DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0024-07

平头弹穿透间隙式双层靶的穿甲模式*

刘 兵[1],陈小伟[1,2]
(1.西南科技大学土木工程与建筑学院,四川 绵阳 621010;
2.中国工程物理研究院总体工程研究所,四川 绵阳 621999)

摘要:平头弹贯穿单层金属靶,随着靶厚的增加和弹速的增高,穿甲模式均可能由剪切冲塞向绝热剪切冲塞转换。因此,对于双层或多层靶的穿甲,其不同层的靶板失效模式可能是不同的。本文中对相关的平头弹穿甲 Weldox 700E 单层及双层间隙式钢靶的实验数据进行分析,讨论其穿甲模式。弹速较高时,贯穿第 1 层靶发生绝热剪切失效,弹速降低,贯穿第 2 层靶板发生绝热剪切失效或剪切冲塞失效,最终失效模式为绝热剪切和剪切冲塞混杂。

关键词:固体力学;穿甲模式;剪切冲塞;间隙式双层靶;绝热剪切冲塞;单层靶
中图分类号:O385 **国标学科代码**:1301540 **文献标志码**:A

在军事应用和民用防护中,平头弹穿甲金属板起着重要作用。随着实验技术的提高、计算机的发展和相关理论的提出,平头弹对单层靶破坏模式得到了较充分的认识。近年来,双层靶的穿甲破坏模式研究受到广泛关注,但还远不及单层靶,对双层靶研究的深度和宽度也很有限。目前主要手段为实验研究和数值模拟,缺乏失效模式的理论模型。

S. Dey 等[1]通过实验,研究了平头弹对双层靶以及相同厚度的单层靶的侵彻性能,认为双层靶比单层靶的弹道极限高是由于两者的变形和失效形式不同,双层靶产生较大的弯曲变形,耗散更多能量。张伟等[2]通过实验发现(2×5+200) mm 间隙式双层靶结构发生冲塞剪切破坏,认为来自于第 1 层靶板的塞块对靶板的弹道极限产生影响。X. Teng 等[3]通过 ABAQUS/EXPLICIT 软件建立二维轴对称模型,结果表明,将单层靶分为两层时对平头弹的抗侵彻能力提高 7%~25%。R. L. Woodward 等[4]分析认为,第 1 层为厚靶时发生冲塞破坏,较薄时发生碟形破坏,同时假定后层靶板的失效模式为碟形破坏。邓云飞等[5]通过实验,研究了间隙对 A3 钢薄板抗尖卵形弹侵彻性能的影响,认为间隙大小对靶体抗侵彻性能和失效模式影响不大;C. C. Liang 等[6]认为,间隙对双层靶的弹道极限影响较小,并基于动量守恒和动能守恒以及 R. F. Recht 等的工作[7]对剩余速度进行预报,其预测结果与文献[8]中的实验结果相近。总之,无论单/双层靶或多层靶穿甲,其最终的终点弹道性能与靶板的穿甲失效模式相关,并进一步导致能量及动量的不同分配。

双层靶板结构形式分为接触式和间隙式。本文中,利用相关理论模型[9-10],研究间隙式双层靶的失效模式,提出平头弹穿甲间隙式双层靶板存在不同破坏模型,并给出剩余速度的计算公式。以此为理论基础,对平头弹穿甲 Weldox E 系列钢靶的实验数据[1]进行系统的分析。

1 模 型

1.1 剪切冲塞模型

针对平头刚性弹撞击金属圆板问题,X. W. Chen 等[9]利用刚塑性分析建立剪切冲塞模型,并将局部撞击响应和整体结构响应相结合。除剪切破坏外,针对不同厚度的靶板,模型中还考虑了靶板弯曲、膜力拉伸和局部压入/侵彻等的作用。

* **收稿日期**:2014-07-03;**修回日期**:2015-02-06
基金项目:国家自然科学基金国家杰出青年科学基金项目(11225213)
第一作者:刘 兵(1987—),男,硕士,工程师;**通讯作者**:陈小伟,chenxiaoweintu@yahoo.com。

