

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.03.006

# CL-20 基高爆热含铝压装混合炸药的研究<sup>\*</sup>

李金鑫<sup>①</sup> 勾莉<sup>①</sup> 张争争<sup>①</sup> 邹浩明<sup>①②</sup>

①甘肃银光化学工业集团有限公司含能材料分公司(甘肃白银,730900)

②北京理工大学化学与化工学院(北京,100081)

**[摘要]** 为了提高 CL-20 基高爆热含铝压装混合炸药配方的成型性能,使用了新的黏结剂体系。通过工艺优化研究,获得了最佳的机械干混工艺条件:混合温度 70~85℃,混合时间 20~30 min;最佳的压药条件:压药温度 85℃、比压 3 300 kg/cm<sup>2</sup>、保压时间 60 min。对新配方的爆热、真空安定性、爆发点和环境适应性进行了测试,结果显示,新配方具有很高的爆热,良好的热安全性、环境适应性和可靠性。新配方密度为 2.041 g/cm<sup>3</sup>,爆热为 8 834.3 J/g。

**[关键词]** CL-20;高爆热;含铝炸药;工艺优化;性能表征

**[分类号]** TJ55

## Study on CL-20 Based Aluminized PBX with High Detonation Heat

LI Jinxin<sup>①</sup>, GOU Li<sup>①</sup>, ZHANG Zhengzheng<sup>①</sup>, ZOU Haoming<sup>①②</sup>

① Gansu Yingguang Chemical Industry Group (Gansu Baiyin, 730900)

② School of Chemistry and Chemical Engineering, Beijing Institute of Technology (Beijing, 100081)

**[ABSTRACT]** A new binder system was used to improve the forming performance of CL-20 based aluminized PBX explosive with high detonation heat. Through the study of process optimization, the optimal mechanical dry mixing process condition was obtained as duration of 20-30 min within the temperature range of 70-85℃ and the best pressuring operation was confirmed as holding time of 60 minutes at charge temperature of 85℃ and under specific pressure of 3 300 kg/cm<sup>2</sup>. Detonation heat, vacuum stability, explosion point and environmental adaptability of the new formula were tested. Results show that the new formula has high detonation heat, good thermal safety, environmental adaptability and reliability. Density and detonation heat of the new formula are 2.041g/cm<sup>3</sup> and 8 834.3J/g respectively.

**[KEYWORDS]** CL-20; high detonation heat; aluminized explosive; process optimization; performance characterization

## 引言

含铝炸药是一种能量密度高、爆热和做功能力大的重要军用混合炸药。含铝炸药广泛应用于鱼雷、水雷、深水炸弹、空对地武器弹药、对舰武器弹药等,很多美欧国家已经研发并实用了多个型号的含铝炸药混合炸药配方,如 H-6、PBXN-115、PAX-3、PAX-29 等<sup>[1-3]</sup>。国内也有大量学者对含铝炸药的配方设计、爆轰性能、安全性能等进行了研究<sup>[4-8]</sup>。六硝基六氮杂异伍兹烷(又名 CL-20)是目前国内外最知名的高能量密度材料之一,已经被广泛地应用于

混合炸药和推进剂配方中<sup>[9]</sup>。甘肃银光化学工业集团有限公司含能材料分公司科研所与北京理工大学材料学院共同研发了多个含 CL-20 的混合炸药配方,能量水平均优于传统 RDX 基或 HMX 基混合炸药,安全性能方面也满足钝感弹药要求<sup>[10-12]</sup>。

本文中,对现有的 CL-20 基含铝混合炸药配方进行优化,使用新的黏结剂体系,提高炸药的成型性能。

## 1 工艺优化研究

### 1.1 原料

所用 CL-20、醋酸丁酸纤维素(CAB)、高氯酸铵

<sup>\*</sup> 收稿日期:2019-10-14

基金项目:专项基金(编号省略)

