

文章编号:1006-9941(2022)01-0058-06

不同海拔高度下破片速度衰减模型的修正方法

李峰梅¹,熊国松¹,王保²,汪衡¹,李俊龙¹

(1. 重庆红宇精密工业集团有限公司, 重庆 402760; 2. 空装驻重庆地区军代表室, 重庆 402760)

摘要: 采用流体力学软件 FLUENT 研究了不同初始速度($\leq 2500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和海拔高度($\leq 20 \text{ km}$)下破片阻力系数,对不同海拔高度下破片速度衰减模型进行修正,并开展相应的低气压破片速度衰减特性试验,验证了修正模型的准确性。结果表明:初速 $700 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的球型破片和初速 $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的长方体破片使用修正后速度衰减模型计算结果与试验结果吻合度较高,误差均小于 5%,且修正后的速度衰减模型计算精度比修正前的模型提高了 10% 左右。该修正后的破片速度衰减模型可用于计算阻力系数随海拔高度变化对破片速度衰减系数的影响,提高破片速度的计算精度,从而进一步提升破片战斗部威力评估的准确性。

关键词: 破片;阻力系数;速度衰减;海拔高度;修正方法

中图分类号: TJ55O35; V216.5; TJ5

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2021150

1 引言

防空、面杀伤等类型战斗部一般采用破片战斗部,依靠破片毁伤目标^[1]。炸药爆炸产生爆轰波和大量高温、高压的爆轰气体,它们冲击金属壳体使之发生巨大变形,直至破裂,形成发散分布的破片^[2-3]。破片能否有效毁伤目标与破片打击目标时的速度密切相关^[4],破片速度是评价破片战斗部毁伤效能的重要指标之一^[5]。因此,建立破片速度衰减模型具有现实的工程意义^[6-7]。

岳通等^[8]基于 Matlab 对不同气象条件下的尾翼弹进行气动特性数值仿真,并进行了不同海拔高度处的外弹道计算;张玉令等^[9]利用理论分析和试验相结合的方法研究了破片阻力系数和飞行速度的关系,并设计了试验装置和基于虚拟仪器的破片飞行速度测试系统;林献武等^[10]基于气体分子动力学理论,计算和分析了不同高度下阻力系数的变化量及其对弹箭射程的影响。在传统破片速度衰减模型仿真计算中大多只考虑破片速度和空气密度

对破片衰减系数影响^[11],并未考虑海拔高度对破片速度衰减模型的影响,但在实际环境中,随着海拔高度的变化,空气密度和大气压力减小,破片阻力系数也会发生变化,破片速度衰减规律会产生改变。

本研究以长方体和球体破片为例,基于流体力学软件 FLUENT 研究不同海拔高度($\leq 20 \text{ km}$)和不同破片初始速度($\leq 2500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)下破片阻力系数变化规律,经过数据拟合得到不同海拔高度下破片阻力系数修正系数的表达式,获得不同海拔高度影响下破片速度衰减模型。

2 破片速度衰减模型

破片在爆轰波和爆轰产物的驱动下获得初速度,飞离爆轰产物的作用范围后,在空气中飞行时,受到两种力的共同作用:一是破片自身重力,二是空气阻力,破片自身重力会使其飞行弹道弯曲变形;空气阻力会造成破片速度不断减小。破片速度较大时,破片从形成到击中目标飞行时间短,故可忽略重力作用,即认为破片在空气中的运动主要受空气阻力影响,破片在空气中运动方程如式(1)所示^[5]:

$$M_e \frac{dv}{dt} = -\frac{\rho_a v^2}{2} C_D \bar{S} \quad (1)$$

收稿日期:2021-06-10;修回日期:2021-07-15

网络出版日期:2021-11-15

作者简介:李峰梅(1991-),女,工程师,主要从事火炸药相关研究。e-mail:15696152183@163.com

引用本文:李峰梅,熊国松,王保,等.不同海拔高度下破片速度衰减模型的修正方法[J].含能材料,2022,30(1):58-63.

