

# 金属薄板抗 7.62 mm 普通弹枪击性能的实验研究

何丽灵<sup>1,2</sup>, 钟卫洲<sup>1,2</sup>, 吕明<sup>1</sup>, 张方举<sup>1</sup>, 岳晓红<sup>1</sup>, 魏发远<sup>1</sup>, 黄海莹<sup>1</sup>

(1.中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900;

2.工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 目的 评估覆钢板复杂结构的抗枪击性能, 开展薄钢板抗枪击性能研究。方法 采用 56 式步枪人工发射方式, 分别开展 4、8 mm 厚 06Cr19Ni10 单层钢板与 8、16 mm 厚 30CrMoA 单层钢板以及 06Cr19Ni10 与 30CrMoA (4 mm+8 mm 与 8 mm+8 mm 两种厚度组合) 双层钢板抗 7.62 mm 普通弹的枪击试验, 测量子弹着靶速度与穿靶余速, 观测靶板的破坏模式, 理论分析单层钢板的弹道极限速度。结果 7.62 mm 普通弹不能穿透 16 mm 厚 30CrMoA 单层钢板以及所有参试双层钢板, 其余参试单层钢板均能被穿透。基于 Recht-Ipson 模型, 4、8 mm 厚 06Cr19Ni10 与 8 mm 厚 30CrMoA 单层钢板弹道极限速度分别为 511.7、498.6、684.3 m/s。结论 薄钢板随厚度的增加, 破坏模式从韧性扩孔向塞块推出转变, 均为韧性破坏模式。强度较高的背衬板有助于提高前钢板的抗侵彻性能。

**关键词:** 7.62 mm 普通弹; 枪击; 06Cr19Ni10 钢板; 30CrMoA 钢板; 韧性扩孔; 塞块; 弹道极限速度

**中图分类号:** TJ410      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-9242(2021)05-0079-08

**DOI:** 10.7643/ issn.1672-9242.2021.05.012

## Study on the Anti-penetration Performance of Thin Metallic Plate Against Ordinary 7.62 mm Bullet

HE Li-ling<sup>1,2</sup>, ZHONG Wei-zhou<sup>1,2</sup>, LYU Ming<sup>1</sup>, ZHANG Fang-ju<sup>1</sup>,  
YUE Xiao-hong<sup>1</sup>, WEI Fa-yuan<sup>1</sup>, HUANG Hai-ying<sup>1</sup>

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China; 2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang 621900, China)

**ABSTRACT:** The thin metallic plate is ordinarily used as rapped structure. The paper aims to evaluate the anti-penetration performance of the thin metallic plate against high-speed bullet, in order to evaluate the anti-penetration performance of the complex structure rapped by thin steel plate. The 7.62 mm bullet is adopted to evaluated the anti-penetration performance of thin

收稿日期: 2021-03-31; 修订日期: 2021-04-11

Received: 2021-03-31; Revised: 2021-04-11

基金项目: 中物院创新基金 (CX20210031)

Fund: Supported by the Innovation Foundation of CAEP (CX20210031)

作者简介: 何丽灵 (1984—), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为冲击动力学。

Biography: HE Li-ling (1984—), Female, Doctor, Associate researcher, Research focus: impact dynamics.

通讯作者: 钟卫洲 (1978—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为冲击动力学。

Corresponding author: ZHONG Wei-zhou (1978—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: impact dynamics.

引文格式: 何丽灵, 钟卫洲, 吕明, 等. 金属薄板抗 7.62 mm 普通弹枪击性能的实验研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(5): 079-086.

HE Li-ling, ZHONG Wei-zhou, LYU Ming, et al. Study on the anti-penetration performance of thin metallic plate against ordinary 7.62 mm bullet[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(5): 079-086.

metalllic plate, which is used by 56-type rifle manual firing method. Single steel plate, 4 mm and 8 mm 06Cr19Ni10 plate and 8 mm and 16 mm 30CrMoA plate are respectively shot by the bullet. Double steel plates, 06Cr19Ni10 and 30CrMoA plates with thickness combination as 4 mm+8 mm and 8 mm+8 mm are also studied. The striking and residual velocities of bullet is measured in the test, and the fracture mode of the target is analyzed. The ballistic limit velocity of perforated plate is theoretically obtained. It is indicated that the 7.62 mm ordinary bullet can not perforate the single steel plate made of 30CrMoA steel with thickness 16mm. It can not perforate all double steel plates tested in the present paper. Other single steel plates tested are perforated by the bullet. Based on the Recht-Ipson model, 4 mm and 8 mm 06Cr19Ni10 and 8 mm 30CrMoA steel plate has ballistic limit velocity 511.7 m/s, 498.6 m/s and 684.3 m/s, respectively. With the increase of thickness, the failure mode of plate transforms from ductile hole-enlargement into plugging, and both are ductile failure modes. The high-strength backing plate can enhance the anti-penetration performance of the front plate.

