

文章编号: 1006-9941(2011)06-0720-05

火箭发动机残余装药对战斗部毁伤效果影响的模拟研究

王宁, 赵孝彬, 王晨雪, 田军

(航天工业固体推进剂安全技术研究中心, 湖北 襄樊 441003)

摘要: 利用铅柱压缩量、铅墙扩孔值和冲击波超压与冲量等参数定量研究了推进剂残余装药对战斗部爆炸毁伤效果的影响, 并探讨了影响战斗部装药/推进剂体系铅柱压缩量的因素。试验结果表明, 四种推进剂的存在对战斗部装药/推进剂体系的铅柱压缩量均有不同程度的增益作用。HTPB 四组元推进剂对战斗部装药/推进剂体系的铅柱压缩量和铅墙扩孔值的贡献量要高于 HTPB 三组元推进剂 (HTPB-3), 其铅墙扩孔值的增益量分别为 81.4% 和 54%。比例距离范围为 3.5 ~ 12.5 m · kg^{-1/3} 时, HTPB-3 对 1 kg 战斗部装药 PBXN/0.6 kg HTPB-3 体系的超压 TNT 当量和冲量 TNT 当量分别贡献了 18.7% 和 19.7%。

关键词: 爆炸力学; 推进剂残余装药; 引爆技术; 毁伤效果增益

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.06.026

1 引言

便携式防空导弹等小型导弹攻击低空目标时, 在导弹到达目标后, 发动机内一般还有推进剂残余装药存在。此类导弹战斗部装药量比较固定, 如果能够将这些推进剂残余装药利用起来, 使其产生爆炸反应, 在理论上可以较大程度提高导弹的综合毁伤威力, 实例是俄罗斯的 SA-18 和“针”-S 等便携式防空导弹, 由于将火箭发动机残余装药和战斗部装药一起引爆促使战斗部的综合毁伤效果显著增强。国内外报道的高能推进剂的爆炸冲击波超压 TNT 当量范围为 1.07 ~ 1.3^[1-4], 于川等人^[5]利用板痕试验和爆炸冲击波超压试验进行过聚能装药引爆聚醚复合固体推进剂的研究, 并指出固体推进剂余药起爆技术在便携式防空导弹的战斗部-发动机一体化设计中具有重要的应用价值。

丁羟推进剂在战术导弹中应用广泛, 但由于在通常情况下仅发生燃烧, 所以其对战斗部爆炸毁伤效果影响的研究较少。本文开展了不同种类推进剂残余装药对模拟战斗部装药/残余推进剂体系爆炸毁伤效果的影响研究, 以猛度试验为原型重点分析了被模拟战斗部装药间接引燃或引爆的丁羟推进剂对战斗部装药/残余推进剂体系毁伤效果的作用及其影响因素。

收稿日期: 2011-08-31; **修回日期:** 2011-10-31

作者简介: 王宁(1982-), 男, 工程师, 主要从事固体推进剂安全性能研究。e-mail: sdwn8211@163.com

2 实验部分

2.1 样品组成

模拟战斗部装药(以下简称战斗部装药)采用浇注 PBX 炸药, 分别为 HTPB 基 PBXN 和 PX139 以及 GAP 基 GPBX; 模拟推进剂残余装药(以下简称推进剂残余装药)分别为 HTPB 三组元推进剂(以下简称 HTPB-3, 主要组成为 AP/Al/HTPB)、HTPB 四组元推进剂(以下简称 HTPB-4, 主要组成为 RDX/AP/Al/HTPB)、HTPB 模拟装药(主要组成为玻璃微珠/HTPB)、NEPE 推进剂(主要组成为 HMX/AP/Al/NB/PEG)和 GAP 推进剂(主要组成为 HMX/AP/Al/NB/GAP)等。传爆药采用 NEPE 推进剂, 药量为主装药的 2% ~ 3%。所有样品均自制。

2.2 铅柱压缩量试验

铅柱压缩量试验应用炸药猛度试验的原理, 试验过程主要依据炸药猛度试验标准 GB12440-1990 进行, 试验条件不同于猛度试验, 其余相同, 目的是利用铅柱压缩量来定量反映被引燃或引爆的推进剂残余装药对战斗部装药/推进剂体系(以下简称 W/P 体系)的毁伤效果。战斗部装药引燃或引爆推进剂后作用于两个钢片上, 钢片压缩下面的铅柱, 其试验装置示意图如图 1a 所示。为更好地模拟实际导弹情况, 战斗部装药和推进剂之间加入一定厚度钢片起隔离作用, 并在外面增加 1 mm 厚的钢管模拟壳体, 其试验装置示意图如图 1b 所示。

