

MB₂镁等四种金属材料的本构关系 和动态断裂研究

张万甲 张玉松 宋春香

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 冲击波物理与爆轰物理实验室 成都 610003)

摘要 采用炸药爆轰-分离飞片加载装置与电容传感技术相结合, 由高速示波器连续记录靶板自由面速度剖面, 通过波剖面的时间分辨测量, 研究了 MB₂镁、LY-12铝、钨合金、2169钢四种金属材料的动力学响应特性, 给出了这几种材料在弹性-理想塑性模型假设下的本构关系, 还给出了它们的动态断裂强度, 并对标准化层裂强度与破坏比功、屈服强度之间的相关性进行了分析和讨论。

关键词 本构关系 动态断裂 炸药爆轰加载装置

中图分类号 O 346.1

1 前言

金属材料对动载荷的响应完全受本构关系或动力学状态方程所控制, 本构关系的一般形式为

$$\sigma = \varphi(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) \quad (1)$$

它把流动应力 σ 和应变 ε , 应变率 $\dot{\varepsilon}$ 及温度 T 的现时值联系起来。本构关系与介质的物理、力学特性密切相关, 它既取决于某些宏观参量, 如杨氏模量和粘性系数; 也取决于原子相互作用和位错过程的微观参量, 如位错密度、位错运动速度等。金属和合金在高应变率下的力学实验现象是十分复杂的, 在不同变形阶段, 如弹性变形阶段、塑性变形阶段和冲击熔化后的流体阶段, 本构方程的表达形式是不同的, 加载阶段和卸载阶段的本构关系也是不同的。对控制这些现象的物理机制还不是很清楚, 因而至今, 研究冲击载荷下材料的响应还没有一个统一的本构模型, 而只有在某些限定条件下的本构模型, 如弹-塑性模型、弹-粘塑性模型、粘弹-塑性模型和流体模型等。在中、低的冲击压力下, 常用弹性-理想塑性和弹性-线性硬化两种模型。工程上感兴趣的许多材料, 尤其是金属材料, 能够用弹性-理想塑性模型来近似描述。在弹性-理想塑性模型假设下, 我们对 MB₂镁、钨合金等四种结构材料的本构关系进行了研究, 实验确定了它们的弹-塑性本构关系中的待定材料常数, 如屈服强度 Y 、杨氏模量 E 、剪切模量 G 、体积模量 K 、泊松比 ν 等。在 σ - ε 平面中, 给出了这几种材料的应力-应变曲线。

动态断裂是材料动态响应的重要特性之一。冲击载荷产生的高强度短历时的脉冲应力波穿越靶板传播时, 从靶自由面反射的稀疏波与跟随入射压缩波后的稀疏波在靶内相

遇,产生高幅度的拉伸应力集中区,只要拉伸应力和拉伸持续时间满足一定的条件,层裂现象便会发生。断裂是由于缺陷(孔洞或裂纹)的成核、增长、传播、聚合以致最终形成内部的断裂表面,在累积增长的断裂过程中,新产生的断裂表面需要消耗能量,这可进一步联系到孔洞(或裂纹)增长所作的功和材料的其他力学性质,如动态屈服强度等。作者研究了这几种材料的动态断裂强度、破坏比功,并对标准化断裂强度与屈服强度、破坏比功之间的相关性作了分析、讨论。

2 实验方法

实验装置如图 1 所示^[1],炸药爆轰后,驱动由高冲击阻抗材料和低冲击阻抗材料组合的双层飞片,由于组合飞片界面不能承受拉伸,且由于两者阻抗的显著差异,在起飞时,使二者分离。在以后的空腔飞行过程中,前面很薄的低阻抗飞片以大于后面较厚的高阻抗飞片的速度向前飞行,这样便得到了不再受爆轰产物和高阻抗飞片中波系影响的自由飞行的平板冲击器[图 1(b)所示]。适当选择飞行空腔,实验测量控制在高阻抗飞片击靶之前完成。