第一作者:李金鑫(1988-),工学学士,工程师,研究方向:混合炸药成型性工艺。E-mail: lijinxin441092388@126.com

通信作者:邹浩明(1988-),博士,研究方向:混合炸药配方及工艺。E-mail: shevchenkozou@sina.com

(AP)、铝粉(Al)、增塑剂和钝感剂纯度均大于 99%。

### 1.2 仪器

表 1 列出了试验中所用的仪器设备。

表 1 试验仪器设备

Tab. 1 Test equipment

仪器名称	型号	生产厂家
数显恒速搅拌机	S312-40	上海申生科技有限公司
数显恒温循环水浴锅	HH-4	常州国华电器有限公司
微机控制电液伺服 万能试验机	WAW-600	济南恒瑞金试验机 有限公司

### 1.3 组分相容性

根据 GJB 772A—1997 501.2 真空安定性测试中的压力传感器法对混合炸药各组分的相容性进行测试,测试结果如表 2 所示。其中,CL-20 与 AP、Al、石蜡,AP 与 Al、石蜡的相容性,由于之前进行过测试,且结果相容,所以没有再重复测试。

表 2 混合炸药各组分的相容性

Tab. 2 Compatibility of the components of the PBX

组分	放气量 R/mL	结果
CL-20 与 CAB	-0.30	相容
CL-20 与增塑剂	-0.45	相容
CAB 与增塑剂	-0.20	相容
CAB 与 AP	-0.55	相容
CAB 与 Al	-0.35	相容
CAB 与石蜡	-0.12	相容
增塑剂与 AP	-0.10	相容
增塑剂与 Al	-0.22	相容
增塑剂与石蜡	0.18	相容

### 1.4 制备工艺优化

采用溶液水悬浮法进行 CL-20 基高爆热含铝压装混合炸药造型粉的制备<sup>[13]</sup>。配方中各组分的含量(质量分数):CL-20, 43.0%;CAB, 1.0%;AP, 23.0%;Al, 30.0%;增塑剂,1.5%;钝感剂,1.5%。原配方采用氟橡胶 F2311 作为黏结剂,具体组分(质量分数):CL-20, 41.5%;F2311, 1.5%;AP, 20.5%;Al,33%;钝感剂,3.5%。

从两个配方组分看,新配方提高了 CL-20、AP 和 Al 含量,降低了黏结剂和钝感剂含量,从而使得配方整体能量水平提高。原配方中黏结剂和钝感剂含量较高的原因是 F2311 对 CL-20 的包覆效果比 CAB 差,需要更多的黏结剂和钝感剂,才能确保配方整体的成型性和机械感度达到使用要求。

在该混合炸药的制备中,关键工序为 CL-20 造型粉与 AP 及 Al 粉的机械混合过程。在工艺优化研究中,对混合温度与混合时间进行了优化,以混合

温度与混合时间对高爆热产品安全性能的影响为依据进行了对比试验,不同工艺下混合炸药的机械感度见表 3。其中,撞击感度的测定采用 GJB 772A—1997<sup>[14]</sup>方法 601.1;摩擦感度的测定采用 GJB 772A—1997 方法 602.1。

表 3 不同工艺条件下混合炸药的机械感度

Tab. 3 Mechanical sensitivity of the PBXs under different processes

序号	混合温度/ ℃	混合时间/ min	撞击感度/ %	摩擦感度/ %
1 <sup>#</sup>	60 ~ 65	20 ~ 30	20	8
2 <sup>#</sup>		30 ~ 50	18	10
3 <sup>#</sup>		40 ~ 50	12	4
4 <sup>#</sup>	65 ~ 70	20 ~ 30	8	8
5 <sup>#</sup>		30 ~ 50	12	4
6 <sup>#</sup>		40 ~ 50	18	4
7 <sup>#</sup>	70 ~ 85	20 ~ 30	8	0
8 <sup>#</sup>		30 ~ 50	12	4
9 <sup>#</sup>		40 ~ 50	8	4

