DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0766-07

# 波纹板阻爆燃型阻火器对丙烷-空气预混火焰的淬熄研究*

王鲁庆,马宏昊,沈兆武,李雪交
(中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和设计重点实验室,安徽 合肥 230027)

**摘要**: 根据我国石油气体管道阻火器实验的国家标准(GB13347—92),对 6 组ⅡA 类气体波纹板阻爆燃型阻火器进行了实验探究,得到了相应的阻火速度。实验结果表明:阻火器扩张比、阻火芯狭缝通道长度以及狭缝截面形状是影响阻火速度的主要因素。通过分析以上 3 个因素对阻火速度的影响,得出了阻火速度与阻火器基本参数的拟合公式。结果表明:阻火速度与狭缝通道的长度、扩张比的平方成正比,与狭缝截面三角形的特征尺寸成反比。

**关键词**: 爆燃阻火器;波纹板;阻火速度;扩张比;狭缝
**中图分类号**: O381 **国标学科代码**: 1303510 **文献标志码**: A

可燃气体运输广泛应用于发电、制药、造纸、石油化工厂等工业生产中,当气体泄漏遇到明火时会发生爆炸,带来灾难性的后果。因此,阻爆轰或阻爆燃型阻火器是必不可少的安全装置。20 世纪 70 年代的加拿大亚伯达市,由于阻火器设计或安装的漏洞,每年有约 30 起爆炸事故发生[1]。在真正意义上的阻火器出现之前,许多关于火焰淬熄的研究已经展开。W. Payman 等[2]指出,火焰能否穿过小直径管道取决于火焰的传播速度;J. M. Holm[3]通过实验研究得出,相比于管道壁面的热传导率,影响火焰淬熄的最主要的因素是狭缝的尺寸;N. Iida 等[4]通过纹影实验研究了丙烷-空气预混火焰在狭缝中传播的瞬时形态,并指出火焰能否穿过平板狭缝通道取决于预混气体的平衡比、狭缝宽度及火焰进入狭缝的速度。另一方面,壁面上的火焰淬熄也是研究者关注的问题。Z. Che 等[5]采用实验和数值模拟相结合的手段,结合详细的化学反应机理,研究了不同材料的狭缝壁面上火焰的燃烧特性。

点燃碳氢化合物与空气或氧气的混合物会产生严重的后果,而商业阻火器被认为是可以有效降低此类风险的设备。阻火器由阻火芯和焊接连接法兰的扩张腔组成,扩张腔可以有效地降低火焰传播进入阻火芯的速度。通常可以按照阻火器的固定位置将阻火器分为两大类,即管间阻火器和管端阻火器。在阻火器阻爆实验时,如果火焰通过阻火器,则在管道尾端会出现火光,并伴随着巨大的声音;相反的,若阻火器成功达到阻火的目的,气体爆炸声音就比较沉闷。G. L. Broschka 等[6]的研究表明,阻火器能否成功阻火依赖于测试系统中阻火器的固定位置、点火源位置及火焰速度。波纹板阻火器是现今最常用的阻火器类型,针对此类阻火器,D. Lietze[7]较为详尽地总结了有关其阻火极限的研究工作,可以为阻火器的设计及研究工作提供理论依据。

工业生产中,阻火器的设计思想是根据使用场所的需求,达到阻火要求,并尽可能减小流阻。但实际设计时,一般以阻火芯中三角形狭缝的大小(或疏密程度)为主要出发点,忽略阻火器扩张比、狭缝截面形状对阻火速度的影响。扩张腔是阻火器必不可少的结构,然而,关于扩张比对阻火速度影响的研究却很少;同时,狭缝形状对阻火速度的影响也少有研究,仅仅将其看作等边三角形,或是仅考虑三角形的密度。本文中,采用不同设计参数的波纹板型爆燃阻火器进行实验,分析阻火器尺寸参数对阻火速度的影响,并拟合出阻火速度与阻火器尺寸参数的关系式,以期为阻火器的设计提供参考。

