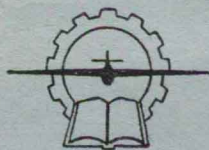


冲压发动机燃烧问题

論文譯丛



国际航空杂志社

1960. 2. 北京

出版者的話

燃燒問題，特別是在高速氣流中和高空低壓條件下的燃燒穩定問題，是近代高速航空發動機發展中的主要問題之一。隨着噴氣發動機的迅速發展，資本主義國家在這方面進行了大量的實驗研究工作，並且公布了許多資料。這些資料包括了有關發動機燃燒的基礎研究和應用研究等各方面的問題。這裡僅收集了一部分有關沖壓發動機燃燒問題方面的一些綜述性文章。通過這些文章，可以初步了解一下資本主義國家在發展沖壓發動機過程中所碰到的燃燒問題，以及在若干問題上的研究和實驗成果。

根據國務院的規定，文中的單位都已盡量換算成公制，只有個別文章照顧到與圖表對照上方便起見，仍留用了原文的單位。

在燃燒問題方面編輯這樣的選文譯叢，還是初次的嘗試，無論在選題上，或是在編輯工作中都不免存在許多不足之處，希望讀者同志給我們提出指正意見，以便我們今後進一步更好地組織這方面的工作。

目 錄

| | |
|--|--------|
| 高空条件下的燃烧問題 | (1) |
| 冲压发动机設計中的燃烧問題 | (17) |
| 燃烧理論研究在冲压发动机上的应用 | (27) |
| 預先混合紊流气体火焰稳定的近期研究 | (36) |
| 不良流綫体廻流区内的火焰稳定 | (46) |
| 可燃混合气流的点火理論 | (56) |
| 两股平行气流混合区中的燃烧研究 | (64) |
| 燃烧室的气动力因数 | (73) |
| 根据稳定燃烧和燃油分布特性計算冲压发动机燃烧室和加力燃烧室的方法 | (82) |

高空条件下的燃燒問題

(从基本观点进行研究)

—H. G. Wolfhard

Royal Aircraft Establishment

本文指出，当压力降低到至少为0.01大气压时，預混火焰的低压极限並不存在。着火极限和溫度极限的变化可能也不很剧烈。这些論点对于层流火焰是确实的，但对于紊流火焰就不一定，因为紊流火焰的熄火現象是一个比較复杂的过程。

扩散火焰具有低压极限，这主要是由于在正常直立的形式下燃烧时自然对流的結果。然而，当燃料与空气之間的交接面是水平面而不是垂直面时，扩散火焰也能燃烧。那末，这种火焰在低压时与預混火焰就沒有什么区别了。

引 言

在第二次世界大战以前，对一个大气压力以下的火焰传播研究得非常少。这种情况恰好与热火点燃和动力学的大量研究工作形成了对照。通常所采用的实验装置是个封闭的瓶子，其中装有預先混合好的燃料和空气（或氧气），混合物是用电阻或灼热电阻絲点爆的。瓶子的直径通常为2—5厘米。所有这些研究的結果[1-9]，都說明了火焰在低于某一压力时就不能传播了，而这一压力我們就称为火焰传播的低压极限。例如，Berl和Hartmann[8]发现了下述燃料—空气混合气的低压极限：对于苯—空气来說，低空极限为350毫米水銀柱高；对于乙醚—空气来說，为100毫米水銀柱高；对于环己烷—空气来說，为400毫米水銀柱高；对于丙酮—空气来說，为300毫米水銀柱高；对于戊烷—空气来說，为400毫米水銀柱高和对于己烷—空气来說，为240毫米水銀柱高。Hsien和Townend[5]发现了低压极限是在一般比較低的压力下（在100毫米水銀柱高左右），然而这些数值一直是被当作燃烧的基本常数。有的时候还認為瓶子尺寸並不重要，甚至根本沒有談到它。然而，Garner和Pugh[10]发现，在封闭瓶内的氫氧火焰，其低压极限取决于瓶管直径，而且該直径与极限压力的乘积是个常数。

本文将指出，这一低压极限並不是真实的极限，而是由于試驗装置，例如点火能量不足或所采用的瓶子太小而引起的。本文考虑到在降压时火焰传播的有关全部参数，亦即灭火直径、燃烧速度、着火极限、火焰溫度、最小的氧含量指数和点火能量。其中有許多参数的测量还没有进行，但是，有一种意图想要預言一下这些数值与压力的相互关系，並把与它們有关的已知数值都考虑进去。

本題分为預混火焰和扩散火焰。我們将会看到这样做是必要的，因为火焰的型式在极大程度上决定低压时火焰的工作状态。

預混火焰

灭火直径

首先，必須改慮在不同的压力下穩定預混火焰能够燃燒的条件，这点最好利用图 1（见参考文献11），在图 1 上表明圆柱管内按化学当量配合的乙炔—空气混合气的气流速度与压力的关系曲线。混合气是在管的頂端燃燒，而管子是装在不断抽气的減压室内。只有当燃燒条件处于图上形状奇特的穩定区内，燃燒室的頂部才可能有穩定的火焰，图上的穩定区位置

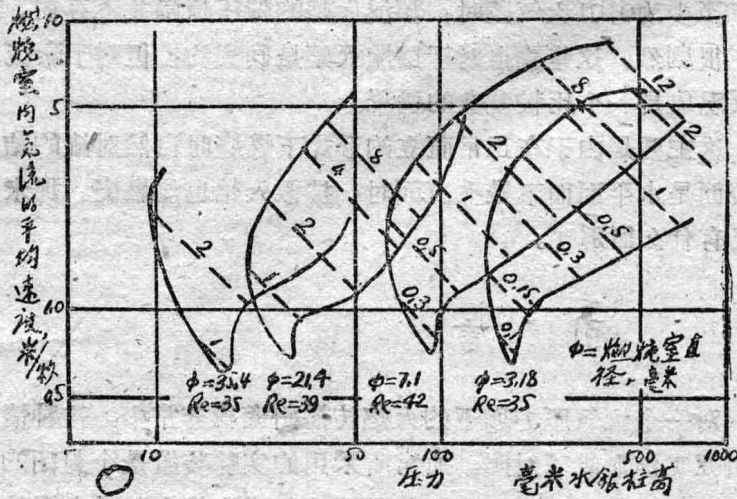


图 1 当燃燒室的大小不同时，按化学当量配合的乙炔—空气火焰的穩定区。穩定区内的数字表明乙炔的質量流量，以毫升/秒表示（在正常的溫度及压力下）。Re 数是指在穩定区的尖峯处燃燒室内气流的雷諾数。