LI Feng-mei, XIONG Guo-song, WANG Bao, et al. A Correction Method for the Velocity Attenuation Model of Fragments Based on Altitudes[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2022, 30(1):58-63.

对(1)式积分得到破片速度与距离的关系, 见式(2)^[5]:

$$v_R = v_0 e^{-\alpha R} \quad (2)$$

式中, v_R 为破片在飞行距离 R 处的速度, $m \cdot s^{-1}$; v_0 为破片初始速度, $m \cdot s^{-1}$; α 为破片速度衰减系数; C_D 为破片阻力系数; ρ_a 为当地空气密度, $kg \cdot m^{-3}$; \bar{S} 为破片迎风面积, m^2 ; M_e 为破片质量, kg 。

表 1 不同形状破片阻力系数经验公式^[5]

Table 1 Empirical formulas for the drag coefficient of fragments with different shapes

fragment shape	empirical formula	constant
sphere	$C_D(Ma) = 0.97$	0.97
cube or cylinder	$C_D(Ma) = 1.72 + \frac{0.3}{Ma^2}$ 或 $C_D(Ma) = 1.2852 + \frac{1.0536}{Ma} - \frac{0.9258}{Ma^2}$	1.17
cube or rhombus (prefabricated)	$C_D(Ma) = 0.8058 + \frac{1.3226}{Ma} - \frac{1.1202}{Ma^2}$	1.24
cube or rhombus (natural)	$C_D(Ma) = 1.45 - 0.0389Ma$	1.5

当地空气密度 ρ_a 是指破片所在飞行高度处的空气密度, 具体见式(4)~(5)^[12]:

$$\rho_a = \rho_0 H(y) \quad (4)$$

$$H(y) = \begin{cases} \left(1 - \frac{H}{44.308}\right)^{4.2558} & H \leq 11 \text{ km} \\ 0.297e^{-\frac{H-11}{6.318}} & H > 11 \text{ km} \end{cases} \quad (5)$$

式中, ρ_0 为地面空气密度, $kg \cdot m^{-3}$; $H(y)$ 为与海拔高度相关的空气密度修正系数。

在实际过程中, 当破片的飞行高度变化时, 其所处的环境参数如温度、密度等也会发生相应的变化, 这时破片所受的阻力系数也将随之改变, 最终影响破片速度衰减系数。

3 不同海拔高度下破片速度衰减模型修正

3.1 海拔高度与破片阻力系数关系

海拔高度是影响破片速度衰减系数的重要因素, 衰减系数 α 能直接反应破片在飞行过程中速度损失的程度, 影响衰减系数的因素有飞行破片的质量、破片阻力系数、当地空气密度和破片迎风面积等, 其关系可以用数学模型表示, 具体见式(6)^[13-15]:

$$\alpha = \frac{C_D \rho_a \bar{S}}{2m_f} \quad (6)$$

如公式(4)和(5)所示, 针对密度已考虑到海拔高度的影响, 但在实际计算当中发现海拔高度对破片阻力系数影响也不可忽略。

目前, 普遍认为破片的阻力系数与破片形状及飞行速度有关。如式(3)所示, 形状相同的破片, 其破片阻力系数是马赫数的函数^[7]:

$$C_D = C_D(Ma) \quad (3)$$

当马赫数为 3~5 时, 破片阻力系数的经验式计算公式见表 1。在工程设计中, 为处理问题方便, 常将破片阻力系数取为常数。

为进一步研究海拔高度对破片阻力系数影响规律, 以某项目为背景, 选取 5.3 mm×5.3 mm×6.1 mm 的长方体破片和 $\Phi 8$ mm 的球型破片为研究对象, 破片速度为 700~2500 $m \cdot s^{-1}$, 依次递增 300 $m \cdot s^{-1}$, 海拔高度为 0~20 km, 依次递增 4 km, 对不同初始速度和海拔高度下的破片阻力系数进行仿真计算。长方体破片实际飞行会存在翻转现象, 为便于计算, 迎风面积为表面积四分之一, 球形破片迎风面积为投影面积。表 2 为不同海拔高度下的大气参数。

