DOI：10.11883/bzycj-2026-0190

曲边圆柱装药两端起爆近地面冲击波威力特性*

卫宇轩[1]，张健[2]，胡闯[3]，吕中杰[1]，黄风雷[1]，刘彦[1]

（1.北京理工大学 机电学院，北京 100081;
2.北京航天长征飞行器研究所，北京 100076;
3.北京理工大学重庆创新中心，重庆 401100）

摘 要：异形装药在实际应用中的重要作用逐渐显现，为研究曲边圆柱装药的冲击波威力特性，采用理论推导、实爆试验与数值仿真相结合的方法，围绕曲边圆柱装药在两端起爆条件下的近地面冲击波威力特性开展研究。研究结果如下：应用形状参数 Ω 表征曲边圆柱装药的几何形态，曲边圆柱装药冲击波威力特性符合爆炸相似律；两端起爆条件下，曲边圆柱装药内部爆轰波传播与爆炸冲击波演化符合典型两端起爆规律与近地面爆炸冲击波演化特征；曲边圆柱装药产生的爆炸冲击波与圆柱装药具有相似的波系结构，但具体形态与传播特性存在差异；形状参数差异显著影响曲边圆柱装药的爆轰产物流动与冲击波演化过程，对于质量为 20kg，形状参数 Ω=±0.30 的曲边圆柱装药，在传播距离 2m≤R≤8m 范围内，超压峰值相对差异从 85.4%减少为-17.5%；引入超压峰值形状增益因子 S_p，在比例距离 0.6~1.1m/kg$^{1/3}$ 范围内，形状参数 Ω 大于（小于）0 时，随比例距离增大，形状增益因子 S_p 非线性减小（增大），随长径比增大，由形状参数产生的超压峰值差异逐渐减小；拟合得到形状参数 Ω 和比例距离为变量的超压峰值和超压峰值形状增益因子的计算公式，公式计算结果与数值模拟的结果偏差小于 20%。研究结果对非典型几何形态装药设计与冲击波威力特性评估具有一定的参考价值。

关键词：曲边圆柱装药；冲击波威力特性；超压峰值形状增益因子；预测模型；

中图分类号：O389　　**国标学科代码：**13035　　**文献标识码：**A

Near-ground field shock wave power characteristic of curve-edge cylindrical charges with dual-end initiation

WEI Yuxuan[1], ZHANG Jian[2], HU Chuang[3], LYU Zhongjie[1], HUANG Fenglei[1], LIU Yan[1]

(*1. School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*
2. Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China;
3. Chongqing Innovation Center, Beijing Institute of Technology, Chongqing 401100, China)

Abstract: The important role of special-shaped charges in practical applications is gradually emerging. A combination of theoretical derivation, explosion test and numerical simulation was adopted to focuses on the near-ground shock wave power characteristics of curve-edge cylindrical charges under dual-end initiation conditions. The shape parameter Ω was introduced to characterize the geometric shape of curved cylindrical charges for dimensional analysis based on Π theorem and explosion similarity law. Static explosion tests of 20kg curve-edge cylindrical charges with different shape parameters were conducted, and numerical simulation models were established after verifying the rationality to expand the shape conditions for regularity analysis.

*收稿日期：2026-06-16；　修回日期：2026-11-06；
基金项目：无
第一作者：卫宇轩（1998－ ），男，硕士研究生，1998weiyuxuan@163.com
通信作者：胡　闯（1987－ ），男，硕士，助理研究员，chuang.hu@bitcqic.com

录用稿件，非最终出版稿

Analysis of the shock wave evolution process and ground overpressure distribution of curved cylindrical charges were conducted from both qualitative and quantitative perspectives. The shock wave power characteristics of the curved edge cylindrical charge explosion still comply with the explosion similarity law. The difference between numerical simulation and experimental results was less than 10%, the numerical simulation can simulate the experimental results well at different distances, which verifies the rationality of the finite element model. With dual-ends initiation, the detonation wave's propagation of curve-edge cylindrical charges conforms to the typical characteristics of dual-ends initiation, and the shock waves' evolution conforms to the general rule of near ground explosion. The explosive shock wave generated by curve-edge cylindrical charges has a similar wave system structure to that generated by cylindrical charges, while there are differences in specific morphology and propagation characteristics. The shape difference of curve-edge cylindrical charges significantly affects the flow of detonation products and the evolution of shock waves. As the distance increases, the difference in shock wave characteristics caused by shape gradually decreases. For 20kg curve-edge cylindrical charges with $\Omega = \pm 0.30$, the relative difference of peak overpressure decreases from 85.4% to -17.5% within the distance of $2\text{m} \le R \le 8\text{m}$. Peak overpressure shape gain factor S_p was introduced to measure the influence of the shape parameter on the distribution of peak overpressure. Within the scaled distance of 0.6-1.1m/kg$^{1/3}$, when Ω is greater (less) than 0, S_p decreases (increases) nonlinearly as the proportional distance increases, and as the aspect ratio increases, the difference in overpressure peak values caused by shape parameters gradually decreases. Binary cubic polynomial that conforms to the explosion similarity law was introduced to fit the change status of peak overpressure and peak overpressure shape gain factor as function of shape parameter and scaled distance. The deviation between the calculated results and simulated results is less than 20%. The results have certain reference value for designing atypical geometric shape charges and power characteristics evaluating of warheads.

Keywords: curve-edge cylindrical charge; shock wave power characteristics; overpressure peak shape gain factor; prediction model;

爆破战斗部的毁伤主要由近地冲击波造成[1]，衡量冲击波毁伤效果的主要参数通常包括冲击波超压峰值、正压持续时间和比冲量，其中冲击波超压通常能够最直观地反应毁伤效果，因而有效提高冲击波超压水平、并准确高效评估毁伤效果一直是该领域的研究重点之一。在实际应用中，由于有如搭载平台对包络尺寸和重量的限制等客观条件，战斗部常以简单规则几何体的形态存在。而随着战斗部和武器平台技术的发展，以及异形炸药压装技术相关理论和工业技术水平的进步[2][3]，许多非典型规则体的战斗部形状也已受到相关研究者的重视。Williams等[4]研究了棱柱形炸药的爆炸冲击波演化情况。Deng等[5]结合仿真分析与爆炸试验开展研究，发现破片空间分布受到椭圆战斗部的长短轴比影响，短轴方向的破片具有更高的速度和密度。安骋远等[6]通过实验与数值模拟探究了0.3 m/kg$^{1/3}$至1m/kg$^{1/3}$范围内椭圆截面柱形炸药的冲击波威力特性，并根据数值模拟的结果建立了计算公式。

曲边圆柱装药是指截面为半径不等的圆形、剖面为不规则几何形状，且具备旋转对称性的近似圆柱体的装药结构。目前，国内外学者已经针对曲边圆柱战斗部的爆炸威力特性开展了一些研究。Wang 等[7]、Guo 等[8]先后采用试验和数值模拟等方法研究了 D 形战斗部结构的破片特性，获得了 D 形结构战斗部的破片威力场的分布规律。李豪凯等[9]通过数值模拟发现鼓形战斗部较圆柱战斗部有更大的破片离散角和对目标的覆盖面积。王晋等[10]开展了线性聚焦战斗部破片聚焦过程的数值模拟，获得了战斗部尺寸、破片排布、破片质量以及交汇速度对破片飞散特性和穿孔分布的影响规律。

在可将炸药等效为球形炸药的条件下，冲击波超压经验计算公式通常有较好的适用性**Error! Reference source not found.**[12]，对于其他几何形状装药，国内外学者主要通过实验与数值模拟仿真相结合的方法对其威力特性开展研究。王明涛等[13]开展了考虑多种因素的柱形装药空中爆炸数值模拟，总结出一定长径比范围内柱形装药径向和轴向超压与长径比的关系。Simoens等[14]针对圆柱形炸药的轴向超压开展研究，通过实验和仿真发现圆柱形炸药爆炸产生的径向超压随长径比增大而增大。Fan等[15]结合实验与有限元模拟研究了装药的超压威力场，并建立了以长径比、方位、爆轰结构等因素为参数的圆柱形

录用稿件，非最终出版稿

装药爆炸载荷经验模型。马瑞龙等[16]通过实验和数值模拟研究球形和柱形装药近场爆炸冲击波结构和峰值空间分布规律，得到长径比为0.8时柱形炸药近场冲击波计算公式。刘军等[17]针对柱形炸药在近场的冲击波分布规律，使用经过实验效验的模拟数据补足样本空间，得到圆柱装药空爆在较小等效衰减距离下的超压估算公式。

起爆方式可以改变装药能量输出的方向与速率，进而影响炸药爆炸产生的冲击波威力场。谷鸿平等[18]研究发现在5m/kg$^{1/3}$范围内，起爆方式可改变爆炸冲击波场的局部分布形态。史利平等[19] 通过试验得到不同起爆方式情况下1.5~4.5m/kg$^{1/3}$范围内的地面冲击波超压，并通过数值仿真分析了不同起爆方式与炸药爆炸冲击波场分布之间的影响关系。黄宁等[20]研究两端起爆的爆轰波碰撞，验证了两端起爆对近地冲击波超压的增益机制。近地面爆炸通常指爆炸高度低于一定比例爆高即$H/W\leq0.35$的工况条件[21]，在近地面条件下，炸药爆炸形成冲击波会地面介质相互作用发生强烈反射，并形成马赫杆等典型的波系几何形态[22]，显著改变冲击波的传播机制和威力特征，且来自地面介质的约束持续影响近地面冲击波的完整传播过程。

既有研究表明冲击波威力特性受到起爆方式、装药形状以及近地面条件的影响，同时在爆炸近场，起爆方式以及装药形状的影响较为显著[23][24][25]。现有研究针对非典型形状结构装药关注仍然相对较少，尚未建立基于试验和数值模拟结果的冲击波威力特性理论体系，对于曲边圆柱装药，研究主要集中于其形状对破片生成状态与分布的影响，对于曲边圆柱装药的冲击波威力特性及其与形状之间的影响关系尚未建立完整的定量联系。实际战斗部应用中，常遇到对装药几何结构存在尺寸约束的工况，以曲边圆柱装药为例，对其冲击波威力特性进行分析并形成针对冲击波超压空间分布的规律性理解，可为约束条件下的战斗部设计与毁伤效果评估提供一定参考。因此，在既有研究基础上，本文采用理论推导、实爆试验与数值仿真相结合的方法，探究曲边圆柱装药的近地冲击波威力特性和不同形状工况下的冲击波演化，并分析在固定装药质量和长径比时曲边圆柱装药形状对冲击波威力特性的影响。

