

立式液压膨胀环实验技术研究

张 佳, 郑宇轩*, 周风华

(宁波大学 教育部冲击与安全工程重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 设计一种立式液压膨胀环实验技术, 能解决现有的冲击膨胀环实验技术中试件存在二次碰撞变形的问题, 实现了碎片的软回收. 通过对装置结构的重新设计, 改变液体的驱动方向, 实现了试件动态断裂过程的可视化.

关键词: 动态拉伸; 碎裂; 液压膨胀环; 1060 铝

中图分类号: O346.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 02-0035-04

膨胀环实验是研究固体在准一维应力作用下动态拉伸断(碎)裂的重要实验技术手段^[1]. 爆炸膨胀环实验技术^[2]和电磁膨胀环实验技术^[3]历经多年发展已成为目前应用最广泛的两种膨胀环实验技术. 许多学者利用上述两种实验手段对多种金属在准一维应力状态下的动态拉伸性能和断(碎)裂机理进行了研究^[4-9]. 电磁膨胀环实验技术和爆炸膨胀环实验技术所涉及的实验设备昂贵, 对操作技术要求高. 而在技术上爆炸加载使试件产生震荡, 电磁加载使试件升温明显, 均不利于研究试件的本质特征.

郑宇轩等^[10-11]曾提出一种基于分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)的冲击膨胀环实验技术. 该实验装置包括左侧活塞、液压仓、试件封闭罩和右侧活塞, 如图 1 所示. 对活塞施加轴向冲击, 液体受压后流向试件内壁. 由于流体截面积的大比例缩小, 低速活塞冲击将转化为高速的圆环试件径向膨胀. 液体驱动试件膨胀、拉伸变形直至断(碎)裂. 液体加载对试件产生均匀的压力, 不存在爆炸膨胀环实验技术中试件的震荡问题, 同时也不造成试件额外的升温软化效应. 初步试验结果表明, 该装置可以成功驱动金属环膨胀断裂, 但断裂后的试件高速碰撞装置内壁产生明显变形, 如图 2 所示. 由于试件被装置密闭, 无法观察试件的膨胀过程, 因此难以展开深入的研究.



图 1 冲击膨胀环实验装置



图 2 碎片复合形貌

本文在前期研究的基础上, 设计了一种立式液压膨胀环实验技术, 有效地解决了二次碰撞和试件观察问题. 为研究金属的动态拉伸断裂问题提供了一种新的实验方法.

1 实验装置结构和原理

实验装置如图 3 所示. 整个装置主要包括 3 个部分: (1)驱动部分, 包括液压基座和冲击活塞. 冲击活塞的高速运动主要来自于外界的动加载, 如 SHPB 或落锤的冲击加载. 冲击活塞上套有双重 O

收稿日期: 2016-10-19.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11402130).

第一作者: 张佳(1991-), 男, 安徽宿州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: 914961538@qq.com

*通信作者: 郑宇轩(1986-), 男, 江西樟树人, 博士/讲师, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: zhengyuxuan@nbu.edu.cn

