DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0876-05

低冲击加载下 JOB-9003 炸药的反应阈值*

李金河,傅　华,曾代朋,李　涛

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室,四川 绵阳 621999)

摘要:发展了一种研究炸药反应阈值的实验方法和分析技术:采用火药炮发射飞片的加载技术产生低冲击加载压力,应用电磁粒子速度计测量 JOB-9003 炸药后界面与 PMMA 之间界面粒子速度。通过分析界面粒子速度曲线,得到了低冲击加载下炸药与 PMMA 之间的界面粒子速度历史,获得了入射压力与未反应和反应后的界面粒子速度之间的 u_p-p 关系。JOB-9003 炸药在低冲击加载下的化学反应阈值和点火阈值分别为 1.42、2.62 GPa。

关键词:爆炸力学;反应阈值;电磁粒子速度计;界面粒子速度;飞片;火药炮

中图分类号:O381　　**国标学科代码**:13035　　**文献标志码**:A

在低速撞击或弱冲击作用下,由于强度和作用时间的不同,炸药可能会产生不同的反应情况,如化学反应、点火、燃烧、爆燃、爆轰以及 DDT 和 XDT 等现象[1]。由于 DDT 和 XDT 现象往往会导致灾难性的事故,是炸药或武器系统储存、运输、使用过程中必须避免的。P. J. Baker[2]认为研究在低刺激作用下炸药的反应很有意义,他指出在低于一定压力情况下炸药不会发生反应(即存在反应阈值),但压力在反应阈值和爆轰阈值之间可能出现 DDT、燃烧和爆炸等现象。因此,研究炸药的反应阈值,明确某种炸药在什么撞击压力或撞击速度下发生反应,反应的程度有多大,反应的性质是什么,对研究炸药的安全性有非常重要的意义。S. K. Chidester 等[3-4]用 Steven 实验方法对 PBX-9501 等炸药进行了研究,说明在低压下存在燃烧性质的反应,得到了不同炸药发生反应的阈值速度。T. P. Liddiard 等[5-6]通过改进的隔板实验方法(modified gap test),获得了几十种炸药的反应阈值,研究表明炸药的反应阈值与炸药厚度无关,入射压力在化学反应阈值与点火阈值之间时,炸药的反应烈度很低。对于某些以 HMX 为主要成分的炸药,在接近点火阈值时,大尺寸装药有可能发生灾害性的反应。D. G. Tasker[7]、M. Kroh[8]、李金河等[9]也采用改进的隔板实验方法得到了低于炸药爆轰阈值压力的反应阈值压力。由此可见,炸药在低冲击加载下存在反应阈值,反应阈值与炸药的安全性密切相关,研究炸药在低冲击加载下的反应阈值对炸药在使用和运输过程中的安全性评估具有重要意义。

改进的隔板实验方法被多个研究者用于研究炸药的反应阈值,但是,该实验方法存在一些问题。一是改进的隔板实验方法采用炸药加载方式,炸药的爆压较高,为了获得低冲击压力,需要使用很厚的隔板,装置比较笨重,并且压力幅值、脉宽调节不方便。另外,以往的测试手段都是采用高速分幅相机拍摄炸药自由面的运动情况,根据分幅图像分析、计算炸药自由面粒子速度,而炸药自由面并不是一维平面,且边界并不是很清晰,炸药自由面边界的提取存在比较大的人为性,计算结果的准确性不高。本文中应用火药炮发射飞片撞击炸药的加载方式,通过改变飞片的速度和材料,可以准确地获得所需要的低冲击加载压力。采用电磁粒子速度计[10](EMV)测量炸药与 PMMA 之间界面粒子速度,发展以界面粒子速度研究炸药在低冲击加载下反应阈值的分析方法,为炸药安全性研究提供一种新的研究思路。

1　实验方法

实验布局示意图见图 1。通过火药燃烧产生的高压气体驱动飞片撞击受试炸药,获得所需加载压

* **收稿日期**:2014-04-17;**修回日期**:2014-07-15

第一作者:李金河(1979—　),男,学士,助理研究员,leejinhe103@163.com。

力。飞片材料为 Al 或无磁不锈钢，尺寸∅120 mm×25 mm(钢飞片为∅100 mm×10 mm)。受试炸药 JOB-9003 的尺寸为∅40 mm×30 mm，炸药密度为 1.844～1.847 g/cm^3。通过改变火药的装填量(调节飞片的撞靶速度)和飞片材料(改变飞片的阻抗)，可以在炸药表面产生不同的撞击压力。

