

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0017

弹体斜侵彻双层钢板的结构响应和失效研究*

朱超¹, 张晓伟¹, 张庆明¹, 张陶²

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2. 北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076)

摘要: 为探究弹体斜侵彻多层钢板的结构响应及失效规律, 开展了圆形、椭圆和非对称椭圆三种截面弹体对双层钢板的斜侵彻试验, 获得了不同弹体的弹道特性和结构失效情况。在此基础上, 采用有限元软件对弹体斜侵彻过程的弹道特性、动态载荷以及结构响应进行了数值分析。基于空间自由梁理论和弹体动态载荷, 给出了侵彻过程中弹体轴力和弯矩的分布规律, 建立了弹体结构强度与失效分析方法。结果表明, 弹体以正着角水平侵彻多层钢板时, 存在一个临界攻角; 当攻角小于临界值时, 侵彻过程中会出现弹体低头、弹道向下偏转的现象; 当攻角大于临界值时, 则出现弹体抬头、弹道向上偏转的现象; 该临界攻角随着靶板厚度的减小而增大。对于强度高、韧性低的弹体, 失效模式为脆性断裂, 断裂位置距头部 0.72~0.81 倍弹长, 弹身后部所受横向冲击载荷是造成弹体断裂的主要原因。建立的弹体结构响应模型可准确预测弹体断裂失效及发生位置。此外, 在三种截面弹体中, 非对称椭圆弹体的断裂位置更接近头部。

关键词: 斜侵彻; 双层钢板; 结构响应; 失效; 自由梁理论

中图分类号: O385

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Structural response and failure of projectiles obliquely penetrating into double-layered steel plate targets

ZHU Chao¹, ZHANG Xiaowei¹, ZHANG Qingming¹, ZHANG Tao²

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to investigate the structural response and failure of projectiles obliquely penetrating into a multi-layered steel plate target, oblique penetration tests were conducted, in which three kinds of projectiles with circular, elliptical, and asymmetric elliptical cross-sections were employed while the ballistic trajectory and structural failure of projectiles were recorded. With the photographs captured by high-speed camera, a pixel measuring method was used to obtain the velocity and attitude deflection angle of projectiles. Based on the test results, the ballistic characteristics, dynamic loads and structural response of projectiles are analyzed by using FEM code ABAQUS/explicit, focusing on the oblique penetration at initial speed of 480 m/s and attack angle within 2°. Then, based on the free-free beam theory and the dynamic loads obtained by numerical simulation, the distributions of axial force, shear force and bending moment within projectiles are calculated, and an analytical method for structural strength and dynamic failure of projectiles is developed. The results show that when the projectile horizontally penetrates a multi-layered steel plate target with positive inclined angle, there exists a critical attack angle. If the attack angle is smaller than this critical value, the projectile will head drop and its trajectory turns downwards; when the attack angle is larger than the critical value, the projectile will be raised and its trajectory turns upwards. In addition, the critical attack

* 收稿日期: 2023-01-17; 修回日期: 2023-05-09

基金项目: 基础加强重点项目(2020-JCJQ-ZD-221-03)

第一作者: 朱超(1998—), 男, 硕士研究生, zhuchao98@bit.edu.cn

通信作者: 张晓伟(1982—), 男, 博士, 副教授, mezhangxw@bit.edu.cn

angle increases as the thickness of the target plate decreases. For the projectiles with high strength and low ductility, the failure mode is brittle fracture and the distances between the fracture position and the projectile nose is 0.72–0.81 times of its length, which is mainly due to the lateral impact load at the rear part of projectile. Moreover, by means of the dynamic model of the projectile based on the free-free beam theory, the fracture position of projectile during oblique penetration process could be well predicted. Also, among the three types of projectiles with the same length and cross-sectional area, the projectile with asymmetric elliptical cross-section is easier to fracture and the position is even closer to the projectile nose.

Keywords: oblique penetration; double-layered steel plate target; structural response; failure; free-free beam theory

近年来,随着高超声速飞行器的快速发展,与飞行平台共形的异构型战斗部对目标的侵彻行为引起了广泛关注。与传统回转体战斗部不同,异构型战斗部能更好地适应高超声速平台的气动外形,提高舱内空间的利用率,进而提升武器的毁伤效能。受弹体姿态和环境等因素的影响,弹体着靶时通常存在攻角和着角,使得弹体对目标的侵彻特性更加复杂^[1]。由于异构型战斗部结构的特殊性,在斜侵彻过程中更容易出现姿态偏转和弹道偏离现象。因此,在一定约束条件下,确定异构型战斗部(以下简称弹体)在侵彻过程中的结构响应和失效规律,对于战斗部的结构设计具有重要意义。

针对传统回转体弹体斜侵彻典型靶标的作用过程与机理,已有丰富的研究成果。对于半无限靶,以空腔膨胀理论为基础,提出了描述弹体斜侵彻行为的理论模型^[2-4],能够对侵彻弹道、弹体姿态等进行预测;闪雨^[5]基于微分面方法、空腔膨胀理论以及自由面效应模型,对弹体侵彻过程进行简化,建立了弹体侵彻半无限靶的弹道预测模型。对于多层钢板,Goldsmith^[6]对非理想条件下弹靶作用的研究成果进行总结,提出可从弹体剩余速度、靶板破坏模式和弹体姿态偏转等方面开展研究。Gupta 等^[7]、Iqbal 等^[8-9]、杜华池等^[10]开展了弹体斜侵彻多层钢板靶的试验和数值模拟研究,得到了弹体材料、入射姿态、靶板材料及厚度等因素对弹道偏转、剩余速度和靶板破坏模式的影响规律。

在异构型弹体方面,王文杰等^[11]、Dong 等^[12]开展了椭圆截面弹体侵彻混凝土半无限靶的研究,建立了刚性弹体的侵彻深度和侵彻阻力理论模型;刘子豪^[13]、Dai 等^[14]结合椭圆截面弹体的结构参数,对混凝土半无限靶的侵彻过程进行分析,发现弹体侵彻能力与长短轴之比呈正相关。王浩等^[15]、田泽等^[16]结合靶板破坏模式和弹体的受力特征,建立了椭圆截面弹体斜侵彻双层钢板过程中弹体姿态的偏转模型。岳胜哲等^[17]对类椭圆截面弹体斜侵彻薄靶的姿态偏转进行了研究,发现在相同条件下,弹体姿态偏转幅度与截面不对称度呈正相关。王景琛等^[18]针对异构型弹体斜侵彻薄靶问题进行数值仿真,分析了着角、攻角和弹靶结构参数对弹体所受动态载荷的影响规律。

以上研究主要针对弹体的侵彻性能、弹道特性和靶板失效等问题,没有考虑弹体的结构响应和失效。大量实验结果^[19]表明,随着侵彻速度的提高,弹体结构将出现头部侵蚀、弯曲、断裂等失效行为。针对头部侵蚀现象,Silling 等^[20]基于对试验结果的分析,认为着靶速度接近 1 km/s 时,弹体质量损失与初始动能成正比;何翔等^[21]、武海军等^[22]、He 等^[23]、Zhao 等^[24]提出了一系列与速度相关的质量损失(半)理论模型。针对弹体弯曲和断裂现象,陈小伟等^[25-26]给出了深侵彻弹体壁厚的设计依据,并结合实例进行了验证。皮爱国等^[27]开展了大长径比弹体侵彻混凝土靶的结构响应研究,给出了弹体剪力、弯矩的计算方法以及弹体弯曲的临界条件。王一楠等^[28]、张欣欣等^[29]基于自由梁理论,分析了弹体斜侵彻混凝土靶的结构弯曲现象,得到剪力、弯矩以及屈服函数的分布规律。刘坚成等^[30]通过反弹道试验研究了大长径比弹体侵彻厚靶的结构响应特性,发现弹体变形集中在头部,以弯曲和屈曲为主。

综上所述,目前对弹体结构响应的研究主要针对对混凝土厚靶的侵彻过程,且仅考虑了弹体头部受载情况。事实上,在侵彻过程中,弹身同样会受到严重的冲击载荷作用。特别是弹体斜侵彻多层钢板时,由于弹靶接触位置随时间发生变化,弹体的结构响应更为复杂,现有基于头部受载的结构响应结论无法有效推广应用。因此,为了深入探究斜侵彻多层钢板过程中弹体的结构响应,本文中设计圆形、椭圆、非对称椭圆三种截面弹体,开展不同弹体斜侵彻双层钢板的试验研究,并进行数值仿真和弹体结构响应模型的建立,着重分析斜侵彻条件下弹体的动态载荷特性以及结构失效条件。

