

丙烷-空气爆燃火焰通过平行板 狭缝时的淬熄研究^{*}

周凯元 李宗芬

(中国科学技术大学 合肥市 230026)

摘要 对丙烷-空气预混气的爆燃火焰在平行板狭缝中传播时的淬熄现象进行了实验和理论研究,给出了火焰传播速度与淬熄直径、淬熄长度的关系,对爆燃火焰在狭缝中淬熄机理作了探讨,并得到了有实用价值的结论。

关键词 丙烷 爆燃火焰 平行狭缝 淬熄

中图分类号 O381

1 引言

可燃气体与空气的预混气火焰在管道中传播时,在一定条件下,火焰速度将从最初的亚声速,经过短暂的DDT超驱动过程,转变为超声速并达到稳定的爆轰。一旦形成爆轰,包括此前的DDT过程都将对输运可燃气体的管道网及网中其它设备的安全造成威胁。为了防止在非正常条件下火焰沿管道网传播,避免爆炸事故的发生,工业上广泛采用阻火器这一安全装置,它只允许气体流过而能有效地使通过阻火器的火焰熄灭。阻火器的工作原理依赖于火焰在狭缝中传播时熄灭现象的研究。

火焰在狭缝或狭小的通道中传播时,如果狭缝的间距或通道直径足够小,火焰在其中传播一段距离后便会自动熄灭,称为淬熄。能使火焰发生淬熄的狭缝间距或通道直径存在一个上限值 D_q ,称为淬熄直径。火焰进入狭缝运动一定长度 L_q 后,才能完全熄灭,定义这一长度为淬熄长度。

最早期的淬熄研究见于1815年H. Davy为解决煤矿中瓦斯爆炸问题而进行的淬熄实验。对淬熄现象的定量化实验研究是在二十世纪以后进行的。W. Payman等人^[1]用煤气-空气和甲烷-空气所作的火焰通过小直径管道的实验研究表明,火焰穿越小直径管道的能力主要取决于火焰的传播速度。J. M. Holm^[2,3]采用烧嘴法对多种燃气预混气火焰的淬熄直径进行测量实验后得到的结论是,小直径通道对火焰的淬熄作用受多种因素的影响,主要取决于通道的尺寸(淬熄直径),通道壁面材料的导热系数居其次。K. N. Palmer等人在1963年用丙烷-空气作实验介质,对工业上实用的波纹板阻火器(三角形孔)的淬熄性质进行过研究,并从热量平衡的观点出发解释了淬熄原理,给出了火焰在进入波纹板前的传

* 国家自然科学基金资助项目。

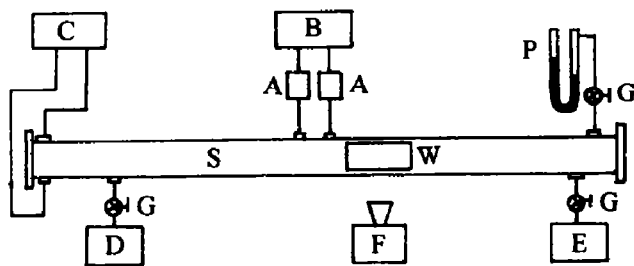
1995-11-23-收到原稿,1996-08-01收到修改稿。

播速度 v 与三角形孔径(体现在单位面积上三角形孔的数量)及淬熄长度的关系^[4],这个经验公式得到了实验结果的支持。但该关系仅适用于火焰速度较低(小于 100m/s)的情形。M. Maekawa^[5]用甲烷-空气实验研究了矩形狭缝间距 D 与淬熄长度 L_q 的关系,但未能涉及火焰传播速度这个重要影响因素。N. Iida^[6]等人用丙烷-空气研究了从燃烧室获得的运动火焰经过一个可改变间距的矩形狭缝时的淬熄,并采用纹影照像获得了火焰在通过狭缝时的三种不同姿态,对于我们最为关注的淬熄直径与淬熄长度的关系未给出具体结果。

