

金属材料动态响应过程中的卸载特性

黄勇, 潘昊, 胡晓棉

北京应用物理与计算数学研究所计算物理国家重点实验室, 北京 100094

摘要 针对金属材料卸载过程中计算结果与实验数据之间存在比较大差异的现象, 在卸载段采用与加载段不同的剪切模量, 描述金属材料动态响应过程中卸载初期的准弹性卸载过程, 结合所选取的本构模型和损伤演化模型, 对靶材料冲击加载过程中的卸载、损伤、层裂等过程进行理论和数值模拟研究, 数值模拟结果表明, 文中采取的模型, 对于动态响应过程中准弹性卸载过程、后续的损伤以及完全层裂过程的描述比较合理, 获得了与实验数据符合比较好的计算结果。

关键词 动态响应; 准弹性卸载; 损伤演化; 层裂; 数值模拟

中图分类号 O344

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.10.003

The Unloading Characteristics of Metal in During Dynamic Response

HUANG Yong, PAN Hao, HU Xiaomian

National Key Laboratory of Computational Physics, Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China

Abstract The unloading characteristics are studied to explain the difference between the simulation results and the experimental data in this paper. The different elastic-plastic limiting conditions between the loading and the unloading processes are used to describe the quasi-elastic unloading of the earlier unloading. The critical damage model and the Steinberg-Guinan constitutive model are used to simulate the shock-unloading spallation process and the second loading process of Fe and Al. The simulation results indicate that the method used in this paper can describe quasi-elastic phenomena reasonably well. The results of the damage evolution and the spallation compare favorably with the experiment data at the complete spallation. But in the case of Al experiment, the incomplete spallation occurs because of the lower shock velocity, and it can not be described well with the macroscopic damage evolution model, which explains the difference between the simulation results and the experimental data.

Keywords shock response; quasielastic release; damage evolution; spallation; simulation

0 前言

金属材料动态响应特性是冲击动力学研究的重要内容之一, 在现实应用中具有重要的作用。金属材料在冲击载荷作用下, 一般会经历以下几个基本的响应过程: 弹性响应、塑性流动、相变、Hugoniot 状态、动态卸载、损伤与断裂等, 对于含能材料还可能会出现化学反应过程, 这些过程在速度剖面上都有明确的对应体现^[1]。状态方程和本构关系研究工作的大量开展^[2]使得金属材料在冲击加载过程中的几个响应过程能在数值上得到准确的描述, 但是对于金属材料在冲击载荷作用下卸载、损伤以及后续的层裂过程等, 目前的研究还不是很充分, 尤其是对于卸载初期弹塑性卸载之间的转换过程, 一般的理论计算结果与实验结果有着明显的差异, 并导

致后续过程状态的描述不够准确。

本文重点关注金属材料动态响应过程中的卸载特性, 采用 Steinberg-Guinan 本构模型, 通过卸载初期准弹性卸载过程合理的物理描述和数学处理, 并选取合适的损伤演化模型描述后期卸载过程, 对金属材料在冲击载荷作用下的卸载行为进行相应的数值模拟研究。

1 物理模型

在连续介质力学框架下, 描述材料的动态响应过程, 除了流体力学方程组, 还需加上材料的状态方程、弹塑性本构关系及损伤演化模型, 并选取适当的初始条件和边界条件, 才能构成对该问题的完备物理描述, 下面对本文采用的弹塑

收稿日期: 2011-11-27; 修回日期: 2012-03-16

作者简介: 黄勇, 副研究员, 研究方向为冲击动力学, 电子信箱: huang_yong@iapcm.ac.cn

性本构模型和损伤演化模型进行简要介绍。

1.1 本构模型

材料的本构关系表征的是应力与应变、应变率、温度及变形历史等的关系,适用于数值模拟的本构模型必须能准确描述材料的力学行为、相应的物理过程。在长期的研究过程中,不同学者提出了大量的本构模型^[12-13],大体上可以将这些本构模型分为以下几类:经验模型、基于物理理论的模型和混合机理模型,其中具有代表性的分别为 Johnson-Cook 模型、Steinberg-Guinan 模型和 Zerilli-Armstrong 模型。

