

火炸药静电性能研究进展

李志敏,张同来,杨利,周遵宁,张建国

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 火炸药静电性能是评估火炸药在静电环境中安全性的重要参数,静电感度和静电积累量的研究对减少火炸药静电事故的发生有着重大的意义。本文从多个方面对火炸药静电性能的研究进展进行了综述。在静电火花感度方面,分析了测试方法中各种因素对测试结果的影响;讨论了火炸药静电火花感度与其分子结构和其他相关性能的关系;并对静电火花点燃火炸药的机理进行了叙述。在静电积累方面,总结火炸药静电起电的机理,并对国内外研究进展进行了简单概述。还进一步对火炸药静电防护技术进行了一些讨论。火炸药静电感度和静电积累测试受仪器条件、环境因素和药剂形貌等因素的影响较大,因而测试结果存在较大的偏差,不能得到绝对的数值,只能相对比较,对结构与性能之间的关系规律研究更要求是在同一条件下得到数据。

关键词 火炸药;静电感度;静电积累量;静电放电

中图分类号 TJ55,O64

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.26.011

Progress on Electrostatic Performances of Explosive

LI Zhimin, ZHANG Tonglai, YANG Li, ZHOU Zunning, ZHANG Jianguo

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

Abstract The electrostatic performance of an explosive is an important aspect to estimate its safety under the electrostatic discharge environment. Studies of electrostatic sensitivity and electrostatic accumulation play an important role to reduce accidents caused by electrostatic discharge. The progress on the field of electrostatic performances of explosive is reviewed in this paper. Some factors influencing the results of measurement of the electrostatic spark sensitivity of explosive are analyzed, and the relationship between the electrostatic spark sensitivity and the molecular structure is discussed in detail. Also, the mechanism of igniting explosive by electrostatic discharge is discussed. Moreover, the studies related with electrostatic accumulation are reviewed briefly, and a further discussion on the electrostatic protection is made. The measurements of electrostatic sensitivity and electrostatic accumulation are influenced by various factors, such as the condition of instruments, ambient temperature, relative humidity, the shapes and sizes of the explosive particles. So, a large deviation would be expected when the electrostatic performance is evaluated under different conditions and environments, and the results we obtained are not absolute, only a relative comparison. When investigating the relationship between the electrostatic performance and molecular structure, these data should be obtained under a same condition.

Keywords explosive; electrostatic sensitivity; electrostatic accumulation; electrostatic discharge

0 引言

火炸药静电性能主要指静电火花感度和静电积累量,是评估火炸药在静电环境中安全性的重要参数^[1-3]。火炸药在生产、储运和使用过程中,不可避免要与人、生产加工设备、运输工具、装药器件等各种不同材料的物体发生接触分离作用,当接触距离达到 25×10^{-8} cm 或更小时,两种材料之间就会

发生电子转移,当两物体分开时,电子不能及时地导走,从而导致静电积累^[4-5]。火炸药的静电积累到一定程度就会与周围物体形成一定的场强,当静电场强达到环境介质的击穿场强后,就会导致静电放电,引爆火炸药;另一方面,如果积累一定静电荷的物体接近火炸药,也会与火炸药之间形成电位差,致使发生静电放电而引爆火炸药。国内外均发生过大量

收稿日期:2011-05-31;修回日期:2011-08-31

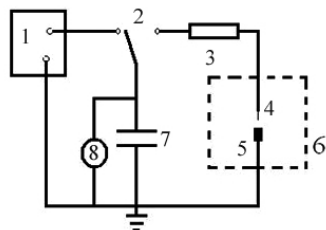
基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目;《科技导报》博士生创新研究资助计划项目(kjdb201001-2)

作者简介:李志敏,博士研究生,研究方向为含能材料静电性能,电子信箱:lzmbit@yahoo.com.cn;张同来(通信作者),教授,研究方向为含能材料制备、性能及其应用,电子信箱:ztlbit@bit.edu.cn

