

文章编号: 1000-5773(2001)02-0097-06

# 钨珠在穿靶过程中破损问题的数值研究

曹菊珍, 李恩征, 王 政

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**摘要:**使用二维有限元法,研究了  $\phi 6\text{mm}$ 、 $\phi 8.5\text{mm}$  的预制破片(钨珠、钢珠)以不同速度在稠密气体中飞行时的破损问题,初步确定了珠子破损的阈值速度。研究表明,破损的程度与珠子的速度、材料、大小有密切关系。同时还研究了破损了的破片对 6mm 厚钢靶的穿透能力。

**关键词:** 破片; 破损; 数值模拟

**中图分类号:** O385      **文献标识码:** A

## 1 引 言

常规武器中往往用爆轰来加速飞片(如钨珠、钢珠),使加速了的飞片去碰撞目标,达到毁伤目标的目的。但是实践证明,有时飞片在碰撞目标前已经破碎,大大影响了武器对目标的毁伤效果。这种破碎主要是由于飞片被驱动时冲击波传入飞片中,当冲击波到达背面、侧面时,反射稀疏波的作用使飞片有一种向外的拉力,当拉力大于飞片的抗拉强度时就会发生破裂。这个问题的存在也涉及到飞片设计的指标。一味地追求飞片的高速度未必能达到好的效果,因为速度越大,飞片碎裂的可能性就越大。期望有个阈值速度存在,若设计的飞片速度低于阈值就能保证飞片不碎。然后,在低于阈值速度范围内尽可能地增加飞片的速度。事实上,有些飞片即使出现破裂,但不严重,其对目标的侵彻、穿透能力下降不多,这样的飞片也可认为是有效破片。我们从碎裂阈值及有效破片两方面着手,作些数值研究,从而得到一些定性的看法,给设计破片者提供参考。

## 2 破片的本构关系

本工作的重点是研究破片(钨珠、钢珠)的破损,因此在本构方程中必须引进珠子的破损机制,我们使用有限元 LTZ-2D 程序来研究珠子穿靶的破损问题。

在有限元 LTZ-2D 程序中,首先把计算的区域划分成三角形或四边形单元,然后把单元的质量分配给单元的节点,给出每个节点的初始速度或炸药的起爆条件,算出节点的位移和速度,进而计算单元的应变、应变率、应力,然后再把应力分配给节点,由运动方程  $F = ma$  ( $F$  为力,  $m$  为质量,  $a$  为加速度)算出新的速度和位移,如此往复循环。在 LTZ-2D 程序中,金属材料的本构关系考虑了损伤断裂机制,断裂判据是当塑性应变累积到某一个确定值时就认为断裂。大量的程序运算是计算弹塑性应力、应变、应变率、剪切应力、剪应变等。LTZ-2D 程序特别适于计算弹体对薄靶的穿透问题,计算中使用的几个关键的本构关系如下。

收稿日期: 1999-12-29; 修回日期: 2000-09-04

基金项目: 中国工程物理研究院基金(20000107)

作者简介: 曹菊珍(1941—),女,研究员。

## 2.1 材料强度(最大流动应力 $\sigma_{\max}$ )

材料的最大流动应力为

$$\sigma_{\max} = (C_1 + C_2 \bar{\epsilon}_p^N)(1 + C_3 \ln \dot{\epsilon})(1 - T^* M) + C_4 \bar{p}$$

式中:  $C_1, C_2, C_3, C_4, M, N$  为材料常数;  $\bar{\epsilon}_p$  为等效塑性应变( $t^n$  时刻的量);  $\dot{\epsilon}$  为应变率( $t^{n+1}$  时刻的值);  $\bar{p}$  为  $t^n$  时刻单元流体力学静压力;  $T^* = T^{n+1} - T_0 / (T_m - T_0)$ ,  $T^{n+1} = T_1 + E_S / (c \rho_0)$ ,  $T_0$  为室温,  $T_1$  为初温,  $T_m$  为熔化温度,  $c$  为比热,  $\rho_0$  为材料初始密度,  $E_S$  为内能。

