文章编号：1000-5773(2012)02-0163-08

双层 A3 钢靶对平头杆弹的抗侵彻性能研究*

张　伟，肖新科，郭子涛，慕忠成，魏　刚

（哈尔滨工业大学高速撞击研究中心，黑龙江哈尔滨　150080）

摘要：钢板被广泛用于构建防护结构，大量文献报道了单层金属靶的防护性能，而对双层金属靶，特别是大间隙双层金属靶，报道的却很少。在轻气炮上进行了平头杆弹体正撞击由两层 5 mm 厚 A3 钢板组成的接触式和具有 200 mm 间隙的间隙式双层靶的实验研究，得到了两种结构的初始-剩余速度曲线。实验表明：(1) 两种形式双层靶均发生了充塞剪切；(2) 接触式双层靶的弹道极限是 5 mm 单层 A3 靶的 1.92 倍；(3) 间隙式双层靶的抗侵彻性能具有较大的分散性，通过高速摄像和对回收靶板的分析表明，该分散性产生的原因是，弹体贯穿第一层靶后存在两种典型弹道状态；(4) 间隙式双层靶存在两个弹道极限；(5) 接触式双层靶的弹道极限接近或者大于间隙式双层靶的弹道极限。使用 ABAQUS/EXPLICIT 有限元软件进行了相应的数值模拟，得到了与实验一致的现象和结果。

关键词：侵彻和贯穿；双层金属靶；弹道极限；数值模拟

中图分类号：O347；O385　　**文献标识码**：A

1　引　言

虽然先进轻质复合材料越来越多地应用于防护结构的设计中，但鉴于轧制钢板的比强度高、高塑性，具有良好的承载能力和可加工性，以及价格低廉，因此轧制钢板仍旧是防护领域应用最广泛的材料之一，即军用和民用的防护构件经常由钢板构建而成，或者防护构件中至少包含有钢板。这种结构按照板材的结构形式可分为单层和多层，而多层结构又包括各层直接相邻的接触式多层靶和层间具有一定间隙的间隙式多层靶[1]，比如大型舰船或者航空母舰普遍采用多层间隔式的防护结构[2]。同时，随着防御体系的发展，一些具有重要战略价值的军事目标都采用多层防护[3]。

在亚弹速范围内，单层金属靶对杆弹的抗侵彻性能及其典型的变形和破坏形式均得到了比较充分的研究，其中代表性的研究工作可在几个重要的综述文献中找到，如 Backman 和 Goldsmith[4]、Corbett 等[5]、Goldsmith[6]、Zukas[7]、Borvik 及其合作者[8]和陈小伟等[9]。而对双层金属靶的研究（包括实验、数值模拟和理论分析），无论是文献报道的数量还是报道的广度和深度都远不及单层靶，在公开的文献中仅可见一些零星的报道，如文献[1,10-17]。正如同 Dey 等[1]所言："尽管类似的文献还可以找到，但是对多层靶的研究依然非常少，并且这些不同的文献其结论往往相背，目前很难比较不同文献中的实验结果"。特别地，对间隙式双层靶的抗侵彻性能的研究鲜见报道，对大间隙双层金属靶对杆弹撞击的防护性能以及物理过程的认识还十分缺乏。

本研究使用单层厚度为 5 mm 的 A3 钢板，组成 5＋5 的接触式双层靶和 5＋200＋5 的间隙双层靶，其中 200 表示的为两层靶中间具有 200 mm 的间隙（即 200 mm 的空气层），通过实验和数值仿真，研究双层靶在平头杆弹撞击下的变形和破坏形式，以及双层靶的抗侵彻性能。同时，为了比较双层金属靶相比单层金属靶的抗侵彻性能，进行了部分 5 mm 厚 A3 钢靶的侵彻实验。实验结果表明，单层靶和两种

* **收稿日期**：2010-08-11；**修回日期**：2011-03-15

作者简介：张　伟(1964—)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事冲击动力学研究. E-mail：zhdawei@hit.edu.cn

形式的双层金属靶均发生充塞剪切破坏;间隙式双层靶的抗侵彻性能具有较大的离散性,高速摄像表明,该离散性是由于弹体贯穿第一层靶后存在两种典型弹道状态造成的;间隙式双层靶存在一高、一低两个弹道极限;接触式双层靶的弹道极限略低于间隙式双层靶的最高弹道极限。结合材料性能测试的数值模拟,得到了与实验一致的现象和结果。

