

影响静电火花放电的因素

陈 坤¹, 张小良², 陶光远², 王昊博², 黄 兵², 赵彦丽²

(1. 上海奉贤消防救援支队, 上海 201499; 2. 上海应用技术大学 城市建设与安全工程学院, 上海 201418)

摘要: 为了研究静电火花放电的影响因素及放电能量, 利用高压火花发生器和高速摄像系统等研究静电放电火花直径与能级、电极、环境压力、环境风速、温湿度及击穿场强与电极间隙等的关系。结果表明: 在电极间隙为 0.5 mm、放电电压为 1 507 V 时, 火花产生到放电通道被击穿仅耗时 0.074 ms, 整个放电过程持续时间约为 1.408 ms; 同一电极间隙条件下, 随火花能级的上升火花直径逐渐变大; 静电放电火花直径不锈钢电极最大, 铜电极次之, 钨电极最小; 负压从 0.01 MPa 增大至 0.06 MPa、正压从 0.05 MPa 增大至 0.5 MPa 的过程中, 火花直径整体呈减小趋势, 但变化并不明显; 另外当压力大于 0.6 MPa 时, 未见产生放电火花, 提高放电火花能量到 1 J 依然未见放电火花; 环境风速、温湿度等对火花直径影响较小; 随电极间隙增加, 临界的击穿电压呈增加趋势; 静电击穿场强与电极间隙之间呈负相关。

关键词: 静电放电; 放电能量; 火花直径

中图分类号: X932

文献标志码: A

Influence factors of electrostatic spark discharge

CHEN Kun¹, ZHANG Xiaoliang², TAO Guangyuan², WANG Haobo², HUANG Bing², ZHAO Yanli²

(1. Fengxian District Fire Rescue Detachment, Shanghai 201499, China;

2. School of Urban Construction and Safety Engineering, Shanghai University of Applied Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: In order to study the influencing factors and discharge energy of electrostatic spark discharge, the relationship between electrostatic discharge spark diameter and energy level, electrode characteristics, ambient pressure, ambient wind speed, temperature and humidity, breakdown field strength and electrode gap, etc of electrostatic discharge sparks were studied using high-voltage spark generators and high-speed camera systems. The results show that when the electrode gap is 0.5 mm and the discharge voltage is 1 507 V, the time from spark generation to discharge channel breakdown is only 0.074 ms, and the duration of the whole discharge process is about 1.408 ms. Under the same electrode gap condition, the spark diameter gradually increases with the increase of spark energy level. The diameter of electrostatic discharge is the largest at stainless steel electrode, followed by copper electrode and the smallest at tungsten electrode. When the negative pressure increases from 0.01 MPa to 0.06 MPa and the positive pressure increases from 0.05 MPa to 0.5 MPa, the spark diameter decreases, but the change is not obvious. In addition, when the pressure is greater than 0.6 MPa, there is no discharge spark, and when the discharge energy is increased to 1 J, there is still no discharge spark. Environmental wind speed, temperature and humidity have less effect on spark diameter. With the increase of electrode gap, the critical breakdown voltage increases. There is a negative correlation between electrostatic shock penetration field strength and electrode clearance.

Keywords: electrostatic discharge; discharge energy; spark diameter

静电放电引发的火灾爆炸事故对工艺设备、相关人员以及经济财产等会造成较大的影响或损失^[1-2]。研究表明, 大约 80% 静电引发的点火源于火花放电^[3], 因其放电机理复杂且受外界环境影响较大, 彻底消除静电难上加难。研究指出, 静电防治主要还是从降低可燃物静电敏感性以及减小放电能

收稿日期: 2021-03-08, 修回日期: 2021-03-21。

基金项目: 国家自然科学基金项目, 编号: 51304137; 上海应用技术大学科技发展基金项目, 编号: KJFZ2018-5。

第一作者简介: 陈坤(1985—), 男, 研究方向为灭火救援和应急通信。E-mail: 290038861@qq.com。

通信作者简介: 张小良(1978—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为气体(粉体)爆炸防治。E-mail: yyyzxl@126.com。

量2个方面入手^[2]。另外,即便是同种类型的静电放电,其点火能力也会受到放电电压以及击穿介质的影响,况且物质分类众多,对静电的敏感性各不相同^[4],想要对静电放电点火风险做出评估,静电放电理论方面的研究和总结必不可少。

