

文章编号: 1006-9941(2009)04-0424-04

## 战斗部旋转对固液混合装药发射安全性的影响

段 云, 张 奇, 李 伟

(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:**为了研究固液混合装药在发射过程的安全性,从固液混合装药的物理特性出发,考虑战斗部发射时装药与壳体的摩擦生热,在壳体和装药之间建立能量守恒方程,利用有限差分对其进行数值计算。计算得到,当战斗部转速为  $40 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$  时,燃料最高温度为 542 K,结果表明:装药与壳体之间的摩擦是固液混合装药发射过程的主要危险源。

**关键词:**爆炸力学; 燃料空气炸药; 发射安全性; 混合燃料

中图分类号: O383; TP216+.4

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.04.012

### 1 引 言

固液混合装药是 FAE 武器一次引爆型的主要装填燃料,其组分一般由金属颗粒、液态燃料和粘结剂等组成<sup>[1]</sup>。由于爆炸时具有高温高压等特点,世界各国都在大量使用。随着固液混合装药在高性能武器上的大量应用,固液混合装药在发射过程中多次发生早爆、早炸等安全性事故,严重地阻碍了高性能武器的发展。因此,开展固液混合装药的安全性研究对三高武器的使用具有重要意义。

国内外学者对装药发射安全性的研究,主要是利用热动力学和化学反应动力学对形成热点的各种机理进行数学描述<sup>[2]</sup>,其中孔隙压缩形成热点<sup>[3-5]</sup>的机理、演化过程是各国学者研究的热点问题,发表的论文较多,在某一方面已取得了一定的成果,但还不能正确全面描述发射过程中装药的早炸机理。因为,发射载荷下装药点火/爆炸问题十分复杂,一种模型不可能全面考虑所有影响炸药安全性的因素,必须根据实际问题,分门别类地寻找新的理论模型,去研究装药的安全性问题。

固液混合装药状态一般为松散介质,燃料之间间隙较大,装药整体密度较低。弹体发射时无法保证发射过程装药与壳体材料紧密粘接。在战斗部高速旋转过程中,装药与壳体可能发生相对运动,运动摩擦在装药与壳体分解面上产生热量形成热点可能是引起早炸的主要危险源。因此,分析装药与壳体摩擦生热的能量演化过程也就是“早炸”点火源的能量演化过程,对

研究固液混合装药的早炸机理至关重要。

发射过程中装药与壳体之间的摩擦生热与壳体转速有很大的关系,关于这方面的基础理论研究目前文献报道很少。本文根据固液混合装药物理形态的特殊性,在壳体与炸药之间建立能量守恒方程,分析战斗部旋转对固液混合装药发射安全性的影响,为固液混合装药用于高过载发射平台奠定理论基础。

### 2 物理模型

战斗部在发射过程中,在火药压力、弹前阻力、自身重力等作用下在膛内发生高速运动和转动,在高速运动和转动的作用下,装药由于惯性力的作用使装药与战斗部壳体之间发生沿轴向和转动方向的相对运动,由于壳体的结构特点,一般沿轴向的运动距离可以忽略不计,本文主要考虑装药与战斗部壳体在旋转方向的运动摩擦情况。图 1 是战斗部结构图,图 2 是分析的简化物理模型。在图 2 中,  $q_1$  表示摩擦生热传给壳体的热量,  $q_2$  表示摩擦生热传给装药的热量,  $x_1$ 、 $x_2$  分别表示壳体与装药的厚度,  $T_1$ 、 $T_2$  是壳体和装药中的温度。

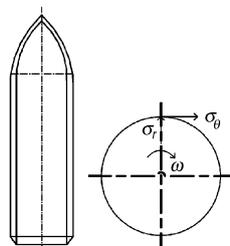


图 1 战斗部结构图

Fig. 1 Warhead's structure

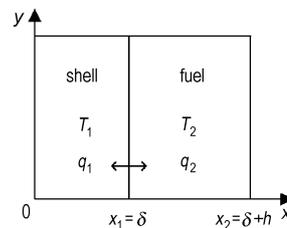


图 2 物理模型

Fig. 2 Physical model

#### 2.1 方程确定

建立壳体与固液混合燃料能量守恒方程时,作如

收稿日期: 2008-12-22; 修回日期: 2009-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(10772029), 北京理工大学校资助项目(20070242003)

