文章编号：1000-5773(2011)05-0401-06

7A04 高强铝合金抗杆弹正撞击性能实验研究*

张　伟，魏　刚，肖新科，慕忠成

（哈尔滨工业大学高速撞击研究中心，黑龙江哈尔滨　150080）

摘要：7A04 铝合金具有较高的强度-密度比，广泛应用于穿甲工程材料领域。在轻气炮上进行了平头和卵形钢杆弹体正撞击 10 mm 厚 7A04 铝合金板的实验研究，得到了两种弹体撞击 7A04 铝合金靶板的损伤形式和特性。使用高速相机记录了撞击过程并测得了弹体的剩余速度，得到了两种弹体撞击 10 mm 厚 7A04 铝合金靶板的弹道极限。实验表明，此种铝合金靶板抗卵形弹体正撞击的能力强于平头弹。

关键词：7A04 高强铝合金；抗弹性能；弹道极限；靶板损伤

中图分类号：O347；O385　　**文献标识码**：A

1　引　言

目前，无论在军用还是民用防护领域都广泛使用高强钢板作为防护材料[1]。然而随着武器装备水平的提高，对防弹装甲的要求也越来越高。为了提高防弹能力，装甲不得不做得越来越厚。这样虽然防弹能力提高了，但这是在牺牲机动性、灵活性的前提下实现的，不利于在战场上发挥作用，同时增加重量也给运输转移带来困难。因而需要研究和开发新型装甲材料，以满足坦克、装甲车辆等装备轻质高强的要求。另外，舰船、武装直升机等由于其自身特点对其装甲重量的要求更高[2]。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，但由于高强铝合金具有的优良特性，因而无论是单独使用，还是与其它材料复合使用，均得到越来越广泛的应用。近年来，国外一些高校和研究机构逐渐开始重视铝合金穿甲防护性能的研究，对 2024、7075 等高强、超高强铝合金在杆弹侵彻下的损伤形式、破坏机理以及抗穿甲能力进行了一些研究[3-5]；而国内对高强铝合金抗弹道撞击性能的研究还比较少，有限的一些研究主要集中在数值仿真方面[6-8]。

国产 7A04 铝合金具有较高的强度-密度比，有用作装甲防护材料的潜质。本研究针对国产 7A04 高强铝合金板材开展了平头和卵形两种形状弹体的正撞击侵彻实验，研究了其破坏特性和抗侵彻能力。实验表明，7A04 铝合金靶板在弹体撞击后的破坏形式明显不同于钢靶板[1,9]，两种弹体穿透靶板后，靶板的破坏形式相似，区别仅在于冲塞的完整性以及靶板正面孔口处的崩落；7A04 铝合金靶板抗卵形弹撞击明显好于抗平头弹撞击的能力。

2　实验系统与方法

实验用 7A04 铝合金板材由东北轻合金有限公司提供，热处理状态为 T6，密度为 2.85 g/cm^3，规定非比例延伸强度 $R_p0.2$ 为 450 MPa，抗拉强度 520 MPa，断后延伸率 9%，名义厚度 10 mm。靶板大小为 200 mm×200 mm，由 4 颗螺栓固定在靶架上，自由直径 150 mm。弹体为经过热处理的 38CrSi 合金钢，

* **收稿日期**：2010-06-02；**修回日期**：2010-07-21

基金项目：国家自然科学基金(11072072)

作者简介：张　伟(1964—)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事超高速撞击动力学及其模拟技术、材料动态力学性能、毁伤效应研究. E-mail：zhdawei@hit.edu.cn

平均洛氏硬度为 53。平头弹名义直径 12.62 mm,长度 37.1 mm,名义质量 37 g;卵形弹弹身直径也是 12.62 mm,弹头尺寸为 CRH 3(卵形头半径与弹身直径之比为 3),总质量和平头弹相同。

撞击实验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,具体实验设置如图 1 所示。弹体飞离炮口后由平行激光光束测量其撞击初始速度,使用高速相机监控整个撞击过程并测定弹体通过靶后的剩余速度。实验中控制初始撞击速度范围,使其大多数在弹道极限(临界贯穿速度)附近。

