

文章编号: 1001-1455(2003)04-0325-06

任意头形弹丸侵彻地质材料的理论分析模型*

路中华, 钱立新, 金建明

(中国工程物理研究院结构力学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了推广 Forrestal 侵彻方程的应用范围, 基于球面空腔膨胀理论, 用分析方法推导出弹丸垂直侵彻半无限厚地质材料的侵彻方程, 建立了任意头形刚性弹丸侵彻地质材料的理论分析模型。试验数据和数值模拟结果表明, 该模型能对地质材料侵彻过程中的弹丸速度、加速度和最终侵深等参数作出较为准确的预估。

关键词: 爆炸力学; 侵彻方程; 空腔膨胀理论; 地质材料

中图分类号: O385; TJ012.4

国标学科代码: 130·50

文献标志码: A

1 引言

近年来, M. J. Forrestal 等^[1~4]根据空腔膨胀理论建立了卵形弹丸对半无限厚土壤、混凝土以及其它地质材料侵彻的分析模型, 该模型除对侵彻深度具有较准确的预估能力外, 还可给出侵彻过程中弹丸的速度、加速度等动力学参数, 而且其侵彻方程具有明确的物理意义。针对截卵形弹丸, 钱立新等^[5]用经验参数 K 对 Forrestal 模型进行修正, 将其推广到卵形/截卵形弹丸的侵彻计算, 但该模型却停留在“半分析”阶段。此外, 路中华等^[6]提出尖拱类弹丸头形系数 N_L , 并用它修正了 Forrestal 模型, 使其适用于一般尖拱类(包括锥形头)弹丸, 但由于系数 N_L 没有明确的物理意义, 并且缺乏必要的试验验证, 该方法的实用性还有待于进一步探讨。尹放林等^[7]也对该问题进行了较为深入的研究。

以上模型都是针对规则头形弹丸建立的, 对于复杂头形弹丸, 推导更为一般的侵彻方程非常必要。本文中基于球面空腔膨胀理论, 推导弹丸垂直侵彻半无限厚土壤和混凝土等地质材料的侵彻阻力方程。

2 任意头形弹丸侵彻阻力方程的推导

假设弹丸为刚性轴对称体, 其头部表面可以看成是由一段曲线绕弹轴旋转而成, 有时会带有平台, 而弹身通常是一段圆柱体。本文中弹丸基本外形及其侵彻过程的坐标系如图 1 所示。

另外, 假设弹丸头部长度为 h , 弹体半径为 R , 平台半径为 r_0 , 如图 2 所示, 则弹丸头部曲线为

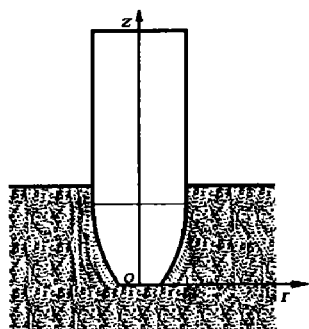


图 1 弹丸外形及侵彻过程的坐标系
Fig.1 Projectile shape and coordinate system for penetration

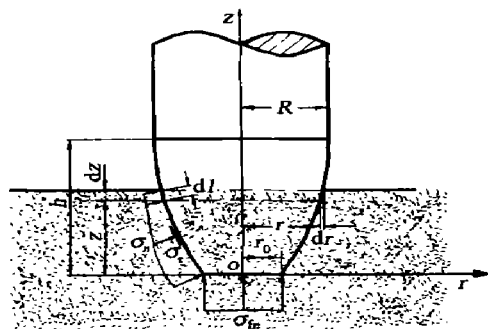


图 2 弹丸受力示意图
Fig.2 Diagrammatic sketch of projectile force

* 收稿日期: 2002-07-18; 修回日期: 2003-01-25

作者简介: 路中华(1977—), 男, 硕士。

$$r = f(z) \quad 0 \leq z \leq h, \quad r_0 \leq r \leq R \quad (1)$$

2.1 弹丸垂直侵彻半无限厚土壤类介质

弹丸侵彻土壤类介质时,一般不存在靶前崩落现象。在侵彻过程初始阶段,只有弹丸头部的部分表面受力,如图2所示;当弹丸头部全部侵入介质后,整个头部表面受力。

根据空腔膨胀理论,侵彻过程中弹丸表面法向应力^[1~3]

$$\sigma_n = \tau_0 A + \rho_0 B v^2 \quad (2)$$

式中: A 和 B 为由球面空腔膨胀理论确定的材料常数^[1,3]; τ_0 和 ρ_0 分别为土壤的 Tresca 屈服应力和初始密度; v 为空腔膨胀速度,即弹丸表面的法向速度。

