

文章编号:1006-9941(2021)07-0650-08

低易损浇注 HMX-Al 基 PBX 炸药设计与性能

曹仕瑾^{1,2},李忠友^{1,2},熊伟强¹,王 鹏¹,张天福¹,程 迪¹,高 扬¹

(1. 湖北航天化学技术研究所, 湖北 襄阳 441003; 2. 航天化学动力技术重点实验室, 湖北 襄阳 441003)

摘要: 为提高 HMX-Al 基混合炸药的能量和低易损性能,通过分析计算 Al 含量、奥克托今(HMX)含量对炸药爆轰性能的影响规律,确定了高固含量含铝 PBX(polymer bonded explosive)炸药设计依据,在此基础上通过三级颗粒级配优化、固化体系筛选及降感剂、工艺助剂的选择应用,制备了固相含量 90%(HMX/Al=75/15)的端羟基聚丁二烯(HTPB)/异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)黏结体系浇注固化炸药 GOL-42,炸药工艺及安全性能优良。按照 GJB772A 等方法对 GOL-42 炸药进行了爆轰能量、低易损性、力学性能、热性能及加速贮存性能测试,结果表明:该炸药实测密度 $1.782 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、爆速 $8251 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、爆压 26.9 GPa 、 $\Phi 25 \text{ mm}$ 圆筒试验格尼系数 $2.76 \text{ mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$,在快速烤燃、慢速烤燃、子弹撞击试验中响应程度均为低反应等级的燃烧反应,炸药综合性能优良,预估贮存寿命 20 年以上,是一种长寿命低易损浇注炸药。

关键词: 杀爆战斗部;浇注 PBX 炸药;低易损性;爆轰性能;金属加速能力

中图分类号: Tj55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2020270

1 引言

杀爆战斗部是应用最广泛的战斗部类型之一,其战斗部装药爆炸后产生大量破片和爆炸冲击波,对目标进行毁伤,是大型战斗部常用的装药形式。爆速、爆热、金属加速能力是评价其装药性能的重要指标,爆速和金属加速能力决定了炸药的破片毁伤效能,而爆热则影响炸药的冲击波超压,因此为了优化这三个指标,炸药配方中常加入铝粉^[1]。目前,国内这类炸药主要采用压装含铝炸药和 2,4,6-三硝基甲苯(TNT)为载体的熔铸炸药,这些炸药均采用压、铸装方式,适于炮弹、火箭弹等小尺寸装药,对于较大尺寸和复杂结构的战斗部装药适用性差,同时这类炸药安全性能较差,已无法满足钝感、低易损性弹药的发展需求。浇注 PBX 炸药具有安定性好、易损性低、力学性能好、成型性优良等特点^[2],能满足新型作战需求,已成为不敏感弹药

的重要发展方向。

国外钝感含铝浇注杀爆炸药的配方有德国的 KS22a(黑索今(RDX)/Al/粘结剂 67/18/15)^[3]、美国的 PBXN-109(RDX/Al/粘结剂 64/20/16)^[4]、PBXW-114(HMX/Al/粘结剂 78/10/12)^[5]、DLE-C050(HMX/Al/粘结剂 74/15/11)^[6]、DLE-C067(3-硝基-1,2,4-三唑-5-酮(NTO)/RDX/Al/粘结剂 88/12)^[7]等,大部分炸药已通过美军标钝感试验或者全弹不敏感试验考核,获得应用。国内以典型配方 PBXN-109 炸药为基础开展了浇注 PBX 的性能研究,罗观等^[2]以硝基胍(NQ)或 NTO 部分代替 RDX 考察了浇注炸药的易损性能,谢斌等^[8]研究了 1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(FOX-7)替换 HMX 对浇注 PBX 炸药安全性能的影响,这些研究以钝感炸药替代部分主炸药的方式提高了炸药的易损性或安全性能,但是炸药的能量势必降低;为提高炸药能量,孙利杰等^[9]开展了高固含量浇注 PBX 炸药工艺研究,制备了 90% 固含量 RDX/Al 基 PBX 炸药,炸药实测爆速 $7.8 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$;欧亚鹏等^[10]通过浇注炸药粘结剂体系设计制备了 90% 固含量 HMX 基 PBX 炸药,爆速达到 $8560 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,密度 $1.684 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,未见到关于这些炸药低易损性能的报道。为进一步提高能量,近年来金浩博^[11]、张峰峰^[12]等开展了浇注炸药的

收稿日期:2020-10-06;修回日期:2021-02-02

网络出版日期:2021-04-13

作者简介:曹仕瑾(1983-),女,高级工程师,主要从事含能材料配方与工艺研究。e-mail:qiucqj123@163.com

通信联系人:李忠友(1973-),男,研究员,主要从事含能材料研究。e-mail:lizhongyou1s@126.com

引用本文:曹仕瑾,李忠友,熊伟强,等.低易损浇注 HMX-Al 基 PBX 炸药设计与性能[J].含能材料,2021,29(7):650-657.

CAO Shi-jin, Li Zhong-you, XIONG Wei-qiang, et al. Design and Performance of a Low Vulnerability PBX with HMX and Al[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(7): 650-657.

