

文章编号: 1003-1480 (2025) 01-0037-07

# 爆炸切割网络传爆中的间隙与角度效应

周晓鹏<sup>1,2</sup>, 姜勇<sup>1,2</sup>, 袁航<sup>1,2</sup>

(1. 中国船舶集团有限公司第七一三研究所, 河南 郑州, 450015; 2. 河南省水下智能装备重点实验室, 河南 郑州, 450015)

**摘要:** 为研究爆炸切割网络中传爆节点处传爆能力的关键影响因素, 通过改变切割索对传爆药柱的传爆间隙进行了平板传爆试验, 将试验结果结合仿真分析确定了 JO-11C 传爆药柱的仿真材料参数, 并进一步分析了传播角度对传爆能力的影响。研究表明: 随着传爆间隙的增加, 传爆能力下降, 切割索对传爆药柱的最大传爆间隙区间为 2.0~2.5 mm; 同时, 传爆角度的增大能够显著提高传爆能力。本研究为爆炸切割网络的传爆性能研究以及提高武器系统的可靠性提供了参考。

**关键词:** 爆炸切割网络; 传爆间隙; 传爆角度; 传爆药柱; 仿真分析

中图分类号: TJ450.2 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2025.01.007

## Gap and Angle Effects in the Detonation Transmission of Explosive Cutting Networks

ZHOU Xiao-peng<sup>1,2</sup>, JIANG Yong<sup>1,2</sup>, YUAN Hang<sup>1,2</sup>

(1. 713th Research Institute of China State Shipbuilding Corporation Limited, Zhengzhou, 450015; 2. Henan Key Laboratory of Underwater Intelligence Equipment, Zhengzhou, 450015)

**Abstract:** In order to explore the key influencing factors of explosion transmission capacity at the nodes of explosive cutting networks, flat plate detonation tests were conducted by changing the detonation gap between the cutting cord and the detonation column, and the test results were combined with simulation analysis to determine the simulation material parameters of the JO-11C detonation column. And the effect of detonation angle on the detonation capability was further analyzed. The results indicate that with the increase of detonation gap, the detonation capability decreases, the maximum detonation gap interval for the cutting cord to the detonation column is 2.0~2.5 mm; Meanwhile, increasing the detonation angle can significantly enhance the detonation capability. This research provides reference for the study of detonation transmission performance in explosive cutting networks and the improvement of weapon system reliability.

**Key words:** Explosive cutting network; Detonation gap; Detonation angle; Detonation column; Simulation analysis

近年来, 随着科技的进步爆炸切割网络获得了飞速发展。与传统的沟槽装药相比, 以切割索纵横交错组成的爆炸切割网络具有结构简单、装药量小、良好的同步分离性能和高可靠性等优点, 因而被大量应用于导弹、火箭的级间分离以及飞机的逃生通道等领域<sup>[1-4]</sup>。目前, 关于爆炸切割网络的研究主要集中于射流侵蚀机理以及切割器结构设计等方面, 对爆炸切割网

络传爆可靠性的研究较少, 而传爆性能直接关系着整个武器系统的可靠性, 因此有关爆炸切割网络传爆性能的研究将成为研究热点。

对于爆炸网络爆轰传播中的非理想爆轰情况, 国内外尚未见关于切割索传爆间隙的理论和试验研究报道, 而关于拐角效应国内外学者进行了广泛的研究。M.Cox<sup>[5]</sup>采用多狭缝扫描技术对 PBX-9502 炸药爆轰

收稿日期: 2024-11-10

作者简介: 周晓鹏 (1983-), 男, 高级工程师, 主要从事非金属成型应用技术、爆炸力学等方面的研究。

基金项目: 国家重大科技专项。

引用本文: 周晓鹏, 姜勇, 袁航. 爆炸切割网络传爆中的间隙与角度效应[J]. 火工品, 2025(1): 37-43.

波的拐角现象进行了分析,确定了炸药未爆轰区域的大小;Held<sup>[6]</sup>通过高速摄影研究了拐角效应的影响因素,发现增加主发药柱面积或在被发药柱施加高声速材料约束可以减少侧向延迟时间;Hill等<sup>[7]</sup>设计了Mushroom试验来表征钝感炸药的拐角效应,以TATB和PBX-9504为实例验证了此试验方法的准确性;李生才等<sup>[8]</sup>利用高速摄影技术观测了注装TNT的爆轰波在不同角度下的拐角绕射现象,发现随拐角角度的增加会出现爆轰波滞后现象,当拐角角度为120°时出现了死区(未爆轰区)。焦清介等<sup>[9]</sup>采用LS-DYNA软件对3种常见拐角装药的爆轰波传播特性进行了数值模拟,模拟结果清晰显示了爆轰波在拐角处先衰减再增加的过程,由此得出了爆轰波在拐角处传播时先因传播面积增大而衰减,后因约束材料对冲击波的反射作用而增长的结论。

