中北大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF NORTH UNIVERSITY OF CHINA(NATURAL SCIENCE EDITION)
2026年 第47卷 第5期(总第229期)
Vol. 47 No. 5 2026(Sum No. 229)

文章编号：1673-3193(2026)05-0577-11 J. North Univ. China, Nat. Sci. Ed., 2026, 47(5): 577-587.

爆炸逻辑网络沟槽结构对传爆性能的影响

张会锁[1]，韩泽瑜[1,2]，王宏伟[3]，王建华[4]

(1. 中北大学 机电工程学院，山西 太原 030051；2. 中国兵器科学研究院宁波分院，浙江 宁波 315000；
3. 辽宁华兴机电有限公司，辽宁 锦州 121017；4. 中北大学 环境与安全工程学院，山西 太原 030051)

摘　要：针对爆炸逻辑网络沟槽结构对其传爆性能的影响问题，采用LS-DYNA有限元软件对截面积相同但截面形状不同的单、双拐角沟槽的爆炸逻辑网络传爆过程进行了数值仿真，对同一观测点处的爆轰波峰值压力、爆速等仿真结果进行分析，获取了爆炸逻辑网络沟槽结构对传爆性能的影响规律。在JO-9C(Ⅲ)同等装药条件下，截面积相同但截面形状不同的直线沟槽结构对爆轰波传播约束的不同引起叠加效应的变化，导致了爆炸逻辑网络传爆过程中爆速与峰值压力的改变；在相同截面的沟槽中，爆轰波绕射过程中存在的拐角效应是影响爆炸逻辑网络拐角传爆性能的重要因素，而不同的沟槽结构所产生的拐角效应强弱不同。结果表明：正梯形截面能较好地聚集爆轰波能量，爆速亏损比仅为−0.179%，峰值压力方差为8.2×10^{-4}；在直线传爆区域进入拐角区域时，具备平滑过渡(圆角半径大于4 mm)、小角度变化(0°～30°)等特征的拐角能有效提高传爆性能；双拐角形状对支路同步性无明显影响。本研究可为爆炸逻辑网络沟槽结构设计提供参考。

关键词：爆炸逻辑网络；沟槽结构；拐角效应；传爆性能

中图分类号：TJ45+6　　**文献标识码：**A　　**doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2026.07.0027

引用格式：张会锁，韩泽瑜，王宏伟，等. 爆炸逻辑网络沟槽结构对传爆性能的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版)，2026，47(5)：577-587.

Zhang Huisuo, Han Zeyu, Wang Hongwei, et al. Influence of groove structure on detonation propagation performance in explosive logic networks[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(5): 577-587.

Influence of Groove Structure on Detonation Propagation Performance in Explosive Logic Networks

Zhang Huisuo[1], Han Zeyu[1,2], Wang Hongwei[3], Wang Jianhua[4]

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. China Ordnance Science Academy Ningbo Branch, Ningbo 315000, China;
3. Liaoning Huaxing Electrical and Mechanical Co., Ltd., Jinzhou 121017, China;
4. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the influence of the groove structure of the explosive logic network on its detonation transmission performance, the finite element software LS-DYNA was employed to numerically simulate the detonation propagation process in single- and double-corner grooves of an explosive logic network, with the grooves maintaining a constant cross-sectional area while varying in cross-sectional shape. By analyzing the simulated peak detonation pressures and detonation velocities at corresponding observation points, the effects

收稿日期：2026-07-27
基金项目：重庆红宇精密工业集团高能效装备制造技术中心创新基金(022025003)
作者简介：张会锁(1976－)，男，副教授，博士，主要从事弹药工程与爆炸技术的研究。E-mail：745936769@qq.com。

of the groove structure on the network's detonation propagation behaviour were established. Under the same charge condition of JO-9 C(Ⅲ), the linear groove structure with the same cross-sectional area but different cross-sectional shapes causes the change of superposition effect due to the different constraints of detonation wave propagation, which leads to the change of detonation velocity and peak pressure in the process of detonation propagation of explosive logic network. In the grooves with the same cross section, the corner effect in the process of detonation wave diffraction is an important factor affecting the corner detonation performance of the explosive logic network, and the corner effect generated by different groove structures is different. The results show that the trapezoidal cross section can gather the detonation wave energy well, the detonation velocity deficit ratio is only −0.179%, and the peak pressure variance is 8.2×10^{-4}. When the straight detonation area enters the corner area, the corner with smooth transition (the radius of the corner is greater than 4mm) and small angle change (0°-30°) can effectively improve the detonation performance. The shape of the double corners has no obvious effect on the branch synchronization. This study can provide reference for the trench structure design of the explosion logic network.

Key words: explosion logic network; groove structure; corner effect; detonation performance

0 引 言

爆炸逻辑网络是一种由爆炸元件构成、以爆轰信号传递起爆指令的微型火工品，被广泛应用于各种战略武器、常规兵器、航空航天系统以及民用工业中，可代替常规电子或机械安全保险装置进行逻辑判断[1-2]。爆炸逻辑网络多为沟槽式，即对基板按线路规划进行开槽后装填传爆药，传爆性能评价指标为距起爆输入点相同位移处爆速与爆压的一致性和全路径上爆速和爆压的稳定性。

在爆炸逻辑网络装药与传爆性能方面，Jones[3]指出直径效应与化学反应区反应速率相关；Eyring等[4]指出直径效应与波阵面的弯曲有关；安崇伟等[5]研究了适用于小尺寸爆炸网络的传爆药配方；Silvia等[6]发现了传爆药的拐角效应；Khaldeev等[7]使用高速摄影研究了爆轰波在拐角处的运动和暗区的形成。陈锦健[8]针对异形爆炸逻辑网络结构高质量装药需求，从装药配方、装药工艺、装药质量评价准则等方面进行了系统研究，其基于自研的PBX类传爆药配方提出的空间三维自动化挤注与等静压相结合的高质量、高精度装药工艺已为某火工产品的研制提供了技术服务，当前该技术成果也已实现了转化，但也仅从装药性能与精度方面进行了深入研究，未涉及沟槽截面结构形状对传爆性能的影响，而沟槽结构对爆炸逻辑网络传爆性能的影响不可忽视。

综上所述，现有研究主要集中于约束条件、装药配方、常规拐角工况，以及装药工艺等因素对爆炸逻辑网络传爆性能的影响，关于沟槽截面形状及其他拐角工况影响的研究则很少。同时，相比于试验仅能观测爆轰波波阵面形状，数值仿真能获取较详细的参数。因此，本研究以爆炸逻辑网络中的沟槽结构为研究对象，通过数值仿真方法，研究在装药类型及约束条件不变时，不同截面及拐角的沟槽结构对传爆性能的影响。

1 材料模型

小尺寸装药爆轰是非理想爆轰，不仅需要JWL状态方程描述未反应的炸药与产物，还需要三项式反应速率方程[9]描述反应区内炸药反应的过程。数值仿真使用的材料模型与状态方程如表1所示。

