

文章编号: 1003-1480 (2003) 03-0011-04

利用母弹开舱过载的 压电点火器研究

刘飘楚

(北京理工大学机电工程学院, 北京, 100081)

摘 要: 讨论了弹箭(子母弹)利用母弹开舱抛撒子弹瞬间形成的过载挤压子弹内置的压电陶瓷环, 形成脉冲电流(高电压、小电流)至固定的电点火头, 实现点火的工作原理及点火能量计算。

关键词: 复合电源; 开舱过载; 压电陶瓷; 电位移; 点火装置

中图分类号: TJ459

文献标识码: A

Study on Piezoelectric Igniter through Dispersion Ballistic Open Overload

LIU Piao-chu

(Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

Abstract: The paper discusses the overload extruding piezoelectric ceramic ring set inside the submunitions formed immediately after dispersion ballistic open and submunitions spreading of the artillery and rocket, pulse current (high voltage, low current) formed to the fixed electric igniter, fulfill the calculation of ignition energy and working principle.

Key words: Compound power source; Dispersion ballistic open overload; Piezoelectric ceramics; Electric displacement; Ignition device

新装备的发展对弹用电源不断提出新的要求。弹丸飞行速度高, 使其达到规定最小攻击距离的时间缩短, 在炮口初速为 600m/s 的条件下, 当小攻击距离指标为 200m 时, 要求电池最晚不得迟于 300ms 供电, 否则难于保证战术指标实现; 要求炮弹在出炮口瞬间完成装定的新一代高射炮弹, 对电源供电时间的要求更高。但是, 电源激活直至稳定供电需要一个过程。一般地, 热电池激活时间为 1s, 化学电池激活时间为 500~1 000ms。解决需求与供给矛盾、实现快速供电的可行方法之一是采用复合电源供电接力方法(例如: 液体电池与压电电源复合, 液体电池和磁电机复合)。这种弹用复合电源将利用各种电源的优点, 缩短激活时间, 保证膛内

上电等要求。

某子母弹子弹用复合电源采用压电陶瓷电池与热电池复合。依靠母弹开舱抛撒子弹瞬间形成的过载挤压子弹内置的压电陶瓷环, 形成脉冲电流(高电压、小电流), 压电陶瓷电源激活时间为毫秒级, 能满足和保证初级功能性供电。但是, 因预留的空间有限, 过载作用时间短, 压电陶瓷电池部件结构设计难度极大。作为初级供电系统, 其可靠性要求极高, 是全系统能否发挥作用, 完成预定功能的关键环节。其中母弹开舱抛撒子弹瞬间形成的过载可否有效挤压压电陶瓷环使其正常供电又是关键中的关键。

收稿日期: 2003-05-23

作者简介: 刘飘楚(1963-), 男, 博士, 主要研究方向为中近程目标探测。

1 结构与原理

由黄铜外环构成外极，黄铜圆板带塞柱构成内

极，在塞柱及外环间有内外为轻微间隙配合的陶瓷（锆钛酸铅）环片，用塑料外壳、垫片、隔板等包装、固定及绝缘，内外极各有电线连至点火头。点火装置构造见图 1。

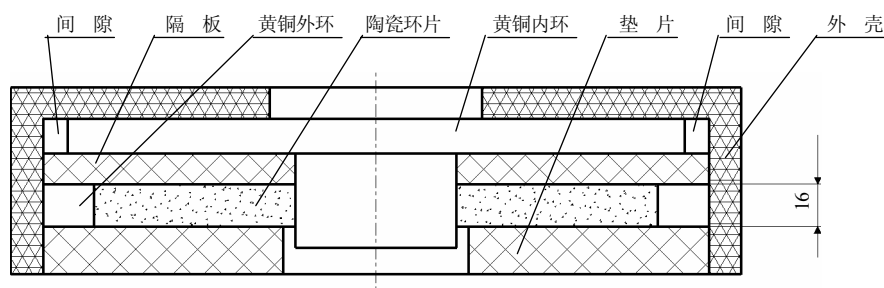


图 1 点火装置构造图

点火器受到爆炸引起的过载，内圈靠近爆炸源 4 发子弹的过载为 35 000g，9 发位于外圈的为 14 000g。在侧向过载作用下，黄铜外环压向陶瓷，陶瓷受压后在环片内侧形成不同极性的电荷，此电荷由黄铜的内外极连至点火头，形成脉冲电流（高电压、小电流）；当电压大于 600V 时，点火能成功，当然此 600V 电压为均值，其变异系数为 0.05，即容许电压为 $V^*=600\pm0.025\times600=(600\pm15)$ V。

