

文章编号 :1007-3124(2001)04-0020-06

惰性粉尘抑爆过程的实验研究

范宝春, 谢波, 张小和, 李鸿志

(南京理工大学动力工程学院, 江苏南京 210014)

摘要 在长 9m, 内径 0.14m 的燃烧管内进行了 CaCO_3 颗粒对 $\text{H}_2\text{-O}_2$ 混合物中发生爆炸过程的抑制作用的实验研究。该管分为三部分: 激波成长段, 抑爆段和抑爆后观察段。其中抑爆段装有 10 套可形成均匀颗粒悬浮流的喷粉系统。实验结果表明, 仅当颗粒浓度大于某值时, 才可能有效抑制爆炸, 否则爆炸波会在抑制后重新成长。笔者还基于两相化学反应流的基本方程, 通过分裂方法, 全耦合 TVD 格式和 Lax-Wendroff-Rubin 格式对粉尘抑爆现象进行了数值模拟, 计算结果反映了惰性颗粒作用下激波的变化过程, 其结果与实验结果一致。

关键词 爆炸抑制, 两相化学反应流, 激波, 实验研究

中图分类号: O384; TK123 O354.5 文献标识码: A

Experimental research on explosion suppression by inert particles

FAN Bao-chun, XIE Bo, ZHANG Xiao-he, LI Hong-zhi

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract The inert particle suppression of explosion induced in reacting gas mixture has been studied experimentally. The experiments were conducted in a 9m long 0.14m inner diameter tube consisting of three sections: a shock induced section, a suppression section and a post suppression section. A well developed dust dispersion system was equipped on the suppression section to get a good quality uniform particle suspension for the explosion suppression. The shock waves and flame fronts were measured by pressure transducers and photodiodes respectively. It has been shown from experimental results that only if the dust concentration is larger than a critical value, the explosion will be quenched completely, otherwise it may get strong again in the post suppression section. A numerical technique has been developed to integrate the governing equations based on a non-steady two-phase reacting flow with the existence of the very disparate time scales and spatial length scale, as well as the appearance of

收稿日期: 2001-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19672025)

作者简介: 范宝春(1945-), 男, 江苏扬州市人, 南京理工大学教授。

shock waves. The conclusions got from calculations are consistent with that from experiments.

Key words: explosion suppression ;two-phase reacting flow ;shock wave ;experimental research

0 引言

可燃混合物极易发生意外爆炸,这将造成巨大财产损失和人员伤亡。如果爆炸发生时,适时喷入惰性粉尘,用以扑灭火焰和吸收激波能量,常可达到抑制爆炸的目的。因此,惰性粉尘抑爆过程的研究成为人们关注的课题^[1,2]。

笔者利用直径 $d_p = 15\mu\text{m}$ 的碳酸钙粉尘,在卧式燃烧管内对其在 $\text{H}_2\text{-O}_2$ 混合物中发生爆炸的抑制作用进行实验研究,并用全耦合 TVD 格式和 Lax-Wendroff-Rubin 格式对该现象进行数值模拟。结果均表明,为完全抑制爆炸,抑爆剂浓度必须高于某临界值,否则激波会重新成长。

1 实验

实验在图 1 所示的燃烧管中进行。水平燃烧管总长 9m,由三根内径 0.14m,长 3m 的钢管通过法兰盘连接而成。燃烧管左端用装有点火头和 20cm 长弹簧的法兰盘封闭,用于管内点火并尽快形成湍流加速火焰。其右端与 10m^3 的泄爆罐相连,为使燃烧管处于封闭状态,其间用薄膜隔开。位于中间的 3m 管为抑爆管,两侧装有 10 套喷粉系统,喷粉系统顺次由气室、电磁阀、单向阀、粉尘室和喷头组成,其结构与工作原理详见文献 [3]。在距离点火端 3.3m、3.65m、5.25m、6.15m、7.2m 和 7.8m 处装有压力传感器,距离 3.4m、4.05m、5.20m、7.05m 和 8.05m 处装有以 2CU24 光敏二极管为中心元件的火焰探头,分别用来检测激波与火焰阵面。