**KEY WORDS:** 7.62 mm ordinary bullet; gun-shot test; 06Cr19Ni10 steel; 30CrMoA steel; ductile hole enlargement; plug; ballistic limit velocity

金属薄板在军民领域均有较多的应用，其常作为外部包覆材料，具有易成形、易加工等优点。如各种包装容器、梁柱等结构的外包材料等。异常事故环境中，高速破片、子弹等可能穿透外包覆薄钢板，对内部被保护目标构成威胁。为此，有必要研究金属薄板抗枪击性能，为其作为结构组元的复杂大型目标的抗枪击性能评估提供支撑。

研究金属板抗侵彻性能的文献很多，特别是关于韧性金属靶板分层能否增强防护性能的研究仍有争论：部分结论支持靶板分层将增强其抗侵彻性能<sup>[1-3]</sup>，而部分结论与此相反<sup>[3-7]</sup>。大多数试验展示的结果较为一致，即靶分层强化仅出现在打击弹体为钝头弹时，而分层劣化可能出现在弹头为钝头、尖卵、锥头等各种头型的弹体打击时。

弹道极限速度是定量表征薄钢板防护性能优劣的常用参数，其定义为恰好穿透靶板时子弹的着靶速度。面对相同打击时，弹道极限速度越高，靶板的防护性能越好，反之则越差。由于子弹恰好穿透的状态较难掌控，需要开展大量的试验才能直接获得测试靶标的弹道极限速度。为减少试验数量，需认识弹道极限速度的决定因素，建立其解析表征模型。

基于能量与动量的守恒原理，建立了一系列弹道极限速度的解析表征模型。在这些解析模型中，最为著名的是 1963 年发展的 Recht-Ipson 解析模型<sup>[8]</sup>。该模型假设子弹为刚体，且靶板耗散能量与子弹打击速度无关，导出了子弹着速、余速与弹道极限速度的简单关系。基于该解析模型，理论上 1 发试验即可获得靶板弹道极限速度，大大减少了试验数量。除这个模型之外，还有 Lambert-Jonas 模型<sup>[9]</sup>、Resenberg-Dekel<sup>[10]</sup>模型、Liang 模型<sup>[11]</sup>、Ben-Dor 模型<sup>[12-14]</sup>、Elek 模型<sup>[15]</sup>等。上述模型基本都是基于能量与动量两大守恒定理建立的。目前仍是 Recht-Ipson 模型应用得最为普遍。基于解析模型，开展少量试验，即可获得靶板的弹道极限速度。

从抗侵彻机理上解释，靶板变形与破坏模式是弹

道极限速度的重要控制因素<sup>[3]</sup>。子弹打击时，韧性金属靶板破坏可能出现盘形凹陷等全局变形吸能模式，也可能出现韧性扩孔、塞块推出等局部破坏模式。靶板具体变形或破坏模式与打击弹体形状、速度和弹靶材料的力学性能及失效模式相关。一般认为，靶厚在弹径的 1/3 以下时，靶板为薄靶，靶板全局变形吸收能量占靶板吸收总能量比重较大。随靶板厚度的增加，靶板破坏模式从全局变形为主向局部破坏为主转变<sup>[10]</sup>。

通常韧性金属板弹道极限速度与靶厚正相关，即靶厚越厚，弹道极限速度越高。但试验发现，部分钢板随靶厚的增加，弹道极限速度不增加或增速明显放缓<sup>[16-17]</sup>。这种反常现象通常伴随着靶板变形或破坏模式的转变，如从全局变形向局部破坏的转变等。不是所有材料都能简单地依靠增加靶厚来增强靶板的抗侵彻能力。

06Cr19Ni10 钢是最常见的不锈钢，具有良好的延展性；30CrMoA 钢是常见的高强钢。两种钢材的生产工艺均较为成熟，应用广泛。文中主要针对 06Cr19Ni10 钢与 30CrMoA 钢 2 种钢板，开展其抗 7.62 mm 普通弹的枪击试验，分析钢板的抗侵彻机理，获得其弹道极限速度等。研究成果将为评估覆钢板复杂结构的抗枪击性能提供支撑。

## 1 试验设计

### 1.1 靶标

文中研究的薄钢板材料分别为 06Cr19Ni10 钢与 30CrMoA 钢，几何形状为圆柱形，直径约 120 mm，约为弹径的 15 倍。06Cr19Ni10 与 30CrMoA 钢的准静态力学性能对比见表 1，可见，前者较后者强度稍低，但韧性与抗冲击韧性均较好。研究钢板材料、厚度及层数对其抗枪击性能的影响，试验靶板类型及规格见表 2。每种规格靶板获得 2 发有效试验数据。

