

文章编号: 1001-1455(2002)04-0381-06

间隔靶对射流侵彻影响的数值模拟和实验研究*

梁争峰, 胡焕性, 孙建, 雷全虎
(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 对某聚能装药射流侵彻靶板的过程进行了数值模拟, 得出其碰撞点附近应力分布与传统理论相符, 侵彻深度与实验结果及工程计算结果基本相符; 分别对该聚能装药侵彻连续靶和间隔靶的过程进行了数值模拟, 数值模拟结果显示间隔靶的侵彻深度明显低于连续靶的侵彻深度, 这说明侵彻开坑阶段的能耗侵深比远大于准定常阶段。为了验证间隔靶对射流侵彻的影响, 用另一聚能装药分别对连续靶和间隔靶进行了侵彻实验, 并排除了炸高的影响。实验结果也表明, 间隔靶对射流侵彻的确存在着不利影响。还结合数值模拟及实验结果对传统的侵彻公式进行了修正。

关键词: 数值模拟; 射流; 侵彻深度; 连续靶; 间隔靶

中图分类号: O385 文献标识码: A

1 引言

传统侵彻理论^[1]认为, 当碰撞体速度超过 3km/s 时, 靶板的侵彻深度与碰撞体长度成一恒定比例, 而与速度无关; 当碰撞体速度降低时, 侵彻深度与碰撞体长度之比则随碰撞体速度的下降而减小; 而当碰撞体速度降低到临界侵彻速度以下时, 射流将失去侵彻能力。

射流的侵彻过程可分为开坑阶段、准定常阶段和终止阶段。开坑阶段是从射流头部碰击靶板开始, 到射流在靶板中建立起稳定的三高区为止。射流接触靶板发生碰撞时, 自碰撞点向靶板和射流中分别传入冲击波, 在碰撞点压力可达到 200GPa, 温度可达 5000K, 碰撞点周围的金属产生高速塑性变形, 形成一个高温、高压、高应变率的区域, 简称三高区。准定常阶段是射流对处于三高区状态靶板的侵彻阶段, 此阶段的碰撞压力比较小。

现代坦克多采用挂甲裙板和复合装甲来增强自身的防护能力, 对破甲弹而言, 北约三层靶的验收是比较严厉的。许多研究者认为侵彻开坑阶段的能耗侵深比远大于准定常阶段。秦孟兆等^[2]曾对破甲临界侵彻进行了数值研究, 用 HELP 类型的二维计算程序和流体弹塑性力学模型, 计算一无限长匀速金属铜射流对钢靶板的侵彻。在计算过程中, 发现在碰撞的早期, 由于形成冲击波, 能量消耗最大, 表现为能量-时间曲线和能量-穿深曲线中很大的初始斜率。刘梦霞^[3]应用闪光 X 射线摄影技术, 直接观测了射流对专用三层组合靶板的侵彻作用, 经过对实验的分析, 认为各层靶板正面反溅的射流和靶板残渣, 以及靶板背面冲塞及层裂飞片对后续射流都存在干扰。作者在过去的大量实验中也观察到间隔靶对射流的侵彻存在不利影响。为了证实这一观点, 本文中分别用数值模拟和实验方法进行验证。

为了计算射流对间隔靶的侵彻深度, 许多研究者提出了各自的计算方法。郑哲敏^[4]提出, 在射流速度分布为线性和侵彻过程中射流不出现拉断的条件下, 可以用各层靶板材料压力-时间曲线叠加的方法来计算复合靶的侵彻深度。黄国光^[5]认为, 对多层间隔靶的侵彻, 可以分段计算其侵彻行程。在射流的连续时期, 空行程只是“炸高”的突然增加; 在射流的断裂时期, 空行程只是“相对孔底”的突然远移。这些计算方法都认为间隔靶对射流侵彻的影响仅仅是增加了炸高, 而没有考虑到更多开坑及射流飞溅带来的影响。