对于土壤类介质,参考 M. J. Forrestal^[3]的推导可取

$$\begin{cases} A = \frac{2}{3} \left[1 - \ln \left[\frac{(1 + \tau_0/(2E))^3 - (1 - \eta^*)}{(1 + \tau_0/(2E))^3} \right] \right] \\ B = \frac{3}{2(1 - \eta^*)} + \frac{3\tau_0/E + \eta^*(1 - 3\tau_0/(2E))^2}{((1 + \tau_0/(2E))^3 - (1 - \eta^*))^{2/3}} \\ \frac{((1 + \tau_0/(2E))^3 - (1 - \eta^*))^{1/3}}{2(1 + \tau_0/(2E))^4} \left[1 + \frac{3(1 + \tau_0/(2E))^3}{1 - \eta^*} \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中: η^* 和 E 分别是土壤的锁定体应变和杨氏模量。

若令弹丸头部母线弧长的微分

$$dl = \sqrt{(dz)^2 + (dr)^2} \quad (4)$$

当侵彻深度为 z 时,弹丸速度为 v_z 。则弹丸平台表面的法向速度 $v_{fn} = v_z$,弹丸头部侧面的法向速度

$$v_n = v_z \frac{dr}{dl} \quad (5)$$

于是,弹丸头部平台表面和侧表面的法向应力分别为

$$\begin{cases} \sigma_{fn} = \tau_0 A + \rho_0 B v_{fn}^2 = \tau_0 A + \rho_0 B v_z^2 \\ \sigma_n = \tau_0 A + \rho_0 B v_n^2 = \tau_0 A + \rho_0 B v_z^2 \left[\frac{dr}{dl} \right]^2 \end{cases} \quad (6)$$

另外,若考虑弹丸表面与土壤类介质之间存在滑动摩擦,且摩擦因数为 μ ,则弹丸头部侧表面的切向应力

$$\sigma_\tau = \mu \sigma_n \quad (7)$$

而平台表面的切向应力为零。

因此,作用在与 dl 相应的弹丸侧表面上的力为

$$dF_n = 2\pi r \sigma_n dl \quad (8a)$$

$$dF_\tau = 2\pi r \sigma_\tau dl \quad (8b)$$

$$\text{轴向阻力} \quad dF_z = dF_n \frac{dr}{dl} + dF_\tau \frac{dz}{dl} = 2\pi r \sigma_n dr + 2\pi r \mu \sigma_n dz \quad (8c)$$

作用在弹丸头部平台表面的力

$$F_{flat} = \pi r_0^2 \sigma_{fn} \quad (9)$$

故弹丸侵彻过程中总的阻力方程为

$$F_z = \pi r_0^2 \sigma_{fn} + 2\pi \int_{r_0}^r r \sigma_n dr + 2\pi \mu \int_0^z r \sigma_n dz \quad 0 \leq z \leq h \quad (10a)$$

$$F_z = \pi r_0^2 \sigma_{fn} + 2\pi \int_{r_0}^R r \sigma_n dr + 2\pi \mu \int_0^h r \sigma_n dz \quad h < z \leq P \quad (10b)$$

式中: P 为弹丸的最终侵深。

2.2 弹丸垂直侵彻半无限厚混凝土类介质

根据文献[4]的论述,当弹丸侵彻混凝土类介质时,侵彻阻力方程可以参考方程(10a)和(10b),用 Sf 代替 $\tau_0 A$, 并取 $B=1$ 。其中 S 是一个量纲一经验常数, f 是混凝土的无侧限拉伸强度。另外,侵彻初期存在靶前崩落区 ($0 \leq z \leq 4R$), 卵形弹丸的试验数据表明,崩落区的侵彻阻力 F_z 与侵深 z 近似呈线性关系^[4]

$$F_z = \pi r_0^2 (Sf'_c + \rho_0 v_s^2) + cz \quad 0 \leq z \leq 4R \quad (11a)$$