2 实验系统与方法

实验是在哈尔滨工业大学高速撞击研究中心的二级轻气炮上进行的。该测试设备主要包括:高压气室;57 mm 口径的一级炮管;12.7 mm 口径、3 m 长的发射管;靶仓;测试仓;激光测速系统;高速摄像系统等。弹体的撞击速度由高压气室里的充气压力以及发射管前的膜片的厚度以及材料(钢或铝)决定。实验中使用的高速摄像机型号为 ultima APX-RS,采用的帧率为 36 000 s^{-1}。弹体贯穿靶板后的剩余速度由高速摄像照片判读,整个实验装置如图 1 所示。

靶板为 5 mm 厚的 A3 钢,正方形靶板尺寸为 250 mm×250 mm,靶板四周加工有螺栓孔,通过 8 个 M8 螺栓与靶架固定起来,靶板的自由跨度为 210 mm×210 mm。平头圆柱弹体由经特殊热处理的 38CrSi 钢加工而成,直径为 12.62 mm,长度为 38.1 mm。为了保证弹体可以正撞击靶板,将弹体的后端挖去一个直径为 6.2 mm、长度为 10 mm 的孔,使弹体的质心前移。

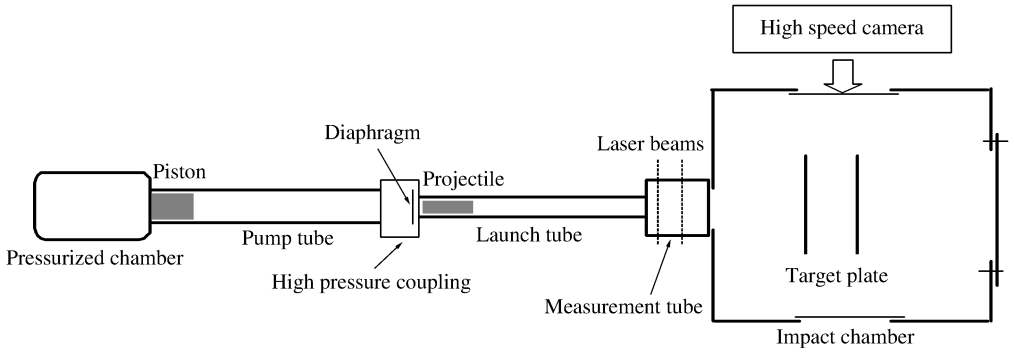


图 1 撞击实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of impact experiment set-up

3 实验结果及讨论

3.1 弹道极限

对于 5+200+5 靶板(记为 SD 靶),一共进行了 10 发实验,其中有 3 发实验其弹体未能穿靶,在其余 7 发实验中弹体均贯穿两层靶板;对于 5+5 接触式双层靶(记为 ID 靶),一共进行了 6 发实验,其中 1 发实验的弹体未能贯穿靶板,其余 5 发实验中的弹体均贯穿靶板;对于 5 mm 厚的单层 A3 钢靶(记为 M 靶),一共进行了 8 发实验,同时,通过测量弹体贯穿间隙式双层靶 5+200+5 的第一层靶后的剩余速度,也得到了部分实验数据。表 1 给出了得到的初始-剩余速度数据,表中 v_i 和 v_r 分别表示弹体的初始撞击速度和贯穿靶后的剩余速度。

文献中经常使用 Recht 和 Ipson[18] 提出的公式(R-I 公式)处理弹体的剩余速度-初始速度关系,并得到弹靶系统的弹道极限,该公式写为

$$v_r = a(v_i^p - v_{bl}^p)^{1/p} \tag{1}$$

式中:v_i 为弹体初始撞击速度,v_r 为弹体贯穿靶板后的剩余速度,v_{bl} 为弹道极限速度,a 和 p 为待定常数。a 和 p 可以通过对实验或者数值模拟得到的弹体的初始-剩余速度数据进行最小二乘拟合得到。

表 1 3 种 A3 钢靶侵彻实验结果

Table 1 Penetration test results of three A3 steel target configurations

Parameter	SD target									
	SD1	SD2	SD3	SD4	SD5	SD6	SD7	SD8	SD9	SD10
v_i/(m/s)	256.0	273.1	358.0	423.7	439.5	477.0	518.7	540.5	647.0	360.0
v_r/(m/s)	—[a]	—[a]	199.0	149.8	186.1	275.0	285.6	276.9	422.7	—[a]

