

铝壳密封炸药柱的一维热起爆 延滞期测定方法的研究

李金山

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 成都 610003)

摘要 参照 Slape 等人的 ODTX 方法, 建立了恒温空气浴的 ODTX 试验装置和方法, 用该法对以 TATB/HMX/TATB 为基的塑料粘结炸药, 在 200~300℃ 进行了一维热起爆延滞期测定, 讨论了铝壳密封炸药柱的热起爆延滞期与温度的关系, 提出了用较小尺寸炸药柱的 ODTX 试验结果去推测相同限制性条件下的大尺寸炸药柱的临界温度的方法。结果表明: 大尺寸炸药柱的临界温度的计算值与文献值之间的差值在 ±15℃ 范围内。

关键词 ODTX 炸药柱 热起爆 临界温度

1 引言

高能炸药的热起爆研究对炸药的热稳定性评价及炸药的压制、加工、使用等过程的安全预测有十分重要的意义。50 年代, Henkin^[1] 等提出了将小药量(40mg)的爆发点测定方法应用于炸药热安定性测定。60 年代, 苏联的 Дубовицкий Ф 和 Мержанов А 研究了非限制性条件下炸药药柱直径对其热爆炸临界温度的影响^[2]。70 年代初, Rogers 报道了在限制条件下研究炸药爆发点的工作^[3], 可惜样品量太小, 与实际条件相差较远。随着炸药热起爆研究的深入, 原有的评价炸药热安定性的方法难以满足在不同限制条件下对炸药柱安全性进行预测的要求。从 80 年代至今, 人们相继建立了不同限制性条件下的成型炸药柱的热起爆实验方法, 用于炸药安全性的测定^[4,5]。这些方法模拟了炸药部件在实际中遇到的一些真实情况。比如, 放大尺寸的 ODTX (One-Dimension Time-to-Explosion) 试验方法用于完全密封的炸药柱的安全性评估, 无外壳炸药柱热爆炸实验方法用于裸露炸药柱的热安全性测定。

大尺寸炸药柱 ODTX 试验方法模拟的是炸药柱在压制及使用过程中的热刺激情况, 近年来受到各国学者的高度重视, 美国 Pantax 兵工厂的 Schmitz 等人对 ODTX 试验方法进行了大量的研究工作^[6,7]。作者参照 Slape 等人^[6~7] 的 ODTX 试验方法建立了恒温空气浴的 ODTX 试验方法, 并将其用于 JB-9014 (TATB/粘结剂, 95/5)、JOB-9003 炸药在 200~300℃ 下的一维热起爆延滞期的测定。为达到用较小尺寸炸药柱的 ODTX 试验结果预测大尺寸炸药柱的临界温度的目的, Schmitz 等人利用数种较小尺寸炸药柱的 ODTX 试验结果线性回归得到炸药柱的临界温度与其尺寸的关系^[6]。由于这样做很繁琐, 而且花

费也大, 本作者提出了用 $\varnothing 13\text{mm}$ 炸药柱的 ODTX 试验结果, 建立起完全密封条件下的炸药柱的临界温度与其尺寸关系的方法。计算结果表明, 较大尺寸炸药柱的临界温度的预测值与文献值的差值在 $\pm 15^\circ\text{C}$ 范围内。

2 试验部分

2.1 试验装置

恒温空气的 ODTX 试验方法的装置见图 1, 其中试样反应器见图 2。用于测温的热电偶, 一对紧贴于试样反应器中部铝壳外表面, 一对放置于环境介质中。装入试样反应器内的炸药柱由两发 $\varnothing 13\text{mm} \times 26\text{mm}$ 炸药柱组成, 其长径比为 4:1。

