

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0249

在椭圆横截面弹体正侵彻下有限厚铝靶的破坏模式及响应特性*

刘均伟¹, 张先锋¹, 赵瑶瑶², 魏海洋^{1,3}, 刘 闯¹, 李鹏程¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 江苏永丰机械有限责任公司, 江苏 淮安 211722;

3. 北京航天长征飞行器研究所, 北京 100074)

摘要: 基于30 mm口径弹道炮平台, 开展了3种不同椭圆横截面弹体在200~600 m/s撞击速度范围内正侵彻2A12铝靶的实验, 获得了2A12铝靶的破坏形貌及弹体的剩余速度。在此基础上, 建立了相应的数值模型, 结合实验结果验证了所建模型的有效性, 并系统分析了弹体横截面长短轴长度比对靶体的破坏情况及响应特性的影响。研究表明: 弹体最大横截面面积是影响弹体剩余速度的主要因素, 而弹体横截面长短轴长度比对弹体剩余速度的影响较弱; 在圆形横截面弹体侵彻下靶体背部形成的花瓣大小和形状一致, 空间分布均匀, 而在椭圆横截面弹体侵彻下, 随着弹体横截面长短轴长度比的增大, 靶体背部形成的花瓣数量增加、尺寸变小, 且在短轴方向的花瓣数量和靶体表面隆起高度均大于长轴方向的; 靶体在圆形横截面弹体侵彻下的径向位移、径向应力和切向应力与其在椭圆横截面弹体侵彻下的显著不同, 前者沿周向方向各点的变化规律基本一致, 靶体处于简单的压缩状态, 切向应力为零, 而后者各点的应力状态与弹体横截面长短轴长度比和周向角密切相关, 靶体受到压缩和剪切应力的耦合作用。

关键词: 铝靶; 椭圆横截面弹体; 长短轴长度比; 剩余速度; 正侵彻; 径向位移; 径向应力; 切向应力

中图分类号: O385

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Failure modes and response characteristics of finite-thickness aluminum targets under normal penetration of elliptical cross-section projectiles

LIU Junwei¹, ZHANG Xianfeng¹, ZHAO Yaoyao², WEI Haiyang^{1,3}, LIU Chuang¹, LI Pengcheng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

2. Jiangsu Yongfeng Machinery Co. Ltd., Huai'an 211722, Jiangsu, China;

3. Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100074, China)

Abstract: By means of a 30-mm-caliber ballistic gun platform, a series of experiments were carried out on 2A12 aluminum targets subjected to normal penetration by three kinds of 30CrMnSi2A steel projectiles with different elliptical cross-section shapes in the striking velocity range from 200 m/s to 600 m/s. The residual velocities of the projectiles and the failure modes of the targets were experimentally obtained. Based on the experimental results, the corresponding numerical models were established and verified. And the influences of the major-to-minor axis length ratios of the projectile cross-sections on the failure modes and response characteristics of the targets were systematically analyzed. The results show as follows. The maximum cross-sectional areas of the projectiles are the main factor affecting the residual velocities of the projectiles, while the major-to-minor axis length ratios of the projectile cross-sections have little effect on the residual velocities. Therefore, in

* 收稿日期: 2022-06-08; 修回日期: 2022-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(12141202, 11790292); 中央高校基本科研业务费(30919011401)

第一作者: 刘均伟(1996—), 男, 博士研究生, liujunwei@njust.edu.cn

通信作者: 张先锋(1978—), 男, 博士, 教授, lynx@njust.edu.cn

engineering applications, the engineering model for the circular cross-section projectile penetrating a target can be directly used to calculate the residual velocity of the elliptical cross-section projectile with the same maximum cross-sectional area. In addition, under normal penetration of the circular cross-section projectiles, the sizes, shapes and distribution of the petals induced at the back faces of the targets are uniform. However, under normal penetration of the elliptical cross-section projectiles, as the major-to-minor axis length ratios of the projectile cross-sections increase, the numbers of the petals induced at the back faces of the targets increase and the petal sizes decrease, and the petal numbers and the uplifted height in the minor axis direction are greater than those in the major axis direction. The radial displacement, radial stress and tangential stress of the targets under the normal penetration of the elliptical cross-section projectiles are obviously different from those of the targets under the normal penetration of the circular cross-section projectiles. Under normal penetrations of the circular cross-section projectiles, the above response characteristics of the targets change basically the same along the circumferential directions and the targets are under simple compression states with the tangential stress of zero. But, under normal penetrations of the elliptical cross-section projectiles, the stress states of different points of the targets are closely related to the major-to-minor axis length ratios and the circumferential angles of the projectiles, and the targets are subjected to the coupling effects of the compression and shear stresses.

Keywords: aluminum target; elliptical cross-section projectile; major-to-minor axis length ratio; residual velocity; normal penetration; radial displacement; radial stress; tangential stress

目前,相较于圆形横截面弹体,各种非圆横截面弹体由于具有在高超声速武器平台上适应性好、装填比大、抗弯强度高及平台内部有效载荷空间利用率高等优点已成为研究热点^[1-3]。诸多学者在异形弹体对目标的侵彻与贯穿作用机理方面已开展了大量研究工作。Ben-Dor 等^[4-5]、Yakunina^[6-7]通过研究发现,对于弹体在稠密介质中的侵彻问题,非圆横截面弹体(多圆锥体切面)为最优的弹体结构形状,能够有效降低靶体侵彻阻力。Woo^[8]基于傅里叶级数展开和最小二乘法,研究了以压力/速度边界条件控制的任意截面形状的空腔膨胀时空腔边界的应力分布特性,通过比较发现非圆横截面弹体具有更优异的侵彻性能。Bless^[9]针对矩形横截面弹体和圆形横截面弹体进行了高速侵彻实验,分析了这 2 种弹体的侵彻效率,发现非对称横截面弹体在临界速度以下的侵彻性能更优异。杜忠华等^[10-11]开展了圆形、矩形和三角形 3 类横截面弹体侵彻半无限金属板的实验和理论研究,发现在弹体最大横截面面积和初始速度相同的情况下,三角形横截面弹体的侵彻效率最高,矩形横截面弹体的侵彻效率次之,而圆形横截面弹体的侵彻效率最低。高光发等^[12]基于杜忠华等^[10-11]的实验结果,开展了相应的数值模拟,进一步验证了杜忠华等^[10-11]的发现。Dong 等^[13-14]、Gao 等^[15]、高旭东等^[16]开展了一系列椭圆横截面弹体侵彻半无限厚混凝土靶的实验,弹体横截面长短轴长度比分别为 1.5 和 2.0,实验数据表明,椭圆横截面弹体在 700~1 000 m/s 的撞击速度范围内具有良好的侵彻性能和弹道稳定性;同时,通过数值模拟研究了椭圆横截面弹体侵彻混凝土靶的受力特性,结果表明,在相同侵彻速度下,弹体头部的法向应力从弹体横截面长轴方向向短轴方向逐渐升高。在有限厚靶板方面,王浩等^[17-18]开展了椭圆横截面弹体正贯穿加筋板的研究,获得了椭圆横截面弹体剩余速度和靶板弹道极限速度的预测公式,发现随着椭圆弹体横截面长短轴长度比的增大,靶板的弹道极限速度近似线性升高。Landkof 等^[19]基于刚塑性模型假设和能量守恒原理,考虑了裂纹传播、花瓣弯曲和靶板整体凹陷变形能,建立了锥形弹体正侵彻薄铝板弹道极限速度计算模型。张中国等^[20]和 Chen 等^[21]开展了加筋板贯穿实验研究,讨论了加强筋对靶板破坏模式和弹道参数的影响,分析了靶板吸收能量的情况,根据实验数据修正了 De Marre 贯穿经验公式。Song 等^[22]和徐双喜等^[23]同样基于刚塑性模型假设和能量守恒原理,分别对截卵形弹体和截锥形弹体贯穿加筋钢板进行了理论分析。