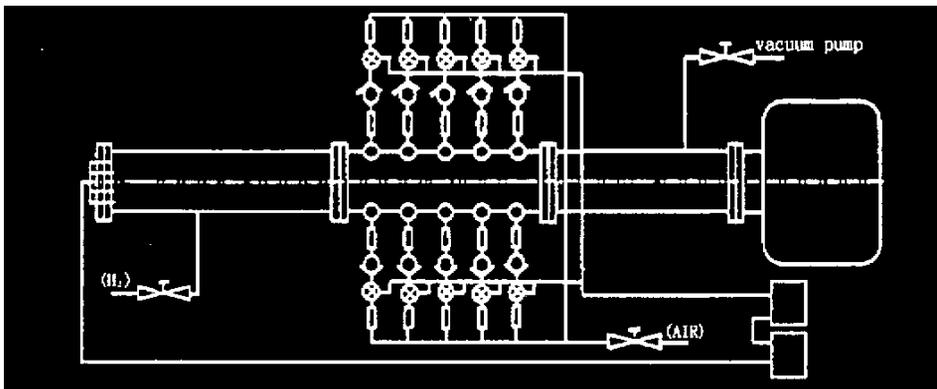


图 1 抑爆实验装置草图

Fig.1 Schematic of experimental setup of explosion suppression

实验采用氢气混合气体。先用真空泵将燃烧管抽至 0.03MPa,然后充入氢气至 0.09

MPa,为防止泄漏,在维持管内负压状态下,预混数小时。

抑爆剂为粉状碳酸钙,用激光衍射仪(Malvern Mastersizers)对其粒径分布进行了测试,其结果如图2所示。其中曲线1为粒径关于体积分数的分布曲线,对应左端坐标轴,曲线2为相应的积分曲线,对应右端坐标轴。结果表明最小粒径为 $0.15\mu\text{m}$,最大粒径为 $45\mu\text{m}$,其平均粒径约为 $15\mu\text{m}$,实验还测得其材料密度为 $2.8\text{g}/\text{cm}^3$ 。

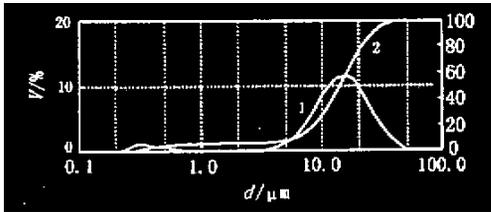


图2 激光衍射仪测得的 CaCO_3 颗粒的径粒分布曲线

Fig.2 Distribution of diameter of CaCO_3 particles measured by laser diffractometer

整个实验由控制系统控制,实验指令发出后,电磁阀先被打开,致使储存在气室中的高压气体经由电磁阀和单向阀,夹带粉尘室中的粉尘由喷头吹入燃烧管,在其中形成扇形颗粒悬浮区,10套装置相互填补死角,从而形成分布均匀的颗粒悬浮流。根据激光和光敏二极管组成的颗粒浓度测试系统的测试结果,颗粒在管内可维持约400ms的良好悬浮状态。从电磁阀开启到悬浮流形

成需要一定时间,而悬浮流又仅能在一段时间内保持良好悬浮状态,这需要点火与形成颗粒悬浮流这两个过程之间的契合。这里采用等待式抑爆,即先在管内形成抑爆区,以等待激波的通过。因此过早和过晚的点火均不能得到良好的抑爆效果。对于本实验,电磁阀打开与点火之间的延时约为150ms。点火头点火后,在弹簧和管壁作用下,火焰不断加速,在成长段已生成一定强度的激波。当管内压力达到预定值时,数据采集系统被触发,瞬态记录仪开始记录压力信号和火焰信号,并输往微机保存。

2 数值计算

一维带化学反应的两相流守恒方程为

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial x} = S \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_p}{\partial t} + \frac{\partial G_p}{\partial x} = S_p \quad (2)$$