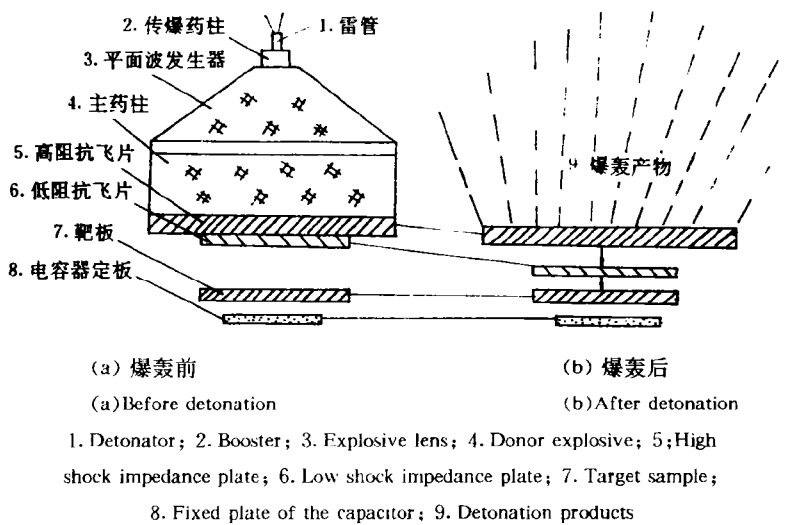


图 1 实验装置

Fig 1 Experimental set up

为了改变靶内的压力幅值,根据界面条件,在线性假设下,高-低冲击阻抗飞片交界面上入射应力和透射应力的分配满足

$$\sigma_r = \frac{2(\rho c)_L}{(\rho c)_L + (\rho c)_H} \cdot \sigma_i \quad (2)$$

式(2)中: σ_i 、 σ_r 表示入射和透射应力, $(\rho c)_H$ 、 $(\rho c)_L$ 表示高阻抗飞片和低阻抗飞片的波阻抗。改变平板冲击片的阻抗和炸药种类,在钢靶板中 1~30GPa 压力范围内,得到了 10 个压力点,即 10 种冲击加载装置。冲击片的厚度,决定了输入脉冲的持续时间,用不同厚度的冲击片,就可以在靶中获得不同持续时间和卸载速率的应力脉冲。由此可知,这种加载装置系列可以人为地控制输入应力脉冲的应力历史,以改变靶板的受力状态。在层裂实验

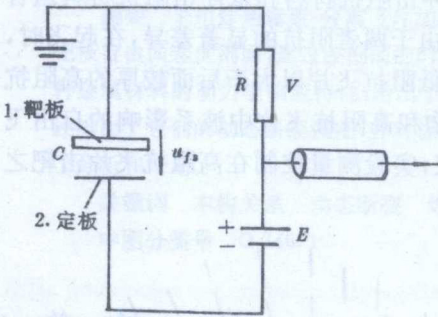
中,也就可改变拉伸脉冲的形状,变化层裂区的受载条件,进而可以实验建立起材料的各种断裂准则。

对于 $\phi 200\text{mm}$ 的实验装置,从靶下表面测的波形得出,未受边侧稀疏影响的范围大于 $\phi 120\text{mm}$,平面性小于 $0.1\mu\text{s}$,冲击器与靶上表面之间的碰撞角小于 0.003 rad 。因此,在电容传感器 $\phi 10\text{mm}$ 的有效测量范围内,可以看作是平面平行正碰撞。

可变电容传感器是由靶样品后自由面和镀金陶瓷定板构成,如图 2 所示,电容器的电极直径为 $\phi 10\text{mm}$,两极之间的距离为 $1\sim 3\text{mm}$,讯号通过阴极跟随器输至示波器,并由触发探针给出飞片击靶时刻的时基讯号,以便计算弹-塑性波速。当靶板导电自由面向前运动时,平板电容器两极间距离变小,电容量增加,电流通过负载电阻向电容充电,在负载电阻 R 上产生的电压降 $V(t)$ 为

$$V(t) = ERu_{fs}(t)dC/dx \quad (3)$$

式中: $u_{fs}(t)$ 为靶板自由面运动速度, E 为电源电压。对于理想平板电容器,电容量对距离的微分 dC/dx 可事先标定。由于电容器反应快,在测量期间,自由面的运动不受阻碍,在一次实验中,测量的速度范围可跨 2 个量级,测量精度小于 5%,因此,这一技术得到了广泛应用。平板电容传感技术可参阅文献[2]。



