

文章编号: 1674-8085(2015)04-0064-06

反步兵地雷预制破片材料对破片初速及飞散的影响

*王季鹏, 袁志华, 王广程, 孙运阳

(沈阳理工大学装备工程分院, 辽宁, 沈阳 110159)

摘要: 利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对钨球、钢球两种预制破片材料的速度及飞散情况进行数值模拟, 分析研究了钨球、钢球预制破片的速度、加速度和位移的数值模拟差异。结果表明采用钨球作为破片材料更合理。

关键词: 反步兵地雷; 预制破片; 破片材料; 破片速度

中图分类号: TJ761

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2015.04.012

BASED ON ANTI-INFANTRY MINES THE INFLUENCE FACTORS OF PREFORMED FRAGMENT VELOCITY

*WANG Ji-peng, YUAN Zhi-hua, WANG Guang-cheng, SUN Yun-yang

(Shenyang Ligong University, Equipment engineering branch, Shenyang, Liaoning province Hunnan district nanping middle road no. 6, 110159)

Abstract: Using ANSYS/ls-dyna software of tungsten ball, steel ball two kinds of preformed fragment velocity and distributing materials are numerically simulated and analyzed based on the tungsten ball, steel ball preformed fragment velocity, acceleration and displacement of the numerical simulation. Simulation results are as follows, in determining the warhead charge mass and charge size cases, such as the shape, for the same shape, material for tungsten and steel preformed fragment, the starting time of the displacement of the two phase after the explosion is not much difference, tungsten ball velocity and acceleration are smaller than steel ball, but the duration of the tungsten ball acceleration is longer than steel, tungsten ball kinetic energy is also larger than the steel ball. The results show that the tungsten ball as a broken piece of material is more reasonable.

Key words: anti-infantry mines; prefabricated fragment; fragment materials; fragment velocity

0 引言

在科学技术飞速发展的今天, 现代武器也在发生着翻天覆地的变化。由常规武器发展到核武器, 在众多武器演变的今天, 地雷也在发生巨大的变化。

地雷通常是设置于地面, 是一种受到目标作用且在满足其动作条件下就会自行发火、阻挡和毁伤人员或装甲目标的爆炸武器。根据地雷毁伤目标的不同,

分为反步兵地雷、反坦克地雷和反直升机地雷。

反步兵地雷又称防步兵地雷或杀伤人员地雷, 是设计成在人员出现、接近或接触时爆炸而使一名及一名以上人员丧失战斗能力、受伤或死亡的地雷。在车辆而非人员出现、接近或接触时引爆, 并且装有防排除装置的地雷。该种地雷主要是为了造成人员伤亡; 阻止敌方士兵排除我方反坦克地雷; 拒绝访问我方领地和提供部队防线周边安全^[1]。反步兵地雷主要是由抛射筒、雷体和引信组成。其雷

收稿日期: 2015-03-06; 修改日期: 2015-04-16

作者简介: *王季鹏(1989-), 男, 黑龙江绥化人, 硕士生, 主要从事终点弹道与毁伤理论研究(E-mail:bigbird123456789@163.com);

袁志华(1963-), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事火炮、自动武器与弹药工程研究(E-mail:yuanzhizhua2003@yeah.net);

王广程(1989-), 男, 河南周口人, 硕士生, 主要从事新概念和新原理研究(E-mail:1061026695@qq.com);

孙运阳(1989-), 男, 江苏连云港人, 硕士生, 主要从事新概念和新原理研究(E-mail:koreyoshies@qq.com).

