

静电防护用典型气体的放电特性及其机理

范鑫辰¹, 罗志龙¹, 徐浩铭², 迟晓红², 邹高兴¹, 刘文凤²

(1. 西安近代化学研究所, 710065, 西安; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对火炸药生产、存储、运输以及使用过程中的静电放电问题, 为了寻找抑制静电放电电压过高的可行办法, 对空气、二氧化碳、氦气在 0、20、40 °C 3 种温度条件下以及压强范围 0.05~0.15 MPa 之间的静电击穿特性展开研究, 并计算对比了静电击穿能量。结果表明: 随着气压的升高, 3 种气体的静电击穿电压随之升高, 其中二氧化碳的静电放电电压在相同条件下最高, 静电放电能量最大, 氦气放电电压在 3 种气体中最低; 随着温度的升高, 3 种气体的静电击穿电压随之下降, 在 40 °C、0.05 MPa 下, 3 种气体静电击穿电压达到最小, 因此应选择低压、较高温度、低击穿场强气体的环境作为静电防护气氛环境。本文的研究结果可为火炸药生产过程中保护气氛环境的选择提供数据基础和理论支撑。

关键词: 静电放电; 典型气体; 火炸药生产; 静电保护

中图分类号: TM852 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202106010 **文章编号:** 0253-987X(2021)06-0077-07



OSID 码

Electrostatic Discharge Characteristics of Typical Gases

FAN Xincheng¹, LUO Zhilong¹, XU Haoming², CHI Xiaohong²,

ZOU Gaoxing¹, LIU Wenfeng²

(1. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the problem of electrostatic discharge in the process of production, storage, transportation and use of explosives, the electrostatic breakdown characteristics of air, carbon dioxide and helium under three temperature conditions of 0, 20, 40 °C and the pressure range between 0.05 and 0.15 MPa are studied to find a feasible way to suppress the excessively high electrostatic discharge voltage, and the electrostatic breakdown energy is calculated and compared. The results show that the electrostatic breakdown voltage of the three gases increases with the increase of the pressure. The electrostatic discharge voltage and energy of carbon dioxide are the highest under the same condition, while the discharge voltage of helium is the lowest among the three gases; with the increase of temperature, the electrostatic breakdown voltage of the three gases decreases, and the electrostatic breakdown voltage of the three gases reaches the minimum at 40 °C and 0.05 MPa. Therefore, an environment with low pressure, higher temperature, and low breakdown field strength should be selected as the electrostatic protection atmosphere environment. These research results may serve as data basis and theoretical support for selection of protective atmosphere environment in the production process of explosives.

收稿日期: 2020-12-03。 作者简介: 范鑫辰(1989—),男,助理研究员;刘文凤(通信作者),女,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52077163);西安近代化学研究所开放基金合作项目(SYJJ47)。

网络出版时间: 2021-03-03

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210303.1220.002.html>

Keywords: electrostatic discharge; typical gases; production of explosives; electrostatic protection

火炸药在生产、运输、存储过程中会不可避免地发生摩擦现象而产生静电荷,当静电荷累积较多时就会发生静电放电^[1],同时释放大量能量引爆火炸药^[2]。每年国内外都会发生大量因静电放电造成的含能材料^[3]爆炸事故,造成严重的经济损失和人员伤亡。据统计,我国火炸药生产中的意外起火事故有 10%~20%是因为静电放电造成的^[4]。我国某军工企业在单基无烟药生产混同工序中,因为传送带摩擦产生的静电电压过大,导致静电放电引发爆炸,造成 20 余人死亡,200 余人重伤,直接经济损失高达百万元。在世界范围内,美国十年间因为静电放电造成的火灾事故高达 116 起,法国统计有 40%的火炸药着火事故是由于静电放电引起^[5]。因此,研究不同环境下的静电放电特性,开辟抑制静电放电能量过高的新途径,对于科学研究和工程应用有重要意义^[6-7]。

火炸药在静电火花作用下发生爆炸的难易程度叫静电火花感度^[8],其中绝对静电感度是指引燃引爆某火药所需要的最小放电能量,又称为燃爆物质的最小点火能^[9]。目前,国际上均采用 50%发火概率下的静电能量表示样品的静电感度^[8]。火炸药的静电感度一直是国内外的研究热点,法国 Auzanneau 等人研究了放电电极的间距、形状、放电电容和电阻等因素对静电感度的影响规律,发现气体湿度较小时静电感度较高,随着气体湿度增大静电感度迅速降低^[10]。美国空军设计了静电感度测试系统,即用记忆示波器记录电压、电流和时间信号,并进行积分计算静电放电能量,用于测试火炸药生产、运输、使用过程中的标准静电感度^[11]。在国内,李德鹏等人进行了氮化铅、硝化棉、梯恩梯等火炸药的静电感度测试,发现火炸药的静电感度在 mJ 级呈概率分布^[12]。

