

文章编号: 1001-1455(2006)06-0481-05

实现金属环动态拉伸的电磁加载技术研究*

桂毓林, 孙承伟, 李 强, 张光升

(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实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 描述了实现金属环动态拉伸的电磁膨胀环实验方法, 改进了快速放电和短路开关两个实现自由膨胀的关键问题, 为研究材料本构关系、动态断裂和破碎提供了一条简单而实用的加载途径。主回路电流由 Rogowski 线圈测量获得, 金属环的膨胀速度由狭缝扫描相机测量得到, 并由电动力学方程可计算出金属环中的流动应力、应变、应变率以及温升等动态力学参数。

关键词: 爆炸力学; 电磁膨胀环; 动态拉伸; 金属环; Rogowski 线圈; 狭缝扫描

中图分类号: O382.3 **国标学科代码:** 130 · 3520 **文献标志码:** A

1 引 言

膨胀环加载技术主要有爆炸驱动和电磁驱动。用炸药驱动膨胀环的优点有, 环尺寸受限制小, 可达较高的应变率, 而且加载过程中环温升不显著。但其缺点也很明显: 加载过程中有冲击波和稀疏波的影响, 炸药产物的侧向效应不可避免, 一维应力条件难以完全实现。电磁膨胀环技术利用线圈产生一个均匀磁场, 试样环置于线圈外的中心平面上, 试样环中产生感生电流相互作用, 使试样环获得一个向外的驱动力。对研究高应变率下材料的动态力学性能, 电磁膨胀环具有许多优点, 主要有, 第一, 电流均匀穿过试样环横截面, 作用在试样环的洛伦兹力处处均匀, 没有由于机械力作用产生的波效应; 第二, 试样环的膨胀速度和应变率可通过调节螺线管和电路特征参数得到精确控制, 由于试样环为自由膨胀运动, 流动应力、平均应变、应变率历史的测量变得简单而准确; 第三, 如果原线圈和试样环之间的耦合效率很高, 可达到 10^4 s^{-1} 以上的应变率; 第四, 该方法比爆炸加载方法更有利于在实验室里进行, 而且动态拉伸断裂和破碎以及应变率实验具有良好的复验性。

1972 年, M. J. Forrestal 等^[1]采用电磁加载方法研究了 6061-T6 铝环短压力脉冲下的轴对称塑性响应。1982 年, D. E. Grady 等^[2]利用电磁膨胀环技术对 OFHC 铜和 1100-0 铝进行了动态破碎实验。1989 年, M. H. Gourdin 等^[3]在文献[1]的基础上发展了复合膨胀环技术, 拓展了材料的研究范围, 使低导电率的材料也能用电磁加载技术进行实验研究。1996 年, M. Altynova 等^[4]利用该加载技术研究了金属材料的延性断裂。丰树平等^[5]利用电磁膨胀环技术对 OFHC 铜进行过实验。本文主要介绍电磁膨胀环实验方法、测试技术以及相关的改进技术, 测试结果与计算结果基本一致, 为研究材料在一维轴对称拉伸应力情况下的本构关系、动态断裂与破碎提供简单而实用的加载途径。

2 实验原理

电磁膨胀环电路简图如图 1 所示。整个装置类似于一个变压器, 一个 6 匝线圈的螺线管相当于一个固定原线圈, 试样环相当于一个可移动的二级线圈。电容器电容为 C , 当实验时充电到预定电压 V , 触发 K_1 开关对螺线管线圈快速放电。螺线管线圈中电流 I_1 在自己的近区产生一个强大的磁场, 根据洛伦兹定律, 该磁场在试样环中感生一个反向旋转的电流 I_2 。试样环中的电流与磁场相互作用, 在环上

* 收稿日期: 2005-09-26; 修回日期: 2006-03-15

基金项目: 电磁加载下金属材料的动态破坏机理研究基金项目(FZ02003)

作者简介: 桂毓林(1973—), 男, 博士研究生, 助理研究员。

产生一个均匀的、向外的力。环径向膨胀速度由扫描相机进行狭缝扫描测得,采用氙灯作为实验照明。残余磁力由 K_2 开关控制,在回路电流的半周期处将电路短路,回路电流迅速衰减,残余磁力最小化,从而实现试样环自由膨胀。

