

doi: 10.7690/bgzdh.2018.12.020

## 发射药制造过程中静电产生机理及控制措施

张洪林, 李洪叶, 刘宝民, 崔立明, 李欣馨, 王旭东  
(辽宁庆阳特种化工有限公司院士工作站, 辽宁 辽阳 111002)

**摘要:** 为提升发射药生产过程的安全性, 对其在制造过程中静电产生机理及控制措施进行研究。通过对发射药制造过程易产生静电的主要工序进行分析, 根据发射药制造过程中静电产生的机理, 分别提出了控制发射药制造过程中接触带电、摩擦带电和升温带电的措施, 并进行试验验证。结果表明: 控制静电产生的主要措施是改变设备表面的功函数, 增加导电剂和环境湿度, 减少电荷的迁移和使电荷平衡。

**关键词:** 发射药; 静电; 控制措施

**中图分类号:** TJ55 **文献标志码:** A

## Mechanism of Electrostatic Generation and Control Measures in Propellant Production Process

Zhang Honglin, Li Hongye, Liu Baomin, Cui Liming, Li Xinxin, Wang Xudong  
(Academician Workstation of Liaoning Qingyang Chemical Industry Corporation, Liaoyang 111002, China)

**Abstract:** In order to improve the safety of the propellant production process, the electrostatic generation mechanism and control measures in the propellant production process are studied. Through the analysis of the main processes that are easy to generate static electricity in the of propellant, according to the mechanism of electrostatic generated in the production process of propellant, the measures to control the generation of the electrostatic generation during the production process of propellant are proposed from the aspects of contact charging, friction charging and heating charging, and the test is verified. The results show that the main measures to control the electrostatic generation are to change the work function of the device surface, increase the conductivity and environment humidity, reduce the migration of charge and balance the charge.

**Keywords:** propellant; electrostatic; control measures

### 0 引言

静电是一种处于静止状态或不做定向运动的电荷。静电放电是导致发射药燃烧爆炸事故发生的主要因素之一。在发射药制造过程中, 制造发射药所用原料及发射药药粒之间和相关设备相互摩擦运动就会产生静电。由于发射药是高绝缘性物体, 其体积电阻率高达  $10^{13} \Omega \cdot m$  以上, 是电的不良导体, 导致发射药及原材料自我释放静电的能力较差, 就会使产生的大量静电不断被积累。带有静电的发射药和与之有电位差的物体接触时, 就会出现静电放电现象。当放电能量大于发射药及其周围可燃气体的最小点火能时, 就存在引发燃烧爆炸事故的可能性; 因此, 发射药制造过程中的静电现象是造成燃烧、爆炸事故重要原因之一。

在发射药防静电技术研究方面, 国内卫水爱等研究了发射药生产过程中静电锥体放电规律<sup>[1]</sup>, 钱仲研究了发射药生产防静电问题<sup>[2]</sup>, 董朝阳等研究

了发射药制造中的静电在线检测及消除<sup>[3]</sup>。但国内外对发射药制造过程中静电产生的机理和控制方法研究报道较少。国外在含能材料静电研究方面主要集中在粉体材料的静电产生与防护研究方面。发射药制造一般采用溶剂法工艺, 主要产生静电和静电积累的工序是固体原料加料、烘干及混同包装工序。笔者分析了溶剂法发射药制造过程中产生静电的机理, 提出了控制发射药制造过程中防止静电危害的措施。

### 1 发射药制造过程静电产生的机理

#### 1.1 接触带电

由于物质分子中质子所带的正电荷数等于核外电子所带的负电荷数, 所以物质在自然状态下都呈现出电中性, 即不带电状态。当发生电荷转移, 物体正、负电荷失去平衡时, 则成为带电体。物体产生静电的过程包括使物体间发生正负电荷转移并最终导致物体正负电荷平衡被破坏的所有过程<sup>[4]</sup>。对

收稿日期: 2018-08-22; 修回日期: 2018-09-05

作者简介: 张洪林(1960—), 男, 河北人, 博士, 研究员级高级工程师, 从事含能材料及技术创新研究。

于发射药制造过程，固体物料与设备的接触，发射药粒之间及与设备的摩擦是产生静电的主要方式。

当 2 个固体物质(包括颗粒)互相接触时，电荷会根据 2 种物质表面的电子或离子的能量不同而从一个物体向另一个物体转移，并直至达到电荷的平衡<sup>[5]</sup>。两者分离后，失去电子的物体带正电，而得到电子的则带负电。

