

文章编号:1006-9941(2020)11-1089-06

界面粒子速度法评估雷管输出压力

陈清畴,李光,李艺

(中国工程物理研究院化工材料研究所,四川绵阳621999)

摘要: 雷管输出压力是表征其输出特性的主要指标之一。采用界面粒子速度测量实验,结合阻抗匹配计算方法,建立了一种可靠的冲击片雷管输出压力评估方法。设计了三种二级装药结构的冲击片雷管,一级装药为六硝基芪(HNS-IV),二级装药为以黑索今为基的高聚物黏结炸药(PBX-RDX),每种雷管的总装药量不变,但是装药比例不同。采用光子多普勒测速仪(PDV)测量了三种冲击片雷管与光学窗口的界面粒子速度,阻抗匹配计算结果表明,雷管输出压力分别为7.64,7.29 GPa和6.71 GPa。PBX-RDX对比对雷管输出压力有一定影响,PBX-RDX配比降低,雷管输出压力也随之降低。采用数值模拟计算,计算了三种冲击片雷管的输出压力,计算结果分别为7.7,7.1 GPa和6.4 GPa,实验值与计算值相比,误差小于6.5%,验证了界面粒子速度法评估雷管输出压力的有效性。雷管底壳材料对雷管输出压力有重要影响,雷管底壳的冲击阻抗越低,雷管输出压力越高,不锈钢底壳对雷管输出压力有明显的削峰作用。

关键词: 雷管;界面粒子速度;输出压力;阻抗匹配

中图分类号: TJ45

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2019286

1 引言

雷管属于起爆类火工元件,作为起爆传爆序列的重要组成部分,雷管的输出威力是表征其输出特性的主要指标之一。目前标准的雷管输出威力试验方法有铅板试验^[1]、钢块凹痕试验^[2]和铝块凹痕试验^[3]。铅板试验使用的铅材料有毒性,并且其硬度受温度影响较大,具有显著的实验误差。凹痕试验能够给出相对的输出威力特征比较,但是凹痕本身无法与雷管的起爆能力建立起定量关系。

根据冲击起爆的临界起爆能量判据^[4],冲击压力及其持续时间是炸药能否被起爆的主要特征量,因此输出压力是体现雷管起爆能力的重要特征之一。Coleburn等^[5]采用高速相机测量了雷管在水中的冲击波速度,并且根据冲击波速度和压力的关系^[6]获得了

雷管在水中的输出压力。但是这种实验方法复杂、成本高、效率较低,并且需要对水介质的冲击波特性和深入了解。压力传感器也被用于测量雷管爆炸时在水介质^[7]或者空气介质^[8]中的压力波形,但是这种实验方法也只能获得雷管的相对输出压力,而无法获得雷管实际输出压力。锰铜压力计做为爆轰压力测量的常用实验方法,同样适用于雷管输出压力的测量。路光明等^[9]利用锰铜压力计对雷管内部不同装药界面处的爆压进行了测量,认为在雷管输出端处雷管装药已达到稳定爆轰。锰铜压力计产生的电信号较弱,容易受到干扰,造成主信号淹没。针对此问题,蒋俊等^[10]改进了测试系统,避免了发火通路对传感器采集通路的影响,保证了传感器信号的无干扰。韩克华等^[11]采用锰铜压力计测量了冲击片雷管多点同步起爆爆轰波压力,但是实验值明显低于计算值,这说明锰铜压力计显著的影响了测试结果的准确性。锰铜压力计需要包裹绝缘层以保持与爆轰产物绝缘,同时为改善压力上升信号而增加的保护介质厚度甚至可以达到1 mm^[12],而绝缘层和保护介质会引起信号畸变或者增大测量误差^[13]。以上研究结果表明,锰铜压力计法测量雷管的输出压力存在着抗干扰能力差,测量精度较低,有必要

收稿日期:2019-11-11;修回日期:2020-02-17

网络出版日期:2020-05-25

作者简介:陈清畴(1983-),男,工程师,主要从事爆炸箱起爆技术及传爆序列设计研究。e-mail:chenqingchou@caep.cn

通信联系人:李艺(1977-),女,高级工程师,主要从事爆炸箱起爆器研究。e-mail:liy_i cm@caep.cn

引用本文:陈清畴,李光,李艺. 界面粒子速度法评估雷管输出压力[J]. 含能材料,2020,28(11):1089-1094.

