

文章编号: 1001-1455(2007)04-0364-06

串联随进战斗部侵彻混凝土靶实验研究*

段 建, 杨黔龙, 周 刚, 王可慧, 张 颖, 田亚军, 初 哲

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 设计了一种小尺寸串联随进战斗部, 利用 $\varnothing 100$ mm 滑膛炮进行了不同弹速和不同着角下该战斗部侵彻混凝土靶实验。实验结果表明, 前级聚能装药战斗部为二级随进战斗部的随进侵彻开辟了有利通道, 串联战斗部的侵彻效果理想; 尤其在小着角情况下侵彻, 串联随进战斗部的侵彻效率大大提高。

关键词: 爆炸力学; 串联随进战斗部; 实验研究; 混凝土靶; 滑膛炮

中图分类号: O385 **国标学科代码:** 130 · 3530 **文献标志码:** A

1 引 言

侵彻战斗部按其作用方式来分, 有动能侵彻战斗部和串联随进战斗部(或复合战斗部系统)两种。其中动能侵彻战斗部结构简单, 在高着速情况下作用比较稳定可靠, 但在低着速及小着角下容易跳弹; 串联随进战斗部由一个前级聚能装药和后面的随进弹头组成。当串联随进战斗部接近目标一定高度时, 前级聚能装药首先爆炸形成爆炸成型弹丸(简称 EFP)对目标沿弹头方向炸开一个孔洞, 第二级随进战斗部依靠本身的动能沿此洞口继续侵彻, 随进战斗部上的延时或智能引信引爆该侵彻战斗部装药, 最终毁伤目标。

串联随进战斗部作为一种新型侵彻弹药近年来得到了广泛研究并装备了部队。与普通动能侵彻战斗部相比, 串联随进战斗部在小着角下不易跳弹, 在单一介质的整体硬目标及低着速下侵彻深度可增大 1~2 倍; 若要达到同样的深度, 串联随进战斗部的速度可低得多, 弹长径比不必很大, 弹着角较小时也会有很好的侵彻效果, 很适合作反硬目标的精确制导炸弹或巡航导弹战斗部。目前, 比较著名且最具代表性的串联随进战斗部有: 英、法合作的 BROACH^[1] 战斗部(如图 1)和德、法合作的 Mephisto^[2] 战斗部(如图 2)。

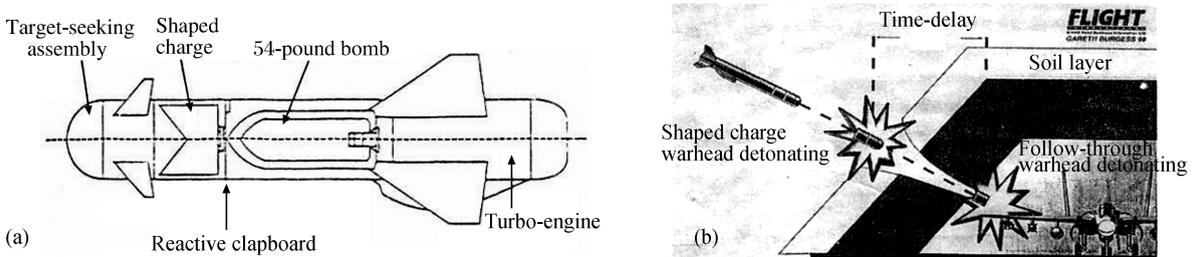


图 1 BROACH 战斗部结构及其攻击目标示意图^[1]

Fig. 1 Schematic diagram of BROACH warhead and its attacking target^[1]

英国的 BROACH 战斗部是英国国防评估与研究局、英国航空航天公司皇家军械分部和汤姆森-索恩导弹电子(TME)公司合作研制的战斗部。BROACH 是英文皇家军械增强聚能装药炸弹的字头缩写。该战斗部将装备在英国的风暴前兆导弹和法国 SCALP EG 导弹上。美国空军曾经评估 BROACH 战斗部, 准备将其作为改进 AGM-86C 常规巡航导弹的候选战斗部。美海军也进行过比较试验, 准备将其

* 收稿日期: 2006-03-23; 修回日期: 2006-06-27

作者简介: 段 建(1979—), 男, 硕士。

作为 AGM-154C 单一战斗部型 JSOW 的候选战斗部。BROACH 战斗部还可能会用于美空军的 AGM-129 先进巡航导弹常规型,还可能用于战斧巡航导弹的各种型号上。