1 试验条件与数值模拟模型建立

1.1 曲边圆柱装药的爆炸相似律

相较于圆柱形装药，曲边圆柱装药无法仅靠直径与长度，或直径和长度中任何一项与长径比完整描述其包络参数。以曲边为一端圆弧且其对称轴与装药径向对称轴重合为例，如图 1 所示，曲边圆柱在剖面存在曲率半径为r'的弧线边界，且在径向上均存在两个数值不同的半径 r_1 和 r_2。

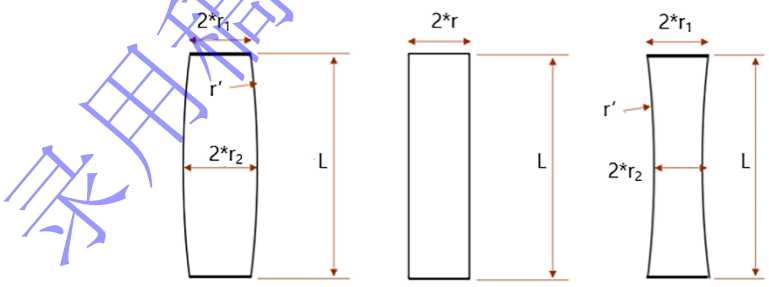


图 1 曲边圆柱包络参数

Fig.1 Envelope parameters of curve-edge cylinder

考虑到不同半径和高的曲边圆柱，同一曲率半径数值对应不同侧边弧度，本研究为便于研究分析，基于实际应用场景中的包络尺寸约束，定义曲边圆柱装药的长径比为装药长度 L 与最大半径的比值，即 $\lambda=L/\max(r_1,r_2)$。同时引入曲边圆柱形状参数 Ω，以表示轴向中点处半径 r_2 与底面半径 r_1 的比值：

$$\Omega = lg(r_2/r_1)\#(1)$$

录用稿件，非最终出版稿

即当 Ω 的值大于零和小于零时，分别对应外凸形（鼓形）装药和内凹形装药。则曲边圆柱装药的几何形态可由底面半径 r_1、形状参数 Ω 与长径比 λ 表示。当 Ω 与 λ 固定时，曲边圆柱装药的相对形状轮廓保持固定，当三个参数均固定时，则有唯一的曲边圆柱装药几何形态及对应体积。

令炸药能量为 E，曲边圆柱装药的底面半径与轴向中点处半径分别为 r_1 和 r_2，装药长为 L，形状参数为 Ω，炸药质量为 W，装药距地面高度为 H。定义曲边圆柱装药的长径比 λ 为 $L/\max(r_1,r_2)$，环境中的声速和初始压力为 c_0 和 p_0，视空气绝热指数为常量，则距离爆源 R 处的冲击波超压峰值 p 为：

$$p = f(E,r_1,r_2,\Omega,\lambda,L,W,R) \#(2)$$

令地面密度为 ρ_g，地面纵波波速为 c_g，地面泊松比为 v_g，地面屈服强度为 σ_y。对于地面，其反射性质主要取决于阻抗比 Z、泊松比和地面塑性。基于量纲分析与 Π 定理，将上式转化为：

$$\frac{p}{\rho_0 c_0^2} = f\left(\frac{E}{\rho_0 c_0^2 H^3}, \frac{R}{H}, \frac{r_1}{R}; \Omega, \lambda, \frac{\rho_g c_g}{\rho_0 c_0}, v_g, \frac{\sigma_y}{\rho_0 c_0^2}\right) \#(3)$$

将上式中距离量纲 R 转化为比例距离。定义特征长度：

$$L_0 = \left(\frac{E}{\rho_0 c_0^2}\right)^{1/3} \#(4)$$

其中 E 为炸药能量，ρ_0 为空气密度，c_0 为空气声速。L_0 量纲为长度，综合了炸药能量和空气介质性质。则 $\overline{R^*} = R/L_0$ 为无量纲比例距离、$\overline{H} = H/L_0$ 为无量纲爆炸高度、$\overline{r_1} = r_1/L_0$ 为无量纲炸药底面半径。可将上式转化为：

$$\frac{p}{\rho_0 c_0^2} = f\left(\overline{R^*}, \overline{H}, \overline{r_1}; \Omega, \lambda, \frac{\rho_g c_g}{\rho_0 c_0}, v_g, \frac{\sigma_y}{\rho_0 c_0^2}\right) \#(5)$$

固定炸药种类和质量，即能量 E 为常数，则体积 V 为常数，此时特征尺寸 r_1 与 Ω 和 λ 有关，有：

$$\frac{p}{\rho_0 c_0^2} = f\left(\overline{R^*}, \overline{H}, \Omega, \lambda, \frac{\rho_g c_g}{\rho_0 c_0}, v_g, \frac{\sigma_y}{\rho_0 c_0^2}\right) \#(6)$$

不考虑地面性质对冲击波超压峰值的影响，有：

$$\frac{p}{\rho_0 c_0^2} = f\left(\overline{R^*}, \overline{H}, \Omega, \lambda\right) \#(7)$$

固定爆炸高度不变，则当缩比模型与原模型满足几何相似且测试距离按比例变化时，有：

$$\frac{p}{\rho_0 c_0^2} = f\left(\overline{R^*}, \Omega, \lambda\right) \#(8)$$

通过量纲分析可知，在缩比模型与原型中的爆炸源和冲击波效应系统整体满足几何相似和材料相似的条件下，缩比模型与原型中的冲击波超压演化规律相同，即曲边圆柱装药爆炸的冲击波威力特性仍然符合爆炸相似律。

1.2 试验测试条件

参照曲边圆柱装药的基本结构，设计药柱形状为轴线方向上下对称的变截面主体。定义药柱的底面半径为 r_1，轴向中点处半径为 r_2，侧边弧线对应曲率圆的半径为 r'，装药长度为 L。试验工况的弹体几何参数见表 1。试验装药布置如图 2(a)与图 2(b)所示。装药置于木架上，底面距离地面高度为 64cm，装药以导爆索实现两端同步起爆。试验工况测点布置如图 2(c)所示。以装药为圆心，以 30°

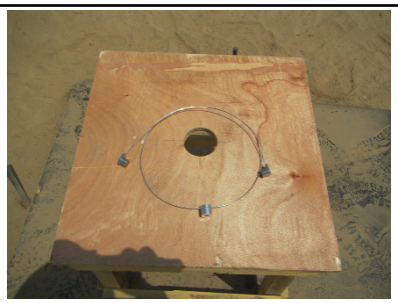
录用稿件，非最终出版稿

间隔设置共计 7 路测点，每路在 5.45m、8.15m、10.85m 布置传感器，在 20kg 质量装药工况下对应的比例距离分别为 2m/kg$^{1/3}$、3m/kg$^{1/3}$、4m/kg$^{1/3}$。试验均采用带有壁面压力传感器的集成式压力采集仪进行数据收集，采集仪如图 2(d)所示。采集仪埋入指定测点位置与地面齐平，由壁面压力传感器对炸药静态爆炸的地面冲击波超压进行测量，综合考虑试验场地布设难度与数据回收工作量，使用采集仪无连接单独布设、数据分别进行回收读取的方案。

表 1 试验装药几何参数

Table 1 Geometric parameters of each charge

试验工况	ρ (g·cm^{-3})	M//g	L/cm	r_1/cm	r_2/cm	r'/cm
1	1.72	20000	45.5	6.46	10.26	70.0
2	1.72	20000	45.5	11.49	7.69	70.0



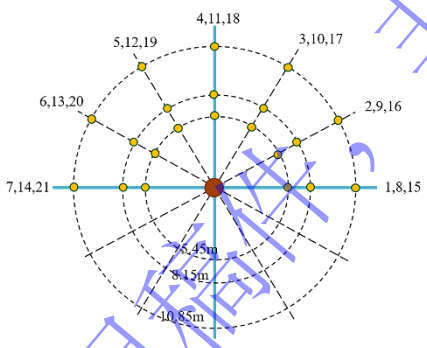
(a) 支架及导爆索

(a) Bracket and detonating cord



(b) 装药安装及水平调整（左：外凸形，右：内凹形）

(b) Installation and horizontal adjustment (left: convex, right: concave)



(c) 试验测点布置示意图

(c) Position schematic diagram of measurement points



(d) 试验用集成式压力采集仪

(d) Integrated pressure acquisition device

图 2 曲边圆柱装药静爆试验

Fig.2 Static explosion experiment of curve-edge cylindrical charge

1.3 数值模拟模型建立

炸药爆炸场属于高温、高压、高电磁辐射耦合环境，在爆炸场中进行测量并获取数据较为困难[26]，炸药质量的增加，爆炸近场靠近炸药区域都会进一步提升在爆炸场中开展数据测量的难度。因此在经过可靠性验证的条件下，通过数值模拟补充完善实验数据并开展后续分析是常用的研究方法。在开展炸药冲击波威力特性研究时，若不讨论来自炸药种类的影响，通常可将炸药的药量等效为 TNT 质量进行分析。因本研究试验装药参数不便直接用于开展数值模拟，本研究综合考虑数值模拟效率与根据爆热换算的精度，采用 TNT 装药开展数值模拟。炸药采用高能炸药材料模型进行描述。采用 JWL 方程[27]对炸药爆炸及其产物在爆轰后迅速膨胀的过程进行表示，其表达式为:

录用稿件，非最终出版稿

$$P=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\mathrm{e}^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\mathrm{e}^{-R_1V}+\frac{\omega E_0}{V}\#(9)$$

式中 P 为压力，A，B，R_1，R_2，ω 为 JWL 状态方程参数，V 为相对体积，E_0 为初始内能。TNT 材料的相关参数取值如表 2 所示[28][29]。表中 D 为炸药爆速，ρ 为炸药密度，V_0 为初始相对体积。