* **收稿日期**: 2015-12-18; **修回日期**: 2016-04-11
**基金项目**: 国家自然科学基金项目(51674229,51374189)
**第一作者**: 王鲁庆(1990— ),男,硕士; **通信作者**: 马宏昊,hhma@ustc.edu.cn。

## 1　实验装置与实验方法

### 1.1　阻火器的基本尺寸参数

实验所用阻火器均属于ⅡA类气体阻火器，适用于许多常见的可燃气运输（如丙烷、甲烷等）。选取6组直径为50 mm的阻火器为被测试对象，其编号分别为$A_1$、$B_1$、$A_2$、$B_2$、$A_3$、$B_3$。图1为两种类型阻火器的示意图，A类阻火器扩腔内仅含一层波纹板阻火芯，B类阻火器扩腔内含有两层波纹板阻火芯，并以厚度为2.2 mm的不锈钢制星形圈隔开。除阻火芯狭缝的倾斜方向不同外，B类阻火器内阻火芯的其他参数均与具有相同下标的A类阻火芯完全相同。

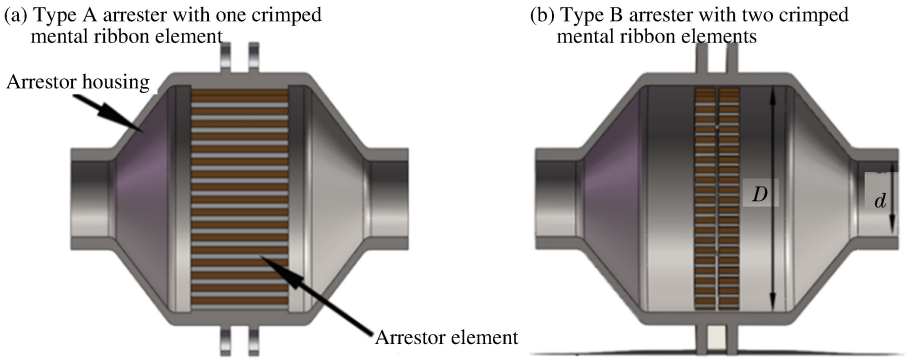


图1　两种类型的阻火器

Fig. 1　Skematic of two types of flame arrestors

阻火器的基本尺寸参数可以直接测量得到，结果如表1所示。入口直径，即管道直径$d=50$ mm。阻火芯可直接从扩张腔中拆除，从而测量得到其参数。图2为阻火芯、狭缝通道尺寸示意图，其中$b$为阻火芯厚度；$\alpha$为狭缝与竖直方向的夹角；$D$为阻火芯的直径，因此阻火器的扩张比为$\beta=D/d$。对于单个狭缝，其截面尺寸可以通过显微镜进行测量。波纹板阻火芯的通道截面可以近似地看作等腰三角形，其中$a$为底边长，$h$为三角形的高，$\gamma$为底角。

