

穿甲机理的数值研究

刘小苹

谢春生

秦孟兆

吕德业

(中国科学院力学所)

(西安近代化学所)

(中国科学院计算中心)

(兵器部 52 所)

提要 为了深入开展穿甲机理的研究,本文对三组穿甲问题——钨弹以 1000m/s 打钢靶,钢弹以 1000m/s 打钢靶,钢弹以 1000m/s 打铝靶,作了数值研究。应用流体弹塑性力学模型,二维不定常欧拉型编码 CPG-LTDL code 进行计算,计算结果与试验对比符合良好。

对计算结果的分析指出:(1) 弹丸侵彻能力不是取决于它的整体动能,而是取决于弹靶接触面上的压力,当靶板参数和弹材固定时,可用弹丸初始面积比动能来标志。(2) 铝靶在抗侵彻过程中呈流体状态。高强度铝板的抗侵彻性能不如普通的 A3 钢,因此应致力于研制具有抗高压、耐高温的新型铝材,而不是单纯追求提高铝材的常规强度。

关键词 穿甲弹,侵彻,计算

一、前 言

穿甲机理是研究高速弹丸(900~1500m/s)碰撞靶板,弹靶相互作用的原理。它与弹速、弹径、弹形(弹头形状及细长比)、弹材、靶材和靶厚等诸多因素的匹配有关,是一个十分复杂的问题。对于此类高速碰撞问题,测量手段仅能获得高速过程中的弹靶外形,因此借助数值计算的手段来研究,是一种有效的途径。

本文介绍了应用 CPG-LTDL code^[1]及流体弹塑性力学模型^[2]所作的三组计算:钨弹以 1000m/s 碰撞钢靶,钢弹以 1000m/s 碰撞钢靶,钢弹以 1000m/s 碰撞铝靶,并对结果作了力学分析及试验对比。

二、基本方程

在二维不定常流体弹塑性方程组中采用了下列形式的本构关系、状态方程等:

1. 本构关系

$$\dot{S}_{ij} = 2G\dot{\epsilon}_{ij} + \omega_{ij}$$

其中 G 为刚性模数,取值如表 1^[3]所示。 ω_{ij} 为旋转修正项。

表 1

材 料	Fe	Al	W
G (10^{11} Pa)	0.81	0.274	0.144

本文于 1988 年 1 月 24 日收到,于 1988 年 12 月 9 日收到修改稿。

2. von · Mises 屈服准则

$$S_{ii} : S_{ii} = \frac{2}{3} Y^2$$

3. 强度方程

$$\begin{cases} Y = Y_0 \left(1 - \frac{I}{I_m}\right) & \text{当 } I < I_m \\ Y = 0 & I \geq I_m \end{cases}$$

式中 Y_0 为材料常温常压下动态强度, I_m 为材料熔化比内能, 取值如表 2 所示。

表 2

	钢 弹	钢 靶	铝 靶	钨 弹
Y_0 (10^9Pa)	0.74	0.38	0.489	0.85
I_m (J/kg)	1.30×10^6	1.30×10^6	7.0×10^5	2.28×10^6

4. 状态方程

$$(1) p = A_1 \mu + A_2 \mu^2 + A_3 \mu^3 + B_1 \mu l$$

其中

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$$

该式用于计算钢弹打钢靶及钢弹打铝靶, 系数^[2]见表 3。

表 3

材 料	A_1 (10^{11}Pa)	A_2 (10^{11}Pa)	A_3 (10^{11}Pa)	B_1 (10^3kg/m^3)	ρ_0 (10^3kg/m^3)
Fe	1.236	2.452	5.139	17.16	7.85
Al	0.765	1.559	3.428	5.44	2.79

(2) Tillotson 状态方程

该式用于计算钨弹打钢靶, 材料参数取自文献^[3]。

5. 破坏准则

假设材料由于相对比容 V/V_0 达到一定的值后而破坏, 即比容破坏准则。所用数值列于表 4^[3]。

表 4

	Fe	Al	W
V/V_0	1.03	1.015	1.052
ρ/ρ_0	0.97	0.985	0.95

三、初边值条件及差分网格分布

1. 钨弹打钢靶 ($W \rightarrow Fe$)

钨弹系以高速向前运动, 其运动方向与钢靶表面垂直。

初始条件

	材料	Y_0 (10^9Pa)	密度 ρ_0 (10^3kg/m^3)	z 向速度 v (m/s)	r 向速度 u (m/s)	比内能 I_0 (J/kg)	弹 长 (或靶厚)	弹 径 (或靶径)
钨弹	W 合金	0.85	18.0	1000	0	6.36943	40mm	4mm
钢靶	A3	0.38	7.85	0	0	3.88888	20mm	80mm

边界条件(见图 1):

GC 弹靶界面, 压力及速度连续.

