

文章编号: 1006-9941(2013)02-0244-05

## 火工药剂静电积累量的测试

周铭锐,李志敏,张同来,武碧栋,杨利,张建国,周遵宁

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

**摘要:** 为测试常见火工药剂的静电积累量,探讨测试过程中各种因素对静电积累量的影响。选取 420~840  $\mu\text{m}$  的石英砂为标准试样,在不同环境温湿度、滑槽材质、滑槽长度及倾斜角度、试样粒度和用量等条件下,对其静电积累量进行了测试。结果表明:试样量越多,积累的电荷量越大;静电积累量与环境温度和湿度有着良好的线性关系,温度越高静电积累量越大,湿度越大静电积累量越少;静电积累量随粒度的增大而减小,可拟合成指数变化关系;滑槽的材质,长度和倾斜角度对于静电积累量有着明显的影响。在此基础上,对斯蒂芬酸铅、叠氮化铅、苦味酸钾以及高氯酸碳酰肼系列火工药剂的电阻率与静电积累量进行了测试。表明,这几种火工药剂均属于高电阻率的物体;在所测药剂中,斯蒂芬酸铅的静电积累量最高;添加了晶型控制剂糊精与聚乙烯醇的叠氮化铅静电积累值明显小于纯叠氮化铅,糊精与聚乙烯醇可以作为良好的抗静电剂使用。

**关键词:** 物理化学;火工药剂;石英砂;静电积累量;电阻率**中图分类号:** TJ55;O64**文献标识码:** A**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.02.018

## 1 引言

火炸药属高绝缘材料,电阻率一般在  $10^{12} \sim 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$  之间,因此在制药、倒药、混药、轮碾、粉碎、切片过筛、气流输送、气力粉碎及炮弹装药等许多工艺过程中,由于人体的各种活动、工装机具的接触-分离和被加工对象之间的摩擦剥离等,导致电子转移产生静电荷,当两物质分开时,电荷未能及时导出,可能产生静电积累<sup>[1-3]</sup>;绝大多数火炸药不仅是高绝缘易起静电的粉体,其总的表面积非常大,而且也都属于易燃易爆的活性介质,当静电积累到一定程度就会与周围物体形成一定场强,当静电场强达到环境击穿场强,很容易发生静电放电导致的燃爆灾害事故<sup>[4-5]</sup>。据统计,由于静电而引起的火炸药燃爆事故占火炸药生产总事故的 10% 左右,国内外曾发生过很多起由于物质静电积累而导致的故事,造成大量人员伤亡以及财产的损失。典型事例介绍如下:

1969 年我国某化工厂单基无烟药混同工序,在混药时突然发生爆炸,造成 27 人死亡,直接经济损失近

百万元。经过分析,专家组认为是药剂与输送带之间的机械摩擦产生静电火花而引发事故的;1985 年 1 月 11 日,美国部署在前西德的潘兴 II 导弹发生发动机爆炸事故,造成 3 人死亡,16 人受伤,损失惨重。经过深入的调查研究,事故原因归结为复合材料壳体与运输车上的支架摩擦起电,在推进剂药柱局部形成高电场,击穿药柱并形成静电放电,药柱被点燃,进而发生爆炸<sup>[6]</sup>。

从上述事例可以看出火炸药一旦积累了一定量静电荷将很有可能成为危险源,关于这方面研究已有不少报道。刘钧等<sup>[7]</sup>对不同粒度 RDX 静电积累量进行了测试,发现粒度越大其带电量越小。陆明等<sup>[8]</sup>的研究也表明,静电积累值随着 RDX 的质量增加而线性增加,存在一个角度对应着最大静电量值,当滑槽角度小于这个角度时,静电积累量随着角度的增加而上升,当滑槽角大于这个角度后,电量又迅速下降。本工作在前人的基础上选取与火工药剂电阻接近的石英砂为试验样品,研究了不同测试条件下的静电积累量及其变化规律,为减少静电放电引爆火工药剂事故的发生,提高火工药剂在静电环境的安全性,提供一定的基础理论指导。

