃点），那么我们就必须比在纯氧气和甲烷的混合气体中添加更多的能量（因为还有一部分能量是加热氮气的）。这一点在图中表示的很清楚。橙色矩形区域的面积大幅度增加。甲烷在空气中燃烧，比甲烷在纯氧中燃烧，需要更多的点火能。

甲烷在空气中燃烧，和甲烷在纯氧中燃烧相比，燃烧的结果也不同。甲烷在空气中燃烧，氮气不参与化学反应，反应后还存在。反应产物是二氧化碳、水和氮气的混合物。燃烧产生的热量与之前的情况完全相同。因为，燃烧的甲烷的量是相等。但是，现在产生的热量分布在三种不同的物质中，其中氮气会吸收大量的热量，如图 4 所示。反应产物最终温度 T_2 低

于图 3 中的 T1。图 4 中，红色矩形和绿色矩形的面积之和，等于图 3 中红色矩形的面积，这在图上可以清楚地看到。

上述两种混合气体的反应都在理想状况下进行的。事实上，理想状态很少出现。现实情况不是氮气多，就是氧气多。这都会影响到反应的进行。假设现在有三个氧分子，而不是两



个，那么反应过程如下：

除了多余的氧气，混合物中还有多余的氮气。在混合气体中，氧气分子和氮气分子的比例是 1: 3.76。这意味着，现在混合气体中有 11.28 个氮气分子。反应会再次发生变化。在反应产物中，现在我们可以看到过量的氧气分子。反应图形进一步改变。

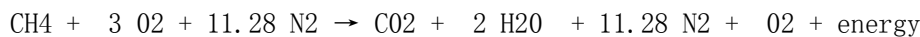


图 5 显示了甲烷在过剩空气中燃烧。紫色矩形代表过剩的氧气。绿色矩形比前一张图更宽了。在虚线右侧，反应产物的最终温度，比前一张图更低，反应产物一侧的所有矩形面积之和等于燃烧所产生的热能。（Karel Lambert 绘制）

图 5 中虚线的左侧是初始气体。实际参与燃烧反应的甲烷和氧气的量仍然用蓝色矩形表示，氮气用绿色矩形表示。

但是，氮气的量增加了，因此绿色矩形现在变宽了。紫色矩形表示过量的氧气分子。现在我们要讨论一下可燃气体浓度低的情况，可燃气体比理想燃烧状态下的可燃气体量要少。橙色矩形的尺寸再次增大。因为所有的初始物质都必须加热到 T_i ，其中包括不参与化学反应的氧气。

在图 5 虚线的右侧，是反应的最终产物。与前面的图一样，红色矩形仍然表示燃烧产物。同样，不参与反应过程的氮气和氧气仍然分别用绿色矩形和紫色矩形表示。反应产生的能量与前面理想状态下燃烧产生的能量相等。图 3 中红色矩形的面积大小等于图 5 中红色、绿色和紫色矩形的面积之和。如果对图 3—图 5 进行比较，可以明显看出，需要加热的元素越多，反应产物的最终温度会越低，即 $T_3 < T_2 < T_1$ 。

反应产物的高温，这时就成了周围可燃气体的点火能量。这意味着反应产物会向它们周围的气体提供点火能量。图 3—图 5 显示，每一次需要的点火能量 (AE) 都在递增。但同时也可以看出，燃烧产物的温度在递降 ($T_3 < T_2 < T_1$)。在某个点，由于氧气 (和氮气) 过多，反应产物的温度，不足以点燃周围的可燃气体，可燃气体将不能燃烧。这时空气量远远多于可燃气体的混合气体就达到了爆炸下限或燃烧下限。

在图 5 中，如果加入过量的甲烷代替过量的氧气。反应结果将是甲烷过量剩余，而氧气消耗光了。同时，氮气的量保持不变。过量的甲烷会被反应产生的能量加热。另外，因为有更多的甲烷存在，这一反应过程将需要更多的点火能。过量的甲烷不会燃烧，但会吸收反应产生的能量。这将导致反应产物的总温度降低。在某个点，混合气体中的甲烷量远远多于空气量，不能发生燃烧。这一点就是爆炸上限或燃烧上限。