FA 对称轴, $u = 0$, 剪应力 $\tau = 0$.

其它边界均为自由面 $p = 0$, $\tau = 0$.

r 、 z 方向均为不等距网格, I 、 J 为网格格坐标, 具体分割如下:

I	1→4	5→24	25→49
Δr (mm)	0.5	0.75	1.0

J	1→7	8→12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23→100
Δz (mm)	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.75	0.70	0.65	0.60	0.50

2. 钢弹打钢靶 (Fe→Fe)

初始条件

	材 料	Y_0 (10^9Pa)	v (m/s)	u (m/s)	I_0 (J/kg)	弹 长 (或靶厚)	弹 径 (或靶径)	ρ_0 (10^3kg/m^3)
钢弹	45#钢	0.74	1000	0	0	30mm	12.7mm	7.85
钢靶	A3 钢	0.38	0	0	0	20mm	80mm	7.85

边界条件(见图 2):

FA 对称轴, $u = 0$, $\tau = 0$.

GC 界面, 弹靶压力及速度连续.

其它边界均为自由面, 满足 $p = 0$, $\tau = 0$.

r 方向不等距分割:

I	1→5	6→35	36	37→49
Δr (mm)	1.05	1.10	1.75	1.00

z 方向等距分割: $J = 1 \rightarrow 100$, $\Delta z = 1 \text{mm}$.

3. 钢弹打铝靶 (Fe→Al)

边界条件及网格划分与 Fe-Fe 相同, 初始条件为:

	材 料	Y_0 (10^9Pa)	v (m/s)	u (m/s)	I_0 (J/kg)	ρ_0 (10^3kg/m^3)	弹长 (或靶厚)	弹径 (或靶径)
钢弹	45#钢	0.74	1000	0	0	7.85	30mm	12.7mm
铝靶	LY12	0.489	0	0	0	2.79	20mm	80mm

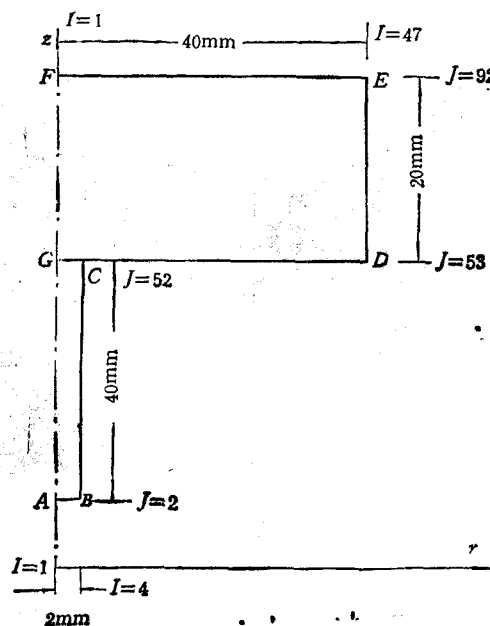


图 1

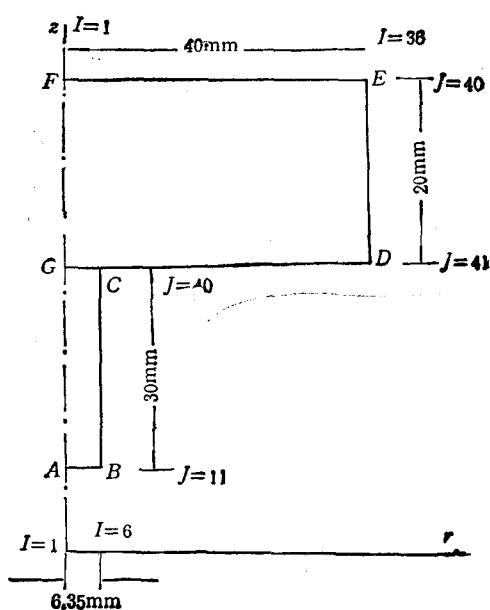


图 2

四、计算结果及与试验对比

1. 关于侵彻过程中的弹靶形态

计算所得 W-Fe 1000m/s 侵彻形态为: 侵彻孔直径上下基本相同, 孔径约是弹径的两倍。以试验弹弹速为 1012m/s 的高速摄影照片与计算形态对比, 测出弹靶的相对位置(表 5)及三种弹速试验弹穿靶的出入口尺寸(表 6)。对比可见计算与试验结果一致。

