

文章编号: 1001-1455(2009)05-0546-04

实现材料高应变率拉伸加载的爆炸膨胀环技术*

汤铁钢, 李庆忠, 陈永涛, 谷 岩, 刘仓理

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰波物理国防科技重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 设计了新型的爆炸膨胀环实验加载装置, 加载装置中采用爆炸丝线起爆方式, 避免了传统装置中对碰爆轰波加载时的应力不均匀性。利用新型的爆炸膨胀环实验技术研究了无氧铜材料的动态性能, 利用激光位移干涉仪测量了试样环的径向速度历史, 处理数据获得了无氧铜材料的流动应力-塑性应变-应变率的关系, 为进一步利用爆炸膨胀环实验技术研究材料在高应变率拉伸加载时的本构关系奠定了基础。

关键词: 爆炸力学; 爆炸膨胀环; 冲击拉伸实验; 无氧铜; 高应变率

中图分类号: O384

国标学科代码: 130 · 3520

文献标志码: A

1 引 言

一维高应变率拉伸加载实验技术主要有 Hopkinson 拉杆、电磁膨胀环^[1]和爆炸膨胀环。爆炸膨胀环实验技术最早由 P. C. Johnson 等^[2]建立起来, 通过对爆炸膨胀环实验中试样环运动方程和测试数据的处理, 计算环材料的流动应力-塑性应变-应变率响应。C. R. Hoggatt 等^[3]运用爆炸膨胀环技术, 测试了许多工程材料的本构关系数据, 通过测量环径向位移计算环中流动应力和塑性应变, 由于需要对位移进行 2 次微分, 数据的精度一直困扰着膨胀环实验的推广应用。1980 年, R. H. Warnes 等^[4]改进了膨胀环测试技术, 利用激光速度干涉仪(VISAR)直接测量爆炸膨胀环的径向膨胀速度, 克服了求流动应力时位移关于时间 2 次微分的困难, 膨胀环实验也逐步被广泛开展起来。

近年来, 国内的激光干涉速度测试技术有了长足进步, 桂毓林等^[5-6]采用电磁膨胀环技术及 VISAR 测试研究了无氧铜的动态断裂性能及本构关系。本文中拟对传统爆炸膨胀环实验技术进行改进, 建立爆炸丝线起爆方式的新型爆炸膨胀环加载技术, 并利用该技术开展无氧铜试样环的冲击拉伸实验。

2 新型爆炸膨胀环实验技术

2.1 实验装置设计

新型爆炸膨胀环实验装置如图 1 所示, 由爆炸丝起爆系统、爆炸丝、粉末炸药、装药筒、驱动器、聚酯绝缘盖板、试样环等组成。为了避免爆轰波对碰加载时的应力不均匀性, 采用了爆炸丝线起爆方式, 在轴线上同步起爆柱形装药, 形成柱面爆轰波加载驱动器, 柱面冲击波经驱动器传到试样环, 从而实现驱动试样环进行径向膨胀运动。

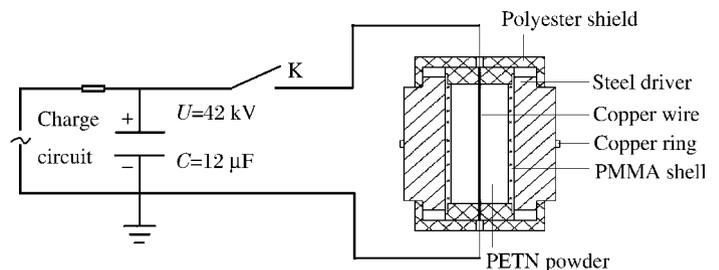


图 1 爆炸丝线起爆膨胀环实验装置示意图
Fig. 1 Sketch of the experimental setup for an explosive expanding ring by line initiation

* 收稿日期: 2008-06-14; 修回日期: 2008-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(10872187);

冲击波物理与爆轰波物理国防科技重点实验室基金项目(9140C6702010903)

作者简介: 汤铁钢(1974—), 男, 博士, 副研究员。

爆炸丝线起爆系统包括充电回路和放电回路等 2 部分,其中充电回路由直流高压、限流电阻和脉冲电容器组成;放电回路由脉冲电容器、球隙开关和爆炸丝等组成。触发控制由高压脉冲发生器和触发电极等组成,可产生一个几千伏至十几千伏的触发脉冲,引起球隙开关击穿,接通放电回路。爆炸丝线起爆系统参数主要参照文献[7]进行设计,脉冲电容为 $12 \mu\text{F}$,直流高压为 42 kV,爆炸丝采用直径为 0.175 mm 的铜丝。