2 压电点火能量有关参数计算

2.1 电位移计算

锆钛酸铅陶瓷的简称为 PZT。压电陶瓷的正压电效应可由下述公式计算^[1]：

$$\begin{cases} D_1 = \varepsilon_{11}^T E_1 + d_{15} T_5 & (1a) \\ D_2 = \varepsilon_{11}^T E_2 + d_{15} T_4 & (1b) \\ D_3 = \varepsilon_{33}^T E_3 + d_{31}(T_1 + T_2) + d_{33} T_3 & (1c) \end{cases} \quad (1)$$

式中：D——电位移；

d——压电常数；

T——应力；

ε ——介电常数；

E——电场。

现结构中，外力只有 T_3 （下标 3 代表极化方向），无外加电场，故：

$$D_3 = d_{33} T_3 \quad (2)$$

（2）式中， D_3 的单位法拉， T_3 的单位牛顿， d_{33} （压

电常数）的单位为 10^{-12}C/N 。先计算陶瓷上作用的力 T_3 。由黄铜外环质量及加速度 a 可算得 T_{31} 及 T_{32} （用下标 1, 2 分别表示内圈及外圈过载）。黄铜外环的体积 V 为：

$$V = \frac{\pi(2.10^2 - 1.81^2)}{4} \times 0.16 = 0.1425 \text{ cm}^3 \quad (3)$$

黄铜的比重可据文献^[2]查得为 8.43，其重量 G 为：

$$G = 0.1425 \times 8.43 / 1000 = 0.001201 \text{ kg} \quad (4)$$

转换成牛顿，有：

$$T_{31} = ma_1 = \frac{0.001201}{g} \times 35000g = 42.04 \text{ kg} = 414.2 \text{ N} \quad (5)$$

同理，可得：

$$T_{32} = ma_2 = \frac{0.001201}{g} \times 14000g \times 9.81 = 164.9 \text{ N} \quad (6)$$

参考文献^[1,3]，得：

$$d_{33}^T = 265 \times 10^{-12} \text{ F/N} \quad (7)$$

$$\text{也即：} d_{33}^T = 265 \text{ pC/N} \quad (8)$$

式中：pC——皮库，即 10^{-12}F ，故有

$$D_{31} = 265 \times 10^{-12} \times 414.2 = 109800 \times 10^{-12} \text{ F} = 0.1098 \mu\text{F} \quad (9)$$

$$D_{32} = 265 \times 10^{-12} \times 164.9 = 43700 \times 10^{-12} \text{ F} = 0.0437 \mu\text{F} \quad (10)$$

2.2 电压计算

本点火装置的压电陶瓷为带内孔圆片，其优点为适用于任何方向侧向过载，且其效果都相同。其缺点为尚未见现成计算公式，应将其能转化成上面已有计算公式的典型点火装置（常规圆柱形点火装置）。由文献^[3]（第 308~310 页），得出图 2 所示典型点火装置的电压计算的计算公式如下（符号改用文献[1]的符号）。

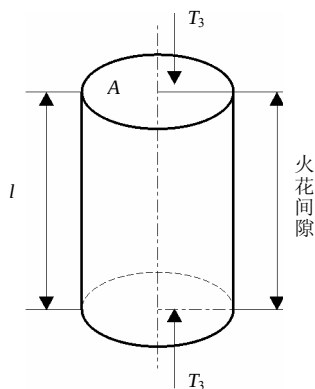


图 2 典型点火装置图

图 2 表示一已极化的圆柱体，其截面积为 A ，长度为 l ，两端作用有压力 T_3 ，在压力 T_3 作用下，有变形，

$$\delta_l = S_{33}^D \frac{T_3 l}{A} \quad (11)$$

S_{33} 为介质的柔性系数，总的机械功为：

$$W_{ma} = \frac{1}{2} T_3 \delta_l = \frac{1}{2} S_{33}^D \frac{T_3^2 l}{A} \quad (12)$$