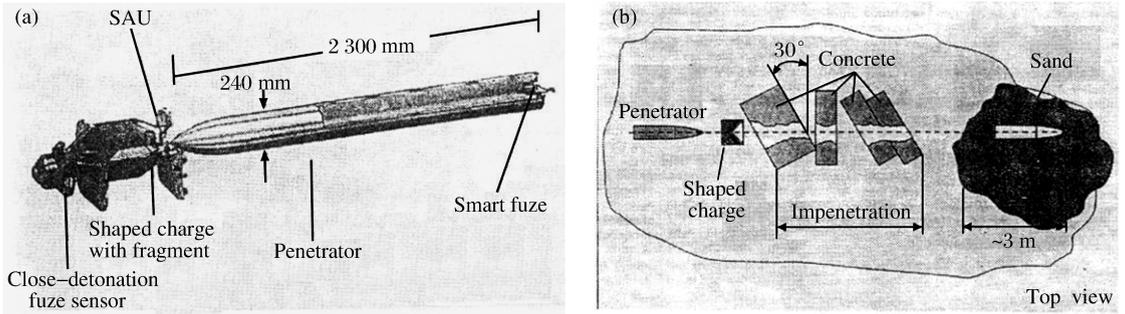


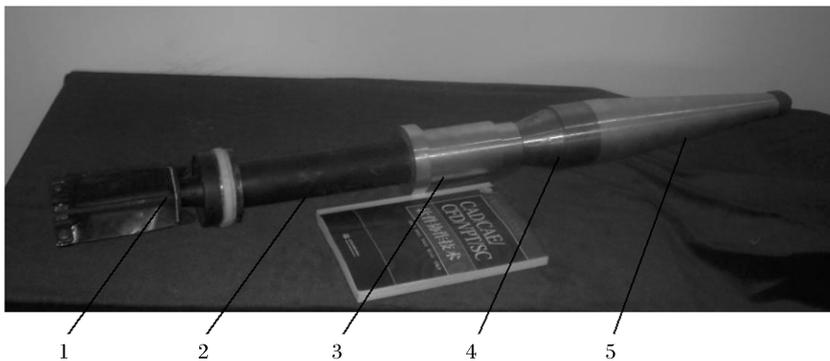
图 2 Mephisto 战斗部结构及侵彻目标示意图^[2]

Fig. 2 Schematic diagram of Mephisto warhead and its penetrating target^[2]

Mephisto(多效应侵彻、高尖端、目标优化)战斗部是由德国航空航天公司和法国汤姆逊-CSF 公司合资的 TDA/TDW 公司开发的复合型战斗部,用来装备 KEPD-150 一类防区外发射导弹。TDW 是汤姆逊、德国航空航天公司和武器系统的德文缩写;而 TDA 则是这三个词的法文缩写。根据德国国防部的合同,1997 年大部分时间都在德国梅彭试验靶场对这种战斗部进行达标测试研究。Mephisto 战斗部可以攻击 2.5 m 厚的混凝土目标和再被覆 2 m 厚泥土的同样目标,实验达到了预期目标,前级装药炸出的弹孔直径平均为 15 cm。公司认为前置装药的作用是成功的,它能够使侵彻弹在 65°命中角下也不会产生跳弹现象,确保摧毁目标。

2 小尺寸串联随进战斗部结构设计

所设计的小尺寸串联型侵彻战斗部由两级战斗部串联组成,结构见图 3。前级采用大锥角药型罩结构的聚能破甲战斗部,后级为一般的动能侵彻战斗部,两级之间采用联接件进行联接。其中前级聚能战斗部重 3.2 kg,装药采用 JH-15,药量约 0.85 kg;后级动能战斗部重 5.8 kg,采用模拟装药,药量约 0.92 kg。串联随进战斗部总重 13.1 kg(包括尾翼、定心部、联接件及引信等)。



- 1. Empennage
- 2. Follow-through warhead
- 3. Joining
- 4. Shaped charge warhead
- 5. Windshield

图 3 串联随进战斗部结构

Fig. 3 Structure of the tandem follow-through warhead

2.1 前级聚能装药结构设计

前级聚能装药设计包括:装药壳体设计、药型罩设计及风帽设计。

2.1.1 装药壳体设计

壳体的设计要考虑到前级装药爆炸对随进战斗部的影响^[3],包括:(1) 爆炸后形成的爆炸冲击波可能损坏随进战斗部的弹体,甚至可能引爆其装药;(2) 爆炸冲击波和爆轰产物直接作用在弹体上产生的冲量,可能使随进战斗部的速度降低,并且可能引起随进战斗部姿态的改变,使随进战斗部的侵彻位置偏离前级战斗部的侵彻位置。为了减小这种影响,便于随进战斗部沿前级装药侵彻的孔洞内继续侵彻,

