

文章编号: 1001-1455(2009)01-0013-05

# 装药弹体侵彻混凝土厚靶中的炸药摩擦起爆模型\*

李德聪, 陈 力, 丁雁生

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 基于炸药的热爆炸理论, 采用炸药的热点温度(也称为临界起爆温度)作为起爆判据, 分析了装药弹体在侵彻混凝土厚靶过程中的炸药安全性问题, 建立了炸药摩擦起爆的热传导模型。对模型进行了量纲一化分析, 得出量纲一热流率幅值  $Q_m$  与炸药和弹壳界面量纲一温度峰值  $T'_{max}$  的关系, 以及可在实际工程中应用的临界量纲一控制参数  $Q_{mc}$ , 同时得到了反映摩擦产生的热量在炸药与弹壳间分配比例关系的量纲一参数  $K_1$ 。结果表明, 炸药装药和弹壳接触面间的强摩擦是形成热点、从而导致炸药早炸的一个重要因素。

**关键词:** 爆炸力学; 热传导模型; 临界起爆温度; 炸药安全性; 侵彻

**中图分类号:** O381

**国标学科代码:** 130 · 3510

**文献标志码:** A

## 1 引 言

不同细长比及弹头形状的弹体在混凝土等硬介质中的侵彻运动规律, 一直是武器设计部门密切关注的问题。近几十年来, 国内外学者在此问题上做了大量的研究工作<sup>[1-5]</sup>。然而, 由于弹体内部装填有高能炸药, 在侵彻混凝土等硬介质过程中, 炸药受到惯性冲击, 可能发生早炸, 达不到预定的技战术指标。由此看来, 装药弹体侵彻靶体过程中的炸药安全性问题, 也是武器研制部门一个急需解决的问题。

依照热爆炸理论<sup>[6]</sup>, 弹体侵彻过程中的炸药安全性问题的实质是: 在装药弹体侵彻靶体过程中, 能量在炸药表面或体内发生局部沉积, 形成了热点; 在一定条件下, 热点演化和成长, 引起炸药爆炸。陈力等<sup>[7]</sup>经过实验和理论分析后指出: 对某一种特定的炸药, 尽管起爆手段很多, 但炸药起爆时的热点温度(也称为炸药的临界起爆温度)差别却很小, 所以在工程应用中, 可以将炸药的临界起爆温度作为炸药起爆的判据。

在装药弹体侵彻混凝土等硬介质的过程中, 炸药中热点形成的可能原因有很多种。从宏观的角度看, 如果在弹体头部位置存在一定厚度的气隙或者其内部存在一定尺度的气泡, 在高撞击载荷作用下, 这些区域便会形成热点<sup>[8]</sup>。从微观的角度来看, 如果装药内部有损伤, 存在缺陷, 比如细观微小的裂隙或孔洞, 在高撞击载荷的作用下, 热能会集中在这些区域, 从而形成热点; 另外, 炸药内部颗粒之间的摩擦或者位错也可能是热点形成的原因<sup>[9]</sup>。此外, 在弹体侵彻过程中, 炸药装药和弹壳接触面之间存在强摩擦, 热量在摩擦面附近的聚积也可能是形成热点的一种途径。

本文中基于炸药的热爆炸理论, 建立摩擦起爆的热传导模型, 重点分析装药和弹壳接触面间强摩擦生成热点的可能性, 以期得到可用于工程实际的炸药安全判据。

## 2 物理模型

### 2.1 物理问题分析

弹体结构如图 1 所示。通常情况下, 弹壳材料为钢, 其弹性模量比炸药的弹性模量大一个数量级; 同时弹壳材料的密度是炸药密度的 3~5 倍。在装有炸药的弹体侵彻混凝土介质的过程中, 弹壳以及装药均受到很高的惯性冲击载荷, 使得炸药装药与弹壳脱开, 并伴随有相对振动, 从而造成了壳-药界面间的强摩擦。

