

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.05.002

CL-20 基压装型温压炸药的设计及性能研究*

张磊^① 吴成成^② 王正宏^③ 李世伟^③ 王硕^③ 郭学永^②

①西安现代控制技术研究所(陕西西安,710065)

②北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室(北京,100081)

③辽宁庆阳特种化工有限公司(辽宁辽阳,111000)

[摘要] 为了提高六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)基温压炸药的能量水平和安全性能,通过分析温压炸药爆炸反应历程,开展了CL-20基压装型温压炸药的设计及性能研究。结果表明:CL-20基压装型温压炸药装药密度 2.015 g/cm^3 、爆热 $8\ 361\text{ kJ/kg}$ 、爆速 $7\ 815\text{ m/s}$, 30 kg 炸药爆炸时在远场 12 m 处的冲击波超压可对人员达到中度以上的毁伤;且其撞击感度 8% ,摩擦感度 24% ;在慢速烤燃、快速烤燃、 12.7 mm 子弹撞击试验中,炸药响应等级均为燃烧反应,爆轰性能和安全性能优异。

[关键词] CL-20;温压炸药;爆轰性能;安全性能

[分类号] TJ55

Design and Performance Research on CL-20 Based Pressed Thermobaric Explosive

ZHANG Lei^①, WU Chengcheng^②, WANG Zhenghong^③, LI Shiwei^③, WANG Shuo^③, GUO Xueyong^②

①Xi'an Modern Control Technology Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

②State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology (Beijing, 100081)

③Liaoning Qingyang Special Chemical Co., Ltd. (Liaoning Liaoyang, 111000)

[ABSTRACT] In order to improve the energy density and safety performance of hexanitrohexaazaisowurtzitan (CL-20) based thermobaric explosive, design and performance research of CL-20 based pressed thermobaric explosive were carried out by analyzing the detonation reaction course. Results show that charge density of CL-20 based pressed thermobaric explosive is 2.015 g/cm^3 , measured detonation heat is $8\ 361\text{ kJ/kg}$, detonation velocity is $7\ 815\text{ m/s}$, and the shock wave overpressure at 12 m in the far field could damage personnel more than moderately. Additionally, its impact sensitivity is 8% , and friction sensitivity is 24% . The response level in fast cook-off test, slow cook-off test and 12.7 mm bullet impact test are all combustion. So the detonation performance and safety performance are excellent.

[KEYWORDS] CL-20; thermobaric explosive; detonation performance; safety performance

引言

温压炸药通常是以高能炸药、氧化剂、可燃剂为主体,并配以黏结剂和添加剂组成的一种非理想炸药^[1]。为了实现温压炸药的高能量密度化、能量输出可控化,提高对爆炸环境中氧的利用率,国内外学者主要从降低燃料的点火阈值、提高燃料的反应完全性、改善燃料粒子与环境中氧的混合度、提高燃料燃烧反应速率等方面进行综合设计,多维度地研究

了温压炸药爆炸能量输出结构的时空演化规律,但多集中在以黑索今(RDX)、奥克托今(HMX)等二代含能材料为基的温压炸药^[2-4]。随着高能量密度材料、高活性功能材料、复合装药形式等的发展,如何将其有机融合在温压炸药体系中逐渐成为当前高能炸药发展的热点和趋势。

六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)由Nielsen等于1987年首次合成^[5],是一种具有笼型结构的多晶型高能量密度化合物(HEDC)^[6]。在常温、常压下,CL-20存在4种晶型(α 、 β 、 γ 、 ϵ),其中, ϵ -CL-20的密

* 收稿日期:2022-07-14

基金项目:国家自然科学基金(11772058)