由机电耦合系数 k_{33} 定义可得电能：

$$W_{el} = \frac{1}{2} k_{33}^2 S_{33}^D \frac{T_3^2 l}{A} \quad (13)$$

因圆柱体两端存在电势差 U ， U 与电能有关，即：

$$W_{el} = \frac{1}{2} C U^2 \quad (14)$$

这里， C 电容，单位 F，又因为介电常数

$$\varepsilon_{33}^T = \frac{C l}{A} \quad (15)$$

$$\text{得: } W_{el} = \frac{1}{2} U^2 \varepsilon_{33}^T \frac{A}{l} \quad (16)$$

由式 (13) 与 (16)，得电压：

$$U = k_{33} \sqrt{S_{33}^D / \varepsilon_{33}^T} \times \frac{T_3 l}{A} \quad (17)$$

用符号 g_{33} 表示 $k_{33} \sqrt{S_{33}^D / \varepsilon_{33}^T}$ ，故有：

$$U = g_{33} \frac{T_3 l}{A} \quad (17a)$$

本点火装置外壳内侧与黄铜外环外侧有制造公差引起的小间隙，外环内侧与陶瓷片外侧也有因公差引起的小间隙（以上两个小间隙，其每个间隙量均在 0~0.26mm 之间），而陶瓷片内侧与黄铜圆柱内极间有公差间隙 0~0.15mm；因此当黄铜外环在过载作用下通过间隙向右撞向陶瓷片时，陶瓷片接着向右撞击黄铜内极圆柱左侧，再通过间隙及考虑到各个零件的受力变形，可认为总的受力如图 3 所示。

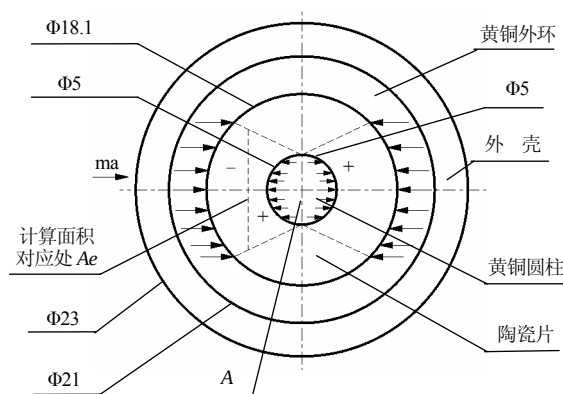


图 3 受力简化图

图 3 所画各端分力的合力均为 T_3 ，计算面积 A_e 为：

$$A_e = k_1 A \quad (18)$$

这里， k_1 为面积折算系数， A 为圆柱垂直截面中与陶瓷厚度 1.6mm 对应部分的面积，即 $A=5 \times 1.6=8\text{mm}^2$ 。由于存在间隙及变形，故实际受力较图 3 小相当多，取有效 T_{3e} 为 $T_3 k_2$ ，由于过载可能偏离侧向，即过载带有一些向垂直于板片方向偏，因此有效 T_3 还需乘一个方向系数 k_3 ，故有 $T_{3e} = T_3 \frac{k_2 k_3}{k_1}$ ，

综合系数 k 为：

$$k = \frac{k_2 k_3}{k_1} \quad (19)$$

$$\text{则有 } U = k_{33} \sqrt{S_{33}^D / \varepsilon_{33}^T} \cdot \frac{k_2 k_3 T_3 l}{k_1 A} \quad (20)$$

$$\text{也即 } U = g_{33} k \cdot \frac{T_3 l}{A} \quad (20a)$$

据文献[1]及[3], 取 $k_{33}=0.70$, $S_{33}^D=8 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$,

$\varepsilon_{33}^T=1\,500\,\varepsilon_0$, 式中, ε_0 为真空介电常数, 据文献

[3], 有 $\varepsilon_0=8.854 \times 10^{-12} \text{C/m}$

故有

$$\varepsilon_{33}^T=1\,500 \times 8.854 \times 10^{-12}=13\,280 \times 10^{-12} \text{C/m} \quad (21)$$