其中

$$U = \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_n \\ \rho u \\ E \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} \rho_1 u \\ \rho_n u \\ p + \rho u^2 \\ u(E + P) \end{pmatrix}, \quad S = \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_n \\ F \\ Q + u_p F \end{pmatrix}$$

$$U_p = \begin{pmatrix} \rho_p \\ u_p \rho_p \\ E_p \end{pmatrix}, \quad G_p = \begin{pmatrix} \rho_p u_p \\ \rho_p u_p^2 \\ u_p E_p \end{pmatrix}, \quad S_p = \begin{pmatrix} 0 \\ -F \\ -Q - u_p F \end{pmatrix}$$

无脚标表示气相,脚标 p 表示颗粒相

$$E = \rho \int C_p(T) dT + \sum \rho_s h_s^0 + \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (3)$$

为总内能,其中 h_s^0 为 S 组分的生成焓,脚标 s 表示 S 种组分。 F 和 Q 分别为两相间的动量传递和能量传递, ω_s 为化学反应速率,对于可逆反应有

$$\omega_s = P_s - L_s \rho_s \quad (4)$$

其中 P_s 为组分 S 的生成率, $L_s \rho_s$ 为组分 S 的消耗率。其反应速率常数皆采用 Arrhenius 定律。对于笔者讨论的 H_2-O_2 系统,采用 Roger 的 4 组分可逆反应模型,模型中涉及的化学反应动力学常数参见文献 [4],有关热力学常数参见文献 [5]。

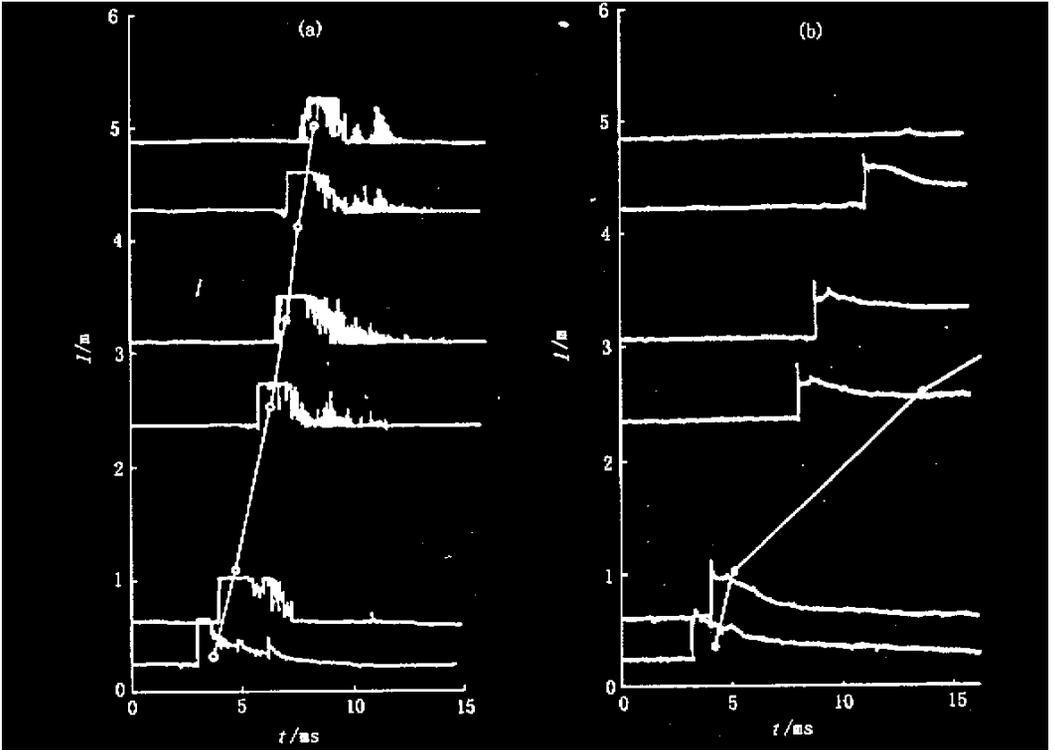


图 3 压力传感器和光敏二极管测得颗粒抑爆实验的结果

(a) 空白实验

(b) 抑爆段喷入浓度为 0.526kg/m^3 的 CaCO_3 颗粒

Fig.3 Typical pressure-time histories and flame trajectory measured by pressure transducers and photodiodes