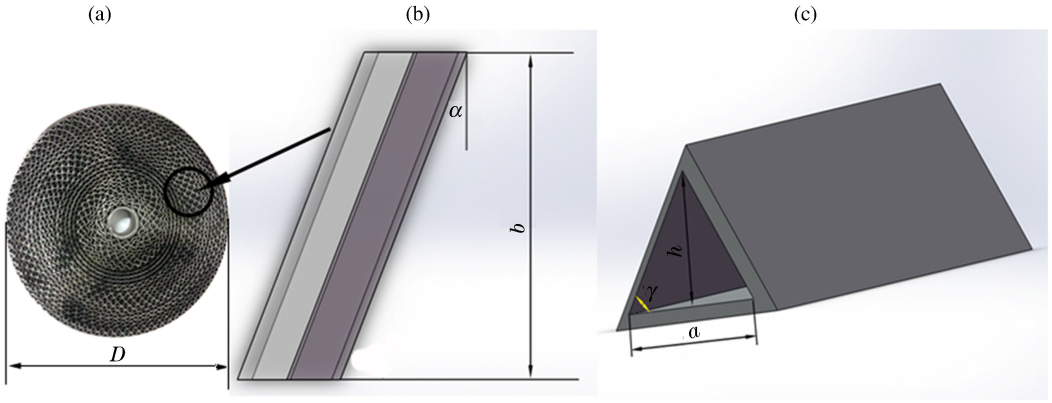


图2　波纹板阻火芯与狭缝示意图

Fig. 2　Sketch of narrow channel of the crimped metal ribbon element

**表1　阻火器基本参数测量结果**

**Table 1　Basic parameters of crimped metal ribbon elements**

| No. | $d$/mm | $D$/mm | $\beta$ | $b$/mm | $\alpha$/(°) | $a$/mm | $h$/mm | $\gamma$/(°) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $A_1$($B_1$) | 50 | 99 | 1.98 | 15 | 28 | 2.13 | 0.87 | 39 |
| $A_2$($B_2$) | 50 | 101 | 2.02 | 16 | 20 | 3.50 | 1.54 | 41 |
| $A_3$($B_3$) | 50 | 145 | 2.90 | 21 | 29 | 3.57 | 1.48 | 40 |

### 1.2 阻火实验装置与方法

图 3 为测量阻火器的阻火速度的实验装置，可分为管道系统、配气系统、点火系统及测量系统 4 部分。阻火器与起爆端的间距为 6 m，阻火器后的管道长度为 4 m。采用静态等容分压配气法将各种气体通入配气罐，形成预混气。预混气为满足当量比的丙烷-空气混合气，为提高燃烧效果，可适当加入氧气。预混气中丙烷的浓度为 4.3±0.2%，静置至少 4 h，以达到均匀混合的效果。测量阻火速度前，首先用真空泵将密闭管道抽真空；随后将预混气导入管道内，使管内气压达到 101.325 kPa，静置 10 min；然后将管道尾端的法兰打开，通过放电器放电立即引爆管内气体。管道壁面放置 4 组(8 个)光电传感器，相邻两组传感器之间的距离为 50 mm，其中 3 组在阻火器前，1 组在阻火器后，阻火器两侧最近的传感器之间的距离为 200 mm。气体爆炸后，火焰加速运动，当火焰传播经过光电传感器时，传感器采集的光信号经过电荷放大器转换为电信号，在计算机上可以显示每个通道的峰值。通过记录每组信号峰值的时间差，计算得到火焰速度，并将第 3 组传感器测得的火焰速度作为阻火速度。如果阻火器后的传感器有信号，说明火焰传播通过了阻火器；反之，火焰在阻火芯狭缝中淬熄，即成功阻火。

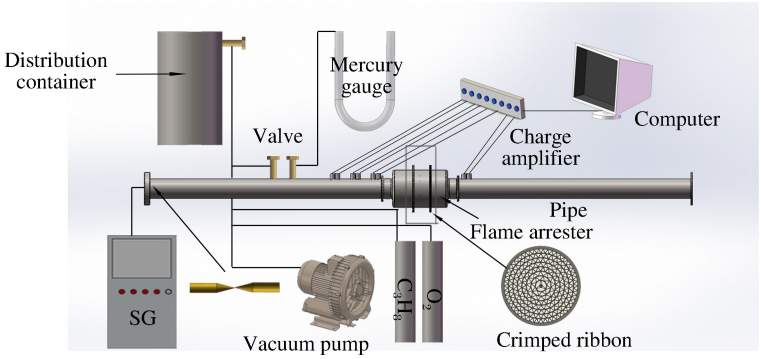


图 3 阻火实验装置图

Fig. 3 Sketch of experimental system of flameproof velocity

实验中可以通过适当调节丙烷浓度改变火焰的速度。由于爆燃火焰的传播受环境因素影响，例如当天的温度、气压、湿度等，因此同一配比下混合气爆炸后得到的火焰速度可能出现较大的波动。除此之外，法兰连接部分、阀门以及管道内部的不平滑等会导致产生湍流或冲击波，使火焰速度不稳定。基于以上原因，每个阻火器都需要进行多次实验，以确定其阻火速度。

