

可燃性气体爆炸极限和爆燃 转变成爆轰的研究

胡 栋** 龙属川* 吴传谦*
孙珠妹* 程新路** 王春彦**

(* 西南流体物理研究所)

(** 成都科技大学应用物理所)

摘要 我们成功地研制了长为6.6m、内径为100mm的柱形爆炸激波管。利用此激波管我们研究了氢气和氧气混合物的爆炸特性。研究表明：氢气和氧气混合物的可燃性极限为25% H₂至84% H₂(体积比)；混合物起爆的临界初始压力 p_0 近似与混合物的浓度无关。我们还用石英传感器技术测量了混合物从爆燃转变为爆轰的过程(DDT)，确定了爆炸速度、爆炸压力与混合物初始压力 p_0 的关系。爆燃波速度 D 和压力 p 快速增加，并且 $D > C_0$ (声速)时，爆燃波能转变成爆轰。爆燃波速度 D 和压力 p 衰减时，爆燃波将熄灭。氢氧混合物浓度接近上限时，爆燃向爆轰转变时的爆轰呈过激励状态，然后逐渐趋于正常爆轰。C-J理论可近似预估气体爆轰参数。

关键词 可燃性极限 爆燃 爆轰

1. 前言

目前，可燃气体爆轰、粉尘爆炸的研究已成为十分注目的一个问题。在很多国家由于军事、民用的需要对气相爆轰，粉尘爆炸进行了大量的研究。国内已有一些单位进行了一些研究工作。在我国工业生产中防爆问题日益突出，尤其是哈尔滨亚麻厂爆炸事故发生后对爆炸、爆炸过程、防爆措施的研究显得十分必要。我们研制成的爆炸激波管可以从事这些问题的测试和研究。

可燃气体的爆炸极限及临界引爆参数的测定在工业生产和民用中有着十分重要的意义。但是，以前发表的数据^[1]多数是用小的点火源进行测量(起爆能量多数小于100J)，并且所用的爆炸容器比较小(0.001~0.005 m³)。近几年来，有的研究人员认为^[1]，起爆能量为10000J、体积为1 m³的容器时，确定的参数较接近实际情况。为了能够提供接近实际的爆炸极限，我们采用大起爆能量、大容器的方法来测定爆炸极限，临界引爆参数——临界初始压力，爆炸波传播速度及压力。

2. 实验装置及测试技术

用我们研制的爆炸激波管进行的一系列试验表明，这种激波管能适应于各种易爆气体混合物的爆炸特性研究。激波管全长6.6m，它有13个传感器接口，4个光学窗口，可在一发实验中同时进行光、电测量。在爆炸波传播的不同距离处安装传感器，可观察爆燃转变为爆轰的过程以及传播速度的变化过程。

爆炸激波管和气体预混容器都装有三个高压阀门及压力真空表，以便监测爆炸激波管和预混容器内气体混合物的初始压力，确定它们的浓度。

爆炸激波管的工作原理：按照实验所需的浓度，以体积比把可燃气体及氧气(或空气)输入预混容器。在预混容器内混合 2~3 小时后，即可根据实验所需的压力把气体混合物输入已抽真空的(真空度约为 13.3 Pa)爆炸激波管内，用电容器短路放电的火花引爆。电容器的电容为 9.15 μF、标称电感 40 nH，额定电压 20 kV，储能约 1800 J^[2]。火花隙为柱形黄铜杆，间隔约为 7 mm。主放电回路和测试线路参见图 1、图 2。

我们采用图 2 所示的装置测量爆轰波或爆燃波阵面的压力、速度。当波阵面到达传感器 1 后，波阵面产生的压电信号经过电荷放大器输入示波器；同样，传感器 2 的压电信号也输入同一台示波器。这样就可以测得多个压力剖面 $p_n(t)$ ，其典型结果可参见图 3。传感器采用 YY 1-2 型石英压力计；并对石英压力计进行了动态标定，精度为 3%；标定试验是在较大型的激波管上进行的。石英压力计先密封在一个有螺纹的封头中，然后拧入爆炸激波管的传感