体是完成弹药毁伤目标或完成既定战斗任务的核心部分。有很多因素影响其对于目标的毁伤,如雷体装药质量、爆炸点距目标距离、爆炸高度、爆炸高度的环境压力、预制破片的材料及形状、目标几何尺寸以及目标抗冲击载荷能力等各种随机因素。其中反步兵地雷材料已被各国研究多年,相应的研究与应用势必是未来继续研究的趋势^[2]。本文主要针对两种不同材料的预制破片的速度及飞散情况,运用 ANSYS/LS-DYNA 软件,对破片速度、加速度、位移方面进行模拟与数值分析。

1 破片相关理论

1.1 预制破片

预制破片是通过炸药爆炸使壳体破碎产生具有一定杀伤破坏作用的破片,分为自然破片、半预制破片和预制破片等。

破片可以制造成球体、立方体、圆柱体和扇形体等。不同形状的破片具有各自的优缺点。对于球体破片,其速度衰减性能较好。而立方体破片,其不仅速度衰减性能较好、排列紧密,而且能较好地利用战斗部的空间。圆柱体破片,其最大特点就是排列紧密,相比其他破片扇形体破片排列最为紧密,因此需要较少的粘结剂。炸药爆炸后,爆炸产物较早地逸出,爆炸力抛出预制破片前,预制破片几乎不存在膨胀过程。其与刻槽式相比,破片速度要降低大约 10%~15%,但炸药爆炸后预制破片的质量损失较小,而经过调质的球形破片几乎没有什么质量损失,这在很大程度上弥补了预制结构附加质量较大的固有缺陷^[3]。

1.2 破片初速

破片初速是指在炸药爆炸作用下,战斗部的壳体获得一定的能量后所达到的最大的飞行速度。

破片初速的公式如下:

$$v_0 = 1.236 \sqrt{\frac{Q_e}{\frac{1}{\beta} + \frac{1}{2}}} \quad (1)$$

上式中, v_0 为破片初速; Q_e 为炸药爆热; β 为装药质量与形成破片壳体质量的质量比,即

$$\beta = \frac{M_e}{M_f}; M_e \text{ 为装药质量, } M_f \text{ 为形成破片的壳体}$$

质量。该公式是在假设壳体为相等壁厚并且忽略不计壳体的破裂阻抗以及爆轰产物沿装药轴向的飞散;认为壳体形成的破片具有相同的初速的条件下由质量守恒定律推导得出的^[4]。该公式并不是完全适用于预制破片式战斗部,因而从上述公式推导得出了用单位质量装药的能量 E 表示破片初速的公式,即格尼公式,格尼公式的应用条件是炸药爆炸时炸药释放的能量转变为壳体和爆轰产物的动能,爆轰产物的速度沿径向线形分布,爆轰产物的密度均匀分布,它的应用较为广泛。对于圆柱形壳体,破片的平均速度可根据格尼公式进行计算,这是一种相对简单的计算方法^[5],公式如下:

$$v_0 = \sqrt{2E} \sqrt{\frac{\beta}{1 + \frac{\beta}{2}}} \quad (2)$$

上式中, v_0 为破片初速; $\sqrt{2E}$ 为格尼常数; β 为装药质量与形成破片的壳体质量的质量比,即 $\beta = \frac{M_e}{M_f}$; M_e 为装药质量, M_f 为形成破片的壳体质量。

1.3 影响破片初速的因素

反步兵地雷雷体战斗部破片的初速受到很多因素的影响,炸药性能、装药长径比、装药与壳体的质量比、起爆方式、破片周向排列数量、壳体材料、间隙填充物等因素都会对破片的初速有影响。

(1) 炸药性能

破片在炸药爆炸后获得一定的速度。在炸药和壳体的质量比相同的情况下,破片初速随着炸药威力性能的提高而增大。从破片初速公式可知,破片初速与炸药的格尼常数成正比。但在具体实际操作中,炸药性能的差别并不是很大。因此在提高破片的初速上可以不用优先考虑提高炸药的性能^[6]。

(2) 装药长径比

装药的长径比对预制破片初速的影响,主要体现在端部效应上,对于不同的长径比,端部效应将会导致炸药能量损失程度的不同。在战斗部总质量和炸药与壳体的质量比不变的情况下,破片初速随着长径比的增大而增高。