* 收稿日期: 2001-09-07; 修回日期: 2001-12-17

作者简介: 梁争峰(1972—), 男, 硕士, 工程师。

J.W.Gehring 等^[6]认为开坑阶段是与射流直径相当的弹丸对靶板的侵彻,用弹丸侵彻公式计算侵彻长度,再加上射流剩余段的侵彻长度,即为总侵彻长度。这样简单的叠加显然不符合实际的物理过程。本文中,在数值模拟和实验结果的基础上,用一开坑系数修正了传统的侵彻公式。

2 射流对靶板侵彻深度的炸高计算法

G.Birkhoff 等最早描述了射流侵彻的分析模型^[7,8],假设靶板和射流均为不可压缩流体,并建议用 Bernoulli 方程描述射流对靶板的侵彻,即在碰撞点两侧流体静压力和动压力之和相等,由此得出

$$\frac{1}{2} \rho_j (v_j - u)^2 = \frac{1}{2} \rho_t u^2 \quad (1)$$

式中: v_j 为射流速度, u 为侵彻速度, ρ_j 和 ρ_t 分别为射流和靶板的密度。

在方程(1)的基础上,可推导得到具有速度 v 的射流质点对靶板的侵彻深度^[8]

$$P = S \left| \left[\frac{v_0}{v} \right]^{\frac{1}{r}} - 1 \right| \quad (2)$$

式中: $r = (\rho_t / \rho_j)^{1/2}$, S 为炸高。此方程即为射流对靶板侵彻深度的炸高计算法。

当射流穿透靶板时,上式可直接用来计算侵彻深度。当靶板太厚、射流未穿透靶板时,只要已知射流头部速度、能够侵彻靶板的极限射流速度、炸高及射流和靶板密度,也可用此方程来计算侵彻深度。

3 射流侵彻两种靶板的数值模拟

3.1 计算模型

采用的射流物理模型来源于某聚能装药,其参数主要参照 JPGS 工程计算程序对该聚能装药射流形成过程的计算,和 X 光获得的射流照片。在进行数值模拟时,射流和靶板均采用 MAT-PLASTIC-KINEMATIC 材料模型,这种材料模型适合模拟率相关的各向同性及动态硬化塑性,材料性能参数如表 1 所列。 G_h 为塑性切线硬化模量。利用程序对模型划分网格时,整个模型共划分成 202085 个单元,其中射流 2085 个单元,靶板 200000 个单元。所用模型全部采用 Lagrange 算法,射流与靶板之间采用面-面侵蚀接触。由于整个计算模型是轴对称的,为了简化计算模型和节省计算时间,计算时只取模型的四分之一进行计算,后处理时再对计算结果进行对称演示。

图 1 为射流的初始形态,共由 11 段射流微元组成,各微元速度和形态分布如表 2。连续靶和间断靶厚度均为 80cm,间断靶分为 10 层,数值模拟时用来侵彻两种靶板的射流参数相同。

表 1 射流和靶板的材料性能参数

材料	$\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	E / GPa	ν	Y / GPa	G_h / GPa
射流	8940	132	0.37	0.27	0.10
靶板	7860	210	0.29	0.60	1.24

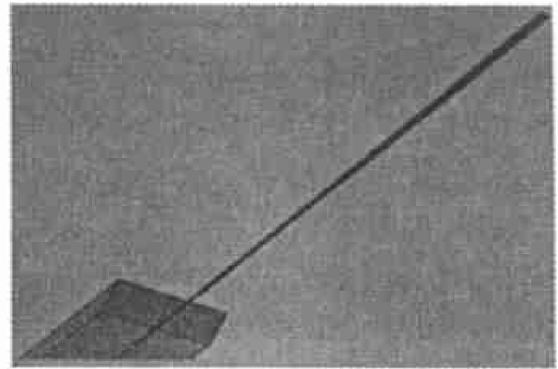


图 1 射流初始形态

Fig. 1 The initial form of jet

表 2 射流微元速度及形态分布

Table 2 The parameters of jet

微元序号	$v / (\text{km}/\text{s})$	R / cm	L / cm
1	9.5	0.11	7
2	8.9	0.14	11
3	8.1	0.17	11
4	7.4	0.20	11
5	6.6	0.24	11
6	5.9	0.29	9
7	5.1	0.33	9
8	4.4	0.37	9
9	3.7	0.39	8
10	3.0	0.42	8
11	2.3	0.46	6