表 1 06Cr19Ni10 与 30CrMoA 的准静态力学性能对比  
Tab.1 Comparison of the static mechanical performance of 06Cr19Ni10 and 30CrMoA

Material name	Density/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio	Yielding strength/MPa	Reduction of area/%	Dynamic ductility/ $(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2})$	Rupture strength/MPa
30CrMoA	7.82	209	0.27	735	~50	~710	930
06Cr19Ni10	7.82	205	0.33	210	~75	>2500	520

表 2 枪击试验靶板类型和规格  
Tab.2 Configuration of target for gun-shot test

Type	Configuration
Single steel plate	06Cr19Ni10(4 mm)
	06Cr19Ni10(8 mm)
	30CrMoA(8 mm)
Double steel plates	30CrMoA(16 mm)
	06Cr19Ni10(4 mm)+30CrMoA(8 mm)
Double steel plates	06Cr19Ni10(8 mm)+30CrMoA(8 mm)

## 1.2 56 式 7.62 mm 普通弹

56 式 7.62 mm 普通弹是最常见的现役步枪子弹类型，具有代表性。7.62 mm 普通弹主要由弹壳和弹头两部分组成，如图 1 所示，质量约 16.5 g，长约 55.6 mm。采用 56 式步枪（见图 2）发射，弹壳内装发射药，推动弹头运动，弹头出枪口速度为  $(750 \pm 30) \text{ m/s}$ 。弹头携自身动能侵彻靶标。弹头质量约为 8 g，长约 26 mm，直径约为 7.9 mm，主要由覆铜钢弹皮、低碳钢弹芯、铅锑合金填充物组成<sup>[18]</sup>，其结构如图 3 所示<sup>[19]</sup>。弹芯质量约为 3.6 g，长约 19.7 mm，直径约为 5.8 mm。

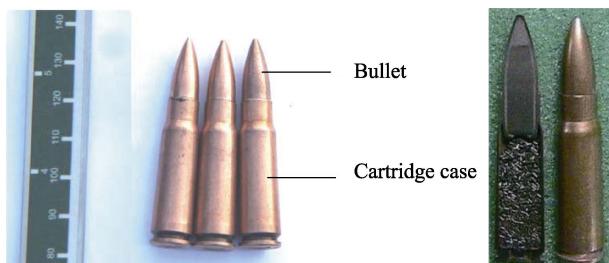


图 1 56 式 7.62 mm 普通弹及其剖视图  
Fig.1 7.62 mm ordinary bullet with cartridge case (left) and its cross-section view (right)



图 2 56 式步枪  
Fig.2 56 rifle for firing



图 3 弹头结构<sup>[19]</sup>  
Fig.3 The structure of the bullet<sup>[19]</sup>

## 1.3 试验布局

7.62 mm 普通弹采用 56 式步枪人工发射。枪口距离靶面 15~20 m。采用 E9900-X 间隔光幕测速装置记录子弹的飞行速度。子弹正侵彻靶板，采用高速摄影记录子弹着靶姿态与速度，与间隔光幕测速装置记录结果互为速度记录的备份，高速摄影同时还记录穿靶后子弹余速。将靶板放置在靶架上，靶架结构如图 4 所示。靶架下空间内堆填沙袋，以约束子弹冲击时靶架发生位移。在 8 mm 厚 30CrMoA 单层钢板试验中，靶后 50 cm 处放置 20 mm 厚 2A12 铝效应靶。试验整体布局如图 5 所示。

