

文章编号: 1001-1455(2009)01-0085-05

预应力对 LY12 铝层裂强度的影响*

张世文, 刘仓理, 李庆忠, 刘 乔

(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: 通过过盈配合的热装配方法和机械夹紧方法对 LY12 铝合金平面样品施加了径向预应力, 采用平面飞片撞击方法获得了预应力对层裂特性的影响。结果表明: 当飞片以 500 m/s 的速度撞击样品, 预应变为 0 (无预应变)、 251×10^{-6} 、 1.108×10^{-6} 、 1.886×10^{-6} 时, 层裂强度分别为 1.130、0.935、0.755、0.643 GPa, 初始预应力(变)明显降低了 LY12 铝层裂强度, 证实了材料的层裂强度与初始应力状态密切相关, 可为以后的非一维平面应变下的层裂研究提供参考。

关键词: 固体力学; 预应力(预应变); 过盈配合; 层裂强度

中图分类号: O347.3; O346.1

国标学科代码: 130·15

文献标志码: A

1 引 言

预应力结构是一种常见结构, 比如岩体的自重应力、热胀冷缩或装配原因引起的内部预应力、内部充压的密闭柱壳或球壳等, 许多工程构件和结构由于各种原因尚未承受载荷便存在初始应力或残余应力。一般而言, 一个构件或结构的工作状态总可以看作初始应力在位形上产生的附加变形运动, 研究初始应力对构件和结构的动态行为有普遍的科学意义^[1]。

层裂破坏研究主要以一维平面应变撞击下的实验结果作为研究对象, 研究大多强调物理机制(温度^[2]、粘性^[3]、应变率^[4]等)和材料特性^[5-8]对层裂的影响, 但预应力对层裂影响的研究比较少见。刘建秀等^[9]对粉末冶金摩擦材料在冲击和被动围压下的动态性能进行了比较, 被动围压套筒的尺寸公差仅为 0.05 mm, 仅是让套筒限制样品后期的径向自由膨胀, 即考虑应力波在约束边界反射后对材料性质如屈服极限的影响, 而在碰撞前并没有施加稳定的初始应力。HUANG Cheng-yi 等^[10]采用霍普金森实验分析了不同约束程度(相当于不同初始应力)对层裂强度的影响, 表明层裂强度受约束应力的拉压性质和幅值影响较大, 层裂强度随约束压应力的增加而增加。这些讨论主要是在一维应力条件下进行的, 而预应力对一维应变下层裂特性的影响未见报道, 本文中通过给样品施加一定的径向预应力, 采用平面飞片撞击预应力(或预应变)样品进行层裂实验, 探讨预应力对层裂强度的影响规律。

2 实验装置

2.1 热装装置

为了在样品径向方向获得较大的预应力, 同时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。一般而言, 单向拉压很容易达到较大的应变, 对于双向或多向压缩, 很难使应变达到较大值, 双向或多向压缩技术本身就具有一定的难度。采用如图 1、2 所示的热装配方法完成对平面样品施加预应变, 箍紧环内径小于样品半径, 过盈配合量在 0.1~0.5 mm 之间。箍紧环材料必须满足以下两个原则: 第一, 热膨胀系数较大, 可以使内径在相同温升下膨胀量较大, 增大过盈配合量, 冷却后在样品上产生的压力较大; 第二, 刚度较大, 如果箍紧环刚度较小, 即使过盈配合量再大, 对样品的压缩应变也不会有多大。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

* 收稿日期: 2007-05-14; 修回日期: 2007-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(10772165); 中国工程物理研究院“双百人才”基金项目(2005R0802)

