文章编号：1001-1455(2014)04-0483-06 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)04-0483-06

一种基于 SHPB 的冲击膨胀环实验技术*

郑宇轩[1,2]，周风华[1]，胡时胜[2]

(1. 宁波大学教育部冲击与安全工程重点实验室，浙江 宁波 315211；
2. 中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和设计重点实验室，安徽 合肥 230026)

摘要：设计了一种基于分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)的冲击膨胀环实验装置，实验装置包括一个液压腔，一侧为驱动活塞，另一侧为圆环试件封闭。对活塞施加轴向冲击，利用液体体积近似不可压缩的特性，通过液压腔截面积的大比例缩小，将较低速度的对活塞冲击转化为圆环试件沿径向的高速膨胀，驱动试件发生拉伸变形直至断(碎)裂。使用这种冲击膨胀装置，获得了 LY12 铝环在不同撞击速度下碎裂过程的初步结果。实验结果显示，随着撞击速度增大，圆环试件碎裂产生的碎片的尺度减小，试件的表观断裂应变增加。这为研究材料的动态拉伸碎裂问题提供了一种加载方式。

关键词：固体力学；动态拉伸；SHPB；膨胀环；碎裂；表观断裂应变

中图分类号：O346.1 **国标学科代码**：1301545 **文献标志码**：A

固体材料在冲击载荷作用下的动态碎裂问题一直是物理学、力学等领域共同关心的重要课题，膨胀环实验是研究固体材料在准一维拉伸应力作用下动态断(碎)裂现象的重要实验手段。早期的爆炸膨胀环实验技术由 P. C. Johnson 等[1]提出；C. R. Hoggatt 等[2]通过爆炸膨胀环实验获得了多种工程材料的冲击拉伸应力应变关系；汤铁钢等[3]在圆柱形装药中心轴设置爆炸丝线代替雷管，有效消除了爆轰波沿轴向传播造成的非轴对称性问题。电磁膨胀环加载技术与爆炸膨胀环实验技术同期发展，最早的电磁膨胀环加载装置设计由 F. I. Niordson 提出[4]，他在常应变率下进行了一系列的铜环和铝环的单轴拉伸实验，观察到圆环的冲击碎裂现象。学者们利用电磁膨胀环实验技术研究金属环的动态拉伸性能和碎裂特征[5-7]。W. H. Gourdin[8]在改进和完善了膨胀环电磁驱动技术，发展了一种复合膨胀环的电磁加载技术，可以用来测试低导电率材料及绝缘材料的单轴冲击拉伸特性。桂毓林等[9]解决了电磁膨胀环的快速放电和短路开关 2 个关键性问题，实现了金属环的自由膨胀。H. Zhang 等[10-11]采用电磁膨胀技术系统研究了金属圆环的冲击拉伸及碎裂性质，以及表面镀膜对材料拉伸断裂性质的影响。

由于加载方式的不同，爆炸膨胀环与电磁膨胀环实验技术各有优劣。在爆炸膨胀环实验中，冲击波驱动环形试件，使其获得初始动能后自由膨胀，爆炸可以使试件获得较大动能而达到较高的应变率，试件材料不受限制，且局部温升不明显。但爆炸产生的初期压缩冲击波会影响试件的一维拉伸状态，爆炸的随机性也使得实验装置的应变率调节困难。在电磁膨胀环实验中，电磁力驱动环形试件膨胀，采用该技术能精确地控制环的膨胀应变率，且试件中没有初期应力波的影响；但实验能达到的应变率较低，感应电流会造成试件发热，使得材料的力学性能发生改变。

无论是电磁膨胀环还是爆炸膨胀环，都存在实验技术比较复杂，实验和诊断设备造价昂贵的问题，不利于技术推广。本文中，提出了一种基于分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)的冲击膨胀环实验技术，为研究材料的动态拉伸断裂和碎裂问题提供一个动态加载方式。

1 实验原理

设计的冲击膨胀环加载装置如图 1 所示。薄壁圆环试件内径为 14.5 mm，径向厚度为 1 mm，轴向

* **收稿日期**：2012-09-24；**修回日期**：2013-01-22
基金项目：国家自然科学基金项目(10972108)
作者简介：郑宇轩(1986—)，男，博士研究生。