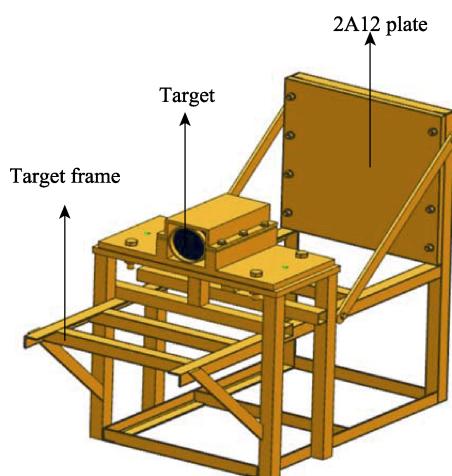


图 4 靶架结构  
Fig.4 Target frame structure

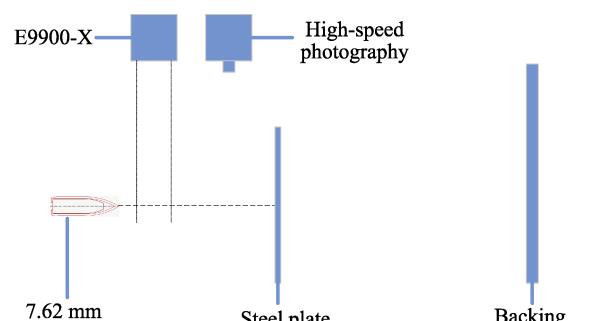


图 5 试验布局  
Fig.5 Test layout

## 2 结果及分析

### 2.1 试验结果

子弹侵彻靶板姿态的高速摄影如图 6 所示，可见

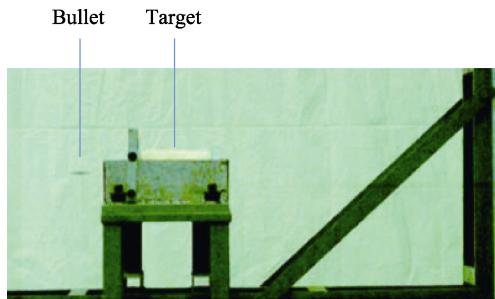


图 6 枪击时子弹飞行姿态高速摄影

Fig.6 High-speed photography of bullet into target during shooting

子弹以正侵彻姿态侵入靶板。共获得了 14 发有效试验数据, 单/双层钢板结构抗 7.62 mm 普通弹侵彻试验结果分别见表 3 和表 4。回收子弹与塞块形貌如图 7 所示, 可见, 7.62mm 普通弹未能击穿 16 mm 厚单

层钢板以及所有参试双层钢板。

## 2.2 单层/双层钢板的抗侵彻性能及机理

枪击后, 单层钢板整体变形形貌及弹孔形貌如图 8 所示, 图中“Front”表示着靶面, “Back”表示着靶背面。鉴于试验钢板厚度与弹径之比均在 1/3 之上, 即钢板可看作中厚靶<sup>[10]</sup>, 钢板盘形凹陷的整体变形模式将被抑制, 更多表现为弹孔周围的局部变形破坏。子弹打击 16 mm 厚 30CrMoA 钢板后, 仅在着靶面形成凹坑, 靶背面没有明显变形印记, 见图 8a。其余厚度钢板中, 弹孔着靶面有小唇形翻边, 着靶背面断面齐整, 弹孔周围无裂纹, 说明钢板具有典型韧性破坏特征。需要说明的是, 图 8 中的前孔定义为弹孔穿着靶面形成的孔截面, 而后孔为弹孔透着靶背面形成的孔截面。

表 3 单层钢板抗 7.62 mm 普通弹侵彻试验结果  
Tab.3 Test results for single steel plate against 7.62 mm bullet

Test No.	Target material	Target thickness/mm	Backing effective plate	Striking velocity/(m·s <sup>-1</sup> )		Residual velocity/(m·s <sup>-1</sup> )		Residual mass/g	
				E9900-X	High-speed photography	Bullet	Plug	Bullet	Plut
S-3		8.06	Yes	744	745	147	171	3.6	—
S-4		7.97	Yes	760	753	210	243	3.6	—
S-25	30CrMoA	7.93	Yes	771	725	177	192	—	—
S-26		8.03	Yes	760	734	183	209	3.6	5.1
S-9		15.96	No	751	745	Not perforated	3.6	—	—
S-10		15.95	No	753	717	Not perforated	3.4	—	—
S-15		3.91	No	745	783	551	—	—	—
S-16	06Cr19Ni10	3.97	No	744	729	578	—	—	—
S-21		7.99	No	753	712	406	436	—	—
S-22		8.00	No	738	729	378	402	—	—

表 4 双层钢板抗 7.62 mm 普通弹侵彻试验结果  
Tab.4 Test results for double steel plates against 7.62mm bullet

Test No.	Target material	Target thickness/mm	Striking velocity/(m·s <sup>-1</sup> )	Residual velocity/(m·s <sup>-1</sup> )	Residual mass of bullet/g
D-3	06Cr19Ni10	3.98	754	Not perforated	—
	30CrMoA	8.03			
D-4	06Cr19Ni10	3.94	754	Not perforated	—
	30CrMoA	7.97			
D-9	06Cr19Ni10	7.99	747	Not perforated	3.6
	30CrMoA	7.89			
D-10	06Cr19Ni10	7.98	758	Not perforated	—
	30CrMoA	8.00			



图 7 回收子弹及塞块形貌  
Fig.7 Morphology of recovered bullets and plugs

由表 3 可知, 子弹未能穿透 16 mm 厚 30CrMoA 钢板, 仅在钢板上留下直径约 16 mm 的弹孔, 见图 8a。弹芯头部韧性扩径成伞状, 见图 7 中 S-9 与 S-10, 但总质量损失在 0~0.6% 之间, 这说明弹芯材料韧性良好。