爆炸丝起爆炸药的原理为:脉冲大电流通过直径很细的金属丝时,由于突然产生很高的热量而使金属丝气化,并形成等离子体急剧压缩周围介质而产生冲击波,在热与冲击波的综合作用下起爆炸药。

2.2 实验场地布局

实验场地布局如图 2 所示,爆炸膨胀环实验装置摆放于木箱中,有利于回收实验装置,起爆系统置于木箱外 2 m 处,便于起爆系统的保护,但距离不宜太远,线路过长会增加回路中的电感。电容组采用 3 个 $4 \mu\text{F}$ 的电容用铜板进行并联,输出端与爆炸丝之间采用高压同轴电缆连接,以尽可能降低电路中的电感,确保输出到爆炸丝上的能量。起爆控制系统及测试系统位于实验工号内,确保实验人员安全。



图 2 实验场地布局

Fig. 2 Layout of the experimental field

3 无氧铜试样环的拉伸实验

3.1 实验状态

采用图 1 所示的实验装置开展无氧铜试样环的拉伸实验,试样环材料为 M 态的无氧铜(TU1),内径为 40 mm,厚度为 1 mm,轴向高度为 2 mm。粉末炸药采用微晶泰安粉。驱动器采用 20 钢,装药筒采用有机玻璃,装药筒外径与驱动器内径紧密贴合,粉末炸药的装药量由装药直径确定,通过改变装药量和装药筒外径实现试样环不同的初始加载速度。对无氧铜试样环进行了 3 发实验,状态参数见表 1。

表 1 无氧铜膨胀环实验参数

Table 1 Parameters for the OFHC copper expanding ring experiment

实验号	环内径/mm	环截面尺寸	装药筒外径/mm	装药筒内径/mm	装药质量/g
No. 1	40	1 mm×2 mm	14	12	4.1
No. 2	40	1 mm×2 mm	17	12	4.3
No. 3	40	1 mm×2 mm	19	17	8.5

3.2 试样环膨胀速度

实验中采用激光位移干涉仪对试样环的径向膨胀速度进行测试,无氧铜试样环径向膨胀速度历史如图 3 所示。从速度历史可以看出,试样环膨胀早期,由于受到冲击加载,应力波在试样环中来回反射,造成速度的振荡。当试样环进入自由膨胀阶段后,其速度呈现近似匀减速运动,速度历史接近于等斜率的直线。当试样环中发生失稳或者断裂时,速度将发生变化,如实验 3 的速度历史。处理试样环材料的应力-应变-应变率关系时,早期加载阶段和后期失稳断裂阶段的速度均为无用数据,只有中间的自由膨胀阶段数据可用。

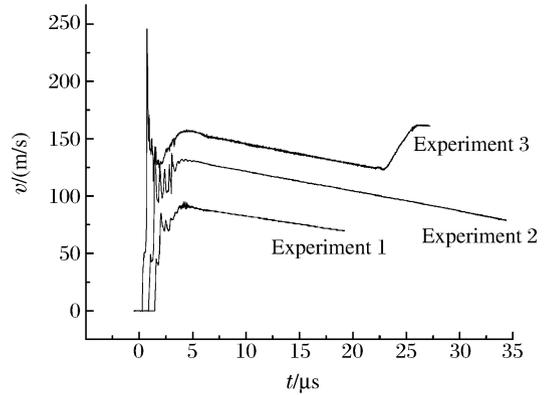


图 3 无氧铜试样环径向膨胀速度历史
Fig. 3 Radial velocity of OFHC copper expanding ring

3.3 流动应力-塑性应变-应变率关系

在一维近似假定(针对环的自由膨胀阶段)条件下推导出的流动应力(环向应力) σ 、塑性应变 ϵ 及应变率 $\dot{\epsilon}$ 的表达式^[2]分别为 $\sigma = -\rho R \ddot{R}$, $\epsilon = \ln(R/R_0)$, $\dot{\epsilon} = \dot{R}/R$, 其中 ρ 为试样环材料密度, R_0 、 R 分别为试样环初始半径和运动过程中的半径, \dot{R} 为速度, \ddot{R} 为加速度, 由此可求解出试样环材料的流动应力-塑性应变-应变率之间的关系。试样环的膨胀速度、位移可以直接测量, 但加速度目前还没有测试方法, 只能依靠速度微分获得。

已经获取 M 态无氧铜试样环自由膨胀阶段的速度历史, 为了保证数据的可用性, 只对速度曲线中的可用数据段进行微分获得加速度, 进行积分获得位移, 进而求解材料的流动应力-塑性应变-应变率关系。由 3 发实验数据处理获得的 M 态无氧铜材料的流动应力-塑性应变-应变率关系如图 4 所示, 随着初始加载应变率的升高, 无氧铜材料的流动应力也在增加, 说明无氧铜材料的屈服强度对应变率是敏感的。图 4 中同时列出了采用电磁膨胀环实验获得的无氧铜材料的几组数据^[6], 与本文数据相比, 文献 [6] 中试样环加载的应变率较低, 在相同应变时其流动应力相对较小。电磁加载时, 试样环中的平均温升约 100 °C^[6]; 而冲击加载时, 试样环中的平均温升只有约 10 °C, 温升对材料的流动应力也有影响。