静电放电是气体放电的一种,主要研究理论包括汤森放电理论^[5]和帕邢定律^[6],因其产生与发展耗时短,光现象变化剧烈,故采用传统仪器设备来表征和研究已不能满足要求。随着传感器技术、光学设备的快速发展,高速摄影、纹影仪以及各种高频的数据采集设备已成为研究静电放电过程的必备工具。此外,静电放电除了与其电极、放电参数等相关,还受工况条件下各种复杂环境的影响,实验室模拟温湿度、风速、压力等条件对放电火花的影响,同时需要分析火花产生与消逝以及火花半径的规律。

目前国内关于静电放电的研究主要把落脚点放在静电放电影响因素以及静电放电点燃能力上。国外的文献则偏重对某一具体的放电类型,研究其放电过程中能量的输出规律、能量的转化以及能量的计算。如周本谋等^[7]通过一系列实验对典型的静电放电类型,如电晕放电、刷形放电、堆表面放电、人体放电以及火花放电的点燃能力作了定量评估;然后又结合数据序列理论相关内容,找到了点火源与可燃物序列的关联性,此方法可以用于评估静电放电的点火能力及危险性。周本谋等^[8]对典型静电放电的6种类型的点火能力和点燃危险性作定量评估的基础上,通过大量实验研究得出火花持续时间、火花直径以及火花能量对静电放电点燃能力的影响,并结合灰色系统理论的相关研究,从另一个角度找了可燃物和点火源的关联性,最后将实际工况条件下的静电放电火花点燃危险性进行了分级。Beloni等^[9]以镁粉尘为研究对象,主要研究其静电放电点火能量和点火时间对点火延迟时间的影响。结果表明,随着放电能量增加,延迟时间趋近于0。Weiret等^[10]以铝粉尘为研究对象,通过不断减小铝粉的粒径,研究其对电导和静电敏感性影响。实验结果表明,不断减小铝粉尘粒径,电导率减小,同时铝粉尘被点燃所需的能量也逐渐降低。Stephane等^[11]除了对粉尘云着火能量进行统计分析外,还对电容放电和其他类型放电进行了比较。Kamenskihs^[12-13]和张博等^[14]研究发现,在高电压点火系统中的能量损耗占电容储存总能量的91.34%,仅有约9%的能量用于电火花点火。Zhong等^[15]采用不同的触发方式研究了电感对放电效率和放电时间的影响。结果表明,当电极运动触发放电时,无电感器时放电效率为78.2%~90.1%,有电感时放电效率为41.1%~59.3%。Liu等^[16]改变能量(电容和电压)和电极参数的影响研究了火花放电特性。结果表明,电压驱动的火花放电能量比电容变化的能量更稳定。根据电极的场强分布,揭示了不同电极参数下电极的击穿特性。大电极间隙比小电极间隙的能量利用效率提高约5.55%。

基于此,笔者主要以火花放电为基础,研究其放电的产生与消逝以及影响静电火花的因素,为相关工贸行业提供预防静电爆炸事故的理论和行动指导。

1 实验

1.1 装置简介

1) 电火花发生器

实验采用 DHNF-265 电火花发生器(成都新辰光电有限公司)进行。表1为火花发生器主要技术指标,表2为火花能量对应电容容量。

表1 火花发生器主要技术指标

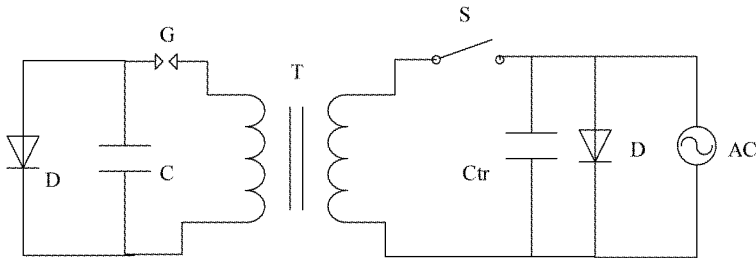
Tab.1 Main technical specifications of spark generator

指标	数据	指标	数据
电源电压 AC/V	220% ± 15%	引弧电压(V_{pp})/kV	16
电源电流/A	2	储能电压/kV(连续可调)	1 ~ 1.55
电火花最大输出能量/J	265	储能电压精度	±1%
电火花最小输出能量/J	0.01	工作方式	间断
高能量 H 档/J	1 ~ 265	工作环境温度/℃	5 ~ 45
低能量 L 档/J	0.01 ~ 1.65	工作环境相对湿度	≤75%

