文章编号：1000-5773(2005)02-0105-08

一种新的概念性层裂模型*

陈大年，俞宇颖，尹志华，刘国庆，王焕然，谢书港

（宁波大学力学与材料科学研究中心，浙江宁波 315211）

摘要：在重建Cochran-Banner模型的基础上提出了一种新的概念性层裂模型。这种新模型仅保留Cochran-Banner模型中的强度函数，重新定义损伤，并抛弃了基本假设：一旦微损伤形成，使微损伤演化远远易于使固体进一步体积应变，进而修正了差分微元中固体比容的计算。在新的模型中，一旦拉伸应力达到层裂强度，重新定义的损伤将由强度函数确定的应力松弛方程、计及损伤的能量守恒方程、状态方程以及本构方程等一系列封闭方程组确定。新模型中也仅包含两个参数：层裂强度及临界损伤度，它们的确定能使在一定初、边值条件下的层裂试验的数值计算结果与实验测得的靶自由面速度历史或靶-低阻抗界面应力历史以及回收观测的层裂面上的损伤一致。强调指出，选定强度函数或应力松弛方程提供了确定损伤的可能，同时排除了任何外加的损伤演化方程。

关键词：层裂模型；层裂强度；强度函数；临界损伤

中图分类号：O346.5 **文献标识码**：A

1 引 言

关于层裂的成核与增长模型已于1987年由Curran等[1]作了总结，此后有关微空穴或微裂纹成核与增长的机理又有很多研究[2~9]。最近，关于微空穴聚结机理的研究也有进展[10,11]，认为不仅仅由于膨胀效应，还由于微空穴的变形效应，也就是空穴间基体的内部颈缩失稳。这些研究进展对于精细描述层裂现象当然是有益的。然而，涉及大量的不同损伤阶段的材料参数，为确定这些参数，要进行大量的实验。因此，这种精细的层裂模型很难得到实际应用。另一方面，Grady[12]等指出："虽然认为层裂与物体内部既有的与演化的微结构成核、增长及聚合过程相关，已有大量证据表明，连续层裂特性对于材料的微观详情并不敏感，更多地依赖于瞬态应力波加载中的驱动能量平衡以及诸如断裂韧度、表面拉伸、流动应力、粘性等断裂损耗的连续度量。"

也许，层裂强度是最基本的断裂损耗度量。然而，在层裂过程中，应力会改变，应力松弛效应必须包含在层裂计算中。Cochran和Banner[13]曾提出一种概念性的层裂模型，这种模型并不涉及微损伤演化的精细而局部的描述，而是以最简化的形式计及了微空穴增长与聚结对于强度计算的效应。本项研究将提出一种新的概念性层裂模型，重新定义损伤，抛弃损伤间基体的不可压缩假设，基于层裂强度的松弛函数特性，耦合计及损伤的能量守恒方程、计及损伤的状态方程以及计及损伤的本构方程，在初、边值条件下，损伤自协调演化，无须外加损伤演化方程，已构成了一种新的层裂模型，其中仅包含两个参数，可以通过实验确定。应用实例表明，这种新的概念性层裂模型不仅可以有效再现靶板自由表面速度历史或靶板-低阻抗材料界面的应力历史，而且可以有效地再现靶中层裂区的损伤分布。

2 一种新的概念性层裂模型

Cochran-Banner[13]层裂模型的要点如下：

* **收稿日期**：2004-06-03；**修回日期**：2004-12-08

基金项目：国家自然科学基金(10272058)；浙江省自然科学基金(502167)；中国工程物理研究院专项基金

作者简介：陈大年(1940—)，男，研究员. E-mail：chdnch@nbu.edu.cn

(1) 引进损伤函数

$$D(x,t)=V_c/A \tag{1}$$

式中:x 为 Lagrange 坐标,t 为时间,V_c 为裂纹(空穴)的体积,A 为垂直于应变的面积。

(2) 作如下假设:

(a) 裂纹(空穴)各向同性分布。

(b) 当应力达到最大拉伸极限 Σ 时,质量元的比容增长被认为是空穴的总体积增长所致,因为非空穴区相对地不易应变。因此

$$D(x,t)=\int_0^t \frac{\mathrm{d}V}{A},\quad (\mathrm{d}V>0) \tag{2}$$

(3) 证明了如下关系

$$A_c \sim V_c^{2/3} \tag{3}$$

式中:A_c 为空穴的总截面。因此,提出了如下强度函数

$$f=1-(D/D_0)^{2/3} \tag{4}$$

式中:D_0 为临界损伤,当 $D=D_0$ 时,宏观断裂发生。

应力 σ 不允许超过 Σ,材料进入损伤相后

$$\sigma=f\Sigma \tag{5}$$

我们重建了 Cochran-Banner 层裂模型,提出了一种新的概念性层裂模型。首先重新定义损伤 $D(x,t)$

$$D(x,t)=\frac{v_V(x,t)}{\overline{v}(x,t)} \tag{6}$$

式中:$v_V(x,t)$为单位质量介质中微损伤(空穴)的体积,$\overline{v}(x,t)$为比容。相应地,方程(5)改变为

$$\sigma(x,t)=\left\{1-[D(x,t)/D_0]^{2/3}\right\}\Sigma \tag{7}$$

根本性的重建在于抛弃 Cochran-Banner 所作的上述假设(b),并不认为当应力超过最大拉伸极限后,质量元的比容增长就是空穴的总体积。我们认为,质量元的比容 $\overline{v}(x,t)$始终由两部分组成,即

$$\overline{v}(x,t)=v_V(x,t)+v_s(x,t) \tag{8}$$

式中:$v_V(x,t)$为空穴的比体积,$v_s(x,t)$为固体(基体)的比容,下标"s"表示固体。假设在层裂过程中 $v_s(x,t)$不变,并没有充分依据,而 $v_V(x,t)$的确定应该基于层裂强度的松弛函数特性方程(7),耦合计及损伤的能量守恒方程、计及损伤的状态方程以及计及损伤的本构方程,构成封闭的方程组,在初、边值条件下,损伤自协调演化。具体来说,对于平面冲击波致层裂试验,当拉伸应力达到最大拉伸极限 Σ 时,差分单元的微损伤比体积 v_V 等由求解如下封闭的联立方程组得到

$$-(\overline{p}+\overline{q})+\overline{s_1}=\left[1-\left(\frac{v_V/\overline{v}}{D_0}\right)^{2/3}\right]\Sigma \tag{9}$$

$$\dot{\overline{u}}-\overline{v}\,\overline{s_1}\,\dot{\overline{\varepsilon_1}}+(\overline{p}+\overline{q})\,\dot{\overline{v}}=0 \tag{10}$$

$$\overline{p}=\left(1-\frac{v_V}{\overline{v}}\right)\cdot p_s\left[\left(1-\frac{v_V}{\overline{v}}\right)\overline{v},\overline{u}\right] \tag{11}$$

$$\overline{Y}=Y\cdot\left(1-\frac{v_V}{\overline{v}}F\right) \tag{12}$$

$$\overline{G}=G\left(1-\frac{v_V}{\overline{v}}F\right),\quad F=15\,\frac{1-\nu}{7-5\nu} \tag{13}$$

式中:"—"表示含损伤的介质的平均量,"·"表示随流微商,p、u 为压力、比内能。

$$p_s=p_s(v_s,u_s) \tag{14}$$

为固体(基体)的状态方程,在可忽略表面能的情况下,假设 $\overline{u}=u_s$,q 为人为粘性,s_1、ε_1 分别为偏应力、全应变,Y、G 为固体的流动应力、剪切模量,ν 为泊松比。

显然,在差分计算中,$\overline{v}$ 已由运动方程及连续性方程确定

$$\frac{\dot{\overline{U}}}{\overline{v}}=\frac{\partial[-(\overline{p}+\overline{q})+\overline{s_1}]}{\partial X} \tag{15}$$

$$\frac{\dot{\overline{v}}}{\overline{v}}=\frac{\partial\overline{U}}{\partial X} \tag{16}$$

$$X=X(x,t) \tag{17}$$

式中:U 为速度,X 为 Euler 坐标。

当 $-(\overline{p}+\overline{q})+\overline{s_1}\geqslant\Sigma$ 时,方程(9)～方程(17)的差分方程在初、边值条件下,就可一并确定 $\overline{U}(x,t)$、$X(x,t)$、$\overline{v}(x,t)$、$\overline{q}(x,t)$、$\overline{p}(x,t)$、$\overline{u}(x,t)$以及 $v_V(x,t)$。当 $v_V(x,t)/\overline{v}(x,t)=D_0$ 时,层裂过程完成。

