

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.01.020

聚能装药侵彻体对混凝土基座 毁伤效应数值模拟研究

谢兴博¹, 宋歌², 张勳³, 钟明寿¹

(1. 陆军工程大学, 南京 210007; 2. 解放军 31434 部队, 沈阳 110045; 3. 东部战区海军保障部, 宁波 315122)

摘要: 为选定混凝土基座爆破后残高低、块度小的聚能装药结构形式, 采用数值模拟方法对比研究了装药量、外径和药型罩壁厚相同条件下 60°、120° 锥形罩和曲率半径为 10.8 cm 曲面罩形成的射流或爆炸成型弹丸(EFP)运动特性, 及其对混凝土基座垂直侵彻过程和毁伤效应。结果表明: 不同聚能装药侵彻体对混凝土基座的侵彻方式不同。60° 药型罩的头部射流先侵彻混凝土基座, 随后杵体对孔洞进行扩大, 120° 药型罩的杵体与射流合并侵彻混凝土基座, 而曲面药型罩主要依靠成型弹丸对混凝土基座进行冲击侵彻; 混凝土基座的破碎能力与侵彻孔直径相关; 孔径越大、能力越强。60°、120° 和 EFP 药型罩侵彻孔直径分别为 4.3 cm、5.2 cm 和 7.0 cm, 在侵彻深度范围内形成的裂缝数量、宽度呈现增大趋势; 混凝土基座爆破后的残留高度与横向贯通裂缝至底面之间的距离相关, 而横向裂缝形成与侵彻体参数、装药量等多个因素相关。对有限尺寸的混凝土基座, 大锥角药型罩的聚能装药破碎范围和程度的综合效果较佳, EFP 药型罩虽然侵彻能力最弱, 爆破作用后混凝土残留高度较大, 但在侵彻深度范围内的破碎能力最强。研究不同聚能装药侵彻体对混凝土基座的爆破效应为毁伤机理探究和破除方式选择提供参考。

关键词: 聚能装药; 药型罩类型; 射流侵彻; EFP 冲击; 数值模拟

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)01-0147-07

Numerical Simulation of Damage Effect of Shaped Charge Penetrator on Concrete Base

XIE Xing-bo¹, SONG Ge², ZHANG Qing³, ZHONG Ming-shou¹

(1. Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China;

2. No. 31434 Troops of PLA, Shenyang 110045, China;

3. Support Department of Eastern Theater Navy, Ningbo 315122, China)

Abstract: In order to select the shaped charge structure with low residual height and small fragmentation after blasting of concrete base, numerical simulation method is used to study the motion characteristics of jet flows formed by 60° and 120° conical liners and explosive formed projectiles(EFP) formed by curved liners with curvature radius of 10.8 cm as well as the vertical penetration process and damage effect on concrete bases under the same explosive charge, outer diameter and shaped charge liner thickness. The results show that: Different shaped charge penetrators have different penetration modes to concrete bases. The head part of the jet flow formed by the 60° conical liner penetrates the concrete base first, and then the pestle part expands the hole. For the 120° conical liner, the pestle body and the jet flow penetrate the concrete base together, while the curved liner mainly penetrates the concrete base by the formed projectile; the crushing capacity of the shaped charge is related to the diameter of penetration hole. The larger the hole diameter is, the stronger the crushing capacity is. The penetration hole diameters of 60° liner, 120°

收稿日期: 2022-09-22

作者简介: 谢兴博(1971-), 男, 硕士、教授, 主要从事爆破器材应用技术研究, (E-mail) znbxie@126.com。

通讯作者: 宋歌(1989-), 男, 博士、工程师, 主要从事爆炸毁伤效应机理研究, (E-mail) Slevin324@qq.com。

liner and EFP liner are 4.3 cm, 5.2 cm and 7.0 cm, respectively. In addition, the number and width of cracks formed within the penetration depth show an increasing trend; the residual height of the concrete base after blasting is related to the distance between the transverse through cracks and the bottom, while the formation of transverse cracks is related to multiple factors such as penetrator parameters, charge quantity and so on; for the concrete base with a limited size, a shaped charge liner with a large cone angle has a better comprehensive effect with respect to crushing range and degree. Although the penetration ability of EFP liner is the weakest and the residual height of the concrete base after blasting is large, its crushing ability within the penetration depth is the strongest. The study of blasting effect of different shaped charge penetrators on a concrete base can provide a reference for exploring damage mechanism and selecting destruction mode.