设弹质量 M，弹径 d，初速 v_i；靶径 D，靶厚 H，量纲一靶厚 $\chi=H/d$，靶材的屈服应力 σ_y，密度 ρ。有量纲一质量 $\eta=\rho\pi d^2H/(4M)$。这里只考虑中厚靶穿透情形（$\chi_1<\chi\leqslant\sqrt{3}\,(A+B\Phi_J)/4$），不计及局部压入/侵彻和膜力拉伸，当 $\chi<1/\sqrt{3}$ 时需考虑靶的弯曲效应。其中：χ_1 是薄靶厚度的经验上限，与靶材和靶径有关，一般有 $\chi_1\approx0.2$；A 和 B 是考虑局部压入/侵彻时的靶材常数，由动态空腔膨胀模型决定，而 $\Phi_J=\rho v^2/\sigma_y$，是 Johnson 破坏数。

平头弹穿甲中厚靶的弹道极限和剩余速度分别为[9]：

$$\begin{aligned} v_{BL}&=2\sqrt{\frac{2\chi(1+\eta)\,(\eta+\vartheta)}{\sqrt{3}}}\sqrt{\frac{\sigma_y}{\rho}}\\ v_r&=\frac{\vartheta v_i+\eta\sqrt{(v_i^2-v_{BL}^2)}}{(1+\eta)\,(\eta+\vartheta)}\geqslant v_{jump}\end{aligned}\tag{1}$$

式中：v_{BL} 为靶板弹道极限，ϑ 是与靶厚和靶径相关的量纲一数。在弹道极限时，剩余速度存在速度跳跃 $v_{jump}=\dfrac{\vartheta v_{BL}}{(1+\eta)\,(\eta+\vartheta)}>0$。

1.2　绝热剪切冲塞模型

穿甲问题是个绝热过程，随着靶厚和靶材强度的增加，靶板失效模式并不是单一的剪切冲塞，穿甲模式有可能发生由剪切冲塞向绝热剪切冲塞转换，或是两者的混合。在穿透情形发生绝热剪切失效时，相应临界速度 v_A 为[10]：

$$\left[a+b\left(\frac{\sqrt{3}}{2\alpha}\right)^n\right]^2\left[1+c\ln\left(\frac{2(\eta+\vartheta)}{\alpha\left[v_A-\sqrt{(v_A^2-v_{BL}^2)}\right]\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]=\frac{nb\rho c_V(T_m-T_r)}{\beta}\left(\frac{\sqrt{3}}{2\alpha}\right)^{n-1}\tag{2}$$

方程(2)给出了绝热煎切临界速度 v_A 与靶厚、靶材参数（强度、密度和力学性能等）以及弹体参数之间的关系（几何形状和质量）。

在绝热剪切冲塞穿甲模式中，其终点弹道性能相对较复杂，需分别考虑[11-12]。

(1) $v_A\leqslant v_{BL}$

绝热剪切失效先于剪切冲塞穿甲发生，可认为穿甲模式为绝热剪切冲塞，该状况对应于较大厚度靶板，无需计及靶板的结构响应[10]。弹道极限应修正为：

$$v_{ASB\text{-}BL}=v_A\tag{3}$$

弹和冲塞块的剩余速度为：

$$v_r=\sqrt{(v_i^2-v_{ASB\text{-}BL}^2)}/(1+\eta)\tag{4}$$

(2) $v_A>v_{BL}$

分析表明，该状况对应于较小厚度靶板，应考虑靶板的结构响应[10]。

若 $v_{BL}<v_i<v_A$，弹体剪切冲塞穿透靶板，也不发生绝热剪切失效，其终点弹道仍用式(1)描述。

若 $v_i\geqslant v_A$，弹体绝热剪切冲塞穿透靶板，由于失效模式变换，剩余速度修正为：

$$v_r=\frac{\vartheta v_i+\eta\sqrt{(v_i^2-v_{ASB\text{-}BL}^2)}}{(1+\eta)\,(\eta+\vartheta)}\tag{5}$$

这里仍取 $v_{ASB\text{-}BL}=v_A$。

还有，材料失效效应往往是剪切失效和绝热剪切失效的混杂，可以假设绝热剪切冲塞穿甲的弹道极限为：

$$v_{ASB\text{-}BL}=(1-\delta)v_A+\delta v_{BL}\qquad 0<\delta<1\tag{6}$$

式中：δ 为两种模式在混杂中占有的程度。

需指出的是，随着靶厚的增加，靶板失效模式可能由剪切冲塞向绝热剪切冲塞转换；随着弹速的增加，靶板失效模式也可能由剪切冲塞向绝热剪切冲塞转换；不同靶材也会影响靶板的失效模式，若靶材强度较高，也容易发生绝热剪切失效[11]。