(3) 起爆方式

采用不同起爆方式对破片的初速影响很大,轴

向中心单点起爆后,破片初速离起爆点的轴向距离越大,速度越低。两端面中心点起爆后,由于爆轰波的相互碰撞作用,在壳体壁面作用不等的超压,从而使整体平均速度小于中心单点起爆后产生的破片速度。轴线起爆后,爆轰波以轴线为轴,整体向外同步移动并同时到达壳体壁面,从而产生速度几乎一致的破片。破片整体平均速度大于其他的起爆方式产生的破片初速^[3]。

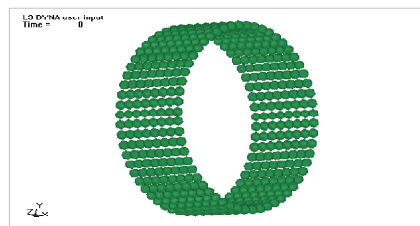
(4) 壳体材料

壳体在爆轰产物作用下的膨胀程度主要取决于壳体材料的性能,塑性材料壳体膨胀破裂时具有较高的初速且相对半径较大。因此,反步兵地雷应当采用塑性材料的钢来制造壳体。

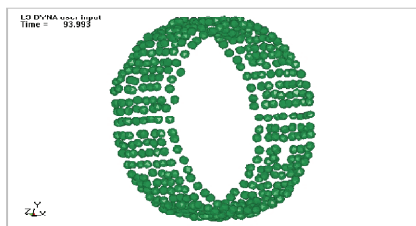
2 不同材料预制破片速度的数值模拟与分析

在分析影响预制破片速度的因素时数值模拟具有较高的有效性与可操作性,其边界条件与初始条件都是可以控制的,并且可以连续动态地、重复地显示所需模拟爆炸的整个变化过程,便于对实验结果进行深入地了解和他分析,对科学研究具有重要作用及意义。通过该方法可以较准确地模拟预制破片式战斗部的爆炸飞散过程、破片的空间位置以及速度、加速度的分布。除此之外,数值模拟的计算结果还对预制破片的参数优化具有重要的参考价值及意义。下面对两种不同材料的预制破片初速进行数值模拟与分析。

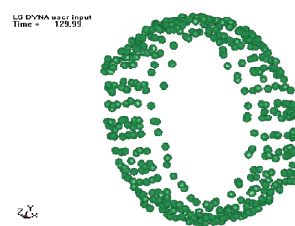
本文采用的地雷雷体模型主要是中国 72 式反步兵地雷,该种地雷雷体是由炸药 TNT、内衬、预制破片 and 外壳四部分组成。雷体近似看作是圆柱形,TNT 高度是 32 mm,底面半径是 33.5 mm,内衬选用厚度为 1.5 mm 的硬铝。



0 μ s



90 μ s



130 μ s

图 2 钨球预制破片爆炸时的破片飞散分布

Fig.2 Tungsten ball of preformed fragment exploded fragment velocity distribution

对两种不同材料的球体预制破片的数值仿真,球形预制破片的半径均是 2 mm,在战斗部中采用 8×56 的排列方式,在球形预制破片战斗部中共有 448 块球形预制破片。

在对地雷的雷体仿真模型进行建立之后,就要对两种不同材料的球形预制破片速度的数值进行模拟^[8]。

数值模拟采用的是 ANSYS/LS-DYNA 软件进行,结合不同材料预制破片的飞散速度,加速度及位移等特点进行相关内容的论述。数值计算模型用到的是 ANSYS/LS-DYNA 软件中的有限元分析模型。ANSYS/LS-DYNA 是当前使用最广泛,功能最强大的有限元软件。该软件是集结构、热、流体、电磁场、声场和耦合场分析于一体的,用来求解各种二维、三维非弹性结构的爆炸、高速碰撞等问题,同时还可以求解流体和流固藕合问题,是一款军用与民用相结合的大型通用非线性结构分析有限元应用程序。如图 1 所示为 ANSYS/LS-DYNA 操作界面。