式中: v_s 是弹丸的撞击速度; c 为系数,可根据牛顿第二定律由初始条件计算求得^[4]。

进一步假设在接下来的隧道区 ($4R < z \leq P$), 弹丸整个头部受力,忽略弹丸与介质间的摩擦,令 $\mu = 0$, 侵彻阻力 F_z 类似服从方程(10b), 则有

$$F_z = \pi r_0^2 (Sf'_c + \rho_0 v_z^2) + 2\pi \int_{r_0}^R \left[Sf'_c + \rho_0 v_z^2 \left(\frac{dr}{dl} \right)^2 \right] r dr \quad 4R < z \leq P \quad (11b)$$

方程(11a)和(11b)就是弹丸侵彻混凝土类介质的侵彻阻力方程。

此外,如果假设弹丸头形是尖拱形,并且忽略侵彻初始阶段部分弹头受力的情况,则可得到与文献[3~4]中的 Forrester 方程一致的结果。所以,本文中的理论分析模型是 Forrester 侵彻模型的推广,比原模型具有更大的适用范围。

3 任意头形弹丸侵彻阻力方程的迭代算法

上文导出了任意头形弹丸的侵彻方程(10a)、(10b)和(11a)、(11b),这两组方程对于规则头形的弹丸(如卵形、锥形和平头弹丸等)可以求出理论解,但对于复杂头形的弹丸,则需要用迭代方法求解。具体求解过程如下。

通过表面离散,可以表达出任意形状的弹丸头形。再根据空腔膨胀理论推导出弹丸受力的增量及合力表达式,就可得到侵彻过程中每一瞬间的阻力,进而可以确定弹丸的基本运动状态。

值得注意的是,在弹丸侵彻混凝土类介质时存在靶前崩落区,侵彻初期的阻力方程(11a)中有一个待定系数 c ,在迭代计算中难以确定。不过,分析弹丸侵彻土壤类介质的阻力方程(10a)可见,侵彻初期 ($0 \leq z \leq h$) 的阻力 F_z 也是随着侵深 z 的增加而增加的,可以近似反映方程(11a)的弹丸受力规律。于是,用形如方程(10a)和(10b)的方程来综合表示弹丸侵彻土壤类和混凝土类介质是近似可行的。相应地,可将弹丸侵彻土壤和混凝土这两类介质时的表面法向应力综合表示为

$$\sigma_n = C_1 + C_2 v_n^2 \quad (12)$$

式中: C_1 和 C_2 是材料特性系数。当靶体为土壤时, $C_1 = \tau_0 A$, $C_2 = \rho_0 B$; 当靶体为混凝土时, $C_1 = Sf'_c$, $C_2 = \rho_0$ 。

这样,就可以给出任意头形弹丸侵彻土壤和混凝土类地质材料的迭代算法。

首先,将弹丸头部表面离散为 $(n-1)$ 个相连的圆锥面、圆台面或圆柱面,用矩阵 $[z(i), r(i)]$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 表示,每个圆锥面、圆台面或圆柱面的高度

$$\Delta z(i) = z(i+1) - z(i) \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (13a)$$

相应地,截面半径的增量

$$\Delta r(i) = r(i+1) - r(i) \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (13b)$$

母线的增量

$$\Delta l(i) = \sqrt{\Delta z^2(i) + \Delta r^2(i)} \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (13c)$$