工艺性能及混合固化工艺数值模拟研究,可见进一步提高浇注炸药的能量并兼顾低易损性能仍有很大的发展空间,尤其是以性价比较高的 HMX-Al 为主成份的炸药配方。为此,本文通过分析 Al 含量对杀爆炸药能量的影响规律和配方工艺研究,设计制备了一种高性能低易损 HMX-Al 基浇注 PBX 炸药 GOL-42,开展了爆轰性能、圆筒试验、机械感度、低易损性试验和力学性能、热性能、贮存老化性能等研究。

2 实验部分

2.1 主要原材料

HMX,工业级,甘肃银光化学工业集团有限公司,其中粗、中、细 HMX 粒径范围分别为 450~220 μm , 100~200 μm , 40 μm 以下;Al 粉,粒径范围 2~13 μm ,工业级,鞍钢实业微细铝粉有限公司;端羟基聚丁二烯 (HTPB),Ⅲ型,工业级,黎明化工研究院;IPDI,工业级,德国拜耳公司;甲苯二异氰酸酯(TDI),工业级,黎明化工研究院;其它组分及助剂自制,纯度大于等于 99%。

2.2 样品制备

将原材料 HTPB、Al 粉、功能助剂等按一定配比称量好,预混均匀。分步加入 HMX,采用立式混合机捏合、真空浇注、固化制备出均匀致密炸药试样,根据测试要求加工成待测试件。

2.3 测试方法和条件

(1) 爆轰性能

装药密度按 GJB772A-1997 方法 401.2“药柱密度液体静力称量法”进行,药柱尺寸: $\Phi 30\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 。

爆速测试按 GJB772A-1997 方法 702.1“爆速-电测法”进行,单发药柱尺寸: $\Phi 30\text{ mm}\times 30\text{ mm}$;爆压测试按照 GJB772A-1997 方法 704.2“爆压-锰铜压力传感器法”进行,试样尺寸: $\Phi 30\text{ mm}\times 60\text{ mm}$, $\Phi 30\text{ mm}\times 10\text{ mm}$;爆热测试按照 GJB772A-1997 方法 701.1“爆热-恒温法和绝热法”进行,药柱状态为 $\Phi 25\text{ mm}$ 中心带雷管孔药柱;圆筒试验按 GJB772A-1997 方法 705.2“标准圆筒试验法”进行。

(2) 工艺性能

药浆工艺性能按照 Q/G147-2004 复合固体推进剂药浆黏度测定-哈克粘度计法进行。对出料药浆进行 50 $^{\circ}\text{C}$ 保温,测试出料 1, 3, 5 h 药浆的粘度和屈服值。

(3) 安全性能

撞击感度测试按 GJB772A-1997 方法 601.1“撞击

感度爆炸概率法”进行,样品质量(50 ± 1) 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 ± 1) mg,正压力 3.92 MPa,摆角 90 $^{\circ}$;起爆感度测试按照《军用混合炸药配方评审适用试验方法汇编》方法 208.1“炸药雷管感度”进行。

(4) 低易损性能

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“炸药慢速烤燃试验法”进行,以 1 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温速率加热烤燃弹发生响应或温度达到 400 $^{\circ}\text{C}$ 为止,以响应温度和烤燃弹壳体的变形状况评价其慢速烤燃特性。快速烤燃试验按照《军用混合炸药配方评审适用试验方法汇编》方法 702.1“炸药快速烤燃试验”进行,根据试样发生反应的剧烈程度,评定其快速烤燃特性。子弹撞击试验按照《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,通过观察试验现象、回收样品残骸、观察见证板综合判断响应程度。三项试验装药尺寸均为 $\Phi 60\text{ mm}\times 240\text{ mm}$,壳体厚度 3 mm,两头有带螺纹端盖。

(5) 力学性能

抗拉强度测试按照 GJB 770B-2005 方法 413.1“最大抗拉强度、断裂强度、最大伸长率和断裂伸长率单向拉伸法”进行,采用 B 型哑铃试件;抗剪强度测试按照 GJB 772A-1997 方法 415.1“抗剪强度双剪法”进行;抗压强度测试按照 GJB 772A-1997 方法 416.1“抗压强度压缩法”进行。

(6) 热性能

热安定性测试按照 GJB772A-1997 方法 501.2“真空安定性试验压力传感器法”和方法 503.1“安定性 75 $^{\circ}\text{C}$ 加热法”进行;爆发点测试按照 GJB772A-1997 方法 606.1“爆发点 5 s 延滞期法”进行。