表1 材料模型与状态方程

Tab. 1 Material model and state equation

结构	材料	类别	关键字
传爆药	JO-9C(Ⅲ)	材料模型	Elastic plastic hydro
		状态方程	Ignition and growth of reaction in HE
起爆药	TNT	材料模型	High explosive burn
		状态方程	JWL
基板	4340钢	材料模型	Johnson cook
		状态方程	Gruneisen
空气域	空气	材料模型	Null
		状态方程	Linear polynomial

传爆药材料参数如表2和表3所示。该套参数经杨小玉[9]数值仿真与徐新春[10]试验数值对比后，误差为0.365%～4.425%，表明该套参数能够较好描述JO-9C(Ⅲ)在小尺寸装药下的爆轰规律。4340钢材料参数如表4所示，选用文献[10]中的steel4340参数，起爆药TNT和空气材料参数直接选用文献[11]中的仿真参数，如表5和表6所示。

表 2　JWL 状态方程参数

Tab. 2　Parameters of JWL state equation

未反应炸药		反应产物	
参数	数值	参数	数值
R_1/GPa	952 200	A/GPa	650.18
R_2/GPa	−5.944	B/GPa	0.153 4
R_5	14.1	xp_1	4.6
R_6	1.41	xp_2	1.3
w_e	0.886 7	w_p	0.38
C_{ve}/(GPa•K^{-1})	0.002 781 3	C_{vp}/(GPa•K^{-1})	0.083 58
T_0/K	298	E_0	30.03
ρ/(g•cm^{-3})	1.707		
剪切模量/GPa	5		
屈服强度/GPa	0.2		

表 3　反应速率方程参数

Tab. 3　Reaction impedance rate equation

参数	数值	参数	数值
I	44	y	0
a	0	F_{G1max}	0
b	0.222	G_2/(GPa^{-2}•μs^{-1})	2390
x	4	e	0.222
F_{igmax}	0.3	z	2
G_1/(GPa^{-2}•μs^{-1})	0	g	0.667
c	0	F_{G2min}	0
d	0		

表 4　STEEL4340 材料模型参数[9]

Tab. 4　Material model parameters for STEEL4340[9]

ρ/(g•cm^{-3})	A/MPa	B/MPa	C	n	m
7.83	792	510	0.014 7	0.26	1.03
D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	
0.05	3.44	−2.12	0.002	0.61	

表 5　TNT 材料模型参数[11]

Tab. 5　Material model parameters for TNT[11]

ρ/(g•cm^{-3})	D/(m•s^{-1})	P_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa
1.583	6 880	19.4	30.7	3.9
R_1	R_2	ω	E_0/(J•cm^{-3})	V_0
4.49	0.79	0.3	7 000	1.0

LS-DYNA 程序成熟的 ALE 算法被广泛应用于爆炸与冲击问题的数值分析，可有效避免因爆炸产生的巨大变形而引起的网格畸变，因此，本研究采用 ALE 算法进行数值仿真。

表 6　空气模型参数[11]

Tab. 6　Material model parameters for air[11]

ρ(g•cm^{-3})	C_4/Pa	C_5/Pa	E_0/(J•cm^{-3})	V_0
0.001 185	0.4	0.4	0.25	1.0

2　仿真方案

根据爆炸力学理论可知，在反应区宽度 τ 内，若药柱边侧的稀疏波抵达药柱的中部，爆轰将会停止或不能维持定态传播，所以临界直径 d_c 可由以下公式估算

$$d_c = 2ct, \tag{1}$$

式中：c 为反应区产物声速；t 为时间。ct 约等于反应区厚度。

由文献[9]可知 JO-9C(III)炸药的反应区厚度为 0.22 mm，则依据式(1)可得临界直径约为 0.44 mm。同时，由于具有立方结构的沟槽装药近似于具有等效质量的圆柱形装药[12]，为保证爆轰顺利进行，以直径 1.5 mm 的圆柱装药为基准，分别建立相同横截面积下正方形、三角形、半圆形和正梯形不同截面形状的直线装药，并以正方形作为截面建立了不同形状的拐角计算模型。

计算模型截面几何参数如图 1 所示。其中上层浅绿色为约束盖板，下层深绿色为沟槽基板，中间黄色为不同装药沟槽截面，红点为端面起爆位置。四周全包裹在空气域中，其中起爆药、传爆装药与空气域采用 Euler 算法模型，金属约束盖板和沟槽基板采用 Lagrangian 算法模型。

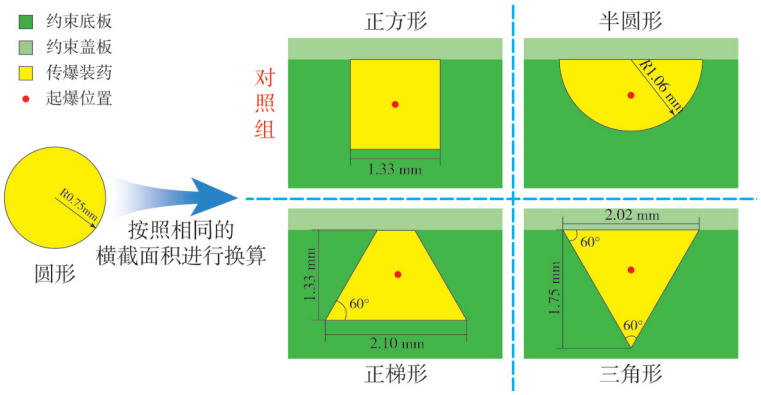


图 1　截面几何参数

Fig. 1　Geometric parameters of cross-section

建立单拐角计算模型如图 2 所示，以直角模型作为对照组，建立如图 3 所示的 3 种单拐角模型：双圆角模型、内圆角模型和 45°斜角模型，每种拐角建立 5 种规格的模型，依次为 1，2，3，4 和

5 mm，同时对45°斜角的5 mm模型补充建立了30°和60°两种斜角模型。本文不作角度注明的斜角模型均为45°斜角模型。其中入口表达爆轰波输入方向，出口表达爆轰波输出方向。