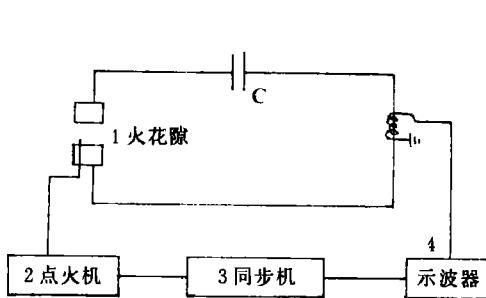


图 1 放电回路测试框图

Fig. 1 Schematic diagram of arrangement for discharge-circuit

- 1 - Spark-gap, 2 - Initiator,
- 3 - Simultaneous system,
- 4 - Oscillograph

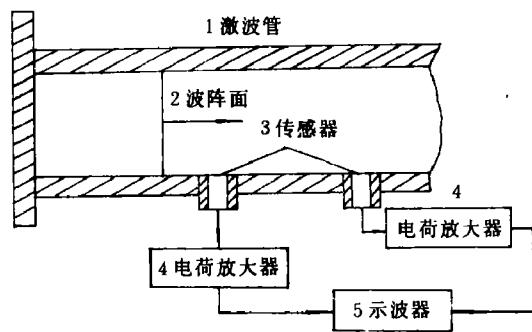


图 2 压力测量线路

Fig. 2 Schematic diagram of experimental arrangement for the pressure measurement

- 1 - Shock tube, 2 - Front of wave,
- 3 - gauge, 4 - Charge amplifier,
- 5 - Oscillograph

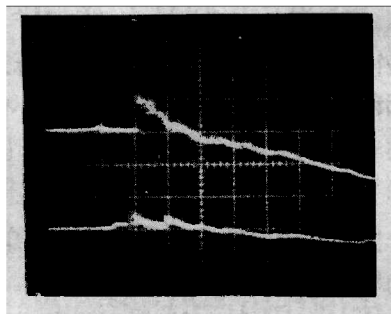


图 3 压力测量典型结果

氢氧混合物的初始压力 $p_0 = 0.026$ MPa

灵敏度：0.1 V/div，扫程：2ms/div

Fig. 3 Typical result of pressure profile

Initial pressure for the mixture of hydro-

gen and oxygen $p_0 = 0.026$ MPa

Vertical: 0.1V/div,

Time sweep: 2ms/div

器接口,石英片与爆炸激波管内壁相切。

图3列出了三个石英传感器测得的压力剖面。在上一条扫描线中,第一、第二个脉冲分别为波阵面已到达第一、第三个传感器,它们距离点火源分别为0.8 m、3.34 m。由于第二个脉冲的压力上升速率比第一个压力脉冲的上升速率快得多,故我们认为第二个压力脉冲已是爆轰波阵面;而第一个脉冲的压力上升速率 dp/dt 比较缓慢,因此到达第一个传感器的波阵面是爆燃波阵面,它的压力值和速度值远低于爆轰波阵面的压力、速度。在下一条扫描线中,第一个脉冲表示波阵面已到达第二个传感器,它距离点火源2.6 m,由于它的压力上升速率 dp/dt 比较缓慢,它也属于爆燃波。根据两个传感器之间的时间间隔便可确定波阵面的速度 \bar{v}

$$\bar{v} = \frac{L_n - L_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \quad (1)$$

式中 L_n 、 L_{n-1} 分别为第 n 、 $n-1$ 个传感器离点火源的距离, t_n 、 t_{n-1} 分别为波阵面到达第 n 、 $n-1$ 个传感器的时间。

3. 实验结果及分析

1. 爆燃转变为爆轰的研究(DDT)

可燃气体混合物的引爆是一个十分复杂的过程。目前,多数人认为,爆燃转变成爆轰的过程是按以下方式发展:在接近管端引爆源产生的火焰在气体中产生一个压缩波,在离管端的某一距离处逐渐变成冲击波,它使气体流动变成湍流,湍流的作用使得火焰燃烧面积增加,反应加剧,这样就逐渐加强了冲击波,当加强的冲击波足以使爆燃引爆时就形成了爆轰。在密闭容器内可燃性气体点火后只能形成爆燃波和爆轰波,故未形成爆轰前的过程都称为爆燃^[3]。