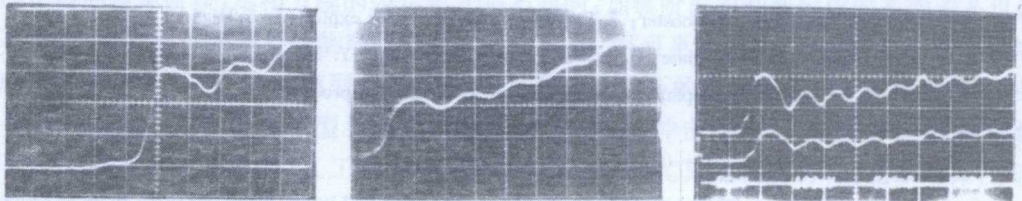
1. Target plate; 2. Fixed plate

图 2 电容传感器原理图

Fig 2 Schematic diagram of the capacitor gauge

按上述实验方法得到的实验照片如图 3 所示。

波剖面讯号表明,尽管加载-卸载过程发生在 $1\sim 2\mu\text{s}$ 之内,但波携带着波源及传播介质物理特性的各种信息,严格按事件发生的先后顺序,传播到自由面,并影响自由面运动的历史。下面我们将进一步讨论,如何从波剖面的时间分辨测量中,定量地研究介质的各种力学特性。



(a) MB_2 镁
(a) MB_2 -Magnesium
 $0.2\mu\text{s}/\text{div}, 0.1\text{v}/\text{div}$

(b) Ly-12 铝
(b) Ly-12-Aluminum
 $0.2\mu\text{s}/\text{div}, 0.2\text{v}/\text{div}$

(c) 2169 钢
(c) 2169 Steel
 $0.5\mu\text{s}/\text{div}$, 上 $50\text{mv}/\text{div}$,
下 $100\text{mv}/\text{div}$

图 3 典型的实验照片

Fig. 3 Typical oscillogram

3 本构关系研究

在均匀材料的平面冲击波测量中,介质的应力-应变状态可表示为

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \varepsilon_x(x, t) \\ \varepsilon_y = \varepsilon_z = 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} \sigma_x = \sigma(x, t) \\ \sigma_y = \sigma_z \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

为了得到应力-应变关系, 设其总的应变由弹性分量和塑性分量两部分组成, 弹性分量只引起体积改变, 是线性的、可逆的; 塑性分量只引起形状改变, 是非线性的、不可逆的。因而其总应变可表示为

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \varepsilon_x^e + \varepsilon_x^p \\ \varepsilon_y = \varepsilon_z = \varepsilon_y^e + \varepsilon_y^p \end{cases} \quad (5)$$

其应变的弹性部分由 Hooke 定律给出

$$\begin{cases} \varepsilon_x^e = (\sigma_x - 2\nu\sigma_y)/E \\ \varepsilon_y^e = [(1-\nu)\sigma_y - \nu\sigma_x]/E \end{cases} \quad (6)$$

由于 $\sigma_y = \sigma_z$, 塑性应变不产生体积变化, 因而有

$$\varepsilon_x^p + 2\varepsilon_y^p = 0 \quad (7)$$

由平面应变的定义, $\varepsilon_y = 0$, 则有

$$\varepsilon_y^e = -\varepsilon_y^p = \frac{1}{2}\varepsilon_x^p \quad (8)$$

将式(8)代入式(6), 给出

$$\sigma_y = \frac{1}{2} \frac{E}{1-\nu} \varepsilon_x^p + \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_x \quad (9)$$

所以在弹性区内, 应力-应变关系简化为

$$\sigma_x = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_x = (K + 4G/3)\varepsilon_x \quad (10)$$