取决于燃燒管的直径。穩定区内的虛綫表明質量流量不变（在正常的溫度及压力下，以毫升/秒表示），其数字表示乙炔的实际質量流量，根据此流量需要适当地增加空气，以保持化学当量的配合。穩定区的右边边界是火焰发生回击現象的极限，而其左边和頂边的边界則是灭火的位置。在穩定区的頂端处发生过渡为紊流火焰的現象，然而，若在穩定区内繼續昇高的話，火焰回击現象更加劇烈，忽而这一現象突然停止，这就出現穩定区尖峯处的情况；在这尖峯处，灭火边界和火焰回击边界联接在一起。實質上，在这尖峯处的火焰是个扁平的圓盘（在高于尖峯处的穩定区内，火焰則是圓錐形的），但当压力增大，从而气流速度降低时，火焰並不移入管内，而在入口处熄灭。

图 1 說明了低压燃燒的全部特点。在出現特殊穩定区尖峯的压力下，該管的直径就是灭火直径。可以看出，对于按化学当量配合的乙炔—空气混合气來說，这一灭火直径非常接近于与压力成反比的关系（图 1 和图 2）。图 1 还表明，只有当質量流量具有某一最小值时，火焰才能燃燒。如果把这一質量流量（假若取穩定区尖峯处的数值）与压力繪成关系曲线的话，那么，可以看出，在实验誤差的范围内，这一質量流量还是与压力成反比关系。管内的最小气流速度几乎与压力无关，大約为 70 厘米/秒。尖峯处的雷諾数 (Re) 几乎也是个常数，它接近于 40。反应区的视觉厚度随着压力的降低而增加[11]。由于这一厚度的定义还不是很明确，所以，要得到准确的数值是非常困难的。然而，无论如何，这一厚度是近似地与压力成反比关系（但下述情况除外，即在靠近穩定区尖峯处的火焰常常比在 Re 数較高下燃燒的火焰

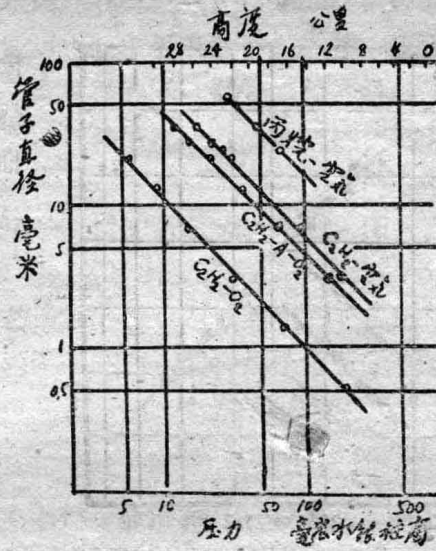


图2 在不同的乙炔火焰时，
 灭火直径与压力的关系曲线
 （从稳定区的图表求得）。

的厚度要大)。这一反比例的关系就意味着火焰需要有相同的碰撞次数使反应能够完成，这一点与压力是无关的。此外，还存在这样一种后果，即反应区的厚度和燃烧器直径的比值与压力无关。然而，这一比值多少取决于稳定区内的位置。

为了使火焰在低压下燃烧，因而必须剧烈地增大燃烧器直径。而且，因为可比拟的火焰（ Re 数相同）的质量流量与压力成反比，所以，唧送速度也要很大，因此，燃气的气体容积与压力的平方成反比。

除了乙炔—空气混合气以外，其他按化学当量配合的燃料与空气或氧气的混合气，其稳定区也与图1相似。然而，最小质量流量、稳定区的位置和在某一程度上尖峰处的 Re 数则取决于所采用的燃料和氧化剂，也取决于混合气的浓度。灭火直径也可能不是严格地与压力成反比关系（而在乙炔—空气混合气的情况下，灭火直径与压力是近似成反比关系）。一般来说，火焰越稳固，尖峰的 Re 数，亦即灭火状态下的 Re 数就越低，例如，对于按化学当量配合的乙炔—氧火焰来说，其灭火状态下的 Re 数接近于20，而对于按化学当量配合的丙烷—空气火焰来说， $Re=50$ 。因此， Re 数总的变化不是很大的。如混合气不是按化学当量配合的，其形成的火焰也具有相似的稳定区。然而，当火焰很富油时，其稳定区的形状很奇特，这一问题还没有得到彻底的研究。

Cullen[12]也研究了低压下的火焰，在他的文章里提出：压力降低时，火焰变得更扁平。然而，这是由于他在降低压力的时候，他逐渐地向稳定区的尖峰移动。如果在高压和低压时保持 Re 数相同的话，则火焰的形状不变。Cullen发现了，对于所采用的每一种燃烧器尺寸，丙烷—空气火焰的燃烧速度在压力降低时增大至最大值，然后就往下降（见图3）。这一初始的增大，是由于丙烷—空气火焰的燃烧速度随着压力的降低而确实地增大。至于随后下降的原因，则是由于相对热损失的增大，而他的实验点移入尖峰时，也就发生了灭火现象。Cullen把燃烧速度的下降，亦即 Su_1/Su_0 与贝克莱数（ Pe ）联系起来（这里的 Su_0 是特定压力下的真实燃烧速度， Su_1 是测量速度）。他发现，当贝克莱数大的时候， Su_1/Su_0 等于1，但当 Pe 数小时， Su_1/Su_0 就明显地下降（见图4）。在图上，雷诺数是用来说明稳定区内的位置，然而，贝克莱数是与 Re 数成比例的，所以，这两数间的任何一个数都可以说明火焰状

态的特性。

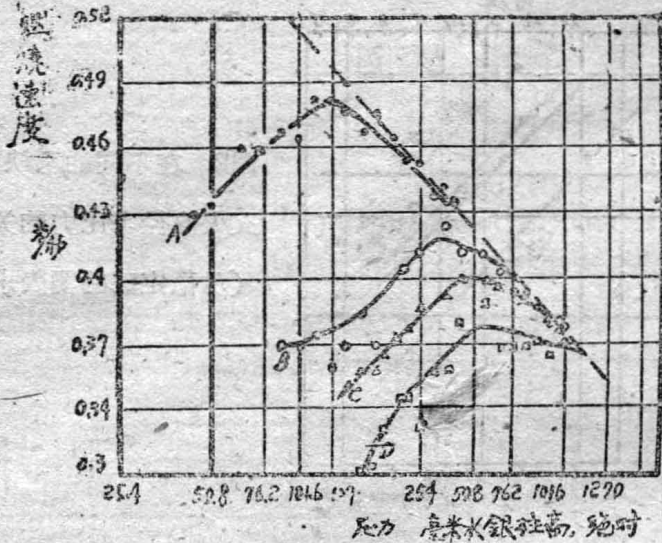


图3 丙烷—空气火焰的燃烧速度随压力而变化的关系曲线(Cullen)

