文章编号:1000-5773(2008)02-0125-06

偏应力对材料层裂强度影响的实验研究*

张世文,刘仓理,李庆忠

(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)

摘要:采用热装配方法对平面样品施加径向应力,获得不同程度的偏应力,通过轻气炮实验获得了不同预应力下 LY12 铝合金层裂信号,结果表明:即使在相同撞击速度下,材料的层裂强度差异也发生明显变化。偏应力越大,材料的层裂强度越小,由于不同的球面层裂具有不同的偏应力场,通过本实验方法有可能将球面层裂与一维平变下的层裂联系起来。

关键词:层裂强度;偏应力场;预应力状态;球面层裂

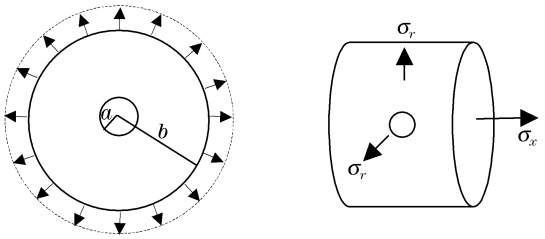
中图分类号:O346.1 **文献标识码**:A

1 引 言

层裂是压力脉冲在自由面反射从而在材料内部产生拉应力导致材料破坏的一种动态效应。为实验和分析方便,通常采用平板撞击实验研究材料层裂机理,获得材料层裂的相关信息,由此研究材料的层裂强度与加载率、加载幅值以及持续时间的关系。在实际应用中,很多情况并不是严格意义的一维平面应变状态,比如超强短脉冲激光辐照在球面上,可能使得球面外层材料气化,从而向球壳内部产生一球形短脉冲冲击波,造成空心球体内的层裂。传统研究方法一般是在简单加载条件下(各向同性拉伸状态)获得材料特征胞元的损伤演化过程,从而获得含损伤的材料本构,然后将获得的含损伤的本构带入复杂的宏观结构进行计算,获得宏观的损伤演化过程,这种单向耦合分析方法并未考虑外部宏观应力场特别是偏应力场对材料特征胞元变形的影响。在一维平面应变下的层裂过程中,由于径向应变始终保持为零,这个条件基本确定了 3 个主应力的大小关系,即可以产生近似的各向同性拉伸应力,传统分析方法基本上是合适的。然而,球面层裂却破坏了这个假定,球壳材料在球形冲击波通过后,其环向一直处于压/拉应力状态,因此存在不同的偏应力场,一维平面应变获得的层裂信息是否可以推广到球面层裂值得进一步分析。从国内外文献[1-13]可以看出,在其它条件都不变的情况下(应变率、应力历史及应力幅值相同),认为层裂强度为材料本身的属性,与结构无关这一观点占据了大多数。本研究尝试采用对平面样品施加径向预应力的方法,获得不同程度的偏应力,探讨偏应力对层裂强度的影响规律。

2 偏应力计算

在一维平面应变下的层裂过程中可以产生近似的各向同性拉伸应力,因此可以采用球胞模型进行分析,如图 1(a)所示,假设孔洞周围的基体是塑性不可压的,孔洞在整个增长和压缩过程中保持球形不变,使用孔洞膨胀比 α 来表示材料的损伤。采用空心球来描述微孔的演化过程和材料的宏观本构行为,假定微孔洞尺寸与空心球内径相同,空心球内外



(a) Sphere cell model (b) Axial symmetry cell

图 1 两种体胞模型

Fig. 1 Two kinds of three-dimensional cell model

* **收稿日期**:2007-07-03;**修回日期**:2007-08-28

基金项目:中国工程物理研究院"双百人才"基金(2005R0802)

