

复合材料易碎弹实验测试与仿真分析研究

荣吉利¹, 李健², 刘先光², 林贤坤²

(1. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081; 2. 广西科技大学 广西汽车零部件与整车技术重点实验室, 广西 柳州 545006)

摘要: 基于分离式霍普金森压杆(SHPB)实验获取复合材料易碎弹及航空有机玻璃的材料动态力学参数,选择合理描述易碎弹与有机玻璃材料的本构模型;采用显示动力学分析软件LS-DYNA中的光滑粒子流体动力学(SPH)方法对易碎弹侵彻靶板全过程进行仿真分析。通过仿真分析研究易碎弹着靶速度、入射角度对弹体破碎和靶板毁伤的影响规律,对比不同工况下子弹的破碎效果及毁伤性能,分析总结相关规律。结果表明:子弹的破碎效果及毁伤性能随着入射速度的增大提高明显;相同速度下,子弹垂直入射靶板其破碎与毁伤效果均要优于倾斜入射靶板。数值模拟方法及结果为易碎弹的研制提供了一定的理论参考依据。

关键词: 兵器科学与技术; 易碎弹; 侵彻; 数值模拟; 破碎

中图分类号: TJ012.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2013)09-1057-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.09.001

Simulative Analysis and Experimental Test of Composite Fragile Projectile Under Impact Dynamics

RONG Ji-li¹, LI Jian², LIU Xian-guang², LIN Xian-kun²

(1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Guangxi key laboratory of Automobile Components and Vehicle technology, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China)

Abstract: Dynamic mechanics parameters of composite fragile projectile and aviation organic glass are obtained by split Hopkinson press bar (SHPB) experiment. The reasonable material constitutive models are chosen to model the fragile projectile and organic glass based on LS-DYNA software. The simulation of the fragmentation process of fragile projectile penetrating target is carried out with smoothed particle hydrodynamics (SPH) method. The influence rule of projectile frangibility and damage performance is researched by analyzing the falling speed and impacting angle of projectile, and the relevant results are summarized by comparing the fragile and damage performances. Simulation result shows that the performances of fragmentation and penetration increase as the incident velocity increases, and at the same velocity, the performances of fragmentation and penetration under normal penetrating are superior to oblique penetrating. Numerical simulation and analysis of results offer a theoretical reference for the study of fragile projectile.

Key words: ordnance science and technology; fragile projectile; penetration; numerical simulation; fragmentation

0 引言

易碎穿甲弹能在保持弹体的弹道性能及打击命中率的同时,穿透靶板后形成膨胀破片群,达到进一步的毁伤效果。基于 MSC. DYTRAN 软件,有研究者研究了具有不同力学特性的材料作为钨合金易碎动能穿甲弹的侵彻和破碎性能,结果表明弹体的破碎及毁伤性能随其材料拉伸强度的降低而提高^[1]。还有研究者基于 LS-DYNA 软件中塑性流动理论,研究不同材料下弹体侵彻的效果^[2-6]。其仿真结果表明,弹体对靶体的侵彻是包含高应变率、大变形乃至损伤和破坏的动态过程,材料的损伤和破坏是一个很复杂的问题,与材料性质密切相关。

目前国内外所研究的易碎弹材料主要采用高强度、高密度的易碎钨合金,通过控制其动态抗拉抗压强度比,在撞击目标时由拉伸波作用而破碎。有研究者基于有限元软件对不同材料的弹体侵彻进行仿真^[7-10],其结果表明高密度易碎钨合金除了具有满足常规动能穿甲弹所需的材料性能之外,还具有实现破碎效果的潜力,可优先用作易碎穿甲弹材料,因此对易碎弹的研究主要放在了改善、提高钨合金的性能上。另有研究者基于实验与数值模拟相结合的方法研究和分析了易碎弹穿甲机理^[11-16],结果表明当易碎弹丸攻击目标时,易碎材料钨合金弹芯侵彻到物体内部,在其内逐渐地解体为破片群,产生“瀑布”效应,从而创造出更好的靶后毁伤效果。Sikhanda 等^[17]利用 DYNA 软件对分离式霍普金森压杆(SHPB)实验过程中长细杆撞击金属材料试件进行了仿真分析研究。