Key words: shaped charge; type of shaped charge liner; jet penetration; EFP penetration; numerical simulation

混凝土基座和上方固定的构件组成障碍物,能够阻滞机械装备的行进。由于聚能装药具有能量集中、方向性好、穿透力强以及高效轻便^[1,2]的特点,在混凝土基座破碎领域被越来越重视。现有研究主要集中在聚能装药对混凝土目标的侵彻穿孔方面,而对破碎效应涉及较少。张利认为药型罩外曲率半径、炸高对入口孔径和侵彻深度影响最大^[3];任思远研究环形射流和中心 EFP 组合战斗部对混凝土墙体的破孔特性^[4],结果显示组合战斗部可以对混凝土墙体形成直径大于 2.5 倍装药口径的通孔;曾虎得到 EFP 对岩石的破坏毁伤范围、侵彻深度与装药直径关系^[5];徐浩等通过 ALE 仿真得到了超高速金属射流能量转换及侵彻过程中射流速度变化规律、围压对射流侵彻混凝土靶速度及穿深的影响规律^[6];王伟认为影响 EFP 动能的主次顺序为装药长径比、药型罩顶厚度、壳体厚度、药形罩外曲率半径和内曲率半径^[7];Xu Wen-long 研究表明超高速聚能装药形成的弹丸速度随着钨板厚度增大呈现先增大后减小的趋势^[8];Xiao Qiang-qiang 试验研究得到聚能装药侵彻高强钢纤维活性粉末混凝土靶板的侵彻深度和弹坑直径随混凝土强度的变化规律与聚能

侵彻普通强度混凝土不同^[9];朱少平数值模拟得到混凝土非贯穿试验中侵彻深度和损伤范围随着卵形弹丸形状系数增大而增加^[10]。实际上,聚能装药对有限尺寸的混凝土基座除了开坑和侵彻穿孔外,还有较好的破碎效果。对比研究同样外径、装药量和药型罩壁厚的不同类型侵彻体对混凝土基座的作用过程和破碎效应,为聚能装药毁伤机理探究和破除方式选择提供依据和参考。

1 聚能爆破装置和混凝土基座的有限元模型

1.1 材料模型及参数

针对聚能装药对轨条混凝土基座破坏效应问题进行数值模拟,涉及到相关参数:空气、炸药、紫铜和混凝土。空气采用空白材料 NULL 本构模型和线性多项式状态方程;聚能装药所用的炸药为 8701 炸药(主要成分为 RDX),炸药及爆轰产物的材料模型采用高能燃烧模型,状态方程采用 JWL 方程;药型罩使用紫铜,采用 Johnson-cook 材料模型和 GRUNEIS-EN 状态方程进行描述;混凝土基座为 C35 素混凝土,采用 RHT 材料模型,混凝土材料参数如表 1。

表 1 混凝土材料参数

Table 1 Concrete material parameters

$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	G/GPa	f_c/MPa	f_t/f_c	f_s/f_c	A	N	Q_0	f_{gc}/f_c	f_{gt}/f_c	D_1	D_2
2.31	16.7	35	0.1	0.18	1.6	0.61	0.6805	0.53	0.7	0.04	1

1.2 聚能装药设计及模型建立

建立三种规格的聚能装药模型。三个模型的药型罩分别是夹角分为 60°、120° 的锥形罩和曲率半径为 10.8 cm 的曲面罩,药型罩厚度均为 0.5 cm,装药为 8701 炸药,采用圆柱形结构装药,装药量均为 1.3 kg,装药直径均为 11 cm,装药高度分别为 14 cm、9.7 cm 和 9.1 cm,如图 1。

1.3 聚能装药爆破混凝土基座模型建立

轨条混凝土基座爆破数值模拟研究基于 LS-

DYNA 程序进行,采用 Solid164 实体单元进行建模,利用 ALE 和流构耦合算法进行计算,数值模型单位使用 cm-g- μs 。以 60°紫铜锥形药型罩为例,建立四分之一有限元模型,炸药质量为 1.3 kg,混凝土基座为四棱台体,高度为 80 cm。

数值模型单元采用 Solid164 六面体实体单元,炸药、药型罩、空气采用 Euler 网格,所有的单元连接为共节点的方式;混凝土基座采用 Lagrange 网格,混凝土与空气采用多物质耦合算法。模型共创建了

4个 part, 欧拉网格最小单元尺寸为 0.2 cm, Lagrange 网格最小单元尺寸为 0.3 cm, 图 2 为有限元模型的示意图。有限元模型建立后, 在对称面施加固定约束, 以模拟四分之一模型, 同时, 在空气域边界添加无反射边界, 计算时间步长参数设为 0.6, 终止时间为 1200 μs 。