- A = 燃烧室直径为 31.75毫米
- B = 燃烧室直径为 15.83毫米
- C = 燃烧室直径为 12.7毫米
- D = 燃烧室直径为 9.5毫米

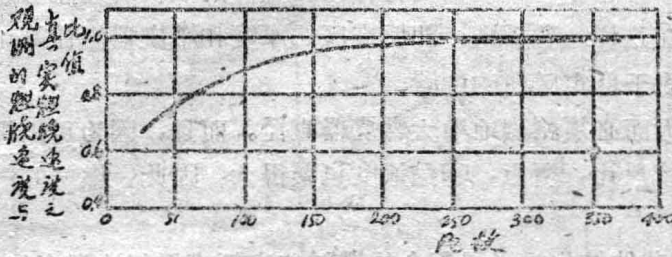


图4 燃烧速度与貝克萊数 (Pe)的关系曲线 (Cullen)

重要的結論是，如果雷諾数保持常数，亦即如果在低压时剧烈地增大燃烧器尺寸，那么在高压和低压下的燃烧速度才能互相比較。假如测出的燃烧速度不計及热損失的話，則雷諾数要比灭火状态下的雷諾数大得很多，大約为1000—2000。这种情况几乎在有关低压火焰传播的所有文献中都被忽略了。

测定灭火直径最好的，但是費事的方法是繪出如图1所示的实际稳定区。在大气压力下，因为質量流量非常小，所以，这是公認的困难，但是，在低压时，它是一种又快又准确的方法，除了能求出灭火直径外，它还能求出其他数值，例如，最小質量流量、最小Re数和极限的燃烧速度，所有这些数值都是火焰传播詳細理論的基本要素。

Friedman和Johnston[13]以及Berlad[14]等人用宽度可变的长方形燃烧器，在一个大气压和0.1大气压之間的压力下测出了丙烷—氧—氮混合气的灭火距离。长方形火焰的灭火距离与圓形火焰的灭火直径之間具有简单的关系。Simon[15]求得：灭火直径減去35%就等于灭火距离。从Berlad的結果可以看出，通常氧含量指数越高，亦即火焰温度越高，則灭火距离更接近于与压力成反比关系（氧含量指数的定义是用氧化剂的 $\frac{O_2}{(O_2 + N_2)}$ 值来表明）。对冷焰來說（它是由于氧含量指数較低或是由于燃料或氧气过多而造成的），灭火距离随压力反比的增大速度就沒有那样迅速。这一現象显然与下一节将要論述的情况有关，因为对冷焰來說，燃烧速度並不是常数，而是随着压力的降低而增高的。

Simon, Belles和Spakowski[16]用不同的燃料—空气混合气和不同的瓶直径，以类似的方

法测出封闭瓶内的“低压极限”，然而，这比Huebner和Wolfhard[17]所采用的更为准确。从这两个研究所得出的结论是，“低压极限”发生在某一压力下，也就是在此压力下，瓶管直径等于灭火直径。如果情况是这样的话，瓶管直径与极限压力的关系曲线就要符合于灭火直径与压力的关系曲线，那么，这种情况也就是真实的情况。Simon等人利用Friedman和Johnston[13]与Harris, Grumer, Von Elde和Lewis[18]（其灭火距离是直接测出的）的结果，把他们的“低压极限”与管子直径的关系加以比较。图5表明所有的这些点都落在一条曲线上。这就证实了“低压极限”完全是由于灭火而造成的，当压力至少降低到0.1大气压和可能降低到0.01大气压时，倘若火焰的体积与表面积之比随压力作适当调节的话，则火焰传播本身是不受压力影响的。丙烷—空气火焰在瓶子直径为18.9毫米和压力降低到5.6毫米水银柱高时，还能传播。

燃烧速度

在这里不打算介绍过去对低压下燃烧速度测定方法的研究概况，因为几乎在所有早期的试验中，燃烧器直径都是不够大的，亦即Re数变得很小，而火焰是接近于低压灭火。然而，倒可以介绍一下哪一种测定方法是最好的。

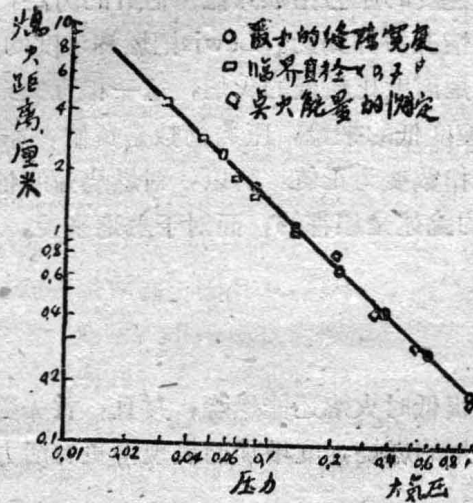


图5 最小灭火距离与压力的关系曲线（丙烷—空气混合气）

本生灯方法（它测定火焰前沿的总面积）可能是最合适的一种。用这一方法所求得的结果，燃烧速度是稍微低些，但是，如果保持Re数为常数大于1000时，则由于火焰顶端的曲度和根部的散热而引起的误差就会变得小些。肥皂泡方法肯定是不适用的，因为在低压时，肥皂泡变得太小了。如果用贮气瓶来保持压力不变、火焰面积可以准确地测出和在低压时增大管子尺寸的话，那么，正在管内传播着的火焰就可以得出良好的结果。Lewis所发展的方法[19]（在这方法里，火焰的形成和压力的增大是在带有中心点燃的球形瓶中进行观察的），在压力不太低的情况下，亦即火焰前沿厚度增厚的情况下，也将得出可靠的结果。

