

文章编号: 1006-9941(2015)02-0184-05

# 一种平板式微小型爆炸序列的传爆性能研究

赵象润<sup>1</sup>, 孙延臣<sup>1</sup>, 闫利伟<sup>2</sup>, 郝永平<sup>1</sup>, 金世鑫<sup>2</sup>

(1. 沈阳理工大学装备工程学院, 辽宁 沈阳 110159; 2. 辽宁北方华丰特种化工有限公司, 辽宁 抚顺 113003)

**摘要:** 设计了一种平板式微小型爆炸序列, 将 HMX 基导爆药 JO-9C(Ⅲ型) 在薄板空腔内压装成长条形代替柱形导爆药, 在其两端分别使用轴向与条形导爆药表面垂直的微小型电雷管和传爆管作为输入和输出, 形成包含两个直角的传爆路径。对比研究了不同温度(高温、低温、常温)条件下的爆炸序列在条形导爆药高度为 0.8 mm 和 1.8 mm 时的传爆性能。结果表明: 微小型电雷管、传爆管与药高为 0.8 mm 的条形导爆药组成双直角传爆路径的爆炸序列能够逐级传爆; 爆炸序列温度越高, 作用后对约束件破坏性越大。

**关键词:** 爆炸序列; 传爆导爆药; 药高**中图分类号:** TJ55; O69**文献标志码:** A**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.02.015

## 1 引言

爆炸序列是一系列激发感度由高到低而输出能量由低到高的火工品组成的有序排列, 其作用是把一个相当小的初始能量有控制地适当放大, 起爆弹药主装药<sup>[1]</sup>。爆炸序列是引信设计的核心内容之一, 也是弹药发挥作用的重要组成部分。由于需求的推动和技术的发展, 引信向着微型化、小型化、灵巧化、高安全性、高可靠性、低成本发展已成为趋势, 设计微小型爆炸序列也因此变得十分必要。

传统的爆炸序列由以下爆炸元件组成: 转换能量的爆炸元件(包括火帽和雷管)、控制时间的爆炸元件(包括延期管和时间药盘)、放大能量的爆炸元件(包括导爆管和传爆管)<sup>[2]</sup>。其中瞬发型爆炸序列是传统爆炸序列中最基本的结构形式, 其余诸如延期型、自毁型及组合型爆炸序列均可看作是在此基础上增加了相应的机构来实现。瞬发爆炸序列的一般构成是: 雷管→导爆药柱→传爆管。导爆药柱通常安装在安保机构运动单元(滑块或转子)里, 因此运动单元高度不能低于药柱总高, 且为集中能量, 其侧向尺寸不能过小, 导致整个机构体积较大, 很难应用在微小型爆炸序列上。针对这个问题, Charles H. Robinson 等<sup>[3]</sup>提出基于平行基板式爆炸序列的设计思路, 该设计将混有粘合剂

的六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)直接装在薄板预制沟槽里作为导爆药, 通过移动薄板起到类似于滑块的作用, 再使用微型输入药柱和受主药柱组成爆炸序列, 三者装药体积和小于 0.002 cm<sup>3</sup>; 国内王殿湘等<sup>[4]</sup>研究了不同许用传爆药在微小型爆炸序列中的起爆感度等性能, 认为超细化的 JO-9C 比较适合微小型爆炸序列的装药; 吴凯等<sup>[5]</sup>研究了直线微通道传爆药装药工艺及直线传爆的临界尺寸问题, 认为挤注工艺可用于小尺寸传爆沟槽装药, 直线传爆的临界直径是 0.5 mm。上述研究中, 文献[4]的爆炸序列结构采用“T”型导爆管和沟槽型传爆板, 装药结构较为复杂; 文献[5]研究目的在于直线微通道传爆, 未考察微通道传爆药被起爆后的输出特性。