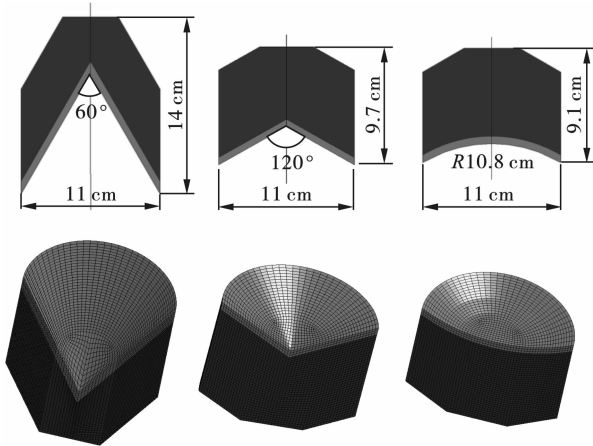


图 1 三种规格的聚能装药模型截面和有限元模型
Fig. 1 Cross section and finite element model of shaped charge model of three specifications

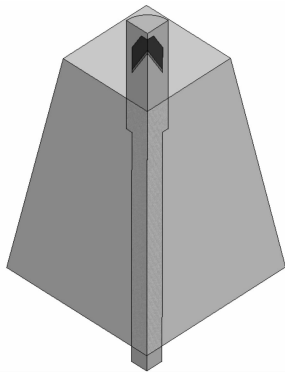


图 2 四分之一有限元模型
Fig. 2 Quarter finite element model

2 聚能装药对轨条砮混凝土基座破坏效应分析

2.1 射流和 EFP 形成及运动特性分析

建立空气、炸药、药型罩有限元模型, 不考虑对混凝土基座的侵彻破坏作用, 仅计算并研究射流和 EFP 在自由域的形成和运动特性。图 3 至图 5 为数值计算得到的三种规格药型罩在装药爆炸作用下形成射流或 EFP 的过程。

如计算结果所示, 60° 药型罩形成射流相对细长, 头部速度相对较大, 在 240 μs 时刻射流头部飞行距离约 96.3 cm, 速度约为 4.5 km/s; 药型罩在爆炸作用下形成射流和杵体两部分, 射流部分在 160 μs 左右断裂, 头部射流呈断续状态, 尾部射流

保持连续状态, 约长 35 cm 至 45 cm; 杵体部分在 240 μs 左右分离成两部分。120° 药型罩形成射流头部速度相对较小, 速度约为 2.3 km/s; 药型罩在爆炸作用下形成射流和杵体两部分, 射流和杵体部分均在 320 μs 左右各自分离成两部分, 头部射流呈断续状态, 尾部射流保持连续状态, 约长 20 cm。曲率半径为 10.8 cm 药型罩在爆炸作用下形成 EFP, 约在 160 μs 时刻炸高 25 cm 处形成稳定的形态, 高约 5.2 cm, 直径约 6.9 cm, 速度约为 1.5 km/s。