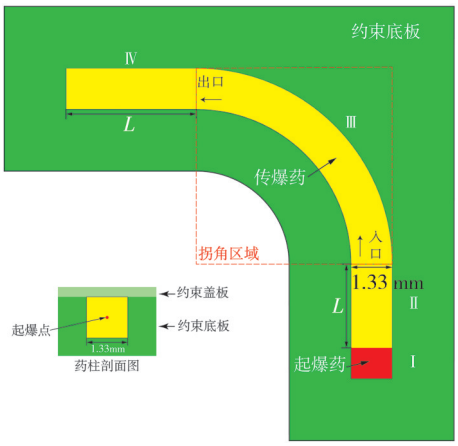


图2 单拐角计算模型

Fig. 2 Single corner calculation model

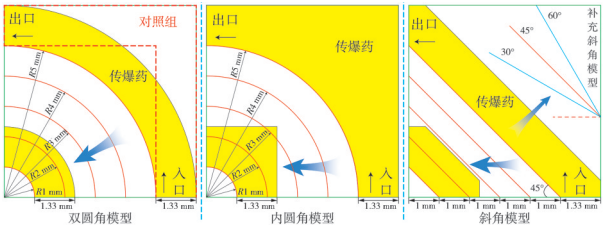


图3 单拐角模型

Fig. 3 Single corner model

双拐角计算模型如图4所示，直角模型作为对照组，再依次建立3种双拐角计算模型：双圆角模型、内圆角模型和斜角模型。

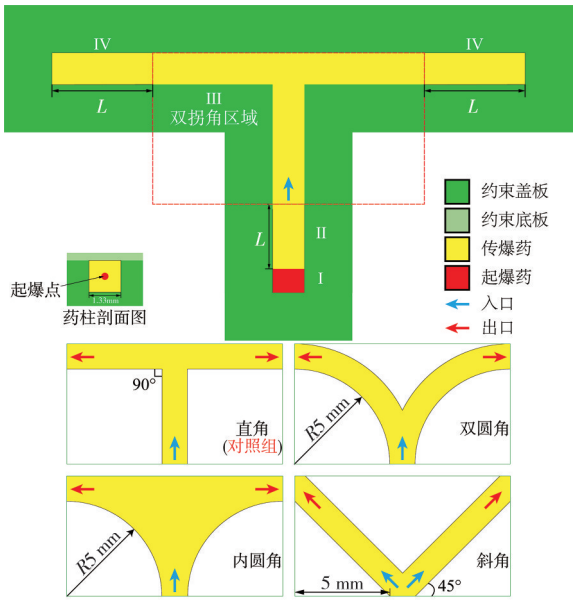


图4 双拐角计算模型

Fig. 4 Double corner calculation model

如图5所示，本研究数值仿真模型采用六面体网格。为得到合理的网格尺寸，对正方形沟槽装药进行数值仿真，得到不同尺寸的峰值压力均值，如图6所示，随着网格尺寸的减小，峰值压力计算结果不再随网格尺寸的减小而发生明显波动，结果收敛稳定。因此，本研究采用0.1 mm×0.1 mm网格尺寸进行数值仿真。

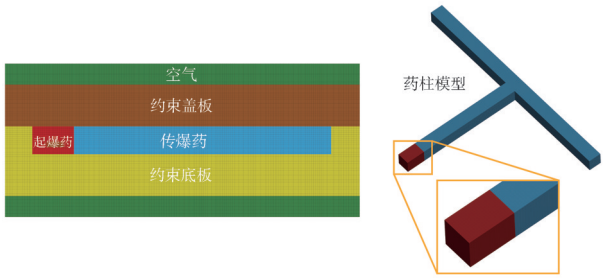


图5 网格模型

Fig. 5 Grid model

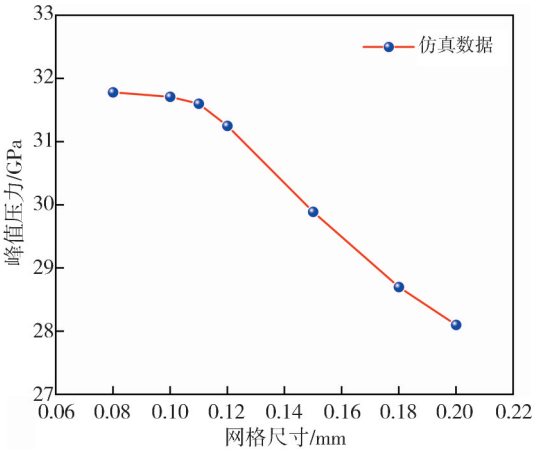


图6 网格收敛性

Fig. 6 Grid convergence

3 传爆性能分析

评判沟槽截面形状对爆炸逻辑网络传爆性能影响的方法是分析其对爆速和峰值压力的影响规律。评判沟槽拐角对传爆性能影响的方法是在分析爆速和峰值压力的基础上，根据峰值压力云图分析拐角效应随拐角尺寸及形状变化的规律。

3.1 机理分析

炸药爆轰状态与临界直径d_c及极限直径d_m相关，如图7所示，装药直径$d<d_c$时属于不稳定爆轰，$d_m>d>d_c$时存在直径效应，属于非理想爆轰。爆炸逻辑网络装药一般为非理想爆轰，爆轰波在传播过程中受侧向稀疏波的作用，爆速和爆压受约束条件和装药直径的影响[13]。

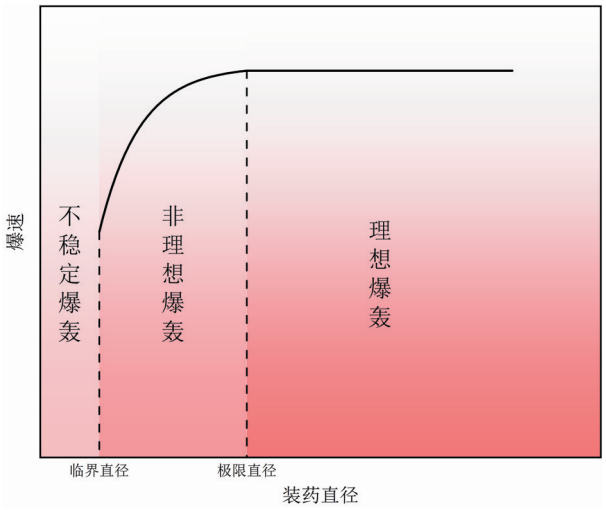


图 7　爆速与装药直径

Fig. 7　Detonation velocity and charge diameter

爆轰波在拐角传播时，由于尺寸变化引起爆轰波绕射产生非稳态爆轰区的现象为拐角效应。如图 8 所示，爆轰波自 A 向 B 传播过程中，经过拐角 C 将产生一个非稳态爆轰区。$d<d_c+d_l$ 时，爆轰波无法通过拐角传播；$d>d_c+d_l$ 时，爆轰波可以传播，但需经过距离 d_i 之后达到正常爆轰。