作者简介: 段云(1978-), 男, 博士, 研究领域为安全理论与技术、战斗部技术。e-mail: yduan\_nmg@yahoo.com.cn

下假设：在发射整个过程中，壳体和燃料的热物性参数（热导率、密度、热容量）及燃料的化学反应特征量（活化能、指前因子、反应热）均不随时间变化；装药内部除了化学反应热外，无任何体热源，热量产生主要是壳体与燃料摩擦所产生。根据上述条件，参照文献[6-7]得到战斗部壳体内部能量守恒方程为：

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = k_1 \nabla^2 T_1$$

简化为：

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \quad \text{其中, } \alpha_1 = k_1 / \rho_1 c_1 \quad (1)$$

固液混合装药区内的能量守恒方程为：

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = k_2 \nabla^2 T_2 + \rho_2 Q_2 \frac{\partial A}{\partial t} \quad \text{其中, } \frac{\partial A}{\partial t} = z e^{-E/RT_2}$$

简化为：

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{Q_2}{c_2} z \exp\left(-\frac{E}{RT_2}\right) \quad \text{其中, } \alpha_2 = k_2 / \rho_2 c_2 \quad (2)$$

式中， $\rho$  为密度， $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ； $c$  为定压比热容， $\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ； $k$  为热传导系数， $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ； $Q$  为单位质量炸药的分解热， $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ ； $A$  为固相炸药浓度，可以忽略不计； $z$  为频率因子， $\text{s}^{-1}$ 。

### 2.2 边界条件的确定

炸药与壳体摩擦产生热量为摩擦力做功的总和  $q = fp\Delta v$ ，其中  $p$  是壳体与炸药中的压强， $f$  是摩擦系数， $\Delta v$  是壳体与炸药之间的相对运动速度。传入壳体的热量为  $q_1$ ，传入炸药的热量  $q_2$ ，不考虑其它的能量损失，认为摩擦产生热全部传入壳体和炸药，则  $q = q_1 + q_2$ 。

边界条件为：

$$x = 0, t > 0 \text{ 时, } k_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right| = 0 \quad (3)$$

$$x = \delta, t > 0 \text{ 时, } k_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right| = q_1, k_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right| = q_2, T_1 = T_2 \quad (4)$$

$$x = \delta + h, t > 0 \text{ 时, } k_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right| = 0 \quad (5)$$

由边界条件(4)得到：

$$q_1 = \frac{q}{1 + \frac{k_2}{k_1} \sqrt{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}}}, \quad q_2 = \frac{q}{1 + \frac{k_1}{k_2} \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}}} \quad (6)$$

初始条件：

$$T = F(x) = 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad 0 \leq x \leq L \quad t = 0 \quad (7)$$

式中， $L = \delta + h$ 。

### 2.3 侧向压力的确定

侧向压应力主要取决于装药结构，在固体炸药中，

一般由装药应力确定，而对于FAE这种装填固液混合燃料的战斗部，在发射过程中主要是燃料旋转产生的离心力。根据文献[8]得到装药旋转产生的离心力为：

$$\sigma_{r_{in}} = \frac{F}{\pi d} = \frac{2\rho\omega^2(r^3 - r_1^3)}{3d} \quad (8)$$

式中， $\rho$  为燃料密度， $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ； $\omega$  为发射过程中战斗部的转动角速度， $\text{r} \cdot \text{s}^{-1}$ ； $r_1$  为中心装药半径， $\text{cm}$ ； $r$  为装药半径， $\text{cm}$ ； $d$  为装药直径， $\text{cm}$ 。由以上方程联立求解，可以得到壳体和装药区的温度分布图。