乙炔氧、乙炔—空气和乙炔与含有大量氩气的空气（用氩气代替空气中的氮气）等混合气的准确燃烧速度都已经测出[11,20]。在所有的情况下，当压力降低到10毫米水银柱高时，燃烧速度(Su)与压力的关系极小。Diederichsen[21]最近已测出甲烷—氧和甲烷—空气火焰的燃烧速度。他保持Re数为1200（一直保持到最低压力），因而需要把燃烧器直径增大至10厘米。试验结果如图6所示，从图上可看出，按化学当量配合的甲烷—氧混合气的燃烧速度似

乎与压力无关，而 $\lambda=2$ （ λ 是含有的氧气与理論上完全燃烧所需要的氧气的比值）的貧油火焰，其燃烧速度与压力的关系很小。然而，甲烷—空气火焰的燃烧速度当压力降低时，却增加得十分剧烈。一般的規律似乎是火焰温度越高，燃烧速度与压力的关系也就越小。

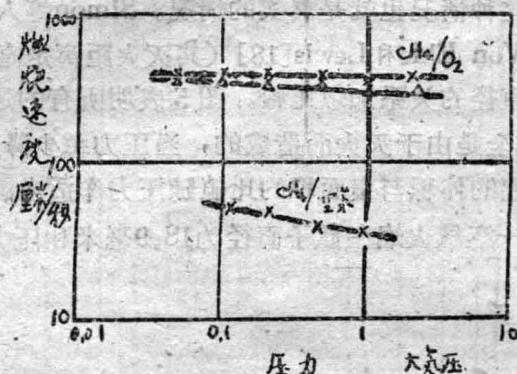


图6 甲烷—氧和甲烷—空气火焰的燃烧速度 (Diederichsen)

×—按化学当量配合的混合气。

△— $\lambda=2.0$ 的混合气。

这一結論有一部分符合于Lewis的測量結果，他对燃料—氧化剂的系統进行过許多研究，在他发表的結果里，对于每一种系統只有两个测定点是有用的，通常一点是在大气压力下，另一点是在低压下，因而燃烧速度的压力指数只能用估計的方法，并假定 S_u 与压力之間存在简单的关系。但是肯定地說，情况并非如此。Lewis把燃烧速度的压力指数与燃烧速度本身联系起来。然而快速火焰常常是温度比較低的火焰，这一相互关系就与上述的相互关系很相似。Lewis发现了，对于燃烧速度低的來說，压力指数是負值，亦即低压时火焰越快，而当燃烧速度大于100厘米/秒时，指数变为正值。所以，对燃烧速度低的來說，也就是对冷焰來說，Lewis的論述与以上推导的論述是相符的，而对于热焰來說，这些論述是有矛盾的。

着火极限

現在，我們已經看到，在压力很低时火焰还能燃烧，并且，首先受到低压状态影响的緩慢而低溫的火力，事实上，由于火焰的燃烧速度增加而表現得更有活力。从本身來說，这并不証实着火极限是不受低压影响的。

有必要用直径为5厘米的管子来求出在一个大气压力下的实际着火极限。这是因为当接近于极限时，灭火直径增加得非常迅速。事实上，任何一种测定极限的方法都将得出这样一种混合气濃度，也就是在这一混合气濃度时，灭火直径就是管子直径。正因为接近极限时，灭火直径增加得极快，所以，才有可能測出近似的极限。假定灭火直径的增加近似与压力成反比的話，那么，为了求得在0.1大气压力下的实际极限，就需要一个50厘米的管子。这一試驗还没有进行。

图7表示在直径为5厘米的瓶管中，天然气—空气混合气的着火极限[22]。从图中可以看出，当压力在150毫米水銀柱高以上时，着火极限始終不受压力影响，而当热損失所引起的灭火变得很重要时，着火极限就封閉起来。无疑地，較大的瓶管和充足的点火能量会使着火极限在更低的压力下才封閉起来。同时，还可以得出这样一个微小的启示，就是富油极限是受到压力的輕微影响。这一影响是十分可能的，因为我們知道在压力大于1个大气压时富油极限扩大了很多[24]，然而，貧油极限則完全不受压力影响。

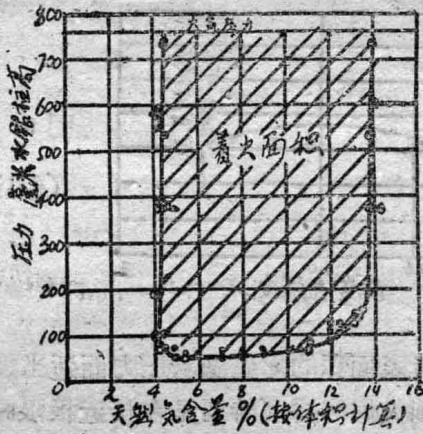


图7 压力降低（在一个大气压力以下）对天然气—空气混合气的着火极限的影响。

在1个大气压下，碳氢—空气混合物燃烧时的贫油极限[23]相当于极限温度约为 1200°C 。由于离解的缘故，火焰温度通常与压力有关。然而，对于极限时的火焰来说，情形并非如此，因为甚至在低压时，当离解程度小到不起任何影响时，火焰温度是非常低的。唯一例外的情况是水—气平衡具有重要意义的富油极限，然而，当摩尔数不发生变化时，甚至这一特定的平衡也是与压力无关的。当压力至少降低到150毫米水银柱高时，贫油极限不发生变化，总而言之，贫油极限的温度是不取决于压力的。

现在来考虑在混合气浓度的全部范围内的极限温度是有利的。用氮气加入燃料或者空气的方法，可以定出任何油气比的极限。乙烷的数据（取自Lewis和Von Elbe[24]）绘于图8上，该图表明极限过氧含量指数与混合气浓度的关系曲线。在这图表中所有的冲淡剂是加入氧气中[氧含量指数是 $\text{O}_2/(\text{O}_2 + \text{N}_2)$]。另一种方法是用极限温度代替极限的氧含量指数，而绘出极限温度本身与压力的关系曲线（图9）。从一个大气压下的这些数据可以得出这样结论：如果不考虑富油极限（此时，不平衡状态似乎会发生）的话，这一极限温度与混合气浓度的关系非常小。正如所表明的，压力降低至150毫米水银柱高时，贫油极限的温度并不改变，最好还应当假定极限的氧含量指数一般亦将不改变。这是燃烧研究工作的一项重要结论。它指出，为了使火焰熄灭而加入的惰性气体将不受压力的影响。很可能同样的结论也适用于化学灭火剂，除非因某些反应使这些状态受到压力的影响。