## 2 实验部分

### 2.1 样品准备

实验所需试样石英砂均为市售分析纯,将所买石英砂用稀硝酸浸泡洗除表面杂质,用清水洗净烘干。用不

**收稿日期:** 2012-07-03; **修回日期:** 2012-11-11**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目**作者简介:** 周铭锐(1990-),男,硕士研究生,从事火工药剂静电性能研究。e-mail: zmrbit@163.com**通讯联系人:** 张同来(1960-),男,教授,研究方向为含能材料制备、性能及应用。e-mail: ztbit@bit.edu.cn

锈钢筛对产品进行干态筛分,得到不同粒度的样品,放入干燥器中,待用。在对石英砂静电积累量测试过程中均选择粒度为 110~420  $\mu\text{m}$  的石英砂进行测量。

实验用高氯酸碳酰肼系列、叠氮化铅以及斯蒂芬酸铅等火工药剂均根据成熟的合成工艺路线制得<sup>[9-11]</sup>。同样用不锈钢筛对产品进行筛分,得到 90~380  $\mu\text{m}$  的产品,放入干燥器中,待用。

## 2.2 静电积累量测试

静电积累量是表征火工药剂与其他物质摩擦产生静电并积累的难易程度的物理量,符号为  $Q$ ,单位为  $\text{nc} \cdot \text{g}^{-1}$ 。静电积累量测试原理如图 1 所示。将一定量的样品由滑盒 1 倒入某种具有一定长度与倾斜角度的滑槽 2 内,样品从滑槽上滑下,与滑槽表面摩擦带上一定量的静电荷,带电的样品滑入接药容器法拉第筒 4 中,数字天平 5 可记录样品的质量,电荷量则由数字电荷仪 7 测出,数字电压仪 6 则读出样品经过滑槽底端时所带的电压(由电压探头 3 采集),这三组数据通过计算机数据采集与软件系统 8 输入计算机中,最后由计算机 9 采集、处理数据。图 2 为测试装置示意图。

实验选用了夹布胶木盛药盒(滑盒),铝、夹布胶木、有机玻璃、普通牛皮纸、虫胶漆牛皮纸、不锈钢和碳钢等不同材质的滑槽。在实验过程中除单独列出外,其余测试条件均为,滑槽材料虫胶漆牛皮纸,倾斜角度  $45^\circ$ ,长度 60 cm,样品量 5 g,石英砂粒度 200~240  $\mu\text{m}$ 。

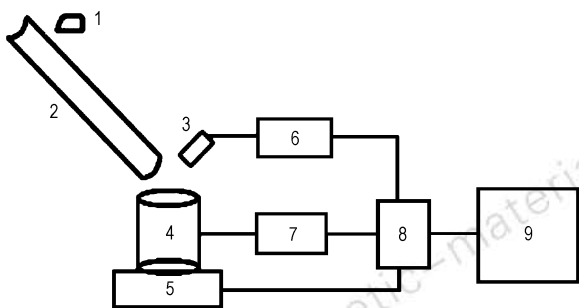


图 1 静电积累量测试原理图

1—滑盒, 2—滑槽, 3—电压探头, 4—法拉第筒, 5—数字天平, 6—数字电压仪, 7—数字电荷仪, 8—计算机数据采集与软件系统, 9—计算机

Fig. 1 Schematic diagram of the electrostatic accumulation test apparatus

1—slip box 2—chute, 3—voltage probe, 4—faraday cup, 5—digital balance, 6—digital voltage meter, 7—digital charge meter, 8—computer data acquisition software system, 9—computer



图 2 静电积累量测试装置图

Fig. 2 Test apparatus for electrostatic accumulation

## 3 结果与讨论

### 3.1 粒度对石英砂静电积累量的影响

选取表 1 所示 4 种粒度规格的石英砂在相同条件下(测试条件:环境温度  $19^\circ\text{C}$ ,湿度 30%)对其静电积累量进行测试。图 3 为石英砂静电积累量随粒度的变化关系。由图 3 可知,随着石英砂粒度的增大,其静电积累量逐渐减少。当石英砂粒度为 125  $\mu\text{m}$  左右时,积累的电荷量最大为  $-5 \text{ nc} \cdot \text{g}^{-1}$ ,粒度达到 400  $\mu\text{m}$  时,静电积累量已经减少到不足  $-0.5 \text{ nc} \cdot \text{g}^{-1}$ 。这主要是由于随着石英砂粒度的减少,其比表面积越来越大,导致颗粒与滑槽的接触面积增大,摩擦面积加大,静电积累量增加。另外,研究测试了试样通过滑槽的下滑时间,并据此计算出不同粒度石英砂与滑槽表面的摩擦系数,结果见表 1,在其他条件相同的情况下,粒度越小其下滑时间越长,摩擦系数越大,石英砂带电量越高,这与前面利用经验解释的结果一致。

