

# 燃气燃烧理论与实践

姜正候 徐吉浣 章成骏 吴念劬 编著

中国建筑工业出版社

# 燃气燃烧理论与实践

姜正侯 徐吉浣 编著  
章成骏 吴念劬

中国建筑工业出版社

10038/48

本书系论文集，由五篇独立的论文组成。在这些论文中，有的阐述了燃气燃烧的稳定性和燃气的互换性等理论问题；有的介绍了关于燃气火焰温度的光学测量、燃气红外辐射器等研究成果；有的分析了燃气工业炉的节能技术。本书根据国内外有关科研报告，提供了各种燃气的燃烧稳定性实验曲线，以及多种红外辐射器的光谱分布曲线，以便有关科研、设计和教学工作选用。

本书可供从事燃气燃烧与节能工程设计、科研、运行管理人员以及有关大专院校师生参考。

### 燃气燃烧理论与实践

姜正侯 徐吉沅 编著  
章成骏 吴念劬

\*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)  
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

\*

开本：787×1092毫米 1/32 印张：7<sup>5</sup>/<sub>16</sub> 字数：164千字

1985年5月第一版 1985年5月第一次印刷

印数：1—4,800册 定价：1.45元

统一书号：15040·4757

# 前 言

我国气体燃料的使用规模正在日益扩大。不论是天然气、煤气、液化石油气或农村沼气事业，都面临着迅速发展的前景。运用先进的燃气燃烧与节能技术来提高气体燃料使用效益，是发展燃气事业的一个重要环节。

应该指出，我国燃气燃烧与节能技术同国际先进水平相比尚有一段不小的差距。例如，本书所介绍的燃气燃烧稳定性、燃气火焰温度的光学测量和工业炉窑平衡等问题，在国际上已有很多研究成果，但我国却尚缺乏系统的介绍。结合我国实际情况系统地介绍一些先进理论与技术，有利于我国燃气燃烧与节能技术水平的提高。这也正是编写本书的目的。

本书由五篇独立文章组成，每篇文章涉及一个专题。有的文章着重阐述实用燃气燃烧理论，有的文章着重阐述燃气燃烧与节能技术原理。为了缩短与国际先进水平的差距，应该系统阐述的专题很多，本书只能起抛砖引玉作用。我们殷切地期待着有更多为此目的而写的文章出现。

## 目 录

|                    |                     |
|--------------------|---------------------|
| 大气式燃气火焰的稳定性 .....  | 姜正侯 ( 1 )           |
| 燃气互换性判定原理 .....    | 姜正侯 王少华 杨庆泉 ( 105 ) |
| 燃气火焰温度的光学测量法 ..... | 徐吉浣 ( 131 )         |
| 燃气红外辐射器的研究 .....   | 徐吉浣 ( 157 )         |
| 燃气工业炉节能分析 .....    | 章成骏 吴念劬 ( 180 )     |

# 大气式燃气火焰 的稳定性

姜 正 侯

## 一、引 言

燃气燃烧稳定性问题是燃气燃烧理论和实践中最重要的问题之一。它不单对阐明燃气燃烧的机理有重要的理论意义,而且对燃气燃烧器具、炉窑的设计及运行也有重要指导意义。

化学物理学家和物理化学家对燃气燃烧稳定性进行了大量研究。鉴于这些研究对燃气燃烧工程有重要的指导作用,因此它是燃气燃烧工程师必须掌握的重要理论基础。此外,燃气燃烧工程师也应进行一些与工程实际更为接近的燃烧稳定性理论和实验研究工作。

国际上对于燃气燃烧稳定理论较为系统的研究始于20世纪40年代, B. Lewis和 G. von Elbe 的边界速度梯度理论代表了这一阶段的主要成果, 它第一次从理论上系统地分析了本生火焰回火、离焰和脱火等燃烧稳定性现象<sup>[1, 2, 3, 4]</sup>。在50年代, 进行了大量的实验研究来验证和发展了边界速度梯度理论<sup>[5, 6, 7]</sup>。从60年代开始, S. B. Read等人应用 B. Karlovitz关于在有速度梯度存在的气流中的火焰传播理论来解