3 动态拉伸实验

3.1 装置设计以及开关

设计如图 2 所示的有机玻璃制成的螺线管固定装置。螺线管外径为 40 mm,螺线管绕线为 1.5 mm 粗的铜丝,绕线匝数为 6。为了平均分布接触载荷,在螺线管芯棒上刻上环绕的凹槽,凹槽间距为 1.8 mm,凹槽底部形状与金属丝的轮廓近似。为确保产生的磁场处处均匀,使线圈从一匝到另一匝过渡处为垂直缠绕,即避免绕处线带来的横向磁场干扰。线圈绕制完成后将整个装置浸泡在环氧树脂中,使环氧树脂充满金属丝的所有空隙(包括过渡带),以避免由于产生的阻抗热而使线圈起拱,对原线圈起固定作用。

开关在电磁膨胀环实验中起到了重要作用,关系到试样环是否能实现自由膨胀。在文献[2~5]中,为达到对图 1 中的两个开关在时间上的精确控制,均采用了雷管开关。虽然雷管开关的时间漂移很小,但是有两个不利因素:一是大电流下雷管的安全性;二是雷管开关的成本高。经过多次放电实验,发现在充电电压为 1~6 kV 之间,短时间导通的三电极开关^[6]的时间漂移约为 2.5 μs 。自制的三电极开关原理示意图如图 3 所示,两个主电极之间的最佳间距约为 1.3 mm,触发电极由高压脉冲发生器给出幅值为 9 kV 的负脉冲,触发电极与脉冲发生器之间有一个起保护作用的变压器。另外,三电极开关密封在真空容器中,给回路带来的电感小于 30 nH。在不放置环的情况下,从 RLC 振荡波形和截止波形比较来看, K_2 开关得到了准确控制,如图 4 所示。