上述这种层裂的新模型,其实质是用层裂强度的松弛方程(9)替代了损伤演化方程,这种方程的物理意义已由 Cochran-Banner[13] 予以证明,与所谓的 Percolation(渗透)作用有关,也就是与微损伤的聚合有关。因此,这种模型从本质上讲,是着重描述损伤后期诱发的突变效应。关键的参数是 Σ 及 D_0,我们将通过应用实例,考察这种层裂模型的有效性,并讨论 Σ 与 D_0 的确定。

必须强调指出,上述新的概念性层裂模型在抛弃了基体(微损伤间的固体)不可压缩的假设后,损伤度 $D(x,t)$的计算也无须引入外加的损伤演化方程。因为,引入强度函数已经使方程组闭合。

3　应用实例

本项研究主要目的在于研究新的概念性层裂模型的合理性与实用性,并不追求数值模拟与实验结果的符合程度。因此,关于状态方程及本构方程,采用最常用的 Grüneisen 状态方程[14] 及 Steinberg-Guinan[15] 本构方程

$$p_s=p_s(v_s,u_s)=k_1\eta+k_2\eta^2+k_3\eta^3+\Gamma u_s \tag{18}$$

式中:

$$k_1=\rho_0C_0^2$$
$$k_2=\rho_0C_0^2(2s-\Gamma/2)$$
$$k_3=\rho_0C_0^2s(3s-\Gamma)$$
$$\eta=1-\rho_0/\rho_s$$

ρ_0、ρ_s分别为固体的初始及瞬时密度,C_0、s 为冲击波速度与波后质点速度线性关系中的系数,Γ 为 Grüneisen 参数。

$$Y=\left[Y_0\left(1+\beta\varepsilon_{\mathrm{eq}}^{\mathrm{p}}\right)^n\right]\left[1+bp_s\left(\rho_0/\rho_s\right)^{1/3}-h(T-300)\right] \tag{19}$$

$$G=G_0\left[1+bp_s\left(\rho_0/\rho_s\right)^{1/3}-h(T-300)\right] \tag{20}$$

$$Y_0\left(1+\beta\varepsilon_{\mathrm{eq}}^{\mathrm{p}}\right)^n\leqslant Y_{\max} \tag{21}$$

当 $T>T_m$ 时,$Y=0$。

$$T_m=T_{m0}\left(\rho_0/\rho_s\right)^{2/3}\exp\left[2\Gamma(1-\rho_0/\rho_s)\right] \tag{22}$$

$\varepsilon_{\mathrm{eq}}^{\mathrm{p}}$、$T$ 分别为等效塑性应变、温度,T_m 为熔化温度,β、n、b、h、T_{m0}、Y_0、$Y_{\max}$、G_0 为材料参数。

我们对铜、钢、铝、铀等材料的层裂试验进行了数值模拟,所用参数见表 1 及表 2,表 2 中 * 表示 p 的单位取 10^2 GPa 时的参数。

表 1　Grüneisen 状态方程参数[14]

Table 1　Parameters[14] of Grüneisen equation of state

Material	ρ_0/(g/cm^3)	C_0/(km/s)	s	Γ	k_1/(GPa)	k_2/(GPa)	k_3/(GPa)
Aluminium	2.73	5.3	1.34	2.00	79.0	132.5	213.0
Copper	8.93	3.9	1.49	1.99	138.0	274.9	511.3
Steel	7.90	4.6	1.49	2.17	164.8	312.4	564.9
Uranium	18.95	2.5	1.56	2.20	117.2	236.8	453.5

表 2 Steinberg-Guinan 本构方程参数[15]

