

文章编号: 1001-1455(2013)01-0085-06

高电压点火有效能量的测量及相关问题*

张 博^{1,2}, 白春华²

(1. 华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237;

2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 00081)

摘要: 建立了测量高电压点火产生的爆炸波参数装置, 利用 PCB 压力传感器测定了在空气中高压电火花产生的爆炸波压力及其到达时间。改变点火能量和测试距离, 得到了爆炸波的变化趋势和传播规律, 并探讨了爆炸波各参数的标度尺寸。结果表明, 电火花产生的爆炸波符合 Hopkinson-Sachs 爆炸相似律。把 1/4 周期放电能量与数值模拟结果进行比较, 得知初始 1/4 周期放电能量(点火能量)与爆炸波能量基本吻合; 因此, 1/4 周期放电能量可被视为作用于直接起爆引起爆轰的有效能量。进一步探讨了高电压点火各能量的分布; 结果表明, 储存于电容的总能量 $1/2CU^2$ 中约 91% 消耗于能量损失和欧姆损耗, 初始 1/4 周期放电能量仅约占 2%, 其余的点火能量只起到加热混合物的作用。

关键词: 爆炸力学; 爆炸波能量; PCB 压力传感器; 高压电火花; Hopkinson-Sachs 爆炸相似律; 1/4 周期放电能量

中图分类号: O381

国标学科代码: 1303510

文献标志码: A

高压电火花作为点火源被广泛应用于研究爆轰机理的实验中, 由于其在瞬间产生强爆炸波, 可被视为理想的瞬间点爆炸源, 因而可作为直接起爆引起爆轰的一种起爆源。然而关于高压电火花的特性, 如产生的爆炸波传播规律、点火能量是否完全作用于爆轰的形成等一系列问题, 目前了解甚少。

在计算直接起爆点火能量时, 早期使用储存于电容的总能量 $E_{\text{tot}} = 1/2 CU^2$ 作为起爆能量, 由于在放电过程中存在欧姆损耗, 所以用该方法得出的临界能量误差较大。R. Knystautas 等^[1] 发现真正沉积于混合物中的能量为电流函数的平方 $i^2(t)$ 与电火花电阻 R_s 乘积的积分, 并通过理论分析得出作用于直接起爆的有效能量是电流最初的 1/4 周期放电能量, 但缺少必要的实验数据支持。

本文中拟首先建立测量高电压点火产生的爆炸波的参数的装置, 确定电火花放电能量的计算方法, 测定在空气中高压电火花产生的爆炸波参数(点火能量、超压及其到达时间), 通过改变点火能量和测试距离, 得到电火花产生的爆炸波的变化趋势和传播规律, 并研究爆炸波各参数的标度尺寸; 其次, 把 1/4 周期放电能量与点爆炸的数值模拟结果进行对比, 得出 1/4 周期放电能量与爆炸波能量的关系; 最后, 对高压电点火各能量的分布进行研究, 以期采用高压电火花作为起爆源的直接起爆研究中有有效点火能量的计算提供依据。

1 实验装置和测试方法

1.1 高电压点火系统

高电压点火系统^[2] 主要包括高压电源(最高可达 30 kV)、电容、间隙开关、触发开关(TM-11A)、电流转化系统和电火花点火装置。电路中的电流信号通过罗哥夫斯基(Rogowski)线圈转化为示波器中的电压信号, 并通过对信号的分析得出电火花放电能量。在电极的末端是间隙为 3.5 mm 的火花塞, 电路触发后通过火花塞产生放电能量; 放电能量的大小通过控制放电电压的高低和改变电容大小来调节; 放电的初始条件为: $p_0 = 101.3 \text{ kPa}$, $T = 293 \text{ K}$ 。

* 收稿日期: 2011-10-31; 修回日期: 2012-12-11

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2012M520852)

