

文章编号: 1006-9941(2017)06-0515-05

火炸药粉体静电带电监测方法对比实验研究

卫水爱^{1,2}, 白春华¹

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 兵器工业安全技术研究所, 北京 100053)

摘要: 为了安全、准确地监测火炸药粉体静电放电引发燃烧爆炸风险, 针对静电场强监测、法拉第筒电荷量监测及感应电流积分电荷量监测等三种方法, 建立了相应的实验装置。采用代用材料方式, 对不同方法获取静电场数据的准确性、静电带电监测的可靠性进行了对比实验研究, 并评估了监测系统的安全性。结果表明, 在料仓中粉堆高度为 200 mm 时, 粉堆表面监测到的场强 (2160 kV) 仅为粉堆底部场强 (14709 kV) 的 1/7, 粉堆高度为 100 mm 时粉堆表面的场强数据与标定数据相差 20 倍, 不能实现对静电放电风险的准确、可靠监测。法拉第筒电荷量监测方法及感应电流积分电荷量监测方法的监测数据准确, 可以实现对静电场强的可靠监测, 但法拉第筒电荷量监测系统自身存在静电放电风险, 而感应电流积分电荷量监测系统安全性较好。

关键词: 火炸药; 静电; 场强监测; 法拉第筒; 感应电流; 电荷量监测

中图分类号: TJ55; TM151

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.06.012

1 引言

静电放电是引发火炸药燃烧爆炸事故的重要致灾源, 某军工企业曾经在单基发射药混同工序由于静电放电造成了 27 人死亡的严重事故^[1]。料仓作为事故高发设备, 防止其静电放电是重要研究方向。料仓的静电放电有两种, 一是料仓的火花放电, 可通过接地消除该风险。二是粉堆场强超过空气击穿阈值的锥形放电, 可通过实时获取静电场强, 并限制其不超过空气击穿阈值消除该风险。

静电场强的获取方法有两种, 一是静电场强监测方法, 有学者对奥克托今(HMX)的静电进行了监测^[2]研究, 但尚未见到监测准确性、有效性的研究报道。二是孙可平等^[3]提出的以电荷量为参量、仿真计算为手段的方法, 其关键是静电电荷量的监测。电荷量的监测有法拉第筒法和感应电流积分法。法拉第筒法已应用多年, 许多学者采用该方法测量了含能材料的静电电荷量^[4-6]。感应电流积分法是作者研究开发的^[7], 通过测量料仓内壁的感应电流, 并对其积分, 根据 $Q = \int_0^t Idt$, 得到粉体的电荷量。上述两种方法测试数

据的一致性和安全性, 尚未见到报道。

本研究设计并建立了实验装置, 采用代用材料方式, 对静电场强监测、法拉第筒和感应电流积分静电电荷量监测三种方法进行了对比实验, 开展了数据准确性、监测系统安全性、静电放电风险判定的可靠性分析研究, 得出适用于火炸药研制生产过程的静电带电监测方法, 为防止火炸药粉体放电提供监测手段。

2 实验

2.1 静电场强监测实验

2.1.1 装置与仪器

实验装置包括三个部分: 滑槽、料仓、10 只静电场强传感器, 组成如图 1 所示。

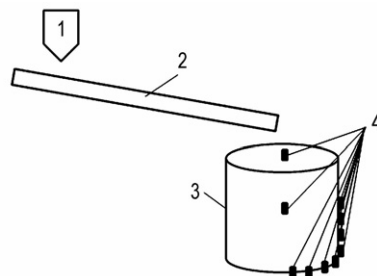


图 1 静电场强监测实验装置示意图

1—粉体容器, 2—滑槽, 3—料仓, 4—静电场强传感器

Fig. 1 Schematic diagram of testing device for electrostatic field strength

1—container of powder, 2—chute, 3—storage bin, 4—electrostatic field strength probe