在塑性阶段, 冲击波数据通常借助于一种假设的屈服条件和硬化规律来解释, 对于单轴应变的塑性响应, 由 Von Mises 或 Tresca 准则都可引导出 σ_x 和 σ_y 之间有如下的关系

$$\sigma_x - \sigma_y = \pm Y \quad (11)$$

其中 Y 是屈服应力的现时值, 因为平均应力由下式给出

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{3}(\sigma_x + 2\sigma_y) \quad (12)$$

如是可以得到在压缩期间平均应力和纵向应力之间的关系

$$\sigma_x = \bar{\sigma} \pm \frac{2}{3}Y \quad (13)$$

如果材料没有剪切强度(即“流体动力学”假设), 则平均应力 $\bar{\sigma}$ 可表示为

$$\bar{\sigma} = K\varepsilon_x \quad (14)$$

若采用工程上常用的弹性-理想塑性近似, 即认为不存在应变硬化, 则 $Y = Y_0 = \text{Const}$, 且设 $K = \text{Const}$, 因而可得

$$\sigma_x = K\varepsilon_x \pm \frac{2}{3}Y_0 \quad (15)$$

但是, 当外载荷比较大, 塑性变形比较显著时, 压缩模量 K 有明显的变化, 它是 ε_x 的函数。若将产生体积变化的弹性加载作用 $K\varepsilon_x$ 与描述理想流体的高压 Hugoniot 方程联系起来, 在一维应变中有 $p = K\varepsilon_x$, 则可得到

$$\sigma_x = p \pm \frac{2}{3}Y \tag{16}$$

这里的 Y 是一维应变的屈服强度在应力 σ_x 处的值, σ_x 和 p 对应于同一个体积应变, 如果不考虑应变硬化, 则 $Y = Y_0$ 。(16)式中左边第一项代表流体动力学分量, 第二项是材料剪切强度的贡献。以上的处理方法既考虑了在较高压力下材料体积变化的非线性, 又考虑了材料还有抵抗剪切变形的能力, 这种处理方法称为流体-弹塑性模型。理想弹-塑性模型和流体弹-塑性模型的应力-应变关系如图 4 所示。

