文章编号：1000-5773(2005)04-0312-07

铝锂合金材料损伤演化方程和层裂准则的研究*

郭 扬，李永池，曹结东，李建光

（中国科学技术大学力学和机械工程系，安徽合肥 230027）

摘要：通过平板撞击实验对铝锂合金层裂现象进行实验研究。以细观统计和唯象分析相结合的思想，提出了一种新的微孔洞型损伤演化方程，方程同时计及了孔洞长大、成核以及材料可压缩性的耦合效应对损伤演化的影响。在一维应变波模拟程序中嵌入考虑损伤演化影响的铝锂合金本构方程和状态方程，模拟平板撞击过程靶板自由面质点速度时程曲线，并与实验曲线相对比，得到了铝锂合金材料损伤演化方程及其层裂准则的相关参数。

关键词：铝锂合金；损伤演化；层裂准则；数值模拟

中图分类号：O347.3 **文献标识码**：A

1 引 言

铝锂合金作为新型材料在航空、航天等国防和高科技领域得到了日益广泛的应用。我们对其本构方程[1]和状态方程[2]作了系统的理论和实验研究。在冲击载荷下，短时的强载荷是以应力波的形式表现，通常载荷明显超出材料的屈服应力，使材料中存在的各类不均匀的薄弱细观结构都被激发、活化起来，形成沿时空分布、演化的各类损伤，同时对材料的本构关系或状态方程产生影响。因此讨论材料在强冲击载荷下的力学行为时，有必要考虑损伤演化的影响。

材料损伤演化的研究开始于20世纪70年代中期。Seaman (1976)[3]发表了固体材料延性和脆性断裂的计算模型，该模型考虑了微损伤的成核和长大效应，称之为NAG模型(Nucleation and growth)。Perzyna(1986)[4]将他本人于20世纪60年代提出的动态粘塑性超应力本构模型推广到了同时考虑损伤的情形中，将韧性材料损伤内变量取为孔隙度。封加波(1992)[5]把延性材料中的宏观损伤定义为微孔洞总体积与材料总体积之比，其得到的损伤演化方程模型虽然作了较多的假设，但方程参数具有明确的物理意义，使得参数选择有一定的物理根据。李永池[6]根据上述观点，将实体静水压改为表观静水压同时抛弃实体不可压假定得到改进的损伤演化方程，并将此方程应用于内爆柱壳的破坏理论和计算模拟中，取得了与实验相一致的结果。

本研究以细观统计和唯象分析相结合的思想，提出了一种新的微孔洞型损伤演化方程，推导中并未像文献[5,6]一样，只以损伤发展中的能量转换为出发点，而是以更一般的微孔洞体系演化的思想为依据，得出了其损伤演化方程，其方程同时计及了孔洞长大、成核以及材料可压缩性的耦合效应对损伤演化的影响。通过平板撞击实验对铝锂合金层裂现象进行了实验观察，并在一维应变波模拟程序中嵌入考虑损伤演化影响的铝锂合金本构方程和状态方程，模拟平板撞击过程靶板自由面质点速度时程曲线，并将模拟结果与实验曲线相对比，通过不断调整相关参数使模拟结果不断逼近实验结果，最终得到并验证了铝锂合金材料损伤演化方程及其层裂准则的相关参数。

* **收稿日期**：2004-08-25；**修回日期**：2005-02-25

基金项目：国家自然科学基金(10272097)

作者简介：郭 扬(1962—)，男，博士，副教授，主要研究方向为工程力学. E-mail：guoy@ustc.edu.cn

通讯作者：李永池，教授，主要研究方向为工程力学. E-mail：ycli@ustc.edu.cn

2　层裂实验

层裂是冲击载荷造成材料破坏的一种典型方式,而层裂实验是研究材料损伤和破坏的重要手段。本次实验在中国工程物理研究院流体物理研究所的 100 mm 口径一级轻气炮上进行的,采用对称碰撞,试件尺寸和实验参数见表 1。在不同撞击速度下共进行 3 次碰撞实验,应用 VISAR 技术测量碰撞过程中靶片自由面质点的运动速度时程曲线,结果见图 1。当碰撞产生的冲击波到达样品靶片自由面后,将向试件中反射拉伸稀疏波,在其与加载冲击波后的稀疏波相遇后,会在试件中产生拉应力,拉应力足够大时,样品将发生层裂,在自由面粒子速度时程曲线上反映为质点速度出现等周期振荡,这是由于层裂产生的裂片中波的来回反射的结果,这就是所谓层裂特征信号,图 1 中这种层裂的特征信号明显。