研究表明^[2],Steinberg-Guinan 本构模型有较好的物理基础,模型的各个参数均具有明确的物理含义,可以利用材料的结构和固体物理力学理论研究本构模型参数的变化性质及其范围。因此本文采用如下形式的 Steinberg-Guinan 本构模型。

在材料熔化之前,剪切模量的表达式改写为

$$G=G_0[1+b\rho V^{1/3}-h(t-300)] \quad (1)$$

屈服强度的表达式为:

$$Y=Y_0(1+\beta\bar{\epsilon}^p)^n \cdot \frac{G}{G_0} \quad (2)$$

式中, $\bar{\epsilon}^p$ 为等效塑性应变, V 为相对体积, $V=\rho_0/\rho$, ρ 为比容, G_0 为剪切模量。

上述方程受条件限制:

① $Y_0(1+\beta\bar{\epsilon}^p)^n \leq Y_{max}$, 如果 $Y_0(1+\beta\bar{\epsilon}^p)^n > Y_{max}$, 则 $Y_0(1+\beta\bar{\epsilon}^p)^n = Y_{max}$;

② $t > t_m$ 时, $Y=G=0$;

式中的 β, n, t_m, ρ_0 分别为塑形硬化系数、塑形硬化指数、温度、融化温度和密度, b 和 h 分别为体积相关系数和温度相关系数。

屈服强度 Y 表达式中等效塑性应变 $\bar{\epsilon}^p$ 的计算如下:

$$\bar{\epsilon}^p = \int d\epsilon^p \quad (3)$$

$$d\epsilon^p = \sqrt{\frac{2}{3} d\epsilon_i^p d\epsilon_j^p}, \quad i, j=x, r, \theta \quad (4)$$

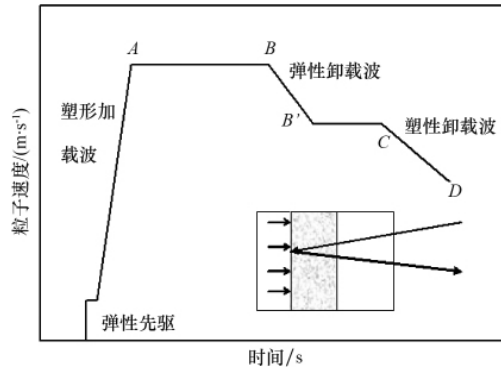
并且, $d\epsilon_i^p = d\epsilon_i^e - d\epsilon_i^p$, $d\epsilon_i^e$ 是由运动方程给出的总应变增量; $d\epsilon_i^e$ 是由 Hook 定律获得的应变增量。

1.2 准弹性卸载模型

理想弹塑性材料在弹性段的行为取决于剪切模量 G_0 , 随着应力水平的增加, 塑性流产生; 当应变方向发生反转时, 卸载路径重新经历从弹性到塑性的过程。反映在自由面速度曲线上, 弹性稀疏波到塑性稀疏波之间有比较明显的转换过程。如图 1 所示, 弹性稀疏波使得自由面速度从 B 点下降到 B' 点, 而塑性稀疏波体现为 CD 段, 两者之间明显的转换过程从 B' 点到 C 点。之所以出现这种现象, 是因为纵向弹性模量和体模量的差异造成的, 其中纵向弹性模量控制弹性波的速度, 而体模量控制塑性波的速度。

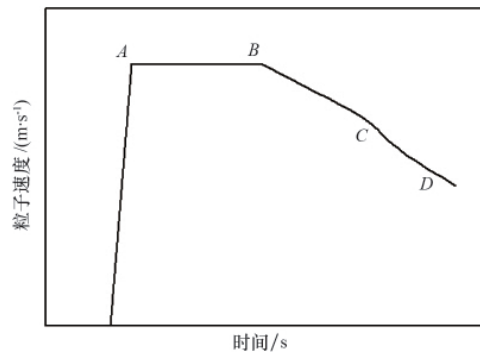
但是实际测量得到的自由面速度波形上却没有明显的转换过程(图 1), 材料的弹性行为到塑性行为的转换是逐渐

