高压物理学报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

第 32 卷 第 2 期
2018 年 4 月

高 压 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

Vol. 32, No. 2
Apr., 2018

DOI: 10.11858/gywlxb.20170631

长径比对侵彻阻力的影响*

吴普磊,李鹏飞,杨 磊,赵向军,宋 浦

(西安近代化学研究所,陕西 西安 710065)

摘要:基于经典空腔膨胀理论、Forrestal 阻力修正模型和加速度阻力模型研究了战斗部侵彻强度靶过程中长径比对于侵彻阻力的影响,通过对不同长径比条件下战斗部侵彻余速的计算,分析了长径比对阻力项系数的影响,讨论了 3 种理论的适用范围。结果表明:当战斗部长径比小于 3 时,加速度阻力项系数变化对侵彻过程影响较大;当长径比大于 5 时,3 个模型的计算结果趋于一致,均适用于工程计算。

关键词:弹药工程;侵彻;长径比;阻力项系数

中图分类号:O385 **文献标识码**:A

现代战争对侵彻战斗部性能提出了更高的技术要求。目前提高战斗部侵彻能力的技术途径主要有增大战斗部质量、提高战斗部速度及优化弹体长径比等。在实际应用中,由于受到武器发射平台条件的限制,提高战斗部质量和速度有较大难度,因此优化弹体长径比成为重要技术途径。

徐建波等[1]利用轻气炮系统开展了长径比在 10~15 范围内的长杆射弹侵彻混凝土的研究,明确了空腔膨胀理论和美国陆军《抗常规武器设计规范》中侵彻混凝土经验公式的适用范围。高光发等[2]针对长杆弹对半无限靶的垂直侵彻行为,利用经验公式和数值软件研究了长径比对侵彻深度的影响规律和机制。万文乾等[3]利用有限元软件 LS-DYNA 对长径比分别为 1.5、2.5、4.0、5.0 的 4 种弹体侵彻钢筋混凝土靶板进行了分析。从已经公开的文献来看,现有的研究工作大多针对长径比对侵彻剩余速度和侵彻深度的影响,有关长径比对侵彻过程中阻力和过载影响的研究则较少。有鉴于此,本工作利用经典空腔膨胀理论[4-7]、Forrestal 阻力修正模型[8-12]和加速度阻力模型[13]对不同长径比条件下战斗部侵彻钢筋混凝土靶进行系统研究,对比不同模型计算得到的战斗部的侵彻剩余速度,并分析长径比对阻力项系数的影响,以期为工程设计提供理论参考。

1 侵彻阻力的计算模型

战斗部侵彻强度靶是一个十分复杂的动力学过程,一般研究通过测量剩余速度或侵彻深度来反推侵彻阻力。本工作基于 3 种理论模型,通过 MATLAB 编程计算不同长径比时的靶后剩余速度,并利用加速度阻力模型计算侵彻过程中的阻力变化,分析长径比对侵彻阻力的影响。

1.1 经典空腔膨胀理论

经典空腔膨胀理论中空腔表面的法向压力表达式为

$$p(t)=p_{\mathrm{s}}+\rho_{\mathrm{p}}(B_1 r_{\mathrm{a}}\ddot{r}_{\mathrm{a}}+B_2\dot{r}_{\mathrm{a}}^2) \tag{1}$$

$$B_1=1-\alpha\delta^{-2/3} \tag{2}$$

式中:p_{s} 为静压力;r_{a} 为空腔半径;$\dot{r}_{\mathrm{a}}$ 为空腔膨胀速度;$\ddot{r}_{\mathrm{a}}$ 为空腔膨胀加速度;B_1 和 B_2 为与空腔界面加速度和速度有关的系数;$\alpha=1-\rho_{\mathrm{e}}/\rho_{\mathrm{p}}$,$\delta=1-\mathrm{e}^{-3\beta}\rho_{\mathrm{e}}/\rho_{\mathrm{p}}$,$\beta=(Y-2E_{\mathrm{p}}\varepsilon_{\mathrm{p}}/3)/[2(E_{\mathrm{e}}-E_{\mathrm{p}})]$,$Y$ 为线性强度

* **收稿日期**:2017-08-15;**修回日期**:2017-11-06
基金项目:装备预研基金
作者简介:吴普磊(1992—),男,硕士研究生,主要从事战斗部设计及终点效应研究. E-mail:505336201@qq.com
通信作者:宋 浦(1973—),男,博士,研究员,主要从事战斗部毁伤技术研究. E-mail:songpu73@163.com

