

火花放电能量精确控制系统研究

李新光¹, 钟圣俊², 李伟晔¹, 魏玉龙¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 通过对采集的电流、电压进行积分计算的方法, 设计了粉尘云最小点火能火花放电能量的精确控制系统, 通过 IGBT(绝缘栅双极晶体管)来控制电路中剩余能量的泄放, 实现了放电能量相同但放电时间不同并且可控的目标, 即实现了最小点火能量的放电能量和放电速率的控制. 实验表明: 该控制系统对于 100 J 与 10 J 能量的控制误差为 5%, 当能量为 1 J 时误差为 10%; 对于粒度为 8 ~ 13 μm 的铝粉, 当放电能量为 1 J 时, 放电时间越短, 粉尘云越容易被点燃, 说明铝粉在能量输入速率较高时更加容易点燃.

关 键 词: 最小点火能; 能量精确控制; 火花能量; 能量输入速率; 粉尘云

中图分类号: X 932

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)02-0162-04

Accurate Control System of Spark Discharge Energy

LI Xin-guang¹, ZHONG Sheng-jun², LI Wei-ye¹, WEI Yu-long¹

(1. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WEI Yu-long, E-mail: wylxpp@126.com)

Abstract: By using the method of integral calculation for sampled current and voltage, an accurate experiment system was designed to control the minimum spark discharge energy of dust clouds. Through insulated gate bipolar transistors, the discharge of the residual energy in the circuit was controlled, thus the discharge time was different and controllable under the same discharge energy. And the purpose of controlling the minimum ignition energy and the discharge rates at the same time was realized based on the proposed system. The results showed that the control error of 5% could be obtained for 100 J and 10 J energy. When the energy was 1 J, the control error was about 10%. For the aluminum powder with the diameter range of 8 ~ 13 μm , when the discharge energy was 1 J, the shorter the discharge time was, the easier the dust cloud was lit. It is indicated that the aluminum powder is easier to be ignited at high rate of energy input.

Key words: minimum ignition energy; accurate control of energy; spark energy; energy input rate; dust clouds

粉尘云最小点火能量是衡量粉尘点火敏感性的重要指标之一. 目前, 国内外粉尘云最小点火能量是以电容上储存的能量作为火花放电能量进行测试的, 但是在火花间隙放出的能量和电容上储存的能量存在较大差别. 精确测量火花间隙的实际放电能量, 并对放电速率进行控制, 对最小点火能的测量研究有重要意义.

1 最小点火能的计算及测量

最小点火能是指能够引起粉尘云(或可燃气体与空气混合物)燃烧(或爆炸)的最小火花能量, 也称为最小火花引燃能或者临界点火能.

最小点火能的理论放电能量以电容存储能量为准, 计算方法如下^[1]:

$$E = \frac{1}{2}CU^2. \tag{1}$$

式中： C 为电容容值； U 为充电电压； E 为电容存储能量。

而最小点火能的实际放电能量是通过采集放电电压及放电电流，然后通过对放电功率的积分来计算：

$$E = \int_{t_1}^{t_2} U_t \cdot I_t dt. \tag{2}$$

式中： U_t 、 I_t 分别为放电过程中的瞬时电压和瞬时电流； t_1 为放电初始时间； t_2 为放电结束时间。

实际火花放电能量的测量通过泰克高压探头、电流探头以及示波器来实现，如图 1 所示。示波器数据通过 USB 接口传送至上位机，在对数据进行积分之前，需要剔除无效数据（示波器采集到的数据包括放电结束时的数据，需要剔除）。