本文作者采用与上述研究不同的实验方法,获得了丙烷-空气预混气爆燃火焰在平行板狭缝中传播时淬熄姿态的大量实验照片,并从分析和判读实验照片中得到了淬熄直径,淬熄长度与火焰传播速度之间的关系。从能量平衡角度出发对爆燃火焰的淬熄机理作了初步理论分析和计算,并与实验结果作了比较,得到了有实用价值的结论。

2 实验装置和实验结果

实验装置如图 1 所示。S 为内截面 110mm×20mm 的扁矩形激波管,全长 4m,分为两段。其中部开设一个透明窗口 W,窗口内设置一组精密加工制成的平行板狭缝装置。图 2



- A. 电荷放大器;
- B. 波形存储器;
- C. 电火花起爆器;
- D. 气体预混罐;
- E. 真空泵;
- F. 相机;
- G. 真空阀门;
- P. 真空压力计;
- S. 激波管;
- W. 摄影窗口

A. Electric charge amplifier; B. Transient wave form storage unit; C. Electric spark initiator; D. Premixing tank; E. Vacuum pump; F. Camera; G. Vacuum valve; P. Mercury vacuum gauge; S. Shock wave tube; W. Photographic window

图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental equipment

是狭缝装置的照片。该装置共设置实验用狭缝 28 条,其间距值 D 最大为 5mm,最小值为 0.1mm, D 值分布如表 1 所示。由于精密加工上的要求以及为了减小火焰进入狭缝装置时的流动阻力,小于 0.4mm(第 22 号缝)的 7 条实验狭缝均被两条 1mm 宽的缝隙间隔开。即从 1 到 21 号狭缝形成连续的间距递减区。从 22 号到 28 号是另一个区,该区的读数只读相关狭缝的数据,两区之间还存在一个 2mm 的间隙。狭缝装置全长为 192mm,宽为 12mm。

火焰进入狭缝前的传播速度由火焰传感器,电荷放大器 A 及波形存储器 B 测量获得。火焰淬熄长度 L_q 用设置在激波管窗口外的普通相机 B 门拍摄的火焰通过狭缝时的照

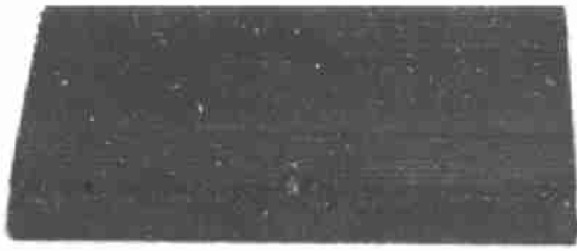


图2 平行板狭缝装置照片

Fig. 2 The photograph of the device of narrow parallel channels

片来判读。由于相机镜头加装了近摄镜圈,镜头距窗口的距离仅80mm,镜头对准狭缝装置的中部位置,因此对于火焰入口端及上下狭缝处的 L_q 读数都应作适当的修正。另外,窗口是用40mm厚的有机玻璃制成,光的折射效应对读数的影响亦是不可忽视的。对此,在实验数据的处理上一概作了严格的修正。

本文作者所用实验介质为93%的丙烷与空气的混合气,丙烷

在预混气中的浓度为4.03%。所有实验的初始压力均为1个大气压。图3是不同火焰速度时的部分实验照片。图4是根据实验照片判读和修正后所得到的狭缝间距即淬熄直径 D 与淬熄长度 L_q 关系的实验曲线和实验点,火焰速度变化范围从30m/s到551m/s。从图4我们可以看到实验曲线呈较规则的抛物线形状。火焰速度较大时,曲线趋于平缓。每条曲线的右下方是各自的淬熄区。图5给出了不同狭缝中火焰速度与淬熄长度的关系,是

表1 狭缝间距 D 的分布Table 1 The width D of channels

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
D	5.00	4.50	4.00	3.50	3.00	2.50	2.00	1.80	1.60	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00
序号	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
D	0.90	0.80	0.70	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10