Table 2 Parameters[15] of Steinberg-Guinan constitutive model

Material	Y/(GPa)	Y_{max}/(GPa)	β	n	b^*	h	T_{m0}	G_0/(GPa)
Aluminium	0.29	0.68	125.0	0.1	8.0	6.2×10^{-4}	1.22×10^{3}	27.6
Copper	0.12	0.60	36.0	0.45	3.0	3.8×10^{-4}	1.79×10^{3}	47.7
Steel	0.34	2.0	40.0	0.35	3.0	4.5×10^{-4}	1.93×10^{3}	69.0
Uranium	0.80	1.7	2.7	0.26	1.0	8.1×10^{-4}	2.42×10^{3}	84.4

采用本项研究的层裂模型，对于若干平面冲击波致层裂试验进行了数值模拟，研究的实例表明，此层裂模型不仅可再现靶板自由面速度历史或靶板-低阻抗材料界面的应力历史，而且能再现靶中层裂区的损伤分布。

实例 1

2 mm 厚铜飞片以 0.185 km/s 速度冲击 9 mm 厚的平面铜靶[16]。图 1 表示靶板自由面速度历史的实验曲线与数值模拟曲线，其中取 $\Sigma=1.5$ GPa，$D_0=0.1$。

实例 2

0.62 mm 厚的铜飞片以速度 0.159 km/s 冲击 1.59 mm 厚的平面铜靶，在靶后置有 PMMA 板，在 PMMA 中距靶-PMMA 界面 0.5 mm 处置锰铜应力计[1]。图 2 表示了应力计所测得的应力历史以及我们的数值模拟的应力历史，其中取 $\Sigma=1.3$ GPa，$D_0=0.20$，图中还表示了采用 NAG 模型计算的结果。在图 3 中表示了在靶的层裂区中，实测的损伤分布以及我们的数值模拟结果，图 3 中也表示了采用 NAG 模型计算的结果。

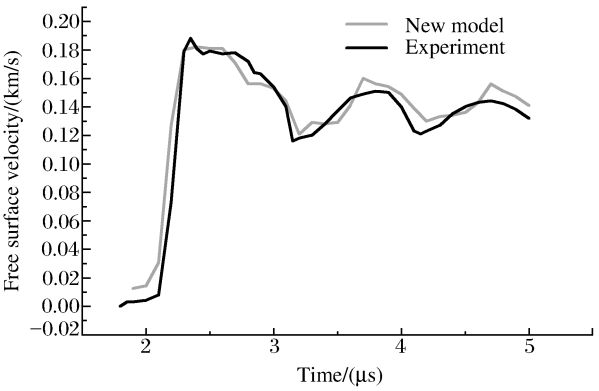


图 1 2 mm 厚铜飞片以 0.185 km/s 的速度冲击 9 mm 厚平面铜靶的实测与计算的靶自由面速度历史比较(实例 1)

Fig. 1 Comparison between model and experimental free surface velocity histories

(Example 1: 9 mm thick copper-target was impacted by 2 mm thick copper plate at velocity of 0.185 km/s)

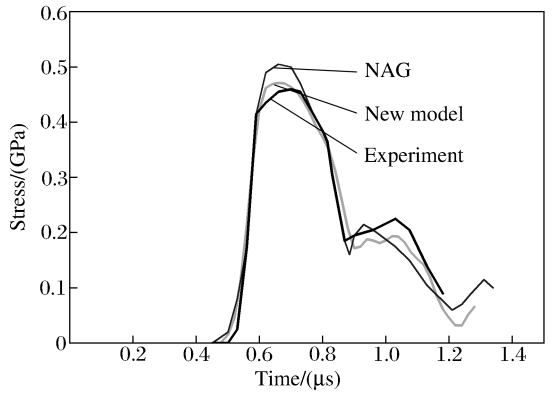


图 2 0.62 mm 厚铜飞片以 0.159 km/s 的速度冲击 1.59 mm 厚的平面铜靶的实测与计算的 PMMA 中应力历史比较(实例 2)

Fig. 2 Comparison of stress record from manganin gage in PMMA behind copper with computed stress

(Example 2: 1.59 mm thick copper-target with PMMA buffer was impacted by 0.62 mm thick copper plate at velocity of 0.159 km/s)

