

文章编号: 1006-9941(2025)10-1138-17

# 封闭房间内部圆柱形装药爆炸荷载数值模拟

肖伟芳, 邬明桃, 赵宪忠

(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 为探究圆柱形装药在内部爆炸工况下的荷载分布规律, 采用 LS-DYNA 显式动力学软件建立了 16 个封闭房间内部爆炸冲击波传播数值模型, 以壁面峰值反射超压和峰值反射冲量为评价指标, 系统分析了装药长径比 ( $L/D=1\sim5$ )、起爆位置 (首部、中心、尾部) 及装药朝向对爆炸荷载分布的影响规律。结果表明: 长径比 ( $L/D$ ) 影响最为显著, 当  $L/D$  从 1 增至 5 时, 反射超压比从 37.5%~1287.9% 降至 25.5%~356.7%, 反射冲量比从 88.7%~235.3% 降至 76.5%~132.8%。起爆位置仅在特定区域内对爆炸荷载影响显著, 最大超压比和冲量比可高达 2173.3% 和 328.0%。装药朝向对爆炸荷载的影响随  $L/D$  和入射角增大而减弱: 当  $L/D$  为 1 时, 最大反射超压比和冲量比分别为 1287.9% 和 235.3%; 而当  $L/D$  为 5 时, 二者分别降至 356.8% 和 132.7%。内部爆炸荷载分布的影响因素按大小排列依次为: 长径比 ( $L/D$ )、装药朝向、起爆位置。

**关键词:** 圆柱形装药; 内部爆炸; 荷载分布; 长径比; 装药朝向; 起爆位置

中图分类号: TJ55; O64

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2025142

## 0 引言

准确预测作用在建筑结构和构件的爆炸荷载是结构抗爆性能评估和抗爆设计的重要基础<sup>[1-2]</sup>。相较于开放空间, 封闭空间内的爆炸冲击波由于存在多次反射与叠加, 引起冲击波荷载峰值与持时增加, 进而提高了人员伤亡和结构构件损伤的风险<sup>[3-4]</sup>。当前, 已有的内部爆炸相关研究主要集中于构件响应与球形装药爆炸荷载分布规律<sup>[5-6]</sup>, 尚未针对圆柱形装药长径比 ( $L/D$ , 其中  $L$  和  $D$  分别为装药长度和直径)、起爆位置和装药朝向等因素对爆炸荷载分布特征展开系统研究。

确定爆炸荷载是进行结构抗爆性能评估和设计的前提条件, 针对自由场空中爆炸和地面爆炸工况, 防护领域相关规范<sup>[7-8]</sup>给出了其爆炸荷载的计算方法。基于爆炸试验数据, 不少学者提出了爆炸冲击波入射超压峰值的预测公式, 其中应用最为广泛的当属 Kingery

和 Bulmash<sup>[9]</sup>与 Kinney 和 Graham<sup>[10]</sup>所提出的爆炸荷载经验公式。然而, 此类预测公式大多基于球形或半球形装药的空中或地面爆炸工况。与球形装药不同, 圆柱形装药爆炸荷载还受装药长径比 ( $L/D$ )、装药朝向以及起爆位置的影响<sup>[1,11]</sup>。因此, 上述计算方法并不适用于计算圆柱形装药爆炸荷载。

近年来, 学者们针对圆柱形装药爆炸荷载开展了相关研究。刘军等<sup>[12]</sup>通过数值仿真模拟, 分析了方位角对爆炸冲击波超压峰值的影响规律, 建立了适用于长径比 ( $L/D$ ) 为 1/4~4 的圆柱形装药爆炸荷载计算方法, 但该方法并未考虑起爆位置对爆炸荷载的影响。王明涛等<sup>[11]</sup>通过有限元分析得到了圆柱形装药峰值入射超压和入射冲量形状因子, 建立了考虑起爆位置影响的圆柱形装药空中爆炸入射和反射冲击波荷载的计算方法。已有研究表明, 长径比 ( $L/D$ ) 对圆柱形装药爆炸荷载具有显著影响<sup>[13-16]</sup>。Xiao 等<sup>[14]</sup>对比了等药量的圆柱形装药与球形装药爆炸下的超压与冲量荷载分布以及超压时程曲线, 指出忽略装药形状将可能严重低估近场超压和冲量峰值。Punnappilly 等<sup>[15]</sup>通过数值模拟研究对比了不同长径比 ( $L/D$ ) 的圆柱形装药与球形装药的超压荷载分布, 建立了基于随机森林算法的爆炸荷载预测模型。Zhao 等<sup>[16]</sup>研究了  $0.2 \leq L/D \leq 5$  的圆

收稿日期: 2025-06-30; 修回日期: 2025-07-17

网络出版日期: 2025-09-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (22120250132)

作者简介: 肖伟芳 (1981-), 男, 副教授, 主要从事工程结构抗爆研究。e-mail: weifangxiao@tongji.edu.cn

通信联系人: 赵宪忠 (1972-), 男, 教授, 主要从事钢结构教学与研究。e-mail: x.zhao@tongji.edu.cn

引用本文: 肖伟芳, 邬明桃, 赵宪忠. 封闭房间内部圆柱形装药爆炸荷载数值模拟[J]. 含能材料, 2025, 33(10): 1138-1154.

XIAO Wei-fang, WU Ming-tao, ZHAO Xian-zhong. Numerical Investigations on Blast Loads generated from Cylindrical Charges inside Confined Rooms[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2025, 33(10): 1138-1154.

柱形装药与球形装药的爆炸冲击波荷载分布规律及其对钢筋混凝土板的毁伤特性。结果表明,同药量的圆柱形装药所引起的毁伤更为严重,且钢筋混凝土板的毁伤面积随着装药长径比( $L/D$ )的增加而增加。然而,由于上述计算方式基于自由场获得,故无法直接用于预测封闭空间内部圆柱形装药爆炸荷载。

伴随建筑结构内部爆炸事故频发,内部爆炸荷载分布研究逐渐得到国内外防护学界的广泛关注<sup>[17-19]</sup>。田力等<sup>[17]</sup>采用数值模拟分析了单个房间内部爆炸下壁面爆炸荷载的分布规律,并提出了内部爆炸荷载简化计算方法。Sochet等<sup>[18-19]</sup>通过开展内部爆炸试验研究了封闭空间内球形装药爆炸荷载分布规律,验证了Baker<sup>[20]</sup>所提出的内部爆炸荷载计算方法的适用性,并提出了相应的内部爆炸荷载简化计算方法。但是,此类计算方法大多针对球形装药内部爆炸工况,并不适用于圆柱形装药内部爆炸工况。

当前,针对圆柱形装药内部爆炸的相关研究主要集中于装药形状对构件响应的影响,尚无针对圆柱形装药长径比( $L/D$ )、起爆位置以及装药朝向对内部爆炸荷载分布规律的系统研究。为研究这些因素对内部爆炸荷载分布规律的影响,明确圆柱形装药在封闭空间内部的爆炸荷载分布规律的关键影响因素,研究采用LS-DYNA有限元软件建立内部爆炸冲击波传播数值模型;通过Dragos等<sup>[21]</sup>的内部爆炸试验数据对模型进行验证;并开展参数分析对比不同爆炸工况的壁面超压云图、反射超压时程曲线和反射冲量等,以壁面峰值反射超压和反射冲量为指标,讨论了长径比( $L/D$ )、起爆位置和装药朝向对内部爆炸荷载分布的影响。

1 内部爆炸冲击波传播数值模型仿真与验证

1.1 数值模型建立

1.1.1 材料模型与状态方程

采用LS-DYNA有限元软件中的S-ALE方法建立内部爆炸冲击波传播数值模型。鉴于装药位于房间中心处,为提高计算效率,建立1/4对称模型,如图1所示。通过约束空气域边界法向位移将壁面设定为刚性壁面<sup>[22]</sup>。数值模型包含空气与炸药两种材料,基于文

献[14]进行材料参数设定。空气密度为 $1.225\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,通过关键字\**MAT\_NULL*和线性多项式状态方程(EOS,式(1))将其定义为理想气体,其中 $\mu=p\cdot\rho_0^{-1}-1$ , $\rho$ 与 $\rho_0$ 分别代表当前与初始空气密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , $e$ 为单位体积内能, $\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。 $C_i$ 均为常数,其中 $C_0$ 到 $C_3$ 以及 $C_6$ 均为0, $C_4$ 和 $C_5$ 为0.4。

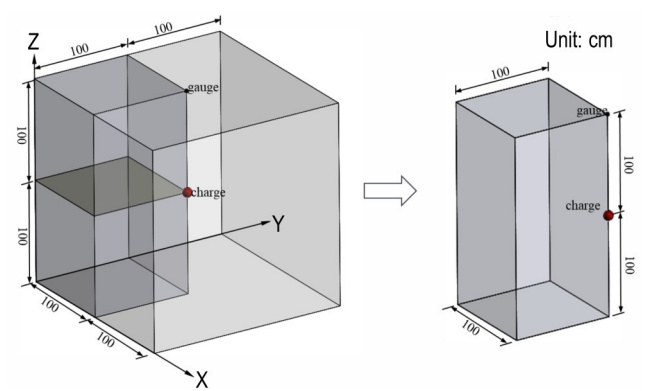


图1 装药与测点位置示意图

Fig.1 Sketch of charge and gauge point

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)e \quad (1)$$

通过\**MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN*关键字和Jones-Wilkins-Lee(JWL)状态方程(式2)定义装药材料模型。

$$p_2 = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1V_0}\right)e^{-R_1V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2V_0}\right)e^{-R_2V} + \frac{\omega E_0}{V_0} \quad (2)$$

式中, $p_1$ 为爆轰产物压力,kPa; $E_0$ 为炸药的单位体积内能, $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;  $V_0$ 为炸药与爆轰产物密度比(相对体积); $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$ 为常数。TNT炸药相关材料模型和状态方程参数见表1。

1.1.2 网格敏感性分析

网格敏感性分析采用的爆室模型尺寸为 $200\text{ cm}\times 200\text{ cm}\times 200\text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),装药位于爆室中心,测点位于天花板中心处,采用1000 g球形TNT装药,如图1所示。分别采用0.5、0.8、1、1.5、2、2.5 cm和5 cm网格进行网格敏感性分析,对应的网格数量与计算时间见表2。图2和图3分别对比了不同网格尺寸下的超压时程曲线、峰值反射超压和反射冲量。第一个超压峰值( $p_{r1}$ )出现在 $t=0.56\text{ ms}$ 附近,第二个超压峰值( $p_{r2}$ )出现在 $t=2.31\text{ ms}$ 附近。结果表明,当网格

表1 TNT材料模型参数和状态方程参数<sup>[14]</sup>

Table 1 Parameters of the material model and EOS for TNT<sup>[14]</sup>

| $\rho / \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | $D / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | $p_{CJ} / \text{MPa}$ | $A / \text{MPa}$  | $B / \text{MPa}$  | $R_1$ | $R_2$ | $\omega$ | $R_1$ | $R_2$ | $E_0 / \text{MPa}$ |
|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------|-------|----------|-------|-------|--------------------|
| 1630                                 | 6930                             | $2.1\times 10^7$      | $3.71\times 10^8$ | $3.23\times 10^6$ | 4.15  | 0.95  | 0.3      | 4.15  | 0.95  | $7\times 10^6$     |

Note:  $\rho$  is density of the high explosive,  $D$  is detonation velocity,  $p_{CJ}$  is Chapman-Jouguet detonation pressure.