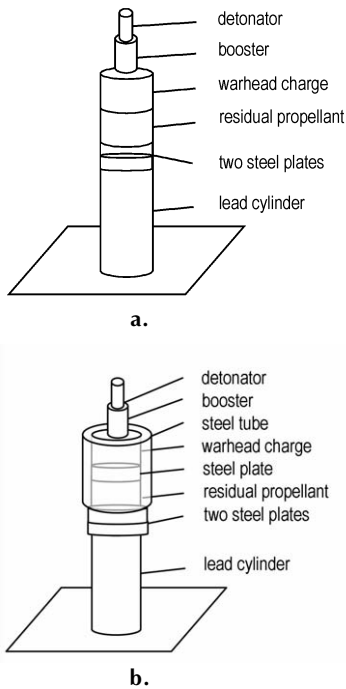


图 1 铅柱压缩量试验装置示意图

Fig. 1 Diagram of lead cylinder compression value test

2.3 铅墙扩孔值试验

铅墙扩孔值试验应用炸药作功能力试验的原理,试验过程主要依据炸药作功能力试验 GB12436-1990 进行,试样量不同于作功能力试验,其余相同,目的是利用铅墙扩孔值来定量反映被引燃或引爆的推进剂残余装药对 W/P 体系的毁伤效果,其试验装置如图 2 所示。



图 2 铅墙扩孔值试验示意图

Fig. 2 Diagram of lead block volume test

2.4 爆炸冲击波超压和冲量试验

铸装 TNT 和浇注 PBXN 药量分别为 1 kg, PBXN/HTPB-3 体系中 PBXN 药量为 1 kg 而 HTPB-3 药量为 600 g, 各两发。传感器采用昆山 CYG410 型低压和 CYG411 型中压自由场高频动态压力传感器,量程分别为 0~300 kPa 和 0~500 kPa。

药柱放置在离地面约 1.1 m 高的木架上,传感器安装在离地面 1 m 的专用支架上,传感器轴线方向指向爆心,从距爆心 3.5 m 开始,每间隔 1 m 布置两支传感器,相同距离的两支传感器与爆心形成的夹角不得大于 90°,共 18 个测点,传感器距爆心的水平距离分别为 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5, 9.5, 10.5, 11.5 m。

3 结果与讨论

3.1 固体推进剂对 W/P 体系铅柱压缩量的影响

3.1.1 固体推进剂种类对 W/P 体系铅柱压缩量的影响

利用 HTPB-3、HTPB-4、NEPE 和 GAP 等四类推进剂研究了固体推进剂对战斗部装药 GPBX/推进剂体系铅柱压缩量的影响,并和战斗部装药直接作用于 HTPB 模拟装药的情况进行了对比,采用图 1a 所示的试验装置,试验结果列于表 1 和图 3 中。从表 1 和图 3 中可知,与 HTPB 模拟装药相比,不同种类推进剂对 W/P 体系铅柱压缩量均有不同程度的增益作用,四种推进剂相比,GAP 推进剂的贡献量最多,HTPB-4 比 HTPB-3 的贡献大,这与推进剂的能量性能有关。

表 1 推进剂种类对战斗部装药 GPBX/推进剂体系毁伤效果的增益量

Table 1 Effect of different kind of solid propellant on warhead charge GPBX/propellant system damage effect gain

type of propellant	total lead cylinder compression value/mm	percentage of gain/%
simulating HTPB propellant	5.4	0
HTPB-3	11.5	113
HTPB-4	15.2	181.5
NEPE	24.4	351.8
GAP	25.3	368.5

Note: 1) mass of propellant is 25 g; 2) mass of warhead charge GPBX is 25 g.

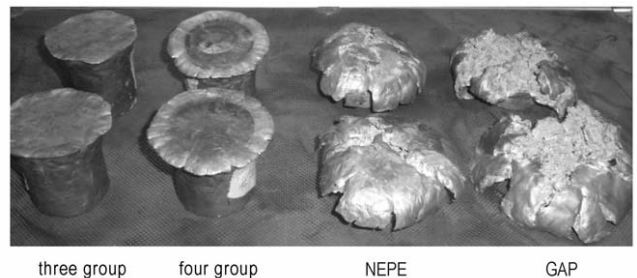


图 3 战斗部装药 GPBX/推进剂体系试验后受压铅柱的示意图

Fig. 3 Diagram of compressed lead cylinder after warhead charge GPBX/propellant system was tested