表 2 火花能量对应电容容量
Tab.2 Spark energy corresponds to capacitance

高能量	示值能量/J	100	80	40	20	10	8	4	2	1
H 档	储能电容/ μF	100	80	40	20	10	8	4	2	1
低能量	示值能量/J	0.8	0.4	0.2	0.1	0.08	0.04	0.02	0.01	
L 档	储能电容/ μF	0.8	0.4	0.2	0.1	0.08	0.04	0.02	0.01	

电火花发生器工作原理见图 1。如图所示, Ctr 是触发电容, 充电后开关 S 接通瞬间, 能量释放, 通过变压器产生高压脉冲, 在电极 G 间产生微小电弧, 使得电极间电阻降低, 从而触发主要储能电容 C 开始释放储存的能量。



G—电极; S—开关; Ctr—触发电容; C—电容; D—二极管; T—变压器; AC—交流电。

图 1 火花发生器电路原理

Fig. 1 Principle of spark generator circuit

2) 高速摄像系统

本次实验为记录放电火花实时图像, 选用 Lavison 公司的高速摄影系统来完成, 见图 2。如图所示, 该系统主要包括尼康 CCD 高速相机、一个同步控制器、一个计算机工作站以及一套软件 (DaVis8. 40)。设备主要参数如下: 采集频率: 最高 10 kHz; 尼康 CCD 相机像素: 1 280 × 800 pixels; 输入输出信号: TTL 5V; 曝光模式: 单帧单曝光-双帧双曝光; 相机视场: 2D&3D。

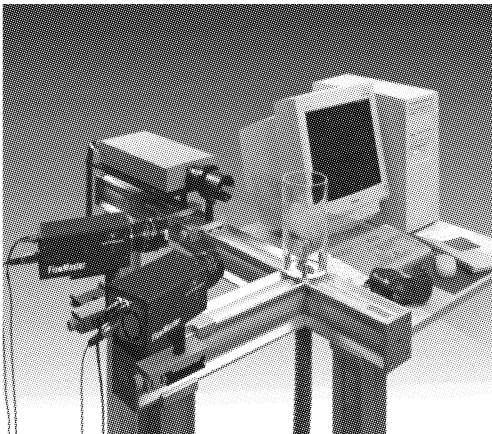


图 2 高速摄像系统

Fig. 2 High speed camera system

3) 电极材料

电极材料如图 3 所示, 钨电极 (直径为 2 mm、长度为 300 mm、尖角为 30°, 纯度为 99.9%, 均为质量分数, 下同)、黄铜电极 (铜占 70%, 锡占 30%, 纯度为 99.9%)、304 不锈钢电极 (纯度为 99.9%)。黄铜及 304 不锈钢电极设计参数如图 4 所示。

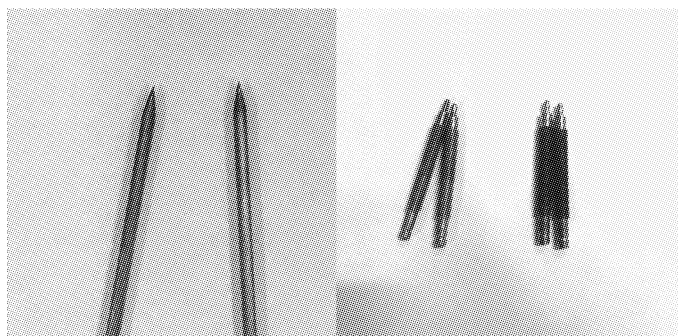


图3 电极

Fig.3 Electrode

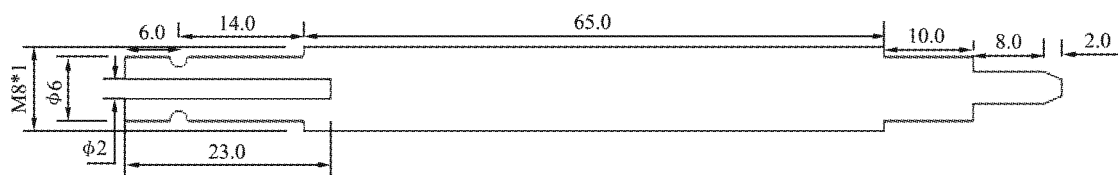


图4 电极设计参数图

Fig.4 Electrode design parameter diagram

1.2 方法

实验通过高速摄像系统完成对静电放电过程的拍摄,整个过程可以自动控制,能减少手动操作带来的误差,以此来研究火花半径的影响规律,主要测试步骤如下。

1) 图像标定。首先在拍摄区域竖直放置一个直尺,调整高速相机的位置与焦距,使其处在最佳的位置;然后在软件 DaVis8.40 中创建 New Project, 选择 Scaling 模块, 寻找 2 个像素点设置距离(取 10 mm), 确认即可。