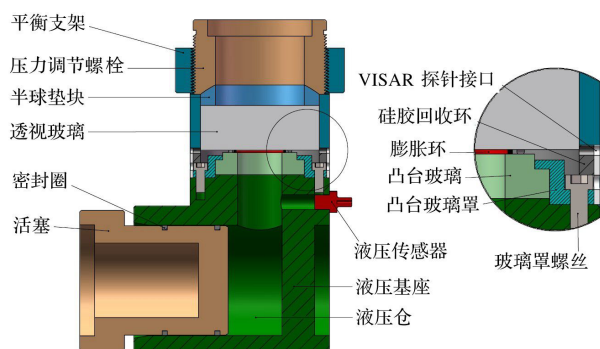


图3 立式液压膨胀环实验装置示意图

型密封圈,防止高速情况下液体从活塞处泄漏。实验前在液压仓内注满液体,并将液压基座右端固定。当外加动载驱动活塞向右做轴向运动时,活塞挤压液压仓内的液体,由于液压基座右端近似固定,液体只能从液压基座上部的竖孔高速流出,为试件的膨胀提供初始压力。(2)试件连接部分,包括凸台玻璃、凸台玻璃罩、透视玻璃、半球垫块、平衡支架和压力调节螺丝。凸台玻璃中部开孔,其内径与液压基座的竖孔直径相同,二者连接须保证同轴。凸台玻璃的下表面与液压基座的上表面用高强度胶水粘结密封连接。凸台玻璃罩通过螺栓与液压基座连接,起到压紧固定凸台玻璃的作用。金属试件位于透光率极好的透视玻璃与凸台玻璃中间,经过精细打磨,并且在连接处涂有密封树脂,尽可能保证与上下玻璃无缝接触。半球垫块和压力调节螺栓为球面接触,起到万向头的作用,保证平行接触,提高液压系统的密封性。(3)试件回收部分,主要为内壁镶有硅胶垫圈的金属环。试件在膨胀过程中产生的碎片高速冲击回硅胶垫圈,有效避免在撞击时产生严重的二次变形。回收环开有若干直径 6 mm 的孔,用于卸载由于试件膨胀之后

快速流入回收舱内的液体。

此外,实验装置预设 3 个测量接口,包括高速摄影窗口、压力传感器接口和 VISAR 探针的接口,可根据不同的研究目的测量需要的实验数据。压力传感器接口是一个与液压仓联通的通道。通道长度与试件到压力传感器通道内口的距离相同,保证压力传感器与试件同步受压,如图 3 所示。

高速摄影机通过反光镜拍摄试件的膨胀过程,如图 4(a)所示。实验装置架在 SHPB 上,透视窗口垂直向上。在装置上方架一面反光镜,反光镜与水平面呈 45° 夹角。高速摄影机水平架设,其镜头的轴线与透视玻璃的周线在同一平面内。两个闪光灯的轴线与摄影机镜头的轴线在同一平面内,如图 4(b)所示。左右两侧分别以一定的夹角照射反光镜,由反光镜将光线反射到试件上。摄影机通过反光镜拍摄试件的膨胀过程。

探针接口开在回收环上,与试件处于同一平面。探针支架将探针固定在试件所在的平面上,探针轴线通过试件的圆心,如图 4(c)所示。

2 动态碎裂实验

薄壁圆环试件为内径 32 mm,径向厚度 1.5 mm,轴向高度 1.5 mm 的 1060 铝圆环。将组装好的立式液压膨胀环加载装置当成一个巨型试件置于分离式 Hopkinson 压杆的入射杆和透射杆之间,并用支架调整加载装置位置,使其和入射杆、透射杆同轴对心,如图 5 所示。实验中使用的是直径为 74 mm 的分离式 Hopkinson 压杆系统。采用液态水作为传压介质,通过气压控制子弹对入射杆的撞击速度,对 1060 铝环进行冲击膨胀断裂实验,使用高速摄影记录 1060 铝环的动态碎裂过程。

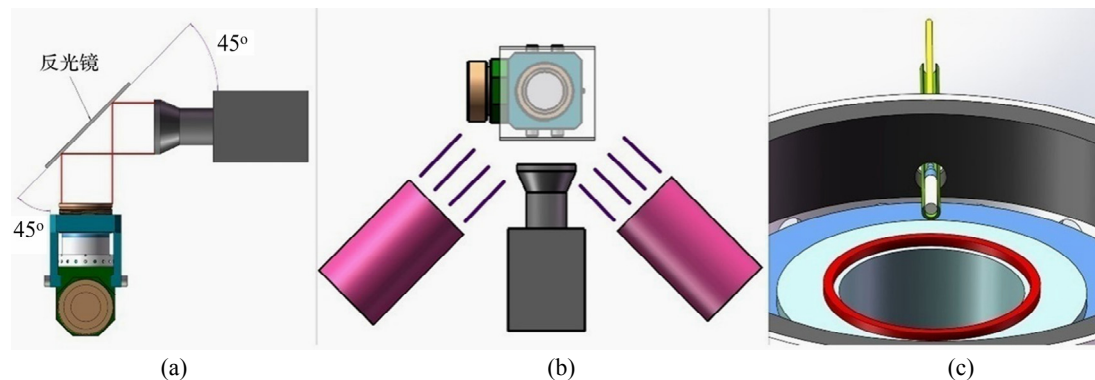


图4 高速摄影机和闪光灯架设位置及 VISAR 探针安装位置示意图

2.1 碎裂过程

通过高速摄影记录了试件整个动态膨胀碎裂过程, 如图6所示. $t=0\ \mu\text{s}$ 时, 金属圆环处于静止状态; $t=30\ \mu\text{s}$ 时刻, 金属圆环在高压液体的驱动下膨胀, 整体处于均匀塑性变形阶段, 沿周向各点塑性应变基本相同; $t=70\ \mu\text{s}$ 时, 金属圆环塑性变形加剧, 横截面显著减小而整体形状保持圆形不变, 说明