收稿日期: 2016-11-07; 修回日期: 2017-02-07

基金项目: 科技部国家重点实验室自主课题-爆炸安全理论与技术研究 (ZDKT009-02)

作者简介: 卫水爱 (1981-), 女, 高级工程师, 主要从事燃烧爆炸品静电防护技术研究。e-mail: 53064070@qq.com

滑槽用于粉体的静电起电,材料采用 304[#] 不锈钢,长度 1000 mm,宽度 300 mm,倾斜角度 0~60°连续可调;料仓为单层结构并直接接地,用于经滑槽带电的粉体堆积储存,材料采用 304[#] 不锈钢,直径 300 mm,高度 300 mm,在其侧壁和底部分别等距设置由大孔径绝缘网封堵的 4 个测量孔,孔直径 30 mm,每个测量孔处均安装传感器,料仓内部安装的传感器,一只为固定安装方式,距底部距离为 300 mm,另一只为移动式,始终保持与粉堆表面 10 mm 的距离。传感器为兵器工业静电检测中心研制,测量方式为非接触式,场强监测范围为 10~100000 kV·m⁻¹,直径 10 mm,其标定测量距离 10 mm。

为保证实验结果的可靠性,实验装置建立在人工环境实验室内,温度为 18~22℃,湿度为 30%RH~40%RH。同时实验前对测试装置进行擦拭、清洗并保持干燥。

2.1.2 实验样品

由于在实验过程中可能发生静电放电,为保障实验安全,样品选取与典型火炸药绝缘电阻、起电规律相近的代料进行,由于场强分布决定于电荷量和设备尺寸,代料不影响实验结果,代料为聚氯乙烯粉体,粉体直径 3~5 mm,体积电阻率 10¹⁴ Ω·m。为保证粉体物料起电不受粉体水分影响,实验前将样品在 50℃ 烘干箱内烘干 5 h,然后再存放于人工环境实验室内 24 h 后进行实验。

2.1.3 实验过程

将 13 kg 试验样品加入滑槽上方的容器中,打开容器闸门,使粉体均匀流入滑槽,经摩擦带电后进入料仓形成堆积,在粉体堆积高度 h 分别为 25, 50, 100, 125, 150, 200 mm 时,记录固定安装和可移动式传感器的测量值;在粉体堆积高度 h 为 200 mm 时,记录 10 只传感器的测量值。按上述方法重复 10 次实验。

2.2 法拉第筒法和电流积分法静电电荷量监测对比实验

2.2.1 装置与仪器

法拉第筒与感应电流积分两种静电电荷量监测方法对比实验装置如图 2 所示。

双分支式滑槽用于摩擦起电,且保证分别进入法拉第筒料仓和低电阻接地料仓的粉体物料经历相同的流动距离,满足相同的静电起电条件,材料采用 304[#] 不锈钢,长度分别为 1000 mm,宽度 300 mm,倾斜角度 0~60°连续可调。法拉第筒料仓用于收集经滑槽分支 I 的粉体,并连接至电荷量表进行静电电荷量监

测,材料采用 304[#] 不锈钢,外筒直径 400 mm;内筒直径 300 mm,内筒接地电阻 >10¹⁴ Ω,与电荷量表之间由屏蔽电缆连接,料仓下部安装粉体质量测量系统,用于实时监测进入料仓的粉体质量,测量范围 0~100 kg。低电阻接地料仓用于收集经滑槽分支 II 的粉体,并连接至感应电流积分静电电荷量测试仪进行静电电荷量监测,为双层结构,材料采用 304[#] 不锈钢;外筒接地,直径 400 mm;内筒直径 300 mm,接地电为 1 kΩ,料仓下部安装粉体质量测量系统,用于实时监测进入料仓的粉体质量,测量范围 0~100 kg。接触式静电电压表用于测量法拉第筒料仓内筒的电压,型号为 Q₃V,测量范围 3~100 kV。感应电流积分法电荷量测试仪为作者自行研制^[7],测量范围为 1 nC~100 μC。电容表用于测量料仓的电容,型号为 LC 型,测量范围 1 pF~200 μF。电压表测量范围 0.01~100 V,用于测量低电阻接地料仓的电压。紫外光成像仪为 Doycar 型,光谱范围 200 nm~400 nm。