2) 设置实验参数。按实验所需条件调整电极间隙距离、设置火花能量等级,等待放电拍摄。

3) 实验测试。按下信号箱软件控制按钮,开始启动放电,同时高速相机进行拍摄,完成实验。

4) 数据整理与存储。实验结束,关闭电源,清理实验台,整理和保存数据,等待下一次实验。

除温、湿度试验外,静电放电实验均在环境温度为 15 ~ 20 ℃,相对湿度 35%~50% 的条件下进行。

2 结果与分析

2.1 放电火花的产生与消逝

火花放电是一个极其短暂而又复杂的过程,火花的产生和消逝伴随着强烈的光、热现象,储能电容的电能在在这个过程中会转化成冲击波能、焦耳热以及辐射能和其他能量等。图 5 为火花放电过程。如图所示,高速摄像设备记录了放电电极间隙为 0.5 mm、放电电压为 1 507 V、分辨率为 8K 以及图像帧频为 0.074 ms 时的电火花产生与消逝过程,整个放电持续时间约为 1.406 ms,其中火花产生的时间比较短,从火花产生到放电通道被击穿的时间仅为 0.074 ms;接着电火花发生飞溅现象,瞬时能量值达到最大,伴随着剧烈的发光发热现象;此后,放电能量逐渐减小,衰减持续时间约为 1.11 ms,直至全部火花熄灭,至此,储能电容能量释放完毕,静电放电过程结束。

图 6 为火花飞溅现象图。如图所示,实验开始前,在选择不同火花能量等级进行预实验的过程中,发现当静电放电能量等级超过 1 J 时,通过高速相机拍摄的火花会出现喷溅现象,短时间内严重曝光,非常不利于对放电火花的观察和测量,综上确定火花能量能级范围为 0.1 ~ 0.9 J。

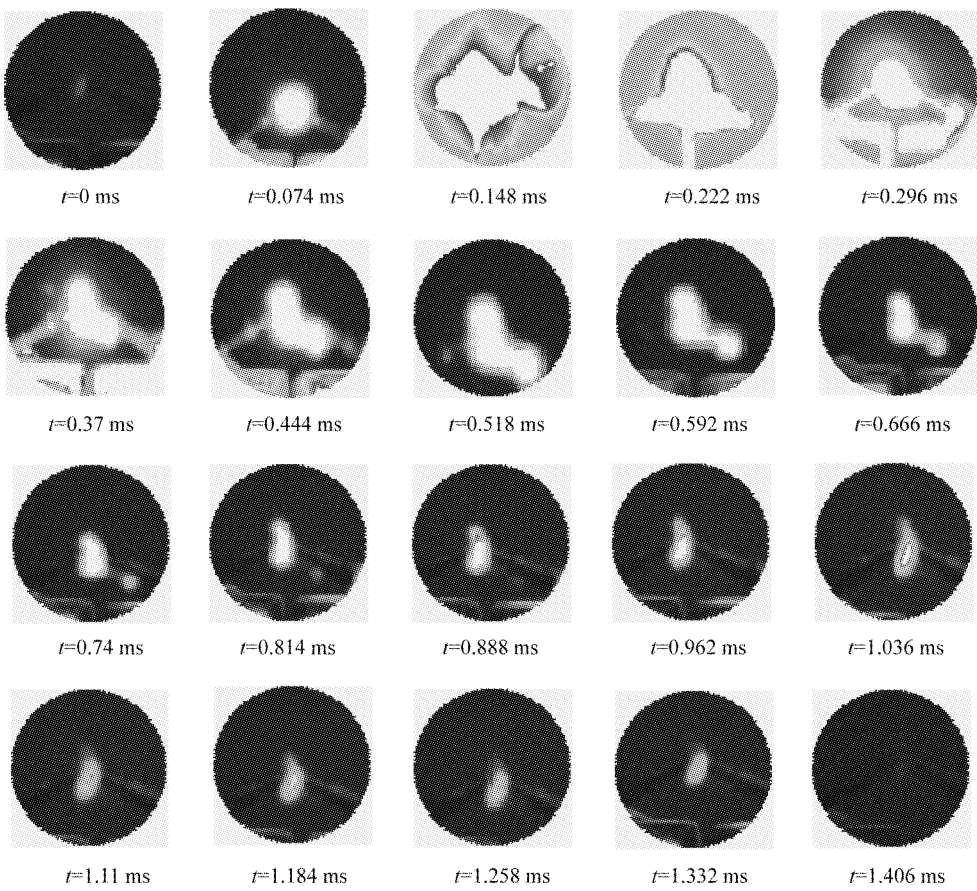


图 5 火花放电过程

Fig. 5 Spark discharge process



图 6 火花飞溅现象图(分辨率 8 K)