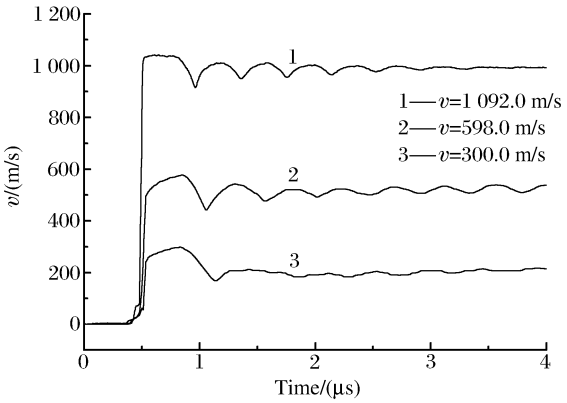


图 1　层裂实验靶片自由面质点速度时程曲线

Fig. 1　Free-surface particle velocity history

表 1　铝锂合金层裂实验试件尺寸和实验参数

Table 1　Dimensions of specimen and the experimental results

Exp. No.	Thickness of flyer h/(mm)	Thickness of target H/(mm)	Impact velocity U/(m/s)	Shock velocity u/(m/s)
1	1.618	3.000	1092.0	5924.0
2	1.613	2.999	598.0	5683.3
3	1.563	3.003	300.0	5458.3

理论上,随撞击速度的提高撞击产生的冲击波压力增加,产生层裂的反射拉应力增加。考察层裂过程中靶板自由面质点速度时程曲线可明显看出,随碰撞速度的增加,振荡的周期在减小,振荡波形变得更加清晰。振荡周期的减小表明层裂片厚度变小,说明碰撞速度对层裂片厚度有直接的影响,在飞片厚度相同时碰撞速度越高,层裂片厚度越薄,发生层裂的位置越靠近自由面。另外,300.0 m/s 碰撞实验曲线层裂片的振荡不清晰,周期也不明显,可以认为是由于产生层裂的反射拉伸应力处于层裂产生的阈值应力附近,层裂过程不稳定的结果。图 2 为收集到 300.0 m/s 碰撞实验靶板层裂后的残片与完整靶板的比较,表明在试件中发生了层裂,但试件周边层裂并不完全。更高速度的碰撞实验没有找到可辨识层裂的样品残体。

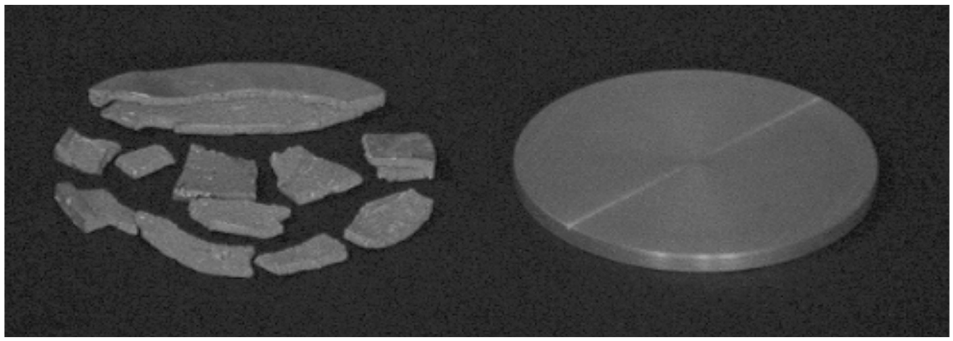


图 2　层裂实验铝锂合金实验靶板样品实验前后比较

Fig. 2　Al-Li alloy target before and after experiment

3 损伤演化方程和层裂准则的建立

讨论在强冲击载荷下材料的力学行为有必要考虑损伤演化的影响。为此,以细观统计和唯象分析相结合的思想,推导材料微孔洞型损伤演化方程。首先考虑包含大量空穴、总体积为 V 的一块介质,设空穴总体积为 V_D,实体物质总体积为 V_S,则有