实验采用高速数字分幅相机拍摄飞片的撞靶过程并计算飞片的撞靶速度和撞靶压力。采用电磁粒子速度计测量炸药与有机玻璃窗口之间的界面粒子速度。电磁粒子速度计所需的磁场由亥姆霍兹线圈产生，线圈的直径为 400 mm。磁场的磁感应强度约为 0.07 T[11]。

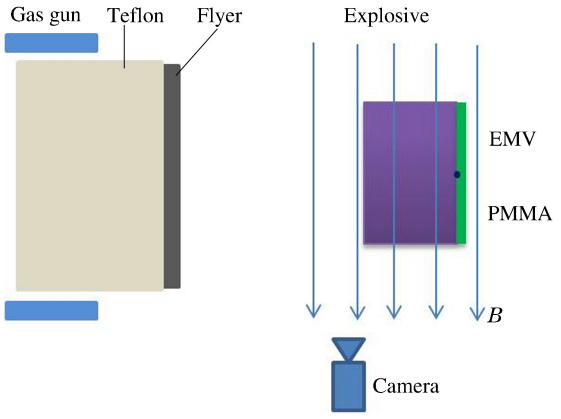

图 1 实验布局示意图

Fig. 1 Schematic drawing of experimental layout

2 实验结果

2.1 飞片速度以及撞靶压力

采用高速数字式分幅相机拍摄飞片的飞行姿态和撞靶情况，并计算了飞片的速度和相应的撞靶压力。飞片撞靶时，界面处的压力是连续的。根据飞片的速度 v 和材料的冲击绝热线关系可计算加载压力：

$$u_p=\frac{(2\rho_f\lambda_f v+\rho_f c_f+\rho_e c_e)-\sqrt{(2\rho_f\lambda_f v+\rho_f c_f+\rho_e c_e)-4(\rho_f\lambda_f-\rho_e\lambda_e)(\rho_f\lambda_f v^2+\rho_f c_f v)}}{2(\rho_f\lambda_f-\rho_e\lambda_e)} \tag{1}$$

$$p=\rho_f(v-u_p)(c_f+\lambda_f(v-u_p)) \tag{2}$$

式中：u_p 为飞片与炸药界面粒子速度，v 为飞片速度，ρ_e、ρ_f 分别指受试炸药和飞片的密度，c_e、λ_e 和 c_f、λ_f 为未反应炸药和飞片的冲击绝热线常数，p 为界面压力，实验用材料参数见表 1，飞片速度及压力计算结果见表 2。

表 1 材料参数[12]

Table 1 material parameters

材料	c/(mm·μs^{-1})	λ	ρ/(g·cm^{-3})
JOB-9003	2.49	2.09	1.84
PMMA	2.60	1.52	1.19
Al	5.25	1.39	2.78
不锈钢(0Cr18Ni9)	4.69	1.33	7.80

表 2 界面粒子速度随加载压力的变化情况

Table 2 Interface particle velocity of explosives vs. input pressure

实验	飞片	v/(m·s^{-1})	p/GPa	u_{pn}/(m·s^{-1})	u_{pr}/(m·s^{-1})	u_{pc}/(m·s^{-1})	备注
1	Al	320	1.28	152	152	153	未反应。取 $u_{pr}=u_{pn}$。
2	Al	365	1.42	185	185	182	未反应。取 $u_{pr}=u_{pn}$。
3	Al	450	1.75	235	305	235	慢反应。
4	Al	476	2.02	287	647	244	慢反应。
5	Al	524	2.26	319	788	273	慢反应。
6	Al	595	2.62	418	958	305	快速反应。
7	Al	624	2.78	455	1417	316	快速反应。
8	Steel	565	3.08	515	2280	335	爆炸。u_{pn} 根据未反应实验点拟合得到。

2.2 电磁粒子速度计测试结果

电磁粒子速度计的测试结果见图 2，由图 2 可知，加载压力从 1.28 GPa 上升到 3.08 GPa 的过程

中，炸药经历了不反应到微弱反应，再到快速反应直至爆炸的过程，相应地，炸药的界面粒子速度逐步增大。图中，u_{pn}表示未反应炸药界面粒子速度，u_{pr}表示反应后炸药的界面粒子速度。

