DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0852-06

预应力对 LY12 铝弹性前驱波的影响*

张世文[1],刘仓理[2],李庆忠[1],刘　乔[1]

(1.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重点实验室,四川 绵阳 621999;
2.中国工程物理研究院,四川 绵阳 621999)

摘要:通过过盈配合的热装配方法对 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弹性前驱波的影响。结果表明:当飞片均以 500 m/s 的速度撞击样品时,压缩预应变为 0(无预应变)、964.5×10^{-6} 和 $1\ 886.0\times10^{-6}$ 时,弹性前驱波幅值分别为 87.56、95.24、121.03 m/s,压缩预应力(变)提高了 LY12 铝弹性前驱波幅值。结合实验的特点,探讨了对样品施加静态径向预应力的数值模拟方法,结果表明,上升沿(100 μs)较为缓慢的加载可以达到与准静态加载应力分布一样的结果。采用该数值模拟方法给出和验证了弹性前驱波随压缩预应力增加而上升的计算结果,与实验结果较为吻合。

关键词:爆炸力学;预应力(预应变);平面飞片撞击;弹性前驱波

中图分类号:O381　　**国标学科代码**:13035　　**文献标志码**:A

预应力结构是一种常见结构,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。研究初应力对构件和结构的动态行为有普遍的科学意义[1]。预应力对结构破坏的影响研究较多,比如预应力对构件振动频率的影响[2],预应力对层裂的影响[3]。近年来,结合武器的侵彻和防护工程的需要,开展了大量混凝土、岩石或者粉末冶金材料在有无预应力或者外界限制下的抗冲击特性研究[4-9],这些研究对于提高工程设计水平具有较高的价值,同时也有助于理解材料的损伤演化进程。此类研究一般对样品施加被动或主动围压,采用霍普金森杆撞击带套筒约束的样品,结合配套的实验数据处理方法,获得相应条件下的应力应变曲线,从这些应力应变曲线中获得相应状态的动态屈服应力等参数,并希望将这些曲线或者参数引入计算程序进行实际工程损伤破坏过程计算[10-11]。但是,这些研究没有将应力状态本身引起的动态屈服应力增加项很好地分析出来,有可能高估围压下的动态本构。

在张世文等[12]的预应力层裂实验中发现,随着径向压缩预应力的增加,弹性前驱波幅值相应增加,该实验可以比较直观地给出预应力对屈服应力的"增加"现象,这有些类似于围压对材料动态屈服影响实验。这一奇特现象用应变率效应难以获得圆满解释,因为这些实验均是在近似同一个碰撞速度下开展的,我们施加的径向应力不及冲击压力的 5%,用静水压力效应同样难以解释。本文中首先简要介绍实验结果,结合实验特点,探讨对样品施加静态预应力计算方法,并采用该方法来复现这一实验现象。

1　预应力碰撞实验

采用如图 1～2 所示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,详细介绍见文献[3]。预应变可以通过样品特定线段在装配前后变化计算出来。样品内的径向应力可以通过应变由下式计算:

$$\sigma_{0,r}=\frac{E}{1-\mu}\varepsilon_{0,r} \tag{1}$$

当预应变不再变化时,按照传统的轻气炮实验将 VISAR 探头安装好。本文中飞片和预应力样品均为 LY12 铝合金,飞片厚 2 mm、样品厚 8 mm。

* **收稿日期**:2014-05-07;**修回日期**:2014-10-08
基金项目:国家自然科学基金项目(11272297,10772165)
第一作者:张世文(1971—　),男,博士,副研究员,zhangswxueshu@163.com。