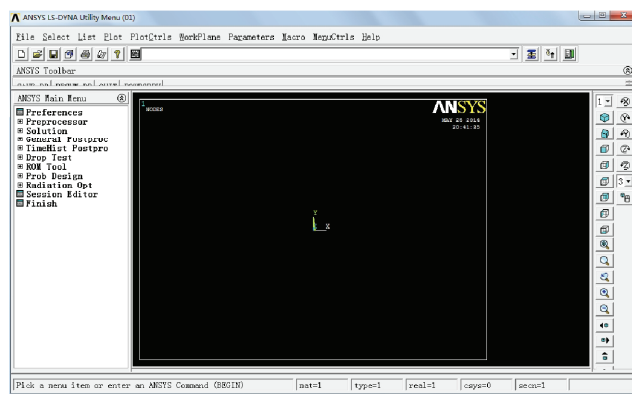


图 1 ANSYS/LS-DYNA 操作界面

Fig.1 ANSYS/ls-dyna interface

2.1 方案一

针对钨球预制破片的破片速度进行数值模拟,炸药在爆炸过程中,钨球体预制破片爆炸所形成的破片飞散状况如图 2 所示。

由图 2 所示的破片飞散状况可以看出, 钨球预制破片飞散过程中, 由于破片间的空隙较大, 破片的膨胀效果并不是十分的明显, 除少量破片外, 其余破片加速效果较为一致, 飞散情况均匀。

如图 3 所示, 选取所有预制破片, 绘制出整体速度随时间变化的曲线。

由图 3 可看出钨球预制破片在爆炸后 75 μs 时, 速度基本稳定下来, 选取的这些破片稳定后的最高速度为 625 m/s, 最低速度为 590 m/s, 通过对所有破片的速度进行分析, 可知中心起爆时预制破片的平均速度为 607.5 m/s。

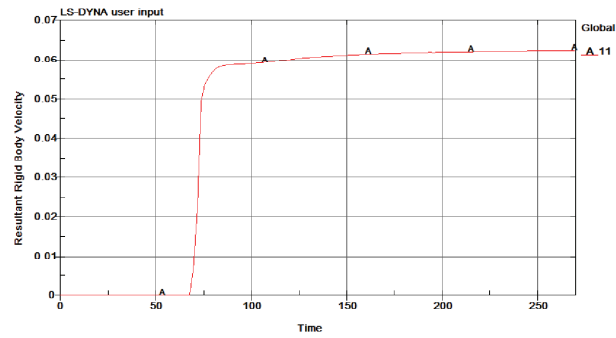


图 3 起爆后钨球预制破片的速度—时间曲线
Fig.3 After the initiation of tungsten ball speed of preformed fragment - time curve

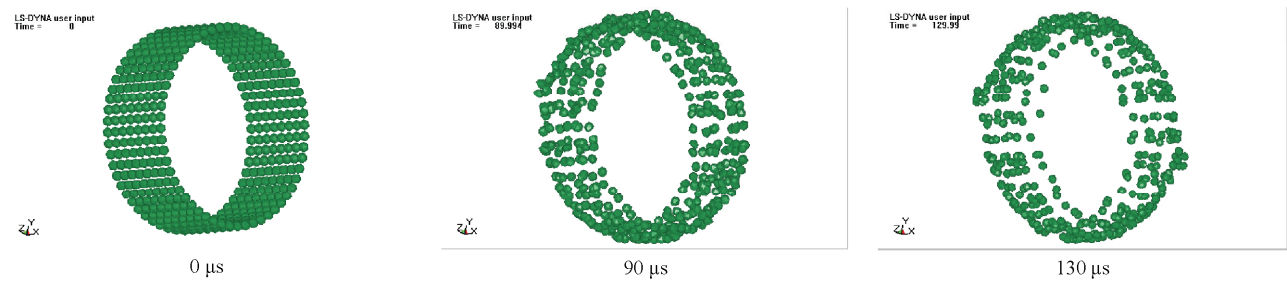


图 4 钢球预制破片爆炸时的破片飞散分布
Fig.4 Ball of preformed fragment exploded fragment velocity distribution