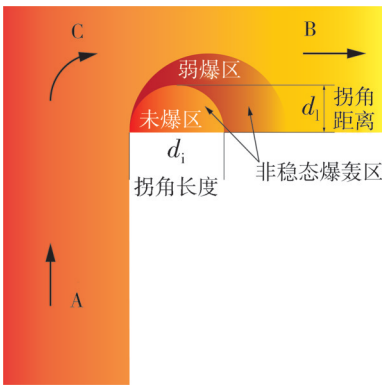


图 8　拐角效应示意图

Fig. 8　Diagram of corner effect

在爆轰波绕射研究中一般不考虑拐角处惰性介质反射波的传播，但在小尺寸装药的拐角效应中这一因素的影响不可忽视[14]。反射波分为冲击波与膨胀波，如图 9 所示，D_1 为反射波速度，在垂直入射时，其性质与炸药和介质的物理特性相关，界面处压力 p_x 与爆轰压力 p_H 的计算公式为[15]

$$p_x=p_m=\rho_{m0}D_2u_m, \tag{2}$$

$$p_H=\rho_0Du_H, \tag{3}$$

式中：p_m，D_2 和 u_m 分别为传入冲击波的波后压力、速度、质点速度，其中界面质点速度 $u_x=u_m$；ρ_{m0} 为介质初始密度；ρ_0，D 和 u_H 分别为炸药初始密度、爆轰波速度和质点速度。

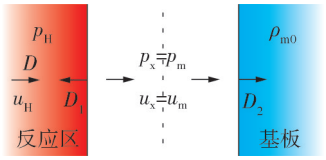


图 9　爆轰波垂直入射介质

Fig. 9　Detonation wave vertically incident medium

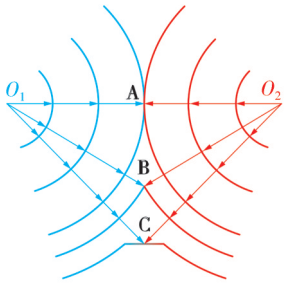
当 $p_x<p_H$ 时，反射波为膨胀波，满足 $u_x>u_H$，则一定存在 $\rho_{m0}D_2<\rho_0D$；当 $p_x>p_H$ 时，反射波为冲击波，满足 $u_x<u_H$，则一定存在 $\rho_{m0}D_2>\rho_0D$。称 $\rho_{m0}D_2$ 为介质冲击阻抗，ρ_0D 为炸药冲击阻抗。因此，垂直入射可根据上述不等式判别反射波类型。

在斜入射时，不仅需要考虑上述因素，还需要考虑入射角度的影响。$\rho_{m0}D_2>\rho_0D$ 时，爆轰波倾角较小，反射冲击波，倾角增加至一定程度出现非正规斜反射，倾角很大时，导致 $p_x<p_H$，反射膨胀波；$\rho_{m0}D_2<\rho_0D$ 时，均为膨胀波。

4340 钢密度为 7.83 g·cm^{-3}，JO-9C（Ⅲ）密度为 1.707 g·cm^{-3}，两者密度相差较大，可认为 4340 钢冲击阻抗大于 JO-9C（Ⅲ）冲击阻抗。由此认为，爆轰波在入射倾角不是很大时，基板反射波均为冲击波。

基板反射波为冲击波，爆轰波与反射冲击波的相互碰撞会出现叠加效应，叠加效应最显著的特征为碰撞点处出现超速爆轰现象，即碰撞点处传播速度大于爆轰速度，压力高于其他区域，并以碰撞点为中心形成一个面积逐渐扩大的压力平台，叠加后的爆轰波阵面趋于光滑。

如图 10 所示，波的碰撞分 3 种情况。文献[15]中计算了不同碰撞类型下的压力增益，结果表明非正规斜碰撞引起的压力增益最大，正碰撞与斜碰撞引起的压力增益相近。



A–正碰撞；B–正规斜碰撞；C–非正规斜碰撞

图 10　冲击波的相互碰撞

Fig. 10　Collision of shock waves

3.2　不同截面传爆分析

根据 Herzberg 等[16]的研究，起爆药建立的低速爆轰经过一段距离成长为高速爆轰，这一距离称为

起爆距离，且在起爆端存在暗区。根据初步仿真计算结果，起爆端存在暗区，沟槽末端处爆轰压力受壁面影响较大。为降低起爆药与沟槽末端对传爆性能分析的影响，测量区域选取如图11所示，4条曲线为不同截面下药柱中心峰值压力的变化曲线。

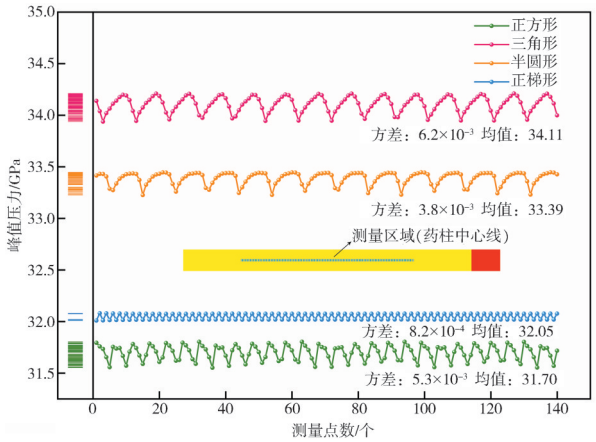


图11 不同截面的峰值压力曲线和测量位置

Fig. 11 Peak pressure curves and measuring positions of different cross-sections

经计算，正梯形峰值压力曲线的方差最小，为8.2×10^{-4}；正方形传爆压力均值最小，为31.70 GPa，三角形传爆压力均值最大，为34.11 GPa。在数据分布上，正梯形呈现了较为规律的两极分布，半圆形在较高的峰值压力区域出现较为平缓的压力变化，三角形、半圆形和正梯形表现出较为明显的周期性变化。

根据式(4)对爆速D进行分析：

$$D=\frac{\sum_{i=1}^{n-1}|x_{i+1}-x_i|}{\sum_{i=1}^{n-1}|t_{i+1}-t_i|},\quad i=1,2,3,\cdots,n, \tag{4}$$

式中：x为测量点的x轴坐标；n为测量点数量。

计算结果如表8所示，以正方形爆速为对照组，3组仿真计算工况的爆速均出现亏损，半圆形爆速亏损最大，正梯形爆速亏损最小。

综上所述，正梯形相对于正方形截面单一水平约束增加了垂直约束，这使爆轰波能量较好地聚集在基板沟槽，能在爆速亏损较小的基础上，提高传爆压力的稳定性；三角形和半圆形呈向上发散趋势，装药尺寸自下向上增加，爆轰压力随之增加，同样面积下，能实现较高压力的传爆。

3.3 单拐角传爆分析

在单拐角沟槽分析中，如图12所示，对测量区域A内峰值压力和拐角出口后峰值压力变化分别绘制峰值压力云图和出口峰值压力曲线。

表8 截面形状爆速表

Tab. 8 Cross-section shape detonation velocimeter

类别	爆速/(km·s^{-1})	亏损比/%
正方形	8.373	—
三角形	8.296	−0.920
半圆形	8.275	−1.170
正梯形	8.358	−0.179