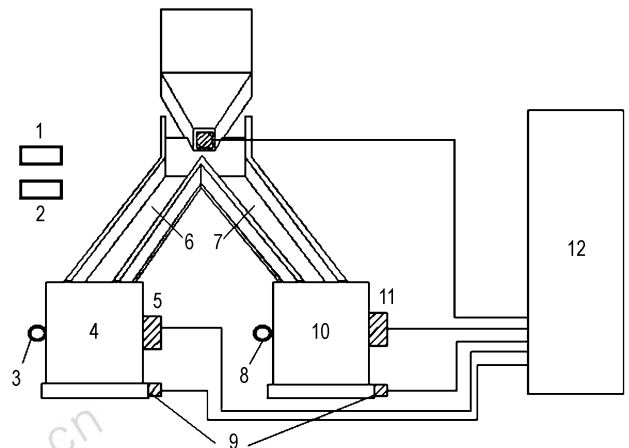


图 2 静电电荷量监测实验装置示意图

1—电容表, 2—紫外光成像仪, 3—接触式静电电压表, 4—法拉第筒料仓, 5—电荷量表, 6—滑槽双分支 I, 7—滑槽双分支 II, 8—电压表, 9—粉体质量测量系统, 10—低电阻接地料仓, 11—感应电流积分静电电荷量测试仪, 12—计算机

Fig. 2 Schematic diagram of electrostatic charge quantity monitoring test device

1—capacitance table, 2—ultraviolet imager, 3—contact electrostatic voltmeter, 4—Faraday cylinder storage bin, 5—charge scale, 6—chute double branch I, 7—chute double branch II, 8—voltmeter, 9—powder quality measurement system, 10—low resistance grounding storage bin, 11—electrostatic charge induced current integral tester, 12—computer

为保证实验结果的可靠性,实验环境温度、湿度与静电场强监测实验相同,并对电容表、接触式静电电压

表进行标定。

2.2.2 实验样品

采用与静电场强监测实验相同的代料样品及前处理方法。

2.2.3 实验过程

采用电容表测量法拉第筒电容值并进行记录,然后将 26 kg 试验样品注入滑槽上部的储存料斗中,打开放料闸门,使粉体均匀流经滑槽的两个分支后分别流入法拉第筒料仓和低电阻接地料仓,在料仓中粉体质量为 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 kg 时,进行数据记录。记录 Q_3V 的测量电压,根据 $Q=CU$, 计算获得法拉第筒料仓粉体的静电电荷量,当粉堆高度为 200 mm, 采用一个直径为 10 mm 的接地金属球靠近并接触内筒,用紫外成像仪拍摄放电图像,并根据 $W=CU$, 计算法拉第筒料仓可能发生的火花放电能量;记录感应电流积分静电电荷量测试仪数据,获得低电阻料仓中粉体的静电电荷量,记录电压表测量值,获得该料仓的电压值。重复 10 次上述实验并记录数据。

3 结果与讨论

3.1 静电场强实验结果与讨论

3.1.1 场强传感器安装方式对粉堆表面场强监测数据准确性的影响

粉体堆积高度 h 分别为 25, 50, 100, 125, 150, 200 mm 时,固定安装和可移动安装方式静电场强监测数据 10 次平均值,结果如图 3 所示。