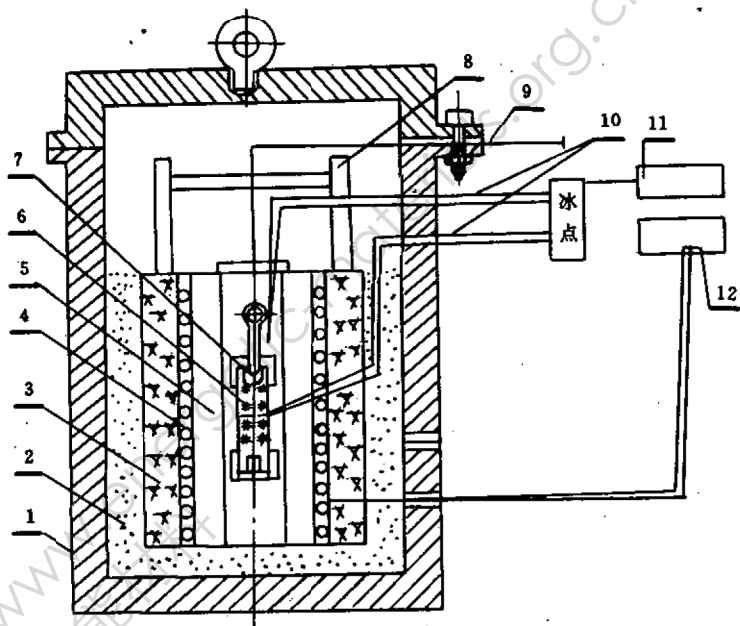


图 1 ODTX 试验装置示意图

- 1——防爆容器; 2——砂石; 3——隔热材料; 4——加热器; 5——均热块;
6——炸药柱; 7——试样反应器; 8——支撑架; 9——拉线;
10——热电偶; 11——记录仪; 12——控温仪。

Fig. 1 Schematic of ODTX test setup

- 1——Explosion-proof container, 2——Sand, 3——Insulator, 4——Heater,
5——Thermostatic block, 6——Explosive cylinder, 7——Specimen chamber,
8——Holder, 9——Wire, 10——Thermocouples,
11——Recorder, 12——Temperature monitor.

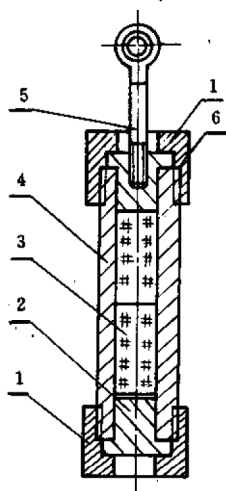


图2 试样反应器

- 1——试样盖；2——试样塞；
3——炸药柱；4——试样池；
5——螺杆；6——O型垫圈。

Fig. 2 Reactor of specimen

- 1——Specimen cap; 2——Specimen plug;
3——Explosive cylinder; 4——Specimen cell;
5——Nut bolt; 6——"O" ring seal.

2.2 试验程序

2.2.1 样品的制备

将炸药造型粉压制成 $\varnothing 20\text{mm} \times 30\text{mm}$ 炸药柱,然后,加工成 $\varnothing 13\text{mm} \times 26\text{mm}$ 的炸药柱,要求炸药柱的密度不小于其理论密度的95%,炸药柱与试样反应器(由铝壳制成的)的间隙($d = \varnothing_{\text{铝壳}} - \varnothing_{\text{药柱}}$)要求小于0.03mm。

2.2.2 传感器的标定

使用的传感器为 $\varnothing 0.3\text{mm}$ NiCr/NiSi 热电偶。参考端为冰点,用精密温度计采用下式对传感器进行标定:

$$T = A' + B'\mu \quad (1)$$

式中: T , 温度计的读数, $^{\circ}\text{C}$; μ , 热电偶的电势, mV ; A' 和 B' 均为待定系数。

2.2.3 热起爆延滞期测定

2.2.3.1 按图1安装好装置后,根据炸药的性质,使恒温浴升高到一定温度。

2.2.3.2 打开记录仪,将已装药的试样反应器放入恒温浴中,记录试验过程的温度-时间历程;如果炸药柱在10h内不爆,再继续升温,直到有爆燃现象。

2.2.3.3 反应完毕后,关闭仪器,待试验装置降温后,检查试验场地,取出试样反应器,记录其损坏程度、起爆延滞期等。

3 结果与讨论

3.1 试验结果

用上述方法对 JB-9014、JOB-9003 两种炸药,在 $200 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 范围进行了 ODTX 试验,结果列于表1中。表中 T_m 为环境介质的温度, T_c 为紧贴试样反应器中部铝壳外表面处的热电偶测得的温度, t_c 为热起爆延滞期, r 为相关系数,回归方程中 T_m 和 T_c 的单位为 K。JB-9014 炸药在三个不同试验温度下对试样反应器的破坏程度见图3,