作者简介:张世文(1971—),男,博士研究生,副研究员,主要从事冲击动力学研究. E-mail:zswxueshu@yahoo.com.cn

半径之比符合材料的孔隙度，即

$$\xi=(a/b)^3 \quad 或 \quad \alpha=1/(1-\xi) \tag{1}$$

式中：a、b 分别为空心球内外半径；ξ、α 分别为材料的孔隙度和膨胀比。

这种分析方法在分析平板层裂的演化过程时获得了巨大成功，实验和理论证明基本上是合适的。但这种方法无法分析偏应力对孔洞损伤演化的影响。对于本研究的施加预应力的层裂分析，有些不太适合。

对于无预应力的一维平面应变样品，由于有径向应变为零的限制，在层裂部位产生拉伸应力时，偏应力 τ($\tau=\sigma_e$，σ_e 为等效应力)为

$$\tau=\sigma_{xx}-\sigma_{rr}=\sigma_{xx}-\frac{\nu}{1-\nu}\sigma_{xx}=\frac{1-2\nu}{1-\nu}\sigma_{xx} \tag{2}$$

当基体材料为不可压时，相当于泊松比 ν 为 0.5，因此 $\tau\approx0$。当给样品施加径向压缩应力 σ_r^0 后，如图 1(b)所示，偏应力则为

$$\tau=\sigma_{xx}-(\sigma_{yy}-\sigma_r^0)=\frac{1-2\nu}{1-\nu}\sigma_{xx}+\sigma_r^0\approx\sigma_r^0 \tag{3}$$

3 实 验

3.1 热装配实验装置

为了在样品径向方向获得较大的预应力，同时又要考虑轻气炮炮室的空间尺寸限制，预应力装置必须小巧而紧凑。采用如图 2 和图 3 所示热装配方法完成对平面样品施加预应力，箍紧环内径小于样品半径，过盈配合量在 0.1～0.5 mm 之间。通过理论分析初步选择箍紧环材料为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢，样品为 LY12 铝合金。加热箍紧环使其内径膨胀(样品不加热)足够大，然后将样品放入，当箍紧环最终冷却时，在样品径向产生均匀的径向应力。为了消除因热传导对实验样品施加的热效应，将样品用胶与∅30 mm×170 mm 的黄铜棒粘接，黄铜传热较快，样品中心部位不会产生较高温度，且持续时间较短，不会对样品材料性质产生明显影响。对热装配过程的数值模拟结果表明，即使箍紧环温度达到550 ℃，样品外沿与样品接触部位的温度不超过 110 ℃，样品中心温度不超过 80 ℃，且温度迅速降低(不到 5 min)，最终保持在 60 ℃左右，然后自然冷却，因此对样品的冶金效应可以忽略。预应变是通过实测获得，选取样品中某一特定线段热装配前后尺寸变化计算应变大小。比如样品直径为∅100 mm，选取的线段应在∅70 mm 内，避开样品与箍紧环接触位置。采用的测试工具为 19JC 型万能工具显微镜，可以显示小数后 7 位有效数据，我们只取其中 5 位有效数据，尽管与应变计相比要差一些，但测试结果仍有较高精度。样品内的径向应力可以通过应变由(4)式计算

$$\sigma_{rr}=\frac{E}{1-\nu}\varepsilon_{rr} \tag{4}$$

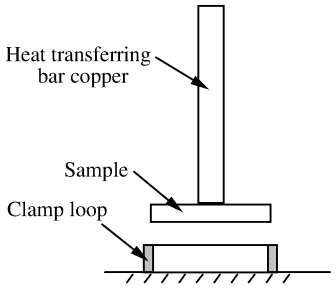


图 2 热装配示意图

Fig. 2 Schematic of heat assemblage

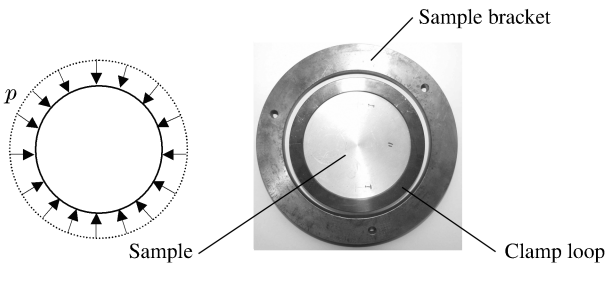


图 3 样品过盈配合实验装置(右边为侧视图)

