

非限定药柱实验热爆炸研究

楚士晋 郭明朝^②

(中国工程物理研究院化工材料研究所)

冯长根 何光斌

(北京理工大学)

摘要 本文主要介绍了非限定药柱的实验热爆炸过程,并得到了有实用价值的结果。

关键词 实验热爆炸 药柱 非限定条件

1 引言

理论热爆炸发展至今,已有一百余年的历史,并且日趋完善^[1],在安全应用方面,一直发挥着重要作用。

实验热爆炸在相当长一段时期以至今天仍然落后于理论热爆炸的发展。这主要是由于实验热爆炸研究需要的实验装置和实验条件的设计难以达到理论模型的要求,尤其是含能材料的实验热爆炸危险较大、费用过高以及研究方法限制所致。实验及理论研究均表明,液体、气体和固体炸药的物理状态对热爆炸的影响是不同的。一般地,液体和气体在受热过程中伴随对流传热和挥发造成热损失,而固体仅被认为具有热传导行为。在尺寸较小时,固体可以被近似看成系统内部无温度差,各点温度一致,能够满足 Semenov 假设条件。事实上,对于大药量、非限定药柱的实验热爆炸研究而言,体系与环境之间既存在传热,又存在传质。因此,对于固体含能材料实验热爆炸研究的困难是显而易见的。

由于某些特殊工程和研究的需要,前苏联的 Merzhanov^[2]、美国的 Rogers^[3~5]等学者先后进行过一些实验热爆炸研究,包括对液体、气体和固体含能材料的热爆炸临界温度和延滞期测定方法研究^[6]。封闭体系的一维热爆炸临界温度试验方法(ÖDTX)^[7,8]研究和密封性能对临界参数的影响研究^[9],在一定范围为武器设计提供了技术依据。

实验热爆炸不仅需要实现热爆炸理论的边界假设,而且更重要的是对含能材料受热影响后发生危险的临界条件及热爆炸的可能性进行预测,以及为此而开展的一系列方法研究。这包括对含能材料在加工过程中工艺参数的确定,制定武器(部件)在运输、贮存和使用过程中防止发生热危险的措施,在意外强热冲击下(如阵地火灾等)有效安全时间的确定等。这些工程应用的典型实例,其发生热爆炸的可能性评估都有赖于热爆炸过程的深入研究。因此,实验热爆炸方法不失为研究含能材料安全性的有效手段。正是基于这种想法,本文着重介绍研究非限定药柱的实验热爆炸过程,以期获得有实用价值的结果。

2 实验^[10]

2.1 材料

JH-9105^[11]、JO-9159 和 JOB-9003 炸药造型粉; $\varnothing 0.3\text{mm}$ NiCr/NiSi 热电偶等。

2.2 试样制备

将热电偶置于模具中三个不同位置,在一定温度和压力下使造型粉压实成接近规定密度的药柱,压制好的试样用 X 光检测热电偶在药柱中的几何位置,如图 1 所示。

2.3 试验系统

将反应器置于周围充满绝热材料的小型爆炸容器中,用程序温度控制器控制温度,保证试样上下端温度差不大于 0.5°C ,用电位差计或计算机记录试样发生热爆炸的温度时间历程。

试验系统由防爆容器、反应器、加热器、温度控制器、温度显示器和数据记录系统组成。如图 2 所示。



图 1 试样示意图

1——热电偶;2——JH-9105 炸药药柱。

Fig. 1 Scheme of specimen

1——Thermocouples,

2——JH-9105 explosive charge.