## 2 阻火速度的影响因素

### 2.1 狭缝通道长度

理论上讲，随着阻火芯厚度的增加，阻火速度上升。K. N. Palmer 等[8]得到了可以用于预测阻火器阻火速度($v$)的半经验公式：

$$v = 0.95NL \tag{1}$$

式中：$N$ 为单位面积(1 cm$^2$)内狭缝截面三角形的数量，$L$ 为阻火芯的厚度。K. N. Palmer 等[8]认为，对于低速爆燃火焰，火焰的淬熄是由于阻火芯的热传导作用，如果传热量超过某一个特定的临界值，火焰就会熄灭，从而达到阻火的目的。然而，式(1)中忽略了狭缝截面三角形的形状，因此预测结果较为不准确[9]。周凯元等[10]经过阻火器实验和平板狭缝实验发现，冷壁效应是爆燃火焰淬熄的主要原因。对于速度低于 300 m/s 的爆燃火焰，阻火速度满足的关系式为：

$$v = 6.833L/h^2 \tag{2}$$

当火焰速度超过 300 m/s，式(2)的误差将会增大。式(1)和式(2)将阻火芯的厚度作为狭缝的长度，忽略了倾斜角的影响。事实上，由于狭缝倾斜角的存在，狭缝实际长度会大于阻火芯的厚度，为 $b/\cos\alpha$。由表 1 可知，若考虑倾斜角，相比于式(1)和式(2)，通道的长度将会增加 6%～14%。

### 2.2　狭缝截面形状

式(1)仅考虑了三角形的面积。若忽略组成狭缝的不锈钢片厚度(0.2 mm)，对于截面面积相同的三角形狭缝通道，单位面积上的三角形数量也是相同的，因此得到的阻火速度也是相同的，这显然是不准确的。而式(2)将三角形看作等边三角形，与实际的尺寸相差较大(见表 1)。根据 A. L. Berlad 等[11]的理论，狭缝横截面上活性粒子(active particle)的浓度可以通过求解偏微分方程得到，即：

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 c}{\partial y^2}=-\frac{c_0}{D_i} \tag{3}$$

式中：$c$ 为活性粒子的浓度，$c_0$ 为单位时间单位体积内产生的活性粒子数量，$D_i$ 为某一类活性粒子的扩散系数(diffusion coefficient)，本文中即为丙烷-空气混合气中活性粒子的扩散系数。由于在三角形边界上活性粒子的浓度为零，因此式(3)对应的边界条件为：

$$c=0 \qquad y=\begin{cases}0 & -a/2\leqslant x<a/2\\ 2h(x+a/2)/a & -a/2\leqslant x<0\\ -2h(x-a/2)/a & 0\leqslant x\leqslant a/2\end{cases} \tag{4}$$

对于截面面积相同的三角形，若底边角减小，则边界层效应必然增加，对阻火是有利的。以面积为 $\sqrt{3}/2$ mm$^2$ 为例，式(3)的解见图 4，其中 $c_{ave}$ 为活性粒子的平均浓度。分析结果可知，随着三角形底角的减小，三角形的水力学直径(面积与湿润周长之比的 4 倍)随之减小，导致活性粒子浓度的降低。

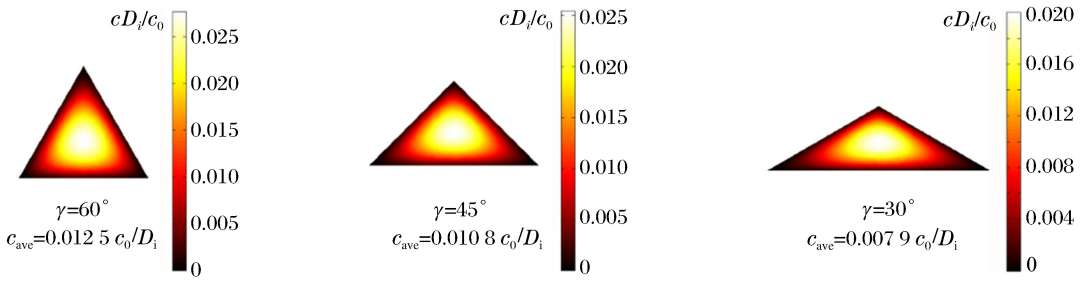


图 4　面积为 $\sqrt{3}/2$ mm$^2$ 的活性粒子浓度云图

Fig. 4　Contours of numerical concentration of active particles

由图 4 可知：当 $\gamma$=60°时，活性粒子最大浓度为 0.028$c_0/D_i$；当 $\gamma$=30°时，最大浓度为 0.020$c_0/D_i$，且平均浓度从 0.012 5$c_0/D_i$ 降为 0.007 9$c_0/D_i$。对于单位厚度的三角形，活性粒子的总量为：