本文利用石英传感器研究了五种浓度(34%、25%、20%、16.3%、72% H_2)的氢氧混合物在不同初始压力下的爆燃转变成爆轰的过程。

图4列出了氢氧混合物浓度 ϕ 为34% H_2 、初始压力为0.035 MPa时由石英压力传感器测得的爆燃转变为爆轰的过程。它清楚地说明了随着传播距离的增加,其阵面压力不断增加,直至发展为爆轰。

图5、图6分别列出了五种浓度(72% H_2 、34% H_2 、25% H_2 、20% H_2 、16.3% H_2)的氢氧混合物在不同初始压力下的爆燃(爆轰)速度、压力。

由图5可见,氢氧混合物的浓度为72% H_2 、34% H_2 时,随着混合物初始压力的增加其爆燃速度不断增加;同一初始压力,不同距离处爆燃速度是单调增加,直至转变成爆轰,即 $d^2L/dt^2 > 0$ (式中 L 为波阵面离点火源的距离)。氢氧混合物的浓度为20% H_2 、16.3% H_2 时,随着混合物初始压力的增加其爆燃速度仅缓慢增大;同一初始压力不同距离处的爆燃速度开始稍有增加,然后迅速衰减($d^2L/dt^2 < 0$)并出现了极值点。这种爆燃波不能发展为爆轰波,它将逐渐衰减,直至熄灭。氢氧混合物浓度为25%时,随着混合物初始压力的增加其爆燃速度也相应地增加,但是增加到一定值后趋于恒定。同一初始压力,不同距离处的爆燃速度仍旧单调增加。虽然在我们现有装置的部分低初始压力的实验中还尚未观察到爆轰,但是爆燃波的速度已达到超音速;随着传播距离的增加,它必将发展成爆轰波^[4]。

图6的结果清楚地说明了氢氧混合物浓度为72% H_2 、34% H_2 时随着爆燃波阵面传播

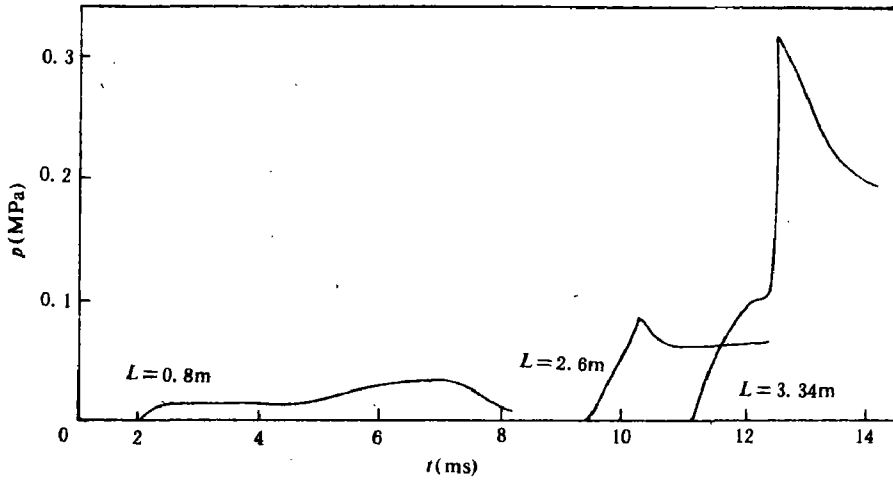


图4 氢氧混合物中的压力场

($\phi = 34\% \text{H}_2$, $p_0 = 0.035 \text{MPa}$)

Fig 4. Pressure field in the mixture of hydrogen and oxygen

($\phi = 34\% \text{H}_2$, $p_0 = 0.035 \text{MPa}$)

距离 L 的增加, 其阵面压力增大($dp/dL > 0$), 直至发展成爆轰波; 浓度为 $20\% \text{H}_2$ 、 $16.3\% \text{H}_2$ 时爆燃波阵面的压力逐渐减小($dp/dL < 0$), 它将导致爆燃波的熄灭。浓度为 $25\% \text{H}_2$ 时的爆燃波阵面压力仍是单调增加, 并逐渐发展为爆轰波。图6(a)的结果表明, 爆燃波转变成爆轰波时有一段过激励的过程, 然后逐渐衰减为稳态。

