

文章编号: 1001-4888(2011)02-0158-06

约束状态下聚能杆流对混凝土作用的实验研究^{*}

潘绪超, 何勇, 张先锋, 何源, 赵晓宁

(南京理工大学 机械工程学院智能弹药国防重点实验室, 江苏南京 210094)

摘要: 聚能杆流是多级串联战斗部次级装药的常用聚能侵彻体。基于两种典型的聚能装药结构, 设计加工了有不同直径和深度预约束孔的 C35 混凝土靶板, 开展了 $\Phi 60\text{mm}$ 亚半球和 K 装药在不同约束状态侵彻毁伤混凝土对比实验研究。结果表明, 两种聚能杆流都可在混凝土孔约束状态下形成大且深的侵彻孔; 随约束孔径增大, 侵彻深度先减小而后增加; 随约束孔深增加, 侵彻深度增加, K 装药侵彻深度更大; 但与空气对比, 亚半球装药侵彻深度受约束影响较大, K 装药则变化较小, 比较稳定。实验结果为多级串联战斗部次级装药结构的选择提供了依据。

关键词: 爆炸力学; 聚能装药; 聚能杆流; 侵彻; 串联战斗部

中图分类号: V435

文献标识码: A

0 引言

防护系统的堡垒化和地下化, 对常规钻地武器提出了更高的要求。怎样打击这种堡垒化和地下化的防护系统已成为当今世界常规武器界研究的重要课题。由聚能装药和动能侵彻体组成的多级串联战斗部是钻地武器的发展趋势之一, 也是比较有效的反深层目标武器系统之一。多级串联战斗部前级要求对混凝土的侵彻要大穿深和大孔径以满足后级聚能装药或者动能侵彻体的有利侵彻要求。这就产生了两种情况, 后级动能侵彻体或者聚能杆式射流对前级聚能射流侵彻形成的混凝土空腔的侵彻作用。国内外学者对动能侵彻体对前级射流形成的混凝土空腔的侵彻作用及相关原理进行了大量的研究^[1-6], 但聚能杆式射流对前级射流形成的混凝土空腔作用的相关原理的研究报道很少。与动能侵彻体相比, 聚能杆式侵彻体与前级聚能射流形成的空腔相对位置相关。

基于此, 本文对聚能装药在前级聚能射流形成的侵彻孔约束下的作用特点进行了实验研究。多级串联战斗部次级要求形成大穿深和孔径, 据此首先设计加工了 $\Phi 60\text{mm}$ 的亚半球装药和 K 装药^[7-9] 两种可形成聚能杆式射流的聚能装药结构, 并设计加工带有不同直径和深度的模拟前级射流侵彻形成的预约束孔的 C35 混凝土靶板。通过固定炸高, 改变不同的预约束孔深度和直径, 来测试其在混凝土孔中的头部速度及对混凝土靶的侵彻深度和孔径; 并通过对比相同装药结构在无约束空气中对混凝土靶板的作用情况, 以期得到约束孔的孔径、深度对聚能杆流的影响, 为多级串联战斗部次级装药结构设计以及整体结构设计提供一定的指导。

1 实验方案

1.1 装药结构

多级串联战斗部次级聚能装药侵彻目标时, 既要保证形成一定的穿深, 又要保证形成一定的孔径来

^{*} 收稿日期: 2010-08-03; 修订日期: 2010-09-19

基金项目: 国家部委基金 62301060301

通讯作者: 潘绪超(1982-), 男, 博士生, 主要研究方向为战斗部终点效应, 火箭发动机技术及其应用等。E-mail: pxchxc@yahoo.com.cn

保证后续随子弹顺利跟进。一般聚能射流都采用小锥角装药结构,形成的射流头部速度高达 $8000 \sim 10000 \text{ m/s}$,但占大部分质量的杆体速度却很低。为了满足要求,设计了无隔板亚半球^[7](Hemispherical liner charge, HLC)和有隔板K装药^[8](K charge, KC)两种结构,如图1。