CHEN Qing-chou, LI Guang, LI Yi. Evaluation of Detonator Output Pressure by Interface Particle Velocity Method[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(11):1089-1094.

发展新的测试方法。随着激光测速技术的发展,光子多普勒测速仪(Photonic Doppler Velocimetry, PDV)被应用于雷管作用后的破片速度^[14]、输出压力在有机玻璃中的衰减^[15]等输出性能表征研究中。

相对于锰铜压力计测量方法,PDV测量无需保护绝缘层,能够减少绝缘层对输出压力衰减带来的影响;激光传输信号能够天然隔离电干扰信号,提高测试成功率。为此,本研究采用PDV技术,测量雷管与光学窗口的界面粒子速度,并且通过阻抗匹配计算方法,计算雷管的输出压力,建立一种可靠的雷管输出压力测量新方法。同时采用数值模拟方法,计算雷管输出压力,与实验结果对比验证。

2 实验方法及实验结果

2.1 实验样品

设计了三种二级装药的冲击片雷管(Slapper Detonator),开展雷管与光学窗口的界面粒子速度实验。冲击片雷管的桥箔材料为铜,尺寸(宽度×厚度)为 $0.3\text{ mm}\times 3\text{ }\mu\text{m}$;飞片材料为聚酰亚胺薄膜,尺寸为 $\Phi 0.45\text{ mm}\times 25\text{ }\mu\text{m}$;炮筒材料为不锈钢,尺寸为 $\Phi 0.45\text{ mm}\times 0.4\text{ mm}$ 。雷管底壳材料为不锈钢,厚度为 0.20 mm 。

冲击片雷管的一级装药为六硝基芪(HNS-IV),二级装药为以黑索今(RDX)为基的高聚物黏结炸药(以下简称PBX-RDX),装药直径均为 $\Phi 6.3\text{ mm}$ 。为了形成标准化产品,冲击片雷管的结构尺寸通常难以随意更改,可以在总装药量不变的条件下,通过调整两级装药的配比来控制雷管的输出能力。为研究不同配比装药对雷管输出能力的影响,设计了三种雷管的装药配比(见表1)。

表1 实验用冲击片雷管装药参数

Table 1 Parameters of explosive load of slapper detonator

No.	first explosive	second explosive
group 1	HNS-IV : 150 mg	PBX-RDX : 150 mg
group 2	HNS-IV : 200 mg	PBX-RDX : 100 mg
group 3	HNS-IV : 250 mg	PBX-RDX : 50 mg

冲击片雷管的放电回路采用 $0.2\text{ }\mu\text{F}$ 的放电电容,充电电压为 3500 V 。PDV系统采用的激光波长为 1550 nm ,示波器参数设置为采样率 $10\text{ GS}\cdot\text{s}^{-1}$ 。LiF光学窗口厚度为 5 mm ,光纤探头距离光学窗口约为 $(1\sim 3)\text{ mm}$ 。

2.2 实验原理与方法

在冲击片雷管作用过程中,起爆回路中会有大电流脉冲信号,有可能在电测系统中产生感应干扰信号。为验证测量方法的抗干扰能力,实验中采用冲击片雷管。采用PDV测量系统,测量雷管与光学窗口之间的界面粒子速度。实验装置结构及原理如图1所示,主要由冲击片雷管、氟化锂(LiF)光学窗口、光纤探头、PDV主机和示波器等部分组成。