3.2 计算结果

图 2 为数值模拟得出的某碰撞点附近的 Von Mises 应力图, 可以看出, 高应力区 (图中颜色较黑部分) 主要分布在两倍于穿孔直径的范围内。传统理论认为, 硬度的最高点可以认为是高速变形的范围, 由此可以估计高温、高压和高应变率的三高区的范围, 通过实验得出的三高区范围为穿孔直径的两倍左右^[9]。因此可以认为数值模拟得出的应力分布与传统理论相符。

另外, 通过观看数值模拟结果的动画演示, 发现射流穿透某层靶板时, 其在碰撞时所形成的高应力区将消失, 而射流在进入下一层靶板时, 又需要重新建立高应力区, 这无疑将损失更多的能量。因此, 重新开坑是减小射流侵彻能力的一个主要因素。

图 3 为通过数值模拟得出的连续靶和间断靶的侵彻深度, 图 4 和图 5 分别为连续靶和间断靶侵彻过程中射流能量的变化曲线。由图可以看出, 在初始能量相同的情况下, 射流穿透了 80cm 的连续靶, 而对于间断靶, 射流仅穿深 70cm。因此间断靶对射流侵彻有着不利的影响。

通过数值模拟得出该聚能装药对连续靶的垂直侵彻深度为 80cm, 这与 JPGS 工程计算程序计算出的垂直侵彻深度 88.6cm 误差仅为 9.7%, 与实验获得的垂直侵彻深度 84cm 的误差也只有 4.8%。