使用钨合金材料制成的穿甲易碎弹具有较好的穿透侵彻能力,但若在狭小空间、人员密集的环境中,传统钨合金穿甲弹较容发生过穿透,从而造成对建筑结构或人群的二次毁伤。因此,为研究一种具有一定穿透性能,但较传统钨合金穿甲弹更容易破碎的子弹,本文提出一种金属与有机物混合烧结而成的复合材料易碎弹,通过 SHPB 实验获取弹体与靶板材料的动态力学材料参数。以此为基础,借助 LS-DYNA 非线性有限元软件对弹体侵彻靶板全过程进行仿真分析,研究材料的动态力学特性以及弹体侵彻靶板的破坏性能。

1 子弹与靶板材料的实验研究

易碎弹侵彻靶板是一个相当复杂的变形过程,

若对其进行实弹实验,成本较高,而且对设备的要求也过高,因此在实弹实验困难的前提下,通过有限元软件对其进行仿真分析是最可行的方法。运用有限元软件对易碎弹侵彻靶板的过程进行数值模拟分析时,在材料参数未知的情况下,往往需通过实验来获得材料的力学参数。由于易碎弹侵彻靶板是一个高速、大变形的动态碰撞过程,故采用材料的动态力学参数。本实验采用 SHPB 设备来测量子弹及靶板的动态压缩性能,其中子弹试件材料为一种金属与有机物混合烧结而成的复合材料,其材料配比如表 1 所示。靶板试件材料为飞机上的有机玻璃材料。

表 1 复合材料化学成分

Tab. 1 Chemical composition of composite material

化学成分	S	K	Ca	Fe	Cu	W
质量分数/%	21.29	6.38	1.13	1.20	30.49	39.51

1.1 子弹材料的实验过程及结果

本次实验子弹材料的应变率在 $1\ 060 \sim 1\ 860\ \text{s}^{-1}$ 之间,对子弹试样发射 5 发,应变率依次增大。图 1 为子弹材料试件基于 SHPB 实验的结果,其中图 1(a)~图 1(e)为不同应变率下与之相对应的子弹材料试件的破碎情况。从图中可看到,随着应变率的增加,子弹材料试件的破碎程度越高,以破片最大尺寸为参考,图 1(a)~图 1(e)破片的最大尺寸依次为 5.12 mm、4.63 mm、4.26 mm、4.08 mm 和 3.74 mm。图 2 为不同应变率下子弹的应力-应变曲线图,图中的曲线变化趋势大体相似,在应变未达到 0.01 之前材料处于弹性变形过程,在应变达到 0.01 左右时发生屈服,但是并没有非常明显的屈服点,在应变超过 0.02 之后,明显看到曲线呈下降趋势,即意味着材料已经失效破坏。

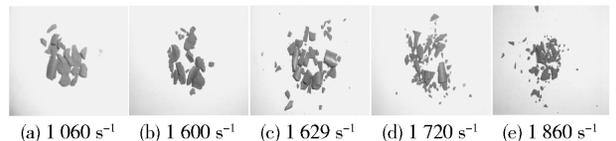


图 1 不同应变率下子弹试件的破坏情况

Fig. 1 Damage of projectile specimen under different strain rates

1.2 靶板材料的实验过程及结果

对靶板有机玻璃材料进行了同样的动态压缩实验,对靶板试样也发射 5 发,应变率在 $998 \sim 3\ 210\ \text{s}^{-1}$ 。

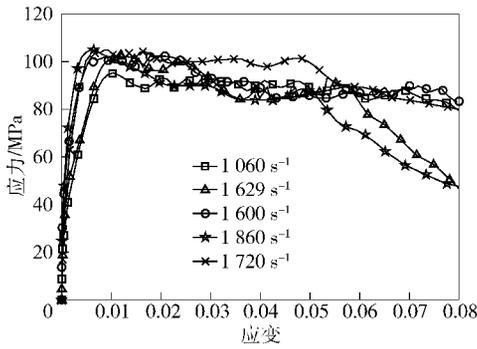


图2 不同应变率下子弹试件的应力-应变曲线图

Fig. 2 Stress-strain relationship of projectile specimen under different strain rate

图3给出了材料试样在不同应变率下其动态压缩实验的应力-应变关系,从图中可看出,曲线的形状大体相似,具体表现在弹性阶段极短,并且会出现一个小的平缓区,材料没有明显的屈服点。应变处于0.055~0.075这段区间内,材料基本达到强度极限,之后呈下降趋势。根据实验结果,子弹试件的强度极限约在104 MPa,超过后材料就会发生破坏,从这点也可以看出,子弹材料的强度较低,这有利于子弹在撞击靶板时发生破坏及碎裂。而对于航空有机玻璃来说,其强度极限一般在375~400 MPa,远大于子弹的强度极限。实验表明,2种材料在相同的初始条件及相同的实验装置下所表现出来的力学性能还是有很大的差异的,具体表现在塑性应变、屈服应力、强度极限方面,在这3个方面,航空有机玻璃的材料参数均不同程度地大于子弹材料。