进行的, 即, 在整个卸载路径上, 均伴随着不同程度的塑性变形, 即所谓的准弹性卸载^[3]。金属材料冲击压缩过程中准弹性卸载现象的产生原因比较复杂, 目前认识不是很清楚, Johnson 等^[4]对 Al 材料的卸载行为进行研究和分析后, 给出了一种物理解释, 认为紊乱的堆积和循环是造成准弹性过程的原因, 卸载过程中随着流动应力的减小, 反向的塑性流立即产生, 因此使得纵向弹性模量减小, 造成卸载波速度降低。



(a) 理想弹塑性

(a) Ideal elasto-plasticity



(b) 测量曲线

(b) Measured curve

图 1 自由面速度曲线

Fig. 1 Free surface velocity profiles

为了描述准弹性卸载过程中弹性模量和体模量之间的关系, 定义一个有效剪切模量 G_{eff} :

$$G_{eff} = \frac{1}{2} \frac{dS_1}{d\epsilon_1} \quad (5)$$

式中, S_1 和 ϵ_1 分别为真实的应力偏量和应变偏量。

这样, 与理想弹塑性材料卸载依赖于常数剪切模量 G_0 类似, 卸载-再加载过程依赖于有效剪切模量 G_{eff} , 只不过 G_{eff} 不再是常数, 而是与应力-应变过程有关。

图 2 是 G_{eff} 与 S_1/S_1^{max} 的关系, 其中 S_1^{max} 是 S_1 在加载过程中的最大值^[5]。

由图可知, G_{eff} 可以近似为两段直线, 因此描述这条曲线只需要 3 个不同阶段 G_{eff} 的值即可: (1) 在卸载开始段, $G_{eff} (+1) = G_0$; (2) 卸载经过 $S_1=0$ 时, $G_{eff} (0) = G_1$; (3) 反向屈服时, $G_{eff} (-1) = G_2$, 通常情况下 $G_2 \approx 0$ 。

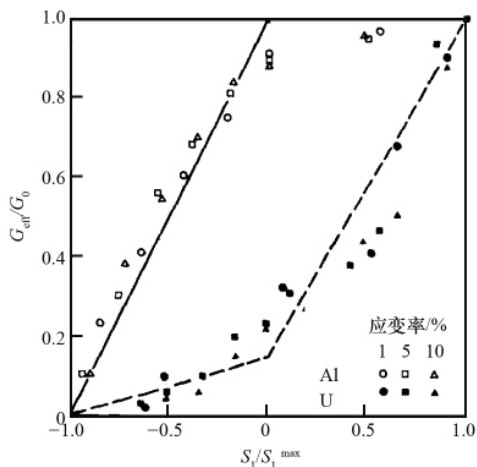


图2 卸载和再加载过程中有效剪切模量 G_{eff}/G_0 与应力偏量 S_i/S_1^{max} 的关系
Fig. 2 Relation between G_{eff}/G_0 and S_i/S_1^{max} in unloading and reloading

1.3 损伤演化

损伤累积和演化的物理过程已经被大家所接受,当材料基体受到拉伸作用时,微损伤和微裂纹开始发展、演化、累积;材料的损伤演化机制上非常复杂,Feng等^[7]基于Bai等^[6]损伤演化的统计理论描述,从能量的角度考虑,导出了一个具体的损伤演化方程:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{[(1-D)(\sigma - \sigma_0)]^2}{\eta\kappa} \quad (6)$$

式中, D 为损伤度, σ 为拉伸应力, κ 为强化模量, η 为材料黏度, σ_0 为屈服强度。

以上损伤度函数方法不仅适用于研究柱壳的膨胀断裂问题、平面冲击断裂问题,还适用于内爆作用下柱形钢壳的层裂问题^[8-9],说明该方法在研究材料的动态断裂问题中具有一定的普适性,得到了较为广泛的应用。

