

金属长杆穿透多层靶板的实验研究^{*}

丁 桦, 黄婉莉, 孙庚辰

(中国科学院力学研究所工程科学研究所, 北京 100080)

摘要: 通过进行金属长杆穿透多层靶板的实验研究了解了靶板的破坏形态与长杆入射状态间的关系; 了解了影响长杆穿透多层靶板的轨迹和姿态的稳定性的各种因素; 对长杆轨迹的层间偏移和速度降给出了简单的量纲分析结果, 这些结果得到了实验的定性验证。还对实验中存在的问题进行了总结分析。

关键词: 金属长杆; 多层靶; 弹道稳定性; 破坏性态

1 引言

在金属长杆穿透多层靶板的弹道稳定性的研究方面国际上尚未见报道。它涉及两方面的问题: 一是金属长杆穿透单层靶板后的状态对入射状态的依赖关系; 二是金属长杆穿透多层靶板后弹道偏离的累积效应。在我们的问题中金属长杆在穿透隔舱时的速度要远高于其穿透极限。

本文中详细描述了金属长杆穿透多层靶板的弹道稳定性的实验研究的实验方案、实验结果和结果分析, 对大量实验数据进行了整理分析, 为进一步的机理分析提供了一定的依据。

2 实验安排

本研究的实验内容为以下几个方面: (1) 斜入射和带随机偏航的金属长杆穿透单层靶出射状态的研究; (2) 斜入射和带随机偏航的金属长杆穿透(重点为非耦合)多层靶板的出射轨迹及状态的研究。实验使用的金属长杆平均质量 22.5g。弹托为两瓣自分离式卡瓣, 借助飞行中的空气阻力实现弹托与弹体的分离。实验装置由发射装置、卡瓣收集器、多层靶架、激光测速靶、X 光正交照相机组成; 同时利用测速靶测量靶回弹速。实验中金属长杆杆速最高可达 1400m/s。实验采用 LY-12 铝靶板, 尺寸 300mm×300mm, 厚度 3mm。复合材料板为玻璃纤维层压板, 尺寸 300mm×300mm, 厚度 3mm。

3 实验结果

根据实验安排, 共进行了 28 发杆弹穿靶实验。薄铝靶板弹孔的破坏形态对应不同的人射状态(速度、姿态)有着不同的特征。当弹速较高时, 弹孔直径比弹杆直径略大, 弹孔边缘有熔化的迹象, 弹的尾翼在弹孔边扩出呈圆形的孔; 当速度降低时尾翼的痕迹逐渐变窄, 即尾翼对靶板的破坏逐渐由熔化变为剪切。从弹孔的背面看, 高速下, 孔边有熔化痕迹, 稍稍有些翻边; 当弹速降低时, 逐渐出现开花瓣现象, 速度越低, 花瓣越明显但越不规则。弹孔的另一特征是: 速度越低, 弹孔周围靶板的变形越大。对于斜入射情况, 弹孔呈椭圆形, 弹孔正面普遍是上翘下凹, 速度越低时越明显。以上这些特征表征了靶板在不同弹速的弹体撞击下具有不同的破坏特征。弹体的入射姿态很难控制为理想的正入射或斜入射, 这种偏差在速度较低时影响明显。

穿多层板的弹体整体弹道轨迹, 在正入射时, 存在随机偏转, 这一现象也是速度越低越明显。但在斜入射时弹体的弹道轨迹有明显的固定偏转方向, 它是向减小弹体速度方向与靶板的法向夹角的方向偏转。同样, 这一现象也是弹速越低越明显。关于弹体在穿透多层靶板过程中的速度衰减, 对于正入射和斜入射以及不同的初始入射速度, 存在不同的现象: 正入射时, 存在着穿透后靶的速度降远小于穿透前靶的速度降的现象。