对于侵彻过程中的某一瞬时速度 $v_z(k)$ ($k=1, 2, \dots, N$), 有

$$v_n(k, i) = v_z(k) \cdot \frac{\Delta r(i)}{\Delta l(i)} \quad i = 1, 2, \dots, j \quad (14)$$

j 的取值为: 当 $k \leq n-1$ 时, $j=k$; 当 $k > n-1$ 时, $j=n-1$ 。

于是,有

$$\sigma_{in}(k) = C_1 + C_2 v_z^2(k) \tag{15a}$$

$$\sigma_n(k, i) = C_1 + C_2 v_n^2(k, i) \quad i = 1, 2, \dots, j \tag{15b}$$

则弹丸所受的轴向阻力增量及合力分别为

$$\Delta F_z(k, i) = 2\pi r(i) \sigma_n(k, i) \Delta r(i) + 2\pi r(i) \mu \sigma_n(k, i) \Delta z(i) \quad i = 1, 2, \dots, j \tag{16a}$$

$$F_z(k+1) = \pi r_0^2 \sigma_{in}(k) + \sum_{i=1}^j \Delta F_z(k, i) \tag{16b}$$

弹丸加速度
$$a(k+1) = -F_z(k+1)/m \tag{17}$$

弹丸速度
$$v_z(k+1) = \sqrt{v_z^2(k) + 2a(k+1)\Delta z(k)} \tag{18}$$

式中:当 $k > n-1$ 时, $\Delta z(k) = \Delta p$, Δp 是计算中所取的侵彻步长。则有

$$z(k+1) = z(k) + \Delta p \quad k > n-1 \tag{19}$$

故弹丸侵彻深度

$$p(k) = z(k) \quad k = 1, 2, \dots, N \tag{20}$$

式中: $p(N) = P$ 为最终侵深。

此外,侵彻过程的时间增量和瞬时时刻分别为

$$\begin{cases} \Delta t(k) = \frac{2\Delta z(k)}{v_z(k) + v_z(k+1)} \\ t(k+1) = t(k) + \Delta t(k) \end{cases} \tag{21}$$

根据以上分析,在给定弹丸头部外形矩阵 $[z(i), r(i)]$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 和弹丸质量 m 、撞击速度 v_s 以及靶体材料参数 C_1 和 C_2 的情况下,对(14)式~(21)式进行迭代计算,直到 $v_z(N) \approx 0$ 时停止。最终,对应于 $k = 1, 2, \dots, N$, 得到弹丸侵彻过程的加速度 $a(k)$ 、速度 $v(k)$ 、侵深 $p(k)$ 及时间 $t(k)$ 等结果。

在以上算法基础上,编制了任意头形弹丸侵彻地质材料的计算代码 PANP2GM (Penetration of Arbitrary Nosed Projectile to Geological Material)。

4 分析模型及 PANPGM 程序的试验验证

首先,用文献[3]侵彻土壤的试验数据验证该侵彻方程的实用性。弹丸 A 的参数为:质量 $m = 23.1\text{kg}$, 弹径 $2R = 95.2\text{mm}$, 曲径比 $\psi = 3.0$; 土壤参数为: $\tau_0 = 10\text{MPa}$, $\eta^* = 0.13$, $\rho_0 = 1860\text{kg/m}^3$ 和 $E = 160\text{MPa}$ 。图 3 所示为弹丸头部的离散情况。最终侵彻深度的模型预估和试验数据的比较如图 4 所示,由图可见,该侵彻方程对侵深的预估结果与 Forrestal 模型的预估结果比较接近,与试验数据吻合较好。但目前获得的试验数据中,侵彻速度比较集中,其它速度范围内的情况需在今后的工作中进一步研究。