### 3 方程求解

方程(1)~(8)就是描述壳体与装药之间摩擦的数学描述，对上述方程采用数值方法进行求解。壳体和燃料区微分方程采用显示有限差分形式表示，边界条件采用中心差分形式表示，图3是划分的网格图，经过化解得到如下形式的方程组：

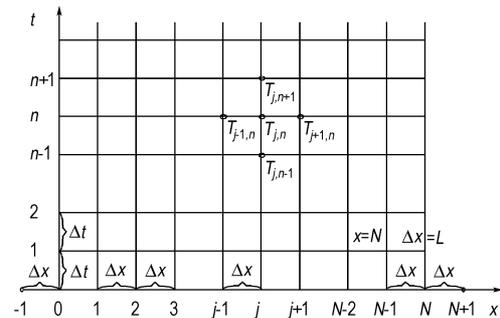


图3 区域  $(i, j)$  中步长为  $\Delta x, \Delta t$  的网格

Fig.3 Grid in the area of  $(i, j)$  at step size of  $\Delta x$  and  $\Delta t$

在壳体区：

$$T_0^{n+1} = (1 - 2r) T_0^n + 2r T_1^n, \quad j = 0 \quad (9)$$

$$T_j^{n+1} = r T_{j-1}^n + (1 - 2r) T_j^n + r T_{j+1}^n, \quad j = 1, 2, 3, \dots, N - 1 \quad (10)$$

$$T_N^{n+1} = 2r T_{N-1}^n + (1 - 2r) T_N^n + 2r \Delta x q_1 / k_1, \quad j = N \quad (11)$$

$$T_j^0 = F(j\Delta x) \equiv F_j, \quad j = 0, 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

式中， $n = 0, 1, 2, \dots$ 。

在装药区：

$$T_0^{n+1} = (1 - 2r) T_0^n + 2r T_1^n + \frac{2r\Delta x}{k_2} q_2 + \frac{\Delta t Q z}{c_2} \exp\left(-\frac{E}{RT_j^n}\right), \quad j = 0 \quad (13)$$

$$T_j^{n+1} = r T_{j-1}^n + (1 - 2r) T_j^n + r T_{j+1}^n + \frac{\Delta t Q z}{c_2} \exp\left(-\frac{E}{RT_j^n}\right), \quad j = 1, 2, 3, \dots, N - 1 \quad (14)$$

$$T_N^{n+1} = 2r T_{N-1}^n + (1 - 2r) T_N^n + \frac{\Delta t Q z}{c_2} \exp\left(-\frac{E}{RT_N^n}\right), \quad j = N \quad (15)$$

$$T_j^0 = F(j\Delta x) \equiv F_j, \quad j = 0, 1, 2, \dots, N \quad (16)$$

式中,  $n = 0, 1, 2, \dots$ 。

通过求解壳体和燃料区的方程组,便可得到不同时间内的温度分布。本文利用 Matlab 软件编写有限差分程序,对壳体和装药中的热传导进行了计算分析。

### 4 计算结果

从以上方程组可以看出,摩擦升温与战斗部转速、

材料的导热系数、装药密度、战斗结构、接触面光滑情况等有很大的关系。战斗部在发射过程中,转速随径向运动速度增加而增加,在什么时间内装药与壳体发生相对运动、运动距离的大小与发射环境有很大的关系,需要实验去验证。在这里我们假定装药与壳体在战斗部达到某一转速时,装药与壳体之间发生了相对运动。选战斗部转速为 40, 60, 80  $r \cdot s^{-1}$  三种情况进行计算,表 1 是某战斗部型号为 100 mm 的主要结构参数。

表 1 各种材料的性能参数

Table 1 Performance parameters of different materials

materials	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	$k/J \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$	$c/J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$	$r/cm$	$r_1/cm$	$Q/J \cdot g^{-1}$	$E/kJ \cdot mol^{-1}$	$Z/s^{-1}$	$\Delta v/m \cdot ms^{-1}$	$f$
fuel	1.47	0.002	1.31	5	1.5	1080	177.233	$1.46 \times 10^{19}$	0.2	0.5
shell	7.8	0.48	480							