释离焰和脱火现象，提出了火焰拉伸脱火理论。同时，关于紊流火焰稳定性、非预混火焰稳定性的研究也大量开展。70年代以后，随着测试仪器的进一步精确和电子计算机的普遍应用，对燃烧速度等影响火焰稳定性的重要参数进行了精确的测定，使火焰稳定性的理论研究有了更准确的实验基础。同时，有关火焰稳定性的数学模型研究也进一步开展。

我国对于火焰稳定性的研究与国际先进水平相比尚有一定差距。从60年代起我国燃气界也进行了一些大气式火焰稳定性的实验，但并未用边界速度梯度理论来整理分析。当前正在进行与稳定性密切有关的燃气互换性研究。

目前，使用最广的燃气燃烧方法是燃气和空气预混的大气式燃烧和无焰式燃烧。燃气和空气预混后燃烧而产生的火焰称为大气式火焰，又称本生火焰。本文的目的是系统地阐述大气式火焰燃烧稳定性的理论和实验成果。燃气和空气不预先混合而进行的燃烧称为扩散式燃烧。扩散火焰的稳定性与本生火焰是不同的，它不属于本文所阐述的范围。

## 二、边界速度梯度理论

### （一）基本概念

在层流气流中的边界速度梯度理论是由B.Lewis 和 G. von Elbe在1943年首次提出的<sup>[1]</sup>。这是在火焰稳定研究中第一次提出的比较完整的理论。它科学地解释了本生火焰在火孔（燃烧器头部气流出口）上的稳定机理。

燃烧器火孔可以是一根较长的管子，如实验室中所用的本生灯；也可以是钻在燃烧器头部的具有不同壁厚的小孔。在理论分析时，可以把火孔分成两类：第一类是孔深比孔径

大得多的火孔，其典型代表就是本生灯的燃烧管。第二类是孔深与孔径差不多的火孔，其典型代表就是钻在薄铁皮上的火孔。从流体力学的角度看，前者容易获得稳定的流动状态，后者不易获得稳定的流动状态。在本文中称第一类火孔为深火孔，第二类火孔为浅火孔。Lewis等的边界速度梯度理论是以圆形深火孔及层流稳定状态为对象提出的。

设燃气与助燃剂（空气或氧气）的混合物（以下称为可燃混合物或燃气-空气混合物）从圆管中以层流状态流出，按照管内气流的流速分布规律，管壁处的流速为零，而管中心处的流速最大。火焰之所以能在火孔上稳定，主要是因为火焰底部（根部）能在火孔边缘稳定。因此，分析火焰稳定条件时最主要应分析火孔边缘的火焰稳定工况。

图1为靠近火孔壁面的气流速度和可燃混合物燃烧速度（法向火焰传播速度）变化示意图。决定火焰是否稳定的区域是紧靠火孔边缘的区域，该区域称为火焰稳定区，即使对于燃烧速度很慢的甲烷-空气混合物来说，其宽度

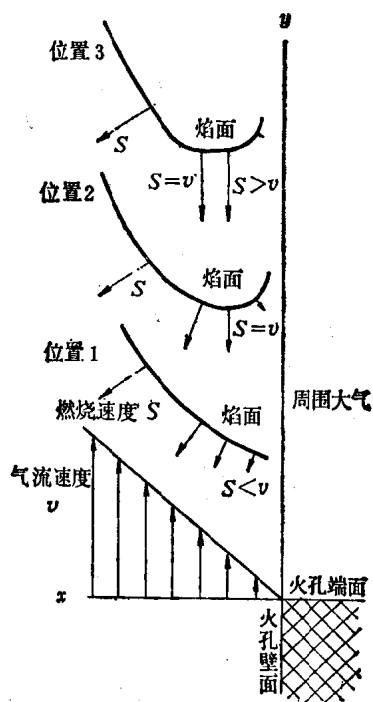


图1 层流气流中的火焰稳定示意图

也只有 1 毫米左右。由于该几何尺寸与管径相比小得很多,所以在该区域内的气流速度变化可假定为线性变化。虽然气流在管内(火孔内)的流动方向是与管中心平行的,然而气流一旦射出管外,由于燃烧时气体热膨胀等原因,靠近边缘的气流方向就会更向边缘偏移。但是,在气流刚射出火孔时,这种偏移不会太大。因此,在理论分析时可假定气流在射出火孔口后其流向仍然平行于火孔中心。

由于假设在火焰稳定区气流速度为线性变化,因此成立:

$$v = gx$$

式中  $x$  ——离火孔内壁的径向距离;