作者简介: 张 博(1983—), 男, 博士, 讲师。

1.2 电火花放电能量的计算方法

R. Knystautas 等^[1]研究得知,如果采用储存于电容的总电能($E_{\text{tot}} = 1/2 CU^2$)作为直接起爆的点火能量,其与真实的临界能量有数量级的差异,并提出点火能量 $E_s = \int_0^{\infty} i^2 R_s dt$;而对于衰减的震荡放电电流,电流表达式为:

$$i(t) = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega t) \quad (1)$$

1.3 爆炸波测量装置

用图 1 所示的装置测量电火花起爆产生的爆炸波在不同距离处的反射压力及其到达时间,并通过冲击波基本关系式把反射压力换算成爆炸波的入射压力。放电电极被固定于刚性半球形的支架上,电极的上方是水平支架,型号为 PCB401A22 的 PCB 压力传感器(通过实验标定,该传感器的灵敏度为 $3.0965 \mu\text{V}/\text{Pa}$,滞后约 $2 \mu\text{s}$)固定于支架的中心。支架的两侧是垂直钢板,传感器与电极顶部之间的距离可通过改变水平板的上下距离来调节。

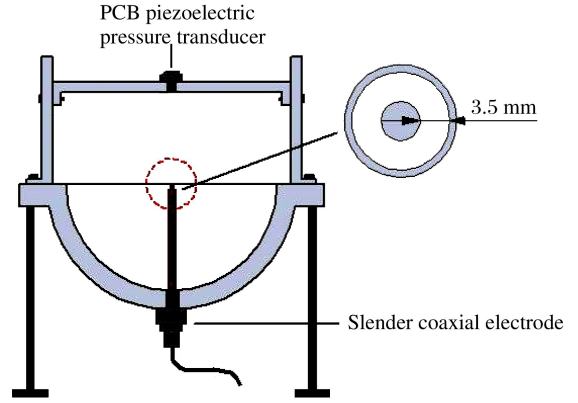


图 1 爆炸波测量装置

Fig. 1 The setup for measuring the blast wave

2 实验结果与讨论

2.1 高压电点火产生的爆炸波的标度尺寸

高电压击穿空气隙时,等离子体释能加热临近气体,使其快速膨胀,形成气体冲击波,也即爆炸波。通过传感器接收不同能量的电火花在各不同距离处的爆炸波压力及其到达时间,并通过示波器得到波形图。图 2 是典型的爆炸波波形图,电火花与传感器之间的距离为 5 cm,点火电压为 18 kV。通过波形峰值的电压和传感器的灵敏度得到超压峰值,同时爆炸波的到达时间可由波形图横坐标得知。

若爆炸波的传播距离远大于爆炸物的尺寸,并且爆炸波超压远大于初始压力,即可认为由点爆炸源瞬间产生强爆炸波。强爆炸波的爆炸半径 r_{sh} 只依赖于时间 t 、初始密度 ρ_0 ,和爆炸波能量 E_{sh} ,即:

$$r_{\text{sh}}(t) = f(t, \rho_0, E_{\text{sh}}), \text{ 或 } F(r_{\text{sh}}, t, \rho_0, E_{\text{sh}}) = 0$$

在该问题中有 4 个参数和 3 个基本量纲 M、L 和 T(质量、长度和时间),因此只有一个量纲一组,并选择 r_{sh} 、 E_{sh} 和 t 作为特征参数,由 E. Buckingham 的 π 理论^[3-4]可得:

$$\pi = r_{\text{sh}}^a E_{\text{sh}}^b t^c \rho_0 \quad (2)$$

由于各主定量的量纲分别为: $\dim \rho_0 = \text{M}/\text{L}^3$, $\dim E_{\text{sh}} = \text{ML}^2/\text{T}^2$, $\dim r_{\text{sh}} = \text{L}$, $\dim t = \text{T}$,因此,

$$\dim \pi = \text{L}^a \left(\frac{\text{ML}^2}{\text{T}^2} \right)^b \text{T}^c \frac{\text{M}}{\text{L}^3} = 1 \quad (3)$$

