

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.05.004

CL-20 基薄膜炸药的爆轰特性研究^{*}

李文祥 邢晓玲 刁小强 赵省向
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 采用重结晶方法细化的 CL-20 炸药进行 CL-20 基薄膜炸药制备。研究了 CL-20 基薄膜炸药的爆轰性能、熄爆厚度和拐角效应,并与 HMX 基薄膜炸药进行对比。研究表明:在装药相对密度为 85% 时,CL-20 基和 HMX 基薄膜炸药的爆速分别为 8 393 m/s 和 8 069 m/s;CL-20 基和 HMX 基薄膜炸药的熄爆厚度分别为 0.23 mm 和 0.41 mm;相比 HMX 基薄膜炸药,CL-20 基薄膜炸药的熄爆厚度更小,传爆能力更强。

[关键词] CL-20;薄膜炸药;拐角效应;熄爆厚度

[分类号] TQ560.7;TJ51

Detonation Characteristics of CL-20 Based Thin Film Explosive

LI Wenxiang, XING Xiaoling, DIAO Xiaoqiang, ZHAO Shengxiang
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] The recrystallization refining CL-20 was used for the preparation of CL-20 based thin film explosive. Detonation properties, critical thickness of the explosive samples with different densities, and corner effect were researched and compared with those of HMX based thin film explosive. The results show that when the charge relative density is 85%, the detonation velocity of CL-20 based and HMX based thin film explosives are 8 393 m/s and 8 069 m/s, respectively. The quenching thickness of CL-20 based and HMX based thin film explosives are 0.23 mm and 0.41 mm, respectively. Compared with HMX based thin film explosive, CL-20 based thin film explosive has smaller critical thickness and stronger detonation transition capacity at the same charge relative density.

[KEYWORDS] CL-20; thin film explosive; corner effect; quenching thickness

引言

六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)是近年出现的一种笼型多硝胺化合物。CL-20 自成功被合成以来,就以高密度、高能量在世界范围内获得广泛关注,其性能和应用的探索研究一直都是材料学的热点之一^[1-5]。通过近 20 多年的研究,CL-20 的合成技术及在火炸药中的应用研究取得了快速的进展。人们认为,CL-20 的应用是未来 10 年至 15 年内大幅度提高传统武器性能的有效途径之一。然而,目前从多角度对 CL-20 的性能进行的探索和评价,主要集中在其自身性能方面,而对其应用原理与技术方面的研究仍不完善,CL-20 与 HMX 的某些基础性能及爆轰性能差异也有待于进一步研究。在应用上,虽然研制了许多 CL-20 基混合炸药配方,如 LX-

19、PAX-29、DLE-C038 等,这些炸药比相应的 HMX 基炸药性能可提高 5% ~ 15%^[6],但生产成本却提高了 5 ~ 10 倍,导致这些炸药配方短期内难以大规模应用。因此,探索 CL-20 新应用途径显得尤为必要。

本文中,主要对 CL-20 炸药在小型化、智能化发展的爆炸网络用装药的应用方面开展了初步研究,主要涉及 CL-20 基薄膜炸药和 HMX 基薄膜炸药在一维尺度上的爆轰性能。

1 薄膜炸药的制备及性能研究方法

1.1 CL-20 的细化处理

CL-20 晶体的细化处理采用溶剂-非溶剂重结晶法,溶剂为乙酸乙酯,非溶剂为石油醚^[7-8]。具体工艺过程如下:在 50 ℃ 条件下,将 CL-20 溶于一定

^{*} 收稿日期:2019-10-24

第一作者:李文祥(1984 -),男,硕士,主要研究方向为混合炸药配方及工艺设计。E-mail:251853018@qq.com

量的乙酸乙酯中,通过控制滴加速度将溶解CL-20的乙酸乙酯溶液加入高速搅拌的 50 ℃石油醚溶剂中,滴加完成后,搅拌一段时间以保证 CL-20 转晶完全,得到含 CL-20 晶体的乙酸乙酯-石油醚乳状混合液。最后对混合液进行过滤、干燥,得到细化的 CL-20 炸药。CL-20 处理前后粒度分布如表 1 所示。从表 1 可以看出,经过处理的 CL-20 的 $D_{0.5}$ 从初始的 61.7 μm 降低到 23.3 μm ,粒度范围变窄。本文中涉及的试验样品 CL-20 均采用细化后的 CL-20; HMX 为 120 目成品,其 $D_{0.5}$ 为 25.3 μm 。