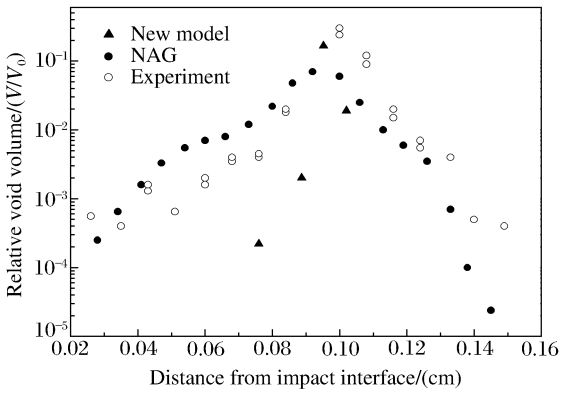


图 3 0.62 mm 厚铜飞片以 0.159 km/s 的速度冲击 1.59 mm 厚平面铜靶的实测与计算的层裂区损伤分布(实例 2)

Fig. 3 Computed and observed damage in copper

(Example 2: 1.59 mm thick copper-target with PMMA buffer was impacted by 0.62 mm thick copper plate at velocity of 0.159 km/s)

实例 3

1.14 mm 厚的铜飞片以速度 0.129 km/s 冲击 3.18 mm 厚的铜靶,在靶后置 PMMA,在 PMMA 中距靶-PMMA 界面 0.5 mm 处置锰铜应力计[1]。图 4 表示了应力计所测得的应力历史以及我们的数值模拟应力历史,其中取 $\Sigma=1.3$ GPa,$D_0=0.20$。图 4 中还表示了采用 NAG 模型计算的结果。图 5 表示了在靶的层裂区中,实测的损伤分布以及我们的数值模拟结果,图 5 中也表示了采用 NAG 模型计算的结果。

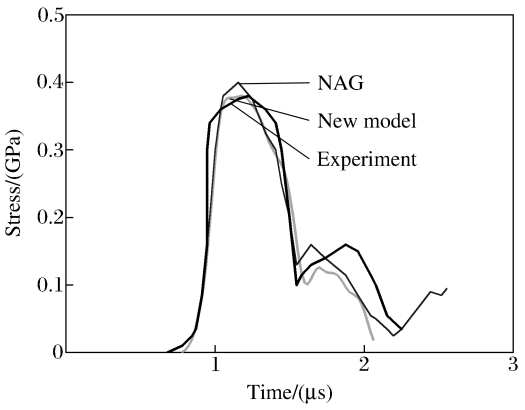


图 4　1.14 mm 厚铜飞片以 0.129 km/s 的速度冲击 3.18 mm 厚铜靶的实测与计算的 PMMA 中的应力历史比较(实例 3)

Fig. 4　Comparison of stress record from manganin gage in PMMA behind copper with computed stress (Example 3: 3.18mm thick copper-target with PMMA buffer was impacted by 1.14 mm thick copper plate at velocity of 0.129 km/s)

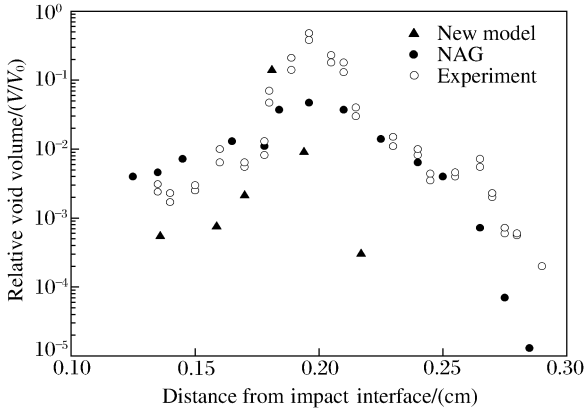


图 5　1.14 mm 厚铜飞片以 0.129 km/s 的速度冲击 3.18 mm 厚铜靶的实测与计算的层裂区中的损伤分布(实例 3)

Fig. 5　Computed and observed damage in copper (Example 3: 3.18 mm thick copper-target with PMMA buffer was impacted by 1.14 mm thick copper plate at velocity of 0.129 km/s)