为了深入分析爆炸切割网络传爆节点处的传爆能力影响因素,本研究通过平板传爆试验确定了切割索对传爆药柱的最大传爆间隙区间,并结合文献数据确定了JO-11C的点火增长模型参数。建立了不同传爆角度下的仿真分析计算模型,研究了传爆角度对传爆能力的影响规律。

## 1 传爆间隙对传爆能力的影响

本研究以十字爆炸切割网络作为研究对象,该网络具备起爆、传爆和切割的多重功能,是研究爆炸切割网络传爆性能的理想模型。十字爆炸切割网络的传爆过程通常为切割索1先起爆传爆药柱,再由传爆药柱起爆其它切割索。在实际工程应用中,切割索1与传爆药柱之间的传爆间隙(装配间隙)是影响传爆性能的关键因素,本文通过平板传爆试验以得到最大传爆间隙,为爆炸网络的传爆可靠性研究提供支持。

### 1.1 最大传爆间隙试验

本试验采用的切割索药型罩材料为铅铋合金,装药为黑索今,靶板材料为有机玻璃,传爆药柱装药为JO-11C。为固定和保护传爆药柱,设计了一种ABS材料制成的密闭结构,其厚度为3.5 mm,紧密贴合传爆药柱的侧面与上表面。将4根切割索以90°夹角

均匀布置在有机玻璃靶板上。试验工况如图1所示。

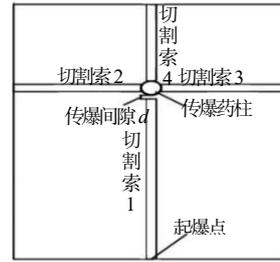


图1 传爆试验工况图

Fig.1 Explosion transmission test working condition

由图1可见,切割索2、3和4与传爆药柱紧密贴合,通过改变切割索1和传爆药柱之间的传爆间隙 $d$ (0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mm)进行传爆试验,以确定切割索对传爆药柱的最大传爆间隙。试验结果显示,当传爆间隙在0~2.0 mm之间时,传爆药柱能被切割索1起爆,且切割索2、3和4均能被传爆药柱起爆;而当传爆间隙为2.5 mm时,传爆药柱未能被切割索1起爆。试验前后传爆间隙为2.0, 2.5 mm的靶板状态如图2~3所示。

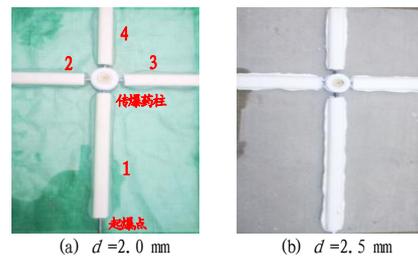


图2 试验前靶板状态图

Fig.2 Target plate state before the test

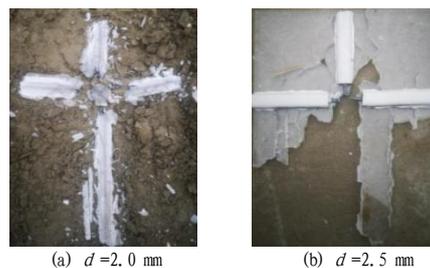


图3 试验后靶板状态图

Fig.3 Target plate state after the test

由图2可见,起爆点位于切割索1的端面顶部。在试验过程中,有机玻璃靶板自由放置于平地,然后起爆切割索1。由图3可知,当传爆间隙为2.0 mm时,切割索1可以成功起爆传爆药柱,并且传爆药柱成功起爆切割索2、3和4,有机玻璃靶板被完全切割。而当传爆间隙为2.5 mm时,切割索2、3和4的端面保持整洁,切割索1未能成功起爆传爆药柱,导致有机

玻璃部分断裂。因此确定切割索起爆传爆药柱的最大传爆间隙区间为 2.0 ~ 2.5 mm。

### 1.2 仿真分析

#### 1.2.1 模型与算法

为进一步研究爆炸切割网络传爆能力的影响因素,本研究选取传爆节点处进行仿真分析。仿真模型包括切割索起爆传爆药柱再起爆切割索的结构,是一个包含空气、切割索1、传爆药柱、密封结构和切割索2的三维结构。在仿真模型中,切割索长度均设置为 10 mm;传爆药柱直径 6 mm,高度 3.0 mm;靶板尺寸为 40 mm×35 mm×17 mm;密封结构厚度为 3.5 mm;切割索截面尺寸如图 4(a)所示。切割索1与传爆药柱的间隙为传爆间隙  $d$ ,仿真模型如图 4(b)所示。