本文采用式(6)的损伤演化方程,并根据临界损伤的思想,即通过损伤演化方程计算材料的实际损伤,当损伤到达

某一临界值时,就认为材料发生宏观破坏,临界损伤度 D_c 的值通过实验结果确定。

2 数值模拟及分析

一维平面冲击加载实验:飞片采用一级轻气炮驱动,使用VISAR测速仪对靶材料的自由面速度-时间剖面进行连续测量,在靶和VISAR测速仪之间有一层窗口材料。冲击加载实验的飞片和靶材料均为Fe,其中飞片厚度0.2cm,靶材料厚度0.4998cm,飞片的冲击速度为515m/s。

在进行数值模拟时,通过压力和人工黏性判断,如果材料经历卸载过程或反向加载过程,则对本构模型中的剪切模量进行如下修正:

$$G_{eff} = f(S_1) \cdot G_0 \quad (7)$$

$$f(S_1) = \begin{cases} \frac{S_1}{S_1^{max}} \left(1 - \frac{G_1}{G_0} \right) + \frac{G_1}{G_0} & S_1 \geq 0 \\ -\frac{S_1 - S_1^{min}}{S_1^{min}} \left(\frac{G_1}{G_0} - \frac{G_2}{G_0} \right) + \frac{G_2}{G_0} & S_1 < 0 \end{cases} \quad (8)$$

通过调整准弹性卸载剪切模量的2个可变参数 G_1 和 G_2 ,改变卸载段 G_{eff} 两段直线的关系,对靶材料卸载过程中的准弹性卸载过程进行修正。

如果不考虑卸载屈服强度与加载屈服强度的差异,即,无论是加载还是卸载,无论是基体材料还是损伤体材料,其剪切模量 G_0 认为是相同的。那么在卸载初期数值模拟速度剖面有一明显的平台,与实验结果有一定的差异,导致后续卸载特性描述不够准确;如果采用准弹性卸载剪切模量,则对速度剖面的平台有明显的修正作用,计算结果与实验结果更接近(图3)。

准弹性过程主要影响初期的卸载速度,随着卸载的进一步加深,损伤演化的影响开始凸显。要比较准确地反映材料的卸载特性,两者需要结合考虑。图4是本文的数值模拟得到的靶自由面速度曲线与实验曲线的比较。由图上可以看出,从波形的弹性起跳开始,到准弹性卸载、层裂“回跳”信号,我们的数值模拟结果与实验结果均能够很好的符合,层裂片