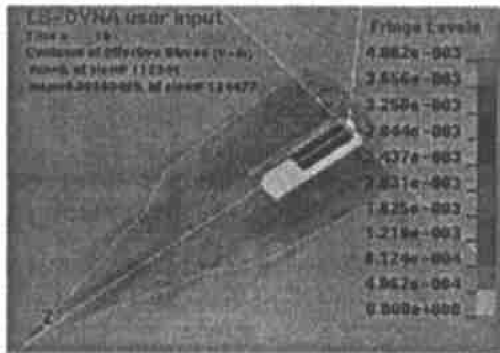


图 2 某碰撞点附近的 Von Mises 应力图
Fig.2 Von Mises stress near impact point

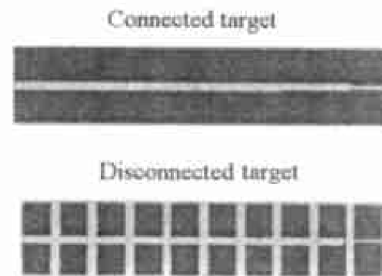


图 3 靶的侵彻深度图
Fig.3 Penetration depth of target

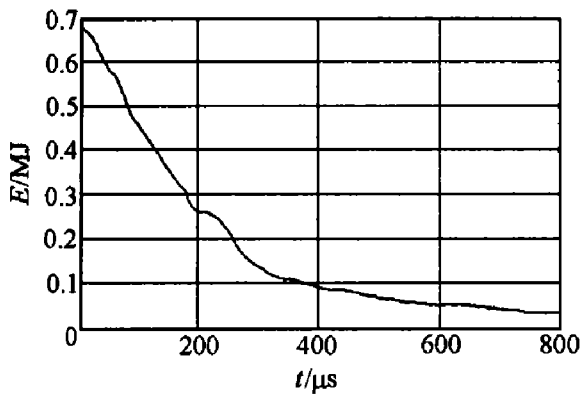


图 4 射流侵彻连续靶的能量变化曲线
Fig.4 Energy loss curve of connected target

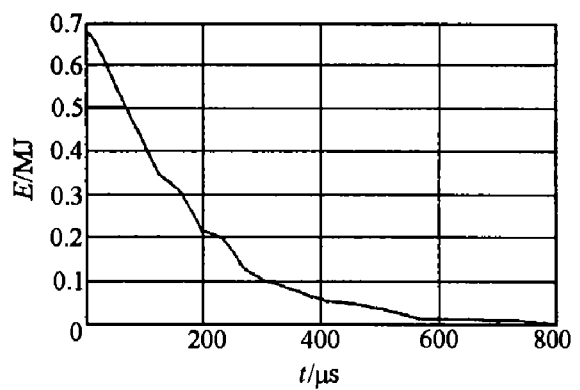


图 5 射流侵彻间断靶的能量变化曲线
Fig.5 Energy loss curve of disconnected target

3.3 对数值模拟的数据进行处理

通过对射流侵彻靶板过程的数值模拟, 可以获得任一时刻的侵彻深度和射流剩余长度, 并由此得出侵彻深度与射流长度损失的关系图。图 6 就是射流侵彻连续靶时侵彻深度与射流长度损失的关系图。由图可见, 侵彻深度与射流长度损失基本上呈现出一种线性关系, 这符合传统的侵彻理论。

3.4 根据计算结果修正传统的侵彻公式

通过对数值模拟结果的分析,考虑到过多开坑对射流侵彻深度的影响,用一开坑系数 K 来修正方程(2),即

$$P = (1 - nK)S \left[\left(\frac{v_0}{v} \right)^{\frac{1}{r}} - 1 \right] \quad (3)$$

式中: n 为靶板增加的层数。根据数值模拟结果,对连续靶和间隔靶分别使用公式(3)可得 $K = 0.0156$, 于是公式(3)可写为

$$P = (1 - 0.0156n)S \left[\left(\frac{v_0}{v} \right)^{\frac{1}{r}} - 1 \right] \quad (4)$$

4 射流侵彻两种靶板的实验研究

4.1 实验条件

图7和图8分别为实验所用连续靶和间隔靶的示意图。为了防止因杵堵而无法精确测量侵彻深度,连续靶被分为两层,上、下两层分别厚110mm和30mm,两层之间间隔为3mm。间隔靶共分为14层,每层厚10mm,每两层之间间隔为3mm。实验所用聚能装药为同一批次生产。

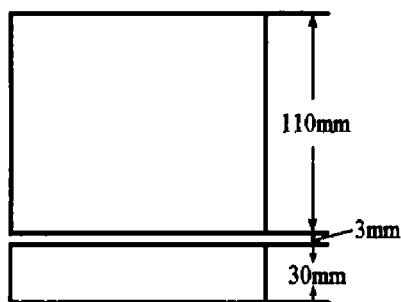


图7 连续靶示意图
Fig.7 Sketch map of connected target

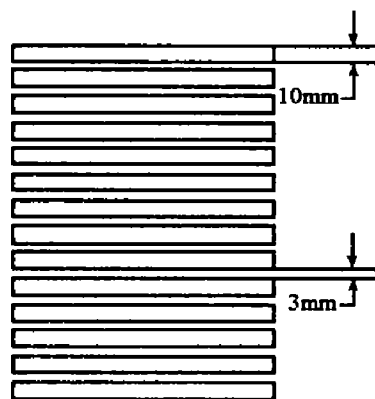


图8 间隔靶示意图
Fig.8 Sketch map of disconnected target

4.2 实验结果及分析

考虑到间隔靶间隙引起底层靶炸高增大而造成侵彻深度误差,分别对连续靶进行了60mm和90mm炸高的侵彻实验,实验结果见表3。可以看出,两种炸高的平均侵彻深度相差仅为4.6%。对于间隔靶,仅仅是第十二层靶板的炸高比连续靶炸高增加了33mm,第二层只增加了3mm,第 n 层增加了

