

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.021

球状带壳装药爆炸毁伤混凝土初始参量计算^{*}

王新生¹, 刘志浩¹, 马潇潇²

(1. 河南开放大学 建筑工程与智能建造学院, 郑州 450008; 2. 河南省智能绿色建造工程研究中心, 郑州 450008)

摘要: 为准确评估带壳装药爆炸毁伤混凝土介质的威力, 通过理论建模与数值计算, 精确求解了爆炸冲击波作用于混凝土介质表面的初始参量, 分析了壳体厚度对毁伤效果的影响规律。基于牛顿第二定律, 建立了球状壳体在爆炸压力、混凝土介质阻力及壳体周向应力共同作用下的运动控制方程。采用 MATLAB 软件求解该方程的数值解, 系统分析了壳体厚度(2~8 mm)对壳体膨胀运动速度沿径向分布的影响规律。结合壳体-混凝土界面处的质点速度连续条件, 进一步推导出混凝土孔壁的初始质点速度与初始冲击压力解析表达式。以典型 B 炸药(密度 1.6 g/cm³、爆速 7.80 × 10³ m/s、装药半径 23.3 mm)和 45# 钢壳体(密度 7.85 g/cm³, 屈服强度 3.55 × 10² MPa)在混凝土(密度 2.4 g/cm³)中爆炸为例进行数值计算, 结果表明: 壳体最大运动速度随其厚度增加而显著降低, 从 2 mm 壳体的 1.44 × 10³ m/s 降至 8 mm 壳体的 8.08 × 10² m/s, 降幅达 43.8%; 相应地, 受此影响, 孔壁峰值压力与壳体内部初始峰值压力之比(P_{mx}/P_m)也随壳体增厚而明显下降, 从 0.82 降至 0.46。本研究揭示, 减小壳体厚度能有效提升能量传递效率, 增强对混凝土介质的爆炸毁伤效果; 反之, 增大壳体厚度将显著降低能量传递效率, 但能提升弹体的结构完整性与侵彻能力, 以满足穿透硬目标的需求。因此, 在实际弹药设计中, 壳体厚度的选择需在侵彻深度与内部爆炸威力之间寻求最优平衡。

关键词: 爆炸力学; 混凝土介质; 爆炸毁伤; 球状带壳装药; 初始冲击压力

中图分类号: O383+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)02-0203-07

Calculation of Initial Parameters for Concrete Damage Induced by Spherical Cased Charge Blast

WANG Xin-sheng¹, LIU Zhi-hao¹, MA Xiao-xiao²

(1. School of Architecture Engineering and Intelligent Construction, Henan Open University, Zhengzhou 450008, China; 2. Henan Province Engineering Research Center of Intelligent Green Construction, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: To quantitatively evaluate the destructive effects of a cased charge on concrete structures, this research combines theoretical analysis with numerical simulations to determine the initial blast wave parameters impacting the concrete surface with high precision. It further analyzes the influence of casing thickness on damage outcomes. Applying Newton's second law, the research derives the governing equation of motion for the spherical shell by accounting for the simultaneous influences of detonation pressure, concrete resistance forces, and circumferential shell stresses. The governing equation was numerically solved using MATLAB, enabling a systematic investigation of the effects of

收稿日期 (Date of reception): 2022-07-26

网络首发日期 (Published online): 2025-11-19

作者简介: 王新生 (1976-), 男, 博士、教授, 河南开封人, 从事爆炸理论及应用方面研究, (E-mail) wxs@hpu.edu.cn。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2023YFC2907202); 河南省重点研发与推广专项 (No. 242102320059, 252102320059); 河南省高等学校青年骨干教师计划项目 (No. 2024GGJS200)

About the author: WANG Xin-sheng (1976-), male, born in Kaifeng city, Henan province, Ph. D., professor, mainly engaged in research on explosion theory and application, (E-mail) wxs@hpu.edu.cn.