现在的问题是，当压力在大约150毫米水银柱高以下时，是否有任何理由来相信着火极限会变得更加狭窄。如果反应级数是2或者稍微小些（正如燃烧速度取决于压力的这一关系

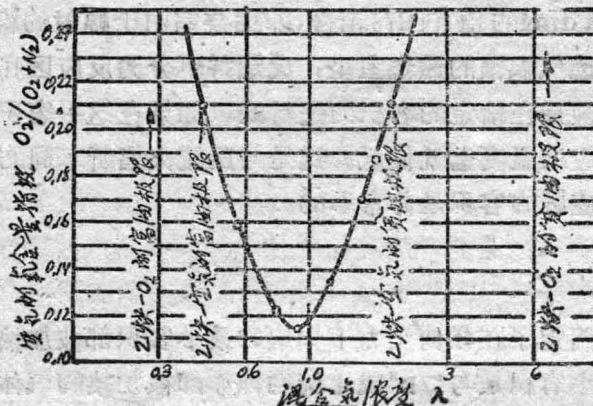


图8 乙烷火焰的最小氧含量指数（取自Lewis和von Elbe的数据）

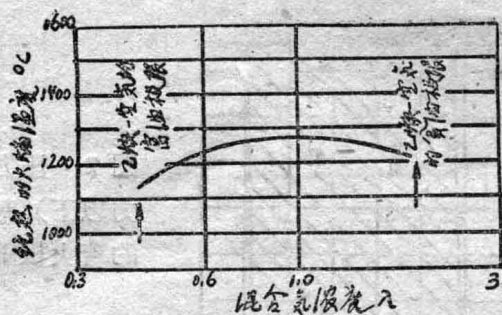


图9 乙炔火焰的极限温度
(假定是化学平衡)

所提出的), 同时, 如果火焰的体积与表面积的比例随着压力而适当调节的话, 那末, 除了因幅射而造成的热损失以外, 能够限制火焰传播(特别是在接近极限时)的理由就没有了。要估计这一效果是非常困难的。然而, 可以作出下列的假设:

- a) 极限温度与压力无关;
- b) 只有红外的幅射才具有重要意义, 而且红外是从一个微弱的光源射出的。

我们知道, 许多火焰因幅射而造成的热量总损失是10—15%。这一热量总损失似乎与压力的关系不大[25]。

在火焰中热损失能影响火焰传播的唯一位置是在反应区内。因为这一反应区的容积比火焰总容积小得多, 所以, 在一个大气压力下, 幅射对火焰传播将没有什么影响。然而, 在低压时, 反应区的容积增大得非常显著。现在我们来考虑乙炔—空气火焰的数据, 对于这种火焰已有充分的实验资料可以利用。灭火直径(Q)与压力成反比, 反应区的厚度(d)也是与压力成反比(参攷文献26)。所以, 反应区的最小容积与 $1/p^3$ 成比例, 而幅射的分子数与 $1/p^2$ 成比例。假设极限温度保持常数和不计及自己吸收的话, 那么, 反应区的幅射随着 $1/p^2$ 增加, 然而, 正如已指出的, 可用于反应的分子数与 $1/p$ 成比例。结果, 反应区的热损失在压力很低时将增加。从物理学上来说, 这是很简单的, 因为反应区的厚度增加, 而通过反应区的速度实际上是与压力无关的。

所以, 在理论上由于幅射的原因可以有一个火焰传播的低压极限。这点将在灭火直径与压力增量(它大于压力的反比)的关系曲线图中显示出来, 当压力比它低时, 幅射变得相当显著。对于在直径为3.9厘米的瓶管内, 压力低到5毫米水银柱高的乙炔—空气火焰以及在直径为1.89厘米的瓶管内, 压力低至5.6毫米水银柱高的丙烷—空气火焰来说, 并没有观察到有这种压力增量。所以, 可以得出这样结论: 对于层流火焰来说, 在这些压力下火焰的幅射还不显著。这一结论必定与Spalding的预言[27]相符, 即燃烧室由于幅射的缘故, 在大约 $1/20$ 的大气压下具有低压极限。在燃气涡轮的燃烧室里, 火焰并不分为反应区和燃气, 但是, 由于紊流而造成的迅速混合, 反应是在给定的容积内进行的。如果在这一容积内幅射损失变得比较显著的话, 那么, 发生反应的温度也就较低。这是与层流火焰所不同的, 因为在层流火焰里, 除非压力很低的话, 反应区的容积是非常小的。

点火能量

从热力点燃的最简单形式假定了在任何压力下火焰的最小容积都被加热到火焰温度。已经发现了乙炔—空气火焰的最小容积是与 $1/p^3$ 成比例的, 亦即被加热的气体质量与 $1/p^2$ 成比

例。假定有一个瞬时的点燃火源，这就意味着点火能量必需与 $1/p^2$ 成比例。对于大多数的碳气—空气火焰来说，灭火直径的增加稍微小于 $1/p$ 的增加，也就是点火能量的增加与稍微小于 $1/p^2$ 的增加。这一简单的计算法是被实验所证实的，例如，Lewis和von Elbe[24]求得甲烷—空气混合气在1个大气压力下具有的点火能量为0.45微焦耳，而在0.1大气压力下，则需要点火能量为25微焦耳。对丙烷来说，相应的数值为：在1个大气压力下，点火能量为2.6微焦耳，而在0.2大气压力下，则为55微焦耳。在后者的情况下，压力变化的倍数是5，而点火能量的倍数则是21.2。Friedman [17] 求出，对于相同的燃料和相同的压力范围，灭火距离的变化倍数是4.5，它的平方是20.3，这数很接近于21.5。

所以，对低压下点燃的一般状态来说，可以认为瞬时点燃火源的点火能量约随 $1/p$ 而上升。如果要更详细分析的话，则应计及灭火直径与压力的真实关系，也应计及火焰前锋的厚度。然而，并不需要对低压点燃的全面理解作细致的分析。只要不让电极插入火焰时，点火能量才能有效。如果使用一对电极，其间的间隙很小，而且是固定不变的话，点火能量的上升速度将更加剧烈，而在某一压力以下，它甚至根本不可能点燃。如果压力显然低于0.1大气压，电阻再也不是点燃的有效方法。这是因为电阻慢慢地转变成放电的现象（它具有不同的电学性质）。然而，如果采用的电极是具有较大的表面积和较大的间隙的话，那么，点燃就变得比较容易。当压力约为1—30毫米水银柱高时，一台约5000伏特的1千瓦或2千瓦的简单变压器是最好的点燃方法 [23]。