目前国内外的火炸药防静电技术大体可分为三类:一是对火炸药进行抗静电剂包覆处理;二是对火炸药进行改性处理,如表面改性、改善晶型等;三是提供良好的防静电环境并设置严格的生产措施,如设备接地、增加环境湿度等^[9]。Talawar 等研究了聚维酮包覆火炸药后静电感度的变化,结果表明包覆后的叠氮化铅静电感度明显下降,但叠氮化银变化不明显,5-硝基四唑汞的静电感度则呈上升变化^[13]。余咸早研究了表面处理对火炸药静电感度

的影响,实验表明不同的表明活性剂和配方对静电感度有不同的影响^[14]。然而,包覆抗静电剂和火炸药粒子改性的手段往往只能针对特定的火炸药,且处理方法比较复杂;而提供防静电环境则大多只能根据经验处理,如增大湿度、减小流速以及将设备接地^[15-16]等,缺乏系统性。

为了寻找火炸药生产、运输等过程中更加有效的静电防护方法,探索抑制静电放电能量过高的可行途径,本文选择了 3 种火炸药工艺工程中所涉及的典型气氛环境——空气、二氧化碳以及氦气为研究对象,展开了静电击穿特性研究,通过测量 3 种气体在不同压强、温度下的静电击穿电压并计算对应的静电放电能量,探究气体种类、温度、压强等因素对静电放电能量的影响关系并分析其机理,以此寻找使静电放电能量最小的气氛条件,为火炸药工艺过程中静电安全评价提供理论基础和数据支撑。

1 实验方法

1.1 实验设备

图 1 所示为静电击穿测试平台,实验平台由静电发生器、示波器以及环境控制模块 3 部分构成。

静电发生器选用普瑞马电子有限公司的 PESD6030 智能静电发生器,其具体参数如表 1 所示,电流波形符合 IEC61000-4-2 标准^[17]。电极极性选择负极性,放电模式选用空气放电,放电方式选择单次触发,电子枪与电极板之间的间距为军工标准 0.05 mm。

表 1 静电发生器主要参数
Table 1 Main parameters of electrostatic generator

参数	数值或模式
电压范围/kV	0.2~20.0
电极极性	+, -, +/-, -/+
放电方式	1. 单次; 2. 手动; 3. 自动
增压范围/kV	0~10.0
放电模式	1. 接触放电; 2. 空气放电
放电电容/pF	150

示波器选用 Tektronix 示波器,并搭载一个 ETCR016 电流探头和一个 Tektronix TPP0201 电压探头,电流探头的精度为 0.01 A,不设置衰减;电压探头的精度为 1 V,衰减设为 10 倍。

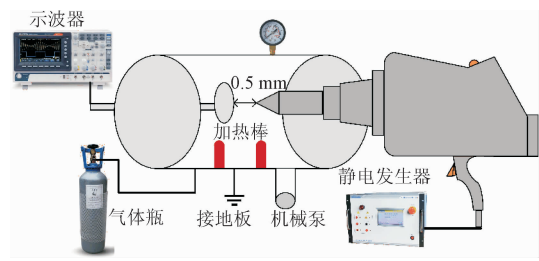


图 1 静电击穿实验平台
Fig. 1 Static breakdown platform

环境控制模块由实验腔体、机械泵、温度控制模块、气体瓶以及接地系统构成。实验腔体耐温范围为 60~200℃,耐压范围为 0.01~0.3 MPa,通过机械泵控制实验腔体内气压变换,采用温度控制模块对腔体内温度进行调控,气体瓶则用于更换实验腔体内气体种类,接地系统采用聚四氟乙烯接地板,以防止实验过程中外部静电荷的干扰。