Fund Programs: National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFC2907202), Henan Province Key Research and Development and Promotion Program (Scientific and Technological Tackling) (No. 242102320059, 252102320059), Henan Province Young Backbone Teachers Training Program for Higher Institutions (No. 2024GGJS200)

casing thickness (2 ~ 8 mm) on the radial expansion velocity distribution. Through application of particle velocity continuity conditions at the shell-concrete interface, closed-form solutions were derived for both initial particle velocity and shock pressure at the concrete borehole wall surface. Numerical simulations were conducted for a representative scenario featuring composition B explosive (density is 1.6 g/cm³, detonation velocity is 7.80 10³ m/s, charge radius is 23.3 mm) encased in 45# steel shell (density is 7.85 g/cm³, yield strength is 3.55 10² MPa) detonating within concrete medium (density is 2.4 g/cm³). The results demonstrate that the maximum shell velocity exhibits an inverse relationship with shell thickness, decreasing by 43.8% from 1.44 10³ m/s (2 mm shell) to 8.08 10² m/s (8 mm shell). Correspondingly, the pressure transfer ratio (P_{mx}/P_m) at the borehole wall declines from 0.82 to 0.46 with increasing shell thickness. This research establishes that reducing the shell thickness effectively enhances energy transfer efficiency and improves the blast damage effect on concrete, whereas increasing the shell thickness significantly reduces energy transfer efficiency but improves the projectile's structural integrity and penetration capability, which is necessary for penetrating hard targets. These findings underscore the necessity of balanced ammunition design that considers both penetration requirements and blast effectiveness.

Key words: mechanics of explosion; concrete medium; explosion and damage; spherical cased charge; initial shock pressure

混凝土因其优异的抗压性能和广泛的工程适用性,已成为军事防护与民用基础设施中不可或缺的结构材料。随着钻地武器、聚能装药等新型战斗部的发展,混凝土及由混凝土组成的多层介质结构在爆炸荷载作用下的动态响应与毁伤机理研究日益受到重视^[1,2]。常规战斗部通常由壳体与内部装药构成,其在侵彻目标后爆炸,形成冲击波与破片共同作用的复杂毁伤场。已有研究显示,壳体对爆炸波的传播特性、能量耦合效率以及混凝土的最终毁伤效果具有重要影响^[3,4]。

梁斌等采用试验及数值模拟研究了壳体材料对毁伤效果的影响^[5,6],结果表明:复合材料壳体装药在空气中爆炸所产生的冲击波超压相对较高,且从混凝土中爆炸破坏毁伤效应结果来看,复合材料壳体装药在波阻抗匹配方面较 D6A 钢壳好,更利于冲击波的传播。苏波等运用 ALE 方法模拟了带壳装药在多层介质中的爆炸过程^[7],发现壳体能够提高爆炸波与土中冲击波的峰值压力,并延长其作用时间,最终导致漏斗坑口部半径增大。刘彦等通过实验研究了不同厚度壳体装药在混凝土中的爆炸效应^[8],发现壳体厚度对毁伤效果具有非线性影响:壳体较薄时,爆坑体积甚至大于裸装药;而随着壳体厚度增加,爆坑体积逐渐减小,壳体破碎程度也相应降低。王新生等进一步采用 AUTODYN-2D 数值模拟验证了该现象^[9],指出薄壳体可增强爆炸压力并延长作用时间,从而提高毁伤效果;而厚壳体因破碎消耗更多能量,导致对混凝土的破坏作用减弱。孙善政等量化分析了壳体厚度对爆炸毁伤效果的影响规律^[10],发现存在最佳无量纲壳体厚度 ($\delta/d_0 = 0.025$),此时带壳装药对混凝土靶体的毁伤效果达

到最优。然而,上述研究多聚焦于单一变量(如埋置深度、壳体厚度或壳体材料)的影响,试验样本有限,缺乏对二者以上耦合效应的系统分析。祝飞翔等通过钻爆法开展了 12 种工况下的浅埋与深埋带壳装药爆炸试验及数值模拟^[11],综合考虑了装药深度与壳体厚度的协同作用,揭示了更为精细的毁伤规律。

在冲击波与破片联合作用方面,廖南等采用 SPG 算法对带壳装药爆炸过程进行了精细化数值模拟^[12],揭示了壳体对冲击波传播与破片运动的耦合影响机制。黄晨等基于 SPH-FEM 算法模拟封闭空间内带壳装药爆炸过程^[13],发现壳体参数显著影响爆炸载荷与破片特性,破片与冲击波协同作用可加剧结构毁伤。张生等系统分析了带壳装药爆炸后冲击波与破片的能量分配机制^[14],提出了考虑爆炸产物内能与壳体破裂能的破片初速修正公式。胡宏伟等针对带壳装药在水下爆炸条件下的殉爆特性开展了实验研究^[15],发现壳体厚度与炸药类型对殉爆距离具有显著影响。