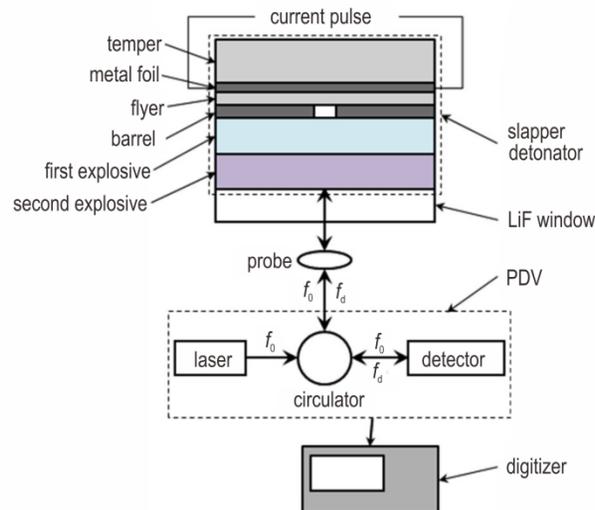


图1 界面粒子速度测量实验装置及原理示意图

Fig.1 Schematic of the interface particle velocity measurement

LiF光学窗口与雷管接触端镀有一层铝膜,厚度为 400 nm 。当开关闭合后,脉冲电源释放出脉冲大电流,激发金属桥箔发生电爆炸,剪切并驱动飞片高速运动。飞片以一定速度冲击起爆炸药,炸药爆轰产物驱动雷管底壳对LiF光学窗口冲击压缩。由于速度连续性,在界面处,雷管底壳、铝膜和LiF光学窗口以相同速度一起运动。光纤探头捕捉到铝膜反射回的激光信号,由此测量铝膜的运动速度。当铝膜厚度非常薄时,其对界面处粒子速度影响非常小,可忽略不计。此时,测量到的铝膜速度即为雷管底壳与窗口界面粒子速度。

2.3 实验结果与阻抗匹配计算

按照表1参数准备三种雷管进行实验,每种状态进行两发实验。PDV测速系统通过伪颜色深浅来表征频率和速度高低。以第一组第一发实验为例,实验获得的界面粒子速度的伪色彩图片如图2所示。

通过程序分析伪色彩图片,可以获得速度曲线数据。以第一组实验为例,实验获得的界面粒子速度曲线如图3所示。

从图3看出,雷管作用后的爆轰波驱动雷管底壳

撞击窗口材料,碰撞界面的速度瞬间升高到 $1400\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,随后界面速度迅速降低。在界面速度下降约 $200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 后,受到雷管底壳内部反射波的作用,界面速度再次升高,形成第二峰值,第二峰值速度小于第一峰值速度。雷管输出压力的波形为双峰结构。

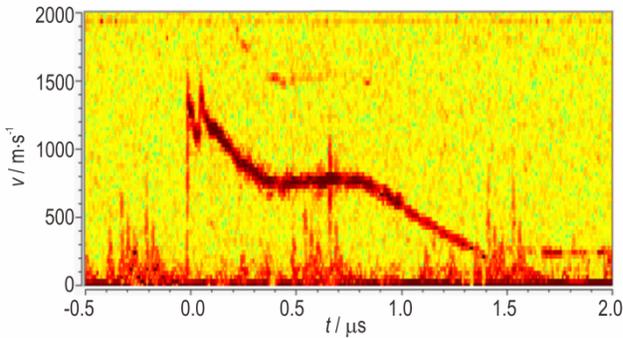


图2 实测界面粒子速度的伪色彩图片示例
Fig.2 Pictures of the measured interface particle velocity histories

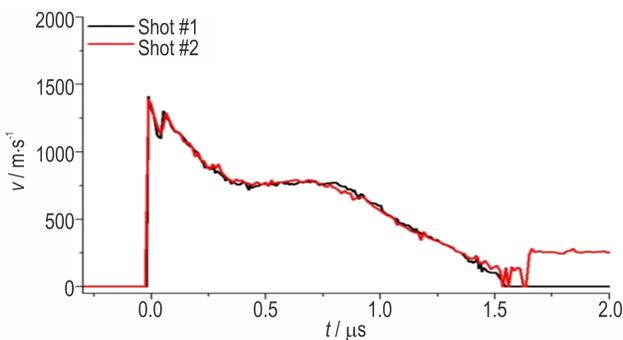


图3 第一组实验所得界面粒子速度曲线
Fig.3 Interface particle velocity histories of group 1 experimental

在冲击波作用下,受窗口材料折射率变化的影响,加窗激光干涉测速系统的实测界面粒子速度(u_a)不是真实的界面粒子速度(u_p),需要对实测速度进行修正。在压力小于 124 GPa 时,可以认为两者是线性关系^[16]。 1550 nm 波长下LiF窗口的速度线性修正方程^[16]为:

$$u_p = \frac{u_a}{1.2678} \quad (1)$$

式中, u_p 为真实界面粒子速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; u_a 为实测界面粒子速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。读取实验获得的界面粒子速度峰值,并按照式(1)修正,可得雷管输出时实际的界面粒子速度。三组实验的实际界面粒子速度如表2所示。