表 1 CL-20 处理前后粒度分布

Tab. 1 Particle size distribution of CL-20 before
and after treatment

样品状态	$D_{0.1}$	$D_{0.5}$	$D_{0.9}$
处理前	36.3	61.7	84.8
处理后	11.9	23.3	32.5

1.2 薄膜炸药的制备及装药

采用水悬浮工艺对细化的 CL-20 进行钝感包覆,黏结剂选用含能热塑性聚氨酯弹性体(ETPE),炸药和黏结剂的质量比为 96:4,溶剂为二氯乙烷。薄膜炸药的装药采用分次涂覆的工艺,先在钝感包覆的炸药中按比例加入一定量的溶剂浸润,搅拌后得到黏稠的炸药物料;再采用专用工装,将炸药分次涂覆到爆炸网络板中,在 40~50℃下烘干即可。

对比试验中,HMX 也采用相同的制备工艺制备。该工艺过程中通过调节溶剂的加入量实现物料黏度和装药密度的控制。本文中涉及的炸药配方组成如表 2 所示。

表2 样品配方组成及质量分数

Tab.2 Composition and mass fraction
of sample formula

	%		
配方	$w(\text{CL-20})$	$w(\text{HMX})$	$w(\text{ETPE})$
A	96.0	0	4.0
B	0	96.0	4.0

1.3 薄膜炸药的爆燃尺寸

采用楔形装药^[9]进行炸药的熄爆直径的测量。试验中设计了两种不同尺寸的楔形槽传爆板,铝板尺寸为 200 mm × 80 mm;楔形凹槽设计尺寸为长 180 mm,宽 5 mm,深度在 0.5 ~ 2.0 mm 之间,楔形槽的倾角为 0.470°;另一种楔形凹槽设计为长 180 mm,宽 5 mm,深度在 0.2 ~ 1.0 mm 之间,楔形槽的

倾角为 0.235° 。炸药由雷管从深度较大的一端起爆,然后由炸痕判定爆轰熄爆位置,根据炸药爆轰距离与楔形槽倾角计算出炸药熄爆时对应的药柱厚度,用于比较爆轰传播能力的大小,如图1所示。

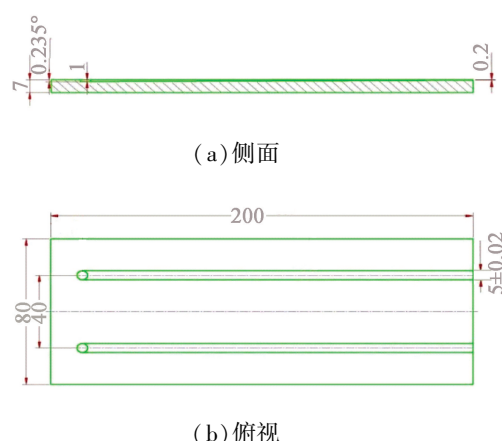


图 1 楔形槽传爆板视图(单位:mm)

Fig. 1 View of booster plate with wedge groove (unit:mm)

1.4 薄膜炸药爆速的测试

爆速测试采用 GJB 772A—1997《炸药试验方法》方法 702.1 爆速 电测法。该方法利用炸药爆轰波波阵面电离导电特性,用测时仪和电探针测定爆轰波在一定长度炸药柱中传播的时间,通过计算求出试样的爆速。