(7) 加速贮存性能

按照 GJB736.8-1990 火工品试验方法“71 $^{\circ}\text{C}$ 试验法”进行加速老化试验。

3 结果与讨论

3.1 浇注杀爆配方的设计

3.1.1 主成份 Al 含量的设计

Al 含量对混合炸药爆轰性能的影响最为显著,通过计算考察了 Al 含量对炸药金属加速能力的影响。炸药的金属加速能力常有两种表征方法:圆筒膨胀和

金属盘加速。文献[13]提出了一种预估含铝炸药金属加速能力的方法,该方法采用 $\Phi 40$ mm金属盘速度 W 来表征加速能力,其表达形式如下:

$$W \sim [K(Q\rho)]^{0.5} \quad (1)$$

$$K \sim (N\rho)^{0.6} \quad (2)$$

式中, W 为金属盘速度, $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$; Q 为炸药爆热, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; ρ 为炸药密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; N 为每千克炸药的气相爆轰产物的摩尔数, $\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。将式(2)代入(1)得到式(3):

$$W \sim N^{0.3} Q^{0.5} \rho^{0.8} \quad (3)$$

按照式(3)对90%固含量HTPB/Al/HMX炸药进行了金属加速能力理论预估。对CHNOAl炸药,其爆轰产物生成次序^[14]为: $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, 剩余H、N以 H_2 和 N_2 存在,其余产物略去。采用自编的《混合炸药爆轰参数计算软件》进行密度、爆热计算,其计算结果见表1。

表1 HTPB/Al/HMX配方参数预估结果

Table 1 Estimated result for composition of HTPB/Al/HMX

number	Al / %	ρ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	Q / $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	N / $\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$	$N^{0.3}Q^{0.5}\rho^{0.8}$
1	5	1.740	5852	47.3	378.9
2	10	1.764	6330	43.2	387.7
3	15	1.788	6664	37.8	386.4
4	20	1.814	6979	32.3	381.6
5	25	1.839	7274	26.8	372.4

Note: 1) ρ is density of composition; 2) Q is detonation heat of composition; 3) N is mole number of gaseous explosion products per mass unit of high explosive.

表1可见,Al含量在10%~15%时, $N^{0.3}Q^{0.5}\rho^{0.8}$ 值达最大,由式(3)可知,即炸药的金属盘速度 W 达到最大值,理论预估表明Al含量在10%~15%时,炸药的金属加速能力最佳。

国内外在Al含量对炸药金属加速能力的影响研究也有报道。Trzcinski W A等^[15]研究了含Al粉的RDX/Wax炸药体系的爆轰性能,试验表明含15%Al粉的混合炸药格尼能最高,与纯炸药相当。冯晓军等^[16]采用电探针法测量了RDX基含铝炸药爆炸驱动金属薄片的速度变化,结果表明Al粉含量对炸药爆炸加速能力的贡献有一最佳值,其Al含量为15%。美国陆军坦克机动车辆-武器研究发展中心^[17]在研制PAX-29(77%CL-20/15%Al)炸药初期,系统研究了Al含量0%~30%炸药的圆筒膨胀能 $E_{6.5}$,在Al含量为15%时,其 $E_{6.5}$ 最佳,通过计算表明,15%Al含量炸药的总能量比LX-14高45%, $E_{6.5}$ 比LX-14高30%,其系

列配方PAX-11(79%CL-20/15%Al)、PAX-30(77%HMx/15%Al)、PAX-42(77%RDX/15%Al)炸药中均保持了15%的Al含量。美国阿连特系统公司开发的用于金属驱动和爆破杀伤双重作用目的的DLE-C050炸药^[6]也含有15%的Al粉。

通常来说,Al含量增加,炸药爆速降低,而爆热先增加后减小。Radwan M A等^[18]研究了0%~30%的Al粉添加对HMx/PU体系PBX炸药爆轰性能的影响,结果表明15%的Al粉添加炸药综合性能最好,其爆热和爆温显著增加了58%和37%,爆炸力增加了8%,爆速和破坏力只降低了2.75%和2.13%。

综合理论预估和国内外相关研究实践,本研究以15%Al含量开展试验研究。

3.1.2 主炸药HMx含量的设计

通过Urizar经验算法、盖斯定律^[14]对88%~92%固含量HMx/Al/HTPB(Al含量15%)炸药配方进行了爆速、爆热理论计算,得到爆速、爆热随HMx含量的变化曲线,见图1。

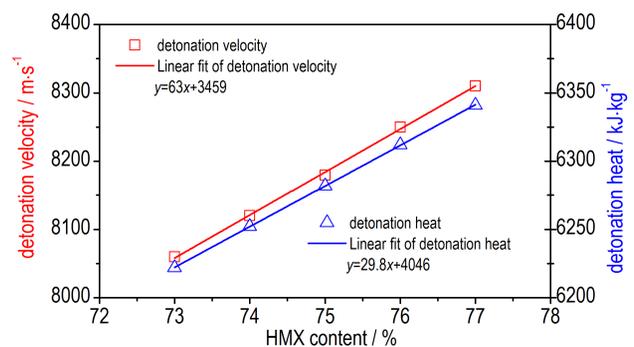


图1 理论爆速、爆热随HMx含量变化曲线

Fig.1 Theoretical estimation on detonation velocity and detonation heat of compositions with various HMx contents

图1中,将理论爆速与HMx含量进行线性拟合,得到: $Y=63X+3459$ (X 为HMx的质量分数,%; Y 为理论爆速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),此线性拟合相关系数为99.8%,若理论爆速为 $8200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,则计算 $X=75.2$;将理论爆热与HMx含量进行线性拟合得到: $Y=29.8X+4046$ (X 为HMx的质量分数,%; Y 为理论爆热, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$),此线性拟合相关系数为99.9%,若理论爆热为 $6300\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,则计算 $X=75.6$ 。