$g$  ——气流速度随  $x$  的变化率,称为边界速度梯度;  
因假定气流速度为线性变化,故  $g$  为常数;

$v$  ——离火孔内壁距离为  $x$  处的气流速度。

设在该气流中有一本生火焰内焰面存在,如图 1 所示。实验证明,在本生火焰中,除了火焰顶端和底部以外,在大部分焰面上的燃烧速度是相同的,如图 2 所示<sup>[4]</sup>。在

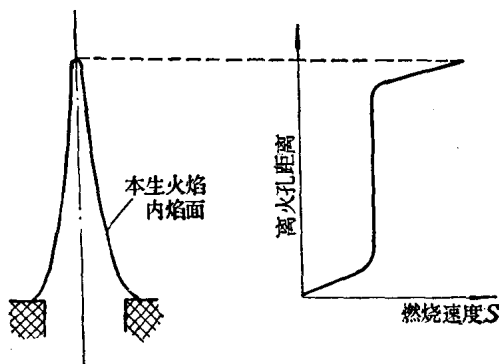


图 2 本生火焰内焰的燃烧速度变化曲线

火焰顶端，由于温度和活化中心对燃烧反应的有利影响，燃烧速度较大。在火焰底部，由于管壁的冷却作用，燃烧速度逐渐减小。当离火孔内壁的径向距离小于某一极限距离，燃烧速度降低为零，这一距离称为熄火距离(quenching distance)。熄火距离的大小与可燃混合物的组分、温度和压力有关。在圆管中，该距离略小于两块平行板之间的熄火距离的一半。在熄火距离范围内，燃烧速度等于零。

以下分析火焰底部在火孔出口边缘的稳定条件：

通常，火焰底部与火孔端面之间在  $y$  方向有一段很小的距离，但十分接近。而在  $x$  方向，离火孔壁面较远的焰面各点，其燃烧速度较大，并基本上是常数。随着离火孔壁面距离的降低，其相应点的燃烧速度也降低。焰面各点燃烧速度的大小在图 1 中用箭头的长短来表示。

当焰面底部在  $y$  方向离火孔端面很近时(位置 1)，焰面上所有各点的燃烧速度均小于相应的气流速度，焰面就被气流推离火孔。当火焰底部离火孔端面稍远时，由于向孔壁的散热减少，活化中心损失也减少，孔壁附近的焰面各点的燃烧速度增加。当达到位置 2 时，火焰底部某一点的燃烧速度正好等于气流速度，这时火焰底部就稳定在位置 2 上。位置 2 称为平衡位置。如果由于某种原因而使焰面推离火孔过远(位置 3)，则火焰底部某点的燃烧速度就会大于相应的气流速度，焰面就会被推回到平衡位置。这就是火焰得以稳定的简单机理，除火焰底部的稳定点外，火焰其它各点的气流速度均比燃烧速度大，在这些点上燃烧速度与气流在焰面法向的分速度相等，这就是本生火焰内焰成为锥体的原因。

本生火焰内焰为什么会发生回火呢？设火焰原来是稳定的，即在火焰底部某一点燃烧速度与气流速度相等。当气流

速度逐渐降低时，边界速度梯度  $g$  降低，平衡位置 2 逐渐移近火孔，也即火焰逐渐移近火孔。这时只要在火焰底部有一点能使燃烧速度等于气流速度，火焰就能找到一个新的平衡位置。当气流速度降低到某一极限时，会使焰面上某一点的燃烧速度大于气流速度，这时火焰就会迎着气流方向移动并传播到火孔内部，这种现象称为回火。回火时的边界速度梯度称为回火极限边界速度梯度。

本生火焰内焰又为什么会发生脱火呢？当气流速度逐渐增加时，边界速度梯度  $g$  增加，火焰逐渐离开火孔。这时火孔壁面对火焰底部的冷却作用减少，燃烧速度增加，从而使火焰在新的位置上稳定。同时，当火焰周围的气氛是空气（或氧气）时，气流速度的增加会加强可燃混合物与周围空气的相互扩散，使气流边界层的可燃混合物被空气稀释。对于燃气浓度大于化学计量浓度的可燃混合物来说，初期的空气稀释能使混合物中的燃气浓度趋近于化学计量浓度，燃烧速度相应增加。但当气流速度进一步增加时，气流边界层的可燃混合物会被空气过分稀释，使燃气浓度小于化学计量浓度，燃烧速度相应减小。当边界速度梯度增加到某一值时，火焰底部每一点的气流速度都超过燃烧速度，火焰就被气流无限制地推离火孔而熄灭。这种现象称为脱火。脱火时的边界速度梯度称为脱火极限边界速度梯度。