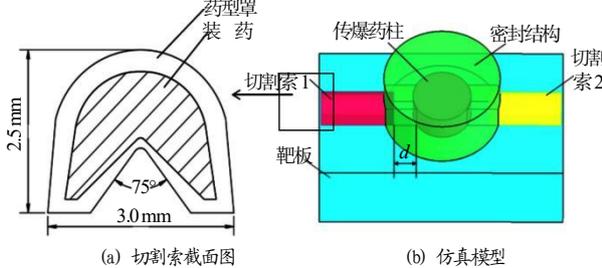


图 4 切割索截面及仿真模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of cutting cable section and simulation model

本文选取的材料模型及状态方程如表 1 所示。

表 1 所用材料模型和状态方程

Tab.1 The model and state equation of the used materials

部分	材料	材料模型	状态方程
切割索装药	RDX	HIGH_EXPLOSIVE_BURN	JWL
药型罩	Pb-Sb	STEINBERG	GRUNEISEN
传爆药柱	JO-11C	ELASTIC_PLASTIC_HYDRO	Lee-Tarver
靶板	有机玻璃	JOHNSON_HOLMQ UIST_CERAMICS	
密封结构	ABS	ELASTIC_PLASTIC_HYDRO	GRUNEISEN

为了观测传爆药柱被切割索 1 起爆以及切割索 2 被传爆药柱起爆的过程,对传爆药柱以及切割索 2 采用点火增长模型,即 Lee-Tarver 模型。点火增长模型可以较好地描述凝聚炸药从未反应到反应的整个过程,其反应速率方程如下:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = I(1-F)^b \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1(1-F)^c F^d P^y + G_2(1-F)^e F^g P^z \quad (1)$$

式(1)中:  $F$  为炸药反应度;  $\rho$  为密度;  $P$  为压

力;  $I$ 、 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $x$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $y$ 、 $e$ 、 $g$  及  $z$  为反应速率参数。为了使点火增长模型能更精确地表示炸药的反应过程,为等式引入了  $F_{igmax}$ 、 $F_{g1max}$ 、 $F_{g2min}$  3 项,当  $F > F_{igmax}$  时,点火项设置为 0;  $F > F_{g1max}$  时,增长项设置为 0; 当  $F < F_{g2min}$  时,完成项设置为 0<sup>[10]</sup>。对于大多数炸药,  $a$ 、 $b$ 、 $x$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $y$ 、 $e$ 、 $g$  及  $z$  的数值是固定的,而  $G_1$ 、 $G_2$  表示炸药表面积与体积的比值,受炸药粒度影响较大;  $I$  在点火增长模型中没有限制。因此,本文以文献[11]为基础,调整  $G_2$  和  $I$  值,直到符合切割索对传爆药柱的最大传爆间隙区间为 2.0 ~ 2.5 mm 的试验现象。 $G_2$  参数的调整区间上限选为文献[11]中的 1 500,调整区间下限为与其组分相似的 JO-9C 药剂的 320;  $I$  的调整区间为其常见范围 40 ~ 4×10<sup>6</sup>。黑索今的点火增长模型参数来自文献[12]。最终获得的传爆药柱点火增长模型参数如表 2 所示。

表 2 JO-11C 点火增长模型参数

Tab.2 Parameters of JO-11C ignition growth model

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$a$	0	$c$	0	$e$	0.222
$b$	0.222	$d$	0	$g$	0.667
$F_{igmax}$	0.3	$F_{g1max}$	0.3	$F_{g2min}$	0
$x$	4	$y$	0	$z$	2
$I/\mu s$	2 800				

#### 1.2.2 仿真分析结果

在进行仿真分析时,可以通过监测各监测点的爆轰压力峰值变化趋势来判断试样是否发生爆轰。若爆轰压力峰值逐渐上升且达到稳定爆轰阶段,则判定试样发生了爆轰;若爆轰压力峰值逐渐降低,则认为试样未发生爆轰。除此之外,还可以通过反应度  $F$  的变化来判别试样是否发生爆轰。当反应度曲线达到 1,则认为试样发生爆轰;反之,认为试样炸药未发生爆轰。为方便分析,选取传爆药柱中部 5 个观测点进行监测,如图 5 所示。

