

环境温度对熔铸炸药圆柱体装药热安全性的影响^{*}

赵省向, 王晓峰, 王 浩, 刘志建

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 根据热爆炸理论的热平衡方程, 在 Thomas 边界条件下, 数值计算了热爆炸临界体系温度、临界环境温度和临界装药尺寸的关系。在不同的温度范围, 环境温度对临界尺寸的影响不同: 在 80 °C 以上, 温度的影响比较显著; 而在 70 °C 以下, 温度的影响不太显著; 环境温度为 105 °C 时, 环境温度对临界尺寸的影响结果也就是 Frank Kamenetskii 热量平衡方程在稳态条件下的处理结果, 且是最保守的估计。作为示例列出了一种 EAK (Ethylenediamine dinitrate-Ammonium nitrate-Totassium nitrate) 基的分子间炸药的热爆炸临界条件的计算结果。

关键词: 爆轰与爆燃理论; 热安全性; 数值计算; 熔铸炸药; 热爆炸; EAK

中图分类号: O381 国标学科代码: 130°3510 文献标志码: A

1 引 言

在炸药装填弹壳后装药的冷却过程中存在着自加热爆炸的危险性, 因为在该过程中存在着炸药的分解反应。炸药装药时, 往往是处于过冷状态的熔融体, 粘度较大, 而且对于大尺寸装药, 往往采用“块铸”的工艺, 所以在装药的过程中, 炸药接近于、或者处于固态。对于固态的体系, 由于介质的非流动性, 以及不高的导热系数, 所以体系应该是一个非均温体系, 对于这样的体系, 其热量平衡方程可以用经典的 Frank-Kamenetskii 方程描述。

在实际中人们往往关心的是临界条件。按照一定的边界条件, 求解 Frank-Kamenetskii 热量平衡方程的稳态方程的解, 就得到临界条件^[1~2]。假定边界温度等于环境温度, 系统中心的热流为零, 求解稳态方程, 忽略反应物消耗的影响, 则得到 Frank-Kamenetskii 临界条件。假定在系统边界上, 系统内部传入边界的热量等于边界向环境散失的热流量, 同时中心的热流为零, 得到的临界条件是 Thomas 临界条件。

上述的稳态方程得到的临界温度是指临界环境温度, 而且假定体系一开始就处在这样的环境温度下。如果体系一开始不是处在这样的环境温度下, 其临界条件或临界参数就会不一样。本文中, 试图通过熔铸炸药柱临界条件的数值计算来揭示这种差别。

2 计算方程

考虑有限长圆柱体, 忽略反应物的消耗, 采用二维的圆柱坐标时, 则 Frank-Kamenetskii 热量平衡方程为

$$\rho c_v \frac{dT}{dt} = Q \rho A e^{-\frac{E}{RT}} + \lambda \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; c_v 为比热容 (J/kg·K); T 为体系的温度; t 为时间; Q 为分解热 (J/kg); R 为气体常数; E 为分解反应的 Arrhenius 活化能 (J/mol); A 为分解反应的 Arrhenius 指前因子; λ 为导热系数。

假设圆柱长径比为 H , a_0 为圆柱体半径。考虑圆柱体的对称性, 令 $u = r/a_0$, $v = z/(Ha_0)$, 则方程 (1) 变换成

* 收稿日期: 2002-02-05; 修回日期: 2002-04-09

作者简介: 赵省向 (1963—), 男, 博士, 高级工程师。

$$\rho c_v \frac{dT}{dt} = Q \rho A e^{-\frac{E}{RT}} + \frac{\lambda}{a_0^2} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial u^2} + \frac{1}{u} \frac{\partial T}{\partial u} + \frac{1}{H^2} \frac{\partial^2 T}{\partial v^2} \right] \quad (2)$$

式中: $0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1$ 。

相应的在圆柱中心点的 Thomas 边界条件为

$$\frac{\partial T}{\partial u} = 0, \quad u = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial v} = 0, \quad v = 0 \quad (4)$$

在边界上,即圆柱体表面有

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial u} + \chi a_0 (T - T_a) = 0 \quad u = 1 \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial v} + \chi a_0 (T - T_a) = 0 \quad v = 1 \quad (6)$$

