

文章编号: 1006-9941(2007)01-0012-04

高能炸药摩擦感度理论初步研究

林文洲¹, 洪 滔²

(1. 中国工程物理研究院研究生部, 北京 100080;

2. 北京应用物理与计算机数学研究所, 北京 100088)

摘要: 根据炸药的热反应扩散方程, 通过理论分析和数值模拟的方法对高能炸药的摩擦感度进行了研究。理论模型中考虑了由于炸药与金属摩擦作用导致炸药的熔化, 以及炸药温度变化引起炸药与金属之间摩擦阻力的变化。通过数值模拟考察了不同的摩擦系数对炸药与钢摩擦引起的点火的影响, 得到了 HMX 在 400 MPa 的压力作用下以 $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的相对速度与钢摩擦时界面温度的变化。当摩擦界面温度达到 750 K 时, 炸药发生点火。确定了 HMX 的点火时间为 0.43 ms, 金属与炸药的滑移的距离为 1.6 mm, 与 HMX 的摩擦感度实验结果基本符合。

关键词: 爆炸力学; 高能炸药; 摩擦感度; 点火; 熔化

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

1 引言

装药的侵彻体在侵彻过程中, 由于壳体材料与炸药对冲击作用响应的差异, 传入的激波导致壳体与炸药间的相对运动, 产生摩擦。实验表明, 炸药与壳体之间的摩擦作用是导致炸药点火的重要因素之一。J. G. Glenn^[1] 等将炸药放置在圆柱管内, 用活塞装置在炸药中产生一定的压力并使之在钢管内滑动, 产生摩擦。Avi Birk^[2] 等用活塞以不同的速率对装在不同厚度的钢管中的 Comp. B 进行加载。他们均在实验中观察到炸药与管壁的摩擦导致点火的现象。

在 高能炸药的摩擦感度实验中, 将炸药置于装置的两个滑柱之间, 施加一定的压力 (100 ~ 500 MPa)^[3,4], 然后对炸药施加短暂而强烈的机械摩擦功的作用, 观测炸药是否发生爆炸, 确定炸药的摩擦感度。炸药的摩擦感度是反映炸药性能的重要参数, 有较多的实验测量的结果^[4], 但具体的理论研究很少见到。

Glenn^[1] 等建立了炸药与金属由于摩擦引起放热的模型。本文应用此模型对炸药与金属的摩擦引起的热爆炸问题进行研究。通过数值模拟确定与金属发生摩擦时, 炸药在摩擦界面附近的温度变化过程, 由此判断炸药是否发生点火。

2 高能炸药与金属摩擦引起的升温和点火模型

2.1 物理模型

在摩擦感度实验中^[4], 炸药置于钢滑柱之间(见

图 1)。用摆锤击打上滑柱, 使其与炸药产生位移。在摩擦过程中, 炸药在压紧的状态下与金属的摩擦系数较大, 炸药温度上升很快, 由于炸药的熔点较低, 温度很快就接近熔点, 导致炸药与钢的摩擦系数减小^[3], 滑柱对炸药的作用变小。因此模型中忽略滑柱与炸药相互作用引起的炸药整体塑性变形导致炸药的升温, 仅考虑滑柱与炸药之间摩擦产生热量引起炸药升温和热传导。

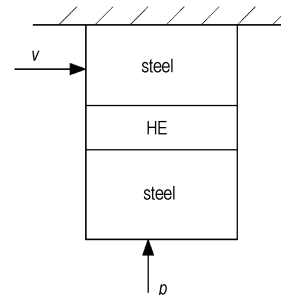


图 1 炸药与滑柱之间摩擦示意图

Fig. 1 Sketch map of friction between high explosive and steel

实验中炸药与金属之间的位移只有 1.5 ~ 2.0 mm, 而滑柱的直径为 10 mm。由于热传导速率相对较慢, 在摩擦过程中存在一个侧向边界的热传导效应影响不到的区域, 在这个区域中, 温度仅随纵向位置变化, 因此可以用一维模型来描述。而在这个区域以外, 横向位置相同的位置的温度比这个区域的温度低。参照 Glenn 建立的一维理论模型, 在摩擦界面上考虑由于摩擦产生的热量(见图 2), 无需引入动力学方程。模型中还忽略了炸药与下滑柱之间的热传导。