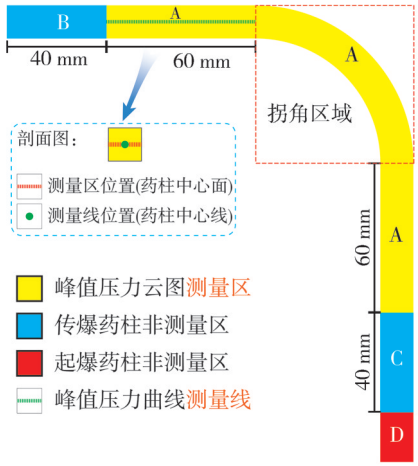


图12 单拐角模型测量示意图

Fig. 12 Single corner model measurement diagram

3.3.1 直角拐角

以直角拐角为对照组，绘制峰值压力云图及曲线如图13所示。

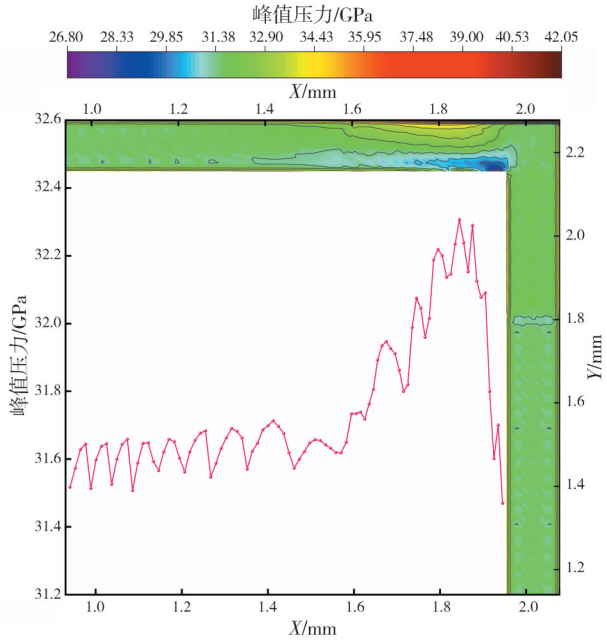


图13 直角拐角的云图和曲线

Fig. 13 Right-angle corner cloud image and curve

图中X、Y分别表征计算平面的横向、纵向位置，峰值压力云图与压力曲线均基于这一坐标系构建，峰值压力曲线的数值由一侧纵轴进行标注。

拐角内侧由于爆轰波绕射形成非稳态爆轰区，压力曲线右侧的较低的起始值表明非稳态爆轰区拐角距离位于药柱中线附近，爆轰波到达该区域顶点后沿着该区域向下传播，同时，壁面反射冲击波与爆轰波叠加在外侧壁面形成高压区，受高压区影响，压力曲线出现峰值。随着距离的增加，非稳态爆轰区与高压区逐渐减弱，药柱开始转入正常爆轰。

3.3.2　其他单拐角

其他单拐角以直角拐角为对照组，从出口爆速亏损、传爆区域压力极值、非稳态爆轰区分布等方面进行分析。

3 种拐角出口爆速如图 14 所示，按尺寸分 5 组。双圆角与内圆角出口爆速均低于对照组，其中，双圆角和内圆角出口爆速受尺寸影响不显著；斜角出口爆速受尺寸影响显著，小尺寸时能提供较高的出口爆速，随着拐角尺寸的增大，出口爆速逐渐减小。

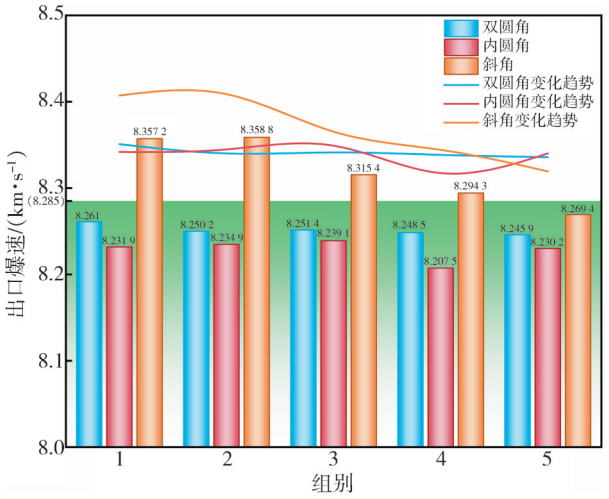


图 14　不同拐角出口爆速

Fig. 14　Detonation velocity at different corner exits

3 种拐角的压力极值分布如图 15 所示，按类型分 3 组。双圆角 p_{max} 与尺寸成反比，尺寸较大时 p_{max} 小于对照组水平，表明该尺寸下能够降低基板过载。内圆角和斜角在小尺寸时，p_{max} 与尺寸成正比，后续仿真计算中受尺寸影响不显著。内圆角装药量在相同尺寸拐角中最多，因此其最高压力在 3 种拐角中最高。3 种拐角的 p_{min} 均高于对照组水平，表明拐角形状能够提高非稳态爆轰区的传爆能力，其中，双圆角和内圆角的提升能力较好且相近。综合分析，双圆角模型在较大尺寸下既能降低基板过载，又能提高非稳态爆轰区的传爆能力。

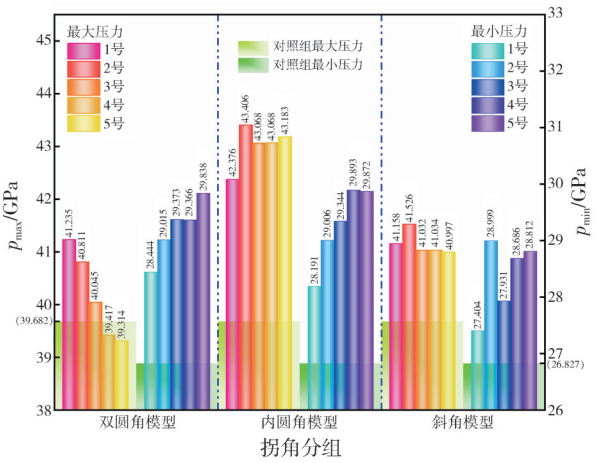


图 15　不同拐角压力极值

Fig. 15　Extreme values of pressure at different corners

不同角度斜角的压力极值和出口爆速如图 16 所示。在极值压力方面，30°斜角相比 60°斜角的基板过载更小，非稳态爆轰区传爆能力更好；在出口爆速方面，两者与对照组水平基本持平。综合分析，小角度变化在提高传爆性能方面的表现更好。