1 弹体斜侵彻双层钢板的试验研究

1.1 试验准备

根据异构型战斗部的结构特点, 设计了圆形截面(circular cross-section, CC)、椭圆截面(elliptical cross-section, EC)和非对称椭圆截面(asymmetric elliptical cross-section, AC)三种类型弹体。圆形截面弹体的头部形状系数 η 和非对称椭圆截面弹体的不对称度 γ 分别定义如下:

$$\eta = \frac{\rho}{D}, \quad \gamma = \frac{b_1}{b_2} \quad (1)$$

式中: ρ 为圆形截面弹体头部子午线曲率半径, D 为弹体直径, b_1 和 b_2 分别为上下非对称椭圆截面弹体的上、下两部分短半轴长度, a 为弹体截面长半轴长度, 如图 1 所示。

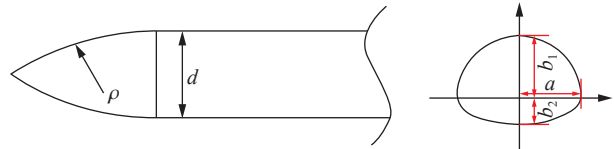


图 1 弹体结构参数示意图

Fig. 1 Schematic diagram of projectile structural parameters

基于圆形截面弹体, 对长轴和短轴进行适当比例的缩放, 可得到椭圆和非对称椭圆截面弹体, 通过控制参数保证三种弹体的截面积一致。三种弹体的具体结构参数如表 1 所示, 表中 D 为圆形截面弹体直径, A 和 B 为椭圆截面弹体长轴、短轴长度, L 为弹体总长度, h 为弹体壁厚, m 为弹体质量, 其中非对称椭圆截面弹体不对称度为 2。通过数控中心加工得到的弹体实物如图 2 所示。

表 1 三种截面弹体的结构参数

Table 1 Structural parameters of three projectiles with different cross-sections

截面形状	截面参数/mm			L/mm	h/mm	m/g
	D	A	B			
圆形	30	-	-	180	4	506.2
椭圆形	-	33	27	180	4	509.2
非对称椭圆形	-	33	18/9	180	4	519.5



图 2 加工后的三种截面弹体

Fig. 2 Three types of projectiles after manufacture

为了保证弹体的结构强度, 弹体材料选用 30CrMnSiNi2A 高强度钢。粗加工后, 对试件进行一次淬火, 然后再精加工。图 3 给出了弹体材料的准静态拉伸试验结果, 其弹性模量为 210 GPa, 屈服强度和极限强度分别为 1 707、2046 MPa, 断裂应变为 5%。靶板材料为 45 钢, 尺寸为 520 mm×520 mm, 共有 4 种厚度, 分别为 12、8、6、4 mm。根据安排进行组合, 设置双层靶板的垂直间距为 360 mm。

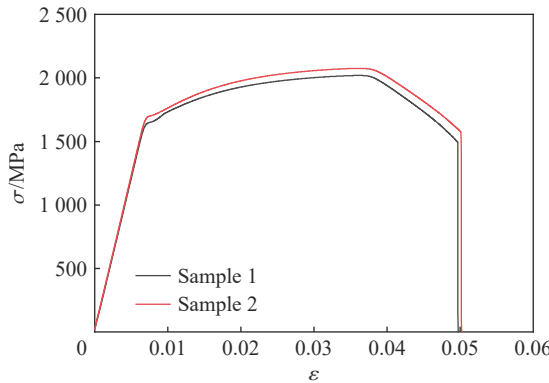


图 3 弹体材料的准静态拉伸曲线

Fig. 3 Quasi-static tensile curves of projectile material

试验平台如图 4 所示, 采用口径 40 mm 的一级轻气炮作为发射装置, 在弹体出炮管后以气动方式实现弹托分离。为了模拟弹体斜侵彻工况, 设置靶板的倾斜角度为 30°。利用高速摄像机对弹体的侵彻过程进行记录, 得到弹体的姿态和速度等参数。此外, 在靶板后方布置沙箱, 对弹体进行软回收。

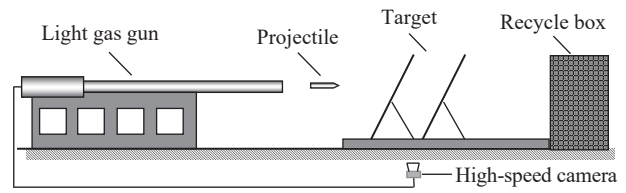


图 4 试验系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental system

1.2 试验结果

共进行了 8 发斜侵彻试验, 其中椭圆截面和非对称椭圆截面弹体各 2 发、圆形截面弹体 4 发作为对照参考。图 5 给出了不同弹体侵彻双层钢板的典型时刻照片。

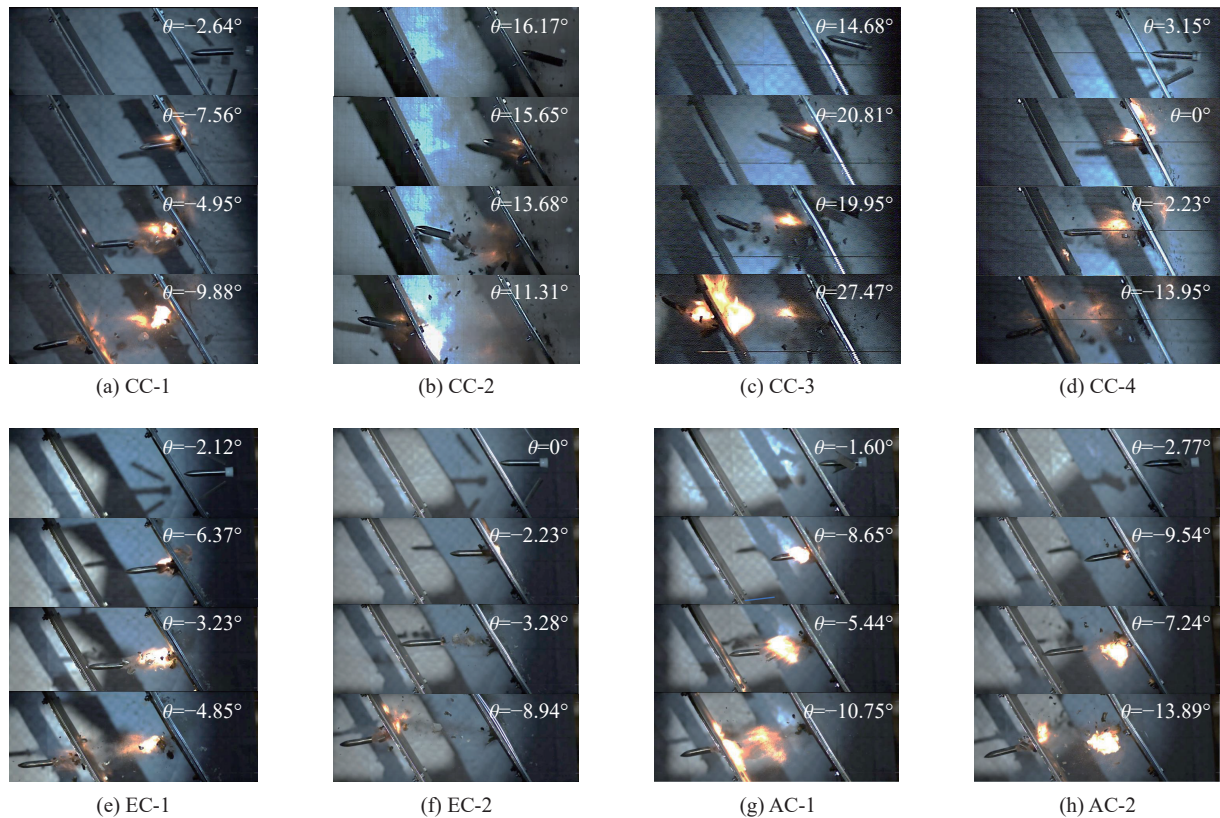


图 5 弹体侵彻过程的典型时刻

Fig. 5 Typical moments for different projectiles during penetration process

图 6 给出了侵彻过程中的弹体姿态的定义。如图 6(a) 所示, 将弹体的姿态角 θ 定义为弹体轴线与水平方向的夹角, 弹体头部方向在水平线以上时姿态角为正; 攻角 α 为弹体轴线与速度的夹角, 弹体头部方向在速度方向以上时攻角为正; 着角 β 为靶板法线与弹体速度的夹角, 当靶面向上时为正。在试验过程中, 弹体初始速度保持水平, 则弹体的初始姿态角 θ 与攻角 α 相等, 初始着角 $\beta=30^\circ$ 。如图 6(b) 所示, 试验过程中, 椭圆和非对称椭圆截面弹体的长轴位于水平方向。