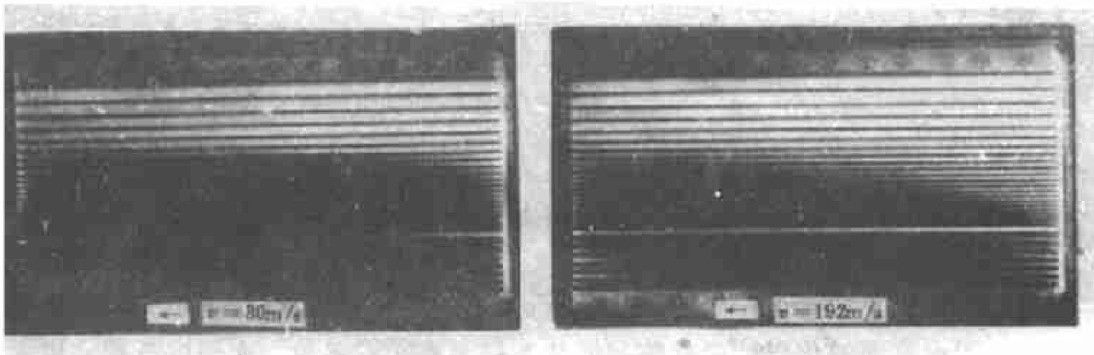


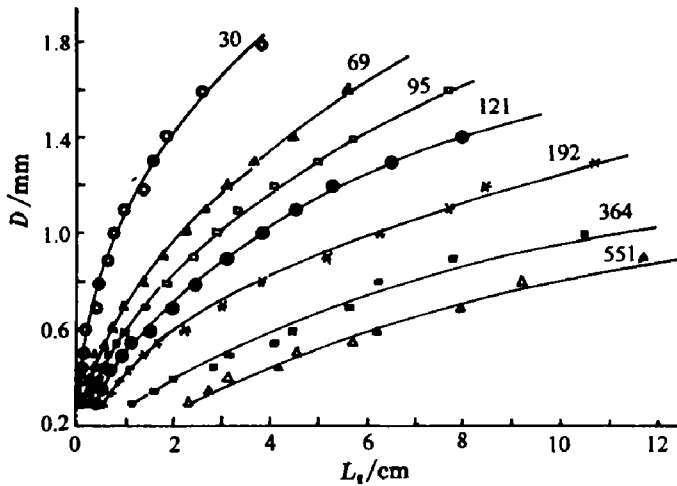
图3 不同火焰速度时的实验照片

注:箭头所指方向是火焰传播方向,实验初始压力为 $p_0=0.1\text{MPa}$,照片比例(scale):——27mm

Fig. 3 The experimental photographs at various flame velocity

The arrow directs to the direction of flame propagation, the initial pressure $p_0=0.1\text{MPa}$

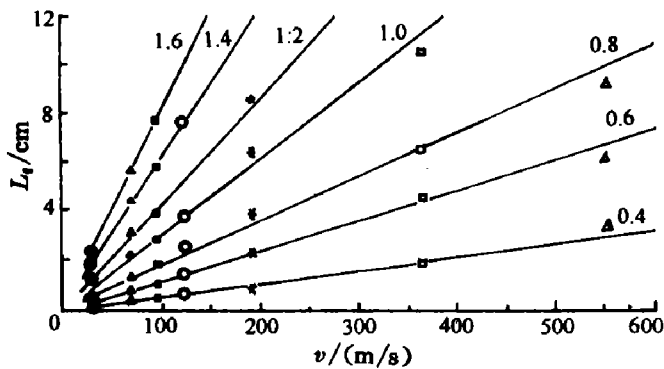
根据实验数据拟合的,它们近似於不同斜率的直线。火焰速度较大时,直线与实验点之误差较大,在它们各自的左上方为淬熄区。从图3给出的实验照片可以看到火焰在狭缝中淬熄都经历了火焰阵面由亮变暗的过程,并且火焰扫过的区域亦由宽变窄,即靠近狭缝壁面的暗区随火焰的运动而逐渐扩大,最终在狭缝中心处相交会。该交会点到火焰进口处之距离即淬熄长度 L_q 。