解得 $a=5, b=-1, c=-2$,则

$$\pi = \frac{r_{\text{sh}}^5 \rho_0}{E_{\text{sh}} t^2} \quad (4)$$

可得出爆炸波能量与波传播距离和传播时间之间的关系为:

$$r_{\text{sh}} = A \left(\frac{E_{\text{sh}}}{\rho_0} \right)^{1/5} t^{2/5} \quad (5)$$

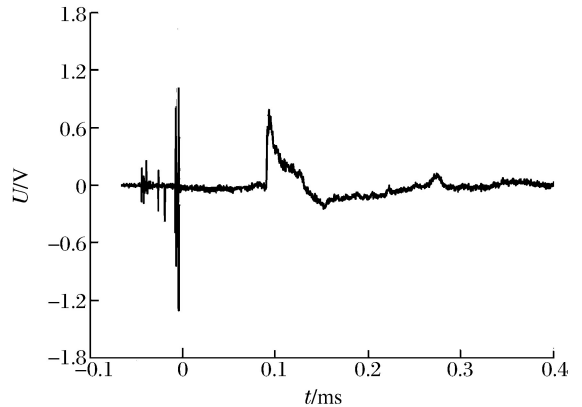


图 2 典型的爆炸波波形

Fig. 2 A typical blast wave trace

式中: A 是定常数, 需通过实验确定。由上式可得到爆炸波的传播速度

$$\dot{r}_{sh} = \frac{2A}{5} \left(\frac{E_{sh}}{\rho_0} \right)^{1/5} t^{-3/5} \quad (6)$$

对于强爆炸波, $p_{sh} = 2\rho_0 \dot{r}_{sh}^2 / (\gamma + 1)$, 由于 γ 为常数, 因此,

$$p_{sh} \sim \rho_0 \left(\frac{E_{sh}}{\rho_0} \right)^{2/5} t^{-6/5} \quad (7)$$

测得爆炸波压力 p_{sh} 、点火能量 $E_{1/4 \text{ cycle}}$ 以及爆炸波到达时间 t , 由图 3 可知, 点火能量的变化并没有改变 p_{sh} 与函数 $\rho_0 (E_{sh}/\rho_0)^{2/5} t^{-6/5}$ 的线性关系。

由式(5)可知, t 与 r_{sh} 之间的关系为:

$$t \sim \frac{r_{sh}^{5/2}}{(E_{sh}/\rho_0)^{1/2}} \quad (8)$$

把 t 代入式(8), 得:

$$p_{sh} \sim \frac{E_{sh}}{r_{sh}^3} \sim \left(\frac{E_{sh}^{1/3}}{r_{sh}} \right)^3 \sim \left(\frac{1}{r_{sh}/E_{sh}^{1/3}} \right)^3 \quad (9)$$

B. Hopkinson^[5]最早证明了对于同种凝聚炸药和相同初始压力, 如果比例距离 $r_{sh}/m^{1/3}$ (m 为炸药质量) 相等, 则产生的爆炸波压力也相当。随后 P. G. Sachs^[6]放宽了对初始压力的限制, 并提出比例尺寸 r_{sh}/r_0 (其中 r_0 是特征半径^[7], 并且 $r_0 = (E_{sh}/\rho_0)^{1/3}$, $\rho_0 = 101.3 \text{ kPa}$) 相同, 其产生的爆炸波压力也相同。因此, 爆炸波压力与爆炸长度之间的关系 ($p_{sh} \sim f(r_{sh}/r_0)$) 被称为 Hopkinson-Sachs 爆炸相似律。式(9)本质上就是 Hopkinson 爆炸相似律。图 4 给出了通过实验测定的爆炸波压力 p_{sh} 与传播距离 r_{sh} 以及点火能量 $E_{1/4 \text{ cycle}}$ 的关系, 实验结果与式(9)基本相符。

