

炸药圆柱体的热爆炸临界参数 与其长径比的关系研究

李金山

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 成都 610003)

摘要 讨论了圆柱体的热爆炸临界 Frank-Kamenetskii 参数、临界温度与其长径比的关系, 应用所得到的临界 Frank-Kamenetskii 参数与长径比的关系式对相同直径不同长径比的 JB-9001 药柱实测临界温度进行了数据处理。

关键词 临界参数 炸药圆柱体 长径比 数值计算

1 引言

在一维热爆炸研究中, 人们得到临界 Frank-Kamenetskii 参数仅是 ϵ 、 Bi 的函数^[1]:

$$\delta_{cr} = \left[\frac{a_0^2 Q E C_0 A \exp(-E/RT_e)}{K R T_e^2} \right]_{cr} = \delta_{cr}(\epsilon, Bi) \quad (1)$$

式中: δ_{cr} 为临界 Frank-Kamenetskii 参数; a_0 为圆柱体的半径; Q 为摩尔反应热; E 为热爆炸表观活化能; C_0 为初始浓度; A 为指前因子; K 为药柱的导热系数; R 为气体常数; T_e 为环境温度; ϵ 为无量纲活化能, RT_e/E ; Bi 为 Biot 数, $a_0 x/K$; x 为药柱与环境的传热系数; n 为反应级数。

事实上, 人们所遇到的问题除少数情况是一维问题外, 大多数情况是非一维问题。比如, 对有限长的圆柱体, 其热爆炸临界参数不仅与 ϵ 、 Bi 有关, 还与其长径比有关, 即

$$\begin{aligned} \epsilon_{cr} &= \epsilon_{cr}(\epsilon, Bi, H) \\ H &= h/(2a_0) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: H 为圆柱体长径比; h 为圆柱体的高。

研究圆柱体的热爆炸临界参数与其长径比的关系, 对了解有限长圆柱体与无限长圆柱体区别, 进行一维热爆炸试验方法(如 ODTX 试验)和其他模型设计等方面均有重要意义。

笔者曾在把处于临界状态时的无外壳炸药柱热爆炸实验系统归属为 Semenov 热爆炸系统基础上^[2], 得到了长径比为 5 的有限长圆柱体可视为无限长圆柱体。本文在圆柱体二维热爆炸点火临界参数数值计算和相同直径不同长径比的 JB-9001(TATB/粘结剂, 95/5)小药柱临界温度测定的基础上, 讨论了热爆炸临界参数与圆柱体长径比的关系, 得到了 δ_{cr} 与 H 的一种比较精确的关系式。利用此关系式讨论了有限长圆柱体可视为无限

长圆柱体的条件,并对实测的临界温度进行了处理。

2 实验部分

实验所用的 JB-9001 造型粉由我所提供。热爆炸延滞期和临界温度的按测定文献[3]进行。

3 结果与讨论

3.1 δ_{cr} 与 H 的关系

对于大多数的高能炸药,无量纲活化能在 0.05 左右。因此,本文将 ϵ 定为 0.05,然后在 Biot 数一定情况下,利用二维热爆炸数值计算程序^[4],计算不同 H 时的 δ_{cr} 值。当 $Bi=2.0$ 时,计算结果列于表 1,并绘成图 1。由图 1 可知,当 H 增大时, δ_{cr} 逐渐衰减并趋于一个定值。通过大量数值模拟,找到 δ_{cr} 与 H 之间采用下式进行拟合是合适的:

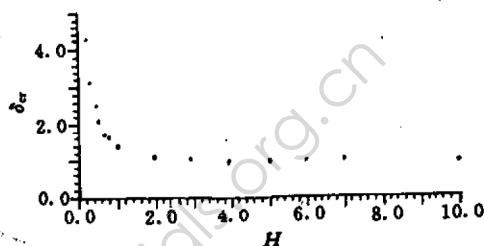


图 1 δ_{cr} 与 H 的关系 ($Bi=2.0$, $\epsilon=0.05$)

Fig.1 The relationship between δ_{cr} and H

$$\begin{aligned} \delta_{cr} &= A_1 \exp(B_1/H) & 0.2 \leq H \leq 1 \\ \ln \delta_{cr} + \ln(1 + 1/H) &= A_2 - B_2/\delta_{cr} & 1 < H < \infty \end{aligned} \quad (3)$$

式中: A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 为待定系数。

表 1 δ_{cr} 的数值计算结果 ($Bi=2.0$, $\epsilon=0.05$)

Table 1 The numerical computational values of δ_{cr} ($Bi=2.0$, $\epsilon=0.05$)

H	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	10.0
δ_{cr}	4.33	3.08	2.45	2.09	1.69	1.56	1.40	1.10	1.03	1.00	0.99	0.98	0.98	0.98

不同 Bi 数的 A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 值列于表 2,拟合的相关系数(r)为 0.99,从表中可以看出, A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 均随 Biot 数增大而增大。

当圆柱体的长径比增大到一定值时,沿轴向的传热与径向方向上的传热相比可忽略不计,此时有限长圆柱体可视为无限长圆柱体。而二者的分水岭是与采用的判断标准有关的,本文以下式为标准进行判断:

$$\delta_{cr} = 1.1\delta'_{cr} \quad (4)$$

式中: δ'_{cr} 为 $H=10000.0$ 的 δ_{cr} 值。

结合(3)式和(4)式可推导得:

$$\ln(1 + 1/H) = B_2/(11\delta'_{cr}) - \ln 1.1 \quad (5)$$

采用(5)式计算的 H 值列于表 3。从表 3 可知,在本文假定的判断标准下,长径比为 5 的有限长圆柱体可视为无限长圆柱体,由此亦可得出 ODTX 试验^[5](试验用的药柱长径

