

# 气脉冲发生器中火焰传播与压力变化的研究

樊未军<sup>1</sup>, 孙文超<sup>2</sup>, 吴承康<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学动力系, 北京 100083; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

## A STUDY ON FLAME PROPAGATION IN A GAS-PULSE GENERATOR

FAN Wei-jun<sup>1</sup>, SUN Wen-chao<sup>2</sup>, WU Cheng-kang<sup>2</sup>

(1. Thermal Power Institute, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**ABSTRACT:** Gas-pulse generators are used for ash removing in utility boilers. The operating principle involves pressure pulse being produced when a premixed combustible gas burns quickly in a tube with inside obstructions and a partially open end. Propagation of flame in the combustion chamber with four kinds of fuel (acetylene, water gas, liquefied petroleum gas and methane) were measured in the experimental apparatus. Flame speeds were compared at various fuel/air equivalence ratios. Effects of blockage ratios on flame velocity and peak pressure were investigated and calculated. The experimental and calculated results are useful in providing some guidance for industrial application.

**KEY WORDS:** gas-pulse; flame propagation; chamber with obstructions

**摘要:** 燃烧气脉冲发生器应用于电厂锅炉除灰。其工作原理是预混可燃气体在右端部分开口在内部有障碍物的容器中快速燃烧, 以形成一定的压力脉冲, 并产生作用于积灰表面的射流和冲击波。火焰在湍流扰动装置的作用下不断加速, 容器中的压力不断上升。火焰传播愈快, 压力波形愈陡, 压力峰值愈高。针对这些现象, 该文进行了实验和理论研究。主要研究了乙炔、水煤气、液化石油气和甲烷 4 种燃料, 在不同燃料浓度、不同阻塞比时对火焰传播和压力上升的影响。计算和实验结果对实际应用有指导作用。

**关键词:** 气脉冲; 火焰传播; 有障碍物容器

中图分类号: TM621.2 文献标识码: A

## 1 前言

中国电厂锅炉因燃烧大量的劣质煤不可避免地普遍存在着严重影响锅炉安全和经济运行的积灰问题。国内外发展起来的新一代除灰技术—气脉

冲技术, 用爆燃方法产生的冲击波及高速气流作用于锅炉受热面以达到除灰的目的。图 1 所示的实验装置说明了气脉冲技术燃烧部分的原理。可燃气体与空气在经过各自的流量测控系统后均匀混合, 然后在有湍流产生装置的容器中燃烧。火焰不断加速, 燃烧产生的压力不断上升。压力峰值愈高, 除灰能力愈强, 但是为安全起见燃烧产生的压力峰值还必须被限制在一定的范围之内, 并防止燃烧向爆轰转变。在有障碍物的管道内火焰传播的特性国外已有不少研究。1926 年文[1]首先发现了甲烷空气混合物火焰在直径 5cm 管道内因一系列环形孔板的作用可以很快加速到 420m/s, 而在没有孔板的光滑管内与之相对应的火焰速度是 6m/s。1982 年文[2]在直径 2.5m, 长 10m, 一端开口的圆筒形大型管道内进行了火焰加速实验, 研究了 4 种阻塞比  $R_B = 0.16, 0.3, 0.5, 0.84$  的环形孔板对火焰面速度和压力峰值的影响, 及研究了管道内填充不同数目的孔板对火焰速度和压力波形的影响。1983 年文[3]在 1.22m 长, 127mm×203mm 的矩形通道内进行了爆炸实验, 矩形阻塞板固定于通道下方。1990 年文[4]在矩形通道内通过高速摄影技术观察了氢作燃料时快速爆燃区的火焰速度介于 400 m/s~1200 m/s 之间。1984 年文[5]的实验装置为燃烧管直径 5cm 长 11m, 长径比大于 200, 在燃烧管前部 3m 的管道内装螺旋式阻塞条, 其余部分为光管, 研究了高速爆燃以及爆燃转爆轰的规律。1988 年文[6]等研究了气体粉尘火焰在 50mm×50mm 矩形截面为 1 m 长, 一端封闭另一端开口的通道内的爆炸特性, 阻塞板的  $R_B$  分别为 0.2, 0.4, 0.6, 得到了火焰在不同时刻的照片。本文的工作是针对气脉冲技术的具体应用进行研究。