Parameter	ID target						M target					
	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6	S1	S2	S3	S4	S5	S6
v_i/(m/s)	337.0	385.0	463.0	496.0	528.5	615.8	256.0	273.1	274.0	303.0	326.0	358.0
v_r/(m/s)	—[a]	70.9	158.3	235.0	288.0	344.4	189.6	203.6	219.0	224.9	246.0	280.0

Parameter	M target										
	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17
v_i/(m/s)	375.0	399.0	409.0	423.7	439.5	477.0	480.0	518.7	540.5	618.0	647.0
v_r/(m/s)	301.0	337.0	337.0	353.6	186.1	413.2	390.8	445.0	451.3	461.0	568.0

Note: a. The projectile only perforates the first plate.

图 2 给出了弹体侵彻靶板的初始-剩余速度数据,从图中可以看出:(1) 5+200+5 的大间隙双层金属靶的抗侵彻性能离散性较大,其初始-剩余速度数据大致可分为两组,也即该结构存在两个弹道极限(其原因在后文详述);(2) 5+5 接触式双层金属靶的弹道极限接近或者大于 5+200+5 的大间隙双层金属靶的弹道极限。

表 2 给出了依据公式(1)拟合得到的模型参数。由表 2 可以看出, 5+5 双层靶的弹道极限远高于 5 mm 单层靶弹道极限,根据公式(1),前者的弹道极限是后者的 1.92 倍。

表 2 A3 钢靶的弹道极限及模型参数

Table 2 Ballistic limits and model constants of A3 targets

Target	Experiment			Calculation		
	a	p	v_{bl}	a	p	v_{bl}
M	0.84	3.2	187.5	0.82	3.6	196.9
ID	0.84	1.55	362.4	0.85	1.76	378.8
SD	$0.69^{(1)}$	$3.03^{(1)}$	$402.9^{(1)}$	$0.71^{(1)}$	$3.53^{(1)}$	$418.4^{(1)}$
	$0.66^{(2)}$	$2.88^{(2)}$	$273.1^{(2)}$	$0.66^{(2)}$	$3.42^{(2)}$	$271.8^{(2)}$

Note: (1) The projectile plus the plug from the first plate penetrate the second plate as a whole.
(2) The projectile penetrates the second plate alone.

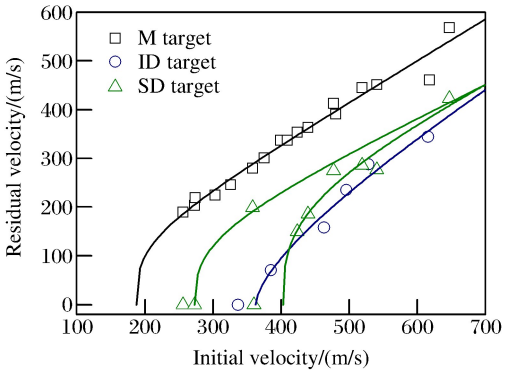


图 2 弹体贯穿 A3 钢靶的初始-剩余速度

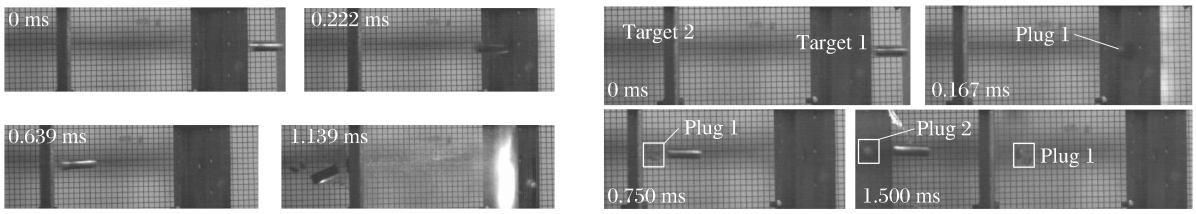
Fig. 2 Initial versus residual velocity of projectiles in perforation of A3 steel targets