在预制混凝土孔中难以进行脉冲X光照相,按照空气作用情况对聚能装药进行设计,并按照设计的装药尺寸,采用二维数值模拟方法对两种聚能杆流的成型过程进行数值模拟计算,得到成型后的聚能杆式射流如图2。模拟结果显示,设计的装药结构在空气中能形成长径比较大、质量分布较为均匀的连续杆式射流,能满足大深孔的侵彻要求。

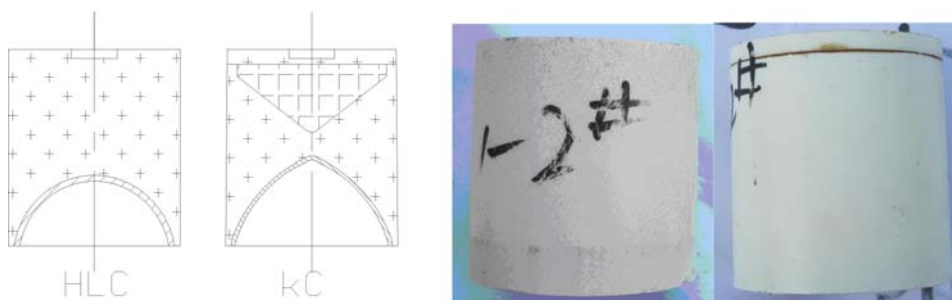


图1 亚半球(HLC)和K装药(KC)结构图

Fig.1 Structure of HLC and KC

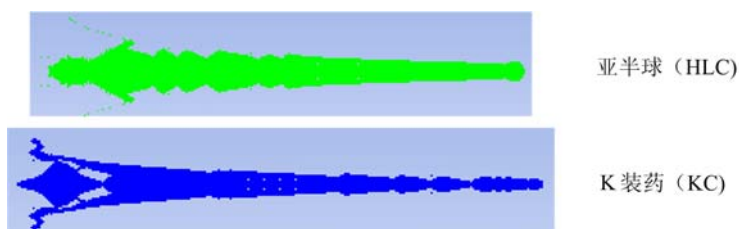


图2 两种装药结构在150mm炸高成型仿真图

Fig.2 Simulation results of the charge under the standoff of 150mm

两种装药口径 D 皆为 60 mm ,长径比为 $1:1$ 。亚半球装药由药形罩、主装药、起爆药柱和雷管组成。药形罩采用变壁厚,顶厚 $0.043D \sim 0.047D$,口部厚度 $0.033D \sim 0.034D$,高度 $0.410D \sim 0.420D$,材料为T2军用紫铜;主装药采用8701,压装,密度为 1.70 g/cm^3 。K装药带有聚氨酯材料隔板,药形罩采用弧锥结合的形式,顶厚 $0.025D \sim 0.027D$,口部厚度为 $0.016D \sim 0.017D$,高度为 $0.495D \sim 0.505D$;药形罩和主装药材料与亚半球装药相同,副装药也采用8701,密度与主装药相同。聚能药柱采用端面点起爆方式。

1.2 实验布局与测试系统

实验布局如图3,圆柱形混凝土靶委托工厂按国军标准进行浇注,在标准温度和湿度条件下养护。在养护期28天后,对混凝土靶体强度进行测量,达到C35强度标准。靶体的结构尺寸按照 $\Phi 600 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 进行加工。为尽量减小靶体尺寸的影响,在靶体周围布置 5 mm 厚的钢箍。其中分别预制四种尺寸 $\Phi 65 \times 300 \text{ mm}$ 、 $\Phi 80 \times 300 \text{ mm}$ 、 $\Phi 65 \times 400 \text{ mm}$ 、 $\Phi 80 \times 400 \text{ mm}$ 圆柱约束孔,并在孔底两侧分别对称开置 $\Phi 4 \text{ mm}$ 侧孔(如图3),用以引出测试系统导线。