我们利用下列公式近似计算了氢氧混合物的爆轰参数^[5]

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{(K_1 + 1) \pm [(K_1 + 1)^2 - 4K_1 \frac{M_1}{M_0} \cdot \frac{T_0}{T_1}]^{\frac{1}{2}}}{2K_1 \frac{M_1}{M_0} \cdot \frac{T_0}{T_1}} \quad (2)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho_1} = \frac{(K_1 + 1) \pm [(K_1 + 1)^2 - 4K_1 \frac{M_1}{M_0} \cdot \frac{T_0}{T_1}]^{\frac{1}{2}}}{2K_1} \quad (3)$$

$$\frac{1}{K_1 - 1} \cdot \frac{p_1}{p_0} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_1} - \frac{1}{K_0 - 1} = \frac{1}{2} \left(\frac{p_1}{p_0} + 1 \right) \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_1} \right) + \frac{\rho_0}{p_0} Q \quad (4)$$

$$D = v_0 \left[\frac{p_1 - p_0}{v_0 - v_1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

p 、 ρ 、 T 、 D 、 v 分别为压力、密度、温度、爆速、比容、 Q 为爆热, K 为等熵指数、 M 为气体平均分子量; 下标1为爆轰波阵面的参数, 下标0为初始气体的参数。如果近似取 $K_1 = K_0 = K$, 则得到