冲击波在传播过程中遇到界面,会在两种材料的界面处发生反射和透射。采用界面粒子速度法测量雷管输出压力时,雷管输出压力即为透射波压力。透射波压力与材料冲击阻抗密切相关,雷管起爆不同种类炸药时的输出压力不相同。因此有必要选择一种标准

材料作为受主,便于雷管输出能力的在同一基准下对比。本研究选择冲击阻抗与炸药接近、同时在爆压测试中常用的有机玻璃(PMMA)作为标准受主。

在雷管底壳与LiF窗口的界面处,压力和质点速度连续。根据压力和速度连续条件,采用阻抗匹配方法,可以求解界面处冲击波状态参量。阻抗匹配的作图求解过程^[17]如图4所示。

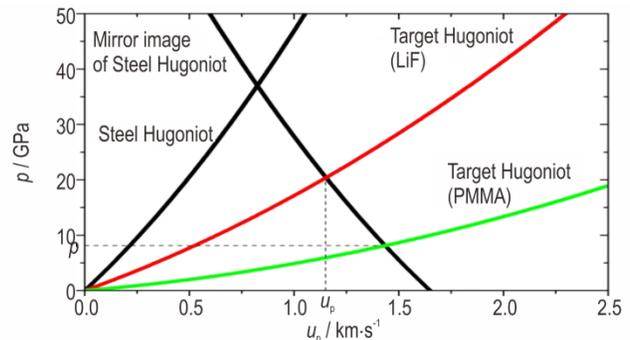


图4 阻抗匹配法计算所得雷管输出压力
Fig.4 Detonator output pressure calculated by the impedance matching method

不锈钢、LiF和PMMA的冲击 Hugoniot 参数已知,可在图中做出三种材料的压力-粒子速度($p-u$)曲线。LiF的冲击 Hugoniot 曲线与不锈钢的冲击 Hugoniot 镜像线的交点为冲击波在界面反射后的状态。当已知界面粒子速度时,可在图中确定此交点位置并给出不锈钢的冲击 Hugoniot 镜像线。当由PMMA替代LiF时,PMMA的冲击 Hugoniot 曲线与不锈钢的冲击 Hugoniot 镜像线的交点为雷管底壳与PMMA界面状态,此点即为本文定义的雷管输出压力。按照图解法对三组实验中雷管输出压力进行计算,计算结果如表2所示。

表2 输出压力实验和阻抗匹配结果

Table 2 Results of output measurements and impedance matching

No.	$u_a/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	p/GPa	\bar{p}/GPa
group 1	1.411	7.73	7.64
	1.388	7.55	
group 2	1.360	7.33	7.29
	1.348	7.24	
group 3	1.290	6.81	6.71
	1.261	6.60	

Note: u_a is real particle velocity, p is interface pressure, \bar{p} is mean pressure.

从表2的计算结果来看,三种装药结构雷管的平均输出压力分别为 7.64 、 7.29 GPa 和 6.71 GPa 。雷管输出压力随着HNS-IV药量增大、PBX-RDX药量减小

而逐渐减小。对比而言, PBX-RDX的爆速比 HNS-IV 的爆速高, 输出能量更高, PBX-RDX 药量减少对雷管输出压力有一定影响。这说明, 通过不同能量的炸药配比设计, 可以控制冲击片雷管的输出压力。

3 数值模拟计算

3.1 计算模型

采用数值模拟方法也可以预估冲击片雷管的输出压力, 但是需要获得雷管装药的爆轰状态方程参数, 而拥有状态方程参数的雷管装药种类较少。在未知雷管装药的状态方程参数情况下, 采用数值模拟方法不能计算得到准确的雷管输出压力。实验中采用的 HNS-IV^[18] 和 PBX-RDX^[19] 已通过圆筒实验获得了状态方程参数。

基于冲击片雷管的基本构型, 以 PMMA 为受主, 建立有限元计算模型。HNS-IV 可以认为是理想炸药, 因此冲击片雷管起爆方式简化为点起爆, 将 HNS-IV 起爆面的中心设置为起爆点。网格为四边形网格, 尺寸为 0.05 mm。计算模型中各接触面均为单面接触, PMMA 下端面为透射边界。冲击片雷管的输出压力计算模型如图 5 所示。

