

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.06.002

# 微序列隔板对 MEMS 火工品传爆性能的影响<sup>\*</sup>

李 慧 任 炜 褚恩义 白颖伟 王可暄 尹 明

陕西应用物理化学研究所应用物理化学国家级重点实验室(陕西西安,710061)

[摘 要] 为研究微传爆序列结构中隔板对其传爆性能影响,采用有限元分析方法,模拟了微小直径药柱(以 CL-20 和 JO-9C 作为一级、二级装药,直径分别为 2 mm 和 4 mm,径高比为 1)在镍和不锈钢材料下,不同隔板厚度对微序列起爆传爆能力的影响。得到了 CL-20 起爆 JO-9C 装药时这两种材料隔板的临界起爆厚度,分别为 1.6 mm(不锈钢)、1.4 mm(镍),材料镍的隔爆能力优于不锈钢。对仿真结果进行了试验验证,结果表明,该仿真能够较准确地反映实际情况。

[关键词] 爆炸力学;隔板;传爆序列;仿真分析

[分类号] TJ450.1

## 引言

MEMS(micro-electro-mechanical system,微机电系统)火工品已经成为新一代智能弹药发展的关键技术<sup>[1]</sup>。基于 MEMS 火工技术的微小型传爆序列是实现火工品 MEMS 安全和发火系统的重要技术。微传爆序列中,隔板是其能量传递的界面,通过改变隔板的材料及厚度,可实现上下级装药的传爆或隔爆,以确保传爆序列的可靠性和安全性。目前,胡湘渝<sup>[2]</sup>以直径 50 mm 的 8701 炸药、Jette 等<sup>[3]</sup>以直径为 50 mm 的硝基甲烷炸药做了隔板对冲击波的衰减研究;王作山等<sup>[4]</sup>建立了 RDX 炸药在有机玻璃中的衰减模型;但这些研究主要是针对大直径装药的传爆性能。

微小药柱与大直径药柱的爆轰机理存在很大的差别,目前研究结果较少。微传爆序列的结构如图 1

所示,隔板位于一级、二级药柱之间。本文中,针对微传爆序列中隔板材料及结构对其传爆性能的影响进行研究,以 CL-20 和 JO-9C 作为微序列的一级和二级装药,直径分别为 2 mm 和 4 mm,径高比是 1。基于 JWL 和 Lee-Tarver 模型,采用有限元仿真方法研究不锈钢和镍材料的隔板对微序列传爆能力的影响,并进行试验验证,为 MEMS 火工品的设计研究提供依据。

## 1 微序列隔板起爆数值模拟

### 1.1 有限元模型

选择 AUTODYN 软件进行仿真研究<sup>[5]</sup>。微序列为轴对称结构,因此,取一级药柱底面中心点为坐标原点、X 轴为对称轴建立模型,如图 2。考虑仿真精度及计算时间,有限单元大小设置为 0.1 mm。在模型轴对称处设立观测点(1<sup>#</sup>~18<sup>#</sup>),获取压力时间曲线。模拟过程从一级药柱开始,以中心点起爆方式起爆。