Fig. 3 The experimental setup by excessively conjugate

3.2 实验装置

实验装置如图 4 所示，实验在 100 mm 口径的一级轻气炮上进行，由于飞片厚度较小、直径较大，为防止在飞行过程中变形，采用标准飞片弹托进行支撑，飞片碰靶速度用刷子探针在碰靶前测量。样品后

自由面粒子速度-时间剖面由 VISAR 系统测量,信号均由精密数字示波器记录,采样时间间隔为 2 ns。

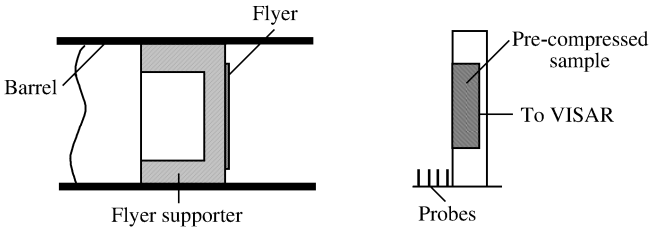


图 4　实验装置示意图

Fig. 4　Schematic of experimental setup

3.3　实验结果及其分析

采用 2 mm 厚的飞片撞击 8 mm 厚样品,其中箍紧环为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢,飞片和样品材料均为 LY12 铝合金。图 5、图 6 为不同预应力(或预应变)下 VISAR 干涉条纹的原始波形。其中图 5 为预应变为零(即通常意义的一维平面应变状态,飞片速度 497.8 m/s)时原始波形,图 6 为预应变为 1 886 με(径向预应力为 0.194 GPa,飞片速度 499.0 m/s)的原始波形。

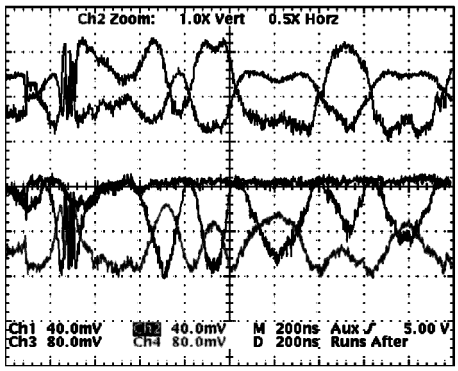


图 5　预应变为零时 VISAR 干涉条纹的原始波形

Fig. 5　Experimental record of VISAR output under $\varepsilon_r^0=0$(flyer plate velocity 497.8 m/s)

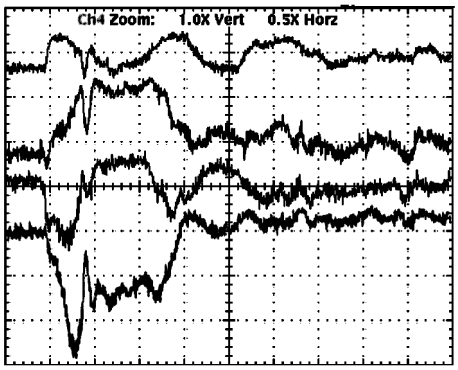


图 6　预应变为 1 886 με 时 VISAR 干涉条纹的原始波形

Fig. 6　Experimental record of VISAR output under $\varepsilon_r^0=1\,886$ με(flyer plate velocity 499.0 m/s)