© 2018 Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics

塑化域的初始应力，E_e 和 E_p 分别为混凝土弹性和塑性强化模量，ε_p 为瞬时锁定应变，且 $\varepsilon_p=\ln(\rho_p/\rho_e)$，$\rho_e$ 和 ρ_p 分别为混凝土的弹性锁变密度和塑性锁变密度。从(1)式中可以看出：阻力由静阻力和动阻力组成，动阻力又包含了加速度阻力项 $\rho_p B_1 r_a \ddot{r}_a$ 和速度阻力项 $\rho_p B_2 \dot{r}_a^2$。

1.2　Forrestal 阻力修正模型

Forrestal 等[8]在经典空腔膨胀理论的基础上提出了尖卵形弹头的半解析计算模型，认为刚性弹侵彻混凝土靶的破坏包括一个锥形弹坑区和一个隧道区。Li 等[9]和陈小伟等[10-12]在 Forrestal 工作的基础上将该模型应用范围推广至任意头部形状弹，得到了作用于弹体头部的轴向总阻力

$$F=\begin{cases}cx & x/d<k\\ \pi d^2(Sf_c+N^*\rho\dot{x}^2)/4 & x/d\geqslant k\end{cases} \tag{3}$$

式中：c 为常数，x 为弹体侵彻深度，d 为弹径，kd 为锥形弹坑的深度，ρ 为混凝土靶的密度，$\dot{x}$ 为刚性弹体的瞬时速度，f_c 为混凝土无约束抗压强度，S 为与 f_c 相关的无量纲经验常数，N^* 为弹头形状因子。

1.3　加速度阻力模型

战斗部侵彻强度靶过程中，加速度变化会导致总阻力增大，因此，忽略加速度项的影响也会使计算误差增大。郭锦炎等[13]在 Forrestal 等研究的基础上考虑加速度项，得到加速度阻力模型

$$F=\begin{cases}cx & x/d<k\\ \pi d^2(Sf_c+B_1 d\ddot{x}/2+N^*\rho\dot{x}^2)/4 & x/d\geqslant k\end{cases} \tag{4}$$

1.4　模型对比分析

空腔膨胀理论求解简便，但由于诸多假设和简化，导致其计算精度不高；工程上为了获得更高的精度，一般采用实验测量参数修正理论模型，然而，这样不仅大幅增加了研究成本，而且所得参数仅适用于特定工况。Forrestal 阻力修正模型是基于大量实验数据归纳、梳理而得到的，该模型对静力项进行了修正，但忽略了加速度对阻力的贡献，导致描述加速度变化较大或过载较高的侵彻过程时计算精度较低。加速度阻力模型是在 Forrestal 阻力修正模型的基础上引入加速度阻力项，该项对于加速度的变化比较敏感，能够提升计算精度。

2　计算结果及分析

2.1　计算工况

设战斗部质量为 310.5 kg，速度为 280 m/s；C40 钢筋混凝土靶的厚度为 1.2 m。建模后，利用 MATLAB 编程计算得到不同长径比(φ)条件下 3 种理论给出的靶后剩余速度(v_r)，如图 1 所示。可以看出：当长径比为 2～5 时，靶后余速均随长径比的增大而迅速增大；当长径比大于 5 时，曲线的斜率减小，增大长径比对侵彻余速变化的影响较小[3]。基于此，以加速度阻力模型所得靶后余速为基准，计算得到 Forrestal 修正模型和空腔膨胀理论相对于该模型的偏差，如图 2 所示。