$$C_T=2\int_{-\frac{a}{2}}^{0}\int_{0}^{\frac{2h}{a}x+h} c\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\frac{1}{2}\bar{c}\,a\,h=\frac{1}{2}c_0\tau_i a\,h\upsilon_t \tag{5}$$

式中：$C_T$ 为活性粒子的总量，$\tau_i$ 为活性粒子相邻两次有效碰撞发生相隔的时间(time between effective collisions)，$\upsilon_t$ 为反应速度。当反应速度相同时，阻火速度也是相同的。因此，对于截面面积相同的狭缝，随着底角的减小，阻火速度增加。

### 2.3　扩张比

K. N. Palmer 等[8]指出，阻火器的阻火速度随着气体爆炸压力的升高而降低。也就是说，如果阻火芯前的爆燃压力降低，则阻火器的阻火速度将会增加，阻火器的扩张腔符合该要求。由于管道尾端是开放的，因此管内的压力可视为是不变的[15]。在这种情况下，我们做如下假设：火焰进入扩张腔的瞬间，化学反应引起的变化可忽略，且动量守恒。在此假设下，火焰进入扩张腔的速度将会变为原来的 $1/\beta^2$。为验证此假设，利用 Fluent6.3.23 建立了三维的狭缝模型，并对 6 组阻火器进行模拟。以阻火

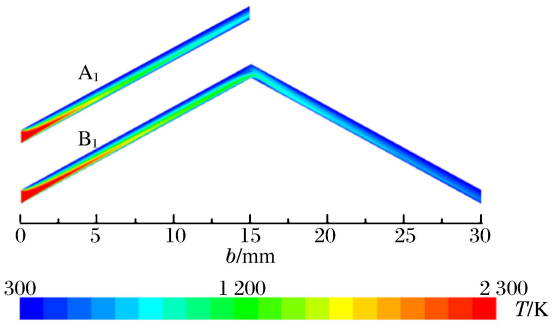


图 5　阻火器 $A_1$、$B_1$ 的温度云图

Fig. 5　Temperature contours of $A_1$ and $B_1$ arrester

器 $A_1$($B_1$)为例,图 5 显示了中心切片的温度云图。由图 5 可知,两狭缝的出口处温度均为 800 K 左右。由于入口处绝热燃烧温度为 2 300 K,高于实际情况下的温度,因此出口处的实际温度应低于 800 K。再者,由于未燃烧的气体在流动,其自点火温度应该大于静止状态下丙烷的自点火温度 723 K。因此,狭缝后的未燃烧气体不会被点燃,阻火成功,上述假设是合理的。

## 3 实验结果与讨论

图 6 为 6 组阻火器实验中火焰速度的测量结果,其中横坐标为实验编号,纵坐标为按照国家标准(GB13347—92)确定的阻火速度。可以看出:对于阻火芯尺寸相同的阻火器,相比于仅含一层阻火芯的阻火器,含两层阻火芯时,其阻火速度明显增加,说明阻火速度随着狭缝长度的增大而增加。在式(1)和式(2)中,当其他参数不变时,阻火速度与阻火芯厚度成正比,实验中也发现该规律。分析图 6 中火焰速度的数值可知,双层阻火芯的阻火速度与单层阻火芯的阻火速度之比分别为 1.80、2.03、1.79,比值非常接近。另外,对于厚度与狭缝截面三角形完全相同的阻火芯,若通道的倾斜角不同,则通道的实际长度也不同,从而造成阻火速度的差异。因此,对于爆燃火焰,阻火速度正比于 $b/\cos\alpha$ 。