本文以HMx含量至少75%(固体含量至少90%)炸药配方开展试验研究,配方理论爆速可以达到 $8200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,爆热达到约 $6300\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

3.1.3 颗粒级配对工艺性能的影响

对固体含量90%、91%HTPB/Al/HMx炸药配方

开展了制备工艺研究。对 HMX 选取前述粗、中、细三种粒度规格,部分 HMX 采用类球形化炸药,通过最佳紧密堆积模型进行含量优化设计;AI 粉采用微米级细粒度尺寸,既有利于改善药浆工艺又有利于提高炸药

中 AI 粉的反应效率^[19];此外加入适量工艺助剂,进一步改善固体颗粒之间的界面性能以提高固体含量,其 HMX 颗粒级配及助剂对配方工艺性能的影响,见表 2。

表 2 HMX 级配对炸药工艺性能的影响

Table 2 Effects of HMX grain distributions on the processing performance of explosive

sample	total solid/%	HMX grain distribution	process agents	process properties
		coarse/middle/fine		
1	90	40/20/15	no adding	common liquidity and leveling property
2	90	40(near spherical particles)/20/15	add 0.2%	good liquidity and leveling property
3	91	41(near spherical particles)/20/15	add 0.2%	poor liquidity and leveling property
4	91	41/20/15(near spherical particles for all)	add 0.2%	good liquidity and leveling property
5	90	40/20/15	add 0.3%	better liquidity and leveling property
6	90	-/60/15	add 0.3%	good liquidity and common leveling property

表 2 可见,采用三级粒度级配和类球形 HMX,并加入工艺助剂,炸药固体含量可以达到 91%,提高工艺助剂含量,采用普通 HMX,90% 固含量炸药工艺性能良好。对流动性良好的样品 5(三级配)和样品 6(二级配)药浆进行了工艺性能测试,得到了混合出料 1、3、5 h 后药浆的粘度 η 和屈服值 τ 变化曲线,见图 2 和图 3。

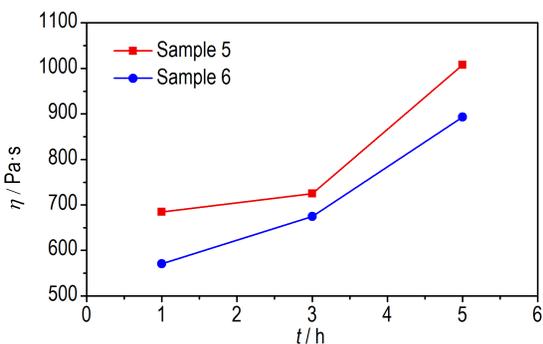


图 2 药浆出料粘度随出料时间变化曲线

Fig.2 Viscosity change of the slurry discharge with time

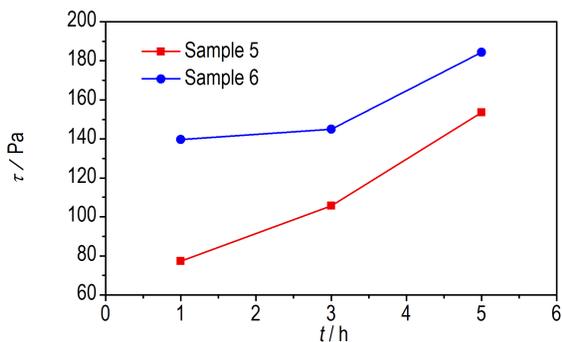


图 3 药浆屈服值随出料时间变化曲线

Fig.3 Yield change of the slurry discharge with time

药浆粘度反应了药浆的流动性,而屈服值反应了药浆的流平性。图 2 和图 3 可见,样品 5 采取三级粒度级配,出料药浆粘度比样品 6 略高,但是药浆屈服值比样品 6 降低很多,即药浆流平性有较大改善,因此采取三级粒度级配颗粒设计,90% 固含量配方具有良好的工艺性能,满足大药量浇注工艺需求。

3.1.4 固化体系对工艺性能的影响

考察了固化剂 TDI、IPDI 对炸药配方工艺性能的影响,通过肉眼观察出料药浆浇注时的流动性和流平性来判断炸药配方的工艺性能,结果见表 3。

表 3 不同固化剂对炸药工艺性能的影响

Table 3 Effects of various curing agents on the processing performance of explosives

curing agent	conditioning agent	process properties
TDI	no adding	good liquidity and leveling property
IPDI	no adding	poor liquidity and leveling property
IPDI	add 0.2%	good liquidity and leveling property

表 3 可见,采用 TDI 作为固化剂,不加入网络调节剂时,配方的工艺性能良好,但是浇注过程中发现药浆适用期较短;采用 IPDI 作为固化剂时,炸药的工艺性能较差,而加入 0.2% 网络调节剂,通过调节固化反应历程,可显著改善炸药药浆的流动流平性。