前级装药壳体设计成尾部带有锥角的壳体,即圆柱与截锥形组合式的壳体。实验研究表明,圆柱与截锥形组合式的壳体可以减小前级装药爆炸对后级随进战斗部的影响。同时,壳体尾部锥角的大小对爆炸成型弹丸会有一些影响。壳体尾锥角减小,装药质量增多,弹丸动能随之增加,但其能量利用率降低。因此,壳体的设计应根据不同情况、不同要求进行合理设计。

2.1.2 药型罩设计

药型罩材料选用紫铜,其密度大,侵彻深。同时也可以考虑采用铝、镁以及铁等金属材料作为药型罩材料。采用大锥角、变壁厚的药型罩结构,药型罩壁厚 $\delta=(0.03\sim 0.04)D$,药型罩高 $h=0.24D$,其中药型罩底径 $D=90\text{ mm}$ 。

2.1.3 风帽设计

风帽的作用是:(1) 保证聚能装药爆炸形成 EFP 所要求的炸高;(2) 连接引信,使其成为引信的一极,当风帽触及目标时,风帽头部与引信的另一极闭合,形成短路而触发引信,引爆前级装药;(3) 保证全弹有良好的气动外形和正确的着靶姿态。风帽长度,可用 $H_s = H_F + Kv(t_1 + t_2) \times 10^{-3}$ 计算。式中: H_s 为风帽长度(mm); H_F 为炸高(mm),一般取为药型罩底径的 3.0~5.0 倍; v 为着靶速度(m/s); K 为战斗部着靶头部变形速度与着靶速度的比值,通常钢制风帽取 0.46,铝制风帽取 0.30; t_1 为引信瞬发度(μs); t_2 为爆轰波阵面从引信孔底起爆点传至药型罩端面的时间(μs)。

2.2 随进动能侵彻战斗部设计

从有利于随进侵彻对后级随进侵彻战斗部进行研究设计。随进侵彻战斗部在受到前级装药爆炸冲击的作用及侵彻加固靶体过程,弹体要保持完好,高强度和高韧性就成了战斗部壳体材料最主要的力学性能。此外,根据 C. W. Young^[4-6] 的侵深方程,提高弹丸面质量可以提高随进侵彻弹的侵彻深度。在尺寸设计上,采用次口径设计,后级随进战斗部弹径设计为前级聚能装药战斗部弹径的 0.5~0.8 倍。

2.3 联接件设计

合理的联接件设计关系到随进战斗部侵彻的好坏。设计时考虑了以下几点:(1) 串联战斗部在运输、发射及飞行过程中满足强度要求;(2) 合理的材料选择,能够保障随进战斗部免受或较小受到前级装药爆炸冲击的影响;(3) 质量尽可能小,有利于二级随进战斗部的侵彻,提高战斗部威力;(4) 有较好的气动力外形;(5) 前级装药爆炸后联接件完全破碎,不影响二级随进战斗部的侵彻。

2.4 尾翼设计

尾翼设计为后张式结构,翼片张开后掠一定的角度,以保持尾翼的稳定性。翼片在炮膛内运动时,依靠轴向惯性力收束在一起,避免划伤炮膛,离开炮膛后,凭借压力差,翼片张开,维持战斗部稳定飞行。

由于空间的限制,翼片设计成翼弦短而翼展长的细长刀形。为了保证翼片的气动力面积,采用六片展翼。所设计的张开式尾翼结构如图 4 所示。

3 实验方案

采用 100 mm 滑膛炮,进行了不同弹速下的串联随进战斗部侵彻混凝土靶实验,实验现场布置如图 5 所示。炮口距混凝土靶约 80 m,在距炮口约 30 m 和约 40 m 处布置网靶,通过网靶测量串联战斗部撞击靶板速度。同时,采用高速摄影对串联随进战斗部侵彻混凝土靶板过程进行了录像,通过高速录像,可以估算战斗部撞击靶板速度以及穿透靶板后二级随进战斗部的剩余速度。高速录像系统见图 6。