陈小伟等[11]根据以上两种分析模型，对文献[13-14]中大量的实验数据进行比较分析，得到较理想的结果，证实了上述物理现象的存在；张伟等[2]认为这两种模型是平头弹穿透金属靶板失效模式的典型代表；潘建华等[15]参考了文献[10]，得到了几乎相同的破坏模式转化的临界条件。

2 实验分析

2.1 单层靶穿甲

S. Dey 等[1]采用平头弹分别穿甲单层金属靶和间隙式双层金属靶，单层靶的厚度为 6、12 mm，双层靶为 2 层厚 6 mm、间隙 24 mm。靶板材料为 Weldox 700E，具体参数分别为：$\rho=7\ 850\ \mathrm{kg/m^3}$，$E=210\ \mathrm{GPa}$，$E_n=329\ \mathrm{MPa}$，$\sigma_y=858\ \mathrm{MPa}$，$n=0.579$，$\dot{\varepsilon}_0=5\times10^{-4}\ \mathrm{s^{-1}}$，$C=0.011\ 5$，$T_r=293\ \mathrm{K}$，$T_m=1\ 800\ \mathrm{K}$，$c_p=452\ \mathrm{J/(kg\cdot K)}$。平头弹采用高硬度(约 1 900 MPa)材料，质量为 197 g，直径为 20 mm。可将间隙式双层靶的每 1 层靶作为单层靶考虑，不考虑间隙对弹道性能产生的影响[1]，本文中也采用这种处理方法。

根据以上两种分析模型，对于 Weldox 700E 靶板，6 mm 厚度单层靶穿透的弹道极限和绝热剪切临界速度分别为 171.2、213.0 m/s，12 mm 的分别为 228.9、201.6 m/s。可知在弹穿透情形中，6 mm 厚单层靶有 $v_{\mathrm{BL}}<v_{\mathrm{A}}$，剪切冲塞先于绝热剪切，当弹速大于 213.0 m/s 时，易发生绝热剪切失效；12 mm 厚单层靶有 $v_{\mathrm{BL}}>v_{\mathrm{A}}$，绝热剪切先于剪切冲塞，其弹道极限应修正为 201.6 m/s。12 mm 厚单层靶的绝热剪切临界速度比 6 mm 厚靶板小，表明随着靶厚的增加，靶板的绝热剪切临界速度更易达到，易发生绝热剪切失效。

图 1(a)给出了平头弹撞击 6 mm 厚 Weldox 700E 单层金属靶板的实验数据，以及剪切冲塞模型和绝热剪切冲塞模型分别得到的理论预期。由剪切冲塞模型得到的理论预期接近于实验数据，靶板失效机制为剪切冲塞。6 mm 单层靶 $\chi=0.3<1/\sqrt{3}$，接近于 χ_1，因此靶板的结构响应明显；在弹道极限时，剩余速度存在垂直跳跃，这与实验现象一致。图 1(b)给出了平头弹撞击 12 mm 厚 Weldox 700E 单层金属靶板的实验数据，以及剪切冲塞模型和绝热剪切冲塞模型分别得到的理论预期。与图 1(a)不同，该实验结果与绝热剪切冲塞模型的理论预期更接近，因此，可认为穿甲失效机制主要为绝热剪切。

图 1 表明，当靶厚增加时，高强合金钢靶的穿甲失效模式可能由剪切冲塞向绝热剪切冲塞转换，与穿透绝热剪切临界速度 $v_{\mathrm{A}}|_{12\ \mathrm{mm}}$(201.6 m/s) $<v_{\mathrm{A}}|_{6\ \mathrm{mm}}$(213.0 m/s)相吻合。另外，因 12 mm 厚度的单层靶 $\chi=0.6>1/\sqrt{3}$，可不考虑结构响应。