为对微小型爆炸序列产品设计提供参考, 本研究在借鉴上述研究成果的基础上, 考虑到不同装药条件和温度条件对爆炸序列逐级传爆可靠性有重要影响, 借用性能固化的某微小型火工元件系列, 设计了模拟完整结构形态的平板式微小型爆炸序列(下称样件)。其主要结构是在薄金属平板上加工长条形空腔并压装超细化的 HMX 基导爆药 JO-9C(Ⅲ型), 形成近似扁平长方体状的条形导爆药代替传统结构中的柱形导爆药来传递爆轰, 并将某微小型电雷管和传爆管分别置于药条两端的上下表面作为导爆药的施主雷管和受主装药, 组成一个形状为“L”形的双直角传爆路径。为提高逐级传爆可靠性, 将条形导爆药设计成两端略大于中间宽度的圆弧, 并使装药部分的高度低于平板总高度, 以留置空气间隙。导爆药采用高度为 0.8 mm 和 1.8 mm 两种尺

**收稿日期:** 2013-12-24; **修回日期:** 2014-03-31**基金项目:** 辽宁省教育厅自然科学基金资助(L2013093)**作者简介:** 赵象润(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事 MEMS 火工品的研究。e-mail: xiangrui8010@126.com

寸进行装压,将样件控制在高温、低温及常温条件下进行传爆试验以考察逐级传爆性能。

## 2 试验

### 2.1 试验装置

图1为所设计的爆炸序列原理模型,试验压药模具如图2所示,压好导爆药的药板如图3所示,试验发火电路如图4所示。由图3可见,压装的导爆药药面平整密实,成型符合要求,条形装药工艺性良好。

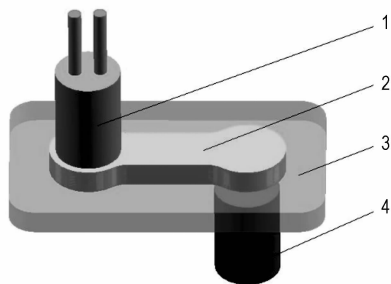


图1 爆炸序列模型

1—电雷管, 2—导爆药, 3—药板, 4—传爆管

Fig.1 Explosive train model

1—electric detonator, 2—lead explosive, 3—flat-sheet for charge, 4—booster

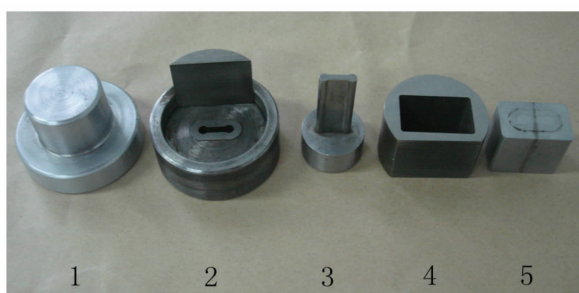


图2 压药模具

1—底座, 2—中模, 3—压药冲, 4—定位套, 5—垫块

Fig.2 Loading charge mould

1—pedestal, 2—mid-mould, 3—punch of press charge, 4—orientation sleeve, 5—support cushion

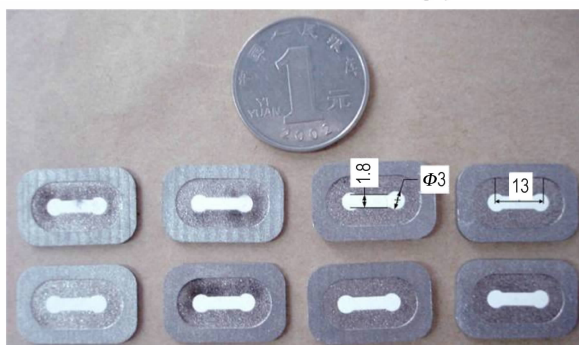


图3 导爆药板

Fig.3 Flat-sheet with lead explosive

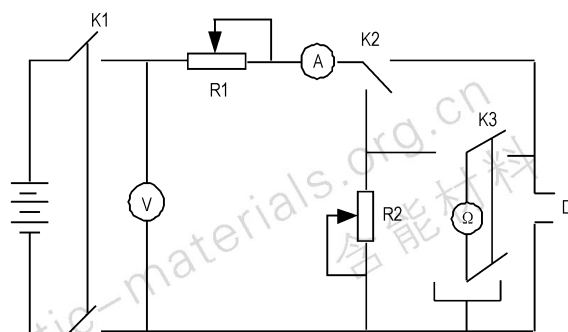


图4 发火电路

K1—安全开关, K2—水银点火开关, K3—电阻测量开关, R1—调流电阻, R2—等效电阻, D—电雷管

Fig.4 Fire circuit

K1—safe switch, K2—mercuric switch for igniting, K3—switch for measuring resistance, R1—resistance of adjusting current, R2—equivalent resistance, D—electric detonator