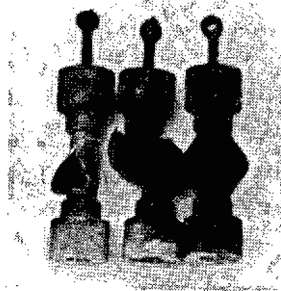


图3 JB-9014 炸药 ODTX 试验后的试样反应器

Fig. 3 Specimen chamber after ODTX test of JB-9014

JOB-9003 炸药在四个不同试验温度下都可使试样反应器裂成三段。

表1 JB-9014、JOB-9003 炸药柱在 $d=0.03\text{mm}$ 条件下的 ODTX 试验结果

Table 1 ODTX test results of JB-9014 and JOB-9003 cylinders at $d=0.03\text{mm}$

炸 药	药柱直径/(mm)	$T_m/(^{\circ}\text{C})$	$T_c/(^{\circ}\text{C})$	$t_c/\text{(s)}$
JB-9014	13.0	286.1	287.4	11596
	13.0	283.3	285.9	11692
	13.0	274.8	277.8	34560
	$\ln t_c = -47.6510 + 31818.4/T_m, r=0.9738$ 当 $T_m = 553.2\text{K}$ 时, $t_c = 19260\text{ s}$ $\ln t_c = -57.0493 + 37184.5/T_c, r=0.9906$			
JOB-9003	13.0	215.4	217.7	4014
	13.0	215.6	215.6	4090
	13.0	202.4	203.2	11596
	13.0	201.1	201.0	13954
	$\ln t_c = -31.3245 + 19367.1/T_m, r=0.9987$ $\ln t_c = -28.7601 + 18159.5/T_c, r=0.9962$			

3.2 药柱与铝壳间的间隙对热起爆延滞期的影响

为了考察炸药柱与密封铝壳间的 d 值对炸药热起爆延滞期的影响,进行了尺寸为 $\varnothing 12.7\text{mm}$ (铝壳内径为 $\varnothing 13.0\text{mm}$) JB-9014 炸药柱的 ODTX 试验,结果列于表2中。比较表1与表2可知,对于JB-9014炸药来说,如炸药柱与密封铝壳间的 d 值增大近10倍,则在相同环境介质温度 280°C 下,其热起爆延滞期将缩短近1倍,该试验方法要求炸药柱与密封铝壳之间紧密配合。

表2 JB-9014 炸药柱在 $d=0.3\text{mm}$ 条件下的 ODTX 试验结果

Table 2 ODTX test results for explosive of JB-9014 cylinders $d=0.3\text{mm}$

药柱直径/(mm)	$T_m/(^{\circ}\text{C})$	$T_c/(^{\circ}\text{C})$	$t_c/\text{(s)}$
12.7	270.0	273.5	22709
12.7	280.4	282.4	11576
12.7	285.2	287.5	6917
12.7	289.7	291.3	2683
$\ln t_c = -46.9251 + 31024.1/T_m, r=0.9554$ 当 $T_m = 553.2\text{K}$ 时, $t_c = 9480\text{ s}$ $\ln t_c = -52.9690 + 34521.2/T_c, r=0.9578$			

3.3 较大尺寸炸药柱的热爆炸临界温度的估算

热爆炸理论研究结果表明,对有限长圆柱形炸药柱的热爆炸系统,当 Biot 数和炸药柱的长径比增大到一定时,可作为一维(无限长圆柱体)Frank-Kamenetskii 热爆炸系统处理^[7,8],即有:

$$\delta_{cr} = \left\{ \frac{a_0^2 Q E \rho Z \exp(-E/RT_m)}{k R T_m^2} \right\}_{cr} = \text{Const} \quad (2)$$

式中: δ_{cr} , 临界 Frank-Kamenetskii 参数; a_0 , 炸药柱的半径; Q , 炸药的摩尔反应热; ρ , 炸药成型后的密度; Z , 指前因子; k , 炸药柱的导热系数; E , 表观活化能; R , 摩尔气体常数。

对于同一种炸药, Q 、 Z 、 E 、 k 在温度变化不是很大的情况下可视为常数, 上式可简化为:

$$\frac{E}{RT_{mcr}} = \ln \frac{a_0^2}{T_{mcr}^2} \eta \quad (3)$$

式中: η , 与炸药有关的系数; T_{mcr} , 临界温度。如果已知某一尺寸(a')炸药柱的 T'_{mcr} , 则可由下式计算相同限制性条件下较大尺寸炸药柱的临界温度:

$$\frac{E}{R} (1/T_{mcr} - 1/T'_{mcr}) = \ln \frac{a_0^2 T'^2_{mcr}}{a'^2_0 T_{mcr}^2} \quad (4)$$