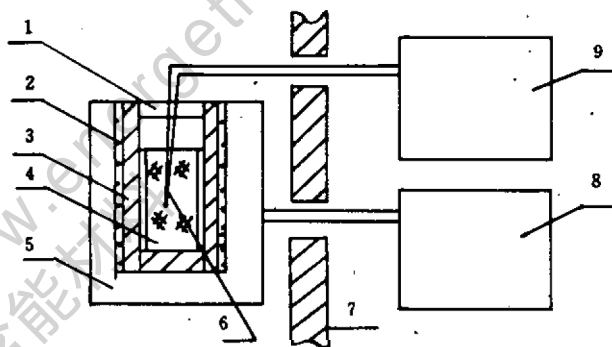


图 2 非限定系统热爆炸试验装置

1——反应器上盖;2——环形加热器;3——反应器;4——试样;5——加热炉外壳;6——热电偶;
7——爆炸容器壁;8——控温测温仪;9——计时讯号测定仪。

Fig. 2 Experimental setup of unconfined thermal explosion

1——Reactor cap, 2——Hoop heater, 3——Reactor, 4——Specimen, 5——Heating furnace shell,
6——Thermocouples, 7——Explosion-proof container wall, 8——Temperature monitor, 9——Timer.

2.4 试验条件

$\varnothing 10\text{mm} \times 20\text{mm}$ 、 $\varnothing 20\text{mm} \times 30\text{mm}$ 和 $\varnothing 30\text{mm} \times 40\text{mm}$ 三种尺寸的 JH-9105 药柱以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 、JO-9159 和 JOB-9003 药柱以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率进行试验。

3 结果和讨论

上述三种塑料粘结炸药的实验结果列于表 1。表 1 中临界温度 (T_c) 是药柱发生热爆

炸的最低环境温度与没有发生热爆炸的最高环境温度的平均值。中心最大升温(ΔT)是发生热爆炸前试样中心温度所达到的最大值与环境温度(T_a)之差。

表1 实验热爆炸结果

Table 1 Results of experimental thermal explosion

炸药	尺寸 (mm)	$T_a/^\circ\text{C}$	$\Delta T/^\circ\text{C}$	升温时间 (min)	延滞时间 (min)	现象 ¹⁾	$T_m/^\circ\text{C}$		
JH-9105	$\varnothing 10 \times 20$	202.0	—	55.0	55.0	TE	198.8		
		197.5	5.2	—	—	TD			
		193.5	8.0	50.0	—	TD			
	$\varnothing 20 \times 30$	184.9	9.2	110.0	243.0	TE			
		183.8	8.2	63.0	—	TD			
		188.1	10.0	68.0	138.0	TE			
		$\varnothing 30 \times 40$	175.0	19.0	68.0	415.0		TE	
			169.5	27.0	65.0	580.0		TE	
			168.5	23.0	73.0	870.0		TD	
JO-9159	$\varnothing 10 \times 20$	220.0	14.0	23.0	118.0	TE	198.5		
		213.1	14.0	61.0	225.0	TE			
		203.6	—	—	673.0	TD			
	$\varnothing 20 \times 30$	210.0	18.0	79.0	201.0	TE			
		207.9	8.0	58.0	268.0	TE			
		200.7	14.0	65.0	397.0	TE			
		196.3	—	—	—	TD			
		$\varnothing 30 \times 40$	200.7	9.0	69.0	313.7		TE	
			196.1	10.0	68.0	524.2		TE	
	191.0		—	—	—	ND			
	JOB-9003	$\varnothing 20 \times 30$	206.3	21.0	73.7	322.1		TE	199.5
			202.9	11.0	42.1	475.8		TE	
200.7			17.0	47.0	516.8	TE			
198.4			—	—	—	ND			
$\varnothing 30 \times 40$		205.0	25.0	93.6	334.7	TE			
		200.7	13.8	79.0	125.0	TE			
		198.4	21.5	88.4	417.6	TE			
		196.0	19.0	95.0	522.0	TE			
		193.8	—	—	—	ND			