子弹穿透 8 mm 厚 2 种钢板, 均有塞块形成。穿透 8 mm 厚 30CrMoA 钢板后, 有塞块推出, 在弹芯

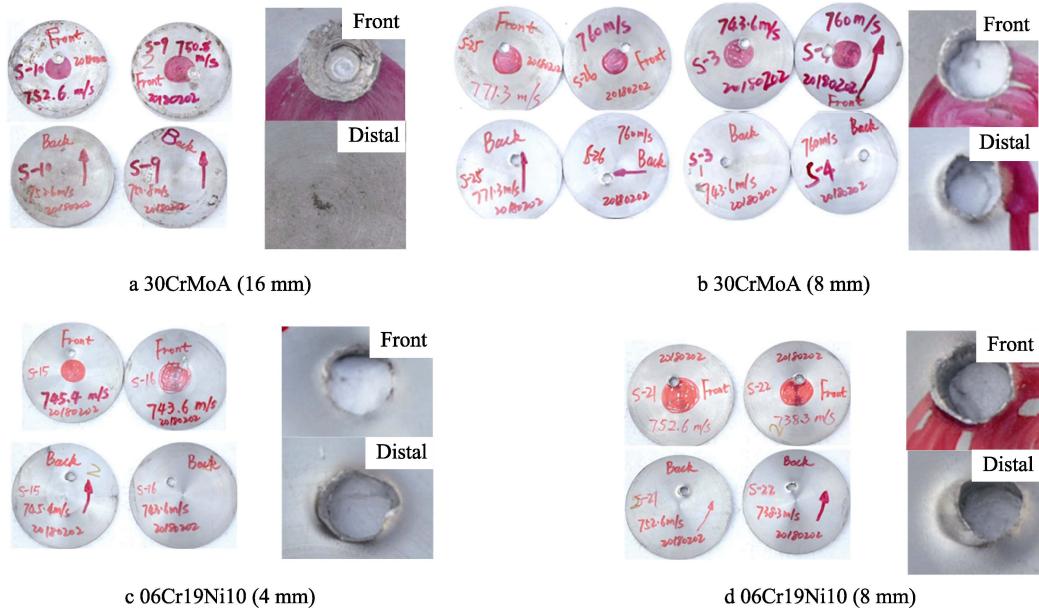


图 8 单层钢板侵彻后整体形貌及弹孔形貌对比

Fig.8 Topographic image of Sing steel plate after shot, impact/front surface (upper) and distal surface (lower)

前飞行，即推出塞块比弹芯运动速度快。弹芯敦粗为蘑菇头，如图 9 所示。效应靶也展示了明显的弹芯与塞块撞击印痕，如图 10 所示。S-26 回收塞块厚度约 5.1 mm，如图 11 所示。穿透 8 mm 厚 06Cr19Ni10 钢板后，在钢板后木材内也回收到塞块，见图 11 中 M-4，

塞块厚度约 5.45 mm。这说明 7.62 mm 普通弹穿透 8 mm 厚钢板，先后经历韧性开孔—弹皮剥离—弹芯敦粗—塞块推出的变形破坏过程。塞块推出是典型的钝头弹打击韧性靶板的破坏模式<sup>[10]</sup>，由于钢板强度与刚度足够高，低碳钢弹芯撞击钢板后，逐步将截卵弹头敦粗为蘑菇头状，敦粗后蘑菇头状弹芯推出靶板塞块。截卵弹头敦粗促使钢板出现典型钝头弹打击破坏模式。塞块厚度均在 5 mm 以上，大于靶板厚度的 1/2，这说明弹芯敦粗发生在侵彻早期。

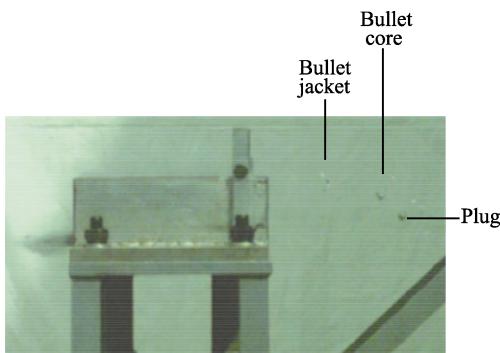


图 9 S-26 高速摄影

Fig.9 High-speed photography of S-26

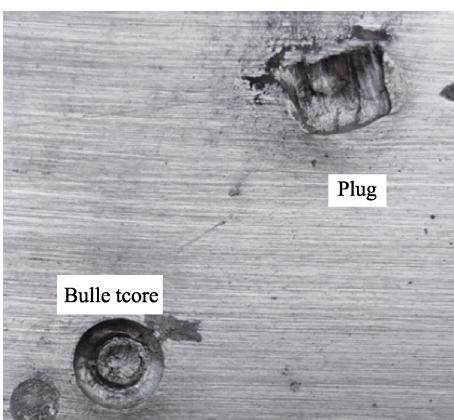


图 10 弹芯与塞块在效应靶上留下的印痕 (S-4)