弹靶作用过程是一个复杂的动力学问题,在异形横截面弹体对目标的侵彻作用过程研究中,对弹体阻力以及侵彻剩余速度和侵彻深度的研究较广泛,而关于弹体侵彻作用下靶体响应特性的研究工作报道较少。研究异形横截面弹体侵彻作用下靶体破坏模式及响应特性对理解靶体非对称破坏、变形和耗

能特性以及建立靶体阻力函数等具有重要意义。因此, 本文中设计并开展 3 种不同横截面弹体正侵彻 2A12 铝板的实验研究, 获得椭圆横截面弹体对 2A12 铝板的破坏特性及弹体剩余速度; 在此基础上, 建立椭圆横截面弹体正侵彻 2A12 铝板的数值模拟模型, 结合实验结果验证模型的有效性, 并从工程应用的角度, 研究不同横截面弹体正侵彻铝板的剩余速度; 另外, 系统分析弹体横截面长短轴长度比对靶体破坏情况及响应特性的影响, 包括靶体两侧花瓣的大小、形状和分布规律, 靶体塑性应变区域的范围以及在弹体头部贯入阶段靶体沿周向各点的径向位移、径向应力和切向应力的变化规律等。

1 实验

1.1 弹体和靶体

为了研究不同横截面形状弹体正侵彻铝板的破坏特性, 开展了椭圆横截面弹体正侵彻铝板的实验。弹体材料为 30CrMnSiNi2A 高强度钢, 经淬火处理后洛氏硬度 HRC 为 55, 屈服强度约为 1600 MPa。实验弹体如图 1 所示, 包括 3 种弹型: C1 型弹、T1 型弹和 T2 型弹。弹体主要参数见表 1, a 和 b 分别为弹体横截面长、短半轴长, β 为弹体横截面的长短轴长度比, L 为弹体头部的长度, ψ 为弹体头部曲径比, m 为弹体的质量。椭圆横截面弹体的头部曲径比不是一个常数, 它与方位角密切相关, 即沿圆周方向由长轴向短轴逐渐增大^[2], 本文中所有曲径比均为短轴方向的曲径比。

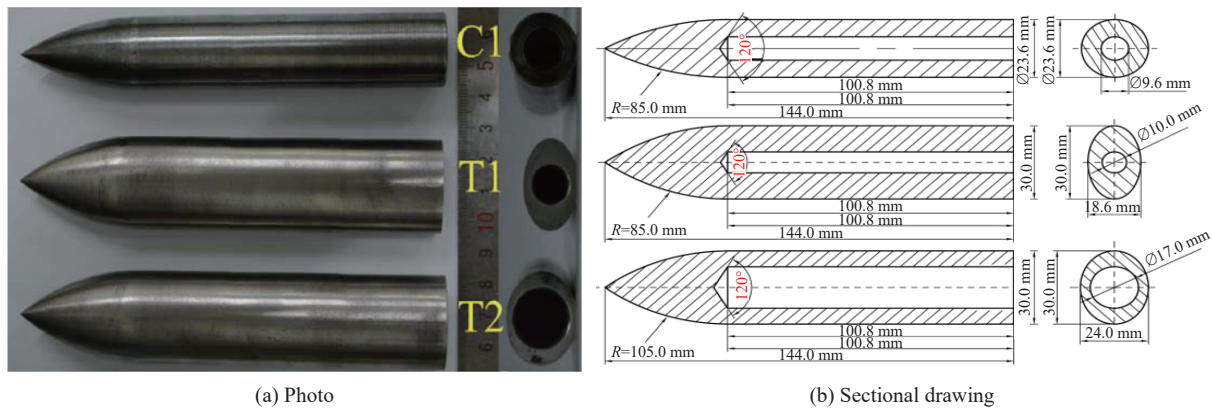


图 1 实验弹体

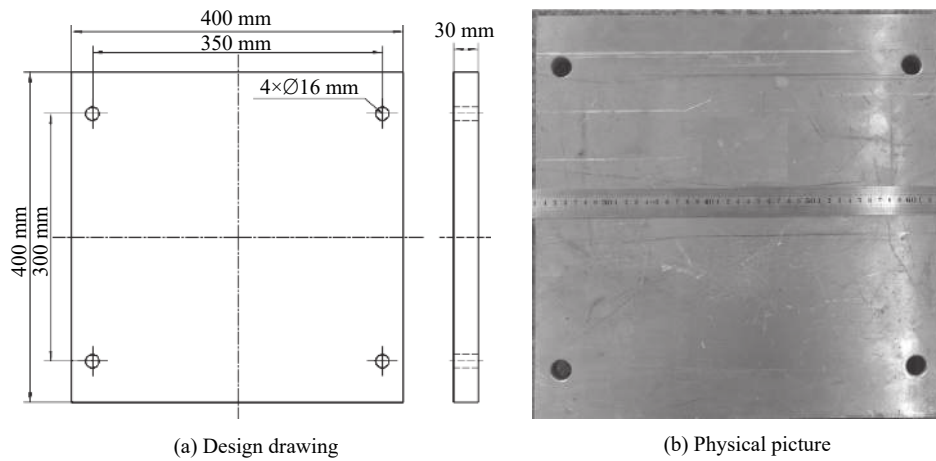
Fig. 1 Projectiles used in the experiments

表 1 三种弹体主要参数

Table 1 Main parameters of three projectiles

弹体类型	弹体轮廓	$2a/\text{mm}$	$2b/\text{mm}$	β	L/mm	ψ	m/g
C1		23.6	23.6	1.00	43.2	3.6	360
T1		30.0	18.6	1.61	43.2	5.6	360
T2		30.0	24.0	1.25	43.2	3.5	360

为保证侵彻弹体的完整性以研究弹体横截面形状对靶体破坏效应的影响, 选用强度较低(屈服强度约为 200 MPa)的 2A12 铝合金作为靶体材料。靶体尺寸设为 400 mm×400 mm×30 mm 以忽略靶体两侧自由面对靶体响应的影响, 如图 2 所示。实验现场布置如图 3 所示, 采用高速摄像机观察弹体飞行姿态, 同时将 2 个平面镜分别放置于靶前和靶后弹体运动轨迹的正下方, 与水平面呈 45° 夹角, 通过测量和分析弹体与平面镜中弹体的位置变化, 得到弹体的速度、运动轨迹和姿态。



(a) Design drawing

(b) Physical picture

图 2 实验靶体

Fig. 2 Targets used in the experiments



图 3 实验布局

Fig. 3 Experimental layout

1.2 实验结果

共开展了 10 发实验, 其中 C1 型弹体 4 发, T1 和 T2 型弹体各 3 发, 通过调整发射药量控制弹体速度在 200~600 m/s。C1-4 弹体飞行姿态如图 4 所示, 根据高速摄影以及平面镜成像可以核定弹体的着靶姿态、初始撞击速度和剩余速度, 实验结果见表 2, v_0 为弹体初始撞击速度, v_r 为弹体剩余速度, α 为弹体的着靶角, γ 为弹体的偏航角。从表 2 中可以看出: 3 种弹体的初始撞击速度基本相同, 具有一定的可比性; 弹体最大着靶角 α 为 2.69° , 最大偏航角 γ 为 -2.39° , 基本满足正侵彻条件。