主要装置:电探针、测时仪、脉冲形成网络和传输电缆。

1.5 薄膜炸药的拐角效应测试

根据熄爆尺寸研究结果,以铝板为基体设计不同厚度、不同角度的传爆板。由8#雷管起爆。如图2所示。

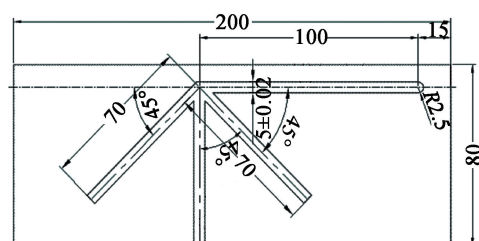


图2 薄膜炸药拐角爆轰测试板设计图(单位:mm)

Fig. 2 Design of corner detonation test panel for thin film explosive (unit:mm)

2 结果与讨论

2.1 细化 CL-20 基薄膜炸药的 XRD 谱图

由图3可知,细化CL-20的XRD峰与原CL-20相比,峰形无明显变化,但明显可见粒度变小,峰强

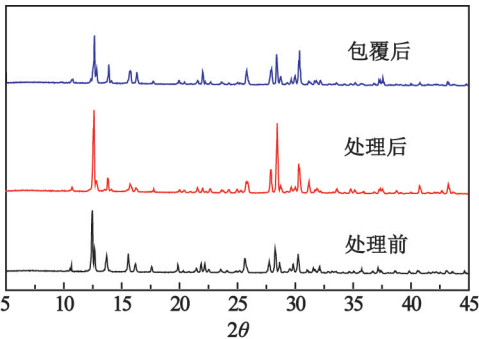


图 3 ε 型 CL-20 细化前后及制成薄膜炸药后的 XRD 谱图

Fig.3 XRD spectra of ε-CL-20 before and after refining and ε-CL-20 thin film explosive

度变小。细化 CL-20 做成薄膜炸药后,峰形依然没有明显变化,说明 CL-20 的晶型未发生改变,保持 ε 型。

2.2 薄膜炸药密度与爆速的关系

用探针法测定了 CL-20 基和 HMX 基薄膜炸药不同密度条件下的爆速,见表 3。表 3 中,相对密度大于 90% 样品的爆速均为采用模压压制成 Ø20 mm 药柱后测试获得。

表 3 不同密度下 CL-20 基和 HMX 基薄膜炸药的爆速

Tab.3 Detonation velocity of CL-20 based and HMX based thin film explosive at different densities

配方	密度/ (g · cm ⁻³)	相对密度/ %	爆速/ (m · s ⁻¹)
A	1.391	70.1	7 325
	1.512	76.2	7 740
	1.573	79.3	7 975
	1.631	82.2	8 164
	1.698	85.7	8 393
	1.881 *	95.2 *	8 876 *
B	1.353	72.9	7 071
	1.451	78.4	7 540
	1.533	82.5	7 855
	1.587	85.4	8 069
	1.781 *	95.9 *	8 541 *

注: * 表示样品经过模压制备。

由表 3 可以看出,对于配方 A,相对密度从 70.1% 增加到 95.2% 时,爆速从 7 325 m/s 增加到 8 876 m/s;对于配方 B,相对密度从 72.9% 增加到 95.9% 时,爆速从 7 071 m/s 增加到 8 541 m/s。当配方 A 和配方 B 装药的相对密度接近时,CL-20 基薄膜炸药的爆速明显高于 HMX 基薄膜炸药。对于采用分层涂覆制备的薄膜炸药,装药相对密度可以达到 85% 以上,相应的 CL-20 基和 HMX 基薄膜炸

药的爆速分别可达 8 393 m/s 和 8 069 m/s。
将表 3 中数据进行线性关系拟合,得到式(1)和式(2)。

$$d_{CL-20} = 2\,602 + 67.6x; \tag{1}$$

$$d_{HMX} = 2\,099 + 69.6x. \tag{2}$$

式中: d 为爆速, m/s; x 为相对密度。

2.3 薄膜炸药的熄爆尺寸

采用分层涂覆的方法,分别将配方 A 和配方 B 炸药装入到图 1 所示的楔形槽传爆板中,通过调节溶剂的量来控制薄膜炸药密度,然后对不同样品进行起爆,测量炸药在楔形槽传爆板上的传爆距离,判断不同炸药的爆轰熄爆尺寸,试验结果列于表 4 和表 5。