实例 4

3 mm 厚的铀飞片以速度 0.153 km/s 冲击 6 mm 厚的铀平面靶[13],图 6 表示了实测的与计算的靶自由面速度历史,数值模拟中,取 $\Sigma=2.0$ GPa,$D_0=0.25$。图中也表示了采用 Cochran-Banner 原始模型的计算结果。

实例 5

1.5 mm 厚的钢飞片以 0.5 km/s 速度冲击 3 mm 厚的钢平面靶[17],图 7 表示了实测的与计算的靶自由面速度历史。数值模拟中,取 $\Sigma=2.4$ GPa,$D_0=0.17$。

实例 6

6.35 mm 厚的铝飞片以 0.99 km/s 速度冲击 12.7 mm 厚的铝靶[18],图 8 表示实测的与计算的靶自由面速度历史,数值模拟中,取 $\Sigma=1.2$ GPa,$D_0=0.25$。

关于 Σ 的选取,初始值可以依据平面冲击波致层裂试验的靶自由面速度跳跃值或靶-PMMA 界面应力跳跃值估算。我们

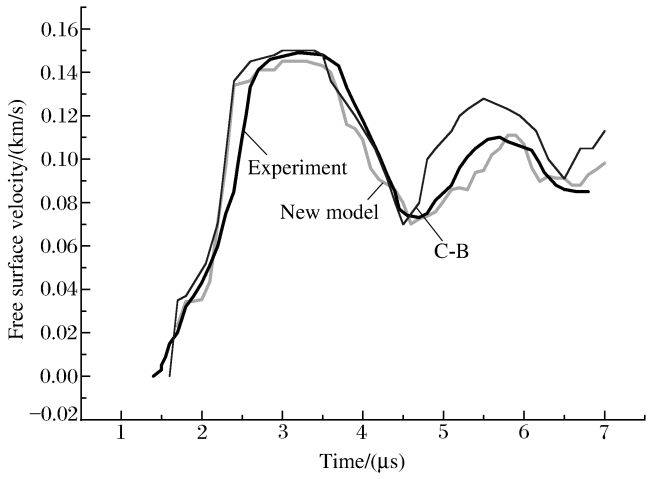


图 6　3 mm 厚铀飞片以 0.153 km/s 的速度冲击 6 mm 厚铀靶的实测与计算的靶自由面速度历史比较(实例 4)

Fig. 6　Comparison between model and experimental free surface velocity histories (Example 4: 6 mm thick uranium-target was impacted by 3 mm thick uranium plate at velocity of 0.153 km/s)

对于这种传统测定层裂强度的方法,已进行了详细讨论[19]。在声学近似下(线性近似),可用如下公式

对于速度历史(剖面)

$$\sigma_{\mathrm{F}}=\frac{1}{2}(Z_{\mathrm{s}}-Z_{\mathrm{w}})U_{\max}-\frac{1}{2}(Z_{\mathrm{s}}+Z_{\mathrm{w}})U_{\min} \tag{23}$$

对于应力历史(剖面)

$$\sigma_{\mathrm{F}}=\frac{1}{2}(Z_{\mathrm{s}}/Z_{\mathrm{w}}-1)\sigma_{\max}-\frac{1}{2}(Z_{\mathrm{s}}/Z_{\mathrm{w}}+1)\sigma_{\min} \tag{24}$$

式中:Z_{s}(对试样)、Z_{w}(对 PMMA)为初始密度与波速的乘积。如果材料响应是弹性的,波速取弹性纵波速,如果材料响应是流体状态,波速取体积声速。

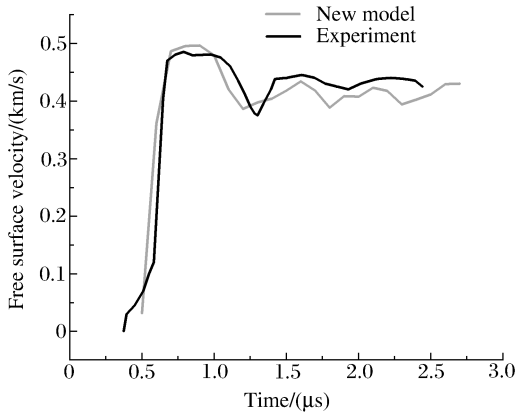


图 7 1.5 mm 厚钢飞片以 0.5 km/s 的速度冲击 3 mm 厚钢平面靶的实测与计算的靶自由面速度历史比较(实例 5)