弹壳与炸药界面间摩擦产生热, 同时向炸药和壳体传导, 使得炸药升温, 炸药表面的温度最高。通常情况下, 弹体侵彻的时间为毫秒量级, 故摩擦加热时间也是毫秒量级。在此情况下, 由于热传导而引起的炸药装药温度升高区很薄, 可近似为薄板形热点。当热点温度达到临界值  $T_1$  时, 热点处炸药被引燃。如果满足化学反应成长条件, 经历一定反应成长期, 热点将起爆炸药装药。如果只考察热点是否点火, 而不管化学反应是否成长, 那就可以忽略化学反应, 将炸药起爆安全性问题提作传热问题。这是一种偏安全的提法。

\* 收稿日期: 2007-06-27; 修回日期: 2007-12-13

作者简介: 李德聪(1979—), 男, 博士研究生。

由于摩擦加热特征时间  $t_m$  为毫秒量级,在此特征时间内通过热传导加热炸药和弹壳。炸药热层的特征厚度  $\delta_e$  ( $\delta_e = \sqrt{\alpha_e t_m}$ ) 为约十微米量级;同时加热弹壳薄层的特征厚度  $\delta_g$  ( $\delta_g = \sqrt{\alpha_g t_m}$ ) 为约几百微米量级。其中  $\alpha_e$  和  $\alpha_g$  分别为炸药和弹壳的导温系数。显然  $\delta_e/l_e$ 、 $\delta_g/l_g$  为小量;并且  $\delta_e/R$  和  $\delta_g/R$  也足够小,这里  $l_e$ 、 $l_g$  分别为炸药柱半径和弹壳的厚度, $R$  为炸药装药与弹壳接触界面处的曲率半径。由此,可以假设本问题的传热是一维平面问题。

## 2.2 基本假设

(1)不计炸药的化学反应过程;(2)热传导问题是一维平面问题;(3)在热传导过程中,炸药和弹壳的密度、比热容、热传导系数均是常数;(4)热传导对10倍特征厚度以外的区域影响甚少,故在计算和分析中取10倍特征厚度处作为物理模型的边界。

## 2.3 基本方程

取坐标原点在炸药与弹壳的接触处, $x$ 轴的正向指向弹壳。 $-L_1$ 表示炸药的边界,其值取为  $10\delta_e$ ;  $L_2$ 表示弹壳的边界,其值取为  $10\delta_g$ 。炸药和弹壳的控制方程及相应定解条件分别为

$$\begin{cases} \rho_e c_e \partial T_e / \partial t = \kappa_e \partial^2 T_e / \partial x^2 \\ t = 0, \quad T_e = T_a \\ x = -L_1, \quad \partial T_e / \partial x = 0 \\ x = 0, \quad -\kappa_e \partial T_e / \partial x = q_e \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \rho_g c_g \partial T_g / \partial t = \kappa_g \partial^2 T_g / \partial x^2 \\ t = 0, \quad T_g = T_a \\ x = 0, \quad -\kappa_g \partial T_g / \partial x = q_g \\ x = L_2, \quad \partial T_g / \partial x = 0 \end{cases} \quad (2)$$

接触处的耦合条件为

$$-q_e + q_g = f(t) \quad (3)$$

式中: $T_e$ 和 $T_g$ 分别表示炸药薄层和弹壳薄层中的温度分布。 $\rho_e$ 、 $c_e$ 、 $\kappa_e$ 和 $\rho_g$ 、 $c_g$ 、 $\kappa_g$ 分别为炸药和弹壳的密度、比热容和热传导系数。 $q_e$ 、 $q_g$ 为炸药和弹壳边界的热流率。 $f(t)$ 为炸药与弹壳边界摩擦功率密度。设药柱和弹壳间的法向应力  $p = p_m \phi_1(t)$ ,炸药柱和弹壳间的相对滑动速度  $v = v_m \phi_2(t)$ ,则耦合边界条件(3)中炸药与弹壳边界摩擦功率密度  $f(t) = \mu p_m v_m \phi_1(t) \phi_2(t) = f_m \phi(t)$ ,  $f_m = \mu p_m v_m$ 表示摩擦功率密度幅值,而  $\phi(t) = \phi_1(t) \phi_2(t)$ 是一个随时间变化的连续函数,函数具体形式视实际情况而定。