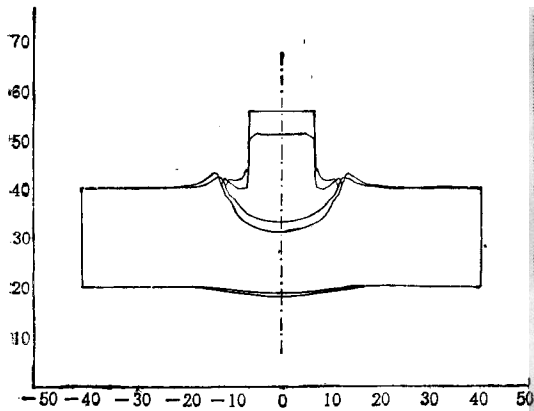
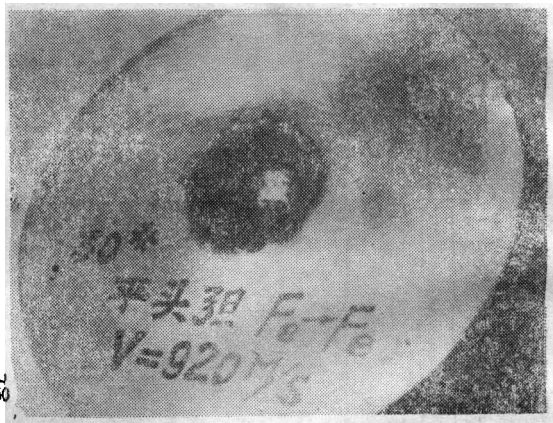
表 5 不同时刻弹靶相对位置对比

	试 验	计 算	试 验	计 算	试 验	计 算	试 验	计 算
t (μs)	9.25	10.0	20.35	20.0	29.6	30.0	40.7	40.0
弹尾至靶面距离 (mm)	32.81	30.00	21.38	20.05	11.76	10.175	弹尾已进入靶内	弹尾已进入靶内
误差		8.56%		6.22%		13.5%		—

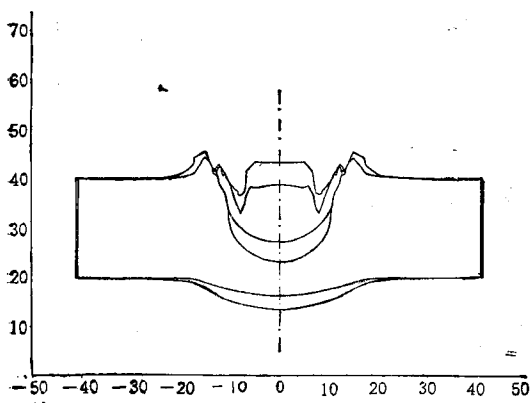
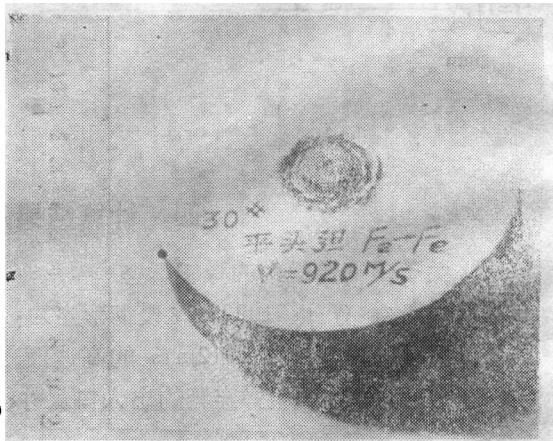
图 3 描述钢弹以 1000m/s 速度打击钢靶, 着靶后 $t = 15, 20, 30, 40 \mu\text{s}$ 时的形态。在侵彻过程中钢弹由圆柱形变成类似半球形, 靶板的变形以开坑为主。靶面坑口直径 $25\text{mm} \approx 2$ 倍弹径, 弹丸堆积头直径 21mm, 堆积深度 10mm。试验所得相应数据列