式中: χ 为体系向环境的散热系数。

上式中,当 $u=0$ 时,方程(2)右边括号中的第二项出现奇异点,采用罗比达法则进行近似。将方程(2)~(6)中的变量 u 和 v 的变化区间分成相同的 n 等分,引两簇平行线: $u = ih, v = jh (0 \leq i, j \leq 1)$, 则在 $u-v$ 平面上(相似于在圆柱体轴向剖面的四分之一区域)形成了一正方形网格,如图 1,相对于网格上的温度用 $T_{i,j}$ 表示。取时间步长为 $\tau, t = m\tau$, 令

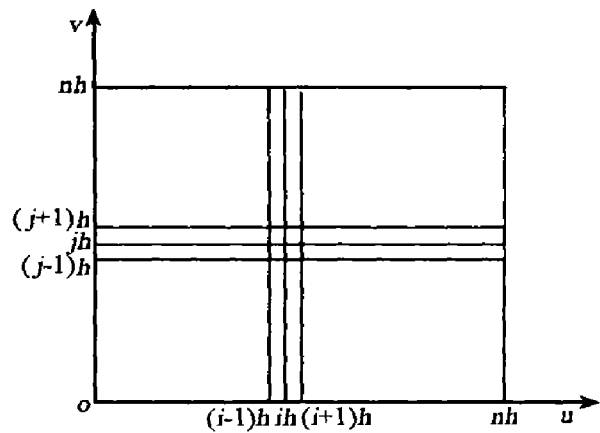


图 1 离散网格示意图

Fig. 1 The sketch of differential meshes

$$\begin{cases} F = \frac{\lambda \tau}{\rho c_v a_0^2 h^2} \\ K = \frac{QA\tau}{c_v} \\ B = \frac{2a_0 h \chi}{\lambda} \end{cases}$$

用菱形五点差分格式进行离散^[3], 则对内节点的差分方程如下

$$T_{i,j}^{m+1} = \left[1 - 2F \left[1 + \frac{1}{H^2} \right] \right] T_{i,j}^m + F \left[1 + \frac{1}{2i} \right] T_{i+1,j}^m + F \left[1 - \frac{1}{2i} \right] T_{i-1,j}^m + \frac{F}{H^2} (T_{i,j+1}^m + T_{i,j-1}^m) + K \exp \left[-\frac{E}{RT_{i,j}^m} \right] \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (7)$$

在中心点,将方程(3)采取中心差商逼近,则

$$(T_{1,j}^m - T_{-1,j}^m) / (2h) = 0 \quad j = 0, 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$(T_{i,1}^m - T_{i,-1}^m) / (2h) = 0 \quad j = 0, 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

即 $T_{1,j}^m = T_{-1,j}^m \quad j = 0, 1, 2, \dots, n \quad (10)$

$$T_{i,1}^m = T_{i,-1}^m \quad j = 0, 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

方程(10)、(11)结合内点差分方程(7) ($i=0$ 时,采取采用罗比达法则近似), 则得到相应中心点的边界条件

$$T_{0,j}^{m+1} = \left[1 - 2F \left[2 + \frac{1}{H^2} \right] \right] T_{0,j}^m + 4FT_{1,j}^m + \frac{F}{H^2} (T_{0,j+1}^m + T_{0,j-1}^m) + K \exp \left[-\frac{E}{RT_{0,j}^m} \right] \quad j = 1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (12)$$

$$T_{i,0}^{m+1} = \left[1 - 2F \left[1 + \frac{1}{H^2} \right] \right] T_{i,0}^m + F \left[1 + \frac{1}{2i} \right] T_{i+1,0}^m + F \left[1 - \frac{1}{2i} \right] T_{i-1,0}^m + \frac{2F}{H^2} T_{i,1}^m + K \exp \left[-\frac{E}{RT_{i,0}^m} \right] \quad j = 1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (13)$$

在式(12)中, 令 $j=0$, 结合式(11)可以得到 $T_{0,0}^m$ 的表达式。

同样地, 对边界方程(5)、(6)也进行向中心差商, 即有

$$\lambda \frac{T_{n+1,j}^m - T_{n-1,j}^m}{2h} + \chi a_0 (T_{n,j}^m - T_a) = 0 \quad j = 0, 1, 2, 3, \dots, n \quad (14)$$

$$\lambda \frac{T_{i,n+1}^m - T_{i,n-1}^m}{2h} + \chi a_0 (T_{i,n}^m - T_a) = 0 \quad j = 0, 1, 2, 3, \dots, n \quad (15)$$