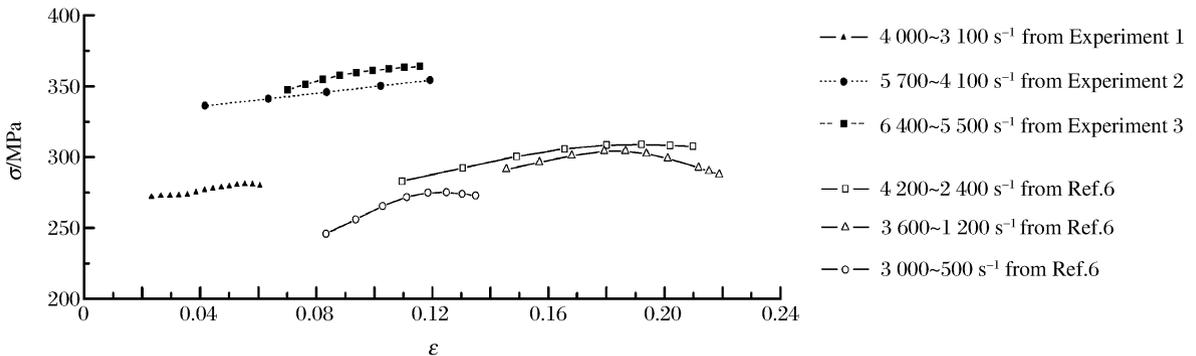


图 4 无氧铜材料在高应变率拉伸加载下的流动应力-塑性应变关系

Fig. 4 Flow stress-plastic strain curves of OFHC copper at high-strain-rate tension loading

4 结论

对传统爆炸膨胀环实验装置中的起爆方式进行了改进, 建立了爆炸丝线起爆方式的新型爆炸膨胀环实验技术。通过新型爆炸膨胀环实验技术获得了无氧铜试样环径向膨胀的速度历史, 对速度历史进行处理获得了无氧铜材料在高应变率拉伸加载下的应变-应变-应变率关系, 为拓展材料高应变率拉伸加载下的本构关系研究提供了一条技术途径。

流体物理研究所的王健、温上捷、梁川等研究小组为本研究提供了爆炸丝线起爆系统,孙学林、金山、刘俊、王德田等同志在测试上给予了协助,在此谨表感谢。

参考文献:

- [1] Grady D E, Benson D A. Fragmentation of metal rings by electromagnetic loading[J]. *Experimental Mechanics*, 1983,23(4):393-400.
- [2] Johnson P C, Stein B A, Davis R S. Measurement of dynamic plastic flow properties under uniform stress[C]// *Symposium on the Dynamic Behavior of Materials*. 1963:195-198.
- [3] Hoggatt C R, Recht R F. Stress-strain data obtained at high rates using an expanding ring[J]. *Experimental Mechanics*, 1969,9(10):441-448.
- [4] Warnes R H, Duffey T A, Karpp R R, et al. An improved technique for determining dynamic material properties using the expanding ring[M]// Meyers M A, Murr L E. *Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals*. New York, 1981:23-36.
- [5] 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.
GUI Yu-lin, SUN Cheng-wei, LI Qiang, et al. The experimental studies on dynamic tension of metal ring by electromagnetic loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006,26(6):481-485.
- [6] 桂毓林. 电磁加载下金属膨胀环的动态断裂与破碎研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2007.
- [7] Hiroe T, Fujiwara K, Abe T, et al. Rapid expansion and fracture of metallic cylinders driven by explosive loads[C]// *Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter*. 2004,706:465-468.

An improved technique for dynamic tension of metal ring by explosive loading

TANG Tie-gang*, LI Qing-zhong, CHEN Yong-tao, GU Yan, LIU Cang-li

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

Abstract: A new setup was designed for dynamic tension of metal ring. The line initiation by exploding wire was used in the designed setup. The dynamic tensile experiments of OFHC copper rings at high strain rate were carried out by the designed setup. The radial velocity histories of OFHC copper rings were measured by a laser displacement interferometer. The stress-strain-rate relations for OFHC copper were obtained by processing the radial velocity histories of OFHC copper rings.

Key words: mechanics of explosion; explosive-driven expanding ring; impact tensile experiment; OFHC copper; high strain rate

* Corresponding author: TANG Tie-gang

E-mail address: ttg1974@163.com

(责任编辑 张凌云)