## 2.2 等效塑性应变 $\bar{\epsilon}_p$

材料等效塑性应变为

$$\bar{\epsilon}_p = \sum_i \bar{\epsilon}_p \Delta t$$

等效塑性应变率  $\dot{\bar{\epsilon}}_p$  为

$$\dot{\bar{\epsilon}}_p = \sqrt{(2/9)[(\dot{\bar{\epsilon}}_r - \dot{\bar{\epsilon}}_z)^2 + (\dot{\bar{\epsilon}}_r - \dot{\bar{\epsilon}}_\theta)^2 + (\dot{\bar{\epsilon}}_z - \dot{\bar{\epsilon}}_\theta)^2 + (3/2)(\dot{\bar{\gamma}}_{rz}^2 + \dot{\bar{\gamma}}_{r\theta}^2 + \dot{\bar{\gamma}}_{z\theta}^2)]}$$

式中:  $\dot{\bar{\epsilon}}_r, \dot{\bar{\epsilon}}_z, \dot{\bar{\epsilon}}_\theta, \dot{\bar{\gamma}}_{rz}, \dot{\bar{\gamma}}_{r\theta}, \dot{\bar{\gamma}}_{z\theta}$  分别为  $r, z, \theta$  方向及  $r-z, r-\theta, z-\theta$  平面的塑性应变率。它们都与正应变率、塑性应变率、剪切应变率有关, 具体表达式可参考文献[1]。

## 2.3 流体静压计算公式

(1)  $\mu \geq 0$  时 ( $\mu = \rho^{n+1} / \rho_0 - 1$ )

$$\begin{cases} p_1 = (k_1 \mu + k_2 \mu^2 + k_3 \mu^3)(1 - 0.5 \Gamma \mu) \\ p^{n+1} = p_1 + \Gamma(1 + \mu) E_S^{n+1} \end{cases}$$

(2)  $\mu < 0$  和  $p > p_{\min}$  (材料允许的最小负压) 时

$$\begin{cases} p_1 = k_1 \mu (1 - 0.5 \Gamma \mu) \\ p^{n+1} = p_1 + \Gamma(1 + \mu) E_S^{n+1} \end{cases}$$

(3)  $\mu < 0$  和  $p = p_{\min}$  时

$$p^{n+1} = p_{\min}$$

式中:  $\Gamma$  为 Grüneisen 函数;  $k_1, k_2, k_3$  为由实验确定的常数;  $E_S^{n+1}$  为  $t^{n+1}$  时刻的内能, 它与  $E_S^n$ 、正应力、体积应变率等有关, 详细内容可参见文献[1, 2]。

## 2.4 单元损坏判据

当单元中满足  $-(p^n + Q^n) \geq S_f$  时, 认为该单元已受损。其中  $S_f$  为材料允许的层裂强度,  $Q$  为人为粘性压力。这里的  $p^n + Q^n$  为负, 即为拉伸应力。也可用允许最小断裂应变值  $\epsilon_{0,f}$  来确定单元是否断裂。  $\epsilon_f$  为

$$\epsilon_f = (D_1 + D_2 e^{D_3 p^*})(1 + D_4 \lg \bar{\epsilon}_p)(1 + D_5 T^*)$$

式中:  $p^* = -(p^n + Q^n) / \sigma_{\max}$ ,  $p^*$  为无量纲量;  $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5$  为由实验确定的常数。若  $\epsilon_f > \epsilon_{0,f}$ , 则单元为断裂。

## 2.5 材料参数

钢及钨的有关本构参数见表 1。

表 1 本构参数

Table 1 Constitutive parameter

Material	$\rho_0$ /(g/cm <sup>3</sup> )	$c$ /[kJ/(kg·K)]	$T_0, T_1$ /(K)	$T_m$ /(K)	$G$ /(GPa)	$C_1$ /(GPa)	$C_2$ /(GPa)	$N$
Fe	7.82	0.4778	294	1790	77.5	1.5	0.509	0.26
W	18.5	0.134	294	172	124	1.5	0.177	0.12
Gas	0.008	1.67	294	—	$0.689 \times 10^{-5}$	—	—	—
Material	$C_3$	$M$	$C_4$	$K_1$ /(GPa)	$K_2$ /(GPa)	$K_3$ /(GPa)	$\Gamma$	$D_1$
Fe	0.014	1.03	0	164	294	499	1.16	-0.8
W	0.016	1	0	302	470	335	1.43	0
Gas	—	—	—	$0.689 \times 10^{-5}$	0	$0.27 \times 10^{-4}$	4.0	—
Material	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$S_f$	$\epsilon_{0,f}$		
Fe	2.1	-0.5	0.002	0.61	$0.57 \times 10^{10}$	0.035		
W	0.33	-1.5	0	0.022	$0.676 \times 10^{10}$	0.022		
Gas	—	—	—	—	—	—		

