文章编号：1000-5773(2003)04-0305-06

D6A、921 和 45 钢的动态破坏与低压冲击特性*

张 林[1]，张祖根[1]，秦晓云[1]，彭建祥[1]，蔡灵仓[1]，李永池[2]

(1. 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，四川绵阳 621900；
2. 中国科学技术大学力学与机械工程系，安徽合肥 230027)

摘要：通过对称碰撞研究了 D6A、921 和 45 钢的动态损伤与破坏行为。利用自由面速度的双波结构，结合材料在常压下的弹性纵波声速，确定了三种钢的低压 Hugoniot 关系，同时给出了三种钢的弹性 Hugoniot 屈服极限以及层裂强度。但是发现，屈服极限和层裂强度的材料分散性明显，在其影响下，层裂强度对加载幅度以及应变率的依赖性得不到体现，从而在其不确定度范围内，可将层裂强度看成一个常数。提出了一个唯象的损伤演化方程，在此基础上，对实验结果进行了部分数值模拟，数值模拟给出的层裂强度远大于近似解析模型的计算结果，两者之间的差异有待进一步研究。

关键词：D6A 钢；921 钢；45 钢；层裂；冲击；动态损伤
中图分类号：O347.3 **文献标识码**：A

1 引 言

材料的动态损伤与破坏自 20 世纪 70 年代以来一直是力学领域的研究热点，目前的研究方法大致可归为两类：一类完全从实验出发，给出损伤演化的经验方程，其典型代表如著名的 NAG 模型[1~3]；另一类则通过对损伤演化的动力学过程作适当的简化，给出演化方程的函数形式，再由实验确定其相应参数，这类方法的研究者很多，如 Rosenberg[4]、Rajendran[5]、封加波[6]、Johnson[7]等。总的来讲，虽然国内外关于材料在冲击载荷下的动态损伤与断裂已有大量研究，但是这一问题依然没有得到很好的理解，特别是在定量描述方面有待进一步的发展和完善。

我们针对 D6A、921、45 钢，利用一级轻气炮首先对其在冲击载荷下的层裂行为进行了实验研究，给出了低压下的 D-u_p 关系、Hugoniot 屈服极限、层裂强度等特性参数；之后提出了一个唯象的损伤演化模型，以此对三种钢的损伤层裂行为进行了数值模拟。

2 碰撞实验

实验在 100 mm 口径一级轻气炮上进行，图 1 是实验装置示意图。实验中，飞片碰靶速度用铜质刷子探针在碰靶前测量；样品自由面速度-时间剖面的测量则由 VISAR[8,9] 完成，其条纹常数为 224 m/(s · fr)。在所有测量中，信号均由精密数字示波器记录，采样时间间隔为 1 ns。样品及飞片尺寸参见表 1～表 3。图 2～图 4 是三种样品实测的自由面粒子速度-时间剖面。

* **收稿日期**：2002-09-16；**修回日期**：2002-11-30
基金项目：中国工程物理研究院重大基金项目(2000z0307)
作者简介：张 林(1968—)，男，博士研究生.

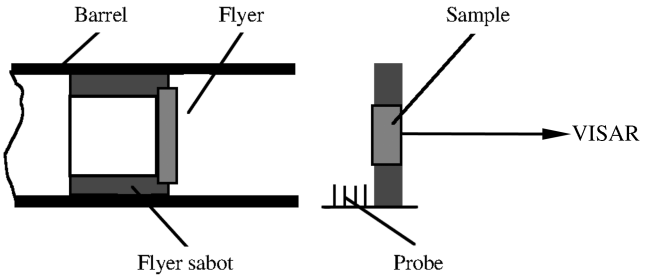

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experiment set-up

表 1 45 钢的实验结果及相关数据

Table 1 Experimental results for 45 steel

Shot No.	Sample thickness /(mm)	Flyer thickness /(mm)	Flyer velocity /(m/s)	D /(km/s)	σ_{Hel} /(GPa)	p_H /(GPa)	$\sigma_{f\text{-}1}$ /(GPa)	$\sigma_{f\text{-}2}$ /(GPa)	$\sigma_{f\text{-}3}$ /(GPa)
1	3.997	1.995	657	4.87	1.493	12.537	1.903	2.584	2.612
2	3.993	1.996	503	4.78	1.626	10.931	2.206	2.981	3.058
3	3.998	1.995	341	4.61	1.813	6.438	2.514	2.969	3.394
4	3.985	1.991	198	4.41	1.503	3.816	1.83	—	—