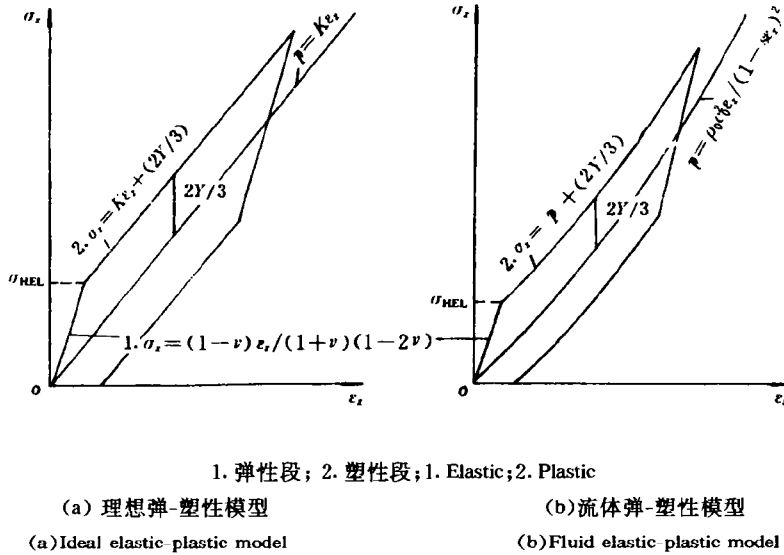


图 4 应力-应变曲线
Fig 4 Stress-strain curve

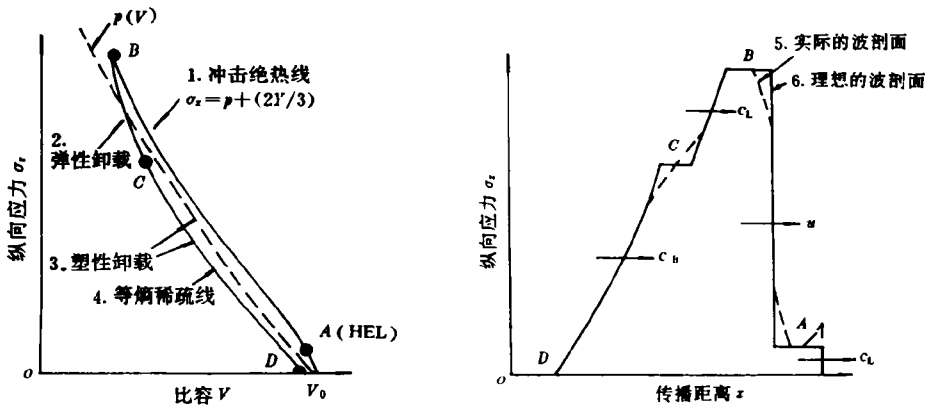
平面应变条件下, 弹-塑性材料的响应周期描述在图 5 中。在加载期间, 材料响应到 A 点 (HEL) 是弹性的, 跟着由塑性压缩到状态 B ; 在卸载期间, 再一次弹性响应到达 C 态, 然后从 C 点塑性卸载至零应力的 D 点。相应的平面压缩波结构表明, 在较低的冲击压缩应力下, 产生一个弹性前驱波, 跟着一个塑性波; 在卸载期间, 弹性稀疏到达状态 C 接着伴随一个连续的塑性稀疏一直卸载到零应力。由此可知, 纵向应力 σ_x 减去流体静压力 p 便可计算出屈服应力 Y , 若流体静压力用高压 Hugoniot 压力表达则

$$p = p_H(\epsilon_x) = \frac{\rho_0 c_0^2 \epsilon_x}{(1 - s\epsilon_x)^2} \tag{17}$$

其中 c_0, s 分别是冲击波-质点速度关系中的截距和斜率, 然后由下面的关系式分别计算出包含在应力-应变关系中材料参数:

剪切模量	$G = Y_0 / (2\epsilon_x)$	
体积模量	$K = p / \epsilon_x$	(18)
杨氏模量	$E = 9KG / (3K + G)$	
泊松比	$\nu = (3K - 2G) / [2(3K + G)]$	

实验确定的 MB_2 镁等四种材料的参数列于表 1。



1. Adiabatics; 2. Unloading elastic; 3. Unloading plastic; 4. Unloading isentropic;
5. Real wave profile; 6. Ideal wave profile

(a) 一维应变下的应力-体积关系 (b) 弹-塑性材料中的冲击波和稀疏波
(a) Stress vs volume for compression and release under uniaxial strain (b) Shock and rarefaction waves in an elastic-plastic material

图 5 冲击压缩下的弹-塑性响应

Fig. 5 Elastic-plastic response under shock compression

表 1
Table 1

材料	$\sigma_{HEL}/$ GPa	$Y_0/$ GPa	$G/$ GPa	$E/$ GPa	$K/$ GPa	ν
MB ₂ 镁	0.24	0.13	16.9	44.0	36.9	0.30
Ly-12 铝	0.57	0.33	37.5	96.8	77.4	0.29
钨合金	3.15	1.4	94.0	255.3	300.4	0.36
2169 钢	1.63	1.5	92.5	236.6	178.1	0.28

从表达式(10)、(15)或(16)式可知,只要把式中的材料常数确定之后,这种材料的应力-应变曲线在 $\sigma-\epsilon$ 平面中的位置就确定了。如果 $\sigma_z-\epsilon_z$ 关系已知,在冲击载荷下,靶板中任一位置的应力和应变随时间的变化,用应力波传播理论,就可以计算出来。更完整的本构模型还应考虑屈服强度 Y 是应变和应变速率相关的,还应计及粘性效应和温度效应^[3],对于这些更复杂的情况,有待进一步研究。