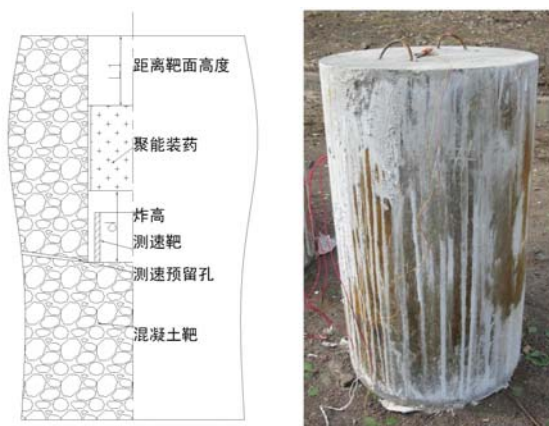


图3 预制孔中聚能装药作用实验布局图

Fig.3 Layout of the experiment

实验采用固定炸高(150mm)。约束混凝土孔中聚能装药作用时,通过测速靶对杆式射流头部速度进行测量。在孔底部放置高度为 100mm 的 PVC 管,管的顶部和底部分别放置导通靶纸,靶网由两层锡箔纸中间安放绝缘纸,导线由侧面 $\Phi 4\text{mm}$ 细孔引出到计时仪器上,计时仪精度为 10^{-7}s 。形成的金属杆式杆流通过时,将使测速靶导通产生电信号,由导线将信号传输到计时仪上,通过计时仪记录通过 PVC 管高度(100mm)所需时间,杆式侵彻体头部速度为测试靶距和测试时间的比值。对两种不同的靶面距离和预制孔直径进行了实验。

为了对比两种装药有无约束作用情况,按照相同装药,相同炸高,在无约束空气中对无预制孔 C35 混凝土靶板进行侵彻实验。实验相关的测试按照约束孔中相同条件进行。

2 实验结果与分析

2.1 不同约束孔径下的实验结果

表 1 不同的约束孔径下实验结果

Tab. 1 Results of experiment under different diameter of the constraint hole

实验号	弹重 (g)	炸高 (mm)	约束孔径 (mm)	约束孔深 (mm)	头部速度 (m/s)	侵深 (mm)	侵彻孔径 (mm)	平均孔径 (mm)
亚半球	1	224	1.5 D_0	无约束	0	4100~4200	6.22 D_0	21~38
	2	224	1.5 D_0	65	300	4000~4100	6.0 D_0	18~36
	3	225	1.5 D_0	80	300	3900~4000	5.67 D_0	16~36
K 装药	4	207	1.5 D_0	0	0	5600~5700	10.8 D_0	18~32
	5	207	1.5 D_0	65	300	5400~5500	10.6 D_0	15~33
	6	207	1.5 D_0	80	300	5100~5200	8.33 D_0	20.5~34

* 数值由不同的侵彻深度下直径平均值获得。

为了考察不同约束孔径对侵彻结果的影响,对约束孔径为 0mm、65mm、80mm 三种情况下两种聚能装药对混凝土靶板的侵彻情况进行了实验,实验结果如表 1 所示。其中预制孔孔径为 0mm 即为聚能装药在无约束空气中的作用情况。射流头部速度取值时考虑测试仪器的偏差,取 100m/s 的误差。实验得到的典型效果如图 4。

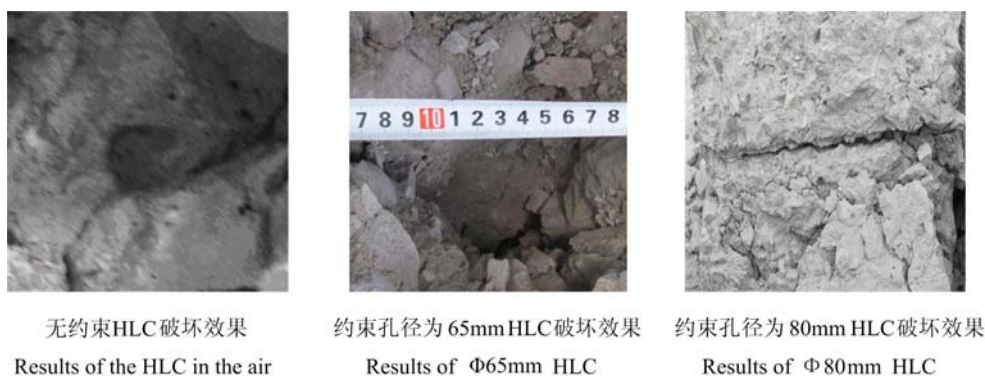


图 4 不同约束孔径破坏典型效果图

Fig. 4 Results of the experiments under different diameter of the constraint hole