* 基金项目: 国防重点基金项目

作者简介: 丁 桦, 博士, 研究员。

在高速(约 1400m/s)下,由于铝板的熔化,会在后面的靶板上留下散落飞溅破片。在弹速降低时,会在后面的靶板上留下明显的塞块痕迹。当斜入射角度逐渐增大时,飞溅破片的中心和塞块会逐渐偏离弹体的轨迹,一般是在靶板的法向和弹体轨迹方向之间。当入射弹体带有较大的偏航角时,弹体穿透靶板后弹头有较大的不对称变形、弹体弯曲和较大的尾翼的不对称变形,这些不对称变形将会随着穿透靶板的层数而增加。这将对弹体姿态和轨迹有很大的影响。在这种情况下出射弹体往往都带有较大的偏航角,这些偏航角是随穿透靶板层数的增加呈非线性增加的态势。

关于复合材料靶板,前面提到的各种特征,除去有关弹孔形态的特征,基本上都具有。另外对于复合靶板:(1)弹孔周围泛白,有机体破坏和机体与纤维间的脱开的迹象;(2)在实验的速度范围内,弹速越高,靶板正面破坏区域越大,弹速越低,靶板背面破坏区域越大。(3)高速下,后靶板有前靶板碎片打击的痕迹。(4)对于斜入射,靶前表面弹孔上方白印面积大,靶背面弹孔下方白印面积大。(5)弹孔中心纤维基本是被拉断,尾翼处基本是被剪断。

4 实验结果分析及结论

在高速入射情况下,弹体在与靶板的碰撞过程中,弹着点附近的材料就会呈塑性流动状态。由于靶板其它部分对这块流动材料的约束,使得流动体的初始运动有向靶后法向运动的趋势;同时,弹体又对其具有沿弹体运动方向的推动。这两种作用的合成,使得这块流动体向弹体运动方向与靶板法向之间的某一方向运动。这样,当弹体入射角度越大,这部分流动材料的飞溅方向与弹体运动方向的夹角也越大。这部分飞溅材料的动量将对弹体产生一个反向的冲量,使弹体产生姿态向上扬和质心向上运动的趋势。这时靶板又会对弹体产生向下运动的约束力,使上扬和向上运动的趋势逐渐减弱。由于上扬的趋势是由作用在弹体上的相对于质心的力矩而获得,因此,弹体通过弹孔所获得的减弱弹体上扬的趋势不会很明显,但减小弹体质心向上运动甚至过渡到向下运动的趋势将是一直存在的。当弹速降低时,着弹点邻近的流体飞溅过程将逐渐被弹头对着靶点邻近的靶板的推动和弹头边缘对靶板的剪切所取代,使之产生开瓣和塞块。同样,塞块的运动方向在受到靶板的约束下,是介于弹体运动方向和法向之间的。同高速时情况一样,这使弹体先产生上扬和质心向上运动的趋势,后又使弹体产生低头和质心向下运动的趋势。同时,由于尾翼的存在,在它斜入射或带偏航角的穿靶过程中,一般都会对弹体产生非对称的作用。由于尾翼的变形和尾翼方位的随机性,使得这种不对称作用具有一定的随机性,并在穿透多层靶过程中有发展的趋势。在高速、小随机偏航角的情况下,弹体的轨迹和姿态基本上是稳定的,其轨迹的发展也是平稳变化的。在低速(约 700m/s)、大偏航角的情况下,弹体的轨迹和姿态存在不稳定的实验例子。而且这些不稳定性质的发展具有一定的随机性。

通过量纲分析,弹体的层间速度降 Δv 和层间轨迹偏移量 Δh 可以近似为

$$\Delta v/v = k_1 \sec^2 \alpha, \quad \Delta h/L = k_2 \sin^2 \alpha (v^2 / (Lg))^n$$

总结前面的分析结果,在我们的实验条件和撞击速度范围内,可以认为:(1)不同的入射速度对弹道轨迹的稳定性是有影响的。速度越高稳定性越好。(2)理想斜入射会引起出射弹体产生偏航角。(3)斜入射穿透多层平面靶板,弹道会偏离入射方向,弹道轨迹是向减小其与靶板法向方向的夹角偏转。(4)弹体尾翼起着稳定弹体飞行方向的作用,但在斜入射时,它将使靶板对弹体产生非对称作用。在低速或弹体发生非对称变形的情况下,弹体的姿态将出现随机发展或失稳(出现横弹)。(5)不同的入射弹速会引起靶板的不同的破坏模式。(6)弹孔的破坏形态与弹体的飞行稳定性、飞行姿态有很强的对应性。而弹体入射速度与弹孔的破坏形态也是相对应的。(7)初始偏航角会使弹体,尤其是尾翼在穿靶过程中产生变形,进而影响弹体的稳定性。