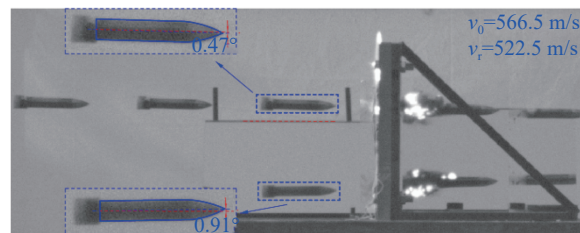


图 4 C1-4 弹体飞行姿态分析

Fig. 4 Analysis of the flight attitude of the C1-4 projectile

C1-4 弹体侵彻铝靶前后的对比如图 5 所示, 弹体长度和形状无明显变化, 仅表面有一定的摩擦痕迹, 因此, 弹体正侵彻铝靶的过程可视为刚体侵彻过程。

图 6 为在 3 种不同横截面形状弹体侵彻下铝靶的破坏形貌。可知, C1 型弹体贯穿铝靶后, 在铝靶正面形成近似圆形的弹孔, 孔径略大于弹体的直径, 铝靶背面形成多个花瓣, 且花瓣大小、分布较均匀;

T1 和 T2 型弹体与 C1 型弹体类似, 在铝靶正面形成近似弹体最大横截面形状和尺寸的孔洞, 而铝靶背面的花瓣大小和分布与 C1 型弹体侵彻下的有较大区别, 靶体破坏情况呈现不对称性, 表现为靶体孔洞横截面短轴方向的花瓣大于长轴方向的, 部分靶体孔洞横截面长轴方向的花瓣甚至发生了崩落。这与文献 [24] 的结论一致, 由于椭圆横截面空腔边界位移的不均匀性, 空腔边界应力分布呈现从长轴至短轴逐渐降低的趋势, 因此长轴方向受力更高。

表 2 弹体正侵彻铝靶的实验结果

Table 2 Experimental results for normal penetration of projectiles into aluminum targets

弹体	$v_0/(m \cdot s^{-1})$	$v_r/(m \cdot s^{-1})$	$\alpha/(^\circ)$	$\gamma/(^\circ)$
C1-1	402.3	336.0	1.08	+0.63
C1-2	310.7	214.5	0.34	+0.19
C1-3	256.2	120.3	0.25	+0.17
C1-4	566.5	522.5	1.11	-0.68
T1-1	402.0	338.0	1.26	-0.62
T1-2	229.4	0	2.03	-1.51
T1-3	570.3	531.6	1.91	-1.49
T2-1	405.3	322.7	0.76	-0.30
T2-2	229.5	0	2.69	-2.39
T2-3	569.3	509.2	1.57	-1.13

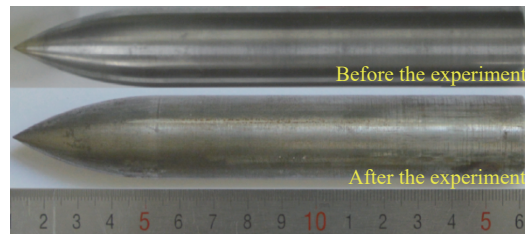


图 5 实验前后 C1-4 弹体对比

Fig. 5 Comparison of the C1-4 projectile before and after the experiment

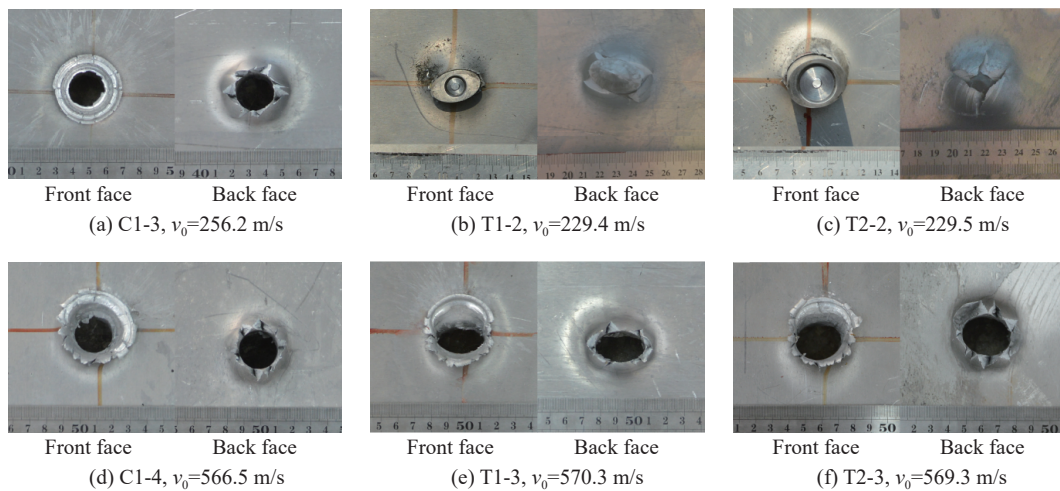


图 6 不同横截面形状弹体侵彻下铝靶的破坏形貌

Fig. 6 Damage of aluminum targets under normal penetration of the projectiles with different cross-section shapes

2 数值模拟

2.1 有限元模型及材料参数

采用 LS-DYNA 软件对铝靶在不同横截面形状的弹体正侵彻下的破坏特性进行数值模拟分析。铝板和弹体均采用八节点六面体单元, 单元算法为拉格朗日算法。为了节约 CPU 资源、提高数值模拟计算效率, 整个模型采用 1/4 建模, 铝靶迎弹面的中心区域网格划分密集, 网格大小为 0.25 mm×0.25 mm×0.3 mm, 网格从中心沿四周采用 3 次蝴蝶网格过渡, 中心区网格密集区域为 10 倍弹径, 弹靶有限元模型如图 7 所示。通过关键字 BOUNDARY_SPC_SET 设置对称面约束, 弹体和靶体之间通过关键字 CONTACT_ERODING_NODES_TO_SURFACE 设置侵蚀接触, 在靶板两侧边缘面设置无反射边界条件, 并施加固定约束, 保证数值模拟的初始条件与实验中初始条件一致。

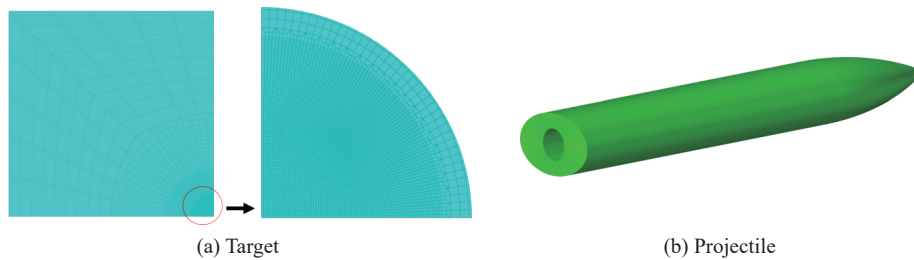


图 7 有限元模型

Fig. 7 Finite element models

从实验回收弹体可以看出弹体正侵彻薄铝靶的过程可视为刚体侵彻, 因此对弹体采用 MAT_RIGID 刚体模型, 而对铝靶则采用高应变率下适用的 JOHNSON_COOK (JC) 材料模型和 GRÜNEISEN 状态方程共同表征, 具体材料参数如表 3 所示。表 3 中 A 、 B 、 C 、 m 和 n 分别为静态屈服强度、硬化系数、硬化指数、温度软化指数和应变率系数, ρ 、 G 和 μ 分别为材料的密度、剪切强度和泊松比。

表 3 材料参数

Table 3 Material parameters

材料	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	G/GPa	μ	A/MPa	B/MPa	n	C	m	D_1
30CrMnSiNi2A ^[25]	7.85	210	0.3						
2A12铝 ^[26]	2.77	28	0.33	195	230	0.31	0.42	1	0.75