4 动态断裂研究

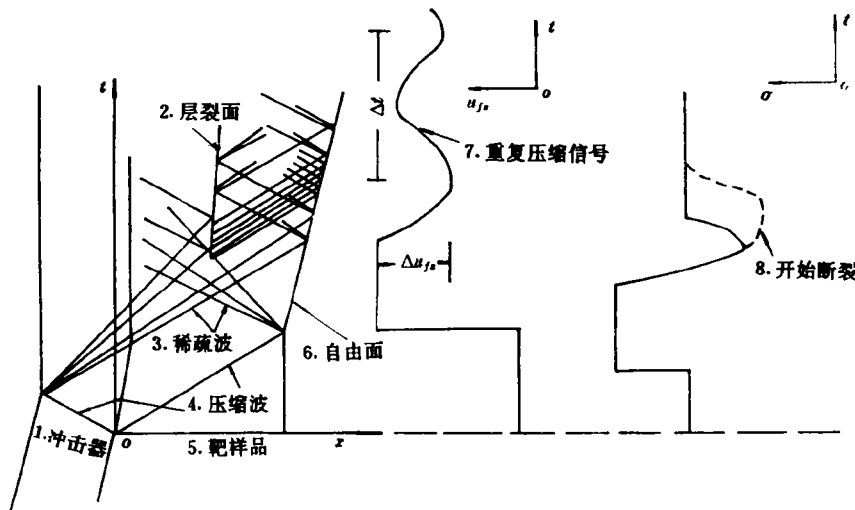
平板撞击实验产生的弹-塑性波系如图 6 所示。平板撞击后($t=0, x=0$ 处)分别在冲击器和靶板中产生一压缩波,当它们达到各自的自由面时,反射两束相向而行的稀疏波,这两束稀疏波的迭加,在靶内部引起局部的拉伸应力,当拉伸应力达到某一幅值时,材料

便发生断裂。断裂一旦发生,材料内部出现新的自由面,使拉伸应力缓解,并向层裂片中传入一个压缩波,使压力回升到常压,密度一般要回到正常值。由层裂效应产生的重复压缩波到达靶的自由面时,使正在下降的自由面速度回升。重复压缩信号是材料内部发生层裂断裂的标志。因此,波剖面的时间分辨测量,能定量地提供层裂强度 σ_f ,层裂片厚 δ 等信息。根据自由面速度下降量 Δu_{fs} 和振荡周期 Δt ,由下面关系式可以确定 σ_f 和 δ :

$$\sigma_f = \frac{1}{2} \rho_0 c \Delta u_{fs} \tag{19}$$

$$\delta = \frac{1}{2} c \Delta t \tag{20}$$

式中: ρ_0 为材料的初始密度, c 为纵波速度。



1. Shock plate; 2. Spallation plate; 3. Rarefaction wave; 4. Compressive wave;
5. Target sample; 6. Free surface; 7. Recompression signal; 8. Initiate spallation

(a) 时间-距离平面上波的相互作用 (b) 自由面上速度-时间曲线 (c) 层裂面上应力-时间曲线
(a) Interaction of waves on time-distance plane (b) Velocity-time profile of the free surface (c) Stress-time profile of the spallation plane

图 6 波的相互作用及在自由面和层裂面上的响应

Fig. 6 Interaction of waves and response at the free surface or spallation plane.

在断裂过程中的能量耗散可联系到材料的破坏比功。在线性假设下,当幅度为 σ_0 、波长为 L_0 的三角形脉冲到达自由面之后,在 $0 < t < L_0 / (2c)$ 的时间区间内,在样品中 $0 < x < ct$ 的区域中存在着拉伸应力,这个应力值随坐标线性增大

$$\sigma = 2\sigma_0 x / L_0 \tag{21}$$

如果在该区存在裂纹,裂纹能够传播开来的条件是弹性应变能的减少量等于裂纹增长产生的两个新表面能的增加,因此,断裂比功 W 表示为^[4,5]

$$W = \int_0^{\delta} \frac{\sigma^2}{2E'} dx = \sigma_f^2 \delta / 6E' \tag{22}$$