表 6 试验弹孔数据

弹 速 (m/s)	917	940	1012
弹孔入口直径 (mm)	7.0	7.5	7.0
弹孔出口直径 (mm)	7.0	7.7	8.0

图 3-1 Fe-Fe 1000m/s $T = 15\mu s$ $T = 20\mu s$ 

照片 1

图 3-2 Fe-Fe 1000m/s $T = 30\mu s$ $T = 40\mu s$ 侵彻图形

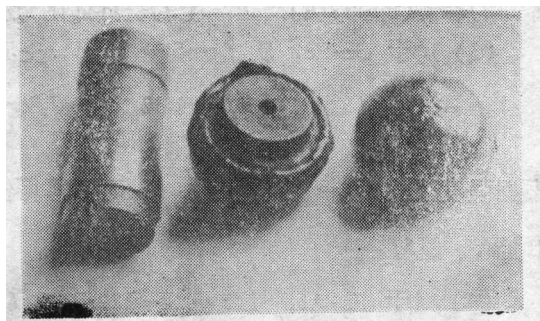
照片 2

表 7

弹 速 (m/s)	弹丸堆积头直径 (mm)	弹丸堆积头深度 (mm)	弹坑直径 (mm)
890	19.2	10.5	20.2
~900	19.1	10.7	20.4
920	19.3	10.8	21.1

于表 7, 试验弹坑及残余弹丸形态见下列照片。有趣的是计算所得堆积态的弹丸, 在其侵彻顶端处略有内凹, 亦与试验现象一致。

Fe-Al 的计算得到在 $t = 35\mu\text{s}$ 时, 弹丸的侵彻深度已等于靶厚, 而同样的弹丸, 此时刻侵彻钢靶的深度为 14.8 mm. 试验钢弹 890m/s 击穿 20mm 厚的 LY12 铝靶, 而侵彻钢靶的深度为 14mm (见下列照片). 计算与试验一致: 高强度的铝靶抗侵彻能力不如低强度的钢靶.

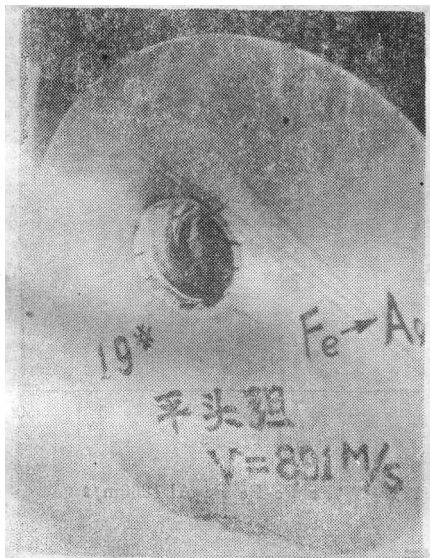


照片 3 试验用平头钢弹及其侵彻后的残余弹丸

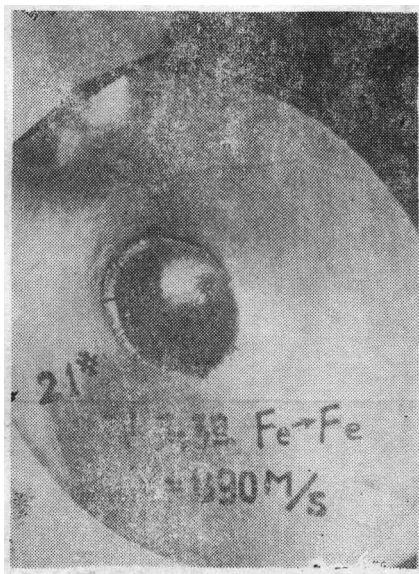
2. 侵彻过程中弹靶内的压力状况

在碰撞早期弹靶中均产生冲击波,但在 $2 \sim 5\mu\text{s}$ 内即消失,因此对侵彻的影响可以忽略.此计算结果与文献[6]一致.冲击波仅造成靶板表面及弹头部分材料的流体状态及大塑性流动状态,表现为开坑的圆形及靶板的翻唇,以及碰撞早期弹靶材料的飞溅现象等.

