

文章编号:1006-9941(2008)06-0708-04

RDX 混合炸药的摩擦静电起电性能测定与分析

陆 明¹, 赵省向², 陈 晶¹

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094;

2. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要:用斜槽法测量了 RDX 及 RDX/Al 混合物的摩擦产生静电积累量。研究表明,在 1 m 不锈钢滑槽内滑行过程中, RDX 得到电子, 静电积累值与 RDX 质量成线性关系, 静电积累值约为 $-3.0 \sim -5.0 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$; RDX 中加入铝粉后, 静电的性质和积累量发生变化, 静电积累最大值由 RDX 粉体的 $-4.89 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变为 RDX/Al 粉体的 $1.19 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且随着铝粉的比例由 20% 提高到 30%, RDX/Al 混合粉体静电积累量由 $0.35 \sim 0.50 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $0.70 \sim 1.20 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$; 加入 3% ~ 8% 的石油醚和乙酸乙酯后, RDX/Al 炸药的静电积累值由 $0.50 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高到 $1.20 \sim 1.50 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

关键词:应用化学; 炸药; RDX; 铝粉; 静电感度

中图分类号:TJ55; O69

文献标识码:A

1 引 言

黑索今(RDX)是常用的炸药装药组分,是高绝缘物质材料,在生产、运输、储存、使用过程中都可能与工具、容器、设备、包装材料等介质发生摩擦产生静电,如果不采取有效措施,会使静电荷聚集,聚集的电荷表现出很高的静电电位,一旦具备放电条件就会产生火花放电,当火花放电能量达到足以点燃周围其它易燃物或炸药时,就可能发生着火或爆炸事故^[1-2]。此外,粉状 RDX 炸药本身在筛选、烘干、混料、称量等工序中也会产生静电荷,某些条件下同样显示出静电危险性。目前,有关 RDX 炸药的摩擦静电起电性能研究报道不多,而在 RDX 炸药中加入铝粉组成混合炸药的摩擦静电起电规律的文獻报道更少^[3-8]。

炸药的摩擦静电起电性能的测定一般采用斜槽法。本文用斜槽法测量粉状 RDX 及 RDX/Al 炸药体系的摩擦带电量,分析其摩擦静电的产生和变化规律,对指导 RDX 炸药的安全生产和使用,特别是 RDX/Al 的混合和喷雾造粒过程的安全操作具有重要意义。

2 试验方法

斜槽法测量粉状 RDX 摩擦带电量实质是模拟该类炸药在生产和使用过程中与管道、容器、工作台面等

接触时的摩擦带电现象。设计采用不锈钢的斜槽、法拉第筒和数字电荷仪,研究粉状 RDX 体系在摩擦条件下产生的静电带电量^[9]。

采用斜槽法测量静电量,测试装置见图 1。其原理是一定量的 RDX 炸药试样从漏斗中落入导槽内,从 1 m 斜槽的上端滑下,在下滑的过程中,与斜槽互相摩擦而产生静电电荷,带电的炸药落入接药容器法拉第筒内,由数字电荷仪测量出静电的电量。

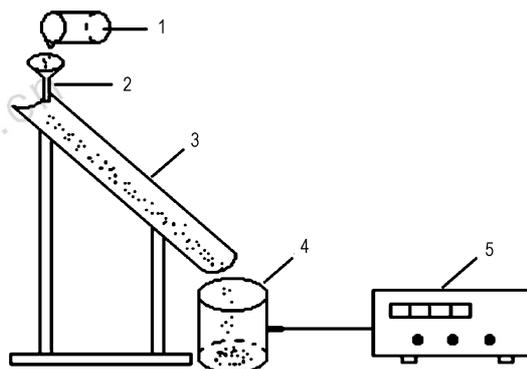


图 1 炸药摩擦产生静电量测试装置

1—样品杯, 2—漏斗, 3—斜槽, 4—法拉第筒, 5—数字电荷仪

Fig. 1 Test apparatus of electrostatic accumulation caused by from explosive friction