$$\frac{v_0}{v_1} = \frac{K + 1}{K} \quad (6)$$

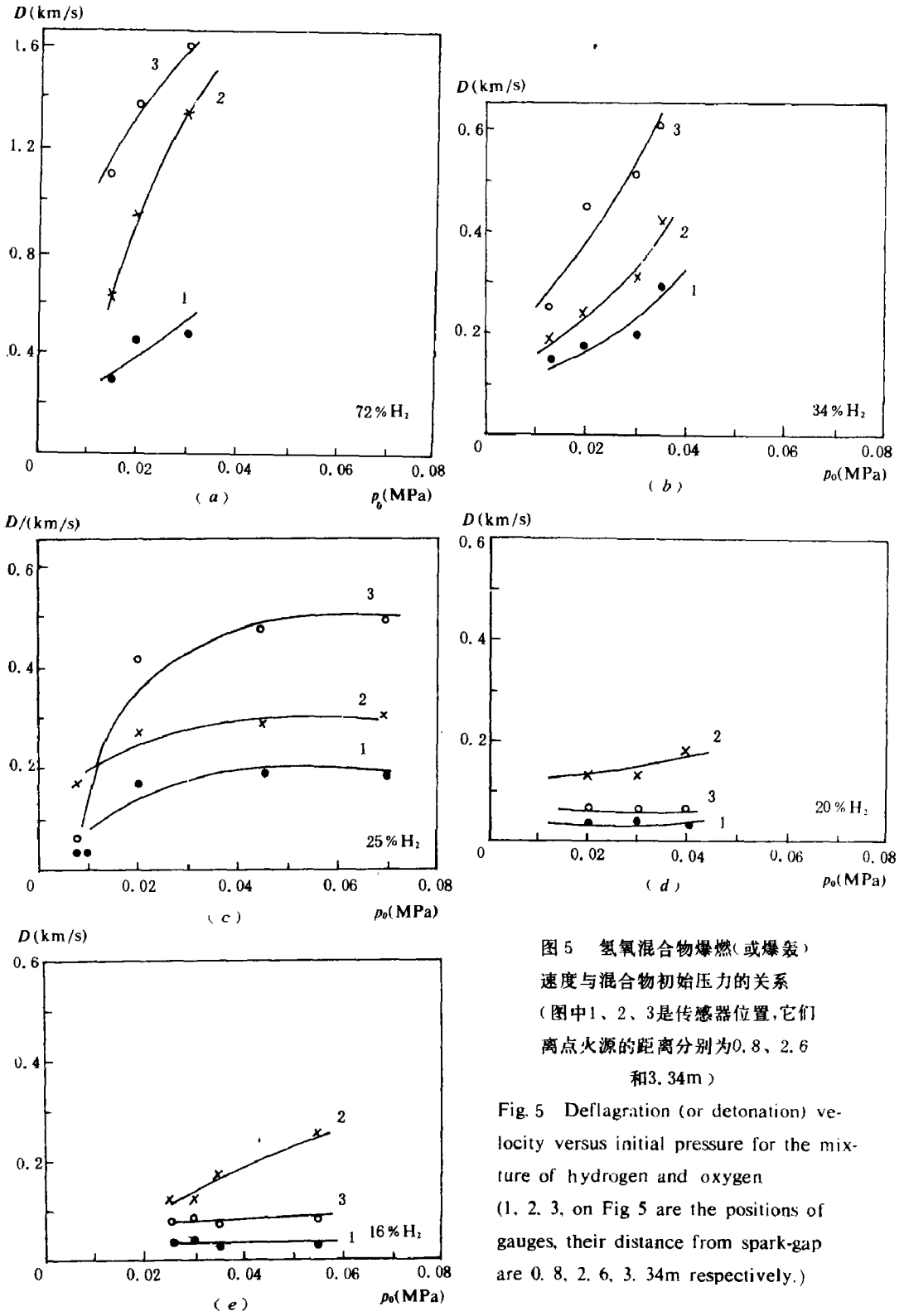


图 5 氢氧混合物爆燃(或爆轰)速度与混合物初始压力的关系 (图中1、2、3是传感器位置,它们离点火源的距离分别为0.8、2.6和3.34m)

Fig. 5 Deflagration (or detonation) velocity versus initial pressure for the mixture of hydrogen and oxygen (1, 2, 3, on Fig 5 are the positions of gauges, their distance from spark-gap are 0.8, 2.6, 3.34m respectively.)