收稿日期: 2006-03-22; 修回日期: 2006-07-07

作者简介: 林文洲(1980-), 男, 硕士研究生, 从事炸药感度理论研究。

e-mail: a3238wen@163.com

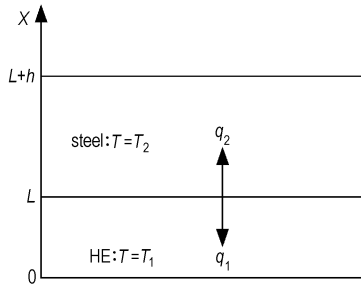


图 2 炸药与钢热传导示意图

Fig. 2 Sketch map of heat conduction between high explosive and steel

炸药中的热反应扩散方程为^[5]：

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{Q}{C_{v1}} Z^{-\frac{E_a}{RT}} \\ x = 0, \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0 \\ x = L, \frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{q_1}{k} \\ t = 0, T_1 = T_0 \end{cases} \quad (1)$$

钢中的热传导方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \\ x = L, \frac{\partial T_2}{\partial x} = -\frac{q_2}{k} \\ x = L + h, \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0 \\ t = 0, T_2 = T_0 \end{cases} \quad (2)$$

在摩擦面上的条件为，

$$x = L, q_1 + q_2 = q, T_1 = T_2 \quad (3)$$

方程中下标 1 为炸药, 2 为钢。T 是温度, ρ 是密度, C_v 是比热, α = $\frac{k}{\rho C_v}$, k 是热传导系数。Q 是单位质量炸药的化学反应产生的热, Z 为指前因子, E_a 为活化能。q 是在摩擦界面上产生的总热量, q₁ 和 q₂ 分别是传入炸药和钢的热量。由于摩擦形成的热为

$$q = \mu p v \quad (4)$$

其中 μ 是摩擦系数, p 是炸药中的压力, v 是钢与炸药之间的相对速度。

2.2 忽略化学反应项的解析解

如果忽略化学反应项, 方程(1)(2)的解为

$$T_1 = T_0 + \frac{2q_1 \sqrt{\alpha_1 t}}{k_1} ierfc\left(\frac{L-x}{2\sqrt{\alpha_1 t}}\right) \quad (5)$$

$$T_2 = T_0 + \frac{2q_2 \sqrt{\alpha_2 t}}{k_2} ierfc\left(\frac{L-x}{2\sqrt{\alpha_2 t}}\right) \quad (6)$$

其中

$ierfc(\eta) \equiv \int_{\eta}^{\infty} erfc(\xi) d\xi$ 为余误差函数的积分,

$erfc(\eta) = 1 - erf(\eta)$ 称为余误差函数,

$erf(\eta) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\eta} erfc(-\xi^2) d\xi$ 为误差函数,

由边界条件(3), 得到

$$q_1 = \frac{q}{1 + \frac{k_2}{k_1} \sqrt{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}}}, \quad q_2 = \frac{q}{1 + \frac{k_1}{k_2} \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}}} \quad (7)$$

由此可以计算由于摩擦引起的温升。摩擦面上的温升为

$$\Delta T = \frac{2q_1 \sqrt{\alpha_1 t}}{k_1} ierfc(0) \approx 1.13 \frac{q_1 \sqrt{\alpha_1 t}}{k_1} \quad (8)$$

由式(7)、(8)可得

$$\Delta T = 1.13 \frac{\mu p v \sqrt{t}}{\sqrt{\rho_1 C_{v1} k_1} + \sqrt{\rho_2 C_{v2} k_2}} \quad (9)$$

由式(9)可知, 摩擦界面的温升幅度与摩擦系数、表面的法向应力 p 与相对速度 v 及 \sqrt{t} 成正比。对于摩擦感度实验, p、v 和 t 固定, 由于摩擦引起炸药的温升与炸药与金属界面的摩擦系数有关, 还与金属及炸药的密度、比热和热传导系数有关。而摩擦引起的温升, 导致炸药的热分解, 引起热爆炸。因此摩擦感度还与炸药的热分解速率有关。

3 考虑炸药熔化和反应的数值模拟

3.1 考虑炸药熔化的物理模型

炸药与金属之间的摩擦力随温度升高而减小^[3]。这里假定摩擦系数与界面温度存在以下关系

$$\mu = \begin{cases} (\mu_0 - \mu_m) \frac{T_m - T}{T_m - T_0} + \mu_m, & T_s \leq T_m \\ \mu_m, & T_s > T_m \end{cases} \quad (10)$$

其中 μ₀ 是初始温度下的摩擦系数, T_m 是炸药的熔点。由于摩擦感度实验中对炸药施加了一定的压力, 金属与炸药为密实接触, 因此 μ₀ = 1^[3]。μ_m 是炸药发生熔化后的摩擦系数。炸药熔化后, 炸药中出现液体与固体的分界面。随着摩擦界面温度的提高, 液体与固体的分界面向炸药内部移动。假定忽略由于相变引起的炸药密度的变化, 相变的分界面方程为

$$\lambda_{11} \frac{\partial T_{11}}{\partial x} - \frac{\lambda_{1s}}{\partial x} = \rho H \frac{dS}{dt} \quad (11)$$