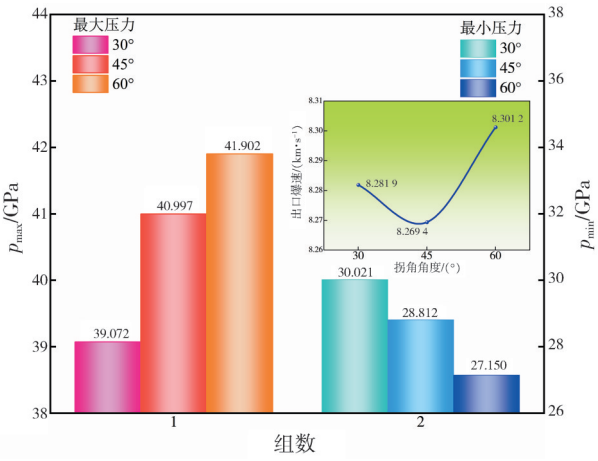


图 16　不同角度斜角的压强极值和出口爆速

Fig. 16　The pressure extreme value and the detonation velocity at the exit of different oblique angles

所有拐角的峰值压力云图如图 17～图 20 所示，分布规律如图 21 所示。

双圆角中爆轰波自 a-A 进入拐角区域后，因圆角过渡平滑，沟槽角度变化较小，经过距离 L_{ab} 在 b 点开始形成非稳态爆轰区Ⅰ。由于波的叠加，自 B 点较早地形成沿外侧壁面连续分布的高压区。1 和 2 号仿真计算中，圆角尺寸较小，拐角效应明显，非稳态爆轰区的拐角距离较大。3～5 号仿真中，非稳态爆轰区的拐角距离减小，爆轰波进入非稳态爆轰区的距离 L_{ab} 增加。自 d-D 界面之后爆轰波开始转入正常爆轰。随着圆角半径的