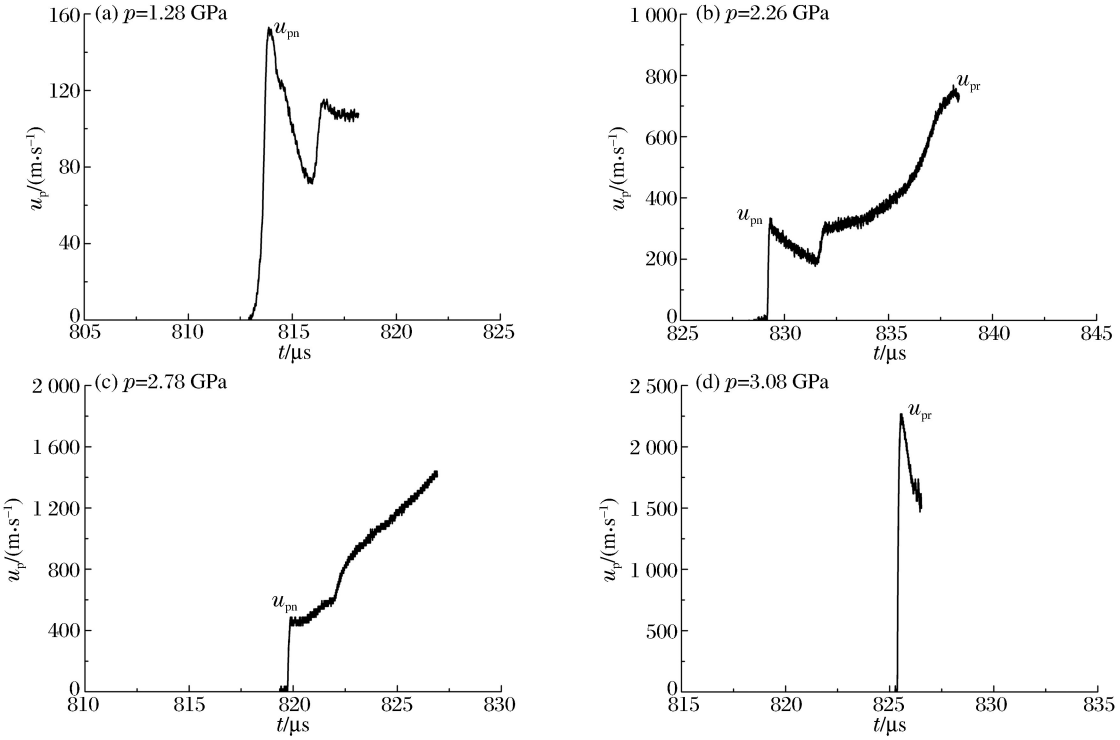

图 2 典型的界面粒子速度实验波形

Fig. 2 Typical experimental waves of interface velocity

3 分析与讨论

根据电磁粒子速度计的测试结果，可以获得不同加载压力下炸药未反应以及反应后 JOB-9003 炸药的界面粒子速度。

如果炸药未发生反应，电磁粒子速度计记录的最大粒子速度即为未反应炸药的界面粒子速度 u_{pn}，为了便于在 u_p-p 图上比较反应后的界面粒子速度变化趋势，将未反应炸药的粒子速度也当作反应后炸药的界面粒子速度进行处理，见图 2(a)。

如果炸药发生了反应，但是并没有爆炸或爆轰，则粒子速度的记录结果包含 2 部分，一部分为未反应炸药的界面粒子速度 u_{pn}，另一部分为炸药发生反应之后的界面粒子速度 u_{pr}，分析图见图 2(b)～(c)。即炸药与有机玻璃之间的界面粒子速度先是在冲击波的作用下增加，之后，炸药反应冲击波追赶上来，导致界面粒子速度进一步增大。需要说明的是，这里所指未反应炸药的界面粒子速度是指当时界面处的炸药还未反应，而界面之前的炸药已经发生了反应，因此，u_{pn}实际上包含了界面之前炸药反应的贡献。J. Wackerle 等[13]和 C. A. Forest 等[14]从理论上说明了该方法是可行的，R. L. Guatavsen 等[15]已经成功地将该方法用于获取未反应炸药的冲击绝热线。一般情况下，电磁粒子速度计能够记录炸药反应后界面粒子速度变化的全过程，电磁粒子速度计记录的最大速度为炸药反应后的界面粒子速度。

如果炸药发生了爆炸或爆轰，电磁粒子速度计的记录结果只有炸药发生爆炸反应后的界面粒子速度 u_{pr}，见图 2(d)。

共完成了 8 发实验，实验结果见表 2。表 2 中 u_{pc}为将炸药当作惰性介质数值模拟计算的界面粒子速度。当炸药未反应时，测量的未反应炸药的界面粒子速度与测量的界面粒子速度大小一致，说明电磁粒子速度计的测试结果具有较高的准确性。当炸药发生反应后，计算结果明显偏小，且随着加载压力增大，计算结果与测量结果的差值逐渐增大。典型的计算结果见图 3。