基金项目: 攀登计划项目 (85-39-16)

燃烧管结构，组织燃烧的方式，测试手段均与文献介绍的不同，本文重点研究它的特殊性。

### 2 实验系统图

火焰探针的布置如图 1。火焰探针放于燃烧管的轴心线上。火焰面传播达探针 1 的时间设定为火焰传播曲线的 0 点。在 1、6 所在的截面上安装两个 0~20MPa 应变式压力传感器，用来测量燃烧管首末两端的压力波形。燃料气分别为乙炔、液化石油气、甲烷和水煤气，经转子流量计与空气预混后注入燃烧管。点火器连接火花塞，点火动作和点火时间由控制器控制。点火器前装有截止阀，用来控制点火前混合气体的流动状态。燃烧管内安装有 5 个孔板，出口截面有收缩。测试中使用的是 DH5932 数据采集系统。它有 8 条通道可同时采集 6 个火焰离子探针和 2 个压力传感器送来的电信号。

表 1 探头布置尺寸

Tab.1 Measured position

探头编号	1	2	3	4	5	6
探头位置/mm	0	130	290	450	610	770

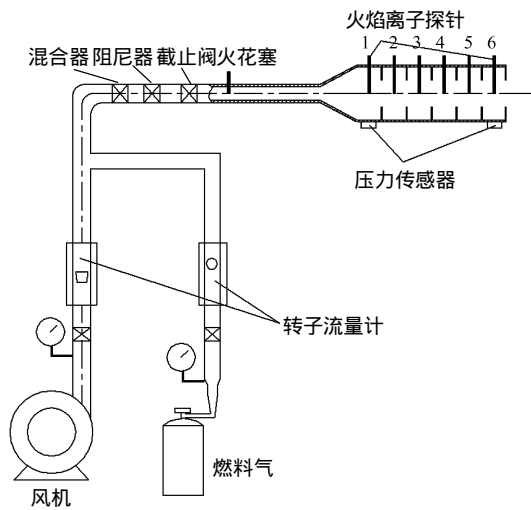


图 1 实验装置系统图

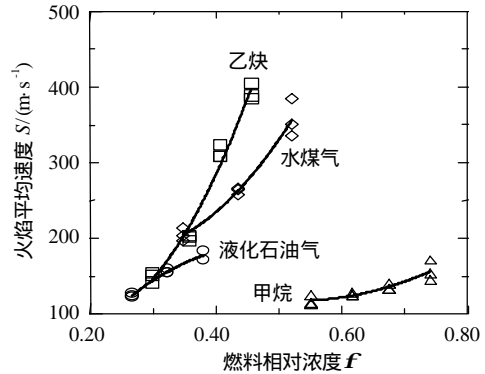
Fig.1 Experimental apparatus

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 平均火焰速度随燃料浓度的变化

图 2 是乙炔、水煤气、液化石油气和甲烷 4 种可燃气体火焰速度随燃料浓度  $f$  的变化曲线， $A_e/A_0$  为出口截面积与燃烧室横截面之比，燃烧管内装 5 块阻塞比  $R_B = 0.28$  的孔板。从图中可见，乙炔在  $f = 0.4$  时平均火焰速度已经达到 300m/s，水煤气次之为 250 m/s，液化石油气为 170 m/s，甲烷最低约

为 100 m/s。另外还可看出在低  $f$  的情况下，乙炔、液化石油气、甲烷等碳氢燃料的火焰速度越来越接近，而水煤气的火焰速度则略高于它们。这可能与水煤气里氢的含量高有关。乙炔是随燃料浓度变化最为强烈的一种燃料气，这不仅与其化学反应的活性有关，而且与它的发热量大也有关系。



$R_B = 0.28; L/D = 7.9; A_e/A_0 = 0.72$

图 2 燃料火焰速度随  $f$  的变化曲线

Fig.2 Flame speed for different  $f$

#### 3.2 不同阻塞比对火焰速度的影响

图 3 为乙炔-空气火焰速度随阻塞比的变化情况。从图中可看出，在相同燃料浓度  $f$  下，当  $R_B < 0.49$  时燃烧速度随阻塞比的增加而不断增加，这主要是由于阻塞比的增加提高了孔板对未燃气体的扰动，也即提高了未燃气体的湍流速度，气流湍流速度的增加必然导致湍流燃烧速度的快速提高。