由于静电放电引爆含能材料的事故,造成了严重的人员伤亡和财产损失。据统计,大约有 10%—20% 的火炸药意外燃爆事故是由静电放电引起的^[6]。1969 年,中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。经过原因分析,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引发事故。1985 年,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。深入的调查研究认为事故原因是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。含能材料发生静电放电事故主要受两方面因素的影响:一是含能材料周围环境中静电放电源所积累静电荷的多少,静电放电源与含能材料能否形成能量耦合以及静电放电能量的大小;另一方面是含能材料在静电火花下发生爆炸的难易程度即静电火花感度^[7]。由于火炸药周围环境物体所带静电荷具有不确定性,不能全面进行研究,因而研究火炸药的静电性能对于减少静电放电事故的发生有着十分重大的意义。本文就国内外有关火炸药静电性能的研究进行总结分析,从火炸药静电火花感度测试方法、静电火花感度与分子结构及其他性能之间的关系规律、火炸药静电积累量和静电防护等方面进行了详细的评述,以期以后的研究工作提供参考。

1 火炸药静电感度测试

火炸药的静电感度又称为静电火花感度,是指在静电火花作用下火炸药发生爆炸的难易程度。静电感度测试一般属于一次性破坏实验,在一定的实验条件下,实验只能有发火和不发火两种结果,不能准确知道每一样品的临界发火能量,只能通过特定的实验方法和数据处理方法确定被测样品静电发火能等相关参数的统计分布规律^[4]。目前,常用的静电感度测试方法的基本原理(如图 1 所示)是用一个充电到一定电压的电容器经过一定阻值的电阻对被测样品进行放电,根据样品发火与否,调整电容器的容量或电容器两端电压来增大或减小静电刺激能量,获取样品发火的敏感度数据,通过特定的数据处理方法,用 50% 发火的能量 E_{50} 表示样品的静电感度。

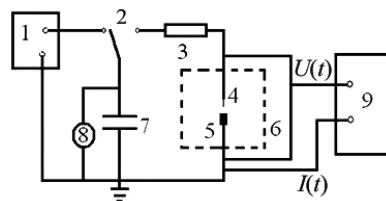


1—高压直流电源,2—高压真空开关,3—放电电阻,4—极针,5—击柱,6—发火箱,7—高压储能电容,8—静电电压表

图 1 静电感度测试原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the electrostatic sensitivity tester

根据电极的放电方式不同,静电感度测试可分为渐进电极端式、固定电极端式、接触分离式^[8]。钱仲^[9]对固定间歇静电仪与渐进间歇静电仪进行了对比研究,两种形式各有特点,可根据不同的需求,选取不同的仪器。中国目前广泛使用的固定间歇静电感度仪,能有效评价火炸药相对静电感度,对评估火炸药静电环境安全性有着重要的意义。根据能量的计算方式不同,可将静电感度测试分为相对静电感度测试和真实静电感度测试:相对静电感度是以放电系统的总能量即电容器存储能量的多少评价样品对静电刺激的敏感性,而真实静电感度则是以样品实际吸收能量的多少评价其抗静电能力^[10]。真实静电感度测试利用数字存储示波器记录放电过程中样品和取样电阻两端的电压信号,用电极两端放电时的电压—时间和电流—时间曲线,积分计算出实际消耗在电极两端的能量,测试原理如图 2 所示。真实静电感度能更实际地反应样品对静电能量的敏感性,但测试系统较复杂。相对静电感度测试能相对地比较各种药剂对静电放电的敏感程度,但未考虑放电回路中的能量损失,算出的能量偏离实际较大。



1—高压直流电源,2—高压真空开关,3—放电电阻,4—极针,5—击柱,6—发火箱,7—高压储能电容,8—静电电压表,9—数据采集处理系统

图 2 真实静电感度测试原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the real electrostatic sensitivity tester

测试火炸药静电火花感度,除了建立合适的测试方法外,测试过程中选取的电容大小、电阻大小、电极的极性、极针形状和材料、电极间隙以及环境温湿度等多种因素对测试结果都有较大的影响,甚至是数量级上的影响,表 1 列出了不同测试条件下斯蒂芬酸铅的静电感度数据。国内外就相关问题已进行了一定的研究,但要准确描述各种因素对火炸药静电感度的影响规律,还有待于系统深入的研究。