弹丸侵彻在靶中形成高压区,该区域中的压力 $p \gg$ 材料强度 Y_t ,致使材料强度可以忽略,或材料处于大塑性流动状态.三组计算所得为:



照片 4 Fe-Al 891m/s 靶穿



照片 5 Fe-Fe 890m/s 坑形

W-Fe	在 $t = 2 \rightarrow 30\mu\text{s}$	高压区在侵彻弹头前约一倍弹半径范围内
Fe-Fe	$5 \rightarrow 20$	高压区在侵彻弹头前约一倍弹半径范围内
Fe-Al	$3 \rightarrow 15$	高压区在侵彻弹头前约一倍弹半径范围内

$$p = (10 \rightarrow 5)Y_t$$

$$p = (6 \rightarrow 3)Y_t$$

$$p = (4 \rightarrow 1.5)Y_t$$

3. 关于 Fe-Fe、Fe-Al 靶中比内能的计算结果

(1) 从 $t = 0$ 至 $1\mu\text{s}$ 内, 靶中最大比内能 $I_{\max}$ 位于对称轴附近的击波阵面上. $t = 0.5\mu\text{s}$ 时得比内能最高值: Fe-Fe 为 $3.01 \times 10^5 \text{J/kg}$, Fe-Al 为 $3.02 \times 10^5 \text{J/kg}$.

(2) 从 $t = 1.5\mu\text{s}$ 开始, 二组问题的全场比内能最大值 $I_{\max}$ 从靶中心移至弹靶交

界面的右侧(即弹丸的周边与靶的交界面附近),直至侵彻终了。

(3) 对于 Fe-Fe, 从 $t = 5 \rightarrow 30 \mu s$, 交界面右侧最大比内能平均值

$$\bar{I}_{\max} = 2.32 \times 10^5 \text{ J/kg}, \quad \frac{\bar{I}_{\max}}{I_m} = 17.9\%,$$

根据强度公式 $Y = Y_0 \left(1 - \frac{I}{I_m}\right)$, 可估算得侵彻过程中钢靶强度下降至 $Y = 0.312 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。

(4) 对于 Fe-Al, 从 $t = 3 \rightarrow 22.5 \mu s$, $\bar{I}_{\max} = 2.58 \times 10^5 \text{ J/kg}$, $\frac{\bar{I}_{\max}}{I_m} = 36.8\%$, 估算铝靶强度下降至 $Y = 0.309 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。

4. 三组计算的侵彻速度和侵彻深度随时间的变化见图 4 和图 5。

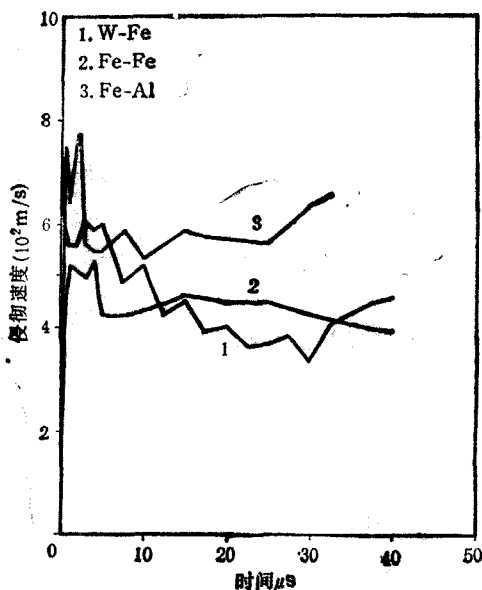


图 4 W-Fe Fe-Fe Fe-Al 1000m/s

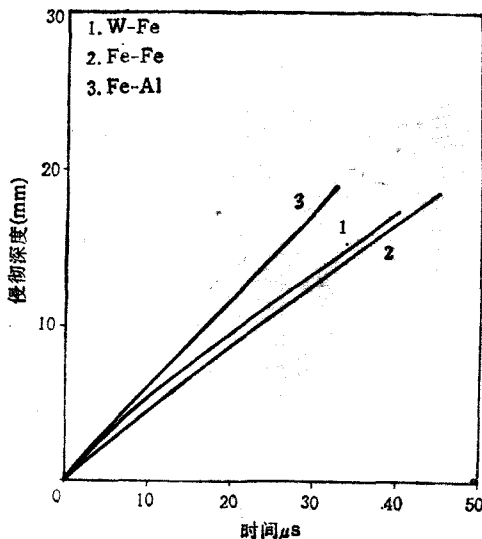


图 5 W-Fe Fe-Fe Fe-Al 1000m/s

五、计算结果分析

1. 关于弹丸侵彻能力的分析

将 W-Fe 与 Fe-Fe 的计算结果对比, 钨弹的侵彻能力强于钢弹(见图 5 侵彻深度~时间曲线)。试验结果亦是如此: 917m/s 钨弹击穿厚 20mm 的 A3 钢板, 而 920m/s 钢弹未击穿。