Fig. 6 Diagram of spark splash phenomenon (resolution of 8 K)

2.2 电极材质对放电火花的影响

电极常见的材质包括铜和钨,为了研究电极材质对电火花的影响,综合各种情况选用黄铜、304 不锈钢以及钨 3 种材质,图 7 为不同材质电极下火花随电极间隙变化情况(以 0.6 J 为例)。如图所示,火花能量等级为 0.6 J 情况下,黄铜和合金电极放电火花直径随电极间隙增加呈现先上升后减小的趋势;同一火花能级条件下,放电火花直径合金电极最大,铜电极次之,钨电极最小。试验过程中还发现合金电极火花散射比较严重,相反,黄铜电极和钨电极放电火花则较为稳定,故采用后者完成静电放电相关试验更有利于点火的发生。

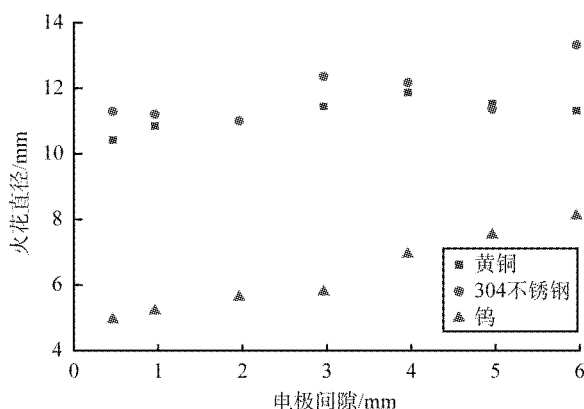


图7 不同材质电极下火花直径随电极间隙变化

Fig.7 Variation of spark diameter with electrode gap under different electrode materials

2.3 电极间隙对放电火花的影响

采用黄铜电极,当电极间隙超过6 mm,静电放电火花通道无法形成,所以电极间隙的范围确定为最小0.5 mm,最大6 mm。需要说明的是,火花直径大小是根据高速摄像设备拍摄的静电放电从火花的产生和消逝过程中选取的典型图片,图8为不同火花能量等级下电极间隙对火花直径的影响。由图8所示,同一电极间隙条件下,随着火花能量等级增加,火花直径呈变大趋势;电极间隙从0.5 mm增加到3 mm的过程中,火花直径呈上升趋势;当电极间隙超过3 mm时,火花直径基本呈现平稳状态,变化不明显,这主要是因为随着电极间隙增大,火花通道的形成克服阻力增加,即空气击穿电压增大,所以火花直径呈现稳定趋势。同一能量等级下,随电极间隙的增加,静电放电火花直径先增加再减小。

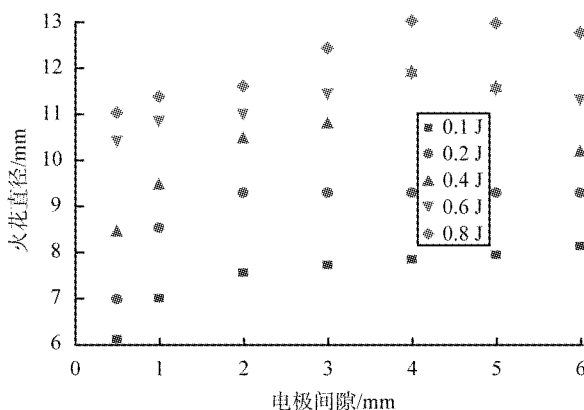


图8 不同火花能量等级下电极间隙对火花直径的影响

Fig.8 Influence of electrode gap on spark diameter at different spark energy levels

2.4 风速、温湿度对放电火花的影响

1) 风速

实验室模拟1.4、2.3、3.4 m/s的风速条件,在使用黄铜电极以及电极间隙为0.5 mm的情况下,测试了火花直径随点火能量的变化情况。图9为不同风速条件(见图例)下火花直径随点火能量变化情况。如图所示,在3种风速条件下,随火花能量增加火花直径呈增大趋势;横向对比图7可知,风速在1.4~3.4 m/s范围内,火花直径与正常环境下的情况基本持平。