1—sample, 2—funnel, 3—flume,

4—Faraday canister, 5—digital charge meter

测试采用不锈钢的斜槽,法拉第筒是一种测量电量的传感器,其结构是由相互绝缘的金属内筒和外筒组成,内外筒的绝缘电阻为 $10^{12} \Omega$ 以上,绝缘材料可

收稿日期:2008-04-17;修回日期:2008-07-18

基金项目:基础产品创新计划项目(A0920061371)

作者简介:陆明(1963-),男,博士生导师,教授,主要从事含能材料、药物中间体研究。e-mail: luming@mail.njust.edu.cn

以选用聚氯乙烯、聚四氟乙烯或塑料等。炸药试样选用普通工业 RDX, 超细 RDX (均为江苏红光化工有限公司生产), RDX/Al 混合物等。

3 实验结果与讨论

3.1 工业 RDX 的静电积累

用不同质量的工业 RDX, 分别在 45° 和 55° 两种角度的斜槽的摩擦静电积累数据见表 1, 处理后的数据见图 2。由表 1 和图 2 可知: (1) RDX 通过不锈钢滑槽, 其静电积累为负值, 说明在滑行过程中 RDX 得到电子; (2) 静电积累值随着 RDX 质量的增加线性增加; (3) 斜槽角度为 55° 时, RDX 的静电积累值约为 $-4.0 \sim -5.0 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高于斜槽角度为 45° 时 RDX 的静电积累值, 约为 $-3.0 \sim -3.5 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。斜槽的倾斜角对带电量有影响, 在一定倾角范围内, 随着倾斜角的增大静电量也增大。当倾斜角达到一定值时, 静电量出现最大值。

表 1 不同质量 RDX 的摩擦静电积累数据

Table 1 Electrostatic accumulation of RDX with different mass

RDX /g	flume angle /($^\circ$)	Q/nC			\bar{Q}/nC	q / $\mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$
		1	2	3		
40	45	-123.3	-119.4	-121.5	-121.4	-3.04
30	45	-87.3	-91.8	-93.5	-90.9	-3.04
20	45	-66.4	-71.3	-72.0	-69.9	-3.50
40	55	-181.2	-167.5	-178.1	-175.6	-4.39
30	55	-137.0	-133.9	-142.5	-137.8	-4.59
20	55	-96.0	-101.6	-95.7	-97.8	-4.89

Note: RDX feed rate = $1 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, Q, measure value of electrostatic accumulation.

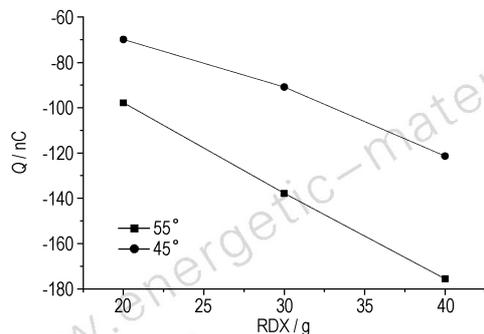


图 2 不同质量 RDX 在斜槽角度 45° 和 55° 的摩擦静电积累

Fig. 2 Electrostatic accumulation of RDX with different mass at angles 45° and 55°

分析这一规律的原因, 炸药所带静电量的大小取决于炸药粉在斜槽中的流散性和流动下滑的速度。适当的流散性和流动下滑速度, 有利于提高粒子之间的

相互摩擦程度, 从而有利于电子从比较容易失去电子的一方转移到比较容易接受电子的一方; 摩擦作用越大, 产生电荷的速度越快, 不至于使产生的电荷逐渐从空气中放掉而来不及补充。因此, 摩擦作用越大, 越有利于电荷的累积。随着斜槽倾角的增大, 下滑速度增大, 但另一方面摩擦作用减小, 两者的综合作用, 使静电量在某一倾角时达最大值。当倾斜角大于这一倾角时, 物料的运动主要是重力作用引起的下滑, 摩擦作用减小, 产生的摩擦静电积累减少。