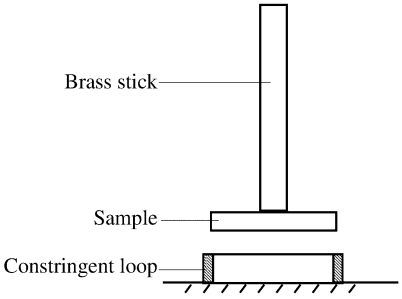

图 1 热装配示意图

Fig. 1 Sketch of heat assemblage

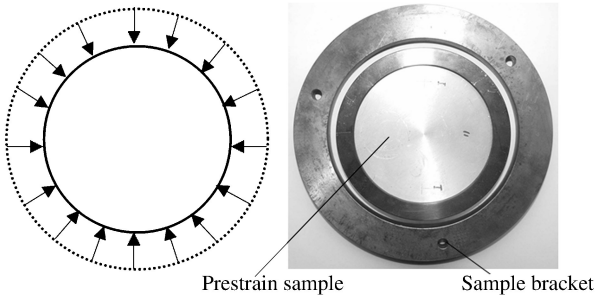

图 2 样品过盈配合实验装置

Fig. 2 Pre-strain sample with bracket

2 实验结果

图 3 为不同预应变下采用 VISAR 技术测得的实验结果。具体实验结果见表 1，表中 v 为飞片速度，$\varepsilon_{0,r}$ 为径向压缩应变，$\sigma_{0,r}$ 为径向压缩应力，u_e^* 为弹性前驱波速度。当飞片均以 500 m/s 的速度撞击样品时，预应变为 0(无初始预应变)、964.5×10^{-6} 和 $1\ 886.0\times10^{-6}$ 时，弹性前驱波幅值分别为 87.56、95.24、121.03 m/s。

表 1 不同径向预应力下实验结果

Table 1 Experimental results of samples under different pre-strains

$\varepsilon_{0,r}/10^{-6}$	$\sigma_{0,r}$/MPa	v/(m·s^{-1})	u_e^*/(m·s^{-1})
0	0	497.82	87.56
964.5	99.2	497.06	95.24
1 886.0	194.0	499.60	121.03

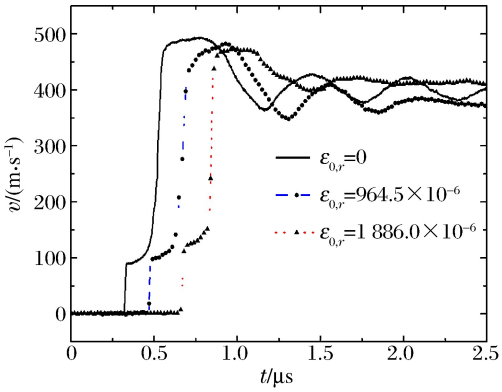

图 3 不同预应变下样品后自由面速度曲线

Fig. 3 Free surface velocity histories for different pre-strain samples

3 数值模拟

3.1 预应力加载技术

借鉴霍普金森压杆(SHPB)测试原理，可以首先对样品施加径向的预应力，让应力波在样品中来回反射多次，达到应力均匀化，然后约束样品外边界，此时样品内就能获得稳定的静态预应力，然后再用飞片撞击样品，进行下一步计算工作。

此方法面临 2 个问题：样品尺寸问题和如何施加预应力。如果按照样品实际直径进行建模计算，应力波在样品径向方向达到均匀化所需时间较长，前期计算时间较长。为解决这个问题，可将模型径向尺寸减小。根据一维应变碰撞时径向应变为 0 这一结论，董杰等[13]采用径向方向只有 1 个单元，通过固定节点非速度向的位移和转动，模拟一维应变单元，成功模拟了平板撞击产生的层裂现象。类似地，当对样品施加了静态径向预应力，在飞片撞击过程中，样品径向同样来不及膨胀，即样品外边界(此时已有固定的位移，该位移可以通过弹性力学解求出)将不会有增加的位移出现，数值模拟也证实了这一结论，因此可以对样品外边界施加此恒定位移，飞片仍采用零位移约束。根据对称性，1/4 三维建模，计算模型中样品和飞片直径为 0.4 mm、飞片厚 2 mm、样品厚 8 mm，直径方向 4 等分、样品厚度方向 320 等分、飞片 40 等分，共计 4 320 个单元，如图 4 所示，其中单元 1 为中心点位置，单元 2 为外边界位置。