## 2.4 基本方程的量纲一化<sup>[10]</sup>

在方程(1)中选取炸药的传热特征厚度  $\delta_e$ 、传热的特征时间  $t_m$ 、临界起爆温度与环境温度之差  $T_i - T_a$ 为基本量;在方程(2)中选取弹壳的传热特征厚度  $\delta_g$ 、传热的特征时间  $t_m$ 、临界起爆温度与环境温度之差  $T_i - T_a$ 为基本量;可将方程(1)~(3)量纲一化

$$\begin{cases} \partial T'_e / \partial t' = \partial^2 T'_e / \partial x'^2 \\ t' = 0, \quad T'_e = 0 \\ x' = -10, \quad \partial T'_e / \partial x' = 0 \\ x' = 0, \quad -\partial T'_e / \partial x' = q'_e = \sqrt{t_m / (\rho_e c_e \kappa_e)} q_e / (T_i - T_a) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \partial T'_g / \partial t' = \partial^2 T'_g / \partial x'^2 \\ t' = 0, \quad T'_g = 0 \\ x' = 0, \quad -\partial T'_g / \partial x' = q'_g = \sqrt{t_m / (\rho_g c_g \kappa_g)} q_g / (T_i - T_a) \\ x' = 10, \quad \partial T'_g / \partial x' = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$-q'_e + \sqrt{(\rho_g c_g \kappa_g) / (\rho_e c_e \kappa_e)} q'_g = Q_m \phi(t') \quad (6)$$

式中: $T'_e = (T_e - T_a) / (T_i - T_a)$ 代表炸药中的温度分布, $T'_g = (T_g - T_a) / (T_i - T_a)$ 代表弹壳中的温度分布。 $Q_m$ 为炸药装药与弹壳界面处的量纲一热源功率幅值,可写为如下形式  $Q_m = \sqrt{t_m / (\rho_e c_e \kappa_e)} f_m / (T_i - T_a) = \sqrt{t_m / (\rho_e c_e \kappa_e)} \mu p_m v_m / (T_i - T_a)$ 。

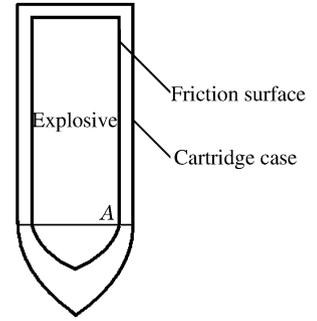


图1 样弹结构示意图  
Fig.1 Schematic diagram showing projectile

### 3 数值计算结果及分析

通过求解方程(4)~(6),便可得到炸药薄层内的温度分布、温度峰值与热流率幅值之间的关系,以及摩擦产生的热量在炸药和弹壳间随时间分配的关系。炸药和弹壳的材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$c/(\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$	$\kappa/(\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$
炸药	1 700	1 130	0.24
弹壳	7 800	113	80

#### 3.1 热源功率计算

为求解方程(4)~(6),需事先得知热源功率密度  $f(t')$ 。如前所述,  $f(t') = \mu p_m v_m \phi(t')$ ,也就是要得到药柱和弹壳间的压力  $p$  及相对滑动速度  $v$  随时间的变化规律。以弹体着靶速度  $v = 600 \text{ m/s}$  为例,具体说明热源功率的计算过程。

装药弹体侵彻厚靶的计算采用了 LS-DYNA 程序,装药样弹形状如图 1 所示。表 2 为计算模型中采用的材料参数。

表 2 数值模拟中的材料参数

Table 2 Input material parameters for numerical simulation

材料	$l/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$E/\text{GPa}$	$\nu$	$\sigma_Y/\text{MPa}$	$v/(\text{m}/\text{s})$
弹壳	433	72	7 800	200	0.30	800	600
炸药	290	60	1 700	10	0.35	2.0	600
靶体	1 300	2 000	2 400	40	0.23	39	0