图 7 为不同预应变下样品后自由面速度测试曲线,由图 7 可以看出,尽管施加的径向应力并不大(相对于撞击方向),但体现层裂强度的速度 Δu 变化明显。

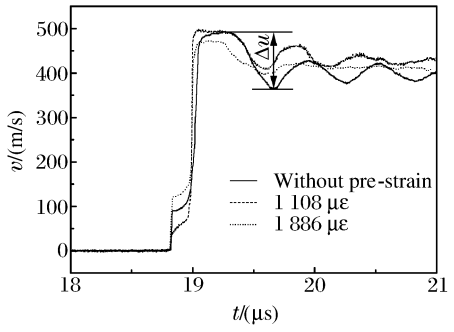


图 7　不同预应变下样品后自由面速度测试曲线

Fig. 7　Free surface velocity histories for different pre-strain samples

目前常用的层裂强度计算公式

$$\sigma_f=\frac{1}{2}\rho_0 c_l \Delta u \tag{5}$$

$$\delta=\frac{1}{2}c_l \Delta t \tag{6}$$

式中:σ_f 为层裂强度,δ 为层裂片厚度,Δt 为层裂片振荡周期,c_l 为纵波声速(也有用体波声速 c_b,然而,张林对不同计算公式获得的结果进行比较发现[14],采用体波声速计算结果与俄罗斯学者[15-16]和 Grady[17]修正的层裂强度计算公式计算结果相差较大,而采用(5)式计算比较接近),Δu 为速度差。后面的结果将采取这种方法计算,以方便在这个统一的计算公式下进行比较和分析。表 1 列出了飞片和样品尺寸以及不同预应力下的测试结果。

由表 1 可以看出,预应力对层裂强度影响较大。事实上,预应力的施加仅仅是改变了偏应力大小而已,对于一维平面应变,在进入塑性状态后,层裂部位应力状态几乎为三维等向拉伸,即 3 个方向主应力相等,偏应力为零,而对于施加初始预应力的平面样品,偏应力大小可以通过 3 个方向的应力计算出来。对于本研究,偏应力大小近似等于施加的径向预应力,当预应力为 0.114 GPa 和 0.194 GPa 时,层裂强度下降了 0.375 GPa 和 0.487 GPa。

表 1 不同径向预应力下实验结果

Table 1 The test results of samples under different pre-strains

Sizes of flyer /(mm×mm)	Sizes of samples /(mm×mm)	ε_{rr}	Flyer speeding /(m/s)	σ_{rr}^{0} 1) /(GPa)	Δu /(m/s)	σ_{spall} 2) /(GPa)	$\sigma_{\mathrm{spall}}-\sigma_{\mathrm{spall}}^{*}$ /(GPa)
∅95×2	∅80×8	0 με	497.8	0	129.41	1.13	0
∅95×2	∅80×8	1 108 με	502.1	0.114	86.37	0.755	0.375
∅95×2	∅80×8	1 886 με	499.0	0.194	73.53	0.643	0.487

Note: 1) $\sigma_{rr}^{0}=\dfrac{E}{1-\mu}\varepsilon_{rr}$; 2) $\sigma_{\mathrm{spall}}=\dfrac{1}{2}\rho c_1\Delta u$; $\sigma_{\mathrm{spall}}^{*}=1.13$ GPa.

3.4 对实验结果定性的数值模拟

图 1(b)轴对称模型可以采用二维轴对称进行建模,模型如图 8 所示,共 3 600 个轴对称单元。LY12 铝合金材料本构取为线形强化模型,弹性模量 $E=72$ GPa,屈服强度 $\sigma_y=345$ MPa,硬化模量取为 $E/50$,泊松比为 0.3。

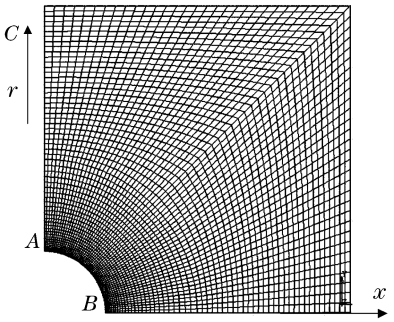


图 8 网格计算模型

Fig. 8 Model of simulation mesh

根据一维平面应变撞击下的应力关系式,不管是在压缩过程或是在两稀疏波相互作用产生的拉伸过程中,σ_x(撞击方向)和 σ_r 的关系始终保持不变,要么同时为正,要么同时为负,因此可采用等比例应力加载方法进行分析。由于一维应变层裂过程中孔洞基本上成球对称扩展,可以认为在此条件下径向方向和撞击方向应力相同。当在径向施加预应力后,初始预应力项在撞击过程中保持为恒值,因此径向方向的应力可认为由两者共同作用,因此在层裂过程中,σ_x 按图 9 曲线 1 进行加载,σ_r 按曲线 3(曲线 1+曲线 2)进行加载,两者加载由(7)式给出