1.2 实验方法

在恒温控压实验中,首先用机械泵将腔体抽至真空状态,然后注入实验气体到所需气压,并通过温度控制模块设置所需温度,静置 5 min,如发生热胀冷缩现象导致气压改变则适当抽气放气。本文采用台阶逐级加压法测试气体的静电击穿电压,每 0.1 kV 为一个台阶,每个电压等级测试 30 次,通过示波器观察是否出现击穿现象。当示波器波形出现下降脉冲则视为该电压等级发生了击穿,直到 30 次均击穿和 30 次均不击穿两个电压阈值的出现,以根据火炸药不同生产标准选择气氛环境。每次击穿后静置 30 s 等待气体恢复绝缘特性。当一个气压点实验完成后则保持温度不变继续注入气体到下一个实验气压。根据火炸药生产气压条件,选择实验气压范围为 0.05~0.15 MPa,共计 8 个气压点。

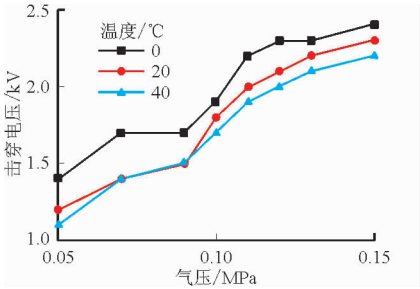
在恒压控温实验中,同样先用机械泵将实验腔体抽至真空状态,然后注入实验气体到所需气压,通过温度控制模块设置所需温度,静置 5 min,若发生热胀冷缩现象导致气压改变则适当抽气放气。采用台阶法测试击穿电压,当一组实验完成后则保持气压不变,通过温度模块改变温度至下一个实验温度点,静置 5 min,若发生热胀冷缩则再适当抽气放气。根据火炸药生产温度条件,实验选择 0、20、40℃ 3 个温度点。

2 实验结果与讨论

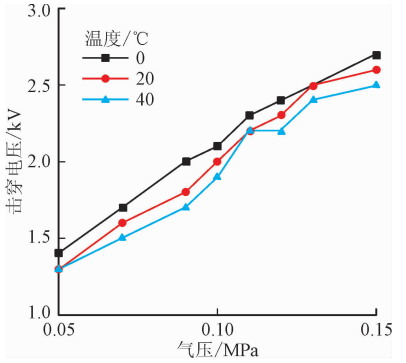
2.1 气压对静电击穿特性的影响

图 2 给出了 3 种气体在 3 个温度、不同气压下

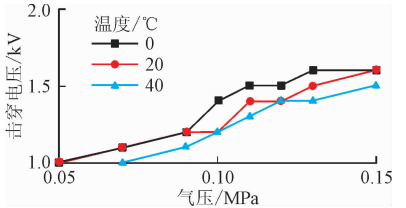
达到 100% 概率击穿的静电击穿电压。可以看出,随着气压上升,静电击穿电压逐渐增大。



(a) 气压对空气静电击穿电压的影响



(b) 气压对二氧化碳静电击穿电压的影响



(c) 气压对氦气静电击穿电压的影响

图 2 气压对 3 种典型气体静电击穿电压的影响

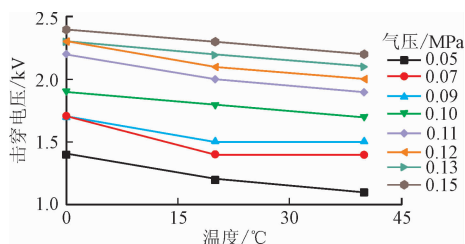
Fig. 2 Influence of pressure on electrostatic breakdown voltage of three typical gases

在常温(20℃)、一个大气压(0.1 MPa)下,空气、二氧化碳和氦气达到 100% 击穿概率的电压分别为 1.8、2.0、1.2 kV。而当气压升至 0.15 MPa 时,3 种气体达到 100% 击穿概率的电压值分别升至 2.3、2.6、1.6 kV。