Fig.10 The mark for bullet core and plug on 2A12 plate (S-4)



图 11 穿透 8 mm 厚 06Cr19Ni10 (M-4) 与 30CrMoA (S-26) 后回收弹芯与塞块对比

Fig.11 Comparison of recovered bullet core and plug after perforating of 8mm 06Cr19Ni10 steel plate (M-4) and 30CrMoA SSP (S-26)

子弹穿透 4 mm 厚 06Cr19Ni10 钢板，无塞块形成。在其后置木材的试验中，在木材内回收到的弹芯几乎无变形。这说明 7.62 mm 普通弹打击 4 mm 厚 06Cr19Ni10 钢板，经历韧性开孔—弹皮剥离变形破坏历程。

7.62 mm 普通弹打击双层钢板后，靶板的变形破坏形貌如图 12 所示，弹孔形貌对比如图 13 所示。需要说明的是，图中编号“D-3-1”表示编号 D-3 的试验的前置钢板；“D-3-2”表示编号 D-3 的试验的背衬钢板。弹芯携弹皮嵌在 4 mm 厚 06Cr19Ni10 前钢板中，这说明弹皮剥离发生在穿透钢板的过程中( 见图 13a、

b )，无塞块形成，钢板的破坏模式为韧性扩孔。当背衬 8 mm 厚 30CrMoA 钢板时，子弹未能穿透 8 mm 厚 06Cr19Ni10 前钢板 ( 见图 13c、d )，与无背衬的单层 8 mm 厚 06Cr19Ni10 钢板相比，背衬钢板增强了前钢板抗侵彻性能。

进一步分析背衬钢板增加前置钢板抗侵彻性能



图 12 双层钢板侵彻后形貌对比  
Fig.12 Topographic images for DSPs

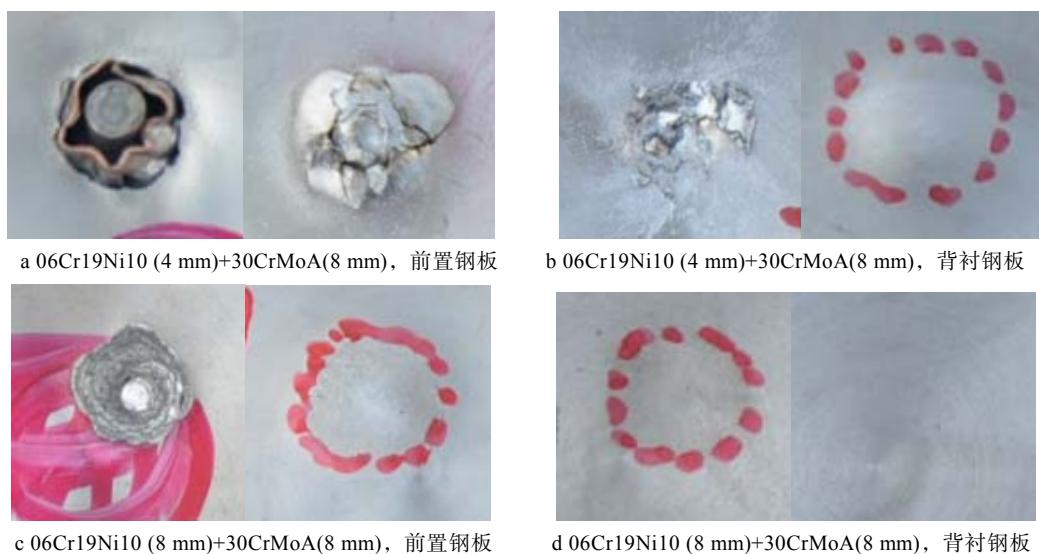


图 13 双层钢板侵彻后弹孔形貌对比

Fig.13 Topographic images of hole in DSP, impact surface and distal surface: a) 06Cr19Ni10 (4 mm)+30CrMoA (8 mm), front steel plate; b) 06Cr19Ni10 (4 mm)+30CrMoA (8 mm), backing steel plate; c) 06Cr19Ni10 (8 mm)+30CrMoA (8 mm), front steel plate; d) 06Cr19Ni10 (8 mm)+30CrMoA (8 mm), backing steel plate

机理, 8 mm 厚 06Cr19Ni10 钢板将 7.62 mm 普通子弹芯敦粗为蘑菇头, 蘑菇头需推动剪切钢板形成塞块。背衬钢板具有足够的刚度与强度, 限制了塞块的推出, 从而增强了前置钢板的抗侵彻能力, 如 D-9 与 D-10。