2.2 不同约束孔径下实验结果分析

根据不同约束孔径得到的实验结果,可知:

1) 取头部速度的平均数值对结果进行分析,约束孔径为 $\Phi 0\text{mm}$ 和约束孔径为无限大时情况一致。得到头部速度随预制孔直径的变化关系如图 4 所示:当预制孔直径为 $\Phi 60\text{mm}$ 时,也即聚能装药同预制孔完全耦合,混凝土靶可等效为无限厚壳体,壳体的存在延缓了稀疏波进入的速度,相对空气势必增加

头部速度^[10],故随着预制孔直径的增加,杆式射流的头部速度满足先减小后增加的曲线趋势,但考虑到多级串联战斗部前后级匹配,前后级直径相差不大,故聚能装药随预制孔的直径变化属于下降段,从而知后级聚能装药直径与前级形成孔径相近更满足多级串联战斗部的要求。

2) 随着预约束孔孔径的增加,侵彻深度减小,且数值比空气中小,同形成的杆式射流头部速度变化趋势一致。主要原因是约束孔的存在,影响了爆轰波的传播,同时爆轰波对约束孔的作用又影响了聚能杆式射流的侵彻作用。随着预制孔孔径的增加,侵彻孔径变化不大,可以近似认为侵彻孔径不变。亚半球装药平均头部速度要比 K 装药低,形成的侵彻深度比 K 装药小,但侵彻直径要比 K 装药大。故亚半球装药在预制混凝土孔中仍然保持着孔径大而穿深较小的特点;而 K 装药则形成穿深大,孔径较大的特点。但 K 装药结构比较复杂,难以加工,而亚半球装药则加工比较容易,故在选择装药结构时需综合考虑。

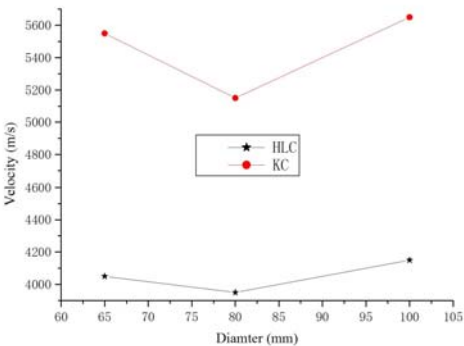


图 5 头部速度随约束孔直径的变化曲线

Fig. 5 Tip velocity of the shaped charge with the diameter of the constraint hole

3) 由不同约束孔径破坏效果图可知,无约束状态下,聚能射流对靶板的破坏程度较小,约束孔径为 80mm 时破坏次之,约束孔径为 65mm 时破坏程度最大。也即在约束孔径与装药口径相近时,聚能装药对目标的破坏能力比无约束时有较大的提高。

2.3 不同约束孔深得到的侵彻结果

为了考察不同约束孔深对侵彻结果的影响,在炸高不变的前提下,对约束孔深为 $\Phi 0\text{mm}$, 300mm 和 400mm 三种情况下两种聚能装药对混凝土靶板的侵彻情况进行了实验研究。其中在约束孔深 400mm 时,靶板完全破坏,仅获得侵彻空腔底部直径。为了表征不同深度对混凝土靶板的破坏情况,利用混凝土回弹仪对侵彻前后混凝土靶板背面抗压强度进行 6 点测量,并求平均,实验结果如表 2。