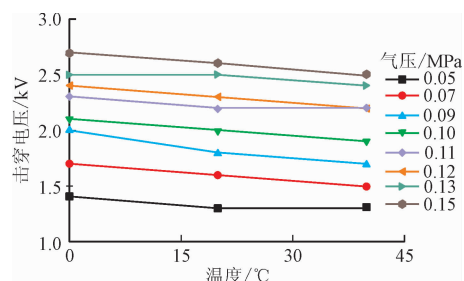
2.2 温度对静电击穿特性的影响

图 3 给出了 3 种气体在 8 种气压、不同温度下达到 100% 概率击穿的静电击穿电压。可以看出,随着温度上升,击穿电压逐渐下降。

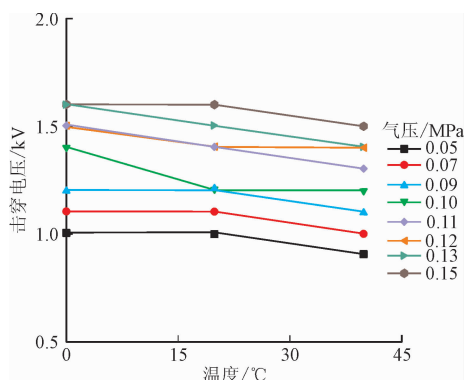
空气、二氧化碳以及氦气在一个大气压(0.1 MPa)下、0℃ 时达到 100% 概率击穿的电压分别为 1.9、2.1、1.4 kV,而在 40℃ 时就降为 1.8、1.9、1.2 kV。



(a) 温度对空气静电击穿电压的影响



(b) 温度对二氧化碳静电击穿电压的影响



(c) 温度对氮气静电击穿电压的影响

图3 温度对3种典型气体静电击穿电压的影响

Fig. 3 Influence of temperature on electrostatic breakdown voltage of three typical gases

2.3 气体种类对静电击穿特性的影响

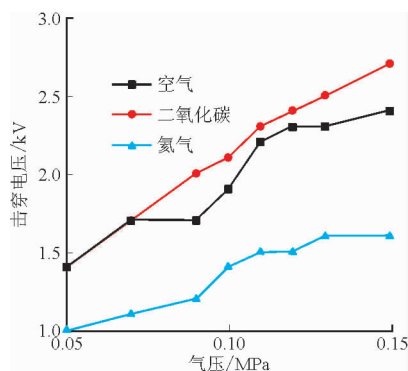
图4给出了不同气体种类下击穿电压的对比,图中电压均为3种气体在不同温度、压强下达到100%概率击穿的电压值。可以看出,相同条件下二氧化碳的静电击穿电压在3种气体中最大,而氮气的静电击穿电压最低。

2.4 气体的静电击穿能量对比

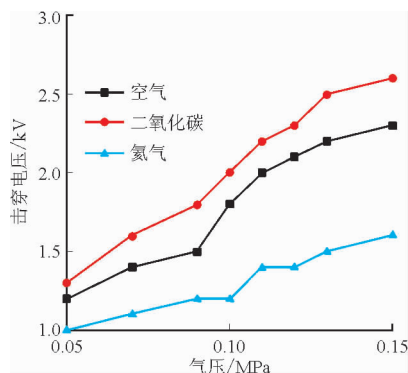
静电主要通过能量耦合的方式对火炸药产生影响,静电放电的能量包含冲击波能、光能、声能、热能等多种能量,其中对火炸药起主要作用的为焦耳热能,其可以通过能量公式计算

$$W = UIt \quad (1)$$

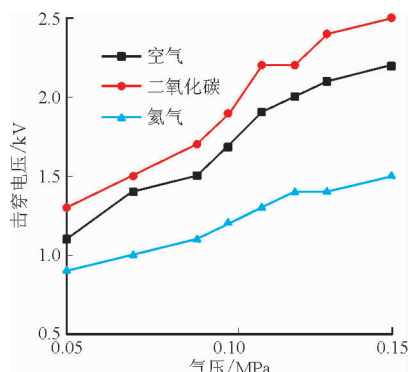
式中: W 为静电击穿能量; U 为击穿发生时板电极的瞬时电压; I 为击穿时的电流; t 为采样时间,本文



(a) 0 °C 下3种气体静电击穿电压对比



(b) 20 °C 下3种气体静电击穿电压对比



(c) 40 °C 下3种气体静电击穿电压对比

图4 3种气体静电击穿电压对比

Fig. 4 Comparison of electrostatic breakdown voltage of three gases

中采样时间为 $0.2 \mu\text{s}$ 。

图5给出了3种气体在不同环境达到100%概率击穿时的静电能量对比图。可以看出,二氧化碳的静电击穿能量在相同条件下是3种气体中最高的,而氮气的静电放电能量在相同条件下则最低,且在 40°C 、 0.05 MPa 条件下达到最低 0.07 mJ 。