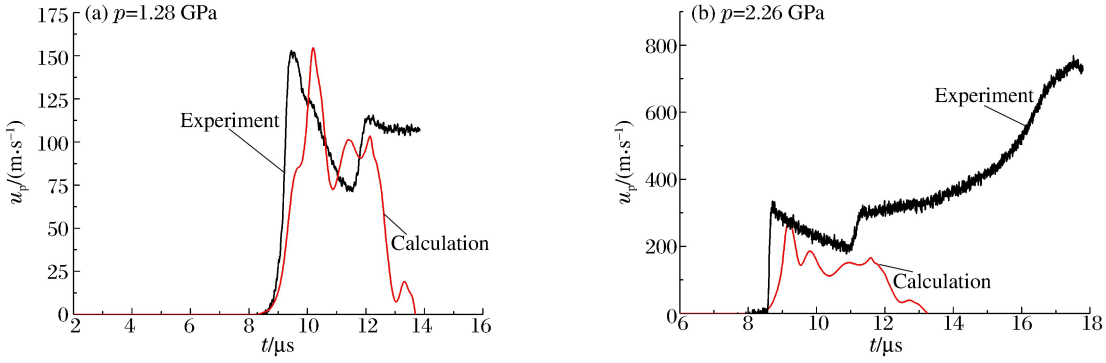

图 3 测量界面粒子速度结果与未反应炸药计算结果对比

Fig. 3 Comparison of interface particle velocity of experiment and calculation

根据表 2 绘制未反应以及反应后炸药的界面粒子速度与入射压力之间的关系图，见图 4。由图 4 可知，炸药在未反应的时候，随着入射压力的增加，其界面粒子速度也逐渐增加，且界面粒子速度的变化与入射压力近似呈线性关系。与未反应炸药计算的界面粒子速度相比，在较高压力情况下，其中显然也包含有界面之前炸药反应的贡献。炸药发生反应后，其界面粒子速度随压力的变化可以分为 2 个阶段：第 1 个阶段，随着压力的增加，界面粒子速度缓慢增加，在约 1.75 GPa 以后，粒子速度的变化增加相对明显，该阶段对应炸药的化学反应过程；第 2 个阶段，随着压力增加，界面粒子速度迅速增加，该阶段对应了炸药的点火反应，发生点火反应后，炸药可能发生爆炸、直至爆轰。根据图 4 可知，JOB-9003 炸药存在化学反应阈值和点火阈值，化学反应阈值约为 1.42 GPa，点火阈值约为 2.62 GPa。

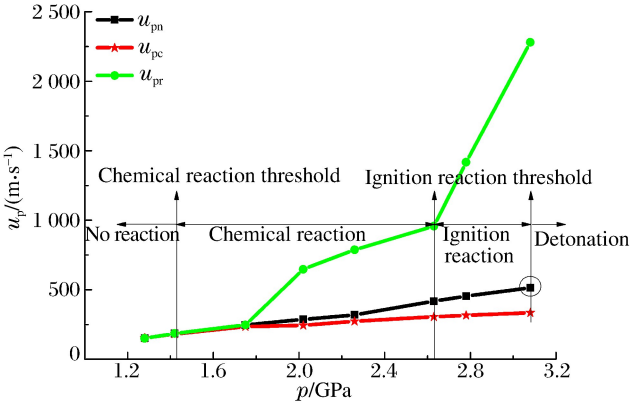

图 4 界面粒子速度与入射压力关系图

Fig. 4 Interface particle velocity vs. input pressure

4 结 论

用火药炮发射飞片撞击炸药产生了低冲击加载的压力，用电磁粒子速度计测量了炸药与 PMMA 之间的界面粒子速度，获得了炸药与 PMMA 界面粒子速度随压力的变化情况，得到了 JOB-9003 炸药的化学反应阈值和点火阈值分别约为 1.42、2.62 GPa。另外，由于本实验测量的是炸药与有机玻璃之间的界面粒子速度，2 种材料由于阻抗失配，测量的界面粒子速度的后期波形会受到反射稀疏波的影响，在以后的实验中将电磁粒子速度计置于炸药内部，可以更准确地研究炸药的反应阈值。与反应阈值研究相关的实验技术和分析方法有待在以后的工作中进一步完善。

参考文献：

[1] Tarver C M, Chidester S K. On the violence of high explosive reactions[R]. UCRL-CONF-202375, 2004.