2.2 方案二

针对钢球体预制破片的破片速度进行数值模拟, 炸药在爆炸过程中, 钢球预制破片爆炸所形成的破片飞散状况如图 4 所示。

由图 4 所示的破片飞散情况可以看出, 钢球预制破片飞散过程情况与钨球预制破片飞散过程情况大致相同。

如图 5 所示, 选取所有预制破片, 绘制出整体速度随时间变化的曲线。

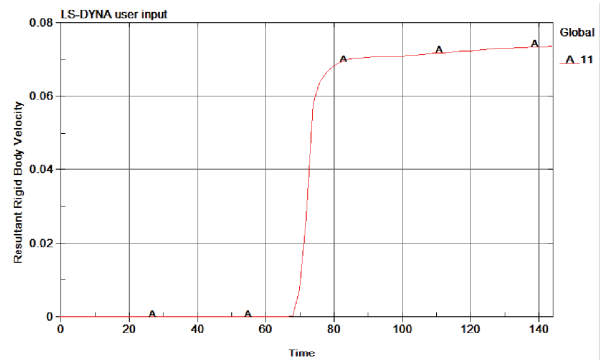


图 5 起爆后钢球预制破片的速度—时间曲线
Fig.5 Ball after initiation of preformed fragment velocity - time curve

由图 5 可看出钢球预制破片在爆炸后 75 μs 时, 速度基本稳定下来, 选取的这些破片稳定后的最高速度为 750 m/s, 最低速度为 700 m/s。通过对所有破片的速度进行分析, 可知中心起爆时预制破片的平均速度为 725 m/s。

将算出的 β 数据以及炸药爆速 $D_e = 7840 \text{ m/s}$ 分别代入公式(2), 可得出两种不同材料破片速度的理论计算值, 其与数值模拟结果的对比如表 1 所示。

表 1 破片速度理论值与模拟值的比较

Table 1 Fragment velocity theoretical value was compared with the simulation values

方案编号	理论值 (m/s)	模拟值 (m/s)	误差%
方案一	664	607.5	9.3
方案二	789	725	8.8

由于格尼公式是在诸如炸药爆炸后, 爆炸气体产物将均匀膨胀且密度处处相等一些假设条件下推导出来的, 并未考虑弹体材料。但在具体实际操作中, 炸药反应区附近的气体密度明显很高; 炸药的化学能不仅转化为动能, 而且还将要转化成热能、光能等; 预制破片初速还会受弹体材料的影响,

所以破片的理论计算值与数值模拟值之间必然存在一定的差异^[3]。

3 预制破片仿真结果的对比分析

根据对两种不同材料的预制破片进行仿真模拟,得出其在其他条件不变的情况下,预制破片材料的不同将会导致预制破片速度的不同。

根据仿真得出的图象可以知道,两种不同材料的预制破片都是在爆炸后 $75\ \mu\text{s}$ 左右时速度趋于稳定。炸药爆炸的加速过程结束之后,钨球预制破片中,除个别破片外其余破片的速度都可以稳定在 $607.5\ \text{m/s}$ 左右,钢球预制破片的速度可以稳定在 $725\ \text{m/s}$ 左右,两种材料的预制破片速度情况对比见表 2。

表 2 不同材料预制破片的速度对比

Table 2 Different materials of preformed fragment velocity contrast

破片材料	最大速度 (m/s)	最小速度 (m/s)	速度差异 (m/s)	平均速度 (m/s)
钨球	625	590	35	607.5
钢球	750	700	50	725