表2 网格数量与计算时间

Table 2 Number of elements and computational effort in dependence on the element size

| mesh size/cm | number of mesh | time /min |
|--------------|----------------|-----------|
| 0.5          | 16000000       | 277.0     |
| 0.8          | 3906250        | 98.5      |
| 1            | 2000000        | 7.0       |
| 2            | 250000         | 0.5       |
| 2.5          | 128000         | 0.2       |
| 5            | 16000          | 0.1       |

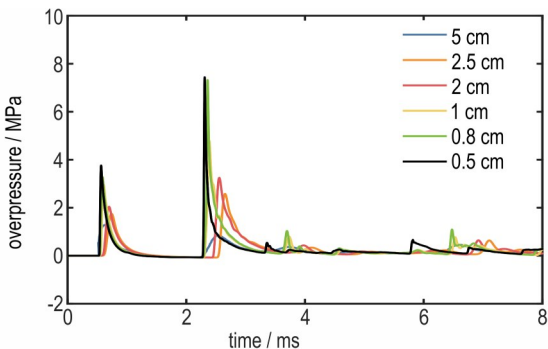


图2 不同网格尺寸数值模型超压时程曲线对比  
Fig.2 Comparison of the reflected overpressure-time histories generated from numerical models with different mesh sizes

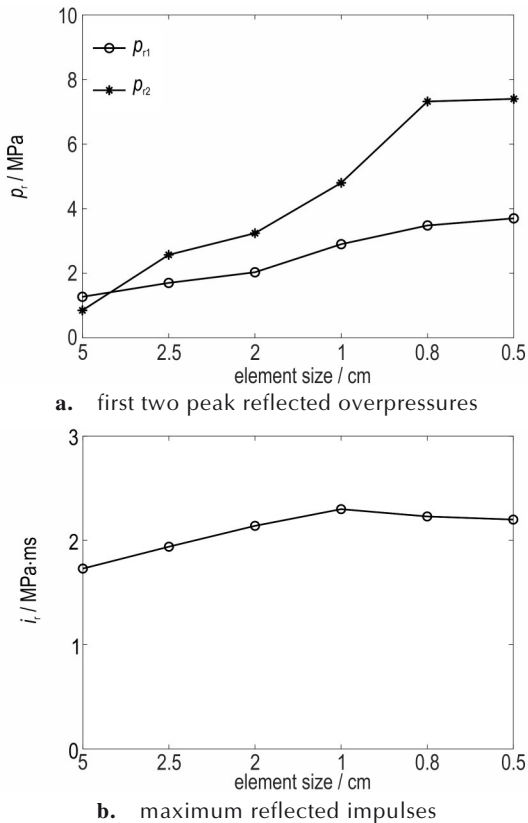


图3 不同网格尺寸数值模型峰值反射超压与反射冲量  
Fig.3 Peak reflected overpressures and maximum reflected impulses generated from numerical models with different mesh sizes

尺寸小于等于 0.8 cm 时,数值模拟结果逐渐趋于收敛。为了保证计算精度,后续数值模型均采用 0.5 cm 网格尺寸。

1.2 数值模型验证

为验证内部爆炸冲击波模型参数与建模方法的可靠性,选取 Dragos 等<sup>[21]</sup>所开展的封闭空间内部爆炸试验数据对数值模型进行验证。

1.2.1 内部爆炸试验

Dragos 等<sup>[21]</sup>所进行的内部爆炸试验靶房为封闭立方体爆炸容器,容器内部净尺寸为 200 cm×200 cm×200 cm(长×宽×高)。试验选用 1000 g 的球形 TNT 炸药,炸药位于容器中心,起爆位置为炸药中心(图 1)。测点位于天花板中心处,用于测量顶板壁面反射超压荷载,比例距离为 1 m·kg<sup>-1/3</sup>。炸药位置与测点位置信息见图 1 与表 3。

表3 内部爆炸试验信息

Table 3 Information of the internal blast experiment

| room dimensions / cm |          |          | charge   |           | gauge location / cm  |                      |                      |
|----------------------|----------|----------|----------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <i>L</i>             | <i>B</i> | <i>H</i> | mass / g | shape     | <i>X<sub>g</sub></i> | <i>Y<sub>g</sub></i> | <i>Z<sub>g</sub></i> |
| 200                  | 200      | 200      | 1000     | spherical | 100                  | 100                  | 200                  |

1.2.2 内部爆炸数值模拟

基于上述网格敏感性分析,选取 0.5 cm 的网格尺寸进行有限元建模与分析。图 4 对比了数值模拟与内部爆炸试验<sup>[21]</sup>所得超压时程曲线和冲量时程曲线。数值模拟结果与试验所测得的超压时程曲线和冲量时程曲线整体趋势较为吻合。其中数值模拟测得第一个和第二个超压峰值分别为 3754.8 kPa 与 7318.3 kPa,试验对应值分别为 4396.5 kPa 与 6025.3 kPa,差异分别为 14.6% 与 -21.4%。当  $t=3$  ms 时,数值模拟与试验所得反射冲量峰值分别为 1233.3 kPa·ms 和 1374.5 kPa·ms,两者差异为 10.3%。综上所述,所建立的数值模型可合理预测封闭空间内壁面爆炸荷载。

2 圆柱形装药内部爆炸冲击波传播数值模型

所建立的内部爆炸冲击波传播数值模型尺寸与内部爆炸试验<sup>[21]</sup>的房间尺寸保持一致,即 200 cm×200 cm×200 cm(长×宽×高),装药量为 1000 g。由于圆柱形装药所产生的爆炸荷载不仅与装药长径比  $L/D$ ( $L$  和  $D$  分别为装药长度和直径)有关,而且还与起爆位置相关,故考虑  $L/D$  为 1~5 的五种圆柱形装药(图 5)和三种不同的起爆位置。起爆点位于装药上端部中心、装药

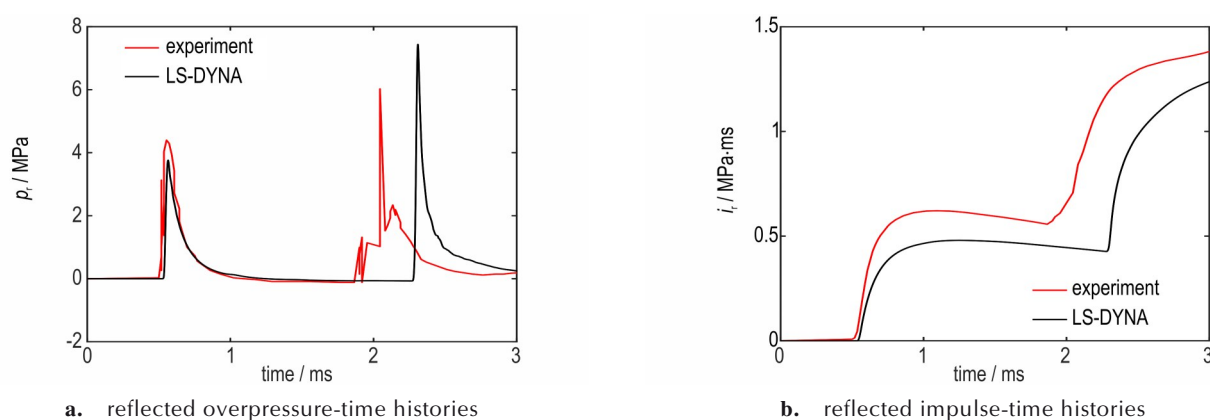


图4 反射超压时程曲线与反射冲量时程曲线的试验结果和数值模拟对比

Fig.4 Reflected overpressure- and impulse-time histories obtained from the experiment and LS-DYNA

中心以及装药下端部中心时分别为首部起爆(图 6a)、中心起爆(图 6b)以及尾部起爆(图 6b)。另外,采用球形装药中心起爆工况作为对照组。

为获取圆柱形装药在不同朝向工况下的爆炸荷载分布,根据测点与圆柱形装药之间的位置关系(径向、轴向和周向,图 7~8),沿各壁面中轴线布置 3 组共计

63 个测点(图 9)。另外,根据测点与装药的空间关系将测点分为径向组、轴向组以及周向组(图 9)。其中径向组测点编号为 1~21,测点沿圆柱体径向分布(图 9a);轴向组测点编号为 22~42,测点连线与圆柱形装药轴向平行(图 9b);周向组测点编号为 43~63,测点分布于圆柱形装药圆周方向(图 9c)。组内测点

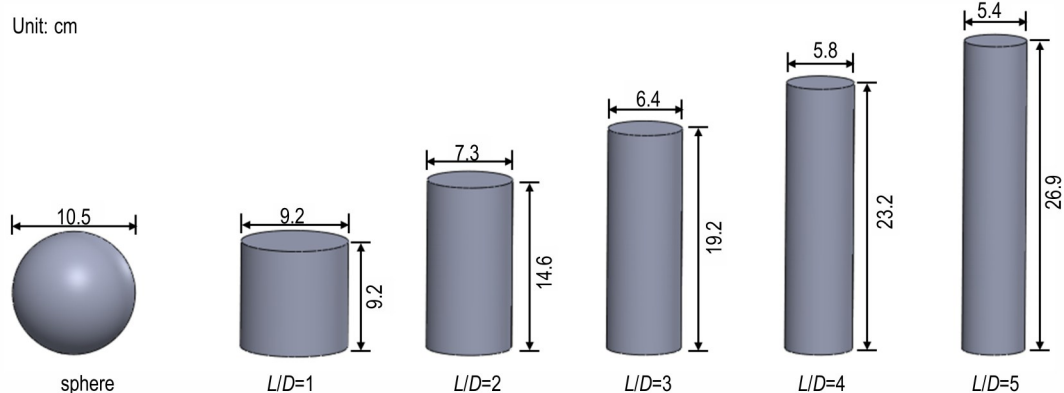


图5 球形装药与圆柱形装药示意图

Fig.5 Diagram of spherical and cylinder charges with different length-to-diameter ratios

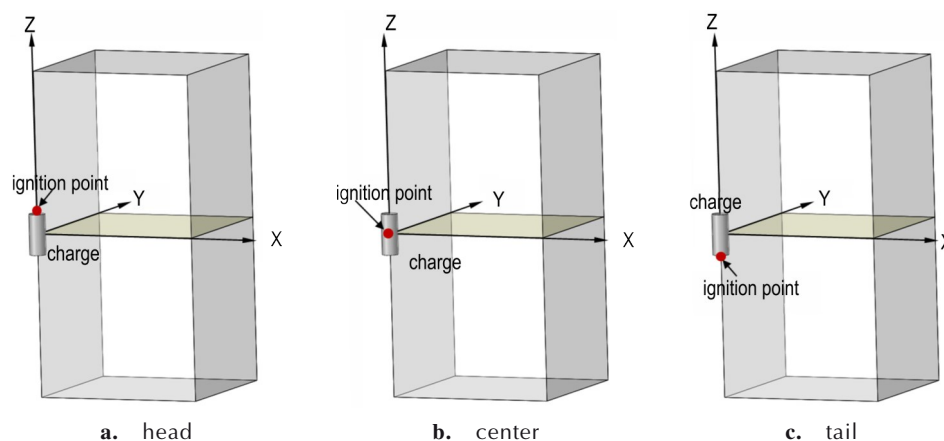


图6 起爆位置示意图

Fig.6 Ignition location of charge

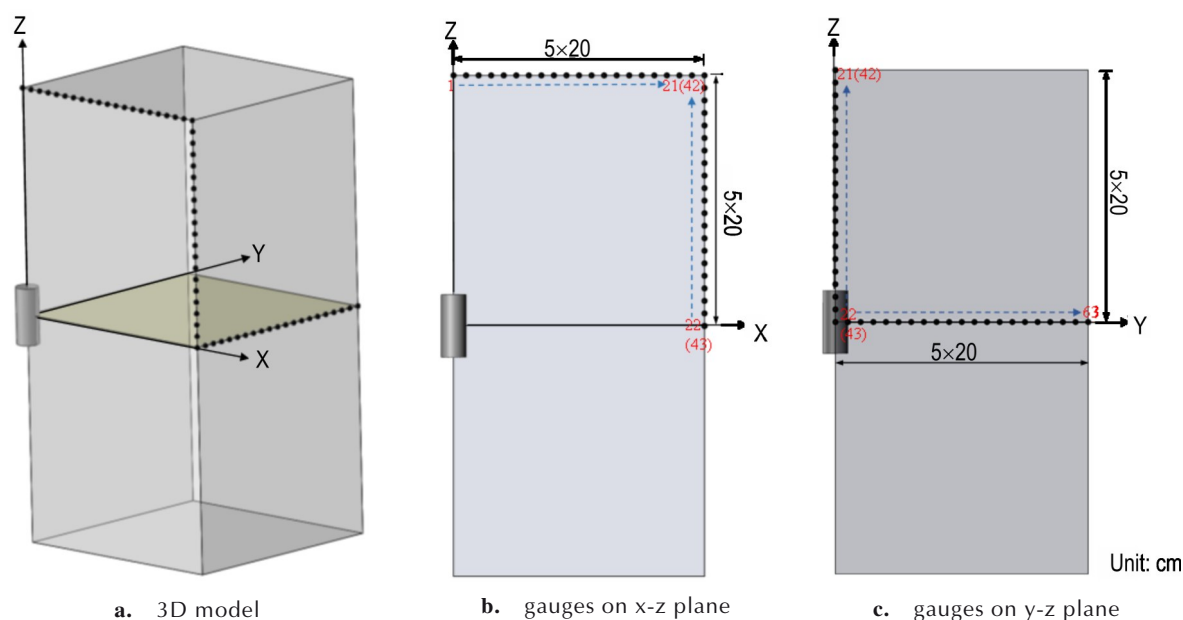


图7 测点布置示意图

Fig. 7 Gauge configuration

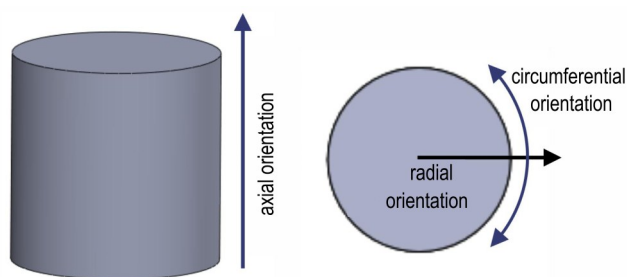


图8 圆柱体轴向、径向和周向示意图

Fig.8 Diagram of main directions of the cylindrical charge

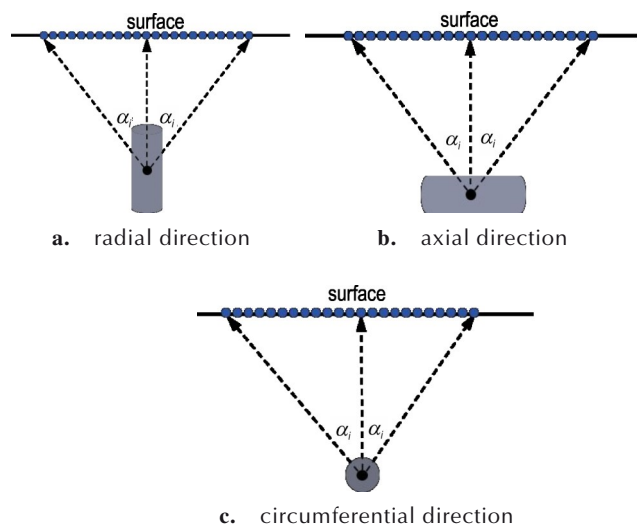


图9 测点分布示意图

Fig.9 Relationship of the locations between the gauges and the charge

间距为 5 cm, 比例爆距  $Z$  范围为  $1 \sim 1.41 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ , 入射角  $\alpha_i$  范围为  $0^\circ \sim 45^\circ$ 。