表 3 中的数据表明,在该混合温度与混合时间条件下,撞击感度与摩擦感度均能满足不大于 40% 的技术指标;考虑到进行规模化生产时的经济性,确定机械干混的工艺条件为:混合温度 70 ~ 85 ℃,混合时间 20 ~ 30 min,此时产品的撞击感度与摩擦感度均在 20% 以下,是最为理想的选择。

### 1.5 压药工艺优化

黏结剂体系在混合炸药制备过程中主要是改善炸药的成型性。在本次研究过程中,对黏结剂体系在总量不变的前提下进行了微调,改善压制成型性,提高压制过程中的一次成型率,以压药密度占理论密度的百分比来衡量压药成型性的改进。使用直径为 20 mm 压药模具,药量为 12 g,在不同温度、比压及保压时间条件下,进行了混合炸药成型性研究,试验结果见表 4。可以看出,压药温度为 85 ℃、比压为 3 300 kg/cm<sup>2</sup>、保压时间为 60 min 时的压药密度最高,可达理论密度的 98.6%。原 CL-20 基高爆热含铝压装混合炸药配方的最高压药密度为 1.92 g/cm<sup>3</sup>,只能达到理论密度的 92.7%。改进后配方的最大压药密度比原配方提高了 6.25%。

## 2 性能表征

### 2.1 爆速

爆速的测定采用 GJB 772A—1997 方法 702.1,结果见表 5。

由表 5 中结果可以看出,改进后配方由于提高

表4 不同工艺条件下混合炸药的压药密度

Tab.4 The pressing density of the PBXs under different processes

序号	压药温度/ ℃	比压/ (kg·cm <sup>-2</sup> )	保压时间/ min	压药密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	占理论密度百分比/%
1 <sup>#</sup>	65	2 350	25	1.981	95.7
2 <sup>#</sup>			45	1.988	96.0
3 <sup>#</sup>			60	1.990	96.1
4 <sup>#</sup>			25	1.986	95.9
5 <sup>#</sup>			45	1.996	96.4
6 <sup>#</sup>			60	1.998	96.5
7 <sup>#</sup>		3 300	25	1.996	96.4
8 <sup>#</sup>			45	2.001	96.7
9 <sup>#</sup>			60	2.012	97.2
10 <sup>#</sup>			25	1.999	96.6
11 <sup>#</sup>	75	2 350	45	1.993	96.3
12 <sup>#</sup>			60	1.995	96.4
13 <sup>#</sup>			25	1.988	96.0
14 <sup>#</sup>			45	1.999	96.6
15 <sup>#</sup>			60	2.001	96.7
16 <sup>#</sup>		3 300	25	2.011	97.2
17 <sup>#</sup>			45	2.015	97.4
18 <sup>#</sup>			60	2.023	97.7
19 <sup>#</sup>			25	2.011	97.2
20 <sup>#</sup>			45	2.013	97.3
21 <sup>#</sup>	85	2 870	60	2.017	97.4
22 <sup>#</sup>			25	2.025	97.8
23 <sup>#</sup>			45	2.024	97.8
24 <sup>#</sup>			60	2.025	97.8
25 <sup>#</sup>		3 300	25	2.031	98.1
26 <sup>#</sup>			45	2.033	98.2
27 <sup>#</sup>			60	2.041	98.6

表5 混合炸药的爆速

Tab.5 The detonation velocity of the PBXs

m/s

序号	爆速	平均值	原爆速
1 <sup>#</sup>	7 310.2	7 318.5	7 100.0
2 <sup>#</sup>	7 321.1		
3 <sup>#</sup>	7 320.5		
4 <sup>#</sup>	7 325.4		
5 <sup>#</sup>	7 315.3		