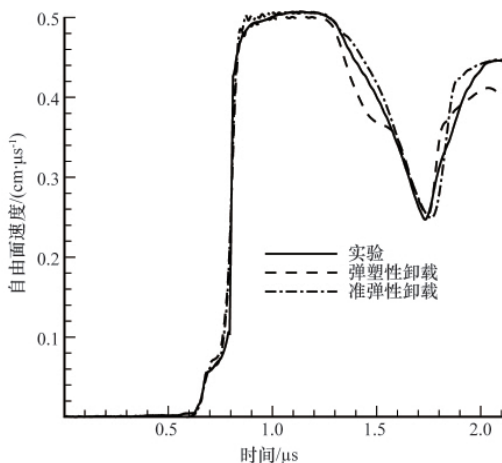


图3 自由面速度
Fig. 3 Free surface velocity profiles

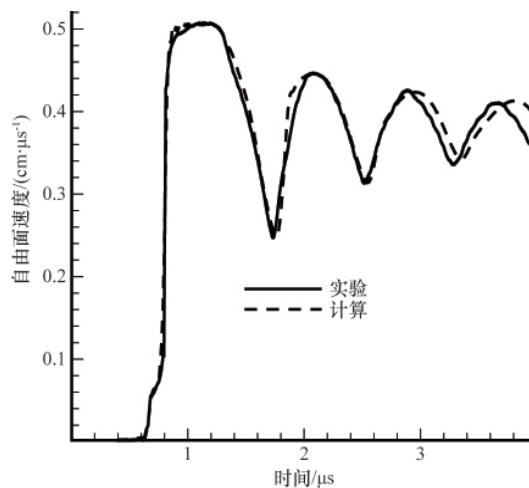


图4 自由面速度波形比较
Fig. 4 Free surface velocity profiles

的再次加载、卸载过程也能够数值上较好地描述。

本文还对不同冲击速度和材料厚度实验以及不同材料的实验进行数值模拟,实验状态见表 1^[10]和表 2^[11],图 5—图 8 是数值模拟结果与实验数据的比较。计算结果表明,在不同的冲击速度范围内,对于 Fe 材料,计算结果与实验数据均能够比较好的符合,因此文中采用的物理模型具有较好的适应性。对于高纯度铝材料的实验 5、6、7,速度剖面计算结果与实验数据的比较表明,在卸载初期准弹性卸载过程的描述也是合理的,但是后续状态(包括速度剖面和损伤分布)计算结果与实验数据有比较明显的差异,尤其是损伤比较分散的模型,差异更大,这是因为这几发实验飞片的冲击速度并不高,使得靶材料均处在非完全层裂状态,这一点可以从实验的样品回收图片清晰地看到^[11](图 9),而文中采用的宏观(唯象)损伤模型,对这种非完全层裂或临界层裂现象物理描述有所欠缺。

表 1 平板撞击实验 1 状态

Table 1 Experiment 1

实验代号	飞片材料	靶材料	飞片厚度/cm	靶厚度/cm	飞片速度/(m·s ⁻¹)
1	Fe	Fe	1.966	3.996	336
2	Fe	Fe	3.975	8.04	485
3	Fe	Fe	2.001	3.998	491
4	Fe	Fe	2.06	3.96	634

表 2 平板撞击实验 2 状态

Table 2 Experiment 2

实验代号	飞片材料	靶材料	飞片厚度/cm	靶厚度/cm	飞片速度/(m·s ⁻¹)
5	Al	Al	2.00	4.00	219.7
6	Al	Al	3.00	6.00	196.9
7	Al	Al	3.00	6.00	236.3