表 4 楔形凹槽深度 0.5 ~ 2.0 mm 的传爆板试验结果

Tab.4 Booster plate test with wedge groove depth of 0.5-2.0 mm

配方	装药密度/ (g · cm ⁻³)	相对密度/%	试验结果
A	1.349	67.9	全部传爆
	1.468	74.0	全部传爆
	1.629	82.1	全部传爆
	1.702	85.8	全部传爆
B	1.326	71.4	全部传爆
	1.412	76.1	全部传爆
	1.478	79.8	全部传爆
	1.572	84.7	全部传爆

从表 4 可以看出,所制备的薄膜炸药样品相对密度在 67% ~ 86% 之间,装药厚度在 0.5 ~ 2.0 mm 时,两种配方的炸药可以被雷管直接起爆,并全部爆轰完全,无熄爆。试验结果表明,配方 A 和配方 B 的炸药爆轰熄爆尺寸应小于 0.5 mm。

为了进一步研究配方 A 和配方 B 炸药的爆轰熄爆尺寸,又开展了楔形凹槽深度 0.2 ~ 1.0 mm 的网络板试验,试验结果如表 5 所示。从表 5 中可以看出,在装药相对密度(85 ± 1)% 时,配方 A 的平均传爆距离为 17.4 cm,熄爆厚度为 0.23 mm;而配方 B 炸药的传爆距离为 13.2 cm,熄爆厚度为 0.41 mm。说明 CL-20 基薄膜炸药与 HMX 基薄膜炸药相比,具有更小的熄爆厚度。考虑到炸药从稳定爆轰到熄爆,炸药爆速有衰减过程,实际中炸药的爆轰熄爆尺寸应该大于试验中得到的熄爆厚度。

2.4 薄膜炸药的拐角爆轰研究

在具有会导致传播方向改变的拐角边界的炸药装药中,爆轰波的传播伴随拐角效应。在临近拐角

表 5 楔形凹槽深度 0.2~1.0 mm 的网络板试验
Tab.5 Network plate test with wedge groove depth of 0.2-1.0 mm

配方	装药密度/(g·cm ⁻³)	相对密度/%	试验结果		
			传爆距离/cm	平均距离/cm	熄爆厚度/mm
A	1.685	85.0	17.4	17.4	0.23
	1.693	85.3	17.0		
	1.677	84.6	17.5		
	1.674	84.4	17.7		
B	1.587	85.6	13.5	13.2	0.41
	1.572	84.8	12.7		
	1.558	84.1	14.0		
	1.567	84.5	12.5		

边界的区域中,炸药有可能出现部分反应或完全不反应。拐角效应最容易出现在爆轰能力不强的低感度炸药装药中。由于本文中的炸药厚度较小,此项研究也被特别关注。采用分层涂覆的方法对图 2 所示爆炸网络板进行装药,装药至高出平面位置,用铜刀处理,使装药与铝板平面平整。选用装药相对密度为(85±1)%的样品进行爆轰传递能力测试,测试过程中对起爆直段以及 45°方向直段的样品爆速进行测量,判断爆轰传递过程中爆速是否发生变化。具体试验结果见表 6。

表 6 不同配方拐角效应试验

Tab.6 Corner effect test of different formulations

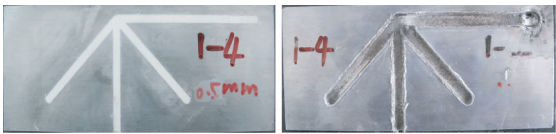
配方	厚度/mm	角度/(°)			爆速/(m·s ⁻¹)	
		45	90	135	拐角前	拐角后
A	1.0	√	√	√	8 273	8 364
	0.7	√	√	√	8 340	8 255
	0.5	√	√	√	8 227	8 306
B	1.0	√	√	√	7 980	7 954
	0.7	√	√	√	7 923	7 843
	0.5	×	×	×	6 321	