其在膨胀过程中均处于均匀受力状态; $t=100\ \mu\text{s}$ 时, 金属圆环已经产生非均匀塑性变形并伴随多处颈缩, 部分颈缩处出现断裂.

2.2 实验结果分析

从高速摄影获得的1060铝的碎裂过程可看出, 立式液压膨胀环装置能够较好地实现1060铝环动态拉伸碎裂. 试件历经拉伸变形、颈缩、断裂等几

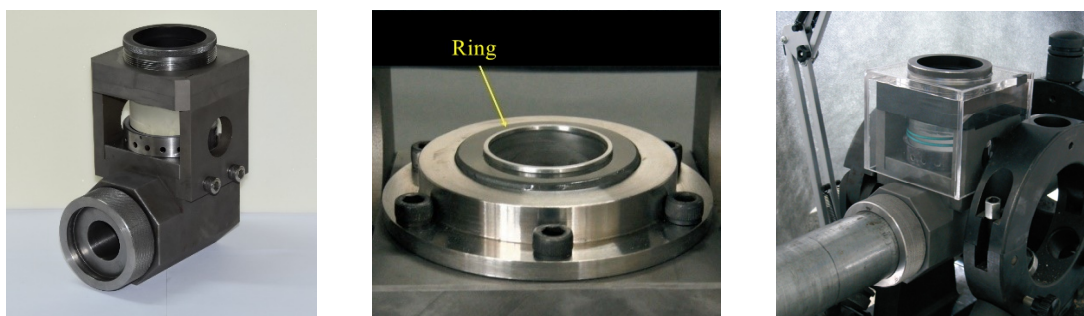


图5 冲击膨胀环实验装置及其安装在 SHPB 系统上的示意图

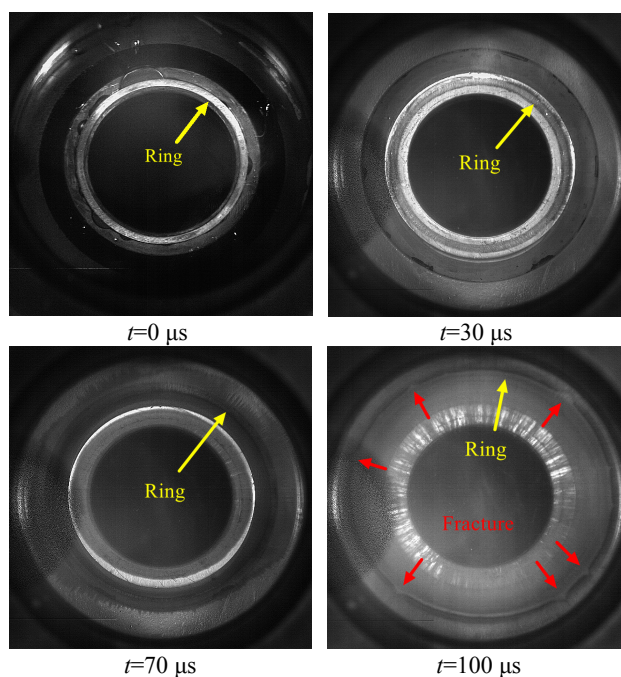


图6 1060 铝环动态碎裂过程

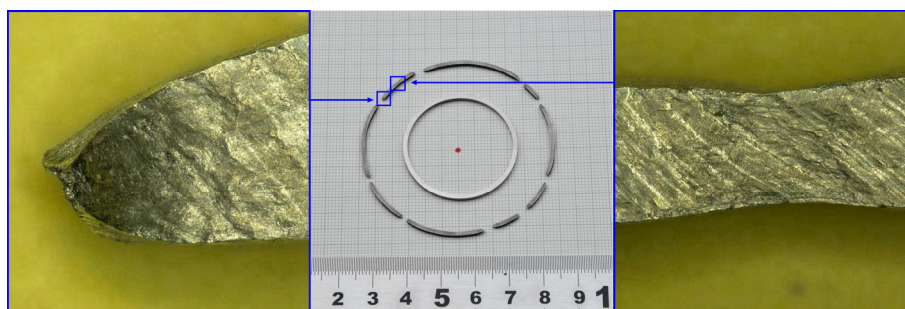


图7 1060 铝环断口与颈缩现象

个阶段,属于韧性金属典型的拉伸碎裂模式^[12]。同时,通过观察实验后回收的典型碎片的形貌(图 7)可发现,试件碎片几乎没有产生扭曲与侧翻现象;碎片断口为明显的颈缩断裂而成;部分碎片中间存在颈缩,颈缩处变形均匀。由此表明试件在前期虽然受驱动液体挤压膨胀,但碎裂的主要原因仍是受周向拉应力作用。通过内壁镶有硅胶垫圈的金属环回收的试件碎片复原图可以看出,软回收后的碎片拼图近似为圆形,从而避免如图 1(b)所示的二次撞击,更有利于对碎片的金相观察与分析。

3 结论

本研究设计发展了一种基于 SHPB 的立式液压膨胀环实验技术。立式液压膨胀环实验装置通过驱动液体在受冲击载荷后膨胀试件环,实现了固体材料冲击拉伸膨胀的研究目的。通过内壁镶有硅胶垫圈的金属环的软回收,有效地避免了碎片的二次碰撞;通过对驱动液体的转向,实现了碎裂过程的可视化。

在该实验装置上展开了 1060 纯铝膨胀环的动态拉伸碎裂实验。高速摄影清晰完整地捕获了铝环的整个碎裂过程:弹性变形、塑性变形、颈缩与碎裂。对碎片断口分析表明,1060 铝环断口均由周向拉伸应力拉伸断裂而成。立式液压膨胀环实验装置满足一维应力条件。

参考文献:

[1] 郑宇轩,周风华,胡时胜,等.固体的冲击拉伸碎裂[J].

力学进展,2016,46:506-540.

- [2] JOHNSON P C, STEIN B A, DAVH R S. Measurement of dynamic plastic flow properties under uniform stress [EB/OL]. [2016-09-12]. https://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/STP/PAGES/STP42030S.htm.
- [3] NIORDSON I. A unit for testing materials at high strain rates[J]. *Experimental Mechanics*, 1965, 5(5):29-32.
- [4] GRADY D E, BENSON D A. Fragmentation of metal rings by electromagnetic loading[J]. *Experimental Mechanics*, 1983, 23(4):393-400.
- [5] 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.