了压药密度,使得爆速得到了提升,比原配方提高了3.1%。

2.2 爆热

爆热的测定采用 GJB 772A—1997 方法 701.1,

结果见表 6。

表6 混合炸药的爆热

Tab.6 The detonation heat of the PBXs

J/g

序号	爆热	平均值	原爆热
1 <sup>#</sup>	8 788.2	8 834.3	8 750.0
2 <sup>#</sup>	8 897.0		
3 <sup>#</sup>	8 810.7		
4 <sup>#</sup>	8 861.9		
5 <sup>#</sup>	8 813.8		

由表 6 中结果可以看出,改进后的配方由于提高了压药密度,使得爆热也得到了提升,比原配方提高了 1%。

2.3 真空安定性

真空安定性的测定采用 GJB 772A—1997 方法 501.2,结果见表 7。

表7 混合炸药的真空安定性

Tab.7 The vacuum stability of the PBXs

48 h 放气量/(mL·g <sup>-1</sup> )				放气量合格要求/ (mL·g <sup>-1</sup> )	结果
1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	平均值		
0.12	0.13	0.13	0.13	<0.20	合格

由表 7 结果可以看出,所制备的高爆热含铝压装混合炸药具有良好的热安定性。

2.4 爆发点

爆发点的测定采用 GJB 772A—1997 方法 606.1,结果见表 8。

表8 混合炸药的爆发点

Tab.8 The explosion temperature of the PBXs

序号	温度/℃	采样平均时间/s	5 s 爆发点/℃
1 <sup>#</sup>	270.0	7.67	295.5
2 <sup>#</sup>	280.0	6.57	
3 <sup>#</sup>	290.0	5.84	
4 <sup>#</sup>	300.0	4.22	
5 <sup>#</sup>	310.0	3.62	

由表 8 结果可以看出,所制备的高爆热含铝压装混合炸药具有较高的爆发点温度(5 s 爆发点温度为 295.5℃,高于 HMX 的 260.0℃),即混合炸药热感度较低,热安全性良好。

2.5 温度循环和温度冲击试验

温度循环试验采用专项工程标准 ZXB 086.001—2013 方法 406.1;温度冲击试验采用专项工程标准 ZXB 086.001—2013 方法 406.2。结果分别见表 9 和表 10。

由表 9 和表 10 中的结果可以看出,无论是温度

表 9 混合炸药的温度循环试验

Tab.9 The temperature cycling test results  
of the PBXs

	样品序号	高度/ mm	直径/ mm	外观变化
循环 试验前	1 <sup>#</sup>	19.576	20.106	无裂纹、 崩裂现象
	2 <sup>#</sup>	19.539	20.107	
	3 <sup>#</sup>	19.585	20.101	
循环 试验后	1 <sup>#</sup>	19.609	20.115	无裂纹、 崩裂现象
	2 <sup>#</sup>	19.563	20.116	
	3 <sup>#</sup>	19.669	20.112	
变化 率/%	1 <sup>#</sup>	0.17	0.04	
	2 <sup>#</sup>	0.12	0.04	
	3 <sup>#</sup>	0.43	0.05	
平均值/%		0.24	0.04	

表 10 混合炸药的温度冲击试验

Tab.10 The temperature shock test results  
of the PBXs

	样品序号	高度/ mm	直径/ mm	外观变化
冲击 试验前	1 <sup>#</sup>	19.581	20.095	无裂纹、 崩裂现象
	2 <sup>#</sup>	19.554	20.106	
	3 <sup>#</sup>	19.587	20.104	
冲击 试验后	1 <sup>#</sup>	19.588	20.137	无裂纹、 崩裂现象
	2 <sup>#</sup>	19.596	20.148	
	3 <sup>#</sup>	19.625	20.143	
变化 率/%	1 <sup>#</sup>	0.04	0.21	
	2 <sup>#</sup>	0.21	0.21	
	3 <sup>#</sup>	0.19	0.19	
平均值/%		0.15	0.20	