通过分析实验中获得的高速摄像照片,可以找到大间隙双层金属靶抗侵彻性能具有较大分散性的原因,从照片中可见,当弹体贯穿第 1 层靶板之后弹体和第 1 层靶的充塞可能会:先后撞击到第 2 层靶的同一个位置(情形Ⅰ);分别撞击到第 2 层靶的不同位置(情形Ⅱ)。图 3 给出了高速摄像机捕捉到的大间隙双层金属靶的两种典型实验工况。这两种不同的撞击情形将导致不同的能量吸收机制(在下文详述),因此使初始-剩余速度分为两组,即存在两个弹道极限。

3.2 靶板的变形和破坏形式

图 4 给出了在典型工况中回收到的弹体以及靶体的冲塞,图 5 给出了典型实验中被贯穿了的靶板。可以看出:靶板的失效模式为剪切充塞。从图 4 可以看出,弹体除了将 ID 靶冲出两个塞子外,还冲出了一个圆环,这个圆环是第 1 层靶中产生的塞块在弹体的冲击和第 2 层靶支撑作用下产生的,类似的实验现象可在文献[1]中找到。同时从图 5(b)和图 5(c)可以看出,接触式双层靶的第 2 层靶发生了较大的

结构变形,类似的实验结果可见文献[1]。图 5(d)和图 5(e)分别展示了大间隙双层金属靶的两种撞击情形,即在图 5(d)中弹体和来自于第 1 层靶的塞块同时撞击到第 2 层靶的同一个位置上,并一起贯穿了第 2 层靶;而在图 5(e)中弹体和来自于第 1 层靶的塞块分别撞击在第 2 层靶的不同位置,弹体独自撞击到了第 2 层靶上,当弹体撞击第 1 层靶之后的剩余速度足够高时便能贯穿第 2 层靶板,由于塞块的质量和速度不够大,因此塞块仅在第 2 层靶上产生了一个撞击坑,而未能贯穿第 2 层靶板。



(a) Scenario Ⅰ (b) Scenario Ⅱ

图 3 5+200+5 双层金属靶的两种典型撞击工况

Fig. 3 Two classical impact scenarios of 5+200+5 metallic double-layered targets

同时,由图 5(d)和图 5(e)可以看出:相比撞击情形Ⅱ,撞击情形Ⅰ中的第 2 层靶发生较大的结构变形,这种大的结构变形将吸收更多的能量。这就是撞击情形Ⅰ中双层靶弹道极限较高的原因。

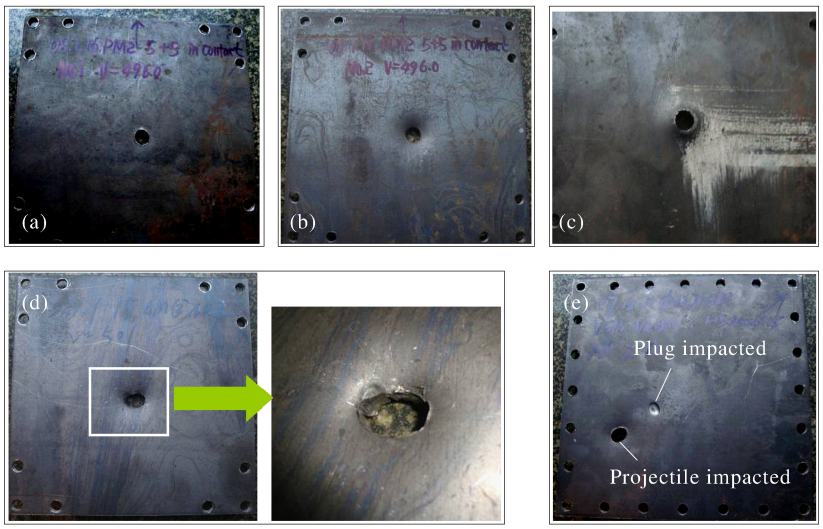


(a) 5+5 (b) 5+200+5

图 4 双层靶实验中回收到的弹体以及破片

Fig. 4 Recovered projectiles and fragments in the double-layered target experiments

值得注意的是,在 SD 靶的撞击情形Ⅰ中,弹体和塞块先后撞击到第 2 层靶的同一个位置上,即类似于 ID 靶的撞击过程,但是在 SD 靶中未见到圆环状的冲出破片,这可能是由塞块和弹体的撞击点重合不够好造成的。在图 5(d)中贯穿孔的周围可看到一个小的撞击坑,该撞击坑可能就是由稍微偏离弹体撞击位置的塞块撞击产生的。