2.2 数值模型准确性验证

根据实验初始条件, 对不同横截面弹体正侵彻铝靶过程进行了模拟。从表 4 可以看到, 数值模拟的弹体剩余速度与实验结果吻合较好, 相对误差 ϵ_r 最大为 9.2%。从图 8 可以发现, 数值模拟得到的 3 种横截面弹体正侵彻铝靶的破坏形貌与实验结果吻合良好, 仅部分铝靶孔洞边缘处一些尺寸较小的花瓣与实验结果有一定差距, 这可能是由于单元侵蚀算法将部分畸变严重网格删除所致。数值模拟结果中靶板破坏情况与实验结果基本吻合, 表明本文中使用的网格尺寸、材料模型及参数等是合理的, 能较好地模拟不同横截面弹体正侵彻下铝靶的结构响应和破坏模式, 后续可依据此模型对不同横截面弹体正侵彻下铝靶的力学行为进行分析和预测。

表 4 弹体剩余速度模拟结果与实验结果的对比

Table 4 Comparison of residual velocities of projectiles between simulation and experiment

弹体类型	$v_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_r/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		$\epsilon_r/\%$
		实验	数值模拟	
C1	256.2	120.3	109.2	-9.2
	310.7	214.5	202.7	-5.5
	402.3	336.0	323.3	-3.8
	566.5	522.5	510.7	-2.3
T1	229.4	0	21.3	
	402.0	338.0	323.5	-4.3
	570.3	531.6	514.5	-3.2
T2	229.5	0	0	0
	405.3	322.7	302.5	-6.3
	569.3	509.2	497.5	-2.3

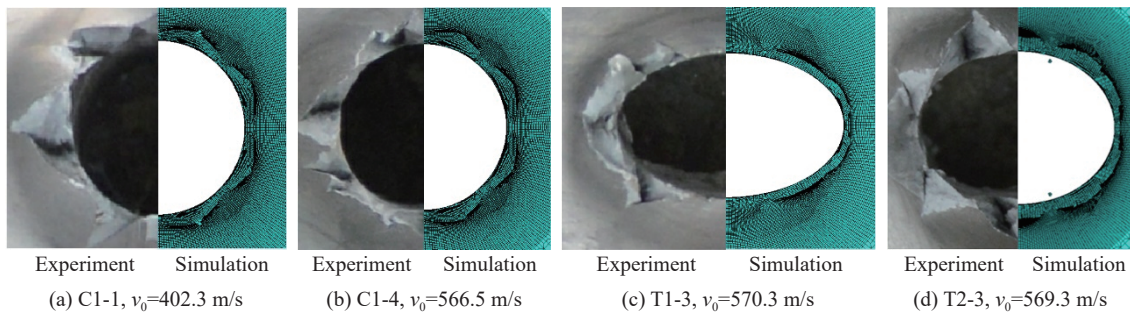


图 8 实验靶板破坏形态与数值模拟结果对比

Fig. 8 Comparison of failure morphologies of targets between simulation and experiment

3 椭圆横截面弹体正侵彻有限厚铝靶作用特性数值模拟分析

基于已验证的数值模型, 系统研究了弹体椭圆横截面长短轴长度比对靶体破坏情况以及响应特性的影响, 包括靶体两侧的花瓣大小、形状和分布规律, 以及靶体塑性应变区域的范围等, 并从工程应用的角度, 计算了不同横截面形状弹体正侵彻铝靶后的剩余速度; 同时在极坐标系中研究了在弹体头部贯入阶段靶体沿周向各点的径向位移、径向应力和切向应力的变化规律。

3.1 不同横截面形状弹体正侵彻铝靶后的剩余速度

为研究弹体椭圆横截面长短轴长度比对弹体剩余速度的影响, 根据 C1 和 T1 弹体, 在保证弹体横截面面积相同的情况下设计了 2 种椭圆横截面弹体(T3 和 T4 弹体), 这 4 种弹体横截面长短轴长度比 β 分别为 1.00、1.61、1.25 和 2.00, 弹体的初始速度 v_0 为 200~600 m/s, 计算相应的剩余速度 v_r , 如图 9 所示, S 为该弹体的最大横截面面积。通过调整弹身部分的开孔尺寸, 保证各弹体的质量和头部长度一致。

从图 9 可以看出, C1、T1、T3 和 T4 型弹体的剩余速度差异较小, 这表明椭圆弹体横截面长短轴长度比对其剩余速度的影响较弱。因此, 在工程应用中, 可直接使用圆形横截面弹体正贯穿靶板的工程模型来计算具有相同最大横截面面积

的椭圆横截面弹体的剩余速度。T2 和 T3 型弹体虽然具有相同的横截面长短轴长度比, 但 T2 型弹体的最大横截面面积大于 T3 型弹体的, 从两者的剩余速度曲线可以看出, T2 型弹体的剩余速度低于 T3 型弹体的, 这意味着弹体最大横截面面积对其正侵彻靶板后的剩余速度影响较显著。在设计弹体结构时, 在保证弹体强度和刚度的情况下, 尽量减小弹体的最大横截面面积以提高弹体穿靶后的剩余速度。

3.2 弹体横截面长短轴长度比对靶体破坏情况及响应特性的影响

为分析椭圆横截面弹体长短轴长度比对靶体破坏情况的影响, 以长短轴长度比 β 分别为 1.00、1.25、1.61 和 2.00 的 4 种弹体(质量、长度、最大横截面面积等均一致)为计算模型, 分析在 400 m/s 弹体撞击速度下靶体破坏情况及响应特性的差异, 如图 10~11 所示。

从图 10 可以看出, 圆形与椭圆横截面弹体侵彻作用下靶体的破坏程度有一定差异(图中长轴方向为长轴平视图, 即弹道边缘对应弹体长轴)。从靶体背部的花瓣数量来看, $\beta=1.00$ 的 C1 型弹体侵彻造成的花瓣数量最少(6 个), 而 $\beta=2.00$ 的 T4 型弹体侵彻造成的花瓣数量最多(多于 20 个)。从花瓣的形态分析, 前者靶体背部的花瓣大小一致、形状规则, 且分布均匀, 而后者靶体背部的花瓣则大小不一、形状不

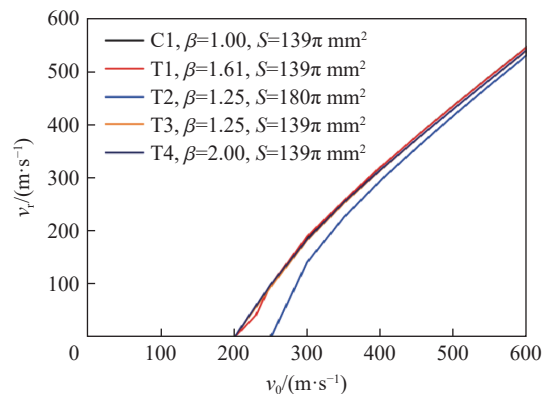


图 9 不同横截面形状弹体剩余速度对比

Fig. 9 Comparison of residual velocities of projectiles with different cross-section shapes

规则, 且分布角度差距较大。总的来说, 弹体横截面长短轴长度比越大, 侵彻后靶体背部的花瓣数量越多, 尺寸越小, 且短轴方向的花瓣数量和靶体表面隆起高度大于长轴方向的。此外, 从塑性应变分布可以看出, 在花瓣处的应变值明显高于其余位置的, 且长轴方向的高塑性应变区域更集中, 意味着靶体在长轴方向受力更高, 容易产生破坏, 这也解释了实验中所观察到长轴方向花瓣发生的崩落现象。