根据高速摄像机的图片结果, 得到弹体速度、姿态角、长度等试验数据如表 2 所示。其中, v_0 、 θ_0 、 l_0 为靶前数据, v_1 、 θ_1 、 l_1 为靶后数据, 弹体穿靶前后的剩余长度之比 $\delta = l_1/l_0$ 。

由表 2 可知, 除 CC-2、CC-3 外, 其余 6 发弹体以小攻角姿态着靶, 在 470~500 m/s 入射速度下穿透双层靶板。从能量角度进行分析, 忽略结构断裂时两部分弹体的速度差异, 根据弹体总质量与靶前、靶后速度计算得到侵彻不同靶板的动能损失 ΔE 。由于第 1 层靶和第 2 层靶的厚度不同, 弹体穿过首层靶板的动能损失更大。

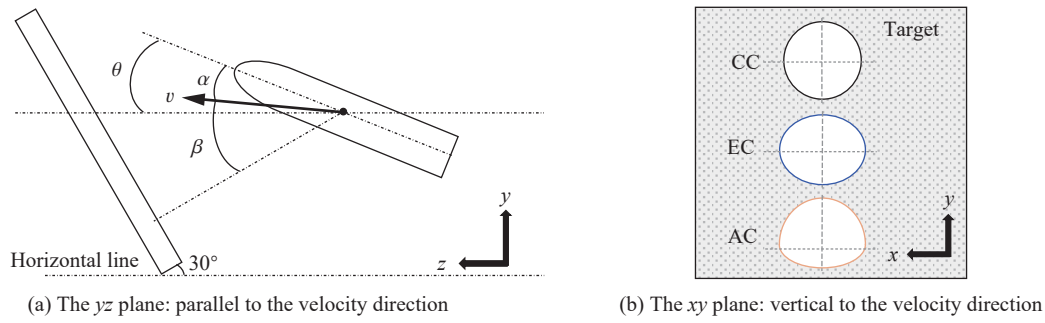


图 6 斜侵彻中弹体不同角度参数及截面布置示意图

Fig. 6 Diagram for the altitude angles and cross section of the projectile in oblique penetration

表 2 弹体侵彻不同靶板的试验结果

Table 2 Penetration experimental results

试验编号	靶板编号	靶板厚度/mm	速度			姿态角			长度		
			$v_0/(m \cdot s^{-1})$	$v_1/(m \cdot s^{-1})$	$\Delta E/J$	$\theta_0/(\circ)$	$\theta_1/(\circ)$	$\Delta\theta/(\circ)$	l_0/mm	l_1/mm	$\delta/\%$
CC-1	1	8	474	425	11012	-2.64	-7.56	-4.92	180	145	81
	2	6	425	388	7520	-4.95	-9.88	-4.93	145	145	100
CC-2	1	4	445	413	6864	16.17	15.65	-0.52	180	136	75
	2	4	413	387	5200	13.68	11.31	-2.37	136	136	100
CC-3	1	8	608	544	18432	14.68	20.81	6.13	180	133	74
	2	8	544	453	22681	19.95	27.47	7.52	133	133	100
CC-4	1	12	499	409	20430	3.15	0	-3.15	180	180	100
	2	8	409	348	11544	-2.23	-13.95	-11.72	180	109	61
EC-1	1	8	486	442	10208	-2.12	-6.37	-4.25	180	143	79
	2	6	442	404	8037	-3.23	-4.85	-1.62	143	143	100
EC-2	1	8	493	453	9460	0	-2.23	-2.23	180	180	100
	2	6	453	416	8038	-3.28	-8.94	-5.66	180	138	77
AC-1	1	8	489	435	12474	-1.60	-8.65	-7.05	180	128	72
	2	6	435	389	9476	-5.44	-10.75	-5.31	128	128	100
AC-2	1	8	473	429	9922	-2.77	-9.54	-6.77	180	180	100
	2	6	429	395	7004	-7.24	-13.89	-6.65	180	133	74

由图 5 可知, 在初始攻角较小($-3^\circ \sim 3^\circ$)时, 穿靶过程中弹体呈逆时针方向偏转, 出现弹体“低头”现象; 随着侵彻层数的增加, 弹体出靶后的姿态角逐渐增大, 侵彻弹道向下偏转。对比靶板厚度为 8 mm+6 mm 的 5 组试验结果, 可以看到非对称椭圆截面弹体穿过首层靶板姿态角变化量 $\Delta\theta$ 大于圆截面弹体和椭圆截面弹体, 这与文献 [17] 的结论相似。

对比 CC-1 和 CC-4 的结果, 在初始攻角较小时, 靶板厚度的小幅度增加并未改变弹体姿态与弹道的偏转方向。而从 CC-1 和 CC-3 来看, 在靶板厚度相当时, 当攻角从 -2.6° 增加到 14.7° 时, 弹体偏转方向发生改变, 出现了弹体“抬头”现象, 侵彻弹道从向下偏转变为向上偏转。此外, 根据 CC-2 和 CC-3 的试验结果, 在大攻角条件下, 当靶板厚度从 8 mm 减小至 4 mm 时, 仍保持弹体“低头”与弹道向下偏转规律。可见, 存在一个使弹体姿态和弹道轨迹发生改变的临界攻角, 且该临界值随着靶板厚度的减小而增大。

由试验过程的高速摄影照片发现, 8 发试验中弹体均出现局部断裂, 其中 CC-1、CC-2、CC-3、EC-1、AC-1 弹体在穿过首层靶板时出现断裂, 而 CC-4、EC-2 和 AC-2 实验中弹体在穿过第 2 层靶板时出现断裂。由图 5 可知, 弹体断裂主要发生在尾部出靶阶段, 这是由于穿靶过程中弹体姿态偏转, 导致出靶时

尾部撞击靶板,引起弹身断裂。图 7 给出了 5 发入靶条件相近的弹体断裂情况,可以看到弹体断裂位置未产生明显的变形,主要破坏模式为脆性断裂。

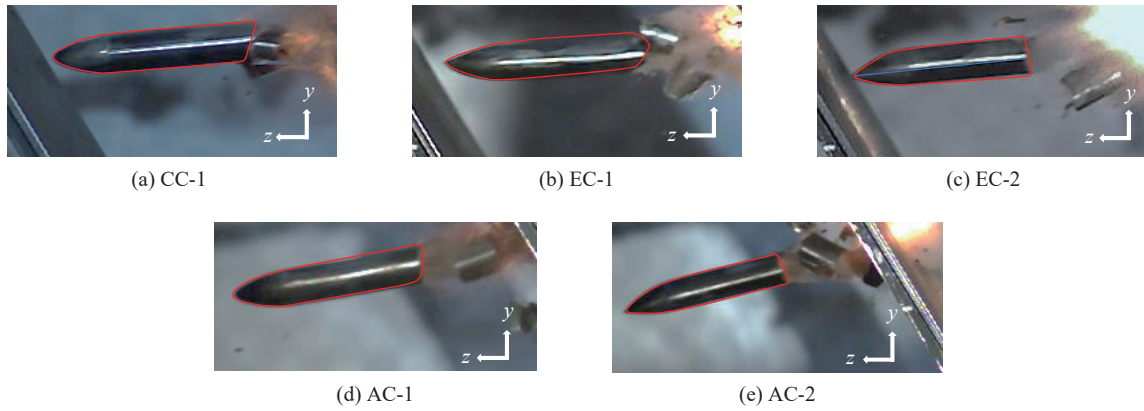


图 7 弹体的破坏情况

Fig. 7 Damages of projectiles

根据表 2, 以上 5 发弹体断裂后的剩余长度约为初始长度的 72%~81%。由图 5 可知, 弹体因侵彻首层靶板而断裂后, 未出现再次断裂现象。从弹体的结构强度来看, 断裂导致弹体长径比减小, 本身承载能力相对提高, 而且穿靶后速度有所下降, 弹体所载荷减小, 因此试验过程中弹体的结构破坏主要为“一次断裂”。由 5 发弹体的测量结果来看, 圆截面弹体的剩余长度大于椭圆截面弹体, 而非对称椭圆截面弹体最小。

