

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2024.03.007

炸高对线性聚能装药射流毁伤混凝土墙体效果的影响*

陈思羽^{①②} 黄正祥^②

①国防科技大学理学院(湖南长沙,410073)

②南京理工大学机械工程学院(江苏南京,210094)

[摘要] 采用一种新型线性聚能装药结构,研究了不同炸高时线性聚能装药射流对混凝土墙体的毁伤效应。数值模拟发现,药型罩锥角为 80° 与 50° 时,能较好地避免拉断现象。得到了线性聚能装药结构的射流头部速度、侵彻深度随炸高的变化规律。炸高为60 mm时,最佳侵彻深度达130.6 mm。对炸高为60 mm与100 mm时的线性聚能装药进行试验研究。结果表明,炸高100 mm时,侵彻深度达到125.0 mm,与仿真结果吻合较好。验证了该线性聚能装药结构对混凝土墙体的毁伤效果较好。可为线性聚能装药结构的设计与试验研究提供参考。

[关键词] 混凝土墙体;线性聚能装药;拉断现象;药型罩锥角;炸高

[分类号] TJ410.3

Influence of Stand-Off on the Damage of Linear Shaped Charge Jet on Concrete Walls

CHEN Siyu^{①②}, HUANG Zhengxiang^②

①School of Science, National University of Defense Technology (Hu'nan Changsha, 410073)

②School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] A new type of linear shaped charge structure was adopted to study the influence of stand-off on the damage of linear shaped charge jet on concrete walls. In numerical simulations, it has found that when the cone angles of the shaped charge are 80° and 50° , it can effectively avoid the phenomenon of pulling and breaking. The variation law of jet head velocity and penetration depth with stand-off for linear shaped charge structure was obtained. The optimal penetration depth reaches 130.6 mm when the stand-off is 60 mm. Experimental study was conducted on linear shaped charge with stand-off of 60 mm and 100 mm. The results show that when the stand-off is 100 mm, the penetration depth reaches 125.0 mm, which is in good agreement with the simulation results. The linear shaped charge structure has been verified to have a good destructive effect on concrete walls. It can provide reference for the design and experimental research of linear shaped charge structures.

[KEYWORDS] concrete wall; linear shaped charge; pull-off phenomenon; cone angle of liner; stand-off

0 引言

混凝土墙体在现代工程建设中具有非常广泛的应用,利用线性聚能射流侵彻混凝土墙体,能在迅速打破障碍物的同时减少附带伤害。

线性聚能装药理论是基于锥形聚能装药理论而发展和扩充的。曾吾新等^[1]建立了三维线性聚能射

流成型的准定常理论模型。Feng等^[2]采用SPH法研究线性聚能射流对钢靶板的毁伤效应,证明了该模型的有效性。王峰等^[3]采用ALE法对线性聚能装药侵彻钢靶进行数值模拟,发现锥角 80° 的线性聚能装药具有较好的切割性能。王克波等^[4]对线性聚能装药侵彻钢板的性能进行了数值模拟,对装药结构多次正交优化,避免了射流成型出现拉断现象。崔云航等^[5]对影响线性聚能装药侵彻能力的主要

* 收稿日期:2023-05-30

第一作者:陈思羽(2000—),女,硕士研究生,主要从事爆炸力学的研究。E-mail:2233188591@njust.edu.cn

通信作者:黄正祥(1967—),男,教授,博导,主要从事爆炸力学的研究。E-mail:huangyu@mail.njust.edu.cn

影响因素进行分析,得到了侵彻能力随炸高、装药形状、药型罩等因素的变化规律。陈沛^[6]对炸高、炸药高度、药型罩锥角、壁厚等影响线性聚能装药形成射流侵彻钢板的因素进行研究,从中得到最佳工艺参数。陈宁等^[7]对以膨化硝酸铵炸药为主的线性聚能装药射流侵彻钢材靶板的特点和规律进行研究,得到线性聚能装药最优结构参数:炸高 40 mm,药型罩锥角 80°,药型罩厚度 1.0 mm。徐文龙等^[8]对锥角药型罩截顶,解决了传统直锥角杆式线性聚能装药能量利用率低、速度小等缺点。Cheng 等^[9]设计了一种线性聚能装药结构,通过数值模拟研究了药型罩壁厚、炸药类型与炸高等因素对双锥角线性聚能装药侵彻性能的影响。Bohanek 等^[10]通过试验测定了炸药质量、药型罩材料和炸高对线性聚能装药侵彻深度的影响,给出了不同炸高下的特征切口与最佳炸高对应的侵彻深度。张斐等^[11]设计了一款截顶超聚能装药结构,通过仿真模拟得到超聚能射流的成型特点、不同炸高下药型罩射流对混凝土靶板的侵彻规律。