在施加位移约束时，位移约束时间曲线对计算结果影响明显，不能直接给样品施加上升沿较窄的脉冲位移。施加位移应满足从 0 上升到指定位移的上升沿时间较长，然后固定该位移，图 5 为样品外边界

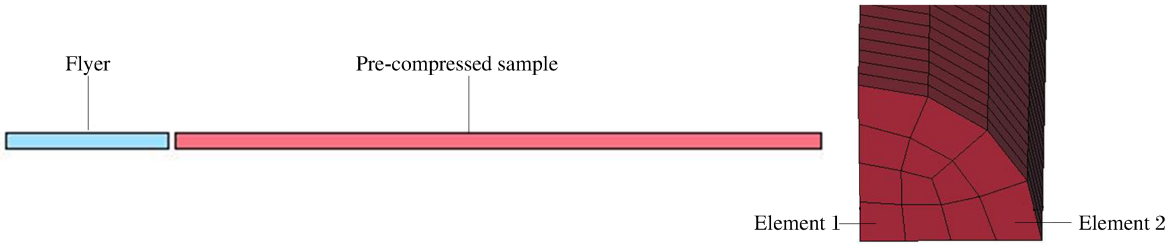

图 4 计算模型(右图为样品截面上网格划分)

Fig. 4 Calculation model (mesh of sample section on the right)

施加上升沿为 1×10^{-11}、10^{-4} s 的两种位移历史曲线。图 6 为径向应力计算结果,从图中可以看出,当上升沿较短时,沿着样品径向方向应力并不均匀(图 6 中曲线 a_1 和 a_2),这是因为对样品外边界施加突加载荷时,该部位存在相应的应力。但是,在远离外边界的样品中心部位,并没有相应的应力,如同泰勒杆撞击一样,在撞击端具有一定的变形,但远离撞击的另一端既没有应变也不存在应力。样品中沿径向分布的应力不均匀即受到加载上升沿的影响,又受到计算模型尺寸的影响。

不过,当位移加载较为缓慢时,样品中心点(单元 1)和边界点(单元 2)的径向应力相同(图 6 中曲线 b_1 和 b_2),与弹性力学理论解完全一样。施加的位移可下式确定:

$$d_r = r\varepsilon_r = r\sigma_r/(E/(1-\mu)) \tag{2}$$

式中:d_r为径向位移,r 为计算模型样品半径,σ_r为径向应力,ε_r为径向应变,E 为弹性模量,μ为泊松比。

图 6 表明,对样品外边界施加上升沿 10^{-4} s 的位移历史曲线能够对样品施加稳定的径向预应力。

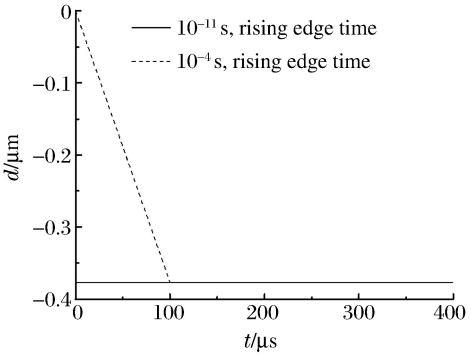

图 5 样品外边界施加不同上升沿的位移曲线

Fig. 5 Two kinds of displace-time curves loading on samples' outer boundary

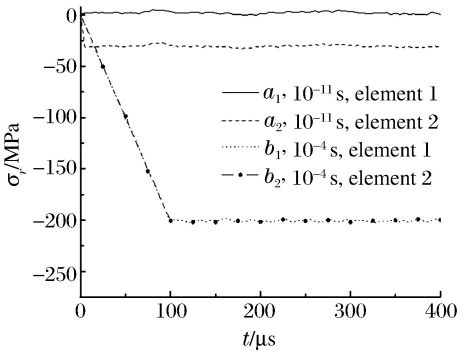

图 6 样品中心和外边界部位的径向预应力

Fig. 6 Samples' radical pre-stress (center—element 1, and outer boundary—element 2)

