

文章编号:1006-9941(2021)04-0332-06

典型 CL-20 和 HMX 基压装炸药爆炸驱动特性对比

王树有¹,南宇翔²,蒋建伟¹,韩伟³,谭杰⁴,陈东萍⁴

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 中国北方工业有限公司, 北京 100053; 3. 中国人民解放军 32381 部队, 北京 100072; 4. 山西江阳化工有限公司, 山西 太原 030041)

摘要: 为了考察六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)基炸药较典型奥克托今(HMX)基炸药的爆炸驱动性能提升幅度,选取典型 CL-20 基压装混合炸药和 HMX 基压装混合炸药(JO-8)开展了爆速、爆压、标准圆筒对比实验测试,并设计了预制破片驱动装置和聚能装药结构,分别开展炸药径向、轴向驱动静爆/静破甲威力实验,实测了爆炸驱动破片的速度以及射流对钢靶静破甲深度。结果表明,CL-20 基炸药(密度为 $1.95 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)的爆速、爆压和格尼系数较 JO-8 炸药(密度为 $1.83 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)分别提高 4.8%、16.7% 和 3.5%。在相同结构下,CL-20 基炸药驱动预制破片速度、动能较 JO-8 炸药分别提高 5.1%~7.3%、10.5%~15.1%;在 5.5 倍装药直径(CD)炸药高条件下,装填 CL-20 基炸药的聚能装药较装填 JO-8 炸药的静破甲能力提高 3.2%~12.6%。

关键词: CL-20 基炸药;HMX 基炸药;爆轰特性;破片驱动;聚能破甲

中图分类号: TJ55; O38

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2020301

1 引言

炸药作为武器系统中最主要的能量来源,其能量的大小直接决定了战斗部的爆炸毁伤威力。从 19 世纪末的 TNT 基炸药,到二战时期发展的 RDX 基和 HMX 基炸药,每一次更高能量密度炸药的应用都影响着战斗部毁伤威力的跨越式发展,也引领着武器装备的更新换代。CL-20 自 1987 年合成以来^[1],已被广泛的研究和应用^[2-3],是目前世界上已应用含有最高能量密度的单质炸药,许多文献表明 CL-20 基混合炸药具有高爆速、高爆压等特点,其爆炸威力高于现已应用的炸药威力^[4-5]。国内自 20 世纪 90 年代 CL-20 单质炸药合成以来^[6],也先后研制了多个能量高、安全性良好的 CL-20 基混合炸药^[7-8]。目前,关于 CL-20 炸药爆炸

驱动特性开展了一些单项研究,如刘红梅等^[9]开展了 CL-20 炸药驱动金属飞片研究,得出了 CL-20 炸药对金属飞片的驱动速度高于 HMX 基 JO-9159 炸药;王利侠等^[10]开展了压装工艺对 CL-20 基炸药性能及聚能破甲威力的影响研究,研究表明热压成型药柱的各项性能均优于常温成型药柱。

由于在 CL-20 基炸药爆炸驱动能力方面仅开展了单项实验研究,未全面系统的开展对比研究,为此,本研究选取了典型的 CL-20 基和 HMX 基压装混合炸药,通过测试爆速、爆压及标准圆筒实验对比炸药基本爆轰性能;设计预制破片驱动装置进行静爆实验,利用脉冲 X 光摄影仪及通靶测速系统测试驱动破片的初速;设计了两种锥角铜药型罩的聚能装药结构,装填不同炸药进行相同炸高下的静破甲实验对比,获得了对钢靶的侵彻能力,以期较全面地对比两种炸药的轴/径向驱动能力,为 CL-20 基炸药应用提供参考。

2 样品与实验

2.1 样品

CL-20 基炸药主成分由六硝基六氮杂异伍兹烷(ϵ -CL-20,简称 HNIW)和塑性粘结剂组成,应用水悬浮法^[11]对 ϵ -CL-20 进行钝化包覆,甘肃银光化学工业

收稿日期: 2020-11-19; 修回日期: 2021-01-27

网络出版日期: 2021-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(118723)、爆炸科学与技术国家重点实验室自主课题(YBKT20-03)

作者简介: 王树有(1977-),男,副教授,主要从事高效毁伤与评估技术研究。e-mail: wangsy@bit.edu.cn

通信联系人: 蒋建伟(1962-),男,教授,博导,主要从事战斗部总体技术及应用研究。e-mail: bitjw@bit.edu.cn

引用本文: 王树有,南宇翔,蒋建伟,等. 典型 CL-20 和 HMX 基压装炸药爆炸驱动特性对比[J]. 含能材料, 2021, 29(4):332-337.