RDX 在斜槽中的加料速度对摩擦静电积累影响见表 2。由表 2 得出, 加料速度 $1 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的静电积累测定平均值为 $-3.03 \sim -3.50 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高于加料速度 $2 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的静电积累测定平均值 $-1.95 \sim -2.16 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在一定范围内, 较慢的加料速度, 有利于颗粒之间的充分摩擦, 使静电积累值增加。

表 2 RDX 加料速度对静电积累的影响

Table 2 Effect of feed rate on electrostatic accumulation of RDX

RDX /g	feed rate / $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	Q/nC			\bar{Q}/nC	q / $\mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$
		1	2	3		
40	1	-123.3	-119.4	-121.5	-121.4	-3.04
30	1	-87.3	-91.8	-93.5	-90.9	-3.03
20	1	-66.4	-71.3	-72.0	-69.9	-3.50
40	2	-80.6	-76.0	-77.8	-78.1	-1.95
30	2	-62.1	-58.3	-58.7	-59.7	-1.99
20	2	-38.4	-48.3	-42.8	-43.2	-2.16
10	2	-21.3	-21.9	-20.1	-21.1	-2.11

Note: flume angle = 45° .

3.2 工业 RDX/Al 混合体系的静电积累

分别测定了 RDX/Al = 75/20 和 RDX/Al = 65/30 两种混合炸药, 在斜槽角度分别为 45° 和 55° 时加料速度 $1 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 的静电积累情况, 不同比例和质量的 RDX/Al 混合炸药的静电积累数据见表 3。由表 3 可知:

(1) 加入铝粉后, 粉体摩擦产生静电, 所带电荷的性质发生变化, 由 RDX 的带负电荷变为 RDX/Al 带正电荷 RDX/Al 混合粉体由滑槽滑下, RDX 粉末与铝粉之间有摩擦作用, RDX 和铝粉与不锈钢滑槽之间也有摩擦作用。单纯铝粉与不锈钢滑槽之间的摩擦产生静电很少。只有 RDX 粉末与铝粉之间和 RDX 与不锈钢滑槽之间的摩擦作用产生静电。前面的研究表明, RDX 与不锈钢滑槽之间的摩擦, 使 RDX 带负电荷; 活泼金属铝粉与 RDX 粉末之间的摩擦, 铝粉失去电子, 而 RDX 粉末得到电子带负电荷; RDX 粉体的高负电性, 部分被传递给不锈钢滑槽; 最终的结果是 RDX/Al 混合粉体带正电荷。

表3 不同质量 RDX/Al 的静电积累数据

Table 3 Electrostatic accumulation of RDX/Al with different mass

RDX /g	RDX/Al g/g	flume angle /($^{\circ}$)	Q/nC			\bar{Q}/nC	q / $\mu C \cdot kg^{-1}$
			1	2	3		
40	75/20	45	19.0	20.3	20.1	19.8	0.50
30	75/20	45	14.7	14.5	15.5	14.9	0.50
20	75/20	45	10.3	9.7	9.3	9.8	0.49
40	75/20	55	13.5	14.3	13.8	13.9	0.35
30	75/20	55	10.9	11.3	9.9	10.7	0.36
20	75/20	55	7.9	8.3	8.5	8.2	0.41
40	65/30	45	47.2	46.3	49.1	47.5	1.19
30	65/30	45	35.9	34.5	35.5	35.3	1.18
20	65/30	45	22.4	25.1	23.3	23.6	1.18
50	65/30	55	31.0	33.4	32.5	32.3	0.65
40	65/30	55	28.1	27.4	27.0	27.5	0.69
30	65/30	55	22.1	22.8	21.9	22.3	0.74
20	65/30	55	14.8	13.9	14.3	14.3	0.72

Note: RDX feed rate = $1 g \cdot s^{-1}$, RDX/Al = 65/30.

