

# 复合弹体撞地的HELP 计算方法初步计算

胡秀章 李永池 金镜泉\*

王肖钧 李宗芬

(·为航天部十四所, 其余为中国科技大学近代力学系)

**摘要** 本文用改进的HELP二维计算程序, 流体弹塑性力学模型, 计算了复合弹体高速撞击岩体问题。给出了早期弹丸侵彻的几何图象, 典型时刻轴向速度、压力、应力分布, 以及早期弹体中出现的拉应力场。可供弹丸防护参考之用。所有结果都与单一弹体的结果进行了比较, 以便估价被帽材料的防护效果。

**关键词** 高速撞击; 复合弹体; 动应力场; 流体弹塑性动力学。

## 一、引言

HELP方法是Hageman和Walsh等人于1971年提出的一个计算多种物质二维流体弹塑性流动的Euler型数值计算方法。该方法是在Euler差分格式基础上引入了Lagrange型的材料示踪点, 使之具备了Lagrange描述方法中的某些特点, 弥补了通常Euler方法描述物质界面时所遇到的困难。同时又保留着Euler方法处理各种弹塑性大变形的能力。近几年来, 国内已提出改进的HELP程序并将它成功地应用于含有两种材料的高速冲击动力学的数值计算<sup>[1, 2]</sup>。本文则用改进的HELP方法完成了复合弹体高速撞击的早期侵彻和动应力场的计算。所处理的问题的特点是含有三种波阻抗相差较大的材料。在计算中, HELP方法关于自由面和物质界面的处理已被进一步修正: 非直线自由面处采用了斜角质量比作为自由面网格的判据, 并且采用了物质界面波前输运噪音的消除方法, 从而减少了数值计算噪音。文中给出了弹丸撞击过程的早期侵彻图象, 几个典型时刻的轴向速度、压力及轴向应力 $\sigma_x$ 的分布, 为弹丸防护参考之用, 文中还给出了弹体中早期出现的拉应力场。所有这些结果都与单一弹体的结果进行比较, 以便估价复合弹体上被帽材料的防护效果。

## 二、基本方程

在空间坐标里, 二维不定常弹塑性流动的基本方程是

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial u_x}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{Du_x}{Dt} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{DE_T}{Dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\sigma_{ij} u_j)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

式中的 $t$ 是时间， $x_i$ 是欧拉坐标，在轴对称问题中是 $R$ 和 $Z$ 。 $D/Dt$ 表示随体微商， $D/Dt = \partial/\partial t + u_i (\partial/\partial x_i)$ ， $\rho$ 为密度， $u_i$ 为速度分量， $\sigma_{ij}$ 是应力张量且

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + S_{ij}, \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases} \quad (4)$$

这里 $p$ 为静水压， $S_{ij}$ 为偏应力张量。 $E_T$ 表示单位质量的总能量，即内能和动能之和。

$$E_T = e + \frac{1}{2} u_i u_i \quad (5)$$

式中 $e$ 为比内能。

材料的本构关系取成通常爆炸力学领域中常用的流体弹塑性模型，即压力和体积变形之间满足流体型的状态方程

$$p = p(\rho, e) \quad (6)$$

应力偏量和形状畸变之间则由弹塑性关系相联系，这包括弹性畸变律，塑性屈服准则以及塑性应变的流动规律。弹性畸变律为

$$\dot{S}_{ij} = 2G\dot{e}_{ij} - S_{ik}\omega_{kj} - S_{jk}\omega_{ki} \quad (7)$$

式中 $G$ 为弹性剪切模量， $\dot{e}_{ij}$ 为速度应变张量

$$\dot{e}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

$\omega_{ki}$ 是旋转率张量

$$\omega_{ki} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_i} - \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (9)$$

塑性屈服准则取 Von. Mises 屈服准则

$$\sqrt{J_2} = K \quad (10)$$

$J_2$ 为应力偏量第二不变量， $K$ 为剪切条件下的塑性流动应力。HELP方法中考虑的 $K$ 取如下形式

$$K = (k_0 + k_1 \mu + k_2 \mu^2)(1 - e/E_m) \quad (11)$$

式中 $k_0$ 、 $k_1$ 、 $k_2$ 为材料常数， $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ ， $E_m$ 材料常数相当于熔化能。顺便指出， $k$ 对密度的依赖实际上反映了静水压力对屈服强度的影响，而这种影响对岩石和高压下的金属都是重要的。

塑性应变的流动规律即是常用的塑性理论中的 Prandtl-Reuss 关系

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda (\partial f / \partial \sigma_{ij}) \quad (12)$$