下标 1 表示液体, s 表示固体。S = S(t) 是相变分界面, H 是炸药的潜热。

3.2 数值模拟结果

用数值模拟方法求解方程(1~3)和(11)。编写了一个数值模拟程序,并对计算程序进行了校验^[6]。这里对 HMX 的摩擦点火问题进行数值模拟。计算条

件 $p = 400 \text{ MPa}$, $v = 3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这个条件与摩擦感度实验相同^[4,7]。而熔化后的摩擦系数 μ_m 难于确定,这里取摩擦系数为 0.10、0.14、0.2 进行了计算。其它参数见表 1。

表 1 计算中所使用的参数^[8]

Table1 Parameters of steel and explosive in calculation

materials	ρ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	C_v / $\text{J} \cdot (\text{g} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	k / $\text{J} \cdot (\text{s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	q / $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$	E_a / $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	Z / s^{-1}	H / $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$	T_m / K
HMX	1.90	0.967	4.2×10^{-3}	2.09	220	5×10^{19}	0.22	542
steel	7.84	0.456	49.8	-	-	-	-	-

图 3 是 HMX 与金属摩擦界面上的温度随时间的变化曲线。从图中可以看出,摩擦开始后在摩擦界面处的炸药温度从初始温度升高到 500 K 的时间与达到点火的时间相比相当短。这个温度接近 HMX 的熔点。此后,炸药与金属之间的摩擦系数明显下降,导致传入炸药的热量也下降,温度上升的速率变小。随着液体与固体的分界面向炸药内部的推进,摩擦界面温度超过熔点后继续升高。当 $\frac{\partial T}{\partial t} \rightarrow \infty$ 时,炸药点火,这时摩擦界面的温度为 750 K。数值模拟得到炸药的点火时间分别为 0.79 ms、0.43 ms、0.22 ms。这意味着钢与炸药的相互位移为 3.0 mm、1.6 mm 和 0.8 mm 时出现点火。实验中^[4]当上滑柱的位移为 1.5~2.0 mm 时,HMX 炸药的点火概率为 92%~100%。当炸药熔化后与钢的摩擦系数取 0.14 时的位移落在实验的范围内,与实验结果比较符合。

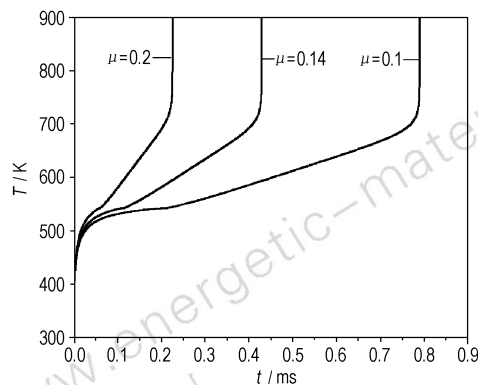


图 3 摩擦界面上的温度随时间的变化曲线

Fig.3 Curves of temperature vs time on friction surface

图 4 是钢和炸药中温度的分布图,计算中炸药熔化后与钢的摩擦系数取 0.14。随着时间的推移,热量从界面分别传入钢和炸药内部。从图中的温度分布可以看出,炸药达到点火时,热量才从摩擦界面到达钢

250 μm 的位置。由此结果可以认为模型中假设侧向热传导不会影响到整个摩擦面温度分布的是合理的。图 5 是炸药中的温度分布图。从数值模拟的结果可以看出,炸药的升温区是很薄的,仅为几十微米量级,到点火发生时熔化区的厚度仅为 3.1 μm 。因此模型中忽略炸药与下滑柱之间的热传导也是合理的。

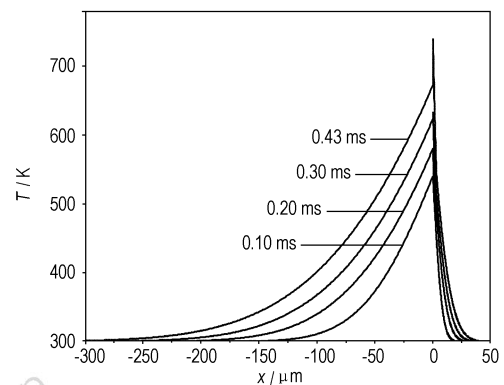


图 4 摩擦界面附近钢和炸药中的温度变化
($x > 0$ 为炸药, $x < 0$ 为钢)