表 2 不同约束孔深下实验结果

Tab. 2 Results of experiment under different depth of the constraint hole

实验号		弹重 (g)	炸高 (mm)	预制孔径 (mm)	预制孔深 (mm)	头部速度 (m/s)	侵深 (mm)	侵彻孔径 (mm)	初始强度 (MPa)	结束强度 (MPa)
亚半球	1	224	1.5 D_0	0	0	4100~4200	6.22 D_0	32	34	19
	2	224	1.5 D_0	65	300	4000~4100	6.0 D_0	31	34	16
	7	225	1.5 D_0	65	400	4150~4250	6.6 D_0	16 [#]	34	14
K 装药	4	207	1.5 D_0	0	0	5600~5700	10.8 D_0	27	34	17
	5	207	1.5 D_0	65	300	5400~5500	10.6 D_0	26	28	13
	8	207	1.5 D_0	65	400	5500~5600	10.7 D_0	15 [#]	34	0

数值为侵彻空腔底部直径。强度为 0 表示已经炸碎。

2.4 不同约束孔深得到的侵彻结果分析

根据不同的约束孔深得到的结果,可知:

1) 固定炸高前提下,亚半球装药随着约束深度的增加,头部速度增加,侵彻深度增加,且在 400mm 深处比空气中略大。随着约束深度的增加,K 装药头部速度增加,侵彻深度也增加,但在 400mm 深处比空气中稍小。故在保持相同炸高时,适当增加多级串联战斗部前级装药的侵彻深度来提高次级装药的成型位置深度,可提高整体侵彻深度。

2) 固定炸高前提下,由靶板的强度可知,随着预制孔深度的增加,强度减小幅值增大,也即在预制孔中聚能装药的破坏力比空气中有较大的增加。

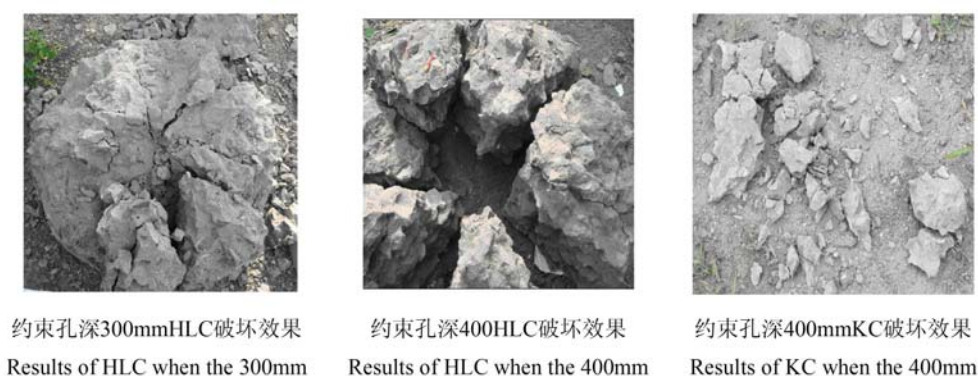


图 6 不同约束孔深破坏典型效果图

Fig. 6 Results of the experiments under different depth of the constraint hole

3) 固定炸高前提下, K 装药比亚半球装药更加稳定, 侵彻深度也比亚半球装药要大, 但随着预制孔深度的增加, 亚半球装药形成的杆式射流侵彻深度受到约束孔深影响更大, 增加更加明显。

4) 由不同约束孔深得到的破坏效果图可知, 约束孔深从 300mm 变化到 400mm 时, 靶体破坏程度增大很多。故聚能装药在前级聚能侵彻形成的空腔内的深度位置更影响多级串联战斗部的侵彻深度。这为多级串联战斗部整体结构设计提出了一定的参考。

3 结论

1) 多级串联战斗部前级聚能装药形成的侵彻孔, 这种侵彻孔形成了后级的约束, 约束孔的直径和深度对聚能装药的成型和侵彻都有一定的影响。在固定 2.5 倍炸高时, 随着约束孔深度的增加, 聚能杆流头部速度增加, 侵彻深度增加; 随着约束孔直径的增加, 两种射流的头部速度先减小后增加, 侵彻深度同头部速度变化一致。