3.2 材料本构及断裂判据

计算中飞片和样品均为 LY12 铝合金,采用 Grüneisen 状态方程和含断裂判据的 Johnson-Cook 本构关系,Grüneisen 状态方程分为 2 个阶段:

当材料处于压缩状态,有:

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu\left[1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{a}{2}\mu^2\right]}{\left[1-(s_1-1)\mu-s_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-s_3\frac{\mu^3}{(\mu+1)^2}\right]^2}+(\gamma_0+a\mu)E \tag{3}$$

当材料处于拉伸状态,有:

$$p = \rho_0 c^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu)E \tag{4}$$

式中:c 为 v_s-v_p曲线截距(v_s为冲击波速度,v_p为粒子速度),近似为体积声速,s_1、s_2、s_3为 v_s-v_p曲线相关系数,γ_0为 Grüneisen 系数,a 为γ_0一阶体积修正系数,$\mu=\rho/\rho_0-1$ 为比容,E 为内能。LY12 铝合金计算参数取值:$c=5.328$ km/s,$s_1=1.338$,$\gamma_0=2.0$。其余均取为 0。

考虑应变率效应的 JC 本构关系及参数定义见文献[14]。与 JC 本构关系配套的用于拉伸断裂计算的判据有 3 种模式[14]，一是压力限制模型，当压力 p 超过设定值 $-p_{\min}$（该值一般为负值，相当于拉伸应力）时，压力 p 将降低到 $-p_{\min}$ 而不是 0，明显不适合层裂分析。第 2 种为最大拉应力失效模式，当单元拉伸应力达到设定值后，单元即失效，拉应力降为 0。第 3 种为应变失效模型，当单元的应变达到某一特定值后，单元删除，该模型在单向拉伸时效果比较明显，遗憾的是，该模型没有将拉伸阶段和压缩阶段分别处理，当材料处于压缩状态时，单元的应变已经达到失效应变而删除，无法进行压力的传输，影响计算结果。本文中选择最大拉应力判据进行计算。

3.3 典型样品后自由面速度曲线计算结果

图 7 为不同预应变样品后自由面速度曲线的数值模拟结果，在计算中均采用同一本构模型和同一最大拉应力判据进行计算。由计算结果可知，随着径向预压应力的增加，弹性前驱波速度也相应地增加，这与实验结果趋势一致，但也说明了对于 LY12 铝合金，通常采用的 Johnson-Cook 模型描述的屈服应力由于应变率相对较低，低于轻气炮实验获得的弹性极限。关于预应力对层裂强度的影响已在另文中讨论[3,15]。

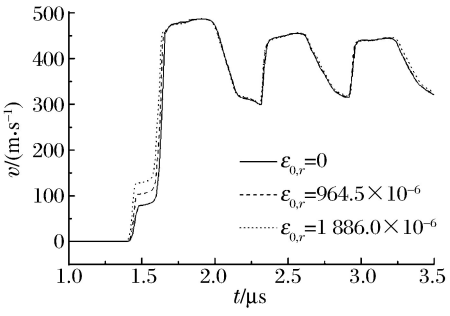

图 7 不同预应变样品后自由面速度曲线计算结果

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

4 应力状态对弹性前驱波影响分析

4.1 一维应变的弹性前驱波速度

对于一维平面应变，根据单一曲线假设，Mises 条件可以写为：

$$\sigma_x - \sigma_r = Y_0 \tag{5}$$

式中：σ_x、σ_r 分别为撞击方向和径向方向应力，Y_0 为一维应力状态下的屈服应力。σ_x、σ_r 满足以下关系：

$$\sigma_r = \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_x \tag{6}$$

代入式(5)可以确定一维应变条件下屈服极限 Y_H 为

$$Y_H = \frac{1-\nu}{1-2\nu}Y_0 \tag{7}$$

式中：ν 为泊松比，Y_H 称为侧限屈服极限或 Hugoniot 弹性极限。显然它高于单向应力下的屈服极限 Y_0，例如 $\nu = 1/3$ 时，$Y_H = 2Y_0$。当材料的屈服极限一定时，体现在自由面的弹性前驱波的速度为

$$u_e = 2Y_H/\rho_0 c_L \tag{8}$$

式中：c_L 为纵波声速。

4.2 预应力下的弹性前驱波速度

对于本文的实验来说，当给径向方向施加初始压应力后，根据单一曲线假设，Mises 条件仍为公式(5)，但是，此时的 σ_r 已经叠加了初始预应力 $\sigma_{0,r}$，

$$\sigma_r = \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_x + \sigma_{0,r} \tag{9}$$