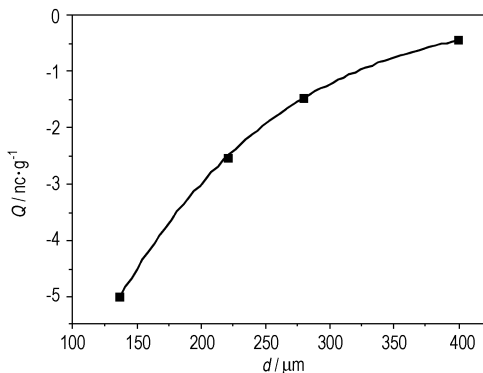


图 3 粒度对石英砂静电积累量的影响

Fig. 3 Effect of particle size on electrostatic accumulation of quartz

表 1 不同粒度石英砂通过滑槽的下滑时间和摩擦系数

Table 1 Sliding in time and the friction coefficient of different particle sizes of quartz

particle size/ $\mu\text{m}$	sliding time/ms	friction coefficient
380 ~ 420	480	0.26
250 ~ 290	529	0.39
200 ~ 240	586	0.50
110 ~ 150	639	0.58

### 3.2 质量对石英砂电荷量的影响

石英砂质量对其电荷量的影响规律如图 4 所示(测试条件:环境温度  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 24%,滑槽材料:不锈钢滑槽)。由图 4 可知,当试样用量为 2.5 g 时,积累的电荷量为  $-2\text{ nc}$ 。随着石英砂质量的增大,电荷量增加,当质量为 12.5 g 时,累计静电量达到  $-8\text{ nc}$  以上。原因是,随着石英砂用量的增加,与滑槽摩擦的量增加,易产生静电荷,使电荷量增加。

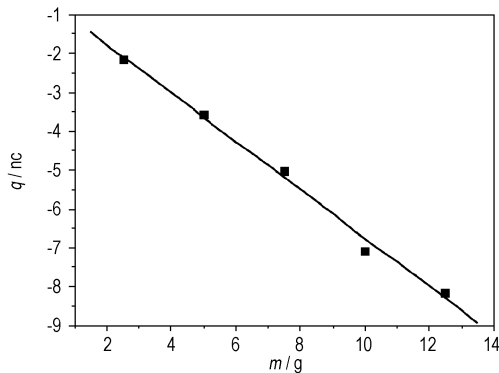


图 4 质量对石英砂电荷量的影响

Fig. 4 Effect of quartz mass on charge quantity of quartz

### 3.3 滑槽长度对石英砂静电积累量的影响

滑槽长度对石英砂静电起电量的影响规律如图 5 所示(测试条件:环境温度  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 38%)。由图 5 可知,下滑长度为 10 cm 时,石英砂摩擦起电量为  $-1.1\text{ nc}\cdot\text{g}^{-1}$ ,随着下滑长度的增加,其静电积累量呈指数增加。当下滑长度到了 80 cm 的时候,其质量电荷密度已经达到  $-2.8\text{ nc}\cdot\text{g}^{-1}$  左右。这是因为,下滑长度越长,其摩擦路途越长,下滑过程中积累的静电荷就越多,同时也增加了下滑时间,导致在下滑过程中流散的静电荷也有所增加,所以电荷增加速度渐趋缓慢。

### 3.4 滑槽倾斜角度对石英砂静电积累量的影响

滑槽倾斜角度对石英砂静电积累量的影响规律如图 6 所示,(测试条件:环境温度  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度