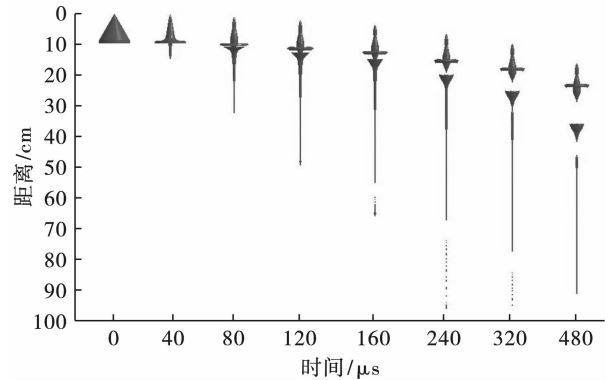


图 3 60° 药型罩金属射流形成过程
Fig. 3 Formation process of metal jet in 60° liner

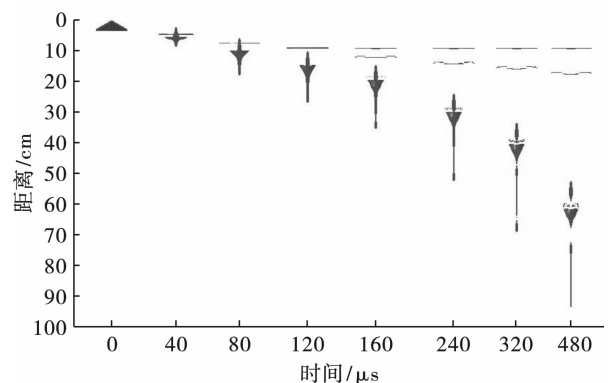


图 4 120° 药型罩金属射流形成过程
Fig. 4 Formation process of metal jet in 120° liner

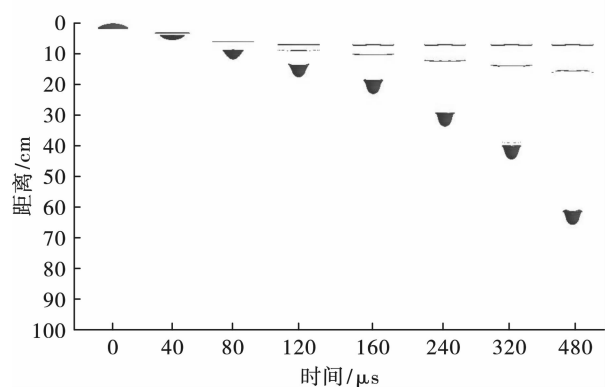


图 5 曲率半径为 10.8 cm 药型罩 EFP 形成过程
Fig. 5 EFP formation process of liner with radius of curvature of 10.8 cm

综上所述,如图6所示,60°和120°药型罩形成射流,均会在炸高20 cm范围内形成射流,且随着射流飞行距离的增加,逐渐形成射流和杵体,并进而再次断裂分离形成两部分射流和两部分杵体。但60°药型罩形成射流比较细长,在230 μs时刻,射流长75.5 cm,射流直径0.4至1 cm,杵体长19.2 cm,直径2.8至5.2 cm,各质点速度分布范围较大,头部射流可保持速度在4.5 km/s,尾部杵体飞行速度则

在0.4 km/s;120°药型罩射流较60°药型罩,射流长度较短,在230 μs时刻,射流长18.9 cm,直径0.4至0.8 cm,杵体长13.1 cm,直径1.6至5.5 cm,个质点速度分布范围较小,头部射流可保持速度在2.3 km/s,尾部杵体飞行速度则在1.4 km/s。曲率半径为10.8 cm药型罩,则形成稳定形态的EFP,高约5.2 cm,直径约6.9 cm,整体速度约为1.5 km/s。

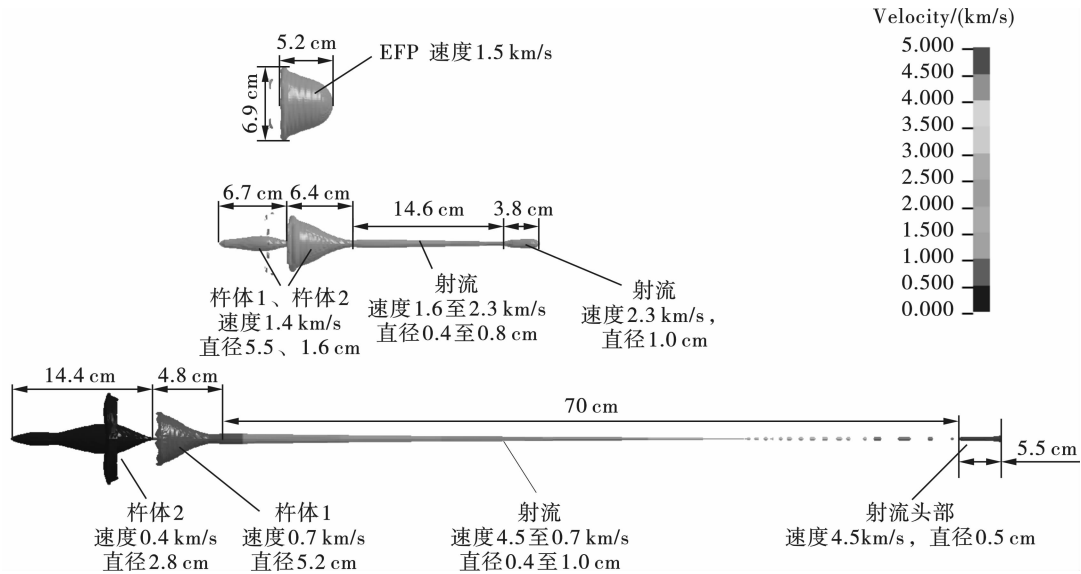


图6 230μs时刻三种规格药型罩形成射流或EFP的物理运动特性

Fig. 6 Physical motion characteristics of jet or EFP by three specifications of liner at 6 230 μs