整理得

$$\sigma_x = \frac{1-\nu}{1-2\nu}(Y_0 + \sigma_{0,r}) \tag{10}$$

在初始径向预压应力下，对轴向应力 σ_x 而言的屈服极限 Y_H^* 为：

$$Y_H^* = Y_H + \frac{1-\nu}{1-2\nu}\sigma_{0,r} \tag{11}$$

预应力下的弹性前驱波的速度幅值 u_e^* 为：

$$u_e^* = u_e + \frac{1}{\rho_0 c_L}\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)}\sigma_0 \tag{12}$$

预应力越大,后自由面的弹性前驱波的速度越大。

5 讨 论

弹性前驱波作为一个衡量材料屈服极限大小标志的参数非常重要,一维应变下的弹性前驱波具有明确的物理意义,通过它可以计算出一维应变的屈服应力或称之为弹性 Hugoniot 极限,它也可通过泊松比转化为一维应力下的屈服应力。非一维应变下的弹性前驱波不但体现了材料本身的属性,也包含了复杂的应力状态。从实验和数值模拟以及理论推导可以看出,即使采用同一个屈服应力值,随着预应力的增加,弹性前驱波幅值也相应提高。这给我们一个启示,即在霍普金森围压实验中获得的本构是否同样包含应力状态的影响。李庆明等[16-17]也认为,霍普金森杆实验中撞击速度对应力状态的影响明显,撞击速度越高,试件越偏离一维应力状态。的确,混凝土在围压下材料屈服应力会增加,但这一增加量必须扣除复杂应力状态的影响。本文中经过对样品施加预应力的探索,成功实现了对样品施加径向预应力,并计算了预应力对样品后自由面速度弹性前驱波的影响,还从理论上给出了解释。这种影响根本没有改变铝合金材料在该应变率下屈服应力,是一种"虚假影响"。

弹性前驱波幅值的准确测量同样是一个需要解决的问题,在实验中也发现了有些弹性前驱波拐点不明显,在一些速度测试曲线中,或者弹性前驱波不明显,且重复性一般并不理想,有时甚至测不到弹性前驱波,这既与靶板的安装有关(比如靶板安装倾斜),也与测试系统本身有关,文献[12]对此进行了解释。如何从这些看似毫无规律的结果中提取体现物理本征属性,需要通过更精细的实验设计和测试技术来完成。另外,本文中针对研究对象的特点进行的模型提取以及预应力施加技术,对于研究结构初应力状态对它的动力学响应,提供了新的分析思路和技术可行性。

感谢范诚对撰写本文英文摘要的帮助。

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 Mechanics, 2003,20(2):91-94.

[2] 张晓敏,盛天文,张培源.初应力拱侧向振动的固有频率[J].工程力学,2004,21(2):178-182.
Zhang Xiao-min, Shen Tian-wen, Zhang Pei-yuan. Natural frequencies of initially stressed arches in lateral vibration [J]. Engineering Mechanics, 2004,21(2):178-182.

[3] 张世文,刘仓理,李庆忠,等.预应力对 LY12 铝层裂强度的影响[J].爆炸与冲击,2009,29(1):85-89.
Zhang Shi-wen, Liu Cang-li, Li Qing-zhong, et al. Influence of pre-stress on spall strength of LY12 aluminum[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(1):85-89.

[4] 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.

[5] Candappa D P, Setunge S, Sanjayan J G. Stress versus strain relation of high strength concrete under high lateral confinement[J]. Cement and Concrete Research, 1999(29):1977-1982.