表 2 D6A 钢的实验结果及相关数据

Table 2 Experimental results for D6A steel

Shot No.	Sample thickness /(mm)	Flyer thickness /(mm)	Flyer velocity /(m/s)	D /(km/s)	σ_{Hel} /(GPa)	p_H /(GPa)	$\sigma_{f\text{-}1}$ /(GPa)	$\sigma_{f\text{-}2}$ /(GPa)	$\sigma_{f\text{-}3}$ /(GPa)
1	4.001	1.964	827	5.17	3.333	—	3.5	4.033	4.585
2	3.994	2.013	506	5.03	2.833	10.17	3.755	4.810	4.94
3	3.990	1.991	335	4.90	3.152	6.868	3.842	4.596	4.992
4	3.997	2.004	200	4.78	2.086	4.104	2.93	3.419	3.886

表 3 921 钢的实验结果及相关数据

Table 3 Experimental results for 921 steel

Shot No.	Sample thickness /(mm)	Flyer thickness /(mm)	Flyer velocity /(m/s)	D /(km/s)	σ_{Hel} /(GPa)	p_H /(GPa)	$\sigma_{f\text{-}1}$ /(GPa)	$\sigma_{f\text{-}2}$ /(GPa)	$\sigma_{f\text{-}3}$ /(GPa)
1	3.999	1.999	654	4.85	1.381	12.491	2.298	2.929	2.989
2	4.003	1.998	500	4.81	1.747	9.454	2.986	3.756	3.892
3	4.000	2.003	352	4.73	1.501	6.634	3.149	3.97	4.117
4	3.996	1.989	200	4.69	1.362	3.931	—	—	—

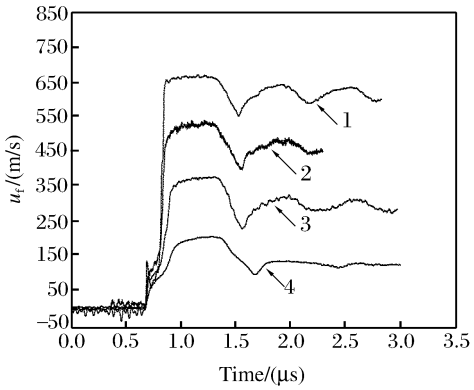

图 2　45 钢样品的自由面粒子速度剖面

Fig. 2　Free-surface velocity profile for 45 steel

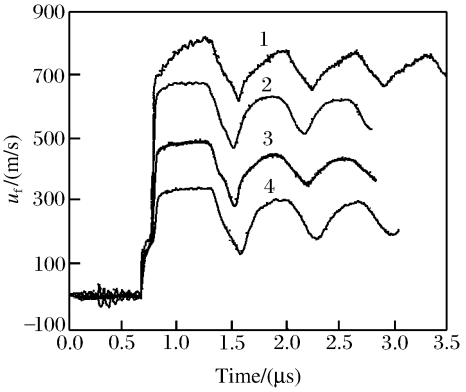

图 3　D6A 钢样品的自由面粒子速度剖面

Fig. 3　Free-surface velocity profile for D6A steel

3　实验结果与动态力学特性参数

参照文献[10],我们计算了三种材料的 D-u_p 关系以及层裂强度。由于低压下冲击波速度的测量一直是实验领域的一个难点,在文献[10]中,我们未对冲击波速度进行直接测量,而是利用自由面速度的双波结构,结合材料在常压下的弹性纵波声速,对冲击波速度进行计算,给出了很好的结果[10]。本研究在确定冲击波速度时亦按此方法。层裂强度的计算公式如下[10~13]

方法 1
$$\sigma_f = \rho_0 c_b \Delta u/2 \tag{1}$$

方法 2
$$\begin{cases}\sigma_f = \rho_0 c_b(\Delta u + \delta)/2 \\ \delta = \left(\dfrac{h}{c_b} - \dfrac{h}{c_l}\right)\dfrac{|\dot{u}_1\dot{u}_2|}{|\dot{u}_1| + \dot{u}_2}\end{cases} \tag{2}$$