$$V=V_D+V_S \tag{1}$$

定义损实比 Φ 和损伤度 D 如下

$$\Phi=V_D/V_S,\ D=V_D/V=V_D/(V_S+V_D) \tag{2}$$

则有

$$V_D=DV,\ \dot{V}_D=\dot{D}V+\dot{V}D,\dot{D}=\frac{\dot{V}}{V}-\frac{\dot{V}}{V}D \tag{3}$$

$$\Phi=\frac{D}{1-D},\ D=\frac{\varphi}{1+\varphi},\ \dot{\Phi}=\frac{\dot{D}}{(1-D)^2},\ \dot{D}=\frac{\dot{\varphi}}{(1+\varphi)^2} \tag{4}$$

设 t 时刻介质 V 中有 m 个空穴,体积各为 V_D^i,以 $\dot{N}$ 表示成核率密度,即单位体积实体介质中单位时间内新增空穴数,并以 v_0 表示最小成核空洞体积,则

$$\dot{V}_D=\sum\dot{V}_D^i+V_S\dot{N}v_0 \quad 或 \quad \frac{\dot{V}_D}{V_S}=\sum\frac{\dot{V}_D^i}{V_S}+\dot{N}v_0 \tag{5}$$

故有

$$\dot{\Phi}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{V_D}{V_S}\right)=\frac{\dot{V}_D}{V_S}-\frac{V_D\dot{V}_S}{V_S^2}=\dot{\Phi}_1+\dot{\Phi}_2 \tag{6}$$

式中:$\dot{\Phi}_1=V_D/V_S$ 表示实体部分不可压缩($\dot{V}_S=0$),而只是由于空穴长大和成核造成的空穴总体积增加 $\dot{V}_D$ 所引起的 Φ 的增加率,$\dot{\Phi}_2=-V_D\dot{V}_S/V_S^2$ 表示空穴体积 V_D 不变,而单纯由于实体部分的可压缩性($-\dot{V}_S$)所引起的 Φ 的增加率。如果近似假设 $\dot{V}_S=0$ 而略去了 $\dot{\Phi}_2$,从物理上讲,这在损伤已较大的阶段可能是合适的,但在损伤较小的阶段则可能是过于粗糙的。另外从数学上讲,由 $\dot{V}_S=0$ 将可直接导出

$$\dot{D}=\frac{\dot{V}}{V}(1-D) \tag{7}$$

这本身已是对材料损伤演化的一种制约,可视为一种由于条件 $\dot{V}_S=0$ 而引出的一种损伤演化方程,而它并不显含对损伤发展最重要的影响因素——介质的应力,故在理论上似乎是不大合适的。我们将抛弃 $\dot{V}_S=0$ 这一近似,而在更严格的理论基础上导出新的材料损伤演化方程。

空穴的长大和成核,需要介质中的应力场突破一个平均拉应力壁垒,即应力阈值 σ_0,当拉应力小于或低于这一壁垒值时,空穴不会长大和成核。当其高于此值时才会出现空穴长大和成核。故从唯象分析的角度,将假定每个孔洞的相对长大率和成核率密度都是相对实体静水(拉)应力 σ_S/σ_0 的函数

$$\frac{\dot{V}_D^i}{V_D^i}=af_1\left(\frac{\sigma_S}{\sigma_0}\right) \tag{8}$$

$$\dot{N}=\dot{N}_0f_2\left(\frac{\sigma_S}{\sigma_0}\right) \tag{9}$$

式中:a、$\dot{N}_0$ 为材料常数,而应力势垒函数 f_1、f_2 具有性质

$$f_1(1)=f_2(1)=0,\quad f'_1>0,\quad f'_2>0 \tag{10}$$

取

$$f_1\left(\frac{\sigma_S}{\sigma_0}\right)=f_2\left(\frac{\sigma_S}{\sigma_0}\right)=\left(\frac{\sigma_S}{\sigma_0}-1\right)^\lambda \tag{11}$$