如果使用的是长期工作的点燃火源的话，那么，上述关系也就无效了。这是因为“点燃的有效时间”取决于压力。如果我们把能量输入于可能的最小火焰的中心，那么，有效时间是从能量流开始输入时算起，一直到有充分的能量达到这一容积的表面时为止。加热时间或者活跃质点行走的某一段距离取决于这一段距离平方的平均值，即 $t = \frac{x^2}{2k}$ ； t 是时间， K 是热

力扩散或扩散系数， \bar{x}^2 是行走过距离平方的平均数， x 相当于可能的最小火焰的半径，所以， x 约略与 $1/p$ 成比例。 K 也是与 $1/p$ 成比例，因此，点燃的有效时间约与 $1/p$ 成比例。所以，长期工作的点燃火源所需要的能量（单位为卡/秒）仅仅是随着 $1/p$ 而增加，而不是随着 $1/p^2$ 而增加。

目前还缺乏有关长期工作的点燃火源在低压下的直接实验，可以用来核对下述的结论，因为很难知道在点燃时究竟从热导线或变压器的放电吸收了多少能量。然而，粗略地实验[17]表明，点火能量的增加速度不象 $1/p^2$ 的增加速度那么剧烈。例如图10表明，用变压器放电的点火能量与压力的关系曲线（用于按化学当量配合的丙烷—空气混合气）。图11表明，为了点燃相同的混合气，镍铬线圈所必需的温度与压力的关系曲线。混合气流过线圈的流动速度也起了一些影响，这点从图12可以看出。如流速高于图12上的各数值，则所需要的点燃温度要高于镍铬线圈可能达到的温度，此时，碳化硅是一种非常合适的导体，它可以在 1500°C 的高温下工作。图13表明在不同压力下，点燃温度与流动速度的关系曲线。图14表明采用碳化硅时，点燃温度随混合气浓度而变化的关系曲线，这就表明，如果采用这种点燃方式的话，那么，按化学当量配合的混合物就不是最易点燃的混合物，而贫油混合物则具有更低的点燃温度。点火线圈的几何排列也是很重要的，如果把图11与图12加以比较（图上所用的线圈数分别为4和1）的话，就可以看出这一点。当压力降低到17毫米水银柱高时，如点燃火源采用4个线圈的话，仍旧可以点燃，其温度大约为 1300°C 。

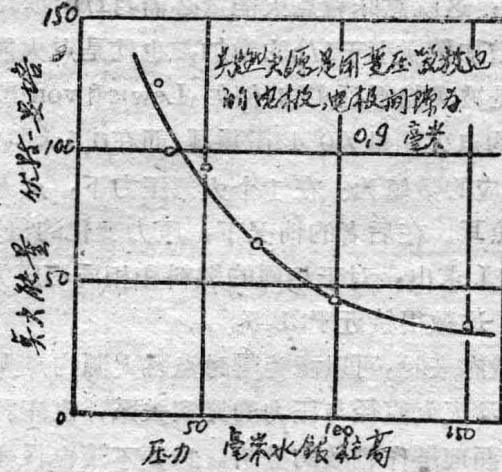


图10 变压器放电的点火能量(用于按化学当量配合的、不扰动的丙烷空气混合气)

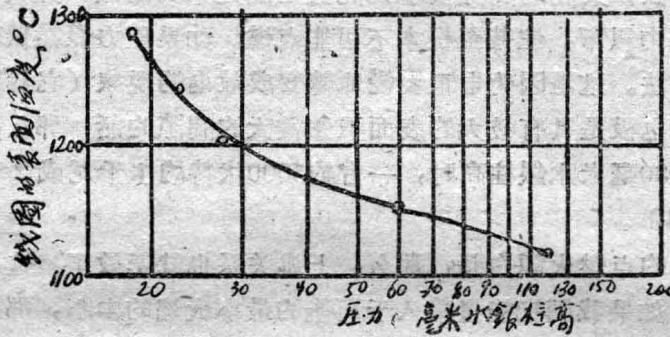


图11 为点燃按化学当量配合的、不扰动的丙烷—空气混合气, 镍铬线圈所必需的表面温度(4个线圈彼此靠近一起地排列着)。

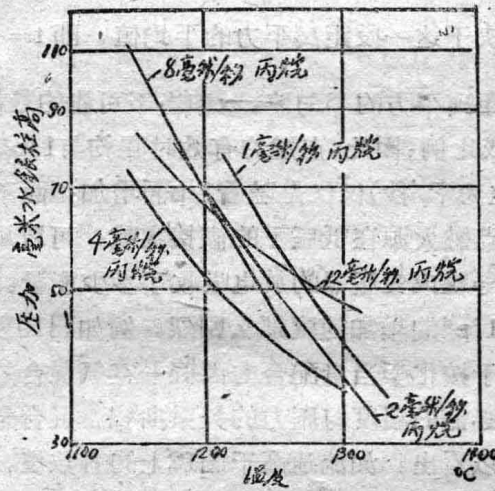


图12 在直径为51毫米的管子里, 为点燃按化学当量配合的丙烷—空气混合气, 镍铬线圈所必需的表面温度与压力和混合气的质量流量的关系曲线。

这些图表表明, 压力降到很低时, 丙烷—空气混合气的点燃是可能的, 然而, 如果点燃温度及能量不是剧烈地增加, 那么, 在低压下的点燃将变为不可能(见Scull [23])。如果采用放电的话, 当压力降到17毫米水银柱高或降低到5.6毫米水银柱高时, 丙烷—空气混合气的点燃肯定是没有突然的障碍(见前节)。

扩散火焰

在发表的文献里，没有扩散火焰极限的测定方法。然而，有各种不同的理论预述火焰的高度和形状[24]，以及扩散火焰的吹灭速度[30,31]。这些理论的基本物理原理通常是假设