第一作者:张磊(1978-),男,高工,主要从事爆炸力学的研究。E-mail:10342039@qq.com

通信作者:郭学永(1975-),男,教授,博导,主要从事混合炸药配方设计及其应用技术研究。E-mail:nust@bit.edu.cn

度最大、热稳定性最好、感度最低^[7-8]。 ϵ -CL-20 是当今综合性能最好的第三代单质炸药之一,能量输出比 HMX 高约 14%^[9];但是, ϵ -CL-20 较高的机械感度、容易发生晶型转变等问题严重阻碍了它在高能炸药中的应用^[10-11]。随着 CL-20 工程化制造的实现,美国已成功研制了 CL-20 基高能炸药:LX-19、PAX-12、PAX-11、PAX-29、DLE-C038 和 PBXW-16 等^[12-17],而且正不断地探索性能更优的配方。但目前未见报道 CL-20 基温压炸药配方。

本文中,针对地面目标毁伤特性,通过分析温压炸药爆炸反应历程,制定了 CL-20 基压装型温压炸药设计途径,通过多种试验手段和方法对其爆轰性能和安全性能进行了综合测量与分析评价,以突破高密度材料 CL-20 在温压炸药中的应用难点。

1 试验部分

1.1 试剂与仪器

CL-20,工业级,辽宁庆阳特种化工有限公司;特细球形微米铝粉,FLQT2 [D_{50} 为 $(24 \pm 3) \mu\text{m}$]、FLQT4 [D_{50} 为 $(6.0 \pm 1.5) \mu\text{m}$]、FLQT5 (D_{50} 为 $1 \sim 4 \mu\text{m}$),工业级,鞍钢实业微细铝粉有限公司;高氯酸铵 (AP),粒度范围 $100 \sim 150 \mu\text{m}$,大连北方氯酸钾有限公司;F2603 型氟橡胶,工业级,中蓝晨光化工研究设计院有限公司;顺式 1,4-聚丁二烯橡胶 (BR),工业级,锦州石化股份有限公司;三元乙丙橡胶 (EPDM),工业级,中国石油天然气股份有限公司吉林石化分公司;80 号微晶蜡,工业级,抚顺顺达蜡业有限公司;石墨,微米级,上海一帆石墨有限公司;乙酸乙酯、石油醚,分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

Hitachi S-4700 型扫描电子显微镜,日本日立公司;ZBL-B 型撞击感度仪、BM-B 型摩擦感度仪,西安近代化学研究所。

1.2 试验过程

1)三元乙丙基复合钝感黏结剂溶液制备。将一定质量比的溶剂、黏结剂和钝感剂投入溶解釜,并开动搅拌。溶解釜的夹套中通入热水,夹套温度 $55 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 为宜,待全部溶解并混合均匀,即为配制好的复合钝感黏结剂溶液。

2)捏合。将配制好的钝感黏结剂按一定比例加入到捏合机中,再加入 CL-20 捏合 10 min 后,加入铝粉、AP 捏合 60 min。在一定的搅拌转速下,用真空浓缩系统抽出多余的溶剂,扭矩达到一定数值后停止真空浓缩操作,将捏合物料送至造条机加料

槽内。

3)造条。真空驱溶的混合物料转入造条机中,经桨叶与孔板挤压后,物料通过造粒筛板得到药条,而后进行预烘干。

4)断粒。预烘干后的药条经振动筛振动断粒,得到一定长度的造型粉。

5)光泽。断粒后的造型粉进入光泽机中,加入一定量的石墨进行滚光。

6)烘干。将光泽后的造型粉经烘干工序烘除药粒中少量溶剂,干燥温度为 $40 \sim 45 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.3 测试方法和条件

1.3.1 装药密度

装药密度按 GJB 772A—1997 方法 401.2 药柱(块)密度-液体静力称量法测试。根据已知质量的试样所排开专用浸液的体积,求出试样的密度。

1.3.2 爆轰性能

爆热测试按《军用混合炸药配方评审适用试验方法汇编》301.2 非理想炸药爆热测试方法进行。药柱直径 40 mm,药柱质量 $(100.0 \pm 0.1) \text{ g}$ 。