李国祥等^[11]设计了一套同时适用于可燃气体和粉状药剂静电感度测试的装置,并在各种条件下对氢气、斯蒂芬酸铅和黑火药的静电火花感度进行了测试。通过对不同的氢气浓度、电极间隙和电容的研究,得出测试气体样品时的最优点火条件;样品的 E_{50} 随着装置的电容、电阻和放电时间的增大,先减小后增大,存在一个最小值,即最优点火条件。在不同环境温湿度下测试的结果表明, E_{50} 随温度和湿度的变化可粗略拟合为线性关系,温度越高,湿度越小,药剂越敏感。

法国 Auzanneau 等^[12-13]研究了装置设计、环境因素和晶体尺寸、形貌等对药剂静电感度的影响规律,并对静电火花起

表 1 不同测试条件下斯蒂芬酸铅的静电感度数据

Table 1 Electrostatic sensitivity values of lead styphnate obtained under various condition

电容/ μf	电阻/ Ω	电极间隙/mm	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	环境湿度/%	E_{50}/J	测试者
0.001	0	大约 2	30	54	0.007	Talawar ^[23]
2×10^{-4}	50	≤ 0.1	20	40	5.24×10^{-5}	李国祥 ^[11]
0.01	$1 \times 10_5$	0.12	24	32	0.0106	李志敏
0.01	0	0.12	24	32	0.0078	李志敏
5×10^{-4}	1×10^5	0.12	24	32	8.65×10^{-4}	李志敏

爆过程的能量转换机理进行了探讨。Auzanneau 等自行设计实验装置,讨论了放电电极的形状(半球形、锥形、平板形)、尺寸,电极间隙大小,放电电容和串联电阻,放电火花持续时间等装置参数对测试结果的影响。结果表明,随着电容、电阻和放电时间的增大, E_{50} 先减小后增大,具有一个最易点燃值,与李国祥得出的最优点火条件一致。湿度较小时药剂的静电感度较高,当湿度达到一定值后,静电感度迅速降低。1991

年, Larson 等^[4]报道了 Los Alamos 实验室采用渐进式静电感度仪测试的一系列炸药的静电感度数据, 就电极材料、电阻、温度等多方面的因素对测试结果的影响进行了研究。

2011年,张同来等对高氯酸碳酰肼过渡金属系列含能配合物的静电火花感度进行了测试,图3为高氯酸碳酰肼锰(GTM)被静电火花点燃过程(电容 $0.32\mu\text{f}$,放电电阻 $100\text{k}\Omega$,电极间隙 0.18mm ,极针极性为负)。



图 3 GTM 的静电火花点燃过程

Fig. 3 Ignition process of GTM by electrostatic spark

2 火炸药静电感度的规律与预估研究

不同测试条件下测得的火炸药静电感度值差异很大,但火炸药对静电的敏感程度作为它的一项属性,从本质上决定于其化学组成和物理状态。化学组成如分子中各元素组成、所含爆炸性基团及其数目、电子结构、分子结构和晶体结构等,这些结构参量决定火炸药的一些性质,如生成热、爆速和爆压,这些性质与其静电感度有着直接的关系;物理状态因素主要包括物理相态、密度、晶形和粒度等^[9]。为有效了解含能材料在静电环境中的安全性能,除了进行大量的实验测试外,通过相关理论研究分子结构与静电性能的关系,得出规律,并进一步对静电性能进行预估也是目前研究的重要方向。

对火炸药结构与静电性能的关系研究,可以直接从原子、基团和连接它们的键层次进行,研究其数目、所占比例以及相关参数对其静电性能的影响,并通过线性拟合和人工神经网络等方法得出一定的关系模型。也可以先找出静电性能与其他物理化学性能的关系,再将这些性能与分子结构进行关联,得出相关规律及预估模型。目前,已有许多研究火炸药爆速、爆压及热性能与其静电感度关系的报道^[15-19]。

美国 Skinner 等^[20]对常见 15 种猛炸药的静电感度与临界爆炸温度、热分解活化能及达到相同分解程度的温度等热力学性能的关系研究发现, 静电感度与其临界爆炸温度和热分