注:√表示爆轰;×表示未爆轰或爆轰不完全。

由表 6 可知,对于配方 A 样品,在装药相对密度为(85±1)%时,在 3 个不同装药厚度以及 3 个不同拐角尺度上均实现了爆轰传递,样品爆轰时在拐角前后爆速未发生明显的变化,可以认为样品在该装药尺度下可稳定爆轰。对于配方 B 样品,在装药厚度为 1.0、0.7 mm 时,3 个拐角尺度上均实现了爆轰;在装药厚度为 0.5 mm、炸药被雷管直接起爆时,爆速显著低于正常爆速,属于不稳定爆轰;3 个拐角角度上均未发生爆轰波的传递。

图 4 是配方 A 在装药厚度 0.5 mm 试验前、后的对比。从图 4 中可以看出,配方 A 被雷管起爆后,爆炸网络板上直段和每个拐角方向上爆痕宽度和深度一致,说明炸药爆轰传爆稳定,炸药的熄爆厚度应小于 0.5 mm。而图 5 中的配方 B,当装药厚度

为 0.7 mm 时,炸药爆痕清晰且明显,说明炸药爆轰完全;当装药厚度降为 0.5 mm 时,起爆段有轻微的爆痕存在,说明爆轰过程不稳定,而拐角 135°时,凹槽没有变形,只有烧蚀的痕迹,没有发生爆轰反应;说明配方 B 爆轰熄爆尺寸处于 0.5~0.7 mm 之间。试验过程中还发现,在装药相对密度相同时,CL-20 基薄膜炸药的爆痕比 HMX 基炸药的爆痕更宽、更深,烧蚀更严重,说明 CL-20 基薄膜炸药比 HMX 基薄膜炸药表现出更优异的爆轰性能。



(a) 试验前 (b) 试验后
图 4 配方 A 在装药厚度 0.5 mm 条件下的爆轰
Fig.4 Detonation of Formula A
at 0.5 mm charge thickness



(a)0.7 mm 厚装药 (b)0.5 mm 厚装药
图 5 配方 B 样品起爆后
Fig.5 The result of formula B after detonation

3 结论

1)采用分层涂覆的方法,薄膜炸药装药密度可以达到 85%,相应的 CL-20 基和 HMX 基薄膜炸药的爆速分别可达 8 393 m/s 和 8 069 m/s,熄爆厚度分别为 0.23 mm 和 0.41 mm。

2)相比 HMX 基薄膜炸药,CL-20 基薄膜炸药的爆轰熄爆尺寸更小,传爆能力更强。

参 考 文 献

- [1] 刘锋,颜事龙,吴红波. 冲击作用下乳化炸药基质微观结构的变化[J]. 火工品,2008(1):25-28.
LIU F, YAN S L, WU H B. Microstructure change of emulsion matrix under shock pressure [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(1):25-28.
- [2] 王尹军,李进军,方宏. 乳化炸药密度对其压力减敏的影响[J]. 爆炸与冲击,2009,29(5):529-534.
WANG Y J, LI J J, FANG H. Influences of emulsion explosive density on its pressure desensitization [J]. Explosion and Shock Waves,2009,29(5):529-534.
- [3] 吴红波,颜事龙,郭子如,等. 动压作用下乳化炸药减敏因素的实验探讨[J]. 火工品,2008(2):16-19.
WU H B, YAN S L, GUO Z R, et al. Experimental discussion on desensitization factors of emulsion explosives under dynamic pressure [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(2):16-19.
- [4] 王尹军,汪旭光,李进军. 冲击波作用后乳化炸药贮存性能及其影响因素实验研究[J]. 含能材料,2009,17(2):214-217,232.
WANG Y J, WANG X G, LI J J. Experimental study on the storage properties and its influence factors of the emulsion explosive after pressed by shockwave [J]. Chi-

nese Journal of Energetic Materials, 2009,17(2):214-217,232.