值得注意的是,装药形状对爆炸荷载分布与结构响应具有显著影响^[16,17]。杨允锴等对比了圆柱形装药与球形装药在相近条件下对混凝土目标的毁伤效应^[18],试验结果表明圆柱形装药的毁伤效果强于球形装药。高矗等基于 Kong-Fang 混凝土材料模型与多物质 ALE 算法^[19],系统研究了球形装药在混凝土中爆炸应力波的传播与衰减规律。杨耀宗等则基于 Kong-Fang 混凝土材料模型与 MM-ALE 算法^[20],研究了带壳柱形装药在混凝土中爆炸应力波的衰减规律,提出了考虑长径比、壳厚比与埋深的峰值应力计算公式,为装药形状与壳体约束效应的量

化分析提供了支撑。田丰等开展了不同约束材料下乳化炸药殉爆实验^[21], 结果表明约束条件对炸药殉爆距离影响十分显著, 约束条件越好, 乳化炸药殉爆距离越大。刘忠磊等的研究也证明由于无缝钢管的约束作用^[22], 乳化炸药在无缝钢管中的引爆距离显著增加。

尽管上述研究在壳体约束爆炸方面取得了重要进展, 但在球状带壳装药条件下, 壳体厚度对初始冲击波参数的定量影响机制仍不明确, 尤其缺乏系统理论模型描述壳体运动与混凝土初始响应的关联。为此, 本文基于牛顿第二定律, 建立球状壳体在爆炸压力、介质阻力与周向应力耦合作用下的运动控制方程, 通过 MATLAB 数值求解获得不同壳体厚度下的速度分布, 进而依据界面连续条件推导孔壁初始质点速度与冲击压力的解析表达式, 以揭示壳体厚度对能量传递与毁伤效果的影响机制, 为钻地战斗部壳体设计提供理论依据。

1 球状带壳装药爆炸时壳体运动方程

球状带壳装药在混凝土介质中爆炸后, 爆炸载荷直接作用于壳体内部。如果假定爆炸载荷作用在球状壳体的各部分都是均匀的。那么, 在对称载荷作用下, 壳体只有径向位移。忽略径向应力的影响, 假定壳体只承受沿壳体壁厚均匀分布的周向应力 σ 。为研究壳体的运动规律, 取一球壳微元来分析。

假设在某一瞬时内半径 r 处, 瞬时球壳厚度为 δ , 作用在该微元体上的力如图 1 所示。周向应力 σ 沿壳体厚度均匀分布, 由于球面对称, 四个方向的周向力相等, 均为 $\sigma\delta(r + \delta/2)d\varphi$, 且在半径方向上的合力为 $-2\sigma\delta(r + \delta/2)(d\varphi)^2$ 。还有壳体内壁上作用的爆炸载荷 $P_r r^2 (d\varphi)^2$ 。另外就是壳体在膨胀过程中, 由于混凝土的存在, 对壳体外表面作用有法向应力 P_R , 于是壳体外壁上作用有限制壳体径向运动的阻力 $-P_R(r + \delta)^2 (d\varphi)^2$ 。

于是, 球状装药爆炸后, 壳体在内部爆炸载荷、壳体周向应力以及混凝土介质阻力的共同作用下做膨胀运动。

若球壳密度为 ρ_s , 根据牛顿运动定律, 在某一瞬时内半径 r 处, 壳体的运动方程为

$$(r + \delta/2)^2 \rho_s \delta \frac{dV}{dt} = P_r r^2 - 2\sigma\delta(r + \delta/2) - P_R(r + \delta)^2 \quad (1)$$

式中, V 为壳体的瞬时膨胀运动速度。

注意到 $\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dr} \cdot \frac{dr}{dt} = V \frac{dV}{dr}$, 代入(1)式为

$$(r + \delta/2)^2 \rho_s \delta V \frac{dV}{dr} = P_r r^2 - 2\sigma\delta(r + \delta/2) - P_R(r + \delta)^2 \quad (2)$$

混凝土垂直于正在膨胀壳体壁上的压力, 可用弹体侵入表面的法向应力表示^[23]

$$P_R = A_s + BV^2 \quad (3)$$

式中: $A_s = Sf_c$, $S = 82.6(f_c/10^6)^{-0.544}$, f_c 为混凝土的抗压强度, MPa; $B = \rho_m$, ρ_m 为混凝土密度。