○ ▲ 等是不同火焰速度时的实验点,曲线是根据实验数据拟合的实验曲线,曲线上的数字表示火焰速度(m/s)
○ ▲ etc. are the results for different values of flame velocity, the diagram is obtained by experiment and the figures above the curves are flame velocity(m/s)

图4 不同火焰速度时狭缝宽度 D 与淬熄长度 L_q 的关系

Fig. 4 The relation between D and L_q



○ ▲ 等为不同火焰速度时的实验点,曲线是根据实验数据拟合的实验曲线,曲线上的数字表示狭缝间距 D (mm)
○ ▲ etc. are the results for different values of flame velocity, the diagram is obtained by experiment and the figures above the curves are the width of channel D (mm)

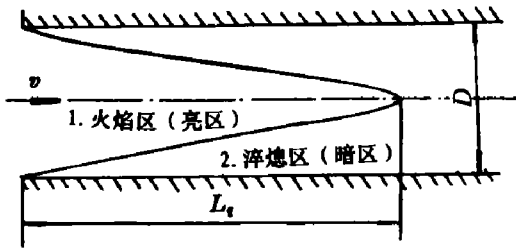
图5 不同狭缝中火焰速度与淬熄长度的关系

Fig. 5 The relation between flame velocity and the quenching length

3 物理模型和计算

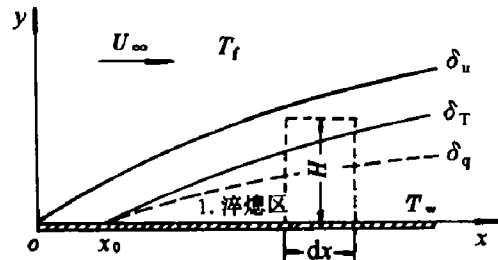
根据对实验照片中火焰淬熄姿态的分析,淬熄过程如图6所示。爆燃火焰在狭缝中淬熄主要是由于火焰面的化学反应放热与散热条件不匹配引起的。火焰以速度 v 进入狭缝时,火焰面内靠近狭缝冷壁处,作为化学反应活化中心的自由基和自由原子与冷壁相碰撞放出其能量,这相当于反应区的热量流向冷壁边界,从而当火焰面到达 $x=x_0$ (x 是固定横坐标)处时,在壁面附近产生了熄灭层。随着火焰面的运动,熄灭层厚度 δ_q 不断增大,以至于自由基进入熄灭层内就被复合成分子并放出能量,而仅有少量自由基能穿透熄灭层与冷壁面相撞。至 $D=2\delta_q$ 时火焰在该狭缝内完全淬熄。因此,在壁面附近除了存在流动

边界层和热边界层以外,还产生一个火焰的熄灭层,它包含在热边界层内,具有温度分布和厚度。设 x 处流动边界层和热边界层厚度分别为 δ_u 和 δ_T ,如图 7 所示。为了问题的简化作如下基本假设:1. 忽略狭缝内流动的不等压不定常过程,而看作是一维准定常层流火焰传播;2. 由于本文仅讨论爆燃火焰,忽略流体内摩擦力引起的边界层温升,故可不计粘性功。



1. Flame zone(Bright zone);
2. Quenching zone(Black zone)
图 6 从火焰淬熄照片观察到的狭缝中火焰淬熄示意图

Fig. 6 Diagram of the flame quenching in narrow channels from photographs of experiment



1. Quenching zone

图 7 火焰淬熄的物理模型

Fig. 7 Physical model of flame quenching

和温度与边界层厚度的关系如下

$$\frac{u}{u_\infty} = \frac{3}{2} \left(\frac{y}{\delta_u} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{\delta_u} \right)^3 \quad (1)$$

$$\frac{T - T_w}{T_f - T_w} = \frac{3}{2} \left(\frac{y}{\delta_T} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{\delta_T} \right)^3 \quad (2)$$