作者简介: 张世文(1971—), 男, 博士研究生, 副研究员。

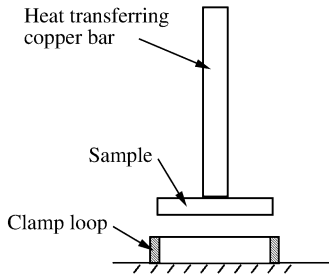


图 1 热装配示意图

Fig. 1 Schematic of heat assemblage

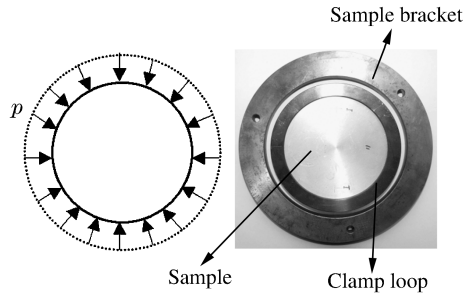


图 2 样品过盈配合实验装置

Fig. 2 The experimental setup for excessively conjugation

箍紧环使内径膨胀(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。由于样品一直用胶与 $\varnothing 30\text{ mm}\times 170\text{ mm}$ 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,且持续时间较短,不会对样品材料性质产生明显影响。通过对热装配整个过程进行数值模拟,结果表明,即使箍紧环温度达到 $550\text{ }^\circ\text{C}$,样品外沿与样品接触部位的温度仍然不会超过 $110\text{ }^\circ\text{C}$,样品中心温度不超过 $80\text{ }^\circ\text{C}$,且温度迅速降低(不到 5 min),达到约 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 后自然冷却,因此对样品的冶金效应可以忽略。样品内的径向应力 σ_r 可以通过应变由下式计算

$$\sigma_r = [E/(1 - \mu)]\epsilon_r \tag{1}$$

式中: ϵ_r 为径向应变, E 为弹性模量, μ 为泊松比。

2.2 机械夹紧装置

2.2.1 光弹实验

通过热装配方法获得的径向预应变相对粗略,不能够在装配前在样品上粘贴应变片来测试应变,只能通过样品上某一特定线段由装配前后的尺寸变化计算出应变,为了更精确地测定预应变(或预应力),采用专门设计的装置进行更精细的实验,图3为机械夹紧装置,其中箍紧环材料为4个 $1/4$ 圆环的 $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ 不锈钢,样品为环氧树脂,对称、轮流、循环和逐次拧紧4个螺栓给样品施加径向应变,通过光弹实验获得环氧树脂样品内的应力分布。图4为光弹实验图片,照明光源为钠光光源,由图中可以看出,在4个螺栓拧紧区应力集中非常明显,出现4级或更多级条纹,而中心区为0级条纹。

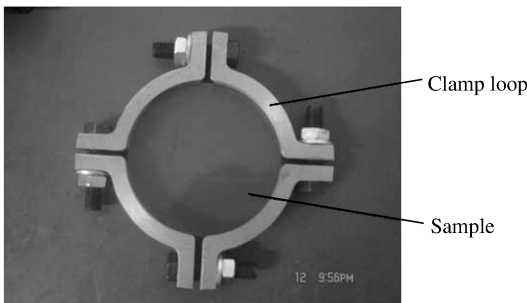


图 3 机械夹紧装置

Fig. 3 Experimental device of mechanical clamp

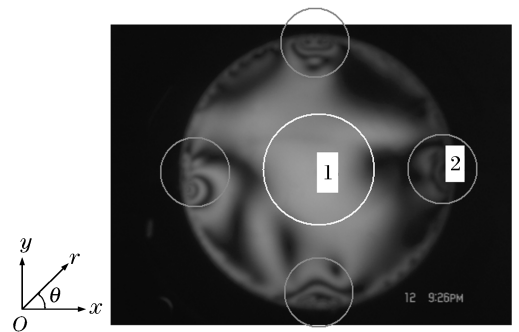


图 4 拧紧 4 个螺栓产生的光弹实验云纹图(钠光光源)

Fig. 4 Photoelastic fringe of device of mechanical clamp

根据光弹原理,环氧树脂样品中的应力分布满足

$$\sigma_x - \sigma_y = nf \tag{2}$$

式中: σ_x, σ_y 为 x 和 y 方向的应力, n 为条纹级数, f 为环氧树脂条纹常数。进行坐标转换后有下式成立

$$\begin{cases} \sigma_r = (\sigma_x + \sigma_y)/2 + [(\sigma_x - \sigma_y)/2]\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta \\ \sigma_\theta = (\sigma_x + \sigma_y)/2 - [(\sigma_x - \sigma_y)/2]\cos 2\theta - \tau_{xy}\sin 2\theta \\ \tau_{r\theta} = [(\sigma_y - \sigma_x)/2]\sin 2\theta + \tau_{xy}\cos 2\theta \end{cases} \tag{3}$$