高度为 1 mm,材料为 LY12 铝(图 1(a)和图 1(c)中红色部件);2 个相匹配的厚壁套筒材质均为 45 钢,内径和试件内径一致,圆筒内端面打磨光滑,且具有很好的平行度;前厚壁套筒上均布 4 个直径为 1 mm 的排气通孔,消除圆环试件高速膨胀时空气阻力的影响;前后冲击活塞上均套有 O 型密封圈,防止高速冲击下液体从活塞处泄漏;加油孔螺栓配有 O 型密封圈,防止高速冲击下液体从加油孔处泄漏。

用一根直径略小于 14.5 mm 的定位棒依次插入厚壁套筒、圆环试件和另一相匹配的厚壁套筒,对圆环试件进行对中定位,然后旋紧 2 个相匹配的套筒后拔出定位棒,此时圆环试件径向内外端面为自由面,轴向平行端面与厚壁套筒端面无缝接触,如图 1(c)所示。连接好的 2 个厚壁套筒外端通过相匹配的冲击活塞来密闭,通过加油孔往冲击活塞和套筒围成的空腔内注入满不可压液体,保证空腔内无气泡,而后拧紧加油孔螺栓。图 1(d)是实际加工制造的膨胀环实验装置。

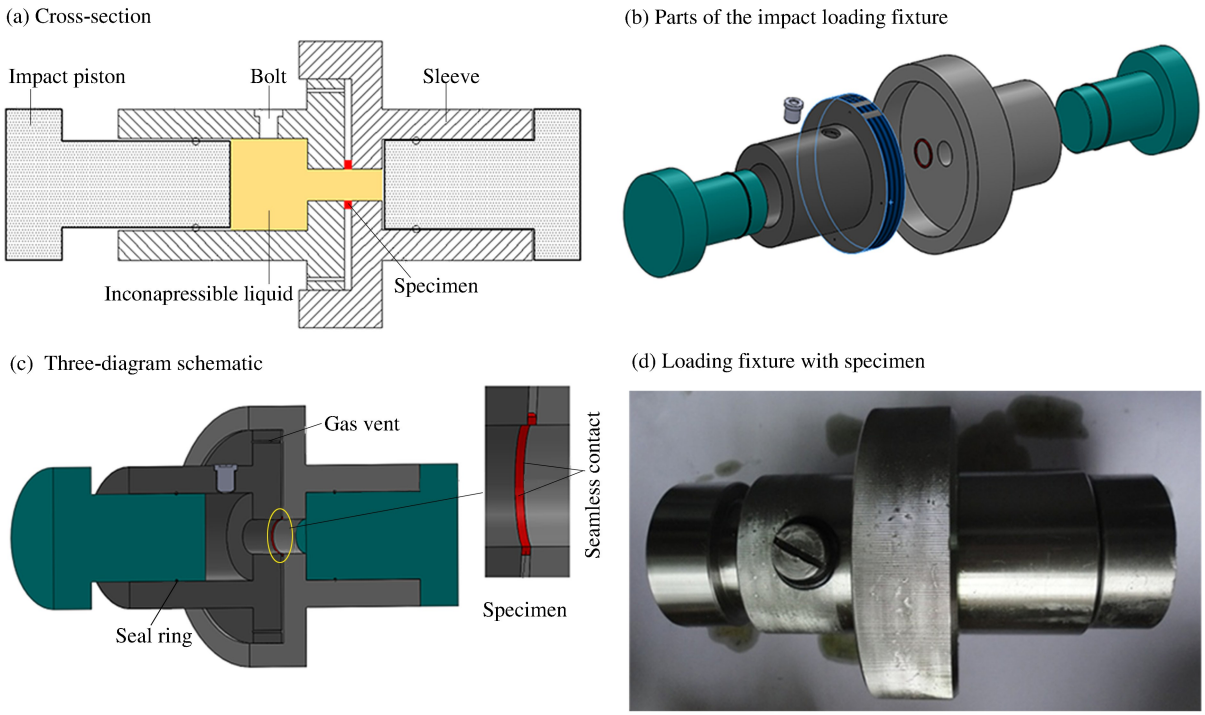

图 1 冲击膨胀环加载装置

Fig. 1 Equipment for loading expanding rings

当受到冲击活塞的压缩载荷时,冲击活塞和套筒围成的空腔内的液体向试件封口挤压,驱动薄壁圆环试件膨胀。利用空腔液体体积近似不可压缩的特性,通过液压腔截面积的大比例缩小,可将较低速度的对活塞的轴向冲击转化为圆环试件的高速径向膨胀。在膨胀过程中,圆环试件周向发生快速拉伸变形,直至拉伸断(碎)裂。