### 2.2 试验条件

导爆药: JO-9C(Ⅲ型),装药密度  $1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。导爆药压药压力:  $(120 \pm 10) \text{ MPa}$ 。输入元件: 某微小型电雷管,尺寸  $\Phi 2.5 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ,输出主装药为 CL-20,药量  $10 \text{ mg}$ 。输出元件: 某微小型传爆管,尺寸  $\Phi 2.5 \text{ mm} \times 6.5 \text{ mm}$ ,主装药 JO-9C(Ⅲ型),药量  $30 \text{ mg}$ 。零件材质: 上壳体(安装药板与电雷管,二者均间隙配合装入)和下壳体(安装传爆管,间隙配合装入)均使用超硬铝 7A04 加工,药板使用高强度马氏体耐热钢 1Cr11Ni2W2MoV 加工。

安装状态: 试验时电雷管和传爆管轴向均垂直于水平面,且输出端向下。电雷管在径向限位,轴向不限位,电雷管与导爆药在重力作用下自由接触(雷管底部有内凹的聚能窝);导爆药与传爆管输入端面空气间隙  $0.7 \text{ mm}$ ,传爆管径向限位,轴向下行限位,上行不限位。雷管→药板→传爆管三者通过壳体上的定位台阶对正。上下壳体使用 4 支 M3 螺钉连接紧固。

发火电流: DC 500 mA。

### 2.3 试验方法

火工品的高、低温性能试验通常在  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下保温 4 h 后发火测试<sup>[6]</sup>,故高、低温条件下的传爆性能试验也采用此方法。在原理验证试验阶段,为使试验结果更加可靠,采取比上述条件更为严格的内控指标进行试验,具体方法如下:

(1) 高温试验: 将样件放入已恒温在  $(60 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  的高温箱中保持 4 h 后取出,使用保温箱转运至测试间,接入已准备好的发火线路完成调试并发火。样件

从取出高温箱至发火用时不超过 5 min (实际用时 <1 min)。

(2) 低温试验: 将样件放入已恒温在  $(-50 \pm 2)^\circ\text{C}$  的低温箱中保持 4 h 后取出, 使用保温箱转运至测试间, 接入已准备好的发火线路完成调试并发火。样件从取出低温箱至发火用时不超过 5 min (实际用时 <1 min)。

(3) 常温试验: 将装配好的样件置于符合火工品储存要求的试验间, 不再进行人为温度环境干预, 在室温条件下直接接入线路进行试验 (试验时室温约为  $20^\circ\text{C}$ )。

### 3 结果与讨论

为研究设计的可行性, 对导爆药药高分别为 0.8 mm、1.8 mm 的两种装药条件爆炸序列分别进行了模拟极端热环境和一般热环境条件下的逐级传爆性能试验。

导爆药药高为 0.8 mm 时传爆性能试验结果见表 1, 样件残体状态如图 5 所示。由表 1 和图 5 可见, 三种温度条件下爆炸序列均可靠传爆, 上壳体产生随温度变化而长度明显不同的裂纹, 且呈现出规律性变化趋势, 导爆药输出威力较为适中。残体其余特征未见因温度不同而有区别: 药板装药空腔宽度由 1.8 mm 扩大为约 2.7 mm, 长度由 13 mm 扩大为约 13.4 mm, 药板外缘宽度方向较原尺寸扩大约 0.2 mm, 外缘长度方向无明显变化; 原  $\Phi 2.5\text{mm}$  电雷管安装孔胀大为约  $\Phi 3.8\text{mm}$ , 上壳体上产生始于电雷管安装孔沿着药条长度方向的裂纹, 且随着温度升高而裂纹由短变长, 上壳体其余部位的材料完整; 上、下壳体与药条