24%,滑槽材料:普通牛皮纸、导电胶皮、不锈钢)。测试结果表明:随着滑槽角度的增加,积累的电荷量越来越少。这是因为,角度越大,下滑速度越快,介质与滑槽未能充分摩擦便滑入法拉第筒中,导致部分介质没有充分带电。而通过这三种滑槽对比来看,普通牛皮纸滑槽受角度的影响最大且最容易积累静电荷,当滑槽倾斜角度从  $30^{\circ}$  增大到  $65^{\circ}$  时,石英砂静电积累量降低了近三分之一;而不锈钢滑槽由于本身可以导电,不容易积累静电荷,样品在整个下滑过程中产生的积累量很少,并且随滑槽倾斜角度的变化影响也较小。

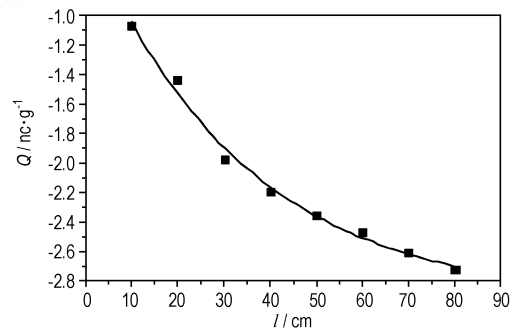


图 5 下滑长度对石英砂静电积累量的影响

Fig. 5 Effects of flume length on electrostatic accumulation of quartz

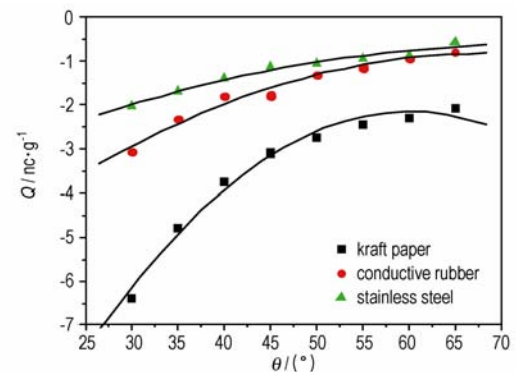


图 6 滑槽角度对石英砂静电积累量的影响

Fig. 6 Effect of inclination of flume on electrostatic accumulation of quartz

### 3.5 滑槽材质对石英砂静电积累量的影响

滑槽材质不同,其静电积累量值往往有很大差别。表 2 给出了几种常见滑槽材质对石英砂静电积累量的影响结果,(测试条件:环境温度  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 26%)。从表 2 中可以看出,不锈钢与碳钢滑槽的静电积累量只有  $-0.71$ ,  $-0.57\text{ nc}\cdot\text{g}^{-1}$ ,而乳胶皮与有机玻璃等滑槽产生的积累电荷量比不锈钢产生的积累电荷量 6 倍还多。这是因为在其他条件都固定的情况下,石英砂带电量的大小决定于两者摩擦力的大小,

摩擦系数越大,石英砂所带电量越高。因此火炸药在过筛和使用过程中要慎重选择滑槽材料,在与之接触较多的场合,尽量避免使用与之摩擦后带电量高的材料。

表 2 滑槽材质对石英砂静电积累量的影响

Table 2 Effect of material of flume on electrostatic accumulation of quartz

number	chute materials	charge mass density/ $\text{nc} \cdot \text{g}^{-1}$
1	stainless steel	-0.71
2	shellac varnish kraft paper	-2.69
3	kraft paper	-3.08
4	conductive rubber	-2.06
5	insulating rubber	-1.35
6	emulsion skin	-4.78
7	carbon steel	-0.57
8	organic glass	-4.46

### 3.6 温湿度对石英砂静电积累量的影响

湿度对石英砂静电积累量的影响规律如图 7 所示(测试条件:环境温度 18 °C)。测试结果表明:石英砂的静电积累量与环境湿度有着良好的线性关系。主要原因是因为当环境湿度较高时,物体吸附的水分子增多,导致介质物体表面电导率提高,从而使静电荷泄漏能力增强,使静电荷的衰减速率大大加快,有效地限制了静电积累的产生。环境温度对石英砂静电积累量的影响要小于湿度,研究在相对湿度为 36% 的条件下测试了不同环境温度下石英砂的静电积累量,结果如图 8 所示。测试结果表明:石英砂的带电量随着温度的增加而升高,并且其线性趋势非常良好。这是因为在空气湿度不变的情况下,环境温度的改变能够引起杂质迁移率的改变以及表面吸附水的变化,从而使药剂电阻率发生变化,影响静电积累量。