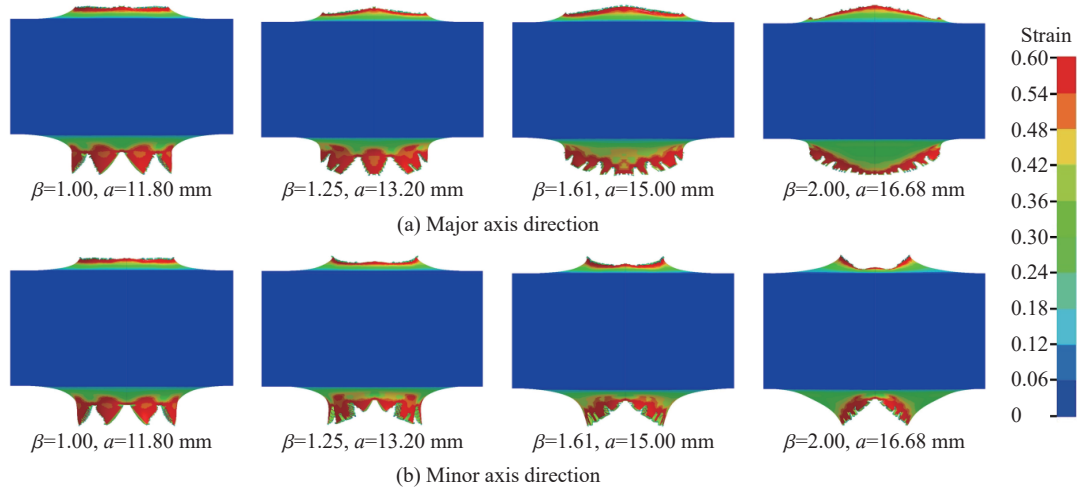


图 10 弹体横截面长短轴长度比对靶体破坏形貌的影响

Fig. 10 Influence of major-to-minor axis length ratios of the projectile cross-sections on damage morphologies of the targets

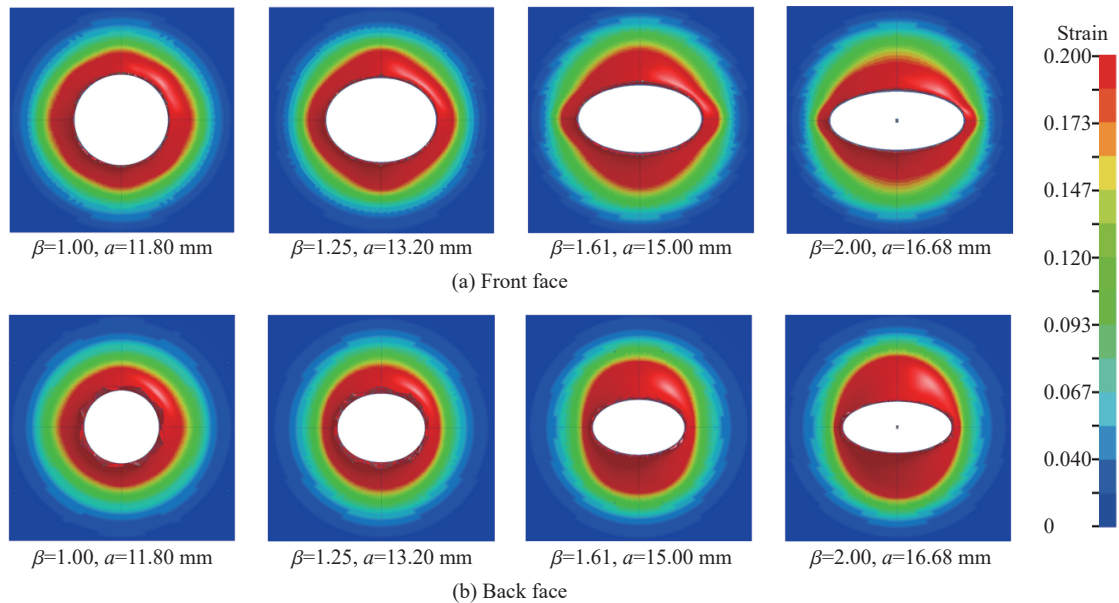


图 11 靶体应变分布

Fig. 11 Strain distribution of the targets

从图 11 可以看出: 圆形横截面弹体侵彻作用下靶体表面、背部塑性应变区域为圆形; 其余 3 种椭圆横截面弹体侵彻作用下靶体表面、背部塑性应变区域呈现类椭圆形, 同时长轴方向的塑性应变影响范围明显小于短轴方向的。

表 5 中统计了在靶体背部长/短轴方向上塑性应变不超过 0.2 的区域的最大坐标值, 定义长/短轴相对增量=(长/短轴最大坐标值-长/短轴半轴长)÷(长/短轴半轴长), 表征靶体在长/短轴方向塑性应变区域的增大比例。表 5 中数据表明, 随着长短轴长度比的增大, 长轴相对增量逐渐减小, 短轴相对增量逐渐增大, 塑性应变区域的不对称性逐渐加剧。

表 5 靶体背部塑性应变区域范围对比

Table 5 Comparison of plastic strain ranges on the back of targets

弹体类型	2a/mm	2b/mm	长轴最大坐标/mm	短轴最大坐标/mm	长轴相对增量/%	短轴相对增量/%
C1	23.60	23.60	18.55	18.55	57.20	57.20
T3	26.40	21.10	17.30	18.08	31.06	71.37
T1	30.00	18.60	18.13	20.10	20.87	116.13
T4	33.36	16.68	19.13	22.30	14.69	167.39

3.3 极坐标系下弹体横截面长短轴长度比对靶体响应特性的影响

在弹体的侵彻理论模型中, 靶体的径向/法向应力是学者们更关注的问题, 其与靶体阻力函数密切相关, 直接影响理论模型的准确性。因此, 通过在数值模拟后处理软件中建立极坐标系的方法, 分析不同椭圆横截面长短轴长度比的弹体侵彻作用下靶体的响应特性。忽略靶体自由面效应及边界效应对计算结果的影响, 仅提取弹体头部贯入阶段靶体沿周向各点的各项参数, 靶体测量点位置如图 12 所示, 在 400 m/s 的初始撞击速度下, 弹体头部贯入阶段持续约 80 μ s。

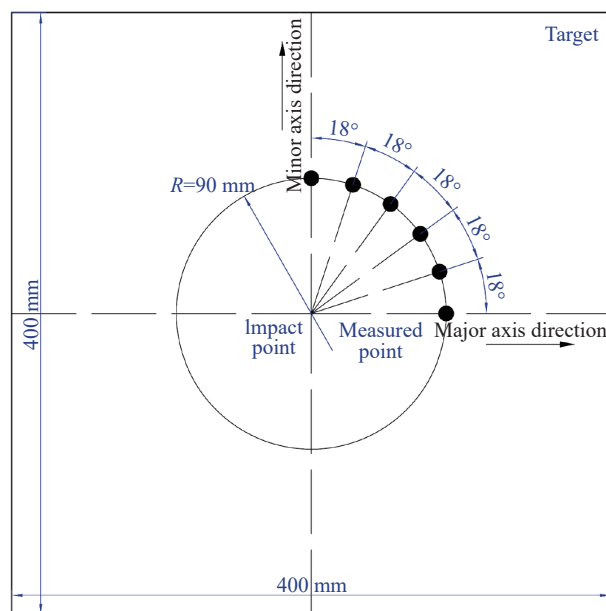


图 12 数值模拟中靶体测点分布

Fig. 12 Layout of measured points of targets in numerical simulation

图 13~15 给出了不同长短轴长度比的椭圆横截面弹体侵彻作用下, 各测量点的径向位移、径向应力及切向应力的变化情况。从图 13~14 可以看出, 圆形与椭圆横截面弹体侵彻作用下靶体的响应特性有显著区别。从靶体的径向位移和径向应力来看, 前者在周向方向的变化趋势基本一致, 各测量点提取的数据曲线重合, 表明靶体的响应沿周向是均匀的; 而后者在周向的各点表现出较大的差异, 主要如下: (1) 各测量点的径向位移和径向应力峰值不同, 峰值呈现出从短轴至长轴逐渐降低的趋势; (2) 各测量点的径向位移和径向应力达到峰值的时间不同, 长轴方向最先达到峰值, 而在短轴方向最晚; (3) 径向位移和径向应力峰值大小和比值与弹体横截面长短轴长度比有关。