Fig. 7 Comparison between model and experimental free surface velocity histories (Example 5: 3 mm thick steel-target was impacted by 1.5 mm thick steel plate at velocity of 0.5 km/s)

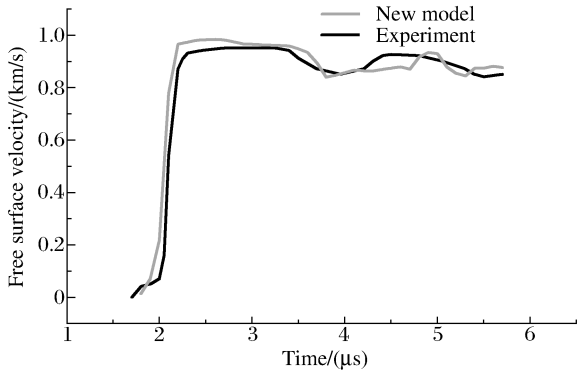


图 8 6.35 mm 厚铝飞片以 0.99 km/s 的速度冲击 12.7 mm 厚铝靶的实测与计算的靶自由面速度历史比较(实例 6)

Fig. 8 Comparison between model and experimental free surface velocity histories (Example 6: 12.7 mm thick aluminium-target was impacted by 6.35 mm thick aluminium plate at velocity of 0.99 km/s)

在 Hugoniot 近似下(非线性近似),层裂强度的估算比较复杂。对于一般情况,须采用 Newton-Raphson 求解。如果要计及层裂片厚度对于估算层裂强度的影响,涉及的问题更多。在这里不作详述,可参考文献[19]。

关于 D_0 的选取,从原则上讲,应该结合对于收回试件的显微观测。对于延性层裂而言,通常取 $D_0=0.1\sim0.3$。

然而,Σ 与 D_0 的最终确定,应该通过数值模拟,调整 Σ、D_0 使计算的自由面速度或靶-PMMA 应力历史与实验结果基本一致。大量实验结果已表明,由传统测定方法确定的层裂强度 Σ 并不是材料常数,而是应变率、温度等的函数,而临界损伤 D_0 也只是一个大体的数量。就我们的观点而言,损伤的演化并非个体行为,而是由整个问题的初、边值问题决定的。因此,损伤演化特征量 Σ 及 D_0 也并非材料常数,由冲击波致层裂的事件确定。我们已发现,数值模拟结果对于 Σ 及 D_0 的敏感性比较强,也许是物理实质,也可能与方程(7)表达的应力松弛特性函数有关,这是我们需要进一步研究的问题。

4 结 论

(1) 提出了一种重建的 Cochran-Banner 层裂模型,重新定义损伤,抛弃损伤间基体的不可压缩假设,基于层裂强度的松弛函数特性,耦合计及损伤的能量守恒方程、计及损伤的状态方程以及计及损伤的本构方程,在初、边值条件下,损伤自协调演化,无须外加损伤演化方程,构成了一种新的层裂模型,其中仅包含两个参数 Σ 和 D_0,可以通过实验结果确定。

(2) 应用实例表明,重建的 Cochran-Banner 层裂模型不仅可以有效地再现靶板自由面速度历史或靶-低阻抗材料界面的应力历史,而且可再现靶中层裂区的损伤分布。

(3) 数值模拟结果对于 Σ 和 D_0 的敏感性比较强,可能是物理实质,也可能与应力松弛的特性函数有关。这是下一步有待研究的问题。

References:

[1] Curran D R, Seaman L, Shockey D A. Dynamic Failure of Solids [J]. Phys Rep Rev Sec Phys Lett, 1987, 147(5-6): 253.

[2] Johnson J N, Addessio F L. Tensile Plasticity and Ductile Fracture [J]. J Appl Phys, 1988, 64(2): 6699－6712.

[3] Rajendran A M, Dietenberger M A, Grove D J. A Void Growth-Based Failure Model to Describe Spallation [J]. J Appl Phys, 1989, 65: 1521.