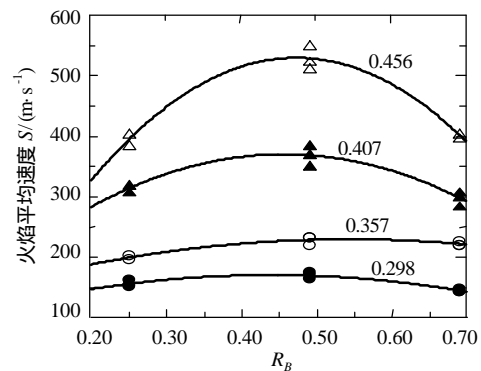


图 3 乙炔火焰平均速度随  $R_B$  的变化曲线

Fig.3 Flame speed for acetylene/air in  $R_B$

当  $R_B > 0.49$  以后，阻塞比的增加反而使火焰速度有所降低，随着阻塞比的增加火焰传播曲线有一个最大值。这可以解释为：阻塞比增加，燃烧波前气流速度由于受到阻塞而减小，火焰速度因此也减小。同时由于阻塞比的增加，湍流燃烧速度有所增加，但其增加的幅度小于波前气流减少的幅度，最终使火焰速度随阻塞比的增加而减少。

3.3 研究参数对压力提升的影响

图4为乙炔-空气混合物爆炸压力随阻塞比的变化曲线。条件是燃烧管内安装5块相同尺寸的孔板,  $R_B=0.28、0.49$ 和 $0.69$ 。图中显示阻塞比愈大压力愈高,而且基本成线性增加。图5是4种燃料的爆炸压力峰值随平均火焰速度的变化曲线。燃烧管内装5块相同的孔板,实验是在同样结构的燃烧管内进行的。可以看出随着火焰速度的增加,压力峰值也提高,但是它们随火焰速度的变化趋势有明显的差别,尤其是液化石油气与水煤气。水煤气的火焰速度很快,但压力峰值并不高,液化石油气的火焰速度尽管不高可压力峰值却很高。因此可以认为,压力峰值的高低不仅受火焰速度的影响,而且也与可燃气体的放热量有很大关系。

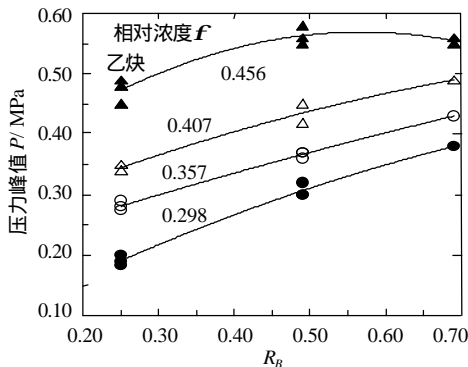


图4 乙炔的压力峰值随  $R_B$  的变化  
Fig.4 Pressure peak for acetylene/air in  $R_B$

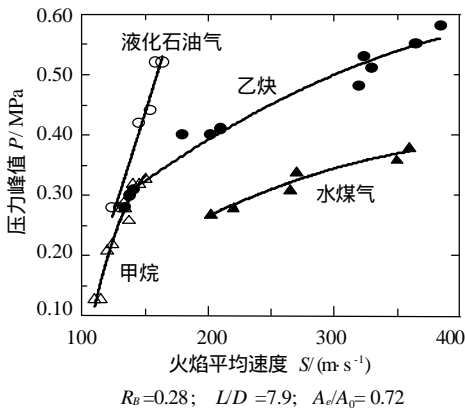


图5 燃料压力峰值随火焰速度的变化  
Fig.5 Pressure peak in different flame speeds

4 数值计算

4.1 爆震燃烧过程基本方程

爆震燃烧过程是一个十分复杂的化学反应及气体动力学过程,为了使这一问题得到简化,做如下假设:

(1) 气体的流动是一维非定常流;

(2) 混合气体为理想的无粘的,而且整个过程为绝热过程;

(3) 火焰面是没有厚度、没有扭曲的几何平面,化学反应仅仅发生在火焰面内;

(4) 火焰面两侧流动可视为等熵流动;

(5) 点火过程非常短暂,并且很快建立起平面火焰面。

以火焰面为界把燃烧室内气体分成2部分,左边为已燃气体,用2区表示。右边为未燃气体,用1区表示。见图6。按上述假设,1区的基本方程如下:

连续性方程: 
$$\frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(ru) = 0$$

动量方程:

$$r\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

能量方程: 
$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} - a_1^2 \left(\frac{\partial r}{\partial t} + u \frac{\partial r}{\partial x}\right) = 0$$

状态方程: 
$$p = rR_1T$$

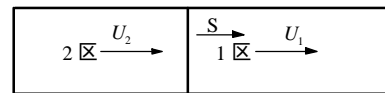


图6 计算模型  
Fig.6 Calculated model

同样,2区的基本方程仅把  $a_1, R_1$  换为  $a_2, R_2$  即可。

式中  $u$  为气流速度; $x$  为轴向距离; $r$  为燃料密度; $a_1, a_2$  分别为1区、2区的音速, m/s; $T$  为温度; $R_1, R_2$  分别为1区、2区的气体常数。

4.2 火焰面条件<sup>[7]</sup>:

火焰面是一个几何面,火焰面前为未燃气体,火焰面后为已燃气体。在火焰面两侧流动参数发生间断,通过火焰面未燃气体的能量以热能的形式释放出来。火焰面前后的瞬时速度、压力和密度应满足如下的守恒关系:

质量守恒关系:

$$r_1(s - u_1) = r_2(s - u_2) \quad (2)$$

动量守恒关系:

$$p_1 + r_1(s - u_1)^2 = p_2 + r_2(s - u_2)^2 \quad (3)$$

能量守恒关系:

$$\frac{g_1}{(g-1)r_1} + \frac{1}{2}(s - u_1)^2 + Q = \frac{g_2}{(g-1)r_2} + \frac{1}{2}(s - u_2)^2 \quad (4)$$

式中 下标“1”代表火焰面前气体;“2”代表火焰

面后气体； $S$  为火焰面传播速度； $Q$  为放热量； $g$  为比热比。

假设火焰面前后气体内的波为等熵波，那么根据等熵波的关系，火焰面前的压缩波关系：

$$p_1 = p_0 \left(1 + \frac{1}{2}(\mathbf{g} - 1) \frac{u_1 - u_0}{a_0}\right)^{2\mathbf{g}/\mathbf{g}-1} \quad (5)$$

$$r_1 = r_0 \left(1 + \frac{1}{2}(\mathbf{g} - 1) \frac{u_1 - u_0}{a_0}\right)^{2/\mathbf{g}-1} \quad (6)$$

$$a_1 = a_0 \left(1 + \frac{1}{2}(\mathbf{g} - 1) \frac{u_1 - u_0}{a_0}\right) \quad (7)$$

火焰面后的压缩波关系：

$$p_2 = p_0 \left(1 - \frac{1}{2}(\mathbf{g} - 1) \frac{u_2 - u_0}{a_f}\right)^{2\mathbf{g}/\mathbf{g}-1} \quad (8)$$

$$r_2 = r_f \left(1 - \frac{1}{2}(\mathbf{g} - 1) \frac{u_2 - u_0}{a_f}\right)^{2/\mathbf{g}-1} \quad (9)$$

$$a_2 = a_f \left(1 - \frac{1}{2}(\mathbf{g} - 1) \frac{u_2 - u_0}{a_f}\right) \quad (10)$$

$$a_0 = \sqrt{\mathbf{g}RT_0}, \quad a_f = a_0 \sqrt{T_f/T_0}$$

式中 下标“0”表示初始状态的数值。

当火焰面前进的时间段足够小时，可假设燃烧为定压燃烧，那么： $r_f = (T_0/T_f)r_0$

将式(5)~(10)代入式(2)~(4)，消去压力和密度项得：

$$\begin{aligned} \left(\frac{T_f}{T_0}\right)(s - u_1) \left(1 + \frac{1}{2}(\mathbf{g} - 1) \frac{u_1 - u_0}{a_0}\right)^{2/\mathbf{g}-1} = \\ (s - u_2) \left(1 - \frac{1}{2}(\mathbf{g} - 1) \frac{u_2 - u_0}{a_f}\right)^{2/\mathbf{g}-1} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (s - u_2) \left(a_0^2 \left(1 + \frac{1}{2}(\mathbf{g} - 1) \frac{u_1 - u_0}{a_0}\right)^2 + \mathbf{g}(s - u_1)^2\right) = \\ (s - u_1) \left(a_f \left(1 - \frac{1}{2}(\mathbf{g} - 1) \frac{u_2 - u_0}{a_f}\right)^2 + \mathbf{g}(s - u_2)^2\right) \end{aligned} \quad (12)$$

