

# 平头弹对接触式双层靶板破坏模式的研究

孙章腾, 刘 兵

(西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川, 绵阳 621010)

**【摘要】**本文是研究接触式双层靶板对平头弹的抗侵彻性能, 实验发现接触式双层靶的弹道极限高于相同厚度的单层靶, 认为提高其弹道极限的原因是发生较大的弯曲变形, 需要耗散更多的能量, 塞块增大靶板的有效厚度。以能量守恒定理及Chen和Li模型为理论基础, 提出平头弹贯穿接触式双层金属靶后的剩余速度的计算公式。在穿甲过程中, 考虑塞块对终点弹道性能产生的影响, 对相关的平头弹穿甲Weldox 700 E系列钢靶的试验数据进行分析比较。

**【关键词】**平头刚性弹; 接触式双层金属板; 穿甲; 剪切冲塞; 塞块

**【中图分类号】**O385 **【文献标志码】**A **【文章编号】**1673-1891(2015)03-0032-03

DOI:10.16104/j.cnki.xccxb.2015.03.010

## 引言

由于动能弹的穿甲能力不断提高, 应用于军事和民用的防护结构的抗侵彻性能要求越来越高。目前多数防护结构都采用金属板的结构形式, 为了提高金属板的抗侵彻性能, 学者们开始致力于研究双层金属靶板。在民用和军事研究领域, 平头刚性弹侵彻单层金属靶板的研究一直受到高度关注, Borvik等<sup>[1]</sup>研究了靶厚对弹道极限的影响, Dey等<sup>[2]</sup>分析了弹头部形状对终点弹道性能的影响, Chen和Li<sup>[3]</sup>建立了关于平头弹撞击单层金属靶板的理论分析模型, 后又讨论了绝热剪切带对弹道极限的影响<sup>[4]</sup>, 其他研究可参见文献<sup>[5-8]</sup>。而关于双层金属靶板的研究深度和宽度远不及单层靶, 目前对双层靶板的研究仅仅停留在实验研究和数值模拟, 理论分析方面的文献极其有限, 因此迫切需要建立关于双层靶板破坏的理论模型。

近些年来, 关于接触式双层靶的研究工作, Liu等<sup>[9]</sup>研究了材料的分层现象对弹道极限的影响, 认为用多层复合靶板取代昂贵的厚靶板是一种经济有效的手段; Liang等<sup>[10]</sup>认为双层靶板中靶板分层厚度会影响终点弹道性能, 发现第一层靶板厚度占总厚度为0.75时弹道极限最高, 为0.5时则最低; Dey等<sup>[11]</sup>通过实验发现了接触式双层靶与相同厚度的单层靶相比弹道极限增加近50%, 这是由于接触式双层靶的变形和失效形式不同, 除发生剪切冲塞破坏, 平头弹撞击第一层靶的时候, 第二层靶会阻止第一层靶的变形, 耗散更多的能量, 同时弹体需要贯穿的有效靶厚不但包括两层靶板而且也包括第一层靶的冲塞, 另外, 他们对实验进行了数值模拟, 预测结果与实验结果吻合; 张伟等<sup>[12]</sup>通过实验发现接触式双层靶(5+5 mm)的弹道极限是5 mm单层A3

钢靶的1.92倍, 接触式双层靶的第2层靶发生了较大的结构变形, 这种大的结构变形将吸收更多的能量, 也进行了数值模拟, 预测结果与实验结果一致。

本文是在Chen和Li<sup>[3]</sup>模型的基础上, 结合能量守恒, 明确提出平头弹对接触式双层靶板破坏模型, 并给出剩余速度的计算公式。以此为理论基础, 对Dey等<sup>[11]</sup>的平头弹穿甲Weldox700E系列钢靶的实验数据进行系统的分析比较, 讨论接触式双层靶对终点弹道性能的影响。

## 1 分析模型

本文所讨论的双层靶均为接触式双层靶, 平头弹对接触式双层靶的破坏可分为两个阶段, 即将平头弹贯穿第一层靶作为第一阶段, 弹从靶中冲出塞块, 并与塞块共速; 弹与塞块一起侵入并贯穿第二层靶作为第二阶段, 又从第二层靶中塞块, 这样平头弹贯穿双层靶后形成两个塞块。

### 1.1 平头弹对金属靶的剪切冲塞

平头弹撞击金属靶的问题, Chen和Li<sup>[3]</sup>利用刚塑性分析和动态空腔膨胀理论, 建立了剪切冲塞模型, 并考虑了局部撞击响应和整体结构响应, Chen和Li<sup>[3]</sup>给出平头弹穿甲中厚靶的弹道极限 $V_{BL}$ 和剩余速度 $V_r$ , 分别为:

$$V_{BL} = 2 \sqrt{\frac{2\chi(1+\eta)(\eta+\vartheta)}{\sqrt{3}}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{\rho}} \quad (1)$$

$$V_r = \frac{\vartheta V_i + \eta \sqrt{V_i^2 - V_{BL}^2}}{(1+\eta)(\eta+\vartheta)} \geq V_{Jump} \quad (2)$$