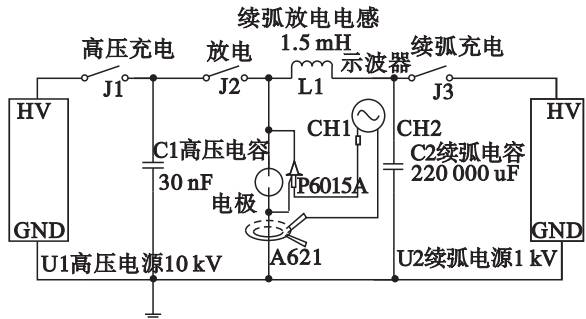


图 1 数据采集系统原理图

Fig. 1 Schematic of the data acquisition system

2 火花放电能量精确控制系统原理

火花放电能量精确控制系统的基本原理是高压触发，低压续弧，亦称为方波发生系统。如图 2 所示，电极左侧为触发回路，右侧为续弧回路，这里触发电容的容值相对较小，通过式(1)计算，保证触发回路的放电能量相对于续弧回路的放电能量可以忽略，所以放电能量来自于续弧回路。在充电过程中，电容储存能量远远大于实际放电能量，因为限流电阻会消耗掉很大一部分能量。放电过程中，通过对多余能量的及时泄放以及放电时间的精确控制，实现对放电能量的精确控制。由于电路中存在继电器，其机械触点的动作时间误差较大，所以在正式实验之前，需要对放电时间进行 2~3 次的校正，以获得所需能量对应的放电时间点。电路中剩余能量的泄放由 IGBT 来完成，因其具有高速开关及耐高压大电流的特性，可以很好地完成实验要求^[2]。电路工作过程如下：①设定触发电容和续弧电容的充电电压；②设定放电时

间、实际延时差及点火延时；③对触发电容及续弧电容组进行充电；④点火并完成电压泄放。整个控制系统由 PLC 与触摸屏构成，完成对电路的智能控制。

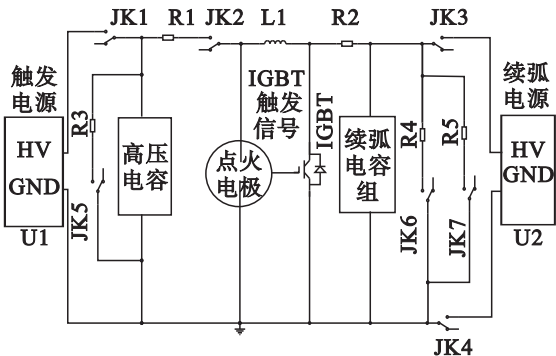


图 2 火花放电能量精确控制系统原理图

Fig. 2 Schematic of the accurate control system of spark discharge energy

本文实现了 1 J、10 J、100 J 的能量精确控制，其中，1 J 能量控制误差为 ±10%，10 J 与 100 J 能量控制误差为 ±5%。能量精确控制主要与两方面有关：放电时间与点火电极。其中点火电极对能量精确控制有着至关重要的影响，由于高压放电是一个热量快速释放的过程，所以点火时会对电极造成损耗，能量越大损耗越严重^[3-6]。目前，点火电极主要有两种材料：铜电极与钨银电极。钨银合金硬度高，抗氧化能力强，在相关实验中比较受欢迎；但是钨银合金价格较高，适用于能量较小的场合^[7]。这里，采用 100 J 能量点火时，采用铜电极，如图 3 所示。每次点火之后，换用新电极，所以对

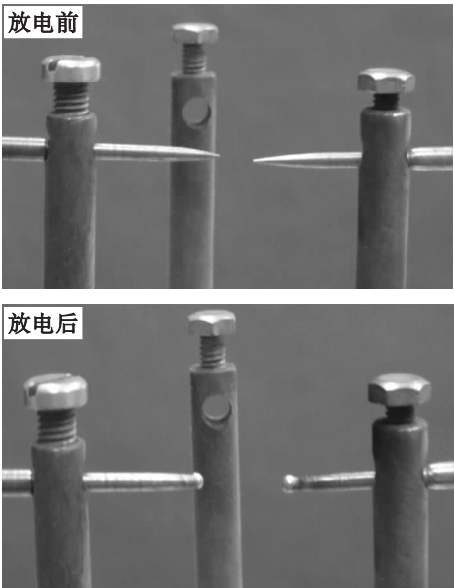


图 3 100 J 能量放电前、后的铜电极
Fig. 3 Copper electrodes of discharge energy of 100 J

电极的要求较高,需要对其进行精加工,保证每对电极形状一致.

采用 10 J 能量点火时,为了降低实验成本,采用钨银电极,如图 4 所示. 这里,由于多次点火会导致电极氧化,所以目前在电极经过一次打磨加工之后,10 J 能量重复放电最少可以达到 40 次.