在弹体侵彻混凝土厚靶的过程中,在炸药与弹壳接触界面拐角处 A 是最危险的部位(见图 1),所以选择接触面 A 处的压力  $p$  及相对滑动速度  $v$  进行计算。为了便于分析,运用最小二乘法对压力曲线和相对滑动速度曲线进行拟合。压力和相对滑动速度拟合曲线见图 2,拟合曲线的方程分别为

$$p = 35[\cos 17.1(t' - 0.038) - 0.8]\exp[-0.57(t' - 0.038)]$$

$$v = 29[0.517\sin 17.1(t' - 0.02) + 0.483\sin 45.9(t' - 0.02)]$$

式中:  $p$ 、 $v$  的单位分别为 MPa、m/s。

取环境温度  $T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,炸药的临界起爆特征温度  $T_i = 240 \text{ }^\circ\text{C}$ ,界面间的摩擦因数  $\mu = 0.1$ ,可得  $Q_m = 32.8$ 。

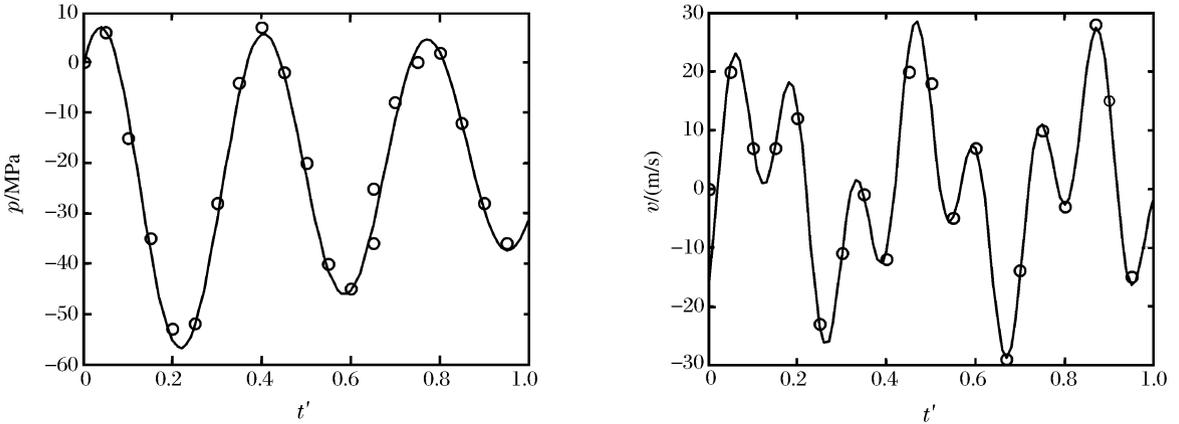


图 2 药壳间压力和相对速度的拟合曲线

Fig. 2 Pressure and relative velocity between explosive and cartridge case

#### 3.2 计算结果及分析

求得热源功率密度后,便可根据方程(4)~(6)计算出炸药薄层温度分布。

从图 3 中可以看出:炸药与弹壳接触面处温度最高,在三倍特征尺度以外,炸药的温升很小,可以忽略。也就是说,炸药与弹壳接触面摩擦产生的热量都沉积在接触面附近区域,是炸药热点形成的一个重要机理。从图 4 中可以看出:在侵彻后期,炸药与弹壳接触面处的量纲一温度超过了 1.0。也就是说,此处的炸药的温升已经超过了临界起爆温度,有发生早炸的危险性。从炸药安全的角度讲,工程设计中应该避免这种情况的发生。

如果要进一步得到不同的界面压力幅值、相对速度及界面摩擦因数情况下,炸药是否安全,可分析量纲一热流率幅值  $Q_m$  与界面量纲一温度的峰值  $T'_{max}$  之间的关系。