将(8)式、(9)式代入(5)式和(6)式得

$$\dot{\Phi}=a\Phi f_1\left(\frac{\sigma_S}{\sigma_0}\right)+\dot{N}_0v_0f_2\left(\frac{\sigma_S}{\sigma_0}\right)+\frac{D\dot{D}}{(1-D)^2}-\frac{D\dot{V}}{V(1-D)} \tag{12}$$

利用(4)式可得

$$\dot{D}=aDf_1\left(\frac{\sigma_S}{\sigma_0}\right)+(1-D)\dot{N}_0v_0f_2\left(\frac{\sigma_S}{\sigma_0}\right)-\frac{D\dot{V}}{V} \tag{13}$$

这就是所得到的损伤演化方程的一般形式。当取函数 f_1、f_2 为(11)式时,损伤演化方程的具体形式为

$$\dot{D}=[aD+(1-D)\dot{N}_0v_0]\left(\frac{\sigma_S}{\sigma_0}-1\right)^{\lambda}-\frac{D\dot{V}}{V} \tag{14}$$

该方程中三项有着明确的意义:第一项 $\dot{D}_1=aD(\sigma_S/\sigma_0-1)^{\lambda}$ 表示孔洞长大对损伤发展的贡献,其特征是与已有损伤 D 成正比,已有损伤越大,孔洞长大对损伤发展的贡献越大,a 可称为孔洞长大损伤因子;第二项 $\dot{D}_2=(1-D)\dot{N}_0v_0(\sigma_S/\sigma_0-1)^{\lambda}$ 表示孔洞成核对损伤发展的贡献,其特点是与未损伤量$(1-D)$成比例,未损伤量越大,孔洞成核对损伤发展的贡献越大,$\dot{N}_0v_0$ 可称为孔洞成核损伤因子;第三项中由于有 $\dot{V}/V=\dot{v}/v=\mathrm{div}\ \boldsymbol{v}$($v$ 和 $\boldsymbol{v}$ 分别为介质的比容和质点速度)表示介质的相对膨胀率,故有 $\dot{D}_3=-D\dot{v}/v$ 表示整个含损伤介质的相对体积膨胀率 $\dot{v}/v$ 对损伤发展的缓解作用,该项也与已有损伤 D 成比例,D 越大体胀对损伤发展的缓解效应越明显,这些趋势在物理上应该是比较合理的。

层裂准则取

$$D=D_c \tag{15}$$

式中:D_c 为极限损伤,当损伤达到此值即认为材料失去承载能力。

4　数值模拟的方法和思想

平板高速碰撞问题是一项具有重大学术意义和应用价值的研究课题。事实上,几乎所有利用轻气炮技术开展材料本构研究的实验工作都离不开一维应变波的计算与分析。从计算力学和应力波基本理论出发,建立并发展了以有限差分法为基础的 ANWP 程序。该程序是计算一维应变波的专用程序,可模拟平板撞击实验及层裂效应。在程序中嵌入了损伤对材料力学行为的影响,采用线性损伤软化的假定,即认为将材料的强度和模量乘以软化系数$(1-D)$即得含损伤材料的相应量。材料损伤 D 由方程(14)计算,当 $D=D_c$(极限损伤)时,认为材料失去承载能力或发生层裂。

对于铝锂合金,已经通过实验和理论相结合的方法得到了其状态方程和一维应力下的热粘塑性本构关系[1,2]。于是在考虑了损伤的影响后,材料的状态方程和一维应力下的本构关系将分别为

$$p=\frac{k_0}{n}(1-D)\left\{\left[\frac{\rho}{\rho_0(1-D)}\right]^n-1\right\} \tag{16}$$

式中:p、ρ 分别为压力、和密度,ρ_0 为初始密度,k_0 和 n 为 Murnagham 方程参数。

$$\sigma=Y_0(1-D)\varepsilon^m(1+A\varepsilon^n)\left[1+\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^P\right]\left[1-B\left(\frac{T-T_r}{T_m-T_r}\right)^3\right] \tag{17}$$