其中, 弹质量 $M$ , 弹径 $d$ , 初速 $V_i$ , 靶径 $D$ , 靶厚 $H$ , 无量纲靶厚 $\chi = H/d$ , 靶材的屈服应力和密度 $\sigma_y$ 和 $\rho$ , 有量纲质量 $\eta = \rho \pi d^2 H / 4M$ ,  $\vartheta$ 是倚赖于靶厚和靶径的无量纲数, 其他所需的靶材常数, 可参见Chen and Li<sup>[3]</sup>。另外, 在弹道极限时, 剩余速度存在速度

收稿日期: 2015-04-27

作者简介: 孙章腾(1990-), 男, 工学硕士研究生, 研究方向: 土木工程-结构工程。

$$\text{跳跃 } V_{Jump} = \frac{gV_{BL}}{(1+\eta)(\eta+g)} > 0。$$

### 1.2 对弯曲效应进行无量纲分析

利用刚塑性分析平头弹对金属靶破坏响应是一种比较有效的手段,当遇到高强度荷载作用时,能较好地显现出弹作用于靶的效应。平头弹撞击金属靶板,除剪切破坏外,针对不同厚度的靶板,还有靶板弯曲、膜力拉伸和局部压入、侵彻等的作用。这里将靶板分为薄靶板、中厚靶板、厚靶板。对于薄靶板,结构响应的初级阶段主要是横向剪切变形,当靶板的变形与板的厚度相同时,弯曲效应出现之前横向剪切终止,此时结构效应表现为膜效应;对于中厚靶板,结构响应包括剪切冲塞阶段和弯曲响应阶段;对于厚靶板,靶板的弯曲变形小,可忽略不计。当忽略靶板的膜效应时,在剪切冲塞和靶板弯曲过程中,弯曲铰的位置是不变的。

Chen和Li<sup>[3]</sup>模型中弯曲铰的位置需满足:

$$\frac{\xi}{d} = \frac{\sqrt{3}\chi + \sqrt{1+2\sqrt{3}-6\chi^2}}{2(1-\sqrt{3}\chi)} \quad (3)$$

其中  $\chi = H/d$  通过式(3)可以发现  $\chi < 1/\sqrt{3}$ , 表明弯曲铰的位置由无量纲参数  $\chi$  确定。

由  $d/2 < \xi < D/2$ , 也即  $1/2 < \xi/d < D/2$  可得

$$\chi < \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ \frac{(D/d)^2 - 1}{(D/d + 1)^2 + 2} \right]$$

当  $\frac{1}{\sqrt{3}} \left[ \frac{(D/d)^2 - 1}{(D/d + 1)^2 + 2} \right] \leq \chi < \frac{1}{\sqrt{3}}$  时,弯曲铰的位置为  $\xi = D/2$ 。

当  $\chi \geq 1/\sqrt{3}$  时,弯曲铰不存在,此时  $\xi = d/2$ 。其中,针对中厚靶穿透情形(对应于靶厚  $\chi_1 < \chi \leq \sqrt{3}(A+B\Phi_1)/4$ ),不考虑局部压入/侵彻和膜力拉伸,当  $\chi < 1/\sqrt{3}$  时需考虑靶的弯曲效应。其中  $\chi_1$  是薄靶厚度的经验上限,依赖于靶材和靶径,一般有  $\chi_1 \approx 0.2$ ;  $A$  和  $B$  是考虑局部压入/侵彻时所需的靶材常数,由动态空腔膨胀模型决定,而  $\Phi_1 = \rho v^2/\sigma_y$  是 Johnson 破坏数。

### 1.3 平头弹贯穿双层靶后剩余速度

首先通过 2.1 和 2.2 判断实验参数是否符合无量纲要求,确定其弹道极限,结合能量守恒来计算最终的剩余速度。

假设一质量为  $M$  的平头弹以一定速度  $V_0$  撞击第一层金属靶板  $P_1$ , 冲出塞块的质量为  $m_1$ , 在冲塞形成塞块后,弹体和塞块的剩余总动能  $(M+m_1)V_{r1}^2/2$ , 在击穿前后,有能量守恒方程

$$MV_0^2/2 = (M+m_1)V_{r1}^2/2 + E_q + E_s \quad (4)$$

其中  $E_q$  为弹体和靶元接触时达到瞬时共同速度时所耗能量,  $E_s$  是在弹孔周围由于形成弹孔所耗的能量,它包括对剪切屈服应力做得功、传播出去的热量和通过弹塑性波传播出去的变形能的总和。