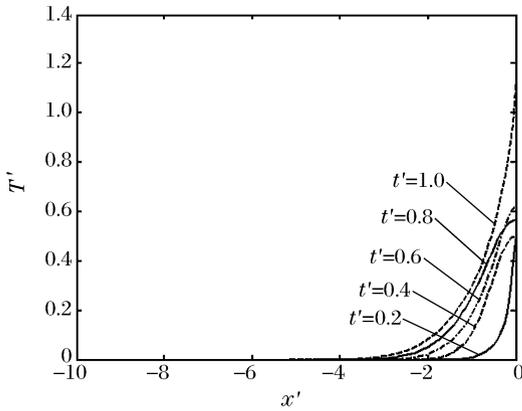


图3 不同时刻炸药薄层内温度的空间分布图

Fig. 3 Temperatures of explosive

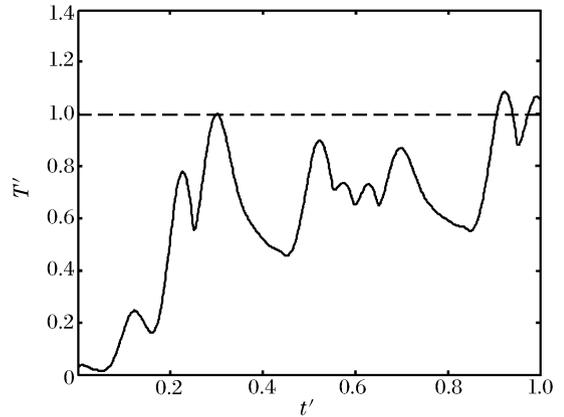
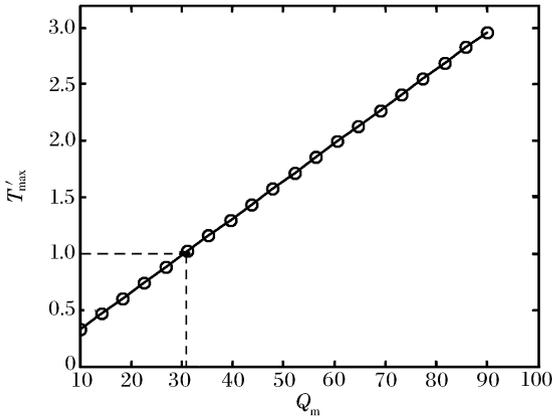
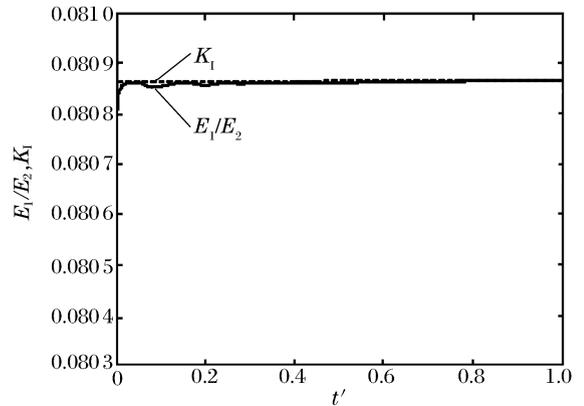


图4 壳药界面温度随时间变化曲线

Fig. 4 Temperatures between explosive and cartridge case

改变量纲一热流幅值  $Q_m$  的取值, 计算了 20 个算例。每个算例中的界面量纲一温度的峰值  $T'_{\max}$  随  $Q_m$  的变化呈线性关系, 见图 5。当界面最高量纲一温度  $T'_{\max} \geq 1$  时, 炸药开始化学反应, 有起爆的危险性。把对应于  $T'_{\max} = 1.0$  的热流率幅值定义为临界热流率幅值, 记作  $Q_{mc}$ 。从图 5 中可得到:  $Q_{mc} = 31.2$ 。从炸药安全引用的角度讲, 应当要求  $Q_m \leq Q_{mc}$ , 这可作为工程应用的一个判据。

图 6 中实线为流入炸药的热量与流入弹壳的热量的比值  $E_1/E_2$  随量纲一时间  $t'$  的变化曲线, 而虚线表示  $\sqrt{(\rho_g c_g k_g)/(\rho_e c_e k_e)}$  的数值。这里定义  $K_1 = \sqrt{(\rho_g c_g k_g)/(\rho_e c_e k_e)}$ 。从图 6 中可得出: 在传热过程中, 流入炸药的热量与流入弹壳的热量的比值  $E_1/E_2$ , 一开始略低于  $K_1$ , 经过短一段时间后,  $E_1/E_2$  与  $K_1$  近似相等, 即  $E_1/E_2 \approx K_1$ 。这说明能量在炸药与弹壳间的分配大体上有一个固定的比例, 其值完全由材料的物理参数所决定。表达式  $E_1/E_2 \approx K_1$  具有普遍的意义。在一般的工程应用中, 可以在不求解方程的情况下, 由  $K_1$  来估算能量的分布情况, 进而估计药层的最高温度, 这种方法具有较高的可靠性。