式中:Y_0、m、n、A 和 P 为材料常数,其中 Y_0 具有应力量纲而其它皆为无量纲常数,$\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率,B 为温度系数,T_m 为材料熔化温度,T_r 为参考温度。

推广到复杂应力状态,认为材料是一种流体弹粘塑性材料,其状态方程由(16)式表达,而其时率相关的屈服准则为

$$\bar{\sigma}=Y_0(1-D)\bar{\varepsilon}^m(1+A\bar{\varepsilon}^n)\left[1+\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0}\right)^P\right]\left[1-B\left(\frac{T-T_r}{T_m-T_r}\right)^3\right] \tag{18}$$

其中

$$\bar{\sigma}=\sqrt{\frac{3}{2}s_{ij}s_{ij}},\quad \bar{\varepsilon}=\int\sqrt{\frac{2}{3}\dot{\varepsilon}_{ij}^P\dot{\varepsilon}_{ij}^P},\quad \dot{\bar{\varepsilon}}\sqrt{\frac{2}{3}\dot{\varepsilon}_{ij}^P\dot{\varepsilon}_{ij}^P} \tag{19}$$

5　损伤演化方程相关参数的确定

一般损伤演化方程以及层裂准则的相关参数需要大量材料损伤实验来确定。我们引入一种新的方法确定这些参数:在一维应变波模拟程序中嵌入考虑损伤演化影响的铝锂合金本构方程和状态方程,模

拟平板撞击过程靶板自由面质点速度时程曲线，并与实验曲线相对比，模拟过程中不断调整损伤演化方程及层裂准则中的参数 a、$\dot{N}_0 v_0$、σ_0、λ 和 D_c，以模拟曲线和实验结果良好符合为出发点，确定铝锂合金材料损伤演化方程及其层裂准则的相关参数。应用这些参数模拟其它几组实验条件的撞击并与实验结果进行对比，以达到对确定的损伤演化方程及其层裂准则的验证。

研究中首先模拟 598.0 m/s 平板撞击过程，以模拟曲线和实验结果尽可能接近为条件，不断调整损伤演化方程及其层裂准则的相关参数，得到图 3(a)所示的令人满意的对比结果。调整后最终的参数即为铝锂合金的损伤演化方程和层裂准则参数，结果见表 2。利用得到的损伤演化方程和层裂准则进一步模拟 1092 m/s 和 300 m/s 平板撞击过程，并与碰撞实验结果进行比对作为对其的验证。图 3(b)和图 3(c)分别给出撞击速度分别为 1092 m/s 和 300 m/s 的平板撞击层裂实验铝锂合金靶板自由面速度时程曲线和计算结果的对比，结果也是基本令人满意的，说明用模拟与实验相结合的方法确定的材料损伤演化方程和层裂准则，反映了铝锂合金材料的损伤演化特性。图 3(c)的结果在振荡部分误差较大，我们认为 300 m/s 碰撞速度较低，从实验曲线的振荡不清晰、周期不明显判断，实验可能处于层裂产生的临界点附近，影响因素较为复杂。图 3(d)给出模拟得到的 598 m/s 撞击层裂时刻靶中的损伤分布曲线，从图中可以看出，层裂时损伤分布比较集中，主要分布于层裂产生的位置附近。