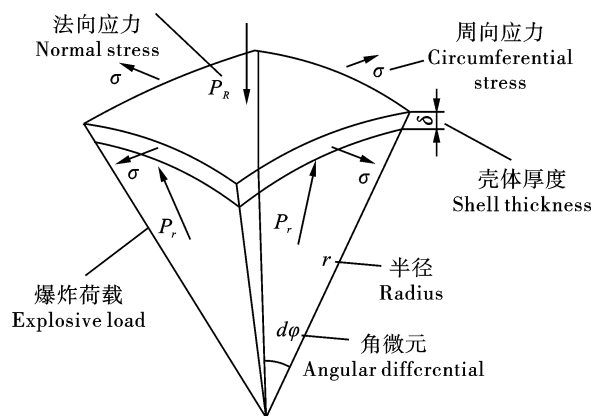


图1 球壳微元上的作用力

Fig. 1 Forces of spherical shell moment

爆炸载荷的表达式, 可考虑凝聚态炸药爆炸产物的近似状态方程

$$P_r = A\rho_e^\gamma \quad (4)$$

式中: ρ_e 为炸药爆炸后的爆炸产物密度; A 和 γ 为与炸药性质有关的常数。

对于凝聚态炸药, 通常取 $\gamma = 3$, 于是可得

$$P_r = P_0 \left(\frac{\rho_e}{\rho_{e0}} \right)^\gamma = P_0 \left(\frac{\rho_e}{\rho_{e0}} \right)^3 \quad (5)$$

式中: ρ_{e0} 为炸药的初始密度; P_0 为炸药的初始爆炸压力。

当炸药为瞬时爆炸时, P_0 可用下式表示

$$P_0 = \frac{1}{8} \rho_{e0} D_e^2 \quad (6)$$

式中: D_e 为炸药爆速。

然而, 炸药爆炸多不是瞬时爆炸, 其初始压力大小还与周围介质性质有关, 尤其是与周围介质的阻抗大小密切相关。考虑介质阻抗对初始爆炸压力的影响, 应对初始爆炸压力进行修正。参考声学近似公式^[24], 可将 P_0 修正为 P_m

$$P_m = P_0 \frac{2}{1 + \frac{\rho_{e0} D_e}{\rho_m C_p}} \quad (7)$$

式中: ρ_m 为周围介质的密度; C_p 为介质中的声速。

对于球状装药,由质量守恒定律

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_e = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho_{e0} \quad (8)$$

则由式(5)、(7)、(8)式得

$$P_r = \frac{1}{8}\rho_{e0}D_e^2 \frac{2}{1 + \frac{\rho_{e0}D_e}{\rho_m C_p}} \left(\frac{r_0}{r}\right)^9 \quad (9)$$

对于带壳装药爆炸毁伤混凝土,药量较大,使得壳体在爆炸载荷作用下发生塑性变形。因壳体的变形较大,所以可略去壳体的弹性变形,而假定壳体的材料是理想刚塑性的,没有硬化效应。那么,材料的应力应变曲线如图2所示。

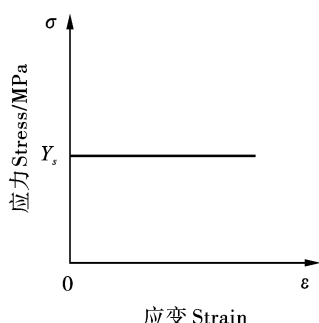


图2 理想钢塑性材料的 σ - ε 曲线

Fig. 2 σ - ε curve of steel-plastic material

于是由刚塑性假设

$$\sigma = Y_s \quad (10)$$

壳体运动方程变为

$$(r + \delta/2)^2 \rho_s \delta V \frac{dV}{dr} = P_m r_0^9 r^{-7} - 2Y_s \delta (r + \delta/2) - (A + BV^2)(r + \delta)^2 \quad (11)$$

方程(11)的初始条件是,当 $r = r_0$ (初始装药半径)时

$$V_{r=r_0} = 0 \quad (12)$$

壳体膨胀过程中,忽略壳体密度的变化,由质量守恒定律

$$\frac{4}{3}\pi(R^3 - r^3)\rho_m = \frac{4}{3}\pi(R_0^3 - r_0^3)\rho_m \quad (13)$$