(a) Vain test

(b) The CaCO_3 concentration of 0.526kg/m^3 in suppression section

该流场具有三类特征时间,即流动特征时间、两相弛豫特征时间和化学反应特征时间。这些特征时间的值差别较大,这使得基本方程带有刚性。为此笔者采用分裂方法,将源项分裂。这样,余下方程可选用最有效的计算格式,而含刚性源项的方程则可在合适的时间步长下进行循环计算。

分裂后包括组元守恒的气相方程采用全耦合有限体积 TVD 格式^[6], 颗粒相方程则采用 Lax-Wendroff-Rubin 格式^[7]。

3 结果与讨论

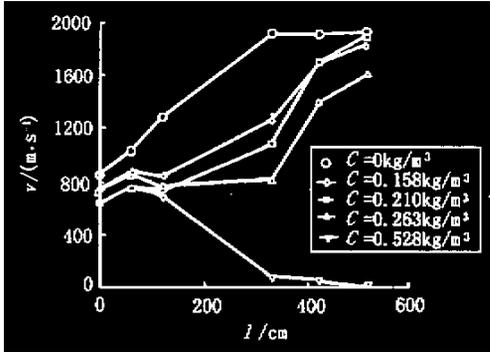


图4 对应于不同 CaCO_3 浓度的激波速度变化曲线

Fig.4 Variations of shock velocity with CaCO_3 concentration

轰波。如果以中间管作为抑爆段, 通过喷粉系统向管内喷入抑爆剂, 则可以抑制激波使之衰减。图(b)为中间管内喷入浓度为 0.526kg/m^3 的 CaCO_3 时, 管内激波变化的实验曲线。结果表明, 在抑爆剂作用下, 火焰完全熄灭, 激波也衰减为声波, 该条件下的抑爆过程具有很好的抑爆效果。

用抑爆剂抑制可燃混合物中发生的爆炸时, 抑爆剂浓度对抑爆效果具有明显的影响。图4为实验曲线, 它描述了碳酸钙浓度对爆炸抑制效果的影响。结果表明碳酸钙浓度低于某临界值时, 虽然对爆炸有一定的抑制作用, 但终究不能使之完全被抑制, 激波穿过抑爆区后在充满 $\text{H}_2\text{-O}_2$ 混合物的观察管内会重新成长, 且最终趋于稳定, 其稳定传播速度约为 1900m/s , 这对应于相应的爆轰波速度。只有抑爆剂粉尘浓度大于某值时, 激波才能完全被抑制, 且不会在观察管内重新成长。

图5为数值计算结果, 它描述了颗粒抑爆时压力空间分布曲线随时间的变化。其中图(a)表明, 当抑爆区内的颗粒浓度小于临界值时, 激波在抑爆区虽有一定的衰减, 但穿越惰性颗粒抑爆区后又重新成长, 且逐渐趋

为了排除喷粉气流对管内流场的影响, 先进行空白实验。图3(a)为空白实验时压力传感器接受的压力信号和光敏二极管接受的火焰阵面信号。传感器的位置用距中间管左端端面的距离来表示。实验结果表明, 管内加速火焰形成的激波在进入中间管时已具有相当的强度, 由于未进行抑制, 故在管内继续成长, 且最终形成稳定传播的爆