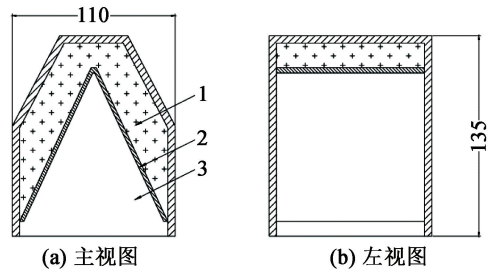
在线性聚能射流侵彻靶板的基础上,设计了一种新型线性聚能装药结构,适当避免线性聚能射流成型过程中的拉断现象。采用 50°、80° 2 种不同的药型罩锥角,分别对侵彻混凝土靶进行数值模拟,得到对混凝土靶毁伤效应较好的新型线性聚能装药结构参数。比较数值模拟与试验结果,得出不同炸高下线性聚能装药结构射流成型以及对混凝土靶的侵彻规律。

1 数值模拟

为构建线性聚能装药的几何模型,作出如下假设:炸药、药型罩、混凝土靶均为均匀连续介质;整个侵彻过程为绝热过程;装药结构为严格的对称结构;采用点起爆方式。

经典的线性聚能装药结构在射流成型过程中易发生拉断现象。主要原因是,药型罩壁厚在母线方向的微元质量不变,而炸药微元的质量变化很大,导致药型罩微元质量的速度梯度过大。为改变射流的成型状态,对线性聚能装药结构进行优化。保持装药结构的基本尺寸(长、宽、高)不变,为适当减少炸药微元梯度的变化,采取炸药微元质量变化较小的新型线性聚能装药结构,如图 1 所示。

适当减少速度梯度,确保炸药质量纵向分布较为均匀,以此来减少聚能射流拉断现象。同时,还可以适当地减少装药量,提高炸药利用率。



1 - 炸药;2 - 药型罩;3 - 空气。

图 1 装药结构示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of charging structure (Unit: mm)

对新型线性聚能射流成型与侵彻混凝土过程进行数值模拟,几何模型如图 2 所示。



图 2 几何模型

Fig. 2 Geometric model

表 1 为线性聚能装药各模块选用的材料模型和状态方程。参考经典线性聚能装药结构,采用 cm-g- μ s 单位制;空气、炸药、药型罩采用 ALE 算法,采取共节点法;建立 1/4 模型;选择 Solid164 网格单元,中央网格采用 0.5 mm 宽度,通过过度网格划分,逐步采用 2.0、2.5 mm 的网格划分。

表 1 材料模型及状态方程

Tab. 1 Material models and state equations

材料	材料模型	状态方程
B 炸药	JWL	High_Explosive_Burn
紫铜药型罩	Gruneisen	Johnson_Cook
混凝土靶	H-J-C	RHT
空气	Linear_Polynomial	Null

2 仿真结果分析

2.1 线性聚能装药结构参数设计

设计药型罩的厚度为 2.5 mm,装药长度为 100 mm,宽度为 100 mm,高度为 120 mm。由正交优化法得出,药型罩锥角对线性聚能射流侵彻混凝土靶毁伤的影响最大;仿真计算得出,药型罩锥角为 80° 时达到最佳侵彻深度;试验得出,50° 锥角时的实际毁伤效果较好。故对 50° 与 80° 锥角的聚能射流成型进行数值模拟。