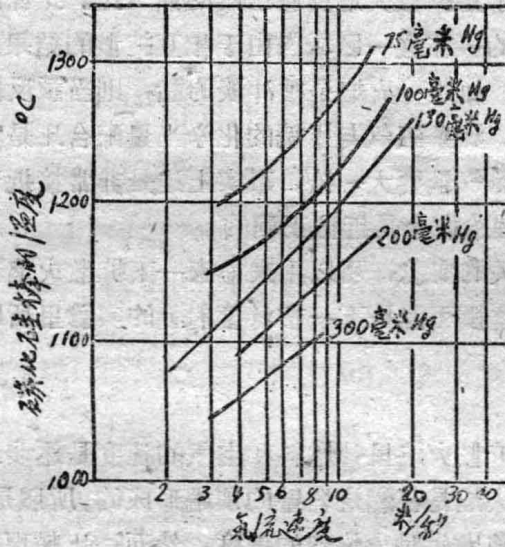


图13 在不同压力下，为点燃按化学当量配合的丙烷—空气混合气，碳化硅棒所必需的表面温度与混合气速度的关系曲线（流管直径为51毫米）

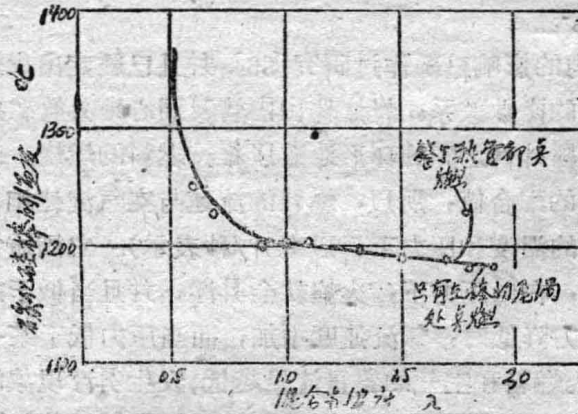


图14 在压力为150毫米水银柱高及速度为13米/秒时，为点燃丙烷—空气混合气，碳化硅棒所需要的表面温度

反应是在一薄层内发生，在这薄层内燃料与氧化剂以化学当量的配合比例相遇，同时，还假设在扩散火焰里存在一个反应速度的上限，它与预混火焰的情况相同。

灼热扩散火焰，亦即与氧气燃烧的火焰的物理和化学结构在参考文献32中已作了研究，并且指出了：反应区是非常厚的，还指出了反应是在接近化学平衡状态下发生的。但是，只要把惰性冲淡剂，例如氮气引入燃料或氧气，上述的这些性质就会逐渐消失。燃料和氧气的冲淡由于反应速度的降低而将促使反应区内的预先混合（反应速度的降低是因火焰温度较低而引起的），一直到与预混火焰相似的情况出现时为止。

然而，扩散火焰与预混火焰的一个基本差别仍然保留着。虽然，预混火焰在一个大气压下的极限实验可以用这种方法推导出来，即由于热损失而引起的灭火仅仅是次要的，也就是可以求出真实的极限，而扩散火焰的情况并非如此。在正常的直立扩散火焰里，燃料的射流

在周围的空气中燃烧，火焰的厚度，特别是在火焰根部是非常小的。所以，传给周围介质的热量损失就没有被用来维持这一反应区。因而，能够加入这种火焰的惰性气体就要比加入预混火焰的份量少得多。例如，预先混合的、按化学当量配合的甲烷—空气火焰，其氧含量指数在灭火发生以前可以降低到0.134，而在直立的扩散火焰里，氧含量指数为0.164时就发生灭火现象。

这种冲淡实验可以用来求定扩散火焰反应区内的油气比。比如说，如果甲烷扩散火焰里的反应是在某一区域内发生的，在这一区域内由于相互扩散的结果，按化学当量配合的状态佔了优势，那么，可以期望，如这一火焰是被冲淡的话，则当该反应区内存有某百分率的冲淡剂时，就会发生灭火现象。如果氧气与甲烷的化学当量配合比是2比1，我们可期望，加入甲烷的氮气量比加入氧气的氮气量要大一倍。事实上这是非常接近于实际情况[33]，这就证实：至少对冲淡火焰来说，理论概念是近似正确的。

不幸的是，目前缺乏有关的实验，可以用来检查一下扩散火焰在低压下的最小氧含量指数是否会逐步增加。但是，这极可能是下一节将要讨论的实验里所暗示的那种情况。

低压下火焰的吹熄

如果在一个直立的层流扩散火焰里，燃料和空气的速度是逐步地增大，则火焰将从燃烧器鼻浮起来而熄灭了。因为火焰是在燃烧器壁的顶端形成的，所以是处于局部低速的区域里，这就难于准确的知道灭火现象发生时火焰内的速度。然而，比较现实的是使火焰鼻浮速度等于燃料和空气的总平均速度。

对于这种扩散火焰，压力的影响已经作过研究[33]，并且已经定出火焰鼻浮与燃料和空气的质量流量以及燃烧器直径的函数关系。燃烧器由内管及同心地外管组成，燃料的蒸气是通过内管引出的；而空气是流经外管之间的环形通道以维持燃料的燃烧。内管面积与环形面积之比值是近似于化学当量比的配合值，所以，燃料的流速与空气流速相等。对于给定的燃料和空气的质量流量（在正常的温度和压力下，以毫升/秒表示）——它们通常保持着化学当量的配合量，可以求出某一压力，在此压力下，火焰就会鼻浮，并且当低于此压力时，扩散火焰就不能存在。这是因为当压力降低时，气流速度增加，而当压力低于某一压力值时，气流速度就超过了鼻浮速度的缘故。燃料和空气的质量流量越低，发生鼻浮现象的压力就越低，但是这种情况无论如何并不是无限地连续下去，而质量流量只能降低到某一限度时才是有利的，这是部分地由于必需具有足够的燃料和空气来保持可能的最小火焰继续进行，以及由于对流的气流速度的缘故（特别是在大管子中）。气流速度越小，火焰中更为实际的气流速度将决定于自然对流。它甚至可能造成迴旋流，因而使火焰受到破坏。图15是火焰产生鼻浮时的压力与燃烧器内管直径的关系曲线。结果表明，当燃料和空气的质量不变时，鼻浮压力随着燃烧器尺寸的增大而下降，一直到曲线突然向上弯曲时为止。在这一区域里，火焰变得不稳定，燃料趋向于在管的另一边燃烧。自然对流造成火焰的不稳定，而质量流量再不能用来确定火焰中的实际气流速度。这种不稳定性应该归咎于扩散火焰的低压极限，对于乙烷—空气火焰，这一低压极限约为25毫米水银柱高，而对由乙烯—空气，低压极限近似于10毫米水银柱高。这点不能用改变燃烧器尺寸的方法或者是用改变质量流量的方法来克服。