表 2 不同海拔高度下的大气参数

Table 2 Atmospheric parameters at different altitudes

H/km	ρ/Pa	temperature / $^{\circ}C$	speed / $m \cdot s^{-1}$	vacuum distance /Pa
0	101325	288.15	340.29	0
4	61660	262.166	324.59	-39665
8	35651	236.215	308.11	-65674
12	19399	216.65	295.07	-81926
16	10352	216.65	295.07	-90973
20	5529	216.65	295.07	-95795

图 1 给出典型工况下破片空气域速度云图, 发现破片附近区域出现流体分离情况, 且随速度增大流场分离程度减弱, 即贴壁性增强。设海拔为 0 km 时阻力系数增量为 0, 如图 2 所示将不同初始速度和海拔高度下破片相对于地面阻力系数增量进行统计。

从图 2 可看出, 破片阻力系数随着破片初始速度和海拔高度增加均发生变化, 且长方体破片和球体破

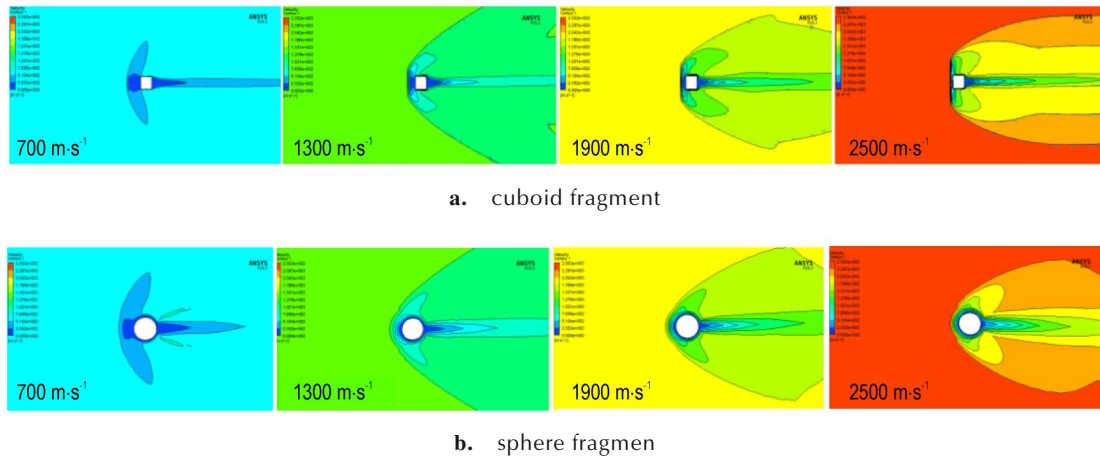


图1 典型工况下破片空气域速度云图

Fig.1 Velocity contour maps of fragments in air domain for typical working conditions