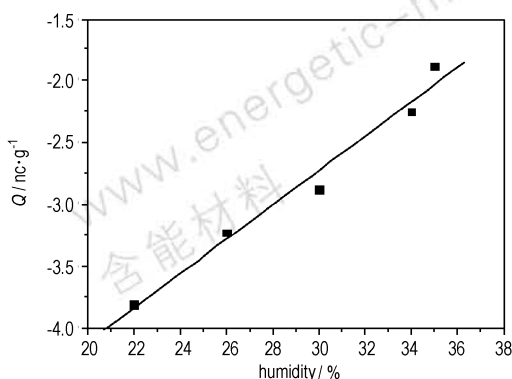


图 7 相对湿度对石英砂静电积累量的影响

Fig.7 Effect of humidity on electrostatic accumulation of quartz

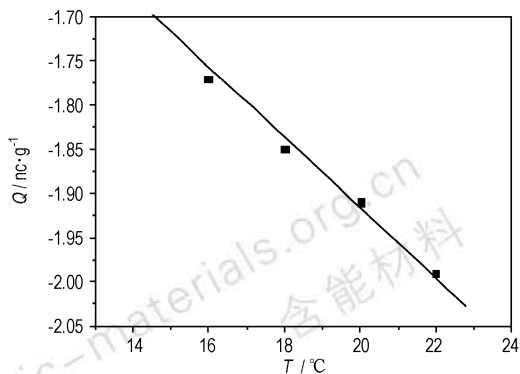


图 8 环境温度对石英砂静电积累量的影响

Fig.8 Effect of environment temperature on electrostatic accumulation of quartz

### 3.7 常见火工药剂的电阻率与静电积累量

对叠氮化铅、斯蒂芬酸铅、苦味酸钾和高氯酸碳酸酐过渡金属配合物系列火工药剂的电阻率及静电积累量进行了测试,测试结果见表 3(测试条件:环境温度 12 °C,湿度 38%,电阻率测试电压为 100 V)。从表 3 可以看出,火工药剂均属于高电阻率物体,其电阻率最高的甚至会达到  $10^{15}$  数量级。对于斯蒂芬酸铅(LTNR)来说,相同条件下其静电积累量最高,因此在使用过程中要特别小心。而加了晶型控制剂糊精与聚乙烯醇的叠氮化铅(LA),其静电积累值明显小于纯叠氮化铅,因此糊精与聚乙烯醇可以作为良好的抗静电剂使用。

表 3 常见火工药剂的电阻率与静电积累量

Table 3 Resistivity and electrostatic accumulation of the common initiating explosives

name	surface resistivity / $\Omega$	volume resistivity / $\Omega \cdot \text{cm}$	charge mass density / $\text{nc} \cdot \text{g}^{-1}$
GTX	$2.09 \times 10^{13}$	$6.94 \times 10^{15}$	3.21
LA	$9.18 \times 10^{13}$	$7.56 \times 10^{14}$	8.10
LTNR	$3.72 \times 10^{14}$	$1.67 \times 10^{14}$	-10.18
dextrin LA	$2.77 \times 10^{12}$	$3.19 \times 10^{12}$	-3.18
polyvinyl alcohol LA	$1.97 \times 10^{15}$	$8.86 \times 10^{15}$	7.92
GTM	$4.61 \times 10^{14}$	$1.47 \times 10^{15}$	1.6
GTN	$2.22 \times 10^{13}$	$8.77 \times 10^{13}$	3.58
KPA	$7.65 \times 10^{11}$	$2.53 \times 10^{12}$	-

## 4 结论

(1) 静电积累量随着滑槽材质的变化会发生大的改变,且与环境温度、滑槽长度和样品质量成正比,与环境湿度、滑槽倾斜角度和样品粒度成反比。

(2) 对常见火工药剂如斯蒂芬酸铅、叠氮化铅系列以及高氯酸碳酰肼系列起爆药的电阻率与静电积累量进行了测试, 结果发现, 常见起爆药均属于高电阻率物质, 最高可达  $10^{15}$  数量级, 而斯蒂芬酸铅在相同条件下最易积累静电荷。