表 2 TNT 仿真模型参数

Table 2 Simulation parameters of TNT

ρ(g/cm^3)	D(m/s)	P_{CJ}(Mbar)	A(Mbar)	B(Mbar)	R_1	R_2	ω	E_0(Mbar)	V_0
1.63	6930	0.21	3.73	0.0373	4.15	0.9	0.35	0.06	1.0

将空气简化为理想气体模型，采用无强度流体模型与气体线性多项式方程进行描述：

$$P=C_0+C_1\mu+C_2\mu^2+C_2\mu^3+\left(C_4+C_5\mu+C_6\mu^2\right)E\#(10)$$

式中 P 为空气压力，E 为单位体积内能，C_0=C_1=C_2=C_3=C_6=0，C_4=C_5=γ-1，γ 为绝热指数，μ 为动力粘度系数。空气材料的相关参数取值如表 3 所示[28]。

表 3 空气材料参数

Table 3 Simulation parameters of air

ρ(g/cm^3)	P_c//(m·s^{-1})	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_0
0.00129	-1x10^{-9}	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.53E^{-6}

距离炸药越近，冲击波压力越大，同时爆炸场的复杂度也越高，因此数值模拟过程中，通常爆炸近场对计算精度有更高要求。选取网格划分精度为 2~16mm 的网格模型，对数值模拟工况开展网格敏感性分析，在比例距离 0.3m/kg$^{1/3}$ 至 0.9m/kg$^{1/3}$ 范围内间隔 0.1m/kg$^{1/3}$ 设置测点，获取不同网格尺寸下的冲击波-时间曲线如图 3 所示。

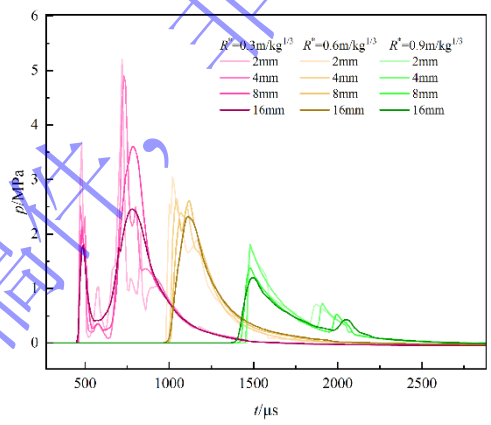
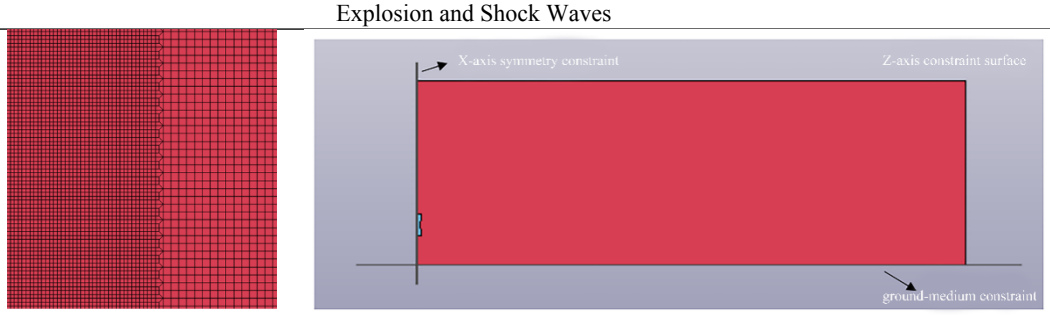


图 3 不同网格尺寸下的压力时程

Fig 3 Pressure-Time curve of different grid sizes

由图 3 可见随比例距离增大，不同精度网格之间差异逐渐减小，比例距离为 0.9m/kg$^{1/3}$ 时研究所设置 2mm、4mm 网格收敛。综合考虑计算精度与效率，采用逐层过渡的网格精度设置，炸药部分以及核心处网格精度为 1mm，逐层过渡至 8mm，网格总数约 221 万。网格过渡处理如图 4(a)所示。曲边圆柱装药截面均为圆形，且剖面具备旋转对称性，因此将其模型简化为二维。采用结构化任意拉格朗日-欧拉（Arbitrary Lagrangian Eulerian, ALE）算法，建立如图 4(b)所示的二维 1/2 模型，设置计算域范围 400cm×1200cm。设置对称边界，空气域顶部及周向采用无反射边界，底部设置无流出边界。为减小介质面对超压计算产生影响，在不同距离处以 1cm 高度设置测点，获取冲击波压力时程数据。

录用稿件，非最终出版稿



(a) 过渡网格　　(b) 二维爆炸模型

(a) Transitional grid　　(b) Two-dimensional explosion model

图 4 炸药静爆的数值模拟模型

Fig 4 Numerical simulation model for static explosion

2 试验与数值模拟结果分析

2.1 数值模拟合理性验证

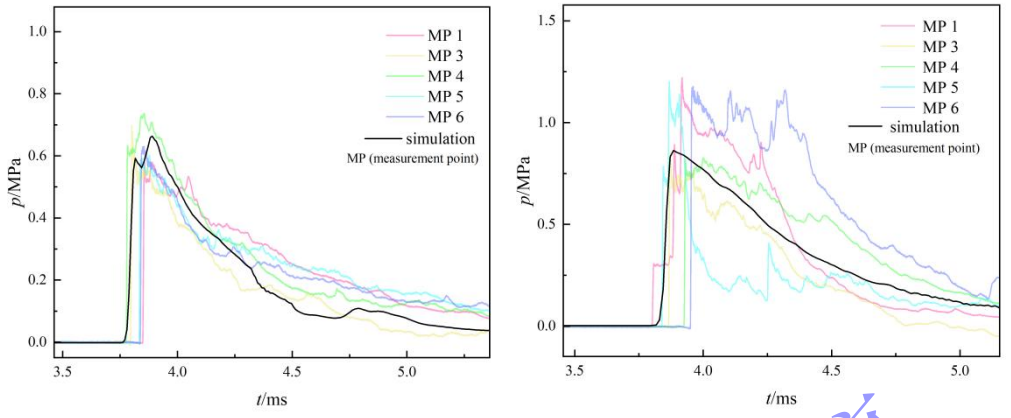
将试验装药其按爆热换算为 TNT 当量后，将试验结果与数值模拟结果进行对比。各工况不同距离处冲击波超压峰值对比结果如图所示。对试验与数值模拟结果进行对比，图 5 为比例距离 2m/kg$^{1/3}$、3m/kg$^{1/3}$、4m/kg$^{1/3}$ 测点处的超压-时间曲线。实爆试验所用集成式压力采集仪本身存在一定的高频噪声，在滤波处理后的超压曲线仍存在不同程度的震荡，实爆试验环境复杂，地面表层硬度、含水量、碎石等均可对冲击波传播过程产生影响。同时，数值模拟受限于网格精度与仿真计算软件本身的限制，数值模拟结果中超压曲线整体更为平滑。由对比可见，试验数据与数值模拟结果的曲线存在误差，但总体而言，通过曲线形态可以判断试验与数值模拟结果关于冲击波抵达时间、超压峰值、冲击波衰减过程的误差在允许范围内，数值模拟可以较好地计算炸药的冲击波超压峰值并预测其衰减过程。表 4 为各距离测点得到的试验数据与对应数值模拟的超压峰值结果对比，其中试验值由同距离测点在滤波后取平均值得到。排除因外部环境和设备故障产生的无效数据，试验与数值模拟得到的超压峰值误差不超过 10%。总体而言，数值模拟对不同距离的试验结果均能够实现有效预测，可以认为各模型设置具备合理性，并能够用于开展针对曲边圆柱装药冲击波威力特性的进一步分析。

表 4 典型位置超压峰值结果对比

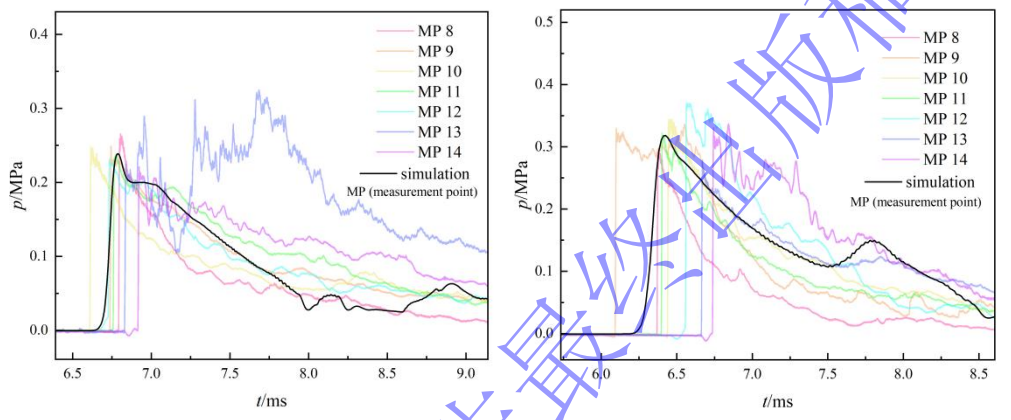
Table 4 Comparison of overpressure peak at typical locations

编号	距离/m	超压峰值/MPa		误差/%
		试验值	数值模拟值	
1	5.45	0.891	0.596	4.5
	8.15	0.319	0.241	3.0
	10.85	0.117	0.100	2.9
2	5.45	0.624	0.847	4.9
	8.15	0.234	0.322	0.9
	10.85	0.103	0.113	3.4