其中 $E' = \frac{(1-\gamma)E}{(1+\gamma)(1-2\gamma)}$, 应用 $c = (E'/\rho_0)^{1/2}$ 和 (19) 式得到

$$W = \Delta u_{fs}^2 \delta \rho_0 / 24 \tag{23}$$

按 (23) 式得出的 MB₂ 等几种金属材料的破坏比功值列于表 2。

表 2
Table 2

材料	初始密度 $\rho_0 /$ (g/cm ³)	自由面速 变下降量 $\Delta u_{fs} /$ (mm/ μ s)	层裂片 厚度 $\delta /$ (mm)	层裂强 度 $\sigma_f /$ GPa	标准化层 裂强度 $(\sigma_f / \rho_0) /$ (GPacm ³ /g)	破坏比 功 $w /$ (J/cm ²)	断裂韧度 $K_{0c} /$ (MPa(m) ^{1/2})	屈服强 度 $Y /$ GPa
MB ₂ 镁	1.77	0.28	0.97	1.22	0.69	0.56	—	0.13
Ly-12 铝	2.73	0.20	1.07	1.61	0.59	0.49	25~30	0.33
钨合金	15.7	0.05	0.46	1.70	0.11	0.09	5~11	1.40
2169 钢	7.85	0.21	1.28	3.61	0.46	1.18	34.4	1.50

从表 2 列出数据的比较中看出, 较低的破坏比功, 有较低的 σ_f / ρ_0 值; 较高的破坏比功显示较大的 σ_f / ρ_0 值, 标准化层裂强度随破坏比功的相关曲线如图 7 所示。

从表 2 还可看出, 较硬的材料有较高的 Y 值, 较低的 σ_f / ρ_0 值; 较软的材料有较低的 Y 值, 而有较高的 σ_f / ρ_0 值。同样, 较低的断裂韧度呈现较低的 σ_f / ρ_0 , 而较高的断裂韧度显示较大的 σ_f / ρ_0 值, 用标准化层裂强度作为屈服强度或断裂韧度的关系曲线如图 8、图 9 所示。