(3) 糊精与聚乙烯醇的加入能够很大程度降低叠氮化铅的静电积累量。

#### 参考文献:

- [1] 马蜂. 火炸药生产中的静电危害及其防护[J]. 安防科技, 2004, (5): 44-45.  
MA Feng. Electrostatic hazard and its protection of the explosive production[J]. *Security and Safety Technology Magazine*, 2004, (5): 44-45.
- [2] 李海军, 姬志杰, 杨虎林. 对火、化工领域用静电安全技术的探讨[J]. 国防技术基础, 2009, (4): 50-53.  
LI Hai-jun, JI Zhi-jie, YANG Hu-lin. Discussed the electrostatic security in the fire and chemical fields[J]. *Technology Foundation of National Defence*, 2009, (4): 50-53.
- [3] 孙德强, 高明, 郝新明. 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 De-qiang, GAO Ming, HAO Xin-ming. Countermeasures research and discussion of the harm of static in fire explosive production work[J]. *Demolition Equipments and Materials*, 2009, 38(3): 22-24.
- [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 Zhi-min, ZHANG Tong-lai, YANG Li, et al. Progress on electrostatic performances of explosive[J]. *Science & Technology Review*, 2011, 29(26): 74-79.
- [5] 刘尚合, 宋学君. 静电及其研究进展[J]. 自然杂志, 2007, 29(2): 63-69.  
LIU Shang-he, SONG Xue-jun. Progress in electrostatic and related research[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2007, 29(2): 63-69.
- [6] 刘尚合, 武占成. 静电放电及危害防护[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.  
LIU Shang-he, WU Zhan-cheng. Electrostatic discharge and its hazard protection[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunication Press, 2004.
- [7] 刘钧, 张立, 费颖. RDX 炸药摩擦静电带电量测试研究[J]. 煤矿爆破, 2006, (3): 1-4.  
LIU Jun, ZHANG Li, FEI Ying. Study on testing the quantity of frictional static electricity of RDX[J]. *Coal Mine Blasting*, 2006, 74(3): 1-4.
- [8] 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 (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(6): 708-711.
- [9] 刘自汤, 劳允亮. 起爆药实验[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.  
LIU Zi-tang, LAO Yun-liang. Experiment of primary explosive[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995.
- [10] 张志刚, 张建国, 张同来, 等. 新型起爆药 GTX 的制备工艺与性能研究[J]. 含能材料, 2001, 9(2): 49-52.  
ZHANG Zhi-gang, ZHANG Jian-guo, ZHANG Tong-lai, et al. Preparation technique and explosive properties of [Zn(CHZ)<sub>3</sub>](ClO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2001, 9(2): 49-52.
- [11] 齐书元. 高氯酸三碳酰肼合锌的制备、性能及应用研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2010.  
QI Shu-yuan. Study on preparation, properties and application of zinc tri(carbohydrazide) perchlorate[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010.

## Electrostatic Accumulation Test of Initiating Explosives

ZHOU Ming-rui, LI Zhi-min, ZHANG Tong-lai, WU Bi-dong, YANG Li, ZHANG Jian-guo, ZHOU Zun-ning

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to test the electrostatic accumulation of common initiating explosives, the influences of various factors were discussed including temperature, humidity, chute material, length, inclination of flume, quartz mass and size of quartz sand. Results show that the amount of charge increases with the increase of the quartz mass. The electrostatic accumulation is linear relation with the environment temperature and humidity, and exponential relation with the sample size. The smaller the particle size, the more electrostatic accumulation. In addition, the chute material, length and inclination of flume also have a great influence to the electrostatic accumulation. On this basis, the resistivity and electrostatic accumulation of the common initiating explosives such as lead styphnate, lead azide and perchloric acid carbon hydrazide series were tested. Results show that those initiating explosives are high resistivity objects, and the lead styphnate can be accumulated static electrostatic easily. The lead azide with crystal type control agent dextrin and polyvinyl alcohol can be reduced the electrostatic accumulation obviously, and dextrin and polyvinyl alcohol can be used as antistatic agent.

**Key words:** physical chemistry; initiating explosives; quartz sand; electrostatic accumulation; electrical resistivity

**CLC number:** TJ55; O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.02.018