在这两组计算中所取靶板参数相同, 弹速相同, 弹材强度接近, 仅弹丸的密度和细长比不同。两种弹丸的动能之比为

$$\eta_1 = \frac{\frac{1}{2} m_W v_p^2}{\frac{1}{2} m_{Fe} v_p^2} = \frac{m_W}{m_{Fe}} = \frac{(0.4)^2 \cdot 4 \cdot 18}{(1.27)^2 \cdot 3 \cdot 7.85} = 0.303$$

即钨弹的总动能仅是钢弹的 30%。由图 4 和图 5 可知两组计算所得侵彻速度 v_G 接近, 所以侵彻过程中两种弹丸对靶板的孔底动压之比约为

$$\eta_2 = \frac{\frac{1}{2} \rho_W (v_P - v_G)^2}{\frac{1}{2} \rho_{Fe} (v_P - v_G)^2} = \frac{\rho_W}{\rho_{Fe}} = \frac{18.0}{7.85} = 2.29$$

即钨弹侵彻钢靶的动压是钢弹的两倍。于是分析认为: 称为动能弹的穿甲弹丸在侵彻中厚靶板时, 其效果取决于弹靶接触面上的压力, 而不是弹丸的初始动能。因此选择适当细长比的杆式弹形, 较高的弹丸密度, 使弹材具有较高的抗压强度和低塑性, 以及提高弹速等, 均可以提高弹靶接触面上的压力, 增强侵彻效果。当靶板参数固定, 弹材参数固定, 仅弹速 v_P 、细长比 L_0/S_0 可调时, 则弹丸的初始比动能——单位面积的动能, 可标志弹丸的侵彻能力。

2. 关于靶板抗侵彻能力的分析

Fe-Fe 与 Fe-Al 的计算结果表明, 在同样的钢弹作用下, 强度高的铝靶的抗侵彻能力低于强度低的钢靶(见图 5)。为了分析这个现象, 将弹靶材料均作为理想不可压缩流体, 获得图 6—图 8 中虚线所示的流体介。将它们与流体弹塑性的数值介对比, 发现 Fe-Al 的结果与流体介基本一致, 其它两组均有偏离, 说明在侵彻过程中铝靶基本上呈流体性态。