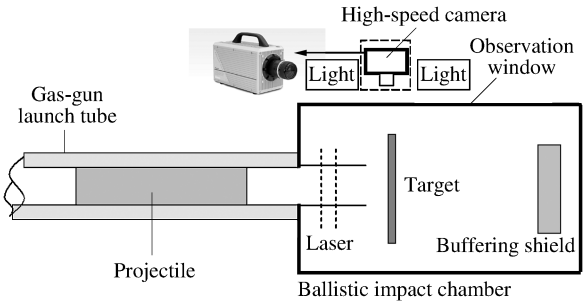


图 1 撞击实验设置示意图

Fig. 1 Schematic of impact experimental set-up

3 实验结果及讨论

3.1 剩余速度规律总结

本次实验的速度范围在 130～360 m/s 之间,平头弹和卵形弹撞击 7A04 铝合金板各进行了 8 发实验。本研究中剩余速度-初始速度的关系使用 Recht 和 Ipson 提出的经验公式[10]拟合实验数据给出

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

式中:v_i 为弹体初始撞击速度,v_r 为弹体剩余速度,v_{bl} 为弹道极限速度,a 和 p 为待定常数。本研究中弹道极限速度是指弹体刚好穿过靶板,并且剩余速度为零时的弹体初始撞击速度,由公式(1)使用最小二乘法拟合实验数据所得曲线与 x 轴的交点得到。

平头弹与卵形弹撞击 7A04 铝板的初始速度和剩余速度实验数据见表 1。在表 1 中一并给出了弹体质量以及靶板的损伤特征数据,m_p 为弹体质量,损伤特征 d 和 D 在下文中将详细说明。

表 1 平头弹与卵形弹撞击 7A04 铝板实验记录及结果

Table 1 Experimental records and results of blunt and ogival projectiles impact on 7A04 aluminum alloy plates

Projectile shape	Exp. No.	m_p/(g)	v_i/(m/s)	v_r/(m/s)	d/(mm)	D/(mm)	Remarks
Blunt	B-1	36.80	134.8	0.0	12.5	—	Rebound
	B-2	36.35	145.2	0.0	12.5	—	Rebound
	B-3	36.36	150.9	0.0	—	30.3	Insertion
	B-4	36.30	179.8	96.3	12.5	29.4	Perforation
	B-5	36.71	192.6	103.7	12.5	26.2	Perforation
	B-6	36.69	215.7	126.9	12.5	29.3	Perforation
	B-7	36.38	269.7	215.7	13.3	26.7	Perforation
	B-8	36.51	359.6	323.6	13.5	25.5	Perforation
Ogival	O-1	37.16	190.9	0.0	—	12.5	Rebound
	O-2	37.23	204.6	0.0	12.1	33.0	Rebound
	O-3	37.10	214.8	63.6	12.7	28.2	Perforation
	O-4	37.10	238.6	73.4	13.6	28.1	Perforation
	O-5	37.14	271.1	159.1	12.7	28.0	Perforation
	O-6	37.14	330.3	245.2	12.7	25.1	Perforation
	O-7	37.25	333.9	231.2	12.8	24.0	Perforation
	O-8	37.16	346.8	252.9	13.5	25.8	Perforation

图2给出了拟合得到的弹体剩余速度-初始速度曲线,对平头弹,$a=1.0$,$p=1.81$,弹道极限 $v_{bl}=151.5$ m/s;对卵形弹,$a=0.88$,$p=2.12$,弹道极限 $v_{bl}=205.0$ m/s。从图 2 中可以看出,两种弹体撞击 7A04 铝板后的剩余速度-初始速度曲线趋势一致,但平头弹撞击后其剩余速度明显要高于同一初始速度时卵形弹撞击的剩余速度,说明此种 7A04 铝合金板抵抗卵形弹撞击要强于抵抗平头弹撞击的能力。这可以从撞击过程及靶板损伤情况来解释。

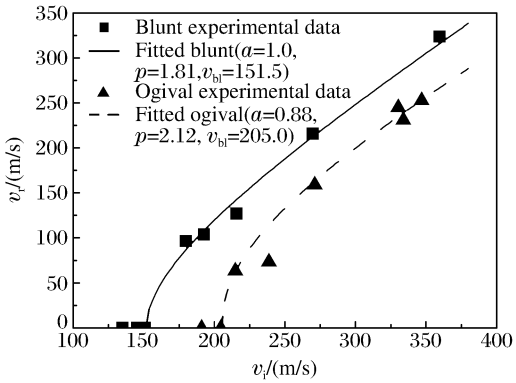


图 2 平头和卵形弹体撞击 7A04 铝合金板剩余速度-初始速度实验点及拟合曲线

Fig. 2 Residual-initial velocity curves for 7A04 Al alloy plates impacted by blunt and ogival projectiles