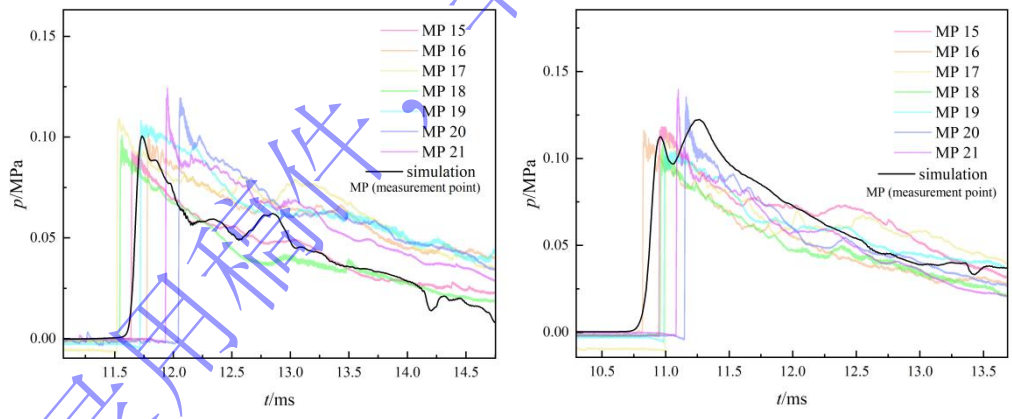
录用稿件，非最终出版稿



(a) 2m/kg$^{1/3}$ (5.45m)



(b) 3m/kg$^{1/3}$ (8.15m)



(c) 4m/kg$^{1/3}$ (10.85m)

图 5 超压-时间曲线（左：Ω=0.30，右：Ω=-0.30）

Fig 5 Overpressure-time curves (left: Ω=0.30, right: Ω=-0.30)

2.2 试验结果分析

通过图 5 所示实爆试验得到的各距离测点的压力时程数据可以判断，不同形状曲边圆柱装药产生的冲击波威力场具有显著差异。内凹形曲边圆柱装药（形状参数 Ω≤0）在 5.45m、8.15m 两个距离测点处的冲击波超压峰值均高于外凸形曲边圆柱装药（Ω≥0），差值分别约为 0.2MPa 和 0.08MPa，且 8.15m 距离测点，两类曲边圆柱装药冲击波超压峰值的差异小于 5.45m 距离测点。在 10.85m 距离测点，内凹形装药与外凸形装药的冲击波超压峰值接近。5.45m 测点处不同工况的冲击波波阵面抵达时间（即压力曲线数值显著增大处）大体一致，随距离增大，内凹形装药的冲击波抵达时间逐渐早于外

录用稿件，非最终出版稿

凸形装药，在 8.15m 测点处时间差约为 300ms，在 10.85m 测点处时间差约为 700ms，即在冲击波传播过程中，内凹形曲边圆柱装药产生的冲击波的速度衰减相对慢于外凸形装药，具有更快的平均传播速度。

对试验工况中传感器测量得到的超压峰值数据依照形如式(11)的超压衰减公式进行拟合，并绘制对应拟合曲线如图 6 所示。由拟合曲线对比可见在 5.45m 至 10.85m 范围内，内凹形曲边圆柱装药的超压峰值高于外凸形曲边圆柱装药。随距离增大，曲边圆柱装药的近地面冲击波超压峰值减小，不同形状曲边圆柱装药超压峰值的差异减小，同时随距离增大，各超压峰值和峰值差异的衰减速度也减小。

$$\mathrm{p}=\mathrm{A}+\frac{B}{R^{*}}+\frac{C}{R^{*2}}+\frac{D}{R^{*3}}\#(11)$$

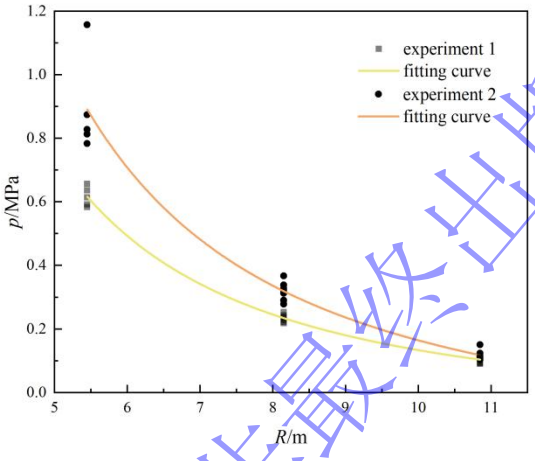


图 6 试验工况超压峰值拟合曲线

Fig 6 Fitting curve of overpressure-time

2.3 曲边圆柱装药冲击波威力特性分析

为进一步研究曲边圆柱装药冲击波特征，建立长径比 λ=2，形状参数 Ω 取值±0.30 的 20kg 级 TNT 炸药数值仿真模型。TNT 和空气参数如表 2 和表 3 所示，仿真模型的几何参数如表 5 所示。

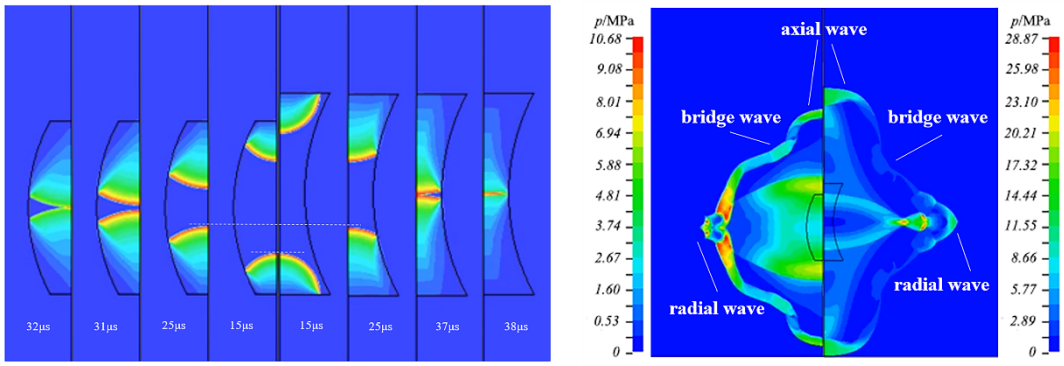
表 5 曲边圆柱装药几何参数 (Ω=±0.30)

Table 5 Geometric parameters of curve-edge cylindrical charges (Ω=±0.30)

Ω	L/cm	r_1/cm	r_2/cm	r’
0.30	44	5.5	11	46.75
-0.30	51.2	12.8	6.4	54.4

图 7 为两工况曲边圆柱装药起爆后炸药内部爆轰波传播过程，在两端起爆条件下，炸药内部产生相向的两道爆轰波并在炸药中部发生碰撞。由图 7(a)可见在 15μs、25μs 时刻，炸药下端起爆点产生的爆轰波传播距离一致，外凸形和内凹形曲边圆柱装药内部爆轰波碰撞分别发生在约 31μs、37μs，爆轰波碰撞时间不同主要源于轴向距离差异，几何形状并未显著改变爆轰波在炸药内部的传播速度。由图 7(b)可以看到在曲边圆柱装药的上下端形成了沿轴向传播的端面主波，在侧面形成了沿径向传播的侧面主波，并在过渡区形成了桥联波[16]。两类曲边圆柱装药内部的爆轰波速度基本一致，但在爆轰波碰撞后，不同曲边圆柱装药产生的冲击波传播速度存在差异。由图 7(b)可见，两类曲边圆柱装药所形成的径向冲击波的传播速度均大于轴向冲击波，使得冲击波波阵面的形状差异逐渐明显，逐渐向近似十字形的形态演化。在 t=180μs 时，两类曲边圆柱装药的径向和轴向冲击波波阵面位置已产生明显差异，内凹形曲边圆柱装药的径向和轴向波阵面较外凸形装药均更远离爆心，其冲击波具有更快的初始速度。

录用稿件，非最终出版稿

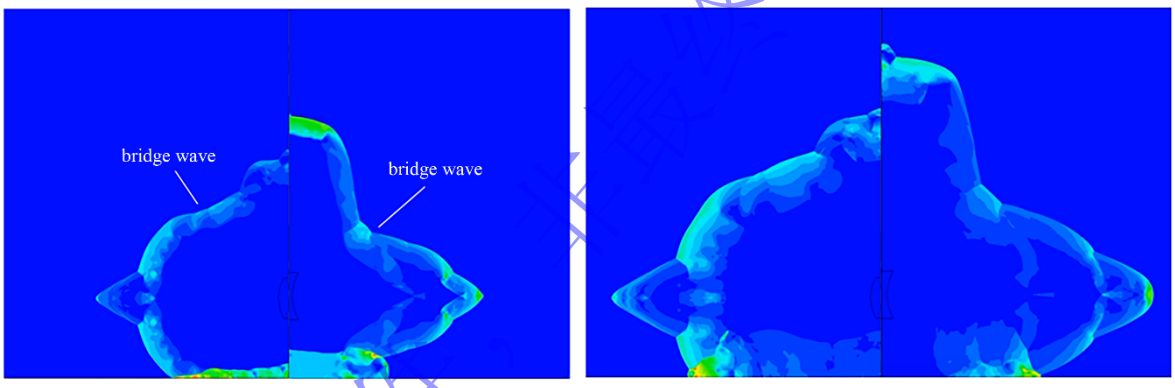


(a) t=15μs, 25μs, 31/37μs, 32/38μs　　(b) t=180μs

图 7 自由场冲击波波阵面随时间变化的图像（左：Ω=0.30，右：Ω=-0.30）

Fig 7 Shock wave as a function of time in free-field (left: Ω=0.30, right: Ω=-0.30)

图 8 为在 600μs、1000μs 时两类曲边圆柱装药的冲击波数值模拟结果。这一阶段炸药上侧的冲击波形态与自由场条件下相似，仍存在径向冲击波、轴向冲击波与桥联波的结构。在炸药下侧，冲击波形态受到地面介质影响产生显著变化，曲边圆柱装药的轴向主波先到达地面并发生反射，之后径向主波也到达地面发生反射。冲击波地面马赫反射由径向冲击波形成的初级反射冲击波逐渐追赶径向冲击波形成，马赫波继续沿地面向前传播。



(a) t=600μs　　(b) t=1000μs

图 8 近地条件冲击波波阵面图像（左：Ω=0.30，右：Ω=-0.30）

Fig 8 Shock wave in near-ground (left: Ω=0.30, right: Ω=-0.30)