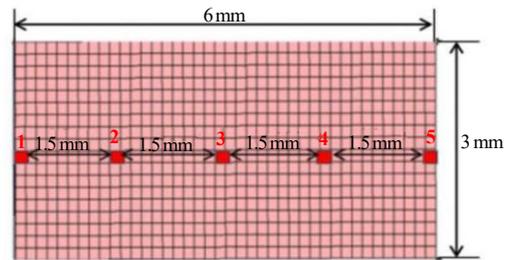


图 5 传爆药柱观测点示意图

Fig.5 Observation points in booster columns

2.0 mm 传爆间隙下的传爆仿真结果如图 6 所示。

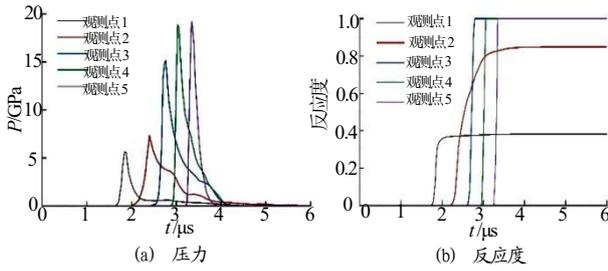


图 6 传爆间隙 2.0 mm 观测点处压力及反应度曲线

Fig.6 Pressure and responsiveness curves of observation points with 2.0 mm gap

由图 6 (a) 可以看出, 在传爆间隙为 2.0 mm 时, 1.50 ~ 3.35  $\mu\text{s}$  的时间内, 5 个观测点处的炸药分别发生了反应, 压力峰值逐渐增大, 形成了稳定的爆轰波, 在观测点 5, 炸药的压力值达到最大, 约为 19.2 GPa。由图 6 (b) 可以看出, 观测点 1 和 2 的炸药反应度未达到 1.0, 炸药未完全反应。而在观测点 3、4、5 处的炸药反应度达到 1.0, 炸药完全反应。由此可知在切割索与传爆药柱间隙为 2.0 mm 时, 切割索产生的爆轰波足以起爆传爆药柱。

2.5 mm 传爆间隙下的传爆仿真结果如图 7 所示。

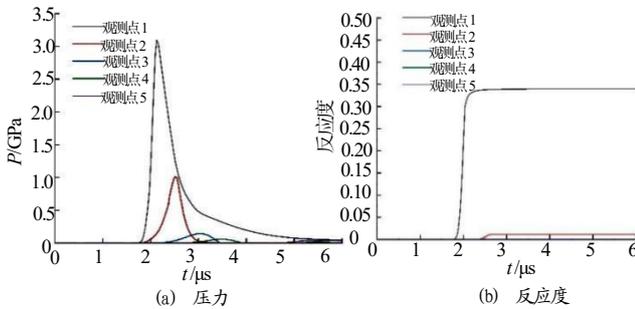


图 7 传爆间隙 2.5 mm 观测点处压力及反应度曲线

Fig.7 Pressure and responsiveness curves of observation points with 2.5 mm gap

由图 7 (a) 可以看出, 在 2.13  $\mu\text{s}$  时, 观测点 1 处的炸药压力峰值约为 3.1 GPa。随后各个观测点处的压力呈下降趋势, 表明炸药发生了部分反应但是没有形成稳定的爆轰波。图 7 (b) 进一步显示, 5 个观测点处的炸药均未完全反应。由此可以得出, 在切割索与传爆药柱的间隙为 2.5 mm 时, 切割索产生的爆轰波不足以起爆传爆药柱。

综上所述, 在 90° 的传爆角度下切割索对传爆药柱的最大传爆间隙区间为 2.0 ~ 2.5 mm。

## 2 传爆角度对传爆能力的影响

当装药存在拐角时, 爆轰波的传播会受到拐角绕射现象的影响, 导致在入射爆轰界面附近形成不爆轰区域。当装药拐角越大时, 爆轰波的传播越稳定。在爆炸切割网络中, 多根切割索围绕传爆药柱构成传爆节点。起爆点设置在切割索 1 的顶部, 切割索 1 与切割索 2 的中轴线夹角定义为传爆角度  $\theta$ , 传爆药柱与切割索 2 的距离即为传爆间隙  $d$ 。传爆节点水平截面示意图如图 8 所示。

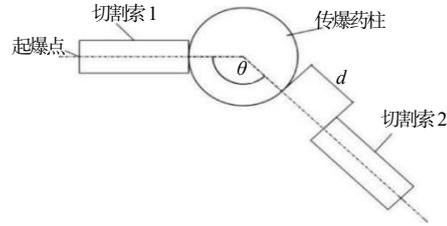


图 8 传爆节点水平截面示意图

Fig.8 Horizontal section of explosion transmission node

在此模型中, 拐角现象主要表现为爆轰波由切割索传递到传爆药柱时, 在传爆药柱内部可能产生低压区或不爆轰区。根据工程经验, 当  $\theta$  过小时可能出现断爆现象。为探究此现象出现的原因, 采用仿真分析的方法研究了不同  $\theta$  时传爆药柱对切割索 2 的传爆情况。