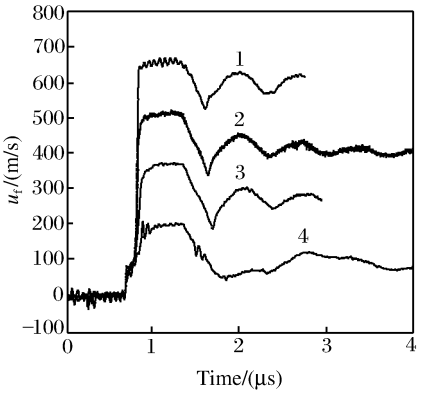

图 4　921 钢样品的自由面粒子速度剖面

Fig. 4　Free-surface velocity profile for 921 steel

方法 3
$$\sigma_f = \rho \frac{c_l c_b}{c_l + c_b}\Delta u\left[1 + \frac{h}{\tau}\left(\frac{1}{c_b} - \frac{1}{c_l}\right)\right] \tag{3}$$

计算结果见表 1～表 3。其中 $\sigma_{f\text{-}i}$(i=1,2,3)分别表示按第 i 种方法计算的层裂强度。($D-u_e$)-(u_p-u_e)间的线性关系由最小二乘法拟合得到,相应的方程为

45 钢　　$D-u_e = 4.28 + 2.025(u_p - u_e)$　　$R = 0.979$

D6A 钢　　$D-u_e = 4.65 + 1.640(u_p - u_e)$　　$R = 0.998$

921 钢　　$D-u_e = 4.60 + 0.732(u_p - u_e)$　　$R = 0.992$

式中 u_e 是弹性前驱波后的粒子速度,R 是线性相关系数;D、u_p、u_e 的单位均为 km/s。弹性 Hugoniot 屈服极限(σ_{Hel})的数据亦见表 1～表 3。

从上面的实验结果可以得出以下的基本结论:(1) 三种钢的弹性 Hugoniot 屈服极限(σ_{Hel})以及层裂强度(σ_f)的材料分散性明显。(2) 与材料的分散性相比,σ_{Hel}、σ_f 对加载幅度以及加载应变率不敏感,或者说,加载幅度和加载应变率对 σ_{Hel}、σ_f 的影响被材料的分散性所掩盖;(3) 45 钢和 921 钢的 σ_{Hel} 和 σ_f 比较接近,而 D6A 钢则明显优于该两者;(4) 在层裂强度的计算中,第二种方法对第一种方法的修正约 20%～30%,第二、第三种方法的计算结果则比较接近。这一结果表明,虽然层裂强度从概念上来讲是

客观的,但其计算却是模型相关的,且受模型差异的影响不可轻视。

4 数值模拟

为了考察碰撞中样品损伤演化与断裂的过程,我们提出了一个简单的唯象模型,并运用该模型分别对三种材料进行了数值模拟。

定义损伤内变量 D_{sn} 为孔洞的总体积,即

$$D_{sn}=V_d/V=V_d/(V_d+V_s) \tag{4}$$

式中:V_d 是总的孔洞体积,V_s 是基体体积,V 是总体积。另外,定义一个损伤比 φ

$$\varphi_{sn}=V_d/V_s \tag{5}$$

(1)式与(2)式联立可得

$$D_{sn}=\varphi/(1+\varphi) \tag{6}$$

$$\dot{D}_{sn}=\dot{\varphi}/(1+\varphi)^2 \tag{7}$$

一般地,$\dot{\varphi}$ 是 φ 和基体球形应力 σ_s 的函数。我们假定 φ 和 σ_s 可分离,即

$$\dot{\varphi}=g(\varphi)h(\sigma_s) \tag{8}$$

一般来说,D_{sn} 的断裂临界值是一个比较小的量,因此直到断裂前 φ 值也可认为是一个小量。鉴于此,我们把 $g(\varphi)$ 进行级数展开,只保留到线性项;对于 $h(\sigma_s)$,我们则唯象地假定

$$h(\sigma_s)=\begin{cases}c(\sigma_s/\sigma_0-1)^{\lambda} & \sigma_s\geqslant\sigma_0\\ 0 & \sigma_s<\sigma_0\end{cases}$$

从而将 $\dot{\varphi}$ 表示为

$$\dot{\varphi}=\begin{cases}(\beta+\alpha\varphi)(\sigma_s/\sigma_0-1)^{\lambda} & \sigma_s\geqslant\sigma_0\\ 0 & \sigma_s<\sigma_0\end{cases} \tag{9}$$

将上面各式带入(4)式得损伤的演化方程

$$\dot{D}_{sn}=(1-D_{sn})^2\left(\beta+\alpha\frac{D_{sn}}{1-D_{sn}}\right)\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_0}-1\right)^{\lambda} \tag{10}$$