增加，非稳态爆轰区与高压区过载均呈减弱趋势，表明双圆角平滑的拐角过渡能够修正爆轰波的传播方向，改善拐角效应，提高沟槽拐角的传爆性能。

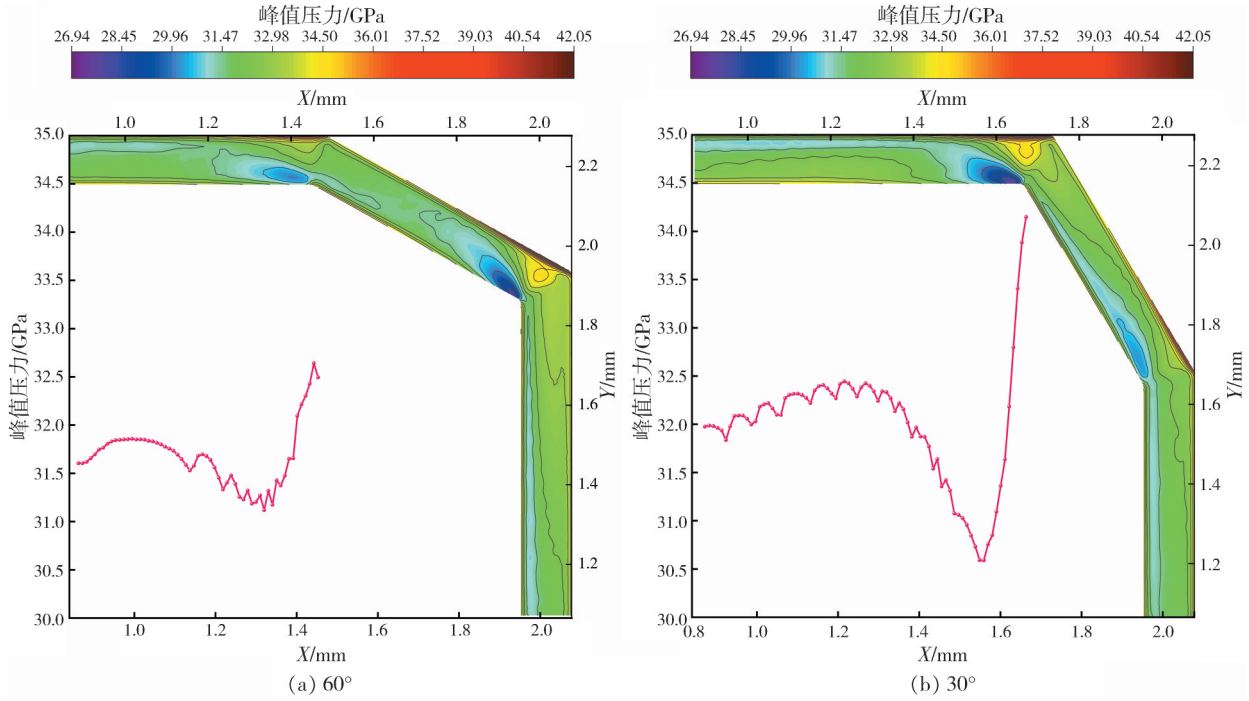


图17 不同角度斜角的峰值压力云图

Fig. 17 Peak pressure cloud diagram at different angles

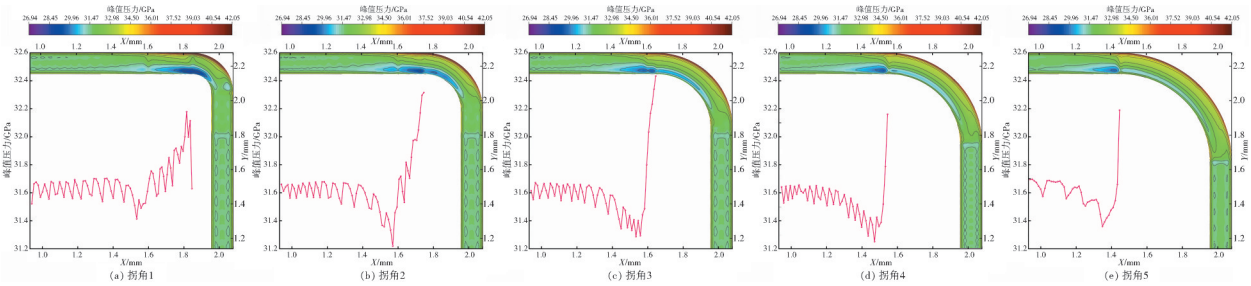


图18 双圆角的峰值压力云图

Fig. 18 Peak pressure cloud diagram of double fillet

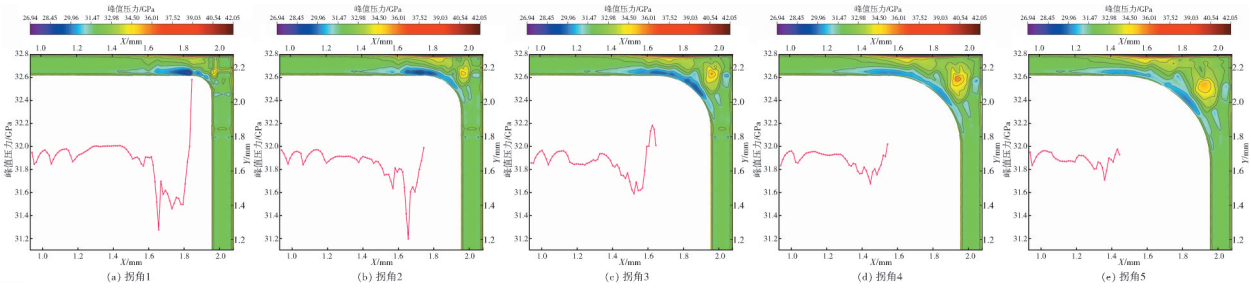


图19 内圆角的峰值压力云图

Fig. 19 Peak pressure cloud diagram of inner fillet

内圆角的内外两侧分别与双圆角内侧和直角外侧相同，因此其对应位置的峰值压力分布与二者具备相似性，但不同之处是E点存在高压区。根据成因机理，非理想爆轰的爆压与装药尺寸成正比，内圆角拐角区域装药尺寸沿传爆方向逐渐增大，爆压随之提高形成高压区。在仿真计算中发现，E点高压区面积与圆角半径成正比，4和5号仿真计算中，高压区面积基本稳定，表明此时爆轰接近稳定爆轰。在较小尺寸的1和2号仿真计算中，拐角效应明显，随着圆角半径的增加，非

稳态爆轰区呈减弱趋势，但高压区持续成长并趋于稳定，表明内圆角结构能够改善拐角效应，但较高的装药量提高了基板过载。

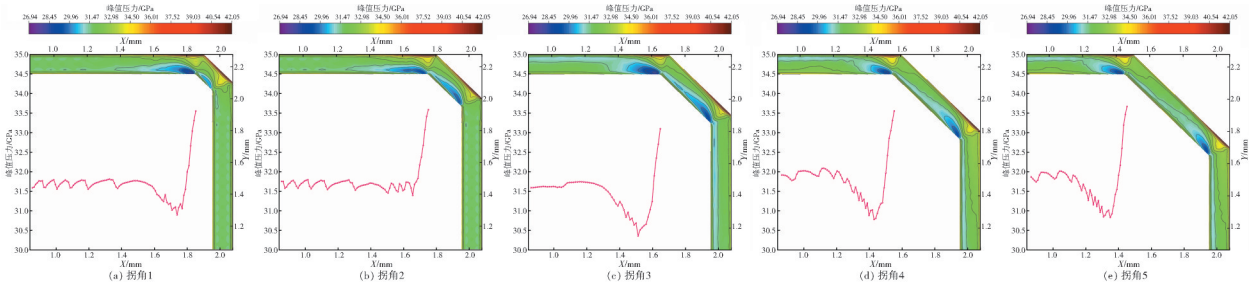


图 20　斜角的峰值压力云图

Fig. 20　Oblique peak pressure cloud diagram

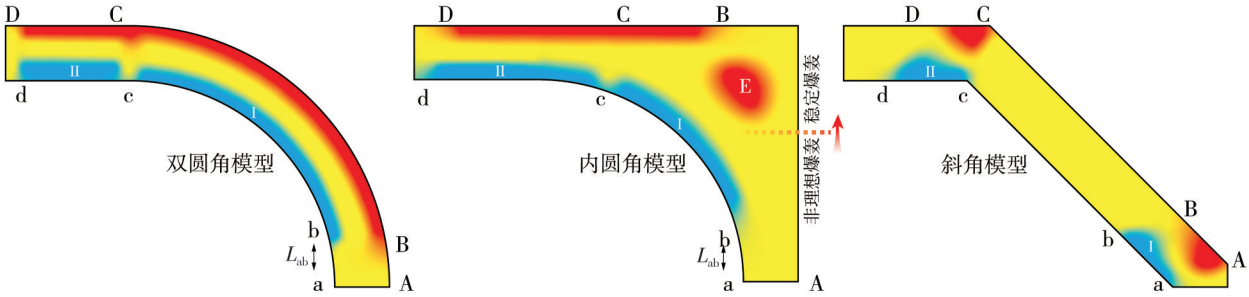


图 21　分布规律

Fig. 21　Distribution law

斜角模型拐角过渡转折明显，因此爆轰波刚进入拐角区域就分别在 a 点和 A 点开始形成非稳态爆轰区和高压区。1～5 号仿真计算中，斜角角度不变时，随着斜角尺寸的增加，入口与出口之间的干涉减弱，最终成为相对独立的压力分区。补充的斜角仿真计算中，在 60°时，拐角效应较强，且高压区分布向出口方向移动，趋向于直角拐角分布规律；在 30°时，拐角效应较弱，高压区压力水平较低。随着斜角尺寸的增加，拐角效应无明显减弱，表明斜角尺寸的增加对提高传爆性能的作用较弱；随着斜角角度的增加，拐角效应明显减弱，高压区过载降低，表明在传爆方向小幅度的角度变化能够提高传爆性能。

综上所述，具备平滑过渡、小角度变化等特征的单拐角沟槽能够提高传爆性能。

3.4　双拐角传爆分析

爆炸逻辑网络会采用一入二出等多路输出方式控制多个信号，爆轰信号同步性的优劣是多路输出是否可靠的重要标准之一，这与传爆线路传爆性能息息相关。对双拐角两条支路的峰值压力、传爆时间进行分析，研究不同形状对同步性的影响。分析传爆时间发现所有双拐角两条支路间的时间差为 0，证明拐角类型对传爆时间的同步性几乎无影响；在传爆压力方面，如图 22 所示，两条支路存在微小差异，数量级在 10^{-7}～10^{-6} 之间。

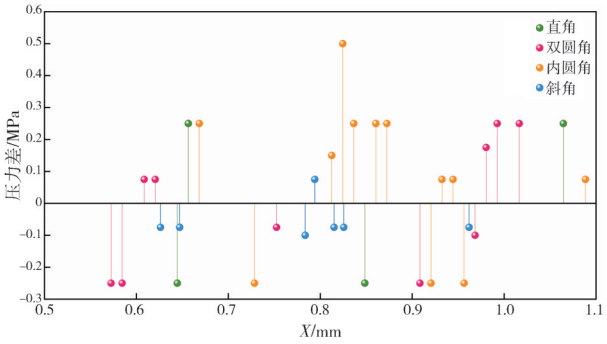


图 22　支路间传爆压力差

Fig. 22　Explosion pressure difference between branches

双拐角峰值压力云图如图 23 所示。4 种拐角的峰值压力分布及出口压力曲线关于拐角区域中线对称，单侧压力分布规律与对应的单拐角相似，不同之处在于拐角区域中心处的高压区，其成因与该处装药质量增加及壁面反射有关，其中，内圆角高压区面积及压力水平均为最高。综上所述，双拐角的拐角效应可参照单拐角的发展规律进行分析，双拐角对支路输出的同步性无明显影响。