图 4 是三种不同转速,在壳体和界面上产生能量随时间的变化情况,从图 4 中可知,在其它参数不变的情况下,随着战斗部转速增加,燃料的离心力也在增加,即使壳体和燃料发生很小的运动,产生的热量也很高,这些热量聚集在燃料内部就会产生爆炸的“热点”。为了更好的观测界面摩擦生热的传热情况,对转速为 40  $r \cdot s^{-1}$  时的壳体和燃料内部温度场进行了计算,图 5、图 7 是壳体与装药中的温度分布空间图,图 6、图 8 是不同时间壳体与燃料的温度分布图。

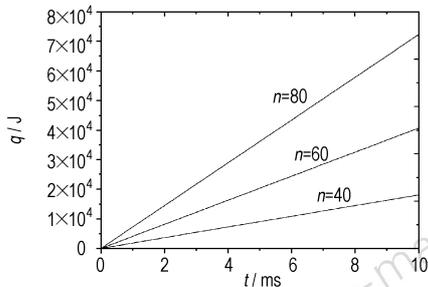


图 4 转速不同时能量随时间的变化图

Fig. 4 Curves of energy vs time at different rotation speeds

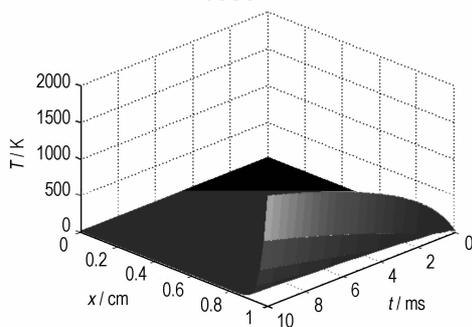


图 5 壳体中温度分布的空间图

Fig. 5 Spatial temperature distribution in shell

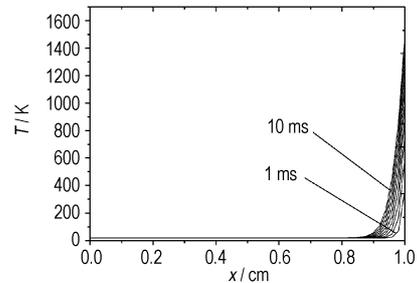


图 6 不同时间壳体中的温度分布图

Fig. 6 Temperature distributions at different times in shell

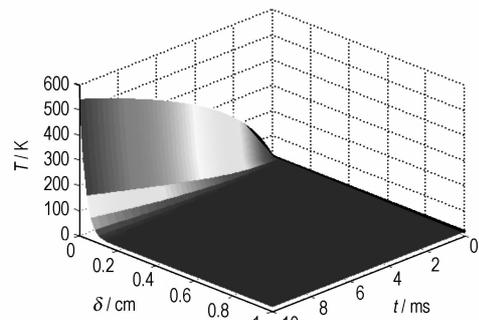


图 7 装药中温度分布的空间图

Fig. 7 Spatial temperature distribution in charge

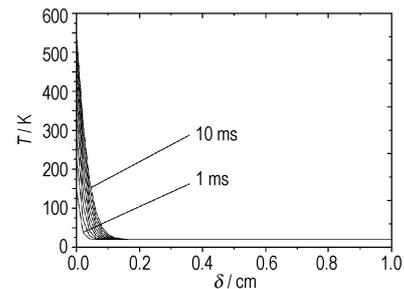


图 8 不同时间装药中的温度分布图

Fig. 8 Temperature distributions at different times in charge

计算所用时间为 10 ms, 即装药与壳体之间的相对运动距离为 2 m; 战斗部转速为  $40 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ , 从图 6、图 7 中可以看出, 即使转速很低, 在壳体和燃料中温度升得也很高, 文献[3]使用绝热加速量热仪 (ARC) 测得固液混合装药的爆炸温度为 483 K。采用本文方法计算, 当战斗部转速为  $40 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 燃料中最高温度达到 542 K, 已超过了固液混合燃料的爆炸极限, 而实际战斗部发射过程中出口转速远远要高于这个转速。从图 7 和图 8 中还可以看出, 由于固液燃料的热导率很低, 在 10 ms 内, 温度传播的距离还不到 2 mm, 这使大量的热量聚集在燃料薄层内, 增加了形成热点的可能性。所以, 战斗部旋转导致壳体与装药之间的摩擦生热是早炸的主要危险源。

笔者认为, 壳体与燃料之间摩擦生热是固液混合装药发射安全性理论研究中需要考虑的重要问题。这些能量聚集在燃料的局部范围内就可能成为引发早炸的“热点”。以往考察 FAE 武器的发射安全性一直使用传统发射安全性理论的依据, 即装药的最大发射应力。但对于 FAE 燃料, 发射时摩擦可能是导致早炸等事故的主要危险源, 应该引起战斗部设计者足够的重视。

## 5 结 论

考虑燃料与壳体摩擦生热, 在壳体和燃料中建立能量守恒方程并采用有限差分进行数值计算, 计算结果表明: 当战斗部转速为  $40 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 燃料的最高温度达到 542 K。这说明壳体与燃料之间一旦发生相对运动, 其摩擦生热产生的能量很高, 这些能量聚集在燃料的薄层内, 是发射过程中出现早炸的主要危险源。

## 参考文献:

- [1] 张奇, 白春华, 刘庆明, 等. 固、液混合燃料状态及特性研究[J]. 燃烧科学与技术, 2001, 7(3): 287-290.  
ZHANG Qi, BAI Chun-hua, LIU Qing-ming, et al. Analysis of mixed solid and liquid fuel state and character[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2001, 7(3): 287-290.
