

文章编号: 1006-9941(2003)03-0127-03

# 几种熔铸炸药的热点临界参数和撞击感度

赵省向, 张亦安

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 从热爆炸理论出发, 推导了炸药临界热点参数的计算公式, 计算了 TNT、B 炸药和 EAKR 分子间炸药等几种熔铸炸药的热点尺寸和临界点火温度, 将这些计算结果分别与 10 kg 落锤和 400 kg 大落锤测定的撞击感度实验值进行了对比, 结果表明临界热点参数的计算较好地说明了这几种炸药感度的排序。

**关键词:** 爆炸力学; 热点; 撞击感度; 热爆炸; TNT; 分子间炸药

**中图分类号:** O389; TQ56

**文献标识码:** A

## 1 引言

根据热点理论, 炸药的撞击点火主要是由于在撞击的过程中, 形成了热点, 热点引起了有效的、激烈的化学反应, 从而引起了炸药的燃烧或爆炸。热点的形成方式, Field<sup>[1]</sup>曾归纳出十种方式, 其中主要的方式有: 内部所包含气泡的绝热压缩; 空穴的压垮, 或者对非常高的冲击压力, 产生应力集中和形变, 引起周围介质的粘性或塑性加热; 炸药晶体或颗粒之间, 炸药与接触面之间的摩擦等。按照这些热点的形成方式, 似乎一般的材料也能形成热点, 但是所形成的热点不能有效地引发材料的激烈的化学反应, 所以热点的形成与发生快速分解的动力学因素是炸药在机械作用下发生爆炸的主要原因。这是炸药与一般材料的本质区别。对于不同的炸药, 由于状态不同, 物理性质不同, 所以形成热点的机率不同; 引发激烈化学分解反应的热点的温度和大小也不同。所以, 炸药的机械感度应该由状态和物理性质两个方面来决定。

一般情况下, 热点的形成是由上述几种机理共同作用的结果, 但是不同的条件下, 其主导机理不同。对于液体炸药和低熔点熔铸炸药, 由于在装药或者制样过程中不可避免地夹带空气, 所以受冲击或撞击时, 由气泡绝热压缩产生热点的几率较大。所以 TNT 基熔铸炸药和 EAK 基熔铸分子间炸药 (EAK 指由乙二胺二硝酸盐、硝酸铵、硝酸钾组成的低共熔物), 在

冲击或撞击条件下, 最有可能产生热点的机理是气泡的绝热压缩机理。当气泡较小, 例如小于 1  $\mu\text{m}$  时, 由气泡绝热压缩而引起的加热可以忽略, 热点主要是由形变产生的。

能引发剧烈反应或者爆炸的热点的最小尺寸和最低温度, 即临界尺寸和临界温度, 通过实验是难以测出的, 但是可以应用热爆炸理论, 通过数值计算得到。通过临界热点的大小或者临界热点的温度可以比较炸药药柱撞击感度的高低。本文通过热爆炸理论计算了 EAK-RDX 分子间炸药、TNT 和 B 炸药的临界热点参数, 通过落锤实验测定了撞击感度, 并对临界热点参数与撞击感度的对应关系进行了讨论。

## 2 热点临界值的理论推测

根据热爆炸理论, 在炸药受冲击或撞击时, 如果在撞击的过程中发生了爆炸或剧烈的反应, 那么可以肯定所产生热点的温度或大小超过了临界温度或大小, 而且引发延滞期不超过冲击或撞击时间。假设引发延滞期可以用绝热反应的爆炸延滞期代替, 根据热爆炸理论, 我们可以由此爆炸延滞期计算出初始引发温度, 即临界温度。通过临界状态下, 热点的临界温度与尺寸的关系, 计算出临界尺寸。

绝热爆炸延滞期可以通过 (1) 式计算<sup>[2]</sup>:

$$t_{\text{ad}} = \frac{C_v RT^2}{QEA} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

式中:  $t_{\text{ad}}$  为绝热延滞期, s;  $C_v$  为热容,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $T$  为体系的温度, K;  $Q$  为分解热,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $R$  为气体常数,  $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $E$  为分解反应的 Arrhenius 活化

收稿日期: 2002-10-08; 修回日期: 2003-02-09

作者简介: 赵省向 (1963 -), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事高能混合炸药研究。

能,  $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $A$  为分解反应的 Arrhenius 指前因子,  $\text{s}^{-1}$ 。