爆速测试按 GJB 772A—1997 方法 702.1 爆速-电测法进行,药柱尺寸 $\varnothing 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。

1.3.3 安全性能

撞击感度测试按 GJB 772A—1997 方法 601.1 撞击感度-爆炸概率法进行。样品质量 $(50 \pm 1) \text{ mg}$,落锤质量 10 kg,落高 25 cm。

摩擦感度测试按照 GJB 772A—1997 方法 602.1 摩擦感度-爆炸概率法进行。样品质量 $(20 \pm 1) \text{ mg}$,表压 3.92 MPa,摆角 90° 。

低易损性试验:慢速烤燃试验按照《军用混合炸药配方评审适用试验方法汇编》方法 701.1 炸药慢速烤燃试验进行;快速烤燃试验按《军用混合炸药配方评审适用试验方法汇编》方法 702.1 炸药快速烤燃试验进行;12.7 mm 子弹撞击试验按《军用混合炸药配方评审适用试验方法汇编》方法 704.1 炸药 12.7 mm 子弹撞击试验进行。3 项试验中,壳体腔尺寸 $\varnothing 60 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$,药柱尺寸 $\varnothing 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$,壳体厚度 3 mm。

2 结果与讨论

2.1 CL-20 基压装型温压炸药的配方设计

温压炸药爆炸反应过程涉及 3 个阶段:最初的无氧爆炸反应、爆炸后的无氧燃烧反应和爆炸后的有氧燃烧反应,如图 1 所示。

根据二次反应理论^[18],铝粉在最初的无氧爆炸

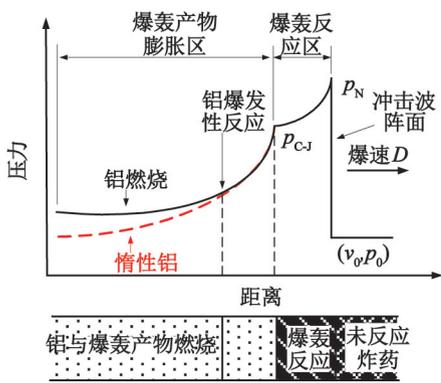


图1 温压炸药爆炸反应过程

Fig. 1 Explosion reaction process of thermobaric explosive

反应时没有参加 C-J 面的反应或在 C-J 面还未反应完全。在爆炸后的无氧燃烧反应阶段,铝粉与爆轰产物、氧化剂的分解产物反应,因而铝氧比 R 是温压炸药能量设计的一个重要参数,计算公式为:

$$R = \frac{n(\text{Al})}{n(\text{O})} \quad (1)$$

式中: R 为铝氧物质的量的比(铝氧比); $n(\text{Al})$ 为 1 kg 混合炸药中铝元素的物质的量; $n(\text{O})$ 为 1 kg 混合炸药中氧元素的物质的量。

一般设计 Al_2O_3 的化学当量比为 0.67 左右。为了确定 CL-20 基压装型温压炸药的组成结构,通过 EXPLO5 计算了不同炸药配方的能量参数,计算结果如表 1 所示。

一般而言,铝粉颗粒粒径越小,颗粒比表面积越大,反应活性越高,具体表现为超压的上升速率越快。在配方铝粉粒度选择上,采用特细球形铝粉 FLQT5、FLQT4、FLQT2 三级级配,以添加 FLQT2、FLQT4 增强后燃效应为主,添加 FLQT5 提高反应活性为辅^[3]。故具体的粒度级配方案为 $m(\text{FLQT5}) : m(\text{FLQT4}) : m(\text{FLQT2}) = 1 : 2 : 2$ 。

在保证有一定破片驱动特性(爆速 $\geq 7\,800$ m/s)的前提下,综合考虑爆热这一关键指标,确定 CL-20 基压装型温压炸药的配方组成(质量分数)