接触分离起电是指 2 种不同性质的物体表面相互接触并迅速分离后，分别带上数量相等、电性相反的静电电荷的过程。量子力学和能带理论认为，接触带电的机理是由于物体接触表面初始费米能级的差异引起电荷的转移<sup>[6]</sup>。费米能级可表示为功函数。功函数是指从物体中发射一个电子所需要的最小能量。

当 2 个物体相互接触的表面距离小于 25 μm 时，如果它们的功函数有差异，则以此为驱动力，电子会在 2 个物体接触面之间发生转移，最终在接触面空隙中形成偶电层。当偶电层的电位差补偿了两侧物质原始功函数之差时，电子就会停止转移并达到平衡状态。此时，若令两物体快速分离，形成的偶电层无法完全消散，就会使两物体分别带上多余的正负电荷，成为带电体。两物体的功函数相差越大，偶电层转移的电荷数量就会越多，接触面两边的电位差就会越大，分离后携带的电量也会越多。功函数越小越容易失去电子带正电荷，功函数越大越容易得到电子带负电荷。2 种物质在静电序列中相差距离的大小，体现了它们相互接触之后接触电位的高低<sup>[7]</sup>。

在发射药制造过程中，塑化机的物料加料过程是固体物料通过加料器加入塑化机中。固体物料一般为绝缘体，加料器多为金属导体，两者的功函数存在差异。固体物料与加料器的接触摩擦易形成接触带电，这就是加料过程中使固体物料产生静电主要原因。

利用斜槽法(钢槽)对固体材料 RDX 进行静电积累试验，测量固体材料 RDX 通过不同斜槽长度后静电电荷积累值，试验结果见表 1。

表 1 接触摩擦带电试验结果

固体材料 RDX 质量/g	斜槽 长度/cm	斜槽 角度/(°)	静电 电荷量/nC
5	100	60	-46.3
5	75	60	-43.1
5	50	60	-35.0
5	25	60	-28.1

由表可见：随着斜槽长度增加，固体材料 RDX

与斜槽的接触摩擦量增大，使固体材料 RDX 与斜槽之间接触分离的次数增多，导致静电积累量增大。

### 1.2 摩擦带电

摩擦起电本质上与接触带电类似，只是物质之间的摩擦使得接触点增多、接触面积增大，甚至会使得接触面温度升高。这些都促进了电荷的转移，使静电产生速率更大。

无论是相似物质，还是不同物质间都会发生摩擦起电。2 个相似物质间产生的电荷可以与不同物质间一样多<sup>[8]</sup>。实际上，除 2 种不同的物质摩擦以外，当同一材料的两物体分开时，也能够因摩擦起电而生成基本的静电电荷。

对于绝缘体，由于其中的电子状态具有空间区域性，即使内部到处都存在低能态的空位，电子仍可被高能态捕获。摩擦为接触表面的高能态捕获电子提供了释放途径。当绝缘体颗粒之间摩擦时，为一个表面的高能态电子提供了与另外一个表面的低能态空穴紧密接触的机会，从而导致了高能态电子向另一个颗粒表面低能态空穴的跃迁。当摩擦接触双方发生分离，在分离过程中界接触面状态没有完全消失前，界面能级由于分离力的作用升高，界面处聚集的电荷会迁移回绝缘体，导致两者分离后每个表面上均留下了剩余电荷，使绝缘体带电。

摩擦起电对摩擦能量和速度最为敏感，所产生的静电电荷随摩擦速度增加而增加，摩擦能量对电荷转移的影响要大于物质性质的影响。这是因为摩擦过程中的动能使得接触表面电子或离子的能级发生变化，从而影响了电荷的转移过程。

在发射药制造过程中，混同包装作业都将使发射药药粒之间产生摩擦，使其产生静电。对发射药摩擦起电进行试验，将发射药粒装入棉纤维布袋中，测量翻动两次的间断摩擦和翻动 10 次的连续摩擦后的静电电位，试验结果见表 2。

表 2 摩擦对发射药静电影响的试验结果

发射药	静电电位/V	
	间断摩擦	连续摩擦
单基药	508	2 218
三基药	526	2 617

由表可见：摩擦使发射药的静电增加，摩擦状态越剧烈，产生的静电越大。

### 1.3 升温带电

物质由原子构成，而原子由带正电的质子和带相同负电的电子组成，物质整体显中性。根据量子

力学理论，在单个原子中，电子具有一系列分离的能级。如果物体中含有若干个相同的原子，那么原先每个原子中具有相同能量的所有价电子，现在处于共有化状态。这些被共有化的外层电子，由于泡利不相容原理的限制，不能处于相同的能级上，这就使得原来相同的能级分裂成若干个和原能级相近的新能级。新能级具有一定能量范围，形成了不同能级的能带。在能量较低的能带中，所有能级均被电子占据，而能量较高的能带则没有电子。在绝对零度时，能带中的电子首先占据能带中的最低能级，填满后再继续填充次低级的能级，依次类推。当温度高于绝对零度时，电子会具有一定的热能，因此有些电子会具有稍高于费米能级的能量，并留下一些稍低于费米能级的空穴。当物质被加热时，费米能级附近的电子获得热能，在两物体相互接触面发生电子迁移。两物体分离后，产生带电现象。