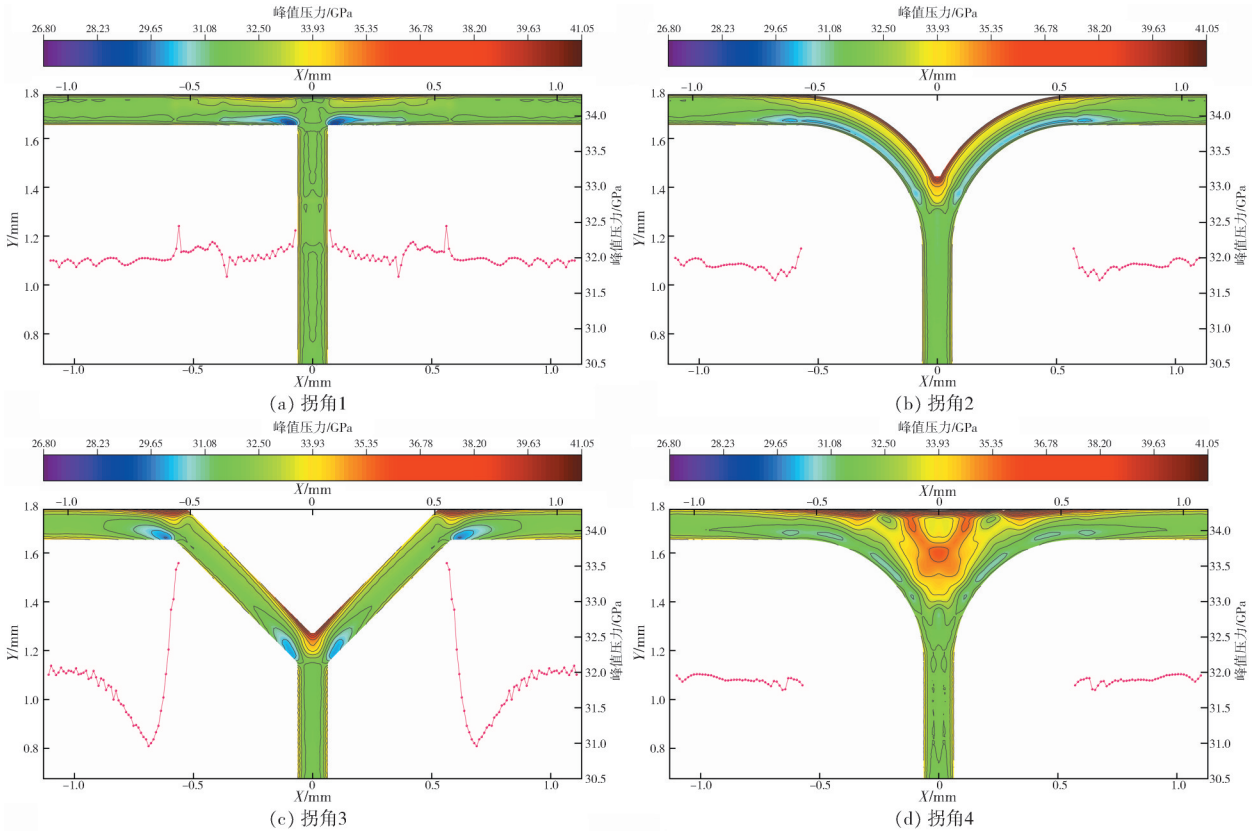


图 23 双拐角的峰值压力云图

Fig. 23 Peak pressure cloud diagram of double corner

4 结 论

本研究以爆炸逻辑网络的传爆线路作为研究对象，在JO-9C(Ⅲ)装药条件下，通过数值仿真完成了不同截面和拐角的沟槽结构对传爆性能的影响，分析了沟槽结构对爆炸逻辑网络传爆性能的影响规律，主要结论如下：

1）正梯形截面使爆轰波能量较好地聚集在基板沟槽，爆速亏损比仅为−0.179%，峰值压力方差8.2×10^{-4}，以较小的爆速亏损获得了稳定的传爆压力；

2）在直线传爆区域进入拐角区域时，具备平滑过渡(圆角半径大于4 mm)、小角度变化(0°～30°)等特征的拐角能有效改善拐角效应，提高传爆性能。

3）双拐角模型对称一侧与单拐角具有相似的分布规律，拐角形状对支路的同步性无明显影响。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献：

[1] 闻泉，刘宣，王雨时，等. 爆炸逻辑网络安全引爆技术综述[J]. 探测与控制学报，2016，38(4)：1-8.
Wen Quan，Liu Xuan，Wang Yushi，et al. Summary on explosive logic network safe initiating technique[J]. Journal of Detection & Control，2016，38(4)：1-8.(in Chinese)

[2] 范军政，杜志明. 爆炸网络技术的发展及应用[J]. 火工品，2003(4)：39-41.
Fan Junzheng，Du Zhiming. Development and application of explosive circuit technology[J]. Initiators & Pyrotechnics，2003(4)：39-41.(in Chinese)

[3] Jones H. A theory of the dependence of the rate of detonation of solid explosives on the diameter of the charge[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A，Mathematical and Physical Sciences，1947，189(1018)：415-426.

[4] Eyring H，Powell R E，Duffy G H，et al. The stability of detonation[J]. Chemical Reviews，1949，45(1)：69-181.

[5] 安崇伟，李文玺，温晓沐，等. 微型爆炸网络用DNTF/HMX基传爆药研究[J]. 含能材料，2017，25(2)：132-137.
An Chongwei，Li Wenxi，Wen Xiaomu，et al. Research on the DNTF/HMX based booster explosive

employed in the microscale explosion network[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25(2): 132-137. (in Chinese)

[6] Silvia D A, Ramay R T. Explosive elements: US3496868[P]. 1970-02-24.

[7] Khaldeev E V, Bessonova A V, Pronin D A, et al. Detonation propagation at bend angles in channels of small cross section[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2018, 54(5): 624-628.

[8] 陈锦健. 爆炸网络精密装药工艺及传爆性能研究[D]. 太原: 中北大学,2025.

[9] 杨小玉. 典型爆炸逻辑网络的数值模拟与可靠性分析研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.

[10] 徐新春. 微通道装药爆轰能量传递规律研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2006.

[11] 郑毅. 爆炸作用下钢桁梁桥结构损伤及动力响应研究[D]. 太原: 中北大学, 2025.

[12] Liu R, Nie J, Song H, et al. Detonation wave propagation in micro-scale groove charges[J]. AIP Advances, 2019, 9(9): 5120085.

[13] 覃剑锋, 焦清介, 徐新春. 微装药空腔能量传递的数值模拟与试验研究[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(9): 885-889.
Qin Jianfeng, Jiao Qingjie, Xu Xinchun. Numerical simulation and experiment study of the energy transfer in micro-channel charge with air interlayer[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(9): 885-889. (in Chinese)

[14] 冯长根. 小尺寸微通道爆轰学[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999.

[15] 张守中. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1993.

[16] Herzberg G, Walker G R. Initiation of high explosives[J]. Nature, 1948, 161(4095): 647.