解达到相同程度的温度对数的一半具有较好的线性关系。但由于这些化合物有硝胺类、硝基芳烃类,还有其他的如高氯酸铵、硝酸铵等,热分解活化能与静电感度的线性关系并不明显。Skinner 认为炸药的静电起爆主要是由分解动力学控制的一种热作用过程。伊朗 Keshavarz 等^[21]通过分析归纳多种硝基芳香类含能材料的元素组成和连接在芳香环上的烷基或烷氧基与静电感度的关系,得出了预估该类含能材料静电感度的关系式。该方法适用于 CHON 体系的含能材料,但不能用于含其他元素的体系。对于同分异构的物质,这种方法也不能有效区分,因而具有一定的局限性。土耳其 Türker 等^[22]运用量子化学方法,研究了最高占有分子轨道(HOMO)、最低未占有分子轨道(LUMO)和静电势等参数对火炸药静电感度的影响,发现电子性能与硝胺类含能材料静电感度有一定关系,但由于分子结构复杂,要进行定量的关联预测还有一定的困难。印度 Talawar 等^[23]研究了常见起爆药的静电感度与活化能、爆速及摩擦感度的关系。结果表明,起爆药的静电感度与其热分解的活化能和摩擦感度有一定的线性关系,与爆速的平方(D^2)也表现出较好的线性规律。

研究含能材料静电感度与其他性能之间的关系,最早开始于捷克的 Zeman,并且研究最为系统全面^[15,18,24-30]。1999 年 Zeman^[26]通过测定 32 种硝胺 50%发火概率下静电火花能 E_{IS} ,

建立了 E_{ES} 与爆速平方值 (D^2) 的线性关系: $D^2 = A \cdot E_{ES} + B$, 并由此预测硝胺类含能材料的静电感度。除硝胺类外, Zeman 还对硝基芳烃类含能材料的静电感度与爆速的关系进行了研究, 得出同样的关系, 进一步验证其合理性。 $D^2 = A \cdot E_{ES} + B$ 不仅体现了 Evans-Polanyi-Semenov 关系, 而且表明在起爆、初始分解或由静电火花引起的能量转换过程中多硝基化合物分子初始分裂时化学机理的同一性。2000 年 Zeman^[27] 通过研究多硝基类含能材料静电感度与热分解参数的关系, 得出结论: 含能材料初始热分解的化学机理及其晶体中分子的相互作用对静电火花起爆起决定性的作用。2006 年 Zeman 等^[30] 研究了硝胺类含能化合物反应活性的电子结构和空位情况对静电感度的影响。

王桂香等^[17,31] 对硝胺类和硝基芳烃类含能化合物的静电感度与爆速和爆压的关系进行了详细的研究。通过计算得到化合物的爆速和爆压与实验测得的静电感度进行关联, 线性回归得出静电感度与爆速的平方 (D^2) 和爆压的对数 ($\lg P$) 的方程, 硝胺类的回归系数在 0.95 以上, 硝基芳烃类的回归系数则达到 0.998。王桂香等^[16] 还报道了硝胺类含能化合物电子结构参数与静电感度的关系。主要研究的电子结构参数有: N—N 键的 Mulliken 键级、硝基上的净电荷、前线轨道能 (E_{HOMO} 和 E_{LUMO}) 及其差值 (ΔE)。用 SPSS 程序对静电感度与电子结构参数进行了多重线性回归, 发现 ΔH 和 M_{NN} 对静电感度影响起着主要作用。

物理形态方面, 火炸药的晶形和粒度是影响静电性能的重要因素, 由于对晶形和粒度的控制和表征比较复杂, 加之实验的危险性, 目前这方面的报道较少。1993 年, Roux 等^[13] 针对奥克托今 (HMX) 和 1% 石墨包覆 HMX 的晶体尺寸和形貌对其静电感度影响的研究表明, 随着粒径的增大, 药剂的静电感度先增大后减小, 存在一最敏感粒径值。2008 年, 蔺向阳等^[32] 研究发现: 单基微气孔球扁药的静电火花感度随着堆积密度降低和颗粒直径的减小而显著提高。2004 年, 曹海峰等^[33] 测试了粉状乳化炸药的静电感度, 并由此计算确定其最小静电着火能, 考察了环境因素和操作条件对粉状乳化炸药静电起电的影响。并在此基础上, 应用探极法测定了粉状乳化炸药在气流中起电后的最大放电火花电流和电量, 从而确定最大静电放电火花能量。根据粉体静电安全性判别标准, 评价认为粉状乳化炸药在工业生产中对静电是安全的。