其中: u 是狭缝中气流速度分布, u_∞ 是狭缝中气体主流速度, T 是温度; T_w 是狭缝壁面温度, T_f 是火焰绝热燃烧温度, y 是固定纵坐标。积分形式的动量守恒方程为

$$\rho \frac{d}{dx} \int_0^H u(u_\infty - u) dy = \mu \frac{du}{dy} \quad (3)$$

其中: ρ 是密度, μ 是动力粘性系数, H 是所取的微元体 y 方向的厚度。由(1)式与(3)式可求得速度边界层厚度为

$$\delta_u = \left(\frac{280 \nu x}{13 u_\infty} \right)^{1/2} \quad (4)$$

其中: ν 是运动粘性系数,按能量平衡的观点,火焰能够定常传播的守恒方程如下

$$\frac{d}{dx} \int_0^H (T_f - T) u dy + \int_0^H \Omega Q dy = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left(\frac{dT}{dy} \right)_w \quad (5)$$

其中: Ω 是化学反应速率, Q 是反应热, λ 是壁面导热系数, C_p 是等压比热,下标 w 表示在壁面附近。

由于我们仅关心熄灭边界层厚度 δ_q ,为了简化计算,可粗略地认为温度为 T_f 的热气流进入狭缝,即不考虑反应过程,而只计其热效应,因此可略去(5)式中反应项,考虑边界

按经典的边界层理论^[7],边界层内速度

条件 $x=x_0$ 时, $\delta_T=0$, 求得温度边界层厚度为

$$\frac{\delta_T}{\delta_u} = \frac{1}{1.026} Pr^{-1/3} \left[1 - \left(\frac{x_0}{x} \right)^{3/4} \right]^{1/3} \quad (6)$$

其中: Pr 是 Prandtl 数, x_0 是与狭缝宽度 D , 流速 u_∞ 及边界导热条件有关的量, 在本文中讨论的爆燃问题中流速较小, 可令 $x_0=0$, 以使(6)式获得简化。火焰的淬熄条件可以由熄灭温度 T_q 给出^[9]:

$$T_q = T_f - \frac{RT_f^2}{E_a} \quad (7)$$

其中: E_a 为反应活化能。由(2)式, 当 $T=T_q$ 时, $y=\delta_q$, 且当 $D=2\delta_q$ 时, $x=L_q$, 故由(2)、(4)、(6)、(7)式联立可求得 D 与火焰速度 v 和淬熄长度 L_q 的关系为

$$D^2 = 81.84 A^2 Pr^{-2/3} \frac{\nu L_q}{u_\infty} \quad (8)$$

其中: $A=\delta_q/\delta_T$, $v=u_\infty+v_0$, v_0 是实验介质的燃烧速度。

作为算例, 我们给出一组计算参数: $R=8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$; $Pr=0.722$ ^[9]; $\nu=80.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[9]; $E_a=38000 \text{ kcal/kg} \cdot \text{mol}$ ^[8], $T_f=2260 \text{ K}$; $T_w=280 \text{ K}$; $v_0=40 \text{ cm/s}$ ^[8]。

图 8 是火焰速度 $v=30, 95, 551 \text{ m/s}$ 时计算曲线与实验结果的比较。

4 讨论

图 3 给出的实验照片中, 狭缝照片的另一端即沿火焰速度的反方向亦有火焰进入 D 较小的狭缝。这是由于在 D 较小的狭缝中, 当正向火焰淬熄后, 狭缝中尚有未燃预混气存在, 故火焰从 D 较大的狭缝通过后又反向进入 D 较小且仍存在未燃气的狭缝。由于反向进入狭缝比正向进入狭缝的火焰滞后一段时间, 故对正向火焰的淬熄不会造成影响, 只是在判读数据时要弃去火焰已贯通整个通道的那些狭缝。事实上在设计狭缝装置的长度为 192 mm 时已经考虑到了这一因素。

从图 8 分析, 对于火焰速度 $v \leq 192 \text{ m/s}$ 的爆燃火焰而言, 当 $D \leq 1 \text{ mm}$ 时, 理论曲线与实验结果符合较好, L_q 的理论值与实验曲线值的相对误差不超过 3%, 但当 $D > 1 \text{ mm}$ 时, 随着 D 的增大, 误差也增大。例如, 对于 v