发生回火和脱火的机理还可用图 3 所示的曲线来阐述。图 3(a) 中直线 1、2、3 分别表示边界速度梯度  $g$  不同时，气流速度随离孔壁距离变化的曲线。曲线  $S$  表示燃烧速度随离孔壁距离变化的曲线。如前所述，火焰稳定区是在离孔壁很近的火孔边缘地带。当速度曲线为直线 1 时，曲线  $S$  与直线 1 相割，这说明在火焰底部的某些部位燃烧速度大于

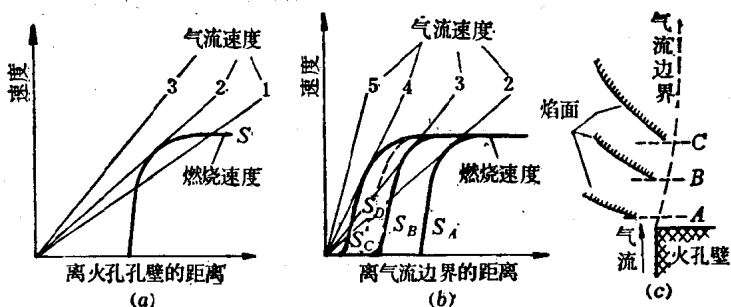


图 3 阐明回火和脱火机理的示意图  
(a)回火机理; (b)脱火机理; (c)火焰状况

气流速度, 发生回火。当提高边界速度梯度, 使速度曲线变为直线 2 时, 曲线 5 与直线 2 相切。在切点处的气流速度等于燃烧速度, 因此焰面底部可以在这点稳定。这时的边界速度梯度就是防止回火所需的最低边界速度梯度, 也即回火极限边界速度梯度  $g_f$ 。当继续提高边界速度梯度, 使速度曲线为直线 3 时, 曲线  $S$  与直线 3 不再有交点, 这说明火焰任何一点的气流速度均大于燃烧速度。这时火焰就被气流推离火孔。图 3 (b) 中直线 2 和曲线  $S_A$  相当于图 3 (a) 中的直线 2 和曲线  $S$ , 也即回火极限工况。这时火焰底部的位置为图 3 (c) 中的位置 A。当提高边界速度梯度而使速度曲线成为直线 3 时, 由于直线 3 上的每一点气流速度值均大于曲线  $S_A$  上的每一点燃烧速度值, 所以火焰底部被推离到位置 B。在位置 B, 火焰底部离开火孔的距离增大, 火孔壁面对火焰底部的冷却作用减弱。同时, 在气流边界层可燃混合物与空气的相互扩散增强, 使边界层附近可燃混合物的一次空气系数增加, 燃烧速度增大。因此, 图 3 (b) 中的燃烧速度曲线  $S_A$  向气流边界移动到  $S_B$ 。因为  $S_B$  与直线 3 相切, 所以焰面底部

能够在位置B重新稳定。同样,当速度梯度继续增大而使速度曲线变为直线4时,焰面继续被推离到位置C,由于壁面冷却作用进一步减弱和稀释作用的有利影响,燃烧速度继续增大,燃烧曲线由 $S_B$ 移动到 $S_C$ 。当曲线 $S_C$ 与直线4相切时,火焰底部就能够在位置C重新稳定。当边界速度梯度再继续增大,使速度曲线变为直线5时,火焰又进一步被推离火孔。这时由于可燃混合物与空气的相互扩散过强,使得气流边界层附近的可燃混合物被空气过分稀释,导致该处的燃烧速度下降,使燃烧速度曲线 $S_C$ 不是继续向左推移,而是反过来向右推移到 $S_D$ 。这时直线5与曲线 $S_D$ 再也找不到切点,即在火焰底部任何一点上的气流速度都大于燃烧速度,于是火焰就被无限制推离火孔,产生脱火。显然,直线4和曲线 $S_C$ 所代表的工况,即为防止脱火的极限工况。这时的边界速度梯度 $g_b$ 即为脱火极限边界速度梯度。