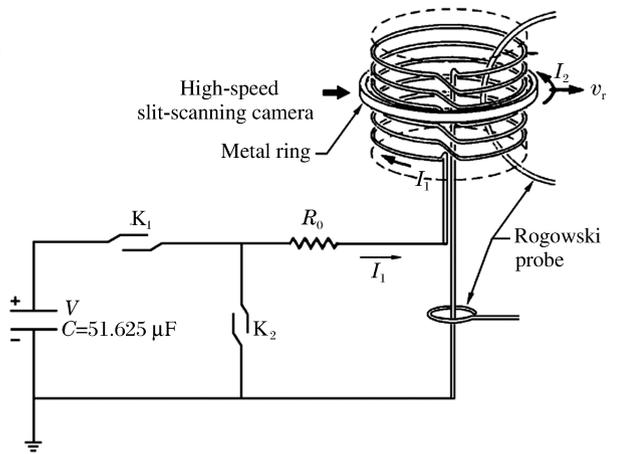


图 1 电磁膨胀环电路简图

Fig. 1 Schematic of electromagnetically driven expanding ring

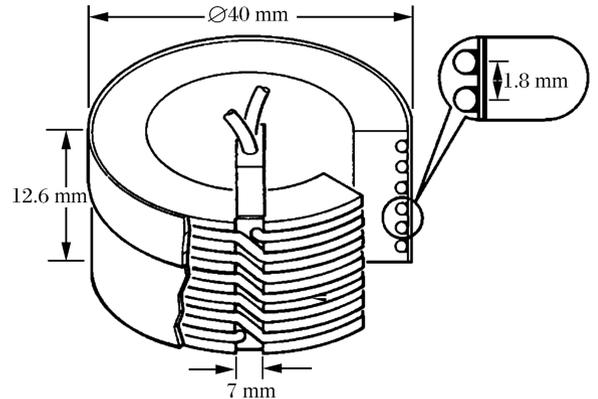


图 2 螺线圈示意图

Fig. 2 Schematic of solenoid

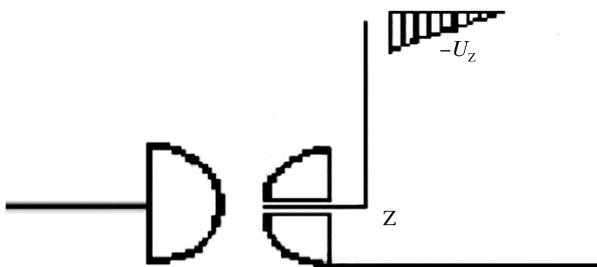


图 3 短时间导通三电极开关示意图

Fig. 3 Schematic of three electrode switch conducted in short time

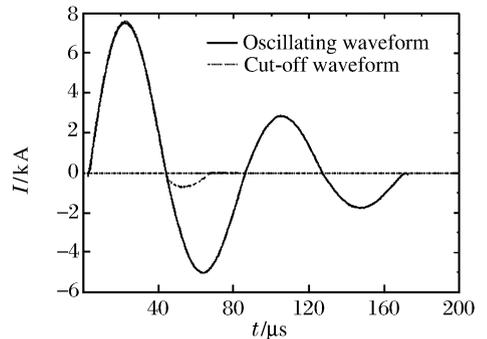


图 4 振荡波形和截止波形比较

Fig. 4 Comparison between oscillating waveform and cut-off waveform

3.2 试样环

试样环应选择高导电率的材料,如无氧铜、纯铝等,本文中采用的试样环为无氧铜,平均半径为

21.1 mm, 截面尺寸为 1.0 mm×1.0 mm。

3.3 电流和速度测量

主回路电流 I_1 用自行绕制的 Rogowski 线圈进行测量, 采用 LR 积分方式, 其灵敏度为 (174 ± 1) A/V。在每次实验前, 必须用无感电阻或可视化电阻 (CVR) 进行 Rogowski 线圈标定。

由 SJZ-15 型高速转镜式狭缝扫描相机测量试样环径向膨胀位移轨迹, 通过试样环膨胀位移轨迹计算出环的膨胀速度, 其中转镜的扫描速度为 60 kn/min。在 2.8 kV 充电电压下, 试样环沿径向运动轨迹的扫描照片如图 5 所示。图中垂直方向上试样环直径不断变化, 水平方向为时间。



图 5 狭缝扫描照片

Fig. 5 Photo of high-speed slit scanning camera

3.3 动态拉伸实验

在进行预定电压下的拉伸实验前, 需要在该电压下进行 RLC 振荡电路放电, 求出该电压下回路电感 L_c 和电阻 R_c 。主要进行了 2.5 ~ 3.5 kV 电压下的无氧铜环动态拉伸实验, 实验数据在表 1 中列出, 其中 U 为充电电压, v_r 为膨胀环径向速度, δ 为延伸率, $\dot{\epsilon}$ 为应变率。回收试样环的均匀膨胀、颈缩、破碎图像分别如图 6(b)、6(c) 和 6(d) 所示。从图 6 中可以看出, 图 6(b) 显示试样环膨胀非常均匀; 图 6(c) 显示试样环没有拉断, 但出现了几个颈缩; 图 6(d) 显示试样环被拉断成几个碎块, 某些碎块还有颈缩。

表 1 无氧铜动态拉伸实验数据

Table 1 The data obtained from each dynamic tensile experiment of OFHC Cu

实验编号	U/kV	$v_r/(\text{m/s})$	$\delta/\%$	$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	颈缩数目	碎块数目
1	2.76	87	21.8	3.96×10^{-3}	—	—
2	2.78	88	23.0	4.00×10^{-3}	6	—
3	2.80	90	23.1	4.10×10^{-3}	5	—
4	3.00	122	—	5.40×10^{-3}	5	5
5	3.50	136	—	6.00×10^{-3}	7	9