实验采用抗压强度为 35 MPa 的圆柱形混凝土靶,靶板直径为 2 m,靶板厚度有 1.0 m 和 0.7 m 两种。为了减小弹侵彻过程对混凝土靶边界效应的影响,圆柱靶周围用 6 mm 厚的钢筒加固。

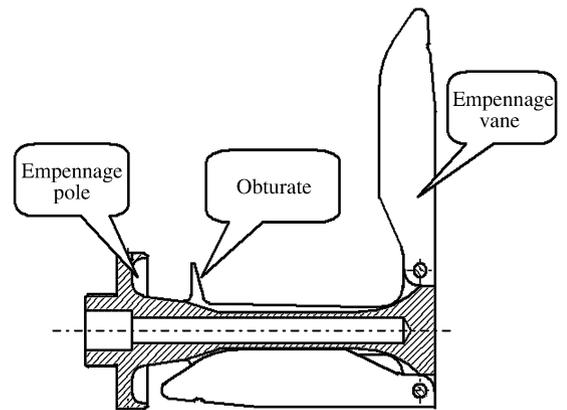


图 4 尾翼结构

Fig. 4 Structure of empennage

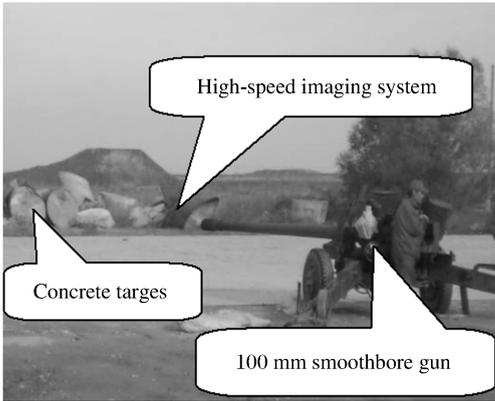


图 5 实验现场布置
Fig. 5 Layout of experiment

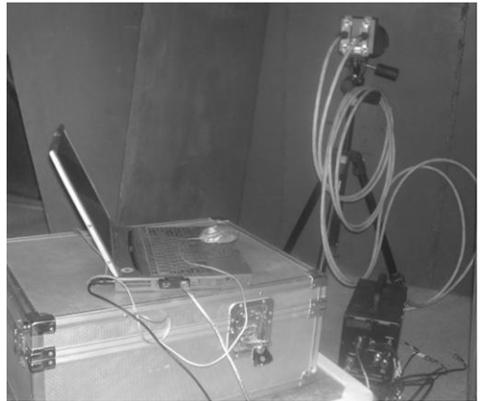


图 6 高速录像系统
Fig. 6 High-speed imaging system

4 实验结果与分析

进行了 4 发侵彻混凝土靶实验,3 发垂直侵彻靶板,1 发着角为 50°斜侵彻,实验数据见表 1。

表 1 串联战斗部侵彻混凝土靶的实验数据

Table 1 Experimental data of the tandem warhead penetrating concrete targets

No.	d/m	h/m	$\theta/ (^{\circ})$	$v_0/(m/s)$	P/m	$v_r/(m/s)$
1	2	0.7	90	453	0.7	200
2	2	1.0	90	458	1.0	120
3	2	1.0	50	460	0.93	0
4	2	1.7	90	762	1.3	0

注: d 为靶直径; h 为靶厚度; θ 为冲击角; v_0 为冲击速度; P 为侵彻深度; v_r 为残余速度。

串联随进战斗部垂直侵彻混凝土靶实验结果表明,串联战斗部以 $v_0 = 458 \text{ m/s}$ 的速度侵彻 1.0 m 厚的混凝土靶,战斗部穿透了 1.0 m 厚的混凝土靶,穿透靶板后随进战斗部仍有约 $v_r = 120 \text{ m/s}$ 的剩余侵彻速度。如果采用与二级动能随进战斗部相同的单一动能弹,通过数值模拟和 C. W. Young^[7] 的侵深方程,得到侵彻深度 $P = 0.48 \text{ m}$ 。考虑边界效应的影响,最大侵透深度不超过 $P/0.7 = 0.68 \text{ m}$ 。图 7 为单一动能弹以 458 m/s 的速度垂直侵彻混凝土靶的数值模拟结果,图 8 为串联战斗部以 458 m/s 的速度垂直撞击 1.0 m 厚的混凝土靶后的靶板正面破坏情况。