图5  $T'_{\max}$  与  $Q_m$  的关系Fig. 5  $T'_{\max}$ - $Q_m$  curve图6  $E_1/E_2$  与  $t'$  的关系Fig. 6  $E_1/E_2$ - $t'$  curve

## 4 结论

(1) 通过分析得出, 装药弹体侵彻混凝土厚靶的过程中, 炸药装药和弹壳接触面间的强摩擦是形成热点、从而导致炸药早炸的一个重要因素。

(2) 量纲一热流率幅值  $Q_m$  与界面量纲一温度的峰值  $T'_{\max}$  呈线性关系。并得到界面最高温度  $T'_{\max}$  达到临界起爆温度时的临界量纲一热流率幅值  $Q_{mc}$ 。从炸药安全应用的角度讲, 应当要求  $Q_m \leq Q_{mc}$ , 这可作为工程应用的一个判据。

(3) 量纲一数  $K_1 = \sqrt{(\rho_g c_g k_g)/(\rho_e c_e k_e)}$ , 反映了摩擦产生的热量能量在炸药与弹壳间的分配比例。在一般的工程应用中, 可以在不求解非线性方程的情况下, 由  $K_1$  来估算能量的分布情况, 进而估计药层的最高温度, 这种方法具有较高的可靠性。

## 参考文献:

- [1] Recht R F, Jpson T W. Ballistic perforation dynamics[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1963,30:384-390.
- [2] Forrestal M J, Altman B S, Cargile J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994,15(4):395-405.
- [3] LI Qing-ming, CHEN Xiao-wei. Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003,28(1):93-116.
- [4] 王明洋,戎晓力,钱七虎,等. 弹体在岩石中侵彻与贯穿计算原理[J]. *岩石力学与工程学报*,2003,22(11):1811-1816.
- WANG Ming-yang, RONG Xiao-li, QIAN Qi-hu, et al. Calculation principle for penetration and perforation of projectiles into rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003,22(11):1811-1816.
- [5] 李永池,袁福平,胡秀章,等. 形头部弹丸对混凝土靶板侵彻的二维数值模拟[J]. *弹道学报*,2002,14(1):14-19.
- LI Yong-chi, YUAN Fu-ping, HU Xiu-zhang, et al. The 2-D numerical simulation on penetrations of an ovalheaded projectile into concrete targets[J]. *Journal of Ballistics*, 2002,14(1):14-19.
- [6] 冯长根. 热爆炸理论[M]. 北京:科学出版社,1988.
- [7] 陈力,丁雁生. 炸药装药撞击热点的演化和撞击起爆的随机性[R]. 北京:中国科学院力学研究所,2001.
- [8] 陈力,丁雁生. 含气体间隙装药撞击实验起爆模型[J]. *爆炸与冲击*,2003,23(增刊):49-50.
- CHEN Li, DING Yan-sheng. A model for impact ignition of charges with gas gaps[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003,23(supple):49-50.
- [9] 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,1991:113-127.
- [10] 谈庆明. 量纲分析[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2005:152-160.

## A model of explosion induced by friction in the process of loaded projectiles penetrating into concrete targets

LI De-cong<sup>\*</sup>, CHEN Li, DING Yan-sheng

*(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)*

**Abstract:** Based on the thermal explosion theory, the security of loaded projectiles penetrating into concrete targets was investigated. By taking the hot-spot temperature (also called the critical initial explosion temperature) as the initial explosion criterion, the thermal conductivity model was introduced. The relationship between the dimensionless heat flow density  $Q_m$  and the dimensionless peak temperature  $T'_{max}$ , which were located in the interface between explosive charge and cartridge case, was acquired. The dimensionless control parameter  $Q_{mc}$ , which can be used as the engineering criterion, and the dimensionless parameter  $K_I$ , which denotes the proportion of the received heat energy between explosive charge and cartridge case, were obtained. The results show that the intense friction between explosive charge and cartridge case is an important factor for the formation of hot spots which can cause projectiles to explode ahead of schedule.

**Key words:** mechanics of explosion; thermal conductivity model; critical initial explosion temperature; explosive security; penetration

\* Corresponding author: LI De-cong  
Telephone: 86-10-82544236

E-mail address: simonldc@163.com