除了上面的速度对比之外,再对两种材料预制破片的位移和加速度进行对比,如图 6 和图 7 所示。

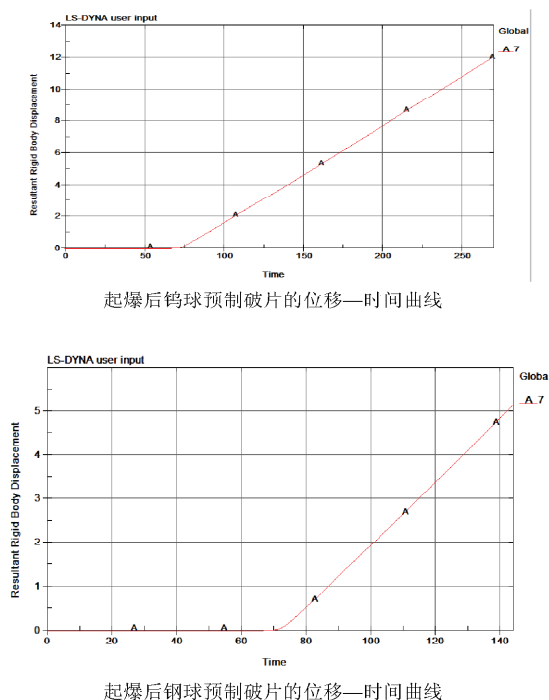


图 6 起爆时不同材料预制破片位移—时间曲线对比

Fig.6 Different materials when initiating preformed fragment displacement - time curve contrast

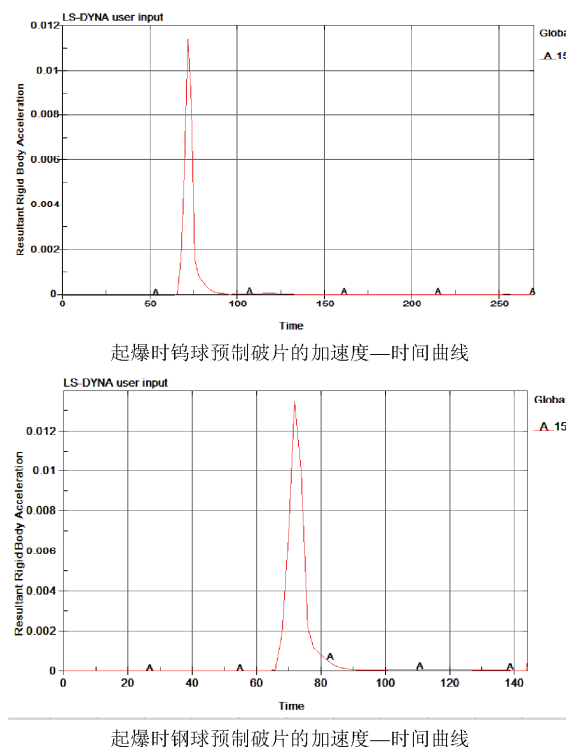


图 7 起爆时不同材料预制破片的加速度—时间曲线对比

Fig.7 When initiating acceleration - time curve of different material preformed fragment

由图 6 可看出钨球预制破片在 $75\ \mu\text{s}$ 左右时,产生位移,开始运动,而钢球预制破片在 $70\ \mu\text{s}$ 左右时,产生位移,开始运动。两者开始运动的时间相差不多,基本相同。

由图 7 可看出钨球预制破片在 $75\ \mu\text{s}$ 左右时,产生加速度,速度开始改变,到 $100\ \mu\text{s}$ 左右时加速度变为零,速度趋于稳定。而钢球预制破片在 $70\ \mu\text{s}$ 左右时,产生加速度,速度开始改变,到 $90\ \mu\text{s}$ 左右时加速度变为零,速度趋于稳定。并且钢球的加速度大于钨球的加速度,但钢球的加速度持续时间比钨球的持续时间短。

综上可知,在确定战斗部装药量质量以及装药尺寸等情况下,对于形状相同、材料不同的预制破片,钨球预制破片式战斗部可容纳的破片总质量最大,而钢球预制破片式战斗部可容纳的破片总质量稍小,钨球速度比钢球速度略小,钨球加速度也小于钢球,但钨球加速度比钢球持续的时间长。二者开始位移的时间相差不多。虽然钨球的速度没有钢球的速度大,但钨球的动能较钢球的大。