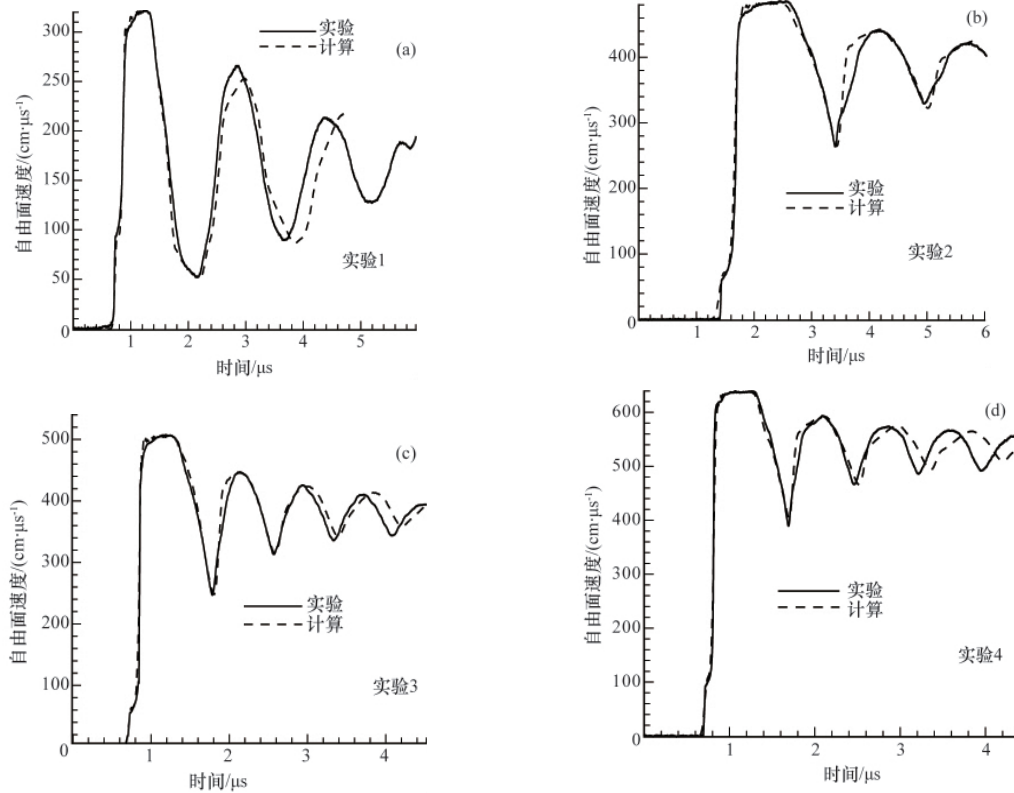


图 5 靶自由面速度比较

Fig. 5 Free surface velocity profiles of target

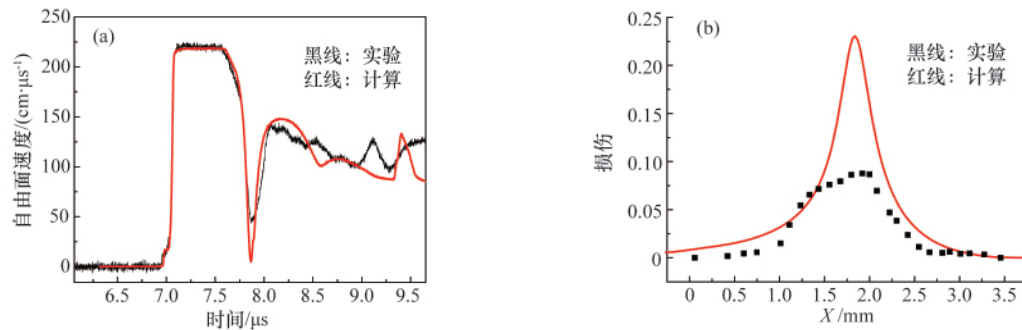


图 6 实验 5 自由面速度和损伤分布

Fig. 6 Free surface velocity and damage profiles of experiment 5

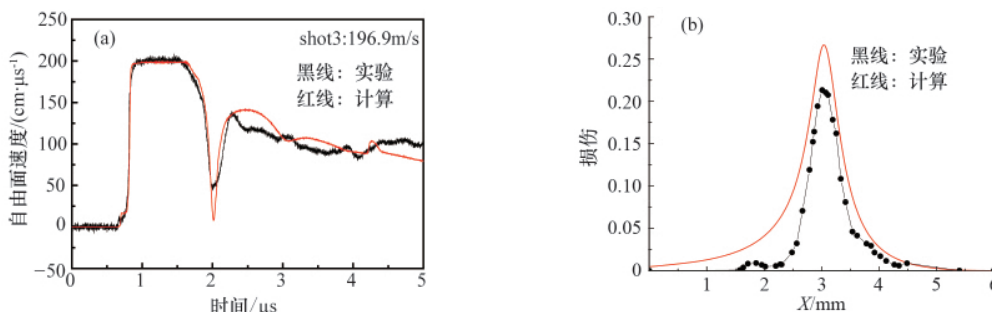


图 7 实验 6 自由面速度和损伤分布

Fig. 7 Free surface velocity and damage profiles of experiment 6

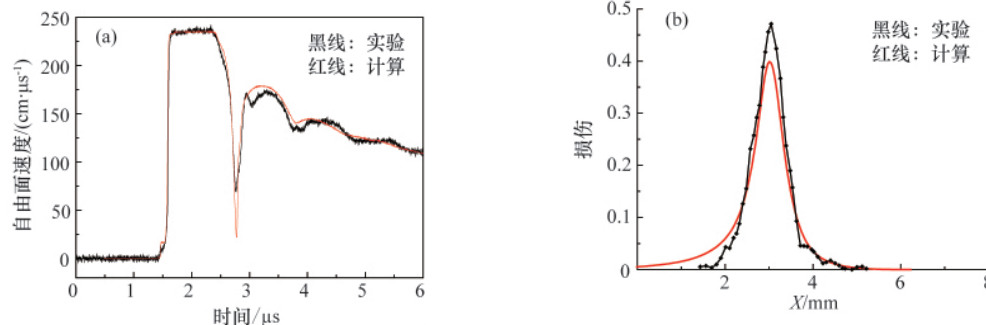


图 8 实验 7 自由面速度和损伤分布

Fig. 8 Free surface velocity and damage profiles of experiment 7

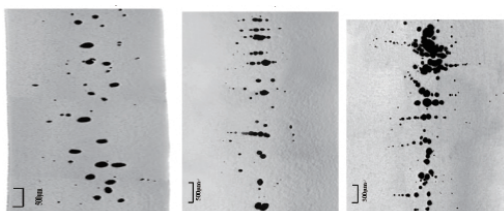


图 9 实验样品回收图片

Fig. 9 Damage pictures of sample recycled

3 结论

金属材料动态响应过程中,卸载过程与加载过程采用相同的屈服条件,使得理论计算的自由面速度曲线在卸载段出现与实验结果明显不符的速度平台。本文采用 Steinberg-Guinan 本构模型,对卸载初期弹塑性卸载之间的转换进行了物理分析,采用有效剪切模量描述初始卸载段的力学状态,并选取损伤度函数模型对 Fe 和高纯度 Al 材料的冲击动态响应过程进行了数值模拟。数值研究表明,文中所采用的模型和方法对准弹性卸载过程的数值描述比较合理,对于发生完全层裂现象的情况,卸载过程、层裂回跳信号以及后续过程的计算结果与实验数据符合较好,但是由于损伤度函数模型为宏观唯象模型,因此对于高纯度 Al 材料的非完全层裂过程的描述有所欠缺。

致谢: 感谢贺红亮、祈美兰、张林等提供的实验数据和提供的帮助。

参考文献 (References)

[1] Meyers M A. Dynamic behavior of materials[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1994.
 [2] 朱建士, 胡晓棉, 王裴, 等. 爆炸与冲击力学若干问题研究进展[J]. 力学进展, 2010, 40(4): 400-423.

Zhu Jianshi, Hu Xiaomian, Wang Pei, et al. *Advances in Mechanics*, 2010, 40(4): 400-423.
 [3] 黄勇. 金属材料动态相应过程中卸载特征研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2008.
 Huang Yong. The research of unloading characteristics of metal [D]. Beijing: China Academy Engineering Physics, 2008.