如果式(9)两边都除以初始压力 p_0 , 则可得到:

$$\frac{p_{sh}}{p_0} \sim \frac{E_{sh}}{p_0} \frac{1}{r_{sh}^3} \sim \left(\frac{r_0}{r_{sh}} \right)^3 \sim \frac{1}{(r_{sh}/r_0)^3} \quad (10)$$

图 5 是通过实验测定的爆炸波超压 p_{sh}/p_0 随距离标度 $(r_{sh}/r_0)^{-3}$ 的变化趋势, 实验结果与式(10)基本相符。而式(10)本质上就是基于特征半径 r_0 的 Sachs 标度定律。因此, 由以上分析可知, 电火花产生的爆炸波符合 Hopkinson-Sachs 爆炸相似律。

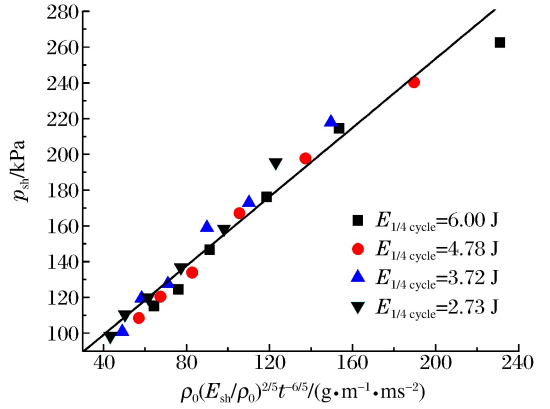


图 3 电火花产生的爆炸波的压力 p_{sh} 与 $\rho_0 (E_{sh}/\rho_0)^{2/5} t^{-6/5}$ 之间的关系

Fig. 3 p_s as a function of $\rho_0 (E_{sh}/\rho_0)^{2/5} t^{-6/5}$ for spark-produced blast wave

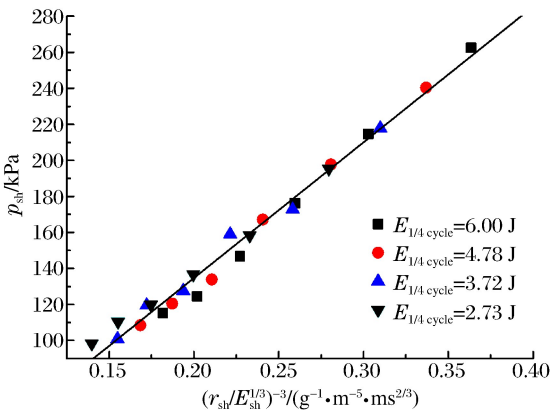


图 4 电火花产生的爆炸波压力 p_{sh} 与 $(r_{sh}/E_{sh}^{1/3})^{-3}$ 之间的关系

Fig. 4 p_{sh} as a function of $(r_{sh}/E_{sh}^{1/3})^{-3}$ for spark produced blast wave

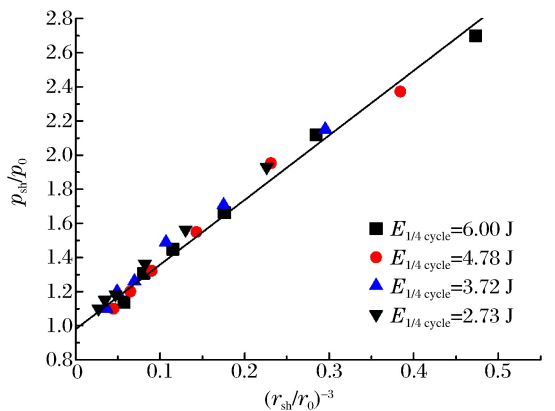


图 5 电火花产生的爆炸波超压 p_{sh}/p_0 与 $(r_{sh}/r_0)^{-3}$ 之间的关系

Fig. 5 p_{sh}/p_0 as a function of $(r_{sh}/r_0)^{-3}$ for spark produced blast wave

2.2 1/4 周期放电能量与爆炸波能量的关系

通过实验验证 1/4 周期的放电能量是否为用于直接起爆的有效能量,把 1/4 周期放电能量与点爆炸的数值模拟结果进行对比,通过实验验证电火花放电最初的 1/4 周期放电能量与爆炸波能量的关系。