当可燃混合物在空气中燃烧时,可燃混合物中的燃气浓度越大,脱火极限边界速度梯度也越大。这是因为这种可燃混合物与空气相互扩散时,在开始阶段能形成燃烧速度增大的气流边界层。然而,当燃气浓度大的可燃混合物不是在空气中而是在惰性气体中燃烧时,脱火极限边界速度梯度就比较小。

Lewis 和 von Elbe 认为,回火与脱火边界极限速度梯度 $g_f$ 、 $g_b$ 是可燃混合物本身的特性。因此他们认为,只要提出边界速度梯度理论时所作的几条假设符合实际情况,那么 $g_f$ 、 $g_b$ 就应与火孔孔径、孔深和孔型无关。这样,对于每一种可燃混合物就可以用一个 $g_f$ 和一个 $g_b$ 来表示在不同火孔中的燃烧稳定性。

## (二) 稳定层流状态下圆形火孔边界速度梯度的表达式

稳定的层流通常发生在深火孔中。对于稳定层流来说，其速度变化规律为：

$$v = \frac{2L}{\pi R^2} \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (1)$$

式中  $R$  —— 火孔半径（米）；

$r$  —— 某一点离火孔中心的径向距离（米）；

$v$  —— 可燃混合物在该点的流速（米/秒）；

$L$  —— 可燃混合物通过火孔的流量（米<sup>3</sup>/秒）。

则边界速度梯度为：

$$g = \lim_{r \rightarrow R} \left( -\frac{dv}{dr} \right) = \frac{4L}{\pi R^3} = \frac{8\bar{v}}{D} \quad (2)$$

式中  $\bar{v}$  —— 火孔断面平均流速（米/秒）；

$D$  —— 火孔直径（米）。

稳定层流的边界速度梯度公式也可以由下列途径导出：

不论是层流还是紊流，都有一个层流边界层。层流边界层的速度梯度与长度摩擦阻力有关，其关系式为：

$$g = \lim_{r \rightarrow R} \left( -\frac{dv}{dr} \right) = \frac{\lambda \bar{v}^2}{8\nu} = \frac{\lambda L \text{Re}}{16\pi R^3} \quad (3)$$

式中  $g$  —— 边界速度梯度（1/秒）；

$\lambda$  —— 孔壁摩擦阻力系数；

$\nu$  —— 运动粘度（米<sup>2</sup>/秒）；

$\text{Re}$  —— 雷诺数。

对于圆管中的稳定层流：

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (4)$$

将式（4）代入（3），即得：

$$g = \frac{4L}{\pi R^3} = \frac{8\bar{v}}{D} \quad (5)$$

式(5)即为稳定层流时圆形火孔边界速度梯度表达式。

J.Grumer等人进行了大量的燃气稳定性试验, 检验了边界速度梯度理论的正确性<sup>[5,6,7,8]</sup>。

图4为层流状态常温下天然气-空气混合物在各种不同直径深火孔上燃烧时得出的回火曲线。图中实线代表回火工况, 虚线代表火焰部分回缩但尚未完全回火的工况。图4的纵坐标代表气体流量, 横坐标代表天然气在可燃混合物中的浓度。在该坐标图上, 明显看出各种不同直径的深火孔各有其单独的回火曲线。图5将图4的数据整理在以边界速度梯