3.1.2 固体推进剂药量对 W/P 体系铅柱压缩量的影响

HTPB 推进剂药量对 W/P 体系铅柱压缩量的影响结果列于表 2 中。从表 2 中看出, 一定战斗部装药时, 增加推进剂 HTPB-3 或推进剂 HTPB-4 的药量, 铅柱总压缩量减小, 即 HTPB 推进剂对 W/P 体系铅柱压缩量的增益量也减少。增加推进剂 HTPB-3 药量时, 推进剂铅柱压缩量的贡献从正效应变为负效应(其中推进剂铅柱压缩量的贡献量为铅柱总压缩量减去 25 g PX139 铅柱压缩值 11.35 mm 的结果), 而增加推进剂 HTPB-4 装药量时, 推进剂铅柱压缩量的正效应贡献量有所减少, 这说明, 适量的 HTPB 推进剂对 W/P 体系铅柱压缩量有不可忽视的贡献量, 随着 HTPB 推进剂药量的增加, 这种贡献量有所减弱, 而且不含有 RDX 的推进剂 HTPB-3 对 W/P 体系铅柱压缩量的贡献量要低于含 RDX 的推进剂 HTPB-4。

表 2 推进剂药量对战斗部装药 PX139/推进剂体系铅柱压缩量的影响

Table 2 Effect of the amount of solid propellant on lead cylinder compression value of warhead charge PX139/propellant system

propellant	mass of propellant/g	total lead cylinder compression value/mm	lead cylinder compression value of propellant/mm	percentage of gain/%
HTPB-3	25	12.8	1.5	13.2
	49.7	6.89	-4.1	-36.1
HTPB-4	24.8	18.35	7	61.7
	49.9	13.57	2.4	21.1

Note: 1) mass of warhead charge PX139 is 25 g and lead cylinder compression value of PX139 is 11.35 mm.

3.1.3 壳体约束对 W/P 体系铅柱压缩量的影响

战斗部装药 GPBX/推进剂 HTPB-3 体系在外面增加壳体约束时的试验结果见表 3。从表 3 可以看出, 增加壳体约束时 GPBX 的铅柱压缩量是无壳体 GPBX 铅柱压缩量的 1.27 倍, 增加壳体约束时 GPBX/HTPB-3 体系的铅柱压缩量是无壳体 GPBX/HTPB-3 体系铅柱压缩量的 1.35 倍, 因此增加壳体约束有利于提高 W/P 体系的铅柱压缩量。此外, 存在壳体约束时 GPBX/HTPB-3 体系铅柱压缩量为 30.6 mm, GPBX 铅柱压缩量为 28.5 mm, GPBX/HTPB 模拟装药铅柱压缩量为 26.3 mm, 表明推进剂 HTPB-3 为 50 g GPBX/25 g HTPB-3 体系的铅柱压缩量贡献了 7%。和 HTPB 模拟装药相比, 推进剂 HTPB-3 为 W/P 体系的铅柱压缩量贡献了 16.3%。

表 3 壳体约束对战斗部 GPBX/推进剂 HTPB-3 体系铅柱压缩量的影响

Table 3 Effect of confinement of steel tube on lead cylinder compression value of GPBX/HTPB-3 system

confinement of steel tube	type of propellant	mass of propellant/g	total lead cylinder compression value/mm
no	no	no	22.5
yes	no	no	28.5
no	HTPB-3	25	22.7
yes	HTPB-3	25	30.6
yes	simulating HTPB propellant	25	26.3

Note: 1) mass of warhead charge GPBX is 50 g.

3.1.4 钢片厚度对 W/P 体系铅柱压缩量的影响

为更好地模拟导弹实际情况, 在 W/P 体系外面增加壳体约束的同时, 战斗部装药和推进剂之间加入起隔离作用的一定厚度的钢片, 采用图 1b 所示的试验装置。

在战斗部装药 GPBX 和推进剂 HTPB-4 之间分别插入 0 mm、0.7 mm 和 3 mm 的钢片, 研究了在壳体约束下被 GPBX 间接引燃或引爆的 HTPB-4 对 W/P 体系铅柱压缩量的影响, 试验结果列于表 4 中。从表 4 中发现, 随着钢片厚度的增加, GPBX/HTPB-4 体系铅柱压缩量逐渐衰减。钢片厚度分别为 0.7 mm 和 3 mm 时, 和 HTPB 模拟装药相比, 推进剂 HTPB-4 的存在减缓了 GPBX/HTPB-4 体系铅柱压缩量的衰减, 而且 3 mm 厚钢片下的减缓效果比 0.7 mm 厚钢片下的好。