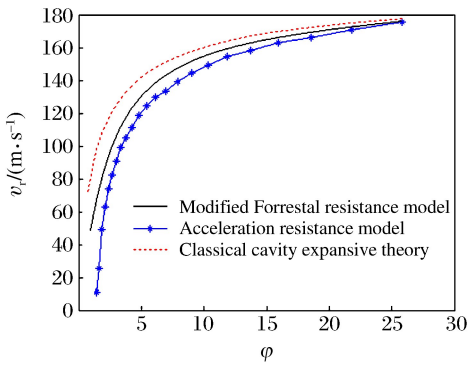


图 1　靶后余速计算结果

Fig. 1　Calculation results of residual velocity

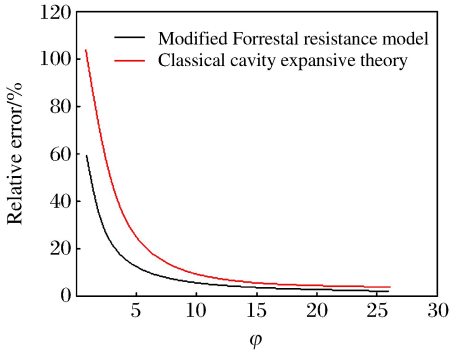


图 2　计算结果差异对比

Fig. 2　Comparison of calculated results

由图 2 可见,随着长径比的增大,Forrestal 阻力修正模型和经典空腔膨胀理论相对于加速度阻力模型的差异均呈递减趋势。当 $\varphi<3$ 时,3 个模型差异较大;当 $\varphi>5$ 时,其结果趋于一致。

实验结果显示,当 $\varphi=3$ 时,弹体在穿出靶体后剩余速度为 82 m/s。经典空腔膨胀理论、Forrestal 修正模型和加速度阻力模型计算结果相对于实验结果的偏差分别为 68%、26%和 4%,由此可知,加速度阻力模型具有更好的计算精度。各理论模型得到的阻力存在差异,导致靶后余速计算结果不同,因此靶后余速的变化反映了长径比对阻力的影响:当长径比较小时,其变化对阻力影响较大;随着长径比的不断增大,其对阻力的影响逐渐减弱。

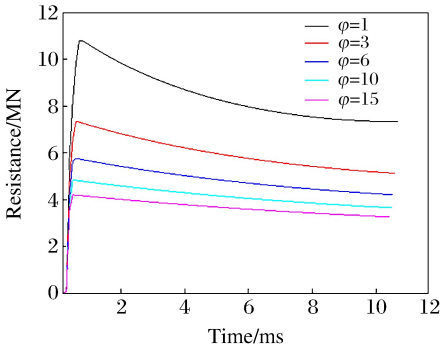


图 3　不同长径比下侵彻阻力时间变化曲线

Fig. 3　Penetration resistance-time curve with different aspect ratios

基于以上结果,利用加速度阻力模型计算了几种典型长径比条件下战斗部侵彻 1.2 m 厚混凝土靶时的阻力变化过程,如图 3 所示。由图 3 可见:侵彻阻力随着时间的增大先陡然增大,随后缓慢减小。当长径比从 1 增加至 16 时,作用于弹体的最大侵彻阻力降低了约 60%,降低效果显著。这是由于增大长径比相当于减小了弹体的直径,降低了战斗部与靶体的阻力接触面积,从而减小了侵彻阻力。

2.2　结果分析

由(1)式积分可得作用于弹体头部的轴向总阻力,结合牛顿第二定律得到侵彻过程的动力学方程

$$M\ddot{r}_a=\pi r_{a0}^2[p_s+\rho_p(B_1 r_{a0}\ddot{r}_a+B_2\dot{r}_a^2)] \tag{5}$$

式中:r_{a0} 为弹体半径,M 为弹体质量。对(5)式左右两边均除以质量 M,得到加速度项为 $\pi B_1 r_{a0}^3\rho_p\ddot{r}_a/M$。为了表征加速度阻力对总阻力的贡献,根据文献[4,7],定义加速度项系数 C_{rt} 为

$$C_{rt}=\pi\rho_p B_1 r_{a0}^3/M \tag{6}$$

由(2)式可知:B_1 为无量纲系数,由于侵彻过程中 ρ_e、ρ_p 变化均较小,因此工程计算中可取 B_1 为常数。通过 2.1 节中的实验工况计算得到加速度项系数 C_{rt} 与长径比 φ 的关系,如表 1 所示。可以看出:随着长径比的增大,C_{rt} 逐渐减小;并且当长径比较小时,C_{rt} 的衰减速度更快。由此可见,长径比的增大减小了加速度阻力项对阻力的贡献,从而减小了侵彻阻力。结合表 1 和图 2 可知,当长径比小于 3 时,忽略加速度阻力项的影响会对侵彻余速的计算造成较大误差。

表 1　长径比与加速度项系数的关系

Table 1　Relationship between aspect ratio and acceleration term coefficient

φ	C_{rt}	φ	C_{rt}	φ	C_{rt}	φ	C_{rt}	φ	C_{rt}	φ	C_{rt}	φ	C_{rt}
1	0.482	3	0.161	5	0.092	9	0.054	12	0.042	15	0.031	20	0.024

3　结　论

(1) 基于经典空腔膨胀理论、Forrestal 阻力修正模型和加速度阻力模型定量研究了长径比对侵彻阻力的影响,发现加速度阻力模型具有较好的计算精度。

(2) 当战斗部长径比小于 3 时,加速度阻力项系数随长径比的增大迅速减小,必须考虑其影响;当长径比大于 5 时,3 种理论的计算结果趋于一致,均适用于工程计算。

参考文献:

[1]　徐建波,林俊德,唐润棣,等. 长杆射弹侵彻混凝土实验研究 [J]. 爆炸与冲击,2002,22(4):174-178.