3.2 损伤特性分析

图 3 和图 4 分别给出了典型的平头弹和卵形弹贯穿 10 mm 厚 7A04 铝板的系列高速摄影照片。从图中可以看出,平头弹撞击贯穿后,冲出了一个较大的塞子和一些铝板碎片,且均在靶板的后方;卵形弹贯穿靶板后,没有形成较大的塞子,但飞出了较多的碎片,这些碎片不仅在靶板的后方,在靶板前面也有一些崩落。不论平头弹还是卵形弹撞击,在其撞击过程中均未见到靶板出现明显的结构变形,这是脆性材料在冲击过程中的明显特征。由此可以得出以下结论:此种 7A04 铝合金板表现出了一定的脆性,它主要依靠塞子冲出以及破碎过程消耗弹体的动能,这也可以用来解释为何此种 7A04 铝板抵抗卵形弹撞击的能力强于抵抗平头弹撞击。

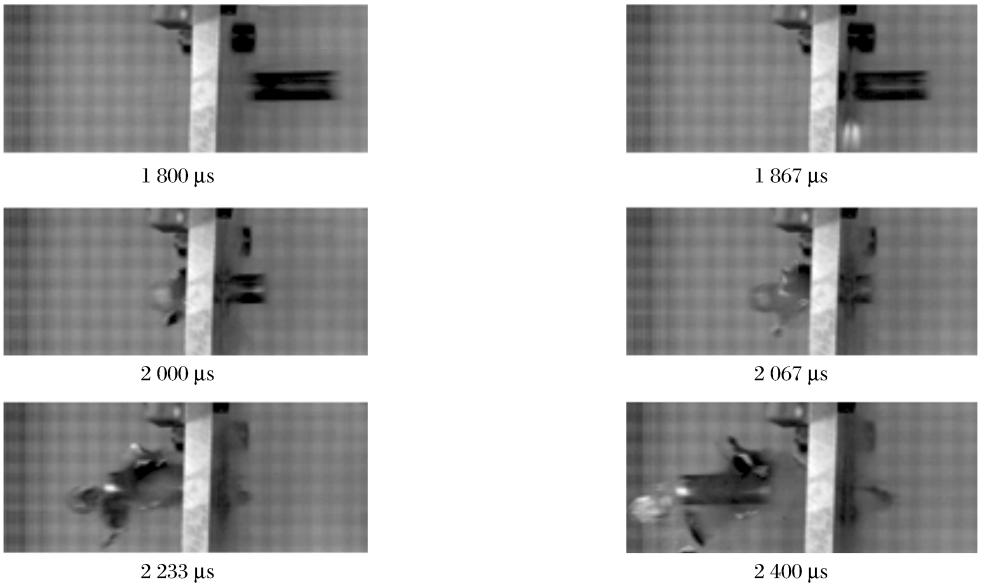


图 3 平头弹穿透 10 mm 厚 7A04 铝合金板过程($v_i=215.7$ m/s,$v_r=126.9$ m/s)

Fig. 3 Perforation of a 10 mm thick 7A04 Al alloy plate by a blunt nose projectile($v_i=215.7$ m/s,$v_r=126.9$ m/s)

图 5 给出了两种弹体以不同速度撞击 7A04 铝合金靶板后,靶板前方和后方的损伤形式照片,图 5(a)为平头弹撞击,图 5(b)为卵形弹撞击。B-2 是平头弹撞击靶板未贯穿时的情形,从图 5 中可以看出,靶板正面为边缘整齐的剪切坑,背面产生了较大范围的开裂;O-1 是卵形弹撞击靶板未贯穿的情况,靶板正面形成了一个和弹头形状一致的撞击坑,背面产生了剥落,但剥落的面积较小。B-3 是平头弹撞击后弹体刚好嵌入到靶板内的情形,此时,撞击速度接近弹道极限速度,靶板背面产生了较大面积的剥落;O-2 是卵形弹撞击靶板后,穿孔直径接近弹体直径但弹体反弹的情形,此时撞击速度接近弹道

极限速度，靶板正面孔口边缘有一些碎片崩落，背面有较大面积的剥落。B-6 和 B-8 为平头弹以不同速度贯穿靶板的情形，靶板正反两面的损伤情况与 B-3 接近，孔径和剥落面积也接近；O-5 和 O-6 为卵形弹以不同速度贯穿靶板的情形，正面孔边有明显崩落，背面剥落情况与 O-2 接近。