在发射药制造过程中，发射药烘干过程是使药粒加热过程，由于温度的作用，使药粒之间接触面发生电子迁移，使药粒产生带电。对发射药升温带电进行试验，将发射药由 20 ℃ 加热到 60 ℃，保温 40 h，测量加热前后发射药的静电电位，试验结果见表 3。

表 3 加热对发射药静电影响的试验结果

发射药	静电电位/V	
	加热前	加热后
单基药	0	50
三基药	0	60

由此可见，加热会使发射药产生静电。

## 2 发射药制造过程静电控制措施

### 2.1 控制接触带电的措施

两接触物体由于得失电子的能力不同，电子由易失去电子的物体表面转移到相对易得到电子的物体表面，使两物体的接触面间产生一个偶电层。若这时两物体分离，则各自带了相反的摩擦电荷。

在发射药制造过程中，加入塑化机的固体物料与加料器表面存在接触分离过程，是产生静电的重要因素。

固体物料与加料器表面接触是两不同电介质间的接触摩擦过程，此时所形成的偶电层电荷面密度可由下式<sup>[9]</sup>表示：

$$\sigma = \frac{2\varepsilon_0 |\Phi_1 - \Phi_2|}{e \left( \frac{\delta_1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{\delta_2}{\varepsilon_{r2}} \right)}$$

式中： $\varepsilon_0$  为真空电容率； $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  分别为固体物料和

加料器表面的相对介电常数； $e$  为电子电量； $\delta_1$ 、 $\delta_2$  分别为固体物料和加料器表面的偶电层厚度； $\Phi_1$ 、 $\Phi_2$  分别为固体物料和加料器表面的功函数。功函数表示了物体发射一个电子的最小能量。

从上式可知：要减少固体物料与加料器表面接触摩擦产生的静电，就要使两者的功函数尽可能一致。可通过对固体物料或加料器表面进行改性材料涂覆，用调整涂覆材料的功函数的大小，使 $(\Phi_1 - \Phi_2)$  的值趋于零来达到减少静电产生的目的。对于制式发射药，其配方组分是确定的，对固体物料进行涂覆将改变发射药的组分，影响发射药的性能，而对加料器表面进行改性材料涂覆，在不改变发射药原料的条件下，是消除静电的一种实用方法。

加料器表面涂覆改性材料前后固体物料静电变化试验结果对比见表 4。

表 4 加料器表面涂覆改性材料前后固体物料静电变化试验结果

固体物料质量/kg	加料器	加料器振动频率/Hz	加料后静电电压/V	静电消除率/%
1.000	不锈钢	50	+56 000	—
1.000	带有改性涂层	50	+1 800	96

由表可见：通过采用加料器表面涂覆改性材料，使加料器表面涂层得失电子的能力与固体物料得失电子的能力相同或相近，从而减少固体物料的接触摩擦起电量。

### 2.2 控制摩擦带电的措施

摩擦产生静电是由于两物体接触面发射电子迁移造成的。由于发射药是绝缘体，发生电子迁移不能使物体所带正负电荷量达到平衡，导致静电产生。

为减少或消除静电，就要使物体所带正负电荷量迅速达到平衡，能产生这种效果的外界因素就是增加物体的导电性。通过对发射药药粒表面进行石墨光泽，使发射药表面具有导电性，减少物体间电荷量的不平衡性，从而减少或消除静电。

在发射药制造过程中，对发射药摩擦起电试验中的发射药粒加入石墨作为导电剂，将发射药粒进行石墨光泽后装入棉纤维布袋中，测量翻动 2 次的间断摩擦和翻动 10 次连续摩擦后的静电电位，试验结果见表 5。

表 5 石墨导电剂对发射药静电影响的试验结果

发射药	静电电位/V	
	间断摩擦	连续摩擦
未石墨光泽的单基药	508	2 218
石墨光泽的单基药	62	620
未石墨光泽的三基药	526	2 617
石墨光泽的三基药	75	625