图 3 ~ 图 4 分别展示了不同锥角时紫铜药型罩在 B 炸药作用下形成射流的具体过程。新型线性聚能装药射流成型持续时间更长,较经典线性聚能

装药射流成型,更不易出现拉断现象,如图5所示。

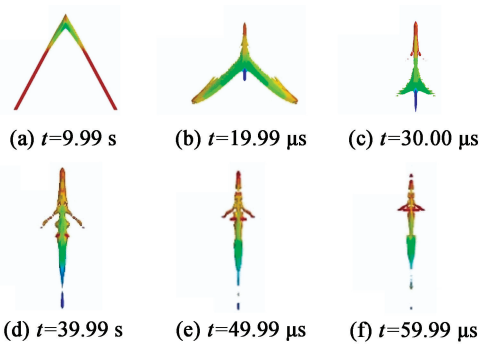


图3 锥角80°时的射流成型

Fig. 3 Jet forming with a cone angle of 80°

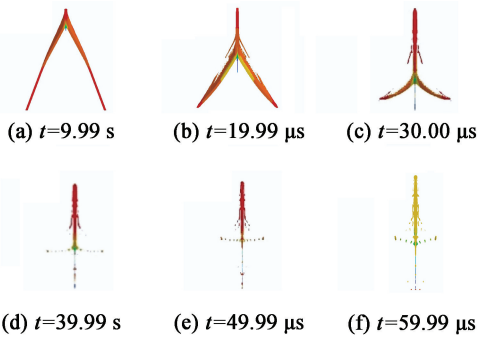


图4 锥角50°时的射流成型

Fig. 4 Jet forming with a cone angle of 50°

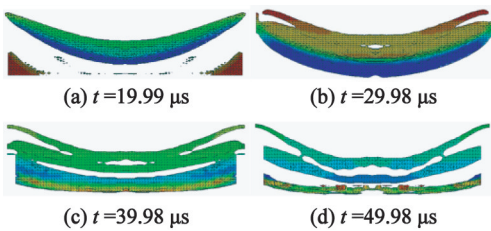


图5 经典线性聚能装药的射流成型

Fig. 5 Jet forming of classical structure

线性聚能装药结构中,锥角越大,药型罩的罩高越小。即药型罩的顶部材料较厚,有可能使对应的炸药微元处于抛散状态^[4],速度梯度较低,导致射流拉断,故锥角50°时的射流成型更好。

2.2 炸高对线性聚能射流侵彻混凝土的影响

线性聚能装药起爆时,不同的炸高对射流成型形态会产生一定的影响。炸高较小时,射流速度还未达到最大便开始侵彻混凝土靶;炸高太大时,又易出现拉断、射流速度梯度过大等问题。根据前人经验,选取炸高0~100 mm进行仿真模拟。为研究高炸高的影响,选取炸高150、160 mm进一步对比。

图6为不同炸高时射流头部速度的变化曲线。由图6可知:

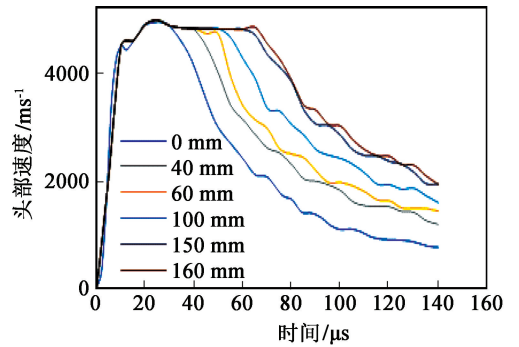


图6 射流头部速度的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of velocity of jet head

1) 在爆轰后短时间内,射流头部速度均迅速增大,再缓慢增长至最大5 244 m/s,侵彻混凝土靶的瞬间,头部速度大范围降低,符合射流成型规律。

2) 炸高为0 mm时,射流头部最大速度仅为5 200 m/s,炸药爆轰还未结束,便开始侵彻混凝土靶,对侵彻混凝土靶会产生一定影响。

3) 炸高越大,射流在空气域运行的时间越长,射流头部速度前期会略有降低,但仍维持在4 950~5 100 m/s之间。

4) 随着炸高增至150、160 mm后,射流在空气域传播过程中损失能量,在后期头部速度减小幅度增大,降低至4 800 m/s左右。

由图7中不同炸高时射流侵彻混凝土靶的深度可知,聚能射流侵彻混凝土墙体的深度随炸高的增加呈先增大而后减小的趋势,且在炸高为60 mm时,达到最大侵彻深度。

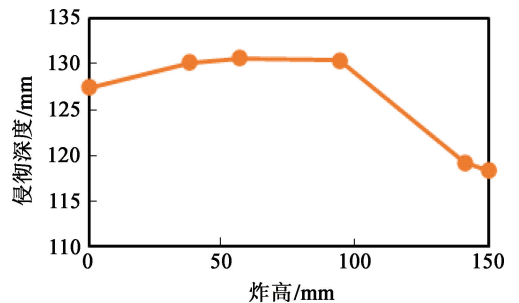


图7 侵彻深度-炸高变化曲线

Fig. 7 Variation curve of penetration depth-stand-off

图8反映了炸高为60 mm时射流侵彻混凝土靶的形态。在44.99 μs时,射流头部开始侵彻混凝土靶,射流在靶中建立起稳定的三高区;随着继续侵彻,碰撞压力较小,射流的能量分布变化缓慢,混凝土靶孔径和切口大小相对比较均匀,相同时间间隔内,射流侵彻深度增大;侵彻后期,射流尾部开始侵彻混凝土靶,随着射流能量的衰减,侵彻会持续一段