[4] Addessio F L, Johnson J N. A Constitutive Model for The Dynamic Response of Brittle Materials [J]. J Appl Phys, 1990, 67: 3275.

[5] Nemes J A, Eftis J, Randles P W. Viscoplastic Constitute Modeling of High Strain Rate Deformation, Material Damage and Spall Fracture [J]. J Appl Mechan, 1990, 57(2): 282－291.

[6] Eftis J, Nemes J A. Modeling of Impact-Induced Spall Fracture and Post Spall Behavior of a Circular Plate [J]. Int J Fract Mech, 1992, 53(4): 301－324.

[7] Cortes R. Dynamic Growth of Microvoids under Combined Hydrostatic and Deviatoric Stresses [J]. Int J Solids Struct, 1992, 29(13): 1637－1645.

[8] Addessio F L, Johnson J N. Rate-Dependent Ductile Failure Model [J]. J Appl Phys, 1993, 74(3): 1640－1648.

[9] Nemes J A, Eftis J, Randles P W. Viscoplastic Constitutive Modeling of High Strain-Rate Deformation, Material Damage and Spall Fracture [J]. J Appl Mech, 1990, 57: 282.

[10] Thomason P F. Ductile Spallation Fracture and the Mechanics of Void Growth and Coalescence under Shock-Loading Conditions [J]. Acta Mater, 1999, 47: 3633－3646.

[11] Tonks D L, Zurek A K, Thissell W R. Void Coalescence Model for Ductile Damage [A]. Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. New York: American Institute of Physics, 2002. 611－614.

[12] Grady D E, Kipp M E. Dynamic Fracture and Fragmentation [A]. Asay J R, Shahinpoor M. High-Pressure Shock Compression of Solids [C]. New York: Springer-Verlag Inc, 1993. 267.

[13] Cochran S, Banner D. Spall Studies in Uranium [J]. J Appl Phys, 1977, 48: 2729.

[14] Wilkins M L. Calculation of Elastic-Plastic Flow [A]. Alder B. Methods in Computational Physics(3) [C]. New York: Academic Press, 1964. 211－263.

[15] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W. A Constitutive Model for Metals Applicable at High-Strain Rate [J]. J Appl Phys, 1980, 51: 1498－1504.

[16] Rajendran A M. High Strain Rate Behavior of Metals [R]. AD-A252979, 1992.

[17] Chen D N, Al-Hassani S T S, Sarumi M, et al. Crack Straining-Based Spall Model [J]. Int J Impact Eng, 1997, 19: 107－116.

[18] Morris C E. Los Alamos Shock Wave Profile Data [C]. California: University of California Press, 1982. 70.

[19] Chen D N, Yu Y Y, Yin Z H, et al. On the Validity of the Traditional Measurement of Spall Strength [J]. Int J Impact Eng, 2005, 31: 811－824.

A New Conceptual Model to Describe Spallation

CHEN Da-Nian, YU Yu-Ying, YIN Zhi-Hua, LIU Guo-Qing,
WANG Huan-Ran, XIE Shu-Gang

(*Mechanics & Materials Science Research Center, Ningbo University, Zhejiang* 315211, *China*)

Abstract: A new conceptual model to describe spallation was presented basing on the original Cochran-Banner spall model. The strength function given by Cochran-Banner was maintained using the redefined damage, and the correction concerning the volume of the mesh cells was realized considering it unnecessary to expect that it is much easier to open microcracks once they are formed than to strain the solid further. Once the spall strength was reached, the damage in the new conceptual spall model would be only determined by a series of closed equations including the stress relaxation relationship given by the strength function, the energy conservation equation, the equation of state, and the constitutive equations for the damaged aggregate. The new conceptual spall model contains only two parameters: the spall strength and the critical damage, the determination of which should make the computed results of spall tests under the appropriate initial and boundary conditions consistent with the experimental free surface velocity profile of target or the stress profile of interface between target and low impedance buffer and the observed damage at spall plane for spall tests. It is worth to note that choosing a strength function or a stress relaxation equation provides a possibility of determining the damage and excludes any extra equation of damage evalution.

Key words: spall model; spall strength; strength function; critical damage