从图5还可以看出,氮气的静电击穿能量在同样的环境条件下远小于空气和二氧化碳。在火炸药生产工艺中可选择氮气等静电放电能量低的气体作

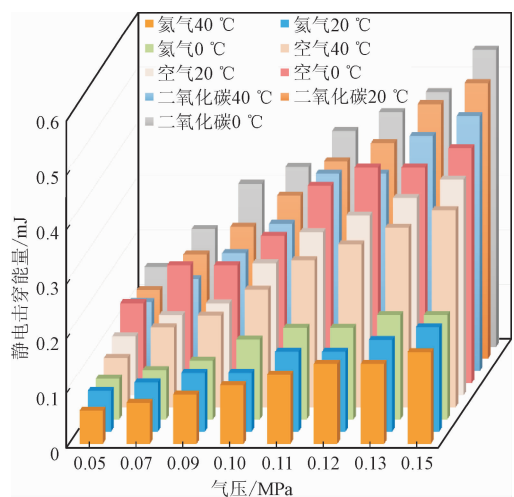


图 5 不同环境下静电放电能量对比

Fig. 5 Comparison of electrostatic discharge energy in different environments

为保护气体。

2.5 气体的低能量静电放电机理

气体的低能量静电放电需要同时满足较低的放电电压以及放电电流。气体的静电放电包含以下几个关键过程：阴极向气体注入静电荷、静电荷在电场的作用下输运以及与气体分子碰撞、电场畸变、形成电子崩^[18-19]。其基本过程可以描述为：阴极向气体发射静电荷，这些电荷作为初始电荷在电场的作用下向阳极移动，并与气体分子发生碰撞电离，当碰撞电离产生的电荷达到一定程度后，贯穿两级的电子崩形成，击穿也随之发生，物理模型如图 6 所示。

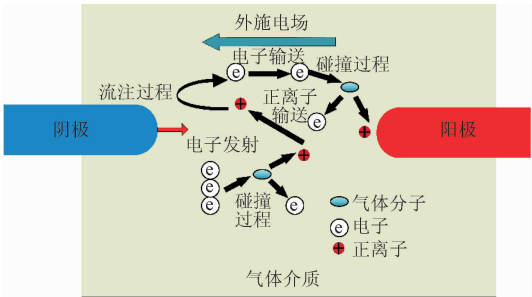


图 6 静电放电物理模型

Fig. 6 The model of electrostatic discharge

在分子运动论中，平均自由程 λ 指分子在连续两次碰撞间分子自由运动的平均路程^[20]。电子从阴极发射向阳极运动的过程中，会与气体分子发生碰撞电离产生二次电子继而产生电子崩。根据流注理论，当电子崩发展到一定程度后，其产生的畸变电场会造成足够的空间电离，从而发射出光子形成二次流注，引发击穿^[21]。当平均自由程较大时，根据

动能定理，电子在电场中有足够的加速距离积累较大的动能，与气体分子碰撞后会电离出更多的气体分子与二次电子，击穿容易发生；而当平均自由程较小时，电子无法积累足够的能量与气体分子发生碰撞电离，从而消弱了电离过程，击穿难以发生。因此，气体中载流子的平均自由程和碰撞电离系数会影响静电击穿过程。

首先，平均自由程的大小对击穿电压大小有重要影响。采用刚性球模型^[22]计算电子与气体分子之间的平均自由程。假设电子为标准刚性球，气体分子为半径 r 的标准刚性球，气体在整个腔体中分布均匀，分子浓度为 n ，如果电子在单位时间内与气体分子的有效碰撞总数为 Z ，且电子速度为 v ，则电子在电场中运动的平均自由程可表示为^[21]

$$\lambda = 1/\pi r^2 n = k_B T/\pi r^2 P \tag{2}$$

式中： r 为气体分子半径； k_B 为玻尔兹曼常数； T 为气体温度； P 为气体压强。

由式(2)可知，温度与气压会改变电子的平均自由程，在气体种类相同的情况下，即气体分子半径 r 不变时，平均自由程随温度的上升而增大，随气压的增大而减小。因此当气压增大时，静电击穿电压阈值逐渐增大，达到 100% 概率击穿的电压也逐渐上升；当温度上升时，静电击穿电压阈值下降，达到 100% 概率击穿的电压也逐渐减小。