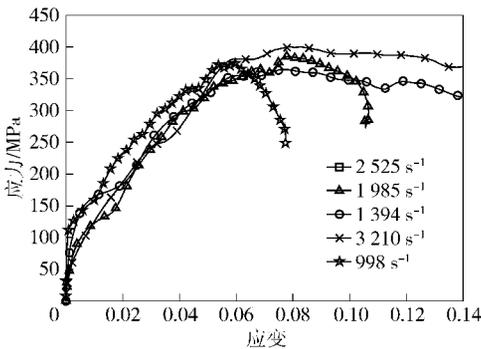


图3 不同应变率下靶板试件的应力-应变曲线图

Fig. 3 Stress-strain relationship of target specimen under different strain rates

2 弹-靶侵彻系统

2.1 弹-靶几何模型

子弹的外形尺寸还处于不断研究的过程中,本

文所用子弹的弹头外形为卵形状,其尺寸如图4所示。靶板为有机玻璃长方体,长度为100 mm,宽度为50 mm,厚度为8 mm。

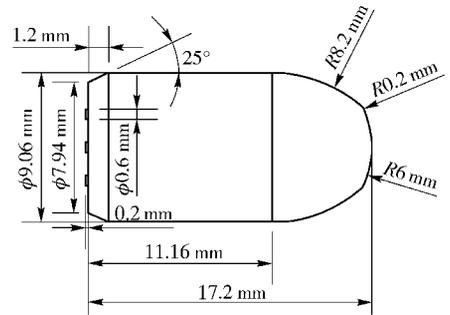


图4 子弹几何模型示意图

Fig. 4 Sketch of projectile geometric model

2.2 有限元模型

光滑粒子流体动力学 (SPH) 方法特别适用于如易碎弹穿甲之类的高速碰撞动力学问题,本文将采用LS-DYNA中的SPH方法对侵彻过程进行仿真分析。子弹模型采用SPH粒子单元来划分,对于靶板,将其中心处略大于弹径的碰撞区域(20 mm × 20 mm)离散为SPH粒子单元,而靶板的剩余部分采用八节点六面体单元来划分。靶板撞击区域与靶板的其他区域采用点面偏移固连(TIED_NODES_TO_SURFACE_OFFSET)接触,使之相互绑定,靶板的边界采用固支边界条件。总模型中SPH的粒子单元数为10377,六面体单元数为1760。为提高计算效率和避免零能模式,采用单点积分和沙漏控制。由于弹体与靶板的撞击区域均为SPH材料,当一个材料的质点位于其他SPH材料质点的球形影响范围之内时,接触作用自然产生,因此相互之间不必定义接触。材料的破坏准则通过控制单元的失效应变来实现。其有限元模型如图5所示。

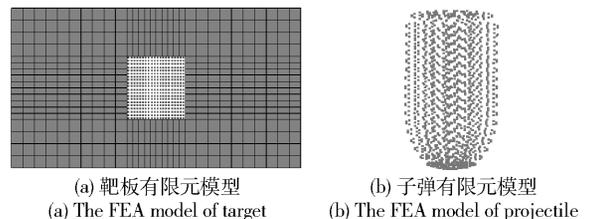


图5 弹与靶的有限元模型图

Fig. 5 Finite element model of projectile-target

2.2.1 材料本构模型

易碎材料在动态穿甲时,其破坏方式主要是由

拉伸作用引起的,压缩时材料发生塑性流动但很难被破坏。根据弹体材料的相关材料性能实验数据,弹体及靶板的材料模型选择 LS-DYNA 中的 MAT3 材料模型。由于在高速碰撞过程中往往要考虑应变率的影响,所以对于材料本构的模型选择时应考虑应力-应变-应变率的关系。故采用 Cowper-Symonds 应变率强化模型,通过确定应变率参数 C 和 p 值来反映材料动态屈服应力与应变率的关系,并采用最大塑性应变破坏准则,其动态应力与应变率的关系为

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_y} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (1)$$

式中: σ_d 为动态应力; σ_y 为静态屈服应力; $\dot{\varepsilon}$ 为等效应变率。参数的推导过程为,对(1)式两边分别取对数,则得到(2)式:

$$\ln \dot{\varepsilon} = p \ln \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_y} - 1 \right) + \ln C. \quad (2)$$