### 2.1 仿真分析

本研究采用 LS-DYNA 软件, 对不同传爆角度 (45°, 90°, 135°, 180°) 的传爆药柱起爆切割索进行了数值模拟分析。在切割索 2 中部以间距 3.0 mm 设置了 4 个观测点。

#### 2.1.1 传爆角度为 45° 时的仿真结果及分析

45° 传爆角度以及 1.5 mm 传爆间隙下的传爆仿真结果如图 9 所示。

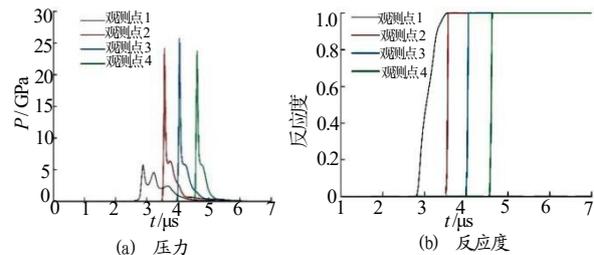


图 9 45° 传爆角度及 1.5 mm 传爆间隙下观测点仿真曲线

Fig.9 Simulation curve of observation points with 45° detonation angle and 1.5 mm gap

由图9(a)可见,观测点1处的炸药在 $2.5\ \mu\text{s}$ 开始反应,其产生的最大压力值约为 $5\ \text{GPa}$ 。在达到该最大压力值之后,炸药内部又经历了几次压力峰值的波动。通过其它观测点处的结果可知,在此过程中,炸药可能持续发生反应,直至在 $3.5\sim 5.0\ \mu\text{s}$ 的时间范围内形成稳定的爆轰波,其最大压力值达到约 $25\ \text{GPa}$ 。由图9(b)可见,4个观测点处的炸药反应度均达到 $1.0$ ,表明炸药完全反应。观测点1处炸药反应度达到 $1.0$ 的时间相比其他观测点处更长,说明观测点1处的炸药反应速率较慢,这也是其最大压力较低且出现多个压力峰值的原因。因此,当传爆角度为 $45^\circ$ 且传爆间隙为 $1.5\ \text{mm}$ 时,传爆药柱可以起爆切割索。

$45^\circ$ 传爆角度以及 $2.0\ \text{mm}$ 传爆间隙下的传爆仿真结果如图10所示。

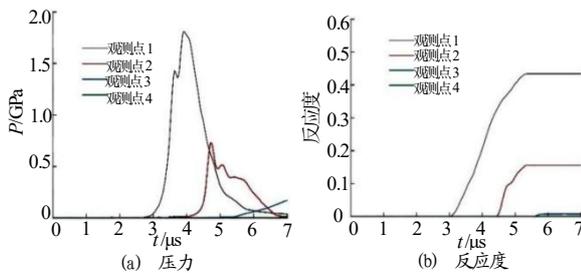


图10  $45^\circ$ 传爆角度及 $2.0\ \text{mm}$ 传爆间隙下观测点仿真曲线  
Fig.10 Simulation curve of observation points with  $45^\circ$  detonation angle and  $2.0\ \text{mm}$  gap

由图10(a)可见,在 $2.7\ \mu\text{s}$ 时观测点1处的炸药发生了反应,其最大压力约为 $1.8\ \text{GPa}$ ,在 $4\ \mu\text{s}$ 时炸药压力峰值降为 $0.7\ \text{GPa}$ 。由图10(b)可见,观测点1处的炸药反应度最高约为 $0.42$ ,观测点2处约为 $0.15$ ,之后炸药的反应度接近于 $0$ 。因此,传爆角度为 $45^\circ$ 且传爆间隙为 $2.0\ \text{mm}$ 时,传爆药柱无法起爆切割索。

综合以上结果,传爆角度设置为 $45^\circ$ 时,传爆药柱起爆切割索的最大传爆间隙区间为 $1.5\sim 2.0\ \text{mm}$ 。

### 2.1.2 传爆角度为 $90^\circ$ 时的仿真结果及分析

$90^\circ$ 传爆角度以及 $2.0\ \text{mm}$ 传爆间隙下的传爆仿真结果如图11所示。由图11(a)可知, $3.0\ \mu\text{s}$ 时,观测点1处的炸药发生了反应,其最大压力约为 $8\ \text{GPa}$ ,在 $3.5\sim 5.0\ \mu\text{s}$ 内炸药已经形成了稳定的爆轰波,其最大压力约为 $23\ \text{GPa}$ 。由图11(b)可见,4个观