- [6] GOURDIN W H. Analysis and assessment of electromagnetic ring expansion as a high-strain-rate test[J]. *Journal Applied Physics*, 1989, 65:411-422.
- [7] ZHANG H, RAVI-CHANDAR K. On the dynamics of necking and fragmentation I: Real-time and post-mortem observations in AL6-610[J]. *International Journal of Fracture*, 2006, 142(3/4):183-217.
- [8] 桂毓林,孙承伟,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.
- [9] 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.
- [10] 郑宇轩,周风华,胡时胜.一种基于 SHPB 的冲击膨胀环实验技术[J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(4):483-488.
- [11] 郑宇轩.韧性材料的动态碎裂特性研究[D].合肥:中国科学技术大学,2013.
- [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.

Experimental technique for fragmentation of liquid-driven expanding ring

ZHANG Jia, ZHENG Yu-xuan*, ZHOU Feng-hua

(Key Laboratory of Impact and Engineering of Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Expanding ring experiment is an important method for dynamic fragmentation of solid materials under 1D tensile loading. A liquid-driving experimental technology was developed for conducting expanding ring tests. Using liquid-driven expanding ring device, 1060 aluminum ring was fragmented and the fragments were recovered. Impact deformation of free-flying fragments was avoided through the use of "sample soft-capture" technology. The fragmentation process is observable by modifying the driving direction of the fluid.

Key words: dynamic tension; fragment; liquid-driven expanding ring; aluminum 1060

(责任编辑 史小丽)