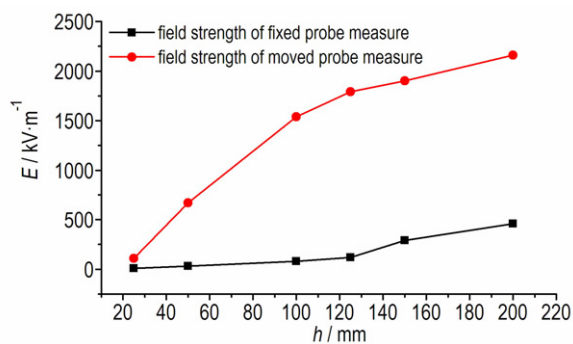


图 3 不同方式监测的静电场强

Fig. 3 Electrostatic field strength obtained by difference monitoring mode

由图 3 可见,不同的粉堆高度,传感器固定安装方式获得的场强数值均远远低于可移动方式的测量值,如在料仓中粉堆高度为 100 mm 时,可移动方式的测量值为 1540 $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$,而固定安装方式的测量值为

$80 \text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$,两者相差近 20 倍;在料仓中粉堆高度为 200 mm 时,可移动方式的测量值为 2160 $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$,而固定安装方式的测量值为 460 $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$,两者相差近 5 倍。原因是由于静电场强传感器是非接触式测量,当粉堆表面电位 U 为一定值时,根据 $U=Ed$,场强的数值与传感器和粉堆之间的距离密切相关,当两者距离为标定距离时,测量值应为真实场强,距离增大时,测量值将小于真实值。可移动方式传感器始终保持与粉堆表面距离为标定距离,其测量数据应为真实场强;而当粉堆高度分别为 100 mm 和 200 mm 时,固定安装方式传感器距粉堆表面的实际距离分别为 200 mm 和 100 mm,远大于标定距离,因此测量数据小于真实场强,固定安装场强传感器的方式不能实现对静电场强的准确测量。

3.1.2 静电场强在料仓不同部位的分布规律

粉体堆积高度为 200 mm 时,粉堆表面、料仓侧壁和底部的静电场强 10 次平均值的实验结果见表 1。

表 1 可移动方式监测不同部位的静电场强

Table 1 Electrostatic field strength of moved mode monitoring at different position

position	field strength / $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$
surface	2160
side	12614
bottom	14709

由表 1 可见,在料仓中粉堆高度为 200 mm 时,静电场强在粉堆表面、料仓侧壁和底部出现不同的分布规律和数值,最大静电场强值出现在料仓底部,粉堆表面的静电场强仅为料仓底部场强的 1/7。

这是因为根据静电场强叠加原理:点电荷系电场中某点总场强等于各点电荷单独存在时在该点产生的场强矢量和。将料仓内每个粉体颗粒看作是点电荷,料仓内粉体点电荷的总量相等,但距粉堆表面、料仓侧壁和底部的距离不同,且料仓侧壁和底部为接地金属物,将引起场强畸变,导致料仓中底部场强最大、表面场强最小。因此如果仅在粉堆表面安装静电场传感器,将不能实时监测到料仓中某处可能出现的最大场强,该种安装方法对于判定静电放电风险存在重大隐患。

3.2 法拉第筒法和感应电流积分法静电电荷量监测实验结果与讨论

3.2.1 两种静电电荷量测量方法数据一致性的分析

采用法拉第筒法和感应电流积分法对粉体静电进

行测量,结合质量监测数据,重复 10 次平均值的实验结果见表 2。

表 2 不同方法监测的静电电荷量

Table 2 Electrostatic charge quantity of difference mode monitoring

Faraday cylinder method			induced current integral charge quantity monitoring method		
M/kg	Q/ μC	(Q/M)/ $\mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$	M/kg	Q/ μC	(Q/M)/ $\mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$
1.00	0.81	0.81	0.90	0.72	0.81
2.10	1.65	0.81	2.40	1.94	0.81
3.80	3.00	0.79	4.00	3.15	0.79
6.00	4.86	0.81	5.70	4.62	0.81
8.10	6.49	0.80	8.60	6.86	0.80
10.20	8.17	0.80	9.80	7.84	0.80
12.10	9.80	0.81	11.90	9.65	0.81

Note: M is the mass of powder; Q is the charge of powder; Q/M is the charge-mass ratio.