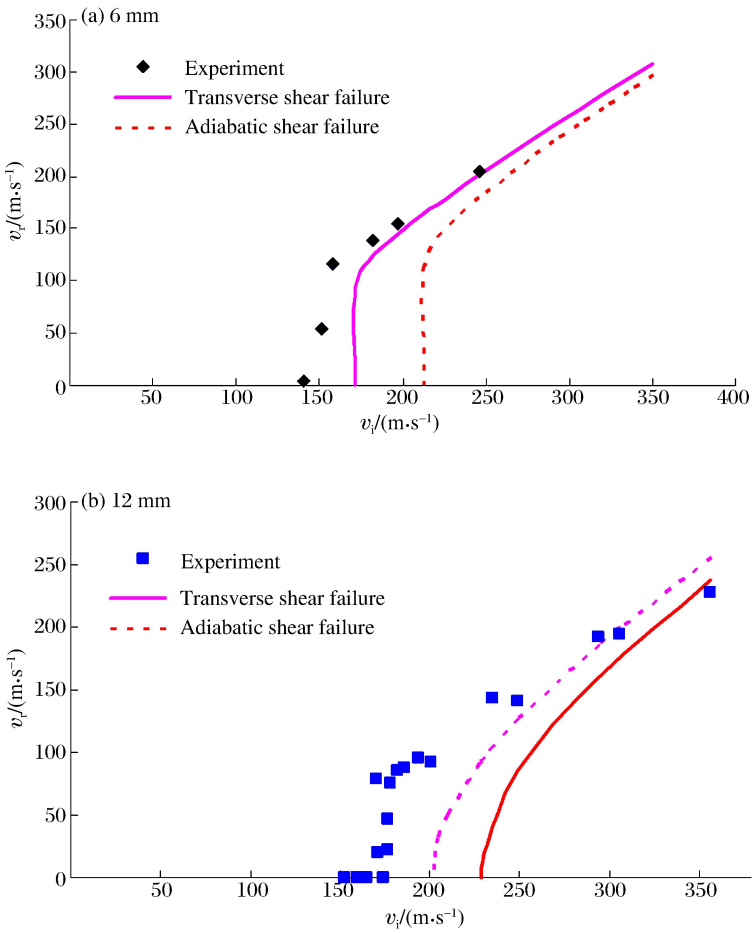

图 1 平头弹撞击单层金属靶

Fig. 1 Blunt rigid projectile striking single-layered metal plate

2.2　间隙式双层靶穿甲

S. Dey 等[1]指出，平头弹穿甲间隙双层靶除发生冲塞破坏之外，来自于第 1 层靶的塞块阻碍了第 2 层靶中的局部剪切，产生的较大弯曲变形需要吸收更多的能量，弹体需要贯穿的有效厚度也随之增加；张伟等[2]也指出来自于第 1 层靶的塞块对终点弹道性能将产生影响。因此，在分析平头弹撞击间隙式双层靶失效模式时，要考虑来自于第 1 层靶的塞块对终点弹道性能的影响。

分析平头弹撞击间隙式双层靶，将它看成两块厚度为 6 mm 的单层靶，可简单通过比较剪切冲塞和绝热剪切冲塞模型来进行分析。按照单一模型分析，即假定两层靶板均分别发生剪切冲塞失效或绝热剪切失效，可得到平头弹贯穿第 1 层靶后的剩余速度，然后再以该速度作为穿甲第 2 层靶板的初速，可得到最终的剩余速度。

另外，若平头弹初速较高且大于绝热剪切临界速度 v_A，第 1 层靶板将发生绝热剪切失效。贯穿第 1 层靶板后，由于弹速降低，贯穿第 2 层靶板将出现两种可能：若弹速仍大于 v_A，则第 2 层靶板失效模式仍表现为绝热剪切破坏；若弹速小于 v_A，则易发生剪切冲塞失效，平头弹穿甲间隙双层靶的失效形式是绝热剪切和剪切冲塞的混杂，即先绝热剪切失效，后剪切冲塞失效。