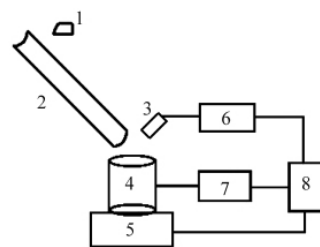
3 静电火花起爆机理

静电火花起爆属于电击穿起爆形式, 混有空气的火炸药起爆过程, 目前都是按空气击穿理论处理。根据不同药剂及其所处的不同状态可分为两种情况: 一是沿炸药表面的空气击穿后形成电火花, 只要火花能足够就能使药剂表面击穿或直接引爆药剂; 二是空气击穿后击穿药剂, 形成高能量火花通道引爆药剂^[1-2]。总之, 混有空气的药剂起爆都是空气首先击穿, 按空气击穿理论处理, 药剂的引爆均属于火花起爆机理, 目前一般认为火花起爆是一个热分解反应的控制过程。

Roux 等^[12] 对静电起爆机理进行了研究, 认为静电火花的电能转换成热能使得药剂温度升高, 当药剂的温度达到爆炸的临界温度时, 药剂就被起爆。由于静电放电的局部性和药剂不均匀, 电能只有小部分转换为热能被药剂吸收, 因而药剂被加热起爆有两种可能: 一是药剂的表面先被加热到临界温度但里层保持最初的温度, 表层首先发生爆炸从而引爆整体药剂; 二是药剂局部形成高温, 热点起爆。由于起爆过程中电能转换成热能, 所以药剂的导热性对静电感度有较大的影响。

4 火炸药静电积累

火炸药在生成、储运和使用过程中, 与其他金属或非金属材料接触分离, 容易导致静电积累, 当积累的静电荷达到足够量时, 就会发生静电放电。在不同材料的接触、分离和电子转移的过程中, 决定一个物体带电量多少的因素很多, 如材料的费米能级、接触面积、分离速度、环境温湿度等^[4]。静电积累量的测试原理是将一定量的样品倒入具有一定长度和倾斜度的滑槽内, 样品从滑槽滑过, 摩擦产生静电荷, 带电样品落入接药容器法拉第筒内, 再由数字电荷仪测出静电量, 图 4 显示了静电积累量的测试原理, 图 5 为测试装置图。



1—盛药盒, 2—滑槽, 3—电压探头, 4—法拉第筒, 5—天平, 6—数字电压仪, 7—数字电荷仪, 8—数字采集处理系统

图 4 静电积累量测试原理图

Fig. 4 Schematic of the electrostatic accumulation test apparatus



图 5 静电积累量测试装置

Fig. 5 Test apparatus for electrostatic accumulation

刘钧等^[34] 研究了黑索金 (RDX) 与不同材料摩擦过程产生静电的情况。在相同环境条件下, RDX 粒度和是否添加抗静电剂对其静电积累量有明显的影。与木制斜槽摩擦产生的静电积累量大于橡胶槽和铝槽。在一定倾角范围内, RDX 的静电积累量随着倾斜角的增大, 先增大后减小, 出现一个极大值点。添加抗静电剂的 RDX 摩擦带电量极小, 且与斜槽材



质、角度的变化基本无关,因此在 RDX 中添加一定的抗静电剂,能有效降低其生产、储运和使用过程中的静电危险性。

陆明等^[35-36]用斜槽法测量了 RDX 及 RDX/Al 体系的静电积累量。在不锈钢滑槽内滑行过程中,RDX 得到电子,而 RDX/Al 体系则积累了正电荷。在测试范围内,RDX 的静电积累量最高可达 $-4.89\mu\text{C}\cdot\text{kg}^{-1}$,而 RDX/Al 粉体的静电积累量最高仅达 $1.19\mu\text{C}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在工业 RDX 中加入超细 RDX,体系产生的静电积累值有所减少,加入石油醚和乙酸乙酯后,RDX 和 RDX/Al 体系产生的静电积累值均有所增加。采用尖端放电方法研究发现 RDX 不发生爆炸的最大静电火花能量为 0.013J ,RDX/Al 不发生爆炸的最大静电火花能量大于 0.013J ,因而该实验范围内,静电积累产生的电火花能量,不能直接引燃 RDX 和 RDX/Al 炸药粉末。