在一级近似下，理想弹塑性体的弹塑性应力应变关系(7)、(12)可采用统一的弹塑性计算公式

$$S_{ij} = \begin{cases} S_{ij} & \text{如果 } S_{ij} S_{ij} < 2K^2 \\ 2K S_{ij} / (S_{im} S_{im})^{1/2} & \text{如果 } S_{ij} S_{ij} \geq 2K^2 \end{cases} \quad (13)$$

此外还引入一次体积粘性以减小击波后方的数值振荡,

$$Q_i = -c_v \Delta u_i \cdot \sqrt{p \cdot \rho} \quad (14)$$

式中  $c_v$  是人工粘性系数。

HELP 方法用等价的积分方程代替上述 (1)~(3) 的微分方程。在轴对称坐标里  $R-Z$  平面上的每个网格代表了绕  $Z$  轴的圆环。对上述方程组采用分裂算子法进行离散化处理, 从而得到一组相容的代数方程组在计算机上进行计算。

### 三、计算模型

#### 1. 问题和计算模式

带有被帽材料的半球形头部的复合弹丸, 初始时刻  $t=0$ , 弹丸以速度  $v_0$  正撞击在静止的、半无限的岩石表面上。求解弹丸的侵彻过程及弹体的动应力场。弹丸是轴对称旋成体, 在  $R-Z$  坐标里的计算模式如图 1, 我们选取  $IMAX=50$ ,  $JMAX=100$  共 5000 个等步长网格空间。网格宽度  $\Delta R = \Delta Z = 0.3 \text{ cm}$ 。JFREE 是岩石自由面位置,  $J\Phi$  是半球头的球心位置,  $JJ\Phi$  为弹体球心坐标。计算中岩石、弹体和被帽材料均作为各向同性的流体弹塑性介质, 暂不考虑裂隙的形成、发展及其对应力场的影响。忽略空气作用。

#### 2. 材料本构参数的选取

考虑到撞击速度在 2000 m/s 以内, 状态方程  $p(\rho, e)$  选用了 Murnagh 状态方程, 其形式为

$$p = \frac{K_0}{n} [(\rho/\rho_0)^n - 1]$$

常数  $K_0, n$  由  $D-u$  形式的 Hugoniot 关系

$$D = C_0 + Su$$

推算得出。  $C_0$  和  $S$  为实验值。对钢  $\rho_0 =$

7.8 g/cm<sup>3</sup>,  $S$  和  $C_0$  取自 (6)。岩石取为  $C_0 = 3500 \text{ m/s}$ ,  $S = 1.25$ ,  $\rho_0 = 2.7 \text{ g/cm}^3$ 。被帽材料取  $C_0 = 3000 \text{ m/s}$ ,  $S = 1.2$ ,  $\rho_0 = 2 \text{ g/cm}^3$ 。

畸变部分的弹性剪切模量对钢、岩石和被帽材料分别取  $G_s = 0.85 \times 10^2 \text{ GPa}$ ,  $G_r = 0.3 \times 10^2 \text{ GPa}$ ,  $G = 0.35 \times 10^2 \text{ GPa}$

与状态方程同内能无关相对应, 塑性判据也取与内能无关的简化形式:  $K = k_0 + k_1 \mu + k_2 \mu^2$ 。对钢取  $K = 0.58 \text{ GPa}$ , 岩石取:  $k_0 = 0.1 \text{ GPa}$ ,  $k_1 = 7 \text{ GPa}$ ,  $k_2 = -1.2 \times 10^2 \text{ GPa}$ , 当  $\mu \geq 0.033$  时,  $K = 0.2 \text{ GPa}$ 。被帽材料取  $K = 0.1 \text{ GPa}$ 。