表3 几种试验情况的侵彻深度

Table 3 The penetration depth of experiments

靶类型	S/mm	P_1/mm	P_2/mm	P_3/mm	P_4/mm	P_5/mm	\bar{P}/mm
连续靶	60	140	138	130	140	133	136.2
	90	123	140	131	116	140	130.0
间隔靶	60	114	131	— ¹⁾	113	81 ²⁾	119.3

1)脱靶无效; 2)跳动太大, 不计

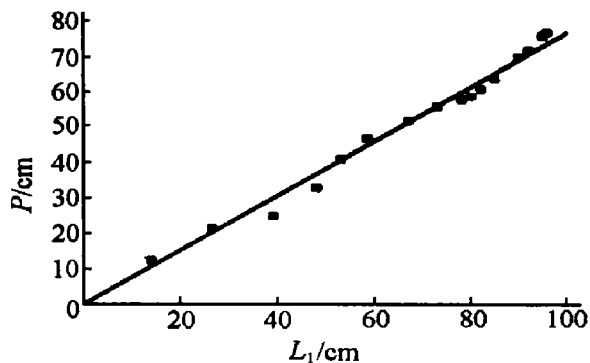


图6 侵彻深度与射流长度损失关系图
Fig.6 The relation of penetration depth and the loss of jet length

3(n-1)mm。所以,实际上炸高的变化对连续靶和间隔靶侵彻深度的影响估计只有2%左右。这说明可以忽略炸高对实验结果的影响。

通过观察间隔靶在侵彻实验后的情况,发现每层靶板的前表面入孔周围都有射流和靶板残渣,这说明由于间隔的存在,射流出现飞溅损失,这也是减小射流侵彻能力的一个不可忽略的因素。

4.3 根据实验结果修正传统的侵彻公式

根据实验结果,对连续靶和间隔靶分别使用公式(3)可得 $K=0.0123$,于是公式(3)可写为

$$P = (1 - 0.0123n)S \left[\left| \frac{v_0}{v} \right|^{\frac{1}{r}} - 1 \right] \quad (5)$$

5 结 论

(1)从数值模拟结果的动画演示和数据处理可以看出,射流侵彻深度基本与射流长度的减少成正比。因此在设计聚能装药时,应尽量设计出能够形成更长射流的装药结构。

(2)由数值模拟和实验共同证实了间隔靶对射流侵彻存在着不利影响,并由数值模拟和实验结果修正了传统的侵彻公式,求得修正参数 K 分别为0.0156和0.0123。由此可以初步得出以下结论,靶板层数每增加一层,侵彻深度就减少1.23%~1.56%。由于材料模型的缺乏,该数值模拟方法没有考虑射流飞溅对侵彻过程的影响,所以得出的修正参数是偏小的。另外,由于实验的数量比较少,所以得出的参数仅供参考,要得出精确的修正参数,还必须进行大量的实验。

(3)间隔靶对射流侵彻能力的减小,主要原因是来源于高应力区的不断重复建立和射流在间隔靶之间的飞溅。

(4)通过对射流侵彻过程的数值模拟,并将得出的侵彻深度与工程计算程序JPGS的计算结果及实验结果进行了对比,其偏差都不超过10%。这说明该数值模拟方法是可行的,建立的物理模型和采用的材料模型及材料参数可以用来近似模拟射流的侵彻过程。

(5)鉴于间隔靶在防护方面的优越性,建议当防护装置的重量受到限制而体积不受严格限制时,可考虑使用层状叠合材料,以增强防护能力。

参考文献:

- [1] Zukas J A. 碰撞动力学[M]. 张志云,丁世用,魏传忠,译. 北京:兵器工业出版社,1989:264-265.
Zukas J A. Impact Dynamics[M]. ZHANG Zhi-yun, DING Shi-yong, WEI Chuan-zhong, translated. Beijing: Publishing Company of Weapons Industry, 1989:264-265.
- [2] 秦孟兆,谢春生,谈庆明,等. 破甲临界侵彻的数值模拟[J]. 力学学报,1987,19(3):101-110.
QIN Meng-zhao, XIE Chun-sheng, TAN Qing-ming, et al. The Numerical Simulation on Critical Penetration of Shaped Charge[J]. Mechanics Transaction, 1987, 19(3):101-110.
- [3] 刘梦霞. 间隔靶的射流侵彻初探[A]. 《兵工学报弹箭分册》编辑部. 破甲文集[C]. 西安:中国兵工学会弹药学会,1984:68-73.
LIU Meng-xia. The Study on Penetration of Shaped Charge Jet into Disconnected Target[A]. 《The Missile Fascicule of Weapons Industry Transaction》Newsroom. The Corpus of Penetration for Shaped Charge [C]. Xi'an: The Ammunition Academy of China Weapons Industry Academy, 1984:68-73.
- [4] 郑哲敏. 关于射流侵彻的几个问题[J]. 兵工学报,1980(1):13-22.
ZHENG Zhe-min. Several Questions about Penetration of Jet [J]. Weapons Industry Transaction, 1980(1):13-22.
- [5] 黄国光. 破甲射流的计算和设计[A]. 《兵工学报弹箭分册》编辑部. 破甲文集[C]. 西安:中国兵工学会弹药学会,1987:60-77.
HUANG Guo-guang. The Calculation and Design of Jet[A]. 《The Missile Fascicule of Weapons Industry Transaction》Newsroom. The Corpus of Penetration for Shaped Charge [C]. Xi'an: The Ammunition Academy of China Weapons Industry Academy, 1987:60-77.
- [6] Gehring J W, Meyers C L, Charest J L. Experimental Studies of Impact Phenomena and Correlation with Theoretical Models[A]. Wilbeck J S. A Short Course on Penetration Mechanics[M]. Houston: Southwest Research Institute, 1985:302-334.

- [7] Birkhoff G, MacDougall D P, Pugh E M, et al. Explosives Lined Cavities[A]. 隋树元, 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 244-246.
Birkhoff G, MacDougall D P, Pugh E M, et al. Explosives Lined Cavities[A]. SUI Shu-yuan, WANG Shu-shan. Terminal Effects[M]. Beijing: Publishing Company of National Defense Industry, 2000: 244-246.
- [8] Chou P C. 非线性速度射流的侵彻理论及其对分层靶的侵彻[A]. 刘安邦, 译.《兵工学报弹箭分册》编辑部. 破甲文集[C]. 西安: 中国兵工学会弹药学会, 1988: 268-269.
Chou P C. The Penetration Theory of Jet no Linearity Velocity Distributing and Penetrating of it into Disconnected Target [A]. LIU An-bang, translated. 《The Missile Fascicule of Weapons Industry Transaction》Newsroom. The Corpus of Penetration for Shaped Charge [C]. Xi' an; The Ammunition Academy of China Weapons Industry Academy, 1988: 268-269.
- [9] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993: 226-229.
WANG Ru-ce, ZHAO Guo-zhi. Terminal Effects of Pill [M]. Beijing: Publishing Company of Beijing Institute of Technology, 1993: 226-229.

Numerical Simulation and Experimental Study on the Effect of Jet Penetrating into Disconnected Targets

LIANG Zheng-feng, HU Huan-xing, SUN Jian, LEI Quan-hu

(Xi' an Modern Chemistry Research Institute, Xi' an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: This paper presents the effects of jet penetrating into disconnected targets by means of numerical simulation and experiments. By comparing penetration depth of disconnected targets with that of connected targets, it was found that there are disadvantage effects for penetrating disconnected targets. By analyzing the results of numerical simulation and experiments, there are two primary adverse factors for penetrating, one is the added reconstruct of stress section, the other is the splash of jet between targets. Based on data gained from numerical simulation and experiments, the conventional equation for calculating penetration depth was improved.

Key words: numerical simulation; jet; penetration depth; connected target; disconnected target