[6] Ravichandran G, Subhash G. Critical appraisal of limiting strain rates for compression testing of ceramics in a split Hopkinson pressure bar[J]. Journal of American Ceramic Society, 1994,77(1):263-267.

[7] Binici B. An analytical model for stress-strain behavior of confined concrete[J]. Engineering Structures, 2005,27 (7):1040-1051.

[8] 薛志刚,胡时胜.水泥砂浆在主动围压下的动态力学性能[J].爆炸与冲击,2008,28(6):561-564.

Xue Zhi-gang, Hu Shi-sheng. Dynamic behavior of cementmortar under active confinement[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(6):561-564.

[9] 吕晓聪,许金余,郭洪海,等.围压对砂岩动态力学性能的影响[J].岩石力学与工程学报,2010,29(1):193-201.
Lü Xiao-cong, Xu Jin-yu, Ge Hong-hai, et al. Effects of confining pressure on mechanical behaviors of sandstone under dynamic impact loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(1):193-201.

[10] Chen W, Ravichandran G. Static and dynamic compressive behavior of aluminum nitride under moderate confinement[J]. Journal of American Ceramic Society, 1996,79(3):579-584.

[11] Chen W, Ravichandran G. Failure mode transition in ceramics under dynamic multiaxial compression[J]. International Journal of Fracture, 2001,101(1):141-159.

[12] 张世文.复杂应力状态对材料层裂特性影响的探索性研究[D].绵阳:中国工程物理研究院,2009.

[13] 董杰,李永池,陈学东.一种新型微孔洞损伤模型[J].高压物理学报,2007,21(4):414-418.
Dong Jie, Li Yong-chi, Chen Xue-dong. A new damage model of microvoid[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2007,21(4):414-418.

[14] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user'S manual, volume Ⅱ[M]. version 960, Livermore LSTC, MARCH, 2001.

[15] 张世文,刘仓理,李庆忠,等.初始应力状态对材料层裂破坏特性影响研究[J].力学学报,2008,40(4):535-542.
Zhang Shi-wen, Liu Cang-li, Li Qing-zhong, et al. Study on spalling response of materials under pre-stress[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008,40(4):535-542.

[16] Li Q M, Meng H. About the dynamic strength enhancement of concrete-like materials in a split Hopkinson pressure bar test[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003,40(4):343-360.

[17] Lu Y B, Li Q M. Dynamic behavior of polymers at high strain-rates based on split Hopkinson pressure bar tests [J]. International Journalof Impact Engineering, 2011,38(1):41-50.

Influence of pre-stress on elastic precursor of LY12 aluminum

Zhang Shi-wen[1], Liu Cang-li[2], Li Qing-zhong[1], Liu Qiao[1]

(1. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*;
2. *China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: The effect of pre-stress on elastic precursor of disk-shaped LY12 aluminum samples was studied, and the radial pre-stress (or pre-strain) state was achieved by using an excessively-conjugated heat assembly device. In the experiment, the LY12 samples were impacted by flyer plates driven by a one-stage light-gas gun, and elastic precursor signals of the samples in several pre-strain states were measured by VISAR. The experimental results show that the elastic precursors are 87.56, 95.24 and 121.03 m/s respectively corresponding to the pre-strains of 0, 964.5×10^{-6} and $1\,886.0\times10^{-6}$ when the samples are impacted by the flyer plates with almost the same velocity. This clearly indicates that the pre-stress (pre-strain) increases the elastic precursor of LY12 aluminum. According to these experiments, we discussed how to apply static loading on the sample in the radial direction. The result shows that the loading with rising edge time 100 μs can produce the same stress distribution as that of static loading. Using this technology, the simulation results show that by increasing pre-stress we can enhance the elastic precursor velocity on the free surface of the samples. The simulated results are in good agreement with those from the experiments.

Key words: mechanics of explosion; pre-stress; impact; elastic precursor

(责任编辑　曾月蓉)