式中可以利用最小二乘法对参数 p 以及 C 进行拟合。根据计算结果,子弹及靶板的材料参数如表 2 所示。

表 2 弹-靶的材料参数

Tab. 2 Parameters of projectile-target material

部件	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	屈服极限/MPa	C/s^{-1}	p	失效应变
子弹	6.19	18.1	0.32	72	1 598.10	0.010 25	0.028
靶板	1.18	486.0	0.31	112	759.59	0.508 38	0.055

2.2.2 材料本构模型的验证

由于弹体和有机玻璃的材料模型是在动态压缩实验的基础上通过最小二乘法对参数 p 及 C 进行拟合得到的,为保证后续数值计算的准确性,有必要先验证材料本构模型选择以及参数拟合的正确性。本节分别以靶板和子弹试件在应变率为 $3\ 210\ s^{-1}$ 和 $1\ 720\ s^{-1}$ 时的工况为例,利用 LS-DYNA 软件对子弹和靶板试件基于 SHPB 动态压缩实验过程进行数值计算,通过仿真分析可以得到入射波、反射波及透射波的脉冲信号,设测试中的脉冲为一维脉冲,测试记录入射、反射和透射脉冲分别用 ε_i 、 ε_r 和 ε_t 表示,则应用一维应力波理论确定试件材料的应变、应力和应变率^[18]。因此,试件材料的平均应变可以表示为

$$\varepsilon_s = \frac{c_0}{l_0} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt, \quad (3)$$

式中: l_0 为试件的初始长度; c_0 为主弹性纵波速度; t 为时间。试件材料中的平均应力表示为

$$\sigma_s = \frac{1}{2} E (A/A_s) (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t), \quad (4)$$

式中: E 为压杆的弹性模量; A/A_s 为压杆与试件的截面比。最终试件材料的应变率可以表示为

$$\dot{\varepsilon}_s = -\frac{2c_0}{l_0} \varepsilon_r. \quad (5)$$

图 6、图 7 分别为靶板和子弹试件分别基于 SHPB 实验和数值仿真所获得的应力-应变曲线的

对比结果。从图中可看到,二者在实验测试和仿真分析中所获得应力-应变曲线均基本吻合,从而验证了本构模型选择与参数拟合的正确性。

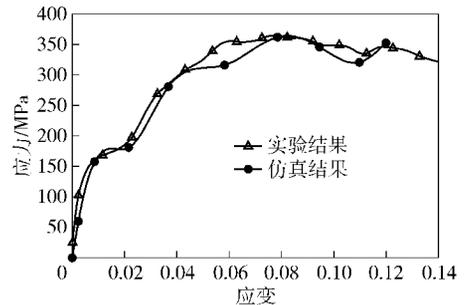


图 6 SHPB 实验和仿真方法的靶板材料应力-应变曲线图

Fig. 6 Stress-strain relationship of target specimen in SHPB experiment and simulation

3 计算结果与分析

由于常规状况下,子弹的入射速度 v 在 $325 \sim 425\ m/s$ 范围内,故本文中复合材料易碎弹垂直入射靶板的入射速度取中间速度 $375\ m/s$ 进行仿真分析,经仿真后可以得到碰撞系统不同时刻的变形过程,取模型的 $1/2$ 进行观察,子弹侵彻靶板的整个过程如图 8 所示,从图中可看出,子弹在撞击靶板时,首先是子弹的弹头弹尾向中间挤压,然后反向拉伸,直至弹体的中间开始破坏,表现为中间的

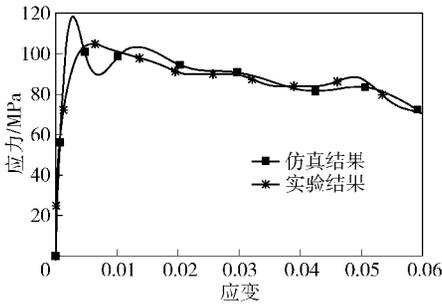


图7 SHPB 实验和仿真方法的子弹材料应力-应变曲线图

Fig. 7 Stress-strain relationship of projectile specimen in SHPB experiment and simulation

SPH 单元首先发生失效,并开始出现断裂,断裂后的弹体分成两部分,且以破片块状的形式存在。对于靶板,在受到子弹撞击后,靶板的撞击区域出现了弹坑且有破坏现象产生,其背板也受到了一定的破坏。