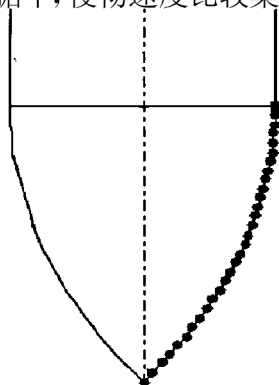


图 3 弹丸 A 头部的离散
Fig.3 Discrete of the nose
of projectile A

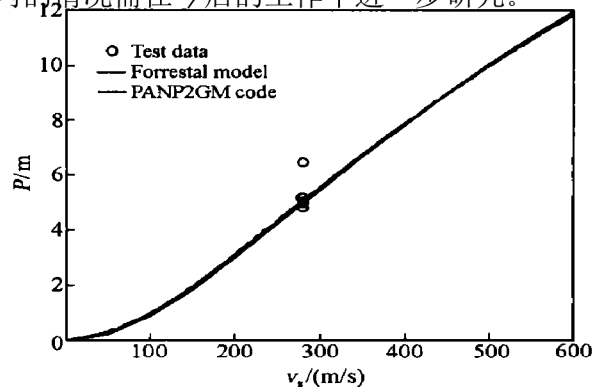


图 4 弹丸 A 的试验数据和模型预估
Fig.4 The test data and model
prediction of projectile A

其次, 钱立新等^[5]对截卵形弹丸 B 侵彻半无限混凝土进行了试验研究和分析, 其弹丸参数为: $m = 0.282\text{kg}$, $2R = 25.3\text{mm}$, $\psi = 3.56$, 截平头半径 $r_1 = 6.3\text{mm}$; 混凝土参数为: $\rho_0 = 2400\text{kg/m}^3$, $f_c = 30\text{MPa}$, $S = 13$ 。弹丸 B 头部的离散情况如图 5 所示, 用计算代码 PANP2GM 求解该问题, 计算结果与试验数据以及其它方法所得结果的比较如图 6 所示。其中, 三种模型的预估精度相当, 但文献[5]修正的 Forrestal 模型引入了一个经验参数 K , 文献[6]修正的 Forrestal 模型则只能适用于尖拱类弹丸, 而本文的 PANP2GM 则还适用于其它头形的弹丸。

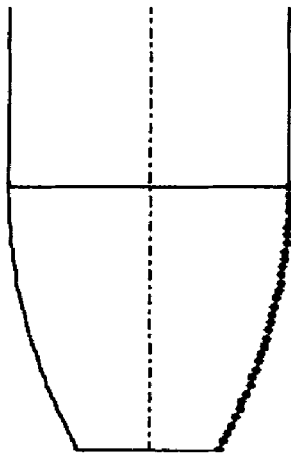


图 5 弹丸 B 头部的离散
Fig.5 Discrete of the nose of projectile B

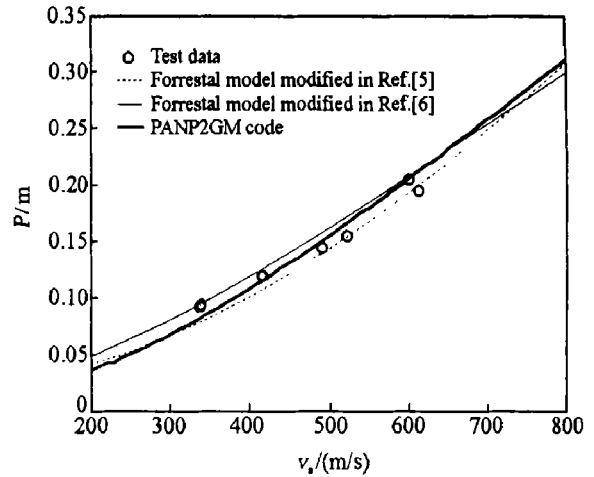


图 6 弹丸 B 的试验数据和模型预估
Fig.6 The test data and model prediction of projectile B

此外, 由于缺乏其它复杂头形弹丸的侵彻实验数据, 本文中用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA3D 对如图 7 所示的弹丸 C 垂直侵彻沙介质进行了数值模拟。该弹丸质量 $m = 0.24\text{kg}$, 其头部是对尖拱弹丸进行倒圆而形成的, 弹径 $2R = 20\text{mm}$, 尖拱曲径比为 $\psi = 3.0$, 倒圆半径 $r_d = 5.455\text{mm}$ 。所侵彻沙介质的参数取自文献[8]。由图 8 可见, PANP2GM 的预估结果与 LS-DYNA3D 数值模拟结果基本吻合, 但 PANP2GM 应用方便, 计算耗时很短, 具有较强的实用性。