2.2 射流和EFP侵彻效应分析

用Lagrange网格对混凝土基座进行建模,为提高计算效率,建立1/4模型,射流侵彻部位网格尺寸为0.3 cm,其余部位网格尺寸采用线性比例进行划分,网格尺寸为0.3至2 cm。图7至图9所示为三种规格爆破装置在炸高为20 cm时形成射流或EFP对混凝土基座的侵彻过程。计算结果表明,60°和120°药型罩射流均可以穿透80 cm高度混凝土基座,曲率半径为10.8 cm药型罩EFP对混凝土基座侵彻深度可达36.3 cm。

但不同的是,60°药型罩形成的射流,头部射流首先进行侵彻破坏,可穿透80 cm混凝土基座,形成直径约2.9 cm的孔洞,随后两部分杵体对混凝土基座进行侵彻,可分别形成将孔洞直径扩大到约4.3 cm和11.2 cm;120°药型罩形成的射流,在侵彻混凝土基座的过程中,射流头部速度降低,杵体部分会赶上射流头部,合并在一起继续进行侵彻,最后穿透80 cm混凝土基座,形成直径约5.2 cm的孔洞,杵体尾部会对混凝土基座进行部分侵彻破坏,形成深度较浅、直径约16.3 cm的孔洞开口,如图10(a)、(b)。曲率半径为10.8 cm药型罩形成的

EFP,弹丸冲击侵彻混凝土基座,形成直径约7.0 cm的孔洞,混凝土基座表面形成深度相对较深、直径约17.4 cm的孔洞开口,如图10(c)。

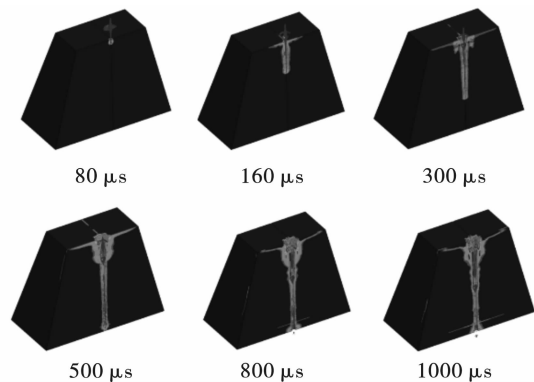


图7 60°药型罩射流侵彻混凝土基座过程

Fig. 7 Penetration process of concrete base by 60° liner jet

综上所述,60°药型罩主要依靠射流对混凝土基座进行侵彻,120°药型罩主要依靠杵体对混凝土基座进行侵彻,曲面药型罩形成EFP对混凝土基座进行侵彻。其中60°药型罩射流侵彻能力最强,但形成侵彻孔直径最小,曲面药型罩形成EFP侵彻能力

最弱, 但形成侵彻孔径最大。

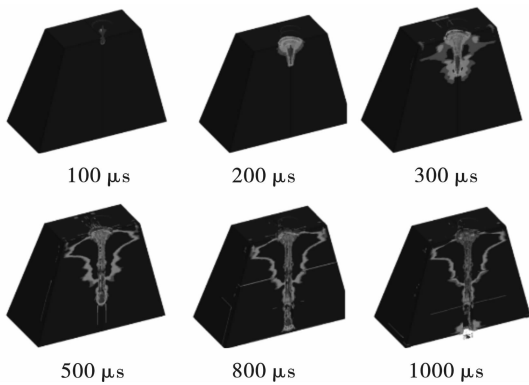


图 8 120°药型罩射流侵彻混凝土基座过程

Fig. 8 Penetration process of concrete base by 120° liner jet

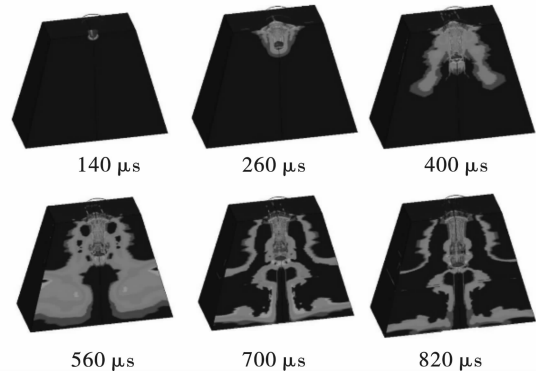


图 9 曲率半径为 10.8 cm 药型罩 EFP 侵彻混凝土基座过程

Fig. 9 Process of EFP penetration into concrete base with radius of curvature of 10.8 cm