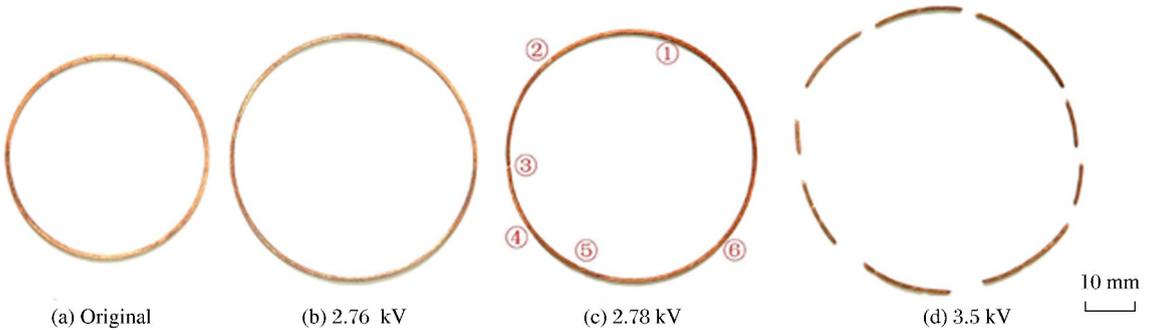


图 6 不同充电电压下试样环变形图像

Fig. 6 Photograph of deformation of OFHC Cu under different charge voltages

4 电动力学计算

由于试样环的横截面尺寸相对于直径非常小, 可近似假设试样环中只存在周向应力, 且处处均匀。根据文献[4]中对电磁膨胀环的电动力学分析, 膨胀环的运动微分方程为

$$\dot{v}_r = \frac{b(r)I_1I_2}{\rho A c^2} + \frac{I_2^2}{2m_s} \frac{dL}{dr} - \frac{\sigma}{\rho r}, \quad \dot{r} = v_r \quad (1)$$

放电回路电流 I_1 和试样环中的感生电流 I_2 由下式给出

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{M^2 - LL_c} \left[L \left(R_c I_1 + I_2 v_r \frac{dM}{dr} + U \right) - M \left(R_s I_2 + I_1 v_r \frac{dM}{dr} + I_2 v_r \frac{dL}{dr} \right) \right] \quad (2)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{1}{M^2 - LL_c} \left[L_c \left(R_s I_2 + I_1 v_r \frac{dM}{dr} + I_2 v_r \frac{dL}{dr} \right) - M \left(R_c I_1 + I_2 v_r \frac{dM}{dr} + U \right) \right] \quad (3)$$

$$\dot{U} = I_1 / C \quad (4)$$

试样环和螺线圈的温度由下列两式给出

$$\dot{T}_s = \frac{R_s I_2^2}{c_p m_s} + \frac{\sigma \dot{\epsilon}_p}{c_p \rho}, \quad \dot{T}_c = \frac{R_c I_1^2}{c_p m_c}, \quad \dot{\epsilon}_p = f(\epsilon_p, \dot{\epsilon}_{tot}, T) \quad (5)$$

方程(1)~(5)中的变量单位为高斯制, v_r 为膨胀环径向速度; R_c 为 RLC 振荡电路电阻; $b(r)$ 为线圈磁场系数; R_s 为试样环电阻; I_1 为螺线圈线圈中电流; U 为电容器充电电压; I_2 为试样环中的感生电流; C 为电容器电容; ρ 为试样环密度; M 为线圈与试样环互感; A 为试样环横截面积; T_s 为试样环温度; c 为真空中的光速; T_c 为螺线圈线圈温度; L 为螺线圈线圈自感; c_p 为试样环比热容; r 为试样环膨胀半径; m_c 为线圈绕线质量; m_s 为试样环质量; ϵ_p 为塑性应变; L_c 为 RLC 振荡电路电感; $\dot{\epsilon}_{tot}$ 为总应变率。利用四阶 Runge-Kutta 对方程(1)~(5)式中的 r 、 v_r 、 I_1 、 I_2 、 U 、 T_s 、 T_c 以及 ϵ_p 等 8 个变量进行求解, 时间步长为 $0.01 \mu s$ 。为了与实验结果进行比较, 计算 2.8 kV 下的电流 I_1 、 I_2 以及应力应变、应变率、膨胀速度和温度等参数。本文中用 Johnson-Cook 本构模型^[7]描述金属环中的流动应力

$$\sigma = Y_0 (1 + 3.24 \epsilon_p^{0.34}) (1 + 0.25 \ln \dot{\epsilon}_{tot}) (1 - (T^*)^{1.09}) \quad (6)$$