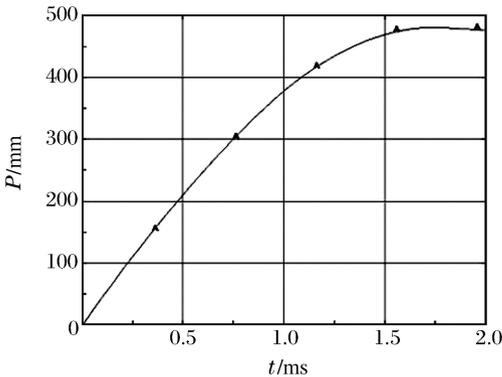


图 7 单一动能弹垂直侵彻混凝土靶的数值模拟
Fig. 7 Simulation of the follow-through warhead normally penetrating concrete target

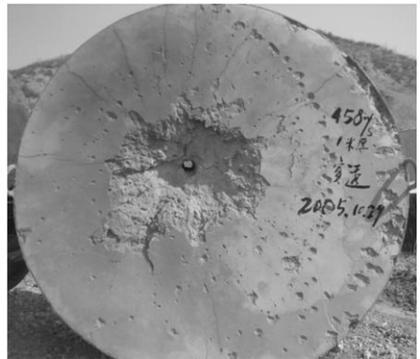


图 8 串联战斗部垂直撞击混凝土靶的实验照片
Fig. 8 Photograph of concrete target normally by penetrated the tandem follow-through warhead

串联战斗部以 460 m/s 的速度、50°着角斜侵彻 1.0 m 厚的混凝土靶时,其侵彻深度为 0.93 m,并且侵彻出的弹道比较平直。而采用单一动能弹,以同样的速度和着角侵彻同样的混凝土靶,数值模拟结

果显示,其侵彻深度 $P=0.13\text{ m}$ 。考虑边界效应的影响,最大侵透深度不超过 $P/0.7=0.19\text{ m}$ 。图9为单一动能弹以 460 m/s 的速度、 50° 着角斜侵彻混凝土靶的模拟结果,图10为串联战斗部斜撞击 1.0 m 厚的混凝土靶后的靶板破坏情况。

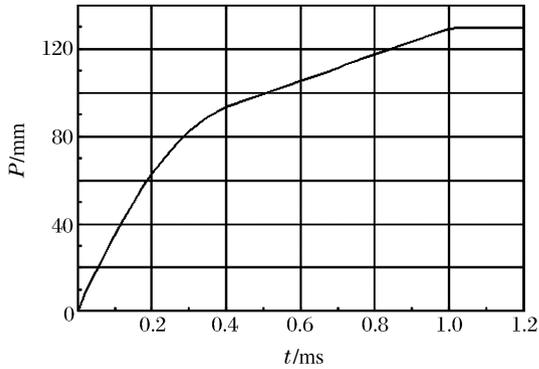


图9 单一动能弹斜侵彻混凝土靶的数值模拟

Fig.9 Simulation of the follow-through warhead obliquely penetrating concrete target



图10 串联战斗部斜侵彻混凝土靶的实验照片

Fig.10 Photograph of concrete target obliquely penetrated the tandem follow-through warhead

通过高速摄影系统,对串联随进战斗部侵彻靶板过程进行了录像,如图11所示。图11(a)为串联战斗部撞击靶板之前飞行情况;图11(b)为串联战斗部撞击到靶板,在一定的炸高内触发引信作用,起爆前级聚能装药;图11(c)为聚能装药爆炸形成 EFP 对靶板进行侵彻;图11(d)为二级随进侵彻战斗部穿透靶板后,在空气中继续向前飞行。