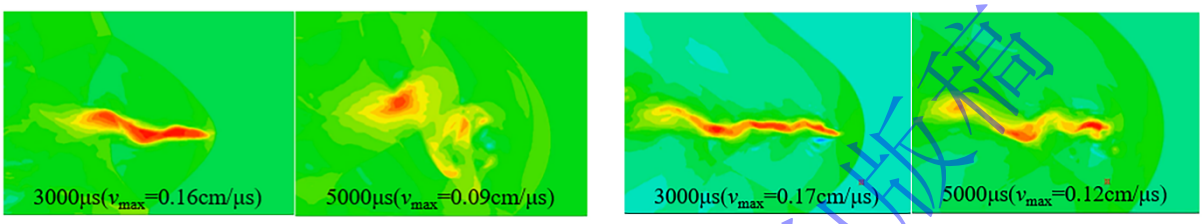
(a) t=600μs　　(b) t=1000μs

图 9 爆轰产物流动情况（左：Ω=0.30，右：Ω=-0.30）

Fig 9 Flow of detonation products (left: Ω=0.30, right: Ω=-0.30)

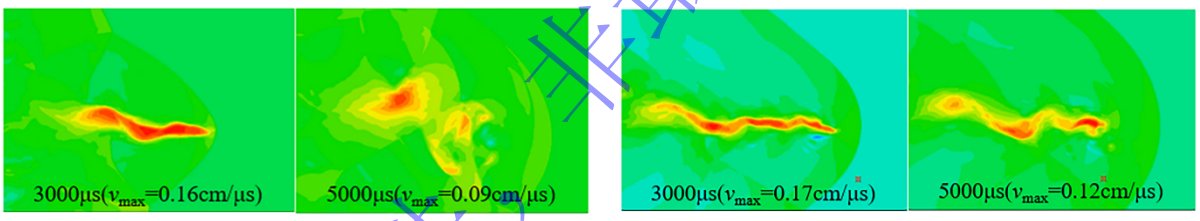
图 9 为 600μs、1000μs 时两类曲边圆柱装药的爆轰产物流动情况。内凹形曲边圆柱装药的爆炸产物基本形态保留一定程度的“花瓶状”形态，但径向存在一道流动速度较快的爆轰产物。外凸形装药

轴向产物流动速慢于内凹形装药，径向产物流动速度接近，但其径向前沿爆轰产物较内凹形装药更少，结合冲击波波阵面形态判断，外凸形装药由侧面主波演化的径向冲击波波阵面更大，桥联波位置更靠近轴向冲击波一侧，其冲击波整体形态已经脱离了圆柱形装药两端起爆的“花瓶状”形态。在1000μs 时对比水平与垂直两方向爆轰产物的扩散距离，内凹形装药的比值约 1.15，外凸形装药的比值约 1.5，即在 t≤1000μs 时，外凸形装药爆轰产物在轴向和径向的流动速度差别较大。冲击波与地面碰撞后产生反射，对比两类曲边圆柱装药的地面反射波与空中径向主波的传播距离，在 1000μs 时，外凸形装药的地面反射波与空中径向主波波峰前进距离的比值约为 0.71，内凹形装药的比值约为 0.57。结合冲击波波阵面演化与爆轰产物流动可见，外凸形装药更大的径向冲击波波阵面前沿与更大的桥联波倾角影响了地面入射波的角度与地面反射的形态。



(a) Ω=0.30　　(b) Ω=-0.30

图 10 为 Ω=±0.30 曲边圆柱装药的径向速度云图。随着冲击波不断传播，冲击波波阵面几何尺寸的扩大、传播过程中前端介质的阻力以及热耗散、湍流等效应叠加使得冲击波能量不断衰减，径向高速物质流逐渐弯曲折叠，脱离原有形态。内凹形炸药水平强冲击波的径向速度衰减显著慢于外凸形炸药，具有更高的平均速度。



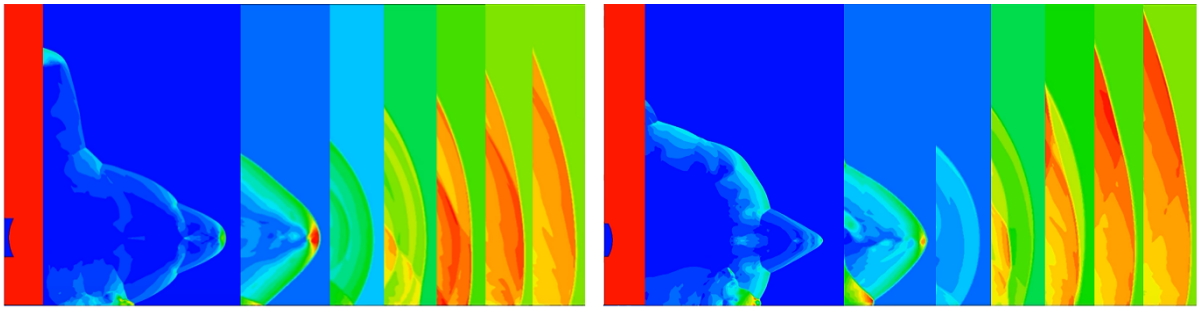
(a) Ω=0.30　　(b) Ω=-0.30

图 10 径向速度云图

Fig.10 Radial Velocity

冲击波波阵面形状随传播距离逐渐变化。图 11 所示为曲边圆柱装药时间间隔 3000μs 的冲击波前沿形态的组合图。空中冲击波尖端随冲击波的前进逐渐向上升高。气体激波在径向冲击波中发生复杂的相互作用。如图 12 所示，以装药长度一半处为基准，对比装药中点附近垂直方向的冲击波超压，可见在距离装药较劲位置即约 2　m/kg$^{1/3}$ 范围内，垂直方向超压峰值位于装药中部，随着水平距离的增加，垂直方向超压峰值位置先降低后升高，先移至装药下半部分位置，并逐渐向装药上半部分移动，表明存在水平冲击波随着传播逐渐抬高的现象，与近地面爆炸的冲击波传播规律一致，其中外凸形（Ω=0.30）装药的冲击波抬高出现更早。随传播距离增大，冲击波波阵面弧线趋于平滑，外凸形装药与内凹形装药产生的冲击波形态差异随传播距离增大而逐渐减小，冲击波形状逐渐演化为扁半球形，并最终演化为近似半球形。

录用稿件，非最终出版稿



(a) Ω=-0.30　　(b) Ω=0.30

图 11 水平冲击波演化

Fig.11 Evolution of horizontal shock waves

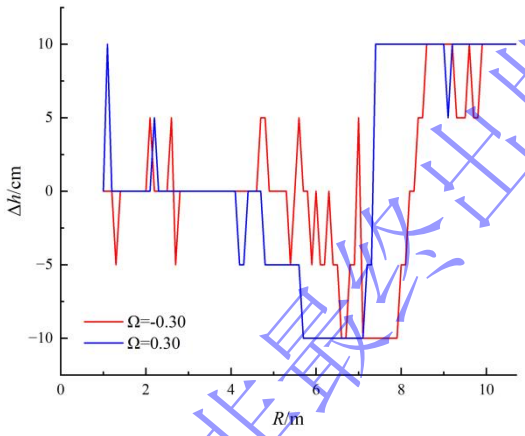


图 12 压力峰值走向

Fig.12 Trajectory of airborne peak overpressure

进一步对曲边圆柱装药冲击波的数值特性进行分析。图 13 给出了以炸药质心在地面投影为原点，两类曲边圆柱装药在距离 1.5m 内的地面冲击波超压峰值。结合冲击波波阵面形态推断，内凹形装药超压峰值的最大值对应轴向冲击波与地面碰撞的反射区，随距离增大冲击波远离爆心投影，轴向冲击波作用减弱，由于桥联波较小且与地面倾角较大，轴向冲击波作用与水平冲击波作用之间存在过渡区，表现为冲击波超压迅速减小。而外凸形装药产生的冲击波桥联波较大且与地面倾角较小，轴向冲击波作用与水平冲击波作用之间过渡相对平滑。

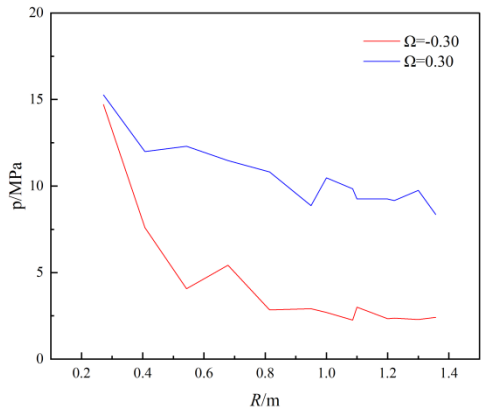


图 13 1.5m 内地面冲击波超压峰值

Fig.13 Peak overpressure of near-ground shock wave within 1.5m

录用稿件，非最终出版稿

图 14 给出了形状参数 Ω=±0.30 曲边圆柱装药的近地面冲击波超压随传播距离 R 的变化情况。由图 10 可见，随着传播距离 R 增大，峰值超压不断减小，冲击波传播速度减慢。两类曲边圆柱装药的冲击波超压峰值如表 6 所示。结合图 14 与表 6 可见，在传播距离 2m≤R≤8m 范围内，内凹形（Ω=-0.30）装药的超压峰值减小幅度小于外凸形装药（Ω=0.30），且通过峰值出现时间可见内凹形装药的近地面冲击波传播速度快于外凸形装药。

表 6 两类曲边圆柱装药典型位置超压峰值差异

Table 6 Difference of peak overpressure at typical positions of two curve-edge cylindrical charges

距离/m	超压峰值 (Ω=0.30)/MPa	超压峰值 (Ω=-0.30) /MPa	差值/MPa	相对差异
2.0	3.649	1.968	1.681	85.4%
5.0	0.401	0.571	-0.169	-29.7%
8.0	0.078	0.094	-0.016	-17.5%

