

硝基甲烷爆轰区热作用下铝、铝热剂和含铝炸药颗粒的温度响应

胡荣祖^{1,2}, 高红旭¹, 赵凤起¹, 徐司雨¹, 张海², 马海霞³

(1. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 西北大学数学系/数据分析及计算化学研究所, 陕西 西安 710069; 3. 西北大学化工学院, 陕西 西安 710069)

摘要: 推导了描述炸药爆炸作用所致材料温度响应的表达式。提出了估算材料渗透深度 (x) 与温度 (T) 关系的数值方法。借助铝颗粒(体系 I)、铝热剂($3\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-8Al}$) 颗粒(体系 II) 和含铝炸药($59/20/20/0.5/0.5\text{-RDX/AP/Al/binder/additive}$) 颗粒(体系 III) 的初温、比热容、密度、热导率和硝基甲烷的爆轰区温度和爆轰持续时间数据, 用导出的表达式, 通过数值计算, 构筑了体系 I、II 和 III 的 T - x 关系图。结果表明, 在硝基甲烷爆轰区热作用下使体系 I 达点火温度 2070 K(体系 I)、1209.15 K(体系 II) 和 485.68 K(体系 III) 的 x 值分别为 1.053, 1.880, 0.1905 μm , 至体系 I 达初温 300 K 的 x 值分别为 10.5, 9.6, 0.6 μm 。

关键词: 爆炸力学; 热作用; 温度响应; 铝颗粒; 铝热剂; 含铝炸药; 硝基甲烷; 热渗透深度

中图分类号: TJ55; TJ410.3⁺4; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.01.002

1 引言

依据图 1 所示的热平衡方程(1)和相应的假设、简化条件, 文献[1-5]报道了估算含能材料(EM)撞击感度特性落高 (H_{50})^[1]、热点起爆临界温度 ($T_{cr, hot spot}$)^[2]、绝热至爆时间 ($T_{adiabatic}$)^[3] 和热导率 (λ)^[4-5] 的数学表达式和一些 EM 的 H_{50} 、 $T_{cr, hot spot}$ 、 $t_{adiabatic}$ 和 λ 值。文献[6]报道了基于方程(2)导出的方程(3)计算了硝基甲烷爆炸热作用所致的铝粉颗粒的温度响应。本工作作为文献[6]的一点注释[方程(3)的由来]和热平衡方程应用的一点拓展, 报道简化条件($j=0$ 和方程(1)右端第 2 项等于零)下, 方程(3)的导出途径, 硝基甲烷爆轰热作用下铝颗粒(体系 I)、铝热剂($3\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-8Al}$) 颗粒(体系 II) 和含铝炸药($59/20/20/0.5/0.5\text{-RDX/AP/Al/binder/additive}$) 颗粒(体系 III) 的温度渗透深度 (x) 和温度 [$T(x, t)$] 关系图的构筑, 体系 I 达到点火温度和维持初温的 x 值的计算结果。