从图 15(a) 可以发现, 靶体在各点的切向应力基本为零, 这是由于圆形横截面弹体为旋转对称结构, 在理想侵彻条件(弹体刚性、无倾角/攻角/偏航角)下, 靶体在各方向的变形一致且仅沿着径向方向, 因此切向方向无变形, 切向应力为零; 而椭圆横截面弹体则是面对称结构, 导致靶体除了在弹体对称面(长/短轴平面)上仅沿径向变形, 而在其余方向同时具有径向变形和切向变形; 因此切向应力在 0°和 90°方向为零, 在 0°与 90°之间呈现先升高后降低的趋势, 如图 15(b)~(d) 所示。

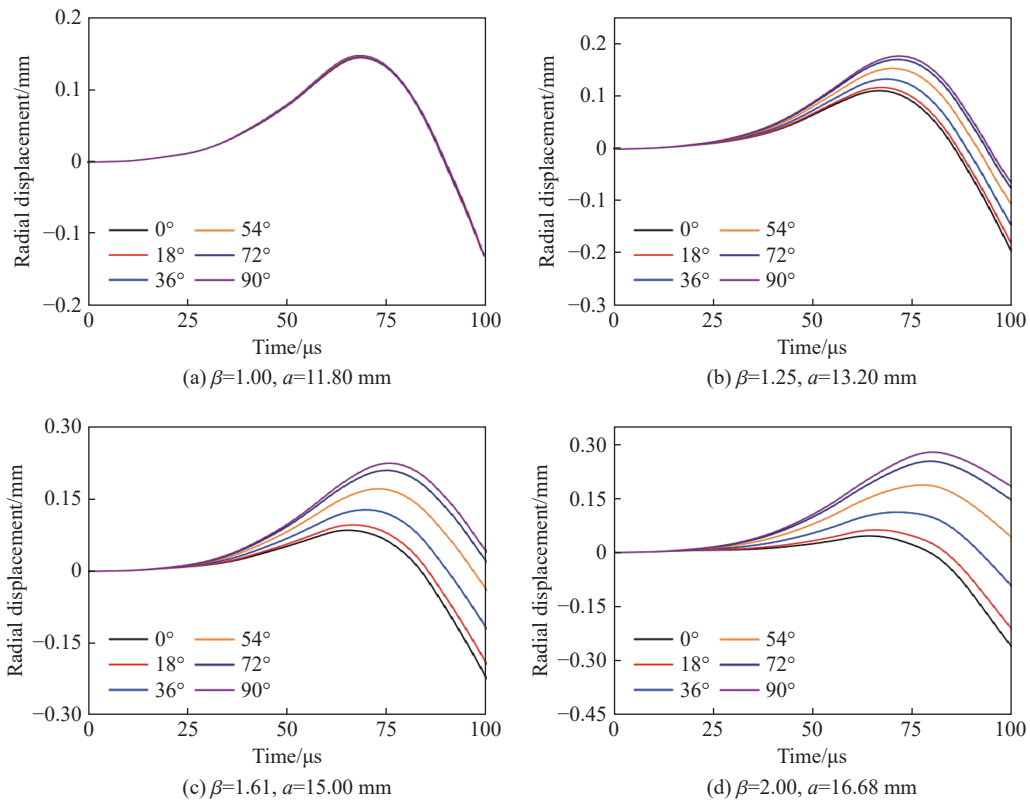


图 13 靶体沿周向方向的径向位移

Fig. 13 Radial displacement of targets along circumferential direction

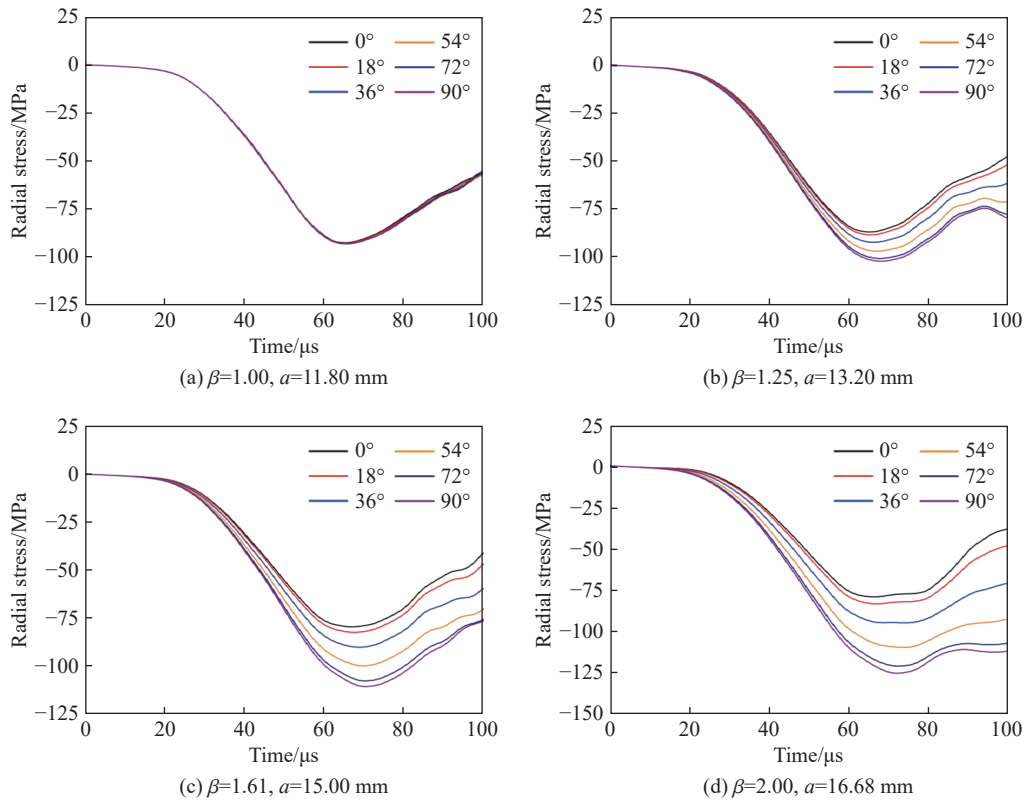


图 14 靶体沿周向方向的径向应力

Fig. 14 Radial stress of targets along circumferential direction

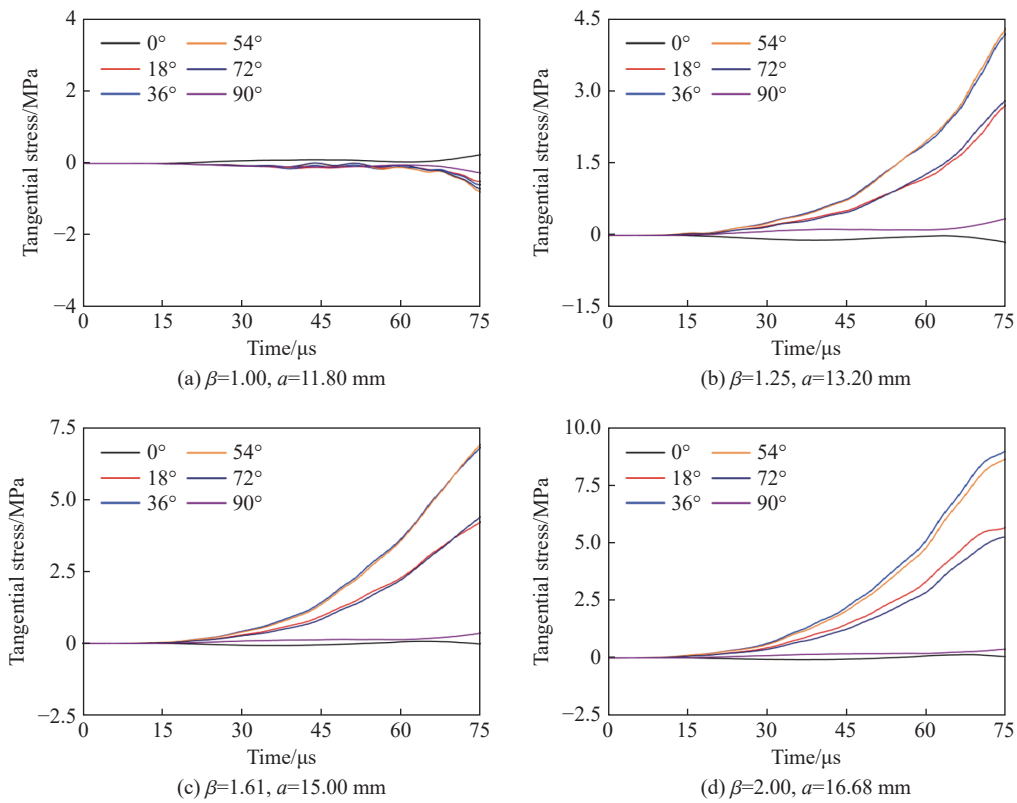


图 15 靶体沿周向方向的切向应力

Fig. 15 Tangential stress of targets along circumferential direction

为了直观分析弹体横截面长短轴长度比对靶体响应特性的影响规律, 将径向位移和径向应力的峰值做无量纲化处理, 同时提取切向应力的峰值进行研究, 如图 16~18 所示。从图中可以看到弹体横截面长短轴长度比对靶体的径向位移/应力和切向应力的影响显著, 长短轴长度比越大, 径向位移/应力和切向应力的不对称性越明显; 径向位移/应力从长轴至短轴逐渐增加, 同时变化梯度呈现先增加后减小的趋势, 类似于三角函数。而靶体的切向应力(除圆形横截面弹体外)则表现先增加后减小的变化规律, 切向应力关于 45°方向基本呈现对称分布; 此外, 随着长短轴长度比的增大, 切向应力的峰值提升显著。

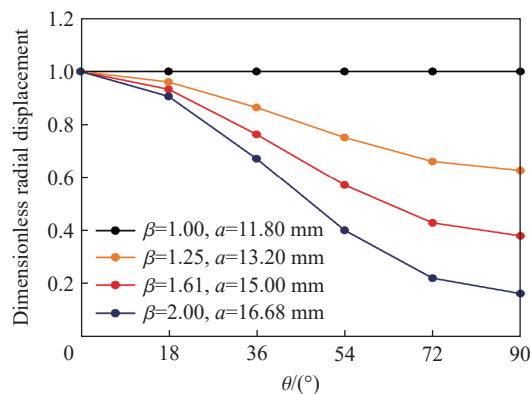


图 16 沿周向方向的无量纲径向位移

Fig. 16 Dimensionless radial displacement of targets along circumferential direction