在样品中心区,由于条纹级数为 0,当 $\tau_{xy}=0$ 时,有下式成立

$$\sigma_r(\theta) = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} = \sigma_x, \quad \tau_{\theta}(\theta) = 0 \tag{4}$$

即 σ_x, σ_y 在中心区始终保持正交,径向应力 σ_r 为轴对称模型,与 θ 无关。由图 2 可以看出,中间应力均匀区直径超过 50 mm,由于飞片厚度为 2 mm,对于层裂问题,如果要测量自由面速度 2 个振荡周期的速度历史曲线,只要样品均匀区直径超过 16 mm 即可,因此能够满足实验需要。

2.2.2 预应力变夹紧实验

当实际样品为 LY12 铝合金时,根据普适定理,光弹中的应力分布同样适用。由于 LY12 铝合金弹性模量比环氧树脂大,塑性变形相对较小,满足实验要求的应力均匀区面积会更大。在装配时应注意采用与环氧树脂同样的装配原则,即对称、轮流、循环和逐次扭紧螺栓。

为获得 LY12 铝合金样品的预应力,需要在样品上粘贴 4 个应变片,通过静态应变仪测试预应力,如图 5 所示,应力的均匀性将由 4 个应变片的读数确定。由于远离螺栓,根据圣维南原理,4 个应变片的读数应该相同。在应变测试系统完全正常的情况下,采用 100 N·m 的扭矩拧紧,直到所有应变计读数基本达到指定读数后,再安装在靶架上。考虑到应力的松弛时间,在拧紧之后等预应力不再变化时,才能进行下一步实验。表 1 为应变随时间的变化关系(其中应变计 1 与 3 正对,2 与 4 正对,1 与 2 垂直)。

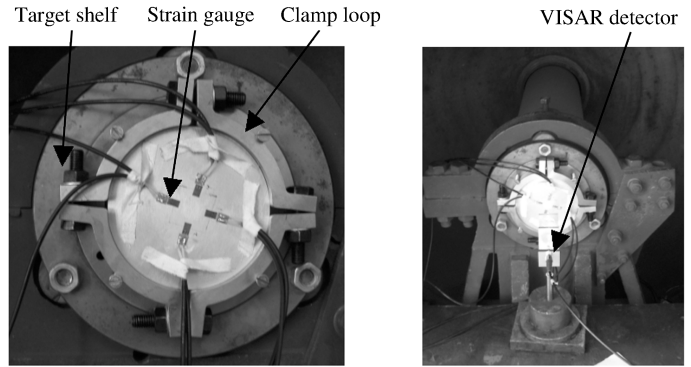


图 5 粘贴应变计的预应力样品实验装置
Fig. 5 Experimental device of the LY12 sample with strain gauges under pre-stress

表 1 4 个应变计随松弛时间变化的数据

Table 1 Data of four strain gauges at differential times

应变计	0 min	32 min	46 min	66 min	86 min	106 min	116 min
1	265	258	258	258	258	256	256
2	285	278	277	277	277	273	273
3	276	269	268	268	268	272	272
4	接触不良	接触不良	接触不良	接触不良	接触不良	接触不良	接触不良
平均径向应变	275.3	268.3	267.7	267.7	267.7	267.0	267.0

由表 1 可以看出,除 4 号应变计因为接触不良无法读数外,其他几个应变计读数基本一致,它们之间的微小差别是由于粘贴应变计时无法达到完全对心,可以通过采用平均方法获得径向预应力。另外,应力松弛在开始时变化较大,随着时间的推移逐渐稳定。