由表 2 可见,两种监测方法均可实时监测料仓中粉体的静电电荷,静电电荷量随粉体质量的增加呈现线性增长;当料仓内粉体集聚到一定质量时,读取两个料仓的测量数据,此时进入两个料仓的粉体质量略有差别,静电电荷量也相应变化,换算成荷质比,则两者完全相同,说明两种监测方法均可准确、实时地监测静电电荷量。

3.2.2 两种静电电荷量监测方法安全性评估

法拉第筒料仓的电容为 190 pF,当粉堆高度为 200 mm,两个料仓的静电电压测量结果见表 3,采用接地金属球靠近法拉第筒料仓,用紫外成像仪拍摄的放电图像见图 4。

由表 3 可知,法拉第筒料仓内筒的电压最高可达 50000 V 以上,而低电阻接地料仓内筒电压最高仅为 0.1 V。当有接地体靠近两者时,法拉第筒料仓内筒发生了火花放电,图 4 是当粉堆高度为 200mm 时捕捉到的火花放电图像。此时根据放电能量计算公式 $W = \frac{1}{2}CU^2$,经计算火花放电能量达到 237.5 mJ,而大多数火炸药的最小静电点火能为 0.01 ~ 100 mJ^[8],该放电足以引起火炸药燃烧爆炸。而相应的低电阻料仓内筒不会发生静电放电。因此,法拉第筒法监测方法由于内筒绝缘电阻大,产生的静电电压高,火花放电产生的能量已超过大多数火炸药的最小点火能,存在燃烧爆炸危险,不适用于火炸药研制生产过程中的静电灾害预警监测,而感应电流积分法具有较好的安全特性。

表 3 不同料仓内筒的静电电压

Table 3 Electrostatic voltage of inner cylinder for difference storage bin

measurement of Faraday cylinder		Measurement of low resistence current	
mass of powder/kg	voltage of inner cylinder/V	mass of powder/kg	voltage of inner cylinder/V
1.00	4263	0.90	0.02
2.10	8684	2.40	0.03
3.80	15790	4.00	0.05
6.00	25580	5.70	0.07
8.10	34160	8.60	0.08
10.20	43000	9.80	0.1
12.10	51500	11.90	0.1

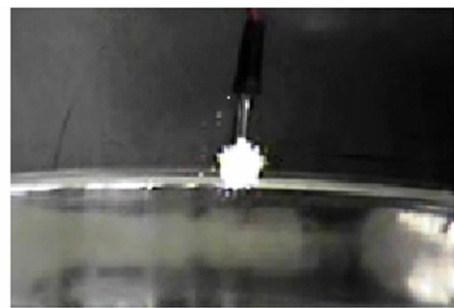


图 4 法拉第筒内筒火花放电紫外成像

Fig. 4 Faraday inner cylinder spark discharge ultraviolet imaging

4 结 论

(1) 采用代用材料实验结果表明,采用粉堆表面安装固定式静电场强传感器的监测方式,当粉堆高度为 100 mm 时,监测值与真实场强相差近 20 倍;粉堆高度为 200 mm 时,两者相差近 5 倍。粉堆高度为 200 mm 时,粉堆最大场强出现在料仓底部,粉堆表面监测到的场强为底部场强的 1/7。因此,目前火炸药生产过程中采用的在粉堆表面安装固定式静电场强传感器的监测方法,不能准确监测到粉堆的真实场强数据、不能获取到最大场强,从而不能可靠判定静电放电风险。

(2) 法拉第筒法和感应电流积分法两种监测方法测量数据基本相同,说明两种监测方法均可准确、实时地监测料仓中粉体的静电电荷量。

(3) 采用法拉第筒法进行静电电荷量监测时,当粉堆高度为 200 mm 时,料仓发生火花放电的能量达到 237.5 mJ;而采用电流积分法监测时,料仓最大电位仅为 0.1 V。因此采用法拉第筒法进行静电电荷量

