

头部形状和着角对弹丸碰击薄目标 前冲过载系数仿真研究*

曹苏雅拉图¹,王雨时¹,王强²,闻泉¹,王乃耀²

(1 南京理工大学机械工程学院,南京 210094;2 九江45信箱,江西九江 332008)

摘要:为了为引信惯性触发装置设计提供参考,利用 LS-DYNA 软件对头部不同形状的弹丸以不同着角碰击薄目标过程进行数值仿真研究,得到了头部不同形状的弹丸以不同着角碰击不同薄目标时的最大前冲过载系数。研究表明:弹丸前冲过载系数最大值并不是在正碰靶的情况下,而是对应某一小着角,靶板材质和厚度不同该着角也不同,应考虑弹丸攻角和立靶误差导致的着角变化对引信惯性触发灵敏度及钝感度性能的影响。头部形状不同,弹丸碰靶前冲过载系数差异较大,因此弹头形状设计应综合考虑气动特性与引信碰靶前冲环境之需。

关键词:触发引信;过载系数;头部形状;着角;薄目标

中图分类号:TJ410.33 **文献标志码:**A

Simulation Research on Set-forward Overload Factor of Head Shape and Impact Angle of Projectile Impacting Thin Target

CAO Suyalatu¹, WANG Yushi¹, WANG Qiang², WEN Quan¹, WANG Naiyao²

(1 School of Mechanical Engineering, NUST, Nanjing 210094, China;

2 P. O. Box 45, Jiangxi Jiujiang 332008, China)

Abstract: The use of the LS-DYNA procedure to simulate the projectile of different head shape contacting thin target at different impact angle and obtain the maximum set-forward overload factor provide reference for designation of inertia contact device of fuze. The results show that the maximum set-forward overload factor appears while the projectile contact target is in a small impact angle which changes along with the materials and thickness of the target plate rather than contacting positively, so the impact angle generated by the error of the target plate and attack angle's influence on the contact sensitivity and insensitivity tests must also be considered. Designing different projectile shape, there is great differences in the maximum set-forward overload factor, so while designing projectile shape, the aerodynamic characteristics and the set-forward enviroment must be considered.

Keywords: contact fuze; overload factor; head shape; impact angle; thin target

0 引言

引信惯性触发装置设计通常要兼顾钝感度和灵敏度要求。文中对头部不同形状的弹丸以不同着角碰击薄目标过程进行数值仿真,得到弹丸碰击薄目标时的最大前冲过载系数值,从而给引信惯性触发装置设计提供工作环境。

众多文献对头部不同形状的弹丸侵彻过载特性的研究主要侧重于混凝土和钢板等硬目标,Jan Arild Teland 等^[1]采用 LS-DYNA 程序研究了截锥形弹丸侵彻混凝土目标的过载特性;聂明飞等^[2]利用 LS-DY-

NA 软件,对弹丸侵彻多层混凝土靶板进行了数值仿真,讨论了混凝土靶板的破坏现象,研究了卵形头部弹丸对多层混凝土目标的侵彻规律以及目标厚度对弹丸前冲过载特性的影响;徐文峰等^[3]采用 LS-DYNA 软件仿真了尖头形弹丸正侵彻混凝土过程,推导出具有不同几何特点的尖头弹丸侵彻过载数学模型,并得出了锥形和卵形头部弹丸侵彻混凝土靶板的冲击过载特性。孙炜海等^[4]对固支薄金属靶板的低速穿透过程进行了评估,给出了锥形头部弹丸穿透金属靶板的耗能公式和弹道极限公式。