2 弹体斜侵彻双层钢板的仿真研究

2.1 数值仿真模型

为深入分析弹体侵彻过程中的动态载荷及结构响应细节, 采用有限元程序 Abaqus/Explicit 对该过程进行数值仿真。基于试验中的弹体和靶板结构, 采用 C3D8R 单元建立模型, 弹体单元尺寸为 1 mm, 靶板中心区域单元尺寸为 1 mm, 外围网格尺寸为 5 mm。为简化计算, 采用对称模型, 弹靶接触定义为通用接触, 并对靶板的边界施加固定约束。

弹体和靶板材料均选用 Johnson-Cook 强度模型, 其中弹体采用拉伸断裂应变 ϵ_T 作为损伤判据。结合材料准静态力学性能试验结果, 将其设为 0.05, 靶板参数根据文献确定, 具体参数如表 3~4 所示。表中, ρ 为密度, E 为弹性模量, ν 为泊松比, T_r 为参考温度, T_m 为熔点温度, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率, A 为准静态屈

表 3 弹体 30CrMnSiNi2A 材料参数^[31]

Table 3 Material parameters of 30CrMnSiNi2A^[31]

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	ν	T_r/K	T_m/K	A/MPa	B/MPa	n	m	C	$\dot{\epsilon}_0/\text{s}^{-1}$	ϵ_T
7.85	210	0.3	294	1760	1600	810	0.479	1	0.04	2.1×10^{-3}	0.05

表 4 靶板 45 钢材料参数^[32]

Table 4 Material parameters of 45 steel^[32]

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	ν	A/MPa	B/MPa	n	m	C
7.8	210	0.33	507	320	0.28	1.06	0.064
T_r/K	T_m/K	$\dot{\epsilon}_0/\text{s}^{-1}$	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
294	1760	1	0.1	0.76	1.57	0.005	-0.84

服强度, B 、 n 为应变硬化常数, C 为应变率常数, m 为温度软化系数, ε_T 为拉伸断裂应变; D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 为 Johnson-Cook 损伤参数。

2.2 试验有效性验证

根据试验结果, 现有试验平台对 500 g 弹体的稳定发射速度约为 500 m/s。考虑到与高超声速武器的末端速度存在差异, 利用数值仿真方法, 对不同速度下圆形弹体斜侵彻钢板的动态载荷进行分析, 从而验证本文试验的有效性。仿真工况设置靶板倾角为 30° , 厚度为 8 mm, 弹体攻角为 2° , 速度为 500、1 000 m/s, 两种速度下弹体的轴向和横向载荷结果如图 8 所示。

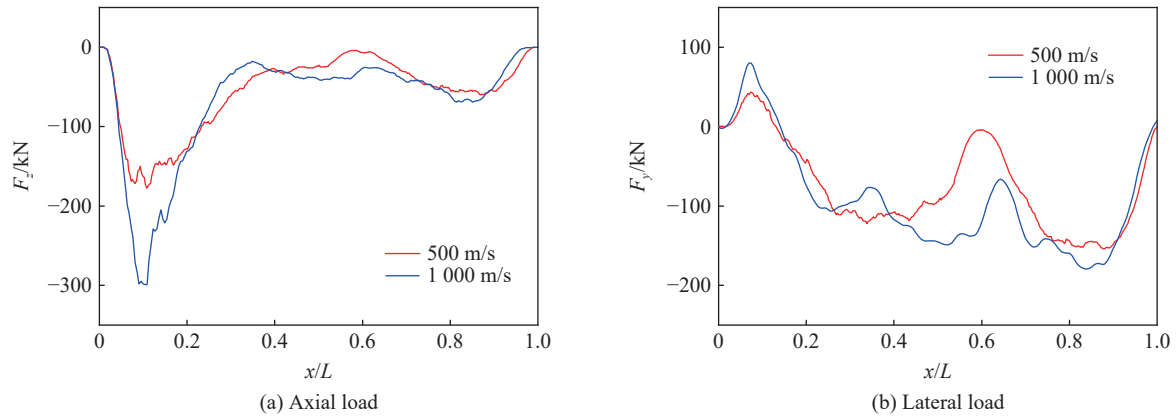


图 8 不同入射速度下弹体的载荷时程曲线

Fig. 8 Time history curves of projectile load under different impact velocities

结果表明, 速度变化的影响主要体现在弹体头部穿靶阶段, 对弹身穿靶阶段的载荷影响较小。在头部穿靶阶段, 1 000 m/s 速度下弹体的载荷约为 500 m/s 速度下弹体载荷的 2 倍; 在此过程中, 弹体可能出现头部侵蚀、轴向屈曲等结构响应行为, 可通过提高弹体材料强度和壳体厚度等方式加以避免。对于弹身穿靶阶段, 两种速度下弹体载荷差异较小; 由于横向载荷的作用, 会出现弹体弯曲/断裂的结构响应行为。此外, 高速条件下弹体的穿靶时间更短, 姿态偏转幅度变小, 这有利于降低弹身受到的横向载荷。因此, 从以上分析来看, 速度变化对弹体弯曲/断裂的结构响应行为影响较小, 针对速度为 500 m/s 的弹体斜侵彻试验进行分析, 对弹体弯曲/断裂的结构响应研究仍具有参考价值。

2.3 数值仿真和试验结果对比分析

现实中弹体以大攻角侵彻的现象较少, 在此仅分析小攻角的情况。图 9 给出了速度为 480 m/s、攻角为 -2° 、靶板着角为 30° 条件下三种弹体的弹道轨迹仿真结果, 并与 CC-1、EC-1、AC-1 的试验结果进行了对比。由图 9 可知, 数值仿真得到的三种弹体向下偏转的弹道轨迹以及弹体姿态与试验结果基本符合, 穿靶后的弹体因姿态偏转而处于“低头”状态。

图 10~13 给出了三种弹体试验与数值仿真结果的对比。图 10 为弹体速度的对比结果, 在一定误差范围内, 椭圆截面弹体的剩余速度略高于其他两种弹体。图 11 给出了由数值仿真得到的不同截面弹体动能结果, 可以看到, 从侵彻首层靶板来看, 在相同的入射条件下, 椭圆弹体的动能损失比其他两种弹体小约 13%。图 12 为弹体姿态角的对比结果, 除 EC-1 弹体的试验结果以外, 整体结果较为接近, 同时表现出弹体在穿靶以及靶间飞行过程中的姿态变化。从失效情况来看, 穿过首层靶板后, 三种弹体尾部均发生断裂, 且由于弹体所载荷荷位置随弹体侵彻过程而不断变化, 整体表现为“斜向”断裂模式, 与试验结果吻合较好。图 13 为弹体剩余长度的对比结果, 可以看到, 数值仿真结果中弹体剩余长度比例约为 74%~78%, 与试验结果较为接近。

基于上述分析结果, 可见本文采用的数值仿真方法具有较好的可靠性, 可用于弹体斜侵彻双层钢板的结构响应和失效分析。

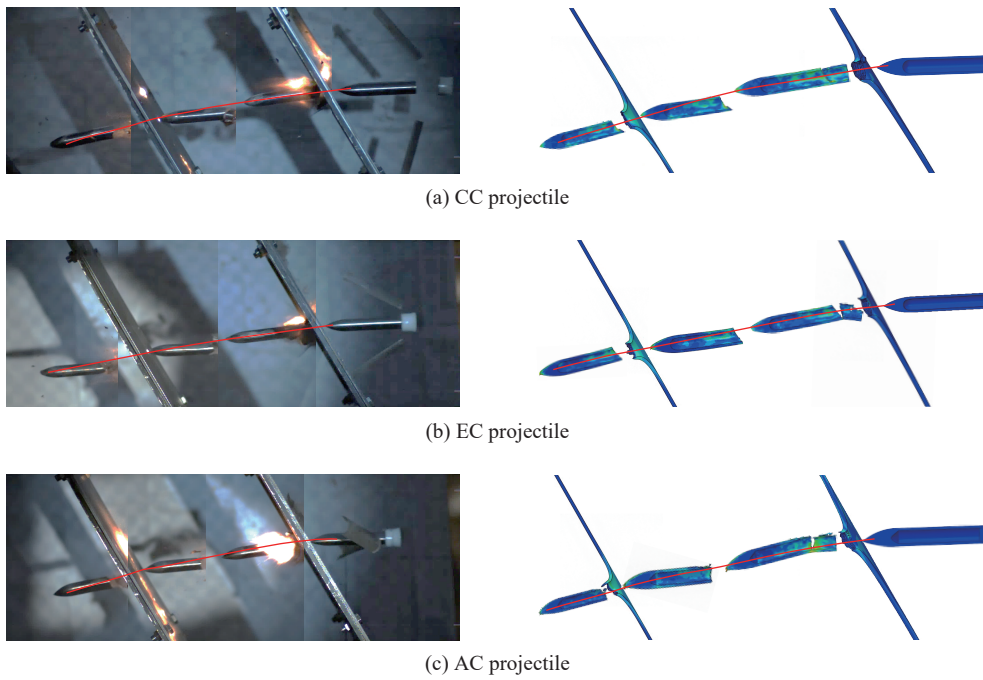


图 9 弹体侵彻轨迹的对比

Fig. 9 Comparison of simulated and experimental results on penetration trajectories