根据动量守恒,开始撞击中,达到共速时速度为  $MV_0/(M+m_1)$ , 为了达到共同速度所耗动能为  $E_q = Mm_1V_0^2/(M+m_1)/2$ ; 当  $V_r = 0$ , 可求出  $E_s$ , 这里假定  $E_s$  和撞击速度无关,只与弹道极限有关,  $E_s = M^2V_{BL}^2/(M+m_1)/2$ ,  $V_{BL1}$  由式(1)计算,这样通过式(4)可计算出平头弹贯穿第一层靶后,同塞块一起运动的速度。此时,弹与塞块一起运动,并撞击第二层靶板,初速为  $V_{r1}$ , 通过式(1)可计算  $V_{BL2}$ , 无量纲质量为  $\eta = \rho\pi d^2 H/(M+m_1)/4$ , 再通过式(2)算出弹最终的剩余速度  $V_{r2}$ 。强调一下,平头弹撞击第一层靶板后的剩余速度通过式(4)计算,这主要是考虑到第二层靶板的阻碍作用,涉及到能量的损失。

## 2 实验分析

根据以上分析模型,本文对 Dey 等<sup>[11]</sup>的实验数据作进一步分析,证实实验中现象的存在。

Dey 等<sup>[11]</sup>采用平头弹穿甲(2×6 mm)接触式双层金属靶。靶板采用 Weldox 700E 钢靶,此种材料强度高、延性好;平头弹采用高硬度(约 1900 Mpa)材料,质量为 197 g,直径为 20 mm,长度为 80 mm。平头弹除了初速不一样,其他参数均相同。对于双层靶  $\chi = 6/20 = 0.3 < 1/\sqrt{3}$ 。由 2.2 中可知,2×6 mm 双层靶存在弯曲铰,剪切冲塞过程中弯曲效应对靶板结构响应起着重要作用。

图 1 给出了(2×6 mm)接触式双层金属靶穿甲的终点弹道实验数据,及由上述分析模型给出的理论预期。显然,在低弹速范围内,Weldox 700E 靶材弹道极限的实验结果与理论预期比较一致。在较高弹速存在一定的偏差,由于实验本身的随机性,但理论预期曲线的趋势与实验数据的相近,另外,凡是理论模型都有特定的适用范围。

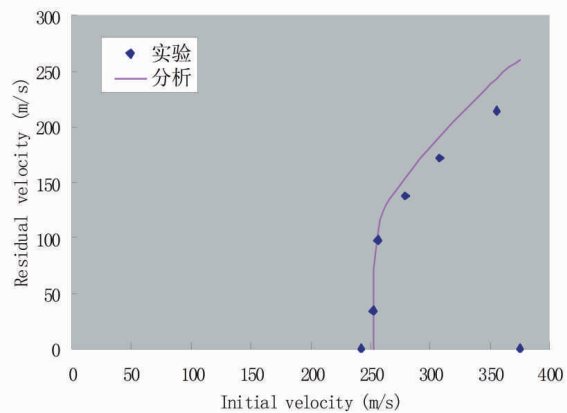


图1 剩余速度的理论预期和实验数据(Weldox 700E)

## 3 讨论

在研究平头弹贯穿穿透接触式双层靶的破坏模式时,传统的理论模型是将接触式双层靶看作两

块单层靶进行理论分析,应用单层靶的R-I公式<sup>[14]</sup>来计算最终的剩余速度。传统理论模型忽略了平头弹贯穿第一层金属靶板时,第二层金属靶板通过弯曲变形耗散能量,对第一层靶板的变形起到阻碍作用,从而提高弹道极限速度,因此通过传统理论模型计算的终点剩余速度相对于实验结果均偏高。本文考虑到双层靶板之间的相互作用,冲出的塞块对终点弹道性能也产生影响,通过能量法计算出贯穿第一层靶板后的剩余速度,应用Chen和Li<sup>[3]</sup>模型计算最终的剩余速度,得到了与实验结果相近的理论预期。

## 5 结语

由于Chen和Li<sup>[3]</sup>模型对平头弹贯穿单层金属靶得到较好的理论预期,本文结合能量法是对Chen和Li模型进一步的拓展应用。以能量守恒和Chen和Li模型为理论基础,明确提出平头弹贯穿接触式双层靶后的剩余速度计算公式,并与实验数据进行系统的分析比较。分析模型的理论预期与试验结果吻合较好。接触式双层金属靶的弹道极限高于相同厚度的单层靶,原因是靶板产生较大的弯曲变形,产生的塞块使平头弹贯穿第二层靶板的有效厚度增大。