注: 1) TE——热爆炸; TD——热分解; ND——看不出分解。

实验结果表明,尺寸对不同炸药的热爆炸临界温度影响是不同的,这可以从表1的数据看出来。如JH-9105炸药, ΔT_m 为29.1 $^\circ\text{C}$;JO-9159炸药, ΔT_m 为14.7 $^\circ\text{C}$;JOB-9003炸药, ΔT_m 为4.5 $^\circ\text{C}$ 。这种差别可能与它们的热安定性有关。对JH-9105炸药,其主体成份RDX在170 $^\circ\text{C}$ 时的热分解非常迅速,热积累效应远远大于以HMX为主体的JO-9159和JOB-9003炸药,从而表现出尺寸影响的严重性;对于JO-9159和JOB-9003炸药,在不考

考虑 HMX 反应的条件时,由于 NC 的反应能力远远大于 TATB,因此 JO-9159 炸药的反应能力比 JOB-9003 强得多,表现为 $(\Delta T_{cr})_{JO-9159} > (\Delta T_{cr})_{JOB-9003}$ 。此外,活化能的大小(详见表 2)也证明了这个结论的正确性。

表 2 实验热爆炸的活化能

Table 2 Activation energy of experimental thermal explosion

炸药	尺寸 (mm)	$T_{cr}/^{\circ}\text{C}$	$E/(\text{kJ/mol})$	相关系数
JH-9105	$\text{Ø}10 \times 20$	198.8	63.94	0.99
	$\text{Ø}20 \times 30$	184.7		
	$\text{Ø}30 \times 40$	169.7		
JO-9159	$\text{Ø}10 \times 20$	208.3	135.342	0.99
	$\text{Ø}30 \times 40$	193.6		
JOB-9003	$\text{Ø}20 \times 30$	199.5	160.577	0.99
	$\text{Ø}30 \times 40$	195.0		

实验证明,当反应温度略低于临界温度时(一般为 $2 \sim 4^{\circ}\text{C}$),炸药主要表现为分解反应直至达到完全分解。一般说来,具有一定几何尺寸的炸药药柱,分解反应从药柱中心开始。图 3 就是在实验中得到的 $\text{Ø}30\text{mm} \times 40\text{mm}$ 的 JH-9105 炸药在 168.5°C 时反应结束后的残留炸药薄壁圆筒。图中①为分解形成的炸药薄壁圆筒,②为分解形成的中心孔。但是,当反应温度较高时,在记录的温度-时间曲线达到平衡以后,中心温度迅速高于表面温度,随着反应的进行,这种趋势愈来愈大,直至发生爆炸(燃烧)为止。

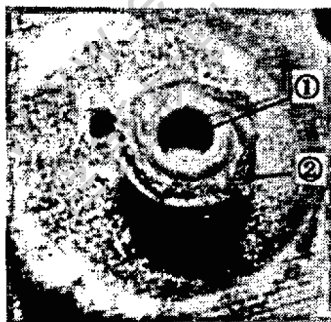


图 3 JH-9105 药柱热分解后的残留的照片
Fig. 3 Photogram of JH-9105 explosive charge residue after thermal decomposition

实验还证明,在炸药药柱处于边缘超临界区域时,诱导期起主要作用,它决定了发生热爆炸的延滞时间。当药柱的尺寸、形状、材料、密度和实验环境相同时,其超临界程度取决于环境温度。超临界程度与热爆炸延滞期有如下关系:

$$\frac{t_{ign}}{t_{ad}} = \frac{C}{\left(\frac{\delta}{\delta_{cr}} - 1\right)^{1/2}} \quad (1)$$

其中: t_{ign} —— 热爆炸延滞期; t_{ad} —— 同种炸药试样在绝热条件下的热爆炸延滞期; C —— 与炸药有关的常数; δ —— Frank-Kamenetskii 参数; $\left(\frac{\delta}{\delta_{cr}} - 1\right)^{1/2}$ —— 系统超临界程度。

实验结果清楚地表明了这种关系,即环境温度越低,延滞期越长;药柱尺寸越大,环境温度的变化对延滞期的影响也越明显。因此在实际应用中,当药柱处于超临界状态时,环境温度的控制对炸药工程应用的安全可靠性将起到决定性的作用。