* 收稿日期:2012-02-07

作者简介:曹苏雅拉图(1986-),男,内蒙古科尔沁左翼中旗人,硕士研究生,研究方向:引信系统分析与设计、弹药安全系统与爆炸序列设计。

1 数值模型

1.1 有限元模型

以某非旋转弹丸质量 4.25 kg, 碰靶速度为 140 m/s 为例。另假设弹体外壳厚度 1 mm, 材料 7A04 铝合金。根据文献[5]所做的研究, 弹体外壳内按土壤处理。为了保证简化后弹丸重量一致, 弹长略有不同, 但这并不影响仿真结果^[5]。弹丸头部几何形状选取为圆柱形、截锥形、半球形和圆锥形, 不考虑尾翼结构。靶板为铝合金板、水曲柳胶合板和杉木板(厚 3 mm)。整个建模过程采用 $g \cdot cm \cdot \mu s$ 单位制。本模型中弹体与靶板之间采用面-面侵蚀接触算法。为节省计算量, 建立四分之一模型。不同弹头几何形状的弹丸如图 1 所示。

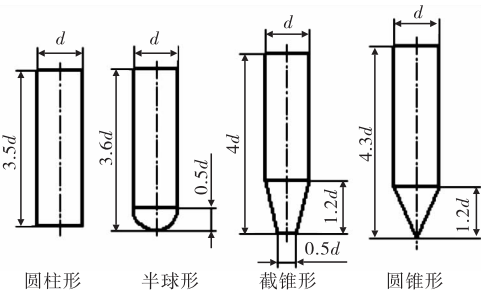


图 1 不同头部形状的弹丸

1.2 材料模型及其状态方程

根据文献[6], 采用 JOHNSON-COOK 材料模型 GRUNEISEN 状态方程定义弹体外壳材料的模型和状态方程。JOHNSON-COOK 材料模型的本构方程描述了应变、应变速率和温度对流动应力的影响, 其表达式为^[7]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon})(1 - T^*{}^m)$$

式中: σ 为流动应力; ε 为流动等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}$ 为无量纲塑性应变率; A, B, n, C, m 为材料参数; $T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$ 为无量纲温度; T_m 为熔点; T_r 为室温。

GRUNEISEN 状态方程定义了体积与压力之间的关系。其表达式为^[7]:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + E(\gamma_0 + a\mu)$$

式中: p 为材料压力; $\mu = \rho/\rho_0 - 1$; C 为 $v_s - v_p$ 曲线截距; S_1, S_2, S_3 为 $v_s - v_p$ 曲线斜率系数; γ_0 为 GRUNEISEN 常数; α 为 γ_0 的一阶体积修正; E 为材料

内能。

用“*MAT_PLASTIC_KINEMATIC”定义弹体填充物。用“*MAT_PLASTIC - C_KINEMATIC”定义靶板材料模型。塑性随动模型通过在 0 和 1 间调整硬化参数 β 来选择随动硬化或各项同性, 其应变率用 COWPER-SYMONDS 模型表示, 屈服应力为^[8]:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p^{\text{eff}})$$

式中: σ_0 为初始屈服应力; C, P 为 COWPER-SYMONDS 应变率参数; $\varepsilon_p^{\text{eff}}$ 为有效塑性应变; β 为硬化参数; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; E_p 为塑性硬化模量。由参考文献[9-11], 得 7A04 铝合金、土壤、水曲柳胶合板和杉木板材料模型的仿真参数如表 1 和表 2 所列。按照表 1 和表 2 设置弹体和靶板材料模型和状态方程参数。

表 1 7A04 铝合金 Johnson-Cook 材料模型参数

参数	参数值	参数	参数值
密度/(g/cm ³)	2.8	熔化温度/K	877
弹性模量/GPa	95	应变率相关系数	0.01
剪切模量/GPa	35	比热/(J/(kg·K))	8.75×10^{-6}
泊松比	0.35	屈服应力/MPa	337
应变硬化参数	0.41	温度相关系数	1

表 2 土壤、水曲柳胶合板和杉木板材料模型的主要参数

材料	参数					
	密度/(g/cm ³)	弹性模量/GPa	泊松比	屈服应力/MPa	切线模量/GPa	失效应变
土壤	1.8	1.5	0.31	0.1	0.57	1.00
水曲柳胶合板	0.8	15	0.30	3.5	5.77	0.05
杉木板	0.47	9	0.30	2.1	3.46	0.05