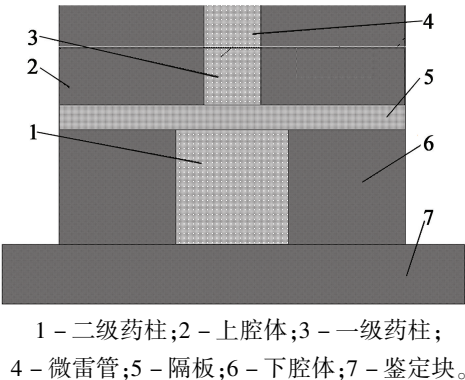


图 1 微序列结构

Fig.1 Structure diagram of the micro sequence

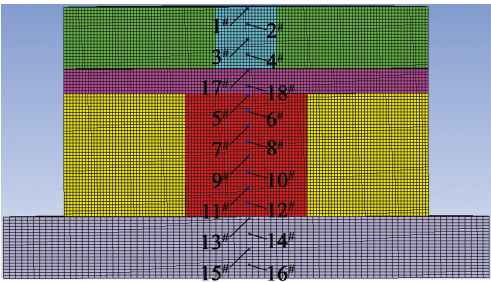


图 2 仿真有限元模型

Fig.2 Finite element model for simulation

<sup>\*</sup> 收稿日期:2016-06-29

基金项目:兵器集团战略基金

作者简介:李慧(1987-),女,硕士,工程师,主要从事高新火工系统技术研究。E-mail:lihuilingshi@163.com

1.1.2 状态方程与材料参数

研究涉及药柱材料、空气介质、壳体及鉴定块材料。一、二级药柱的爆轰为非线性流体力学问题。壳体及鉴定块材料涉及固体大变形,选用流固耦合法进行计算。

1)一级药柱的状态方程选用 JWL 方程,此方程可描述爆轰产物膨胀过程<sup>[6-7]</sup>,其形式为:

$$p=A(1-\frac{\omega}{R_1V})e^{-R_1V}+B(1-\frac{\omega}{R_2V})e^{-R_2V}+\frac{\omega E}{V}。$$
 (1)

式中: $p$  为爆轰产物压力; $V$  为相对体积; $E$  为体积能量密度; $A$ 、 $B$  为线性系数; $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为非线性系数。

CL-20 的各参数取值如表 1 所示。

表 1 CL-20 的 JWL 模型参数

Tab. 1 JWL equation parameters of CL-20						
$\rho_0/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$A/$ GPa	$B/$ GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E/$ ( $\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}$ )
1.84	1 637	186	6.5	2.7	0.5	11.5

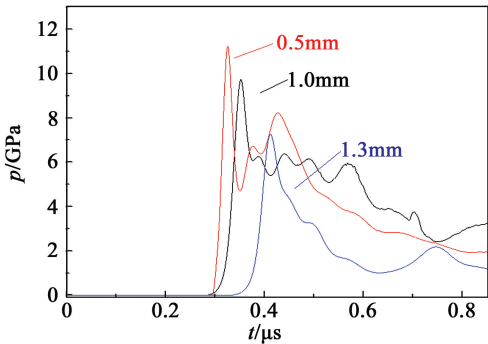
2)隔板、壳体及鉴定块均选用 Gruneisen 材料方程,此方程可通过材料的压缩压力和膨胀压力表示固体大变形。压缩压力定义为:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + a \mu) E。$$
 (2)

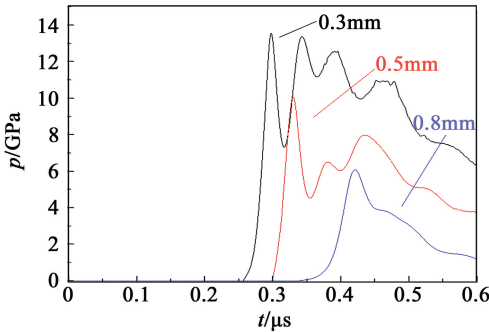
膨胀压力为:

表 3 JO-9C 的 Lee-Tarver 方程参数

Tab. 3 Lee-Tarver parameters of JO-9C							
$\rho_0/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E/(\text{J} \cdot \text{mm}^{-3})$	
1.84	852.4	10.8	4.6	1.3	0.38	10.2	
$a$	$b$	$c$	$d$	$y$	$e$	$g$	$z$
0.667	0	0.667	0.111	1	0.333	1.0	2.0



(a) 不锈钢隔板



(b) 镍隔板

图 3 二级药柱输入端面压力-时间曲线

Fig. 3 Cross section input pressure-time curves of secondary column

$$p=\rho_0C^2\mu+(\gamma_0+a\mu)E。$$
 (3)

式中: $\mu$  为压缩程序, $\mu=1/V-1$ , $V$  为相对体积; $C$  为冲击波速度与质点速度曲线的截距; $\gamma_0$  为 Gruneisen 系数; $a$  为对  $\gamma_0$  的一阶体积修正; $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  为冲击波速度与质点速度曲线斜率系数<sup>[8]</sup>。

不同材料隔板的 Gruneisen 参数取值见表 2。

表 2 不同材料隔板的 Gruneisen 参数

Tab. 2 Gruneisen parameters of the gaps made of different materials						
材料	$\rho_0/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$C/$ ( $\text{s} \cdot \text{km}^{-1}$ )	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$a$
不锈钢	7.83	4.569	1.490	0	0	0.46
镍	8.81	4.190	1.540	0	0	0.41