- [2] 章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [3] ZHANG Qi, JI Yan-hua, BAI Chun-hua, et al. Adiabatic compression of pores in mixed fuel medium during launching[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2004, 18(3): 237-244.
- [4] 魏可臻, 张奇. 装药内球形孔隙随加载率变形特性的数值模拟[J]. 含能材料, 2007, 15(6): 570-580.  
WEI Ke-zhen, ZHANG Qi. Numerical simulation on transformation characteristic of global hole in charge with loading rate[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(6): 570-580.
- [5] 纪艳华. 发射载荷下固液混合装药内孔隙动力响应特性研究[D]. 北京: 北京理工大学硕士学位论文, 2005.
- [6] 周彦煌, 王升晨. 实用两相流内弹道学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990: 70-90.
- [7] 林文洲, 洪滔. 高能炸药摩擦感度理论初步研究[J]. 含能材料, 2007, 15(1): 12-15.  
LIN Wen-zhou, HONG Tao. Theoretical analysis on friction sensitivity of high explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(1): 12-15.
- [8] 闫华, 张奇, 白春华. 发射状态下燃料对 FAE 战斗部壳体的应力作用分析[J]. 火炸药学报, 2003, 26(1): 16-19.  
YAN Hua, ZHANG Qi, BAI Chun-hua. The stress function of fuel on the shell of FAE warhead during launching[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2003, 26(1): 16-19.

## Effect of Warhead Rotation on the Launching Safety of Solid-Liquid Mixed Charge

DUAN Yun, ZHANG Qi, LI Wei

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

**Abstract:** Conservation equation of energy based on the physical property of solid-liquid mixed charge and the heat caused by the friction between shell and charge during launching, was established and calculated by finite difference method to analyze the launching safety of solid-liquid mixed charge. Results show that the maximum temperature of charge reach 542 K when the warhead rotation speed is  $40 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ , and the warhead rotation is the main hazard source in the launch process of solid-liquid mixed charge.

**Key words:** explosion mechanics; fuel air explosive; launching safety; mixed fuel