式中:α、β、λ 为模型常数,σ_0 为损伤发展的阈值应力。根据弹性理论,本文模型将含损伤的状态方程表示为

$$p=K_s(1-D_{sn})\ln(V_{s0}/V_s) \tag{11}$$

式中 K_s 为基体的体积模量。率相关的屈服本构关系选用J-C模型

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}&=(A+B\varepsilon_p^n)(1+C\ln\dot{\varepsilon}^*)\cdot\\&\quad(1-T^{*m})(1-D_{sn})\\ \dot{\varepsilon}^*&=\dot{\varepsilon}_p/\dot{\varepsilon}_0\\ T^*&=(T-T_r)/(T_m-T_r)\end{aligned} \tag{12}$$

式中 A、B、C、m、n 为模型参数,$\bar{\sigma}$ 为等效应力,ε_p 为塑性应变,T_m、T_r 分别为材料的熔化温度和室温。计算中 J-C 模型的相关参数由 Hopkinson 拉杆实验得到[14],见表 4;损伤模型的相关参数则通过样品自由面粒子速度剖面的拟合给出,见表 5。

数值计算结果与实验结果的对比见图 5~图 7,两者基本相符。计算得到的 45 钢、D6A 钢、921 钢的层裂强度分别为 6.01 GPa、7.68 GPa、6.24 GPa。这一结果约为解析近似计算的 2 倍,两者之间的巨

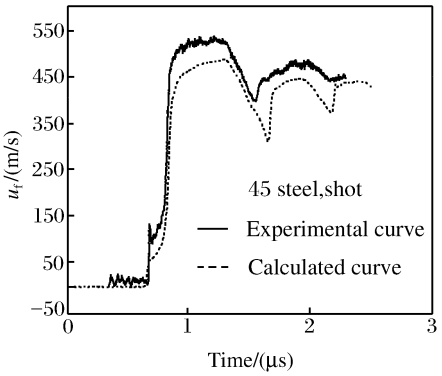

图 5 45 钢数值模拟与实验对比结果

Fig. 5 Comparison between experimental and calculated free-surface velocity profile for 45 steel

大差异需要开展进一步的研究。

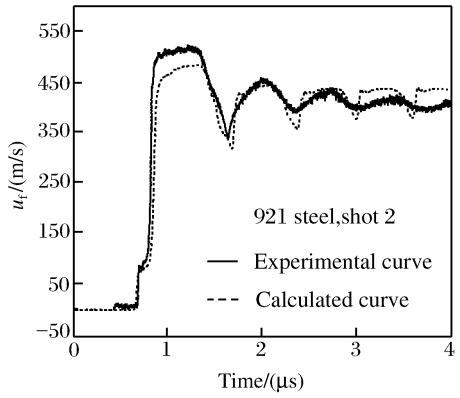

图 6　921 钢数值模拟与实验对比结果

Fig. 6　Comparison between experimental and calculated free-surface velocity profile for 921 steel

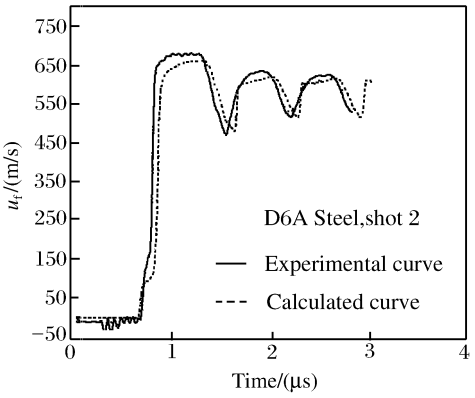

图 7　D6A 钢数值模拟与实验对比结果

Fig. 7　Comparison between experimental and calculated free-surface velocity profile for D6A steel

表 4　本构模型的相关参数

Table 4　Parameters for J-C constitutive relations

Parameters	45 steel	921 steel	D6A steel	Parameters	45 steel	921 steel	D6A steel
A/(MPa)	496.0	898.6	966.0	T_m/(℃)	1491.9	1490.5	1540.0
B/(MPa)	434.0	356.0	512.0	ρ_0/(kg/m^3)	7800	7800	7800
C	0.07	0.022	0.024	G_s/(GPa)	81.9	77.9	81.4
n	0.307	0.586	0.298	K_s/(GPa)	164.2	158.5	165.8
m	0.804	1.05	0.9	c_s/(km/s)	3.24	3.16	3.23
$\dot{\varepsilon}_0$/(s^{-1})	1	1	1	c_l/(km/s)	5.92	5.80	5.93
T_r/(℃)	25	25	25				