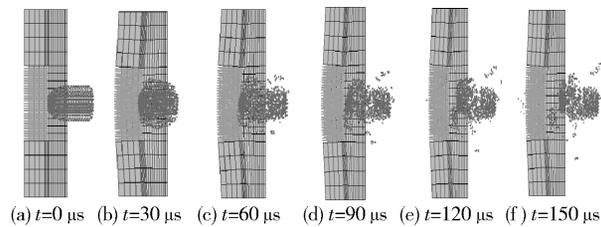


图8 子弹侵彻靶板结果图

Fig. 8 Results of projectile penetrating target

3.1 入射速度的影响

为研究不同入射速度对弹体破碎与靶板毁伤的影响,本节将针对不同的着靶点速度侵彻靶板进行仿真分析,探讨在不同入射速度下,子弹侵彻靶板过程中,子弹的破碎以及靶板的变形情况。图9为 $t = 150 \mu s$ 时,在相同的材料参数及几何尺寸下,入射速度分别为 325 m/s、350 m/s、375 m/s、400 m/s、425 m/s 5 种工况下子弹侵彻靶板的有限元模型结果图。从图中可以清楚地看到,随着入射速度的提高,子弹的破碎效果和靶板的变形程度均有所提高。具体表现为:随着速度的增大,子弹中间部分的破片块状越小,且破碎效果也越明显,而靶板的变形效果也有一定的差别,靶板上的弹坑大小及背板的破坏程度随着入射速度的提高而增大。

在碰撞结束后,子弹发生回弹,图10为子弹弹尾中心节点处的速度历程曲线图,其中速度的方向

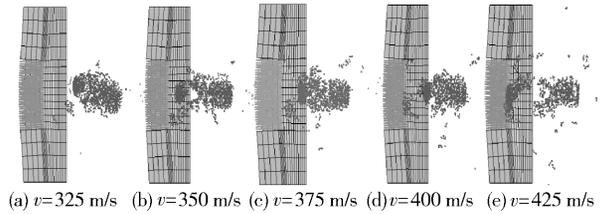


图9 不同入射速度下子弹侵彻靶板的结果图
Fig. 9 Results of projectile penetrating target at different incident initial velocities

为垂直靶板的方向。从图中可看到,子弹的入射速度在 325 ~ 425 m/s 的范围内均有回弹现象发生,且回弹速度的变化幅度也基本相近,最终都趋于一个稳定值。

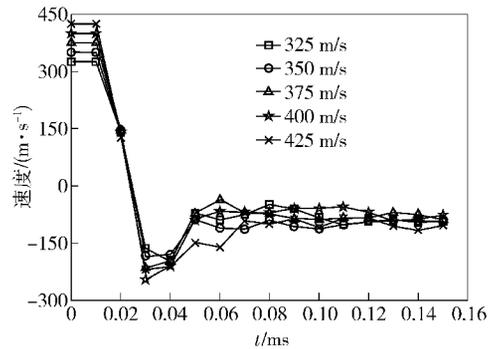


图10 弹尾中心节点处速度历程图

Fig. 10 Process of velocity in central node of projectile tail

图11为不同入射速度下,靶板的变形能随时间的变化曲线图,从图中可以看出,在同一时刻处,靶板的变形能随着子弹入射速度的增大而增大。在 $t = 0.03 \text{ ms}$ 后,靶板的变形能趋于平缓,且子弹的入射速度越大,平缓处的变形能越大,这表明此时靶板的变形能大小只受人射速度的影响。

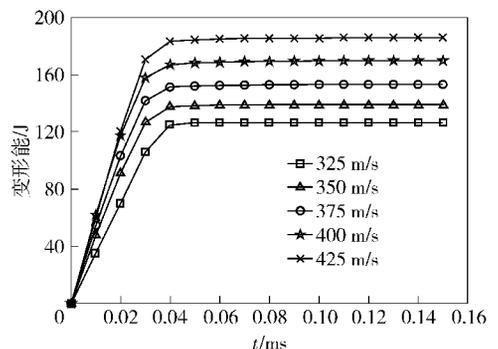


图11 不同入射速度下靶板变形能曲线图
Fig. 11 Curves of distortional energy of target at different incident initial velocities