监测存在燃烧爆炸危险,不适用于火炸药研制生产过程中的静电灾害预警监测。感应电流积分法具有较好的测量特性及安全性,适用于火炸药研制生产过程中的静电灾害监测预警。

参考文献:

- [1] 中国兵器工业集团公司质量安全与社会责任部. 中国兵器工业集团公司成立10年生产安全事故案例汇编与分析(1999年7月-2009年6月)[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2010: 365.
China north industries group cooperation, Production safety accident case assembly and analysis of China north industries group corporation in 10 years (July 1999-June 2009) [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2010: 365.
- [2] 朱传俊, 许力莱, 张熙才. 奥克托今静电连续测量系统[J]. 中原工学院学报, 2003, 14(S1): 120-121.
ZHU Chuan-jun, XU Li-lai, ZHANG Xi-cai. Continuous and real-time static monitor system of HMX[J]. *Journal of Zhongyuan Institute of Technology*, 2003, 14(S1): 120-121.
- [3] SUN Ke-ping, YU Ge-fei. Research on field calculation & safety evaluation in powder silo[J]. *Journal of Electrostatics*, 1988, 44: 119-123.
- [4] 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, 74(3): 1-4.
- LIU Jun, ZHANG Li, FEI Ying. Study on testing the quantity of frictional static electricity on RDX [J]. *Coal Mine Blasting*, 2006, 74(3): 1-4.
- [5] 陆明, 赵省向, 陈晶. RDX混合炸药的摩擦起电性能测定与分析[J]. 含能材料, 2008, 16(6): 708-711.
LU Ming, ZHAO Sheng-xiang, 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.
- [6] 周文韬, 何中其, 陈网桦. 微纳米含能材料静电积累特性与危险性分析[J]. 含能材料, 2015, 23(7): 688-692.
ZHOU Wen-tao, HE Zhong-qi, CHEN Wang-hua. Electrostatic accumulation characteristic and hazard analysis of micro-nano energetic materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(7): 688-692.
- [7] 卫水爱. 粉体输送、储存过程中静电安全监测技术研究[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(增刊2): 96-98.
WEI Shui-ai. Study of electrostatics safety monitoring technique for powder transporting and storage process [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2009, 29(Suppl.2): 96-98.
- [8] 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(增刊): 143-148.
QIAN Zhong. The study of propellant production esd issue [J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2000, 12(Suppl.): 143-148.

Contrast Testing Study of Electrostatic Monitoring Method for Energetic Powders

WEI Shui-ai, BAI Chun-hua

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

Abstract: To safely and accurately monitor the risk of combustion and explosion of explosive and propellant powder caused by electrostatic discharge, aiming at three kinds of monitoring methods, including field strength monitoring and Faraday cylinder charge quantity monitoring and induced current integral charge quantity monitoring, corresponding testing devices were established. The contrast testing study on the accuracy of the electrostatic field monitoring data obtained by different methods and the reliability of the electrostatic monitoring was performed by the way of substitute material and the safety of the monitoring system was evaluated. Results show that when powder pile height in storage bin is 200 mm, the field strength monitored by powder pile surface is 2160 kV, which is only 1/7 of the field strength of 14709 kV in base of powder pile, when powder pile height is 100 mm, the field strength data of powder pile surface is 20 times of the calibration data, it can not achieve accurate and reliable monitoring of electrostatic discharge risk. The monitoring data of Faraday cylinder charge quantity monitoring method and induced current integral charge quantity monitoring method are accurate, they can realize the reliable monitoring of electrostatic field, but Faraday cylinder charge quantity monitoring system itself exists the risk of electrostatic discharge, whereas induced current integral charge quantity monitoring system has good safety.

Key words: propellants and explosives; electrostatic; field strength monitoring; Faraday cylinder; induced current; charge quantity monitoring

CLC number: TJ55; TM151

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.06.012