3.1.5 降感剂对安全性能的影响

筛选了两种复合降感剂,考察了其对炸药配方机械感度的影响,结果见表 4。

表 4 可见,无降感剂时基础配方的摩擦感度较高,加入降感剂 1#、2# 后,炸药的机械感度得到显著改善,

测试条件下炸药撞击感度降为0,摩擦感度降到28%。

通过以上研究,最终确定了一种以HMX/Al为主成份的浇注PBX炸药配方GOL-42,该炸药以HTPB/IPDI为粘合剂体系,固相含量90%(HMX/Al 75/15),通过级配优化及降感,炸药工艺及安全性能优良。

表4 降感剂对炸药机械感度的影响

Table 4 Influence of desensitizer on the mechanical sensitivity of explosives

desensitizer	impact sensitivity / %	friction sensitivity / %
no adding	8	60
1#(1%)	4	32
2#(0.5%)	0	28

3.2 炸药的能量性能

3.2.1 起爆感度

首先通过炸药雷管感度试验测试了GOL-42炸药的起爆感度,药柱尺寸 $\Phi 68\text{ mm}\times 160\text{ mm}$,外带PVC壳体,在药柱端面中心孔插入雷管进行起爆,通过观察见证板的破裂状况来判断是否发生爆轰,试验情况见图4。见证板被炸穿,由此可以判断GOL-42炸药可由雷管直接起爆。

3.2.2 爆轰性能

按标准方法测试了GOL-42炸药的密度、爆速、爆压、爆热,结果见表5。

当样品尺寸为 $\Phi 25\text{ mm}$,8#电雷管未起爆完全,初步判断该炸药临界直径大于25 mm,在采用6 g钝化



a. test device before test b. witness plate wreckage after test

图4 GOL-42炸药雷管感度试验情况

Fig.4 Experimental result of detonator sensitivity of GOL-42

表5 炸药的密度和爆轰性能

Table 5 Detonation properties and density of GOL-42

explo- sive	density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	detonation velocity / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	detonation pressure / GPa	detonation heat / $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
GOL-42	1.782	8251	26.9	6707

RDX传爆后测得配方爆热值为 $6707\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

美国近期报道的DLE-C050炸药^[6]采用Cheetah程序计算的理论密度、爆速、爆压分别为: $1.776\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $7.59\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 24.7 GPa ,可见GOL-42炸药具有较高的密度、爆速、爆压和爆热,性能优于DLE-C050炸药配方。

3.2.3 金属加速能力

采用标准圆筒膨胀试验对GOL-42炸药进行了测试,其壁速 u 和比动能 E 测试结果及计算得到的格尼系数见表6。

表6 GOL-42炸药的圆筒试验结果

Table 6 Cylinder test results of GOL-42

explosive	$\rho / \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$u / \text{mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$			$E / \text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$			gurney coefficient / $\text{mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$	
		6 mm	19 mm	25 mm	6 mm	19 mm	25 mm	19 mm	25 mm
GOL-42	1.780	1.379	1.589	1.623	0.951	1.262	1.316	2.71	2.76

Note: 1) ρ is density of composition; 2) u is expansion velocity of cylinder; 3) E is the ratio energy of cylinder.

GOL-42炸药壁速 u 、比动能 E 随膨胀距离($R-R_0$)的变化曲线见图5。图5可见,随膨胀距离增加(0~25 mm),圆筒壁速、比动能一直增加,含铝炸药由于在爆轰过程中Al粉与爆轰产物的二次反应,其能量释放时间较长,因此随圆筒壁膨胀距离增加,圆筒壁速逐渐增大^[20],未趋于稳定。可见标准圆筒试验25 mm装药直径影响了炸药作功能力的发挥,由上述爆热测试过程可知,炸药的临界直径较大,将图6试验的膨胀距离0~25 mm的格尼能-膨胀距离曲线按拟合趋势延伸至格尼能趋于稳定,此时格尼能 $3.97\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$,计算格尼

系数为 $2.82\text{ mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$,比实验结果 $2.76\text{ mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ 略高。可见,GOL-42炸药具有良好的破片驱动性能。

3.3 炸药的低易损性能

3.3.1 枪击试验

用12.7 mm穿甲燃烧弹,以 $850\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度对GOL-42炸药进行了两发有效径向子弹撞击试验,试验情况见图7,子弹从弹体装药中穿过,弹壳局部轻微撕裂,装药发生燃烧,底见证板无爆炸痕迹和变形,侧见证板完好,无冲倒及凹痕,反应温和。根据测试标准,枪击试验响应等级为“燃烧”。