### 3 参数分析

为分析长径比、起爆位置与装药朝向对圆柱形装药内部爆炸荷载分布的影响, 本研究以  $\alpha_i$  为  $5.7^\circ$ 、 $24.2^\circ$  和  $43.2^\circ$  时测点为例, 对比了不同爆炸工况下的壁面超压云图、反射超压时程曲线和反射冲量峰值。由于峰值反射超压能够反映壁面在瞬时作用下承受的极值荷载, 而反射冲量则表征荷载时程内的累积动量输入, 故选取二者作为评价指标, 以定量评估上述参数对内部爆炸荷载分布的影响。

#### 3.1 壁面冲击波特征

为分析圆柱形装药形状对爆炸冲击波传播规律的影响, 在天花板、地板和周围壁面以 2cm 为间距均匀布置测点以获取壁面荷载分布。图 10 和图 11 分别对比了起爆位置为装药中心时, 不同长径比 ( $L/D$ ) 的圆柱形装药轴向所指壁面和径向所指壁面的超压云图。对于轴向所指壁面, 冲击波于  $t=0.7 \text{ ms}$  到达壁面, 超压云图呈现圆形分布 (图 10a)。随着  $L/D$  增加, 轴向冲击波传播速度减慢且强度降低。当  $t=1.3 \text{ ms}$  时 (图 10b), 冲击波到达角隅处, 随后发生多次反射和耦合, 导致冲击波强度增强, 且增强区域随着  $L/D$  增加而扩大。当  $t=2 \text{ ms}$  时, 冲击波到达三壁面所围成的角隅

处,随后再次发生多次反射与耦合,进一步提高了冲击波强度(图10c)。随着 $L/D$ 增加,冲击波增强区域扩大,而冲击波强度则略为下降。针对径向所指壁面(图11),冲击波传播速度随着 $L/D$ 的增加而逐渐增加(图11a);当冲击波到达两壁面所围成的角隅时,冲击波增强区域随着 $L/D$ 的增加而逐渐增加(图11b)。当 $t=$

2 ms时(图11c),冲击波在三壁面所围成的角隅处进一步得到增强。当 $L/D=1$ 时,其超压分布与球形装药超压分布较为接近,且壁面超压高于其他圆柱形装药工况。

图12和图13对比了 $L/D=3$ 的爆炸工况下起爆位置对壁面超压分布的影响。对于装药轴向所指壁面(图12),起爆位置对壁面超压分布影响显著:当起爆

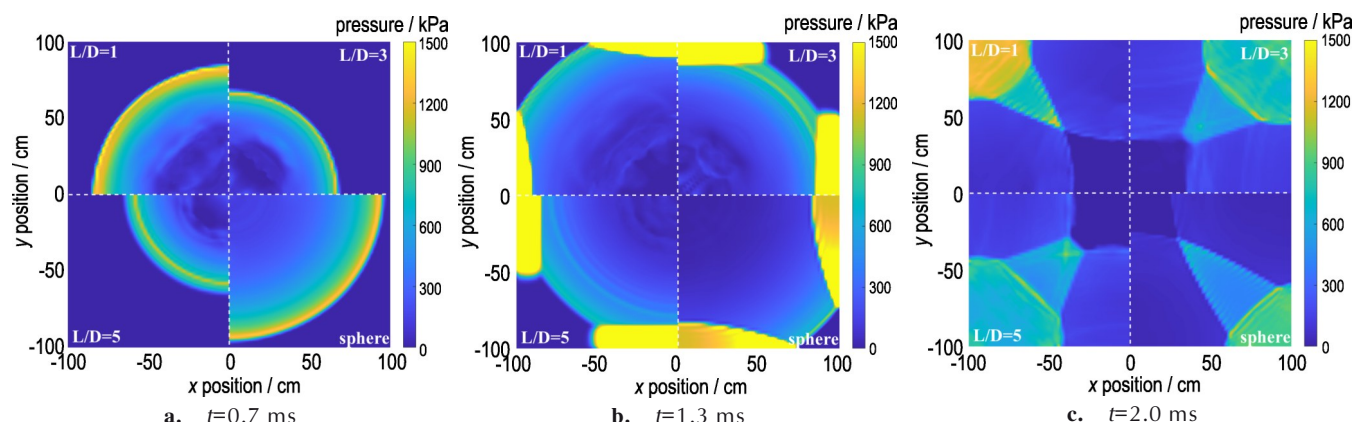


图10 不同长径比的圆柱形装药轴向所指壁面的超压云图

Fig.10 Pressure contours on the surfaces related to the axial direction of cylindrical charges with different  $L/D$  ratios

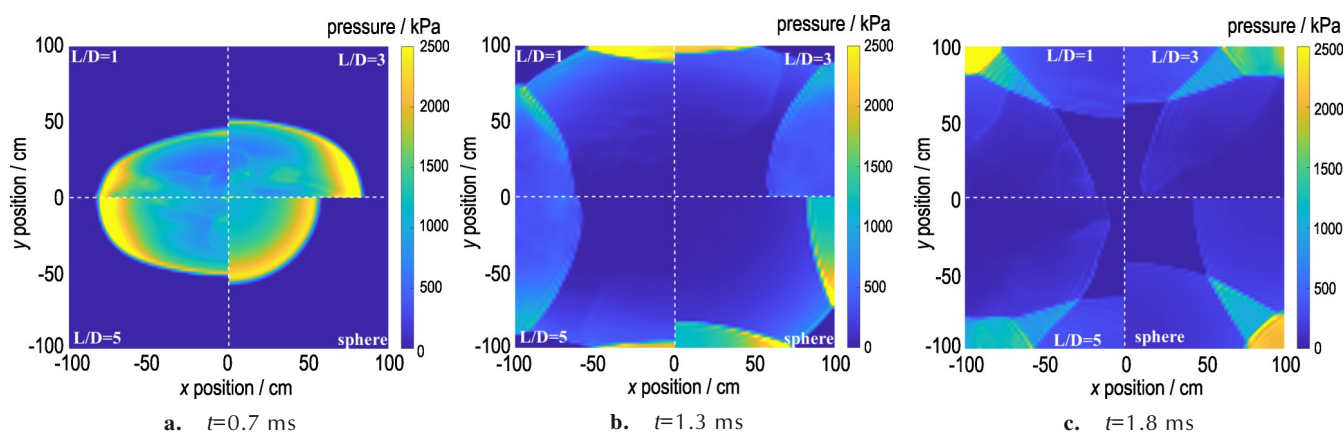


图11 不同长径比的圆柱形装药径向所指壁面的超压云图

Fig.11 Pressure contours on the surfaces related to the radial direction of cylindrical charges with different  $L/D$  ratios

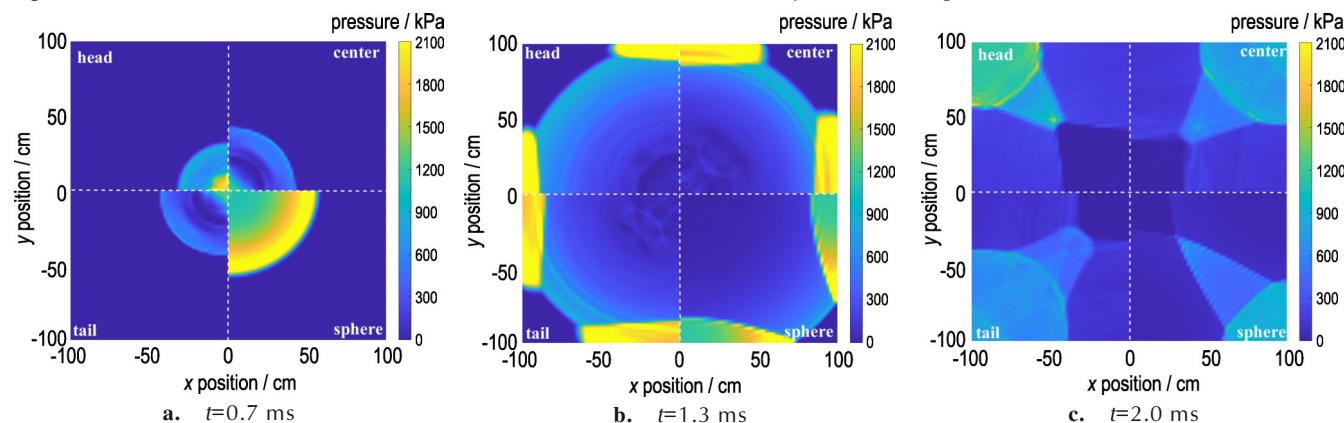


图12 不同起爆位置工况下圆柱形装药轴向所指壁面的超压云图

Fig.12 Pressure contours on the surfaces related to the axial direction of cylindrical charges with different ignition locations

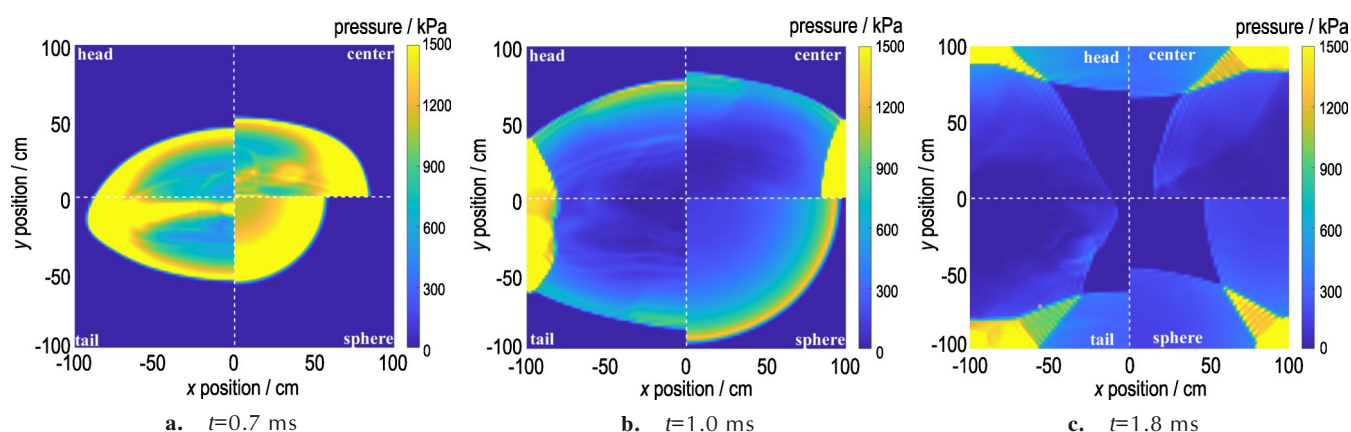


图 13 不同起爆位置工况下圆柱形装药径向所指壁面的超压云图

Fig.13 Pressure contours on the surfaces related to the radial direction of cylindrical charges with different ignition locations