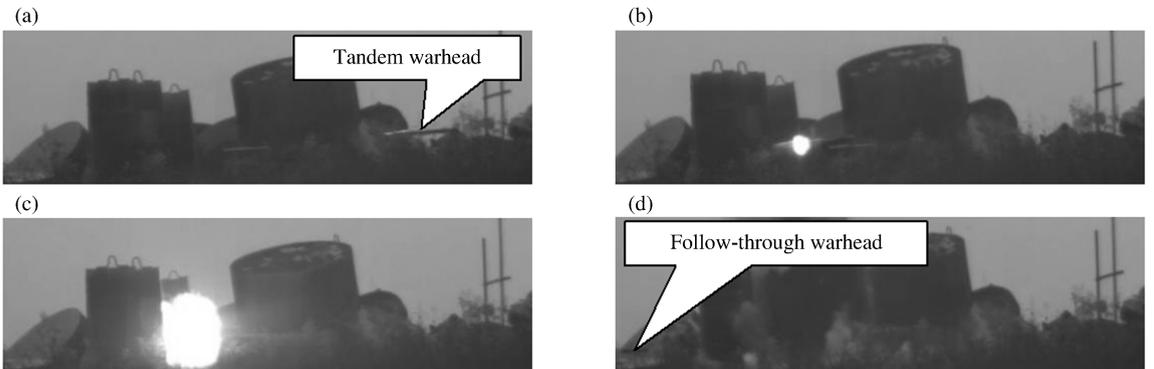


图11 串联随进战斗部侵彻靶板过程的高速摄影照片

Fig.11 Photograph of the tandem follow-through warhead penetrating target by high-speed imaging system

二级随进侵彻战斗部在前级装药爆炸冲击作用下及侵彻混凝土靶板后,弹体无明显变形,弹体保持完好。图12为串联战斗部以 458 m/s 的速度侵彻混凝土靶板后的二级随进弹体。

5 结论

与单一动能侵彻战斗部不同,串联随进战斗部对目标的侵彻过程是:在一定炸高范围内,前级聚能装药爆炸形成 EFP 对目标预先开坑,后级随进战斗部依靠动能沿此开坑孔洞继续侵彻。串联随进战斗部侵彻 35 MPa 混凝土靶实验结果表明:

(1) 串联战斗部的前级聚能装药战斗部开坑效果显著,为二级动能战斗部的随进侵彻开辟了有利



图12 串联战斗部侵彻混凝土靶板后的二级随进弹体
Fig.12 Photograph of the follow-through warhead after the tandem warhead penetrating concrete target

通道。

(2) 在小着角情况下, 串联随进战斗部由于不易跳弹, 对目标也有较好的侵彻效果; 而单一动能侵彻战斗部往往容易跳弹而使得侵彻效果不够理想。

(3) 设计的串联战斗部可以进行 450~800 m/s 的随进侵彻实验, 并且侵彻靶板后, 二级随进侵彻战斗部弹体保持完好。可见, 串联战斗部结构设计比较合理, 满足实验要求。

参考文献:

- [1] 臧晓京. 英国的 BROACH 多战斗部系统[J]. 飞航导弹, 1998, 28(12): 23-24.
ZANG Xiao-jing. The Britain's broach multiple warhead[J]. Winged Missiles Journal, 1998, 28(12): 23-24.
- [2] 罗 翌. 西方攻击加固深埋目标的战斗部[J]. 飞航导弹, 1998, 28(12): 25-31.
LUO Yi. The western countries' warhead of attacking deep-underground reinforced target[J]. Winged Missiles Journal, 1998, 28(12): 25-31.
- [3] 涂侯杰, 恽寿榕, 赵衡阳. 破爆型串联战斗部第一级爆炸对第二级影响的研究[J]. 兵工学报, 1994, 15(3): 18-22.
TU Hou-jie, YUN Shou-rong, ZHAO Hen-Yang. Blast effect on the follow-through charge of a tandem warhead [J]. Acta Armamentarii, 1994, 15(3): 18-22.
- [4] Young C W. Depth prediction for earth-penetrating projectiles[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1969, 95(3): 803-817.
- [5] Young C W. The development of empirical equation for predicting depth of an earth penetrating projectile[R]. SC-DR-67-60, 1967.
- [6] Young C W. Equation for predicting earth penetration by projectiles: an update[R]. SAND-88-0013, 1988.
- [7] Young C W. Penetration equations[R]. SAND-97-2 426, 1997.

Experimental studies of a tandem follow-through warhead penetrating concrete target

DUAN Jian^{*}, YANG Qian-long, ZHOU Gang, WANG Ke-hui,
ZHANG Ying, TIAN Ya-jun, CHU Zhe

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

Abstract: A tandem follow-through warhead was designed. The experiments of the tandem warhead penetrating concrete target at different impacting velocities and different impacting angles were carried out by using smoothbore gun with a diameter of 100 mm. Experimental results show that the forward shaped-charge warhead penetrates a hole in the target firstly and the follow-through warhead continues to penetrate the target along the hole. Efficiency of the tandem follow-through penetrating targets is improved, especially at small impacting angle.

Key words: mechanics of explosion; tandem follow-through warhead; experimental study; concrete target; smoothbore gun

^{*} Corresponding author: DUAN Jian
E-mail address: dis19790606@sohu.com
Telephone: 86-29-84765137