2) 温湿度

实验室模拟不同温湿度条件,在使用黄铜电极以及电极间隙为0.5 mm的情况下,测试了火花直径随点火能量的变化情况,图10为不同温湿度条件下火花直径随点火能量的变化情况。由图所示,在3组不同温湿度条件下,随火花能量增加火花直径呈增大趋势;横向对比图8可知,温度为22.9~45℃、相对湿度为36.4%~62.9%范围内,火花直径与正常环境下的情况基本持平。

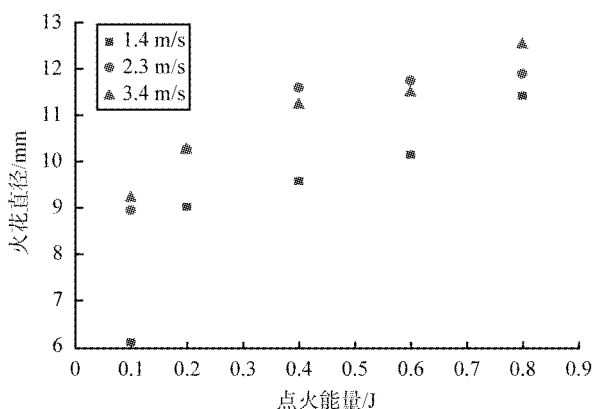


图9 不同风速条件下火花直径随点火能量变化

Fig.9 Variation of spark diameter with ignition energy under different wind speeds

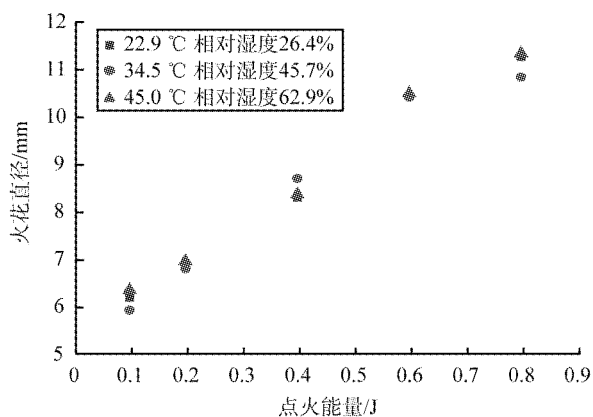


图10 不同温湿度条件下火花直径随点火能量的变化

Fig. 10 Variation of spark diameter with ignition energy under different temperature and humidity conditions

2.5 压力对放电火花的影响

实验室采用纹影法以及高速摄像设备,分别从定量和定性2个方面研究负压状态下对放电火花的影响。实验所用的放电电极为直径2 mm、长度300 mm的钨棒,实验过程中可通过装置两侧的直径225 mm的视窗对放电火花进行观察。

在电极间隙为2 mm、放电火花能量0.6 J的实验室条件下,采用纹影法对放电火花进行了拍摄。图11为纹影法拍摄放电火花示意图。如图所示,明亮区域为高温热作用区,放电过程是从电极中间开始的,冲击波是以电极间隙的中心位置为圆心,逐渐向两端传播,直至全部消失。此外还利用高速摄像系统分别对负压0.01、0.02、0.03、0.04、0.05、0.06 MPa以及正压0.05、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 MPa条件下的放电火花进行了研究。图12为不同负压条件下火花直径变化情况,图13为不同正压条件下火花直径变化情况。由图12、图13可以看出,负压从0.01 MPa增大至0.06 MPa以及正压从0.05 MPa增大至0.5 MPa的过程中,火花直径整体呈减小趋势,但变化并不明显;横向对比图7常压状态下情况,发现火花直径正压条件下最大,常压次之,负压条件下最小。另外,实验中发现当压力大于0.6 MPa时,未见产生放电火花,提高放电火花能量到1 J依然未见。

3 静电放电火花能量测试

采用电火花发生器实验装置,测试了不同电极间隙条件下临界击穿电压的情况。实验设置的电极间隙分别为0.5、2、4、6 mm;电压可调范围为800~1 600 V,步长电压为100 V;试验过程中同一电压条件下连续3次均出现放电火花,则认为击穿成功(击穿成功表示为“√”),否则认为放电击穿失败(击穿失败表示为“×”)。试验时温度为20.1 °C,相对湿度为50.4%。