位置从首部依次变为中心和尾部时,冲击波传播速度依次增加(图 12a);随着冲击波在内部空间继续传播发生多次反射与叠加后,超压分布差异逐渐降低(图 12b 和 12c)。对于装药径向所指壁面(图 13),由于径向方向冲击波波速高于轴向方向冲击波波速,尾部起爆所产生的冲击波强度高于首部 and 中心起爆所产生的冲击波(图 13a)。冲击波于  $t=1.0$  ms 和  $t=1.8$  ms 时分别到达两壁面和三壁面所围成的角隅处,随后发生反射与叠加,引起冲击波强度增强(图 13b 和图 13c)。此外,随着反射次数的增加,起爆位置差异所引起的非对称性逐渐被弱化,超压差异逐渐降低。因此,图 13b 和图 13c 中所呈现的超压分布差异比图 13a 小。

### 3.2 长径比对内部爆炸荷载的影响

#### 3.2.1 超压分析

图 14~16 对比分析了  $L/D=1\sim5$  的圆柱形装药与球形装药爆炸工况下径向、轴向和周向组测点的超压时程曲线。可见,不同  $L/D$  的反射超压时程曲线整体

趋势类似;随着入射角  $\alpha_i$  的增加,峰值超压呈现先下降后上升的趋势。这是因为随着入射角的增加,比例距离逐渐增加,导致冲击波强度逐渐降低;墙角处测点由于冲击波叠加汇聚效应,超压荷载有所增强。

改变长径比对径向、轴向和周向超压峰值影响各异。在径向方向上(图 14),峰值反射超压随着  $L/D$  增加而呈现下降趋势,且小于球形装药产生的峰值反射超压。当  $\alpha_i$  为  $5.7^\circ$ (图 14a)和  $25.6^\circ$ (图 14b)时,峰值反射超压随着  $L/D$  的增加而逐渐下降。当测点位于墙角处时(图 14c), $L/D=1$  的圆柱形装药爆炸工况和球形装药爆炸工况的峰值反射超压较为接近,其比值为 126%。原因在于,当  $L/D$  较小时,轴向区和过渡区范围较大,端部冲击波可近似为阵面波。随着  $L/D$  增加,装药侧面与端面面积之比增大,两者释放的爆炸能量差异也随之增大<sup>[11]</sup>,导致侧面爆炸能量占比提高,同时由于装药长度增加,能量沿轴向分散,引起径向能量密度下降。

在轴向方向上(图 15),不同区间呈现规律略有不同

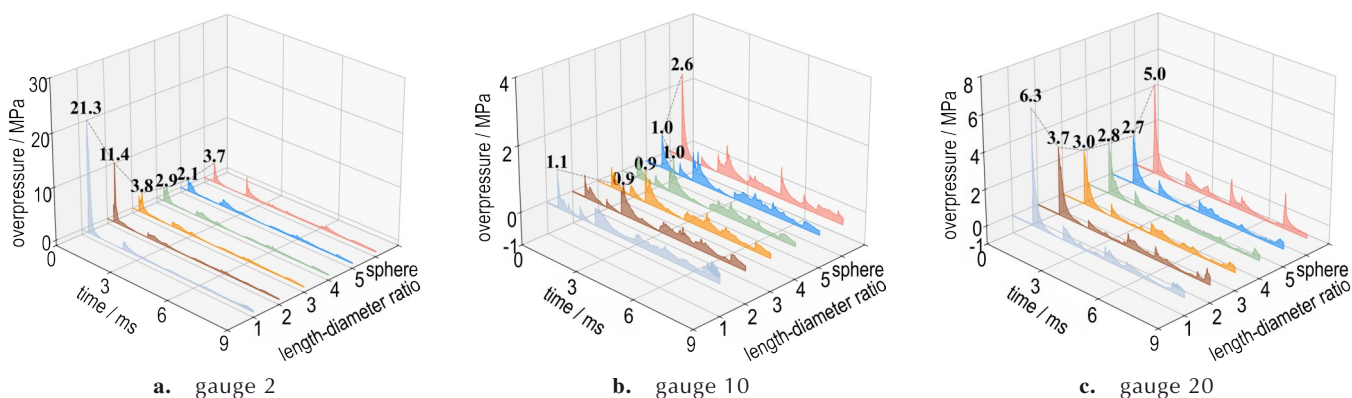


图 14 不同长径比的圆柱形装药径向反射超压时程曲线

Fig.14 Reflected overpressure-time histories in the radial direction generated from cylindrical charges with different  $L/D$  ratios

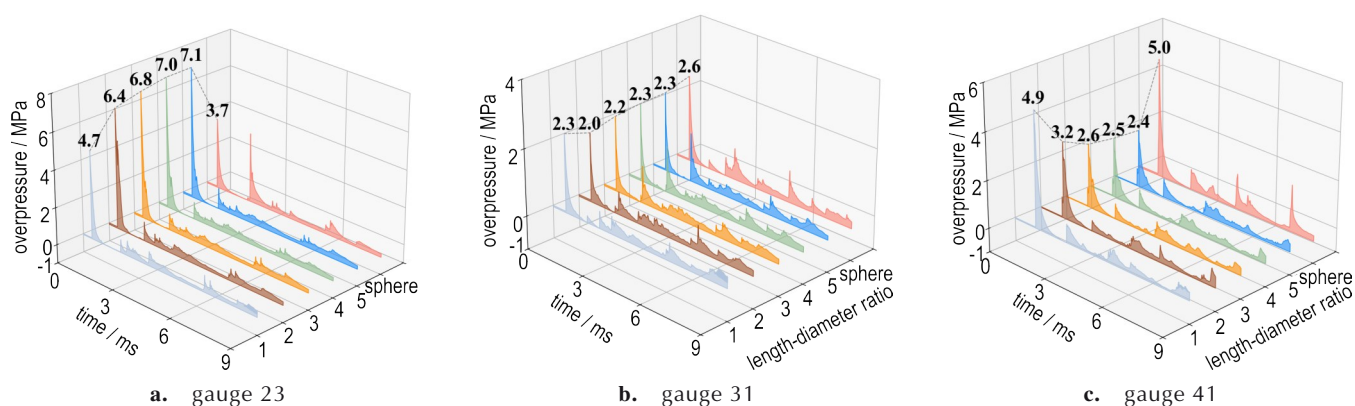


图 15 不同长径比的圆柱形装药轴向反射超压时程曲线

 Fig. 15 Reflected overpressure-time histories in the axial direction generated from cylindrical charges with different  $L/D$  ratios

同:在测点 23 处( $\alpha_i=5.7^\circ$ ,图 15a),峰值反射超压随着  $L/D$  增加而逐渐增加,增幅为 36.2%~56.1%;在测点 31 处( $\alpha_i=25.6^\circ$ ,图 15b), $L/D$  对峰值反射超压并无显著影响,圆柱形装药与球形装药峰值反射超压比为 76.5%~88.5%;当测点位于墙角处时(如测点 41,图 15c),峰值反射超压随着  $L/D$  增加而减少。这是因为装药长度增加可能使轴向冲击波传播更加接近一维定向爆轰,爆炸能量释放更为集中于轴向,因而对入射角较小的壁面测点(如测点 23)冲击更强,故其峰值超压随  $L/D$  增加而增加;当  $\alpha_i=25.6^\circ$  时(如测点 31),端面冲击波与侧面冲击波形成一定平衡, $L/D$  变化带来的爆炸能量分配差异并不明显,导致超压差异较小;当测点位于角落处时(如测点 41),由于释放于径向的爆炸能量随着  $L/D$  增加而减少,导致其峰值反射超压逐渐减少。

在周向方向上(图 16),测点 52( $\alpha_i$  为  $25.6^\circ$ )与 62( $\alpha_i$  为  $43.2^\circ$ )的峰值反射超压均随  $L/D$  增加而增加;而测点 44 的峰值反射超压则随  $L/D$  先减小后增加。此

外,圆柱形装药峰值反射超压远大于球形装药峰值反射超压,测点 44、52 和 62 峰值超压比分别为 200%~218.9%、188.5%~203.9% 和 140.0%~222.0%。这是因为周向测点受到装药端面和侧面爆炸能量共同作用的结果:测点 52 和 62 距离端面较远,因此其超压随  $L/D$  的增加、侧面能量增加而增加;测点 44 距离装药端面则较近, $L/D$  增加所引起的侧面能量提升弥补了端部能量减弱,故其超压先降低后增加。由于圆柱形装药侧面能量的定向集中与叠加效应,圆柱形装药周向超压明显高于球形装药。

通过提取径向、轴向和周向共计 63 个测点(图 7)的峰值反射超压,图 17 对比了不同长径比( $L/D$ )的圆柱形装药峰值反射超压分布随  $\alpha_i(0^\circ\sim45^\circ)$  的变化规律。径向方向的变化可分为两个阶段(图 17a):在  $0^\circ\sim15^\circ$  范围内, $L/D$  改变所引起的峰值反射超压差异最为显著。其中  $L/D=1$  装药峰值反射超压在  $\alpha_i=0^\circ$  处达到 76.3 MPa,随后快速下降至 2.4 MPa( $\alpha_i=15.6^\circ$ );当  $\alpha_i$

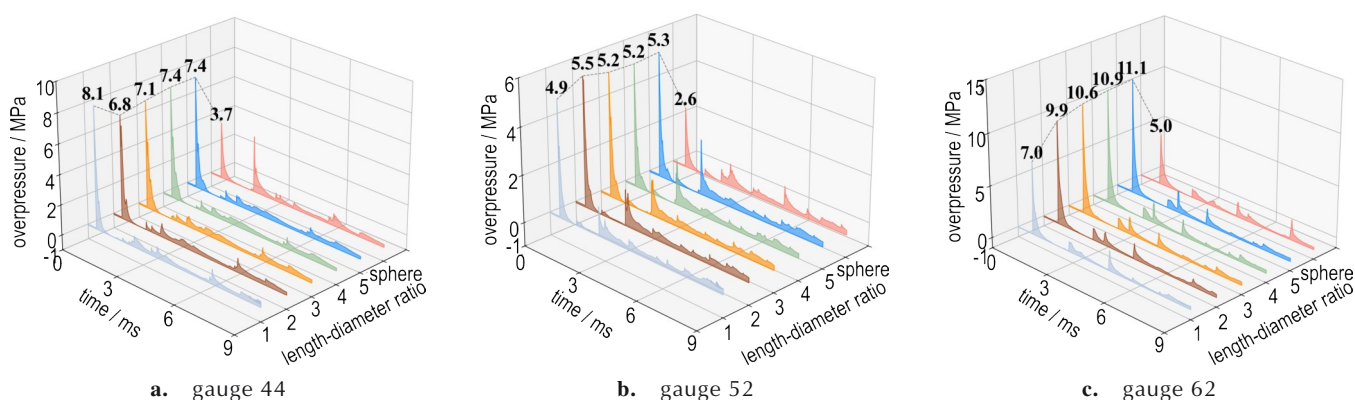


图 16 不同长径比的圆柱形装药周向反射超压时程曲线

 Fig. 16 Reflected overpressure-time histories in the circumferential direction generated from cylindrical charges with different  $L/D$  ratios

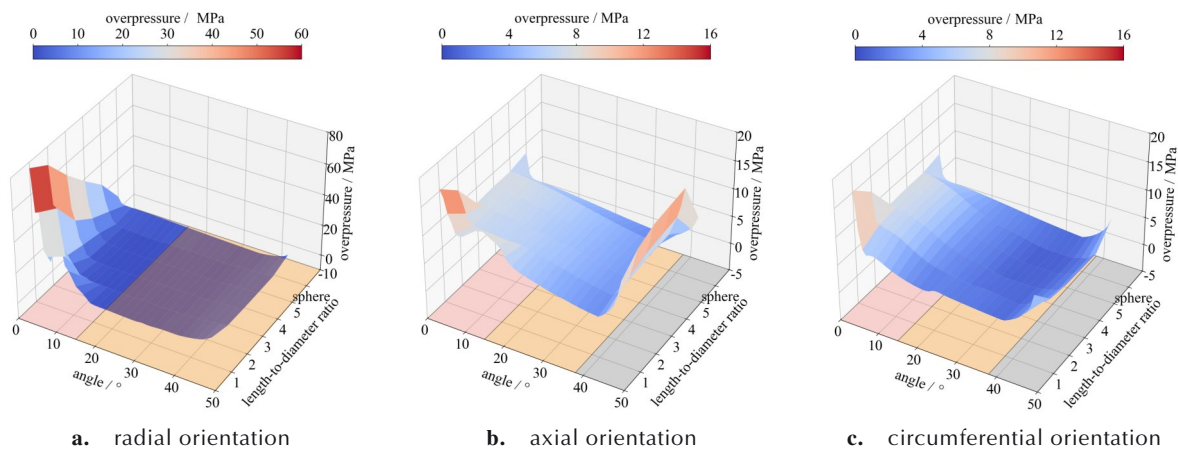


图 17 不同长径比的圆柱形装药峰值反射超压分布

Fig.17 Distribution of the peak reflected overpressures generated from cylindrical charges with different  $L/D$  ratios