2 仿真结果

2.1 圆柱形弹丸

对圆柱形弹丸以不同着角碰击三种薄目标进行了仿真。以不同着角碰击铝合金板、水曲柳胶合板和杉木板的最大前冲过载系数

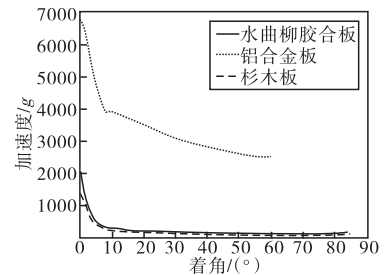
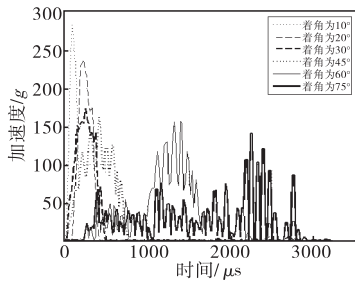


图 2 圆柱形弹丸以不同着角碰击三种薄靶板的最大前冲过载系数

如图 2 所示。碰击铝合金板的最大前冲过载系数值比碰击水曲柳胶合板和杉木板大很多, 圆柱形弹丸以小着角和大着角

碰击薄靶板的最大前冲过载系数值相差较大,着角变化对最大前冲过载系数值影响很大,碰击三种薄靶板时的最大前冲过载系数值均随着角的增大而单调递减,与着角呈反比关系。弹丸以大于 10° 着角碰击木质板时着角变化对前冲过载系数影响不大。

圆柱形弹丸以不同着角碰击水曲柳胶合板的前冲过载系数曲线如图 3 所示。

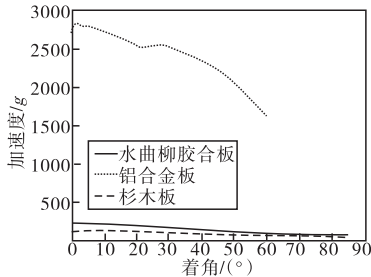


圆柱形头部弹丸四种不同着角碰击水曲柳胶

合板时的最大前冲过载值从大到小依次为: 10°、20°、30°、45°、60° 和 75°。着角为 10° 时前冲过载曲线未见波动,随着角的增大前冲过载系数曲线越来越抖动,着角较大时其它三种头部形状的前冲过载系数曲线也有抖动。

2.2 半球形头部弹丸

对半球形头部弹丸以不同着角碰击三种薄目标进行仿真。以不同着角碰击铝合金板、水曲柳胶合板和杉木板的最大前冲过载系数

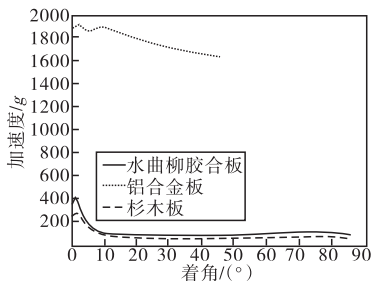


数如图 4 所示。

半球形头部弹丸以 0° ~ 10° 着角碰击三种薄靶板时的最大前冲过载系数值变化较小,在此范围内着角对弹丸前冲过载系数影响较小;当以大于 10° 着角碰击三种薄靶板时弹丸的最大前冲过载系数随着角的增大而减小,与着角呈反比关系。

2.3 截锥形头部弹丸

对截锥形头部弹丸以不同着角碰击三种薄目标进行仿真。以不同着角碰击铝合金板、水曲柳胶合板和杉木板的最大前冲过载系数

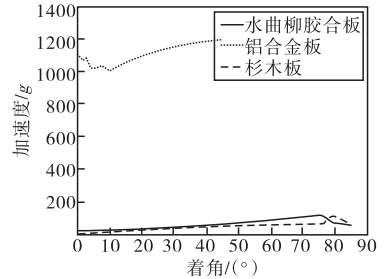


数如图 5 所示。

弹丸碰击铝合金板时着角变化对最大前冲过载系数的影响较小,最大前冲过载系数值变化范围在 250 内。碰击水曲柳胶合板和杉木板时弹丸最大前冲过载系数随着角的增大而先增大到最大值后逐渐减小,在着角 75° 左右时均出现峰值。