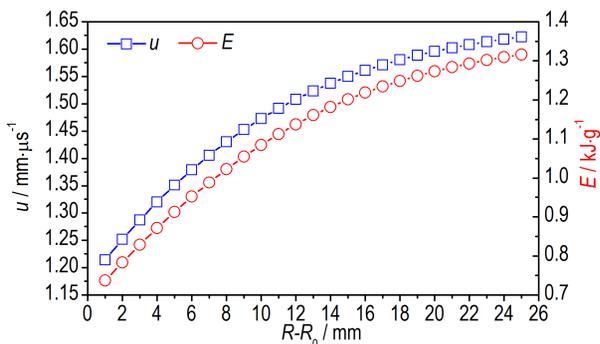


图5 GOL-42炸药的圆筒膨胀速度、比动能曲线

Fig.5 Expansion velocity and specific energy in cylinder tests of GOL-42

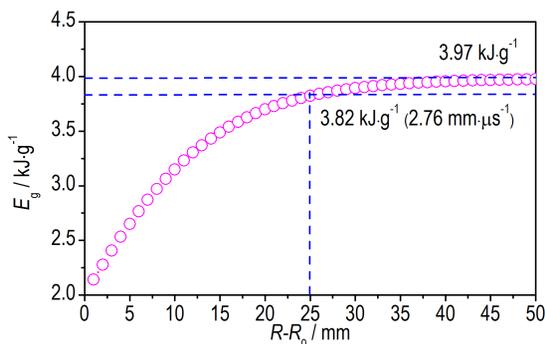


图6 GOL-42炸药的格尼能随膨胀距离变化拟合曲线

Fig.6 Gurney energy fitting curve in cylinder tests of GOL-42

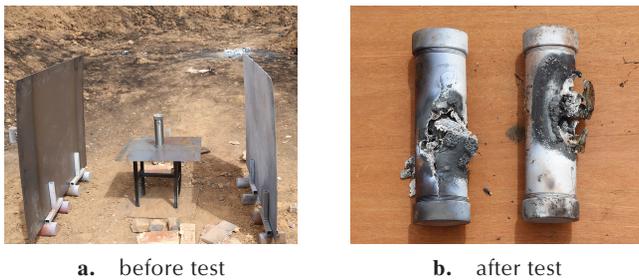


图7 GOL-42炸药枪击试验前后装药状态

Fig.7 Experimental states of GOL-42 before and after bullet impacts

3.3.2 烤燃试验

对 GOL-42 炸药进行了快速烤燃、慢速烤燃试验。将烤燃弹置于高温火焰源中,约 56 s 装药发生响应,对应火焰温度约 700 °C,装药燃烧,端盖被冲开,弹体无变形,见证板完好,快速烤燃试验结果见图 8a。以 1 °C·min⁻¹ 升温速率加热烤燃弹,至约 216 °C 发生响应,装药发生燃烧,端盖被冲开,弹体无变形,见证板完好,慢速烤燃试验结果见图 8b。根据测试标准,快速烤燃和慢速烤燃试验响应等级均为“燃烧”。

在上述低易损试验中,GOL-42 炸药未发生比燃烧更剧烈的反应,通过了 3 项低易损性试验考核。通

过三级粒度级配提高炸药密度,降低了炸药装药的孔隙率^[21];采用工艺助剂和降感剂改善炸药颗粒的界面性能,通过缓冲和润滑减缓了炸药颗粒间的接触,有利于降低热点产生的概率,上述手段的运用很好地改善了炸药在子弹撞击和热烤燃试验的反应程度,使 GOL-42 炸药具有良好的低易损性能。

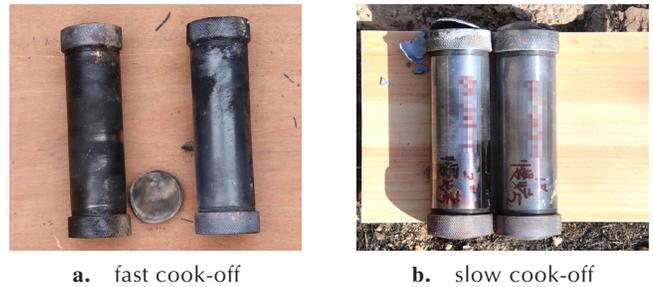


图8 GOL-42炸药烤燃试验后装药状态

Fig.8 Experimental states of GOL-42 after fast and slow cook-off tests

3.4 炸药的力学性能

按照力学标准试验方法测得常温下 GOL-42 炸药的抗压强度为 3.818 MPa,抗剪强度为 1.108 MPa,抗拉强度为 0.96 MPa、最大伸长率 21.4%,美国典型 PBXN-109^[4] 炸药固体含量 84%,其 MIL-E-82886 (OS)^[22] 标准规定了 PBXN-109 应达到的最大拉伸强度和对应的延伸率分别为 0.413 MPa 和 12%,可见 GOL-42 炸药具有较好的强度和一定的延展性,其优良的拉伸性能赋予炸药良好的环境适应性,生产、使用过程不容易产生裂纹等缺陷。

3.5 炸药的热性能

采用真空安定性试验测得 GOL-42 炸药放气量 0.11 mL·g⁻¹ (100 °C, 48 h),低于 2 mL·g⁻¹ 的通用标准,安定性合格。采用 75 °C 加热法对 GOL-42 炸药连续加热 48 h,试验后炸药无明显变色,未出现有色烟雾,无酸性气味放出,挥发分为 0.010%,减少的质量分数为 0.015%,失重率小于 0.5%,热稳定性良好。实验还测得其 5 s 爆发点为 306.5 °C。测试结果均表明 GOL-42 炸药热安定性良好。