由于实验过程中试件受到一定的套筒挤压力,试件和厚壁套筒内端面之间存在较小的摩擦力。实验中套筒对试件的挤压力,及其与厚壁套筒内端面之间的摩擦力均有可能影响试件的碎裂过程。建立有限元模型,分析摩擦力对于碎片个数和断裂应变的影响,有限元模型如图 2(a)所示,模型中摩擦因数 μ 取 0.1,冲击速度 v_0 设为 500 m/s。图 2(b)和图 2(c)分别给出了有挤压和无挤压情形下的模拟结果。模拟结果显示,当套筒对试件的压力 p 为试件屈服应力 σ_y 的 10%时,有挤压和无挤压情形下,韧性碎裂产生的碎片个数均为 14 块,断裂应变相差 1%。因此挤压力和摩擦力对韧性碎裂产生的碎片个数和断裂应变均无显著影响。在一般实验操作中,套筒只要和试件完好接触上即可,因此实验中套筒对试件的挤压力应为一小量,远小于模拟中假定的挤压力。而随着试件在不可压液体的驱动膨胀过程中,由于其横截面积不断变小,套筒对试件的挤压力也将呈减小的趋势。在分析中忽略套筒的挤压力及摩擦力对试件碎裂过程造成的影响。

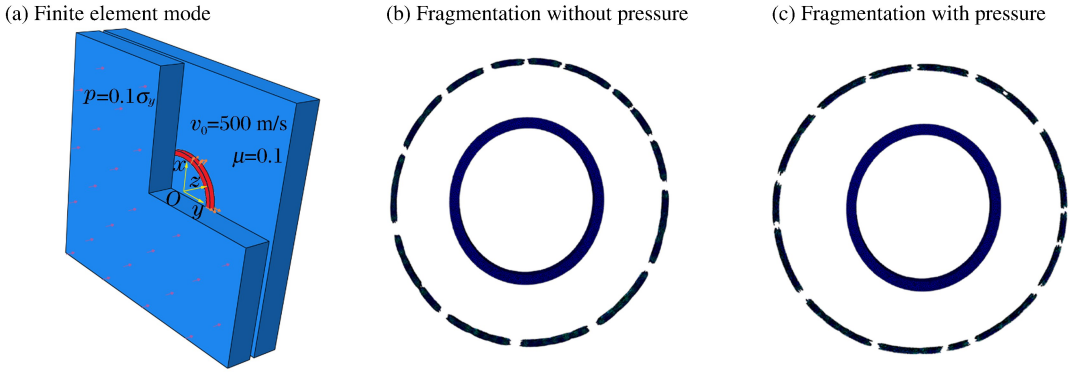

图 2　有限元模拟示意图

Fig. 2　Schematic of FEM simulation

2　动态碎裂实验

2.1　实验过程

将组装好的冲击膨胀环加载装置(包括圆环试件)当成一个试件，置于分离式 Hopkinson 压杆的入射杆和透射杆之间，并用支架调整冲击膨胀环加载装置位置，使它和入射杆、透射杆同轴对心，如图 3 所示。实验中使用直径为 37 mm 的分离式 Hopkinson 压杆系统，采用体积近似不可压的液压油作为传压介质，通过气压控制子弹对入射杆的撞击速度，并使用激光测速仪获得子弹的撞击速度，共对 14 组铝合金环进行了冲击膨胀断裂实验，子弹撞击速度范围为 10～35 m/s。

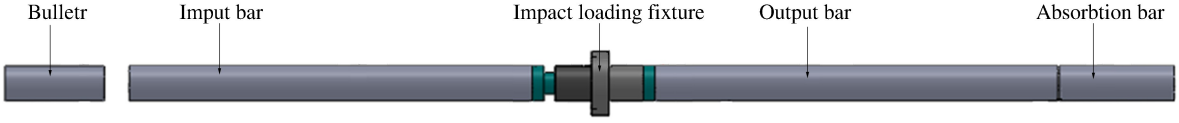

图 3　安装在 SHPB 系统上的冲击膨胀环实验装置示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the impact loading fixture installed between SHPB