(a) The front surface of the first plate in experiment ID4; (b) The front surface of the second plate in experiment ID4; (c) The rear surface of the second plate in experiment ID4; (d) The front surface of the second plate of an SD target for impact scenario Ⅰ; (e) The front surface of the second plate of an SD target for impact scenario Ⅱ

图 5 被贯穿的双层 A3 钢靶

Fig. 5 Perforated double-layered A3 steel targets

3.3　间隙式双层靶弹道极限

在 SD 靶的撞击情形Ⅱ中,弹体依次独自地撞击两层 5 mm 单层靶,因此其弹道极限可以由 5 mm 单层靶的 Recht 和 Ipson 公式[18]给出,即弹体以 5 mm 单层靶的弹道极限速度(即 187.5 m/s)撞击第 2 层靶时,弹体刚好可以贯穿第 2 层靶,且剩余速度为零。而弹体以 187.5 m/s 的速度撞击第 2 层靶,也就是弹体贯穿第 1 层靶后的剩余速度为 187.5 m/s,那么此时弹体应以速度 $v_{\mathrm{bl\text{-}SD\,II}}$ 撞击第 1 层靶,$v_{\mathrm{bl\text{-}SD\,II}}$ 即为 SD 靶撞击情形Ⅱ的弹道极限。根据 5 mm 单层靶的 R-I 公式[18]有

$$187.5 = 0.84(v_{\mathrm{bl\text{-}SD\,II}}^{3.2} - 187.5^{3.2})^{1/3.2} \tag{2}$$

求解公式(2)可得 $v_{\mathrm{bl\text{-}SD\,II}}=257.1$ m/s,而实验得到的该弹道极限为 273.1 m/s(见表 2),即本研究的预测方法给出的预测值与实验实测值的误差低于 6%。

撞击情形Ⅰ中的 SD 靶和 ID 靶的弹道极限一般不宜由此类工程公式给出。

4　数值模拟

4.1　计算模型

数值模拟均采用通用有限元软件 ABAQUS/EXPLICIT 6.9 的拉格朗日求解器进行。为了可以将实际侵彻过程中所有可能的接触作用包括在内,将模型建立在 ABAQUS 的三维模型中。同时,为控制计算规模,利用实际结构的轴对称特点建立 1/72 的整体模型(即二维轴对称模型绕对称轴旋转 5°),间隙式双层靶的模型如图 6 所示,单层靶和接触式双层靶的计算模型与图 6 类似。在该计算模型中,靶板简化为直径 220 mm 的圆板,其四周节点的位移为零;靶板的空间离散采用过渡网格,弹体直接撞击部分的靶板网格尺寸约为 0.20 mm×0.208 mm×0.208(即在 5 mm 靶板的厚度方向上划分为 24 个单元);由于弹体在实验中的变形不明显,模拟中弹体在轴对称平面内的网格尺寸约为 1.0 mm×1.0 mm;弹体与靶板之间具有 0.5 mm 的初始距离;不考虑弹靶以及靶和靶之间的摩擦作用。同时,为了减少计算时间,计算中将 5+200+5 间隙式双层靶之间的间隙由 200 mm 减少至 10 mm,这样的处理方法并不引起物理本质的差别,类似的处理方法可参见文献[1]。靶板中受弹体直接撞击区域的单元为 C3D6R,靶板中其它区域的单元类型为 C3D8R;弹体的单元类型为 C3D6R 和 C3D8R。在 5+5 接触式双层靶的计算模型中,两层 5 mm 的靶板在空间上直接相邻而无连接,即靶板之间可以传递压载荷,而无法传递拉伸或者剪切载荷。

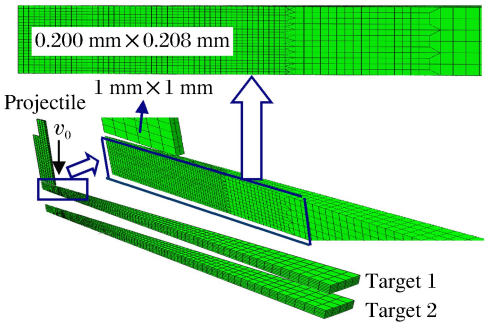


图 6　5+10+5 双层靶的有限元模型

Fig. 6　Finite element model of the 5+10+5 double-layered target

同时,为了揭示不同撞击情形下 SD 靶抗侵彻性能的差异,对 SD 靶的模拟给出两种计算模型:(a) 撞击情形Ⅰ中,第 1 层靶的冲塞可以与第 2 层靶相互作用;(b) 撞击情形Ⅱ中,忽略第 1 层靶的冲塞与第 2 层靶的接触作用。