因为已燃气体的温度很高，利用能量方程求出  $T_f/T_0$ ，代入式(11)、(12)可得： $u_1, u_2$ 。

$$T_f = T_0 + Q/C_p$$

在知道两边速度的情况下，就可以求出其他流动参数。

#### 4.3 边界条件

(1) 右边界条件：如果流动出现壅塞， $M_e = 1$ ，如果流动不是壅塞， $P_e = P_a$ 。

(2) 左边界条件：固体壁面边界条件， $u=0$ 。

#### 4.4 计算结果及分析

数值计算采用特征线法。具体步骤和说明见文[8]。下面为计算结果。

图 7~图 10 为乙炔空气火焰在计量比浓度为  $f=0.407$  时的计算结果。图 7 是封闭端与开口端处的计算压力波形与实验结果的对照图，计算结果在波形和脉宽上与实验结果基本吻合，计算封闭端的压力峰值小于开口端的，计算封闭端压力峰值到达时间要迟于开口端，这些规律都与实验结果类似。原因可以从计算结果得到解释：火焰在燃烧管内传播的初始阶段，燃烧管内封闭端的压力开始上升，开口端的压力保持常压。火焰在向前传播的过程中，在火焰面两边会不断诱导出一系列压缩波。当第 1 道压缩波传播到开口端时，开口端的压力开始上升。当火焰面到达开口端时，开口端的压力达到最大值。然后开口端的压力开始下降，此时燃烧管内仍有一系列压缩波向封闭端传播，当最后一道压缩波传播到封闭端时，封闭端的压力达到最大值，然后在出口传播来的膨胀波作用下压力开始下降。从压力存在的时间来看，封闭端明显长于开口端。这是由于，一方面开口端远离点火源，感受到压力波的时间较晚。另一方面开口端为燃烧管的出口，泻压时开口端的压力首先开始降低，因此开口端的压力脉冲时间较短。

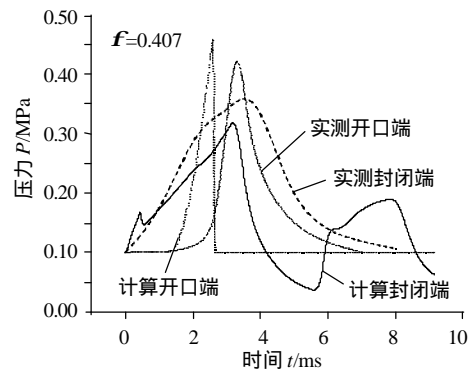


图 7 计算压力波形与实验对照

Fig.7 Calculated pressure shape compared with the experimental

图 8 为不同时刻燃烧管内的速度分布图。在火焰面前气流有一个较大的正速度向前运动，随着压力波的不断向前推进，速度不断增加。火焰面后的速度是负速度，即火焰面后的速度是向封闭端运动的。在靠近火焰面附近气流速度有很大的梯度，由于必须满足封闭端速度为 0 的边界条件，因此气流离开火焰面后速度很快降低。另外对于已燃气体来说，各点的速度基本不随时间变化。图 9 为不同时刻的温度场分布。随着火焰的发展，已燃气体和未燃气体的温度都不断提高。这是由于压力波不断压缩火焰面两侧气体的缘故。图 10 是火焰面前后速度