其次，气体静电击穿电压与气体分子的碰撞电离系数相关^[23]。根据气体击穿的流注判据，电子崩的形成(即产生临界击穿现象)与碰撞电离系数呈反比。碰撞电离系数 α 指电子沿电场方向运动 1 cm 的行程所完成的碰撞次数的平均值。一个电子在气体介质中行进一个单位距离与气体分子的平均碰撞次数 $Z=1/\lambda$ ，因此，碰撞电离系数 α 可以表示为^[21]

$$\alpha = 1/\lambda \exp\left(-\frac{W_i}{qE\lambda}\right) \tag{3}$$

式中： λ 为电子的平均自由程； q 为电子所带电荷量； E 为外施电场场强； W_i 为电子在电场中行进 x 距离做的功。

将式(2)代入式(3)可得碰撞电离系数表达式为

$$\alpha = \frac{\pi r^2 P}{k_B T} \exp\left(-\frac{\pi r^2 P \phi_i}{k_B T F}\right) \tag{4}$$

式中： F 为电子所受电场力； ϕ_i 表示电通量。

以空气为例，选择 20 °C 温度条件，0.1 MPa 气压条件，代入式(4)可得此时的碰撞电离系数约为 34.6 cm⁻¹；当气压升为 0.15 MPa 时，碰撞电离系数降为 20.9 cm⁻¹，因此击穿电压升高。

另外,静电击穿过程与电极间起晕电压有关。由于尖-板电极之间是极不均匀电场,因此电晕放电的影响也应该考虑。根据 Peek 定律^[24-25],起晕电场强度 E_s 可以表示为

$$E_s = E_0 m \delta [1 + K/(\delta R)^{1/2}] \quad (5)$$

式中: E_0 为均匀电场及标准气压、温度下放电间隔为 1 cm 时的击穿场强; m 为电极表面粗糙度; K 为常数; δ 为气体分子相对密度; R 为电极直径。在相同条件下,氢气的 E_0 是 3 种气体中最低的,因此起晕电场强度最低,击穿电压最低。

综上所述,高温、低气压、高碰撞电离系数、低电离能等都会造成较低的静电放电能量,因此火炸药生产、输运过程中应尽量选择满足这些条件的气氛环境。

3 结 论

针对火炸药生产工艺中涉及的 3 种典型气体——空气、二氧化碳以及氢气展开了静电击穿特性研究,并计算了静电放电能量,分析静电击穿的物理过程,得到如下结论。

(1) 由于温度的下降和气压的上升会减小电子的平均自由程,削弱电离过程,使击穿的发生需要更高的电场,因此,随着气压的上升或者温度的下降,100% 发生静电击穿的电压阈值增加,同等级电压击穿概率下降。

(2) 气体种类对静电击穿电压的影响主要是载流子电离系数的作用,二氧化碳的静电击穿电压大于空气和氢气,而氢气的静电击穿电压是 3 种气体中最低的。

(3) 基于发生 100% 放电概率的静电击穿电压计算得到的放电能量,得到氢气在 40 °C、0.05 MPa 条件的放电能量为 0.07 mJ,远小于常用火炸药的静电感度。因此在火炸药生产工艺中,可选择低压、较高温度、低击穿场强气体作为静电防护气氛环境。

参考文献:

- [1] 陆明,赵省向,陈晶. RDX 混合炸药的摩擦静电起电性能测定与分析 [J]. 含能材料, 2008, 16(6): 708-711.
LU Ming, ZHAO Shengxiang, CHEN Jing. Measurement and analysis of the frictional static electricity characteristics of composite RDX [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(6): 708-711.
- [2] PINGALI K C, CHATARLA S K, TRACY B A, et al. Sensing electrostatic charge generation during gran-

ular flow of pharmaceutical powders in a flow tester [J]. Journal of Pharmaceutical Innovation, 2016, 11(3): 179-188.