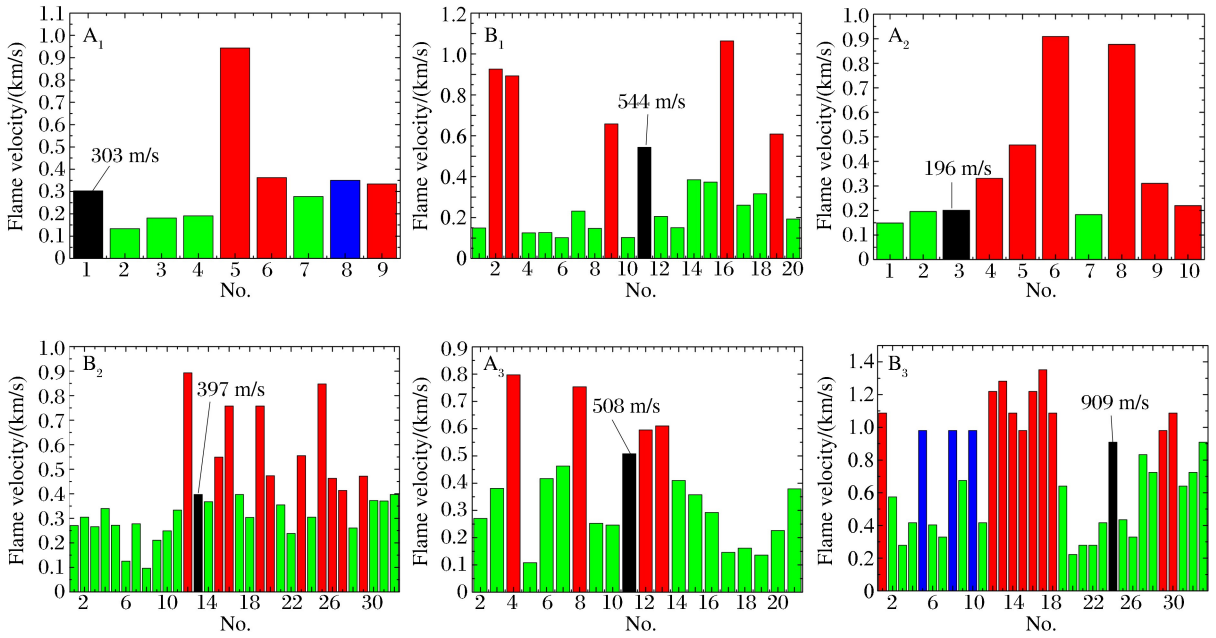


图 6 阻火速度柱状图:红色代表火焰通过阻火器;绿色代表火焰未通过阻火器;蓝色代表此速度下火焰有时通过阻火器,有时不通过;黑色表示最终确定的阻火速度

Fig. 6 Histogram of flame velocity to determine the flameproof velocity. Red: passed through. Green: failed to pass thourgh. Blue: Sometimes passed, sometimes failed. Black: flameproof velocity

由表 1 可知,$A_1$($B_1$)的狭缝截面明显小于 $A_2$($B_2$),其他参数相差不大;图 6 中,$A_1$ 和 $A_2$($B_1$ 和 $B_2$)的阻火速度分别为 303 和 196 m/s(544 和 397 m/s),说明截面三角形的尺寸也会影响阻火速度。以往的研究通常忽略截面形状的影响,或将其当作等边三角形进行处理。由 1.3 节中偏微分方程的解可知,该近似是不准确的。本文中将截面三角形看作等腰三角形,计算得出,对于截面积相同的三角形,底角越小,阻火速度越高,因此可以将 $\sqrt{ah\sin\gamma}$ 作为影响阻火速度的特征尺寸。当 $\gamma=60°$时,该特征尺寸退化为等边三角形的高。

由表 1 可知,$A_2$($B_2$)和 $A_3$($B_3$)的扩张比分别为 2.02 和 2.90,其他参数相差不大;图 6 中,$A_2$ 和 $A_3$($B_2$ 和 $B_3$)的阻火速度分别为 196 和 508 m/s(397 和 909 m/s),说明增大扩张比可以显著提高阻火器的阻火速度。当爆燃火焰传播进入扩张段时,火焰在扩张段入口处发生绕射形成膨胀波,冲击波与化学反应区解耦,导致温度和压力的降低,进而使火焰速度降低,甚至发生“熄爆”现象。郑有山等[12]等通过对