通过数值计算得到理想爆炸波能量产生的压力趋势,爆炸波衰减的不稳定非线性动态解是以非黏性可压缩并且依赖于时间的一维欧拉方程为模型。质量、动量和能量的表达式分别为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial r} + \frac{2}{r}(\rho u) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial r} + \frac{2}{r}(\rho u^2) = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial u(\rho e + p)}{\partial r} + \frac{2}{r}[u(\rho e + p)] = 0 \quad (13)$$

式中: ρ 为密度, p 为压力, e 为比总能量,并且

$$e = \frac{p}{(\gamma - 1)\rho} + \frac{1}{2}u^2 \quad (14)$$

利用通过对冲击波波阵面的跟踪和网格计算的分段抛物线法得到的爆轰程序^[8]对上述方程进行求解。图 6 是通过上述方法得到的点源球面爆炸波马赫数 Ma_{sh} 与 r_{sh}/r_0 的关系曲线。

2.2.1 通过能量比较超压

特征半径 r_0 可由点火能量(即 1/4 周期的放电能量)直接计算得出,由于测试距离 r_{sh} 可直接测量,因此通过计算点火能量可得出爆炸波传播的马赫数 Ma_{sh} ,并通过冲击波基本关系式得出超压

$$\frac{p_{sh}}{p_0} = \frac{2\gamma Ma_{sh}^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1} \quad (15)$$

当点火能量 $E_{1/4 \text{ cycle}} = 6.00 \text{ J}$ 时,电火花产生的爆炸波的参数如表 1 所示。由表 1 可知,对于 $E_{1/4 \text{ cycle}} = 6.00 \text{ J}$,超压的实验值约为理论值的 85.32%。在不同的初始点火能量:6.00、4.78、3.72 和 2.73 J 时,两者压力的对比如图 7 所示。由图 7 可得出, p_{sh}/p_0 的实验值约为基于理想爆炸波能量的数值模拟值的 82%。考虑到电火花点火能量的测量误差约 8%,并且在点火过程中小部分能量直接转化为光能和热能,因此数值计算得出的能量(也即爆炸波能量)和 1/4 周期的电火花放电能量较吻合。

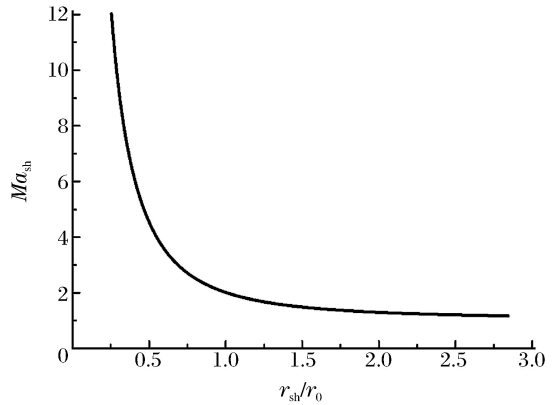


图 6 点源球面爆炸波的马赫数 Ma_{sh} 与 r_{sh}/r_0 的关系

Fig. 6 Ma_{sh} as a function of r_{sh}/r_0 for a spherical blast wave from a point energy source