(2) 加入铝粉后, RDX/Al 粉体摩擦产生静电积累量降低。在测试范围内, 单纯 RDX 粉体的静电积累量最高可达 $-4.89 \mu C \cdot kg^{-1}$, 而 RDX/Al 粉体的静电积累量最高仅达 $1.19 \mu C \cdot kg^{-1}$ 。

(3) RDX/Al 混合粉体中, 铝粉的比例提高, 其 RDX/Al 混合粉体摩擦产生的正电荷积累量增加, 由 $0.35 \sim 0.50 \mu C \cdot kg^{-1}$ 增加到 $0.70 \sim 1.20 \mu C \cdot kg^{-1}$ 。

(4) RDX/Al 混合粉体在斜槽中滑落, 斜槽角度为 45° 时的正电荷静电积累值高于斜槽角度为 55° 时的正电荷静电积累值。

RDX 与 Al 的比例为 75 : 20 时, 斜槽角度为 45° 时的正电荷静电积累值约 $0.50 \mu C \cdot kg^{-1}$, 高于斜槽角度为 55° 时的正电荷静电积累值 $0.35 \sim 0.40 \mu C \cdot kg^{-1}$ 。RDX 与 Al 的比例为 65 : 30 时, 斜槽角度为 45° 时的正电荷静电积累值约 $1.18 \mu C \cdot kg^{-1}$, 高于斜槽角度为 55° 时的正电荷静电积累值 $0.69 \sim 0.74 \mu C \cdot kg^{-1}$ 。

3.3 粒度和溶剂对静电产生的影响

表 4 为不同炸药粒度条件下, 所测得的 RDX 静电积累量。一般来说, 随着炸药粒度直径的增大, 表现出 RDX 带电量减少。这是由于随着粒度增大, 炸药颗粒与斜槽的接触面积减少, 摩擦面积减少, 使静电量减小。但由表 4 可知, 在工业 RDX 加入 20% ~ 30% 的超细 RDX, 体系流散性下降, RDX 在不锈钢滑槽下滑有成团现象, 使体系产生的静电积累值有所减少, 但下降幅度不大。

同样, 在 RDX 和 RDX/Al 体系中, 加入 3% ~ 8% 的乙酸乙酯、石油醚, 也使体系的流散性下降, RDX 在不锈钢滑槽下滑有成团现象。表 5 给出了溶剂对

RDX/Al 炸药静电积累量的影响。由表 5 可知, 有机溶剂的加入, 在一定程度上, 使体系产生的静电积累值增加。如工业 RDX 加入 3% 石油醚后, 静电积累值由 $-3.0 \sim -3.5 \mu C \cdot kg^{-1}$, 提高到 $-4.3 \mu C \cdot kg^{-1}$ 。加入有机溶剂石油醚和乙酸乙酯后, 物料相互摩擦出现的电荷较难导走, 故易带静电荷而使静电积累值增加, RDX/Al 炸药的静电积累值由 $0.5 \mu C \cdot kg^{-1}$, 提高到 $1.2 \sim 1.5 \mu C \cdot kg^{-1}$ 。

表4 炸药粒度对 RDX 静电积累量的影响

Table 4 Effect of explosive particle size on electrostatic accumulation of RDX

explosive	mass /g	Q/nC			\bar{Q}/nC	q / $\mu C \cdot kg^{-1}$
		1	2	3		
industrial RDX	20	-66.4	-71.3	-72.0	-69.9	-3.50
industrial RDX : extra fine RDX = 3 : 1	20	-59.7	-62.1	-64.9	-62.3	-3.11

Note: RDX feed rate = $1 g \cdot s^{-1}$, flume angle = 45° .

表5 溶剂对 RDX/Al 炸药静电积累量的影响

Table 5 Effect of organic solvent on electrostatic accumulation of RDX/Al

organic solvent	explosive	amount of solvent/%	\bar{Q}/nC	q / $\mu C \cdot kg^{-1}$
petroleum ether	industrial RDX	3	-85.8	-4.29
no solvent	0	9.8	0.49	
petroleum ether		3	28.6	1.43
petroleum ether	RDX/Al	6	25.4	1.27
petroleum ether	= 75/20	8	24.4	1.22
ethyl acetate		4	28.2	1.41
ethyl acetate		8	30.0	1.50

Note: Explosive 20 g, RDX feed rate = $1 g \cdot s^{-1}$, flume angle = 45° .