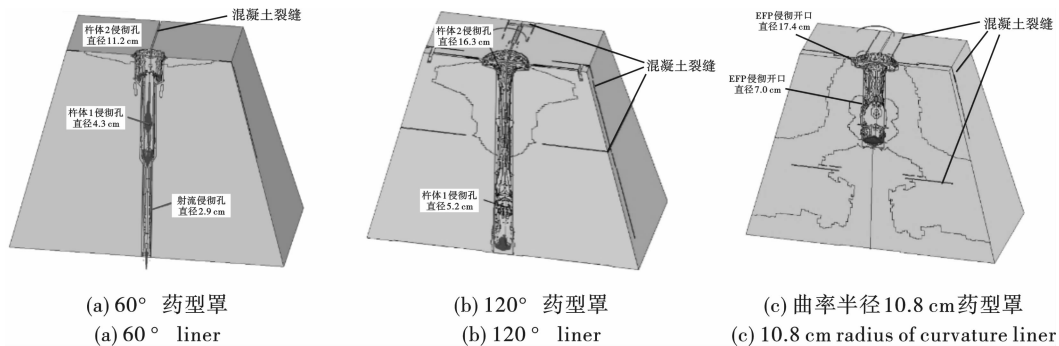


图 10 混凝土基座侵彻结果

Fig. 10 Penetration results of concrete base

2.3 混凝土破碎效应分析

计算混凝土基座侵彻破坏效果所采用的混凝土 RHT 材料模型, 引入了损伤变量 D (Damage Value) 对混凝土的累积损伤效应进行描述, 该变量取值范围为 0 到 1, 0 表示混凝土单元未受到损伤, 1 则表示混凝土单元失效。因此, 损伤变量 D 作为混凝土内部损伤的表征方法, 可以计算混凝土在爆炸冲击作用下产生裂缝的形式。在数值计算过程中, 当混凝土单元达到失效极限时, 损伤变量 D 值为 1; 当混凝土单元达到断裂极限时, 该单元删除。由于划分混凝土的最小网格尺寸为 0.3 cm, 因此计算结果中只有在裂缝宽度大于 0.3 cm 时, 才会删除单元, 裂缝宽度小于 0.3 cm 时, 只能通过损伤变量 D 表示。

图 11 至图 13 所示为三种规格爆破装置射流或 EFP 侵彻混凝土基座裂纹断裂结果。从计算结果看以发现, 三种规格爆破装置射流或 EFP 均在混凝土基座以侵彻孔为中心轴, 大致沿两个垂直对称面, 分别向四条边界方向形成 1 至 3 道宽度大于 0.3 cm 的纵向裂缝。在水平方向上, 60°、120° 和 EFP 药型罩分别在距底面约 10.5 cm、29.9 cm 和 34.2 cm 处形成横向裂缝, 对混凝土基座爆破后的残留高度由横向裂缝的高度决定。

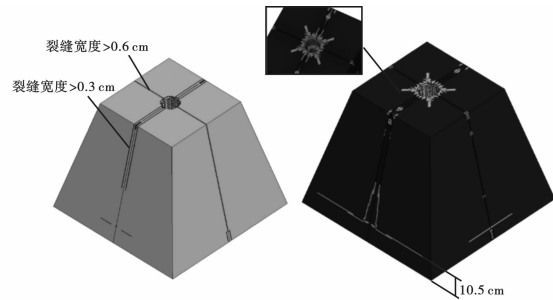


图 11 60°药型罩射流侵彻混凝土基座裂纹断裂结果

Fig. 11 Crack fracture results of 60° liner jet penetrating concrete base

其中, 60°药型罩射流侵彻混凝土基座形成裂缝, 在两个垂直对称面中, 其中一个垂直对称面形成 1 道宽度约 0.6 cm 的纵向裂缝并延伸至底面, 另一个垂直对称面形成 2 道延伸至混凝土基座约一半高度、宽度约 0.3 cm 的纵向裂缝。在距离混凝土基座底面高度 10.5 cm 处形成未贯通的横向裂缝。

120°药型罩射流侵彻混凝土基座形成裂缝, 在两个垂直对称面中, 均形成 4 道以上宽度大于 0.3 cm 的纵向裂缝, 其中一个垂直对称面的纵向裂缝延伸至混凝土基座底部, 另一个垂直对称面纵向裂缝延伸至混凝土基座约一半高度。在距离混凝土