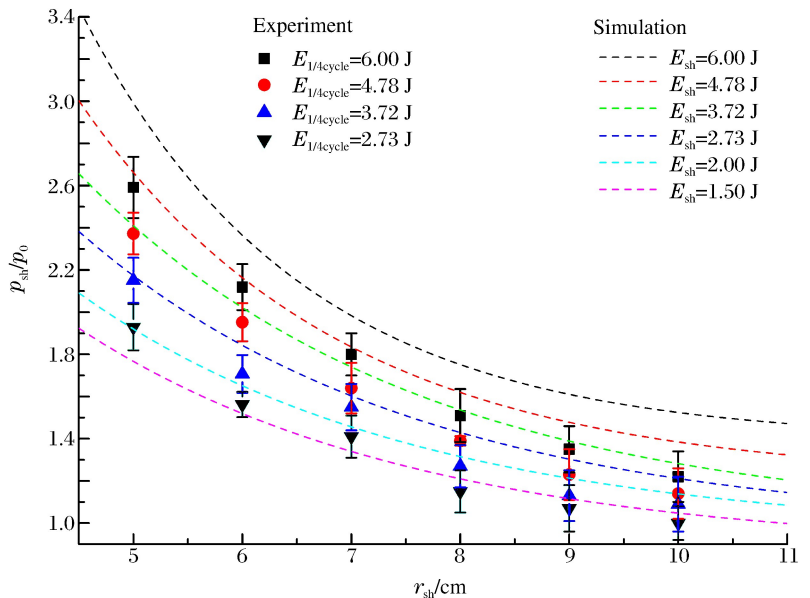


图 7 爆炸波能量和点火能量在不同爆炸波半径处对应的量纲一爆炸波超压

Fig. 7 Dimensionless overpressure as a function of shock wave radial for the different spark energy and the corresponding blast wave energy

表 1 $E_{1/4 \text{ cycle}} = 6.00 \text{ J}$ 时不同距离的爆炸波超压比较

Table 1 Comparison of dimensionless shock wave overpressure at different radii for $E_{1/4 \text{ cycle}} = 6.00 \text{ J}$

r_{sh}/cm	r_{sh}/r_0	Ma_{sh}	p_{sh}/p_0	
			理论	实验
5	1.28	1.65	3.01	2.60
6	1.54	1.47	2.35	2.07
7	1.79	1.36	2.00	1.74
8	2.06	1.28	1.76	1.51
9	2.32	1.23	1.61	1.35
10	2.58	1.20	1.51	1.22

2.2.2 通过超压比较能量

由于数值模拟中采用的是理想爆炸波能量,也即把点火能量近似为爆炸波能量,因此计算得出的压力也即理想爆炸波压力。而在实验中通过压力传感器得到则为实际爆炸波能量产生的压力,并基于式(15)通过压力的计算得出能量 E_{sh} ,并与 1/4 周期的电火花放电能量进行比较,如表 2 所示。

表 2 概括了在不同初始电压下电火花放电的实验参数和结果, R_c 和 R_s 分别为电路板和电火花电阻。从表 2 中可以看出 1/4 周期电火花放电能量 $E_{1/4 \text{ cycle}}$ 与实际爆炸波能量 E_{sh} 基本吻合。对于直接起爆引起爆轰,电火花产生的爆炸波能量作用于爆炸性气体而产生起爆。由表 1~2 可以看出,1/4 周期放电能量与爆炸波能量基本吻合,因此 1/4 周期的点火能量可被视为作用于直接起爆的有效能量。

表 2 不同初始电压下 1/4 周期放电能量与爆炸波能量的比较

Table 2 Comparison of the first 1/4 cycle spark discharge energy and blast wave energy at different initial voltages

U/kV	$C/\mu\text{F}$	$R_c/\text{m}\Omega$	$R_s/\text{m}\Omega$	E_{tot}/J	E_s/J	$E_{1/4 \text{ cycle}}/\text{J}$	E_{sh}/J
18	2	114.2	13.1	324	27.78	6.00	5.12
16	2	116.4	12.5	256	21.52	4.78	3.91
14	2	126.8	11.9	196	16.76	3.72	3.07
12	2	132.3	10.1	144	13.12	2.73	2.28

2.3 高压电点火各能量的分布

表 2 中的数据显示,如果把储存于电容的总能量 $1/2CU^2$ 视为整体,其中约 91% 的能量作用于欧姆损耗,仅有约 9% 的能量作用于电火花点火,也即 $E_s = \int_0^\infty i^2 R_s dt$,但其中只有初始 1/4 周期放电能量(约占总能量的 2%)为爆炸波能量,可被视为作用于直接起爆的有效能量。