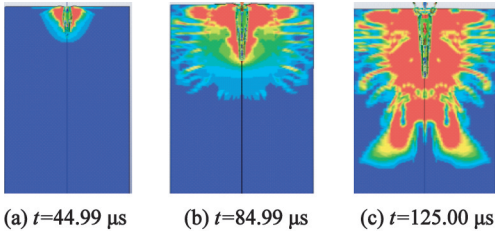


图 8 炸高 60 mm 时混凝土靶的应力云图
Fig. 8 Stress cloud map of concrete target at a stand-off of 60 mm

时间继续扩展,同时方向上能保持稳定;混凝土靶的最终侵彻深度为130.6 mm。

如图 9 所示,堆积、扩壶与拉断现象会影响线性聚能射流对混凝土靶的侵彻效应。相比经典的线性聚能装药结构,新型聚能装药结构在射流成型与侵彻混凝土靶方面效果较优。

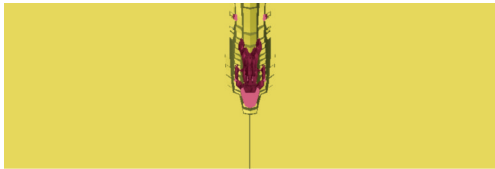


图 9 射流头部堆积现象

Fig. 9 Accumulation phenomenon at the jet head

3 试验与结果

3.1 试验布置

通过数值仿真分析可得,炸高 60 mm 时,射流侵彻混凝土靶的深度达到最大,但与炸高 100 mm 时的结果相差不大。故进行炸高 60 mm 与 100 mm 下侵彻混凝土墙体的近爆威力试验。侵彻试验中使用的线性聚能装药结构与 2.2 小节一致:药型罩锥角 50°,壁厚 2.5 mm,罩顶高 103.5 mm,顶部尺寸 40 mm。试验布置如图 10 所示。



图 10 试验现场
Fig. 10 Test site

3.2 毁伤试验结果及规律分析

试验过程中,混凝土靶受到射流切割时,起爆点最先受力,然后朝径向深度扩展,最终混凝土以块状

飞溅而出,形成切割坑。具体毁伤结果见图 11。

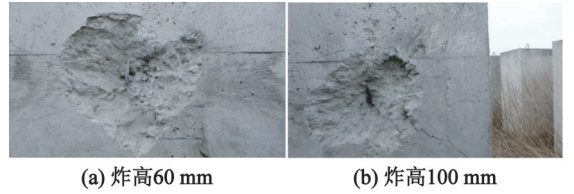


图 11 毁伤结果
Fig. 11 Damage results

对图 11 中混凝土靶漏斗坑地的尺寸以及侵彻深度进行统计,结果见表 2。

表 2 毁伤情况

Tab. 2 Damage records

炸高	mm	
	侵彻深度	
	试验	仿真
60	101.2	130.6
100	125.0	130.4

对比试验结果与数值模拟计算结果可知,炸高为 100 mm 时,新型线性聚能射流侵彻混凝土的侵彻深度吻合较好,误差仅为 4.16%;但炸高为 60 mm 时,聚能射流对混凝土靶的侵彻深度存在一定误差。

钢筋的作用是承受拉力,防止混凝土破坏和开裂。材料性能直接决定钢筋混凝土结构的最终强度与性能。在试验过程中,混凝土墙内部的钢筋增强了靶体的强度,对试验结果产生一定的影响。

为确保混凝土靶在数值模拟中所使用的材料参数具有准确性,通过查阅大量与混凝土靶相关的数值模拟与试验,选取前人大量使用的材料参数,故仿真采用混凝土材料参数与实际性能基本一致。混凝土靶选用 H-J-C 材料模型^[12],具体材料参数如表 3 所示。

国内外关于线性聚能装药侵彻混凝土墙体的研

表 3 混凝土靶的材料参数

Tab. 3 Material parameters of concrete target

$\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$G/$ GPa	$f_c/$ MPa	$T/$ MPa	$f_s/$ MPa
2.36	11.25	30	3.396	-1
$p_c/$ MPa	$p_l/$ MPa	$K_1/$ GPa	$K_2/$ GPa	$K_3/$ GPa
10	800	85	-171	208
A	B	C	μ_1	μ_c
0.79	1.60	0.007	0.1	0.001
D_1	D_2	ε_{\min}	S_{\max}	N
0.035 7	1	0.01	7	0.61