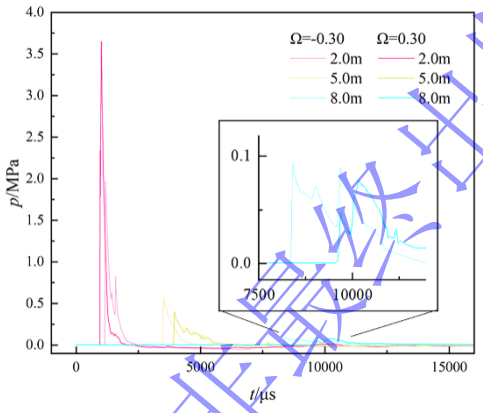


图 14 各距离下曲边圆柱装药的超压-时间曲线

Fig.14 Overpressure-time curves at various distances

3 曲边圆柱装药近地面冲击波超压演化规律

3.1 不同形状参数曲边圆柱装药的冲击波威力特性

基于试验和数值模拟的分析已经表明形状参数 Ω，也即曲边圆柱装药的侧边界形状，会影响冲击波的强度与传播过程，进而对冲击波威力场产生影响。针对曲边圆柱装药形状参数与冲击波威力特性之间的关系展开进一步探讨。取装药质量 W=20kg，固定长径比 λ=2，建立如

表 7 所示的体积为 12270 cm^3，形状参数 Ω 为-0.30~0.30 的共计 20 个曲边圆柱装药模型。

表 7 曲边圆柱装药几何参数

Table 7 Geometric parameters of curve-edge cylindrical charges

工况编号	L/cm	r_1/cm	r_2/cm	r'/cm	Ω
1	44.0	5.5	11.0	46.8	0.30
2	43.6	6.0	10.9	50.9	0.26
3	43.2	6.5	10.8	56.2	0.22
4	42.8	7.0	10.7	63.0	0.19
5	42.4	7.4	10.6	72.3	0.15
6	42.0	7.9	10.5	85.3	0.12
7	41.6	8.3	10.4	100.5	0.10
8	40.8	8.7	10.2	136.8	0.07

录用稿件，非最终出版稿

9	40.4	9.1	10.1	202.5	0.05
10	40.0	9.5	10.0	400.3	0.02
11	40.8	10.2	9.7	404.3	-0.02
12	41.6	10.4	9.4	208.5	-0.05
13	42.4	10.6	9.0	142.1	-0.07
14	43.6	10.9	8.7	110.1	-0.10
15	44.8	11.2	8.4	91.0	-0.12
16	46.0	11.5	8.1	78.4	-0.15
17	47.2	11.8	7.7	69.5	-0.19
18	48.4	12.1	7.3	62.9	-0.22
19	50.0	12.5	6.9	58.4	-0.26
20	51.2	12.8	6.4	54.4	-0.30

在比例距离 0.6~1.1m/kg$^{1/3}$ 范围内对曲边圆柱装药的近地面冲击波威力特性开展研究。图 15 为形状参数 Ω 分别取±0.22、±0.15、±0.10、±0.05 时的冲击波超压峰值随比例距离 R^*增长的变化情况。在相同比例距离处，不同曲边圆柱装药产生的冲击波威力场存在差异。随比例距离增加，所有曲边圆柱装药的超压峰值均呈现减小趋势，且其衰减速度随比例距离增大而减小。外凸形装药的冲击波超压峰值衰减速度快于内凹形装药，随比例距离增加，外凸形装药的冲击波超压峰值从远大于内凹形装药逐渐演化为小于内凹形装药。在 0.6m/kg$^{1/3}$ 处，Ω=±0.22 时冲击波超压峰值分别为 5.683MPa 和 2.447MPa，Ω=±0.10 时冲击波超压峰值分别为 4.697MPa 和 2.784MPa，随形状参数 Ω 增大，冲击波超压峰值逐渐增大；在 1.1m/kg$^{1/3}$ 处，Ω=±0.22 时冲击波超压峰值分别为 1.033MPa 和 1.654MPa，Ω=±0.10 时冲击波超压峰值分别为 1.200MPa 和 1.337MPa，随形状参数 Ω 增大，冲击波超压峰值逐渐减小。可见曲边圆柱装药形状参数 Ω 的大小，即装药的侧边形状影响了冲击波在不同距离处的分布情况。

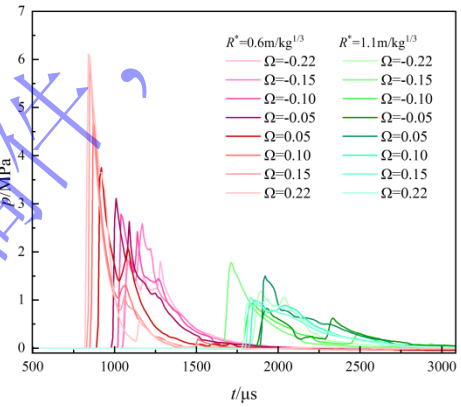


图 15 典型比例距离下各形状参数装药的超压-时间曲线

Fig.15 Overpressure-time curves of charges with various shape parameters at typical distances

引入超压峰值形状增益因子 S_p 衡量形状参数 Ω 与近地面冲击波超压峰值之间的影响关系，对曲边圆柱装药冲击波超压峰值的空间分情况开展分析。参考 Simoëns 等[30]的研究定义无量纲参数 S_p：

$$S_P = p_\Omega / p_0 \#(12)$$

式中 p_Ω 表示形状参数为 Ω 的曲边圆柱装药在某距离处的近地面超压峰值，p_0 表示对应的圆柱形装药（体积 V 与长径比 λ 相同）在同一距离处的近地面超压峰值。

图 16 为形状参数 Ω 分别取值±0.22、±0.10、0 时的形状增益因子 S_p 随比例距离 R^*增长的变化情况。不同形状参数的曲边圆柱装药，其超压峰值形状增益因子 S_p 的空间分布存在一定规律。在比例

录用稿件，非最终出版稿

距离 0.6-1.1m/kg$^{1/3}$ 范围内，形状参数 Ω 大于 0 时，随距离增大，形状增益因子 S_p 呈非线性减小，形状参数 Ω 小于 0 时，随距离增大，形状增益因子 S_p 呈非线性增大。在同一比例距离处，形状增益因子 S_p 随形状参数 Ω 的变化趋势与比例距离有关。在 0.6m/kg$^{1/3}$ 处，随形状参数 Ω 减小，超压峰值形状增益因子 S_p 减小，当 Ω=0.30 时，形状增益因子为 1.622，当 Ω=-0.30 时形状增益因子为 0.60；在 1.1m/kg$^{1/3}$ 处，随形状参数 Ω 减小，超压峰值形状增益因子 S_p 增大，当 Ω=0.30 时，形状增益因子为 0.79，当 Ω=-0.30 时形状增益因子为 1.32。

对于不同形状参数 Ω 的曲边圆柱装药，冲击波超压峰值形状增益因子 S_p 的空间分布存在差异，但两类曲边圆柱装药的超压峰值形状增益因子 S_p 变化趋势相似。对于不同形状参数的曲边圆柱装药，其冲击波超压峰值形状增益因子 S_p 的空间分布存在规律性，也即在控制其他条件的情况下，S_p 与 Ω、R^*之间可能存在如式(13)所示函数关系，与量纲分析结论一致。

$$S_P = F(\Omega, R^*) \#(13)$$

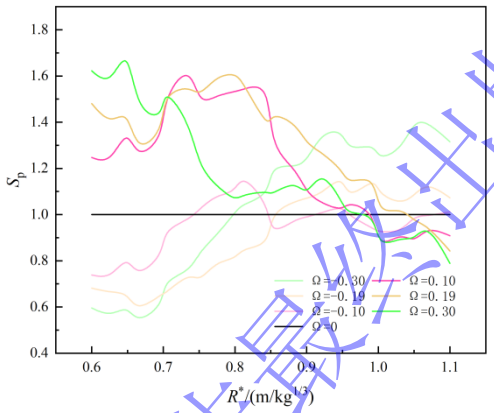


图 16 各形状参数装药的形状增益因子-比例距离曲线

Fig.16 Shape gain factor-scaled distance curves of charges with various shape parameters

既有研究表明柱形装药的长径比对其自由场或近地面爆炸的冲击波威力特性有显著影响。为分析与形状参数 Ω 耦合下长径比在曲边圆柱装药超压分布规律中的作用，取装药质量 W=20kg，形状参数 Ω=±0.30，长径比分别取 2、3、4、5，开展不同长径比曲边圆柱装药数值模拟。针对超压峰值 p 与超压峰值形状增益因子 Sp，整理其差值 Δp、ΔSp 如表 8 和表 9 所示，整理 ΔS_p 随比例距离的变化情况如图 17 所示。

表 8 不同长径比典型工况的超压峰值及差值(MPa)

Table 8 P and Δp of typical aspect ratios (MPa)

L/D	R^*=0.6m/kg$^{1/3}$			R^*=1.1m/kg$^{1/3}$		
	Ω=0.30	Ω=-0.30	Δp	Ω=0.30	Ω=-0.30	Δp
2	6.11	2.24	3.87	1.04	1.74	-0.70
3	6.06	2.59	3.47	1.09	1.63	-0.54
4	5.93	3.14	2.79	1.24	1.65	-0.41
5	5.53	3.24	2.29	1.31	1.74	-0.43

表 9 不同长径比典型工况的超压峰值形状增益因子及差值

Table 9 S_p and ΔS_p of typical aspect ratios

L/D	R^*=0.6m/kg$^{1/3}$			R^*=1.1m/kg$^{1/3}$		
	Ω=0.30	Ω=-0.30	ΔS_p	Ω=0.30	Ω=-0.30	ΔS_p
2	1.62	0.60	1.03	0.79	1.32	-0.53

录用稿件，非最终出版稿

3	1.56	0.67	0.89	0.78	1.18	-0.39
4	1.40	0.74	0.66	0.87	1.17	-0.30
5	1.26	0.74	0.52	0.84	1.11	-0.27

对于不同长径比的曲边圆柱装药，Δp 和 ΔS_p 均随比例距离增大而减小。随比例距离增大，外凸形炸药的超压峰值衰减速度大于内凹形炸药，0.6m/kg$^{1/3}$ 处外凸形装药超压峰值大于内凹形装药，1.1m/kg$^{1/3}$ 处外凸形装药超压峰值小于内凹形装药。在比例距离 0.6~1.1m/kg$^{1/3}$ 范围内，随长径比增大，不同形状参数工况的冲击波超压峰值差异逐渐减小，大长径比工况的形状增益因子差值 ΔS_p 的绝对值小于小长径比工况，总体而言形状增益因子差值 ΔS_p 的绝对值呈现随长径比增大而减小的趋势。即在比例距离 0.6~1.1m/kg$^{1/3}$ 范围内，随长径比增大，由形状参数 Ω 带来的冲击波超压差异逐渐减小。