测点处的炸药反应度均达到 $1.0$ ,炸药完全反应。由此可见,传爆角度为 $90^\circ$ 且传爆间隙为 $2.0\ \text{mm}$ 时,传爆药柱可以起爆切割索。

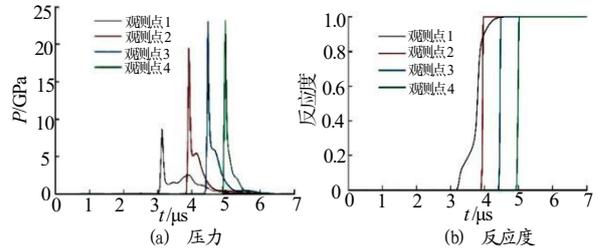


图11  $90^\circ$ 传爆角度及 $2.0\ \text{mm}$ 传爆间隙下观测点仿真曲线  
Fig.11 Simulation curve of observation points with  $90^\circ$  detonation angle and  $2.0\ \text{mm}$  gap

$90^\circ$ 传爆角度以及 $2.5\ \text{mm}$ 传爆间隙下的传爆仿真结果如图12所示。由图12(a)可见, $3.2\ \mu\text{s}$ 时观测点1处的炸药进行了反应,其压力峰值约为 $2.3\ \text{GPa}$ , $4\ \mu\text{s}$ 时炸药内压力降为 $1\ \text{GPa}$ 。由图12(b)可见,观测点1处的炸药反应度最高约为 $0.3$ 。观测点2处炸药反应度约为 $0.1$ ,之后炸药的反应度近乎为 $0$ 。由此可见,传爆角度为 $90^\circ$ 且传爆间隙为 $2.5\ \text{mm}$ 时,传爆药柱无法起爆切割索。

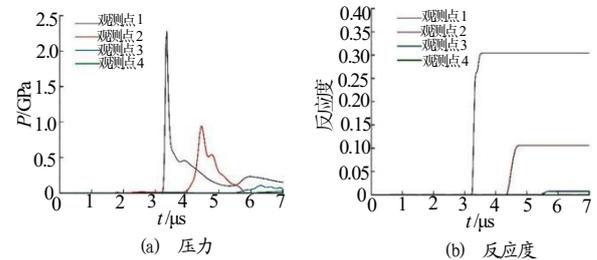


图12  $90^\circ$ 传爆角度及 $2.5\ \text{mm}$ 传爆间隙下观测点仿真曲线  
Fig.12 Simulation curve of observation points with  $90^\circ$  detonation angle and  $2.5\ \text{mm}$  gap

综合以上结果,在传爆角度为 $90^\circ$ 时,传爆药柱起爆切割索的最大传爆间隙区间为 $2.0\sim 2.5\ \text{mm}$ 。

### 2.1.3 传爆角度为 $135^\circ$ 时的仿真结果及分析

$135^\circ$ 传爆角度以及 $2.5\ \text{mm}$ 传爆间隙下的传爆仿真结果如图13所示。由图13(a)可见, $3.4\ \mu\text{s}$ 时观测点1处的炸药发生了反应,其最大压力约为 $8\ \text{GPa}$ ,在 $4.0\sim 5.5\ \mu\text{s}$ 内炸药已经形成了稳定的爆轰波,其最大压力为 $25\ \text{GPa}$ 。由图13(b)可以看到4个观测点处的炸药反应度均达到 $1.0$ ,炸药完全反应。由此可见,传爆角度为 $135^\circ$ 且传爆间隙为 $2.5\ \text{mm}$ 时,传爆药柱可以起爆切割索。

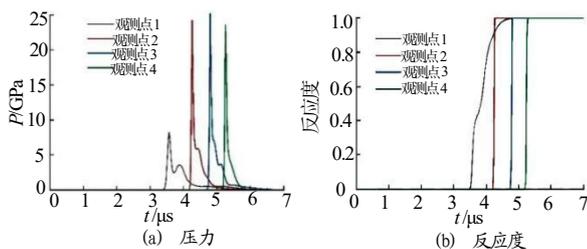


图 13 135° 传爆角度及 2.5 mm 传爆间隙下观测点仿真曲线  
Fig.13 Simulation curve of observation points with 135° detonation angle and 2.5 mm gap