3.2 入射角的影响

为研究子弹入射角度对其自身的破碎效果以及靶板变形能的影响。本节中子弹的入射角 γ 为 $0^\circ \sim 75^\circ$ ，其中入射角为子弹轴线与靶板法线方向的夹角，由于入射角为 $0^\circ \sim 20^\circ$ 时子弹侵彻靶板的效果最显著，故观察此工况内的子弹侵彻靶板的效果，图 12 为 $t = 150 \mu\text{s}$ 时不同工况下子弹侵彻靶板的效果图。从图中可以看出，随着子弹入射角的增大，子弹的破碎效果越不明显，具体表现为子弹中间部分的破片更少，且破片更大。对于靶板来说，随着子弹入射角的增大，靶板中心处凹陷的程度越低，背板破坏的程度也越低。

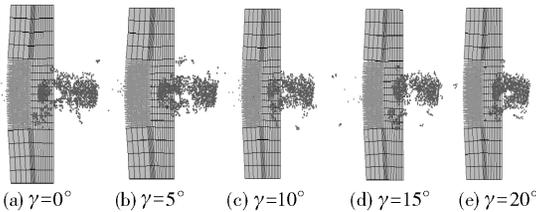


图 12 350 m/s 入射速度下不同入射角的子弹侵彻靶板效果图

Fig. 12 Result of projectile penetrating target at different incident angles and impacting velocity of 350 m/s

碰撞结束后，子弹会发生一定的回弹，图 13 为弹尾中心处节点的速度历程曲线图，其中速度为弹体运动速度沿垂直入射靶板方向的分量。从图中可以看出，弹尾中心节点处的速度变化曲线几乎相近，且回弹速度的大小相差不大，这表明不同的入射角，对子弹的回弹速度的影响并不大。

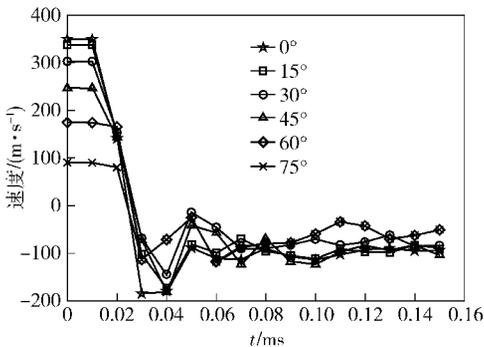


图 13 弹尾中心节点处的速度历程图

Fig. 13 Process of velocity at central node of projectile tail

图 14 为碰撞过程中靶板的变形能时曲线图，从图中可以清楚的看到， $t = 0.02 \text{ ms}$ 之前，靶板的变形

能变化曲线几乎一样，之后开始受到入射角变化的影响，变形能增长的速率表现的不一样，但最后均趋于平稳。具体表现为随着入射角的增大，靶板的最终变形能越小。

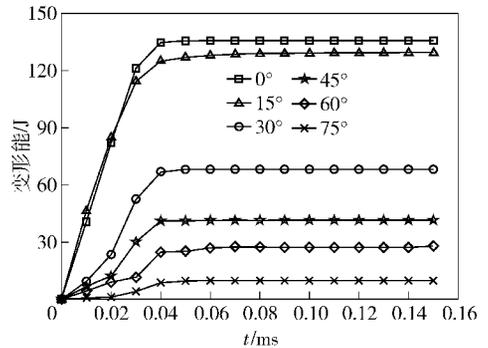


图 14 变形能与时间曲线图

Fig. 14 Curves of distortional energy of target at different incident angles

图 15 为子弹以不同的角度入射时，其入射速度与靶板变形能之间的关系曲线，从图中可以看出，靶板的变形能呈上升趋势，在相同的入射速度下，随着入射角的增大，靶板的变形能越小。在相同的入射角下，随着速度的增大，靶板的变形能也随之增大。

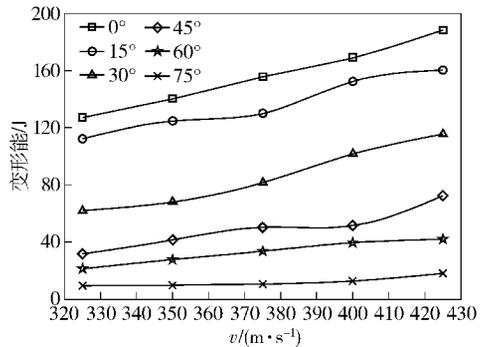


图 15 入射速度与靶板变形能之间的关系

Fig. 15 The relationship of projectile impacting velocity and target distortional energy at different incident angles