5　总　结

通过平面碰撞实验,研究了 45 钢、921 钢和 D6A 钢在低压下的冲击响应特性,给出了($D-u_e$)-(u_p-u_e)之间的关系,计算了 Hugoniot 弹性屈服极限和层裂强度。提出了一个唯象的描述损伤演化的方程,在此基础上对实验进行了部分模拟。特别需要指出的是,用几种解析方法计算的层裂强度与数值模拟的结果相差很大,这一结果表明还需开展进一步的研究。

表 5　损伤模型相关参数

Table 5　Parameters for damage evolution equation

Parameters	45 steel	921 steel	D6A steel
α/(s^{-1})	8.0×10^5	7.6×10^5	7.8×10^5
β/(s^{-1})	0	20	10
σ_0/(MPa)	350	450	500
λ	2.7	2.7	2.9
D_c	0.25	0.3	0.3

References:

[1]　Shockey D A, Curran D R, Seaman L, et al. Int J Rock Mech MIN Sci, 1974, 11: 303.

[2] Seaman L, Curran D R, Shockey DA. J Appl Phys, 1976, 47: 4814.
[3] Curran D R, Seaman L, Shockey D A. Dynamic Failure of Solids [J]. Phys Reports, 1987, 147: 253－388
[4] Rosenberg Z, Mayseless M, Parton Y. J Appl Phys, 1985, 56(2): 1083.
[5] Rajendran A M, Dietenberger M A, Grove D J. A Void Nucleation and Growth Based Failure Model for Spallation [J]. J Appl Phys, 1989, 65: 1521.
[6] 封加波. 金属动态延性破坏的损伤度函数模型 [D]. 北京: 北京理工大学博士论文, 1992.
[7] Johnson G R, Cook W H. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31.
[8] Chen G H, Li Z R, Liu Y K, et al. Flyer Velocity Measurement Using Double-Sensitivity VISAR [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2001, 15(1): 70－74. (in Chinese)
陈光华, 李泽仁, 刘元坤, 等. 用双灵敏度 VISAR 测量铜飞片自由面速度 [J]. 高压物理学报, 2001, 15(1): 70－74.
[9] Hu S L. Laser Interferometry for Measuring Velocities [M]. Beijing: Press of the National Defence Industry, 2001. (in Chinese)
胡绍楼. 激光干涉测速技 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
[10] Zhang L, Cai L C, Wang W, et al. The Dynamic Mechanic Characteristics of Tantalum under Shock Loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2001, 15(4): 265－270. (in Chinese)
张 林, 蔡灵仓, 王 悟, 等. 钽在冲击载荷下的动态力学特性 [J]. 高压物理学报, 2001, 15(4): 265－270.
[11] 卡涅尔 Γ H, 拉扎列诺夫 C B, 乌特金 Л B, 等. 凝聚介质中的冲击波现象 [M]. 韩均万译. 四川绵阳: 中物院流体物理研究所, 1998. 183－185.
[12] Kanel G I, Razorenov S V, Utkin A V. Chap. 1 [A]. Davison L, Grady D E. High-Pressure Shock Compression of Solids II [C]. Shahinpoor: Springer, 1994.
[13] Grady D E. Steady-Wave Risetime and Spall Measurements on Uranium [R]. SAND-85-0233C.
[14] 贺洪亮, 张林, 胡昌明, 等. 45 钢、D6AC 钢和 921 钢的本构关系及动态断裂 [R]. 四川绵阳: 中国工程物理研究院, 1999.

Dynamic Fracture and Mechanical Property of D6A, 921 and 45 Steels under Low Shock Pressure

ZHANG Lin[1], ZHANG Zu-Gen[1], QIN Xiao-Yun[1], PENG Jian-Xiang[1], CAI Ling-Cang[1], LI Yong-Chi[2]

(1. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
2. *University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *China*)

Abstract: The behaviors of dynamic damage and fracture of D6A, 921, 45 steels were studied via symmetric impact experiments. Using the double wave structure of the free-surface velocity profile and the material longitudinal elastic wave speed at room temperature, we obtained the D-u_p Hugoniot relations for the three steels. The Hugoniot elastic limits and spall strengths of the three steels were also obtained. A new simple phenomenal equation for describing the evolution of damage was proposed, with which the experimental spall processes were simulated.

Key words: D6A steel; 921 steel; 45 steel; spallation; shock; dynamic damage