### 2.3 钢板弹道极限速度分析

采用弹道极限速度定量表征 2 种钢板不同厚度时的抗侵彻性能, 弹道极限速度越高, 抗侵彻性能越好。依据能量守恒, 假设子弹为刚体, 靶板弹道极限速度  $v_{bl}$  可采用 Recht-Ipson 模型表征<sup>[10,20]</sup>:

$$v_r = \frac{1}{1+\lambda} \sqrt{v_0^2 - v_{bl}^2} \quad (1)$$

式中:  $v_r$  为穿靶后子弹余速;  $\lambda$  为塞块等效质量  $m^*$  与弹体质量  $M$  之比, 当无塞块时,  $\lambda=0$ ;  $v_0$  为弹体着靶速度。所谓塞块等效质量, 即:

$$m^* = m \left( \frac{v_{pl}}{v_r} \right)^2 \quad (2)$$

式中:  $m$  为塞块质量;  $v_{pl}$  为塞块飞行速度。受回收塞块数量限制, 在处理 8 mm 厚 30CrMoA 钢板时, 塞块质量均假设为 S-26 的塞块质量, 即 5.1 g; 处理 8 mm 厚 06Cr9Ni10 钢板时, 塞块质量均假设为 M-4 的塞块质量, 即 2.9 g。子弹质量取  $M=8$  g。

根据表 3 和式 (1), 拟合得 8 mm 厚 2 种钢板及 4 mm 厚 06Cr19Ni10 钢板的弹道极限速度及抗侵彻性能, 如图 14 所示。4、8 mm 厚 06Cr19Ni10 钢板与 8 mm 厚 30CrMoA 钢板的弹道极限速度分别为 511.7、498.6、684.3 m/s。

厚度同为 8 mm 时, 30CrMoA 与 06Cr19Ni10 钢板具有类似的破坏模式, 即韧性扩孔与塞块推出。前者的弹道极限速度高于后者, 这说明前者抗侵彻性能优于后者。基于表 1 中二者力学性能的对比可知, 类似破坏模式时, 材料强度是控制靶板抗侵彻性能的重要因素之一。

同为 06Cr19Ni10 钢时, 当靶板厚度从 4 mm 增至 8 mm, 弹道极限速度不增反降。这种反常转变是因为靶板破坏模式随厚度的增加发生转变。当靶板厚度为 4 mm 时, 韧性扩孔为主要破坏模式, 无塞块推出; 当靶板厚度增至 8 mm 时, 靶板有明显的塞块推出, 破坏模式为韧性开孔与塞块推出。这说明当靶板破坏模式发生转变后, 8 mm 钢板的有效厚度已经小于 4 mm 钢板。M-4 推出塞块厚度约 5.45 mm, 即韧性扩孔深度约 2.55 mm。穿透 2.55 mm 厚 06Cr19Ni10 钢板及推出塞块所消耗能量应较在 4 mm 厚 06Cr19Ni10 钢板中韧性扩孔消耗的能量少。靶板破坏模式是靶板抗侵彻性能的重要决定因素。

需要说明的是, 文献[10]中假设弹体为刚体, 这与文中枪击子弹变形有较大差别, 特别是穿透 8 mm 厚钢板, 弹芯明显敦粗为蘑菇头, 但无质量损失。上

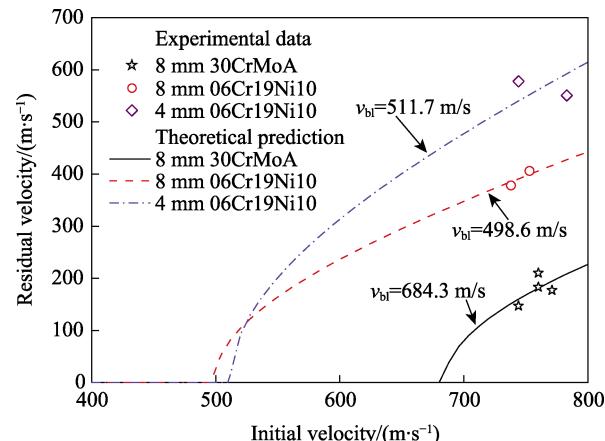


图 14 3 种靶板弹道极限速度对比

Fig.14 Comparison of ballistic limit velocity for three steel plates

述分析将弹芯塑性变形耗散的能量综合到靶板破坏所需能量之中。从理论上讲, 对有大塑性变形的弹体而言, 上述分析将高估靶板破坏所需能量, 即高估弹道极限速度。这也进一步说明 7.62 mm 普通弹穿透 8 mm 厚 06Cr9Ni10 钢板的耗散能量小于穿透 4 mm 厚钢板。