变截面管道内瓦斯爆炸的数值模拟也发现了这种现象。结合数值模拟结果可知，火焰进入扩张腔后，其速度将变为原来的 $1/\beta^2$。

以下利用量纲分析方法推导阻火速度与阻火器尺寸的关系。为构造量纲一参量，引入声速 $c_s$。在上述讨论中，我们得知狭缝长度、狭缝截面形状及扩张比均是影响阻火速度的因素。因此有：

$$v/c_s = f(\beta, b, \alpha, a, h, \gamma) = f(\beta, b/\cos\alpha, a\,h\sin\gamma) \tag{6}$$

结合上文对影响阻火器阻火速度因素的分析，式(6)可以改写为：

$$\frac{v}{c_s} = \lambda\beta^2 \frac{b/\cos\alpha}{\sqrt{a\,h\sin\gamma}} \tag{7}$$

将测得的阻火速度与阻火器基本参数代入式(7)，可以得到关系式如下：

$$v = 77 + 3.8\frac{\beta^2 b/\cos\alpha}{\sqrt{a\,h\sin\gamma}} \tag{8}$$

对于狭缝通道长度这一因素，我们将通道看作长为 $b/\cos\alpha$ 的直通道，忽略倾斜角的影响。理论上讲，式(8)中的截距应为零，但是阻火芯厚度通常超过 15 mm，因此由实验数据拟合得到的拟合公式是合理的。由图 7 可知，式(8)基本上将阻火点与不阻火点分开，说明该拟合公式是非常有效的。该拟合公式考虑了狭缝形状、扩张比和狭缝实际长度等因素，因此相比于式(1)和式(2)，预测结果更精确。需要指出的是，式(8)仅适合爆燃情况，对于爆轰火焰，由于能量的传递方式为冲击压缩波而不是热传导，因此式(8)是不合适的。

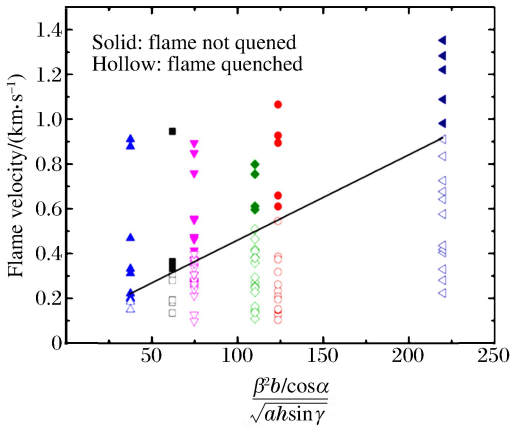


图 7　阻火情况

Fig. 7　Quenching condition of flames

为提高阻火器的阻火速度，不能机械地改变 3 个因素。阻火芯的厚度通常情况下在 15～25 mm 之间，不能无限增加；扩张比过大时会造成阻火器本身强度降低；狭缝截面过小时会造成流阻的增加。这些对阻火器都是不利的，因此在设计阻火器时应该综合 3 方面进行考虑。值得注意的是，在实验中发现阻火器成功阻火(第四组传感器未触发)，但是在管道的尾部仍出现火光的情况，说明发生了二次爆炸。由此可知，除火焰穿过阻火器导致气体燃烧之外，火焰熄灭后的热气流也可能点燃阻火器后方气体。热气流通过狭缝后，散热条件的改变可能使混合气被点燃。因此，利用式(8)设计阻火器时，应该预留一段阻火芯的厚度，使冲击波的强度衰减到不足以点燃混合气，或使热气流的温度下降到混合气的着火点以下。