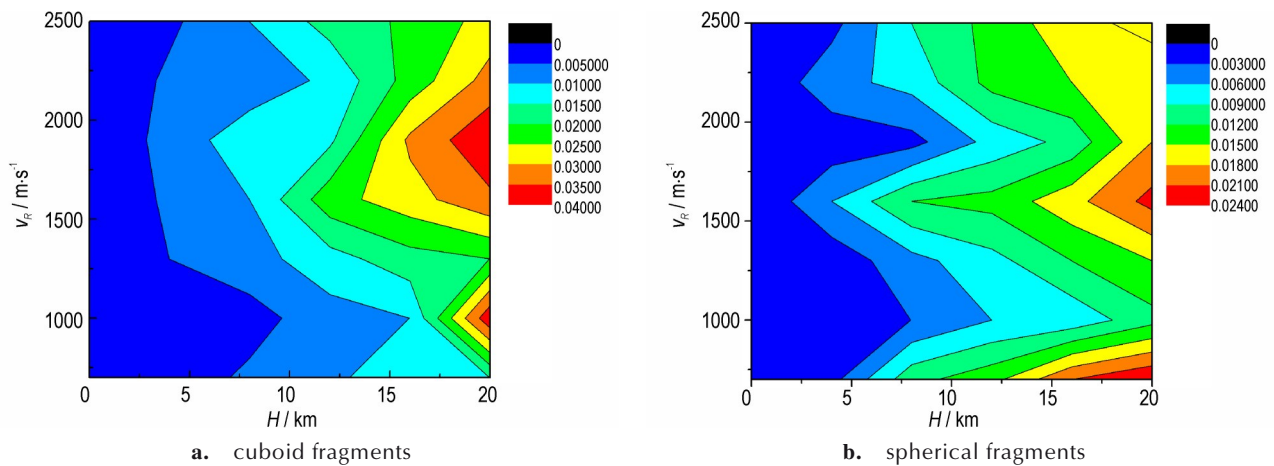


图2 不同初始速度和海拔高度下破片阻力系数增量等值线图

Fig.2 Contour map of the increment of drag coefficients of fragments with different initial velocities and altitudes

片阻力系数最大值均出现在海拔高度为20 km处。

综上,如式(7)所示,破片阻力系数(C_D)是关于速度和海拔高度的函数:

$$C_D = \phi(v, H) \quad (7)$$

鉴于海拔高度发生变化时,由于空气密度发生变化,音速也会随之改变,同一速度在不同海拔高度下马赫数会有所差别,因此,此处使用速度作为变量。

3.2 海拔高度与破片阻力系数关系

为进一步研究海拔高度与破片阻力系数关系,将破片阻力系数分为当地破片阻力系数和受海拔高度影响的破片阻力系数增量两部分组成,即不同速度和海拔高度下破片阻力系数计算(式(8)):

$$C_D(V, H) = C_{D0}(V) + \Delta C_D(V, H) \quad (8)$$

式中, C_{D0} 为地面破片阻力系数, ΔC_D 为与海拔高度和速度相关的破片阻力系数增量,具体表达见式(9):

$$\Delta C_D(V, H) = C_{D0} \left(1 + \frac{\Delta C_D}{C_{D0}}\right) \quad (9)$$

为了对不同海拔高度下破片阻力系数进行修正,引入修正系数 k ,具体见式(10)~(12):

$$k = \frac{\Delta C_D}{C_{D0}} \quad (10)$$

$$\Delta C_D(V, H) = C_{D0}(1 + k) \quad (11)$$

$$k = f(V, H) \quad (12)$$

将所有工况结果作为基本样本点,经过数据拟合,最终得到不同海拔下破片阻力系数修正系数 k 的公式。最终,基于海拔高度影响的破片速度衰减模型修正为公式(13):

$$\alpha = \frac{C_{D0}(1 + k)\rho_a \bar{S}}{2m_f} \quad (13)$$

其中,修正系数 k 的表达式见式(14):

$$k = \begin{cases} 0.016H + 0.004H^2 + 0.71 + \frac{57.787}{1.498 - \frac{V}{12.241}}, & \text{长方形破片} \\ 0.118H - 0.006H^2 - 0.043 - \frac{11.1302}{166.393 - \frac{V}{5.416}}, & \text{圆形破片} \end{cases} \quad (14)$$

4 低气压破片衰减特性试验

为了验证修正后的破片速度衰减模型,开展低气压破片衰减特性试验。该实验装置由密封板、低气压舱、真空设备、测试设备和破片回收装置等组成。具体试验方法是先将低气压试验装置抽真空,降到所需的气压来模拟不同海拔高度,保持气压稳定后,利用弹道炮发射不同形状、质量、材料、速度的破片,侵入准密封的低气压装置内部后依次穿过多个测速靶,测试破片到达不同靶网的时间,通过数据处理计算出不同气压环境下的破片速度衰减系数,但该试验也存在一定局限性,不同高度下温度不同,但鉴于温度不是影响破片速度衰减的主要参数,故本试验未考虑温度的影响,图3为试验装置及破片。