3 VISAR 测速实验结果

不管是热装配还是机械夹紧装配,都在预应力不再变化时,将 VISAR 探头安装好,如图 5 所示。飞片和样品材料均为 LY12 铝合金,飞片尺寸均为 $\varnothing 95 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,热装配时样品尺寸为 $\varnothing 80 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,机械夹紧时样品尺寸为 $\varnothing 104 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,样品中心压缩应力均匀区均能满足层裂研究需要。图 6 为不同预应力下采用 VISAR 技术测得的样品后自由面速度曲线,各种实验结果见表 2,表中 v 为飞片速度, ϵ_r 为径向压缩应变, σ_r 为径向压缩应力, $\sigma_{\text{spall}} = 0.5\rho c_L \Delta v$ 为层裂强度, ρ, c_L 和 Δv 分别为铝合金密度、纵波声速和样品后自由面速度差, σ_{spall}^* 为不加预应力时的层裂强度)。当飞片以

500 m/s的速度撞击样品,预应变为0(无初始预应变)、 $1\ 108\times 10^{-6}$ 、 $1\ 886\times 10^{-6}$ 时,体现层裂强度的速度差分别为129.4、86.4、73.5 m/s(热装配实验结果)。初始预应力(变)明显降低了层裂强度。通过机械夹紧装置产生的应变为 267×10^{-6} 、 251×10^{-6} 时,速度差为105.87、106.86 m/s,因此预应变在 $200\times 10^{-6}\sim 2\ 000\times 10^{-6}$ 范围,都满足这种趋势,且具有一定的可重复性,图7为不同预应变(预应力)对应的层裂强度曲线。由图6和表2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差 Δv 变化明显。

表2 不同径向预应力下实验结果

Table 2 Experimental results under different radial pre-stresses

$v/(m/s)$	$\epsilon_r/10^{-6}$	σ_r/GPa	$\Delta v/(m/s)$	σ_{spall}/GPa	$\sigma_r/\sigma_{spall}^*$	$(\sigma_{spall}-\sigma_{spall}^*)/GPa$	$\frac{\sigma_{spall}-\sigma_{spall}^*}{\sigma_{spall}^*}$
497.8	0	0	129.41	1.130	0	0	0
495.7	267	0.028	105.87	0.926	0.024	-0.204	-0.181
497.7	251	0.026	106.86	0.935	0.023	-0.195	-0.173
502.1	1 108	0.114	86.37	0.755	0.101	-0.375	-0.332
499.0	1 886	0.194	73.53	0.643	0.172	-0.487	-0.431

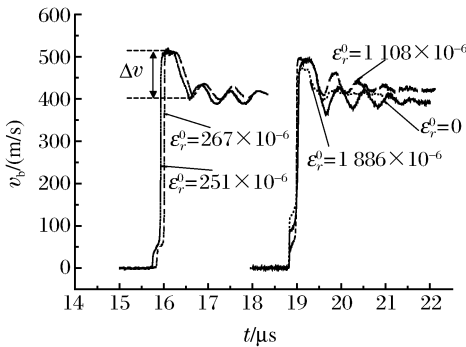


图6 不同预应变下样品后自由面速度测试曲线
Fig. 6 Free-surface velocity histories under different pre-strains

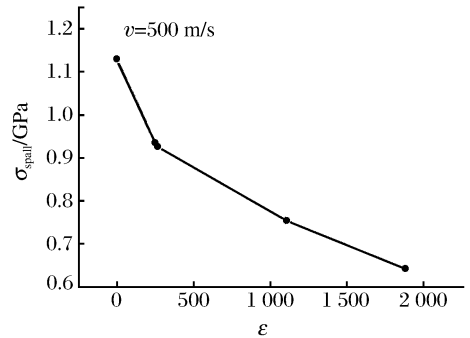


图7 LY12铝的层裂强度-预应变曲线
Fig. 7 Spall strength vs. pre-strain curve of LY12 aluminium

4 结论

通过热装配和机械夹紧实验,进行了初始预应力对层裂强度影响的实验研究,显示了LY12铝的层裂强度随初始预应力(应变)增加而减小的趋势,证实了材料的层裂强度与预应力密切相关,而不是通常认为的相同条件下(相同加载幅值和脉宽)层裂强度基本唯一确定的观点。本文的实验结果表明了应力场对材料损伤演化过程有明显影响。更有意义的启示在于,通过一定的理论分析,可将如柱面、球面等构型的非一维平面应变下的层裂研究和初始应力下的层裂问题联系起来,本文的研究结果为这些构型下的层裂研究提供了参考信息。