大于 $15^\circ$ 时,不同 $L/D$ 的圆柱形装药与球形装药结果基本一致,仅在靠近墙角区域出现明显差异,这是由于冲击波在墙角处的叠加汇聚效应所致<sup>[23]</sup>。轴向和周向峰值反射超压分布规律与径向相似:在 $\alpha_i=0^\circ\sim 15^\circ$ 内表现为快速衰减;在 $\alpha_i=15^\circ\sim 38^\circ$ 范围内则缓慢下降(由约2.5 MPa降至1.5 MPa);当 $\alpha_i$ 接近 $45^\circ$ 时,反射超压峰值则再次增加,且在轴向增幅更为显著,相较于球形装药可高出1.5~2倍(图17b和图17c)。总体而言,随着 $L/D$ 增加,装药形状对峰值超压分布的影响逐渐削弱,各向峰值反射超压比由37.5%~1287.9%( $L/D=1$ )减少至25.5%~356.7%( $L/D=5$ )。

3.2.2 冲量分析

为探究长径比( $L/D$ )对壁面冲量的影响,表4对比了 $L/D=1\sim 5$ 的圆柱形装药爆炸下三个方向(径向、轴

向和周向)不同测点处的反射冲量峰值。相较于超压, $L/D$ 对壁面反射冲量的影响并不显著。除测点2以外,不同 $L/D$ 的圆柱形装药和球形装药在三个方向上的峰值反射冲量比值分别为75.0%~91.6%、73.9%~104.5%和95.8%~125.0%。

通过提取63个测点的反射冲量数据,图18对比了不同长径比的圆柱形装药爆炸工况下三个方向的分布特征。径向方向可划分为下降段、平台段和上升段三个区间(图18a):在 $\alpha_i=0^\circ\sim 17^\circ$ 范围内峰值冲量迅速下降;在 $\alpha_i=17^\circ\sim 38^\circ$ 范围内呈缓慢下降趋势,不同 $L/D$ 圆柱形装药与球形装药差异并不明显(约80.5%~100.1%);当 $\alpha_i$ 大于 $38^\circ$ 时,随着测点逐渐靠近墙角,峰值冲量逐渐上升。轴向(图18b)与周向(图18c)表现出类似规律: $0^\circ\sim 38^\circ$ 内峰值冲量随 $\alpha_i$ 增加而下降, $L/D$ 对冲量分布影响并不明显;在 $38^\circ\sim 45^\circ$ 区间,轴向冲量随 $L/D$ 增加而逐渐减小,而周向则相反。此外, $L/D$ 的增加弱化了装药形状对径向冲量分布的影响,其最大反射冲量比由88.7%~235.3%( $L/D=1$ )降至76.5%~132.8%( $L/D=5$ )。

3.3 起爆位置对内部爆炸荷载的影响

3.3.1 超压分析

鉴于不同 $L/D$ 爆炸工况曲线存在的相似性,图19~21仅对比了 $L/D=1$ 时圆柱形装药在首部、中心和尾部起爆时不同方向测点处的反射超压时程曲线。结果表明:改变起爆位置对反射超压时程曲线整体趋势并无明显影响,但对部分区域峰值反射超压影响显著。当起爆位置由首部起爆变为中心起爆和尾部起爆时,测点2和测点23( $\alpha_i=5.7^\circ$ ,图19a和图20a)的峰值反射超压逐渐上升,其反射超压比分别为259.5%~854.1%和91.9%~424.3%。当 $\alpha_i=25.6^\circ$ 时,峰值反射

表 4 不同长径比的圆柱形装药径向、轴向和周向测点反射冲量峰值

Table 4 Peak reflected impulse at gauges generated from cylindrical charges with different  $L/D$  ratios

| orientation     | gauge | $\alpha_i$<br>/ $(^\circ)$ | peak reflected impulse / MPa·ms |     |     |     |     |                    |
|-----------------|-------|----------------------------|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|--------------------|
|                 |       |                            | $L/D$                           |     |     |     |     | sphere<br>diameter |
|                 |       |                            | 1                               | 2   | 3   | 4   | 5   |                    |
| radial          | 2     | 5.7                        | 4.5                             | 2.8 | 2.5 | 2.4 | 2.1 | 2.1                |
|                 | 10    | 24.2                       | 1.5                             | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.5 | 1.7                |
|                 | 20    | 43.2                       | 2.2                             | 2.0 | 1.9 | 1.8 | 1.8 | 2.4                |
| axial           | 23    | 5.7                        | 2.1                             | 2.3 | 2.2 | 2.2 | 2.2 | 2.1                |
|                 | 31    | 24.2                       | 1.5                             | 1.4 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.7                |
|                 | 41    | 43.2                       | 2.2                             | 1.9 | 1.8 | 1.7 | 1.7 | 2.4                |
| circumferential | 44    | 5.7                        | 2.3                             | 2.3 | 2.4 | 2.4 | 2.3 | 2.1                |
|                 | 52    | 24.2                       | 1.9                             | 2.1 | 2.1 | 2.0 | 2.0 | 1.7                |
|                 | 62    | 43.2                       | 2.3                             | 2.8 | 2.9 | 3.0 | 2.9 | 2.4                |

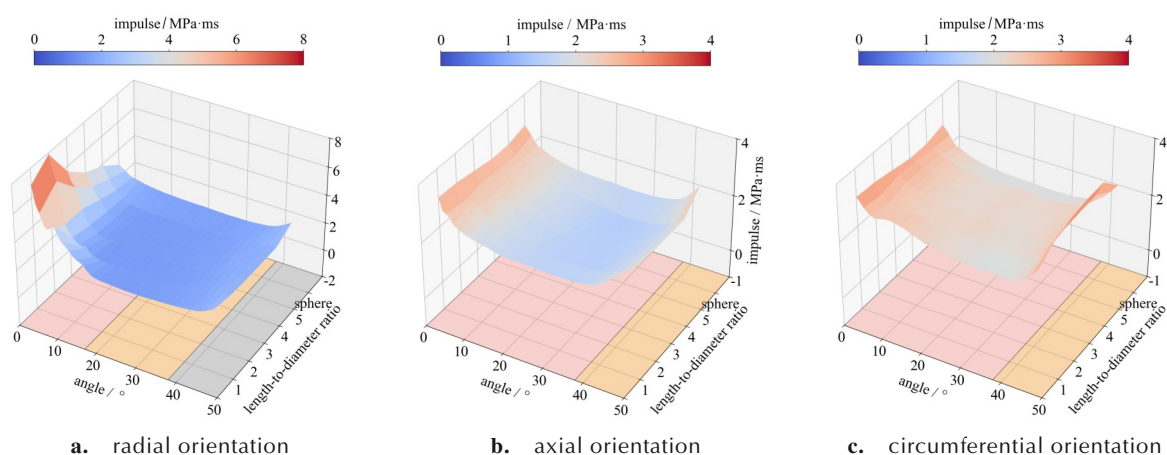


图 18 不同长径比的圆柱形装药爆炸下径向、轴向和周向测点的反射冲量峰值分布

Fig.18 Distribution of the peak reflected impulses generated from cylindrical charges with different  $L/D$  ratios

超压比分别为 46.2%~61.5% (图 19b) 和 73.1%~88.5% (图 20b); 当  $\alpha_i=43.2^\circ$  时, 峰值反射超压比升至 98%~126% (图 19c) 和 97.9%~125.5% (图 20c)。其原因在于, 随着  $\alpha_i$  增大, 比例爆距相应增加, 爆炸能量分布趋于均匀, 进而减弱了起爆位置对爆炸荷载分布的影响。

针对周向测点 (图 21), 由于首部和尾部起爆位置关于装药中心对称, 当首部和尾部起爆时, 周向对称测点的超压时程曲线亦相同。在测点 44、52 和 62 处, 中心起爆工况下的曲线和峰值均高于其他两种起爆方式。此外, 起爆位置对超压分布的影响随着  $L/D$  增加

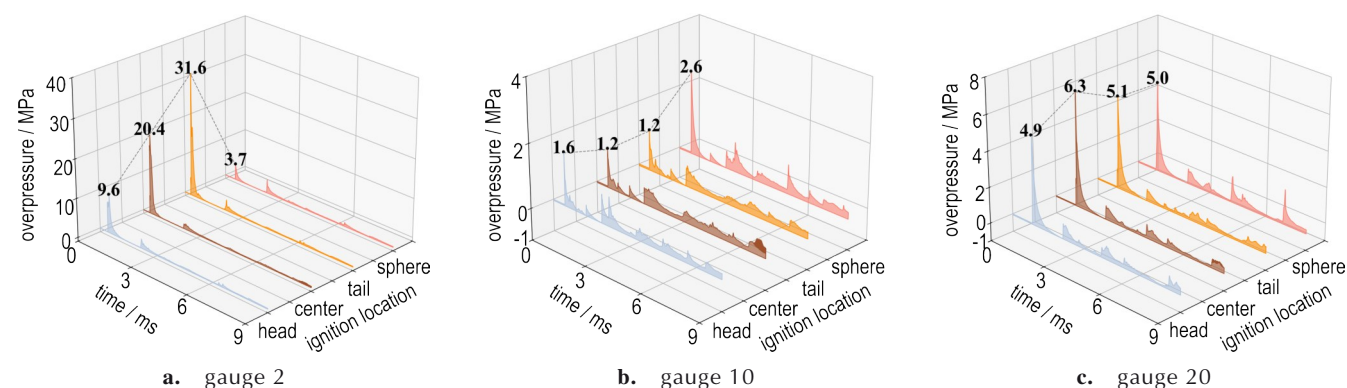


图 19 圆柱形装药不同起爆位置时的径向反射超压时程曲线

Fig.19 Reflected overpressure-time histories in radial direction generated from cylindrical charges with different ignition locations

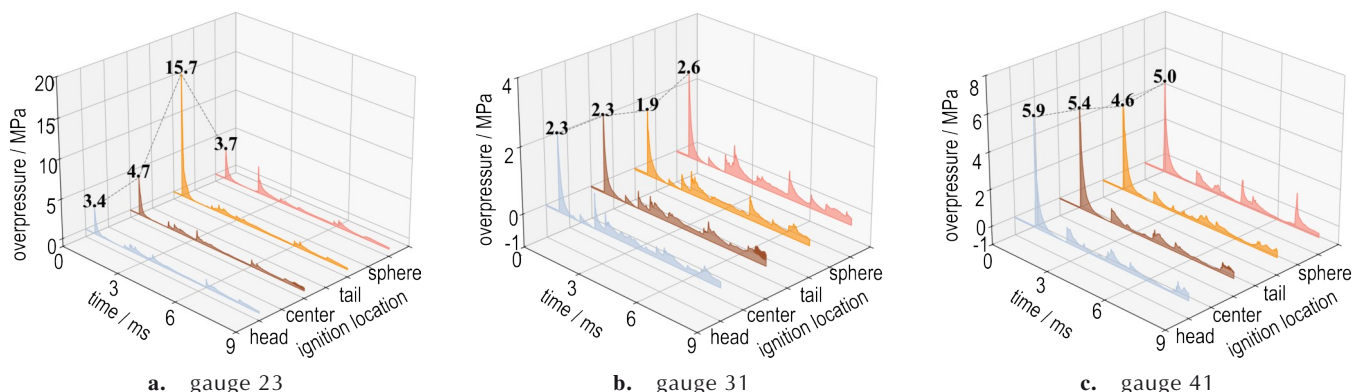


图 20 圆柱形装药不同起爆位置时的轴向反射超压时程曲线

Fig.20 Reflected overpressure-time histories in axial direction generated from cylindrical charges with different ignition locations