爆炸极限用体积百分数表示。爆炸下限 (LEL) 表示，形成可以发生燃烧的混合气体中可燃气体的最低浓度。爆炸上限 (UEL) 表示，形成可以发生燃烧的混合气体中可燃气体的最高浓度。

物质	LEL or LFL (Vol %)	UEL or UFL (Vol %)
氢气	4	75
一氧化碳	12.5	74
甲烷	5	15
乙烷	3	12.4
丙烷	2.1	9.5
丁烷	1.8	8.4
甲醇	6.7	36
乙醇	3.3	19
丙酮	2.6	13

甲烷通常被认为是天然气，其爆炸下限是 5%。这意味着，天然气和空气的混合气体要发生燃烧，天然气的体积比例最低应达到 5%，即 5%甲烷和 95%空气，准确地说是，5%的甲

烷，19.95%的氧气，75.05%的氮气。甲烷的爆炸上限为15%。这两个极限值都是整数。有时候，在不同的文献中，极限值的数值是有一定差距的。

1.2 热阻断

我们再看看上面的不同图形，我们会发现，不参与燃烧过程的天然气气体的量越来越多。这些气体扮演者抑制剂的作用，本身不贡献能量，但它们却需要活化能来加热。这意味着点燃混合气体需要更多的活化能。接下来，他们需要化学反应产生的能量继续加热，这直接导致反应产物温度较低。

这种效果也被描述为热阻断。不参与化学反应的分子像反应过程中的抑制剂。他们使燃烧越来越难持续。当有足够的抑制剂时，燃烧就不可能继续了。

热阻断是消防中的一个重要概念。文章前半部分没有提到的例子就是在燃烧中加入水蒸汽。当消防员开始内攻时，他们必须要冷却气体。为了实现这个目标，水滴以雾状的形式喷射到烟气层，水滴会从烟气层中吸收能量，然后形成水蒸汽。水蒸汽能与烟气混合形成新的气体，这意味着在前面图的虚线右侧需要额外绘制一个矩形。水蒸汽不参与反应过程，但它会吸收部分活化能和部分反应产生的能量。通过将水蒸汽混入混合气中，混合气会变成不燃的。

实际上，热阻断在燃烧过程中会吸收热量。所有那些不参与燃烧的分子吸收的热量，都被“损耗”掉了。

看看产生的能量走向是很有趣的。在火场或燃烧反应（如蜡烛火焰）中，燃烧发生的位置就是能量产生的确切位置。而且，这些能量会通过传导、对流和热辐射传播。当太多的能量从反应区消失时，燃烧就会停止。

这种效应可以通过蜡烛来研究。蜡烛燃烧有层流扩散火焰。这意味着氧气和燃气不断地在火焰表面上混合。这也意味着火焰的顶端被火焰底部产生的能量“点燃”了。将一块金属网放在火焰中间时，火焰就被切断了。这是因为金属网吸收了火焰的热能，改变了火焰的方向。可燃气体继续透过金属网的网眼上升，但其热量被转移到了金属网上。然后，金属网会把热量传递到周围的环境。在金属网的上方，仍然有氧气和燃料的混合气体，但是没有足够的能量点燃混合气体。由于能量被带走，火焰不能继续燃烧的现象，被称为冷却灭火。

在室内火灾中，这种效应以不同的方式呈现。例如，着火房间的墙体会部分地充当金属网。当然，墙体对火的影响更为复杂。在火灾初期，墙体会吸收热量。吸收的量取决于这些墙体的结构特性。经过一段时间后，墙面会变得非常热。吸热能力随之降低。这点与金属网不同。金属具有极好的导热性能。建筑中使用的大多数材料都没有这些特性。这就是为什么一段时间后墙体的吸热能力发生变化的原因。