由表可见：在发射药中则加导电剂，使摩擦对发射药产生的静电大幅度减小。

### 2.3 控制升温带电的措施

物体升温时，物体内费米能级的电子获得能量而易于发生迁移。由于发射药是绝缘体，将导致产生静电。改变环境条件也可增加发射药表面导电性。

通过提高环境湿度来增加发射药表面的导电性。当空气湿度提高时，空气中的水分子作热运动，撞击到物质表面的几率增大，水分子容易被物体吸收或者附着在表面，形成一层很薄的水膜，由于水分子的强极性以及溶解在水中杂质的作用，可降低物体的表面电阻率。

在发射药制造过程中，将烘干环境的相对湿度由 30%提高到 75%，试验结果见表 6。

表 6 湿度对发射药静电影响的试验结果

发射药	静电电位/V	
	环境相对湿度 30%	环境相对湿度 75%
单基药	50	15
三基药	60	18

由表可见：通过增加环境湿度，使升温造成的发射药产生的静电大幅度减小。

## 3 结论

发射药制造过程中产生静电的主要方式是接触带电、摩擦带电和升温带电，其机理是发射药中电

荷的迁移导致其正负电荷不平衡而产生的。控制发射药制造过程中静电产生的措施是减少电荷的迁移和使电荷平衡的方法。笔者通过改变设备表面的功函数，使之与发射药功函数相近，从而减少接触起电；通过增加导电剂减少摩擦起电；通过增加环境湿度减少升温起电。

### 参考文献：

- [1] 卫水爱, 白春华, 李春光. 发射药生产过程中静电锥体放电规律数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2017(5): 892-899.
- [2] 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.
- [3] 董朝阳, 郭茂林, 李国峰. 发射药制造中的静电在线检测及消除[J]. 兵器装备工程学报, 2017(5): 27-30.
- [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: 127-134.
- [5] FAN L S, ZHU C. Principles of gas-solid flows[Z]. New York: Cambridge University press, 1998.
- [6] 吴宗汉. 基础静电学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2010: 102-105.
- [7] 中国物理学会. 静电起电问题[M]. 北京: 静电科研组, 1980: 392-406.
- [8] CROSS J A. Electrostatics: principles, problems and applications[M]. Bristol: Adam Hilger IOP Publishing, 1987: 263-268.
- [9] 方俊鑫, 殷之文. 电介质物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 132-137.

\*\*\*\*\*

(上接第 70 页)

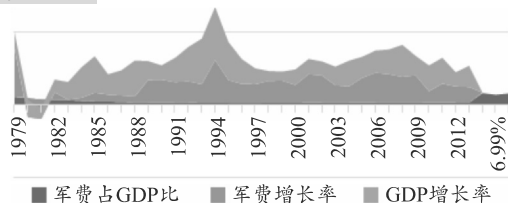


图 7 国防费与 GDP 增长率对比

## 5 结束语

笔者分析了预测国防费的重要性和必要性，针对缺少科学准确预测国防费方法的现状，建立基于 AR 模型和 MA 模型的国防费预测时间序列模型，并采用 2015—2017 年真实国防费数据进行验证。结果可以看出，这 2 种模型能够对中短期内国防费进行较为准确地预测，正确反映国防费增长规律，且误差范围较小。下一步，笔者将细化 ARMA 国防费预测模型的指标参数设置，深入开展对其他国家(如美国、俄罗斯等)的国防费建模工作，通过预测其他主要国家的国防费与我国进行对比分析，来研究未

来国防发展战略走向，为国防费资源有效配置奠定基础。

### 参考文献：

- [1] 黄瑞新, 周亮. 国防支出增长的决定因素及综合模型分析. 军事经济研究, 2008, 29(8): 19-22.
- [2] 侯树栋. 国防教育大词典[M]. 北京: 军事科学出版社, 1992: 27-45.
- [3] 刘忠生, 李东. 中国国防支出的实证分析[J]. 军事经济研究, 2008, 29(2): 13-16.
- [4] 张敬伟, 练萌, 龚杰. 基于时间序列与灰色理论的油料组合预测方法[J]. 兵器装备工程学报, 2018(1): 132-135.
- [5] 李宏, 师应来. 中国国防费时间序列预测模型的建立[J]. 统计与决策, 2005, 21(10): 26-28.
- [6] 王伟宏. 解析中国军费开支的增长——驳“中国军事威胁论”[J]. 思想理论教育导刊, 2007, 14(4): 60-69.
- [7] 姜鲁鸣, 王碧波. 国防建设与经济建设协调发展的资源均衡配置: 均衡状态下的国防支出增长机制研究[J]. 财经研究, 2007, 52(3): 87-100.