利用此式预测了较大尺寸 JB-9014、JOB-9003 炸药柱的临界温度, 结果列于表 3 中。为了证实这种方法的可靠性, 我们用文献[6]报导的 $\varnothing 12.7$ mm 炸药柱的 ODTX 试验结果预估了相同限制性条件下的 $\varnothing 25.4$ mm 炸药柱的临界温度, 结果列于表 4, 为了便于比较亦将实测值列于表中。表中 $T_{m(24)}$ 为相应起爆延滞期为 24h 时的环境介质温度, 在计算较大炸药柱的临界温度时, 以 $T_{m(24)}$ 为临界温度。

表 3 较大尺寸炸药柱的临界温度的预估值

Table 3 Estimated critical temperature of explosive cylinders with diameter 30, 50 and 100 mm

炸 药	$E/(\text{kJ/mol})$	$\varnothing/(\text{mm})$		
		30	50	100
JB-9014	264.538	250.7	241.7	230.1
JOB-9003	161.018	162.3	152.0	130.8

表 4 较大尺寸炸药柱的临界温度的计算值与实测值的比较

Table 4 Comparison of calculated critical temperature with experimental for some explosive cylinders

炸 药	$\frac{E}{R}$	$\varnothing = 12.7 \text{ mm}^{[6]}$		$\varnothing = 25.4 \text{ mm}$	
		$T_{m(24)}/(^\circ\text{C})$	$T_{mcr}/(^\circ\text{C})$	$T_{m(24)}/(^\circ\text{C})$	差值/ $(^\circ\text{C})$
LX-10	22861.98	181.7	169.0	182.3	-13.3
PBX-9501	15009.32	57.3	139.9	155.8	-15.9
PBX-9502	15922.45	225.5	203.5	218.7	-15.2
RX-26-AF	20429.73	169.6	156.1	171.1	-15.0
PBX-9205	66620.84	180.2	175.9	165.5	+10.4

由表 4 可知, 采用(4)式计算较大尺寸炸药柱 T_{mcr} 与实测值的差值在 $\pm 15^\circ\text{C}$ 范围内。

4 结 论

4.1 利用自行建立的恒温空气浴的 ODTX 试验装置和方法对 JB-9014、JOB-9003 等炸

药柱进行了 ODTX 试验,结果表明,炸药柱的热起爆延滞期除与炸药的热稳定性有关外,还与炸药柱与密封铝壳间的空隙紧密相关。

4.2 本文提出的用较小尺寸炸药柱的 ODTX 试验结果预估相同限制性条件下的大尺寸炸药柱的热起爆临界温度的方法在一定程度上是可取的。

沈永兴、彭强、陈凤鸾、夏敬琼等同志参加了试验工作,炸药合成、成型和机械加工等研究室的有关同志在本工作中给予了大力支持,特致谢意。

参 考 文 献

- 1 Henkin H, McGill R. Industrial Engineering Chemistry, 1952, 44: 1391
- 2 松全才,王 鹏. 含能材料学. 北京:北京理工大学出版社, 1991.
- 3 Rogers R N. Thermochimica Acta, 1970, 1: 1~10
- 4 李金山, 楚士晋. 爆炸与冲击, 1994, 14(4): 307
- 5 Slape J R. MHSMP-84-22, 1984.
- 6 Schmitz G J, Faubion B D. MHSMP-80-48, 1980.
- 7 Schmitz G J, Faubion B D. MHSMP-82-26, 1982.
- 8 Boddington T, Feng Chang-gen, Gray P. Proc. Roy. Soc. Lond, 1984, A392: 301
- 9 李金山. 含能材料, 1995, 3(1): 34

DETERMINATION OF ONE-DIMENSION TIME-TO-EXPLOSION OF THERMALLY INITIATED EXPLOSIVE CYLINDERS CONFINED IN Al-CASE

Li Jinshan

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

ABSTRACT A test setup for measuring the time-to-explosion of thermally initiated explosive cylinders confined in Al-cases was constructed. The plastic bonded explosives based on TATB and HMX/TATB at 200~300°C were tested by using the setup thereof. A test method for measuring the one-dimension time-to-explosion(ODTX) by thermal initiation is presented. The relationship between the time-to-explosion and the medium temperature is discussed. A method for calculating the critical temperature of large-sized explosive cylinder by using the ODTX results of small-sized explosive cylinders is proposed as well. The calculated results show that the absolute error between the critical temperature values obtained from this method and the experimental data reported is within 15°C.

KEYWORDS one-dimension time-to-explosion(ODTX), explosive cylinder, thermal initiation, critical temperature.



作者简介 李金山(Li Jinshan), 1992年毕业于四川大学化学系, 获硕士学位, 现为中国工程物理研究院化工材料研究所助理研究员, 从事炸药热分析方面的研究工作, 已在国内有关刊物发表论文五篇。