由上式可得壳体膨胀过程瞬时外半径 R 与瞬小时内半径 r 的关系式

$$R^3 = r^3 + (R_0^3 - r_0^3) \frac{\rho_{m0}}{\rho_m} \quad (14)$$

式中, r_0 和 R_0 分别为壳体的初始内、外半径。

于是可得壳体膨胀过程瞬时壳体厚度为

$$\delta = R - r = (r^3 + R_0^3 - r_0^3)^{1/3} - r \quad (15)$$

联立式(7)、(11)和(15),可得关于 V 和 r 的球状壳体运动方程。利用Matlab软件很容易得到不同径向位置处的壳体运动速度。

2 混凝土孔壁初始参量计算

由以上分析可知,在壳体与混凝土的分界面处是满足界面连续条件的,即界面处的压力和质点速度相等。壳体的运动速度等于混凝土孔壁上的初始质点速度,壳体作用于混凝土介质上的初始压力 P_{mx} 与限制壳体径向运动的法向应力 P_R 是一对作用力与反作用力,二者的大小是相等的,于是可以求得混凝土孔壁的初始质点速度 V_{mx} 和初始压力 P_{mx} 。即有

$$V_{mx} = V \quad (16)$$

$$P_{mx} = A + BV^2 \quad (17)$$

这是求解球状带壳装药爆炸毁伤混凝土威力参量的前提条件。

3 算例

以带壳球状B炸药在混凝土介质中爆炸为例。

已知:

B炸药装药密度为 1.6 g/cm^3 ;爆速为 $7.80 \times 10^3 \text{ m/s}$;装药量为 84.8 g ;装药半径为 23.3 mm 。壳体为45#钢,密度为 7.85 g/cm^3 ;屈服强度为 $3.55 \times 10^2 \text{ MPa}$ 。混凝土介质密度为 2.4 g/cm^3 。

根据式(11),可以绘制出不同壳体厚度情况下,距离装药中心不同距离处的壳体膨胀运动速度值,如图3所示。

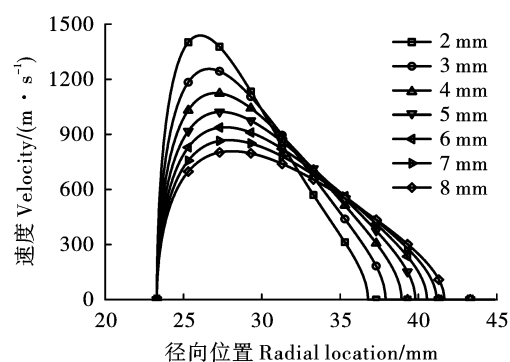


图3 不同径向位置处的球状壳体运动速度

Fig. 3 Spherical shell motion velocity in different radial locations

由图3可知,一定壳体厚度的球状带壳装药爆炸后,壳体在爆炸冲击载荷、混凝土介质阻力以及壳体周向力的共同作用下,首先做加速运动,随着爆炸产物的不断膨胀,爆炸压力逐渐减小,加速度亦逐渐减小,直到加速度为零时速度达到最大值,此时壳体受到的混凝土介质的阻力也最大;之后,增大的阻力和降低后的爆炸压力使得壳体做减速运动,直到运

动速度为零壳体停止运动。由于壳体达到最大速度值需要一个加速运动过程,因此壳体运动的最大速度不是在混凝土孔壁初始半径处产生,而是在远离孔壁初始半径一段距离后速度才达到最大。速度变化的上升沿较快,说明加速过程较快;速度变化的下降沿比较缓慢,说明减速过程较慢。

从图3中还可以看出,壳体厚度 δ 为2 mm、3 mm、4 mm、5 mm、6 mm、7 mm、8 mm时,分别对应的最大速度值 V_{mx} 为 1.44×10^3 m/s、 1.26×10^3 m/s、 1.12×10^3 m/s、 1.02×10^3 m/s、 9.39×10^2 m/s、 8.69×10^2 m/s、 8.08×10^2 m/s,随着壳体厚度的增加,最大速度值均是逐渐减小,而达到最大速度值的位置距离装药中心的距离也随着壳体厚度的增加相应增大。壳体越薄,达到的最大速度值越大,受到的混凝土介质阻力也越大,因此减加速度也就越大,最终导致较薄壳体在距离装药中心较近位置停止运动。

图4给出了球壳孔壁峰值压力与初始峰值压力的比值 P_{mx}/P_m 随壳体厚度 δ 的变化曲线。由图可知,随着壳体厚度的增加,由于壳体最大运动速度逐渐减小,孔壁处的最大峰值压力也逐渐减小。因此在进行弹药设计时,应尽量减小壳体厚度,使得球壳作用于孔壁的峰值压力与球壳内壁的峰值压力尽可能接近,即 P_{mx}/P_m 尽可能的大,此时的毁伤效果较好。