在实验中,38CrSi 弹体仅发生非常有限的变形,由于缺少弹体的材料性质参数,近似认为 38CrSi 材料与文献[1]中的弹体材料性能相同。文献[1]中对弹体使用的为弹性线性强化材料模型,相关材料参数可从文献[1]中获取。

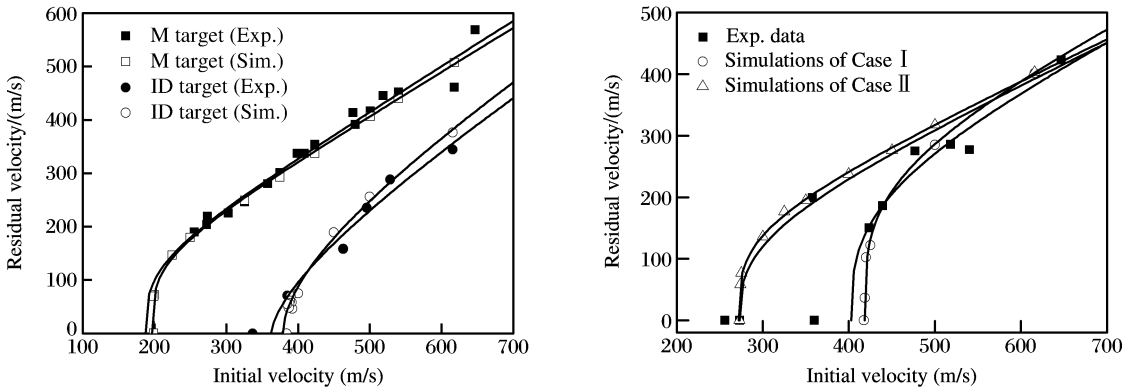
对于 A3 钢,使用 Johnson-Cook (J-C)强度和失效模型。使用 1.91 mm 厚、10 mm 宽的板材拉伸试样进行了单向拉伸实验,给出了 A3 钢 J-C 强度模型中的应变强化项。实验表明:在参考应变率为 1.1×10^{-3} s^{-1} 时,屈服强度 $A=229.0$ MPa,$B=439.0$ MPa,$n=0.503$。其余材料参数选自文献[19]。

4.2 计算结果

图 7 给出了通过数值模拟得到的初始-剩余速度数据，以及由 R-I 公式得到的拟合曲线，R-I 公式参数见表 2。为了说明数值模拟的有效性，图 7 一并给出了实验数据和实验的 R-I 公式拟合曲线。从图 7 和表 2 可见，数值模拟预测的初始-剩余速度数据与实验有非常好的一致性，对于 M 靶、ID 靶和 SD 靶的撞击情形Ⅰ和Ⅱ来说，预测的弹道极限与实验值的误差分别为 5.0%、4.5%、3.8%和−0.5%。