### 3 计算结果

利用材料本构关系及参数,用二维拉氏有限元 LTZ-2D 程度计算了  $\phi 6\text{mm}$  的钨珠以不同驱动速度在气体中飞行时的破片自损情况。为使问题简化,没有详细计算驱动过程,只给出珠子初速  $v_0$ ,与真实的驱动过程有差异。计算中采用的气体密度为  $0.008\text{g/cm}^3$ ,为空气密度的 8 倍。剪切模量  $G$ 、Grüneisen 参数  $\Gamma$  等见表 1。作者由于缺乏真实空气的参数值,故采用比空气稠密的气体代替,这种稠密气体的一些参数由文献[1]中查得。计算中选用稠密气体的厚度为  $200\text{mm}$ 。表 2 为  $\phi 6\text{mm}$  钢珠穿过  $200\text{mm}$  厚稠密气体后珠子的损耗情况。下标 0 表示初始值,1 表示穿过  $200\text{mm}$  厚稠密气体层后的值。表 3 给出了  $\phi 6\text{mm}$  钨珠穿过  $200\text{mm}$  厚稠密气体后破片的损坏情况。图 1 为  $\phi 6\text{mm}$  钢珠、 $\phi 6\text{mm}$  钨珠穿过  $200\text{mm}$  厚气体层后破片破损图。

表 2  $\phi 6\text{mm}$  钢珠穿过  $200\text{mm}$  厚稠密气体后珠子损坏情况 ( $m_0 = 0.8696\text{g}$ )Table 2 The damage degree of  $\phi 6\text{mm}$  steel balls after perforating a  $200\text{mm}$  thick gas layer ( $m_0 = 0.8696\text{g}$ )

$v_0$ /(km/s)	$E_0$ /(J)	$m_1$ /(g)	$v_1$ /(km/s)	$E_1$ /(J)
0.5	108.7	0.8697	0.4985	108.0
0.8	278.2	0.8697	0.7978	276.8
1.0	434.8	0.8697	0.9972	432.0
1.2	626.2	0.8697	1.1967	622.7
1.5	991.2	0.798	1.467	859.0
1.8	1408.8	0.798	1.769	1214.97
2.0	1739.3	0.714	1.938	1341.3

表 3  $\phi 6\text{mm}$  钨珠穿过 200mm 厚稠密气体后破片损坏情况 ( $m_0 = 2.057\text{g}$ )

Table 3 The damage degree of  $\phi 6\text{mm}$  W balls after perforating a 200mm thick gas layer ( $m_0 = 2.057\text{g}$ )

$v_0/(\text{km/s})$	$E_0/(\text{J})$	$m_1/(\text{g})$	$v_1/(\text{km/s})$	$E_1/(\text{J})$
0.5	257	2.057	0.499	257
0.8	658	2.057	0.799	657
1.5	2313.7	1.56	1.463	681
1.8	3332	1.69	1.770	2647
2.0	4113	1.17	1.938	2206

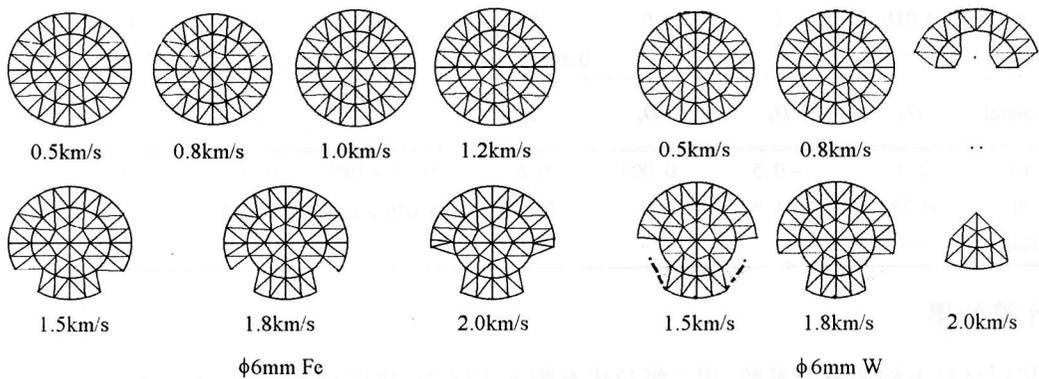


图 1 不同速度的钢珠及钨珠穿过 200mm 厚气体层后珠子破损图

Fig. 1 The damage degree of  $\phi 6\text{mm}$  W and Fe balls after perforating a 200mm thick gas layer with different velocities