## 4　结　论

对 6 组波纹板阻火器进行了系统的阻火实验，得到了相应的阻火速度，并通过数值模拟探究了阻火速度与阻火器基本参数之间的关系，所得结论如下：(1) 阻火器的阻火速度与狭缝通道的长度成正比；(2) 狭缝截面积一定时，阻火速度随着三角形底角的减小而增加，因此预测阻火器的阻火性能时，除了考虑三角形的大小与疏密外，还需要考虑三角形的形状；(3) 当爆燃火焰进入扩张腔时，火焰速度降低为原来的 $1/\beta^2$，即增大扩张比可以大幅度地提高阻火速度；(4) 结合实验结果，推导出了阻火速度与阻火器基本参数的拟合公式，对于ⅡA 类气体 DN50 的波纹板阻火器的设计与生产具有指导意义。

## 参考文献：

[1]　Mendoza V A, Smolensky V G, Straitz J F. Do your flame arrestors provide adequate protection?: Loss prevention/reliability[J]. Hydrocarbon Processing, 1998,77(22):63-69.

[2] Payman W, Wheeler R V. The propagation of flame through tubes of small diameter[J]. Journal of the Chemical Society Transactions, 1918,113(2):36-45.

[3] Holm J M. On the initiation of gaseous explosions by small flames[J]. Philosophical Magazine, 1932,14(89):18-56.

[4] Iida N, Kawaguchi O, Sato G T. Premixed flame propagating into a narrow channel at a high speed, part 1: Flame behaviors in the channel[J]. Combustion and Flame, 1985,60(3):245-255.

[5] Che Z, Wong T N, Nguyen N T. Heat transfer enhancement by recirculating flow within liquid plugs in microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012,55(7/8):1947-1956.

[6] Broschka G L, Ginsburgh I, Mancini R A, et al. A study of flame arrestors in piping systems. Even officially approved flame arrestors must be used only under the exact conditions for which they were tested and approved[J]. Plant/Operations Progress, 1983,2(1):5-12.

[7] Lietze D. Crimped metal ribbon flame arrestors for the protection of gas measurement systems[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2002,15(1):29-35.

[8] Palmer K N, Tonkin P S. The quenching of propane-air explosions by crimped-ribbon flame arresters[J]. International Chemical Engineering Symposium Series, 1963,15:15-20.

[9] Rogowski Z W. Flame arresters in industry[J]. International Chemical Engineering Symposium Series, 1980,58:53-65.

[10] 周凯元,李宗芬.波纹板阻火器对爆燃火焰淬熄作用的实验研究[J].中国科学技术大学学报,1997,27(4):449-454.
Zhou Kaiyuan, Li Zongfen. The quenching of deflagration by crimped-ribbon flame arresters[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 1997,27(4):449-454.

[11] Berlad A L, Potter A E. Prediction of the quenching effect of various surface geometries[C]// 5th Symposium (International) on Combustion. New York: Reinhold Publishing Corporation, 1955:728-735.

[12] 郑有山,王成.变截面管道对瓦斯爆炸特性影响的数值模拟[J].北京理工大学学报,2009,29(11):947-949.
Zheng Youshan, Wang Cheng. Numerical simulation for the influence of variable cross-section tube on explosion characteristics of methane[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009,29(11):947-949.

# Quenching of crimped ribbon deflagration arrestor by propane-air premixed flame

Wang Luqing, Ma Honghao, Shen Zhaowu, Li Xuejiao

(*CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials (LMBD), University of Science and Technology of China, Hefei* 230026, *Anhui, China*)

**Abstract**: According to the national standards of oil and gas pipeline fire test in China (GB13347—92), six DN50 crimped ribbon deflagration arrestors belonging to Group ⅡA were tested by experiments, and the flameproof velocity of every single arrestor was obtained. The experimental results show that the expansion ratio, the length of the narrow channel and the cross-section of the narrow passage are the three dominant factors that influence the flameproof velocity. Based on this analysis, the relation between the flameproof velocity and the expansion ratio, the thickness of the crimped ribbon element and the cross-section of the narrow passage were presented. The results indicate that the flameproof velocity is proportional to the length of the narrow channels and the square of expansion ratio, whereas it is inversely proportional to the feature size of the cross-section. This study can provide guidance in the design and manufacture of crimped ribbon deflagration arrestors.

**Keywords**: deflagration arrestors; crimped ribbon; flameproof velocity; expansion ratio; narrow channels

(责任编辑 王玉锋)