$=30 \text{ m/s}$ 的火焰, 当 D 等于 1.2 mm , 1.4 mm 和 1.6 mm 时, L_q 的理论值与实验曲线值的相对误差分别为 3.5%, 7.1% 和 10.8%。造成误差的原因可能有三点:

1. 较大 D 的狭缝中具有较明显的不等压流动过程, 由于火焰阵面前方压缩波通过后, 介质流动速度 u 沿 x 有较大的梯度分布, 同时也产生了较大的压力梯度, 这与狭缝中准定常传播模型有一定差异。由于这个压力梯度的产生, 与较小 D 的狭缝相比, 较大 D 的

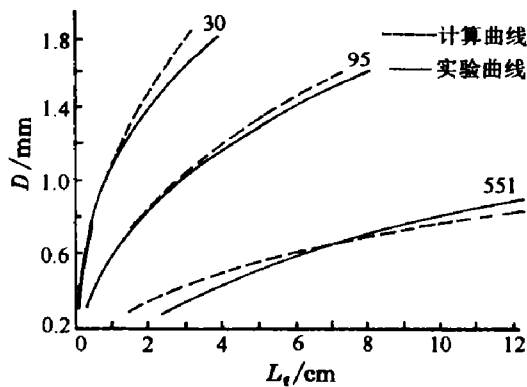


图 8 理论计算曲线与实验曲线的比较
曲线上的数字表示火焰速度(m/s)

Fig. 8 Comparison between diagram obtained by experiment and calculation
The figures above the curves are flame velocity (m/s)
----Calculation; ——Experiment

狭缝更有利于火焰的传播,减缓了火焰熄灭层厚度的增长速率。

2. 由于理论模型是以平行板狭缝为基础的,没有考虑平行板狭缝的宽度。本文实验中设计的平行板宽度为12 mm,这对于较小 D 的狭缝具有足够的精确度。但对于 $D > 1$ mm 的狭缝而言,近似程度较差,更趋近于矩形。A. L. Berlad 和 A. E. Potter 曾给出了通道截面几何形状对于火焰淬熄影响的研究结果^[10],其中矩形通道,三角形通道与平行板狭缝通道之间有如下关系

$$\frac{D^2}{12} = \frac{D_t^2}{80} = \frac{D_t^2}{12} \left[1 - 0.3 \frac{D_t}{b} - 0.047 \left(\frac{D_t}{b} \right)^2 \right] \quad (9)$$

式中: D_t 是等边三角形的边长, D_t 和 b 是矩形管道截面的短边和长边的边长。从(9)式显然可以看出,几何形状的影响也是导致上述误差的原因之一。

3. 在理论计算中忽略了能量方程(5)中的反应项,可能简化过多,这也是导致 L_q 理论值小于实验值的一个因素。

尽管当 $D > 1$ mm 时 L_q 的理论值与实验值之间存在一些误差,不过这对于实际的应用并无影响。因为根据(9)式,当平行板狭缝的宽度 $D = 1$ mm 时,相当于正三角形截面的高 h 为 2.23 mm,这大大超过了工业使用的波纹板阻火器中正三角形孔高的设计范围。按文献[4]所载,实用的 h 值一般不宜大于 0.05 in. (1.27 mm)。

从图5看到,当火焰速度小于 364 m/s 并且 $D \leq 0.6$ mm 时, L_q 与 v 成很好的线性关系。但当 v 大于 364 m/s,以及 D 较大(例如 $D > 1$ mm)时,这种线性关系与实验值的偏离增大。这也是由于较大 D 值的狭缝中的压力梯度和较大的火焰速度所导致的火焰面非正常传播造成的。火焰速度超过爆燃速度时,这种非线性关系就更加明显。