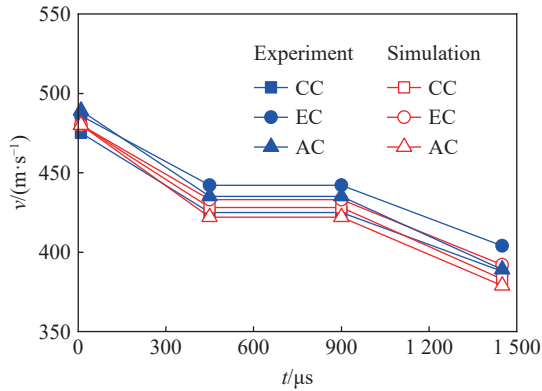


图 10 弹体速度对比

Fig. 10 Comparison of projectile velocities

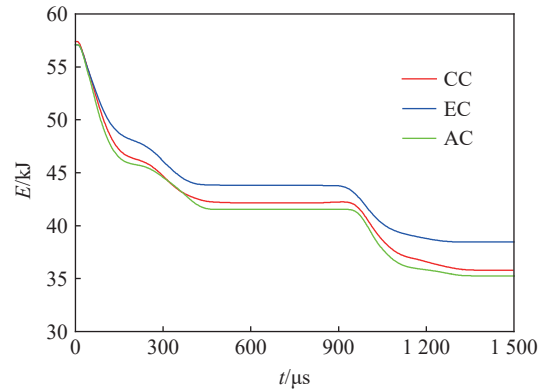


图 11 不同弹体的动能对比

Fig. 11 Comparison of kinetic energies of different projectiles

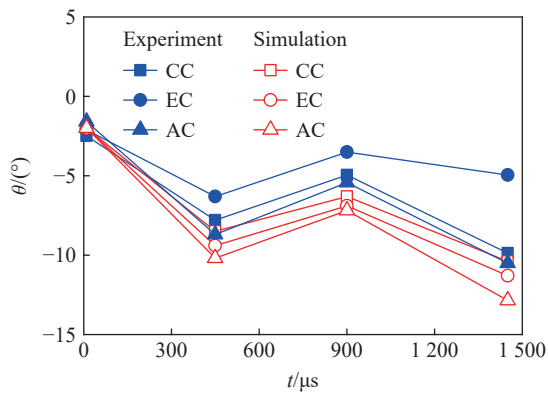


图 12 弹体姿态角对比

Fig. 12 Comparison of projectile attitude angles

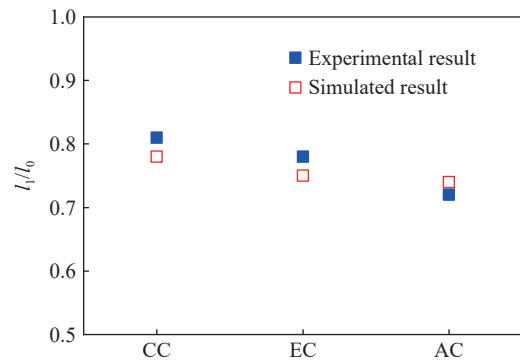


图 13 弹体剩余长度对比

Fig. 13 Comparison of projectile residual lengths

2.4 弹体斜侵彻双层钢板的动态载荷

为了建立弹体结构动力响应的理论模型, 需要得到弹体所受的动态载荷。为此, 图 14 给出了速度为 480 m/s、攻角为 -2° 、靶板着角为 30° 条件下三种弹体受到轴向和横向载荷的数值仿真结果。

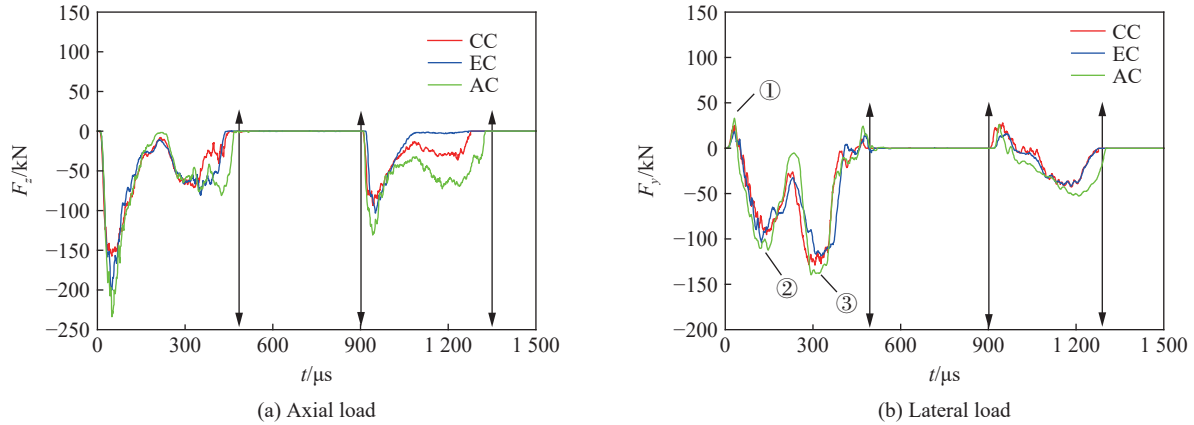


图 14 弹体载荷时程曲线

Fig. 14 Time history curves of projectile load

如图 14(a) 所示, 弹体穿过每层靶板的过程中经历了 2 次轴向载荷峰值。第 1 次载荷峰值出现在头部贯穿阶段, 第 2 次载荷峰值出现在弹身后半段穿靶阶段。弹体的第 1 次轴向载荷峰值约为第 2 次载荷峰值的 2~2.5 倍。结合弹体断裂的分析结果, 可认为轴向载荷并不是导致弹体破坏的主要原因。

从弹靶相互作用来看, 横向载荷是造成斜侵彻弹体姿态偏转和结构断裂的主要原因。如图 14(b) 所示, 依据横向载荷的变化情况, 可将弹体侵彻过程分为 3 个阶段, 分别对应载荷峰值①、②、③, 图 15 给出了典型工况的等效应力云图。在头部压入阶段, 如图 15(a) 所示, 由于着角的存在, 弹体头部下侧首先与靶板接触, 导致弹体头部承受向上的作用力。在此期间达到载荷正向峰值①, 由于作用时间较短, 弹体头部向上偏转幅度较小。随后是头部贯穿阶段, 随着弹体头部继续运动, 弹靶接触面积增大, 靶板变形更大并形成花瓣状破坏。如图 15(b) 所示, 上侧靶板向背面弯曲的变形程度大于下侧靶板, 导致弹体受到的横向载荷合力向下, 且在头部完全穿过靶板时达到载荷峰值②。由于作用力较大且作用时间较长, 弹体姿态向下偏转幅度较大。此外, 在头部穿靶过程中, 由于载荷的作用, 距离头部约 $L/3$ 处局部应力最大。最后是弹身穿靶阶段, 如图 15(c) 所示, 在先前载荷的作用下, 弹体处于低头状态, 弹身持续撞击上侧靶板而受到向下的作用力, 在弹体尾部穿靶时达到载荷峰值③; 在侵彻过程中, 弹体在力矩作用下产生顺时针角速度, 使得弹体出靶后出现姿态修正效果。