直立的扩散火焰具有低压极限这一点有很重要的意义。这就是蜡烛火焰在低于大约为

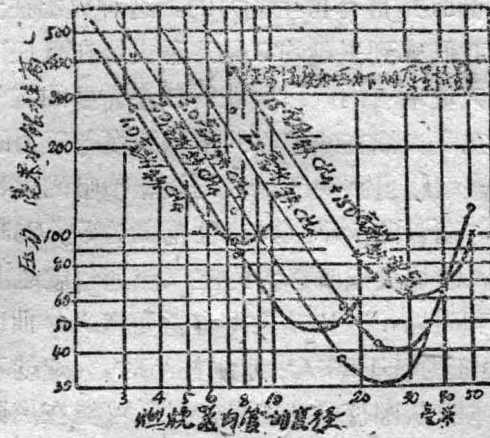


图15 扩散火焰昇浮时的压力与质量流量（它常常是按化学当量配合的）和管子直径的关系曲线

0.1大气压力时不能燃烧的原因。它同样可应用于从液体燃料表面燃烧的火焰〔34〕。当这种火焰在减压室内燃烧时，在某一程度上它本身似乎可调节至低压状态，因为燃料的燃烧量随着压力的降低而降低，所以，减低火焰中的气流速度，从而允许达到较低的极限。然而，对于高沸点和低沸点的烷烃来说，似乎在高度为21000米时就是极限了，超过这一高度，燃烧再也不可能了。

但是，正常扩散火焰具有低压极限这个结论，无论如何，不排斥在极低压力下喷雾燃料的燃烧，因为雾化燃料的燃烧状态在很大的程度上取决于油滴尺寸的分布，而且，能够包括扩散火焰与预混火焰之间的全部范围。

反向的扩散火焰

正常直立的扩散火焰的低压极限主要是由于自然对流的缘故，从而火焰中的气流速度再也不能控制。如果扩散火焰是在如图16的装置内燃烧的话（见参考文献33），那么，上述的后果就可以消除。燃料进入一个多孔的不锈钢半球圆盘，而火焰是在气态燃料与空气（从底部流入）之间形成。这种火焰没有“根部”，前驻点是火焰中浓度和温度梯度最大的位置，而且，如果要使这种火焰灭火，例如用降低空气的氧含量指数或增加空气速度的方法，则灭

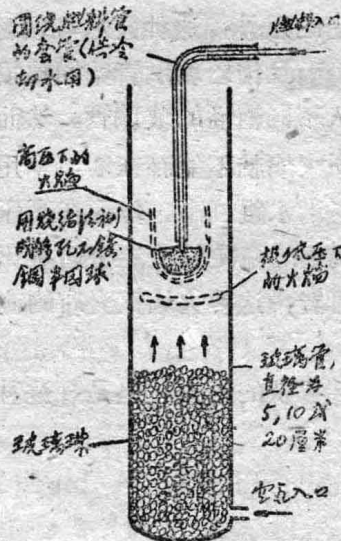


图16 从多孔半球燃烧扩散火焰的实验装置

火現象就象气泡的破灭一样，而且是富有再生能力的。这种火焰在大气压力下的测定方法，我們不准备在这里討論，因为我們感到兴趣的只是这种火焰在低压下的工作状态。

为了这一目的，把噴咀装入玻璃管内，以便获得任意需要的空气速度，而且把整个装置装入减压室内。图17是甲烷—空气火焰在吹熄时的空气速度与压力的关系曲线。只要燃料流量足够大，而且足以防止因燃烧器幅射損失而造成的燒結噴咀的过热，則图上的諸数值与燃料流量无关。此外，吹熄值亦与圆盘的大小（其直径范围为5—25毫米）无关。

从图17可看出，压力越低，吹熄火焰所必需的空气流速也就越小。这些数值不能在高压下确定，因为空气的質量流受到阻滞，而扰动显得有重要意义。曲线B表明如果噴咀是在直径为10.3厘米的玻璃内管，則当压力低于26毫米水銀柱高时，火焰就不能存在。对最低压力下火焰的一个重要观察，是火焰本身从圆盘分离出来，并且可能在离圆盘表面远至5厘米的地

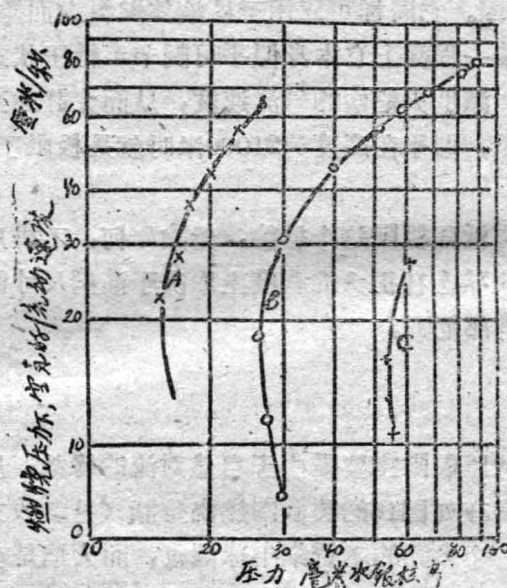


图17 悬挂在多孔圆盘（用燒結法造成的）的扩散火焰的吹熄速度

- A—管子直径为20.8厘米
 - B—管子直径为10.3厘米
 - C—管子直径为5.3厘米
- 燒結圆球的直径为20厘米。

方停駐。火焰不再成为半圆球形，而变成十分扁平，如图16所示。除了在这种情况下，即燃料是通过燃气进行扩散而与空气相遇的以外，这种火焰与預混火焰极为类似。十分明显，这种扁平火焰不再是真实的扩散火焰，而且传给玻璃管壁的热損失也就显得有重要意义。为了試驗这一点，把同样的燒結噴咀装入不同直径的玻璃管。然而，在采用直径为10.3厘米的玻璃管时，当压力低于26毫米水銀柱高火焰就不能存在；当采用直径为5.3厘米和20.8厘米的玻璃管时，其相应的数值为54和15毫米水銀柱高。然而在高压下，这些实验可测定扩散火焰的真实吹熄速度，在极低压下，火焰的稳定性决定于管壁灭火，因为在实验的誤差范围内，低压极限近似与管子直径成反比。再者，这种火焰灭火时的直径和压力接近于真实預混火焰所定出的数值。

所以，这类扩散火焰可以維持到极低的压力，但是，这种火焰是否还可以称为扩散火焰，却是值得怀疑的。