接触部位产生深度约为 0.4 ~ 0.5 mm 的类药条形的凹槽, 下壳体内原  $\Phi 2.5\text{mm}$  的传爆管安装孔胀大为约  $\Phi 4\text{mm}$ , 且安装孔底部限位台阶受冲击破碎。

导爆药药高为 1.8 mm 时传爆性能试验结果如表 2 所示, 样件残体状态如图 6 所示。由表 2、图 6 可见, 三种温度条件下爆炸序列均可靠传爆, 样件残体一致性较好, 不同温度时的残体特征没有明显区别, 导爆药威力偏大。作用后药板装药空腔宽度由 1.8 mm 扩大为约 3 mm, 长度由 13 mm 扩大为约 13.8 mm, 药板由于受压膨胀嵌入上壳体无法取出; 上壳体与药板表面接触部分被完全击穿分离, 分离面与药板表面近似垂直, 分离出的碎片高度 (亦即分离面高度) 4 mm, 碎片及下壳体与导爆药接触部位均产生约 0.8 ~ 0.9 mm 深度的类似药条状凹槽; 下壳体传爆管安装孔作用后特征同 0.8 mm 药高时作用后状态相似。

由表 1、表 2 及图 5、图 6 可以看出, 试验中使用的某微小型电雷管将长度方向与电雷管轴向垂直的条形导爆药全部可靠起爆, 相同条件下多次试验结果基本相同, 重复性较好, 说明装有 10 mg CL-20 主装药的施主雷管通过垂直起爆的方式起爆条形导爆药合适, 该电雷管可以垂直起爆 0.8 mm 高的 JO-9C (III 型) 条形导爆药。被起爆的两种装药条件的条形导爆药亦将轴向垂直于其长度方向的受主装药 (传爆管) 全部起爆, 说明 0.8 mm 高的条形导爆药输出能量已能够垂直起爆传爆管。综合试验结果, 表明某  $\Phi 2.5\text{mm}$  系列的微小型火工元件与尺寸为 1.8 mm (W)  $\times$  0.8 mm (H)  $\times$  13 mm (L) 条形导爆药组成形状为“L”形双直角传爆路径的爆炸序列能够可靠逐级传爆。

表 1 0.8 mm 药高导爆药传爆性能试验结果

Table 1 Test results of transfer performance for lead explosive with the thickness of 0.8 mm

sample temperature / $^\circ\text{C}$	number	lead explosive mass/mg	results of detonating		samples phenomenon	flaw length <sup>1)</sup> /mm
			lead explosive	booster		
50 $\pm$ 2	10	30 $\pm$ 2	detonated	detonated	integrated	5 ~ 7
normal temperature	12	30 $\pm$ 2	detonated	detonated	integrated	7 ~ 9
60 $\pm$ 2	10	30 $\pm$ 2	detonated	detonated	integrated	10 ~ 12

Note: 1) macroscopic linear length from origination to end of the flaw only.

表 2 1.8 mm 药高导爆药传爆性能试验结果

Table 2 Test results of transfer performance for lead explosive with the thickness of 1.8 mm

sample temperature / $^\circ\text{C}$	number	lead explosive mass/mg	results of detonating		samples phenomenon
			lead explosive	booster	
-50 $\pm$ 2	10	70 $\pm$ 3	detonated	detonated	broken <sup>1)</sup>
normal temperature	12	70 $\pm$ 3	detonated	detonated	broken
60 $\pm$ 2	10	70 $\pm$ 3	detonated	detonated	broken

Note: 1) the up-crust is disintegrated, but the under-crust is integrated.