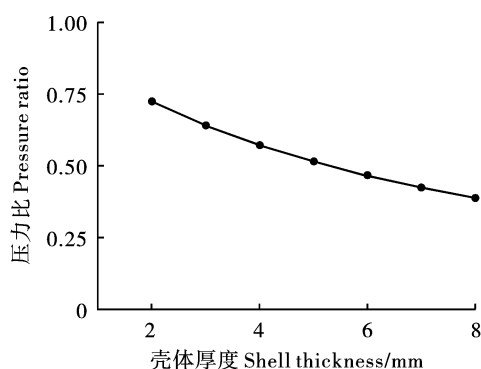


图4 P_{mx}/P_m 随壳体厚度 δ 的变化曲线

Fig. 4 Changing P_{mx}/P_m curve with δ

4 结论

本文通过理论建模与数值计算,系统研究了球状带壳装药在混凝土中爆炸的初始冲击波参量,揭示了壳体厚度对爆炸能量传递与毁伤威力的影响规律,主要结论如下:

(1) 基于牛顿运动定律,建立了球状带壳装药在混凝土中爆炸的壳体运动控制方程,通过数值求

解获得了壳体膨胀速度随径向位置的分布规律,并依据界面连续条件推导出混凝土孔壁初始质点速度与冲击压力的解析表达式,构建了从装药参数到介质初始响应的完整理论模型。

(2) 数值计算结果表明,壳体厚度是影响爆炸能量传递与毁伤效果的关键因素。随着壳体厚度从2 mm增至8 mm,壳体最大运动速度由 1.44×10^3 m/s下降至 8.08×10^2 m/s,孔壁峰值压力与壳内初始压力之比(P_{mx}/P_m)由0.82降至0.46,表明厚壳体显著削弱了爆炸能量向混凝土的传递效率。

(3) 壳体厚度的选择本质上是侵彻能力与爆炸威力之间的综合考虑。薄壳体有利于提升冲击波毁伤效果,适用于面毁伤类弹药;厚壳体虽降低爆炸能量输出,但可保障弹体在侵彻过程中的结构完整性,适用于钻地类战斗部。本研究建立的参量化理论模型为不同战术需求下的壳体厚度优化设计提供了理论依据。

(4) 与柱形装药相比,球状带壳装药在爆炸能量传递方面具有独特的空间对称性,其建立的初始冲击波参数理论计算方法可为战斗部威力评估提供更精确的参考。后续研究将针对不同壳体材料和混凝土强度等级开展实验验证,进一步完善理论模型。

参考文献 (References)

- [1] 胡 榕,姜春兰,卢广照,等. 机场跑道内爆炸毁伤效应及工程化函数模型[J]. 兵工学报,2023,44(4):929-939.
- [1] HU Rong, JIANG Chun-lan, LU Guang-zhao, et al. Damage effects and engineering computational model of internal explosion of airfield runway[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(4):929-939. (in Chinese)
- [2] 周 鑫,冯 彬,陈 力,等. 活性射流侵彻-内爆作用下半无限混凝土靶中应力波效应[J]. 含能材料, 2025, 33(7):689-702.
- [2] ZHOU Xin, FENG Bin, CHEN Li, et al. Stress wave effect in semi-infinite concrete targets subjected to penetration-implosion action of reactive jet[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2025, 33(7):689-702. (in Chinese)
- [3] 刘 璐,徐 昊,任逸飞,等. 圆柱壳体内部多点爆炸冲击波流场演化及压力分布特性[J]. 含能材料, 2025, 33(10):1176-1191.
- [3] LIU Lu, XU Hao, REN Yi-fei, et al. Key influencing factors of multi-point explosions flow field characteristics inside cylindrical shells[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2025, 33(10):1176-1191. (in Chinese)
- [4] 杨 帅,赵金庆,崔小杰,等. 爆炸冲击波/破片耦合毁