表1 CL-20基压装型温压炸药配方及能量参数

Tab. 1 Formulation and energy parameters of CL-20 based pressed thermobaric explosive

$w(\text{CL-20})/\%$	$w(\text{Al})/\%$	$w(\text{AP})/\%$	$w(\text{黏结剂})/\%$	理论密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	理论爆速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	理论爆热/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
54	32	8	6	2.091	8 124	9 635
52	32	10	6	2.088	8 058	9 656
50	32	12	6	2.087	7 988	9 682
48	32	14	6	2.085	7 920	9 606
46	32	16	6	2.083	7 852	9 675
42	32	20	6	2.079	7 716	9 636

为:52% CL-20、32% 铝粉、10% AP、6% 黏结剂。

2.2 AP的钝感包覆处理

为了克服应用于混合炸药中的氧化剂 AP 存在吸湿这一缺点,需要对 AP 进行包覆处理,同时降低 AP 的机械感度。蜡类物质具有熔点低、比热容高、导热率低、硬度小兼具润滑作用等特点。选用微晶蜡作为钝感剂,通过机械混合-蒸发溶剂法包覆处理 AP。包覆后的 AP 扫描电镜照片如图 2 所示。机械感度和吸湿性测试结果如表 2 所示。

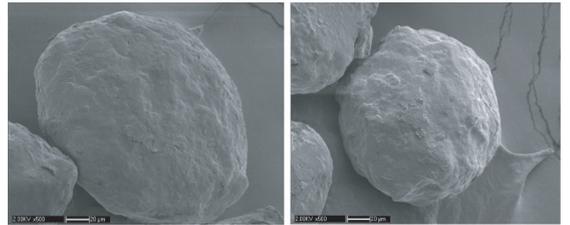


图2 包覆后 AP 的扫描电镜图

Fig. 2 SEM of AP after coating

试验结果表明:AP 表面被一层钝感剂微晶蜡均匀地覆盖;包覆后,AP 的机械感度和吸湿性得到明显降低。

2.3 CL-20基压装型温压炸药的爆轰性能

按照 GJB 772—1997《炸药试验方法》和《军用混合炸药配方评审适用试验方法汇编》中的测试方法,对 CL-20 基压装型温压炸药的装药密度、爆热、爆速进行了测试,结果如表 3 所示。

加入一定量的氧化剂 AP 可以改善炸药体系的氧平衡,使铝粉充分反应。CL-20 基压装型温压炸药能量密度不小于 2.5 倍 TNT 当量,具有较高的能量水平。

为了衡量 CL-20 基压装型温压炸药的综合毁伤威力,测试了静态条件下 30 kg 炸药爆炸时距爆心不同距离处(4、8、12 m)的冲击波超压,以研究其在空爆状态下的超压场规律,如表 4 所示。

由于空爆温压炸药的主要作战任务是对地面有

表 2 包覆前、后 AP 的机械感度和吸湿性测试结果

Tab. 2 Test results of mechanical sensitivity and hygroscopicity of AP before and after coating

AP 样品	特性落高 H_{50} (5 kg 落锤)/ cm	摩擦感度 (90°, 3.92 MPa)/ %	吸湿性/ %
未包覆	47.3	36	0.4
包覆后	56.0	0	0

表 3 CL-20 基压装型温压炸药的装药密度和爆轰性能

Tab. 3 Charge density and detonation performance of CL-20 based pressed thermobaric explosive

装药密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	爆热/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	爆速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
2.015	8 361	7 815

表 4 30 kg 药量静爆威力试验的冲击波超压

Tab. 4 Overpressure of 30 kg CL-20 based pressed thermobaric explosive in static explosion power test

距离/m	4	8	12
冲击波超压/MPa	1.655	0.263	0.099

生目标进行毁伤,同时考虑破片和超压对暴露人员目标的毁伤作用,认为冲击波超压超过 0.05 MPa 即可对人员达到中度以上的毁伤^[19]。静爆威力试验数据表明:冲击波超压随着传播距离的增加呈指数衰减;但在远场 12 m 处,冲击波超压仍然超过了 0.05 MPa,一定程度上添加大颗粒铝粉强化了爆炸后的有氧燃烧反应阶段。