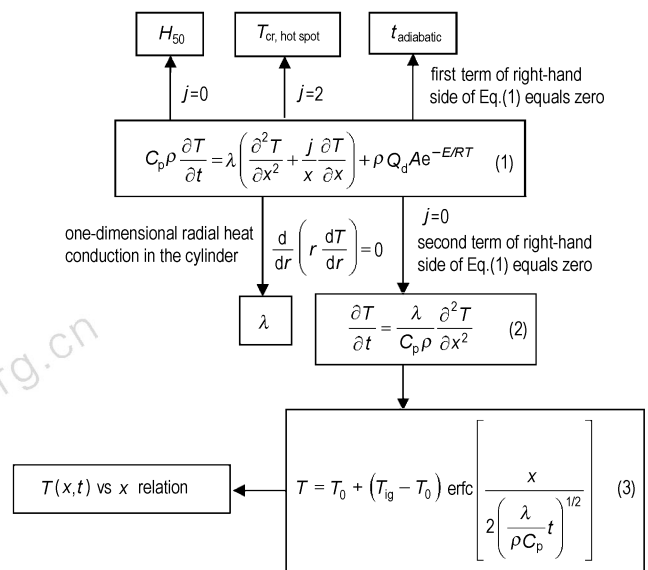


图 1 阐明由方程(1)得材料 H_{50} 、 $T_{cr, hot spot}$ 、 $t_{adiabatic}$ 、 λ 值和 $T(x, t)$ - x 关系的假设、简化条件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of illuminating the assumed and simplified conditions of the values of 50% drop height (H_{50}), critical temperature of hot-spot initiation ($T_{cr, hot spot}$), adiabatic time-to-explosion ($t_{adiabatic}$), thermal conductivity (λ) and relation between temperature (T) and penetration depth (x) of materials obtained by Eq. (1)

收稿日期: 2010-05-19; 修回日期: 2010-06-10

基金项目: 国防科技重点实验室基金(No. 9140c3501010601)

作者简介: 胡荣祖(1938-), 男, 研究员, 从事热化学、热分析研究。
e-mail: hurongzu@public.xa.sn.cn

2 理论

为求方程(3)中的 T , 考虑一维热传导方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} \right] \\ \theta|_{t=0} = f(r) \quad r > a \\ \theta|_{r=a} = \phi(t) \quad t > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{令 } B = \frac{\lambda}{\rho C_p}, \quad \theta = \theta_1 + \theta_2$$

$$\theta_1 \text{ 满足 } \begin{cases} \frac{\partial \theta_1}{\partial t} = B \left[\frac{\partial^2 \theta_1}{\partial r^2} \right] \\ \theta_1|_{t=0} = f(r) \quad r > a \end{cases} \quad (5)$$

$$\theta_2 \text{ 满足 } \begin{cases} \frac{\partial \theta_2}{\partial t} = B \left[\frac{\partial^2 \theta_2}{\partial r^2} \right] \\ \theta_2|_{r=0} = \phi(t) \quad t > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, θ 、 t 、 λ 、 ρ 、 C_p 、 r 、 a 和 B 有通常的含义^[1]。

因为

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = B \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \quad -\infty < r < +\infty \\ u|_{t=0} = f(r) \end{cases} \quad (7)$$

的解为

$$u = \frac{1}{2\sqrt{\pi Bt}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(r') e^{-(r-r')^2/4Bt} dr' \quad (8)$$

所以半无界问题

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = B \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \quad r > 0 \\ u|_{t=0} = f(r) \end{cases} \quad (9)$$

的解为

$$u = \frac{1}{2\sqrt{\pi Bt}} \int_0^{+\infty} f(r') [e^{-(r-r')^2/4Bt} - e^{-(r+r')^2/4Bt}] dr' \quad (10)$$

通过平移变换有 $r > a$ 的半无界问题

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_1}{\partial t} = B \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial r^2} \quad r > a \\ \theta_1|_{t=0} = f(r) \end{cases} \quad (11)$$

的解为

$$\theta_1 = \frac{1}{2\sqrt{\pi Bt}} \int_0^{+\infty} f(r') [e^{-(r-r')^2/4Bt} - e^{-(r+r'-2a)^2/4Bt}] dr' \quad (12)$$

因为

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = B \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \quad r > 0 \\ u|_{r=0} = \phi(t) \end{cases} \quad (13)$$

的解为

$$u = \frac{r}{2\sqrt{\pi B}} \int_0^r \frac{e^{-r'^2/4B(t-\lambda)}}{(t-\lambda)^{3/2}} \phi(t) d\lambda \quad (14)$$

$$\text{令 } \frac{r}{2\sqrt{\pi(t-\lambda)}} = u, \quad t-\lambda = \frac{r^2}{4Bu^2},$$

所以

$$u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{r}{2\sqrt{\pi B}}}^{+\infty} \phi\left(t - \frac{r^2}{4Bu^2}\right) e^{-u^2} du \quad (15)$$

通过平移变换,

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_2}{\partial t} = B \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial r^2} \\ \theta_2|_{r=a} = \phi(t) \quad t > 0 \end{cases} \quad (16)$$