感谢方茂林、陈志云、向曜民、刘俊、马冬莉、王为、卢敏、叶素华、付秋卫、冯东升、吴传谦、戴红跃、蒙建华等同志在测试、结构设计、热装配等方面的大力支持。

参考文献:

- [1] 唐光普,张晓敏,张培源. 初应力位形上附加变形线性理论的局限性及二次理论[J]. 工程力学, 2003, 20(2): 91-94.
TANG Guang-pu, ZHANG Xiao-min, ZHANG Pei-yuan. The limitations of linear theory and improved quadratic theory for superposing additional deformation upon the configuration with initial stresses[J]. Engineering Mechan-

- ics, 2003,20(2):91-94.
- [2] Kanel G I, Razorenov S V, Baumung K, et al. Dynamic yield and tensile strength of aluminum single crystals at temperatures up to the melting point[J]. Journal of Applied Physics, 2001,90(1):136-143.
- [3] Daniel J Steinberg, Richard W Sharp Jr. Interpretation of shock-wave data for beryllium and uranium with an elastic-visco-plastic constitutive model[J]. Journal of Applied Physics, 1981,52(8):5072-5081.
- [4] Buchar J, Rolc S Hrebicek. Strain rate dependence of the spall strength of steels[J]. Journal de Physique-4, 1997, 7(3):951-956.
- [5] 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.
HUANG Feng-lei, WANG Ze-ping. Study on one-dimensional dynamic damage of pure copper[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1993,14(4):287-296.
- [6] 庄仕明,丰树平,王春彦,等. 高应变率下 TC4 及 TC9 钛合金的动态断裂[J]. 高压物理学报,1995,9(2):96-106.
ZHUANG Shi-ming, FENG Shu-ping, WANG Cun-yan, et al. Dynamic fracture of TC4 and TC9 titanium alloy under high strain rates[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1995,9(2):96-106.
- [7] Kanel G I, Razorenov S V, Utkin A Y, et al. Spall strength of molybdenum single crystals[J]. Journal of Applied Physics, 1993,74(12):7162-7165.
- [8] Gilath I, Eliezer S, Dariel M P, et al. Brittle-to-ductile transition in laser-induced spall at ultrahigh strain rate in 6061-T6 aluminum alloy[J]. Applied Physics Letter, 1988,52(15):1207-1209.
- [9] 刘建秀,韩长生,张祖根,等. 摩擦材料在无围压和加围压条件下的形变比较[J]. 爆炸与冲击,2004,24(2):151-157.
LIU Jian-xiu, HAN Chang-sheng, ZHANG Zu-gen, et al. Deformation comparison between confined pressure and non-confined pressure for friction material[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(2):151-157.
- [10] HUANG Cheng-yi, Subhash G. Influence of lateral confinement on dynamic damage evolution during uniaxial compressive response of brittle solids[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2003,51:1089-1105.

Influence of pre-stress on spall strength of LY12 aluminum

ZHANG Shi-wen*, LIU Cang-li, LI Qing-zhong, LIU Qiao

(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: An excessively-conjugated heat assembly and a mechanical clamp device were used to achieve the radial pre-strain of disk-shaped LY12 samples. In the experiment, the LY12 samples were impacted by the flyer plates driven by a one-stage light-gas gun, and spall signals of the samples in several pre-strain states were measured by VISAR. The experimental results show that the spall strengths are 1.13, 0.935, 0.755 and 0.643 GPa respectively corresponding to the pre-strains of 0, 251×10^{-6} , 1108×10^{-6} and 1886×10^{-6} when the samples are impacted by the flyer plates with 500 m/s. The pre-stress (pre-strain) reduces the spall strength of LY12 aluminum obviously. It is confirmed that the spall strength is closely related to the initial stress. It is helpful for the future research on materials spallation in multi-dimensional strain states.

Key words: solid mechanics; pre-stress (pre-strain); excessive conjugation; spall strength

* Corresponding author: ZHANG Shi-wen

E-mail address: zswxueshu@yahoo.com.cn

Telephone: 86-816-2493325