Fig.4 Temperature distribution in steel and high explosive near friction surface($x > 0$: HE, $x < 0$: steel)

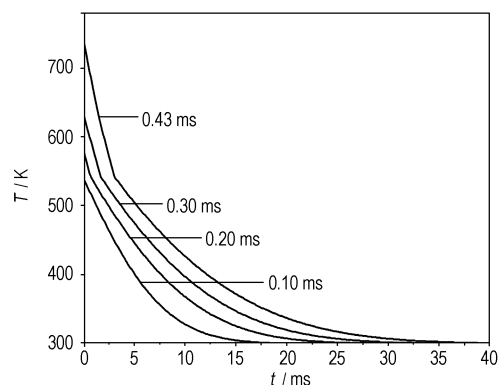


图 5 炸药中的温度分布

Fig.5 Temperature distribution in high explosive

4 结论与讨论

对炸药的摩擦感度问题进行了初步的理论研究。理论模型中考虑了由于炸药与金属摩擦作用产生的熔化,以及炸药升温引起摩擦阻力的变化。通过数值模拟考察了不同的摩擦系数对炸药与钢摩擦引起的点火的影响。得到了 HMX 在 400 MPa 的压力作用下以 $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的相对速度与钢摩擦时界面温度的变化。数值计算结果表明,当界面温度达到 750 K 时,炸药发生点火。确定了 HMX 的点火时间为 0.43 ms,金属与炸药的滑移的距离为 1.6 mm,与 HMX 的摩擦感度实验结果基本符合。

炸药与金属的摩擦系数是影响炸药摩擦感度的重要参数。要想预测高能炸药的摩擦感度,需要对炸药与各种介质的摩擦系数,尤其是炸药熔化后的摩擦系数进行研究。

参考文献:

[1] Glenn J G, Foster J C, Gunger M, et al. A test method and model to

determine the thermal initiation properties of an energetic material in a low pressure long duration event [A]. 12th International Symposium on Detonation [C], San Diego, California, 2002. 175 - 187.

[2] Birk A, Baker P, Kooker D E, et al. Nondetonative explosions and burning of composition-B explosive [A]. 12th International Symposium on Detonation [C], San Diego, California, 2002. 389 - 398.

[3] 李德晃. 炸药作业的事故控制 [M]. 绵阳: 强激光与粒子束杂志社, 2001.

[4] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.

DONG Hai-shan, ZHOU Fen-fen. Property of High Explosives and Their Components [M]. Beijing: Science Press, 1989.

[5] 孙锦山, 朱建士. 理论爆炸物理 [M]. 北京: 国防科技出版社, 1995.

SUN Jin-shan, ZHU Jian-shi. Theory of Detonation Physics [M]. Beijing: National Defence Press, 1995.

[6] 林文洲. 高能炸药摩擦感度的理论研究 [D]. 北京: 中国工程物理研究生部, 2006.

[7] 向永. 私人通信. 2006.

[8] Gibbs T R, Popolato A. LASL Explosive Property Data [M]. University of California Press, 1980.

Theoretical Analysis on Friction Sensitivity of High Explosive

LIN Wen-zhou¹, HONG Tao²

(1. Beijing Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100080, China;

2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: Friction sensitivity of high explosive was analyzed according to thermal explosion theory by theoretical analysis and numerical modeling. Melting of high explosive by friction between high explosive and metal was considered in the model. The change of friction force acting on high explosive due to melting was taken into account. Temperature increase on friction surface and ignition time of high explosive were determined by calculation. The pressure acting on HMX was 400 MPa and relative velocity was $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ between high explosive and steel, the same as the friction sensitivity test for high explosives. As the temperature on friction surface reached 750 K, ignition of high explosive occurred. Ignition time was 0.43 ms and slide distance between steel and high explosive was 1.6 mm. The slide distance is in agreement with experimental one quite well.

Key words: explosion mechanics; high explosive; friction sensitivity; ignition; melting

(上接 11 页)

PBX Booster Explosive Based on HMX/TATB

WANG Bao-guo, ZHANG Jing-lin, CHEN Ya-fang, CHAI Tao

(College of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The optimum formulation with fine HMX 45.5%, coarse HMX 45.5%, TATB 5%, Viton A 2.0%, and PNP 2.0% respectively was confirmed by the orthogonal experiment and blend binder and main explosive particle grading technology. Moulding powder of the new booster explosive was prepared by solution-water suspension, and the properties of this formulation were tested. The results show that its main properties (small clapboard amount, impact sensitivity, vacuum stability, self ignition temperature, volume expansibility, velocity of detonation) were better than that of PBXN-5.

Key words: physical chemistry; insensitivity; booster explosive; HMX; TATB