### 四、计算结果分析

图 2 表示了  $v_0 = 1000 \text{ m/s}$  撞击速度时 (其余图类同) 几个典型时刻上弹丸的侵彻、变形

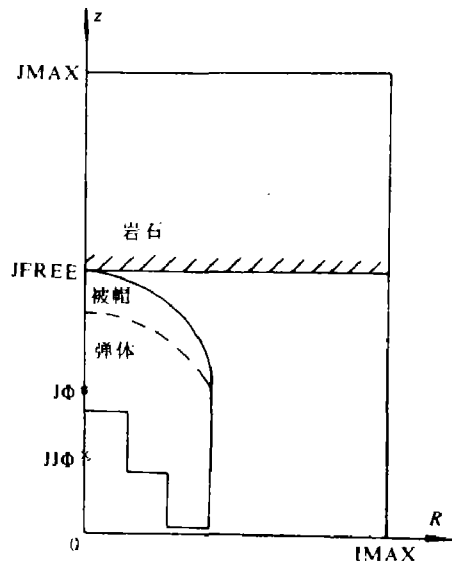


图 1

的几何图象。可见弹头被帽和岩石接触部分区域是大变形区。在发生撞击后的 $20\mu\text{s}$ 以内，弹体尾部变形并不明显，但 $20\mu\text{s}$ 以后，数值结果表明侧向运动开始显著起来。同单一弹丸相比，由于被帽的存在，对岩石的侵彻相对减慢，头部变形明显增大，墩粗。在 $20\mu\text{s}$ 时同单一弹体撞击的坑宽相比，复合弹体撞击的坑宽相差不大，但坑深几乎只有单一弹撞击坑深的一半。

图3表示了对称轴上不同时刻的压力波形和应力 $\sigma_{zz}$ 的分布情形，给人以一直观的了解。由于人工粘性的作用以及球面扩散效应的影响，击波阵面被抹平了，计算的数值振荡也基本被控制，波阵面后没有剧烈的数值振荡。数值结果表明，复合弹体撞击 $18.3\mu\text{s}$ 时弹体内的最大应力 $\sigma_{zz}$ （轴上）比单一弹体撞击后 $22\mu\text{s}$ 时的弹体内的最大应力 $\sigma_{zz}$ 要低 $0.5\text{GPa}$ 左右。被帽材料的存在降低了弹体内的应力峰值。同时也可看到，弹塑性效应在这类撞击问题中已是起主导作用而不可忽略的了。

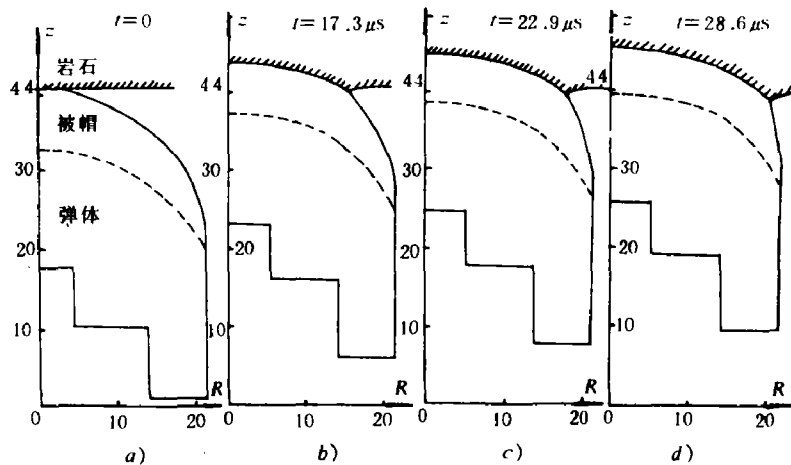


图2 弹丸侵彻的几何图象

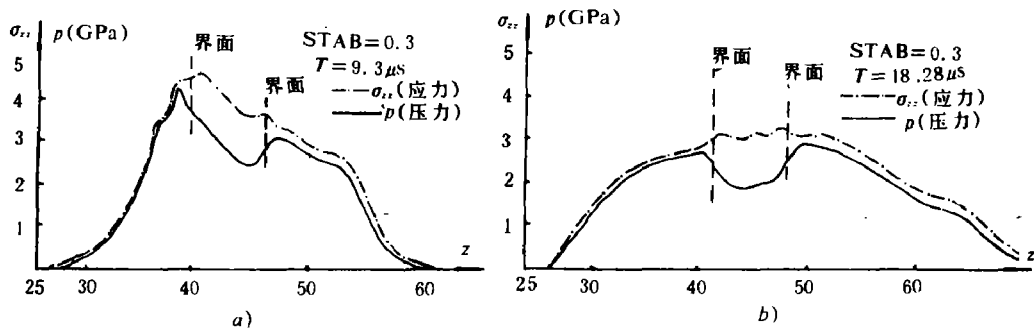


图3 对称轴上压力、应力分布

图4表示了不同时刻对称轴上轴向速度的空间分布及其衰减过程。由于不同波阻抗物质的界面存在,波的透反射作用,速度的空间分布(轴上)出现一些振荡,又由于物质界面在数值计算处理上也会出现一些噪音,所以这样的速度波形图还是能够令人满意的。