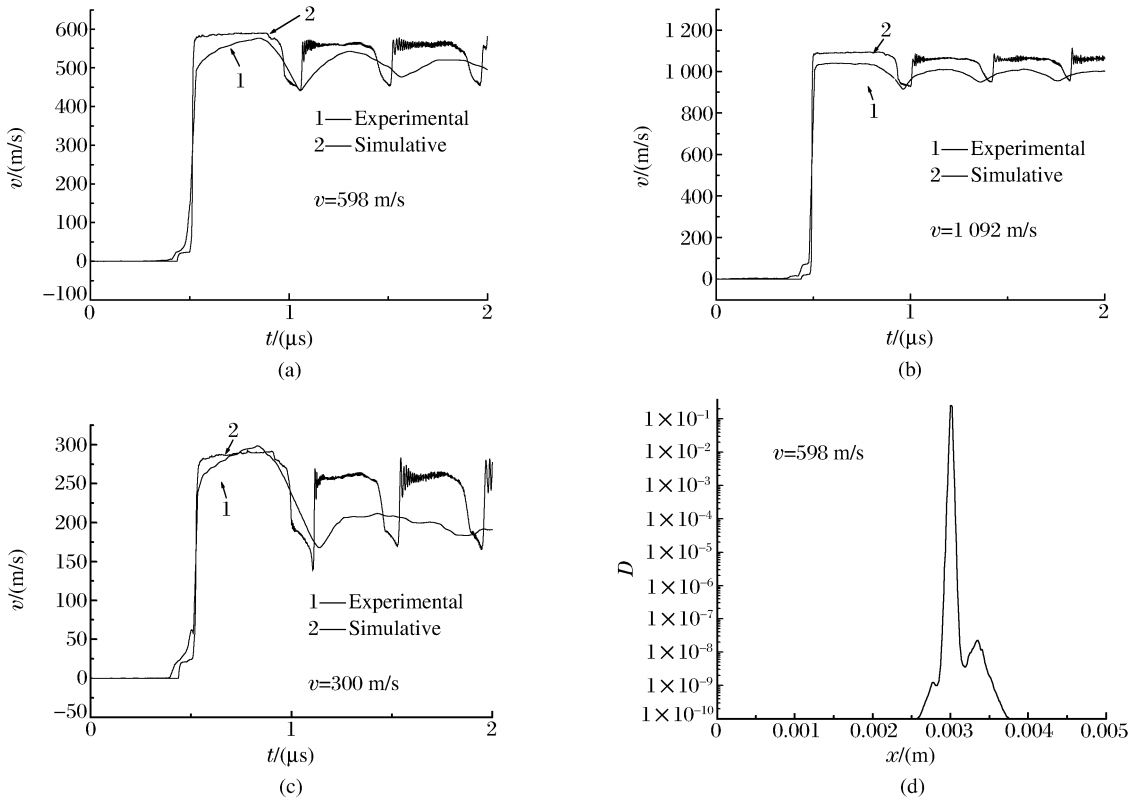


图 3 自由面速度实验结果和模拟结果比较

Fig. 3 Computed and measured curves of free-surface particle velocity

表 2 损伤演化方程和层裂准则参数

Table 2 The parameters in the damage evolution equation and the spallation criterion

$a/(s^{-1})$	$\dot{N}_0 v_0/(s^{-1})$	$\sigma_0/(MPa)$	λ	D_c
7.5×10^5	0	155	3.2	0.25

表 3 给出了计算与实验结果的数值比较。理论和实验得到的自由面最大速度的最大误差不超过 1.77%。在飞片厚度相当条件下,碰撞速度越高层裂片厚度越薄的实验结果在数值模拟中也有明确反映。层裂面最大轴向拉应力随撞击速度的增加而增加,以及层裂时间随撞击速度的增加而减少,很好地反映了碰撞速度对层裂片厚度影响的实验现象。

表 3　数值模拟结果及与实验的比较

Table 3　The numerical simulation results compare with experiments

Parameters	No. 1	No. 2	No. 3
Impact velocity/(m/s)	1092.0	598.0	300.0
Thickness of target/(mm)	3.000	2.999	3.003
Thickness of flyer/(mm)	1.618	1.613	1.563
Thickness of spall(simulation)/(mm)	1.508	1.619	1.584
Spallation time (simulation)/(μs)	0.784	0.819	0.861
Max tensile stress on spalling surface/(GPa)	10.67	4.62	3.78
Max free-surface particle velocity (experiment)/(m/s)	1092.0	598.0	300.0
Max free-surface particle velocity (simulation)/(m/s)	1093.0	587.4	298.0
Errors between the computed and the measured values/(Free-surface velocity)	0.09%	1.77%	0.67%