比为 4) 近似为一维热爆炸系统。

表 2 A_1, B_1, A_2, B_2 拟合结果

Table 2 The fit results of A_1, B_1, A_2, B_2 and B_2

B_i	A_1	B_1	A_2	B_2
0.5	0.428	0.229	2.268	1.122
1.0	0.765	0.238	2.862	1.992
2.0	1.132	0.282	3.280	3.105
4.0	1.494	0.332	3.604	4.305
6.0	1.640	0.367	3.728	4.900
8.0	1.710	0.392	3.778	5.205
10.0	1.751	0.411	3.808	5.401
50.0	1.830	0.502	3.950	6.296
100.0	1.852	0.515	3.954	6.406
1000.0	1.828	0.535	3.973	6.492
10000.0	1.829	0.536	3.996	6.561

表 3 不同 Biot 数下的 H 值¹⁾

Table 3 H values in different Biots

B_i	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0	10.0	50.0	100.0	1000.0	10000.0
H	4.4	4.4	4.6	4.8	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9

注: 1) 不同 Biot 数下有限长圆柱体可视为无限长圆柱体的长径比的值。

3.2 临界温度与 H 的关系

JB-9001 不同长径比下的实测临界温度(T_{cr})列于表 4, 从表中得知: JB-9001 压制成型后的密度为 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 左右, 临界温度随长径比增大逐渐衰减而趋于一个定值, 试样量为 150mg 和 200mg 时的临界温度一样, 是由于临界温度的衰减值仪器无法辨别出。

表 4 JB-9001 的实测临界温度

Table 4 The experimental critical temperature of JB-9001

药量/(mg)	药柱直径/(mm)	长径比	密度/(g/cm^3)	$T_{cr}/(^{\circ}\text{C})$	参考值 ⁽²⁾ /($^{\circ}\text{C}$)
50	6.00	0.202	1.46	340	331~332
80	6.00	0.317	1.49	335	
150	6.00	0.590	1.50	330	
200	6.00	0.755	1.56	330	
300	6.00	1.118	1.58	327	

在热爆炸系统中, 人们广泛采用下式进行数据处理:

$$\ln \frac{\delta_{cr} T_{cr}^2}{a_0^2} = M - E/RT_{cr} \quad (6)$$

式中: M 为与炸药有关的系数。

本文采用(3)式计算 δ_{cr} , 利用上式对表4进行数据处理的结果列于表5。

表5 JB-9001 实测临界温度处理结果

Table 5 Numerically treated results of JB-9001 experimental critical temperature

$\delta_{cr} \quad Bi$	1000.0	100.0	50.0	10.0	1.0
H					
0.202	26.02	23.76	21.99	13.37	2.49
0.317	9.93	9.14	8.92	6.40	1.62
0.590	4.54	4.44	4.29	3.51	1.15
0.755	3.72	3.67	3.56	3.02	1.05
1.118	2.83	2.80	2.71	2.32	0.82
M	131.9	128.0	128.1	110.8	76.1
$E/(kJ/mol)$	531.53	511.86	512.83	426.94	258.68
r	0.998	0.998	0.995	0.996	0.996

实验系统的 Bi 值是难以确定的, 为此本文在 $1.0 \leq Bi \leq 10000.0$ 的范围内进行数据处理, 如果依据回归的相关系数确定 Bi 值, 那么本实验系统的 Bi 值在 $[10000.0, 100.0]$ 范围内, 此与以前人们把五秒爆发点实验系统作为一维的 Frank-Kamenetskii 热爆炸系统处理是一致的。

4 结 论

4.1 在大量的数值计算和拟合的基础上, 找到了 δ_{cr} 与 H 的一种精确关系式, 并假定当有限长圆柱体的 δ_{cr} 为无限长圆柱体的 δ_{cr} 的 1.1 倍时, 有限长圆柱体可视为无限长圆柱, 由此条件, 得到了长径比为 5 的有限长圆柱体可视为无限长圆柱体。

4.2 JB-9001 药柱的实测临界温度表明, 临界温度随长径比的增大而衰减并有趋于一个定值的趋势。本文以线性拟合的相关系数来确定热爆炸实验系统的 Bi 值得到数据处理结果, 亦可根据实测的 x 、 K 等参数的值来确定热爆炸实验系统的理论归属, 此项工作有待进一步研究。

参 考 文 献

- 1 冯长根. 热爆炸理论. 北京: 科学出版社, 1988. 202~218
- 2 李金山, 楚士晋. 爆炸与冲击, 1994, 14(4): 307~313
- 3 GJB 772. 306-91.
- 4 杜霞. 二维热爆炸研究(北京理工大学博士论文), 1994.
- 5 Slape R J. MHSMP-84-22, 1984.
- 6 SAND 74-0079.

STUDY ON THE RELATIONSHIP BETWEEN THE CRITICAL PARAMETERS OF THERMAL EXPLOSION AND THE LONG-TO-DIAMETER OF EXPLOSIVE CYLINDER

Li Jinshan

(*Institute of Chemical Materials, CAEP, Chengdu 610003*)

ABSTRACT The relationship of the critical Frank-Kamenetskii parameter and critical temperature with the long-to-diameter of explosive cylinder was studied, and the experimental critical temperatures of JB-9001 charges in the same diameter are numerically treated by using the equation of critical Frank-Kamenetskii parameter with the long-to-diameter obtained therefrom.

KEYWORDS critical parameter, explosive cylinder, long-to-diameter.