3 结 论

建立了高电压点火系统,确定了电火花放电能量的计算方法,测定了在空气中高压电火花产生的爆炸波的各参数,研究了高压电火花产生的爆炸波的传播规律和性质。把 1/4 周期放电能量与点爆炸的数值模拟结果进行了对比,通过实验验证了电火花放电最初的 1/4 周期放电能量与爆炸波能量的关系,并分析了高压电点火各能量分布情况,得到如下结论:

(1) 高压电点火产生的爆炸波运动满足 Hopkinson-Sachs 爆炸相似律;

(2) 初始 1/4 周期放电能量和爆炸波能量基本吻合,因此 1/4 周期的点火能量可被视为作用于直接起爆的有效能量;

(3) 储存于电容的总能量 $1/2CU^2$ 中,约 91% 作用于欧姆损耗和能量损失,初始 1/4 周期放电能量仅约占 2%,其余的点火能量只起到加热混合物的作用。

参考文献:

[1] Knystautas R, Lee J H S. On the effective energy for direct initiation of gaseous detonations[J]. Combustion and Flame, 1976,27:221-228.

- [2] 张博, Lee J H S, 白春华. $\text{CH}_4\text{-O}_2$ 混合气体直接起爆的临界能量[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(2):113-120.
Zhang Bo, Lee J H S, Bai Chun-hua. Critical energy for direct initiation of $\text{C}_2\text{H}_4\text{-O}_2$ mixture[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(2):113-120.
- [3] Buckingham E. On physically similar systems: Illustrations of the use of dimensional equations[J]. Physical Review, 1914, 4(4):345-376.
- [4] Buckingham E. The principle of similitude[J]. Nature, 1915, 95(2368):66-68.
- [5] Hopkinson B. British ordnance board minutes[R]. Report No. 13565. London, UK: British Ordnance Office, 1915.
- [6] Sachs P G. The dependence of blast on ambient pressure and temperature[R]. BRL Report No. 466. Maryland, USA: Aberdeen Proving Ground, 1944.
- [7] Matsui H, Lee J H S. On the measure of the relative detonation hazards of gaseous fuel-oxygen and air mixture[J]. Proceeding of the Combustion Institute, 1979, 17(1):1269-1280.
- [8] Bourlioux A. Numerical studies of unstable detonations[D]. Princeton, NJ, USA: Princeton University, 1991.

Measurement of effective energy from a high-voltage spark discharge and its some related problems*

Zhang Bo^{1,2}, Bai Chun-hua²

(1. School of Resources and Environmental Engineering,
East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;
2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: An experimental apparatus was developed for measuring the parameters for the blast waves produced by a high-voltage spark discharge. To investigate the variation and propagation tendency of the blast wave and the scaling law of its parameters, the pressure and arrival time of the blast wave in air were measured at different radii and initial energy using a PCB piezoelectric pressure transducer. The results show that the high-voltage spark-produced blast wave follows the Hopkinson-Sachs scaling law. The comparison between the experimental results and the numerical simulation for a spherical blast wave from a point energy source confirms that the blast wave originated from the high-voltage capacitor spark discharge follows adequately the analytical description and the amount of energy contributed to the direct blast initiation from the spark ignition can be estimated from the first 1/4 cycle current discharge. The composition of the total energy stored in the capacitors, (i. e. , $1/2CU^2$) was further investigated. The results indicate that about 91% of the total energy wastes on the energy loss and ohmic dissipation, and only about 2% contributes to the first 1/4 cycle current discharge energy which is responsible to initiate the detonation. The energy released after the first 1/4 cycle only tends to heat up the surrounding gases.

Key words: mechanics of explosion; blast wave energy; PCB piezoelectric pressure transducer; high-voltage spark discharge; Hopkinson-Sachs scaling law; 1/4 cycle current discharge energy

* Received 31 October 2011; Revised 11 December 2012

Corresponding author: Zhang Bo, bzhang@ecust.edu.cn