还应提及的是,在图8中,对于火焰速度大于等于 551 m/s 的高速火焰,即使在 $D \leq 0.6$ mm 的情况下, L_q 的相对误差也已超过 17%。这不仅是由于在火焰速度超过爆燃速度的情况下,火焰速度值对火焰温度有很大影响,更主要的是能量传递方式发生了变化,已由爆燃火焰的热传导方式转变为冲击波压缩。这说明对于超声速的高速传递火焰而言,我们建立的热传导淬熄模型已不适用,至少需要进行较大修正。由于本文仅限于讨论爆燃火焰的淬熄问题,对于爆轰火焰的淬熄问题将另作讨论。

5 结 论

1. 由于本文的实验研究是在初始压力为常压下进行的,因此所得到的 D 小于等于 1 mm 时, L_q 与 D 及 v 的关系可以直接为工业波纹板阻火器的设计提供参考数据。

2. 本文中提出的火焰淬熄模型对于爆燃火焰淬熄是合理的。这证明,冷壁效应是爆燃火焰在狭缝中淬熄的最主要因素。

3. 本文给出的丙烷-空气爆燃火焰淬熄结果也适用于文献[11]所列举的其它 I A 类可燃气体与空气的爆燃火焰。

参 考 文 献

- 1 Payman W. wheeler R V. The propagation of Flame Through Tubes of Small Diameter. J Chem Soc, 1918, 113: 656~666; ibid. 1919, 115: 36~45
- 2 Holm J M. On the Initiation of Gaseous Explosions by Small Flames, Phil Mag, 1932, 14: 18~56

- 3 Holm J M. On the Ignition of Explosive Gaseous Mixtures by Small Flames. *Phil Mag*, 1933,15: 329~359
- 4 Palmer K N, Tonkin P S. The Quenching of Propane-air Explosions by Crimped-ribbon Flame Arresters. In: *Second Symposium on Chemical Process Hazards*. London, The Institute of Chemical Engineers, 1963. 15~20
- 5 Maekawa M. Flame Quenching by Rectangular Channels as a Function of Channel Length for Methane-air Mixture. *Combustion Science and Technology*, 1975,11:141~145
- 6 Iida N, et al. Premixed Flame Propagating into a Narrow Channel at a High Speed. *Combustion and Flame*, 1985, 60:245~267
- 7 许肇钧. 传热学. 北京:机械工业出版社,1980. 71~77
- 8 周力行. 燃烧理论和化学流体力学. 北京:科学出版社,1986. 37~72
- 9 国家医药管理局上海医药设计院编. 化工工艺设计手册. 北京:化工工业出版社,1986.
- 10 Berlad A L, Potter A E. Prediction of the Quenching Effect of Various Surface Geometries. In: *5th Symposium (International) on Combustion*. Reinhold Publish Corp, 1955. 728~735
- 11 Rogowski Z W. *Manual for Testing Flame Arresters*. Borehamwood UK: Crown Copyright, Building Research Establishment, 1987.

THE QUENCHING OF PROPANE-AIR DEFLAGRATIONS BY NARROW PARALLEL CHANNELS

Zhou Kaiyuan, Li Zongfen

(University of Science and Technology of China, Hefei Anhui, 230026)

ABSTRACT An experimental study on the quenching of explosion for propane-air mixtures when the flame passes narrow parallel channels is described. Some photos and curves about the relation of the explosive flame velocity, quenching diameter and quenching length are obtained. The device of the experiment is a rectangular section shock tube. When the explosion flame passes through the tube which is set up a series of narrow parallel channels, the photographs of the flame quenching in different width channels can be obtained through the window on the tube by the camera. In this paper a theoretical model of flame quenching has been presented which is based on heat conduction of cold boundary. The relation of flame velocity v , quenching diameter D and quenching length L_q has been given. The results of comparison of calculated values and measured values prove that the cold wall effect is the most primary factor of the quenching of deflagration flame. But when the flame velocity reaches supersonics, the deviation between the calculated and the measured values is increased. It shows that the cold wall effect is the only one factor for the quenching of detonation flame. The equation (8) obtained in this paper which gives the relation of L_q , v and D , when $D \leq 1$ mm, can provide some useful reference data for design of industrial crimped-ribbon flame arresters.

KEY WORDS propane, deflagration flame, narrow parallel channel, quenching