循环试验还是温度冲击试验,炸药药柱的尺寸变化率均很低,说明本配方具有良好的环境适应性和可靠性。

3 结论

1)通过 CL-20 基高爆热含铝混合炸药制备工艺的优化研究,确定机械干混的最佳工艺条件为:混合温度 70 ~ 85 ℃,混合时间 20 ~ 30 min。

2)通过压药工艺的优化研究,确定压药最佳工艺条件为:压药温度 85 ℃,比压 3 300 kg/cm<sup>2</sup>,保压时间 60 min。新配方的最大压药密度为 2.041 g/cm<sup>3</sup>,比原有配方提高了 6.25%。

3)对新配方的能量性能和安全性能进行了表征。结果表明,新配方爆速为 7 318.5 m/s、爆热为 8 834.3 J/g,具有良好的热安全性、环境适应性和可靠性。

参 考 文 献

[1] WHELAN D J, SWINTON R, BOCKSTEINER G. Velocity of detonation and charge diameter in some RDX-driven heterogenous explosives: PBXW-115, PBXN-111, H-6 and Composition B [J]. Journal of Energetic Materials, 1996, 14(3/4): 257-270.

[2] GEISS D A. Development of IM grenade submunitions [C]//NDIA 2003 IM/EM Technology Symposium. Miami, FL: 2003.

[3] BALAS W, HATCH R. CL-20 aluminized PAX explosives formulation development, characterization and testing [C]//NDIA 2003 IM/EM Technology Symposium. Miami, FL: 2003.

[4] 项传林, 吕荣华. 新型高能含铝炸药的研究[C]//中国兵工学会火炸药学术讨论会论文集. 北京: 中国兵工学会, 1994: 167-171.

XIANG C L, LÜ R H. Research on new high energy aluminized explosive [C]//Proceedings of the Symposium on Explosives of the Chinese Ordnance Society. Beijing: Chinese Ordnance Society, 1994: 167-171.

[5] 万晓智, 马宏昊, 沈兆武, 等. 新型含铝炸药水下爆炸性能研究[C]//2015 中国力学大会论文集. 上海: 中国力学学会, 2015: 266.

[6] 王世英, 李向东. 新型压装含铝炸药应用于大口径榴弹发射安全性模拟研究[J]. 计测技术, 2013, 33(增刊): 37-40.

[7] 黄勇, 黄辉, 李尚斌, 等. PBX 含铝炸药[Z]//中国工程物理研究院科技年报(2000). 绵阳: 中国工程物理研究院, 2000: 315-316.

HUANG Y, HUANG H, LI S B, et al. PBX aluminized explosive [Z]//The Annual Report of Science and Technology of China Academy of Engineering Physics (2000). Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2000: 315-316.

[8] 张峰, 韩超, 周旭辉, 等. TATB 基含铝 PBX 炸药成型性能[C]//2014 年(第六届)含能材料与钝感弹药技术学术研讨会. 成都: 中国兵工学会爆炸与安全技术专业委员会, 2014: 152-155.

[9] LIU R, ZHOU Z, YIN Y, et al. Dynamic vacuum stability test method and investigation on vacuum thermal decomposition of HMX and CL-20 [J]. Thermochimica Acta, 2012, 537(3): 13-19.

[10] 邹浩明, 陈树森, 李鑫, 等. 一种 CL-20 基 PBX 炸药的热分析及热危险性评估[C]//2016 年第七届含能材料与钝感弹药技术研讨会. 绵阳: 《含能材料》编辑部, 2016: 743-746.

ammunitom[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013,34(8): 46-48.

[4] 王震宇,杜力民,冯成良,等. 国外钝感弹药发展脉络及其启示[C]//2014'(第六届)含能材料与钝感弹药技术学术研讨会论文集. 成都, 2014: 244-248.

[5] 许蕾,张鹏. 国内外钝感弹药评估标准的发展与分析[J]. 航天标准化, 2010(4): 35-37.