3)二级药柱爆轰是由冲击波压力作用引起,反应过程不可忽略,以 Lee-Tarver 方程描述其作用过程<sup>[9-10]</sup>。

$$\frac{dF}{dt}=I(1-F)^b\left(\frac{\rho}{\rho_0}-1-a\right)^x+G_1(1-F)^cF^dp^y+G_2(1-F)^eF^gp^z。$$
 (4)

式中: $F$  为炸药反应度; $t$  为时间; $\rho$  为密度; $\rho_0$  为初始密度; $p$  为压力; $I$ 、 $b$ 、 $a$ 、 $x$ 、 $G_1$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $y$ 、 $G_2$ 、 $e$ 、 $g$  和  $z$  为方程系数。

JO-9C 的参数见表 3。

2 仿真结果与分析

采用流固耦合法对微序列隔板起爆进行仿真。图 3 中,在一级药柱完全爆轰的情况下,得到冲击波

经过不同厚度不锈钢和镍隔板后二级药柱输入端面的压力。

仿真表明,随着隔板厚度增大,二级药柱输入端压力大幅降低,相同厚度的镍隔板比不锈钢隔板压力衰减更大。以两种隔板同为 0.5 mm 为例:不锈钢隔板 0.3 μs 时爆轰波到达二级药柱输入端,最大压力为 11.85 GPa;镍隔板 0.35 μs 时爆轰波才到二级药柱输入端,最大压力为 9.80 GPa。说明爆轰波在镍隔板中的传播速率比不锈钢隔板慢,且镍隔板对爆轰压力衰减的能力比不锈钢隔板更强。

2.1 微序列不锈钢隔板起爆仿真结果

计算通过不同厚度不锈钢隔板后二级药柱的爆轰参数,研究不锈钢材料对爆轰波压力传播的影响规律。药柱观测点的  $p-t$  曲线表明其不同深度不同时刻的压力情况。由二级药柱观测点(6# ~ 11#)的  $p-t$  曲线可对其爆轰情况进行判定,如图 4。

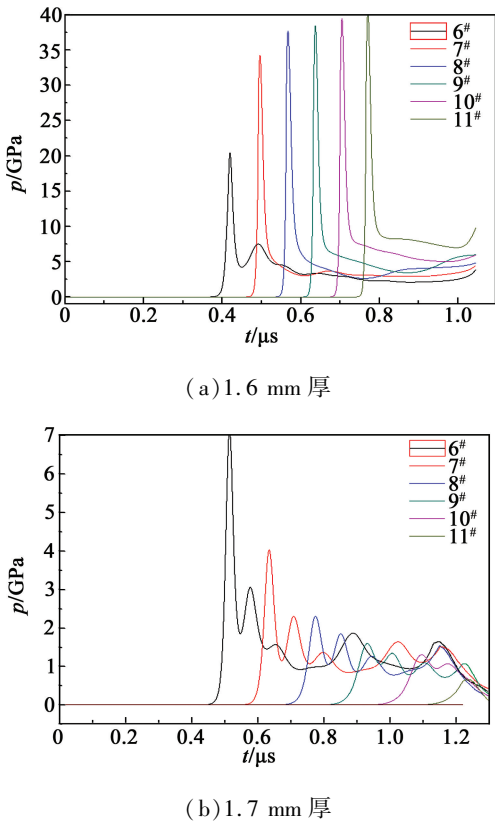


图 4 通过不锈钢隔板的二级药柱压力-时间曲线  
Fig.4 Time dependence of secondary column pressure across the stainless steel gap

如图 4(a),隔板厚 1.6 mm,  $t = 0.4 \mu\text{s}$  时,爆轰传到二级药柱底部发生点火,沿着爆轰波传播的方向,观测点压力达到其爆轰压力并稳定传播,说明二级药柱达到稳定爆轰。

图 4(b)中,隔板厚 1.7 mm 时,当爆轰传到二级药柱底部,沿着爆轰波传播的方向,药柱底部观测

点压力逐渐上升至 7 GPa 左右,然后其压力值随时间下降,并且随着药柱深度的增加,各观测点压力峰值大幅减小,且远低于爆轰压力,二级药柱未爆轰。

2.2 微序列镍隔板起爆仿真结果

模拟通过不同厚度镍隔板后二级药柱的爆轰情况,研究镍材料对爆轰波压力传播的影响规律。由在二级药柱设置的观测点(6# ~ 11#)的  $p-t$  曲线对其爆轰情况进行判定。