WANG Shu-you, NAN Yu-xiang, JIANG Jian-wei, et al. Comparative Experimental Study on Explosion Driving Performance of typical CL-20- and HMX-based Pressed Explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao), 2021, 29(4):332-337.

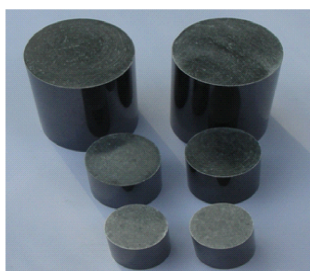
集团有限公司,CL-20 基炸药造型粉如图 1。



图 1 CL-20 基炸药造型粉
Fig.1 CL-20-based explosive powder

采用热压成型工艺压制了不同直径的柱形及异形药柱,其中药柱直径为 25 mm 的爆速、爆压实验,装药密度有两种,分别为 $1.93 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $1.95 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (98.1%TMD),用于圆筒实验的药柱直径为 20 mm、25 mm,密度为 $1.93 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,用于破片驱动实验的药柱直径为 36 mm、106 mm,密度为 $1.93 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,用于聚能破甲实验的药柱直径为 82 mm,密度为 $1.93 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,装药轴向、径向密度均匀性良好,药柱经过高低温变化后,无裂纹及不可逆增长、缩小。图 2 为压制的 CL-20 基炸药压装成型的药柱。

HMX 基 JO-8 炸药,甘肃银光化学工业集团有限公司,作为对比炸药,将其压制成与 CL-20 基炸药相同



a. cylindrical explosive columns



b. shaped charges

图 2 CL-20 基炸药压装成型的药柱
Fig.2 Pressed CL-20-based explosive charges

的药柱,装药密度为 $1.83 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

2.2 实验

2.2.1 爆速、爆压实验

炸药的爆速 D ,爆压 P_{C1} 等基本爆轰参数可表征炸药的基本爆轰驱动特性。选取两种密度的 CL-20 基炸药药柱及 HMX 基 JO-8 炸药药柱,按照 GJB772A-1997《炸药试验方法》标准,用电测法测量炸药爆速,锰铜压力传感器法测试炸药爆压。图 3 为爆速、爆压测试实验装置。



a. electric measurement device for detonation velocity



b. manganin piezoresistance device for detonation pressure

图 3 炸药爆速爆压测试装置

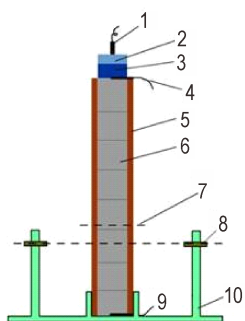
Fig.3 Testing devices for detonation velocity and detonation pressure

2.2.2 圆筒实验

格尼系数可用于表征炸药的爆轰驱动特性,为评价 CL-20 基炸药的爆轰性能,按照 GJB772A-1997《炸药试验方法》开展典型密度 CL-20 基炸药 ($\rho_0=1.93 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 和 JO-8 炸药 ($\rho_0=1.83 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 的圆筒对比实验,采用激光干涉测速仪和狭缝扫描高速摄影仪分别测量圆筒壁膨胀速度 v 、位移 ($r-r_0$) 的历程曲线,分析两种炸药的基本爆轰性能差异。图 4 为圆筒实验装置布局示意图,药柱直径为 25 mm,圆筒外径为 30 mm。

2.2.3 破片驱动实验

设计两种预制破片驱动装置如图 5 所示,分别装填 CL-20 基炸药和 JO-8 炸药,开展静爆实验^[12]对比两炸药驱动预制破片的速度。图 5a 所示 $\Phi 36 \text{ mm}$ 预制破片驱动装置,内装 $\Phi 4.9 \text{ mm}\times 4.9 \text{ mm}$ 钨柱,分别装填 CL-20 基炸药、JO-8 炸药,端部起爆,采用脉冲 X 光摄影仪测试破片初速。图 5b 所示的 $\Phi 106 \text{ mm}$ 预制破片驱动装置,内衬和壳体间装有 $\Phi 7 \text{ mm}$ 钨球,装填 CL-20 基炸药、JO-8 炸药,中心起爆,采用通靶测速系统距爆心 5 m 处的破片平均速度。