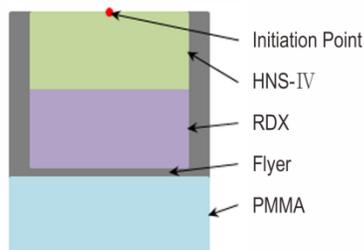


图5 雷管输出压力计算模型

Fig.5 Simulation model of the detonator output pressure

采用非线性有限元动力学程序 Ansys/Ls-Dyna 进行数值模拟。HNS-IV 和 PBX-RDX 采用高能炸药燃烧模型和 JWL 状态方程。JWL 状态方程参数已由圆筒实验获得^[18-19]。不锈钢^[20]、铝^[20]、聚四氟乙烯 (PTFE)^[21] 和 PMMA^[22] 均采用弹塑性动力学模型和 Grüneisen 状态方程。计算所需参数如表 3 所示。

3.2 计算结果与讨论

计算了表 3 中不同装药参数的冲击片雷管起爆过程。以 PMMA 界面中心单元为观测点, 获得了三种装药结构雷管的输出压力曲线, 如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 计算所得的压力曲线与实验所得的界面粒子速度曲线类似, 均具有双峰结构。但是

表 3 计算所需材料参数

Table 3 Parameters of inert materials for simulation

material	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$C/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	S_1	γ_0	a
steel	7.83	4569	1.490	2.17	0.46
Al	2.70	5355	1.345	2.13	0.10
PTFE	2.20	1680	1.123(S_1)	0.59	0
			3.98(S_2)		
			-5.80(S_3)		
PMMA	1.18	2570	1.540	0.85	0

Note: ρ are density; C is the intercept of Hugoniot curve; S_1 is the coefficient of slope of Hugoniot curve; γ_0 is Grüneisen gamma; a is first order volume correction to γ_0 .

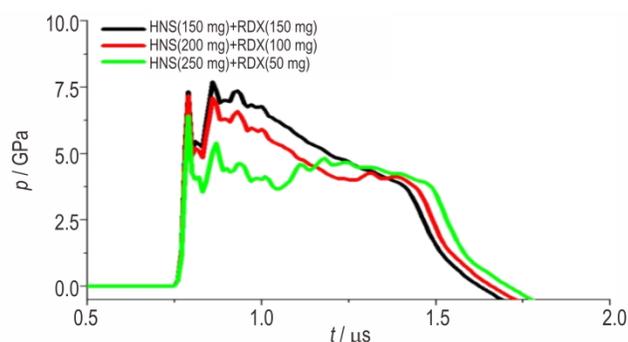


图6 装药参数对输出压力的影响

Fig.6 Effects of explosive load on the detonator output pressure

在数值模拟结果中出现了第二峰值大于第一峰值的情况, 这是由于实验用受主材料为 LiF, 数值模拟中的受主材料为 PMMA, 双峰的峰值大小与材料特性有关。在本研究的冲击片雷管中, 总装药量相同, 意味着雷管输出压力的脉宽基本相同; 雷管直径相同, 说明冲击起爆的作用面积也相同。因此在雷管冲击起爆过程下级装药的过程中, 主导因素是压力峰值。不论是第一峰值, 还是第二峰值作用到下级装药时, 较大的压力峰能够使下级装药发生更为剧烈的反应, 由较大的压力峰表征雷管输出能力具有一定的合理性。按照最大压力峰值为输出压力, 三种装药参数的冲击片雷管的计算输出压力分别为 7.7, 7.1 GPa 和 6.4 GPa, 采用界面粒子速度法获得的输出压力与数值模拟结果相比, 误差小于 6.5%。这说明采用界面粒子速度法评估雷管输出压力具有较好的准确性。

为了保持一定的雷管结构强度, 并减小雷管底壳对冲击波的衰减作用, 雷管底壳厚度的变化余地较小。对于不同应用需求的雷管, 雷管底壳材料会不同。为了研究不同材料对雷管输出压力的影响, 计算了不锈钢、铝和 PTFE 三种材料在 0.2 mm 厚度下、第一组装药结构的雷管输出压力。计算结果如图 7 所示。