落锤撞击实验传感器测到的撞击时间的数量级是  $10^{-3} \text{ s}$ , 但是如果发生爆炸, 爆炸绝大部分发生在压力上升途中, 所以热点的爆炸延滞期小于  $10^{-3} \text{ s}$ , Afanasev<sup>[2]</sup> 认为  $t_{\text{ad}}$  最大不超过  $10^{-5} \text{ s}$  的数量级。将 TNT<sup>[3]</sup>、B 炸药<sup>[3]</sup>、EAKR 分子间炸药<sup>[4]</sup> (指 EAK-RDX) 的动力学参数、比热容和反应热等数据代入上式, 假定临界爆炸延滞期按  $10^{-5} \text{ s}$  计算, 则可以得到临界热点温度, 计算结果列于表 1 中。

表 1 临界温度和临界尺寸

Table 1 Critical temperature and size of hot spots

| 炸药         | 球形热点       |                         | 平板热点       |                         |
|------------|------------|-------------------------|------------|-------------------------|
|            | 热点温度<br>/K | 热点半径<br>/ $\mu\text{m}$ | 热点温度<br>/K | 热点半宽<br>/ $\mu\text{m}$ |
| TNT        | 1010       | 3.89                    | 1010       | 2.12                    |
| B 炸药       | 690        | 3.94                    | 690        | 2.80                    |
| EAKR 分子间炸药 | 985        | 5.79                    | 985        | 3.73                    |

临界热点温度与临界热点尺寸的关系具有如下的形式<sup>[5]</sup>:

$$\frac{Q\rho EAa_0^2}{\lambda RT_{\text{cr}}^2} e^{-\frac{E}{RT_{\text{cr}}}} = f(\theta_0) = \delta_{\text{cr}} \quad (2)$$

$$\theta_0 = (T_{\text{cr}} - T_a) / \left( \frac{RT_{\text{cr}}^2}{E} \right) \quad (3)$$

式中:  $a_0$  为圆柱、球形体系的半径或无限平板体系的半宽,  $\text{m}$ ;  $T_{\text{cr}}$  为临界温度,  $\text{K}$ ;  $T_a$  为环境温度,  $\text{K}$ ;  $\lambda$  为导热系数,  $\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $\theta_0$  为无量纲温升;  $\delta_{\text{cr}}$  为临界参数。  $\delta_{\text{cr}}$  和  $\theta_0$  的关系, 不同的作者得到了不同的近似关系方程, 其中 Thomas, Merzhanov 和章冠人的计算结果在  $\theta_0 = 4 \sim 30$  之间  $\delta_{\text{cr}}$  的计算值很接近, 而其它的方法则相差较大<sup>[5]</sup>。我们应用 Merzhanov 的计算公式<sup>[6]</sup>

$$\delta_{\text{cr}} = 12.1 (\ln \theta_0)^{0.6} \quad (4)$$

计算  $\delta_{\text{cr}}$  值。联立方程 (2)、(3)、(4) 得到热点的临界参数相互关系式:

$$\frac{Q\rho EAa_0^2}{\lambda RT_{\text{cr}}^2} e^{-\frac{E}{RT_{\text{cr}}}} = 12.1 \left[ \ln \left( \frac{E(T_{\text{cr}} - T_a)}{RT_{\text{cr}}^2} \right) \right] \quad (5)$$

将 (1) 式计算得到的临界温度代入 (5) 式, 则得到热点的临界尺寸, 计算结果也列于表 1 中。

表 1 显示 B 炸药与 TNT 相比, 热点的临界温度相差比较大, 而它们的临界热点尺寸相差不大, 所以 B 炸药的撞击感度应该高于 TNT。

对于相似的两种装药, 假如其热点都由气泡压缩产生, 将气泡压缩到同样大小时, 气泡获得的能量相

同, 即温度可能一样, 当这两种炸药热点的临界温度相同时, 就需要看临界热点尺寸, 只有当这个“热点”的尺寸超过热点的临界尺寸时, 才会形成有效的或者真实的热点。对临界尺寸小者也许这个“热点”的尺寸超过了临界值, 有可能形成有效热点, 引起爆炸; 而对于临界尺寸大者就有可能未超过临界值, 则不会形成有效的热点。

从表 1 结果可以看出, TNT 和 EAKR 分子间炸药的临界热点温度相近, 而临界热点的半径 (半宽) 则相差较大, 前者的临界热点尺寸较小, 后者较大。在相同的装药孔隙的情况下, 热点的临界尺寸大者较为钝感。所以 EAKR 分子间炸药的感度应比 TNT 低, 即比 TNT 钝感。

### 3 撞击感度的实验结果

撞击感度的实验结果分别列于表 2 和表 3。

表 2 的数据是由标准落锤感度仪试验得到的。锤重  $10 \text{ kg}$ , 落高  $0.25 \text{ m}$ , 样品为大约  $50 \text{ mg}$  的药粉。