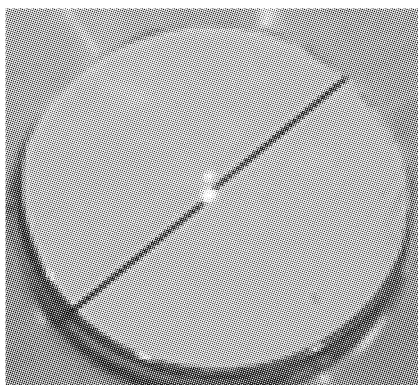


图 11 纹影法拍摄放电火花示意图

Fig. 11 Schlieren method for shooting discharge spark diagram

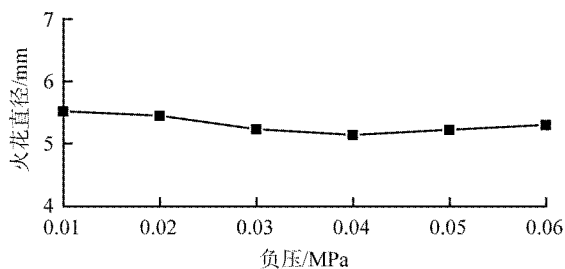


图 12 不同负压条件下火花直径的变化

Fig. 12 Variation of spark diameter under different negative pressure conditions

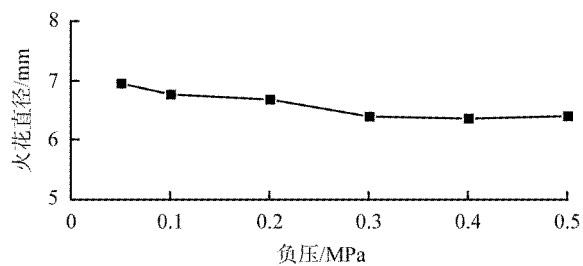


图 13 不同正压条件下火花直径的变化

Fig. 13 Variation of spark diameter under different positive pressure

表3 为不同电极间隙条件下临界击穿电压测试结果(充电电容为 $0.5 \mu\text{F}$)。由表可知,电极间隙从 0.5 mm 增大到 6 mm 的过程中,放电击穿电压也从 800 V 增大到 1300 V ,即同一充电电容条件下,随电极间隙的增加放大电压呈逐渐增大的趋势;根据帕邢定理,放电电压取决于电弧长度 h ,即放电间隙。

表 3 不同电极间隙条件下临界击穿电压测试

Tab. 3 Test of critical breakdown voltage under different electrode gap conditions

放电电压/V	电极间隙/mm			
	0.5	2	4	6
800	√√√	×××	×××	×××
900	—	×××	√××	×××
1 000	—	×√×	××√	×××
1 100	—	√√√	×√×	√××
1 200	—	—	√√√	×√×
1 300	—	—	—	√√√

由式(1)可以计算出本次试验中场强随电极间隙的变化曲线,

$$E = U/h \quad (1)$$

式中: E 为场强, V/mm ; U 为放电电压, V ; h 为放电间隙, mm 。

图 14 为击穿场强随电极间隙变化情况。由图可以看出,击穿场强与电极间隙之间呈负相关,这主要是因为随电极间隙的增大,电极两端的空气分子更容易发生电离,形成带负电的电子以及带正电的离子,故击穿场强呈逐渐减小的趋势。

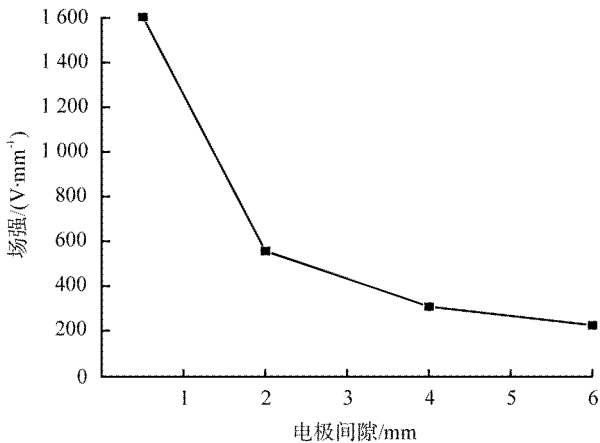


图 14 击穿场强随电极间隙的变化

Fig. 14 Variation of breakdown field strength with electrode gap

本次试验中火花能的计算方法依据经验公式为

$$E = 1/2CU^2 \cdot 10^{-6} \cdot \eta \quad (2)$$

式中: E 为火花能量, J ; C 为电容, μF ; U 为放电电压, V ; η 为放电效率, 取 75%, 具体计算结果见表 4。

表 4 不同试验条件下静电放电火花能量

Tab. 4 Spark energy of electrostatic discharge under different test conditions

组别	放电电压/V	电极间隙/mm	储能电容/ μF	火花能量/J
1	800	0.5	0.5	0.120
2	1 100	2.0	0.5	0.227
3	1 200	4.0	0.5	0.270
4	1 300	6.0	0.5	0.317