基座底面高度 29.9 cm 处形成未贯通的横向裂缝。

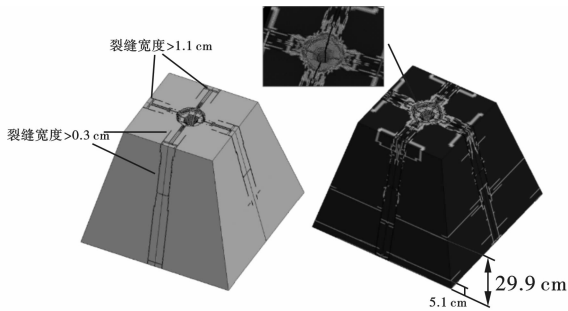


图 12 120°药型罩射流侵彻混凝土基座裂纹断裂结果

Fig. 12 Crack fracture results of 120° liner jet penetrating concrete base

EFP 侵彻混凝土基座形成裂缝,与 60°和 120°药型罩射流形成裂缝不同的是,在距离混凝土基座底面约 34.2 cm 处,形成了宽度大于 0.3 cm 的横向贯通裂缝;在两个垂直对称面中,均形成 4 道以上宽度大于 0.3 cm 的纵向裂缝,纵向裂缝延伸至混凝土基座约一半高度。

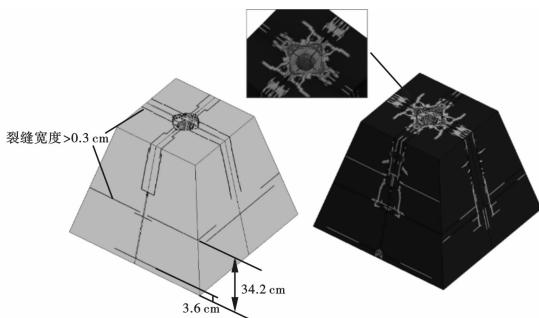


图 13 曲率半径为 10.8 cm 药型罩 EFP 侵彻混凝土基座裂纹断裂结果

Fig. 13 Crack fracture results of EFP liner with radius of curvature of 10.8 cm penetrating concrete base

综上所述,60°药型罩形成射流侵彻能力最强,形成横向裂缝位置最低,但是对混凝土基座的破碎能力最弱,横向裂缝未贯穿整个水平面;120°药型罩形成射流侵彻能力相对较弱,但对混凝土基座的破碎能力较强,形成纵向裂缝数量和宽度均优于 60°药型罩射流;EFP 药型罩虽然侵彻能力最弱,但在侵彻深度范围内的破碎能力最强,可在距离混凝土基座底面 34.2 cm 处形成宽度大于 0.3 cm 的横向贯穿裂缝。

采用 112 mm 直径 105°药型罩聚能装药和 112 mm 直径 115.4 mm 曲率半径 EFP 药型罩聚能装药设置在混凝土基座上方中央爆炸,用高速摄影拍摄裂纹见图 14, EFP 装药设置及毁伤效果见图 15,直径 80 mm 的小锥角药型罩聚能装药设置及效

果见图 16。结合数值模拟结果可以看出,不同形状的射流或弹丸对混凝土基座的侵彻破碎机理也不相同。金属射流侵彻混凝土基座时,随侵彻点高速向下移动并形成系列应力波源,可以看成由中心线向四周传播的倒圆台状应力波,当径向压缩产生的切向拉应力超过混凝土动态抗拉强度时形成裂隙。基座内应力波向下传递到底面与土壤交接面时的反射波拉伸作用形成靠近底面的横向裂纹。EFP 冲击侵彻较浅,可看作由冲击点向外传播的球面波,混凝土被压缩的变形能释放引起的卸载波拉伸形成基座贯通的横向裂纹。实际中聚能装药对混凝土基座的破碎是侵彻和爆生气体的复合作用,爆生气体对裂隙进一步扩展从而加大破碎程度。因此,混凝土基座的残留高度与侵彻体参数、作用方式和装药量等多个因素相关。如图 16 中,外径和装药量较小的聚能装药爆炸,虽然将混凝土基座破成四大块,但残留高度基本没有减小。

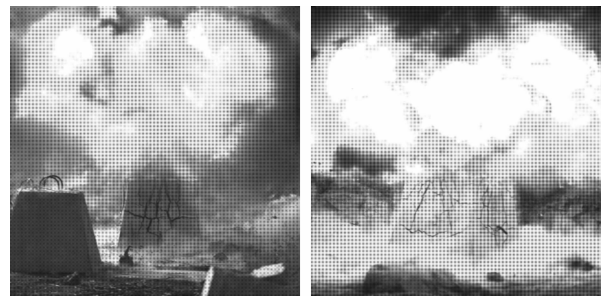


图 14 直径 112 mm 锥角 105°装药和直径 112 mm 曲率半径 115.4 mm 的 EFP 装药毁伤裂纹

Fig. 14 Damage crack of shaped charge and EFP charge



图 15 直径 112 mm 曲率半径 115.4 mm 的 EFP 装药设置及效果

Fig. 15 EFP charge setting and effect with 112 mm diameter and 115.4 mm radius of curvature