2.4 圆锥形头部弹丸

对圆锥形头部弹丸以不同着角碰击三种薄目标进行仿真。以不同着角碰击铝合金板、水曲柳胶合板和杉木板的最大前冲过载系



数如图 6 所示。

头部为圆锥形的弹丸以 0° ~ 10° 着角碰击水曲柳胶合板和杉木板时最大前冲过载系数值变化较小,此范围内着角变化对最大前冲过载系数影响不大;以大于 10° 着角碰击时弹丸最大前冲过载系数随着角的增大而增大,到峰值后逐渐变小,未呈现线性变化。弹丸碰击铝合金板时着角变化对最大前冲过载系数影响较小,最大前冲过载的变化范围在 200 之内,并且着角与弹丸最大前冲过载系数未呈现明显规律,着角小于 10° 时最大前冲过载系数未呈线性变化,在某一特定角度处达到最大值。

2.5 最大前冲过载系数仿真结果汇总

圆柱形、截锥形、半球形和圆锥形四种不同弹头几何形状的弹丸以三种着速和 0° ~ 85° 着角碰击不同材质薄目标的最大前冲过载系数如表 3 所列,表中数值单位为 g。由表 3 可看出,四种头部形状的弹丸以大于 75° 着角碰击铝合金板时均出现跳弹现象。圆柱形头部弹丸以 0°、1°、2° 和 3° 着角碰击水曲柳胶合板时的最大前冲系数值为 2190、1784、883 和 738;截锥形头部弹丸以 0°、1°、2° 和 3° 着角碰击水曲柳胶合板时的最大前冲系数值为 357、408、352 和 226,以上两种情况均是着角对最大前冲过载系数影响大的例证。由圆柱形头部弹丸碰击铝合金板可知,弹丸着角变化对最大前冲过载系数的影响很大,因此布靶引起的着角误差对弹丸前冲过载系数影响很大,且无规律。

四种不同头部形状的弹丸以 10° 着角碰击铝合金板的前冲过载系数在初始阶段有较大的波动,曲线呈现多个峰值,不像碰击水曲柳胶合板和杉木板一样过载系数曲线呈线性,四种不同头部形状弹丸之间的前

冲过载系数峰值相差较大。

此外,按文献[12]提供的弹丸穿透胶合板时的作用力公式计算截锥形弹丸以 0°着角碰击水曲柳胶合

板的理论前冲过载系数为 349.3,仿真结果为 356.9,仿真结果与理论估算值相差不到 3%,仿真结果与理论估算结果相符合,说明仿真结果是较为可信的。

表 3 最大前冲过载系数

靶板 着角/ (°)	铝合金板				水曲柳胶合板				杉木板			
	圆	截	半	圆	圆	截	半	圆	圆	截	半	圆
	柱	锥	球	锥	柱	锥	球	锥	柱	锥	球	锥
	形	形	形	形	形	形	形	形	形	形	形	形
0	6810	1886	2719	1112	2190	357	218	20	1407	249	113	11
1	6668	1891	2808	1101	1784	408	222	15	1163	267	118	10
2	6148	1913	2818	1074	883	352	224	13	1101	253	117	10
3	5416	1878	2791	1083	738	226	229	15	719	231	118	11
4	4983	1870	2791	1027	677	204	222	11	508	183	119	12
6	4302	1854	2765	1026	436	169	220	17	362	147	115	13
8	3928	1887	2748	1035	345	111	218	19	305	108	125	14
10	3917	1886	2707	1011	283	103	210	22	246	99	122	13
20	3540	1784	2537	1099	237	100	194	19	164	69	114	19
30	3095	1708	2531	1155	173	88	153	18	122	61	99	17
45	2708	1635	2231	1201	162	79	132	18	109	50	73	16
60	2530	跳弹	1625	跳弹	156	100	87	20	82	65	56	15
75	跳弹	跳弹	跳弹	跳弹	141	130	85	16	89	78	53	13
80	跳弹	跳弹	跳弹	跳弹	153	110	82	15	110	72	51	11
85	跳弹	跳弹	跳弹	跳弹	170	94	73	15	124	64	48	11