参考文献:

- [1] Robins B. New principles of gunnery (mathematical tracts of the late Benjamin robins)[M]. London: Nourse, 1761.
- [2] Helie F. Traite de balistique experimentale[M]. Paris: Gauthier-Villars, 1884.
- [3] Corbett G G, Reid S R, Johnson W. Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles[J]. Int J Impact Engng, 1996, 18: 141-230.

单元依然能够考虑接触。模型中弹体为接触面,靶体为目标面。计算结果分列如下:

(1)弹体的初速为 800m/s。从弹体对靶板的侵彻过程可以看到,弹体前端被剪断。本模型中靶板采用钢,为延性材料;板厚 0.64cm,在弹体高速侵彻过程中,沿靶板的厚度方向不存在应力和变形梯度,属于薄靶。除延性破坏外,延性材料薄靶一般发生花瓣破坏,当弹体撞击薄靶时大的径向及周向拉应力会使靶板产生形卷边,同时伴随有明显的塑性流动与永久变形,然后弹体继续运动,使靶板的变形向后卷形成花瓣卷边^[4]。

(2)弹体的初速为 750m/s。靶体被贯穿,弹体被剪成两部分,一部分在靶体上部飞出,一部分贯穿靶体后飞出。

(3)弹体的初速为 700m/s。靶体被完全贯穿,弹体跳飞。

(4)弹体的初速为 650m/s。靶体没有被贯穿,出现了一个弹坑,弹体跳飞。

4 结 束 语

运用 LS-DYNA3D 有限元软件,采用各向同性硬化弹塑性材料模型、Von Mises 屈服准则和等效应变失效准则,采用应力修正的弹塑性材料模型,对钨合金弹体对钢靶的侵彻过程进行了数值模拟。从数值模拟的结果中可以看到延性材料薄靶在受到弹体侵彻贯穿时出现的延性破坏和花瓣型破坏等现象,成功地模拟了钨合金弹体对钢靶侵彻的主要物理过程。从上面几个计算结果可以看出,在上述条件下,钨合金弹体贯穿钢靶的极限速度是 700m/s。

参 考 文 献:

- [1] 宋顺成,谭多望,才鸿年,等. 穿破甲有限的几何非线性及物理参数的确定[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(2): 137-143.
- [2] Batra R C, et al. Adianatic shear bands in axisymmetric impact and penetration problems[J]. Comp Methods Appl Mech Engrg, 1998, 151(3/4).
- [3] 吕洪生,等. 连续介质力学[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1999.
- [4] Ansys 公司北京办事处. ANSYS/LS-DYNA 算法基础和使用方法(第 5/6 版)[Z]. 2000.
- [5] 许沐华,王肖钧,张刚明,等. 预扭转钨合金杆弹侵彻钢靶的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(3): 210-215.
- [6] 隋树元,等. 终点效应学[M]. 北京:国防工业出版社, 2000.

(上接第 320 页)

- [4] Sutterlin R. Les Projectiles. Sec. I, II, III, IV. Sciences et techniques de l'armement[J]. Memorial de l'artillerie francaise, 1966, 40: 569-830; 1967, 41(12).
- [5] Anderson C W Jr, Bodner S R. Ballistic impact: the status of analytical and numerical modeling[J]. Int J Impact Engng, 1988, 7: 9-35.
- [6] Schwer L E, Salamon N J, Liu W K, et al. Computational techniques for contact, impact, penetration and perforation of solids, AMD vol. 103[M]. New York: ASME, 1989.
- [7] Goldsmith W. Non-ideal projectile impact on targets[J]. Int J Impact Engng, 1999, 22: 95-395.