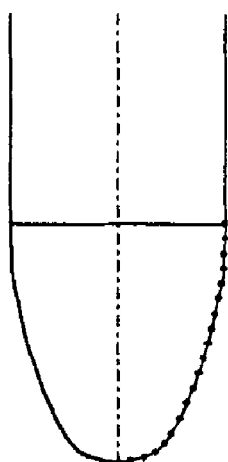


图 7 弹丸 C 头部的离散
Fig.7 Discrete of the nose of projectile C

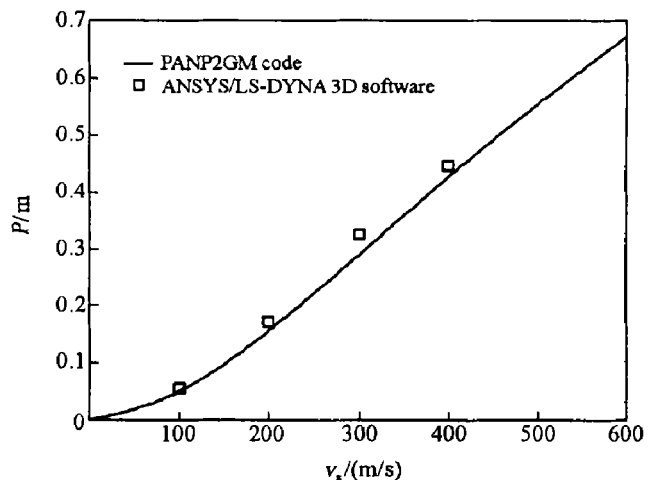


图 8 弹丸 C 的数值模拟和模型预估
Fig.8 Numerical simulation and model prediction of projectile C

5 结 论

推导弹丸侵彻地质材料的阻力方程, 建立了任意头形弹丸侵彻地质材料的理论分析模型, 并根据相应的算法编制了计算代码 PANP2GM。用该程序对文献中的试验数据进行相应的模型预估, 结果吻合

较好,证明了该模型及其算法的有效性。另外,根据本文阻力方程的推导过程,从理论上讲,该模型还适用于许多复杂形状头形弹丸侵彻地质材料的计算,但由于缺乏相应的试验数据,文中只是针对一种弹丸将其计算结果与数值模拟结果作了对比,仍需要进一步的试验验证。

参考文献:

- [1] Forrestal M J, Luk V K. Dynamic spherical cavity-expansion in a compressible elastic-plastic solid[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1988, 55: 275—279.
- [2] Forrestal M J, Okajima K, Luk V K. Penetration of 6061-T651 aluminum targets with rigid long rods[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1988, 55: 755—760.
- [3] Forrestal M J, Luk V K. Penetration into soil targets[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1992, 12(3): 427—444.
- [4] Forrestal M J, Altman B S, Cargile J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 15(4): 395—405.
- [5] QIAN Li-xin, YANG Yun-bin, LIU Tong. A semi-analytical model for truncated-ogive-nose projectiles penetration into semi-infinite concrete targets[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24: 947—955.
- [6] 路中华, 钱立新. 尖拱类弹丸的头形系数[J]. *弹道学报*, 2002, 14(3): 75—80.
LU Zhong-hua, QIAN Li-xin. A nose performance coefficient for general ogive-nose projectiles[J]. *Journal of Ballistics*, 2002, 14(3): 75—80.
- [7] 尹放林, 王明洋, 钱七虎. 弹体垂直侵彻深度工程计算模型[J]. *爆炸与冲击*, 1997, 17(4): 333—339.
YIN Fang-lin, WANG Ming-yang, QIAN Qi-hu. An engineering computing model for penetration depth of projectile normal into target[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1997, 17(4): 333—339.
- [8] 路中华. 尖拱类弹丸侵彻水沙介质的理论分析[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2002: 43—44.

Theoretical analysis for arbitrary nosed projectile penetrating into geological materials

LU Zhong-hua^{*}, QIAN Li-xin, JIN Jian-ming

(Institute of Structural Mechanics,

China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: By extending Forrestal's penetration model and based on the spherical cavity expansion theory, a resistance equation for arbitrary nosed projectile penetrating normally into semi-infinite geological materials has been established. Comparison between the experimental data and numerical simulation indicates that our equation predicts very well for the velocity, acceleration and final penetration depth of the projectile penetrating into geological materials.

Key words: mechanics of explosion; penetration equation; cavity expansion theory; geological material

* Corresponding author: LU Zhong-hua

E-mail address: chinoader@hotmail.com; Telephone: 0816-2488438