a. schematic diagram of cylinder test

1—detonator, 2—booster, 3—transition grain, 4,9—electric pin, 5—oxygen free copper, 6—main charge, 7—scanning position of camera, 8—VISAR pin, 10—pedestal



b. the physical map of cylinder test

图4 圆筒实验装置

Fig.4 Schematic diagram and physical map of cylinder test



a. $\Phi 36$ mm fragment device



b. $\Phi 106$ mm fragment device

图5 两种破片驱动装置

Fig.5 Two kinds of fragment devices

2.2.4 聚能破甲实验

聚能装药分为带隔板和不带隔板两种,带隔板的聚能装药长径比一般较大,隔板的加入可以改善爆轰波形,提高压垮速度和射流速度,从而提高破甲穿透深^[13]。为获得两种炸药较佳的聚能破甲威力,设计了带隔板单锥罩聚能装药(如图6所示),其中装药直径 $\Phi 82$ mm,药型罩为紫铜材料。考虑不同炸药对应的最佳锥角有所不同^[14-15],罩锥角取 49° 、 55° 两种,分别装填JO-8与CL-20基炸药。聚能装药静破甲实验实施方法如下:将圆柱形45#钢锭作为靶板放到水平地基上,在45#钢锭上放置5.5 CD木质炸高筒,将聚能装药放置炸高筒上,上端采用8#电雷管起爆。

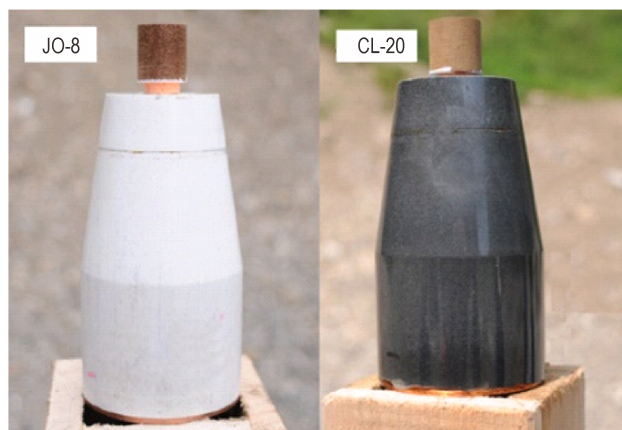


图6 聚能装药结构

Fig.6 Diagram of shaped charge

3 实验结果及分析

3.1 爆速、爆压实验结果及分析

表1给出了两种炸药的爆速、爆压测试结果。由表1结果可知,对于两种密度的CL-20基炸药,密度提高1.04%,爆速 D 相应提高1.11%,爆压 P_{CJ} 提高3.70%,CL-20基炸药爆速较JO-8最大提高4.8%,爆压最大提高16.7%。

3.2 圆筒实验结果及分析

图7为JO-8与CL-20基炸药圆筒实验圆筒壁膨胀

表1 JO-8和CL-20基炸药的爆速爆压

Table 1 Detonation velocity and detonation pressure for JO-8 and CL-20-based explosive

explosive	$\rho_0 / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$D / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	P_{CJ} / GPa
JO-8	1.83	8740	36.0
CL-20-based	1.93	9061	40.5
	1.95	9162	42.0

Note: ρ_0 is density, D is detonation velocity, P_{CJ} is detonation pressure

速度与时间 $v-t$ 、位移与时间 $(r-r_0)-t$ 对比曲线。由图 7a 曲线可知 CL-20 基炸药爆炸驱动圆筒壁膨胀速度为 $1890 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, JO-8 炸药爆炸驱动圆筒壁膨胀速度为 $1783 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 表明 CL-20 基炸药具有更高的驱动金属的能力。