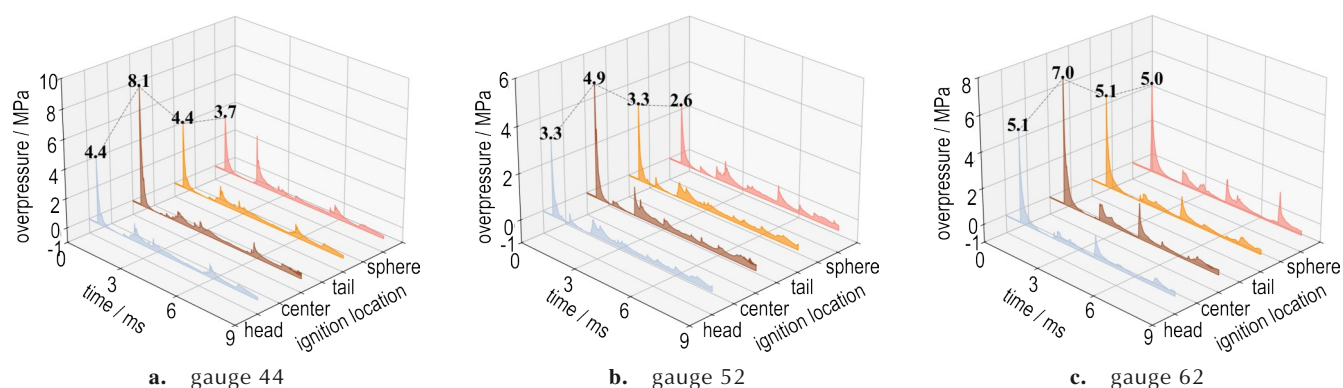


图 21 圆柱形装药不同起爆位置时的周向反射超压时程曲线

**Fig.21** Reflected overpressure-time histories in circumferential direction generated from cylindrical charges with different ignition locations

而降低。首部、中心和尾部起爆下,  $L/D=1$  的圆柱形装药与球型装药在测点 2 处的峰值反射超压比分别为 259.5%、551.4% 和 854.1%。而当  $L/D=5$  时, 其比值分别为 43.2%、56.8% 和 59.5%。

为了分析起爆位置对壁面反射超压分布的影响, 分别提取三个方向 63 个测点的峰值反射超压数据进行对比。由于不同  $L/D$  爆炸工况在三个方向上的规律类似, 图 22 仅展示了  $L/D=3$  的结果。各方向的峰值分布呈现明显差异: 径向峰值始终集中于装药轴线上 (图 22a); 中心起爆和首部起爆时, 轴向峰值出现在靠近装药中心位置, 尾部起爆时则在  $5^\circ$  处出现 (图 22b); 周向方向的下降段及平台段区间, 中心起爆下的超压普遍高于首部和尾部起爆 (图 22c)。随着  $L/D$  的增加, 上升段的峰值超压逐渐增强, 但中心起爆工况的上升幅度略低于首部和尾部起爆工况。此外, 随着  $L/D$

的增加, 起爆位置对超压分布的影响明显收到削弱, 尤其是在径向方向更为明显: 当  $L/D$  由 1 增至 5 时, 首部、中心和尾部起爆下的径向峰值反射超压比分别由 475.4%、1287.9% 和 2355.0% 降至 599.4%、356.8% 和 135.3%, 差异幅度由 2173.3% 减少至 384.1%。

基于图 22 和图 23 划分了起爆位置对不同方向的超压峰值的影响区域: 对于装药轴线所指壁面, 起爆位置对峰值反射超压的影响区域呈现为以装药中轴线与壁面交点为圆心的圆形分布,  $\alpha_i=0^\circ\sim10.2^\circ$ 。该方向主要影响区为半径为 18 cm 的圆形区域。在装药轴向-径向所指壁面, 影响区域  $\alpha_i$  分别为  $20^\circ$  和  $15^\circ$ 。起爆位置对峰值反射超压的影响区域呈现为以装药中心在壁面的投影点为中心的椭圆形分布。其中长轴沿装药轴向方向延伸, 长度为 72 cm; 短轴沿装药径向方向, 长度为 54 cm。

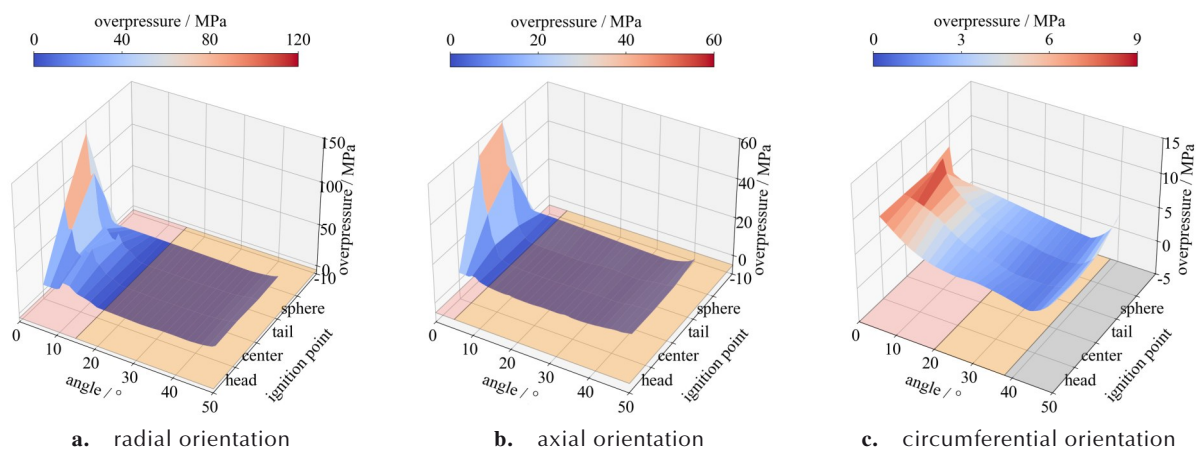


图 22 圆柱形装药不同起爆位置时的峰值反射超压分布 ( $L/D=3$ )

**Fig.22** Distribution of the peak reflected overpressures in different directions generated from cylindrical charges with different ignition locations ( $L/D=3$ )

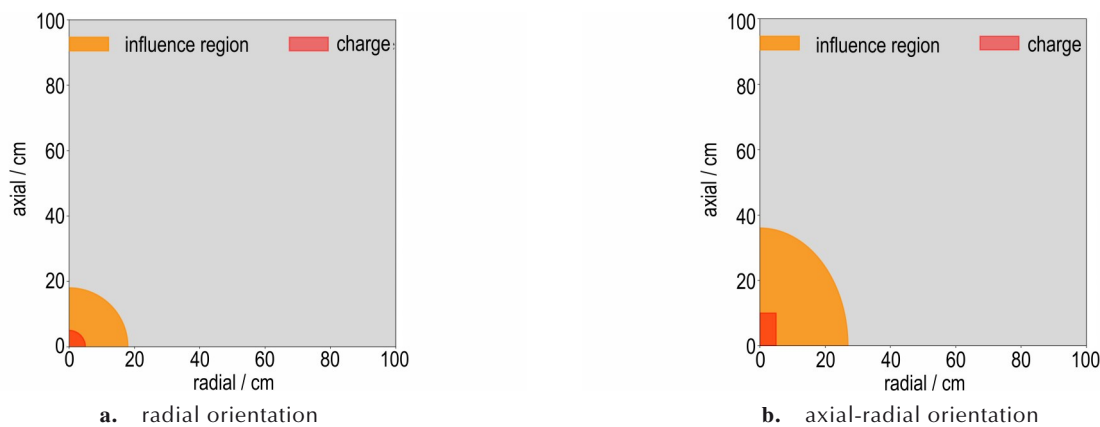


图 23 峰值反射超压影响区(1/4 壁面)  
Fig.23 Influence region of the peak reflected overpressures (1/4<sup>th</sup> wall)

3.3.2 冲量分析

为进一步分析起爆位置对爆炸荷载分布的影响,表 5 对比了  $L/D=1$  的圆柱形装药在不同起爆位置时三个不同方向测点( $\alpha_i=5.7^\circ$ 、 $24.2^\circ$ 和  $43.2^\circ$ )的反射冲量。结果表明:起爆位置并不改变冲量时程曲线的整体趋势,仅可能对峰值反射冲量产生显著影响。当  $\alpha_i=5.7^\circ$  时,起爆位置改变使峰值反射冲量差异达到 76.2%。其根源在于圆柱形装药爆炸冲击波传播特性与起爆位置的关联性:当端部起爆时,爆轰波沿圆柱轴线传播,其传播速度与方向的一致性促使爆炸能量集中于特定方向,进而形成强烈的定向冲击波;定向冲击波与目标作用时,能量传递的集中程度由于起爆位置的不同而变化显著,最终导致峰值反射冲量变化显著。此外,随着  $\alpha_i$  增加,起爆位置对峰值冲量的影响有所减弱,当  $\alpha_i=25.6^\circ$  (测点 10、31 和 52) 和  $\alpha_i=43.2^\circ$  (测点 20、41 和 62) 时,

冲量比分别为 76.4%~111.7% 和 117.7%~135.3%。这是由于比例距离随入射角增加而增加。另外,初始的局部能量集中会在长距离传播中弱化,进而降低了起爆位置的影响。针对  $L/D=1$  的圆柱形装药,当起爆位置为首部、中心和尾部起爆时,测点 2 的冲量比分别为 161.9%、214.3% 和 238.1%;而当  $L/D=5$  时,冲量比则分别为 100%、100% 和 104.7%。

为了进一步分析起爆位置对壁面反射冲量分布的影响,提取三个方向 63 个测点的峰值反射冲量进行对比。由于不同  $L/D$  工况下表现出近似规律,图 24 仅展示了  $L/D=3$  对应的结果。径向与轴向方向均表现出尾部起爆、中心起爆和首部起爆依次降低的趋势(图 24a 和图 24b);周向方向则在中心起爆时峰值冲量最高(图 24c)。此外,随着  $L/D$  增加,起爆位置对峰值冲量的影响受到削弱,最大冲量比 328.0%( $L/D=1$ ) 降低至 48.4%( $L/D=5$ )。

起爆位置对部分区间峰值反射冲量具有显著的影响。当  $L/D=1$  时,起爆位置在径向、轴向和周向的影响区为  $\alpha_i=15^\circ$  所覆盖的区域。图 25 划分了起爆位置对三个方向的影响范围:在轴向所指平面内,影响区为半径 27 cm 的圆形区域;而在轴向-径向方向所构成的平面内,其影响区为轴向 18 cm、径向 36 cm 的椭圆形区域。

3.4 装药朝向对内部爆炸荷载的影响

3.4.1 超压分析

图 26 对比了  $L/D$  为 1、3 和 5 的圆柱形装药和球形装药在不同朝向时的反射超压时程曲线。起爆位置均为装药中心。不同  $L/D$  圆柱形装药三个方向上的超压时程曲线和峰值反射超压分布具有一定的相似性,即随着入射角  $\alpha_i$  的增加,其峰值反射超压均呈现了先下

表 5 圆柱形装药不同起爆位置时测点反射冲量峰值  
Table 5 Peak reflected impulses at gauges in different directions generated from cylindrical charges with different ignition locations

| orientation     | gauge | $\alpha_i / (^\circ)$ | peak reflected impulse / MPa·ms |        |      |                 |
|-----------------|-------|-----------------------|---------------------------------|--------|------|-----------------|
|                 |       |                       | ignition location               |        |      | sphere diameter |
|                 |       |                       | head                            | center | tail |                 |
| radial          | 2     | 5.7                   | 4.5                             | 2.5    | 2.1  | 2.1             |
|                 | 10    | 24.2                  | 1.5                             | 1.4    | 1.5  | 1.7             |
|                 | 20    | 43.2                  | 2.2                             | 1.9    | 1.8  | 2.4             |
| axial           | 23    | 5.7                   | 2.1                             | 2.2    | 2.2  | 2.1             |
|                 | 31    | 24.2                  | 1.5                             | 1.5    | 1.5  | 1.7             |
|                 | 41    | 43.2                  | 2.2                             | 1.8    | 1.7  | 2.4             |
| circumferential | 44    | 5.7                   | 2.3                             | 2.4    | 2.3  | 2.1             |
|                 | 52    | 24.2                  | 1.9                             | 2.1    | 2.0  | 1.7             |
|                 | 62    | 43.2                  | 2.3                             | 2.9    | 2.9  | 2.4             |

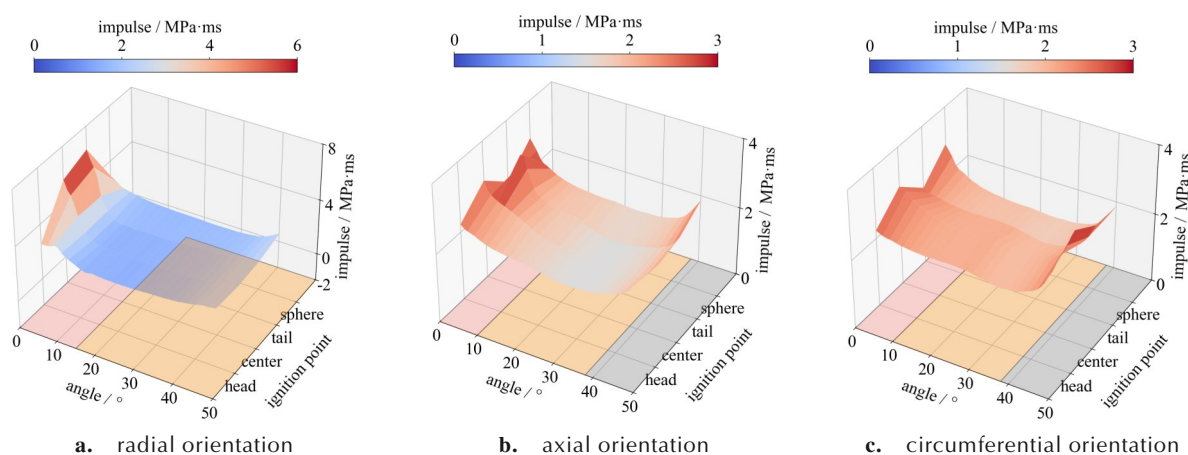


图 24 圆柱形装药不同起爆位置时的反射冲量分布 ( $L/D=3$ )