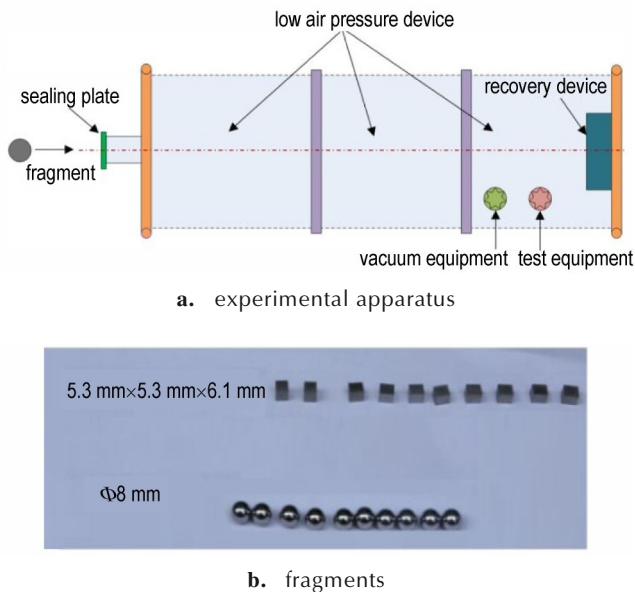
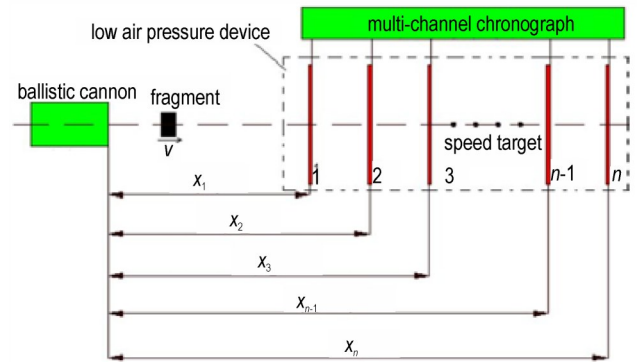


图3 试验装置及破片
Fig.3 Experimental apparatus and fragments

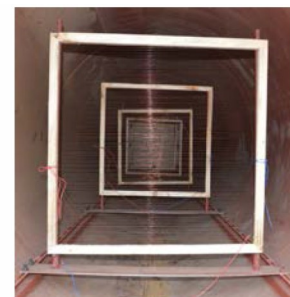
图4为测速靶安装图,破片的初速通过发射药量进行调整,破片到达不同靶网的时间通过多通道计时仪进行记录^[16-17],计算得到不同位置上的破片瞬时速度,再按式(15)的最小二乘法对破片各位置的瞬时速度进行线性回归^[18],拟合出破片的速度衰减系数。

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n \ln v_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i - n \sum_{i=1}^n (x_i \cdot \ln v_i)}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (15)$$

式中, v_i 为破片的瞬时速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; x_i 为破片的测试位置, m 。



a. speed measurement principle



b. measuring targets

图4 测速靶示意图
Fig.4 Sketch of velocity measuring targets

图5为采用修正后破片速度衰减模型计算的不同初始速度和海拔高度下破片速度衰减系数。

经过仿真发现球体破片初速 $700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和长方体破片 $1300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 两种工况下破片速度衰减系数随海拔高度变化最大,鉴于工况较多,本研究选取这两组工况开展试验验证,将试验得到的破片速度衰减系数与修正前、修正后模型得到结果进行对比,结果如图6和图7所示,同时将修正后误差提高值标于图中相应位置。