的解为

$$\theta_2 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{r-a}{2\sqrt{\pi B}}}^{+\infty} \phi\left(t - \frac{(r-a)^2}{4Bu^2}\right) e^{-u^2} du \quad (17)$$

最后 $\theta = \theta_1 + \theta_2$

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{1}{2\sqrt{\pi Bt}} \int_0^{+\infty} f(r') [e^{-(r-r')^2/4Bt} - e^{-(r+r'-2a)^2/4Bt}] dr' + \\ &\quad \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{r-a}{2\sqrt{\pi B}}}^{+\infty} \phi\left(t - \frac{(r-a)^2}{4Bu^2}\right) e^{-u^2} du \end{aligned} \quad (18)$$

$t=0$ 时, $f(r) = \text{constant} = 0$, $\phi(t) = \text{constant} = \theta_0$, 于是有

$$\theta_r = \frac{2\theta_0}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{r-a}{2\sqrt{\pi B}}}^{+\infty} e^{-u^2} du = \theta_0 \operatorname{erfc} \left[2 \left(\frac{\lambda}{\rho C_p} t \right)^{1/2} \right] \quad (19)$$

对不考虑热点 ($a=0$) 的一维渗透 ($r=x$) 材料体系, 由 $\theta_r = Q_x = T - T_0$, $\theta_0 = T_{ig} - T_0$, 得

$$T = T_0 + (T_{ig} - T_0) \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2 \left(\frac{\lambda}{\rho C_p} t \right)^{1/2}} \right] \quad (20)$$

方程(20)称描述受热材料中的温度渗透深度 (x) 和温度 $T(x, t)$ 关系的表达式。

一旦将材料数据: λ 、 ρ 、 C_p 、 T_0 , 含能材料爆轰区温度(爆温)数据 T_{ig} , 维持材料表面温度 T_{ig} 的持续时间 t , 代入方程(20), 就可得图 2 所示的 $T-x$ 关系曲线。

3 计算实例

为从方程(20)求颗粒体系中温度 ($T(x, t)$) 和温度渗透深度 (x) 的关系曲线, 编制了估算 $T(x, t)-x$ 关系的软件, 将表 1 中体系 I、II 和 III 的热物性参量 (T_0 、 λ 、 ρ 、 C_p), 硝基甲烷的爆轰持续时间 $t=20 \times 10^{-9}$ s

和理论爆轰区温度 $T_{ig} = 3281.48$ K 代入方程 (20) 进行计算, 结果如图 2 所示。据此, 知: 在爆轰区内, 达到体系点火温度 $T_{ig} = 2070$ K (体系 I)、1209.15 K (体系 II) 和 485.68 K (体系 III) 的渗透深度分别为 1.053, 1.880, 0.1905 μm , 温度保持初温 $T_0 = 300$ K 的深度为 x (体系 I) = 10.5 μm , x (体系 II) = 9.6 μm 和 x (体系 III) = 0.6 μm 。若考虑爆轰区内体系 I、II 和 III 为片状, 双侧加热, 则在 $t = 20 \times 10^{-9}$ s 时间内, 满足 $T_{ig} = 2070$ K (体系 I)、1209.15 K (体系 II) 和 485.68 K (体系 III) 的厚度可分别达 2.106, 3.760, 0.381 μm 。

表 1 本工作所用体系 I、II、III 的 T_0 、 λ 、 ρ 和 C_p 值

Table 1 Values of T_0 , λ , ρ and C_p of systems I, II and III used in this work

system	T_0 /K	λ /J · cm ⁻¹ · s ⁻¹ · K ⁻¹	ρ /g · cm ⁻³	C_p /J · g ⁻¹ · K ⁻¹
I (aluminum particle)	300	2.37	2.688	0.905
II (3Fe ₃ O ₄ -8Al thermit particle)	300	1.833	3.258	0.670
III [aluminized explosive (59/20/20/0.5/0.5-RDX/AP/Al/binder/additive) particle]	300	0.0044	1.910	0.883

参考文献:

- [1] 胡荣祖, 赵凤起, 高红旭, 等. 高聚物黏结炸药 JH-94 和 JO-96 撞击感度特性落高的估算[J]. 含能材料, 2009, 17(3): 251-254. HU Rong-zu, ZHAO Feng-qi, GAO Hong-xu, et al. The estimation of characteristic drop heights of impact sensitivity for polymer bonded explosives JH-94 and JO-96[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(3): 251-254.
- [2] 胡荣祖, 高红旭, 赵凤起, 等. 含能材料热点起爆临界温度的估算[J]. 含能材料, 2009, 17(2): 127-130. HU Rong-zu, GAO Hong-xu, ZHAO Feng-qi, et al. Estimation of critical temperature of hot-spot initiation in energetic materials[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(2): 127-130.

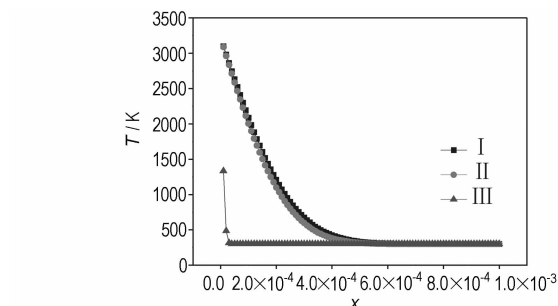


图 2 体系 I ~ III 的温度 (T) 与温度渗透深度 (x) 的关系

Fig. 2 Relation between temperature (T) and penetration depth (x) of systems I, II and III

- [3] HU Rong-zu, GAO Sheng-li, ZHAO Feng-qi, et al. Thermal Analysis Kinetics[M]. Beijing: Science Press, 2008: 331-334.
- [4] LI Nan, HU Rong-zu. Determination of thermal conductivities of solids by microcalorimetry[J]. *Thermochim Acta*, 1994, 231: 317-331.
- [5] HU Rong-zu, CHEN Xue-lin, CHU Shi-jun, et al. A new method of determining the thermal conductivities of energetic materials by microcalorimeter[J]. *J Thermal Anal*, 1994, 42: 505-520.
- [6] 罗艾民, 张奇, 白春华, 等. 爆炸热作用所致的铝粉颗粒温度响应[J]. 火炸药学报, 2005, 28(1): 35-38. LUO Ai-min, ZHANG Qi, BAI Chun-hua, et al. Temperature response of aluminum particle heated by thermal effects of explosive detonation[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2005, 28(1): 35-38.

Temperature Response of Aluminum, Thermit and Aluminized Explosive Particles under Thermal Effects in Nitromethane Detonation Region

HU Rong-zu^{1,3}, GAO Hong-xu¹, ZHAO Feng-qi¹, XU Si-yu¹, ZHANG Hai², MA Hai-xia³

(1. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China; 2. Department of Mathematic/Institutes of Data Analysis and Computation Chemistry, Northwest University, Xi'an 710069, China; 3. College of Chemical Engineering, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: A formula describing the temperature response of materials heated by thermal effects of explosive detonation was derived. A numerical method of estimating the relation between temperature (T) and penetration depth (x) of materials was presented. With the help of the data of initial temperature, specific heat capacity, density and thermal conductivity of aluminum particle (system I), 3Fe₃O₄-8Al thermit particle (system II) and aluminized explosive (59/20/20/0.5/0.5-RDX/AP/Al/binder/additive) particle (system III), and temperature in detonation region and detonation stabilization time of nitromethane, the T vs x relation diagrams for systems I - III were constructed by numerical calculation using derived formula. The results show that under thermal effects in nitromethane detonation region the values of x arrived at ignition temperature of 2070 K for system I, 1209.15 K for system II and 485.68 K for system III is 1.053 μm , 1.880 μm and 0.1905 μm , respectively, and the values of x arrived at original temperature (300 K) is 10.5 μm for system I, 9.6 μm for system II and 0.6 μm for system III.

Key words: mechanics of explosion; thermal effect; temperature response; aluminum particle; thermit; aluminized explosive; nitromethane; thermal penetration depth

CLC number: TJ55; TJ410.3⁺4; O389 **Document code:** A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.01.002