

文章编号: 1001-1455(2002)04-0373-04

几种燃料云雾爆轰临界起爆能的研究*

宋述忠, 彭金华, 陈网桦, 解立峰

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 采用自行设计的立式激波管, 测定了几种燃料与空气混合物不同当量比时的临界起爆能, 并且从理论上将激波管内得到的起爆能数据外推到无约束条件下的临界起爆能, 理论结果与实验值吻合较好。这一结果对预防意外爆炸事故的发生以及研究其在军事上的应用具有重要的参考价值。

关键词: 激波管; 临界起爆能; 爆炸长度; 爆轰

中图分类号: O381 文献标识码: A

1 引言

临界起爆能参数直接反映了被起爆系统的感度。例如, 一些高挥发性燃料与纯氧的混合物, 其临界起爆能为焦量级, 用电火花方式就可直接起爆; 但一些低挥发性的燃料与空气混合物, 其临界起爆能为兆焦量级, 这样的混合物比较钝感。本文中, 采用自行设计的立式激波管, 测定了几种燃料与空气混合物不同当量比时的临界起爆能, 并且从理论上将激波管内得到的起爆能数据外推到无约束条件下的临界起爆能, 这一结果具有重大的实际意义。

2 实验装置与条件

立式激波管实验装置如图 1 所示。主要由以下三部分组成: (1) 激波管主体: 管体总长 5.2m, 内径 200mm。在主管两侧交错地布置了喷雾接管, 以形成均匀的云雾体系。管体两侧对称地分布了压力传感器, 以测量云雾的爆轰参数。(2) 进气、喷雾系统: 喷雾系统由压缩气瓶、气室、电磁阀、单向阀、喷雾室和喷头组成。(3) 测试系统: 由 Kistler 石英压电传感器(211B 型)、电荷放大器(5358 型)、瞬态波存仪(JV 5201 型)、微机及控制系统组成。

实验条件: 爆源采用 8 号雷管引爆不同药量的黑索今药柱, 实验初始压力为 0.1MPa, 温度为 298K。在激波管实验中, 起爆药柱可看作点爆源, 爆炸所产生的为球面波, 但由于所用管径与实验中的燃料胞格尺寸之比远大于 10, 因而可近似将此看作平面波^[1]。

3 不同燃料云雾爆轰临界起爆能

在自行设计的立式激波管内分别实验测定了环氧丙烷(PO)、硝酸异丙酯(IPN)、癸烷(DE)云雾爆轰的临界起爆能, 结果列于表 1 中。其中 T_b 为燃料的沸点, ϕ 为当量比, E_{cr} 为临界起爆能。

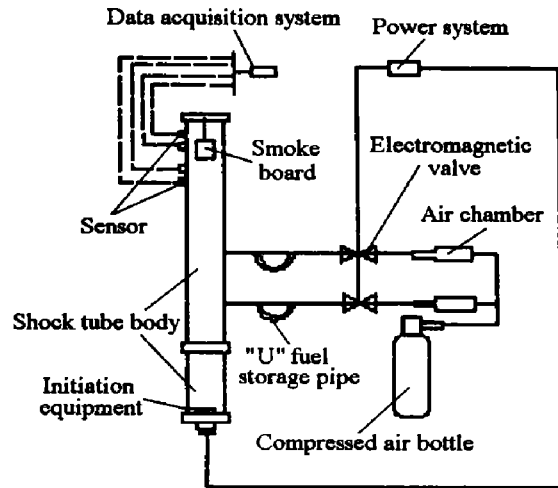


图 1 激波管示意图

Fig. 1 The schematic diagram of shock tube

* 收稿日期: 2001-09-07; 修回日期: 2001-10-15

作者简介: 宋述忠(1971—), 男, 硕士。

表 1 不同燃料云雾爆轰的临界起爆能

Table 1 Critical initiation energy of different fuel-air mixture

混合物	$T_b / (^\circ\text{C})$	ϕ	$E_{cr} / (\text{MJ}/\text{m}^2)$
PO+空气	34.10	1.05	0.190
IPN+空气	101.5	1.16	0.468
DE+空气	105.6	1.12	2.120

研究表明,在激波管中可以起爆低挥发性燃料(癸烷)与空气的混合物。起爆过程包括燃料液滴在激波阵面后的迅速破碎和蒸发以及随后的气相化学反应诱导期,因而包括以上诸多物理和化学过程的总诱导期比气相爆轰的诱导期长很多^[2]。从直接起爆的临界条件考虑,存在一个总诱导期的临界值,超过这一临界时间,化学反应区中释放的能量就不能支持前导的激波。同时,在这一诱导期内,还必须维持燃料浓度高于最低的有效化学当量。在球面传播的情况下,由爆源所产生的爆轰波衰减得很快,比平面激波管中的衰减要快得多。因此,球面发散的爆轰波的起爆要困难得多。相比而言,IPN 的挥发性远小于 PO,而和 DE 差不多,但是其临界起爆能却与 PO 的接近,这主要是由于 IPN 分子中硝基的存在,使其敏感性增强。