2.2　实验结果分析

表 1 给出了不同撞击速度下 LY12 铝环动态拉伸碎裂产生的碎片数 n 和碎裂后的长度 l。各次实验回收的碎片形貌如图 4 所示。由图 4 可以看出，LY12 铝环试件碎裂产生的碎片最少的为 2 块(实验 1 和 2)，最多的为 8 块(实验 11、12 和 14)。整体来看，随着撞击速度的增大，碎片的数目逐渐增多。

表 1　铝合金环动态拉伸实验数据

Table 1　Data obtained from the dynamic tensile experiment of auminium alloy

实验	v_0/(m·s^{-1})	n	l/mm	实验	v_0/(m·s^{-1})	n	l/mm
1	10.8	2	57.0	8	22.1	5	64.9
2	11.0	2	56.8	9	21.7	6	66.8
3	10.9	4	60.8	10	25.2	7	71.7
4	14.1	4	62.6	11	25.7	8	71.1
5	16.1	4	59.0	12	25.5	8	62.4
6	16.8	3	62.9	13	31.6	7	72.4
7	21.5	6	68.0	14	35.1	8	78.9

图 5 给出典型碎片的拉伸变形和断裂形貌。对碎片断口的分析表明，圆环试件的断裂模式一样，都是受周向拉伸作用逐渐产生塑性变形、缩颈而最终断裂的过程。这种变形和断裂模式是韧性金属圆环

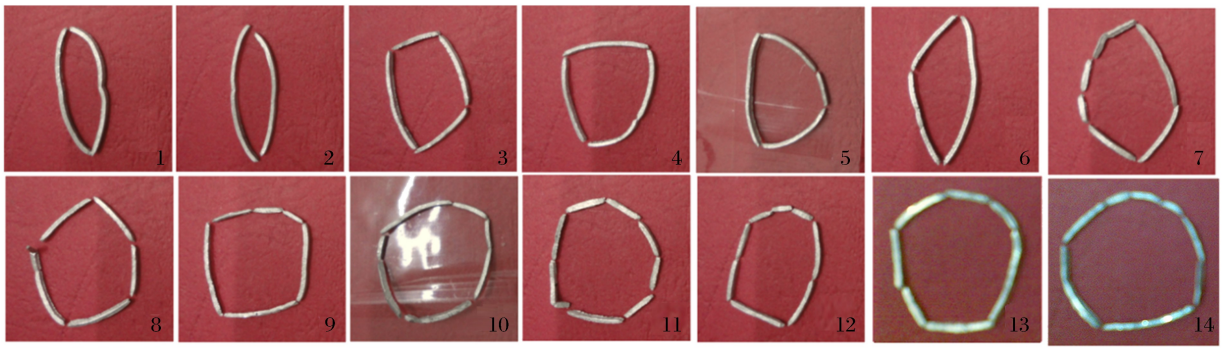

图 4 实验回收的铝合金环碎片

Fig. 4 Recovered aluminum ally fragments after testing

试件自由膨胀发生碎裂的典型模式[12]。这说明试件断裂由周向拉伸应力主导，与实验设计初衷一致，也证实了基于 SHPB 技术的冲击膨胀环实验设计的可行性。另外，从图 4 中可以看出，LY12 铝环经过冲击膨胀之后，回收的碎片拼图绝大多数并不是原来的圆形。造成这种现象的原因是，本次实验中并没有在冲击膨胀装置上添加软回收试件的缓冲装置，试件圆环在高速膨胀碎裂后碎片仍具有很高的自由飞行速度，当碎片撞击到厚壁套筒壁的时候，碎片的圆弧曲率将会和套筒壁的圆弧曲率一致，从而使得碎片的表观形貌发生变化。