2011 年,张同来等对高氯酸碳酰肼过渡金属系列含能配合物的静电积累量进行了测试。研究了药剂粒径、滑槽材质及倾斜度对其静电积累量的影响。表 2 列出了 GTX 起爆药(高氯酸三碳酰肼合锌)从不同材质的滑槽滑出后积累的电荷量及其下滑过程中产生的最大静电电压(药品用量 5g ,粒径 $100\sim 80$ 目,滑出倾斜度 45° ,环境温度 25°C ,相对湿度 56%)。

表 2 GTX 起爆药静电积累量
Table 2 Electrostatic accumulation of GTX

滑槽材质	积累电荷量/nC	最大静电电压/kV
聚氯乙烯	46.50	0.81
聚四氟乙烯	23.80	0.41
普通牛皮纸	5.53	0.07
碳钢	-2.08	-0.03
有机玻璃	-4.10	-0.08
不锈钢	-6.85	-0.09

5 火炸药防静电技术

静电是引起火炸药事故的重要源泉,为有效的防止事故的发生,必须从多方面进行火炸药防静电技术研究。首先,应该不断开发具有较好静电性能的药剂,同时要求这些新型药剂满足各种其他性能要求;其次,运用各种手段对火炸药进行改性处理,从而改善其静电性能,譬如用抗静电剂进行包覆处理、改善晶形和粒度等方法;第三,严格控制生产使用过程中的各项工序,提供一个好的防静电环境,相关人员养成良好的工作习惯。

马峰^[7]对火炸药生产过程中的静电危害与防护进行了讨论,认为要形成静电灾害需同时具备 3 个基本条件:危险的静电放电(ESD)源、静电易燃易爆物、ESD 源与易燃易爆物质之间能够形成能量耦合并且 ESD 能量大于或等于易燃易爆物质的最小点火能。对静电的防护可从以下几方面进行:适当选用设备、工装的材料,尽量减小摩擦、降低流速;增加湿度;对药剂进行防静电剂处理;采用各种防静电制品;建立静电接地系统。孙德强等^[37]认为消除静电的技术措施可分为两类:第一

类是泄放法,即让静电电荷从带电体上泄漏散失掉,避免静电积累,譬如增湿、设备尽可能接地、火炸药颗粒包覆一层导电物质;第二类是中和法,即给带电体外加一定量的反电荷,使其与带电体上的电荷中和,如正负相消法、电离空气法和外加直流电场法等。

Talawar 等^[23]研究了 PVP 包覆起爆药对其静电感度的影响。包覆后的叠氮化铅的静电感度明显降低,叠氮化银的变化不大,PVP 包覆使 5-硝基四唑汞对静电刺激变得更为敏感,因而针对不同的药剂抗静电剂的影响相差甚远。朱顺官等^[38]选用多种表面活性剂对斯蒂芬酸铅进行表面处理,以达到改善其静电性能的目的,不同表面活性剂及配方对斯蒂芬酸铅的静电积累性能有不同的影响。研究发现,HKD 与 HZ-1 抗静电剂对斯蒂芬酸铅具有较好的消除静电积累的能力,6% HZ-1 消除静电积累可达 80%。经抗静电剂处理后的药剂的流散性得到改善,静电火花感度有所降低,火焰感度、爆发点基本保持不变,抗静电剂与药剂有良好的相容性,能满足火工品长期存储和可靠使用的要求。朱顺官等^[39]还研究了 HKD 抗静电剂对太安的静电性能的影响,用 5% 的 HKD 处理后的太安样品,静电电压平均可降低 96%,基本上消除了静电。