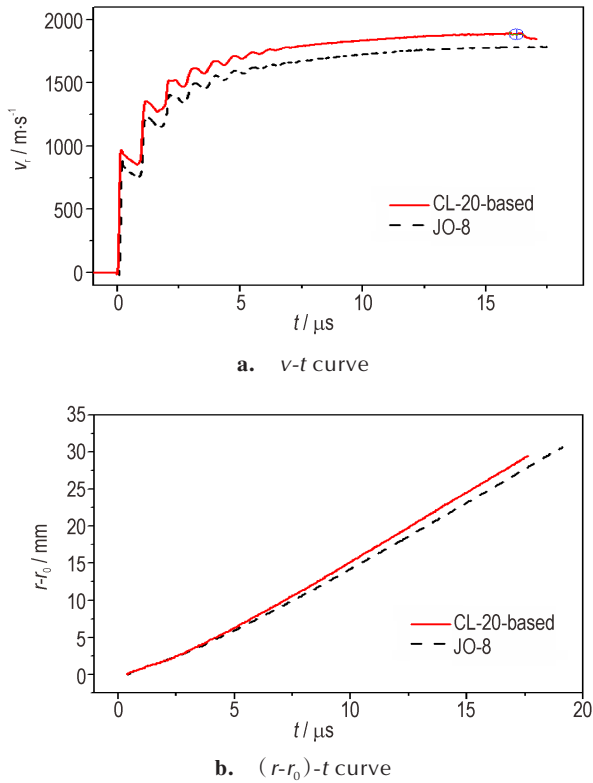


图 7 JO-8 和 CL-20 基炸药圆筒实验结果对比
Fig.7 Comparison of cylinder test results between JO-8 and CL-20-based explosive

根据格尼公式^[16]可以计算格尼系数 $\sqrt{2E}$:

$$\sqrt{2E} = v \sqrt{\frac{\beta}{1 + 0.5\beta}} \quad (1)$$

式中, v 为圆筒壁膨胀速度, β 为装填载荷系数, $\beta = C/M$, C 为炸药质量, M 为圆筒质量。

从图 7 获得圆筒壁的膨胀速度, 及试验对应炸药和圆筒质量, 带入公式 (1), 得到 JO-8 炸药的格尼系数为 $2903 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, CL-20 基炸药的格尼系数为 $3004 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, CL-20 基炸药的格尼系数较 JO-8 提高 3.5%。

3.3 破片实验结果及分析

图 8 为 $\Phi 36 \text{ mm}$ 预制破片驱动装置爆炸后脉冲 X 光拍摄典型时刻的照片。通过测量战斗部典型位置处的膨胀速度并取平均值。表 2 列出了两种破片驱动装置静爆实验后获得的破片平均速度测试结果。

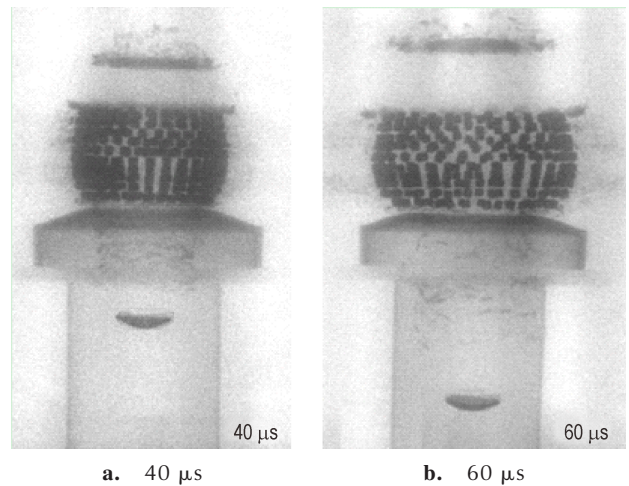


图 8 $\Phi 36 \text{ mm}$ 破片驱动装置典型时刻 X 光照片
Fig.8 X-ray images of $\Phi 36 \text{ mm}$ fragment device at the typical moments

表 2 破片驱动装置破片速度测试结果

Table 2 Testing results of velocity of the two fragment devices

explosive	X-ray test results of $\Phi 36 \text{ mm}$ fragment device		Zone-block measurement test of $\Phi 106 \text{ mm}$ fragment device	
	velocity / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	relative value added/%	velocity / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	relative value added/%
JO-8	807.0	5.1	1103	7.3
CL-20-based	847.9		1184	

由表 2 结果可知, CL-20 基炸药对破片驱动的速度较 JO-8 炸药高 5.1% ~ 7.3%, 在此基础上可以计算出破片在 CL-20 基炸药驱动下获得的动能, 较 JO-8 炸药提高 10.5%~15.1%。由式 (1) 格尼公式可知, 破片速度由格尼系数和装填载荷系数共同决定, 本研究设计的 36 mm、106 mm 两种不同直径的破片驱动装置, 其装填载荷系数不同, 致使二者破片速度和动能提高幅度有略有差异。