特别地，对于 SD 靶两种撞击情形的模拟得到了与实验相符的结果，证实了撞击情形对于 SD 靶抗侵彻性能的影响。

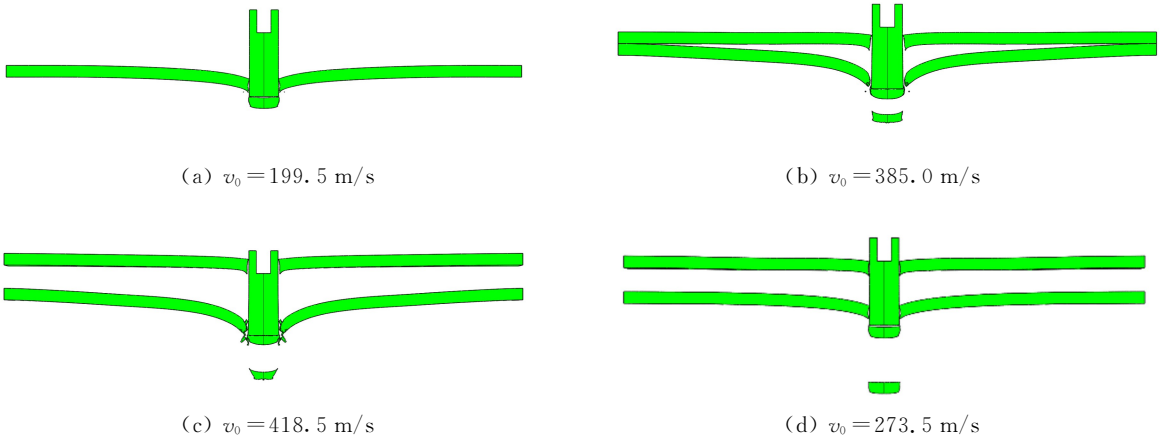
图 8 给出了弹体以略高于相应弹道极限速度侵彻靶板的贯穿图像，可以看出：(1) 所有靶板在平头弹的侵彻下均发生冲塞破坏；(2) ID 靶的第 2 层靶板以及 SD 靶撞击情形Ⅰ中的第 2 层靶板发生较大的结构变形。这些预测结果与实验结果是一致的。



(a) Monolithic target and double-layered target in contact (b) Double-layered target with gap space

图 7 实验与数值模拟得到的初始-剩余速度数据比较

Fig. 7 Comparison of the initial-residual velocity data between experimental results and numerical simulations



(a) v_0 = 199.5 m/s (b) v_0 = 385.0 m/s

(c) v_0 = 418.5 m/s (d) v_0 = 273.5 m/s

图 8 数值模拟得到的靶板贯穿图像

Fig. 8 Pictures of the perforated targets obtained by numerical simulations

5 结 论

通过实验和数值模拟，研究了由 5 mm 厚的 A3 钢板构成的 5 mm 单层靶、5＋5 接触式双层靶和 5＋200＋5间隙式双层靶对平头杆弹的抗侵彻能力，得到如下结论。

(1) 实验发现 3 种靶板结构均发生充塞剪切破坏。

(2) 通过实验得到了 3 种靶板结构的初始-剩余速度数据,并通过拟合公式得到了各自的弹道极限。单层靶、接触式双层靶的弹道极限分别为 187.5 和 362.4 m/s;间隙式双层靶的初始-剩余速度数据具有较大的离散性,且大致可分为两组,即具有两个弹道极限 402.9 和 273.1 m/s。

(3) 接触式双层靶的弹道极限是 5 mm 单层 A3 钢靶的 1.92 倍。

(4) 大间隙双层金属靶具有两个弹道极限的原因是,弹体贯穿第 1 层靶后存在两种典型弹道状态,即弹体和来自于第 1 层靶的塞块先后撞击到第 2 层靶的同一个位置上,或者弹体和塞块分别撞击到第 2 层靶的不同位置上。相比第 2 种情形,第 1 种情形中第 2 层靶板发生较大的结构变形,因此前者需要更大的撞击速度才能贯穿第 2 层靶。

(5) 数值模拟可以成功预测 3 种靶板在弹体侵彻下发生剪切破坏以及双层靶的第 2 层靶可能发生的较大结构变形。

(6) 数值模拟给出的初始-剩余速度预估值与实验值具有很好的一致性,预估的弹道极限与实验值的误差不超过 5.0%。特别地,对间隙式双层靶的模拟证实了两种撞击情形的存在。

References:

[1] Dey S, Børvik T, Teng X, et al. On the ballistic resistance of double-layered steel plates: An experimental and numerical investigation [J]. Int J Solids Struct, 2007, 44(20): 6701-6723.

[2] Liang C C, Yang M F, Wu P W, et al. Resistant performance of perforation of multi-layered targets using an estimation procedure with marine application [J]. Ocean Eng, 2005, 32(3-4): 441-468.

[3] Ji X, Wang L. Numerical analysis of projectile penetrating in to multilayer spaced metal plates [J]. Journal of Detection & Control, 2006, 28(2): 42-45. (in Chinese)
纪　霞, 王　利. 弹丸侵彻多层靶板数值分析 [J]. 探测与控制学报, 2006, 28(2): 42-45.

[4] Backman E M, Goldsmith W. The mechanics of penetration of projectiles into targets [J]. Int J Eng Sci, 1978, 16(1): 1-99.

[5] Corbett G G, Reid S R, Johnson W. Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: A review [J]. Int J Impact Eng, 1996, 18(2): 141-230.