6 结论与展望

火炸药静电性能与撞击感和摩擦感一样,是一项评定其安全性的重要参数。目前,国内外在这方面虽有一些研究,但不够系统全面,相关的测试方法也不够准确统一,对于药剂抗静电的机理本质方面的研究还很少,因而,有待于研究人员进一步系统深入的研究,得出相关理论和统一方法。要对火炸药静电性能进行系统的研究,首先必须得到统一条件下火炸药准确的静电性能数据,这就需要建立一套合适的测试系统和方法;其次是通过这些数据,进一步深层次的研究静电对药剂的作用机理及其结构与性能之间的关系,并得出相关理论;最后是基于得出的相关理论和实际情况,研究静电防护技术。

参考文献 (References)

- [1] 叶迎华. 火工品技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
Ye Yinghua. Initiator technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007.
- [2] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999.
Cai Ruijiao. The design principle for initiating explosive device [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1999.
- [3] 惠君明, 陈天云. 炸药爆炸理论[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1995.
Hui Junming, Chen Tianyu. Explosion theory of explosive [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1995.
- [4] 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 Shanghe, Wu Zhancheng. Electrostatic discharge and its hazard protection [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunication Press, 2004.
- [5] 鲍重光. 静电技术原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.

- Bao Chongguang. Electrostatic technology principle [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993.
- [6] 林大泽, 徐天瑞. 工业粉尘防爆与治理 [M]. 北京: 科学技术出版社, 1990.
- Lin Daze, Xu Tianrui. Explosion protection and prevention for industrial dusts[M]. Beijing: Science and Technology Press, 1990.
- [7] 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.
- Ma Feng. *Security and Safety Technology Magazine*, 2004(5): 44-45.
- [8] 曹海峰, 王国立. 火炸药静电感度研究的进展 [J]. 矿冶, 2002, 11(1): 17-20.
- Cao Haifeng, Wang Guoli. *Mining & Metallurgy*, 2002, 11(1): 17-20.
- [9] 钱仲. 两种静电感度仪研究[J]. 火工品, 2002(2): 39-42.
- Qian Zhong. *Initiators & Pyrotechnics*, 2002(2): 39-42.
- [10] 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, 18(2): 162-164.
- Li Depeng, Wang Peilan, Xu Lixin. *Acta Armamentarii*, 1997, 18(2): 162-164.
- [11] Li Guoxiang, Wang Changying. Comprehensive study on electric spark sensitivity of ignitable gases and explosive powders [J]. *Journal of Electrostatics*, 1981, 10: 341-341.
- [12] 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 E_{50} [J]. *Propellants, Explos, Pyrotech*, 1995, 20(2): 96-101.
- [13] Roux M, Auzanneau M, Brassy C. Electric spark and ESD sensitivity of reactive solids (primary or secondary explosive, propellant, pyrotechnics) Part one: Experimental results and reflection factors for sensitivity test optimization[J]. *Propellants, Explos, Pyrotech*, 1993, 18(6): 317-324.
- [14] Larson T E, Dimas P, Hannaford C E. Electrostatic sensitivity testing of explosives at Los-Alamos [J]. *Institute of Physics Conference Series*, 1991, 118: 107-117.
- [15] Zeman S. Usability of relationship between activation energies of low-temperature thermal decomposition and heats of explosion or squares of detonation velocities in study of initiation of energetic materials[J]. *Theory and Practice of Energetic Materials*, 2005, 6: 452-464.
- [16] Wang G. X, Xiao H M, Xu X J, *et al.* Detonation velocities and pressures, and their relationships with electric spark sensitivities for nitramines[J]. *Propellants, Explos, Pyrotech*, 2006, 31(2): 102-109.
- [17] 王桂香, 肖鹤鸣, 居学海, 等. 含能材料的密度、爆速、爆压和静电感度的理论研究[J]. 化学学报, 2007, 65(6): 517-524.
- Wang G X, Xiao H M, Ju X H, *et al.* *Acta Chimica Sinica*, 2007, 65(6): 517-524.
- [18] Zeman S, Bartei C. Some properties of explosive mixtures containing peroxides -Part II. Relationships between detonation parameters and thermal reactivity of the mixtures with triacetone triperoxide[J]. *J Hazard Mater*, 2008, 154(1-3): 199-203.