4 结论

1)在电极间隙为 0.5 mm、放电电压为 1 507 V 的条件下,利用高速摄像系统(采集频率 13.504 kHz)对放电火花的产生与消逝过程进行了拍摄,从火花产生到放电通道被击穿仅耗时 0.074 ms,整个放电过程持续时间约为 1.408 ms。

2)同一电极间隙条件下,随火花能级的上升火花直径逐渐变大;静电放电火花直径中 304 不锈钢电极最大,铜电极次之,钨电极最小;负压从 0.01 MPa 增大至 0.06 MPa 以及正压从 0.05 MPa 增大至 0.5 MPa 的过程中,火花直径整体呈减小趋势,但变化并不明显;另外当压力大于 0.6 MPa 时,未见产生放电火花,提高放电火花能量到 1J 依然未见放电火花;环境风速、温湿度等对火花直径影响较小。

3)随电极间隙增加,临界的击穿电压呈增加趋势;根据帕邢定理计算得到的场强大小与电极间隙呈负相关,并以此为基础算得了不同电极间隙情况下静电放电火花能量。

参考文献 (References):

- [1] 刘尚合, 魏光辉. 静电理论与防护[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1999: 7-13.
- [2] BOBROV Y K, KOROBEINIKOV V P. On electrical discharges and ignitions of combustible mixtures[J]. *Journal of Electrostatics*, 1998, 47(2): 49-56.
- [3] GUNTER L, SYLVIA L, WOLFGANG S. Static electricity understanding, controlling[M]. Odenthal: Wiley-VCH, 2017: 19-38.
- [4] 周本谋, 刘尚合, 范宝春. 粉体工业典型静电放电辐射场测试研究[J]. *测试技术学报*, 2003, 17(4): 302-305.
- [5] RAIZER Y P. Gas discharge physics[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1991: 14-26.
- [6] MEEK J M. Electric breakdown of gases[M]. New York: Wiley, 1978: 76-85.
- [7] 周本谋, 范宝春, 刘尚合. 典型静电放电火花点燃危险性评价方法研究[J]. *中国安全科学学报*, 2004, 14(4): 31-35.
- [8] 周本谋, 范宝春, 刘尚合. 静电放电火花点燃特性与危险性分级方法[J]. *南京理工大学学报*, 2005, 29(4): 475-478.
- [9] BELONI E, DREIZIN E L. Experimental study of ignition of magnesium powder by electrostatic discharge[J]. *Combustion and Flame*, 2013, 156(7): 1386-1395.
- [10] WEIRET C, PANTOYA M L, DANIELS M A. The role of aluminum particle size in electrostatic ignition sensitivity of composite energetic materials[J]. *Combustion & Flame*, 2013, 160(10): 2279-2281.
- [11] STEPHANE B, KAZIMIERZ L, PHILIPPE G. Statistical method for the determination of the ignition energy of dust cloud-experimental validation[J]. *Loss Prevention in the Process Industries*, 2010, 23: 404-411.
- [12] KAMENSKIHS V, NG H D, LEE J H S. Measurement of critical energy for direct initiation of spherical detonations in high pressure H_2-O_2 mixtures[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(9): 1795-1799.
- [13] ZHANG B, KAMENSKIHS V, NG H D, et al. Direct blast initiation of spherical gaseous detonation in highly argon diluted mixtures[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 2265-2271.
- [14] 张博, 白春华. 高电压点火有效能量的测量及相关问题[J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(1): 85-90.
- [15] ZHONG S, MIAO N, YU Q, et al. Energy measurement of spark discharge using different triggering methods and inductance loads[J]. *Journal of Electrostatics*, 2015, 73: 97-102.
- [16] LIU J, BI M, JIANG H, et al. Evaluation of spark discharge[J]. *Journal of Electrostatics*, 2020, 107: 103.