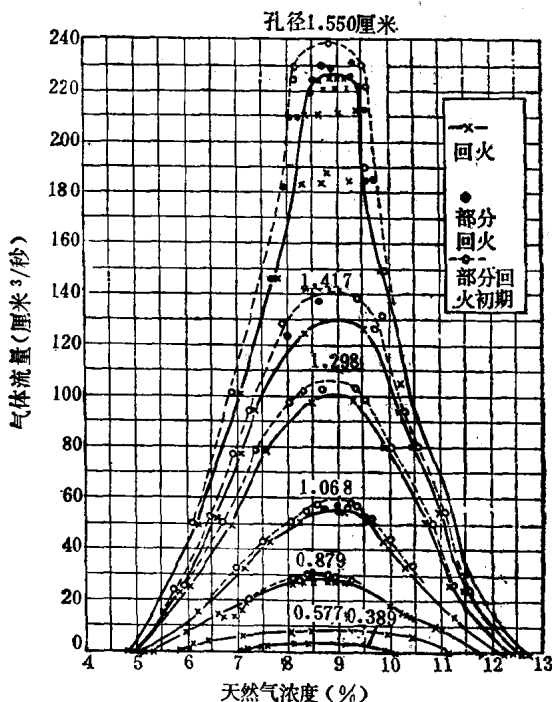


图4 天然气-空气混合物在圆形深火孔上的回火曲线

度为纵坐标，以天然气在可燃混合物中的浓度为横坐标的坐标系上。可以看出，除了直径为 0.333 厘米、0.389 厘米和 1.550 厘米的火孔外，不同直径火孔的回火曲线均十分接近，实际上可以用一根共同曲线来表示。这就表明边界速度梯度理论对于层流时圆形深火孔的回火情况是适用的。当孔径过小（0.333 和 0.389 厘米）时，回火曲线与通用曲线偏离。其原因如下：在孔径过小并接近熄火直径情况下，气流速度与燃烧速度相等的火焰稳定区已经接近火焰顶部，这时气流速度的变化已不能看成是线性变化，所以导出边界速度梯度理论的假设前提已不正确。当孔径过大（1.550 厘米）时，回火曲线与通用回火曲线又偏离。其原因如下：在孔径过大的情况下，火焰的反压力会破坏火孔出口气流分布的对称性，

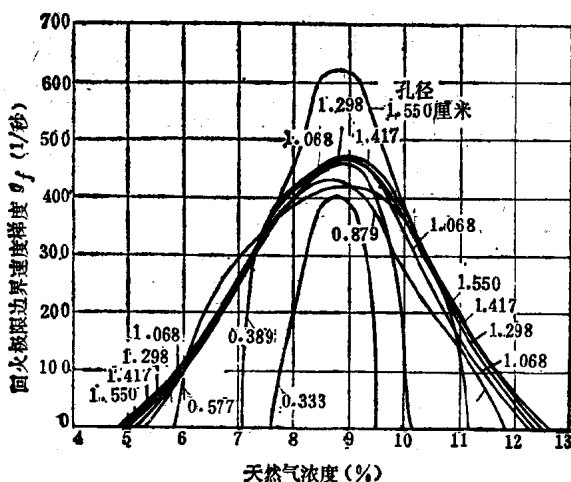


图 5 天然气-空气混合物在圆形深火孔上的回火极限边界速度梯度①

① 图 5 由图 4 演变而来，但原文图 5 比图 4 多一根 0.333 的曲线。——译者

这样，某些局部地区的边界速度梯度就会小于按式（5）计算所得的平均边界速度梯度。亦即，在平均边界速度梯度尚未降到 $g_f$ 时，局部地区的边界速度梯度已经降到 $g_f$ 而发生回火。

图 6 为层流状态常温下天然气-空气混合物在各种不同直径深火孔中燃烧时得出的脱火曲线。由于图 6 的纵坐标为气体流量，因此各种不同直径的火孔各有其单独的脱火曲

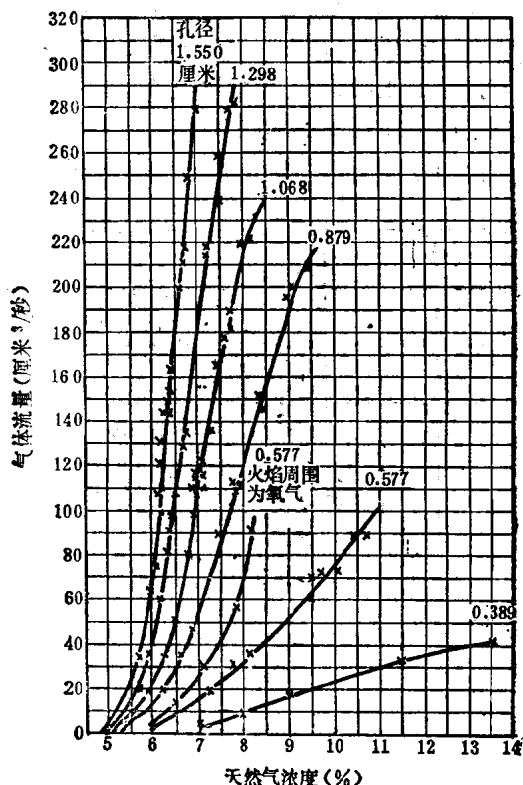


图 6 天然气-空气混合物在圆形深火孔上的脱火曲线