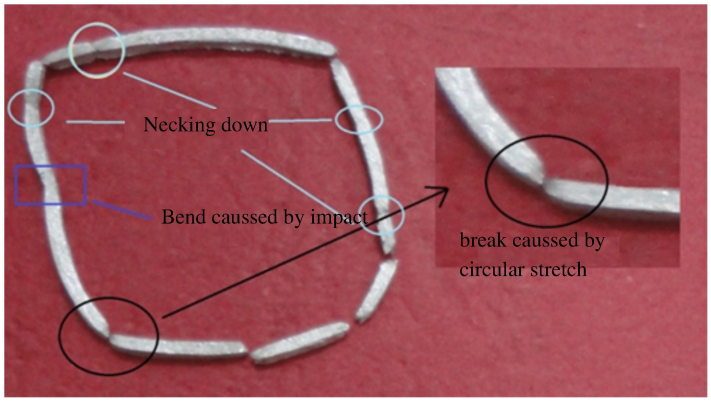

图 5 碎片断裂形貌分析

Fig. 5 Form of the fragments after testing

由图 5 可以看出，周向拉伸应力导致的缩颈使试件环的径向厚度和轴向高度均减小，而由于碎片飞行撞击套筒壁形成的撞击弯曲点处只有径向厚度有变化，且撞击点的曲率明显与整个碎片不一致。通过受力分析可以知道，如果撞击点要发生断裂，试件必然处于环内壁受拉外壁受压的应力状态，撞击点最终弯曲断裂，而通过对所有碎片断口分析发现，所有的碎片断口均未出现上述现象，因此可以推断在本次实验中所有断裂点均是周向拉伸应力主导断裂。

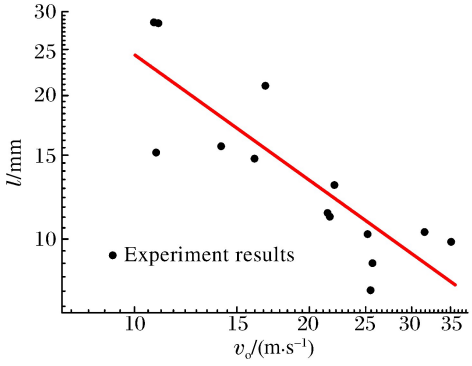

图 6 平均碎片尺寸随撞击速度的变化规律

Fig. 6 Average fragment size under different impact velocity

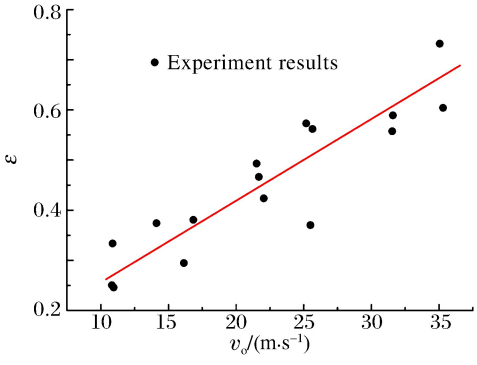

图 7 平均断裂应变随撞击速度的变化规律

Fig. 7 Average fracture strain under different impact velocity

断裂后试件的长度通过对回收碎片进行显微测量并累加得出。通过对表 1 的实验数据处理，可以得到 LY12 铝碎裂后的碎片平均尺寸和断裂应变随子弹撞击速度的变化规律，如图 6～7 所示，其中 l 为平均碎片尺寸，ε 为平均断裂应变。图 6 显示：LY12 铝碎裂后的碎片平均尺寸呈现出随子弹撞击速度的增大而减小的趋势；在同一撞击速度下，特别是在低速情况下，LY12 铝环碎裂产生的碎片平均尺寸相差甚大。造成该现象的原因可能是 LY12 铝环存在着较明显的初始缺陷，材料本身的碎裂特征极有可能是被材料机加工过程中产生的初始缺陷所掩盖，有关初始缺陷对材料碎裂过程的影响见文献[13]。图 7 显示：碎片的平均断裂应变随子弹撞击速度的增大呈上升趋势，造成此种现象的原因可能确实是材料的断裂应变随应变率提高而增大，也可能是在高应变率下，试件环产生了更多的缩颈，而在试件环非均匀流动后，试件的表观应变皆是由缩颈提供的，更多的缩颈可能会造成碎片的断裂应变随应变率提高而增大的假象。

3　结　论

基于传统的分离式 Hopkinson 压杆技术，提出了一种冲击膨胀环的实验技术。通过设计和制作液压冲击装置，实现了基于 SHPB 的固体材料冲击膨胀的研究目的。通过液体受冲击加载后驱动膨胀试件环，对试件材料无限制，温升不明显且无应力波效应的影响。

利用该冲击膨胀环实验技术，获得了 LY12 铝环在不同速度下的碎裂结果。端口分析表明 LY12 铝环断口均是由周向拉伸应力拉伸断裂而成。随着子弹撞击速度增大，LY12 铝的表观断裂应变呈增加的趋势，试件环碎裂产生的碎片尺度呈减小趋势。

参考文献：

[1] Johnson P C, Stein B A, Davh R S. Measurement of dynamic plastic flow properties under uniform stress[C]// Symposium on the Dynamic Behavior of Materials, 1963.