[6] 殷瑱,闻泉,王雨时,等. 北约不敏感弹药标准试验方法[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(10): 1-7.

YIN Z, WEN Q, WANG Y S, et al. Standard experiment method of insensitive munition in NATO[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(10): 1-7.

[7] 梁晓璐,梁争峰,程淑杰,等. 不敏感弹药试验方法及评估标准研究进展[J]. 飞航导弹, 2016(6): 84-87.

[8] 陈朗,马欣,黄毅民,等. 炸药多点测温烤燃实验和数值模拟[J]. 兵工学报, 2011,32(10): 1230-1236.

CHEN L, MA X, HUANG Y M, et al. Multi-point temperature measuring cook-off test and numerical simulation of explosive [J]. Acta Armamentarii, 2011, 32 (10): 1230-1236.

[9] 徐洪涛,金朋刚. 炸药缓慢加热条件实验技术进展[J]. 装备环境工程, 2019, 16(9): 5-17.

XU H T, JIN P G. Development of slower cook-off test for explosives[J]. Equipment Enviromental Engineering, 2019, 16(9): 5-17.

[10] SECHMITS G T. ODTX test program; MHSMP-80-40 [R]. 1980.

[11] KENT R, RAT M. Eplosive thermique (cook off) despropergols solides[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics,1982, 7(5): 129-136.

[12] SLAPE R J. IHE material qualification tests description and criteria; MHSMP-84-22 [R]. 1984.

[13] NATO Standardization Agency Slow heating, munitions test procedures; STANAG 4382[S]. Brussels; NATO, 2003.

[14] 向梅,黄毅民,饶国宁,等. 不同升温速率下复合药柱烤燃实验与数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(4): 394-400.

XIANG M, HUANG Y M, RAO G N, et al. Cook-off test and numerical simulation for composite charge at different heating rate[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(4): 394-400.

[15] 姚奎光,钟敏,代晓淦,等. 缓慢热作用下 PBX-9 炸药的响应特性[J]. 火炸药学报, 2015, 38(6): 56-60.

YAO K G, ZHONG M, DAI X G, et al. Response characteristics of PBX-9 explosive under slow thermal stimulus[J]. Chinese Journal of Explosive & propellants, 2015, 38(6): 56-60.

[16] 于永利,智小琦,范兴华,等. 自由空间对炸药慢烤响应特性影响的研究[J]. 科学技术与工程,2015,15(5):280-283.

YU Y L, ZHI X Q, FAN X H, et al. The research of free-space influence on response characteristics of explosive on slow cook-off condition[J]. Science Technology and Engineering, 2015,15(5):280-283.

[17] 中国兵器工业总公司. 炸药试验方法; GJB 772A—1997[S]. 北京,1997.

[18] Hazard assessment tests for non-nuclear munitions; MIL—STD—2105D [S]. 2011.

(上接第 36 页)

ZOU H M, CHEN S S, LI X, et al. Thermal analysis and risk assessment of a CL-20 based PBX explosive [C]//2016 The Seventh Academic Symposium on Energetic Materials and Insensitive Ammunition Technology. Mianyang: Editorial Department of Chinese Journal of Energetic Materials, 2016: 743-746.

[11] ZOU H M, CHEN S S, JIN S H, et al. Preparation, thermal investigation and detonation properties of  $\epsilon$ -CL-20 based polymer bonded explosives with high energy and reduced sensitivity [J]. Materials Express, 2017, 7:199-208.

[12] LAN G C, JIN S H, JING B C, et al. Investigation into the temperature adaptability of HNIW-based PBXs [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2019, 44(3): 327-336.

[13] 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): 171-173,199.

CHEN L Y, ZHAO S X, YANG P J, et al. The coating and desensitization of CL-20 [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2006, 14(3): 171-173,199.

[14] 中国兵器工业总公司. 炸药试验方法; GJB 772A—1997[S]. 北京,1997.