135° 传爆角度以及 3.0 mm 传爆间隙下的传爆仿真结果如图 14 所示。

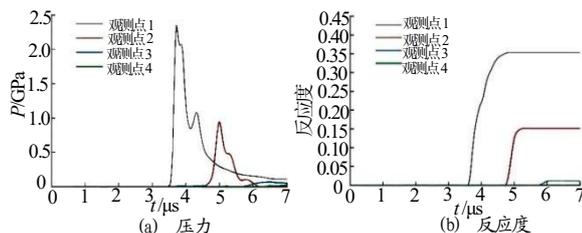


图 14 135° 传爆角度及 3.0 mm 传爆间隙下观测点仿真曲线  
Fig.14 Simulation curve of observation points with 135° detonation angle and 3.0 mm gap

由图 14 (a) 可见, 3.5  $\mu\text{s}$  时观测点 1 处的炸药发生了反应, 其压力峰值为 2.3 GPa, 4.5  $\mu\text{s}$  时炸药内压力降为 1 GPa。由图 14 (b) 可见, 观测点 1 处的炸药反应度最高约为 0.35, 观测点 2 处炸药反应度约为 0.15, 之后炸药的反应度近乎为 0。由此可见, 传爆角度为 135° 且传爆间隙为 3.0 mm 时, 传爆药柱无法起爆切割索。

综合以上结果, 在传爆角度为 135° 时, 传爆药柱起爆切割索的最大传爆间隙区间为 2.5 ~ 3.0 mm。

#### 2.1.4 传爆角度为 180° 时的仿真结果及分析

180° 传爆角度以及 3.0 mm 传爆间隙下的传爆仿真结果如图 15 所示。

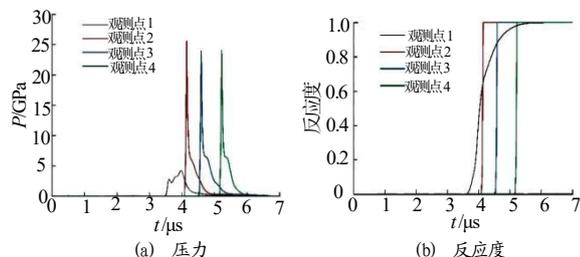


图 15 180° 传爆角度及 3.0 mm 传爆间隙下观测点仿真曲线  
Fig.15 Simulation curve of observation points with 180° detonation angle and 3.0 mm gap

由图 15 (a) 可见, 3.5  $\mu\text{s}$  时观测点 1 处的炸药发生了反应, 其最大压力约为 5 GPa, 在 4.0 ~ 5.5  $\mu\text{s}$

内炸药已经形成了稳定的爆轰波, 其最大压力约为 25 GPa。由图 15 (b) 可见, 4 个观测点处的炸药反应度均达到 1.0, 炸药完全反应。由此可见, 传爆角度为 180° 且传爆间隙为 3.0 mm 时, 传爆药柱可以起爆切割索。

180° 传爆角度以及 3.5 mm 传爆间隙下的传爆仿真结果如图 16 所示。

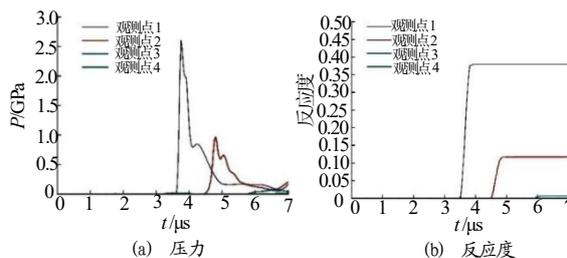


图 16 180° 传爆角度及 3.5 mm 传爆间隙下观测点仿真曲线  
Fig.16 Simulation curve of observation points with 180° detonation angle and 3.5 mm gap

由图 16 (a) 可见, 3.7  $\mu\text{s}$  时观测点 1 处的炸药发生了反应, 其压力峰值为 2.6 GPa。4.5  $\mu\text{s}$  时炸药内压力降为 1 GPa。由图 16 (b) 可见, 观测点 1 处的炸药反应度最高约为 0.38, 观测点 2 处炸药反应度约为 0.12, 之后炸药的反应度近乎为 0。由此可见, 传爆角度为 180° 且传爆间隙为 3.5 mm 时, 传爆药柱无法起爆切割索。

综合以上结果, 在传爆角度为 180° 时, 传爆药柱起爆切割索的最大传爆间隙区间为 3.0 ~ 3.5 mm。

## 2.2 试验验证

为验证仿真分析的准确性, 进行了不同传爆角度下的平板传爆试验。试验所用设备与 1.1 节一致, 并确保切割索 1 和传爆药柱的紧密贴合。通过调整传爆药柱与切割索 2、3 和 4 的传爆间隙  $d$  为 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 mm, 即可获得不同传爆角度下传爆药柱对切割索的最大有效传爆间隙。试验前靶板状态如图 17 所示。