图 13~18 的数值模拟结果表明, 在圆形横截面弹体侵彻作用下, 靶体沿周向方向各测量点的响应曲线基本一致, 靶体各点仅受径向应力作用而切向应力为零, 因此绝大部分圆形横截面弹体的侵彻理论

模型将弹靶作用过程简化为一维是合理的; 在椭圆横截面弹体侵彻作用下, 靶体沿周向方向各测量点的响应曲线则存在明显的非对称特性, 靶体各点径向位移和径向应力峰值、峰值到达时间、峰值比值等与周向角密切相关。不考虑靶体反射形成的拉伸波的情况下, 靶体也不再是处于简单的压缩状态, 而是处于压缩/剪切的复杂应力状态, 因此针对椭圆横截面弹体的侵彻理论模型应着重考虑靶体复杂应力状态对靶体阻力函数的影响。

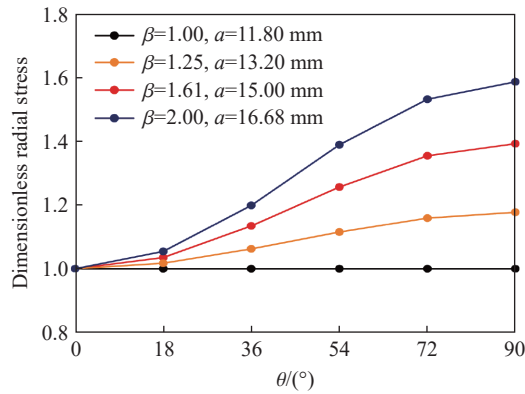


图 17 沿周向方向的无量纲径向应力

Fig. 17 Dimensionless radial stress of targets along circumferential direction

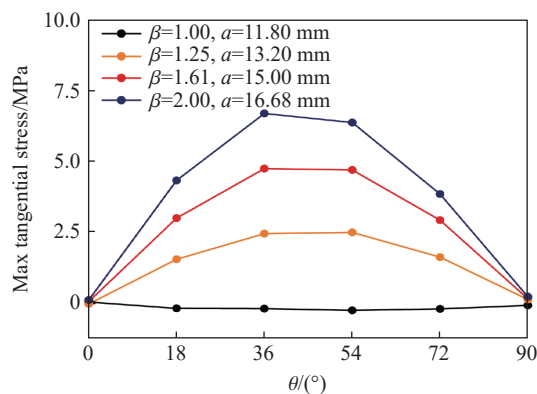


图 18 沿周向方向的最大切向应力

Fig. 18 The maximum tangential stress of targets along circumferential direction

4 结 论

开展了 3 种不同椭圆横截面弹体(弹体横截面长短轴长度比 $\beta=1.00, 1.25, 1.61$) 在 $200\sim 600 \text{ m/s}$ 撞击速度范围内正侵彻 2A12 铝板的实验, 获得了 2A12 铝板的破坏特征及弹体的剩余速度。在此基础上, 建立了相应的数值模拟模型, 结合实验结果验证了模型的有效性, 并系统分析了弹体横截面长短轴长度比对靶体破坏情况及响应特性的影响, 主要结论如下。

(1) 弹体最大横截面面积是影响弹体剩余速度的主要因素, 弹体横截面长短轴长度比对其剩余速度的影响较小。在工程应用中, 可直接使用圆形横截面弹体正贯穿靶板的工程模型来计算具有相同最大横截面面积的椭圆横截面弹体的剩余速度。

(2) 弹体横截面长短轴长度比对靶体的破坏程度有较大影响。当 $\beta=1.00$ 时, 靶体背部形成的花瓣大小和形状一致、空间分布均匀, 而随着长短轴长度比的增大, 花瓣数量增加, 尺寸变小, 且短轴方向的花瓣数量、靶体表面隆起高度大于长轴方向的。