因而

$$g_{33}=0.70 \sqrt{\frac{8.854 \times 10^{-12}}{13\,280 \times 10^{-12}}}=0.017\,18 \text{m}^{3/2} \text{N}^{-1/2} \text{C}^{-1/2} \quad (22)$$

又可取: $k_1 \approx 1.5$, $k_2 \approx 0.7$, $k_3 \approx 0.7$, 则

$$k = \frac{0.7 \times 0.7}{1.5} = 0.326\,7 \quad (23)$$

从前面数据知, $T_{31}=414.2 \text{N}$, $T_{32}=164.9 \text{N}$, $l=6.55 \times 10^{-3}$, $A=8 \times 10^{-6}$; 由于图 3 相当于两个极化陶瓷片并联, 故电压不变, 只是电流增加; 故需改变电压计算公式, 把所有数据代入公式 (20a), 得

$$U_1 = 0.017\,18 \times 0.326\,7 \times \frac{414.2 \times 6.55 \times 10^{-3}}{8 \times 10^{-6}} = 1\,903 \text{V}$$

$$U_2 = U_1 \frac{164.9}{414.2} = 757.6 \text{V} \quad (k \text{ 的取值可由多次试验逐渐修正})。$$

3 结论

压电陶瓷两端产生的电压, 实质是“力致电荷效应”产生的电荷在电容上的积累。因此, 电压与压电陶瓷电容及外部电路并联电容有关, 压电电源放出的能量与外电路匹配的电容有关。本点火装置为两个有效陶瓷片并联, 能量增大, 在已经进行电压、电位移等参数计算的情况下, 可初步判断点火装置满足使用要求。进一步的试验验证了这一判断的正确性。

参考文献:

- [1] 张福学主编. 现代压电学. 上、中、下册 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 郭玉瑛主编. 飞机设计手册第 3 册, 材料 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1997.
- [3] A. J. Moulson 等著, 李世普等译. 电子陶瓷材料、性能、应用 [M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1993.
- [4] 冯元生, 冯蕴雯编著. 可靠性设计与可靠性试验评估理论 [M]. 西安: 西北工业大学继续教育学院, 2000.

新产品、新技术

基于亚稳态分子间复合物 (MIC) 技术的无铅击发药

目前常规击发药组分多为斯蒂芬酸铅、叠氮化铅、硫化锑、硝酸钡等, 上述材料均对环境有害, 其中的铅被人体吸收或溶于血液, 很难排出体外; 此外, 目前的无铅击发药在趋近-65°F 温度时分解。当用于航空炮系统的击发药弹药暴露于严寒环境时, 击发药在低温时是否可靠作用就很重要。当前使用的一种常规无铅击发药二硝基重氮酚仅满足工业应用, 无法满足军用要求。

专利 US5717159 涉及了供弹药底火组件使用的无铅击发药, 该无铅击发药是一种基于亚稳态分子间复合物技术上的改进型击发药。其目的是为底火提供一种改进的击发药, 该击发药不视温度而定, 并且在低温下也能可靠作用, 同时不含毒性材料, 燃烧产物无毒, 对环境无害。本发明的击发药不同于常规炸药组分, 它能爆轰、相互反应, 并能引起极强烈的放热反应。这种反应释放大量的热和燃烧颗粒, 使弹药中的主装药点火并迅速燃烧。击发药为铝粉和三氧化钼的混合物, 或是一种铝粉和特氟隆 (聚四氟乙烯) 粉的混合物。药剂的颗粒尺寸最好是 $0.1 \mu\text{m}$ 或小于 $0.1 \mu\text{m}$, 最佳范围为 $0.02 \sim 0.05 \mu\text{m}$, 铝粉的颗粒含有氧化铝外涂层。其中铝粉和钼粉的颗粒尺寸约 $200 \sim 500 \text{\AA}$ 。对于铝和三氧化钼复合材料, 铝粉的质量分数约 45%, 三氧化钼的质量分数约 55%; 铝和特氟隆复合材料的质量百分比各为 50%。该发明的击发药在 -65°F 时能可靠作用。

—— 彭和平报道