6　结论和讨论

本研究以细观统计和唯象分析相结合的思想,提出了一种新的微孔洞型损伤演化方程和层裂准则,如(14)式、(15)式所示。该损伤演化方程同时计及了孔洞长大、成核以及材料可压缩性的耦合效应对损伤演化的影响。本文损伤演化方程的基本假定是材料损伤是由材料中存在的各类不均匀的薄弱细观结构被载荷激发、活化、长大而形成,并沿时空分布和演化。方程推导的基础是(2)式,即损实比 Φ 和损伤度 D 两概念的定义,并在推导过程中从唯象分析的角度假定每个孔洞的相对长大率和成核率密度都是相对实体应力 σ_S/σ_0 的函数。由于没有具体材料特性的假定,本文得到的损伤演化方程形式同样适用于其它各向同性材料。实际上我们已在几种钢材料上成功应用,并将另文讨论。

通过一维应变波数值模拟与层裂实验结果的比对,确定了材料损伤演化方程和层裂准则的方法。该方法只需少量实验结果即可完成对方程相关参数的确定和验证。通过铝锂合金材料平板撞击层裂实验以及对该过程的数值模拟,得到了铝锂合金材料的损伤演化方程和层裂准则。方程参数中孔洞成核特征频率 $\dot{N}_0 v_0 = 0$,表明铝锂合金材料损伤演化可以忽略孔洞成核的影响,其内在原因需要进一步的研究。

References:

[1] Guo Y, Li Y C, Yao L, et al. Study on the Limit Strain-Rate Softening Property of Al-Li Alloy [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(1): 54－58. (in Chinese)
郭　扬,李永池,姚　磊,等. 铝锂合金材料的极限应变率软化特性研究 [J]. 爆炸与冲击,2004,24(1):54－58.

[2] Li Y C, Guo Y, Tan F L, et al. Equation of State for Al-Li Alloy [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2003, 17(2): 81－87. (in Chinese)
李永池,郭　扬,谭福利,等. 铝锂合金材料状态方程的研究 [J]. 高压物理学报,2003,17(2):81－87.

[3] Seaman L, Curran D R, Shockey D A. Computational Models for Ductile and Brittle Fracture [J]. J Appl Phys, 1976, 47(11): 4814－4826.

[4] Perzyna P. Internal State Variable Description of Dynamic Fracture of Ductile Solids [J]. Int J Solids Struct, 1986, 22: 797－818.

[5] Feng J P. Damage Function Models for the Dynamic Ductile Fracture of Metals [D]. Beijing: Beijing Science and

Technology University,1992. (in Chinese)
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,1992.

[6] Li Y C,Li D H,Wei Z G,et al. Research on the Deformation,Damage and Fracture Rules of Circular Tubes under Inside-Explosive Loading [J]. Acta Mechanica Sinica,1999,31(4):442－449. (in Chinese)
李永池,李大红,魏志刚,等. 内爆炸载荷下圆管变形、损伤和破坏规律的研究 [J]. 力学学报,1999,31(4):442－449.

[7] Zhang L,Cai L C,Wang W,et al. The Response Feature for Shock Loading of Tantalum [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2001,18(4):255－270. (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,2001,18(4):255－270.

The Damage Evolution Equation and the Spallation Criterion of Al-Li Alloy

GUO Yang,LI Yong-Chi,CAO Jie-Dong,LI Jian-Guang

(*Department of Mechanics and Mechanical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *China*)

Abstract: The spallation experiments of Al-Li alloy have been carried out and the free surface velocity temporal curves for the spallation events have been measured. Based on the microscopics statistics and phenomenological analysis, a damage evolution equation is developed, which involves the effects of the growth and nucleation of microcavities as well as the effects of the material's compressibility. Inserting the constitutive equation and Murnagham state equation of Al-Li alloy and the damage evolution equation into ANWP, which is a special program for one-dimension strain wave, and by the numerical simulation of the free-surface velocity temporal curve for the spallation events in the gas gun experiments, we have obtained the related parameters in the damage evolution equation and the spallation criterion.

Key words: Al-Li alloy; damage evolution equation; spallation criterion; numerical simulation