表 1　实验结果和数值模拟结果

Table 1　Experimental results and numerical simulation results

v_i/(m·s^{-1})	v_r/(m·s^{-1})						
	实验[1]	剪切冲塞模型		绝热剪切冲塞模型		绝热/剪切冲塞混杂模型	
		第 1 层	第 2 层	第 1 层	第 2 层	第 1 层	第 2 层
400.0	—	317.5	275.8	309.5	254.9	309.5	254.9
380.0	—	300.1	258.3	291.6	235.3	291.6	235.3
360.0	—	282.7	240.5	273.6	214.8	273.6	214.8
351.1	189.9	274.9	232.5	265.4	205.3	265.4	205.3
330.0	—	256.3	213.0	245.9	180.9	245.9	180.9
309.4	89.8	238.0	193.1	226.5	157.2	226.5	157.2
297.0	155.6	226.8	180.7	214.5	143.8	214.5	143.8
296.7	97.7	226.6	180.4	214.2	142.3	214.2	142.3
296.0	—	225.9	179.6	213.5	141.1	213.5	141.1
295.5	—	225.5	179.1	213.0	0	213.0	140.4
282.6	86.4	213.7	165.5	200.2	0	200.2	127.2
270.8	96.6	202.9	152.1	188.1	0	188.1	113.4
269.3	128.4	201.5	150.4	186.6	0	186.6	111.5
261.0	—	193.7	140.1	177.8	0	177.8	96.3
260.3	—	193.1	139.2	177.0	0	177.0	0
259.7	73.3	192.5	138.4	176.3	0	176.3	0
255.0	—	188.1	132.1	171.2	0	171.2	0
251.7	0	184.9	127.3	167.5	0	167.5	0
249.1	101.7	182.4	123.3	164.5	0	164.5	0
244.0	69.6	177.5	114.4	158.6	0	158.6	0
238.0	—	171.7	98.2	151.2	0	151.2	0
237.5	—	171.2	0	150.6	0	150.6	0
225.2	0	159.0	0	133.7	0	133.7	0

由以上分析得到的理论预期与文献[1]实验结果进行对比，见表 1。采用 Recht-Ipson 公式[7]处理弹体的初始-剩余速度关系，来采信实验数据。文献[1-2]中实验数据离散性大，部分实验结果与拟合的 Recht-Ipson 曲线出入较大。S. Dey 等[1]认为，原因是两批弹的脆性不同，其中脆性偏高的一批弹贯穿靶板后破碎飞溅；张伟等[2]认为，原因是弹同塞块(来自第 1 层靶板)撞击第 2 层靶板的位置不同。由表

1 可知，根据剪切冲塞模型和绝热剪切冲塞模型得到的弹道极限分别为 237.5 和 295.5 m/s，而按照绝热/剪切冲塞混杂模型进行分析得到弹道极限为 260.3 m/s。

当初始弹速大于 295.5 m/s 时，弹贯穿第 1 层靶后，剩余弹速仍较高且大于 v_A，继续穿甲第 2 层靶板仍表现为绝热剪切失效，这样通过绝热/剪切冲塞混杂模型得到的剩余速度与绝热剪切模型相同；当初始弹速小于或等于 295.5 m/s 时，弹贯穿第 1 层靶后，剩余弹速将小于 v_A，继续穿甲第 2 层靶板时其穿甲模式将变为冲塞剪切，因此其弹道极限根据式(6)进行修正。

图 2(a)给出了由单一剪切冲塞模型分析双层靶的剩余速度和实验结果对比。理论预期弹道极限为 237.5 m/s，对双层靶穿甲后的剩余速度理论预期大于相关实验值。利用单一剪切冲塞模型分析平头弹穿甲双层间隙靶是不合适的，其失效模式可能不是单一的剪切冲塞破坏。