3 结论

圆柱形、截锥形、半球形和圆锥形头部形状弹丸小着角(小于 10°)碰击 3 mm 厚水曲柳胶合板的前冲过载系数依次分别为 283 ~ 2190、103 ~ 408、210 ~ 229、11 ~ 24;碰击 3 mm 厚杉木板的前冲过载系数依次分别为 246 ~ 1407、99 ~ 249、113 ~ 125、10 ~ 14;碰击 3 mm 厚铝板的前冲过载系数依次分别为 3917 ~ 6810、1854 ~ 1913、2707 ~ 2818、1011 ~ 1112。圆柱形头部和截锥形头部弹丸的前冲过载系数受着角变化影响较大,因此圆柱形和截锥形头部弹丸应考虑射击试验时布靶误差导致的着角变化以及弹丸攻角变化对引信灵敏度和钝感度试验结论的影响。

四种头部不同形状的弹丸大攻角碰靶时前冲过载系数曲线均呈现较大的抖动,出现多次峰值,故有必要关注这种过载抖动对引信动态特性的影响。

截锥形头部弹丸以不同着角碰击木质靶板时最大前冲过载曲线出现二次峰值,着角和最大前冲过载系数不呈线性关系。广泛应用的截锥形头部弹射击试验时应考虑其前冲过载值不是在正碰时最大,应关注小着角的微小变化对引信钝感和触发灵敏度试验结果的影响。

半球形头部弹丸以小着角(小于 10°)碰击铝合金板的最大前冲过载系数比碰击同厚度水曲柳胶合板大 10 倍左右,比碰击杉木板大 20 倍左右。半球形头部弹丸进行射击试验时,选用铝合金靶板相比木质靶板更能有效提高引信触发灵敏度。

圆锥形头部弹的最大前冲过载值比其它三种头部弹丸小很多,说明圆锥形头部弹相比其它三种头部弹丸碰击靶板时所受到的阻力较小。在强度条件得到满足的情况下,设计钝感度要求较高的引信时弹头或弹头引信形状选为圆锥形,可有效提高引信钝感度。

参考文献:

[1] Jan Arild Teland Henrik Sjøfl. Penetration into concrete by truncated projectiles [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(3): 447-464.

[2] 聂明飞, 李玉龙. 卵形头部弹侵彻单多层混凝土靶板有限元仿真[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(4): 78-82.

[3] 徐文崢, 杨榕. 弹药几何因素对过载特性影响的数值分析[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(2): 97-100.

[4] 孙炜海, 文鹤鸣. 锥头弹丸低速撞击下薄金属靶板的穿透[J]. 固体力学学报, 2009, 30(4): 361-366.

由上式可知, ϕ 由第一靶的高度和其与爆炸点距离的比值决定, 只要将第一靶高度设置为尽量小, 第一靶距离破片初始飞行点尽量远就能得到较小的 ϕ 值。本实验将第一靶高度设置为 0.3m, 弹丸爆炸点距离第一靶的距离设置为 3m, 根据式(2) 可以计算出 $\phi = 1.00499$, 在此设置的情况下, 直接用两靶间的距离代替破片的实际飞行距离最大误差不超过 0.005, 完全可以忽略不计, 因此, 本实验直接用两靶间的距离除以测时仪测得的时间获得破片的飞行速度, 两靶间的距离设置为 0.2m(见图 9)。