由表 2、表 3、图 1 可见,对于  $\phi 6\text{mm}$  钢珠,速度大于  $1.5\text{km/s}$  时珠子明显出现破损,此时珠子质量损耗为原珠子质量的 10%,珠子动能损耗 14%;速度为  $2.0\text{km/s}$  时,珠子质量损耗 18%,动能损耗 23%。对于钨珠,速度为  $1.2\text{km/s}$  时出现明显破损,质量损耗 35%,动能损耗 34%;当钨珠速度为  $2.0\text{km/s}$  时,珠子裂成两块,此时质量损耗达 45%,动能损耗达 47%。

破损了的破片对 6mm 厚钢靶的穿透能力见表 4。下标 0 表示初始值,1 表示穿透 200mm 气体后的值,2 表示穿过复合靶后的值。

表 4  $\phi 6\text{mm}$  钨珠以不同速度穿过 200mm 气体和 6mm 钢复合靶后破片质量、速度损耗 ( $m_0 = 2.057\text{g}$ )

Table 4 The remained mass and velocity of  $\phi 6\text{mm}$  W balls after perforating a 200mm thick gas layer and a 6mm steel target ( $m_0 = 2.057\text{g}$ )

$v_0/(\text{km/s})$	$m_1/(\text{g})$	$v_1/(\text{km/s})$	$m_2/(\text{g})$	$v_2/(\text{km/s})$	$E_2/(\text{J})$
0.5	2.057	0.499	—	—	—
0.8	2.057	0.799	0.784	0.3036	203.9
1.5	1.56	1.463	0.134	1.063	106.6
1.8	1.69	1.770	0.023	1.185	33.41
2.0	1.17	1.938	0.3456	1.316	669.4

从表 4 可见,速度为  $2.0\text{km/s}$  时,破片损耗虽严重,但其穿透复合靶的能力还是最强,因为

破片剩余动能达 669.4J。速度为 0.5km/s 时,钨珠不能穿透复合靶。速度在 0.8~1.8km/s 的破片穿透复合靶以后,剩余动能变得较小,而且没规律。

本文中还计算了  $\phi 8.5\text{mm}$  的钨珠穿过复合靶(200mm 厚的气体及 6mm 厚的钢)后的情况,具体结果见表 5,下标 0 表示初始值,1 表示穿透 200mm 气体后的值,2 表示穿过复合靶后的值。

表 5  $\phi 8.5\text{mm}$  的钨珠穿透复合靶(200mm 气体和 6mm 钢)后钨珠的损伤情况 ( $m_0 = 5.847\text{g}$ )

Table 5 The remained mass and velocity of  $\phi 8.5\text{mm}$  W balls after perforating a 200mm thick gas layer and a 6mm steel target ( $m_0 = 5.847\text{g}$ )

$v_0$	$E_0$	$v_1$	$m_1$	$E_1$	$v_2$	$m_2$	$E_2$
/(km/s)	/(J)	/(km/s)	/(g)	/(J)	/(km/s)	/(g)	/(J)
0.5	730.9	0.49959	5.847	729.17	0	3.2	161.9
0.8	1871.1	0.79935	5.847	1863.14	0.317	1.94	410.455
1.0	2923.7	0.99917	5.847	2918.9	0.650	1.009	431.456
1.2	4210.14	1.19905	5.847	4203.47	0.88587	—	431.456
1.5	6578.35	1.4988	5.847	6567.87	1.17784	1.02	713.56
1.8	9493.01	1.7820	4.564	7250.9	1.39847	0.737	721.29
2.0	11694.8	1.99511	4.564	9274.6	1.74177	0.188	285.9

图 2 为  $\phi 8.5\text{mm}$  的钨珠穿透复合靶(200mm 气体及 6mm 钢靶)后的图像。破损的珠子在穿透 6mm 厚钢靶后继续破损、压碎,因此出钢靶后珠子的质量所剩无几。图 2 中给出初速为 0.8km/s、1.0km/s、1.5km/s 三种情况。从表 5、图 2 可见,  $v_0$  为 2.0km/s 时破片穿透复合靶后的剩余速度达到 1.741km/s,但质量只剩 0.188g,由于速度大,在 6mm 钢靶上打出的洞不比无损伤( $v_0 = 1.0\text{km/s}$ )时小。所以对  $\phi 8.5\text{mm}$  的钨珠穿透 6mm 厚钢靶而言,初速为 2.0km/s 时还是有效破片。