即 $T_{n+1,j}^m = T_{n-1,j}^m - \frac{2\chi h a_0}{\lambda} (T_{n,j}^m - T_a) = T_{n-1,j}^m - B (T_{n,j}^m - T_a) \quad j = 0, 1, 2, 3, \dots, n \quad (16)$

$$T_{i,n+1}^m = T_{i,n-1}^m - \frac{2\chi h a_0}{\lambda} (T_{i,n}^m - T_a) = T_{i,n-1}^m - B (T_{i,n}^m - T_a) \quad j = 0, 1, 2, 3, \dots, n \quad (17)$$

式(16)、(17)结合内点差分方程(7)可得到外边界差分方程

$$T_{n,j}^{m+1} = \left[1 - 2F \left[1 + \frac{1}{H^2} \right] - FB \left[1 + \frac{1}{2n} \right] \right] T_{n,j}^m + FB \left[1 + \frac{1}{2n} \right] T_a + 2F T_{n-1,j}^m + \frac{F}{H^2} (T_{n,j+1}^m + T_{n,j-1}^m) + K \exp \left[-\frac{E}{RT_{n,j}^m} \right] \quad j = 1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (18)$$

$$T_{i,n}^{m+1} = \left[1 - 2F \left[1 + \frac{1}{H^2} \right] - \frac{FB}{H} \right] T_{i,n}^m + F \left[1 + \frac{1}{2i} \right] T_{i+1,n}^m + F \left[1 - \frac{1}{2i} \right] T_{i-1,n}^m + \frac{2F}{H^2} (T_{i,n-1}^m + \frac{FB}{H} T_a + K \exp \left[-\frac{E}{RT_{i,j}^m} \right]) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (19)$$

在式(18)中, 令 $j = 0$, 结合式(11)得到 $T_{n,0}^{m+1}$; 令 $j = n$, 得到 $T_{n,n}^{m+1}$ 。在式(12)中令 $j = n$, 结合式(17)得到 $T_{0,n}^{m+1}$ 的表达式。在已知环境温度 T_a 和体系初始温度 $T_{i,j}^0$ 的情况下, 通过方程(7)、(12)、(13)、(18)、(19)以及 $T_{0,0}^{m+1}, T_{n,0}^{m+1}, T_{0,n}^{m+1}, T_{n,n}^{m+1}$ 的表达式进行迭代计算, 可以描述出体系温度随时间的变化。

3 计算结果和分析

在已知反应体系的密度、热容、导热系数、体系对环境的散热系数、分解热、分解反应的 Arrhenius 活化能和指前因子, 以及给出工作场所的环境温度和物料的初始温度时, 按前面的差分方程, 可以计算出不同环境温度和装药初始温度下, 装药温度随时间的具体变化关系。发生爆炸时计算结果表示了爆炸延滞期, 不发生爆炸时描述了装药的凝固规律。以 EAK-RDX 分子间炸药为例, 其比热容为 2.0 kJ/(kgK), 导热系数 0.35 W/(mK), 密度 1550 kg/m³, 分解反应热 1500 kJ/kg, 分解活化能和指前因子取热失重得到的结果^[3], 分别为 140.9 kJ/mol, 1.592×10¹¹ s⁻¹。

当装药的长径比为 5, 初始装药温度为 105 °C(体系温度均一), 放置于 30 °C 的空气环境中, 而且假设装药壳体有保温措施(例如, 壳体用棉被覆裹, 假设散热系数 $\chi=10$ J/(m²sK), 壳体外表的最初温度也为 105 °C, 装药的半径分别为 2.1m 和 1.8 m 的不同时间的温度变化如图 2 所示。图 2(a)为一个爆炸过程, 图 2(b)为一个降温过程。按上述条件计算, 在炸药装药过程中, 初始装药温度为 105 °C 时发生爆炸的临界装药半径列于表 1。

表 1 在不同的环境温度下进行装药操作时圆柱体装药的临界半径

Table 1 The critical radius in the casting process at different surrounding temperatures

| 环境温度/ °C | 临界半径/m | | 环境温度/ °C | 临界半径/m | |
|----------|--------|-------|----------|--------|-------|
| | 长径比=1 | 长径比=5 | | 长径比=1 | 长径比=5 |
| 20 | 2.15 | 2.05 | 80 | 1.79 | 1.64 |
| 30 | 2.11 | 2.01 | 90 | 1.59 | 1.41 |
| 40 | 2.08 | 1.97 | 95 | 1.35 | 1.22 |
| 50 | 2.03 | 1.91 | 100 | 1.07 | 0.92 |
| 60 | 1.97 | 1.85 | 105 | 0.80 | 0.68 |
| 70 | 1.90 | 1.76 | | | |