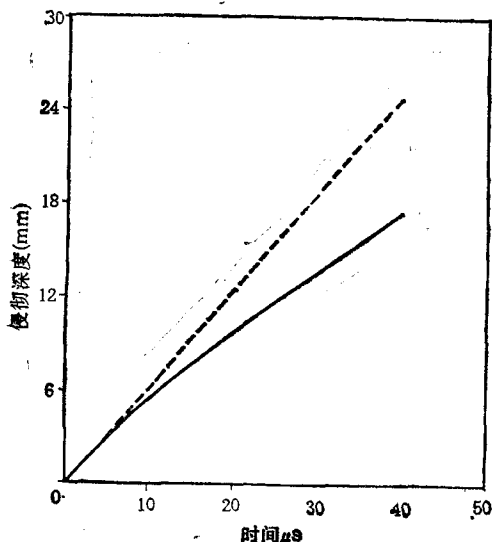


图 6 W-Fe 1000m/s 数值解与理想流体解对比,理想流体结果

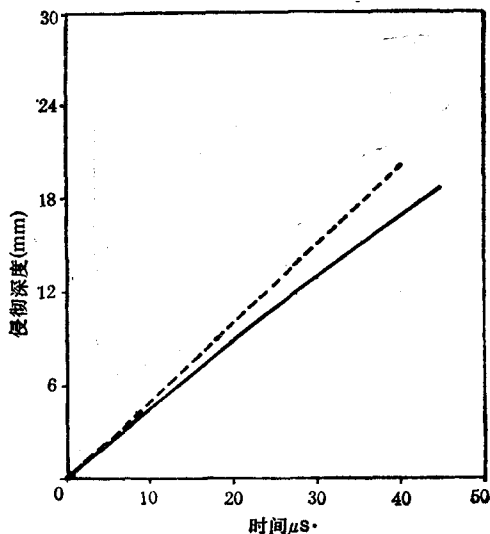


图 7 Fe-Fe 1000m/s 数值解与理想流体解对比,理想流体结果

从关于比内能的计算结果已知, 由于铝材的温度敏感性, 在侵彻过程中其强度已降至接近钢靶的强度。因此两者抗侵彻能力的差异主要是由于密度的不同造成的, 密度小的铝靶出现流体性态, 说明靶板的抗侵彻能力主要依靠材料的惯性, 强度是其次的因素。只有在一定的靶材密度前提下, 强度才能发挥作用, 如 W-Fe, Fe-Fe 的情况。因此对于铝靶用提高其常规强度以增强抗侵彻能力的途径是不妥的, 需改变铝材的热敏感性, 研制具

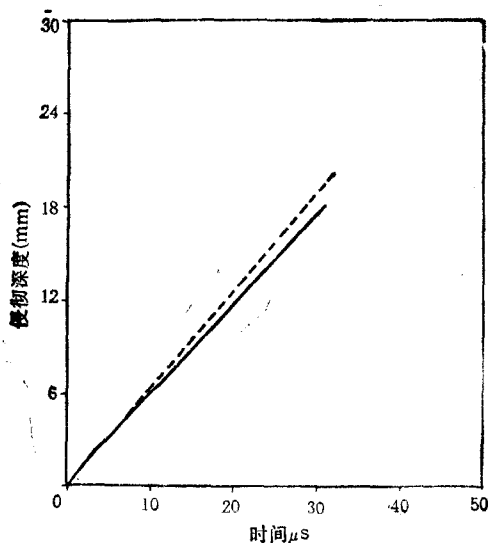


图 8 Fe-Al 1000m/s 数值解与理想流体解对比.....理想流体结果

有高抗压强度、抗高温 (Fe-Al 残余弹丸头部包着一层镀铝,说明侵彻过程中弹靶接面上的温度高于铝的熔点)又有一定韧性的轻质新材料。

参 考 文 献

- [1] 郑哲敏,段祝平等,破甲过程初步分析及一些基础知识,力学情报, 5, 6(1973).
- [2] Hageman, L. J., et. al., HELP code solution of two test problems in armor penetration, AD 725998 (1971).
- [3] Hageman, L. J., Walsh, J. M., HELP, A multi-material Eulerian program for compressible fluid and elastic-plastic flow in two space dimensions and time, I, May (1977), AD. 726460, II, FORTRAN listing of HELP.
- [4] 秦孟兆,谢春生等,二维不定常流体弹塑性问题数值计算的应用软件,数值计算与计算机应用,5,3(1984). (已被收录为美国政府报告,编号 AD-A159 392).
- [5] 谢春生,秦孟兆,刘小苹,吕德业,HELP 的改进 (CPG-LTDL) 及穿甲计算,西安近代化学研究所内部报告.
- [6] 刘小苹,周晓蔚等, Numerical simulation of projectile penetration at high speed, 强动载荷及其效应国际会议论文集,(1986).

NUMERICAL STUDY ON PROJECTILE PENETRATION MECHANISM

Liu Xiao-ping

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

Xie Chun-sheng

(*Xian Modern Chemical Institute*)

Qin Meng-zhao

(*Computational Center Academia Sinica*)

Lu De-ye

(*52th Institute Military Ministry*)

Abstract In this paper, the numerical study is carried out for three test problems of projectile penetration; a tungsten projectile impacting on a steel target at 1000 m/s, a steel projectile impacting on a steel target at 1000 m/s, and a steel projectile impacting on an aluminium target at 1000 m/s. The basic equations of compressible fluid and elastic-plastic flow in two dimensions and Eulerian typical CPG-LTDL code are used in the numerical calculation. The results of computation are in good agreement with the experimental results.

Analysis of the computed results showed: (1) the penetration capacity of projectile is independent on the kinetic of the whole projectile, but dependent on the pressure on the interface of the projectile and target. When the parameters of target and projectile material are given, the penetration capacity of projectile can be indicated by initial specific kinetic energy of projectile. (2) the aluminium target in penetration process behaves like fluid. The penetration resistance capacity of the high strength aluminium target is lower than the A3 steel target. Thus it is shown that the effort should be concentrated on obtaining a new type material of aluminium which can resist high pressure and high temperature of projectile penetration, but not only on increasing the normal strength of aluminium target.

Key words projectile, penetration, compute