在室内火灾中，当消防员将水滴喷射到火焰中时，这种效应以第二种方式呈现。每一个水滴都能吸收一定量的能量。当两个水滴彼此靠近时，会吸收更多的能量，以至于火焰很难通过水滴。穿透火焰运动的水滴就像穿透蜡烛火焰的金属网。雾状水滴能有效冷却火焰。

反过来说，热阻断也有这样的效果。图 4 解释了甲烷在空气中的燃烧。两种气体被点燃时都处于室温，活化能需要把气体加热到一个特定的温度才能开始发生反应。

在上面的文字中，甲烷被用来说明烟气的可燃性。在室温下很少有烟。烟气的温度取决于火场的热释放速率。当热烟气上升，离开火场并与空气混合时会使烟冷却下来。图 6 显示了甲烷和空气的理想燃烧状态。与图 4 相反，可燃气和空气的混合气体温度高于室温。混合气体的温度是 200°C 。当图 6 和图 4 比较时，我们看到图 6 需要更少的活化能，橙色矩形的面积变小。最重要的是，反应产物的温度比图 4 将高出 180°C 。毕竟，燃烧过程中仍会产生等量的能量。由于初始温度比图 4 高 180°C ，最终温度也将高 180°C 。图 6 中的绿色和红色矩形在轴上比图 4 中的温度更高，即 $T_4 > T_2$ 。

具有较高初始温度的混合气体的另一个重要特征是，燃烧范围扩大了，所需活化能减少了。

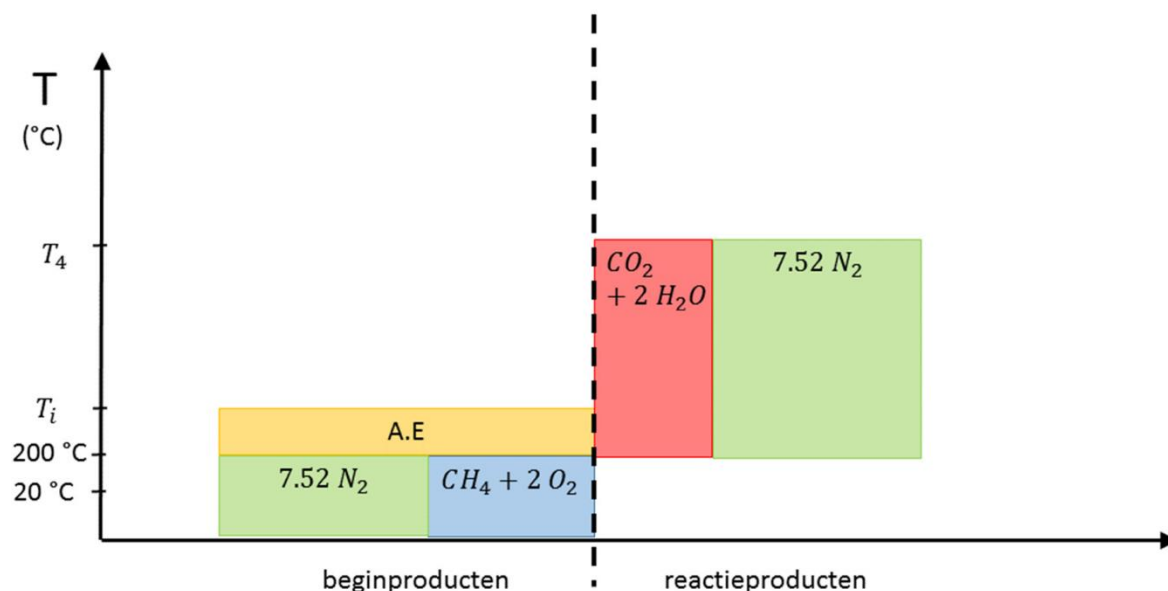


图 6 阐释了甲烷在空气中的理想燃烧状态。这两种物质的初始温度为 200° C，这意味着所需的活化能将小于在室温下点燃混合气体所需的活化能。活化能由橙色矩形表示，其面积比图 4 小。(Karel Lambert 绘制)