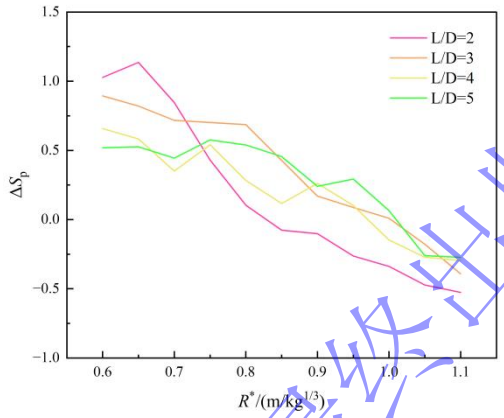


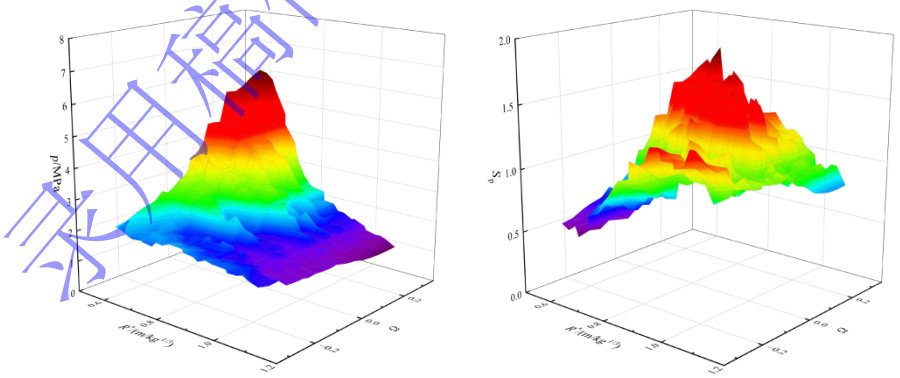
图 17 形状增益因子差值 ΔS_p 随比例距离变化情况

Fig.17 The variation of ΔS_p with scaled distance

3.2 曲边圆柱装药超压峰值计算公式

量纲分析结论与试验和数值模拟结果的定量分析均表明在控制其他条件的情况下，曲边圆柱装药的近地面冲击波超压主要受形状参数、长径比和比例距离的影响。本研究选取形状参数效应相对典型的长径比 λ=2，进一步对其影响规律开展分析，对

表 7 中所示不同工况曲边圆柱装药的数值模拟结果根据比例距离 R^*和形状参数 Ω 进行整理，结果如图 18 所示。



(a) 超压峰值　　(b) 形状增益因子

(a)Peak overpressure　　(b) Shape gain factor

图 18 超压峰值与形状增益因子随形状参数和比例距离的分布情况

Fig.18 The distribution of peak overpressure and its shape factor with shape parameter and scaled distance

由图 18 可见，超压峰值 p 和形状增益因子 S_p 随形状参数 Ω 和比例距离 R^*的变化存在一定规律性，在 0.6m/kg$^{1/3}$ 处，随形状参数 Ω 增大，超压峰值 p 和形状增益因子 S_p 均增大，在 1.1m/kg$^{1/3}$ 处，随形状参数 Ω 增大，超压峰值 p 和形状增益因子 S_p 均减小。对于不同形状参数 Ω，随比例距离增大，

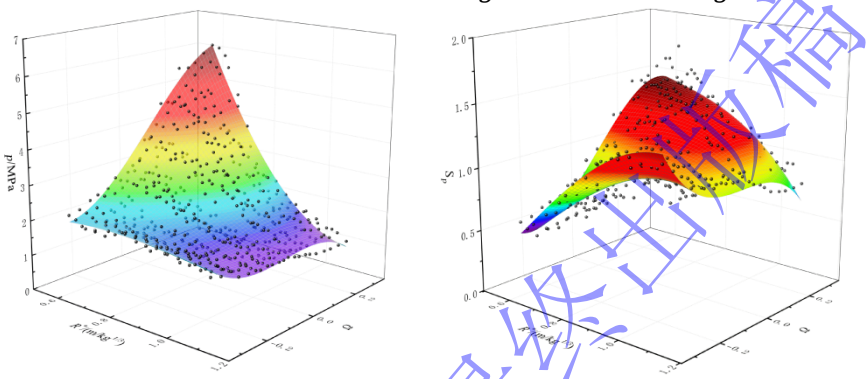
录用稿件，非最终出版稿

超压峰值 p 均减小；当 Ω>0 时，随比例距离增大，形状增益因子 S_p 减小，当 Ω<0 时，随比例距离增大，形状增益因子 S_p 增大。对于质量和长径比相同的曲边圆柱装药，其超压分布的差异是由形状参数和比例距离差异造成的，与量纲分析结论一致。因此可使用二元函数对曲边圆柱装药的超压峰值 p、形状增益因子 S_p 与形状参数 Ω、比例距离 R^*之间的关系进行表示。

综合考虑模型的复杂度与拟合能力，利用符合爆炸相似律的二元三次多项式对超压峰值 p 和形状增益因子 S_p 进行拟合。拟合结果如图 19 所示，得到的计算公式如下：

$$p = 10.95-13.53R^* + 41.79\Omega + 1.56R^{*2} + 2.61\Omega^2-74.55R^*\Omega + 2.53R^{*3}-27.89\Omega^3 + 33.90R^{*2}\Omega-1.96R^*\Omega^2,\ 0.6m/kg^{1/3} \le R^* \le 1.1m/kg^{1/3} \#(14)$$

$$S_p = 1.46-3.81R^* + 5.98\Omega + 7.44R^{*2}-1.07\Omega^2-5.05R^*\Omega-4.02R^{*3}-13.48\Omega^3 -0.36R^{*2}\Omega + 1.92R^*\Omega^2,\ 0.6m/kg^{1/3} \le R^* \le 1.1m/kg^{1/3} \#(15)$$



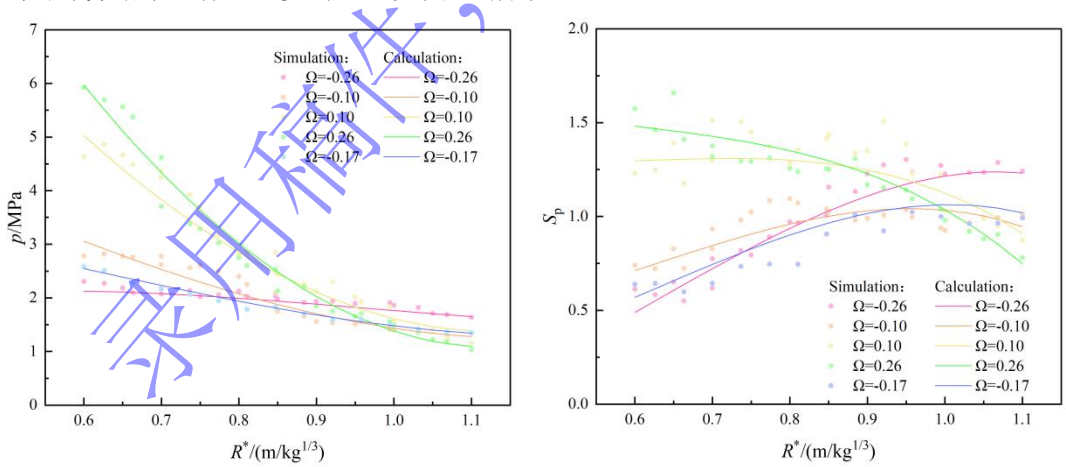
(a) 超压峰值　　(b) 形状增益因子

(a)Peak overpressure　　(b) Shape gain factor

图 19 拟合公式与数值模拟结果对比

Fig.19 Comparison of numerical simulation and calculation formulax

选取各形状参数曲边圆柱装药在典型比例距离处的冲击波超压峰值的数值模拟数据，与由拟合公式得到的计算结果进行进一步对比，如图 20 所示。



(a) 超压峰值　　(b) 形状增益因子

(a)Peak overpressure　　(b) Shape gain factor

图 20 各形状参数的计算公式误差

Fig.20 Calculated results' error of various shape parameters

总体而言，公式计算结果与数值模拟的相对误差随比例距离增大呈现逐渐减小的趋势；在形状参数较小时，超压峰值计算公式有着更小的误差，相较于超压峰值，形状增益因子的计算公式对于不同形状参数曲边圆柱装药的超压计算误差接近。在比例距离 0.6~1.1m/kg$^{1/3}$ 范围内，拟合公式与数值模

录用稿件，非最终出版稿

拟超压峰值结果的偏差小于 20%，可以认为该二元三次拟合模型有较好的可靠性，能够基本满足曲边圆柱装药爆炸近地面冲击波威力特性预测的工程需求。

4 结 论

为研究曲边圆柱装药在近地面爆炸条件下的冲击波威力特性，本文采用理论推导、实爆试验与数值仿真相结合的方法研究了两端起爆条件下曲边圆柱装药近地面冲击波的威力特性与演化过程，对曲边圆柱装药形状与冲击波威力特性之间的影响规律开展了定量分析，并针对曲边圆柱装地面冲击波超压建立了具有工程适用性的计算公式。主要结论如下：

(1)曲边圆柱装药冲击波威力特性符合爆炸相似律；两端点同步起爆条件下，曲边圆柱装药内部爆轰波传播与爆炸冲击波演化符合典型两端起爆规律与近地面爆炸冲击波演化特征。曲边圆柱装药的形状参数差异显著影响爆轰产物流动与冲击波演化过程，随着冲击波传播距离的增大，由形状带来的冲击波特征差异逐渐减小。

(2)定义形状参数 Ω 描述曲边圆柱装药几何形态，对于质量为 20kg，形状参数 Ω=±0.30 的曲边圆柱装药，在传播距离 2m≤R≤8m 范围内，超压峰值相对差异从 85.4%减少为-17.5%。在相同比例距离处，不同曲边圆柱装药产生的冲击波威力场存在差异。随比例距离增大，冲击波的超压峰值、传播速度均减小，由形状参数带来的冲击波特征差异也逐渐减小。

(3)引入超压峰值形状增益因子 S_p 以评估曲边圆柱装药形状参数 Ω 与冲击波超压峰值分布规律之间的影响关系。在比例距离 0.6~1.1m/kg$^{1/3}$ 范围内，形状参数 Ω 大于 0 时，随比例距离增大，形状增益因子 S_p 非线性减小，形状参数 Ω 小于 0 时，随比例距离增大，形状增益因子 S_p 非线性增大；随长径比增大，不同形状参数装药的冲击波超压峰值差异逐渐减小。

(4)利用符合爆炸相似律的二元三次多项式，对曲边圆柱装药的超压峰值和超压峰值形状增益因子随形状参数和比例距离的变化情况进行拟合，拟合得到计算公式的计算结果与数值模拟偏差小于 20%。

参考文献

[1] 缪希伟. 爆破战斗部对典型目标的毁伤评估研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018. DOI: 10.26948/d.cnki.gbjlu.2018.001791.