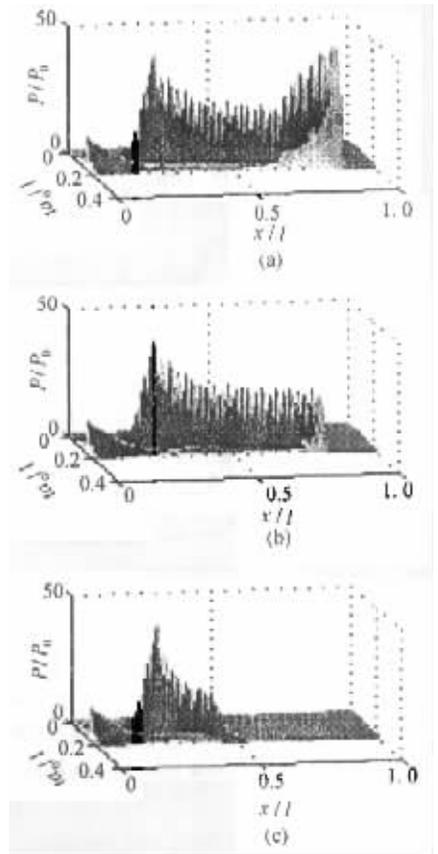


图5 颗粒抑爆时, 压力分布随时间的变化

Fig.5 Variations of pressure profile with time for explosion suppression

于稳定。图 5(b) 表明, 如果加大抑爆区长度, 但颗粒浓度仍保持小于临界值, 结果激波会以另一种较低速度在其间稳定传播, 即形成新的爆轰波。因此不能使之完全被抑制。图 5(c) 表明, 仅当颗粒浓度大于临界值时, 激波才能被完全抑制。衰减后的激波已不能点燃抑爆区以外的可燃混合物, 因此也不能重新成长。显然实验结果与计算结果所得到的结论是一致的。

4 结 论

实验所用的水平燃烧管由三部分组成: 第一部分用于火焰加速和激波成长; 第二部分装有喷粉装置, 可适时在管内形成均匀颗粒悬浮流, 用于抑制激波; 第三部分用于考察抑爆后激波的发展趋势。实验通过火焰探头和压力传感器采集关于管内火焰和激波传播的信息以描述颗粒抑爆效果。结果表明, 这一实验系统用来研究颗粒抑爆问题十分有效的。

对该现象进行数值模拟时, 笔者采用的数值方法包括分裂格式, 全耦合 TVD 格式和 Lax-Wendroff-Rubin 格式, 它有效地处理了方程的刚性, 激波化学反应和两项流之间的相互作用与耦合等问题, 较为成功地模拟了颗粒抑爆现象。

实验结果和计算结果都表明, 仅当颗粒浓度大于某值时才能有效抑制反应激波, 否则, 在穿越抑爆区后激波会重新成长, 或在抑爆区内形成另一种速度较低的两相爆轰波。

参考文献:

- [1] LEBECKI K, CYBULSKI K, DYDUCH Z, et al. Large scale grain dust explosions-research in poland. *Shock Waves* (1995) 5:109-114.
- [2] FROLOV S M, GELFAND B E. Shock waves attenuation in gas-particles suspensions. *Physics of Combustion and Explosion*. 1991 (1):130-136.
- [3] 陈志华, 范宝春, 刘庆明, 等. 大型管中两相爆炸现象的实验研究. *流体力学实验与测量*. 1998, 12(1):44-49.
- [4] ROGER R C, SCHEXNAAYDER C J. Chemical kinetic analysis of hydrogen-air ignition and reaction times. NASA TP-1856, 1981.
- [5] GORDON S, MCBRIDE B J. Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions, rocket performance, incident and reflected shocks, and Chapman-Jouguet Detonations. NASA-Sp-273, 1971.
- [6] CAMBIER J L, ADELMAN H G, MENEES G P. Numerical simulations of oblique detonations in supersonic combustion chambers. *J. Propulsion* 1989, 2(3):482-491.
- [7] RUBIN E L, BURSTEIN S. Difference methods for the inviscid and viscous equations of a compressible gas. *J. Comput. Phys* 1967, 2(2):178-196.