[2] Baker P J. Impact-initiated detonative and nondetonative reactions in confined tritonal, composition H-6, and PBXN-109[C]// Lee E L. 11th Symposium (International) on Detonation, Snowmass. Colorado, 1996:254-265.

[3] Chidester S K, Green L G, Lee C G. A frictional work predictive method for the ignition of solid high explosives from low pressure impacts// Short J M, Tasker D J. 10th Symposium (International) on Detonation. Boston, Mas-

sachusetts, 1993:785-792.
[4] Chidester S K, Tarver C M, Graza R. Low amplitude impact testing and analysis of pristine and aged solid high explosives[C]// Lee E L. 11th Symposium (International) on Detonation. Snowmass, Corolado, 1998:93-100.
[5] Liddiard T P, Forbes J W. Physical evidence of different chemical reactions in explosives as a function of stress[C]// Lee E L, Short J M. 9th Symposium (International) on Detonation. Portland, Oregon, 1989:1235-1242.
[6] Lemar E R, Liddiard T P, Forbes J W. The analysis of modified gap test data for several insensitive explosives[C]// Short J M, Tasker D J. 10th Symposium (International) on Detonation. Boston, Massachusetts, 1993:731-737.
[7] Tasker D G. Shock initiation and subsequent growth of reaction in explosives and propellants: The low amplitude shock initiation, LASI[C]// Short J M. 7th Symposium (International) on Detonation. Annapolis, Maryland, 1981:285-298.
[8] Kroh M, Thoma K, Arnold W, et al. Shock sensitivity and performance of several high explosives[C]// Short J M. 8th Symposium (International) on Detonation. Albuquerque, New Mexico, 1985:1131-1138.
[9] 李金河,文尚刚,谭多望.低冲击作用下JO-9159炸药的反应阈值[J].爆炸与冲击,31(2),2011:148-152.
Li Jin-he, Wen Shang-gang, Tan Duo-wang. The experimental study on the reaction threshold of explosive under low amplitude shock[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(2):148-152.
[10] Gustavsen R L, Sheffield S A, Alcon R R, et al. Shock initiation of new and aged PBX-9501 Measured with embedded electromagnetic particle velocity gauges[R]. LA-13634-MS, 1999.
[11] 李金河,赵继波,谭多望.用组合式电磁粒子速度计研究JO-9159炸药的爆轰增长过程[C]//第八届全国爆轰学术会议论文集.腾冲,2010:58-63.
[12] Marsh S P. LASL shock Hugoniot data[M]. Berkeley: University of California Press, 1980.
[13] Wackerle J, Stacy H L, Seitz W L. Velocimetry studies on the prompt initiation of PBX 9502[C]// Short J M, Tasker D J. 10th Symposium (International) on Detonation. Boston, Massachusetts, 1993:468-475.
[14] Forest C A, Wackerle J, Dick J J, et al. Lagrangian analysis of MIV gauge experiments on PBX 9502 using the mass-displacement moment function[C]// Lee E L, Short J M. 9th Symposium (International) on Detonation. Portland, Oregon, 1989:683-692.
[15] Gustavsen R L, Sheffield S A, Alcon R R. Measurements of shock initiation in the tri-amino-tri-nirtro-benzene based explosive PBX 9502: Wave forms from embedded gauges and comparison of four different material lots[J]. Journal of Applied Physics, 2006,99(11):114907.

The reaction threshold of JOB-9003 explosive under low amplitude loading

Li Jin-he, Fu Hua, Zeng Dai-peng, Li Tao

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: A novel experimental technique to study the reaction threshold of explosives is developed. The flyer is accelerated to an expected velocity to gain a low amplitude loading by the gas gun. The interface particle velocity between JOB-9003 and PMMA under different stresses is measured with electromagnetic particle velocity gauges. The interface velocities of unreacting and reacting explosive are achieved based on the curve of the explosive interface particle velocity. The relationship of u_p-p is achieved according to interface velocity of unreacting and reacting explosives. The chemical reaction threshold and the ignition threshold of JOB-9003 are 1.65 GPa and 2.62 GPa under the low amplitude loading.

Key words: mechanics of explosion; reaction threshold; electromagnetic particle velocity gauge; interface particle velocity; flyer; gas gun

(责任编辑　曾月蓉)