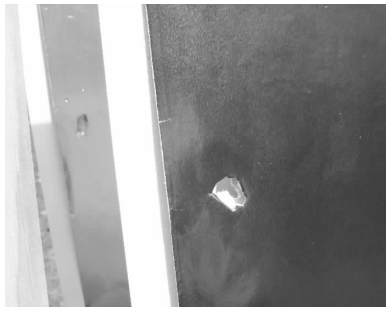


图 9 破片对靶板作用效果

经试验和计算得到单发弹丸爆炸和三发弹丸同时集中爆炸时破片的飞行速度, 结果见表 1。

表 1 速度测试结果

序号	单发速度/(m/s)	三发速度/(m/s)
1	386.414	564.103
2	657.004	360.738
3	432.851	478.261
4	523.921	537.897
5	398.034	482.835
平均值	479.6448	484.7668

在工程应用中, 常采用格尼公式对破片初速进行估算, 格尼公式为^[2]:

$$V = \sqrt{2E} \sqrt{\frac{m_w}{m_s + 0.5m_w}} \quad (\text{m/s}) \quad (3)$$

式中: m_s 、 m_w 分别为弹丸壳体和炸药的质量, $\sqrt{2E}$ 为取决于炸药性能的常数, 对于 TNT 常取 $\sqrt{2E} = 2316\text{m/s}$ 。利用式(3) 计算出本实验用弹的初速为 652.128m/s。

由表 1 测试结果可知, 单发弹丸爆炸后破片的飞行速度虽然比三发弹丸爆炸后破片的速度低, 但两者相差不大, 并且实测速度都小于由格尼公式计算的速度, 这是由于格尼公式在计算的过程中尽可能多的使炸药的爆炸能量作用在弹丸壳体上, 导致所计算出的破片速度高于实际的速度, 因此, 在对弹药爆炸防护安全方面进行研究时, 直接用格尼公式对弹丸破片进行估算, 进而研究对弹药爆炸破片杀伤的防护时是能够确保安全的。

3 结论

文中利用自行设计的模拟弹丸, 利用通靶与多路测时仪相结合的方式, 分别对单发弹丸引爆和三发弹丸同时引爆下的弹丸破片飞行速度进行了试验测试, 对实验结果进行了总结分析, 并与格尼公式的计算结果进行了对比。本实验的研究为进一步研究多发弹丸爆炸时的破片飞行速度规律奠定了基础, 为研究多发弹丸爆炸时对破片杀伤的防护措施和设防安全距离具有重要意义。

参考文献:

[1] 北京工业学院八系. 爆炸及其作用(下册)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
 [2] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
 [3] GJB2425-1995 常规兵器战斗部威力试验方法[S]. 1995.

(上接第 97 页)

[5] 曹苏雅拉图, 王雨时, 王强, 等. 某尾翼火箭弹碰撞击薄弱目标前冲过载系数仿真研究[J]. 探测与控制学报, 2012(2).
 [6] LSTC, LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL(VOLUME I)[M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
 [7] 陈春昆, 李伯龙, 聂作仁. 穿甲弹侵彻铝合金靶板数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2010(14): 3442-3445.
 [8] 尚晓江, 苏建宇, 王化锋. ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版

社, 2008
 [9] 王雨时, 张德智, 曹纯柱. 触发引信防雨试验的等效靶板模拟[J]. 沈阳工业学院学报, 1994(3): 27-37.
 [10] 机械工程手册、电机工程手册编辑委员会. 机械工程手册(工程材料卷)[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1996.
 [11] 楼剑锋, 王政, 洪滔, 等. 钨合金杆侵彻半无限厚铝合金靶的数值研究[J]. 高压物理学报, 2009, 23(1): 65-70.
 [12] 高世桥, 王宝兴. 截锥形弹低中速贯穿薄靶板时的动力分析与计算[J]. 应用数学和力学, 1986, 7(11): 1033-1038.