由图6和图7明显看出,利用修正后的破片速度衰减模型计算出的结果与试验数据吻合度较好,误差均小于5%;图6中修正后的球体破片速度衰减系数与修正前相比,计算精度最大提高10%,最小提高5.6%;图7中修正后的长方体破片速度衰减系数与修正前相比,计算精度最大提高9.3%,最小提高4.9%,故修正后的速度衰减模型计算精度与修正前的模型相比最大提高了10%左右。

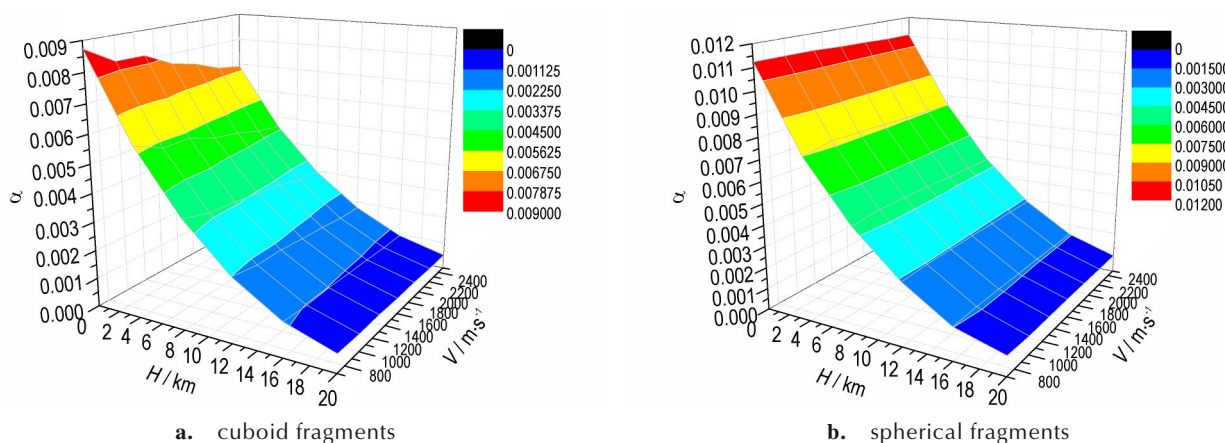


图5 不同初始速度和海拔高度下破片速度衰减系数

Fig.5 Velocity attenuation coefficients of fragments with different initial velocities and altitudes

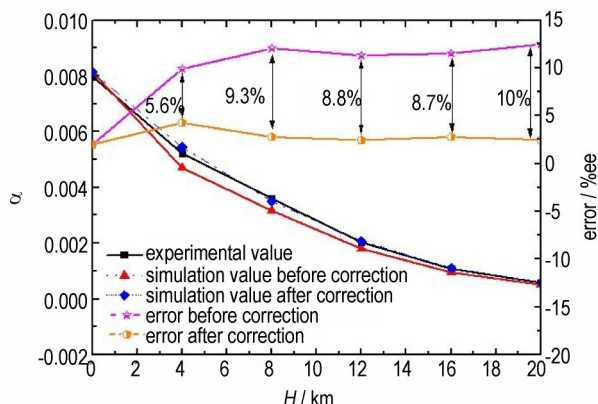


图6 球体破片速度衰减系数与误差曲线(700 m·s⁻¹)

Fig.6 Velocity attenuation coefficient and error curves of spherical fragments(700 m·s⁻¹)

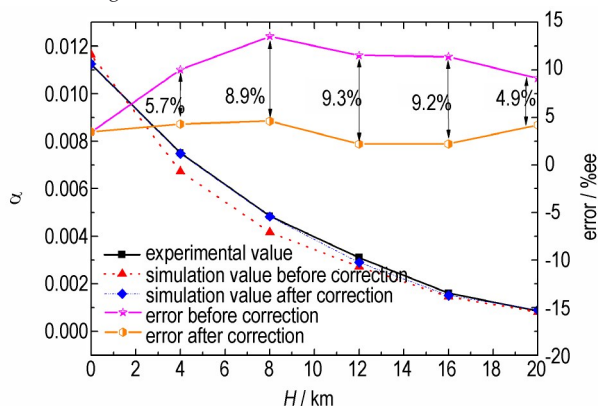


图7 长方体破片速度衰减系数与误差曲线(1300 m·s⁻¹)