### 3 结论

文中研究了 06Cr19Ni10 单层 (4、8 mm)、30CrMoA 单层 (8、16 mm)、06Cr19Ni10 与 30CrMoA 双层 (4 mm+8 mm, 8 mm+8 mm) 钢板结构抗 7.62 mm 普通子弹的侵彻性能及机理。子弹不能穿透 16 mm 厚 30CrMoA 单层钢板与双层钢板, 其余厚度的单层钢板均被穿透。06Cr19Ni10 与 30CrMoA 双层钢板 (4 mm+8 mm) 为子弹不能穿透的参试钢板中最薄组合。

4 mm 厚 06Cr9Ni10 钢板的破坏模式为韧性扩孔, 而 8 mm 厚 06Cr9Ni10 与 30CrMoA 钢板破坏模式为韧性扩孔与塞块推出的组合破坏模式。当塞块推出为主要破坏模式时, 强度与刚度足够高的第二层钢板, 将限制塞块推出, 从而提高前钢板的抗侵彻性能。

基于 Recht-Ipson 模型, 拟合得 4 mm 厚 06Cr19Ni10 钢板、8 mm 厚 06Cr19Ni10 与 30CrMoA 钢板的弹道极限速度。同厚度同破坏模式时, 钢材强度越高, 对应的弹道极限速度越高。06Cr19Ni10 钢板厚度从 4 mm 增至 8 mm 时, 破坏模式从韧性扩孔向“韧性扩孔+塞块推出”模式转变, 弹芯从几乎不变形向敦粗为蘑菇头的钝头弹转变。因此弹道极限速度随钢板厚度的增加不增反降, 钢板破坏模式也是钢板弹道极限速度的重要决定因素。

### 参考文献:

- [1] DEY S, BORVIK 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] 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.
- [3] DENG Y, ZHANG W, QING G, et al. The ballistic performance of metal plates subjected to impact by blunt-nosed projectiles of different strength[J]. Materials and design, 2014, 54: 1056-1067.
- [4] ROSENBERG Z E D. Revisiting the perforation of ductile plates by sharp-nosed rigid projectiles[J]. International journal of solids and structures, 2010, 47(22-23): 3022-3033.
- [5] RADIN J, GOLDSMITH W. Normal projectile penetration and perforation of layered targets[J]. International journal of impact engineering, 1988, 7(2): 229-259.
- [6] 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.
- [7] GRUPTA 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]. International journal of impact engineering, 2008, 35(1): 37-60.
- [8] RECHT R, IPSON T. Ballistic perforation dynamics[J]. Journal of applied mechanics, 1963, 30: 384-390.
- [9] LAMBERT J P, JONAS G H. Towards standardization in terminal ballistics testing[R]. Washington: ADA, 1976.
- [10] ROSENBERG Z, DEKEL E. Terminal Ballistics[M]. Berlin: Springer, 2012.
- [11] 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(3-4): 441-468.
- [12] BEN-DOR G, DUBINSKY A, ELPERIN T. A model of high speed penetration into ductile targets[J]. Theoretical and applied fracture mechanics, 1998, 28: 237-239.
- [13] BEN-DOR G, DUBINSKY A, ELPERIN T. About effect of layering on ballistic properties of metal shields against sharp-nosed rigid projectiles[J]. Engineering fracture mechanics, 2013, 102: 358-361.
- [14] BEN-DOR G, DUBINSKY A, ELPERIN T. Effect of layering on ballistic properties of metallic shields against sharp-nosed rigid projectiles[J]. Engineering fracture mechanics, 2010, 77(14): 2791-2799.
- [15] ELEK P, JARAMAZ S, MICKOVI D. Modeling of perforation of plates and multi-layered metallic targets[J]. International journal of solids and structures, 2005, 42(3-4): 1209-1224.
- [16] CORRAN R S J, SHADBOLT P J, RUIZ C. Impact loading of plates—An experimental investigation[J]. International journal of impact engineering, 1983, 1(1): 3-22.
- [17] BORVIK T, HOPPERSTAD O S, LANGSETH M, et al. Effect of target thickness in blunt projectile penetration of Weldox 460 E steel plates[J]. International journal of impact engineering, 2003, 28(4): 413-464.
- [18] 强洪夫, 傅学金, 杨月诚. 7.62 mm 步枪弹正冲击 30CrMnSiA 钢板破坏效应试验[J]. 解放军理工大学学报, 2007, 8(6): 619-625.
- [19] QIANG H F, FU X J, YANG Y C. Ballistic penetration of 7.62 mm rifle bullets normal impact onto 30CrMnSiA steel plates[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007, 8(6): 619-625.
- [20] 枪弹制造编写组. 枪弹弹头制造[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- Group for Bullet Manufacturing. Manufacture of bullet[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979.
- ANDERSON J C E. Analytical models for penetration mechanics: A review[J]. International journal of impact engineering, 2017, 108: 3-26.