[2] Hoggatt C R, Recht R F. Stress-strain data obtained at high rates using en expanding ring[J]. Experimental Mechanics, 1969,9(10):441-448

[3] 汤铁钢，李庆忠，陈永涛，等. 实现材料高应变率拉伸加载的爆炸膨胀环技术[J]. 爆炸与冲击，2009，29(5)：546-549.
Tang Tie-gang, Li Qing-zhong, Chen Yong-tao, et al. An improved technique for dynamic tension of metal ring by explosive loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(5):546-549.

[4] Niordson F I. A unit for testing materials at high strain rates[J]. Experimental Mechanics,1965,5(1):29-32.

[5] Walling H C, Forrestal M J. Elastic-plastic expansion of 6061-T6 aluminum rings[J]. AIAA Journal, 1973,11(8):1196-1197.

[6] Grady D E, Benson D A. Fragmentation of metal rings by electromagnetic loading[J]. Experimental Mechanics, 1983,23(4):393-400.

[7] Grady D E, Olsen M L. A statistics and energy based theory of dynamic fragmentation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,29(1):293-306.

[8] Gourdin W H. Analysis and assessment of electromagnetic ring expansion as a high-strain-rate test[J]. Journal Applied Physics, 1989,65:411-422.

[9] 桂毓林，孙承纬，李强，等. 实现金属环动态拉伸的电磁加载技术研究[J]. 爆炸与冲击，2006，26(6)：481-485
Gui Yu-lin, Sun Cheng-wei, Li Qiang, et al. Experimental studies on dynamic tension of metal ring by electrmagnetic loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(6):481-485.

[10] Zhang H, Ravi-Chandar K. On the dynamics of necking and fragmentation: Ⅰ: Real-time and post-mortem observations in Al 6061-O[J]. International Journal of Fracture, 2006,142(3/4):183-217.

[11] Zhang H, Liechti K M, Ravi-Chandar K. On the dynamics of localization and fragmentation: Ⅲ: Effect of cladding with a polymer[J]. International Journal of Fracture, 2009,155(2):101-118.

[12] 陈磊，周风华，汤铁钢. 韧性金属圆环高速膨胀碎裂过程的有限元模拟[J]. 力学学报，2011，43(5)：861-870.
Chen Lei, Zhou Feng-hua, Tang Tie-gang. Finite element simulations of the high velocity expansion and fragmen-

tation of ductile metallic rings[J]. Acta Mechanica Sinica, 2011,43(5):861-870.

[13] 郑宇轩,周风华,胡时胜. 周期分布缺陷对韧性材料高应变率拉伸碎裂过程的影响[J]. 爆炸与冲击,2013,33(2):113-119.
Zheng Yu-xuan, Zhou Feng-hua, Hu Shi-sheng. Effect of periodically distributed defects on the ductile fragmentation process of materials under high strain-rate tension[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(2):113-119.

An SHPB-based experimental technique for dynamic fragmentations of expanding rings*

Zheng Yu-xuan[1,2], Zhou Feng-hua[1], Hu Shi-sheng[2]
(1. *MOE Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ningbo University, Ningbo* 315211, *Zhejiang, China*;
2. *CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026, *Anhui, China*)

Abstract: Based on the split Hopkinson pressure bar (SHPB), a new loading experimental technology was developed for conducting expanding ring test which is used to study the dynamic tensile deformation and the fracture (fragmentation) properties of materials. The loading fixture includes a hydraulic cylinder filled with incompressible fluid, which is pushed by a piston connected to the input bar. As the liquid is driven, it expands the metallic ring specimen in the radial direction. The approximately incompressible property of the liquid makes it possible to drive the specimen in very high radial velocity by low velocity movement of piston, according to the large sectional area ratio of the cylinder to specimen. The ring specimens of LY12 aluminum alloy were tested by this experimental technology. The results show apparent increase of the fragment number and the fracture strain of the specimen with the increase of the impact velocity.

Key words: solid mechanics; expanding ring; SHPB; dynamic tension; fragmentation; apparent fracture strain

---

* Received 24 September 2012; Revised 22 January 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (10972108)
Corresponding author: Zhou Feng-hua, fzhou@nbu.edu.cn

(责任编辑 王小飞)