- [3] ZEMAN S, KOCÍ J. Electric spark sensitivity of poly-nitro compounds: part IV A relation to thermal decomposition parameters [J]. 含能材料, 2000, 8(1): 18-26.
ZEMAN S, KOCÍ J. Electric spark sensitivity of poly-nitro compounds: part IV A relation to thermal decomposition parameters [J]. Energetic Materials, 2000, 8(1): 18-26.
- [4] 李志敏,张同来,杨利,等. 火炸药静电性能研究进展 [J]. 科技导报, 2011, 29(26): 74-79.
LI Zhimin, ZHANG Tonglai, YANG Li, et al. Progress on electrostatic performances of explosive [J]. Science & Technology Review, 2011, 29(26): 74-79.
- [5] 钱仲. 发射药生产防静电问题的研究 [J]. 军械工程学院学报, 2000, 12: 143-148.
QIAN Zhong. Research on anti-static problems in propellant production [J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2000, 12: 143-148.
- [6] MANNING H L K, TEN KATE I L, BATTEL S J, et al. Electric discharge in the Martian atmosphere, Paschen curves and implications for future missions [J]. Advances in Space Research, 2010, 46(10): 1334-1340.
- [7] ELAKSHAR F F, GARAMOON A A. Measurements of the breakdown potentials for different cathode materials in the Townsend discharge [J]. Fizika A, 2002, 11(1): 81-90.
- [8] 曹海峰,王国立. 火炸药静电感度研究的进展 [J]. 矿冶, 2002(1): 17-20.
CAO Haifeng, WANG Guoli. Progress in research on sensitivity of powder and explosive to static electricity [J]. Mining and Metallurgy, 2002(1): 17-20.
- [9] 马峰. 火炸药生产中的静电危害及其防护 [J]. 安防科技, 2004(5): 44-45.
- [10] AUZANNEAU M, ROUX M. Electric spark and ESD sensitivity of reactive solids (primary or secondary explosive, propellant, pyrotechnics): part II Energy transfer mechanisms and comprehensive study on E50 [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1995, 20(2): 96-101.
- [11] MELLOR M, STOOPS D R, RUDY T P, et al. Optimization of spark and ESD propellant sensitivity tests: a review [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1990, 15(1): 1-7.
- [12] 李德鹏,汪佩兰,徐立新. 火炸药相对和实际静电感

- 度的对比分析 [J]. 兵工学报, 1997(2): 162-164.
- LI Depeng, WANG Peilan, XU Lixin. Comparison of the relative and real electrostatic sensitivities of propellants and explosives [J]. *Acta Armamentarii*, 1997 (2): 162-164.
- [13] TALAWAR M B, AGRAWAL A P, ANNIYAPPAN M, et al. Primary explosives: electrostatic discharge initiation, additive effect and its relation to thermal and explosive characteristics [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 137(2): 1074-1078.
- [14] 余咸早. 太空的降静电表面处理 [J]. 火炸药学报, 2003(4): 55-56.
- YU Xianhan. Surface treatment of PETN via decreasing static electricity [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2003(4): 55-56.
- [15] KENT R, RAT R. Static electricity phenomena in the manufacture and handling of solid propellants [J]. *Journal of Electrostatics*, 1985, 17(3): 299-312.
- [16] 孙德强, 高明, 郝新明, 等. 对火工生产静电的危害及对策措施的研究与探讨 [J]. 爆破器材, 2009, 38 (3): 22-24.
- SUN Deqiang, GAO Ming, HAO Xinming, et al. Study on the hazard and countermeasures of static electricity in the initiating explosive device production [J]. *Explosive Materials*, 2009, 38(3): 22-24.
- [17] YUAN Zhiyong, LI Tun, HE Jinliang, et al. New mathematical descriptions of ESD current waveform based on the polynomial of pulse function [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2006, 48(3): 589-591.
- [18] GHERARDI N, MASSINES F. Mechanisms controlling the transition from glow silent discharge to streamer discharge in nitrogen [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2001, 29(3): 536-544.
- [19] OSMOKROVIC P. Mechanism of electrical breakdown of gases at very low pressure and interelectrode gap values [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1993, 21(6): 645-653.
- [20] BHATTACHARJEE S, DEY I, PAUL S. Electron random walk and collisional crossover in a gas in presence of electromagnetic waves and magnetostatic fields [J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20(4): 042118.
- [21] RAIZER Y P, BRAUN C. Gas discharge physics [J]. *Applied Optics*, 1991, 31: 2400-2401.
- [22] ZIERING S, EK F. Mean-free-path definition in the Mott-Smith shock wave solution [J]. *Physics of Fluids*, 1961, 4(6): 765.
- [23] OSMOKROVIC P, VASIC A. Anomalous Paschen effect [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, 33(5): 1672-1676.
- [24] 陈维江, 曾嵘, 贺恒鑫. 长空气间隙放电研究进展 [J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1281-1295.
- CHEN Weijiang, ZENG Rong, HE Hengxin. Research progress of long air gap discharges [J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(6): 1281-1295.
- [25] DASTOORI K, KOLHE M, MALLARD C, et al. Electrostatic precipitation in a small scale wood combustion furnace [J]. *Journal of Electrostatics*, 2011, 69(5): 466-472.

(编辑 亢列梅)