图 5(a)中,隔板厚 1.4 mm 时,沿爆轰波传播方向,观测点压力逐渐上升后稳定传播,二级药柱稳定爆轰。

图 5(b)中,隔板厚 1.5 mm,当  $t = 0.43 \mu\text{s}$  时,爆轰传到二级药柱底部,沿爆轰波传播的方向,药柱观测点压力逐渐上升至 5.6 GPa 左右,然后其压力值随时间减小,并且随着药柱深度的增加,各观测点压力值大幅降低,最终低于其爆压,说明二级药柱未发生爆轰。

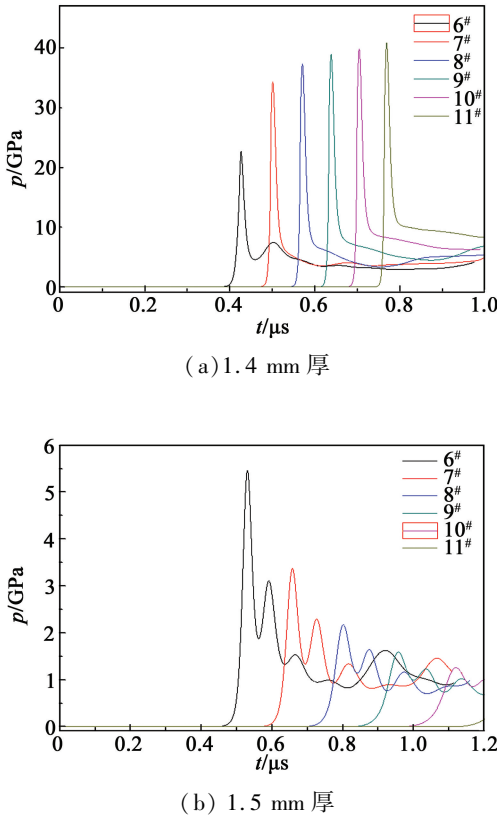


图 5 通过镍隔板的二级药柱压力-时间曲线  
Fig.5 Time dependence of secondary column pressure across the nickel gap

由仿真结果可知,微序列中密度为  $1.84 \text{ g/cm}^3$  的 CL-20 可传爆 JO-9C 的不锈钢和镍材料的临界隔板值为 1.6 mm、1.4 mm,可安全隔爆的不锈钢和镍的临界隔板值为 1.7 mm、1.5 mm。为验证仿真的正确性,对其进行试验。

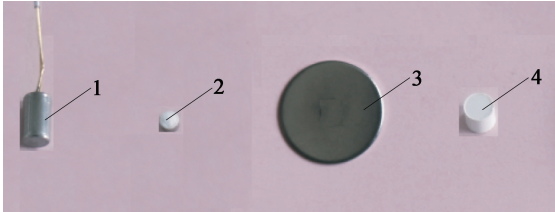
3 微序列隔板起爆试验验证

3.1 试验装置

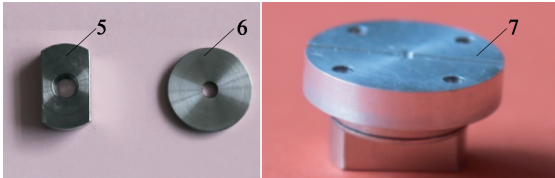
通过微序列隔板起爆发火试验对仿真结果进行验证,运用小雷管对一级药柱进行起爆,起爆方式为电起爆,发火条件为 12 V。一级药柱尺寸 $\varnothing 2\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ ,密度  $1.84\text{ g/cm}^3$ ;二级药柱 $\varnothing 4\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ ,密度  $1.84\text{ g/cm}^3$ ;上腔体尺寸为 $\varnothing 1.2\text{ mm}\times 0.2\text{ mm}$ ;下腔体为 $\varnothing 1.2\text{ mm}\times 0.4\text{ mm}$ ;鉴定块为 $\varnothing 1.6\text{ mm}\times 0.2\text{ mm}$ 。隔板结构如表 4,试验样品如图 6。