[6] Goldsmith W. Non-ideal projectile impact on targets [J]. Int J Impact Eng, 1999, 22(2-3): 95-395.

[7] Zukas J A. High Velocity Impact Dynamics [M]. New York: John Wiley & Sons, 1990.

[8] Borvik T, Dey S, Hopperstad O S, et al. On the main mechanisms in ballistic perforation of steel plates at sub-ordnance impact velocities [A]// Hiermaier S. Predictive Modeling of Dynamic Processes [C]. Berlin: Springer, 2009: 189-219.

[9] Chen X W, Liang G J, Yao Y, et al. Perforation modes of metal plates struck by a blunt rigid projectile [J]. Chin J Theor Appl Mech, 2009, 41(1): 84-90. (in Chinese)
陈小伟, 梁冠军, 姚　勇, 等. 平头弹穿透金属靶板的模式分析 [J]. 力学学报, 2009, 41(1): 84-90.

[10] Marom I, Bodner S R. Projectile perforation of multi-layered beams [J]. Int J Mech Sci, 1979, 21(8): 489-504.

[11] Corran R S J, Shadbolt P J, Ruiz C. Impact loading of plates—An experimental investigation [J]. Int J Impact Eng, 1983, 1: 3-22.

[12] Radin J, Goldsmith W. Normal projectile penetration and perforation of layered targets [J]. Int J Impact Eng, 1988, 7(2): 229-59.

[13] Teng X, Dey S, Børvik T, et al. Protection performance of double-layered metal shields against projectile impact [J]. J Mech Mater Solids, 2007, 2(7): 1307-1328.

[14] Gupta N K, Iqbal M A, Sekhon G S. Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on the deformation behavior of layered plates [J]. Int J Impact Eng, 2008, 35(1): 37-60.

[15] Teng X, Wierzbicki T, Huang M. Ballistic resistance of double-layered armor plates [J]. Int J Impact Eng, 2008,

35(8):870-884.

[16] Iqbal M A,Chakrabartia A,Beniwala S,et al. 3D numerical simulations of sharp nosed projectile impact on ductile targets [J]. Int J Impact Eng,2010,37(2):185-195.

[17] Iqbal M A,Gupta N K. Ballistic limit of single and layered aluminium plates [J/OL]. Strain,2011,47(Sup 1):e205-e219. http://onlinelibrary. wiley. com/doi/10. 1111/j. 1475-1305. 2008. 00601. x/full

[18] Recht R F,Ipson T W. Ballistic perforation dynamics [J]. J Appl Mech,1963,30:384-90.

[19] Chen X W,Chen G,Zhang F J. Deformation and failure modes of soft steel projectiles impacting harder steel targets at increasing velocity [J]. Exp Mech,2008,48(3):335-354.

Investigation on the Ballistic Resistance of Double-Layered A3 Steel Targets Against Blunt Projectile Impact

ZHANG Wei,XIAO Xin-Ke,GUO Zi-Tao,MU Zhong-Cheng,WEI Gang

(*Hypervelocity Impact Research Center,Harbin Institute of Technology,Harbin* 150080,*China*)

Abstract:Steel plates are widely used to construct resistant structures,and a lot of literature report on the ballistic resistance of metallic monolithic target. However,few reports can be found for double-layered target (DLT),especially the one with large gap space. Experimental study was conducted on the DLTs of both in contact (I-DLT) and with 200 mm gap space(S-DLT) by using a gas gun to fire blunt projectiles. Each DLT was made of two A3 steel plates with the thickness of 5 mm. From the experiments, initial-residual velocity curves were obtained. The experimental observations are as follows. Firstly, both configurations of DLT suffer from shear plugging. Secondly,the ballistic limit of I-DLT is 1. 92 times of that of 5 mm thick monolithic target. Thirdly,the ballistic resistance of S-DLT yield to large divergence. The large divergence,according to the high speed photograph and the recovered targets,is caused by the two classical different trajectory statuses of the projectile after perforation of the first plate. Fourthly,there are two ballistic limits for S-DLT. Finally,the ballistic limit of I-DLT is close to or greater than that of S-DLT. Parallel numerical simulations were conducted by ABAQUS/EXPLICIT,and the experimental phenomena and results were well predicted.

Key words:penetration and perforation;double-layered metallic target;ballistic limit;numerical simulation