图 4 钨银合金电极
Fig. 4 W-Ag alloy electrode

采用 1 J 能量放电时,放电电极采用铜电极,如图 3 所示. 由于能量相对较小,对电极损耗较轻,可以保证电极的重复使用,提高了点火次数.

3 相关实验

目前实现了三个级别的能量精确控制,并且放电时间可控,图 5 给出了放电时电压电流的波形. 不同条件下的放电能量数据见表 1 ~ 表 5.

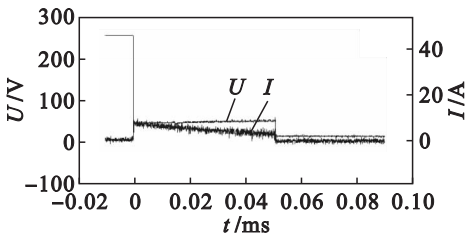


图 5 实验采集曲线
Fig. 5 Curves of the experiment

表 1 100 J 放电能量数据 Table 1 Data of discharge energy of 100 J			
序号	截断时间 /ms	实际放电 能量/J	误差/%
1	148	98. 3	1. 72
2	148	98. 0	1. 98
3	149	100. 8	0. 80
4	150	103. 4	3. 40
5	151	104. 1	4. 10

注:温度 23. 5 ℃,湿度 36%,电极间距 3 mm.

本文进行了不同能量输入速率对铝粉粉尘云最小点火能的影响实验^[8],具体条件如下:①温度为 24. 2 ℃,湿度为 40%;②电极为铜电极,电

表 2 10 J 放电能量数据(I) Table 2 Data of discharge energy of 10 J(I)			
序号	截断时间 /ms	实际放电 能量/J	误差/%
1	53. 2	10. 0	0
2	52. 1	9. 8	2
3	51. 4	9. 6	4
4	51. 4	9. 8	2
5	51. 2	9. 7	3

注:温度 17. 2 ℃,湿度 39%,电极间距 2 mm.

表 3 10 J 放电能量数据(II) Table 3 Data of discharge energy of 10 J(II)			
序号	截断时间 /ms	实际放电 能量/J	误差/%
6	69. 3	9. 9	1
7	69. 4	10. 0	0
8	69. 3	10. 0	0
9	67. 6	10. 0	0
10	69. 4	9. 9	1

注:温度 20. 8 ℃,湿度 52%,电极间距 2 mm.

表 4 1 J 放电能量数据(I) Table 4 Data of discharge energy of 1 J(I)			
序号	截断时间 /ms	实际放电 能量/J	误差/%
1	4. 71	1 064	6. 4
2	4. 52	1 008	0. 8
3	4. 97	948	5. 2
4	4. 86	1 031	3. 1
5	4. 56	978	2. 2

注:温度 24. 3 ℃,湿度 35%,电极间距 2 mm.

表 5 1 J 放电能量数据(II) Table 5 Data of discharge energy of 1 J(II)			
序号	截断时间 /ms	实际放电 能量/J	误差/%
6	8. 63	1 030	3
7	8. 35	995	0. 5
8	8. 53	1 015	1. 5
9	8. 56	1 002	0. 2
10	8. 40	989	1. 1

注:温度 23. 7 ℃,湿度 38%,电极间距 3mm.

极间距为 2 mm;③ 5 ms 时续弧电压为 300 V,限流电阻为 30. 7 Ω,续弧电容为 577 μF,存储能量为 26. 0 J,8 ms 时续弧电压为 370 V,限流电阻为 41. 2 Ω,续弧电容为 111. 9 μF,存储能量为 7. 7 J;④试样处理方法采用粉碎和筛分的方式,样品粒径为 8 ~ 13 μm;⑤测试装置为哈特曼管,分散压力为 0. 6 MPa,测试标准为 ASTM E2 019^[9];

- ⑥粉尘质量为 2 g, 粉尘质量浓度为 1.67 g/L;
⑦实际放电能量为 1 J. 实验结果见表 6.