 [4] Johnson N J, Lomdahl P S, Wills J M. Analysis of internal stress and anelasticity in the shock-compressed state from unloading wave data[J]. *Acta Metallurgica*, 1991, 39(12): 3015-3026.
 [5] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate [J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(3): 1498-1504.
 [6] Bai Y L, Han W S, Bai J. A statistical evolution equation of microdamage and its application[R]. ASTM STP 1315, 1997: 150-162.
 [7] Feng J P, Jing F Q, Zhang G R. Dynamic ductile fragmentation and the damage function model[J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 81(6): 2575-2578.
 [8] 董玉斌, 张万甲, 经福谦, 等. 动态断裂过程的数值分析及 LY-12 铝的层裂[J]. 高压物理学报, 1998, 2(4): 305-312.
 Dong Yubing, Zhang Wanjia, Jing Fuqian, et al. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1998, 2(4): 305-312.
 [9] 董玉斌, 苏林祥, 陈大年, 等. 滑移爆轰作用下内爆柱形钢壳层裂的数值研究[J]. 高压物理学报, 1998, 3(1): 1-10.
 Dong Yubing, Su Linxiang, Chen Danian, et al. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1998, 3(1): 1-10.
 [10] 张林, 张祖根, 秦晓云. D6A, 921 和 45 钢的动态破坏与低压冲击特性[J]. 高压物理学报, 2003, 17(4): 305-310.
 Zhang Lin, Zhang Zugeng, Qin Xiaoyun. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2003, 17(4): 305-310.
 [11] 祈美兰. 高纯度铝拉伸型动态破坏的临界行为研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
 Qi Meilan. Critical behavior in dynamic tensile fracture of high purity aluminum[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
 [12] Zerilli F J, Armstrong R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for dynamics calculations[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 61(5): 1816-1825.

(责任编辑 岳臣)