Fig.7 Velocity attenuation coefficient and error curves of cuboid fragments(1300 m·s⁻¹)

4 结论

研究了长方体和球体破片阻力系数的变化规律,针对不同初始速度($\leq 2500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和海拔高度($\leq 20 \text{ km}$)

提出破片阻力修正系数,进一步优化了破片速度衰减模型,开展了低气压破片速度衰减特性试验,得出如下结论:

(1) 通过流体仿真软件对长方体和球体破片在不同初始速度($\leq 2500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和海拔高度下($\leq 20 \text{ km}$)的破片阻力系数进行计算,经过数据拟合得到不同海拔高度下破片阻力系数修正系数 k 的表达式,最终得到不同海拔高度影响下破片速度衰减模型。其他不同范围的初始速度和海拔高度的破片速度衰减系数计算可参考本文研究方法进行修正。

(2) 开展低气压破片衰减特性试验,将试验数据与利用修正后的破片速度衰减模型计算出的结果进行对比发现,长方体和球型破片的速度衰减系数误差均小于5%,二者破片速度衰减系数吻合度较好,且修正后的速度衰减模型计算精度与修正前的模型相比最多提高了10%左右。

(3) 鉴于本文公式是以具体项目中特定尺寸和特定形状的破片为研究对象提出的,故针对其他类型破片的通用性有待进一步提高,可参考本文方法对其他类型破片的速度衰减规律展开进一步研究。

参考文献:

- [1] 房莹莹. 燃料空气炸药综合毁伤评价模型研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010: 55-57.
FANG Ying-ying. Research on comprehensive damage assessment models of fuel air explosive[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010: 55-57.
- [2] 周捷, 智小琦, 徐锦波, 等. 小尺寸破片对单兵防护装备的侵彻研究[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(2): 023304.
ZHOU Jie, ZHI Xiao-qi, XU Jin-bo, et al. Research on penetration of small size fragment to single soldier protection equipment[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(2): 023304.