4 不同材料球形预制破片对目标的

毁伤概率分析

炸药爆炸后, 预制破片在空气中飞散的过程中, 将受到空气阻力的影响。空气阻力使预制破片的速度下降。但因为反步兵地雷距离毁伤目标距离较近, 作用时间很短, 就近似认为速度没有损失。反步兵地雷的杀伤概率可以根据 1956 年艾伦和佩斯拉扎提出的一个考虑士兵的战斗任务和从受伤到丧失战斗力所需时间的关系式来衡量, 关系式如下:

$$P_{hk} = 1 - e^{-a(91.36mV_0^\beta - b)^n} \quad (3)$$

该式中, P_{hk} 是表示破片的某一随机命中使执行给定战术任务的士兵丧失战斗力的条件概率; m 为破片质量(g); V_0 为着速 (m/s); a 、 b 、 n 和 β 是根据不同战术情况和从受伤到丧失战斗力的时间而由试验得到的常数, 其中 $\beta=3/2$ 与实验吻合较好^[9]。

对于钨球体预制破片, 相关参数为 $m=0.60\text{g}$ 、 $V_0=625\text{m/s}$ 、 $a=0.46134 \times 10^{-3}$ 、 $b=15000$ 、 $n=0.48535$ 。根据上述公式及综合以上数据得出 $P_{hk}=0.293$ 。

对于钢球体预制破片, 相关参数为 $m=0.26\text{g}$ 、 $V_0=750\text{m/s}$ 、 $a=0.46134 \times 10^{-3}$ 、 $b=15000$ 、 $n=0.48535$ 。根据上述公式及综合以上数据得出 $P_{hk}=0.230$ 。

杀伤概率的最为常见的表达式为

$$P(x, y) = 1 - e^{-N(x, y)} \quad (4)$$

上式中, $N(x, y)$ 为杀伤破片数的期望值, 可表示为

$$N(x, y) = \rho_f A(x, y) \quad (5)$$

上式中, $A(x, y)$ 为 (x, y) 处目标相对于爆炸点 $(0, 0, H)$ 的暴露面积, ρ_f 为目标区杀伤破片的密度。该公式计算工作量很大, 需要通过计算机的运算来完成, 因此选用简化的公式计算杀伤概率, 简化后的形式为:

$$P_k^{(1)} = \int_0^r P(r) f(r) dr \quad (6)$$

式中, $P(r)$ 是炸点函数为已知时战斗部的条件杀伤概率, $f(r)$ 是制导系统无系统偏差时炸点坐标分布概率密度。

当 $0 \leq r \leq R_e$ 时, $P(r) = 1$

当 $r > R_e$ 时, $P(r) = 0$

其中, R_e 为战斗部杀伤作用半径。 $f(r)$ 可由正态分布表示, 即

$$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

式中, σ 为炸点散布标准偏差。代入 (6) 式可得

$$P_k^{(1)} = \int_0^r \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} dr = 1 - e^{-\frac{R^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

由此式就可以得到战斗部杀伤目标的概率和作用半径之间的关系。

经过计算, 钨球预制破片的杀伤概率比钢球预制破片的杀伤概率大。应选用钨作为预制破片材料较好。

5 结论

本文主要利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对钨球、钢球两种预制破片材料的速度及飞散情况进行数值模拟, 分析研究了钨球、钢球预制破片的速度、加速度和位移的数值模拟差异。最终得出采用钨球作为反步兵地雷破片材料较为合理的结论。

参考文献:

- [1] 李钊. 21 世纪地雷战装备[J]. 中国工程科学, 2000, 2(12):1-8.
- [2] 何丕儒. 反步兵地雷的发展趋势[J]. 现代军事, 1999, 11:55-57.
- [3] 王瑶. 预制破片毁伤效能数值仿真研究[D]. 太原: 中北大学, 2012.
- [4] 魏惠之, 朱鹤松. 弹丸设计理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [5] Zulkoski T. Development of Optimum Theoretical Warhead Design Criteria[R]. NAVAL WEAPONS CENTER CHINA LAKE CA, 1976.
- [6] 张锡纯. 战斗部设计参考资料[D]. 北京: 北京航空学院, 1963.
- [7] 张会锁, 冯顺山, 刘国宾, 等. 起爆方式对内爆炸圆管战斗部破片初速的影响[J]. 2011, 31(5):93-95.
- [8] 邓凡平. ANSYS10.0 有限元分析自学手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [9] 隋树元, 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.