- [19] Keshavarz M H, Pourtedal H R, Semnani A. Reliable prediction of electric spark sensitivity of nitramines: A general correlation with detonation pressure[J]. *J Hazard Mater*, 2009, 167(1-3): 461-466.
- [20] Skinner D, Olson D, Block-Bolten A. Electrostatic discharge ignition of energetic materials[J]. *Propellants, Explos, Pyrotech*, 1998, 23: 34-42.
- [21] Keshavarz M H. Theoretical prediction of electric spark sensitivity of nitroaromatic energetic compounds based on molecular structure [J]. *J Hazard Mater*, 2008, 153(1-2): 201-206.
- [22] Türker L. Contemplation on spark sensitivity of certain nitramine type explosives[J]. *J Hazard Mater*, 2009, 169(1-3): 454-459.
- [23] 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]. *J Hazard Mater*, 2006, 137(2): 1074-1078.
- [24] Zeman S, Trzcinski W A, Matyas R. Some properties of explosive mixtures containing peroxides -Part I. Relative performance and detonation of mixtures with triacetone triperoxide [J]. *J Hazard Mater*, 2008, 154(1-3): 192-198.
- [25] Zeman S, Kohlíček P, Maranda A. A study of chemical micromechanism governing detonation initiation of condensed explosive mixtures by means of differential thermal analysis [J]. *Thermochim Acta*, 2003, 398(1-2): 185-194.
- [26] Zeman V, Koci J., Zeman S. Electric spark sensitivity of polynitro compounds: Part II. A correlation with detonation velocities of some polynitro arenes [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 1999, 7(3): 127-136.
- [27] Zeman S, Koci J. Electric Spark Sensitivity of polynitro compounds: Part IV. A relation to thermal decomposition parameters [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2000, 8(1): 18-26.
- [28] Zeman S, Friedl Z. Electronic charges at nitrogen atoms of primarily split off nitro groups versus sensitivities of some nitramines [J]. *Theory and Practice of Energetic Materials*, 2003, 5: 710-717.
- [29] Zeman S. Sensitivities of high energy compounds [J]. *High Energy Density Materials*, 2007, 125: 195-271.
- [30] Zeman S. New aspects of initiation reactivities of energetic materials demonstrated on nitramines [J]. *J Hazard Mater*, 2006, 132 (2-3): 155-164.
- [31] 王桂香. 高能化合物的结构和性能的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- Wang Guixiang. Theoretical study on the structure and performance of high energetic compounds [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [32] 蒯向阳, 段红珍, 潘仁明, 等. 单基微气孔球扁药的静电感度研究[J]. 含能材料, 2008, 16(1): 83-85.
- Lin Xiangyang, Duan Hongzhen, Pan Renming, *et al.* *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2008, 16(1): 83-85.
- [33] 曹海峰, 王国立. 粉状乳化炸药静电安全性研究 [J]. 矿冶, 2004, 13(3): 9-12.
- Cao Haifeng, Wang Guoli. *Mining & Metallurgy*, 2004, 13(3): 9-12.
- [34] 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. *Coal Mine Blasting*, 2006, 74(3): 1-4.
- [35] 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. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2008, 16(6): 708-711.
- [36] 陆明, 赵月兵. RDX 与 Al 混合体系的静电火花感度研究 [J]. 兵工学报, 2009, 30(12): 1602-1606.
- Lu Ming, Zhao Yuebing. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(12): 1602-1606.
- [37] 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 Xingming, *et al.* *Explosive Materials*, 2009, 38(3): 22-24.
- [38] 朱顺官, 许坤芳, 牟景艳. 斯蒂芬酸铅的降静电技术研究 [C]. 火工品及相关药剂、烟火剂(含民用烟花)发展研讨会. 西安, 2002: 22-29.
- Zhu Shunguan, Xu Kunfang, Mou Jingyan. Seminar on the progress of initiator and relevant explosive, pyrotechnic compound (contain civil fireworks). Xi'an, 2002: 22-29.
- [39] 牟景艳, 朱顺官. 太安的降静电技术[C]. 火工品及相关药剂、烟火剂(含民用烟花)发展研讨会. 西安, 2002: 30-36.
- Mou JingYan, Zhu Shunguan. Seminar on the progress of initiator and relevant explosive, pyrotechnic compound (contain civil fireworks). Xi'an, 2002: 30-36.