表 4 试验中隔板结构参数

Tab. 4 Dimension of the testing gap			
编号	隔板外径/mm	隔板厚度/mm	材料
1 <sup>#</sup>	12	1.6	不锈钢
2 <sup>#</sup>	12	1.7	不锈钢
3 <sup>#</sup>	12	1.4	镍
4 <sup>#</sup>	12	1.5	镍



(a) 样品



(b) 样品

(c) 装配图

1 - 雷管;2 - 一级药柱;3 - 隔板;  
4 - 二级药柱;5 - 下腔体;6 - 上腔体;7 - 装配图。

图 6 试验样品与装配图

Fig. 6 Testing samples and device

3.2 试验结果

此次共进行了 16 发试验,其中,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>样品各 4 发,结果如表 5。表 5 中,1 表示药柱作用;0 表示药柱未作用。

如图 7 所示,1<sup>#</sup>样品上腔体被炸裂,鉴定块出现很大凹痕,表征 JO-9C 完全爆轰;2<sup>#</sup>样品隔板并未击穿,上腔体中二级药柱完好存在,JO-9C 未爆轰。图 8 中 3<sup>#</sup>样品上腔体出现大变形,鉴定块出现大凹痕,JO-9C 完全爆轰;4<sup>#</sup>样品隔板击穿,但上腔体中二级药柱并未发生大的损耗,JO-9C 未爆轰。试验结果与仿真结果一致,仿真结果是可靠的。

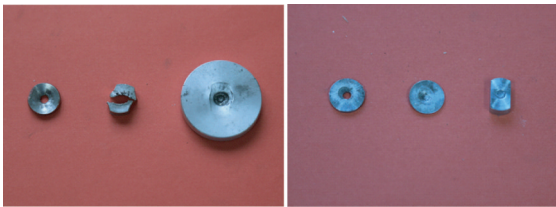
4 结论

通过微装药爆轰波经不同材料隔板后的爆轰情

表 5 微序列隔板起爆试验结果

Tab. 5 The experimental results of initiation test on micro sequence gap

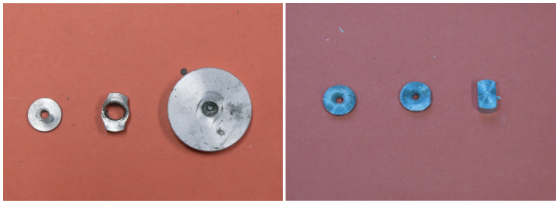
样品	隔板厚度/mm	材料	二级药柱是否作用	现象
1 <sup>#</sup>	1.6	不锈钢	1	爆轰
1 <sup>#</sup>	1.6	不锈钢	1	爆轰
1 <sup>#</sup>	1.6	不锈钢	1	爆轰
1 <sup>#</sup>	1.6	不锈钢	1	爆轰
2 <sup>#</sup>	1.7	不锈钢	0	药柱部分燃烧,壳体被熏黑
2 <sup>#</sup>	1.7	不锈钢	0	药柱受到破坏,未燃烧
2 <sup>#</sup>	1.7	不锈钢	0	药柱部分燃烧,壳体被熏黑
2 <sup>#</sup>	1.7	不锈钢	0	药柱部分燃烧,壳体被熏黑
3 <sup>#</sup>	1.4	镍	1	爆轰
3 <sup>#</sup>	1.4	镍	1	爆轰
3 <sup>#</sup>	1.4	镍	1	爆轰
3 <sup>#</sup>	1.4	镍	1	爆轰
4 <sup>#</sup>	1.5	镍	0	药柱部分燃烧,壳体被熏黑
4 <sup>#</sup>	1.5	镍	0	药柱部分燃烧,壳体被熏黑
4 <sup>#</sup>	1.5	镍	0	药柱部分燃烧,壳体被熏黑
4 <sup>#</sup>	1.5	镍	0	药柱部分燃烧,壳体被熏黑



(a) 1.6 mm 厚(1<sup>#</sup>) (b) 1.7 mm 厚(2<sup>#</sup>)

图 7 不锈钢隔板起爆试验结果

Fig. 7 The experimental results of initiation test on stainless steel gap



(a) 1.4 mm 厚(3<sup>#</sup>) (b) 1.5 mm 厚(4<sup>#</sup>)

图 8 镍隔板起爆试验结果

Fig. 8 The experimental results of initiation test on nickel gap



况数值研究及试验验证,可以得出如下结论:

1)微序列中,以不锈钢和镍材料作隔板时,爆轰波经不锈钢隔板后对 JO-9C 的起爆能力大于镍。因此对于上述两种材料,从微序列隔爆方面来看,镍优于不锈钢。

2)对于径高比为 1、密度为  $1.84 \text{ g/cm}^3$  的 CL-20,其可起爆 JO-9C 装药的不锈钢和镍材料的临界隔板值为 1.6 mm、1.4 mm。且仿真结果与试验一致,此仿真方法可解决微序列起爆传爆的问题,为 MEMS 火工品设计提供依据。

### 参 考 文 献

- [1] 孔俊峰,李兵.新一代火工技术及其应用[J].国防技术基础,2010(7):40-43,51.
- [2] 胡湘渝.凝聚炸药二维冲击波起爆研究[D].北京:北京理工大学,1999.
- [3] JETTE F X, GOROSHIN S, HIGGINS A. Shock reactivity of non-porous mixtures of manganese and sulfur[C]//15th APS Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. Hawaii, US, 2007:1033-1036.
- [4] 王作山,刘玉存,郑敏,等.爆轰冲击波在有机隔板中衰减模型的研究[J].应用基础与工程科学学报,2001,9(4):316-319.  
WANG Z S, LIU Y C, ZHENG M, et al. Study on the attenuating model of detonation shock wave in the PMMA gap[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2001, 9(4):316-319.
- [5] 王辉,沈飞,袁建飞,等. JO-9159 炸药强爆轰雨贡组实验及产物的状态方程研究[J].火炸药学报,2014,37(6):12-15.  
WANG H, SHEN F, YUAN J F, et al. Research on the Hugoniot Experiment and EOS of product for JO-9159

- explosive overdriven detonation[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2014, 37(6):12-15.
- [6] 南宇翔,蒋建伟,王树有,等.一种 CL-20 基压装混合炸药 JWL 状态方程参数研究[J].含能材料,2015,23(6):516-521.  
NAN Y X, JIANG J W, WANG S Y, et al. JWL equation of state of detonation product for CL-20 based pressed composite explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(6):516-521.
- [7] 沈飞,王辉,袁建飞.一种确定 JWL 状态方程参数的简易算法[J].振动与冲击,2014,33(9):107-110.  
SHEN F, WANG H, YUAN J F. A simple mentod for determining parameters of JWL EOS[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(9):107-110.
- [8] 马明迪,崔万善,曾志银,等.大口径火炮弹丸挤进过程膛腔动力响应分析[J].中北大学学报(自然科学版),2014,35(3):263-269.  
MA M D, CUI W S, ZENG Z Y, et al. Dynamic response analysis of chamber throat in the engraving process of heavy caliber gun projectile[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2014, 35(3):263-269.
- [9] 孙占峰,徐辉,李庆忠,等.钝感高能炸药爆轰产物 JWL 状态方程再研究[J].高压物理学报,2010,24(1):55-60.  
SUN Z F, XU H, LI Q Z, et al. Further study on JWL equation of state of detonation product for insensitive high explosive[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(1):55-60.
- [10] LEE E L, TARVER C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives[J]. Physics of Fluids, 1980, 23(12):2362-2372.

## Effect of Gap in Micro Sequence on Detonation Performance of MEMS

LI Hui, REN Wei, CHU Enyi, BAI Yingwei, WANG Kexuan, YIN Ming

National Key Laboratory of Applied Physics and Chemistry, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710061)

[ABSTRACT] In order to clarify the detonation property change of micro sequence brought in by the gap materials, the finite element analysis method was used to simulate the initiation and detonation capability of the micro sequence for small diameter sample shielded by nickel or stainless steel gaps at various thickness. CL-20 and JO-9C were respectively used as primary column and secondary column. Their diameters were 2 mm and 4 mm, and the ratio of diameter to height was 1. The critical thickness at which these two materials will ignite were obtained as 1.4 mm for nickel and 1.6 mm for stainless steel. Nickel has a better anti-blast capability in comparison to stainless steel. Simulation results were verified by corresponding experimental measurement, indicating the high accuracy of this simulating method to reflect the actual conditions.

[KEYWORDS] explosion mechanics; gap; explosive sequence; simulation analysis