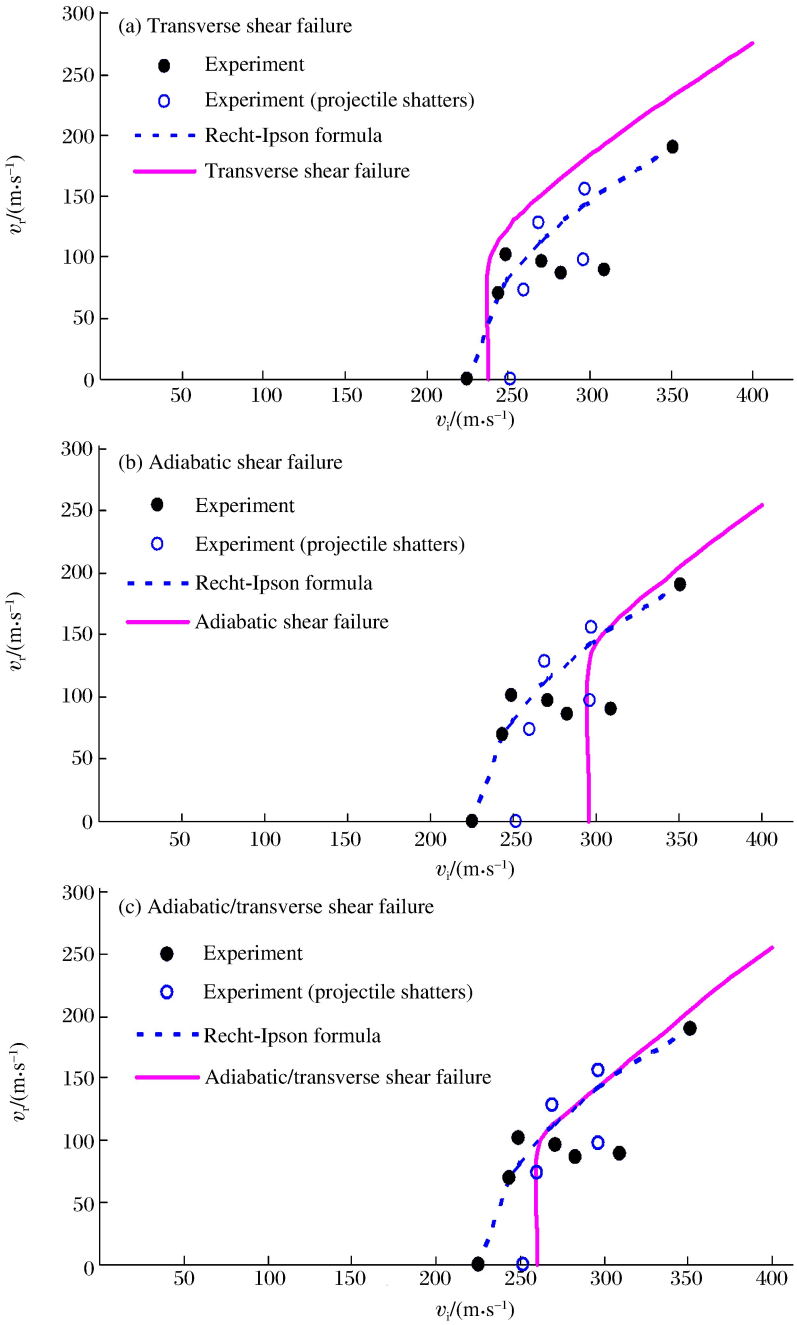

图 2 平头弹撞击间隙式双层靶

Fig. 2 Blunt rigid projectile striking double-layered metal plate

图 2(b)给出了由单一绝热剪切冲塞模型分析双层靶的剩余速度和实验结果对比。弹道极限理论预期为 295.5 m/s，比实验值显著偏大。在较高弹速范围内，剩余速度理论预期接近实验结果；但当弹速低于 295.5 m/s 时，理论模型无法预期实验结果，表明绝热剪切冲塞模型对弹速有一定要求。

图 2(c)则利用绝热/剪切冲塞混杂模型分析平头弹穿甲双层间隙靶，并与实验结果比较。弹道极限理论预期为 260.3 m/s，对剩余速度的预期与实验值接近。该模型给出的弹道极限和剩余速度都与实验结果较好吻合。

另外，两块靶板厚度均为 6 mm，$\chi=0.3<1/\sqrt{3}$，接近于 χ_1，两块靶板结构响应明显。因此，在以上模型分析中，在弹道极限附近存在剩余速度跳跃。

综上所述：当初始弹速 $v_i>295.5$ m/s 时，平头弹穿甲双层间隙靶均为绝热剪切冲塞；当 $260.3\ \text{m/s}<v_i<295.5\ \text{m/s}$ 时，第 1 层靶板为绝热剪切冲塞，而第 2 层靶板为剪切冲塞失效；当 $213.0\ \text{m/s}<v_i<260.3\ \text{m/s}$ 时，第 1 层靶板仍是绝热剪切冲塞，但无法穿透第 2 层靶；当 $171.2\ \text{m/s}<v_i<213.0\ \text{m/s}$ 时，则第 1 层靶板可剪切冲塞穿透，也无法穿透第 2 层靶。需特别指出，当 $255.0\ \text{m/s}<v_i<260.3\ \text{m/s}$ 时，尽管穿透第 1 层靶后弹残速可能大于单层靶弹道极限 171.2 m/s，由于第 1 层靶塞块阻碍了第 2 层靶中的局部剪切，令第 2 层靶产生较大弯曲变形(即发生预结构响应)，导致第 2 层靶仍无法穿透。所以，较高速度穿甲双层间隙靶的失效机制应为考虑结构响应的绝热剪切/剪切冲塞混杂。