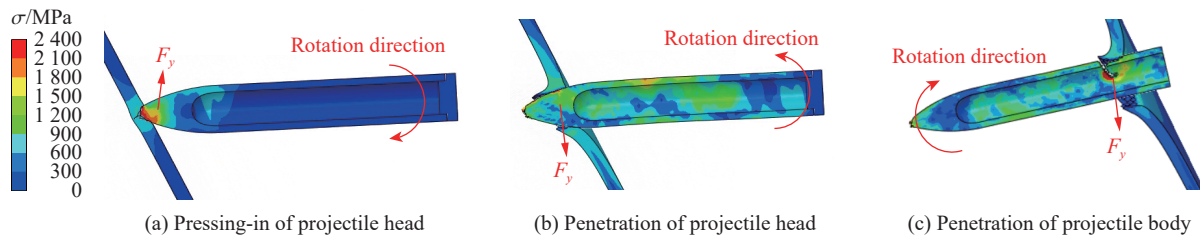


图 15 弹体侵彻的不同阶段

Fig. 15 Penetration stages of projectile

结合数值仿真结果以及轴向、横向载荷历程曲线, 对弹体斜侵彻首层钢板的失效模式进行分析。图 16 给出了典型工况的塑性应变云图, 从图中可见塑性应变主要分布于弹体头部和弹身中后段。如图 16(a) 所示, 在头部穿靶过程中, 靶板在弹体的挤压作用下变形、破坏, 此时弹体头部受到以轴向载荷为主的作

用力,使得弹体头部存在较严重的塑性应变。随着弹体继续运动,在横向载荷的作用下弹体姿态发生偏转,此时弹身受到以横向载荷为主的作用力。随着载荷逐渐增大,弹身达到屈服状态并产生塑性应变,引起弹体局部损伤,如图 16(b)所示。由于载荷作用位置的移动,损伤部位受到载荷的弯曲作用而斜向扩展,最终导致弹体断裂,如图 16(c)所示。因此,可将弹体的结构破坏总结为由“局部受压”和“整体弯曲”共同作用而引起的弹体断裂。

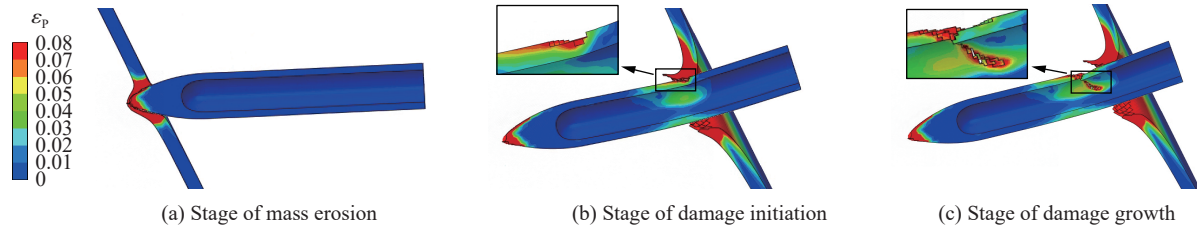


图 16 弹体的失效模式

Fig. 16 Failure modes of projectile

结合数值仿真得到的动态载荷结果,对三种弹体侵彻过程中的动态响应进行对比。对于首层靶板,相同入射条件下,三种弹体的载荷形式基本相同,载荷峰值的差异在 9% 以内。图 17 给出了三种弹体侵彻首层靶板过程中的姿态角变化过程,可见随着载荷作用位置的变化,弹体姿态角呈先增大后减小趋势,而且在三种弹体中,非对称椭圆截面弹体姿态偏转幅度最大。从弹体结构响应来看,当截面积相同时,由于截面形状的差异,三种弹体的截面屈服弯矩不同,从大到小依次为圆形、椭圆、非对称椭圆。说明在载荷相当条件下,非对称椭圆截面弹体更容易达到屈服状态,断裂位置更加靠近头部。

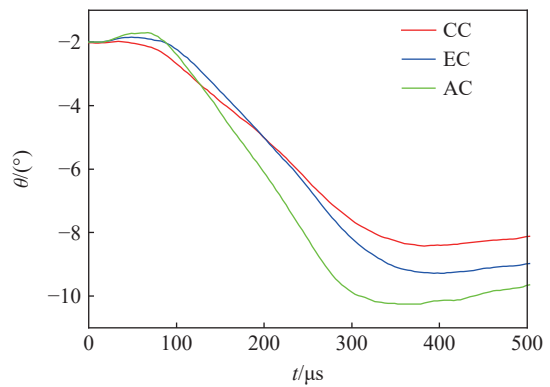


图 17 三种弹体的姿态角对比

Fig. 17 Comparison of attitude angle among three different projectiles

3 弹体斜侵彻双层钢板的结构响应模型

3.1 弹体响应的自由梁模型

由于高速侵彻过程中,弹体的边界条件与空间自由梁撞击过程一致,因此可借助自由梁模型对其动力响应进行分析。将弹体视为质量分布不均匀的自由梁,分为头部实心段和弹身空心段。由于实心段不存在结构强度问题,且相对较短,因此简化模型中不考虑截面形状的变化。如图 18 所示,设弹体总长度为 L ,其中实心段长为 L_1 ,线密度为 ρ_1 ,空心段线密度为 ρ_2 ;横向载荷为 F ,作用位置距离左端部为 e ($e > L_1$),弹体左端的平动加速度为 \ddot{u} ,相对质心的转动加速度为 $\ddot{\theta}$ 。

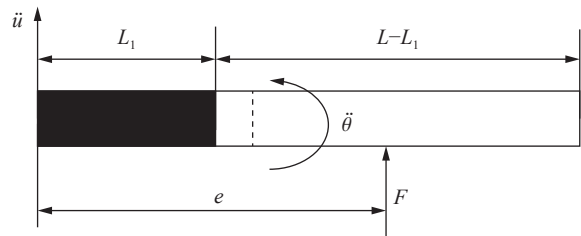


图 18 横向载荷作用下的自由梁模型

Fig. 18 Free-free beam model for the projectile under lateral load

对简化模型的主要参数无量纲化,可得自由梁线密度之比 $\mu = \rho_2 / \rho_1$,实心段长度 $\lambda = L_1 / L$,载荷作用位置 $\xi = e / L$,任意位置 $\bar{x} = x / L$ 。

设弹体的总质量 M_t 为:

$$\frac{M_t}{\rho_1 L} = \lambda(1-\mu) + \mu \quad (2)$$

弹体质心的位置 X_c 为:

$$\frac{X_c}{L} = \frac{1}{2} \frac{\lambda^2(1-\mu) + \mu}{\lambda(1-\mu) + \mu} \quad (3)$$

弹体对质心的转动惯量 J_c 为:

$$\frac{J_c}{\rho_1 L^3} = \frac{\lambda^4(1-\mu) + 4\lambda^3\mu - 6\lambda^2\mu + 4\lambda\mu + \frac{\mu^2}{1-\mu}}{12 \left(\lambda + \frac{\mu}{1-\mu} \right)} \quad (4)$$

由刚体动力学可得弹体的运动方程:

$$\begin{cases} M_t(\ddot{u} - \ddot{\theta}X_c) = F \\ J_c\ddot{\theta} = F(X_c - e) \end{cases} \quad (5)$$

从而解得弹体头部加速度和转动加速度为:

$$\frac{\ddot{u}}{F/(\rho_1 L)} = \frac{4\lambda^3 - 6\lambda^2\xi + \frac{2\mu}{1-\mu}(2-3\xi)}{\lambda^4(1-\mu) + 4\lambda^3\mu - 6\lambda^2\mu + 4\lambda\mu + \frac{\mu^2}{1-\mu}} \quad (6)$$

$$\frac{\ddot{\theta}}{F/(\rho_1 L^2)} = \frac{6\lambda^2 - 12\lambda\xi + \frac{6\mu}{1-\mu}(1-2\xi)}{\lambda^4(1-\mu) + 4\lambda^3\mu - 6\lambda^2\mu + 4\lambda\mu + \frac{\mu^2}{1-\mu}} \quad (7)$$