随时间的变化曲线。随着火焰速度的不断提高，火焰面前气流速度和火焰面后气流速度也不断提高。

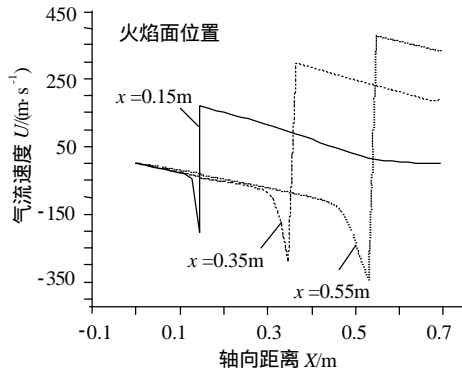


图 8 不同火焰面位置时的速度分布  
Fig.8 Calculated speeds at some positions

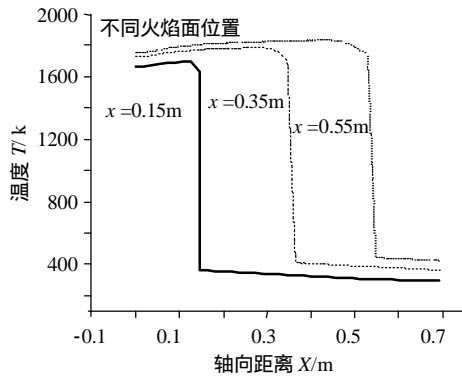


图 9 不同火焰位置时的温度场分布  
Fig.9 Calculated temperatures

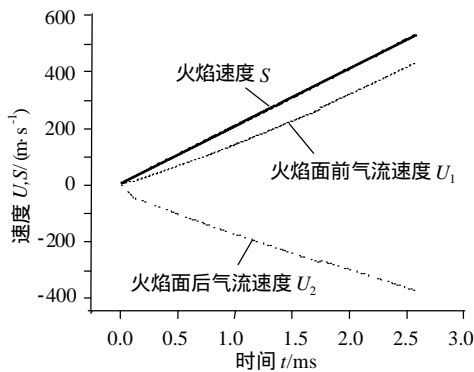


图 10 火焰速度及波前波后速度  
Fig.10 Calculated speeds of flow and flame

## 5 总结

本文工作主要从实验和理论方面对有障碍物管道内燃烧过程进行了研究和探讨。研究结果对气脉冲装置设计和运行提供了很好理论基础。

通过对乙炔、水煤气、液化石油气和甲烷等 4 种燃料在有阻塞板作用下与空气预混燃烧的火焰传播曲线的研究：在所用的稀薄混合气范围内，燃料浓度增加时火焰速度都有较大幅度的提高；研究了乙炔在不同阻塞比下的火焰传播情况，阻塞比较小时，随着阻塞比的增加，火焰速度和压力峰值都有较大的提高；最后从计算的角度分析了火焰在燃烧室内传播时，火焰速度与压力波形之间的关系，火焰传播过程是压力波传播和压力上升的必要条件。计算压力波形、压力峰值和压力峰值到达时间与实验结果基本吻合，因此结果是可信的。同时还计算了不同时刻速度分布和温度分布，计算表明火焰面两侧的气流速度方向正好相反，火焰面后面速度衰减很快。随着火焰不断向前传播，已燃气体温度与未燃气体温度都有所提高。

## 参考文献

- [1] Lee J H S, Knystautas R, Chan CK. Turbulent flame propagation in obstacle-filled tubes [C]. Twentieth Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, 1984, 1663-1672.
- [2] Moen I O, Lee J H S, Pressure development due to turbulent flame propagation in large-scale methane-air explosion[J]. Combustion and Flame 1982, 47: 31-52.
- [3] Chan C K, Moen I O, Lee J H S. Influence of confinement on flame acceleration due to repeated obstacles[J]. Combustion and Flame 1983, 49: 27-39.
- [4] Teodoczyk A, Lee J H S, Knystautas R. The structure of fast turbulent flames in very rough, obstacle-filled channels[C]. Twenty-Third Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, 1990, 735-741.
- [5] Lee J H S, Knystautas R, Freiman A. High speed turbulence deflagrations and transition to detonation in H<sub>2</sub>-air mixtures [J]. Combustion and Flame, 1984, 56: 227-239.
- [6] Yikang Pu. Comparative study of the influence of obstacles on the propagation of dust and gas flames[C]. Twenty-Second Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, 1988, 1789-1797.
- [7] Pickles J H. A model for coal dust explosions [J]. Combustion And Flame 1982, 44: 153-168.
- [8] 樊未军 (Fan weijun). 气脉冲燃烧和除灰过程研究 (Study on mechanism of combustion and ash removing in gas-pulse generator) [D]. 北京：中国科学院力学所 (Beijing: Institute of Mechani-cs. Chinese Academy of Sciences). 1999.

收稿日期：2001-10-06。

作者简介：

樊未军 (1965-), 男, 博士后, 副教授, 研究方向为工程热物理。

(责任编辑 贾瑞君)