3.6 炸药寿命预估

通过 71 °C 高温加速老化试验^[23] 进行炸药寿命预估,试验样品贮存时间分别为 44 d、51 d,测试贮存后爆速、抗剪强度变化,观察其质量损耗和体积变化情况。根据爆速、抗剪强度的试验数据计算平均值和标准差,并判断是否发生了显著性变化。若试验后的爆速、抗剪强度无显著变化,则采用修正的阿累尼乌斯方

程(见式(4))计算常温下(21 °C)的贮存年限。

$$t_0 = \tau t_1 \quad (4)$$

式中, t_0 为常温贮存时间, d; t_1 为高温试验时间, d; τ 为加速系数, 由式(5)计算。

$$\tau = r^{(T_1 - T_0)/A} \quad (5)$$

式中, r 为反应速度系数, 标准规定为 2.7; T_1 为高温试验温度, K; T_0 为常温试验温度, K; A 为与反应温度系数对应的温度变化, 取 10 K。

由式(5)计算得到 τ 为 143.5, 代入式(4)。当高温试验 44 d 时, 计算常温贮存时间 6314 d (17.3 年), 当高温试验 51 d 时, 计算常温贮存时间 7319 d (20.1 年)。

GOL-42 药柱经过 71 °C 贮存 44 d 后, 质量损耗 (-0.0384 ± 0.0014)%, 体积变化 (-0.3984 ± 0.0254)%, 爆速 (8292 ± 28.5) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 抗剪强度 (0.988 ± 0.053) MPa; 71 °C 贮存 51 d 后, 质量损耗 (-0.0390 ± 0.0014)%, 体积变化 (-0.7245 ± 0.1682)%, 爆速 (8263 ± 21.3) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 抗剪强度 (1.053 ± 0.020) MPa。

可见, 试样加速贮存 44 d 和 51 d (对应常温贮存 17 年、20 年), 四项敏感参量均无明显变化, 预估 GOL-42 炸药在常温 21 °C 下的贮存寿命至少 20 年。GOL-42 炸药采用力学性能优异的 HTPB/IPDI 粘合剂体系, 通过网络调节剂、防老剂等综合运用, 使得炸药的高分子粘合剂基体具有良好的耐老化性能。

4 结论

(1) 通过配方设计和工艺研究, 制备了浇注型含铝 PBX 炸药 GOL-42, 该炸药以 HTPB/IPDI 为粘合剂体系, 固相含量 90% (HMX/Al=75/15), 炸药工艺及安全性能优良。

(2) GOL-42 炸药实测密度 $1.782 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、爆速 $8251 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、爆压 26.9 GPa, 试验格尼系数 $2.76 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$, 拟合最大值达 $2.82 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$, 综合爆轰性能优于 DLE-C050 炸药。

(3) 在快速烤燃、慢速烤燃、子弹撞击试验中 GOL-42 炸药响应程度均为低反应燃烧等级, 炸药力学性能、热安定性优良, 其预估贮存寿命至少达 20 年, 是一种长寿命低易损浇注炸药, 在易损性要求高的大口径、复杂结构杀爆类战斗部中有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] Vadhe P P, Pawar R B, Sinha R K, et al. Cast aluminized explosives [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2008, 44(4): 461-477.

- [2] 罗观, 黄辉, 张明. 可浇注固化 PBX 类含铝炸药低易损性研究 [J]. *含能材料*, 2004, 12(1): 20-22.
LUO Guan, HUANG Hui, ZHANG Ming. Study on low vulnerability of cast-cured PBX aluminized explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(1): 20-22.
- [3] Arnold W, Muthig H. KS22a -The insensitive high explosive for hard target defeat applications [C]// 2003 Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. Orlando: IMEM, 2003.
- [4] Hamsher B L, Lochert I J, Dexter R M. Evaluation of PBXN-109: the explosive fill for the penguin anti-ship missile warhead [R]. DSTO-TR-1471: 2003.
- [5] Hutcheson R S, Spears Z A, Sanford M. Advanced recision kill weapon system (APKWS) IM solutions [C]//2006 Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. UK: IMEMTS, 2006.
- [6] Hatch R, Braithwaite P. Development of promising new cast cure explosives [C]// 2007 NDIA Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. Miami: IMEM, 2007.
- [7] Adams M, Olson J, Braithwaite P. DLE-C067: A new insensitive cast-cure formulation for large munition use [C]//2012 NDIA Insensitive Munitions & Energetic Materials Symposium. Las Vegas: IMEMTS, 2012.
- [8] 谢斌, 王述存, 黄川, 等. FOX-7 基浇注型 PBX 安全性能 [J]. *含能材料*, 2019, 27(11): 942-948.
XIE Xiao, WANG Shu-cun, HUANG Chuan, et al. Safety performance of FOX-7 based casting PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(11): 942-948.
- [9] 孙利杰. 高固相含量浇注 PBX 炸药工艺研究 [D]. 太原: 中北大学, 2016.
SUN Li-jie. Research on process of cast PBX explosives with high solid content [D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [10] 欧亚鹏, 闫石, 焦清介, 等. 浇注高聚物粘结炸药的粘结剂体系设计及应用研究 [J]. *兵工学报*, 2018, 39(1): 63-70.
OU Ya-peng, YAN Shi, JIAO Qing-jie, et al. Design and application of binder system for castable polymer bonded explosive [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(1): 63-70.
- [11] 金浩博. 粒度及粒度级配对 HMX 基浇注 PBX 炸药的性能影响研究 [D]. 太原: 中北大学, 2016.
JIN Hao-bo. The influence of the particle size and the gradation of the base explosive on the HMX based PBX [D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [12] 张峰峰. 浇注 PBX 炸药物料混合及固化工艺数值模拟与安全评估 [D]. 太原: 中北大学, 2020.
ZHANG Feng-feng. Numerical Simulation and Safety Assessment of Mixing and Curing Process of Cast-cured PBX Explosives [D]. Taiyuan: North University of China, 2020.
- [13] Makhov M N, Arkhipov V I. A simplified method for predicting the acceleration ability of aluminized high explosives [C]// 37th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe: ICT, 2006.
- [14] 孙业斌, 惠君明, 曹欣茂. 军用混合炸药 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1981.
SUN Ye-bin, HUI Jun-ming, CAO Xin-mao. Military explosive mixture [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1981.