4 同一燃料在不同条件下的临界起爆能

对于同一种燃料,当它以不同当量比与空气混合形成云雾时,直接起爆所需的能量也会不同。实验测定了此三种燃料不同当量比时的临界起爆能,结果见表 2。

从表 2 中可以看出,IPN 燃料云雾爆轰的临界起爆能在本文的当量比范围内变化不大,且临界起爆能随当量比的变化呈“U”曲线关系;PO 的临界起爆能很低,这说明 PO 燃料云雾的爆炸感度高,因为 PO 挥发性强,当形成细小液滴的云雾时,云雾中就存在较浓的 PO 蒸汽,化学反应由气相控制。

5 有效起爆能

在激波管中用起爆源的总能量来表示临界起爆能是不够准确的,因为只有一部分起爆源能量传递给被起爆的可燃混合物,因此用有效起爆能来描述被起爆混合物的敏感程度更为恰当。

Borisov 等^[3]根据激波管中实测空气爆炸波传播速度,用点源爆炸理论推算爆源能量,提出了计算有效起爆能公式

$$E_{\text{eff}} = \rho_0 S u^2 \left[\sqrt{L_1} + \sqrt{L_2} + \frac{\sqrt{L_1 L_2}}{\sqrt{L_1} + \sqrt{L_2}} \right]^2$$

式中: ρ_0 是初始气体密度, S 是激波管截面积, L_1 、 L_2 分别为两个传感器与起爆装药的距离, u 是两个传感器之间的平均激波速度。

实验测量的激波管中空气爆炸波传播速度、有效起爆能等数据列在表 3 中。表中 m 为爆源装药量, E 为起爆药总能量, 1D 表示一个 8[#]电雷管, $L_1=2.8\text{m}$, $L_2=3.3\text{m}$ 。

由表 1 可知,PO、IPN 的起爆相对来说比较容易,这是因为 PO 在常温下的饱和蒸汽压高,因此在激波阵面到达以前,系统中就有相当高浓度的燃料蒸汽存在,当燃料蒸汽浓度处于爆轰范围内时,整个过程就由气相反应控制。对比三种燃料起爆的实验结果,可以看出燃料挥发性所起的重要作用,因为爆轰波的传播要求在起爆之前系统中就有足够浓度的燃料蒸汽存在。

表 2 不同当量比 PO、IPN、DE 与空气混合物的临界起爆能

Table 2 Critical initiation energy with different equivalence ratio of PO-air, IPN-air, and DE-air mixtures

PO+空气		IPN+空气		DE+空气	
ϕ	$E_{cr} / (\text{MJ}/\text{m}^2)$	ϕ	$E_{cr} / (\text{MJ}/\text{m}^2)$	ϕ	$E_{cr} / (\text{MJ}/\text{m}^2)$
1.05	0.189	0.70	0.561	1.12	2.12
1.15	0.189	0.82	0.524	1.25	2.24
1.38	0.189	0.94	0.468	1.88	2.42
1.47	0.374	1.16	0.468	2.47	2.81
1.54	0.374	1.40	0.598	3.61	3.17
1.61	0.744				

表3 激波管中空气爆炸波传播速度和有效起爆能

Table 3 Detonation velocity of air blast wave and efficient critical initiation energy in shock tube

m/g	$u/(m/s)$	$E/(MJ/m^2)$	$E_{eff}/(MJ/m^2)$	E_{eff}/E
1D	424	0.189	0.140	0.742
1D+1g RDX	525	0.374	0.215	0.574
1D+1.5g RDX	584	0.467	0.266	0.570
1D+2g RDX	625	0.559	0.305	0.545
1D+4g RDX	743	0.929	0.431	0.464
1D+6g RDX	860	1.299	0.577	0.444

实验结果, 激波管不仅应当足够长, 其直径也必须足够大, 以使管壁效应对起爆能的影响可忽略。一般来讲, 管径应大于 10 倍被试混合物的胞格尺寸。一旦有了这种关系, 就可利用这一推算关系将小型、经济的室内实验结果推广到大型、耗资昂贵的野外实验, 从而节省大量的人力、物力和财力。