表 3 的数据是由大落锤装置试验得到的。该装置通过传感器和相应的记录仪器可以获得应力值和撞击时间, 通过调节锤重和落高来调节施加于炸药柱的撞击应力。本实验采用  $400 \text{ kg}$  落锤, 实验药柱为  $\Phi 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。药柱均为熔铸方法制样, 相对密度基本一致, 理论密度 (TMD) 为  $98\%$  左右。实验时, EAKR 分子间炸药的落高为  $2 \text{ m}$ , TNT 和 B 炸药为  $1.5 \text{ m}$ 。

表 2 和表 3 都显示 TNT 和 EAKR 分子间炸药的感度比 B 炸药低, 这与表 1 显示的结果是一致的。

从实验结果看, 表 2 的小落锤实验数据似乎表明, 分子间炸药的感度不比 TNT 的低, 而从表 3 的大落锤撞击感度实验结果看, EAKR 分子间炸药的感度稍微低一点。两者的差异主要在于前者是用药粉、后者是用药柱进行实验的。采用药粉实验时, 实验所采用药粉颗粒度的差异, 对于混合炸药取样均匀性的差异、以及由于粉碎造成较敏感炸药晶体过多裸露等都会造成实验结果的不确定性增加, 所以相比较而言, 药柱的实验结果更为可信。

从表 3 的数据看, 在实验过程中, EAKR 分子间炸药所受的应力最大, 而发生爆炸的百分比较小。这也说明它的感度最小。最小应力实际上是发生爆炸的试样在爆炸点的应力, 该值也反应了炸药对撞击的敏感程度, 该值越低说明在较小的应力作用下即会发生反应。从以上几个方面看, EAKR 分子间炸药的感度低于 TNT, TNT 低于 B 炸药, 这与热点临界参数的计算

结果(表1)是一致的。

表2 机械撞击感度  
Table 2 Impact sensitivity

| EAKR    | TNT | B 炸药 |
|---------|-----|------|
| 8 ~ 28% | 12% | 28%  |

表3 发射安全性装置大落锤撞击试验结果

Table 3 Heavy harmer impact results

|           | EAKR   | B 炸药 | TNT    |
|-----------|--------|------|--------|
| 实验发数/发    | 10     | 10   | 14     |
| 平均应力值/MPa | 80     | 61.4 | 58.9   |
| 最大应力值/MPa | 90     | 80   | 80     |
| 最小应力值/MPa | 60     | 24   | 40     |
| 点火类型      | 半爆(残药) | 爆炸   | 燃烧(残药) |
| 点火概率      | 1/10   | 2/10 | 3/14   |

#### 4 结论

运用热爆炸理论,依据炸药的分解动力学参数、分解热及热容等参数推算了 EAK-RDX 分子间炸药、TNT 和 B 炸药的热点温度和热点尺寸。在相近的热点温

度下,EAK-RDX 分子间炸药的临界热点尺寸比 TNT 大;在相近的热点尺寸下,TNT 临界热点温度比 B 炸药高。说明 EAK-RDX 的感度低于 TNT,TNT 的感度低于 B 炸药。通过 10 kg 落锤撞击感度实验和 400 kg 大落锤撞击实验测定了这几种炸药的机械撞击感度,大落锤得到的这几种炸药的感度排序与热点计算结果基本一致。

#### 参考文献:

- [1] Field E. Hot spot ignition mechanisms for explosives[J]. Acc. Chem. Res., 1992,25: 489-96.
- [2] Afanasev G T, Bobolev V K. Initiation of Solid Explosives by Impact[M]. Translated from Russian. Israel Program for Scientific Translation. Jerusalem, 1971.
- [3] Dobratz B M. LLNL Explosives Handbook [R]. UCRL-52997. 1981.
- [4] 赵省向,张亦安,胡焕性,等. EAK-RDX 混合物的热分解[J]. 火工品,2000,83(2): 9-12.
- [5] 冯长根. 热爆炸理论[M]. 北京: 科学出版社,1988.
- [6] Merzhanov A G. On critical condition for thermal explosion of a hot spot[J]. Combustion and Flame, 1966,10: 341.

## The Critical Initiation Parameters of Hot-spots and Impact Sensitivity of Melt-cast Explosives

ZHAO Sheng-xiang, ZHANG Yi-an

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** This paper was an attempt to investigate the possibility of estimating qualitatively or quantitatively the impact sensitivity of melt cast explosives by thermal explosion theory. With the formulations deduced from thermal explosion theory to calculate the critical initiation conditions of explosive such as temperature and size of hot-spots, the critical initiation parameters of TNT, Comp. B and EAKR intermolecular explosives were calculated, and the calculation results were in good agreement with the experimental impact sensitivity data obtained experimentally from 10 kg hammer and 400 kg heavier hammer impact tests respectively.

**Key words:** explosion mechanics; hot-spot; impact sensitivity; thermal explosion; TNT; Comp. B; intermolecular explosive