究大多以数值仿真为多,试验研究参考经验较少,加工工艺处于摸索阶段。数值模拟中,采用理想的加工工艺,炸高在60~100 mm变化时,对应的侵彻深度变化不超过5 mm,符合所得规律。试验中,与数值模拟相比,炸高100 mm时的侵彻深度误差不超过10%。可为后续线性聚能射流侵彻混凝土靶试验提供一定的参考。

4 结论

为研究不同炸高对线性聚能装药射流毁伤混凝土墙体效果的影响,设计了一款新型线性聚能装药结构。结合仿真结果与试验研究,得到如下结论:

1) 新型线性聚能装药结构可以较好地避免射流成型过程中的拉断现象,且药型罩锥角为50°时的射流成型形态更优,确定了模型的几何结构参数。

2) 在爆轰瞬间,射流头部速度迅速增大至最大5 244 m/s;随着炸高的增大,头部速度呈现先小幅度降速、侵彻混凝土靶后迅速降低的规律。

3) 低炸高有利于药型罩锥顶部形成高速射流,故线性聚能射流侵彻混凝土靶在炸高60 mm达到最大侵彻深度;高炸高时,射流在空气域传播过程中损失能量,头部速度减小,侵彻深度略小。

4) 炸高100 mm时,线性聚能射流侵彻混凝土靶的数值模拟与试验结果吻合程度较好。验证了新型结构对混凝土墙体具有较好的毁伤效应。对新型线性聚能装药结构的设计与发展提供一定的依据。

参考文献

[1] 曾新吾,薛鸿陆. 线型聚能装药的理论研究[J]. 爆炸与冲击, 1988, 8(2): 97-105.

ZENG X W, XUE H L. A theoretical study on linear shaped charge [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1988, 8(2): 97-105.

[2] FENG D L, LIU M B, LI H Q, et al. Smoothed particle hydrodynamics modeling of linear shaped charge with jet formation and penetration effects [J]. *Computers & Fluids*, 2013, 86: 77-85.

[3] 王峰,李必红,王喜,等. 药型罩锥角对线性聚能装药切割性能的影响[J]. 火工品, 2019(3): 22-25.

WANG F, LI B H, WANG X, et al. Effect of the cone angle of the liner on the cutting performance of linear shaped charge [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2019(3):

22-25.

[4] 王克波,郑宇. 线性聚能装药结构的数值仿真优化[J]. 爆破, 2012, 29(2): 99-103.

WANG K B, ZHENG Y. Numerical simulation and optimization of the liner shaped charging structure [J]. *Blasting*, 2012, 29(2): 99-103.

[5] 崔云航,李裕春,吴腾芳,等. 线型聚能装药数值模拟与优化设计[J]. 爆破, 2005, 22(3): 26-29.

CUI Y H, LI Y C, WU T F, et al. Numerical simulation and optimization design of linear shaped charge [J]. *Blasting*, 2005, 22(3): 26-29.

[6] 陈沛. 膨化硝酸铵炸药线性聚能装药切割深度的影响因素研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2019.

CHEN P. The study on the influencing factors of penetration depth of expanded AN explosive linear charge [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2019.

[7] 陈宁,段卫东,陈沛,等. 线性聚能装药侵彻深度的影响因素[J]. 工程爆破, 2021, 27(4): 100-106.

CHEN N, DUAN W D, CHEN P, et al. Influence factors of penetration depth of linear shaped charge [J]. *Engineering Blasting*, 2021, 27(4): 100-106.

[8] 徐文龙,王成,徐斌,等. 新型聚能装药爆炸成型杆式射流数值模拟及试验研究[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(6): 579-583, 589.

XU W L, WANG C, XU B, et al. Numerical simulation and experimental investigation on new type jetting projectile charge [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2017, 37(6): 579-583, 589.

[9] CHENG X, HUANG G Y, LIU C M, et al. Design of a novel linear shaped charge and factors influencing its penetration performance [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(10): 1863.

[10] BOHANEK V, DOBRILOVIC M, SKRLEC V. The efficiency of linear shaped charges [J]. *Tehnicki Vjesnik*, 2014, 21(3): 525-531.

[11] 张斐,周春桂,张春辉,等. 超聚能射流成型及侵彻混凝土的数值模拟研究[J]. 火工品, 2018(5): 16-20.

ZHANG F, ZHOU C G, ZHANG C H, et al. Numerical simulation of hypercumulation jet formation and penetration into concrete [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2018(5): 16-20.

[12] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R. A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2011, 78(5): 051003.