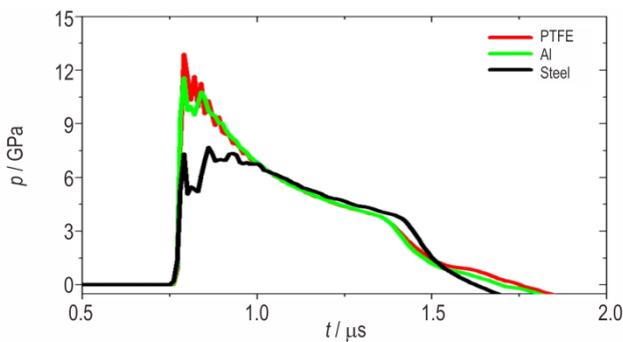


图7 底壳材料对输出压力的影响

Fig.7 Effects of the shell materials on the detonator output pressure

从图7可以看出,材料对雷管输出压力峰值有着显著影响。PTFE底壳的雷管输出压力峰值达到了12.9 GPa,铝壳雷管的输出压力峰值为11.6 GPa,均高于不锈钢壳雷管的7.7 GPa。不锈钢底壳的压力波形与其他两种显著不同,不锈钢底壳削峰作用明显。在装药爆轰产物和雷管底壳界面上,透射波压力取决于底壳材料的冲击阻抗。PTFE和铝的冲击阻抗接近,不锈钢的冲击阻抗最大。由此造成雷管输出压力的峰值按冲击阻抗大小依次降低,并且大幅度降低不锈钢底壳的雷管输出压力峰值。

4 结论

采用PDV测量技术,结合阻抗匹配计算方法,建立了一种可靠的冲击片雷管输出压力测量与计算方法。

(1) 采用PDV测量了三种装药结构的冲击片雷管与光学窗口的界面粒子速度,阻抗匹配计算结果表明雷管输出压力分别为7.64,7.29 GPa和6.71 GPa,随着PBX-RDX配比减小,雷管输出压力也逐渐减小。

(2) 采用数值模拟计算,计算了三种装药参数的冲击片雷管输出压力,分别为7.7,7.1 GPa和6.4 GPa,实验值与计算值相比,误差小于6.5%。

(3) 雷管底壳材料对雷管输出压力有重要影响,雷管底壳的冲击阻抗越低,雷管输出压力越高,不锈钢底壳对雷管输出压力有明显的削峰作用。

参考文献:

- [1] 王奎全,刘虹秋,徐汉宣. GJB5309.18-2004,火工品试验方法第18部分:铅板试验[S].北京:2004.
- [2] 王奎全,刘虹秋,徐汉宣. GJB5309.17-2004,火工品试验方法第16部分:钢块凹痕试验[S].北京:2004.
- [3] 王奎全,刘虹秋,徐汉宣. GJB5309.17-2004,火工品试验方法第17部分:铝块凹痕试验[S].北京:2004.