3.4 破甲实验结果及分析

图 9 为 55° 锥角罩聚能装药静破甲实验照片, 表 3 为 49° 和 55° 锥角罩聚能装药静破甲实验结果。表 3 表明, 5.5CD 炸高条件下, 55° 罩锥角聚能装药结构装填 CL-20 基炸药较装填 JO-8 炸药静破甲深度提高 3.2%; 49° 罩锥角聚能装药结构装填 CL-20 基炸药较装填 JO-8 炸药静破甲深度提高 12.6%。另外, 从两种炸药装药、两种不同锥角结构的静破甲结果来看, 装填 JO-8 炸药的聚能装药随着罩锥角的减小, 静破甲深度随之降低, 而装填 CL-20 基炸药的聚能装药随着罩锥角的减小, 静破甲深度反之提高, 可以得出高爆速炸药

对应的最佳罩锥角小于低爆速炸药对应的最佳罩锥角。



a. JO-8



b. CL-20-based explosive

图9 55°锥角罩聚能装药静破甲实验照片

Fig.9 Photo of penetration results of shaped charge with 55° cone liner

表3 静破甲实验结果

Table 3 Average penetration depth of shaped charge for JO-8 and CL-20-based explosive

explosive	average depth with cone angle 55°		average depth with cone angle 49°	
	depth (CD)	Relative value added/%	depth (CD)	relative value added/%
JO-8	9.54	3.2	9.12	12.6
CL-20-based	9.85		10.27	

4 结论

通过爆速爆压、圆筒、预制破片爆炸驱动及聚能静破甲实验研究了CL-20基压装混合炸药爆炸驱动特性,结果表明:

(1)CL-20基炸药较JO-8具有更高的爆速、爆压及格尼系数,CL-20基炸药(密度为 $1.95\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)的爆速、爆压及格尼系数较JO-8炸药(密度为 $1.83\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)分别提高4.8%、16.7%和3.5%。

(2)在 $\Phi 36\text{ mm}$ 驱动装置装填 $4.9\times 4.9\text{ mm}$ 钨柱结构下,CL-20基炸药对破片驱动的速度、动能较JO-8炸药分别提高5.1%、10.5%;在 $\Phi 106\text{ mm}$ 驱动装置装填7 mm钨球结构下,CL-20基炸药对破片驱动的速度、动能较JO-8炸药分别提高7.3%、15.1%。

度、动能较JO-8炸药分别提高7.3%、15.1%。

(3)5.5CD炸药条件下,55°罩锥角聚能装药结构装填CL-20基炸药较JO-8炸药静破甲深度提高3.2%;49°罩锥角聚能装药结构装填CL-20基炸药较JO-8炸药静破甲深度提高12.6%。高爆速炸药的最佳锥角比低爆速炸药的最佳锥角要小。

参考文献:

- [1] Nielsen A T, Chan M L, Kraeutle C K, et al. Polynitropolyazacaged explosives. Part7, NWC TP7200[R]. China Lake: Naval Weapons Center, 1989
- [2] Donald A, Geiss J. Additional characterization of high performance CL-20 formulation insensitive munitions and energetic materials technology symposium [C]. San Diego: NDIA, 1999: 129-140.
- [3] Samudre S S, Nair U R, Gore G M. Studies on an improved plastic bonded explosive (PBX) for shaped charges[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2009, 34: 145-150
- [4] Murphy M J, Baum D W, Simpson R L. Demonstration of enhanced warhead performance with more powerful explosives [C]//17th International symposium on Ballistics, Midrand, South Africa, 1998, 3:23-27.
- [5] Simpson R L, Urtiew P A, Moddy D L, etc. CL-20 performance exceeds that of HMX and its sensitivity is moderate[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 1997, 22:249-255.
- [6] 欧育湘,陈博仁,贾会平,等.六硝基六氮杂异伍兹烷的结构鉴定[J].含能材料,1995,3(3):1-8.
OU Yuxiang, CHEN Boren, JIA Huiping, et al. Structural identification of hexanitrohexaazaisowurtzitane [J]. *Chinese Journal of Energetic materials (Hanneng Cailiao)*, 1995, 3(3): 1-8.
- [7] 金韶华,于昭兴,欧育湘,等.六硝基六氮杂异伍兹烷包覆钝感的探索[J].含能材料,2004,12(3):147-150.
JIN Shao-hua, YU Zhao-xing, OU Yu-xiang, et al. Investigation of coating desensitization of hexanitrohexaazaisowurtzitane(HNIW)[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(3): 147-150.
- [8] 陈鲁英,赵省向,杨培进,等. CL-20炸药的包覆钝感研究[J].含能材料,2006,14(3):171-173.
CHEN Lu-ying, ZHAO Sheng-xiang, YANG Pei-jin, et al. The Coating and desensitization of CL-20[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(3): 171-173.
- [9] 刘红梅,陈朗,王晨. CL-20炸药两级驱动金属飞片研究[C]//第五届全国强动载效应及防护学术会议暨复杂介质/结构的动力学行为创新研究群体学术研讨会论文集.呼和浩特,内蒙古,2013:303-309.
LIU Hong-mei, CHEN Lang, WANG Chen. Investigation of Two-Stage CL-20 Explosive/Flyer System [C]//Proceedings of the 5th National Symposium on Strong Dynamic Load Effect and Protection and the Innovative Research Group Symposium on Dynamic Mechanical Behavior of Complex Medium/Structure. Hohhot, Inner Mongolia, 2013:303-309.
- [10] 王利侠,戴致鑫,周涛,等.压装工艺对CL-20基炸药性能及聚能破甲威力的影响[J].火炸药学报,2016,39(4):56-60.
WANG Li-xia, DAI Zhi-xin, ZHOU Tao, et al. Effect of pressing molding on the property and shaped charge penetration