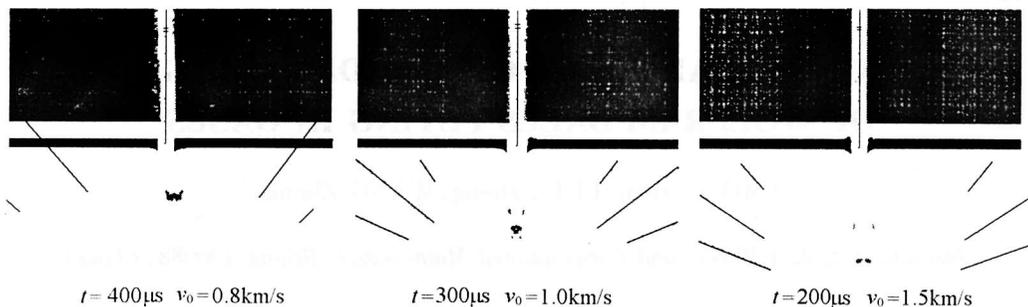


图 2  $\phi 8.5\text{mm}$  的钨珠穿透复合靶的质点图

Fig.2 Computation map of  $\phi 8.5\text{mm}$  W balls perforating combined target with different velocities of 0.8km/s, 1.0km/s, 1.5km/s

从以上结果,可以得到以下几点定性看法。

- (1) 钨珠比钢珠破损的阈值速度低,前者在 1.2km/s 左右,后者在 1.5km/s 左右;
- (2) 初速为 0.5km/s 的钨珠,无论直径是  $\phi 6\text{mm}$  还是  $\phi 8.5\text{mm}$ ,在稠密气体中飞行虽没破损,但都穿不透 6mm 钢靶;

(3)  $\phi 8.5\text{mm}$  钨珠的破损阈值速度比  $\phi 6\text{mm}$  的高;

(4) 对于  $\phi 8.5\text{mm}$  的钨珠在  $v_0 = 1.8\text{km/s}$  时, 钨珠虽有破损, 但穿过复合靶后的剩余动能最大;

(5) 钨珠的初速度大于破损阈值速度时, 速度愈大, 破损愈严重, 因此在设计破片时, 对于  $\phi 8.5\text{mm}$  的钨珠, 其最佳初速为  $v_0 = 1.8\text{km/s}$ 。

#### 4 讨 论

作者曾研究过钨珠侵彻铝靶时的破碎、变形问题<sup>[3]</sup>, 这种破碎属于压碎类型, 而在高速飞行中破片碎裂一般属于拉碎类型。本文中钨珠在穿过气体靶时, 所用气体的密度为空气的 8 倍左右, 借助于本文结果, 可以预测飞片在空气中的破损情况。由于计算结果对参数的依赖性很大, 因此本文的结果只能提供定性参考, 定量上必须通过多次实验, 对参数进行修正和标定。

计算钨珠和钢珠在空气中的飞行规律, 一般的差分程序是难以实现的。因为金属与空气的密度差 5~6 个量级, 这样空间步长的划分有难度。采用有限元方法可弥补这个缺陷, 但在计算时, 滑移线设置的技巧性较强, 设置不好可能会夸大破损的程度。

因此对于这类问题的数值研究, 其计算方法本身还需要进一步探索。但现有的工作可以给出一些相对比较结果和定性变化趋势。由于本文研究的课题难度大, 遗留问题很多, 今后还需进一步努力探索研究。

#### 参 考 文 献:

- [1] Johnson G R. EPIC-2, A Compute for Elastic-Plastic Impact Computations in 2 Dimensions Plus Spin [R]. ARBRLCD-00373, 1978.
- [2] Johnson G R, Cook W H. Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures [J]. Journal of Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31-48.
- [3] 曹菊珍, 周淑荣, 于志鲁, 等. 钨珠对铝靶、钢靶侵彻的数值研究与分析 [J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(3): 199.

## NUMERICAL STUDY ON THE DAMAGING OF WOLFRAM BALLS FLYING IN GASES

CAO Ju-zhen, LI En-zheng, WANG Zheng

( Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China )

**Abstract:** The damage of different ball with the diameters of 6mm(W and Fe) and 8.5mm(W) flying in a gas with different velocity was studied. The damaging threshold velocities of different balls were obtained. The investigation showed that the damage degree of balls depends on the material, velocity and the size of the balls. The perforating ability of damaged balls to 6mm thick steel targets was also studied.

**Key words:** fragment; damage; numerical simulation