从表 1 看出,环境温度对临界尺寸的影响在不同的温度范围影响不一样,在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上温度的影响比较显著,而在 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,温度的影响影响不太显著。环境温度为 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的结果也就是 Frank-Kamenetskii 热量平衡方程在稳态条件下的处理结果。从表 1 的结果看出,稳态条件下的结果实际上是最保守的估计,与实际装弹过程中相应条件下估计的装药安全性结果有一定的差距。

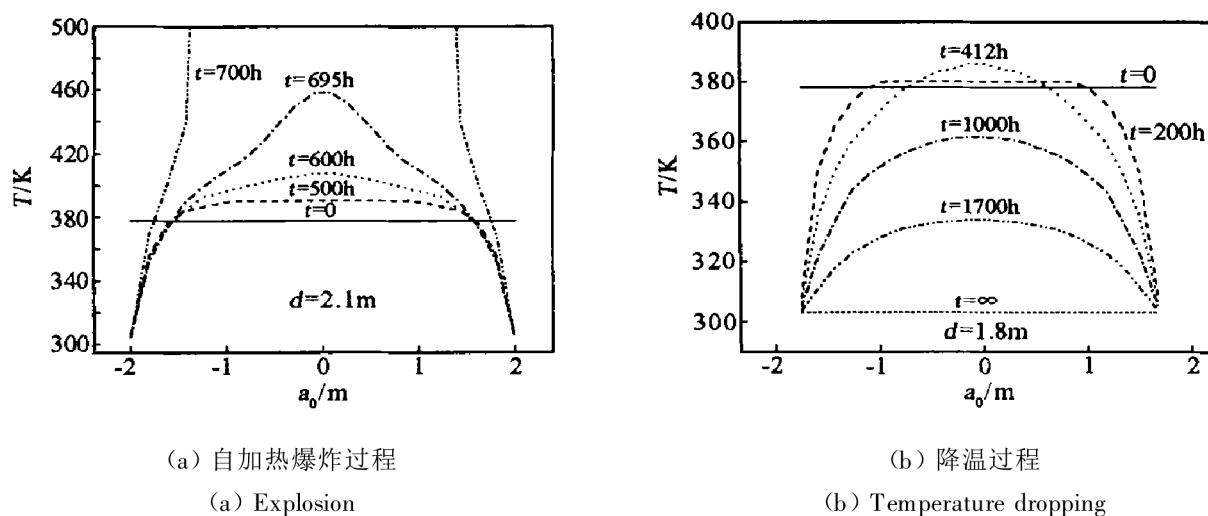


图 2 两种不同的温度变化过程
Fig.2 Evolution of spatial temperature

4 结束语

对于炸药在装药过程中的安全性,一般情况下用热爆炸理论中稳态条件下的临界参数确定是可行的,但是这是最保守的估计,是不全面的,如果考虑到环境的因素,综合进行考虑将会更加全面和准确。

参考文献:

- [1] 冯长根.热爆炸理论[M].北京:科学出版社,1988.
- [2] Merzhanov A G, Abramov G V. Thermol explosion of explosives and propellants[J]. Propellants and explosive, 1981, (6): 130-148.
- [3] 聂铁军,侯谊,郑介庸.数值计算方法[M].西安:西北工业大学出版社,1990.
- [4] 赵省向,张亦安,张为鹏,等.EAK-RDX 混合物的热分解[J].火工品,2000, 83(2):9-12.
ZHAO Sheng-xiang, ZHANG Yi-an, ZHANG Wei-peng, et al. Thermal decomposition of EAK-RDX mixture[J]. Initiators and Pyrotechnics, 2000, 83(2):9-12

The effects of ambient temperature on the thermal safety of melt cast explosive cylinder in the cooling process

ZHAO Sheng-xiang, WANG Xiao-feng, WANG Hao, LIU Zhi-jian
(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: Using the thermal balance function with the Thomas boundary condition, the relations of critical temperature and explosive cylinder diameter for thermal explosion in the cooling process of melt cast explosives have been predicted numerically. As an example, the calculated critical condition of thermal explosion in an EAK-based intermolecular explosive is given.

Key words: mechanics of explosion; thermal safety; numerical calculation; cast explosive; thermal explosion; EAK