[2] 焦云多, 毕晓露, 邹琅, 等. 异形压装药柱精密成型工艺[J]. 兵工自动化, 2024, 43(11): 83-86. DOI: 10.7690/bgzdh.2024.11.018.
JIAO Y D, BI X L, ZOU L, et al. Technology of Precise Formation of Heteromorphic Grain by Pressing[J]. Ordnance Industry Automation, 2024, 43(11): 83-86. DOI: 10.7690/bgzdh.2024.11.018.

[3] 罗春旺, 苟瑞君, 于晓东, 等. 压装工艺参数对异形药柱装药影响的模拟研究[J]. 含能材料, 2025, 33(06): 635-644. DOI: 10.11943/CJEM2024279.
LUO C W, GOU R J, YU X D, et al. Simulation study on the impact of pressing process parameters on irregular-shaped charges[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2025, 33(06): 635-644. DOI: 10.11943/CJEM2024279.

[4] WILLIAMS K, JOHNSON E C. Evaluating blast wave overpressure from non-spherical charges using time of arrival from high-speed video[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics,2023,48(7). DOI: 10.1002/prep.202200346.

[5] DENG X, WU H, YANG X, et al. Preformed Fragment Velocity Distribution of Elliptical Cross-section Projectile[J]. Latin American Journal of Solids and Structures,2022,19(1): e423. DOI: 10.1590/1679-78256835.

录用稿件，非最终出版稿

[6] 安骋远，刘海鹏，刘彦，等. 椭圆截面柱形炸药爆炸冲击波威力特性[J]. 兵工学报, 2025, 46(08): 172-187. DOI : 10.12382/bgxb.2024.0969.
AN C Y, LIU H P, LIU Y, et al. Shock Wave Power Characteristics of Cylindrical Explosives with Elliptical Cross-section[J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(08): 172-187. DOI : 10.12382/bgxb.2024.0969.

[7] WANG M F, Lu F Y, Li X Y, et al. A new method to estimate the projection angles of fragments from a D shape configuration[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013,275-277:122–127. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.275-277.122.

[8] GUO Z W, HUANG G Y, LIU H, et al. Fragment velocity distribution of the bottom part of D-shaped casings under eccentric initiation[J]. International Journal of Impact Engineering,2020,144:103649. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103649.

[9] 李豪凯，冯昱祥，李元，等. 多点起爆下鼓形战斗部的威力特性[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(03): 40-51. DOI : 10.11883/bzycj-2023-0317.
LI H K, FENG Y X, LI Y, et al. Power characteristics of drum-shaped warheads under multi-point detonations[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(03): 40-51. DOI : 10.11883/bzycj-2023-0317.

[10] 王晋，刘一泽，张鸿宇，等. 线性聚焦式杀伤战斗部破片飞散特性及规律[J]. 兵工学报, 2024, 45(S1): 161-173. DOI: 10.12382/bgxb.2024.0672.
WANG J, LIU Y Z, ZHANG H Y, et al. Dispersion characteristics and rule of fragments of linear focusing fragment warhead[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(S1): 161-173. DOI: 10.12382/bgxb.2024.0672.

[11] HENRYCH J, ABRAHAMSON G R. The dynamics of explosion and its use [M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Pub. Co. ,1979: 218.

[12] KINGERY C N, BULMASH G. Air blast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst[M]. Aberdeen Proving Ground, MD, US: US Army Armament and Development Center, Ballistic Research Laboratory,1984.

[13] 王明涛， 程月华， 吴昊. 柱形装药空中爆炸冲击波荷载研究[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(04): 62-82. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0197.
WANG M T, CHENG Y H, WU H. Study on blast loadings of cylindrical charges air explosion[J]. Explosion and shock waves, 2024, 44(04): 62-82. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0197.

[14] SIMOENS B, LEFEBVRE M H, MINAMI F, et al. Influence of different parameters on the TNT-equivalent of an explosion[J]. Central European Journal of Energetic Materials, 2011, 8(1): 53-67.

[15] FAN Y, CHEN L, LI Z, et al. Modeling the blast load induced by a close-in explosion considering cylindrical charge parameters[J]. Defence Technology, 2023, 24(6): 83-108. DOI: 10.1016/j.dt.2022.02.005.

[16] 马瑞龙，王昕捷，孙志民，等. 球形和柱形装药近场爆炸冲击波载荷特性[J]. 兵工学报, 2025, 46(01): 24-38. DOI: 10.12382/bgxb.2023.1105.
MA R L, WANG X J, SUN Z M, et al. Near-field blast wave characteristics of spherical and cylindrical charges[J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(01): 24-38. DOI: 10.12382/bgxb.2023.1105.

[17] 刘军，王政，熊俊，等. 圆柱形炸药空爆在近场空间的超压估算公式[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(09): 918-927. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2022.113.
LIU J, WANG Z, XIONG J, et al. A near-field overpressure estimation equation of cylindrical charge explosive air blast[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(09): 918-927. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2022.113.

[18] 谷鸿平，柳雯，李广嘉. 起爆方式对柱形炸药空爆冲击波场的影响[J]. 爆破, 2016, 33(4): 34-38.
GU H P, LIU W, LI G J. Influences of Initiation Modes on Air Blast Wave Fields Produced by Cylindrical Explosives [J]. Blasting, 2016,33(4):34-38.

[19] 史利平，王成龙，吴宏斌，等. 两端点起爆对炸药近地场冲击波威力增强效应研究[J]. 北京理工大学学报，2022, 42(4): 340-346. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2021.162.

录用稿件，非最终出版稿

SHI L P, WANG C L, WU H B, et al. Enhancement effect of initiation methods on shock wave powerin near-ground field explosive[J]. Transactions of Beijing institute of Technology, 2022, 42(4): 340-346. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2021.162.

[20] 黄宁，吕中杰，高晨宇，等. 基于两端起爆的近地冲击波超压增益机制研究[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(10): 169-179. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2024.10.022.

HUANG N, LYU Z J, GAO C Y, et al. Enhancement mechanism study of detonation at both ends in near-ground field of shock wave based on different length-to-diameter ratios[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(10): 169-179. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2024.10.022.

[21] 杜红棉，曹学友，何志文，等. 近地爆炸空中和地面冲击波特性分析和验证[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(04): 65-68. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdxb.2014.04.001

DU H M, CAO X Y, HE Z W, et al. Analysisand validation for characteristics of air and ground shock wave near field explosion[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2014 34(04): 65-68. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdxb.2014.04.001

[22] 易仰贤. 空爆冲击波马赫反射近似计算[J]. 爆炸与冲击, 1983, (2): 44-49. DOI: 10.11883/1001-1455(1983)02-0044-6.

YI Y X. Approximate calculation of Mach reflection of explosive shock waves in air[J]. Explosion and Shock Waves, 1983,(02):44-49. DOI: 10.11883/1001-1455(1983)02-0044-6.

[23] 侯俊亮，蒋建伟，门建兵，等. 不同形状装药爆炸冲击波场及对靶板作用效应的数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(06): 556-561.

HOU J L, JAING J W, MEN J B, et al. Numerical simulation on blast wave field and deformation of thin plate under different-shape charge loading[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(06): 556-561.

[24] 邓贵德，郑津洋，陈勇军，等. 两种典型形状装药的近场爆炸载荷研究[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2010, 11(04): 462-467. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2010.04.016.

DENG G D, ZHENG J Y, CHEN Y J, et al. Near-field blast loadings from explosion of two typically shaped charges[J]. Journal of Army Engineering University of PLA, 2010, 11(04): 462-467. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2010.04.016.

[25] 张玉磊，陈华，袁建飞，等. 爆炸冲击波超压非均匀分布特性及最优测点数量[J]. 兵工学报, 2024, 45(03): 744-753. DOI: 10.12382/bgxb.2022.0629.

ZHANG Y L, CHEN H, YUAN J F, et al. Non-even Distribution Characteristics of Explosion Shock Wave Overpressure and Optimal Number of Measuring Points[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(03): 744-753. DOI: 10.12382/bgxb.2022.0629.

[26] LAVAYSSIERE M, LEFRANOIS A, CRABOS B, et al. Toward improvements in pressure measurements for near free-field blast experiments[J]. Sensors, 2023, 23(12): 5635. DOI: 10.3390/s23125635.

[27] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives[J]. The Physics Fluids,1980,23(12):2362. DOI: 10.1063/1.862940.

[28] 辛春亮，薛再清，涂建，等. 有限元分析常用材料参数手册[M]. 北京：机械工业出版社, 2020: 376-377.

[29] 宋浦，杨凯，梁安定，等. 国内外 TNT 炸药的 JWL 状态方程及其能量释放差异分析[J]. 火炸药学报, 2013, 36(02): 42-45. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2013.02.010.

SONG P, YANG K, LIANG A D, et al. Difference analysis on JWL-EOS and energy release of different TNT charge[J.] Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013,36(02):42-45. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2013.02.010.

[30] SIMOENS B, LEFEBVRE M. Influence of the shape of an explosive charge: quantification of the modification of the pressure field[J]. Central European Journal of Energetic Materials, 2015, 12(2): 195-213. DOI: 10.22211/cejem/64800.

录用稿件，非最终出版稿