表 6 1 J 不同放电时间测试结果比较
Table 6 Comparison of the test results with different discharge time in the condition of 1 J

设定截断 时间/ms	点火延时 /ms	点燃 效果	点火 次数
5	30	是	3
8	30	否	10
8	60	是	9

表中的点火延时是指从粉尘云产生到电极放电之间的时间差, 调整这个时间的目的是改变粉尘云的湍流度, 因为不同的粉尘云湍流度是不一样的, 所以当采用哈特曼管装置进行粉尘云最小点燃能量测试时, 采用 4 个延时档位: 30, 60, 90 和 120 ms.

在测量粉尘云最小点燃能量实验时, 每种粉尘浓度在同一能量、同一点火延时条件下, 测试次数为 10 次(如果粉尘没有被点燃, 则测试 10 次, 如果粉尘被点燃, 则测试结束). 由上表可以看出, 在 1 J 点火能量, 放电时间为 5 ms(实际不到 5 ms, 见表 4)、点火延时为 30 ms 时, 粉尘云被点燃, 放电时间为 8 ms、点火延时为 30 ms 时, 10 次之内粉尘云没有被点燃; 而在放电时间为 8 ms、点火延时为 60 ms 时, 粉尘云在第 9 次点火时被点燃^[9-10].

由此可见, 粒度为 8~13 μm 的铝粉, 在 1 J 放电能量时, 放电时间越短, 粉尘云越容易被点燃, 说明铝粉在能量输入速率较高时相对于能量输入速率较低时容易点燃.

由于不同的粉尘性能不一致, 所以如果研究能量输入速率对某一种粉尘云的点燃效果的影响, 就需要通过实验来测试, 而不能通过某一种或者几种粉尘云的点燃效果来衡量其他粉尘的性能.

4 结 论

1) 在一定条件下, 火花放电能量的精确控制是切实可行的, 并且与放电时间和点火电极密切相关, 其中, 100 J 与 10 J 能量误差为 5%, 1 J 能量

误差为 10%, 在同一放电能量级别下, 可以实现不同的能量输入速率.

2) 对于同一种粉尘, 在同一测量条件下, 同一能量的不同输入速率对粉尘云最小点火能有影响.

参考文献:

[1] Azhagurajan A, Selvakumar N, Yasin M M. Minimum ignition energy for micro and nano flash powders [J]. *Process Safety Progress*, 2012, 31(1): 19-23.

[2] 曹书强, 陈庆国, 司昌健. 基于 EXB841 的 IGBT 驱动与保护电路研究[J]. *微电机*, 2010, 43(4): 97-99.
(Cao Shu-qiang, Chen Qing-guo, Si Chang-jian. Research of driving & protecting circuit for IGBTs based on EXB841 [J]. *Micro Motor*, 2010, 43(4): 97-99.)

[3] 国家技术监督局. GB T19428 粉尘云最小点火能测试方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
(National Technical Supervision Bureau. GB T19428 Dust cloud minimum ignition energy test methods [S]. Beijing: China Standard Press, 1996.)

[4] Nifuku M, Katoh H. Incendiary characteristics of electrostatic discharge for dust and gas explosion [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2001, 14(6): 547-551.

[5] Bind V K, Roy S, Rajagopal C. A reaction engineering approach to modeling dust explosions [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 207(5): 625-634.

[6] Randeberg E, Olsen W, Eckhoff R K. A new method for generation of synchronised capacitive sparks of low energy [J]. *Journal of Electrostatics*, 2006, 64(3/4): 263-272.

[7] Taghavi Pourian Azar G, Rezaie H R, Gohari B, et al. Synthesis and densification of W-Cu, W-Cu-Ag and W-Ag composite powders via a chemical precipitation method [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 574: 432-436.

[8] 喻健良, 闫兴清, 陈玲. 密闭容器内微米级铝粉爆炸实验研究与数值模拟[J]. *工业安全与环保*, 2011, 30(11): 12-15.
(Yu Jian-liang, Yan Xing-qing, Chen Ling. Experimental and numerical simulation study on aluminum dust explosion in confined space [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2011, 30(11): 12-15.)

[9] American Society for Testing and Materials. ASTM E2019-03 Standard test method for minimum ignition energy of dust cloud in air[S]. West Conshohocken; ASTM, 1999.

[10] International Electrotechnical Commission. IEC 1241-2-3 Method for determining minimum ignition energy of dust/air mixtures[S]. Geneva; IEC, 2001.