2) 两种聚能装药结构在约束混凝土孔中都能达到一定的效果, 均可满足多级串联战斗部次级装药要求。相比之下, K 装药效果更好。但在约束混凝土孔一定深度下, 亚半球装药的侵彻速度和侵彻能力可有很大的提高, 优化设计亚半球装药结构, 也可满足多级串联战斗部的次级装药要求。

3) 约束的存在增强了聚能装药对靶板的破坏程度, 一定程度上提高了炸药的利用率, 为多级串联战斗部的设计提供了一定的指导。

参考文献:

- [1] Blache A, Weimann K. Shaped charge with jetting projectile for extended targets[C]. The 17th International Symposium on Ballistics. Midrand, South Africa; Office of Naval Research, 1998: 207—215.
- [2] Murphy M J. Performance Analysis of two-stage motions[C]. The 8th International Symposium on Ballistics, Orlando, Florida, Oct. 23-25, TB 23-29, 1984.
- [3] Murphy M J, Kuklo R M. Fundamentals of shaped charge penetration in concrete[C]. The 18th International Symposium on Ballistics, San Antonio. Texas, USA. 15-19 November 1999.
- [4] Teland J A. Cavity expansion in penetration of targets with pre_drilled cavities predrilled cavities[C]. The 19th International Symposium on Ballistics, Interlaken. Switzerland 7-11 May 2001.
- [5] Folsom E N, Projectile Jr. Penetration into Concrete with an inline Hole[R]. Master's Thesis, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-53786, June 1987.
- [6] Murphy M J, Kuklo R M. Fundamentals of shaped charge penetration in concrete [C]. The 18th International Symposium on Ballistics. Lancaster, Pennsylvania; Technomic Publishing Company Inc, 1999:105721064.
- [7] 黄正祥. 聚能杆式侵彻体成型机理研究[D]. 南京理工大学, 2003 (Huang Zhengxiang. Mechanism Study on Jetting Projectile Charge Formation[D]. Nanjing University of Science & Technology, 2003(in Chinese))
- [8] Mattson K, Sorensen J, Ouye N, et al. Development of the K charge, A short L/D Shape Charge[C]. The 18th International Symposium on Ballistics, San Antonio. Texas, USA. 15-19 November 1999.

- [9] 张先锋, 陈惠武. 三种典型聚能射流侵彻靶板数值模拟[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(19): 4399—4401 (ZHANG Xian-feng, CHEN Hui-wu. Computational Study of Three Typical Shaped Charge Jets[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(19): 4399—4401(in Chinese))
- [10] 龙源, 岳小兵, 周翔. 76mm 口径 EFP 成形过程数值模拟及影响因素研究[J]. 弹道学报, 2003, 15(2): 59—63 (Zhou Xiang, Long Yuan, Yue Xiaobing. Numerical simulation and effects of the formation of the EFP with 76mm diameter [J]. Journal of Ballistics, 2003, 15(2): 59—63(in Chinese))

Experimental Study of Constraint Effect on Shaped Charge Jet Penetration in Concrete Targets

PAN Xu-chao, HE Yong, ZHANG Xian-feng, HE Yuan, ZHAO Xiao-ning

(Ministerial Key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Jetting projectile is a kind of shaped charge that can be used as the second part of a tandem warhead system. Two typical shaped charges, hemispherical liner charge (HLC) and K charge (KC), that can form jetting projectile were designed. C35 concrete targets with hole constraints which have different diameters and heights were prefabricated. Experiments were carried out using above charges in predrilled hole and in the air. Experimental results show that all two shaped charges can form jetting projectile, also can form deep holes with reasonable large diameter. Comparing with HLC, the penetration depth of KC is much larger, while the diameter of HLC is much larger. But comparing with the results obtained in the air, the penetration depth of HLC is effected by constraints, while the KC changes present more stability. Above results can provide some evidences for designing second part of tandem warhead system.

Keywords: explosion mechanics; shaped charges; jetting projectile; penetration; tandem warhead