2.4 CL-20 基压装型温压炸药的安全性

按照 GJB 772—1997 测试方法,对 CL-20 基压装型温压炸药的撞击感度、摩擦感度进行了测试。撞击感度(落锤 10 kg,落高 25 cm)为 8%;摩擦感度(摆角 90°,表压 3.92 MPa)为 24%。CL-20 基压装型温压炸药机械感度较低,满足压制成型时对机械感度的要求。

按照《军用混合炸药配方评审适用试验方法汇编》对 CL-20 基压装型温压炸药 3 项低易损性试验进行了测试。慢速烤燃、快速烤燃、12.7 mm 子弹撞击试验照片如图 3~图 4 所示。

在慢速烤燃和快速烤燃试验中,端盖被冲开,弹体无变形。根据测试结果评价标准,慢速烤燃和快速烤燃试验的响应等级均为燃烧反应。

当 12.7 mm 穿甲燃烧弹径向撞击弹体后,弹体中心穿孔破裂,但端盖完整,样品发生明显燃烧现



(a) 慢速烤燃试验前



(b) 慢速烤燃试验后



(c) 快速烤燃试验前



(d) 快速烤燃试验后

图 3 烤燃试验前、后 CL-20 基压装型温压炸药的状态
Fig. 3 Experimental states of CL-20 based pressed thermobaric explosive before and after fast or slow cook-off tests



(a) 径向撞击试验后



(b) 轴向撞击试验后

图 4 12.7 mm 子弹撞击试验后 CL-20 基压装型温压炸药的状态

Fig. 4 Experimental states of CL-20 based pressed thermobaric explosive after 12.7 mm bullet impact test

象;12.7 mm 子弹轴向撞击弹体后,弹体端盖穿孔,弹体周身破裂,现场大量残余炸药,样品发生明显的燃烧反应。根据测试标准,12.7 mm 子弹撞击试验的响应等级为燃烧反应。

3 结 论

1) 设计并确定了 CL-20 基压装型温压炸药的配方组成(质量分数)为:52% CL-20、32% 铝粉、10% AP、6% 黏结剂。为兼顾后燃效应和反应活性,铝粉粒度级配方案为 $m(\text{FLQT5}) : m(\text{FLQT4}) : m(\text{FLQT2}) = 1 : 2 : 2$ 。

2) 选用微晶蜡作为钝感剂,通过机械混合-蒸发溶剂法包覆处理 AP。包覆后,AP 的机械感和吸湿性得到明显下降。

3) CL-20 基压装型温压炸药的装药密度 2.015 g/cm^3 、爆热 8 361 kJ/kg 、爆速 7 815 m/s ,30 kg 炸药

爆炸时在远场 12 m 处的冲击波超压可对人员达到中度以上的毁伤;撞击感度 8%,摩擦感度 24%;在慢速烤燃、快速烤燃、12.7 mm 子弹撞击试验中,炸药的响应等级均为燃烧反应,爆轰性能和安全性能优异。