表 4 钢片厚度对战斗部装药 GPBX/HTPB-4 体系铅柱压缩量的影响

Table 4 Effect of steel plate thickness on lead cylinder compression value of GPBX/HTPB-4 system

steel plate thickness/mm	type of propellant	total lead cylinder compression value/mm	percentage of gain/%
0	HTPB-4	26.6	
0.7	simulating HTPB propellant	14.5	0
	HTPB-4	23.5	62.1
3	simulating HTPB propellant	10.4	0
	HTPB-4	21.2	103.8

Note: 1) mass of propellant HTPB-4 is 25 g and mass of warhead charge GPBX is 25 g.

3.2 固体推进剂对 W/P 体系铅墙扩孔值的影响

HTPB-4 和 HTPB-3 两类推进剂对战斗部装药 PX139/推进剂体系铅墙扩孔值的影响结果列于表 5。

从表 5 中看出,固体推进剂在战斗部装药 PX139 爆炸冲击下发生燃烧或爆炸,两者爆炸产物共同作用于铅墙内腔,从而提高了战斗部装药 PX139/推进剂体系铅墙扩孔值。含有一定量 RDX 的推进剂 HTPB-4 对战斗部装药 PX139/推进剂体系铅墙扩孔值的增益效果要高于不含 RDX 的推进剂 HTPB-3,增益量达到 81.4%。

表 5 战斗部 PX139/推进剂体系的铅墙扩孔值试验结果

Table 5 Results of lead block volume of PX139/propellant system

mass of warhead charge PX139/g	type of propellant	mass of propellant/g	total lead block volume/mL	increased percentage of lead block volume by propellant/%
10	no	no	361	0
10	HTPB-3	10	556	54
10	HTPB-4	10	655	81.4

3.3 固体推进剂对 W/P 体系爆炸后冲击波超压和冲量的影响

战斗部装药 PBXN 和 PBXN/HTPB-3 体系的冲击波超压和比例距离的关系如图 4 所示,其中比例距离 $r/\sqrt[3]{w}$ 为水平爆心距离 r 和装药量 w 立方根的比值。从图 4 可以得出一定比例距离时, PBXN/HTPB-3 体系(或 PBXN)的超压 TNT 当量。将比例距离范围为 $3.5 \sim 12.5 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 的 9 个超压 TNT 当量值求平均,结果为 PBXN/HTPB-3 体系的超压 TNT 当量平均值为 1.756, PBXN 的超压 TNT 当量平均值为 1.479,表明推进剂 HTPB-3 为 1 kg PBXN/0.6 kg HTPB-3 体系的超压 TNT 当量贡献了 18.7%。

战斗部装药 PBXN 和 PBXN/HTPB-3 体系的冲击波冲量和比例距离的关系如图 5 所示。从图 5 可以得出,一定比例距离时, PBXN/HTPB-3 体系(或 PBXN)的冲量 TNT 当量。将比例距离范围为 $3.5 \sim 12.5 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 的 9 个冲量 TNT 当量值求平均,结果为 PBXN/HTPB-3 体系的冲量 TNT 当量平均值为 1.323, PBXN 的冲量 TNT 当量平均值为 1.105,表明推进剂 HTPB-3 为 1 kg PBXN/0.6 kg HTPB-3 体系的冲量 TNT 当量贡献了 19.7%。

从冲击波超压和冲量初步试验结果分析,HTPB-3 推进剂的存在增加了战斗部爆炸后产生的 TNT 当量。改变 HTPB-3 推进剂装药量、增加 PBXN/HTPB-3 体系壳体约束或插入 PBXN/HTPB-3 体系不同厚度的隔板等影响因素对战斗部/推进剂体系爆炸冲击波超压和冲量的作用规律还需继续深入开展工作。

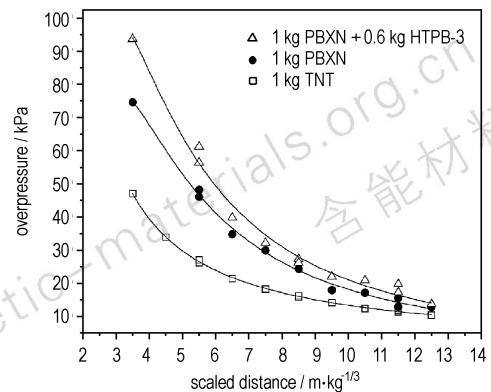


图 4 PBXN/HTPB-3 体系冲击波超压和比例距离的关系

Fig. 4 Relationship between shock wave overpressure of PBXN/HTPB-3 system and scaled distance