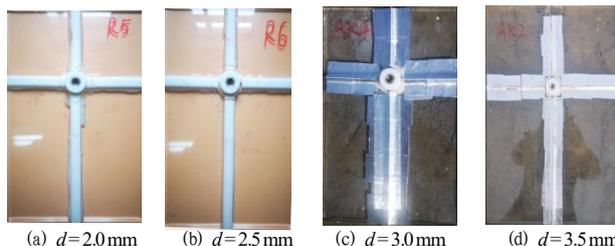


图 17 试验前靶板状态图  
Fig.17 Target plate state before the test

试验后靶板状态如图 18 所示。由图 18 可见,当传爆间隙为 2.0 mm 时,切割索 1 成功起爆传爆药柱,传爆药柱成功起爆切割索 2、3 和 4,有机玻璃靶板被完全切割。当传爆间隙为 2.5 mm 时,切割索 1 起爆了传爆药柱,传爆药柱仅起爆了切割索 4,有机玻璃部分断裂。说明传爆角度为 90°时传爆药柱起爆切割索的最大传爆间隙区间为 2.0 ~ 2.5 mm。

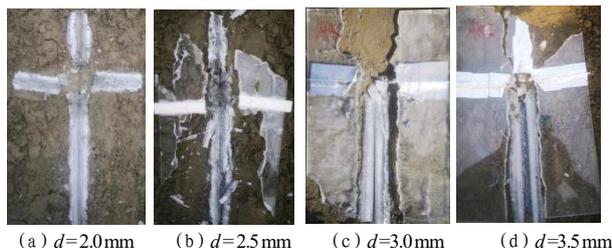


图 18 试验后靶板状态图

Fig.18 Target plate state after the test

当传爆间隙为 3.0 mm 时,传爆药柱仍能成功起爆切割索 4。当传爆间隙为 3.5 mm 时,切割索 2、3 和 4 均未被成功起爆,说明传爆角度为 180°时传爆药柱起爆切割索的最大传爆间隙区间为 3.0 ~ 3.5mm。试验结果与仿真结果吻合,证实了仿真分析具有较高的准确性。

### 3 结论

本文针对爆炸切割网络中的传爆现象,进行了平板传爆试验,得到了最大传爆间隙,依据试验结果及文献确定了 JO-11C 的点火增长模型参数,分析了传爆角度对传爆能力的影响规律,主要结论如下:

(1) 爆炸切割网络传爆过程中,传爆间隙对传爆能力影响较大。本文切割索对传爆药柱的最大传爆间隙区间为 2.0 ~ 2.5 mm。

(2) 通过仿真分析,发现随着传爆角度增大最大传爆间隙增大,当传爆角度为 180°最大传爆间隙达到了 3.0 mm,不同传爆角度下的平板传爆试验结果验证了该结论。

### 参考文献:

- [1] 蒋瑞岗.战术导弹级间线分离探讨[J].现代防御技术,2001(03):31-33,57.
- [2] 王凯民,温玉全.军用工工品设计技术[M].北京:国防工业出版社,2006.
- [3] 赵文虎.柔性同步起爆网络的设计[D].南京:南京理工大学,2008.
- [4] 徐帅.爆炸网络用硅橡胶基传爆药设计与装药成型技术研究[D].太原:中北大学,2018.
- [5] Cox M Campbell A W. Corner-turning in TATB[C]// The Proceedings of the 7th Symposium (Inter) on Detonation. White Oak MD USA: Naval Weapons Center, 1981.
- [6] Held M. The effect of the strength of initiation upon the corner-effect[C]//The Proceedings of the International Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Effect. Beijing:Sciences Press, 1986.
- [7] Hill L G ,Seitz W L,Forest C A ,et al.High explosive corner turning performance and the LANL mushroom test[C]//The Tenth American Physical Society Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter.American Institute of Physics, 2008.
- [8] 李生才,冯长根,赵同虎.拐角角度对爆轰波拐角效应的影响[J].爆炸与冲击,1999,19(4):289-294.
- [9] 焦清介,魏继锋,周钢,严楠,蔡瑞娇.爆轰波拐角传播三维数值模拟[J].爆炸与冲击,2003,23(6):534-538.
- [10] 丁良政,张邹邹,卜雄洙,等.基于点火增长模型的颗粒炸药低速撞击特性研究[J].火工品,2022(3):38-43.
- [11] Li Y ,Yang X ,Wen Y , et al. Determination of Lee-Tarver model parameters of JO-11C explosive[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics,2018,43(10):1 032-1 040.
- [12] 刘通有.非敏含能材料的起爆及爆炸场特性分析[D].南京:南京理工大学,2021.