参 考 文 献

- [1] WILDEGGER-GAISSMAIER A E. Aspects of thermobaric weaponry [J]. *Military Technology*, 2004, 28 (6): 125-126.
- [2] 王晓峰,冯晓军. 温压炸药设计原则探讨[J]. *含能材料*, 2016, 24(5): 418-420.
WANG X F, FENG X J. Discussion on the design principles of thermobaric explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2016, 24(5): 418-420.
- [3] 朴忠杰,张爱娥,罗宇,等. 铝粉粒度对奥克托今基空爆温压炸药能量释放的影响[J]. *兵工学报*, 2019, 40(6): 1190-1197.
PIAO Z J, ZHANG A E, LUO Y, et al. Influence of aluminum powder on energy release of HMX-based air-blast thermobaric explosives [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(6): 1190-1197.
- [4] 王明焯,韩志伟,李席,等. 铝粉粒径对温压炸药爆炸性能及热稳定性的影响[J]. *高压物理学报*, 2018, 32(3): 107-114.
WANG M Y, HAN Z W, LI X, et al. Influence of aluminum particle size on explosion performance and thermal stability of thermobaric explosive [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018, 32(3): 107-114.
- [5] NIELSEN A T, CHAFIN A P, CHRISTIAN S L, et al. Synthesis of polyazapolycyclic caged polynitramines [J]. *Tetrahedron*, 1998, 54(39): 11793-11812.
- [6] GEETHA M, NAIR U R, SARWADE D B, et al. Studies on CL-20: the most powerful high energy material [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2003, 73(3): 913-922.
- [7] CHOSH M, VENKATESAN V, SIKDER N, et al. Quantitative analysis of α -CL-20 polymorphic impurity in ϵ -CL-20 using dispersive raman spectroscopy [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2013, 10(3): 419-438.
- [8] 欧育湘,刘进全. 高能量密度化合物[M]. 北京:国防工业出版社, 2005: 11-12.
OU Y X, LIU J Q. High energy density compound[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 11-12.
- [9] SIMPSON R L, URTIEW P A, ORNELLAS D L, et al. CL-20 performance exceeds that of HMX and its sensitivity is moderate [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1997, 22(5): 249-255.
- [10] 欧育湘,孟征,刘进全. 高能量密度化合物 CL-20 应用研究进展 [J]. *化工进展*, 2007, 26(12): 1690-1694.
OU Y X, MENG Z, LIU J Q. Review of the development of application technologies of CL-20 [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2007, 26(12): 1690-1694.
- [11] 宋振伟,李笑江. 高能量密度化合物 HNIW 的最新研究进展及其应用前景 [J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2011, 9(1): 40-45, 60.
SONG Z W, LI X J. Recent research progress and application prospect of high energy density compound HNIW [J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2011, 9(1): 40-45, 60.
- [12] NAIR U R, SIVABALAN R, GORE G M, et al. Hexanitrohexaazaisowurtzitane (CL-20) and CL-20-based formulations (review) [J]. *Combustion Explosion & Shock Waves*, 2005, 41(2): 121-132.
- [13] LOUIS C, SCOTT H, ANDREW S, et al. Development of alternate process for the synthesis of CL-20 [C]//Proceedings of 32nd International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, DE: Fraunhofer ICT, 2001: 108-117.
- [14] CHIQUETE C, JACKSON S I. Detonation performance of the CL-20-based explosive LX-19 [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(3): 3661-3669.
- [15] DONALD A, GEISS J. Additional characterization of high performance CL-20 formulation [C]//Proceedings of 30th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, DE: Fraunhofer ICT, 1999: 167-180.
- [16] BALAS W, NICOLICH S, CAPELLOS C. CL-20 PAX explosives formulation development, characterization, and testing [C]//NDIA 2003 IM/EM Technology Symposium. Miami, FL, US, 2003: 181-185.
- [17] 王昕,彭翠枝. 国外六硝基六氮杂伍兹烷的发展现状 [J]. *火炸药学报*, 2007, 30(5): 45-48, 87.
WANG X, PENG C Z. Development of Hexanitrohexaazaisowurtzitane at abroad [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(5): 45-48, 87.
- [18] COOK M A, FILLER A S, KEYES R T. Aluminized explosives [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1957, 61(2): 189-196.
- [19] 高旭东,郭敏,孙韬,等. 炮射温压弹对人员目标的毁伤效能研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2011, 31(3): 123-125, 128.
GAO X D, GUO M, SUN T, et al. The damage efficiency research on cannon thermobaric ammunition to personnel target [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2011, 31(3): 123-125, 128.