Fig.24 Distribution of the peak reflected impulses in different directions generated from cylindrical charges with different ignition locations ( $L/D=3$ )

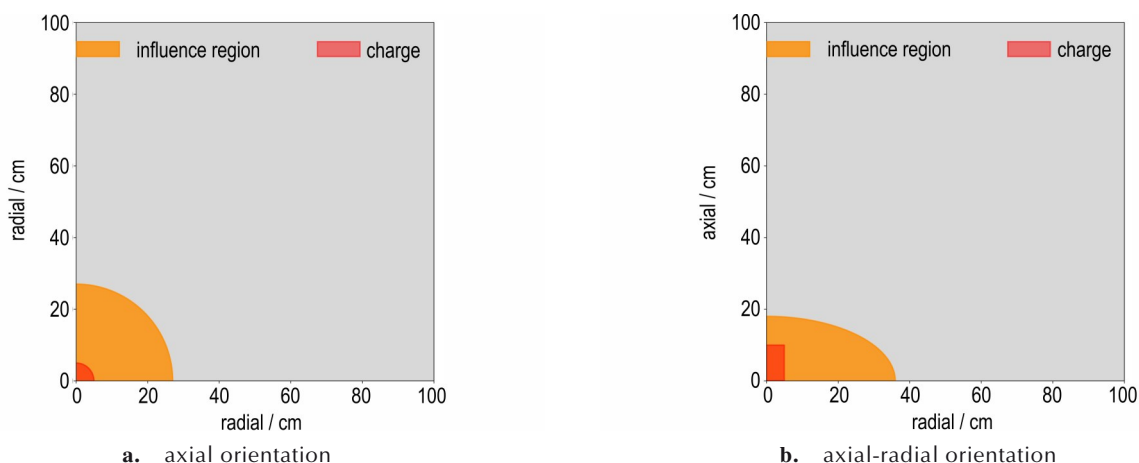


图 25 峰值反射冲量影响区 (1/4 壁面)

Fig.25 Influence region of peak reflected impulses (1/4 wall)

降后上升趋势。另外,  $L/D$  对峰值反射超压也具有一定的影响。当  $L/D=1$  时, 即  $\alpha_i=5.7^\circ$  (图 26a), 径向峰值反射超压远大于其他两个方向的峰值反射超压。当  $L/D=3$  和 5 时 (图 26d 和图 26g), 轴向和周向峰值反射超压均高于径向峰值反射超压, 且两个方向的峰值超压较为接近。当  $\alpha_i=24.2^\circ$  时 (图 26b、26e 和 26h),  $L/D$  对超压时程曲线的形状和峰值反射超压并无显著影响: 径向、轴向和周向在该测点的峰值反射超压与球形装药峰值反射超压比依次介于 34.6%~42.3%、84.6%~88.5% 和 188.5%~203.8%。当  $\alpha_i=43.2^\circ$  时 (图 26c、26f 和 26i), 随着  $L/D$  的增加, 超压时程曲线与峰值反射超压分布并未发生明显改变。峰值反射超压分布呈“V”字形, 即径向和周向峰值反射超压高于轴向峰值反射超压。这是因为随着  $L/D$  的增加, 沿轴向和

端部释放的爆炸能量减少, 而沿侧向释放的爆炸能量增加。

图 27 对比了  $L/D=1$ 、3 和 5 的圆柱形与球形装药在三个方向上的峰值反射超压分布。结果表明, 轴向与周向峰值反射超压分布与球形装药爆炸工况接近, 径向峰值反射超压在一定角度范围内显著高于其他方向。随着  $L/D$  的增加, 装药朝向所引起的超压分布差异逐渐减小, 最大反射超压差异由 1287.9% 降至 356.8%。主要原因在于, 当比例爆距  $Z$  大于  $1 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$  时, 随着  $L/D$  增加, 装药形状因子 ( $S=f(Z, L/D, IC)$ ,  $IC$  为起爆位置) 有所削弱<sup>[11,14]</sup>。此外, 随着  $L/D$  的增加, 峰值反射超压分布由双区间逐渐过渡为“下降段—平台段—上升段”三区间。当  $L/D=1$  时 (图 27a), 在  $0^\circ \sim 15^\circ$  范围内峰值超压随着  $\alpha_i$  增加而显著下降, 随后进入平台段,

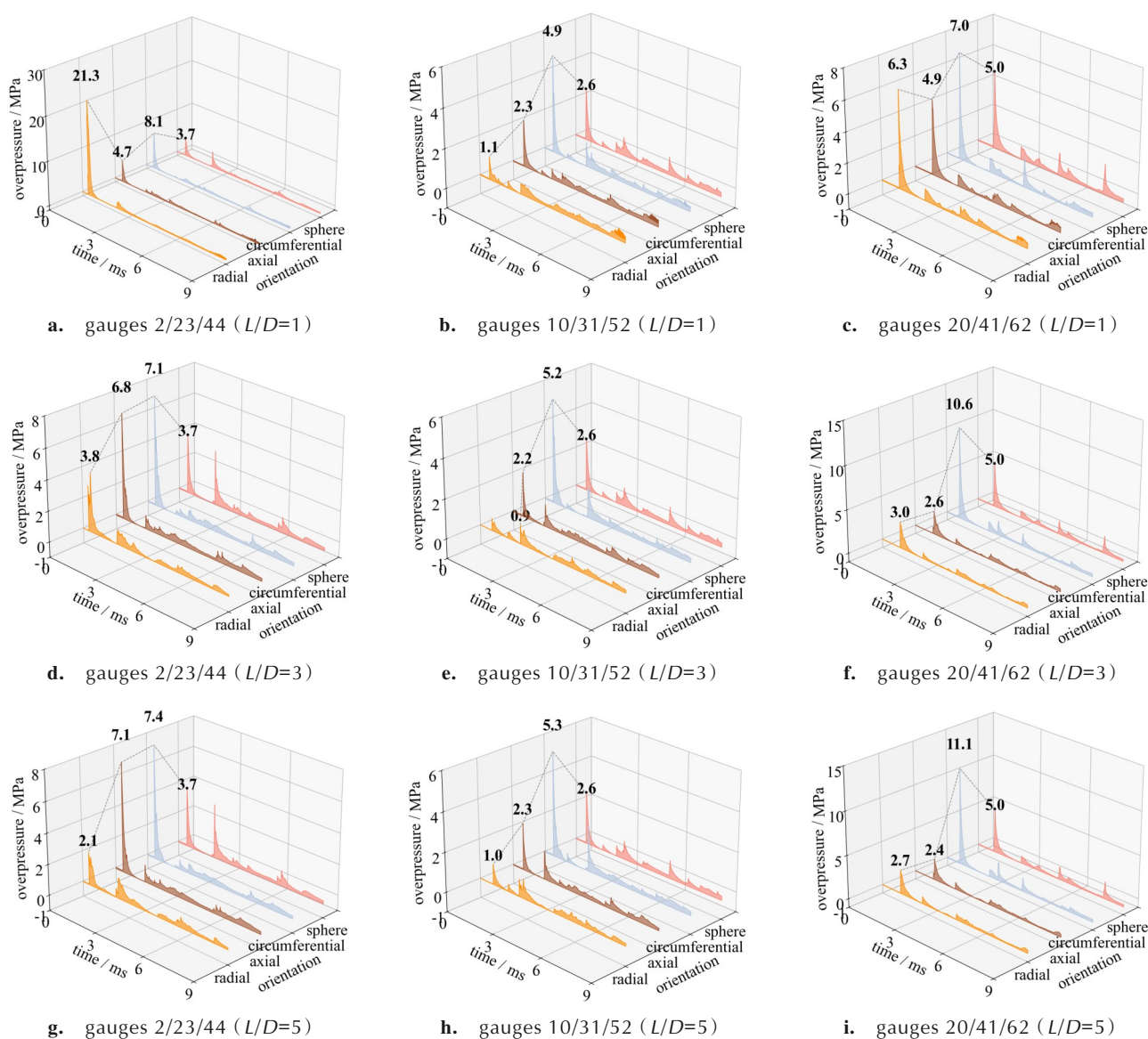


图 26 不同装药朝向爆炸下反射冲量时程曲线

Fig.26 Reflected overpressure-time histories generated from cylindrical charges with different orientations

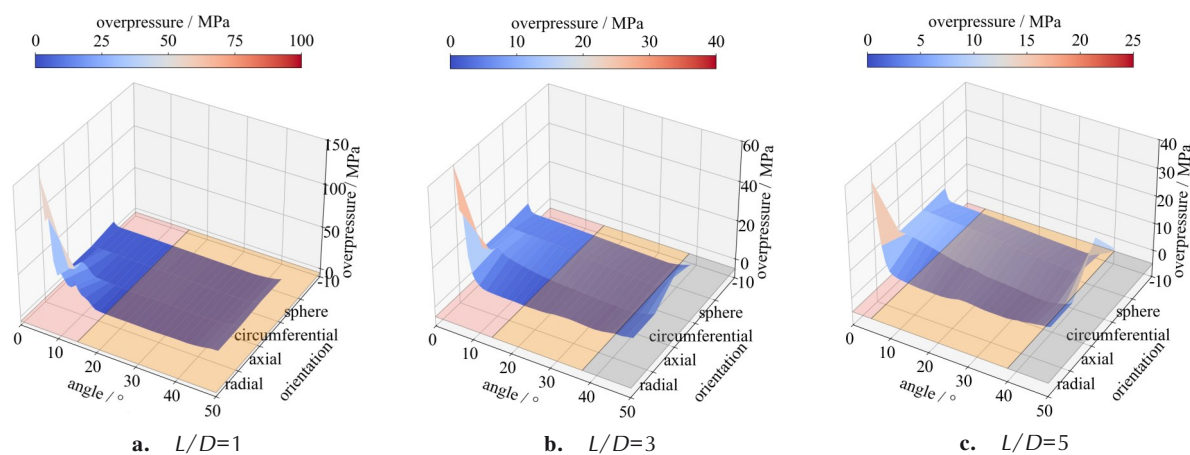


图 27 不同装药朝向爆炸下峰值反射超压分布

Fig.27 Distribution of the peak reflected overpressures generated from cylindrical charges with different orientations

各方向峰值超压与球形装药下的峰值超压差异不大;当 $L/D$ 增至3时(图27b),虽然下降段仍然存在,但平台范围缩短至 $15^{\circ}\sim 38^{\circ}$ ,且在 $38^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 区间呈上升趋势;当 $L/D$ 进一步增至5时(图27c),下降段缩减至 $5^{\circ}$ 以内,平台段延至 $38^{\circ}$ ,而在上升段周向超压峰值增长最为明显, $45^{\circ}$ 时周向峰值反射超压比达224.5%,显著高于轴向与径向(均约为47.3%)。

3.4.2 冲量分析

表6对比了 $L/D$ 为1、3和5的圆柱形装药中心起爆下径向、轴向和周向以及球形装药在不同测点处的峰值反射超压。 $\alpha_i$ 对峰值反射冲量的影响规律与峰值反射超压相似,即先下降后上升。当 $L/D=1$ 时,径向峰值冲量差异显著。当 $\alpha_i=5.7^{\circ}$ 时(图36a),峰值反射冲量为 $4.5\text{ MPa}\cdot\text{ms}$ ;当 $\alpha_i$ 增至 $25.6^{\circ}$ 和 $43.2^{\circ}$ 时,峰值冲量分别为 $1.5\text{ MPa}\cdot\text{ms}$ 和 $2.3\text{ MPa}\cdot\text{ms}$ 。当 $L/D=1$ 、3和5时,圆柱形装药轴向和周向峰值反射冲量与球形装药峰值反射冲量差异并不明显,介于0~22.5%之间。