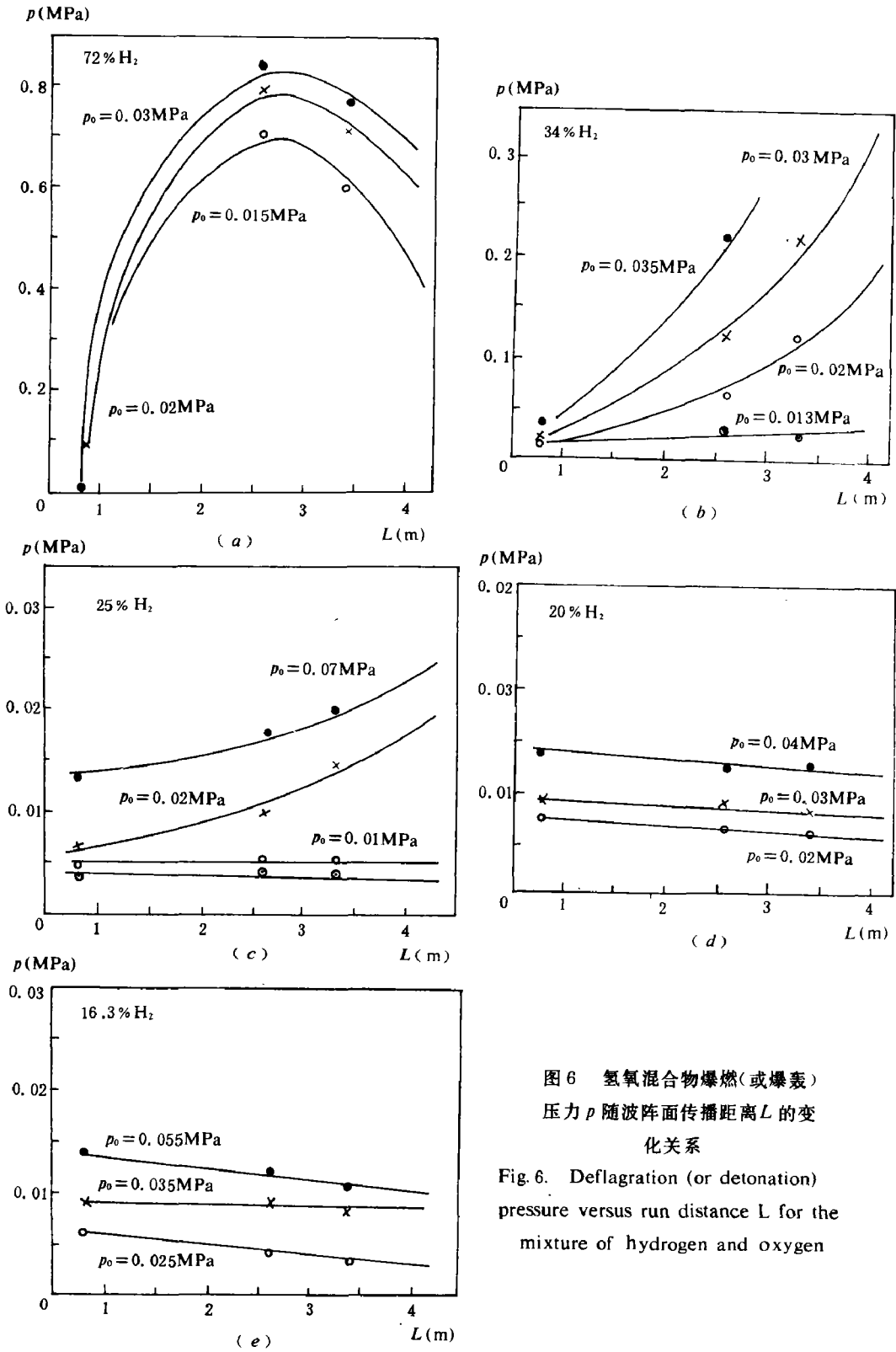


图6 氢氧混合物爆燃(或爆轰)压力 p 随波阵面传播距离 L 的变化关系

Fig. 6. Deflagration (or detonation) pressure versus run distance L for the mixture of hydrogen and oxygen

$$D = v_0 \left[\frac{p_1 - p_0}{v_0 - v_1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$p_1 = \frac{3}{K+1} \rho_0 D^2 \quad (8)$$

$$T_1 = \frac{M_1}{R} \cdot \frac{KD^2}{(K+1)^2} \quad (9)$$

K 值近似取 1.3。

计算结果和实验值同时绘于图 7。比较后说明, 计算值和实验值近似相符。它也说明了利用上述公式可以近似估算气体爆轰波参数, 为工程使用提供了一个较简便的工具。

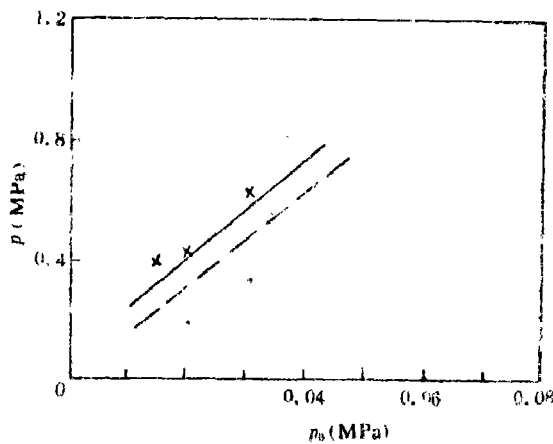


图 7 氢氧混合物爆轰压力的
计算结果与实测值比较
测量值: × 72% H₂, • 34% H₂
计算值: - - - 72% H₂, ——— 34% H₂
Fig 7. Comparison of calculated and
measured detonation pressure for the
mixture of hydrogen and oxygen
Measured: × 72% H₂, • 34% H₂
Calculated: - - - 72% H₂, ——— 34% H₂

2 爆炸极限的确定

利用上述石英传感器测压技术可明显地区别混合物究竟是发生了燃烧还是转变成爆轰; 利用烟膜技术测量气体爆轰后所形成的胞格便能直接确定爆轰是否形成。图 8 列出了我们的实验结果, 它清楚地显示了爆轰波阵面的结构。当爆燃波的速度为超音速时我们也认为这种爆燃波能够增长到爆轰波。因为爆燃波的速度接近声速时下列化学反应形成