图 16 为子弹以不同的速度入射时，其入射角度与靶板变形能之间的关系曲线，从图中可以看出，靶板的变形能随着入射角的增大，整体呈下降趋势，即在相同的入射速度下，靶板的变形能随着入射角的增大而减小，且直至趋于 0，此时也就会发生所谓的“跳弹”现象。图中也表明了，在相同的入射角下，靶板的变形能与入射速度呈正比关系，即随着入射速度的增大而增大。

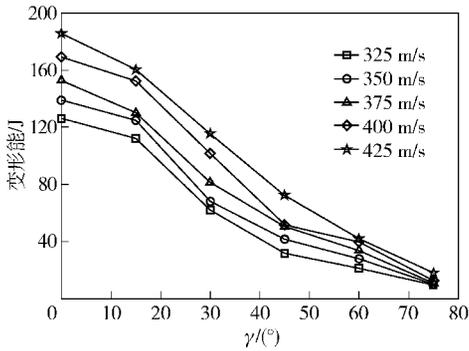


图 16 入射角度与靶板变形能之间的关系

Fig. 16 The relationship of projectile incident angle and target distortional energy at different impacting velocities

4 结论

子弹侵彻靶板是一个相当复杂的过程,影响侵彻效果的因素,除了入射速度和入射角度的影响外,还有材料特性、弹靶的几何构形等因素。在不同的因素下,对子弹的破碎及侵彻性能均不同,因此有时需考虑多种因素的共同作用来满足需求。为此,本文首先通过 SHPB 实验对复合材料易碎弹与航空有机玻璃两种材料的动态力学性能参数进行测量,获取弹靶材料在动态压缩情况下的本构关系,实验结果表明,子弹材料的强度很低,且远低于靶板材料的强度,与目前大量采用的钨合金或钢芯弹丸在同一初速度入射的情况相比,其侵彻能力肯定会远低于后者,但其破碎性能要远高于后者。然后,采用 LS-DYNA 有限元软件对子弹侵彻靶板全过程进行仿真分析,着重探讨了子弹入射速度和入射角度对子弹的破碎效果及靶板变形能的影响,通过仿真分析可以看出,在材料参数一定的条件下,入射速度和入射角度均对子弹的破碎效果和靶板的变形能都有直接的影响,具体表现在:

1) 当子弹以不同的入射速度侵彻靶板时,随着入射速度的增加,子弹的破碎效果更明显且靶板的变形能呈单调递增的情况,即入射速度越高,靶板的破坏程度越大。

2) 当子弹以不同的入射角侵彻靶板时,随着入射角的增大,子弹的破碎效果及靶板的破坏程度均下降。

3) 当子弹以不同的入射速度倾斜侵彻靶板时,子弹均会发生回弹,且子弹的破碎效果和靶板的破

坏程度均要低于垂直入射的情况。

综上所述,为了达到有效毁伤效果,首先应根据实际需要,选择子弹入射时的入射角,因为在相同的材料参数下,入射角越小,靶板的变形能会越大;在选定了合适的入射角之后,再将此入射角固定,对子弹的入射速度进行讨论,找出此工况下,理想的入射速度,从而达到理想的毁伤效能。

参考文献 (References)

- [1] 荣吉利,于心健,刘宾,等. 钨合金易碎动能弹穿甲有限元模拟与分析[J]. 北京理工大学学报,2004,24(3):193-196.
RONG Ji-li, YU Xin-jian, LIU Bin, et al. FEM simulation and analysis of tungsten heavy alloy fragile projectile under impact dynamics[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(3): 193-196. (in Chinese)
- [2] 朱峰,朱卫华,颜君来,等. 锥头弹尖角度对侵彻效果影响问题的数值分析[J]. 四川兵工学报,2011,32(3):139-142.
ZHU Feng, ZHU Wei-hua, YAN Jun-lai, et al. Numerical analysis of penetration effects of conehead projectile's tip angle[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2011, 32(3): 139-142. (in Chinese)
- [3] 朱峰,朱卫华,王怡舒. 卵形弹头子弹侵彻铝-铁复合靶的数值分析[J]. 四川兵工学报,2011,32(5):24-27.
ZHU Feng, ZHU Wei-hua, WANG Yi-shu. Numerical analysis of oval projectile penetrating aluminum-iron composite target [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2011, 32(5): 24-27. (in Chinese)
- [4] 李向东,钱建平,曹兵,等. 弹药概论[M]. 北京:国防工业出版社,2004:103-110.
LI Xiang-dong, QIAN Jian-ping, CAO Bing, et al. Introduction to ammunition [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 103-110. (in Chinese)
- [5] 赵国志. 穿甲工程力学[M]. 北京:兵器工业出版社,1992:86-100.
ZHAO Guo-zhi. The engineering mechanics of penetration [M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1992: 86-100. (in Chinese)
- [6] 杜忠华,沈培辉,赵国志. 钨合金易碎材料动态穿甲特性实验研究[J]. 弹道学报,2006,18(4):51-54.
DU Zhong-hua, SHEN Pei-hui, ZHAO Guo-zhi. Research of tungsten alloy fragile material dynamic impacting characteristic experiment [J]. Journal of Ballistics, 2006, 18(4): 51-54. (in Chinese)
- [7] 张宝生,康志君. 高密度钨合金的穿甲特性及其应用[J]. 中国钨业,1999,14(5-6):178-185.
ZHANG Bao-sheng, KANG Zhi-jun. The property of penetration and application of the high density tungsten heavy alloy [J]. The