- [15] Trzcinski W A, Cudzilo S, Czykl S. Studies of detonation characteristics of aluminum enriched RDX compositions[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2007, 32(5): 392-399.
- [16] 冯晓军, 王晓峰, 徐洪涛. Al 粉对炸药爆炸加速能力的影响[J]. *火炸药学报*, 2014, 37(5): 25-30.
FENG Xiao-jun, WANG Xiao-feng, XU Hong-tao. Influence of Al powder on the explosion acceleration ability for explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants (Huozhayao Xuebao)*, 2014, 37(5): 25-30.
- [17] Baker E L, Balas W, Capellos C. Combined effects aluminized explosives[R]. ARMET-TR-10007: 2010.
- [18] Radwan M A. Explosive characteristics of aluminized plastic bonded explosives based on octogen and polyurethane binder [C]// 32th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe: ICT, 2001(44): 1-9.
- [19] Gogulya M F, Brazhnikov M A, Makhov M N, et al. Effect of aluminum on the acceleration ability of composite formulations based on regular high explosives[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2012, 6(6): 730-743.
- [20] 王辉, 沈飞, 袁建飞. RDX/HMX 基含铝炸药做功能力的比较 [C]// 2014 年火炸药技术学术研讨会. 山东: 中国兵工学会, 2014: 41-44.
WANG hui, SHEN fei, YUAN Jian-fei. Contrast of power capability with RDX/HMX based aluminized explosive [C]// Seminar on explosive technology of 2014. Shandong: China ordnance Society, 2014: 41-44.
- [21] 殷明, 罗观, 代晓淦, 等. 高固含量 HMX 基浇注 PBX 的烤燃试验研究[J]. *火炸药学报*, 2014, 37(1): 44-48.
YIN Ming, LUO Guan, DAI Xiao-gan, et al. Cook-off test investigation of high solid-content cast PBX based on HMX [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants (Huozhayao Xuebao)*, 2014, 37(1): 44-48.
- [22] Naval Surface Warfare Center. MIL-E-82886(OS): Explosive, plastic-bonded, cast PBXN-109 [S]. US: Naval Sea Systems Command, Department of the Navy, 1993.
- [23] 李劲松. GJB736.8-1990: 火工品试验方法—71 °C 试验法[S]. 国防科学技术工业委员会, 1991.
LI Jin-song. GJB 736.8-1990: Initiating explosive device—Method of the test at 71 °C [S]. China Commission of Science Technology and Industry for National Defense, 1991.

Design and Performance of a Low Vulnerability PBX with HMX and Al

CAO Shi-jin^{1,2}, LI Zhong-you^{1,2}, XIONG Wei-qiang¹, WANG Peng¹, ZHANG Tian-fu¹, CHENG Di¹, GAO Yang¹

(1. Institute of Hubei aerospace chemistry technology, Xiangyang 441003, China; 2. Science and Technology on Aerospace Chemical Power Laboratory, Xiangyang 441003, China)

Abstract: To improve the energy property and low vulnerability of cast HMX-Al based explosives, high solid -content aluminized PBX were designed by analyzing the influences of Al and HMX contents on detonation properties. A casted PBX GOL-42 of 90% solid content with HTPB/IPDI binder was manufactured by introducing desensitizers and process agents and was optimized by three-grade grain-size distribution. The GOL-42 explosive showed good processing and safety properties. The detonation property, low vulnerability, mechanical property, thermal property and accelerated storage property were measured by their corresponding standard test methods. The results showed that its measured density, detonation velocity, detonation pressure, Gurney coefficient of $\Phi 25$ mm cylinder test was $1.782 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, $8251 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 26.9 GPa , $2.76 \text{ mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$, respectively. And in the low vulnerability examinations, including bullet impact test, slow cook-off test and fast cook-off test, all the reaction grades were combustion. Its estimated storage life was over 20 years. GOL-42 showed perfect overall properties and was predicted as a long-life low vulnerability cast explosive.

Key words: fragment and blast warhead; cast PBX; low vulnerability; detonation property; metal acceleration ability

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2020270

(责编: 姜梅)