根据 Zeldovich 提出的一个重要基本概念, 即在平面、柱面、球面情况下, 临界起爆能分别与该系统的化学反应时间(或化学反应区长度)的 1、2、3 次方成正比, 为了比较不同几何条件下的临界起爆能, Ramamurthi^[4] 提出了与爆源能量相联系的爆炸长度

$$R_0 = (E_{eff}/p_0)^{\frac{1}{\alpha+1}}$$

式中: p_0 是气体混合物的初压; $\alpha=0, 1, 2$ 分别对应于平面、柱面、球面起爆。

J. H. Lee^[5] 发现, 同一种混合物无论平面起爆、柱面起爆或无约束起爆, 其爆炸长度值相差不大。据此, 在不同条件下同一种混合物的爆炸长度应相等, 即

$$\frac{E_s}{E_c} = \frac{E_c}{E_p} = R_0, \quad E_s = R_0^2 E_p$$

式中: E_s 、 E_c 、 E_p 分别表示无约束、柱面或平面起爆时的临界起爆能。

在激波管实验中, 起爆药柱的爆炸可看作点爆炸, 产生的波为球面波, 但由于管的直径远小于长度, 因而可近似将此波看作平面波。根据激波管中的数据可算出 R_0 , 由此可推导出野外试验的起爆能数据, 见表 4。

为验证无约束条件下临界起爆能计算值的准确性, 对丁烷-空气混合物进行了野外试验。采用 PVC 塑料薄膜袋, 直径 0.4m, 长 4~8m, 两端封闭, 冲入丁烷-空气混合物后, 一端引爆。丁烷-空气混合物当量比为 0.90 时, 测出的临界起爆能为 3.58MJ; 当量比为 1.19 时, 测出的临界起爆能为 2.81MJ^[6]。此试验结果与上述计算结果吻合较好, 由此可见该推算方法是可行的。

6 无约束实验临界起爆能

将激波管内得到的临界起爆能数据外推到无约束条件下的爆轰临界起爆能, 不仅有理论价值, 而且有重大实际意义。在激波管实验中可以在很大的距离内观测爆轰波的传播, 从而比较可靠地确定在被起爆的混合物中是否建立了自维持爆轰。相反, 在野外爆炸场实验中要在较大距离内观测爆轰波, 是很难实现的。当然, 为了得到正确的试

表4 燃料空气混合物爆轰时的有效临界起爆能

Table 4 Critical initiation energy of fuel-air mixture

燃料	ϕ	$E_p/(MJ/m^2)$	E_s/MJ
PO+空气	1.15	0.140	0.26
	1.47	0.215	0.97
	1.61	0.367	4.81
DE+空气	1.12	0.785	47.1
	1.25	0.831	55.9
	1.88	0.902	71.5
IPN+空气	0.70	0.305	2.76
	0.94	0.266	1.83
	1.40	0.318	3.13
丁烷+空气	0.90	0.35	4.03
	1.19	0.31	2.79

7 结 论

通过激波管试验,研究了儿种常温下为液态的燃料的临界起爆能,可看出儿种燃料在同当量比条件下,PO-空气混合物的起爆能最小,这主要是由于 PO 常温下具有较高的蒸汽压所致;同一种燃料的空气混合物的浓度不同,临界起爆能不同;根据激波管试验结果计算出的无约束条件下的起爆能,对燃料的实际应用具有很好的参考价值。

参考文献:

- [1] Papavassiliou J. Measurements of Cellular Structure in Spray Detonation[A]. 13th Symposium on the Dynamics of Explosions and Reactive System[C]. 1991: 421-425.
- [2] Axesson E L, Brezinsky K, Westbrook C K. Chemical Kinetic Modeling of the Oxidation of Large n-octane Fuel[A]. 21th Symposium (International) on Combustion[C]. 1986: 783-799.
- [3] 范宝春. 两相系统的燃烧、爆炸和爆轰[M]. 北京:国防工业出版社,1998: 146-148.
FAN Bao-chun. Flame, Explosion and Detonation of Two-phase System[M]. Beijing: National Defense Publication Company, 1998: 146-148.
- [4] 范宝春,汤明钧. 气云爆炸模型[J]. 力学学报,1992,24(5):34-38.
FAN Bao-chun, TANG Ming-jun. Model of Fuel-air Explosion[J]. Mechanics Transaction, 1992, 24(5): 34-38.
- [5] Lee J H. The Link between Cell Size, Critical Tube Diameter, Initiation Energy and Detonability Limits[J]. Combustion and Flame, 1976: 27-33.
- [6] LIU Rong-hai. The Detonation Risk Evaluation of some Hydrocarbon Fuel-air Mixtures[A]. 23th International Pyrotechnics Seminar[C]. 1997: 479-482.

Study on Critical Initiation Energy of Several Fuel-air Mixture

SONG Shu-zhong, PENG Jin-hua, CHEN Wang-hua, XIE Li-feng

(*Chemical School, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, Jiangsu, China*)

Abstract: In this paper, the experiments were conducted in a vertical shock tube, critical initiation energy of some fuel and air mixture was measured. Meanwhile these results were used to calculate theoretical critical initiation energy of fuel-air mixture in unconfined conditions, and calculated results agree well with experimental ones. The investigation results maybe of directive purpose on accidental-explosion prevention, and on application researchs in military.

Key words: shock tube; critical initiation energy; explosion length; detonation