- [3] Nystrom U, Gylltoft K. Numerical studies of the combined effects of blast and fragment loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(8):995-1005.
- [4] 臧国才, 李树常. 弹箭空气动力学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1989:88-90.
- [5] 隋树元, 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 100-103.
SUI Shu-yuan, WANG Shu-shan. Terminal effect[M]. Beijing: National defense industry press, 2000:100-103.
- [6] 曹凤霞. 爆炸综合毁伤效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008:38-39.
CAO feng-xia. Study on comprehensive damage effect of explosion[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008:38-39.
- [7] 郝建春, 俞金良. 雷管破片速度初探[J]. 含能材料, 2004, 12(1): 59-61.
HAO Jian-chun, YU Jin-liang. Study on the fragment velocity measurement after explosion of detonator[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(1):59-61.
- [8] 岳通, 王惠源, 张成卿. 尾翼弹高低空气动力学特性仿真及外弹道计算[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(5):37-42.
YUE Tong, WANG Hui-yuan, ZHANG Cheng-qing. Simulation and external ballistic calculation of high and low aerodynamic characteristics of tail bomb[J]. *Owner Equipment Engineering*, 2020, 41(5):37-42.
- [9] 张玉令, 罗兴柏, 马光勇, 等. 弹药破片飞行速度实验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(6):83-84.
ZHANG Yu-ling, LUO Xing-bai, MA Guang-yong, et al. Experimental study on flight velocity of ammunition fragments [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2011, 31(6):83-84.
- [10] 林献武, 王中原, 张薇. 超声速弹箭阻力系数随高度变化的计算方法研究, 海军工程大学学报, 2009, 21(3):100-103.
LIN Xian-wu, WANG Zhong-yuan, ZHANG Wei. Research on calculation method of ultrasonic speed characters with height change[J]. *Journal of Naval Engineering*, 2009, 21(3): 100-103.
- [11] 马永忠, 赵田安, 汪勇. 弹丸破片速度衰减规律研究[J]. 弹道学报. 2006, 18(4):4-56.
MA Yong-zhong, ZHAO Tian-an, WANG Yong. Velocity attenuation regularity of projectile fragments[J]. *Journal of Ballistics*, 2006, 18(4):4-56.
- [12] 钱杏芳, 林瑞雄. 导弹飞行力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015:33-35.
- [13] 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 科学出版社, 2019:110-113.
WANG shu-shan. Terminal effect[M]. Beijing: Science press, 2019:110-113.
- [14] 韩子鹏. 弹箭外弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008: 55-60.
- [15] 竺伟梁, 程春, 庞兆君, 等. 三棱柱形大长径比预制破片速度衰减规律研究[J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41(2):141-144.
ZHU Wei-liang, CHENG Chun, PANG Zhao-jun, et al. Research on the velocity attenuation law of triangular prism-shaped prefabricated fragments with large aspect ratio[J]. *Journal of Projectiles, Rockets and Guidance*, 2021, 41(2):141-144.
- [16] 刘晓琦, 尤文斌, 丁永红, 等. 冲击波存储测试系统的时基统一性研究[J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41(1):80-83.
LIU Xiao-qi, YOU Wen-bin, DING yong-hong, et al. Research on the time-base unity of shock wave storage test system [J]. *Journal of Projectiles, Rockets and Guidance*, 2021, 41(1):80-83.
- [17] 唐诗, 郑腾, 孔德仁, 等. 阵列式破片飞散特性测试系统设计[J]. 测试技术学报, 2020, 34(6):485-490.
TANG Shi, ZHENG Teng, KONG De-ren, et al. Design of array fragment scattering characteristics test system[J]. *Journal of Testing Technology*, 2020, 34(6):485-490.
- [18] Mohammadi B, Glatzel M, Altmeppen H. Disordered structure and flexible roles: Using the prion protein N1 fragment for neuroprotective and regenerative therapy[J]. *Neural Regeneration Research*, 2021, 16(7):1431.

A Correction Method for the Velocity Attenuation Model of Fragments Based on Altitudes

LI Feng-mei¹, XIONG Guo-song¹, WANG Bao², WANG Heng¹, LI Jun-long¹

(1. Chongqing, Hongyu Precision Industrial Company with Limited Liability, Chongqing 402760, China; 2. Air-mounted Military Representative Office in Chongqing, Chongqing 402760, China)

Abstract: The hydrodynamic software FLUENT was used to study the drag coefficient of fragments with different initial velocities ($\leq 2500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) and altitudes ($\leq 20 \text{ km}$), and the velocity attenuation model of fragments with different altitudes was corrected. Then the accuracy of the corrected model was verified by the corresponding velocity attenuation characteristic tests with low atmospheric pressures. The results show that the calculated results of spherical fragments with an initial velocity of $700 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and cuboid fragments with an initial velocity of $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ using the corrected velocity attenuation model are in good agreement with the experimental results that the errors are less than 5%, and the calculation accuracy of the modified velocity attenuation model is about 10% higher than that of the original model. The corrected velocity attenuation model of fragments can be used to calculate the influence of the drag coefficient, which is varied with the altitude, on the velocity attenuation coefficient of fragments, to improve the calculation accuracy of the fragment velocity, and to further improve the accuracy of the power evaluation of the fragment warhead.

Key words: fragment; drag coefficient; velocity attenuation; altitude; correction method

CLC number: TJ55O35; V216.5; TJ5

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021150

(责编: 王艳秀)