- [5] 张福场,郭子如. 乳化炸药减敏机理的研究现状[J]. 煤矿爆破,2008(3):19-22.
ZHANG F Y, GUO Z R. Current research situation on the desensitization mechanism of emulsion explosive [J]. Coal Mine Blasting,2008(3):19-22.
- [6] 王尹军,汪旭光. 乳胶基质抗冲击波性能研究[J]. 兵工学报,2005,26(5):697-701.
WANG Y J, WANG X G. A study on the anti-shockwave performance of emulsion matrix [J]. Acta Armamentarii, 2005,26(5):697-701.
- [7] 王尹军,汪旭光,颜事龙. 乳化剂含量与乳化炸药压力减敏关系[J]. 化工学报,2005,56(9):1809-1815.
WANG Y J, WANG X G, YAN S L. Relationship of emulsifier content to desensitization of emulsion explosives [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2005,56(9):1809-1815.
- [8] 程扬帆,颜事龙,汪泉,等. 乳化炸药动压减敏装置的优化设计和试验研究[J]. 爆破器材,2015,44(5):27-30.
CHENG Y F, YAN S L, WANG Q, et al. Optimal design and experimental research of dynamic pressure desensitization device of emulsion explosives [J]. Explosive Materials,2015,44(5):27-30.

(上接第 23 页)

参 考 文 献

- [1] QIAN H, YE Z W, LÜ C X. An efficient and facile synthesis of hexanitrohexaazaisowurtzitane (HNIW) [J]. Letters in Organic Chemistry, 2007, 4(7): 482-485.
- [2] BAYAT Y, MOKHTARI J, FARHADIAN N, et al. Heteropolyacids; an efficient catalyst for synthesis of CL-20 [J]. Journal of Energetic Materials, 2012, 30(2): 124-134.
- [3] VASILEVA A A, DASHKO D V, DUSHENOK S A, et al. Preparing and some properties of spheroid ε -HNIW [R]//Czech Republic: New Trends in Research of Energetic Materials. 2013: 954-966.
- [4] WILLER R L. The early history of CL-20 (HNIW) [R]//Czech Republic: New Trends in Research of Energetic Materials. 2013: 384-397.
- [5] YADOLLAH B, MOHAMMAD A Z, ARDESHZR K, et al. Synthesis of 2,4,6,8,10,12-hexanitro-2,4,6,8,10,12-hexaazaisowurtzitane using melaminium-tris-(hydrogensulfate) by a simple one-pot nitration procedure

[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2013, 38: 745-747.

- [6] 王昕,彭翠枝. 国外六硝基六氮杂异伍兹烷的发展现状[J]. 火炸药学报,2007,30(5):45-48.
WANG X, PENG C Z. Development of hexanitrohexaazaisowurtzitane at abroad [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2007,30(5):45-48.
- [7] 杨利,王绍宗,赵鹏娟,等. 超细 CL-20 晶形控制技术研究[J]. 含能材料,2008,16(3):254-257.
YANG L, WANG S Z, ZHAO P J. et al. Morphology controlling technique for submicron CL-20 [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008,16(3):254-257.
- [8] JOANNA S, SANDRA C, PAWEL M, et al. Friction sensitivity of the ε -CL-20 crystals obtained in precipitation process [J]. Central European Journal of Energetic Materials,2011,8(2):117-130.
- [9] 杨宗伟,刘玉存,于国强. 基于神经网络的 HMX 爆轰临界厚度预测研究[J]. 火工品,2009(3):33-36.
YANG Z W, LIU Y C, YU G Q. Study on the evaluation of critical thickness of HMX based on neural net work [J]. Initiators & Pyrotechnics,2009(3):33-36.