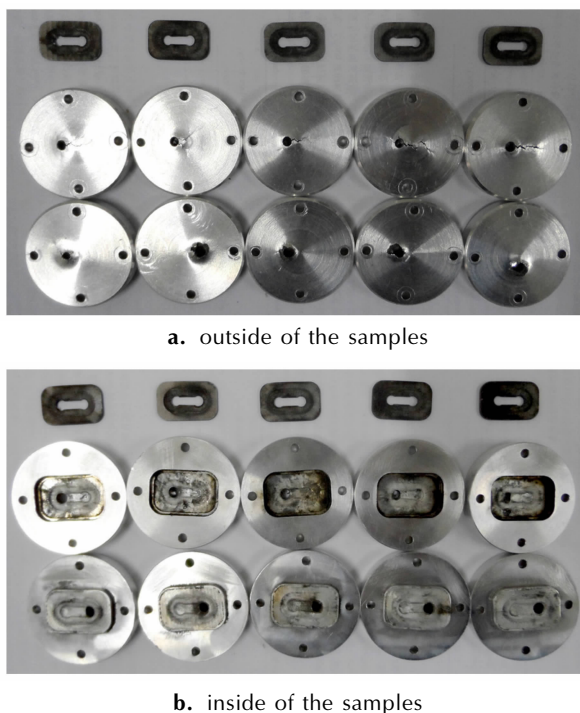


图5 0.8 mm 药高导爆药传爆性能试验样件残体  
Fig.5 Residues photos of samples for transfer performance test of lead explosive with the thickness of 0.8 mm

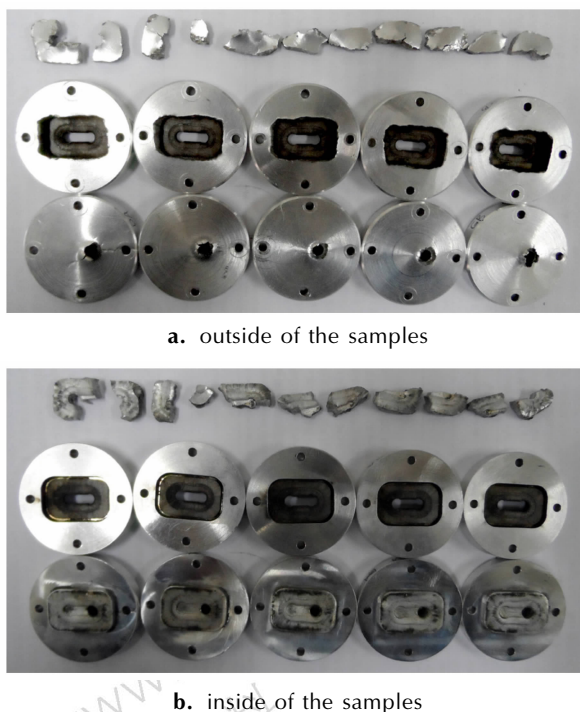


图6 1.8 mm 药高导爆药传爆性能试验样件残体  
Fig.6 Residues photos of samples for transfer performance test of lead explosive with the thickness of 1.8 mm

0.8 mm 药高导爆药作用后,上壳体状态表明:30 mg 导爆药被起爆后释放的能量使上壳体对药剂的

约束面产生裂纹但不足以完全击穿分离(见图5a)。裂纹平均长度分别为:低温时约6 mm、常温时约8 mm、高温时约11 mm(见表1),明显具有裂纹长度随温度单调增加的趋势。这可能是因为以下双重作用所致:1)金属材料在温度升高时抗拉强度和屈服极限单调降低(低碳钢除外)<sup>[7]</sup>,故受爆炸冲击作用时温度高的材料较之温度低时更容易屈服断裂;2)温度升高时,炸药组分分解加速,使化学反应区反应速率增大,这样化学反应区内完成反应所经历的时间越短,反应区宽度变窄,能量损失相对减少,因而爆轰较低温时成长更加完全、释放能量更大,导致对零件的破坏性更大。与导爆药药高为0.8 mm时不同,1.8 mm药高的导爆药作用后对上壳体形成的破坏未见因温度不同而明显有别。这是因为在约束状态和起爆条件相同时,假设爆轰成长完全、不考虑边界效应等因素,则药剂释能与药量近似成正比,而后者的药量约是前者的2.3倍,因此即使在低温条件下导爆药释能较之高温时略小,但也足以将上壳体导爆药约束面彻底击穿碎裂(见图6),故温度的影响未能在残体特征上宏观体现。综合传爆试验后上壳体状态,也反映出本设计方案的不足:药剂约束面强度却最薄弱,在产品设计时应予避免。