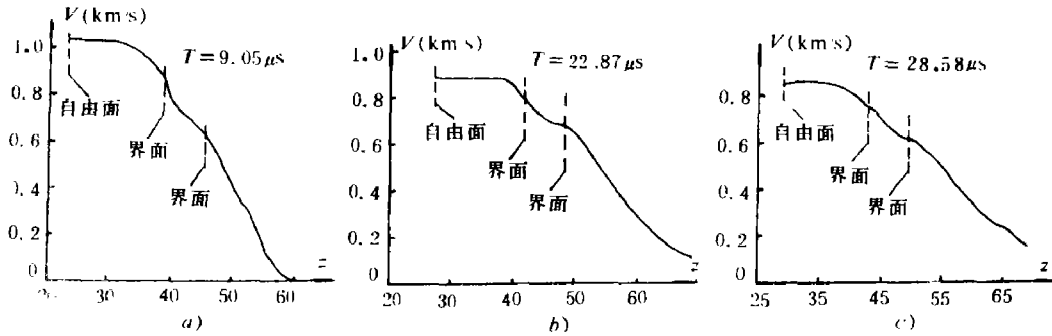


图4 对称轴上轴向速度分布

图5是一个典型时刻 $t = 28.6 \mu s$ 时复合弹体内的拉应力分布。在此时刻以前,拉应力网格仅在弹体底部少数区域出现,这是由弹中轴向追赶稀疏波和加载波在底部自由面的反射稀疏波相互作用而引起的。在此以后拉应力网格明显发展,趋势上是在弹体的 $45^\circ$ 度方向附近出现,这同单一弹丸计算时的情形相似。定性地说,这是由于弹体中的侧向稀疏波和轴向稀疏波相互作用的结果,可以认为是一种撞击的二维效应。但由于被帽的作用,拉应力的量值与单一弹体的情形相比较要小得多,基本上拉应力值比单一弹体的拉应力值低一个量级。从这个意义上看,被帽材料对保护弹体是有利的。

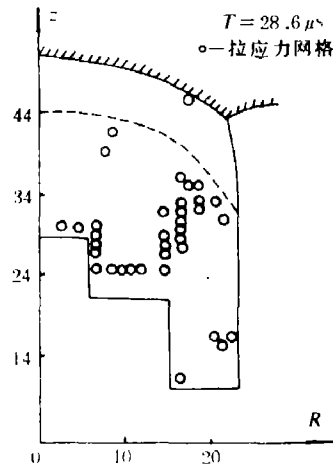


图5 拉应力分布

由于问题十分复杂,无法进行分析求解或提出有把握的近似分析,而眼下又没有直接的实验测量结果,也未见到其它计算方法所得结果,因此计算结果正确性尚无全面检验。但是拉应力区出现的范围,同实验所得的破坏试件比较在方向上是一致的。因此引入了适当的断裂模型和动态材料参数以后,是有希望得到弹体破坏的临界撞击速度的,由于机时的限制,目前尚未进行不同被帽材料下的比较计算,也没有考虑断裂的影响,材料硬化效应的影响及材料粘性效应的影响,还有待于今后进一步的工作。

## 参 考 文 献

- [1] Hageman, L. J., Walsh, J. M. AD-726459(1971).
- [2] 王肖钧、胡秀章、李宗芬, HELP方法在浅埋爆炸计算中的应用, 爆炸与冲击, 5(2)(1985).
- [3] 肖作智, 球面爆轰波的数值模拟, 爆炸与冲击, 5(2)(1985).
- [4] 秦孟兆、谢春生、谈庆明、刘小苹, 破甲临界侵彻的数值研究, 力学学报, 19(2)(1987).
- [5] 王肖钧、胡秀章, 单一弹丸的数值计算, 第一届高速撞击学术讨论会文集, (1984.11).
- [6] Kinslow, R., High-Velocity Impact Phenomena, (1970), 105.

## A PRELIMINARY COMPUTATION FOR THE IMPACT OF A COMPOSITE MISSILE TO THE EARTH BY HELP METHOD

Hu Xiouzhang\* Li Yongchi\* Jin Jingquan\*\*

Wang Xiaojun\* Li Zongfen\*

(\* The Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China)

(\*\* The 14-th Research Institute, Ministry of Space Technology)

**ABSTRACT** Using the elastic-plastic hydrodynamic model, a problem of a composite high velocity projectile impacting at the rock is calculated by the modified two-dimensional HELP code. The geometrical figures of the impinging projectile at early stages and the axial velocity, pressure, stress distribution at typical times and the tensile stress appearing in the projectile at early stages are given. The results may be useful for projectile protection. All these results are compared with the simple projectile and so the effect of protection of the cover material can be estimated.

**KEY WORDS** high velocity impact, composite missile, dynamic stress field, hydro-elasto-plastic dynamics.