OH 基形成, 并导致整个化学反应急剧加速^[4]; 其次, 爆燃波的速度变成超音速后, 冲击阵面和燃烧阵面始终耦合在一起, 冲击阵面的增长速率是和燃烧阵面化学反应增长速率为同一个数量级, 这样化学反应的能量能够不断提供给冲击阵面, 以使冲击阵面能迅速增长到爆轰波^[4]。为了能够较精确地测量爆燃波的速度, 我们用聚偏氟乙烯压力传感器技术^[1]测量了间距为 10 mm 的平均爆燃波速度, 图 9 列出了其典型结果。

按照上述方法我们测定了氢氧混合物在不同初始压力下的可燃性极限。图 10 列出了可燃性极限与混合物初始压力 p_0 、浓度 ϕ (体积百分比) 的关系。我们共测定了十种浓度情况下氢氧混合物的点火情况, 它们的浓度分别为: 16%、20%、25%、34%、50%、66%、72%、82%、85%、90% H₂。研究表明: 浓度为 16%、20%、85%、90% H₂ 的氢氧混合物, 其初始压力从 0.01 MPa 直至 0.1 MPa 时, 它们只能产生燃烧, 不能形成爆轰。但是氢氧混合物的浓度为 34%、50%、66%、72%、25% H₂ 时, 改变初始压力都能使氢氧混合物引爆, 但是它们都存在一个临界初始压力 p_{0c} , 氢氧混合物的浓度接近化学当量计算浓度时 (体



图8 氢氧混合物的爆轰胞格结构

Fig 8. Cellular structure of detonation for the mixture of hydrogen and oxygen

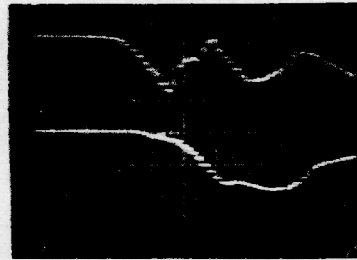


图9 波速测量典型结果

灵敏度：0.1V/div，扫程：10μs/div
Fig 9. Typical result of the wave velocity
Vertical: 0.1V/div.
Time sweep: 10 μs/div

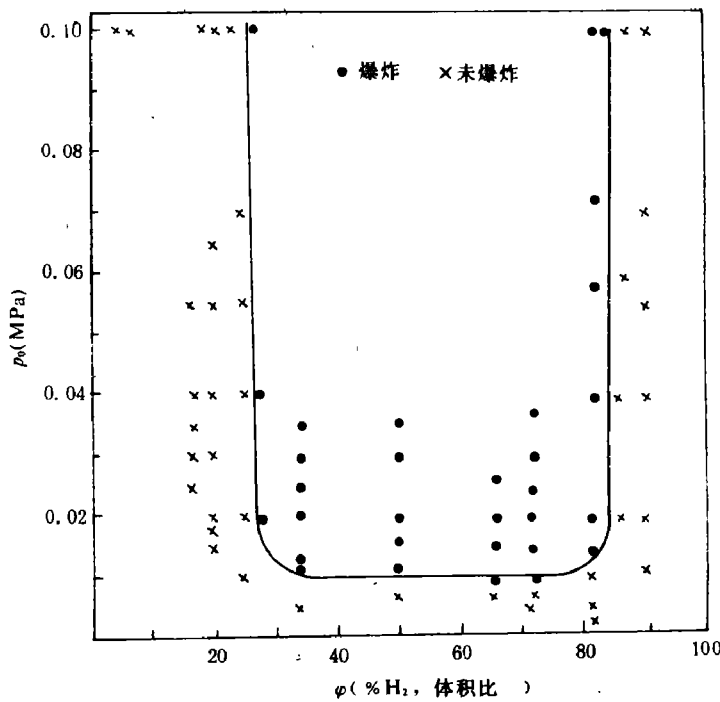


图10 氢氧混合物的可燃性极限与初始压力 p_0 、浓度 ϕ 的关系

Fig 10. Detonability limit versus initial pressure p_0 and concentration ϕ

• — explosion. × — non-explosion

积比约50%至80%)，临界初始压力 p_{0c} 近似为常数。但是接近爆炸极限下限时，临界初始压力 p_{0c} 稍有增加；在接近爆炸极限上限时，临界初始压力 p_{0c} 也稍有增加。