#### 4 结论

(1)10 mg CL-20 主装药的施主雷管可以垂直起爆0.8 mm厚度的JO-9C(Ⅲ型)条形导爆药。

(2)利用微小型火工元件与条形导爆药组成“L”形状的双直角传爆路径的爆炸序列能够可靠传爆,其中JO-9C(Ⅲ型)条形导爆药形状为1.8 mm(W)×0.8 mm(H)×13 mm(L)。

(3)爆炸序列温度越高,作用后对药剂约束零件造成的破坏越大。

#### 参考文献:

- [1] 王凯民,温玉全. 军用火工品设计技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006:249-254.  
WANG Kai-min, WEN Yu-quan. Design of Initiators and Pyrotechnics for Weapon Systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 249-254.
- [2] 张合,李豪杰. 引信机构学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2007:51-54.  
ZHANG He, LI Hao-jie. Science of Fuze Machine[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007: 51-54.
- [3] Robinson Charles H, Wood Robert H, Gelak Mark R, et al. Micro-scale firetrain for ultra-miniature electro-mechanical safety and arming device: US7069861B1[P], Jul. 4, 2006.

- [4] 王殿湘, 胡亚平. 微小型爆炸序列装药研究[J]. 火工品, 2008 (6): 22-24.  
WANG Dian-xiang, HU Ya-ping. An investigation on charge of miniaturized explosive train[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2008 (6): 22-24.
- [5] 吴凯, 刘玉存, 刘登程, 等. 微通道挤注药剂配方与装药工艺研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(2): 251-256.  
WU Kai, LIU Yu-cun, LIU Deng-cheng, et al. Study on the extrusion-cast booster and charging process for the small grooved Channel[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(2): 251-256.
- [6] 王凯民, 张学舜. 火工品工程设计与试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 189-193.  
WANG Kai-min, ZHANG Xue-shun. *Engineering Design and Test Technology of Initiators and Pyrotechnics*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 189-193.
- [7] 梅凤翔, 周际平, 水小平. 工程力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 294.  
MEI Feng-xiang, ZHOU Ji-ping, SHUI Xiao-ping. *Engineering Mechanics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 294.

## Detonation Transfer Performance of a Flat-sheet Style and Micro-scale Explosive Train

ZHAO Xiang-run<sup>1</sup>, SUN Yan-chen<sup>1</sup>, YAN Li-wei<sup>2</sup>, HAO Yong-ping<sup>1</sup>, JIN Shi-xin<sup>2</sup>

(1. School of equipment engineering of Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 2. North Hua-feng Special Chemistry and Industry Ltd. of Liaoning, Fushun 113003, China)

**Abstract:** A flat-sheet style and micro-scale explosive train of loaded HMX-base lead explosive JO-9C (Ⅲ) in a thin sheet to form strip-shaped lead explosive instead of columned lead explosive was designed. Micro-scale electric detonator and booster in two terminals of explosive train, whose axes are upright with surface of strip-shaped lead explosive, were used as input and output of explosive train, and the detonation transfer route which includes two right-angle was formed finally. The detonation transfer performances of explosive train with strip-shaped lead explosive with the thickness of 1.8 mm and 0.8 mm under different temperature (high temperature, low temperature, room temperature) conditions were studied and compared. Results show the detonation of the explosive train with double right-angle route composed of micro-scale electric detonator, booster and strip-shaped lead explosive with the thickness of 0.8 mm can transfer step by step. The higher the temperature of explosive train, the greater the destructivity to the restrictions after action.

**Key words:** explosive train; detonation transfer lead explosive; thickness of charge

**CLC number:** TJ55; O69

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.02.015



### 《含能材料》"观点"征稿

为了丰富学术交流形式,及时传递含能材料领域同行们的学术观点和思想,《含能材料》开设了"观点"栏目。"观点"栏目的来稿应观点鲜明、内容新颖、形式上短小精悍。欢迎含能材料各领域的专家积极来稿。来稿时请附个人简介及主要研究工作介绍。

《含能材料》编辑部