$$\begin{cases}\sigma_r=-\sigma_0+\xi\sigma^{*}\\ \sigma_x=\xi\sigma^{*}\end{cases}\qquad 0\leqslant\xi\leqslant 1 \tag{7}$$

式中:σ_0 为径向预应力,σ^{*} 为飞片撞击产生的最大应力,可由飞片速度决定。作为定性分析,不妨假定 $\sigma^{*}=800$ MPa。当预应力分别为 20、40、60 和 80 MPa 时,A 点的等效应力是 B 点的 1.033、1.067、1.105 5和 1.148 倍,而等效塑性应变是 B 点的 1.047、1.098、1.156 和 1.222 倍,预应力越大,偏应力越大。施加预应力相当于减小了径向拉伸应力,然而 A 点的应力和应变反而增加,并且沿孔边分布的应力和应变不均匀性明显加剧,因此,施加在模型的外部宏观应力所作的功可以不必或者很少消耗在 B 点附近区域,而只需克服 A 点附近区域扩展需要的能量即可,大大降低了能量的耗散。图 10 为考虑了孔洞非均匀扩展典型的计算结果,由图中可以看出,在偏应力作用下,孔洞并不是均匀径向扩展的。

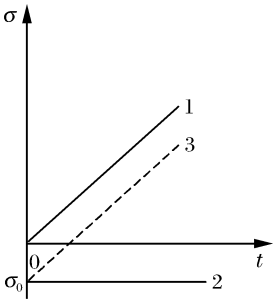


图 9 加载历史曲线

Fig. 9 Loading stress versus time curve

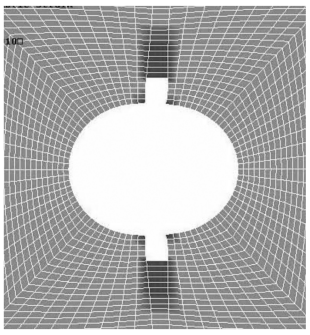


图 10 偏应力下孔洞扩展典型计算结果

Fig. 10 The simulation result of void under deviatoric stress

4 讨 论

如果单纯从应力波传播方面来分析,与撞击方向垂直的较小的径向预应力不应该对层裂强度产生如此大的影响,然而本实验结果表明,偏应力场对材料的损伤演化影响明显,因此需要借鉴和采用固体力学的研究方法进行分析。既分析孔洞的形核阶段,又分析在不同应力作用下造成的孔洞应力集中问题,以至于影响孔洞的非均匀扩展,这种应力集中与偏应力场密切相关,而非一维平面应变(以球面应变或柱面应变为代表的复杂应力状态)的偏应力场明显不同于一维平面应变,且与球面或柱面的半径有关(关于这一点另文给出详细推导)。目前常用的通过 VISAR 实验计算获得的层裂强度仅仅是材料损伤的宏观体现,认为层裂强度是材料本身属性,而与外部宏观应力场或结构无关的论点值得进一步探讨,通过探讨偏应力场对层裂特性影响有可能获得一维平面应变和非一维平面应变下材料层裂特性的联系或差异。

References:

[1] Feng J B, Jing F Q, Su L X, et al. Studies of the Explosion Expanding-Fracture Process of a Thin Cylindrical Shell [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1988, 2(2): 97-103. (in Chinese)
封加波,经福谦,苏林祥,等. 对薄层柱壳爆炸膨胀断裂过程的研究 [J]. 高压物理学报,1988,2(2):97-103.