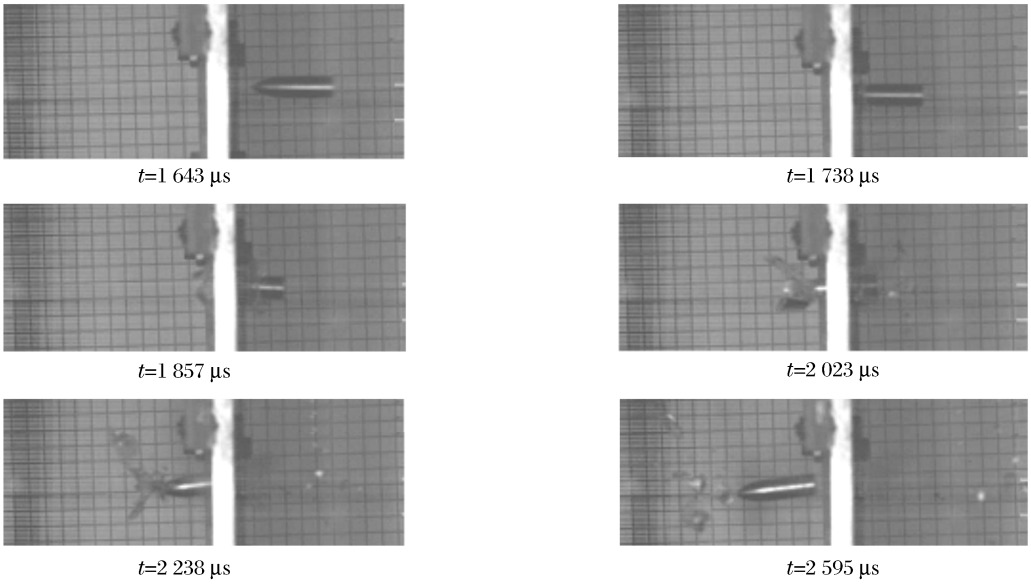
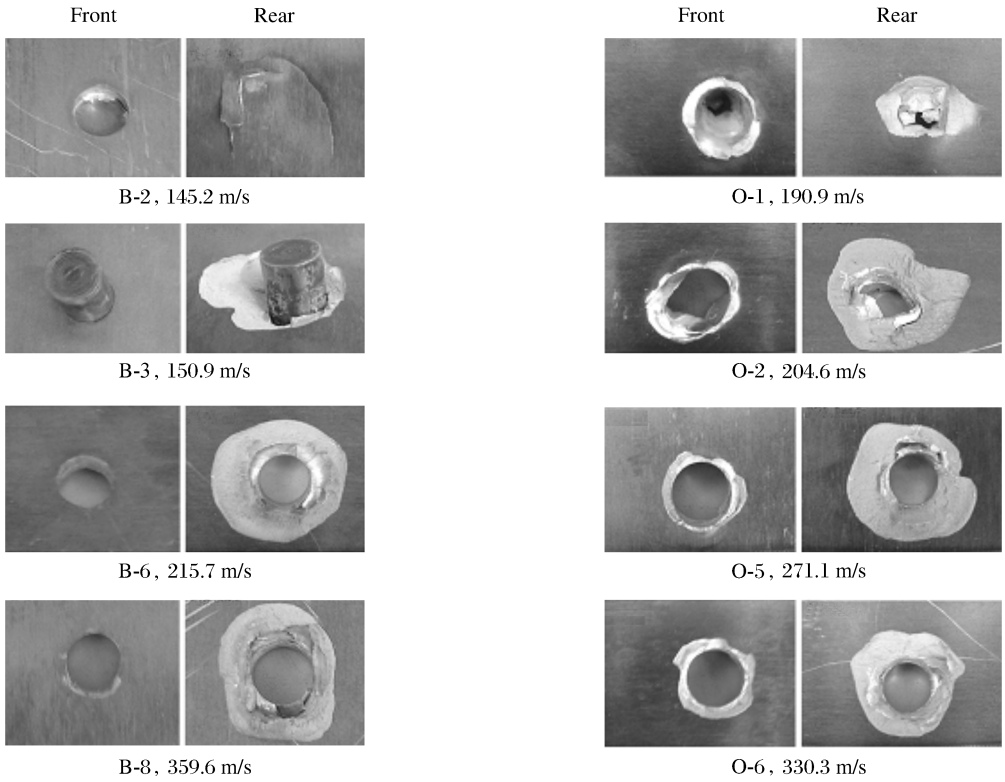