- power of CL-20-based PBX[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2016, 39(4): 56-60.
- [11] 尚凤琴, 金韶华, 王霞, 等. CL-20 的降感包覆研究[J]. *四川兵工学报*, 2015, 36(1): 25-27.
- SHANG Feng-qin, JIN Shao-hua, WANG Xia, et al. Research of reduced sensitivity with coated CL-20[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2015, 36(1): 25-27.
- [12] 南宇翔. 高能炸药爆炸驱动金属能量输出规律研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- NAN Yuxiang. Law of Energy Release for Metal-driving by High-energetic Explosive [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [13] 胡哲成, 吴国东, 刘亚昆. 隔板对聚能装药形成射流性能的影响[J]. *兵器材料科学与工程*, 2018, 41(5): 21-25.
- HU Zhe-cheng, WU Guo-dong, LIU Ya-kun. Effect of wave-shaper on performance of jet formed by shaped charge [J]. *Ordnance Material Science And Engineering*, 2018, 41(5): 21-25.
- [14] 黄正祥. 聚能装药理论与实践[M]. 第一版, 北京: 北京理工大学出版社, 2014, 183-198.
- Huang Zhengxiang. Theory and Practice of Shaped Charge [M]. The first edition, Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014, 183-198.
- [15] Mayseless M, Hirsch E, Harvey W B. Is higher detonation velocity needed for shapedcharges [C]//26th International Symposium On Ballistics Miami, 2011, 12-16.
- [16] 王树山. 终点效应学[M]. 第二版, 北京: 科学出版社, 2019, 180-183.
- WANG Shu-shan. Terminal Effects [M]. The second edition, Beijing: Science Press, 2019, 180-183.

Comparative Experimental Study on Explosion Driving Performance of typical CL-20- and HMX-based Pressed Explosives

WANG Shu-you¹, NAN Yu-xiang², JIANG Jian-wei¹, HAN Wei³, TAN Jie⁴, CHEN Dong-ping⁴

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. China North Industries Corp, Beijing 100053, China; 3. 32381 of PLA, Beijing 100072, China; 4. Shanxi Jiangyang Chemical Co., Ltd., Taiyuan 030041, China)

Abstract: A pair of pressed combined CL-20-based and JO-8 (HMX-based) explosives are selected to investigate the improvements in the explosion driving performance by using more powerful explosive. This paper presents the test results of detonation velocity, detonation pressure and Gurney coefficient from devices loaded by CL-20-based explosive and JO-8, respectively. Enhanced warhead performance has been demonstrated in static experiments of prefabricated fragment warhead and shaped charge. The results show that the fragment velocity (kinetic energy) driven by CL-20-based explosive is 5.1%–7.3% (10.5%–15.1%) higher than that driven by JO-8. The penetration of shaped charge loaded by CL-20-based explosive is 3.2%–12.6% larger than that loaded by JO-8.

Key words: CL-20-based explosive; HMX-based explosive; detonation properties; fragment driving; shaped charge

CLC number: TJ55; O38

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2020301

(责编: 姜梅)