我们也确定了氢氧混合物初始压力为0.1 MPa、不同浓度时的可燃性极限和可燃性极限。氢氧混合物可燃性极限的体积百分比的范围从25%至84% H_2 ，在可燃性极限范围内氢氧混合物能被引爆，产生爆轰现象；氢氧混合物的可燃性极限的体积百分比的范围从4%至96%

H₂。在可燃性极限范围内氢氧混合必定能被引燃；在可爆性极限内爆燃即能转变为爆轰。

4. 结论

本文利用柱形激波管研究了不同浓度、不同初始压力的氢氧混合物由爆燃向爆轰的转变过程，其结果说明：

(1) 可爆性气体混合物的可爆性极限与混合物的初始压力 p_0 ($p_0 \leq 0.1$ MPa) 基本上无关。在浓度 ϕ 及混合物初始压力 p_0 的坐标系中，可爆性极限近似呈“L”形。氢氧混合物的可爆性极限为 25% 至 84% H₂。

(2) 可爆性气体混合物产生爆炸存在一个临界初始压力 p_{0c} ，小于此压力的混合物不能产生爆炸。临界初始压力 p_{0c} 近似与混合物的初始浓度无关，氢氧混合物的临界初始压力 $p_{0c} = 0.01$ MPa。

(3) 氢氧混合物浓度接近爆炸上限时，爆燃向爆轰转变时初始形成的爆轰呈过激励状态，然后逐渐衰减为正常爆轰。

(4) 用 C-J 理论可近似估算爆轰波阵面的参数。

本文工作是在经福谦教授、苟清泉教授指导下完成，在工作中得到金孝刚、程菊鑫、王永国副教授的帮助，在此表示感谢！

参 考 文 献

- [1] 弗·巴尔特克纳西特，爆炸过程和防护措施，化学出版社，(1985)。
- [2] 欧阳登焕等，起爆网络的电容器组能源和传输线路的设计安装，私人通信，(1978)。
- [3] Lee. J. H. 来成都科技大学讲学（气体爆轰等）讲义，(1986)。
- [4] Lee. J. H. et al. *Combustion and Flame*, 56 (1) (1986), 227.
- [5] 北京工业学院一系编，爆炸物理基础，北京工业学院出版社，(1974), 82.
- [6] Belles. F. E. et al. *Am. Rocket Soc. J.*, 32 (1962), 215.
- [7] 孙珠妹、胡 栋，高压物理学报，3 (1) (1989), 78.

STUDIES OF THE DETONABILITY LIMIT AND THE TRANSITION FROM DEFLAGRATION TO DETONATION FOR DETONABILITY GASES

Hu Dong**, Long Shuchuan*, Wu Chuanqian*,
Sun Zhumei*, Cheng Xinlu**, Wang Chunyan**

(* Southwest Institute of Fluid Physics)

(** Applied Physics Institute, Chengdu University of Science and Technology)

ABSTRACT The cylindrical explosion shock tube (6.6 m long, 100 mm diameter) has been developed. The explosion behaviours of the mixture of hydrogen and oxygen are studied with the shock tube. The results show that the detonability limit for the mixture of hydro-

gen and oxygen is in the range from 25% H₂ to 84% H₂ (per-cent of volume); critical initial pressure p_{oc} of initiated mixture is approximately independent of the concentration for the mixture. The transition from deflagration to detonation is measured by means of quartz gauge technique; the relation of explosion velocity and explosion pressure with initial pressure p_0 for the mixture are determined. when the deflagration velocity D (or pressure p) rapidly increases and $D > c_0$ (sound Speed), it is possible to transit from the deflagration to detonation. When the deflagration velocity (or pressure) decreases, the deflagration will fail. As the concentration of the mixture of hydrogen and oxygen approaches to the dense limit, at first the transited detonation is an overdriven detonation, then it gradually fades to normal detonation. The parameters of gas detonation may be approximately predicted by the C-J theory.

KEY WORDS detonability limit, deflagration, detonation.