XU J B, LIN J D, TANG R D, et al. The penetration of steel bar projectiles into concrete targets [J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(4): 174-178.

[2] 高光发, 李永池, 刘文平, 等. 等动能长杆弹侵彻行为的研究及优化设计 [J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(4): 79-82.
GAO G F, LI Y C, LIU W P, et al. The study on penetration of constant kinetic energy long-rod penetrator and optimal design [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(4): 79-82.

[3] 万文乾, 龙源, 岳小兵, 等. 弹体长径比影响钢筋混凝土侵彻规律的数值研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(2): 53-55.
WAN W Q, LONG Y, YUE X B, et al. Research on projectiles ratio of length to diameter influencing penetration of steel reinforced concrete by numerical simulation [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25(2): 53-55.

[4] BERNARD R, HANAGUD S. Large deformation, deep penetration theory for a compressible strain hardening target material [J]. AIAA Journal, 1971, 9(5): 905-911.

[5] ROSENBERG Z, DEKEL E. The penetration of rigid long rods [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(4): 551-564.

[6] GOODIER J N. On the mechanics of indentation and cratering in the solid targets of strain hardening metal by impact of hard and soft spheres [C]//Proceedings of the 7th Symposium on Hypervelocity Impact (Ⅲ). New York: AIAA, 1965: 215-259.

[7] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990: 19-36.
WANG R C, ZHAO G Z. Projectile terminal effect [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990: 19-36.

[8] FORRESTAL M J, FREW D J, HANCKAK S J, et al. Penetration of ground and concrete target with ogive nose projectiles [J]. International Journal of Impact Engineering, 1996, 18(5): 465-476.

[9] LI Q M, CHEN X W. Dimensionless formula for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectiles [J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(1): 93-116.

[10] 陈小伟. 穿甲/侵彻问题的若干工程研究进展 [J]. 力学进展, 2009, 39(3): 316-351.
CHEN X W. Advances in the penetration/perforation of rigid projectiles [J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(3): 316-351.

[11] 陈小伟. 动能深侵彻弹的力学设计(Ⅰ): 侵彻/穿甲理论和弹体壁厚分析 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(6): 499-505.
CHEN X W. Mechanics of structural design of EPW(Ⅰ): the penetration/perforation theory and the analysis on the cartridge of projectile [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(6): 499-505.

[12] 陈小伟, 李维, 宋成. 细长尖头刚性弹对于金属靶的斜侵彻/穿甲分析 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(5): 393-399.
CHEN X W, LI W, SONG C. Oblique penetration/perforation of metallic plates by rigid projectiles with slender bodies and sharp noses [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(5): 393-399.

[13] 郭锦炎, 阮文俊, 王浩, 等. 助推弹体对混凝土目标侵彻过程的计算方法研究 [J]. 兵工学报, 2012, 33(9): 1076-1080.
GUO J Y, RUAN W J, WANG H, et al. Study on the calculation method of penetration process of projectile with booster into concrete targets [J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(9): 1076-1080.

Influence of Aspect Ratio on the Penetration Resistance

WU Pulei, LI Pengfei, YANG Lei, ZHAO Xiangjun, SONG Pu

(*Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an* 710065, *China*)

Abstract: In this paper, the influence of the aspect ratio on the penetration resistance in the target penetration process of the warhead was studied based on the classical cavity expansion theory, the modified Forrestal resistance model and the acceleration resistance model. The influence of the aspect ratio on the resistance term coefficient was analyzed and the range of applicability of the three theories was discussed by calculating the penetration residual velocities of the warhead with different aspect ratios. The results show that the variation of the acceleration resistance term coefficient has a significant influence on the penetration process when the aspect ratio is below 3; when the aspect ratio is above 5, the results of the three models tend to converge, and they are all applicable to engineering calculation.

Keywords: ammunition engineering; penetration; aspect ratio; resistance term coefficient