根据 Merzhanov 热波理论得知,热爆炸具有从试样表面开始反应和发生在中心处两种可能性。

当 δ 值接近或大于 δ_c 时,热爆炸发生于药柱的中心处。随着 δ 值的增大,自加热速率将随时间的变化而不一致。在反应物中心温度达到 T_c 时,最大自加热速率出现于表面或者接近于表面,随时间的增长而移至中心处。这种现象被认为是振幅逐渐增大而引起的热波,当 δ 值不大时点火才出现在中心处。反之,再增加 δ 值,热爆炸将在表面发生。

因为

$$\delta = \frac{a_0^2 \rho Q E_a Z}{\lambda R T_c^2} \exp\left(-\frac{E_a}{RT_c}\right) \quad (2)$$

其中: a_0 ——圆柱的半径; ρ ——密度; Q ——反应热; E_a ——表观活化能; Z ——指前因子; T_c ——临界温度; λ ——导热系数; R ——气体常数。

由(2)式可得

$$\ln\left(\frac{\delta T_c^2}{a_0^2}\right) = M - \frac{E_a}{RT_c} \quad (3)$$

其中: $M = \ln \frac{\rho Q E_a Z}{\lambda R}$

将表1的数据代入(2),得经验表达式:

$$\text{JH-9105} \quad \ln\left(\frac{\delta T_c^2}{a_0^2}\right) = 56.27 - 15330 \frac{1}{T_c} \quad (4)$$

$$\text{JO-9159} \quad \ln\left(\frac{\delta T_c^2}{a_0^2}\right) = 84.83 - 29410 \frac{1}{T_c} \quad (5)$$

因此,可以用经验方程(4)和(5)来预估这两种炸药大尺寸药柱的临界参数^[12]。例如, JH-9105 炸药,在尺寸为 $\varnothing 100\text{mm} \times 150\text{mm}$ 、密度为 1.800g/cm^3 时,数值分析的临界判据 $\delta_c = 3.07$,用数值解法得到此时的临界温度为 421K 。换言之,当环境温度高于 148°C 时,热爆炸必然在一定时间内发生。

致谢:参加本项研究工作的有彭强、沈永兴、李金山和陈凤鸾等同志,秦骏勇工程师参加了安装和调试控制系统,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 冯长根. 热爆炸理论. 北京, 科学出版社, 1988.
- 2 Merzhanov A G. *Uspckikhim*, 1966, 35: 656
- 3 Rogers R N. *Thermochimica Acta*, 1975, 11: 131~139
- 4 Rogers R N. MHSMP-77-18H, 1977.
- 5 Rogers R N. LASL-81-9, 1981.
- 6 Mcguirc R R. UCRL-84986, 1981.
- 7 Schmitz G T, Faubion B D. MHSMP-82-26, 1982.
- 8 Schmitz G T, Faubion B D. MHSMP-80-48, 1980.
- 9 楚士晋. 爆破器材, 1985 (3): 5~8
- 10 郭明朝, 楚士晋等. 高能炸药热爆炸实验研究(待发表), 1992.
- 11 董海山, 周芬芬编. 高能炸药及相关物性能. 北京, 科学出版社, 1989.
- 12 Hutchinson C D. Experimental Studies Concerning the Response of Intermediate Explosives to Thermal Stimuli. 8th Symp. on Detonation (Intern.), 1985.

STUDY ON EXPERIMENTAL THERMAL EXPLOSION OF CYLINDRIC PBX CHARGES IN UNCONFINED SYSTEM

Chu Shijin Guo Mingchao

(*Institute of Chemical Materials, CAEP*)

Feng Changgen He Guangbin

(*Beijing Institute of Technology*)

ABSTRACT This thermal explosion processes of cylindric PBX charges with finite scale were experimentaly studied in unconfined conditions and some valuable results were obtained therefrom.

KEY WORDS experimental thermal explosion, cylindric PBX charges, unconfined system.