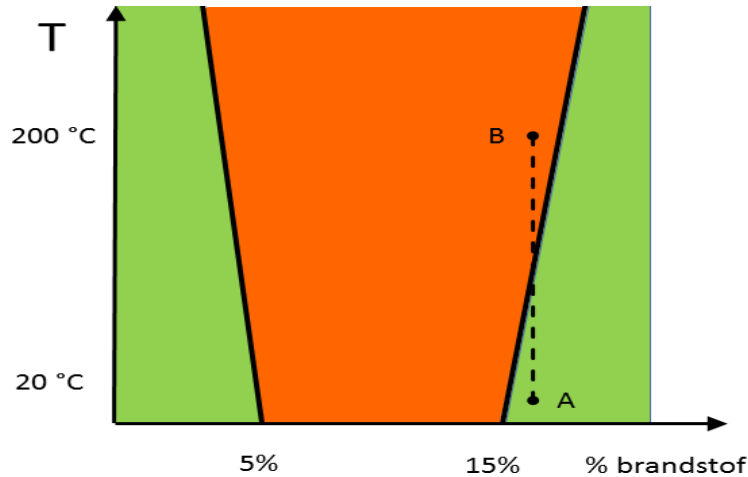


图 7 甲烷的爆炸极限扩展与温度的关系。A 点的混合气体是不燃的。当混合气体从 20° C 加热到 200° C 时，变成 B 点，B 点在可燃范围内。(Karel Lambert 绘制)

在上面的段落中，我们解释了某些混合气体不能再被点燃，是因为燃烧不能为其他分子提供足够的活化能。混合气体在 20° C 不能被点燃，是因为所需的活化能比燃烧产生的能量更高。但混合气体在 200° C 可以被点燃。在两种温度下反应所产生的能量保持不变，而 200° C 时所需的点火能更少。这意味着当温度升高时可燃范围会扩大。这在灭火救援中尤其重要。毕竟，消防员通常在极高的温度下工作。图 7 显示，当混合气体温度为 20° C 时，甲烷浓度大于 15% 的混合气体（A 点）是不燃的。当混合气体被加热后，它在某个点会变成易燃。我们可以清楚地看到 B 点在可燃范围内，而 A 点在可燃范围外，两者唯一的区别是温度不同。

1.3 结束语

最后，我们需要强调的是，上面的段落是对现实情况的简化表述。之所以使用甲烷来描述，是因为甲烷是易于理解的替代物。最重要的是，甲烷是居民厨房用来做饭的气体。每个人都知道天然气。

在火灾中，可燃混合气体不是由甲烷和空气形成的，混合气体由可燃气体、热解气体与空

气混合而成。火场可燃气体是由除了二氧化碳和水以外的其他许多不同的成分组成。比如一氧化碳、氰化氢等可燃气体以及其他可燃气体都会在火场生成。每种气体都有自己的可燃范围和燃点。最重要的是，火场还产生了大量的热解气体，这些气体的量就越多，燃烧的空气就越少。热解气体的性质不同于甲烷和各种可燃气体。

因此，在实战中，现实情况比上面描述的要复杂得多。不过，用甲烷的简单例子足以解释燃烧极限。反过来，这些极限对于快速判断像回燃、闪燃和烟气爆炸这样的火灾过程是很重要的。这就是值得消防队员更深入地研究爆炸极限的原因。

2 参考文献

Introduction to fire dynamics 2nd edition, Dougal Drysdale, 1999

CFBT-instructor course for the Attack Cell, Karel Lambert, 2016

International fire behavior and suppression course, Lars Ågerstrand, Zweden, 2016

Karel Lambert