图 4 卵形弹穿透 10 mm 厚度 7A04 铝合金板过程(v_i=214.8 m/s，v_r=63.6 m/s)

Fig. 4 Perforation of a 10 mm thick 7A04 Al alloy plate by an ogival nose projectile(v_i=214.8 m/s，v_r=63.6 m/s)



(a) Blunt projectiles (b) Ogival projectiles

图 5 平头弹和卵形弹撞击后部分 7A04 铝合金靶板损伤照片

Fig. 5 Part of the damage photos in the 7A04 Al alloy targets after impact by blunt and ogival projectiles

图 6 分别展示了两幅平头弹和卵形弹撞击后的 7A04 铝合金靶板用线切割剖开后的截面图。其中,B-2 是平头弹撞击未贯穿的情况,从图 6 中可以看出,靶板后方已经裂开并即将形成冲塞,正面孔口非常整齐;B-6 为贯穿的情况,正面孔口也非常整齐,背面剥落区域近似为圆锥形。O-3 和 O-5 都是卵形弹撞击贯穿的情况,背面和平头弹撞击的情况非常相似,区别仅在于正面孔口有比较小的近似锥形的崩落,而且孔内壁不太光滑。结合 O-1 实验靶板的损伤情况,可以看出,平头弹和卵形弹贯穿破坏的机理是有区别的。平头弹侵彻靶板,在靶板后方剥落之前应该是纯剪切过程;而卵形弹侵彻时在靶板后方剥落之前有一段延性扩孔过程,是拉剪或压剪耦合破坏,比纯剪切破坏要消耗更多的能量[11-12],由此可以解释为何卵形弹撞击靶板时其弹道极限更高。图 6 中 d 和 D 分别表示正面穿孔直径和背面剥落平均直径。从表 1 中可以看出,不论平头弹还是卵形弹撞击后,靶板正面的穿孔直径 d 都接近于弹体直径,且大多数比弹体直径略小,说明弹体在靶板中是“挤过”的,即弹体紧贴靶板材料,通过后靶板的穿孔还有一定的弹性回复。背面剥落平均直径 D 在 24 mm 到 33 mm 之间,平头弹和卵形弹贯穿以及不同速度贯穿的差别不大。

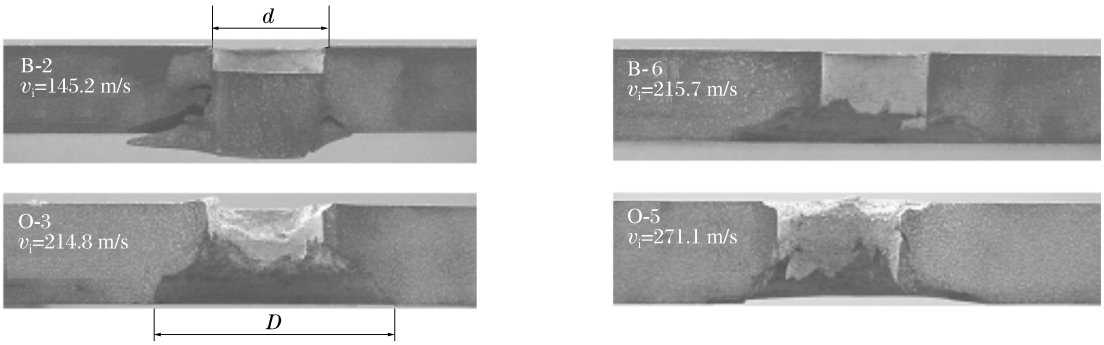


图 6　平头弹和卵形弹撞击后 7A04 铝合金靶板切开的几个截面

Fig. 6　Some cross-sections of sliced 7A04 Al plates after impact by blunt and ogival projectiles

4　结　论

通过轻气炮发射平头和卵形两种杆状弹体正撞击 10 mm 厚 7A04 铝合金板的实验研究,可以得到如下结论。

(1) 得到了两种弹体撞击 7A04 铝合金靶板的弹道极限以及剩余速度-初始速度的拟合公式,发现,卵形弹比平头弹撞击此种 7A04 铝合金板的弹道极限更高,同样速度贯穿后剩余速度更低,即在本研究的弹靶及速度范围内,此种 7A04 铝合金板抵抗卵形弹撞击的能力更强。

(2) 本研究中两种弹体贯穿 7A04 铝合金靶板后,靶板的损伤情况相似,都是正面穿孔,背面剥落,穿孔直径以及剥落区域的平均直径接近。两者的区别在于:卵形弹贯穿靶板后,靶板正面孔口边缘有碎片崩落,且孔壁不太光滑;而平头弹贯穿后,靶板正面孔口整齐,孔壁光滑。

(3) 从贯穿过程、靶板变形以及冲塞破碎情况可以看出,此种 7A04 铝合金板表现为比较明显的脆性特征,韧性比较差。

References:

[1] Børvik T, Dey S, Clausen A H. Perforation Resistance of Five Different High-Strength Steel Plates Subjected to Small-Arms Projectiles [J]. Int J Impact Eng, 2009, 36(7): 948-964.