4 结论

(1) RDX 通过不锈钢滑槽, 静电积累值与 RDX 质量成线性关系; 静电积累值约为 $-3.0 \sim -5.0 \mu C \cdot kg^{-1}$ 。

(2) RDX 加入铝粉后, 静电由 RDX 的带负电荷变为 RDX/Al 带正电荷; 在测试范围内, 单纯 RDX 粉体的静电积累量最高可达 $-4.89 \mu C \cdot kg^{-1}$, 而 RDX/Al 粉体的静电积累量最高仅达 $1.19 \mu C \cdot kg^{-1}$ 。随着铝粉的比例提高, RDX/Al 混合粉体摩擦产生的正电荷积累量增加, 由 $0.35 \sim 0.50 \mu C \cdot kg^{-1}$ 增加到 $0.70 \sim 1.20 \mu C \cdot kg^{-1}$ 。

(3) 在工业 RDX 中加入超细 RDX, 体系产生的静电积累值有所减少; 加入有机溶剂后, RDX 和 RDX/Al 体系产生的静电积累值均有所增加。

参考文献:

- [1] 曹欣茂. 炸药静电危险的研究[J]. 火炸药, 1993(2): 33-35.
CAO Xin-mao. Study on dangerous of explosives eletrostatic [J]. *Explosives & Propellants*, 1993(2): 33-35.
- [2] 陆明. 表面活性剂及其应用技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2007: 226.
- [3] 刘均, 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(3): 1-4.
- [4] 李德鹏. 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.
LI De-peng. Comparison of the relative and real electrostatic sensitivities of propellants and explosives[J]. *Acta Armamentarill*, 1997, 18(2): 162.
- [5] 张荣奇, 谭志良, 林永涛. 常用静电测量技术及其特点[J]. 装备环境工程, 2007, 4(2): 85-88.
ZHANG Rong-qi, TAN Zhi-liang, LIN Yong-tao. Overview on electrostatic testing technologies and their characteristics [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2007, 4(2): 85-88.
- [6] 李德晃, 徐娟珍. 高聚物粘结炸药静电控制[J]. 含能材料, 2000, 8(4): 181-183.
LI De-huang, XU Juan-zhen. Static electricity control of polymer bonded explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2000, 8(4): 181-183.
- [7] Williams M, Wingrave M. The effect of humidity on the friction sensitivity of RDX[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2002, 27(4): 241-243.
- [8] 许治品. 黑索今的假密度变化与摩擦产生静电现象的关系[J]. 火炸药, 1989(1): 24.
XU Zhi-pin. Relationship between false density changes and frictional static electricity of RDX[J]. *Explosives & Propellants*, 1989(1): 24.
- [9] 编写组. 炸药理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982: 233.

Measurement and Analysis of the Frictional Static Electricity Characteristics of Composite RDX

LU Ming¹, ZHAO Sheng-xiang², CHEN Jing¹

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Electrostatic accumulation caused from RDX explosive and RDX/Al composite explosive friction was tested with a one-meter long flume. The results show that RDX obtain electrons while sliding on flume, and electrostatic accumulation (which is from $-3.0 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $-5.0 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$) has a linear relationship with the mass of RDX. The characteristic of static electricity and electrostatic accumulation change after the addition of aluminum powder. The maximum electrostatic accumulation of RDX/Al is $1.19 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ while that of RDX is $-4.89 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$. Electrostatic accumulation changes from $0.35-0.50 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $0.70-1.20 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ with the proportion of Al powder increasing from 20% to 30%. The electrostatic accumulation of RDX/Al composite explosive increases from $0.50 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $1.20-1.50 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ after addition 3% - 8% organic solvents, such as petroleum ether and ethyl acetate.

Key words: applied chemistry; explosive; RDX; Al powder; electrostatic sensitivity