- [4] Walker F E, Wasley R J. Critical energy for the shock initiation of heterogeneous explosives [J]. *Explosive Stoffe*, 1969, 17 (1):9-13.
- [5] Coleburn N L, Liddiard T P, Roslund L A. Dynamic measurements of detonator output [R]. AD-757657. Maryland, USA: 1973.
- [6] Rice M H, Walsh J M. Equation of state of water to 250 kilobars [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1957, 26 (4) : 824-830.
- [7] Lefebvre M H. Determination of the power output of detonators [C] // Proceedings of the 6th Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials. Pardubice, Czech Republic. 2003: 198-204.
- [8] Petr V, Lozano E. Characterizing the energy output generated by a standard electric detonator using shadowgraph imaging [J]. *Shock Waves*. 2017, 27(5): 781-793.
- [9] 路光明,杜志明,段卓平,等.用锰铜压阻法测量雷管内部爆压 [J]. *火工品*. 2000 (3): 6-8,17.
LU Guang-ming, DU Zhi-ming, DUAN Zhuo-ping, et al. Measurement of detonation pressure using the manganin piezoresistors [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2000 (3): 6-8, 17.
- [10] 蒋俊,严楠,鲍丙亮.工业雷管输出压力测试及数值模拟研究 [J]. *火工品*, 2017 (2): 1-5.
JIANG Jun, YAN Nan, BAO Bing-liang. Experiment and numerical simulation research on measuring the detonation pressure of industrial detonator [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2017 (2): 1-5.
- [11] 韩克华,任西,李慧,等.冲击片雷管多点同步起爆爆轰波压力的数值模拟和试验 [J]. *含能材料*, 2016, 24(1): 38-44.
HAN Ke-hua, REN Xi, LI Hui, et al. Simulation and experimental studies on the multi-point synchronization detonation overpressure of slapper detonators [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(1): 38-44.
- [12] 韩秀凤,严楠,蔡瑞娇.锰铜传感器保护介质对雷管输出记录波形的影响 [J]. *北京理工大学学报*, 2004, 24(5): 462-465.
HAN Xiu-feng, YAN Nan, CAI Rui-jiao. Impact of manganin transducer protective medium on detonator's output record waveform [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2004, 24(5): 462-465.
- [13] 孙承伟,卫玉章,周之奎.应用爆轰物理 [M].北京:国防工业出版社,2000: 197.
- [14] Künzel M J, Kucera J, Pachman J. Detonator testing using photonic doppler velocimetry [C] // New Trends in Research of Energetic Materials, Czech Republic, 2018.
- [15] Murphy M J, Lieber M A, Biss M M. Novel measurements of shock pressure decay in PMMA using detonator loading [J]. *AIP Conference Proceedings*, 1979, 160020 (2018).
- [16] 赵万广,周显明,李加波,等. LiF单晶的高压折射率及窗口速度的修正 [J]. *高压物理学报*, 2014, 28(5): 571-576.
ZHAO Wan-guang, ZHOU Xian-ming, LI Jia-bo, et al. Refractive index of LiF single crystal at high pressure and its window correction [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(5): 571-576.
- [17] 汤文辉.冲击波物理 [M].北京:科学出版社.2011: 206.
- [18] 陈清畴,蒋小华,李敏,等. HNS-IV炸药JWL状态方程研究 [J]. *火工品*, 2010 (4): 21-24.
CHEN Qing-chou, JIANG Xiao-hua, LI Min, et al. Studies on JWL EOS of detonation product for HNS-IV [J]. *Initiators & Py-*

- rotechnics*, 2010 (4): 21–24.
- [19] 陈清畴, 蒋小华, 李敏, 等. RDX基高聚物黏结炸药JWL状态方程研究[J]. 含能材料, 2011(2): 21–24.
CHEN Qing-chou, JIANG Xiao-hua, LI Min, et al. Studies on JWL EOS of RDX-based PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011(2): 21–24.
- [20] 时党勇. 基于ANSYS/LS-DYNA 8.1进行显式动力分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2005:117.
- [21] Tarver C M. Modeling detonation experiments on triaminotrinitrobenzene (TATB)-based explosives LX-17, PBX 9502, and ultrafine TATB [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2012, 30 (3): 220–251.
- [22] Garcia M L, Tarver C M. Three-Dimensional Ignition and Growth Reactive Flow Modeling of PRISM Failure Tests on PBX 9502 [R]. UCRL-CONF-222376, Norfolk, VA, United States: 2006.

Evaluation of Detonator Output Pressure by Interface Particle Velocity Method

CHEN Qing-chou, LI Guang, LI Yi

(*Institute of Chemical Material, CAEP, Mianyang 621999, China*)

Abstract: The output pressure is one of the most important feature of detonators. Using photonic doppler velocimetry (PDV) and impedance matching technique, a reliable measurement method for output pressure was carried out. The interface particle velocities between slapper detonators and optic windows were measured by PDV for three kind of detonators. The calculation results show the output pressures are 7.64, 7.29, 6.71 GPa, respectively. The PBX-RDX content has certain influence on the output pressure. As the PBX-RDX content decreases, the output pressure decreases. The output pressure of the three detonators were simulated by Ansys/Ls-Dyna. The simulated output pressures are 7.7, 7.1, 6.4 GPa, respectively. Comparing to the simulation, the pressure difference is less than 6.5%, which validates the method effective. The shell material has significant influence to detonator output pressure. For higher shock impedance, the output pressure is lower. Especially, the peak pressure for steel shell case is undistinguishable.

Key words: detonator; interface particle velocity; output pressure; impedance matching technique

CLC number: TJ45

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019286

(责编:姜梅)