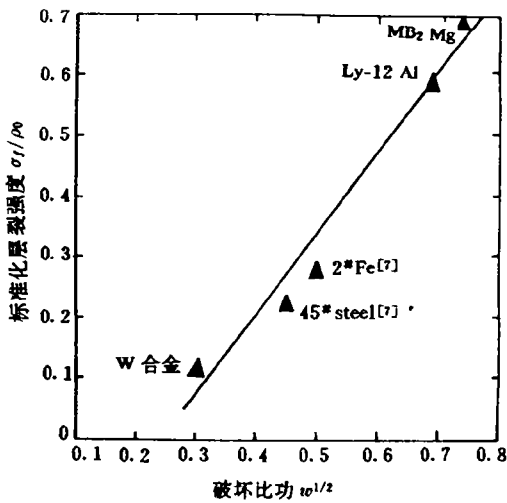


图 7 标准化层裂强度
随破坏比功的变化

Fig. 7 Variation of normalized

spall strength σ_f / ρ_0 vs ratio of fracturing work

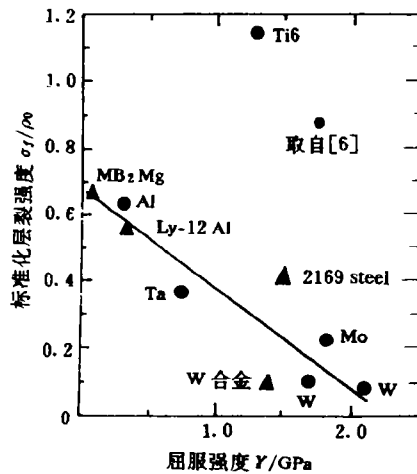


图 8 标准化层裂强度
随屈服强度的变化

Fig. 8 Variation of normalized spall length

σ_f / ρ_0 vs dynamic yield strength

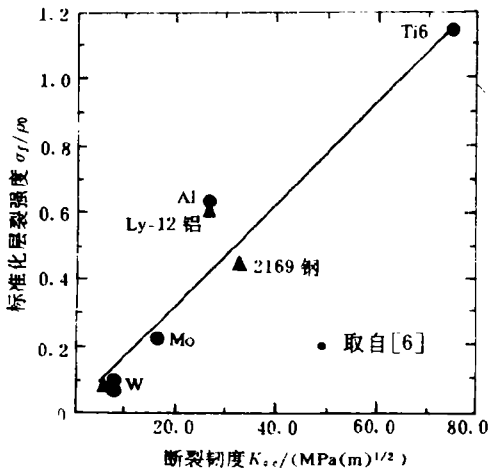


图9 标准化层裂强度随断裂韧度的变化

Fig. 9 Variation of normalized spall strength σ_f/ρ vs fracturing toughness

在标准化层裂强度表示下,MB₂ 镁、Ly-12 铝同钨合金相比,似乎更能阻止冲击载荷引起的断裂,因此, σ_f/ρ_0 可以作为在冲击载荷下,不同材料之间,评估其断裂能力的一种标志。如经受冲击载荷的器件,按破甲的要求,则要选用 σ_f/ρ_0 相对较小的材料作为壳体;而如果按抗冲击加固的要求,则要选用 σ_f/ρ_0 相对较大的材料作为壳体。

动态断裂与介质的物理属性紧密相关, σ_f/ρ_0 能作为断裂能力的一种表征,也可以从材料的物理属性得到解释。从回收样品的微观分析中可知,MB₂ 镁、Ly-12 铝呈典型的延性断裂,而钨合金、钢则呈典型的脆性断裂。在拉伸加载下材料失效,延性方式是通过空洞的成核和增长,有大量的塑性流动;脆性方式是通过裂纹的形成和传播,塑性流动很少。

在延性方式中消耗的能量大大多于脆性方式中消耗的能量。对于延性材料,消耗在空洞增长中的能量与它的屈服强度 Y 相关,对于脆性材料,消耗在裂纹增长和传播中的能量联系到它的断裂韧度 K_{Ic} ,较高的断裂韧度值,材料阻止裂纹增长的能力较大。这就是各种材料之间在动态断裂方面存在显著差异的物理因素。

5 结论

(1) 本文设计的由炸药爆轰驱动高阻材料和低阻抗材料组合的双层飞片低压加载装置系列,能较好地控制输入脉冲的应力历史以改变靶中的受力状态。对材料动态响应特性与冲击加载历史的相关性研究,提供了一种有效的手段。

(2) 文中给出的 MB₂ 镁、Ly-12 铝、钨合金、2169 钢四种金属材料的特性参数和弹塑性理想塑性本构关系,可供工程设计及实验结果评估时参考引用。

(3) 文中给出的 MB₂ 镁、Ly-12 铝、钨合金、2169 钢四种金属材料的标准化层裂强度,是材料其他力学特性(如破坏比功、屈服强度等力学特性)和脆性、韧性断裂等物理机制的一种综合表征,作为在冲击载荷下断裂能力的一种度量,可以作为不同应用目的的选材依据之一。

参 考 文 献

- 1 张万甲. 爆轰波与冲击波,西南流体物理研究所,1985. 3
- 2 Rice. M H. Rev Sci Instr, 1961, 32: 449~451
- 3 Steinberg D J, Lund M C. J Appl Phys, 1989, 65(4):1528~1533
- 4 Gilman J J, Tuler F R. Int J. of Fract Mach, 1970, 6:169~182
- 5 Иванов М А. Ф Г В, 1979, 15(4):131~134
- 6 Chhabildas L C, et al. Int J Impact Engng. 1990, 10:107~124

7 张万甲. 高压物理学报, 1987, (3): 62

STUDIES ON THE CONSTITUTIONAL RELATIONS AND THE DYNAMIC FRACTURE FOR FOUR KINDS OF METAL MATERIALS INCLUDING MB₂-MAGNESIUM

Zhang Wanjia, Zhang Yusong, Song Chunxiang

(*Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research,
Southwest Institute of Fluid Physics, P. O. Box 523, Chengde 610003*)

ABSTRACT The time-resolved motion of the back surface of the target was monitored using an explosive driving device and a capacitor gauge technique. The dynamic response characteristics are studied for the MB₂-magnesium, Ly-12-aluminum, tungsten alloy, 2169-steel. The elastic-ideal plastic constitutional relations and the dynamic fracture strength for these materials are given. The relation between the normalized spall strength and the ratio of the fracturing work as well as yield strength are discussed in this paper

KEY WORDS constitutional relations, dynamic fracture, explosive driving device