### 注释及参考文献:

- [1]Borvik T, Hopperstad OS, Langseth M, Malo KA. Effect of target thickness in blunt projectile penetration of Weldox 460E steel plates. *International Journal of Impact Engineering*[J]. 2003,28(4):413-464.
- [2]Dey S, Borvik T, Hopperstad OS, Leinum JR, Langseth M. The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes. *International Journal of Impact Engineering*[J].2004; 30 :1005-1038
- [3]Chen XW,Li QM. Shear plugging and perforation of ductile circular plates struck by a blunt projectile. *International Journal of Impact Engineering*[J].2003,28(5):513-536.
- [4]Chen XW, Li QM, Fan SC. Initiation of adiabatic shear failure in a clamped circular plate struck by a blunt projectile. *International Journal of Impact Engineering*[J]. 2005,31(7): 877-893.
- [5]Backman ME, Goldsmith W. Mechanics of penetration of projectiles into targets. *International Journal of Engineering Science* [J].1978;16:1-99.
- [6]Anderson Jr CE, Bodner SR. Ballistic impact: the status of analytical and numerical modeling. *International Journal of Impact Engineering*[J].1988; 7:9-35.
- [7]Corbett GG, Reid SR and Johnson W. Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: a review. *International Journal of Impact Engineering*[J].1996;18:141-230.
- [8]Ben Dor G, Dubinsky A, Elperin T. Ballistic impact: recent advances in analytical modeling of plate penetration dynamics—a review. *ASME Applied Mechanics Reviews*[J].2005,58(11): 355-371.
- [9]Liu D,Raju B.B,Dang X. Impact perforation resistance of laminated and assembled composite plates. *International Journal of Impact Engineering*[J].2000,24:733-746.
- [10]Liang C C, Yang M F, Wu P W,Tso L T. Resistant performance of perforation of multi-layered targets using an estimation procedure with marine application. *International Journal of Impact Engineering*[J].2000,24:733-746.
- [11]S.Dey,T.Borvik,X.Teng,T.Wierzbicki,O.S.Hopperstad. On the ballistic resistance of double-layered steel plates:An experimental and numerical investigation. *International Journal of Solids and Structures* [J].2007,44:6701-6723.
- [12]张伟,肖新科,郭子涛,等.双层A3钢靶对平头杆弹的抗侵彻性能研究[J].*高压物理学报*,2012,26(2):163-170.
- [13]Chen XW,Li QM.Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics. *International Journal of Impact Engineering*[J].2002,27(6):619-637.
- [14] Recht RF, Ipson TW. Ballistic perforation dynamics. *Journal of Applied Mechanics*[J]. 1963,30:385-391.

## Perforation Modes of Double-layered Plates Struck by a Blunt Rigid Projectile

SUN Zhang-teng, LIU Bing

(School of Civil Engineering, Southwest University of Science & Technology, Mianyang, Sichuan 621010)

**Abstract:** The thesis aims at exploring the perforation of double-layered plates in contact struck by a blunt rigid projectile. The experiment shows that the ballistic limit of a double-layered target is higher than a monolithic target's. The thesis considers that the higher ballistic limit lies in the great bending deformation which requires more

(下转第38页)

## Qualitative Mapping Polarized Identity and Application in Digital Image Encryption

GUO Hong-jun<sup>1</sup>, CHEN Li-li<sup>1,2</sup>, CHI Xue-dong<sup>1</sup>

(1.Laboratory of Intelligent Information Processing, Suzhou University, Suzhou, Anhui 234000;

2.The Key Laboratory of Intelligent Computing & Signal Processing of MOE, Anhui University, Hefei, Anhui 230039)

**Abstract:** Cryptography, attribute theory and other disciplines of knowledge have been combined, and an image encryption algorithm based on Arnold transform and qualitative mapping polarization identity has been proposed to solve the problem of data encryption in information security. Taking still gray image as the object of study, simulation experiments have been carried out by using Matlab. The experimental results show that the algorithm is feasible and safe.

**Key words:** qualitative mapping; polarized identity; Arnold transform; digital image encryption

---

(上接第 34 页)

energy consumptions and the plug has extended the effective thickness of target. Based on the laws of conservation of energy and the model of Chen and Li, the calculation formula of residual velocity can be put forward after the blunt projectile penetrates the double-layered plate. In the process of armor-piercing, considering about the influence of the plug on the property of terminal ballistic limit, the thesis has compared and analyzed the relevant experimental data about blunt projectile piercing the plates from Weldox 700E series.

**Key words:** blunt rigid projectile; double-layered plates in contact; perforation; shear plugging; plug