图 16 直径 80 mm 小锥角的聚能装药设置及效果

Fig. 16 Setting and effect of shaped charge with small cone angle and 80 mm diameter

3 结论

通过采用 JC 模型和 RHT 模型分别模拟紫铜药型罩和混凝土基座,对射流和 EFP 垂直侵彻混凝土基座特性进行了数值计算分析,得到结论如下:

(1)射流和 EFP 对混凝土基座的侵彻方式不同。60°药型罩的头部射流先侵彻混凝土基座,随后杵体对孔洞进行扩大,120°药型罩的杵体与射流合并侵彻混凝土基座,而曲面药型罩主要依靠成型弹丸对混凝土基座进行冲击侵彻。

(2)混凝土基座的破碎能力与侵彻孔直径相关,孔径越大、能力越强。60°、120°和 EFP 药型罩侵彻孔直径分别为 4.3 cm、5.2 cm 和 7.0 cm,在侵彻深度范围内形成的裂缝数量、宽度呈现增大趋势。

(3)对有限尺寸的混凝土基座,大锥角药型罩的聚能装药破碎范围和程度的综合效果较佳。EFP 药型罩虽然侵彻能力最弱,爆破作用后混凝土残留高度较大,但在侵彻深度范围内的破碎能力最强。

参考文献 (References)

- [1] 高源,王树山,梁振刚,等. 破障火箭弹终点毁伤效能评估研究[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(12): 87-91.
- [1] GAO Yuan, WANG Shu-shan, LIANG Zhen-gang, et al. Evaluation of terminal damage effectiveness of concrete-piercing rocket projectile [J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(12): 87-91. (in Chinese)
- [2] 荆东旭. 聚能爆破技术在岩巷掘进中的应用[J]. 工程技术研究, 2020, 5(19): 16-17.
- [2] JING Dong-xu. Application of shaped charge blasting technology in rock roadway excavation [J]. Engineering and Technological Research, 2020, 5(19): 16-17. (in Chinese)
- [3] 张利. 聚能战斗部对混凝土靶的开坑效应及影响规律研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(4): 134-140.
- [3] ZHANG Li. Study on crater effect and influence law of shaped charge warhead on concrete target [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(4): 134-140. (in Chinese)
- [4] 任思远,张庆明,张晓伟,等. 环形射流和中心爆炸成型弹丸组合战斗部对混凝土墙的破孔特性[J]. 兵工学报, 2021, 42(8): 1569-1578.
- [4] REN Si-yuan, ZHANG Qing-ming, ZHANG Xiao-wei, et al. On the perforation characteristics of concrete wall induced by annular jet and central EFP combined warhead [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(8): 1569-1578. (in Chinese)
- [5] 曾虎,袁端才,崔伟峰,等. 聚能爆破开孔弹岩石毁伤效能研究[J]. 采矿技术, 2020, 20(4): 163-165.
- [5] ZENG Hu, YUAN Duan-cai, CUI Wei-feng, et al. Study on rock damage efficiency of shaped charge blasting open hole projectile [J]. Mining Technology, 2020, 20(4): 163-165. (in Chinese)
- [6] 徐浩. 超高速金属射流侵彻高强混凝土靶 ALE 仿真 [D]. 西安:西安石油大学, 2021.
- [6] XU Hao. ALE simulation of ultra-high speed metal jet penetration into high strength concrete target [D]. Xi'an: Xi'an Shiyu University, 2021. (in Chinese)
- [7] 王伟,徐琳,王玥兮,等. 准球形 EFP 成形因素的正交优化设计与试验验证[J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43(5): 22-25.
- [7] WANG Wei, XU Lin, WANG Yue-xi, et al. Orthogonal optimization design and experimental study on formation process of quasi-spherical explosively formed projectile [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2020, 43(5): 22-25. (in Chinese)
- [8] XU Wen-long, WANG Cheng, YUAN Jian-ming, et al. Penetration of a hypervelocity shaped charge into layered and spaced concrete targets [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42(2): 431-438.
- [9] XIAO Qiang-qiang, HUANG Zheng-xiang, ZU Xu-dong, et al. Shaped charge penetration into high- and ultrahigh-strength Steel Fiber reactive powder concrete targets [J]. Defence Technology, 2020(16): 217-224.
- [10] 朱少平,王志亮,熊峰. 卵形弹丸对混凝土侵彻动力响应数值研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(2): 243-250.
- [10] ZHU Shao-ping, WANG Zhi-liang, XIONG Feng. Numerical study on dynamic response of concrete penetration by ogive-nose projectile [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2022, 45(2): 243-250. (in Chinese)