- Tungsten of China, 1999, 14(5-6): 178-185. (in Chinese)
- [8] 杨海波,徐利明,张笑. 穿甲弹打击双层防护甲板数值模拟计算[J]. 四川兵工学报,2009,30(4):52-54.
- YANG Hai-bo, XU Li-ming, ZHANG Xiao. A numerical simulation of armour piercing projectile impacting double protection deck [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2009, 30(4):52-54. (in Chinese)
- [9] 张朝晖,王富耻,李树奎. 钨丝集束复合材料穿甲弹芯穿甲过程的数值模拟研究[J]. 稀有金属材料与工程,2003,32(6):440-442.
- ZHANG Chao-hui, WANG Fu-chi, LI Shu-kui. A numerical simulation study of Tungsten cluster composite material armour piercing projectile core impacting process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(6): 440-442. (in Chinese)
- [10] 贾福庆. 小口径易碎型穿甲弹穿甲毁伤特性研究[D]. 南京:南京理工大学,2010:20-60.
- JIA Fu-qing. A study of slim fragile armour piercing projectile penetrating characteristic [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010; 20-60. (in Chinese)
- [11] 贺虎成,刘晓华,唐德高. 弹体冲击效应实验的数值模拟分析[J]. 振动与冲击,2007,26(11):91-96.
- HE Hu-cheng, LIU Xiao-hua, TANG De-gao. Numerical simulation analysis of projectile impacting effect [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(11): 91-96. (in Chinese)
- [12] 杨桂通. 塑性动力学[M]. 北京:高等教育出版社,1998:30-56.
- YANG Gui-tong. Plastic-dynamics [M]. Beijing: High Education Press, 1998:30-56. (in Chinese)
- [13] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与分析实例[M]. 北京:科学出版社,2005:300-450.
- BAI Jin-ze. LS-DYNA3D theoretical basis and case analysis [M]. Beijing: Science Press, 2005: 300-450. (in Chinese)
- [14] 蒋志刚,申志强,曾首义,等. 穿甲子弹侵彻陶瓷/钢复合靶板实验研究[J]. 弹道学报,2007,19(4):38-42.
- JIANG Zhi-gang, SHEN Zhi-qiang, ZENG Shou-yi, et al. An experimental study on ceramic/mild steel targets against APP [J]. Journal of Ballistics, 2007, 19(4): 38-42. (in Chinese)
- [15] 陈斌,罗夕荣,曾首义. 穿甲子弹侵彻陶瓷/钢靶板的数值模拟研究[J]. 弹道学报,2009,21(1):14-18.
- CHEN Bin, LUO Xi-rong, ZENG Shou-yi. A numerical simulation on ceramic steel target against penetration of armor-piercing projectile [J]. Journal of Ballistics, 2009, 21(1): 14-18. (in Chinese)
- [16] 荣光,孙瑞胜,薛晓中,等. 两种非圆截面弹芯的侵彻性能研究[J]. 兵工学报,2009,30(4):384-388.
- RONG Guang, SUN Rui-sheng, XUE Xiao-zhong, et al. A study of two kinds of non-circular cross section projectile core penetrating characteristic [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(4): 384-388. (in Chinese)
- [17] Sikhanda S, Stephan B. Response of long rodsto moving lateral pressure pulse; numerical evaluation in DYNA3D [J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 26(3): 663-674.
- [18] 王礼立,朱兆祥. 应力波基础[M]. 第2版. 北京:国防工业出版社,2005:35-64.
- WANG Li-li, ZHU Zhao-xiang. Foundation of stress waves [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 35-64. (in Chinese)