- 伤效能研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44(17): 170-178, 192. DOI: 10. 13465/j. cnki. jvs. 2025. 17. 018.
- [4] YANG Shuai, ZHAO Jin-qing, CUI Xiao-jie, et al. Explosive shock waves/fragments coupled damage efficiency [J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(17): 170-178, 192. DOI: 10. 13465/j. cnki. jvs. 2025. 17. 018. (in Chinese)
- [5] 梁 斌, 卢永刚, 陈忠富. 不同壳体装药在混凝土中爆破威力初步分析[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(4): 111-113.
- [5] LIANG Bin, LU Yong-gang, CHEN Zhong-fu. Primary analyze of different material shell cylinder charge blasting damage effect in concrete [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007, 27(4): 111-113. (in Chinese)
- [6] 梁 斌, 杨世全, 吕 剑, 等. 装药在空气及混凝土靶中爆炸威力试验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(6): 79-82.
- [6] LIANG Bin, YANG Shi-quan, LV Jian, et al. Experimental investigation on blast effect of explosive charge with different shell material [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008, 28(6): 79-82. (in Chinese)
- [7] 苏 波, 唐 勇, 顾文彬, 等. 带壳装药在多层介质中爆炸的数值模拟研究[J]. 爆破, 2009, 26(1): 15-18, 36.
- [7] SU Bo, TANG Yong, GU Wen-bin, et al. Numerical simulation of blast effects for charge with case in multi-layer medium [J]. Blasting, 2009, 26(1): 15-18, 36. (in Chinese)
- [8] 刘 彦, 段卓平, 王新生, 等. 不同厚度壳体装药在混凝土中爆炸的实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(7): 771-773, 848.
- [8] LIU Yan, DUAN Zhuo-ping, WANG Xin-sheng, et al. Experiments on explosion of explosives with different thickness shells in concretes [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(7): 771-773, 848. (in Chinese)
- [9] 王新生, 黄风雷, 汪庆桃. 带壳装药爆炸毁伤混凝土的数值模拟[J]. 爆破, 2011, 28(2): 9-12, 34.
- [9] WANG Xin-sheng, HUANG Feng-lei, WANG Qing-tao. Numerical simulation for shell charge explosion and damage in concretes [J]. Blasting, 2011, 28(2): 9-12, 34. (in Chinese)
- [10] 孙善政, 卢 浩, 李 杰, 等. 侵爆作用下混凝土靶破坏效应试验与数值模拟[J]. 振动与冲击, 2022, 41(1): 206-212. DOI: 10. 13465/j. cnki. jvs. 2022. 01. 026.
- [10] SUN Shan-zheng, LU Hao, LI Jie, et al. Tests and numerical simulation for damage effect of concrete target under penetration and explosion [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(1): 206-212. DOI: 10. 13465/j. cnki. jvs. 2022. 01. 026. (in Chinese)
- [11] 祝飞翔, 高 飞, 刘晨康, 等. 带壳装药在混凝土中爆炸毁伤效果的影响规律研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44(5): 278-288.
- [11] ZHU Fei-xiang, GAO Fei, LIU Chen-kang, et al. Influence law of explosion damage effect of shell charge in concrete [J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(5): 278-288. (in Chinese)
- [12] 廖 南, 洪 建, 方 秦, 等. 带壳装药爆炸冲击波与破片荷载规律的数值模拟研究[J]. 防护工程, 2022, 44(6): 7-14.
- [12] LIAO Nan, HONG Jian, FANG Qin, et al. Numerical simulation of the loading law of shock wave and fragment under cased charge blast [J]. Protective Engineering, 2022, 44(6): 7-14. (in Chinese)
- [13] 黄 晨, 蒋大川, 柴建宁, 等. 封闭空间内带壳装药爆炸载荷特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(10): 154-163.
- [13] HUANG Chen, JIANG Da-chuan, CHAI Jian-ning, et al. Investigation on characteristics of cased charge blasting load in confined space [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2025, 46(10): 154-163. (in Chinese)
- [14] 张 生, 李述涛, 王振清, 等. 带壳装药毁伤元威力参数计算方法[J]. 振动与冲击, 2024, 43(13): 25-34. DOI: 10. 13465/j. cnki. jvs. 2024. 13. 003.
- [14] ZHANG Sheng, LI Shu-tao, WANG Zhen-qing, et al. Calculation method for power parameters of damage element of shell charge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(13): 25-34. DOI: 10. 13465/j. cnki. jvs. 2024. 13. 003. (in Chinese)
- [15] 胡宏伟, 王 健, 卞云龙, 等. 带壳装药水中殉爆特性分析[J]. 水下无人系统学报, 2022, 30(3): 308-313.
- [15] HU Hong-wei, WANG Jian, BIAN Yun-long, et al. Experiments of sympathetic detonation performance of explosives with shell in water [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2022, 30(3): 308-313. (in Chinese)
- [16] XIAO W F, 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. DOI: 10. 1061/(ASCE)ST. 1943-541X. 0002694.
- [17] RIGBY S E, OSBORNE C, LANGDON G S, et al. Spherical equivalence of cylindrical explosives; effect of charge shape on deflection of blast-loaded plates [J]. Interna-