(3) 弹体横截面长短轴长度比对靶体响应特性有显著影响。在圆形横截面弹体侵彻作用下, 靶体背

部的塑性应变区域为圆形;而在椭圆横截面弹体侵彻作用下,靶体背部的塑性应变区域则近似于椭圆形,且沿短轴方向的塑性应变区域明显大于沿长轴方向的塑性应变区域。

(4) 在圆形横截面弹体侵彻作用下,靶体的径向位移、径向应力和切向应力与在椭圆横截面弹体侵彻作用下靶体的径向位移、径向应力和切向应力显著不同:前者靶体沿周向方向各点的应力状态变化规律基本一致,靶体处于简单的压缩状态,切向应力为零;后者靶体各点的应力状态与弹体横截面长短轴长度比和周向角密切相关,靶体各点同时受到压缩和剪切应力的耦合作用。

参考文献:

- [1] VEDERNIKOV Y A, LEVIN V A, KHUDYAKOV Y S. Evolution and comparative analysis of group armor- and aeroballistics of ancient and modern ruled and poly-wedge arrows [J]. *Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Mathematical Modeling in Geophysics*, 2005, 10: 93–116.
- [2] DAI X H, WANG K H, LI M R, et al. Rigid elliptical cross-section ogive-nose projectiles penetration into concrete targets [J]. *Defence Technology*, 2021, 17(3): 800–811. DOI: 10.1016/j.dt.2020.05.011.
- [3] MA X H, ZHANG Q M, ZHANG X W. A model for rigid asymmetric ellipsoidal projectiles penetrating into metal plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 163: 104140. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.104140.
- [4] BEN-DOR G, DUBINSKY A, ELPERIN T. Optimal 3D impactors penetrating into layered targets [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 1997, 27(3): 161–166. DOI: 10.1016/S0167-8442(97)00018-9.
- [5] BEN-DOR G, DUBINSKY A, ELPERIN T. A model for predicting penetration and perforation of FRP laminates by 3-D impactors [J]. *Composite Structures*, 2002, 56(3): 243–248. DOI: 10.1016/S0263-8223(02)00009-0.
- [6] YAKUNINA G Y. The construction of optimum three-dimensional shapes within the framework of a model of local interaction [J]. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2000, 64(2): 289–298. DOI: 10.1016/S0021-8928(00)00051-4.
- [7] YAKUNINA G Y. The optimum non-conical and asymmetrical three-dimensional configurations [J]. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2000, 64(4): 583–591. DOI: 10.1016/S0021-8928(00)00084-8.
- [8] WOO H J. Cavity expansion analysis of non-circular cross-sectional penetration problems [D]. Austin, Texas, USA: The University of Texas at Austin, 1997: 132–154.
- [9] BLESS S J. Penetration mechanics of non-circular rods [J]. *AIP Conference Proceedings*, 1996, 370(1): 1119–1122. DOI: 10.1063/1.50861.
- [10] 杜忠华, 曾国强, 余春祥, 等. 异型侵彻体垂直侵彻半无限靶板试验研究 [J]. *弹道学报*, 2008, 20(1): 19–21.
DU Z H, ZENG G Q, YU C X, et al. Experimental research of novel penetrator vertically penetrating semi-infinite target [J]. *Journal of Ballistics*, 2008, 20(1): 19–21.
- [11] 杜忠华, 朱建生, 王贤治, 等. 异型侵彻体垂直侵彻半无限靶板的分析模型 [J]. *兵工学报*, 2009, 30(4): 403–407. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2009.04.005.
DU Z H, ZHU J S, WANG X Z, et al. Analytical model on non-circular penetrator impacting semi-infinite target perpendicularly [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(4): 403–407. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2009.04.005.
- [12] 高光发, 李永池, 刘卫国, 等. 长杆弹截面形状对垂直侵彻深度的影响 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2011, 34(3): 5–8. DOI: 10.3969/j.issn.1004-244X.2011.03.002.
GAO G F, LI Y C, LIU W G, et al. Influence of the cross-section shapes of long rod projectile on the vertical penetration depth [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2011, 34(3): 5–8. DOI: 10.3969/j.issn.1004-244X.2011.03.002.
- [13] DONG H, LIU Z H, WU H J, et al. Study on penetration characteristics of high-speed elliptical cross-sectional projectiles into concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 132: 103311. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.05.025.
- [14] DONG H, WU H J, LIU Z H, et al. Penetration characteristics of pyramidal projectile into concrete target [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 143: 103583. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103583.
- [15] GAO X D, LI Q M. Trajectory instability and convergence of the curvilinear motion of a hard projectile in deep penetration [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, 121: 123–142. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.12.021.
- [16] 高旭东, 李庆明. 带攻角斜侵彻混凝土的弹道偏转分析 [J]. *兵工学报*, 2014, 35(Supp1 2): 33–39.
GAO X D, LI Q M. Trajectory analysis of projectile obliquely penetrating into concrete target at attack angle [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(Supp1 2): 33–39.

- [17] 王浩, 武海军, 闫雷, 等. 椭圆横截面弹体斜贯穿双层间隔薄钢板失效模式 [J]. *兵工学报*, 2020, 41(Suppl 2): 1–11. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.S2.001.
WANG H, WU H J, YAN L, et al. Failure mode of oblique perforation of truncated ogive-nosed projectiles with elliptic cross-section into double-layered thin steel plate with gap space [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(Suppl 2): 1–11. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.S2.001.
- [18] 王浩, 潘鑫, 武海军, 等. 椭圆截面截卵形刚性弹体正贯穿加筋板能量耗散分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(10): 103203. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0350.
WANG H, PAN X, WU H J, et al. Energy dissipation analysis of elliptical truncated oval rigid projectile penetrating stiffened plate [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(10): 103203. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0350.
- [19] LANDKOF B, GOLDSMITH W. Petalling of thin, metallic plates during penetration by cylindro-conical projectiles [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1985, 21(3): 245–266. DOI: 10.1016/0020-7683(85)90021-6.
- [20] 张中国, 黄风雷, 段卓平, 等. 弹体侵彻带加强筋结构靶的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2004, 24(5): 431–436. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2004.05.009.
ZHANG Z G, HUANG F L, DUAN Z P, et al. The experimental research for projectile penetrating the structural target with rebar [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(5): 431–436. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2004.05.009.
- [21] CHEN Y, WANG Y, TANG P, et al. Impact characteristics of stiffened plates penetrated by sub-ordnance velocity projectiles [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64(6): 634–643. DOI: 10.1016/j.jcsr.2007.12.006.
- [22] SONG W D, NING J G, WANG J. Normal impact of truncated oval-nosed projectiles on stiffened plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(9): 1022–1034. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.05.008.
- [23] 徐双喜, 吴卫国, 李晓彬, 等. 截锥形弹穿甲单加筋板的破坏特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(1): 62–68. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)01-0062-07.
XU S X, WU W G, LI X B, et al. Failure characteristics of a conical projectile penetrating single stiffened plate [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(1): 62–68. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)01-0062-07.
- [24] LIU J W, ZHANG X F, WEI H Y, et al. Study on the penetration of elliptical cross-section projectiles into concrete targets: theory and experiment [J]. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2022, 19(3): 23. DOI: 10.1590/1679-78256939.
- [25] 李磊, 张先锋, 吴雪, 等. 不同硬度 30CrMnSiNi2A 钢的动态本构与损伤参数 [J]. *高压物理学报*, 2017, 31(3): 239–248. DOI: 10.11858/gywlxb.2017.03.005.
LI L, ZHANG X F, WU X, et al. Dynamic constitutive and damage parameters of 30CrMnSiNi2A steel with different hardnesses [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(3): 239–248. DOI: 10.11858/gywlxb.2017.03.005.
- [26] 米双山, 张锡恩, 陶贵明. 钨球侵彻 LY-12 铝合金靶板的有限元分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(5): 477–480. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)05-0477-04.
MI S S, ZHANG X E, TAO G M. Finite element analysis of spherical fragments penetrating LY-12 aluminum alloy target [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(5): 477–480. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)05-0477-04.

(责任编辑 张凌云)