[2] Mei Z Y, Tan D L, Zhu X, et al. Experimental Research on Light Composite Armor of Warship with Aluminum Alloy Structure [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(2): 150-155. (in Chinese)

梅志远，谭大力，朱 锡，等. 铝质舰体轻型复合装甲试验研究 [J]. 爆炸与冲击，2006，26(2)：150-155.

[3] Buyuk M，Kan S，Loikkanen M J. Explicit Finite-Element Analysis of 2024-T3/T351 Aluminum Material under Impact Loading for Airplane Engine Containment and Fragment Shielding [J]. J Aerosp Eng，2009，22(3)：287-295.

[4] Børvik T，Hopperstad O S，Pedersen K O. Quasi-Brittle Fracture during Structural Impact of AA7075-T651 Aluminium Plates [J]. Int J Impact Eng，2010，37(5)：537-551.

[5] Forrestal M J，Luk V K，Rosenberg Z，et al. Penetration of 7075-T651 Aluminum Targets with Ogival-Nose Projectiles [J]. Int J Solids Struct，1992，29(14-15)：1729-1736.

[6] Zhu J F，Wang W L，Zeng L. Research on Numerical Simulation of Anticartridge Effect for Certain Aluminum Allov Armor Plate [J]. Acta Armamentarii，2007，28(4)：467-470. (in Chinese)
朱建方，王伟力，曾 亮. 某型铝合金抗弹效应数值仿真研究 [J]. 兵工学报，2007，28(4)：467-470.

[7] He T，Wen H M. Numerical Simulations of the Penetration of Aluminum Targets by Ogive-Nosed Steel Projectiles [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics，2006，20(4)：404-414. (in Chinese)
何 涛，文鹤鸣. 卵形钢弹对铝合金靶板侵彻问题的数值模拟 [J]. 高压物理学报，2006，20(4)：404-414.

[8] He T，Wen H M. Numerical Simulations of the Perforation of Aluminum Targets Struck by a Deformable Projectile [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics，2008，22(2)：153-159. (in Chinese)
何 涛，文鹤鸣. 可变形弹丸贯穿铝合金靶的数值模拟研究 [J]. 高压物理学报，2008，22(2)：153-159.

[9] 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 Struc，2007，44(20)：6701-6723.

[10] Recht R F，Ipson T W. Ballistic Perforation Dynamics [J]. J Appl Mech，1963，30：384-390.

[11] Børvik T，Langseth M，Hopperstad O S，et al. Perforation of 12 mm Thick Steel Plates by 20 mm Diameter Projectiles with Blunt，Hemispherical and Conical Noses，Part Ⅰ：Experimental Study [J]. Int J Impact Eng，2002，27(1)：19-35.

[12] Dey S，Børvik T，Hopperstad O S，et al. The Effect of Target Strength on the Perforation of Steel Plates Using Three Different Projectile Nose Shapes [J]. Int J Impact Eng，2004，30(8-9)：1005-1038.

Experimental Study on Ballistic Resistance Property of 7A04 Aluminum Alloy Against Rod Projectiles Impact

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

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

Abstract：7A04 aluminum alloy with high strength-to-density ratio has been extensively applied for armour material domain. The projectiles normal impacting 7A04 aluminum alloy plates with 10 mm thickness was conduct by light gas gun，where blunt and ogival steel rod projectiles were involved. The damage modes and penetration characteristics of the 7A04 aluminum alloy targets were obtained. The whole impact process and the residual velocity were obtained by the high-speed camera system. The comparison of the initial velocity versus residual velocity between blunt-projectile penetration events and ogival-projectile penetration events indicated that 7A04 aluminum alloy plates own stronger resistance ability to ogival projectile impact than that of blunt projectile.

Key words：7A04 high-strength aluminum alloy；ballistic resistance property；ballistic limit；target damage