基于运动方程的求解和自由梁的受力分析, 可得自由梁任意位置的无量纲剪力:

$$\frac{Q(\bar{x})}{F} = \begin{cases} \frac{3\bar{x}^2 \left[\lambda^2 - 2\lambda\xi + \frac{\mu}{1-\mu}(1-2\xi) \right] - 2\bar{x} \left[2\lambda^3 - 3\lambda^2\xi + \frac{\mu}{1-\mu}(2-3\xi) \right]}{\lambda^4(1-\mu) + 4\lambda^3\mu - 6\lambda^2\mu + 4\lambda\mu + \frac{\mu^2}{1-\mu}} & 0 \leq \bar{x} < \lambda \\ \frac{\bar{x}^2 \left[3\lambda^2 - 6\lambda\xi + \frac{3\mu}{1-\mu}(1-2\xi) \right] - \bar{x} \left[4\lambda^3 - 6\lambda^2\xi + \frac{2\mu}{1-\mu}(2-3\xi) \right] - \left[4\lambda^3 - 3\lambda^2 + 6\lambda\xi(1-\lambda) + \frac{\mu}{1-\mu} \right]}{\lambda^4 \left(\frac{1-\mu}{\mu} \right) + 4\lambda^3 - 6\lambda^2 + 4\lambda + \frac{\mu}{1-\mu}} - 1 & \lambda \leq \bar{x} < \xi \\ \frac{(\bar{x}-1) \left\{ 3\bar{x} \left[\lambda^2 - 2\lambda\xi + \frac{\mu}{1-\mu}(1-2\xi) \right] - \left[4\lambda^3 - 3\lambda^2 + \frac{\mu}{1-\mu} + 6\lambda\xi(1-\lambda) \right] \right\}}{\lambda^4 \left(\frac{1-\mu}{\mu} \right) + 4\lambda^3 - 6\lambda^2 + 4\lambda + \frac{\mu}{1-\mu}} & \xi \leq \bar{x} \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

对剪力积分, 可得弹体任意位置的无量纲弯矩:

$$\frac{M(\bar{x})}{FL} = \int_0^{\bar{x}} \frac{Q(\bar{x})}{F} d\bar{x} \quad (9)$$

皮爱国等^[24]考虑到弹体侵彻过程中轴向、横向载荷的耦合作用, 提出弹体结构的塑性屈服准则。考虑到实验中弹体以脆性断裂为主, 本文主要针对弹体结构的屈服强度进行分析。以材料弹性屈服强度 σ_y 作为屈服函数的条件, 其表达式为:

$$\psi(x) = \frac{|N(x)|}{N_y(x)} + \frac{|M(x)|}{M_y(x)} - 1 \quad (10)$$

弹体的轴向力 $N(x)$ 可由下式求得:

$$N(x) = \begin{cases} N \frac{m(x)}{m(L)} & 0 \leq x \leq e \\ N(1 - \frac{m(x)}{m(L)}) & e < x \leq L \end{cases} \quad (11)$$

式中: N 为弹靶作用位置处的轴向载荷, 任意位置处的轴向载荷以弹靶作用位置 e 为分界, 头部一侧处于受拉状态, 尾部一侧处于受压状态, 两侧载荷呈线性分布; $m(x)$ 为端部到任意位置的弹体质量。 $N_y(x)$ 为轴向屈服载荷, $M_y(x)$ 为横向屈服弯矩, 表达式为:

$$N_y(x) = \sigma_y S(x) \quad (12)$$

$$M_y(x) = \frac{\sigma_y I(x)}{y_{\max}(x)} \quad (13)$$

式中: σ_y 为材料屈服强度, $S(x)$ 为任意位置的截面面积, $I(x)$ 为截面惯性矩, $y_{\max}(x)$ 为截面各点距离中心轴的最大距离。考虑到弹体的侵彻姿态, 本文以短轴方向上的截面抗弯能力为参考。

3.2 弹体结构响应的分析

对于本文中的弹体, 实心段长度 $\lambda = 0.25$, 线密度之比为:

$$\mu = \frac{\rho_2}{\rho_1} = 1 - (1 - h/r)^2 \quad (14)$$

式中: h 为弹体壁厚, 取为 4 mm, r 为与椭圆弹体截面积相等的圆形弹体截面半径, 取为 15 mm, 则弹体结构简化模型中线密度之比 $\mu = 0.46$ 。代入式 (9)~(10), 可得弹体不同位置受载时的无量纲弯矩分布, 结果如图 19 所示。可见, 随着载荷位置的移动, 弹体无量纲弯矩分布随之变化。根据理论分析结果, 当载荷作用位置位于 $\lambda < \xi < 0.82$ 时, 弯矩最大位置即为载荷作用位置。结合轴向载荷的分布规律, 由式 (12) 可知, 轴力最大位置同样为载荷作用位置。因此, 可通过校核载荷作用位置处的屈服函数, 判断弹体受载时是否达到屈服状态, 进而评估侵彻过程中某时刻的弹体结构失效情况。

根据图 14 的轴向和横向载荷仿真结果, 对三种截面弹体载荷作用位置的屈服函数进行计算, 结果如图 20 所示。可以看到, 由于弯矩在屈服函数中占比更大, 因此弹身不同位置受载时的屈服函数分布与横向载荷曲线相似, 出现 2 次峰值, 其中第 2 次峰值对应位置已达到屈服条件。考虑到弹体材料具有应变率强化效应, 且断裂前会产生塑性变形, 因此弹体的实际断裂位置滞后于理论计算的屈服位置。表 5 给出了弹体剩余长度比例的试验、数值仿真以及理论模型结果的对比, 可以看出理论模型结果与试验结果吻合较好, 相对误差在 8% 以内。

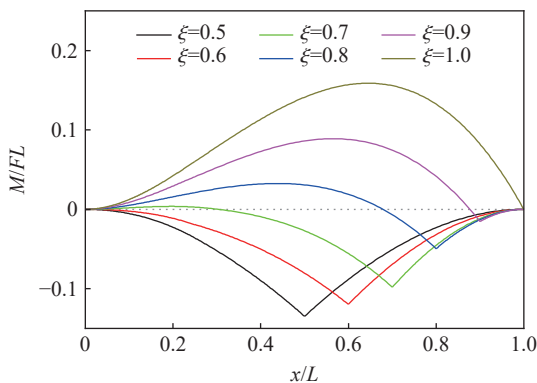


图 19 无量纲弯矩分布

Fig. 19 Distribution of dimensionless bending moment

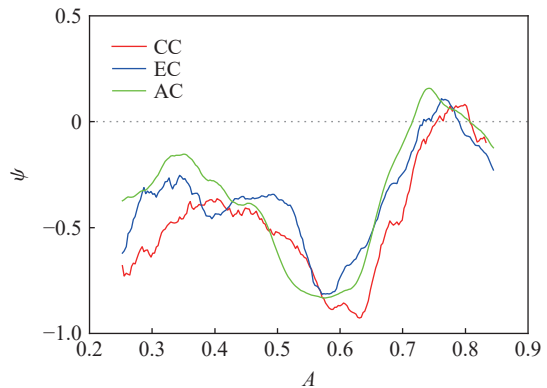


图 20 移动载荷作用下弹体的屈服函数

Fig. 20 Yield function of projectile under moving load

表 5 弹体剩余长度的不同结果对比

Table 5 Comparison of results on projectile residual length

弹型	试验结果	数值仿真结果	理论模型结果	理论模型相对误差/%
圆形	0.81	0.78	0.75	7.41
椭圆形	0.78	0.75	0.73	6.42
非对称椭圆	0.72	0.74	0.71	1.38

4 结 论

开展了圆形、椭圆和非对称椭圆三种截面弹体斜侵彻双层钢板的试验研究, 获得了不同弹体的弹道轨迹以及结构失效情况。在此基础上, 针对弹体斜侵彻工况开展数值仿真工作, 并结合试验结果, 对弹靶作用过程以及弹体动态载荷进行分析。最终, 基于空间自由梁理论, 建立了弹体结构响应分析模型, 得到载荷作用下弹体的剪力、弯矩以及屈服函数分布规律, 并给出弹体结构强度分析方法。主要结论如下。

(1) 根据试验结果, 当弹体以正着角水平侵彻多层钢板时, 存在一个临界攻角, 当攻角小于该值时, 弹体侵彻过程中会发生低头, 随着穿靶层数的增加, 姿态偏转幅度逐渐增大, 弹道轨迹向下偏转。当攻角大于临界攻角时, 弹体由低头转变为抬头, 弹道轨迹向上偏转。该临界攻角随着靶板厚度的减小而增大。

(2) 由于试验中, 弹体材料韧性较差, 弹体的失效模式为脆性断裂, 且断裂位置为弹体中后段, 距离头部 $0.72L \sim 0.81L$, 其中非对称椭圆截面弹体的断裂位置最靠近头部。对双层钢板而言, 在弹体侵彻首层靶板出现断裂后, 随着弹体长度减小以及速度下降, 后续穿靶过程中未出现再次断裂。

(3) 通过数值仿真得到弹体的轴向和横向载荷, 结果表明在斜侵彻过程中弹体会经历 2 次横向冲击载荷, 第 2 次载荷峰值更大, 是造成弹体结构断裂的主要原因。此外, 根据三种弹体的数值仿真结果, 在相同入射条件下, 非对称椭圆截面弹体的载荷峰值及姿态偏转幅度较大。