- tional Journal of Impact Engineering, 2021, 155: 103892. DOI: 10.1016/j.ijimpeng. 2021. 103892.
- [18] 杨允锴,武双章,高振儒,等. 装药参数影响钢筋混凝土柱毁伤效应的试验与数值仿真研究[J]. 爆破, 2023, 40(3): 143-150.
- [18] YANG Yun-kai, WU Shuang-zhang, GAO Zheng-ru, et al. Experimental and numerical analysis on influence of charge parameters on damage effect of RC column[J]. Blasting, 2023, 40(3): 143-150. (in Chinese)
- [19] 高 矗,孔祥振,方 秦,等. 混凝土中爆炸应力波衰减规律的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(12): 68-80.
- [19] GAO Chu, KONG Xiang-zhen, FANG Qin, et al. Numerical study on attenuation of stress wave in concrete subjected to explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(12): 68-80. (in Chinese)
- [20] 杨耀宗,孔祥振,方 秦,等. 混凝土中带壳柱形装药爆炸应力波衰减规律的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(11): 62-76.
- [20] YANG Yao-zong, KONG Xiang-zhen, FANG Qin, et al. Numerical investigation on attenuation of stress waves in concrete induced by cylindrical cased charge explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(11): 62-76. (in Chinese)
- [21] 田 丰,史秀志,李 波,等. 约束条件下乳化炸药殉爆距离研究[J]. 爆破, 2025, 42(3): 63-77.
- [21] TIAN Feng, SHI Xiu-zhi, LI Bo, et al. Study on transmission distance of emulsion explosives under constrained conditions[J]. Blasting, 2025, 42(3): 63-77. (in Chinese)
- [22] 刘忠磊,王旭华,王应魁,等. 约束条件下聚能装置对乳化炸药引爆距离影响的研究[J]. 爆破, 2024, 41(3): 171-178.
- [22] LIU Zhong-lei, WANG Xu-hua, WANG Ying-kui, et al. Study on influence of fusion device on detonation distance of emulsion explosives under constraint conditions[J]. Blasting, 2024, 41(3): 171-178. (in Chinese)
- [23] 王 武,杨 军,王安宝,等. 弹体侵彻钢筋混凝土遮弹层的阻力方程[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(3): 94-106.
- [23] WANG Wu, YANG Jun, WANG An-bao, et al. Resistance equation of projectile penetrating into reinforced concrete shield[J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(3): 94-106. (in Chinese)
- [24] 王玉杰. 爆破工程[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2018.

(上接第187页)

- [19] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [20] 钟沁哲,刘晓辉,刘汝权,等. 不同节理倾角下砂岩动力学特性和损伤本构研究[J/OL]. 中国农村水利水电; 1-17. [2025-11-19]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1419.TV.20250514.2001.020>.
- [20] ZHONG Qin-zhe, LIU Xiao-hui, LIU Ru-quan, et al. Research on the dynamic characteristics and damage constitutive model of sandstone under different joint dip angles[J/OL]. China Rural Water and Hydropower; 1-17. [2025-11-19]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1419.TV.20250514.2001.020>. (in Chinese)
- [21] LUNDBERG B. A split Hopkinson bar study of energy absorption in dynamic rock fragmentation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1976, 13(6): 187-197.
- [22] 侯永强,尹升华,杨世兴,等. 动态荷载下胶结充填体力学响应及能量损伤演化过程研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(S1): 145-156.
- [22] HOU Yong-qiang, YIN Sheng-hua, YANG Shi-xing, et al. Mechanical response and energy damage evolution process of cemented backfill under dynamic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(S1): 145-156. (in Chinese)
- [23] 方士正,李炜煜,杨 阳,等. 静水压状态下深部岩石动态压缩力学行为及能量耗散特征试验研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(6): 280-288.
- [23] FANG Shi-zheng, LI Wei-yu, YANG Yang, et al. Experimental study on dynamic compressive mechanical behavior and energy dissipation characteristics of deep rocks under hydrostatic pressure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(6): 280-288. (in Chinese)
- [24] 谢和平,鞠 杨,黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(17): 3003-3010.
- [24] XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun. Rock Strength and overall failure criteria based on the principle of energy dissipation and release[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(17): 3003-3010. (in Chinese)