[2] Dong Y B, Su L X, Chen D N, et al. Numerical Simulation on the Spallation of a Steel Cylindrical Shell Imploded under Slipping Detonation [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1989, 3(1): 1-9. (in Chinese)
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模拟研究 [J]. 高压物理学报,1989,3(1):1-9.

[3] Feng J B. 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.

[4] Davison L, Stevens A. Continuum Measures of Spall Damage [J]. J Appl Phys, 1972, 43: 988-994.

[5] Wang Y G. Investigation on Dynamic Tensile Fracture and Critical Damage in the Ductile Metals [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2006. (in Chinese)
王永刚. 延性金属动态拉伸断裂及其临界损伤度研究 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2006.

[6] Zeng Y J. Investigation on the Spall Strength of Tungsten Alloy and Shock Loading [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 1990. (in Chinese)
曾元金. 钨合金层裂强度与冲击加载条件关系的研究 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院,1990.

[7] Huang F L, Wang Z P. Study on One-Dimensional Dynamic Damage of Pure Copper [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1993, 14(4): 289-296. (in Chinese)
黄风雷,王泽平. 纯铜一维动态损伤研究 [J]. 固体力学学报,1993,14(4):289-296.

[8] Hixson R S, Vorthman J E. Spall Wave-Profile and Shock-Recovery Experiments on Depleted Uranium [J]. AIP Conference Proceedings, 1998, 29(1): 479-482.

[9] Steinberg D J. A Rate-Dependent Constitutive Model for Molybdenum [J]. AIP Conference Proceedings, 1994, 309(1): 993-996.

[10] Kanel G I, Razorenov S V, Utkin A Y, et al. Spall Strength of Molybdenum Single Crystals [J]. J Appl Phys, 1993, 74(12): 7162-7165.

[11] Clifton R J. Analysis of Failure Waves in Glasses [J]. Applied Mechanics Reviews, 1993, 46(12): 540-546.

[12] Steinberg D J, Sharp R W Jr. Interpretation of Shock-Wave Data for Beryllium and uranium with an Elastic-Viscoplastic Constitutive Model [J]. J Appl Phys, 1981, 52(8): 5072-5081.

[13] Buchar J, Rolc S, Hrebicek J. Strain Rate Dependence of the Spall Strength of Steels [J]. Journal de Physique, 1997, 7(3): 951-956.

[14] 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.

[15] Kanel G I,Razorenov S V,Utkin A Y,et al. Shock Waves Phenomena in Cohesion Medium [M]. Translated by Han J W. Mianyang:Institute of Fluid Physics,CAEP,1998:183-185. (in Chinese)
卡涅尔·Γ H,拉扎列诺夫·C B,乌特金·Д B,等. 凝聚介质中的冲击波现象 [M]. 韩均万,译. 绵阳:中国工程物理研究院流体物理研究所,1998:183-185.

[16] Kanel G I,Razorenov S V,Utkin A V. Chap 1 [A]//Davison L,Grady D E,Shahinpoor M. High-Pressure Shock Compression of Solids [C]. New York:Springer,1994.

[17] Grady D E. Steady-Wave Risetime and Spall Measurements on Uranium [R]. SAND-28520233C,1985.

Experiment Research on Spallation Strength under Deviatoric Stress

ZHANG Shi-Wen,LIU Cang-Li, LI Qing-Zhong

(*Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Overstress assembly by heating is adopted to achieve pre-compression along the radial direction of disk-shaped LY12 Al samples. Different deviatoric stress can be obtained using the assembly methods. The spallation signals of these pre-compressed samples were measured with VISAR in light-gas gun shock experiments. The obtained data show that the pullback amplitudes of the free surface velocity in the samples varied significantly even under the same impact velocity. The material's spallation strength is decreased with the incremental deviatoric stress. This method can be used to investigate the relation between spherical spallation and uniaxial strain spallation.

Key words: spallation strength; deviatoric stress field; pre-compression states; spherical spallation