3　结　语

将单层靶的剪切冲塞和绝热剪切冲塞模型[9-10]进一步延伸，应用于间隙式双层靶的穿甲分析。平头弹贯穿间隙式双层靶，较高速弹贯穿第 1 层靶板时发生绝热剪切冲塞，由于弹速降低，贯穿第 2 层靶板的失效模式有可能由绝热剪切向剪切冲塞转换。

对平头弹穿甲 Weldox 700E 钢靶的实验数据[1]进行系统的分析比较，间隙式双层靶最终的破坏模式为考虑结构响应的绝热剪切和剪切冲塞混杂失效，即先绝热剪切，后剪切冲塞，理论预期与实验结果较好吻合。

参考文献：

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

[2] 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.
Zhang Wei, Xiao Xinke, Guo Zitao, et al. Investigation on the ballistic resistance of double-layered A3 steel targets against blunt projectile impact[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012,26(2):163-170.

[3] Teng X, Dey S, Bϕrvik T, et al. Protection performance of double-layered metal shields against projectile impact [J]. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2007,2(7):1309-1330.

[4] Woodward R L, Cimpoeru S J. A study of the perforation of aluminium laminate targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1998,21(3):117-131.

[5] 邓云飞，张伟，曹宗胜. 间隙对 A3 钢薄板抗卵形头弹侵彻性能影响的实验研究[J]. 振动与冲击，2013,32(12):95-99.
Deng Yunfei, Zhang Wei, Cao Zongsheng. Effect of gap on the ballistic performance of double-layered A3 steel shields against ogival rigid projectiles[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013,32(12):95-99.

[6] 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 Engineering, 2005,32(3):441-468.

[7] Recht R F, Ipson T W. Ballistic perforation dynamics[J]. Journal of Applied Mechanics, 1963,30(3):384-390.

[8] Almohandes A A, Abdel-Kader M S, Eleiche A M. Experimental investigation of the ballistic resistance of steel-fiberglass reinforced polyester laminated plates[J]. Composites Part B: Engineering, 1996,27(5):447-458.

[9] Chen X W, Li Q M. Shear plugging and perforation of ductile circular plates struck by a blunt projectile[J]. Inter-

national Journal of Impact Engineering, 2003,28 (5):513-536.

[10] Chen X W, Li Q M, Fan S C. Initiation of adiabatic shear failure in a clamped circular plate struck by a blunt projectile[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,31(7): 877-893.

[11] 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.
Chen Xiaowei, Liang Guanjun, Yao Yong, et al. Perforation modes of metal plates struck by a blunt rigid projectile[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied mechanics, 2009,41(1):84-90.

[12] Chen X W, Liang G J. Perforation modes of metal plates struck by a blunt rigid projectile[J]. Engineering Transactions, 2012,60(1):15-29.

[13] Bϕrvik T, Hopperstad O S, Langseth M, et al. Effect of target thickness in blunt projectile penetration of Weldox 460E steel plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,28(4):413-464.

[14] Dey S, Bϕrvik T, Hopperstad O S, et al. The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004,30(8):1005-1038.

[15] 潘建华,文鹤鸣.平头弹丸正撞击下延性金属靶板的破坏模式[J].高压物理学报,2007,21(2):157-164.
Pan Jianhua, Wen Heming. Failure modes of ductile metal plates under normal impact by flat-ended projectiles [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2007,21(2):157-164.

Perforation modes of double-layered plates with air space struck by a blunt rigid projectile

Liu Bing[1], Chen Xiaowei[1,2]

(1. *School of Civil Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang* 621010, *Sichuan, China*;
2. *Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: In the cases of the perforation of a single-layered metal plate struck by a blunt rigid projectile, along with the increase of the plate thickness and that of the projectile velocity, the failure mode of the metal plate may transform from shear plugging to adiabatic shear plugging. Therefore, regarding the perforation of double-layered or multi-layered plates, the failure modes of various plates can be quite different. In this work we investigated these different perforation modes by conducting experimental analyses on the perforations of single- and double-layered Weldox E steel plates with air space. Our results indicate that, in the case of a higher initial striking velocity, the failure mode of the first layer plate is adiabatic shear plugging, while that of the second layer plate is adiabatic shear plugging or shear plugging as the striking velocity of the projectile slows down. We conclude that the final failure mode of the double-layered plates is the mixture of both shear plugging and adiabatic shear plugging.

Key words: solid mechanics; perforation mode; shear plugging; double-layered plate; adiabatic shear plugging; single-layered plate

(责任编辑 丁 峰)