表6 不同装药朝向爆炸下反射冲量峰值

Table6 Peak reflected impulses at gauges generated from cylindrical charges with different orientations

| $\alpha_i / (^{\circ})$ | gauge | orientation     | peak reflected impulse / $\text{MPa}\cdot\text{ms}$ |     |     |     | sphere diameter |
|-------------------------|-------|-----------------|-----------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----------------|
|                         |       |                 | $L/D$                                               |     |     |     |                 |
|                         | 2     | radial          | 4.5                                                 | 2.5 | 2.1 |     |                 |
| 5.7                     | 23    | axial           | 2.1                                                 | 2.2 | 2.2 | 2.1 |                 |
|                         | 44    | circumferential | 2.3                                                 | 2.4 | 2.3 |     |                 |
|                         | 10    | radial          | 1.5                                                 | 1.4 | 1.5 |     |                 |
| 24.2                    | 31    | axial           | 1.5                                                 | 1.5 | 1.5 | 1.7 |                 |
|                         | 52    | circumferential | 1.9                                                 | 2.1 | 2.0 |     |                 |
|                         | 20    | radial          | 2.2                                                 | 1.9 | 1.8 |     |                 |
| 43.2                    | 41    | axial           | 2.2                                                 | 1.8 | 1.7 | 2.4 |                 |
|                         | 62    | circumferential | 2.3                                                 | 2.9 | 2.9 |     |                 |

图28对比了 $L/D=1$ 、3和5的圆柱形装药与球形装药的峰值反射冲量分布,其变化规律与峰值反射超压相似,即随着 $L/D$ 增加,不同朝向间的差异逐渐减小。分布由“两区间”逐渐演化为“下降段-平台段-上升段”的“三区间”,且下降段对应的角度范围逐步缩小,即由 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 减至 $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 。当入射角较小时,轴向峰值冲量显著高于其他两个方向及球形装药;而当入射角较大时,周向峰值冲量的增长速率最为明显。当 $L/D=1$ 时,径向峰值冲量在 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 范围内急剧下降,由 $6.9\text{ MPa}\cdot\text{ms}$ 降至 $2.4\text{ MPa}\cdot\text{ms}$ ,而在其他方向

则保持相对平缓,平台段与球形装药的比值为88%~125%;当 $L/D$ 增至3和5时,平台段内三个方向上的峰值冲量与球形装药峰值冲量比值仍维持在82%~124%,但差异幅度有所减少。总体而言,随着 $L/D$ 增加,装药朝向对冲量分布的影响受到显著削弱,其最大比值差异由235.3%( $L/D=1$ )降至132.7%( $L/D=5$ )。

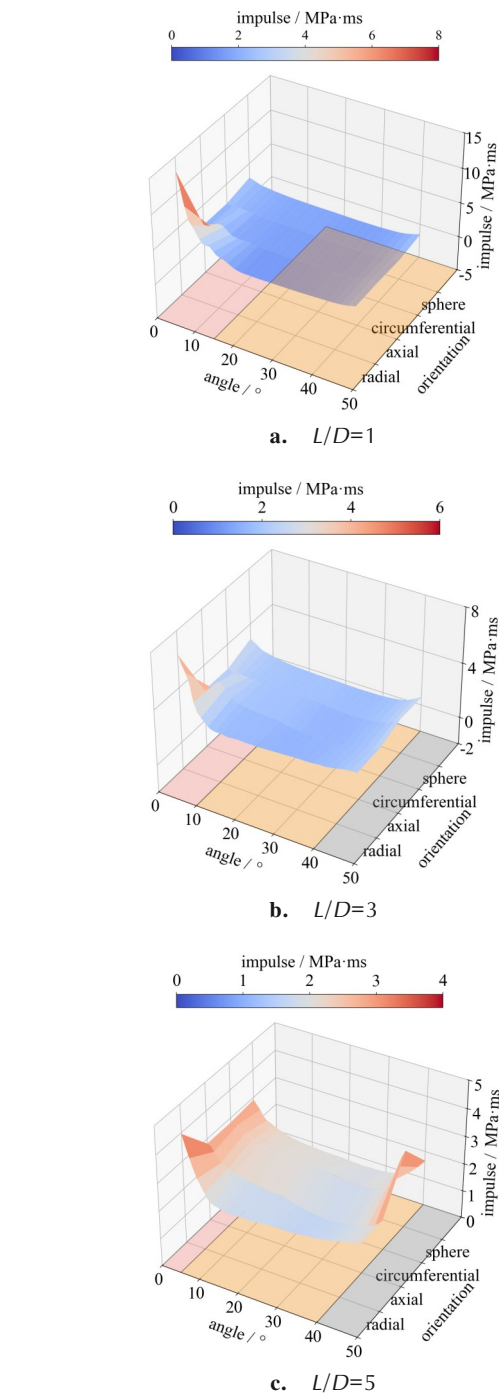


图28 不同装药朝向爆炸下峰值反射冲量分布  
Fig. 28 Distribution of peak reflected impulses generated from cylindrical charges with different orientations

## 4 结论

基于验证后的有限元数值模型建立了16组内部爆炸冲击波传播模型,分析了圆柱形装药内部爆炸工况下,长径比( $1 \leq L/D \leq 5$ )、起爆位置与装药朝向对内部爆炸荷载分布的影响,得出以下结论:

(1)长径比( $L/D$ )对爆炸荷载分布影响显著。随着 $L/D$ 增大,峰值反射超压比与反射冲量比显著降低;随着入射角的增加,长径比对内部爆炸荷载分布影响逐渐减弱。

(2)起爆位置对爆炸荷载的影响具有区域性特征。起爆位置仅对装药轴向、轴向-径向等特定区域的爆炸荷载具有显著影响。基于此,可将其影响区域划分为轴向圆形影响区与轴向-径向椭圆形影响区。

(3)装药朝向对爆炸荷载分布的影响明显,其中反射超压的敏感性高于反射冲量。随着长径比 $L/D$ 与入射角的增大,装药朝向所引起的爆炸荷载差异逐渐减弱。当 $L/D$ 由1变为5时,最大反射超压比和冲量比分别从1287.9%和235.3%降为356.8%和132.7%。此外,径向峰值反射超压与冲量始终高于轴向与周向。

可见,针对圆柱形装药封闭空间内部爆炸场景,三类因素按影响程度大小排列依次为:长径比、装药朝向、起爆位置。需要说明的是,此结论基于固定尺寸的封闭空间和给定装药位置条件获得,并未考虑空间尺寸和装药位置的影响。后续研究将重点开展以下工作:量化分析封闭空间尺寸和装药空间位置对爆炸荷载分布的影响规律,建立综合考虑装药几何参数、空间尺寸和位置角度的内部爆炸荷载预测模型。

### 参考文献:

- [1] XIAO W, ANDRAE M, GEBBEKEN N. Effect of charge shape and initiation configuration of explosive cylinders detonating in free air on blast-resistant design[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(8): 04020146.
- [2] 菅冰玉, 肖伟芳. 抗爆墙防护效应影响因素研究进展[J]. 含能材料, 2025, 33(7): 778-792.  
JIAN Bing-yu, XIAO Wei-fang. Research progress on influencing factors of protective effect of blast walls[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2025, 33(7): 778-792.
- [3] 胡洋, 朱建芳, 朱锴. 公共建筑结构内爆炸效应的数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(2): 184-188.  
HU Yang, ZHU Jian-fang, ZHU Kai. Numerical simulation study for the internal explosion effect on the structure of the public buildings[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(2): 184-188.
- [4] NEEDHAM C E. Blast waves[M]. Berlin, Heidelberg: Springer,

- er, 2010.
- [5] 张舵, 姚术健, 黄河, 等. 箱型结构内部爆炸破坏研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(7): 18-32.  
ZHANG Duo, YAO Shu-jian, HUANG He, et al. A review on Internal damage effects of multi-box type structures[J]. *Explosion and Shock Wave*, 2021, 41(7): 18-32.
- [6] YAO S, ZHANG D, LU F, et al. Fast prediction method of failure modes for steel box structures under internal blast loading[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 120: 104919.
- [7] US DEPARTMENT OF THE ARMY. Fundamentals of protective design for conventional weapons: TM 5-855-1[S]. Washington, USA: US Department of the Army, 1986.
- [8] US ARMY CORPS OF ENGINEERS STRUCTURES TO RESIST THE EFFECTS OF ACCIDENTAL EXPLOSIONS. UFC 3-340-02[S], Air Force Civil Engineer Support Agency, 2014.
- [9] KINGERY C N, BULMASH G. Technical report ARBRL-TR-02555: air blast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical burst[R]. AD-B082 1984.
- [10] KINNEY G F, GRAHAM K J. Explosive shocks in air[M]. Berlin: Springer, 2013.
- [11] 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(4): 62-82.  
WANG Ming-tao, CHENG Yue-hua, WU Hao. Study on blast loadings of cylindrical charges air explosion[J]. *Explosion and Shock Wave*, 2024, 44(4): 62-82.
- [12] 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(9): 918-927.  
LIU Jun, WANG Zheng, XIONG Jun, et al. A near-field overpressure estimation equation of cylindrical charge explosive air blast[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2022, 42(9): 918-927.
- [13] 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(4): 462-467.  
DENG Gui-de, ZHENG Jin-yang, CHEN Yong-jun, et al. Near-field blast loadings from explosion of two typically shaped charges[J]. *Journal of Army Engineering University of PLA*, 2010, 11(4): 462-467.
- [14] XIAO W, ANDRAE M, GEBBEKEN N. Influence of charge shape and point of detonation of high explosive cylinders detonated on ground surface on blast-resistant design[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 181: 105697.
- [15] PUNNAPPILLY S, BASKAR K. Comparative study of the influence of charge shapes on the distribution of blast pressure on a structural unit[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2680(1): 012030.
- [16] ZHAO X, WANG G, FANG H, et al. Shock wave propagation characteristics of cylindrical charge and its aspect ratio effects on the damage of RC slabs[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 2021(1): 2483995.
- [17] TIAN L, LI Z, ZHOU Q. Simplified computation of reflective overpressure in closed cuboid space due to internal explosion[J]. *Transactions of Tianjin University*, 2010, 16(6): 395-404.
- [18] ZYSKOWSKI A, SOCHET I, MAVROT G, et al. Study of the explosion process in a small scale experiment-structural loading[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2004, 17(4): 291-299.
- [19] GAULT K, SOCHET I, HAKENHOLZ L, et al. Influence of the

- explosion center on shock wave propagation in a confined room[J]. *Shock Waves*, 2020, 30(5): 473–481.
- [20] BAKER W E. The elastic-plastic response of thin spherical shells to internal blast loading[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1959, 27(1).
- [21] DRAGOS J, WU C, OEHLERS D J. Simplification of fully confined blasts for structural response analysis [J]. *Engineering Structures*, 2013, 56: 312–326.
- [22] XIAO W, ANDRAE M, GEBBEKEN N. Numerical study of blast mitigation effect of innovative barriers using woven wire mesh[J]. *Engineering Structures*, 2020, 213: 110574.
- [23] CHAN P C, KLEIN H H. A study of blast effects inside an enclosure [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1994, 116 (3) : 450–455.

## Numerical Investigations on Blast Loads generated from Cylindrical Charges inside Confined Rooms

XIAO Wei-fang, WU Ming-tao, ZHAO Xian-zhong

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To investigate the influence of cylindrical charge geometry on blast load distribution under internal explosion conditions, 16 numerical models were developed using LS-DYNA following experimental validation. A comprehensive parametric study was conducted to systematically evaluate the effects of three key factors: charge length-to-diameter ratio ( $L/D=1-5$ ), ignition location (head, center, tail), and charge orientation. The analysis compared overpressure contours, reflected overpressure-time histories, impulse-time histories, and peak values across different scenarios. The results indicate that the  $L/D$  ratio exhibits the most significant impact on blast load distribution. As  $L/D$  increases from 1 to 5, the reflected overpressure ratio decreases dramatically from 37.5%–1287.9% to 25.5%–356.7%, and the reflected impulse ratio reduces from 88.7%–235.3% to 76.5%–132.8%. The effect of ignition position is region-specific, with the maximum differences in reflected overpressure and impulse ratios reaching 2173.3% and 328.0%. Charge orientation influence diminishes with increasing  $L/D$  ratio and incidence angle. Specifically, when  $L/D$  ratio increase from 1 to 5, the maximum reflected overpressure ratio decreases from 1287.9% to 356.8%, and impulse ratio decreases from 235.3% to 132.7%. The distribution of internal blast loads is primarily governed by the  $L/D$  ratio, followed by charge orientation and ignition location.

**Key words:** cylindrical charge; internal explosion; blast load distribution; length-diameter ratio; charge orientation; ignition location

**CLC number:** TJ55;O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2025142

**Grant support:** Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 22120250132)

(责编: 高毅)