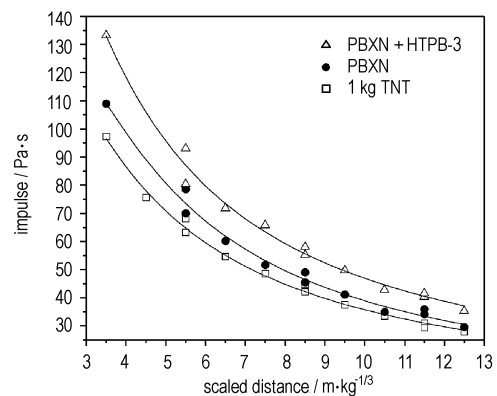


图 5 PBXN/HTPB-3 体系冲击波冲量和比例距离的关系

Fig. 5 Relationship between shock wave impulse of PBXN/HTPB-3 system and scaled distance

4 结论

(1) 在铅柱压缩量试验中四种推进剂的存在对战斗部装药/推进剂体系的铅柱压缩量均有不同程度的增益作用。

(2) 在铅柱压缩量试验中,增加壳体约束有利于提高战斗部装药/推进剂体系的铅柱压缩量。有壳体约束时推进剂 HTPB-3 为 50 g GPBX/25 g HTPB-3 体系的铅柱压缩量贡献了 7%。

(3) 推进剂 HTPB-4 对战斗部装药/推进剂体系的铅柱压缩量和铅墙扩孔值的贡献量要高于推进剂 HTPB-3。

(4) 比例距离范围为 $3.5 \sim 12.5 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时, 0.6 kg 推进剂 HTPB-3 对 1 kg PBXN/0.6 kg HTPB-3 体系的超压 TNT 当量和冲量 TNT 当量分别贡献了 18.7% 和 19.7%。

参考文献:

- [1] 汪炳麟,尹瑞康,张小平等译. 化学火箭和推进剂的危险性[M]. 西安: 航天科技集团公司第四研究院出版,1999.
- [2] 李广武. 硝酸酯增塑高能推进剂爆炸性能研究[J]. 固体火箭技术,2000,23(3): 44-48.
LI Guang-wu. Study on the explosion properties of nitrate plasticized high energy propellant [J]. *Solid Rocket Technology*, 2000,23(3): 44-48.
- [3] 阳建红,徐景龙. 高能推进剂 TNT 当量的计算研究[J]. 计算机仿真,2006,23(6): 299-301.
YANG Jian-hong, XU Jing-long. Calculation of TNT equivalence of high energy propellant [J]. *Computer Simulation*, 2006, 23(6): 299-301.
- [4] 李全,常新龙,王云超. 某型高能推进剂的爆炸当量[J]. 火工品, 2006,1: 16-18.
LI Quan, CHANG Xin-long, WANG Yun-chao. TNT equivalence of high energy propellant [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2006, 1: 16-18.
- [5] 于川,池家春,门举先. 固体火箭推进剂起爆技术[J]. 爆炸与冲击,2004,24(6): 499-502.
YU Chuan, CHI Jia-chun, MEN Ju-xian. An experimental research on initiating technique of solid rocket propellant [J]. *Explosion and Shockwaves*, 2004, 24(6): 499-502.

Simulation on Influence of Residual Rocket Motor Propellant on Warhead Damage Effect

WANG Ning, ZHAO Xiao-bin, WANG Chen-xue, TIAN Jun

(Aerospace Industry Research Center of Composite Solid Propellant Safety Technology, Xiangfan 441003, China)

Abstract: The influence of solid propellant on warhead damage effect was studied by these quantitative parameters including lead cylinder compression value, lead block volume, shock wave overpressure and impulse. Influencing factors that effect lead cylinder compression value of warhead charge/propellant system was also discussed. The results show that four kinds of propellants all could enhance lead cylinder compression value of warhead charge/propellant system in different degrees. Contribution to lead cylinder compression value of warhead charge/propellant system by four groups HTPB propellant is more than that by three groups HTPB propellant (HTPB-3). Increased percentage of lead block volume is 81.4% and 54%, respectively. When scaled distance ranges from $3.5 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ to $12.5 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$, HTPB-3 contributes to shock wave overpressure TNT equivalence and impulse TNT equivalence of 1 kg PBXN/0.6 kg HTPB-3 system by an increase of 18.7% and 19.7%, respectively.

Key words: mechanics of explosion; residual propellant charge; initiating technique; damage effect gain

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.06.026