(4) 利用自由梁模型, 得到了弹体任意位置受到横向载荷作用下的剪力和弯矩分布规律。结合弹体载荷的数值仿真结果, 进一步建立了考虑弯矩和轴力耦合作用的弹体结构强度和失效分析方法。通过与数值仿真及实验结果的对比, 该方法能够准确预测斜侵彻过程中弹体的断裂行为。

参考文献:

- [1] FREW D J, FORRESTAL M J, HANCHAK S J. Penetration experiments with limestone targets and ogive-nose steel projectiles [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2000, 67(4): 841–845. DOI: 10.1115/1.1331283.
- [2] CHEN X W, FAN S C, LI Q M. Oblique and normal perforation of concrete targets by a rigid projectile [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30(6): 617–637. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2003.08.003.
- [3] LI Q M, FLORES-JOHNSON E A. Hard projectile penetration and trajectory stability [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(10): 815–823. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.05.005.
- [4] 段卓平, 李淑睿, 马兆芳, 等. 刚性弹体斜侵彻贯穿混凝土靶的姿态偏转理论模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(6): 063302. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0411.
DUAN Z P, LI S R, MA Z F, et al. Analytical model for attitude deflection of rigid projectile during oblique perforation of concrete targets [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(6): 063302. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0411.
- [5] 闪雨. 弹体非正侵彻混凝土质量侵蚀与运动轨迹研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
SHAN Y. Investigation on the mass abrasion and motion of the projectile non-normal penetrating into concrete [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [6] GOLDSMITH W. Non-ideal projectile impact on targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 22(2/3): 95–395. DOI: 10.1016/S0734-743X(98)00031-1.
- [7] GUPTA N K, MADHU V. An experimental study of normal and oblique impact of hard-core projectile on single and layered

- plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(5/6): 395–414. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)00001-8.
- [8] IQBAL M A, DIWAKAR A, RAJPUT A, et al. Influence of projectile shape and incidence angle on the ballistic limit and failure mechanism of thick steel plates [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2012, 62: 40–53. DOI: 10.1016/j.tafmec.2013.01.005.
- [9] IQBAL M A, SENTHIL K, MADHU V, et al. Oblique impact on single, layered and spaced mild steel targets by 7.62 AP projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 110: 26–38. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.04.011.
- [10] 杜华池, 张先锋, 刘闯, 等. 弹体斜侵彻多层间隔钢靶的弹道特性 [J]. *兵工学报*, 2021, 42(6): 1204–1214. DOI: 10.3969/j.j.issn.1000-1093.2021.06.010.
- DU H C, ZHANG X F, LIU C, et al. Trajectory characteristics of projectile obliquely penetrating into steel target with multi-layer space structure [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(6): 1204–1214. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.06.010.
- [11] 王文杰, 张先锋, 邓佳杰, 等. 椭圆截面弹体侵彻砂浆靶规律分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(1): 164–173. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0020.
- WANG W J, ZHANG X F, DENG J J, et al. Analysis of projectile penetrating into mortar target with elliptical cross-section [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(1): 164–173. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0020.
- [12] 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.
- [13] 刘子豪. 椭圆截面异型弹体高速侵彻混凝土特性研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2018. DOI: 10.26948/d.cnki.gbjlu.2018.000438.
- LIU Z H. Study on the characteristics of high-speed elliptical cross section projectile penetrating into concrete [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018. DOI: 10.26948/d.cnki.gbjlu.2018.000438.
- [14] 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.
- [15] 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(S2): 1–11.
- 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(S2): 1–11.
- [16] 田泽, 王浩, 武海军, 等. 椭圆变截面弹体斜贯穿薄靶姿态偏转机理 [J]. *兵工学报*, 2022, 43(7): 1537–1552. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0367.
- TIAN Z, WANG H, WU H J, et al. Attitude deflection mechanism of projectiles with variable elliptical cross-sections obliquely perforating thin targets [J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(7): 1537–1552. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0367.
- [17] 岳胜哲, 陈利, 张晓伟, 等. 非对称类椭圆截面弹体斜贯穿铝靶数值模拟研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(4): 127–133. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.04.021.
- YUE S Z, CHEN L, ZHANG X W, et al. Numerical simulation of oblique penetration of shaped elliptical cross section projectile through aluminum target [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(4): 127–133. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.04.021.
- [18] 王景琛, 张晓伟, 张庆明, 等. 非圆截面弹体斜侵彻薄靶的动态载荷特性研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2023, 44(1): 127–135. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2023.01.020.
- WANG J C, ZHANG X W, ZHANG Q M, et al. Study on dynamic load characteristics of a non-circular cross-section projectile obliquely penetrating into thin targets [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2023, 44(1): 127–135. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2023.01.020.
- [19] WU H J, WANG Y N, HUANG F L. Penetration concrete targets experiments with non-ideal & high velocity between 800 and 1100 m/s [J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2008, 22(09N11): 1087–1093. DOI: 10.1142/S0217979208046360.
- [20] SILLING S A, FORRESTAL M J. Mass loss from abrasion on ogive-nose steel projectiles that penetrate concrete targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(11): 1814–1820. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.10.008.
- [21] 何翔, 徐翔云, 孙桂娟, 等. 弹体高速侵彻混凝土的效应实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(1): 1–6. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)01-0001-06.
- HE X, XU X Y, SUN G J, et al. Experimental investigation on projectiles' high-velocity penetration into concrete targets [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(1): 1–6. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)01-0001-06.

- [22] 武海军, 黄风雷, 王一楠, 等. 高速侵彻混凝土弹体头部侵蚀终点效应实验研究 [J]. 兵工学报, 2012, 33(1): 48–55.
WU H J, HUANG F L, WANG Y N, et al. Experimental investigation on projectile nose eroding effect of high-velocity penetration into concrete [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(1): 48–55.
- [23] HE L L, CHEN X W. Analyses of the penetration process considering mass loss [J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2011, 30(2): 145–157. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2010.10.004.
- [24] ZHAO J, CHEN X W, JIN F N, et al. Analysis on the bending of a projectile induced by asymmetrical mass abrasion [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 39(1): 16–27. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.09.001.
- [25] 陈小伟. 动能深侵彻弹的力学设计 (I): 侵彻/穿甲理论和弹体壁厚分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(6): 499–505. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)06-0499-07.
CHEN X W. Mechanics of structural design of EPW(I): the penetration/perforation theory and the analysis on the cartridge of projectile [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(6): 499–505. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)06-0499-07.
- [26] 陈小伟, 金建明. 动能深侵彻弹的力学设计 (II): 弹靶的相关力学分析与实例 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(1): 71–78. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)01-0071-08.
CHEN X W, JIN J M. Mechanics of structural design of EPW(II): analyses on the design of EPW projectiles, concrete targets and examples [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(1): 71–78. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)01-0071-08.
- [27] 皮爱国, 黄风雷. 大长细比弹体斜侵彻混凝土靶的动力学响应 [J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27(4): 331–338. DOI: 10.11883/1001-1455(2007)04-0331-08.
PI A G, HUANG F L. Dynamic behavior of a slender projectile on oblique penetrating into concrete target [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(4): 331–338. DOI: 10.11883/1001-1455(2007)04-0331-08.
- [28] 王一楠, 黄风雷, 段卓平. 小攻角条件下动能弹体高速侵彻混凝土靶的弹体弯曲 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(6): 598–606. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)06-0598-09.
WANG Y N, HUANG F L, DUAN Z P. Bending of projectile with small angle of attack during high-speed penetration of concrete targets [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(6): 598–606. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)06-0598-09.
- [29] 张欣欣, 武海军, 黄风雷, 等. 斜侵彻混凝土靶的刻槽弹体的结构响应 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(3): 033301. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0047.
ZHANG X X, WU H J, HUANG F L, et al. Structural response of the concrete target obliquely penetrated by a grooved-tapered projectile [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(3): 033301. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0047.
- [30] 刘坚成, 张雷雷, 徐坤, 等. 反弹道非正侵彻的弹体结构响应实验研究 [J]. *兵工学报*, 2019, 40(9): 1797–1803. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.09.005.
LIU J C, ZHANG L L, XU K, et al. Structural response of projectile in reverse ballistic non-normal penetrating experiment [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(9): 1797–1803. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.09.005.
- [31] 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.
- [32] CHEN G, CHEN X W, CHEN Z F, et al. Simulations of A3 steel blunt projectiles impacting 45 steel plates [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(5): 390–397. DOI: 10.11883/1001-1455(2007)05-0390-08.

(责任编辑 曾月蓉)