式中: 初始屈服强度 $Y_0 = 90 \text{ MPa}$; 特征温度 $T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$, 熔化温度 $T_{melt} = 1082 \text{ }^\circ\text{C}$, 室温 $T_{room} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

计算电流与 Rogowski 线圈测得比较如图 7 所示, 金属环膨胀速度比较如图 8 所示。应力应变关系如图 9 所示。应变率历史和温升变化如图 10 所示。

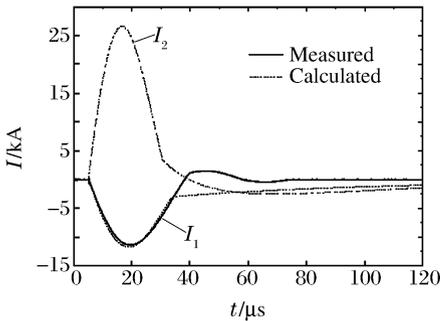


图 7 试样环电流和回路电流

Fig. 7 Currents of specimen and circuit

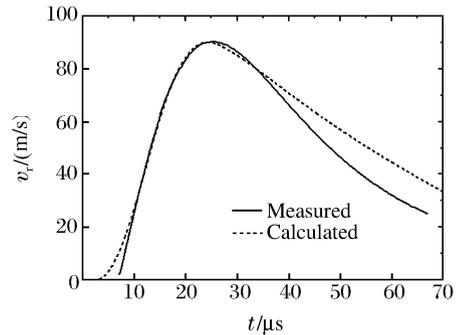


图 8 试样环径向膨胀速度

Fig. 8 The radial expansion speed of ring

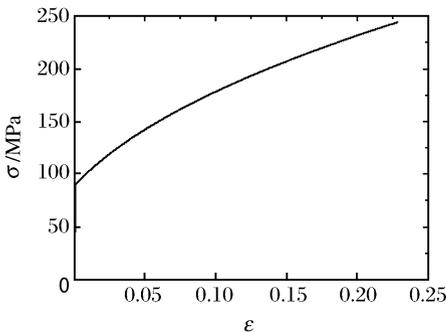


图 9 应力应变曲线

Fig. 9 The stress-strain curve

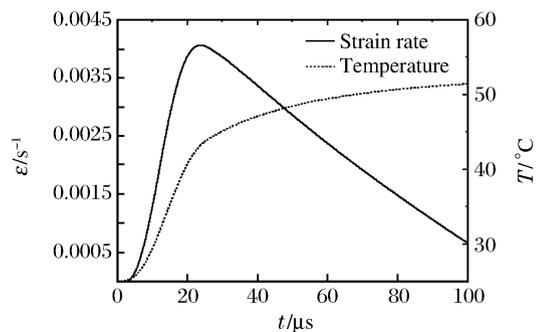


图 10 应变率与温度曲线

Fig. 10 Strain rate and temperature versus time

5 结束语

本文中主要对电磁膨胀环实验技术及改进技术进行了介绍。电动力学计算结果与实验结果相互吻合,表明该技术对于研究材料本构关系、动态断裂和破碎提供了简单而实用的加载途径。虽然本文的金属环为高导电率材料,但如果发展复合膨胀环技术,就会拓宽材料的研究范围。

感谢赵剑衡、丰树平、孙奇志、杨礼兵、欧阳凯、黄淑萍等在实验中给予的大力支持。

参考文献:

- [1] Forrestal M J, Walling H C. Axisymmetric plastic response of rings to short-duration pressure pulses[J]. AIAA Journal, 1972,10(10):1382-1384.
- [2] Grady D E, Benson D A. Fragmentation of metal rings by electromagnetic loading[J]. Experimental Mechanics, 1983:393-400.
- [3] Gourdin W H. Analysis and assessment of electromagnetic ring expansion as a high-strain-rate test[J]. Journal of Applied Physics, 1989,65(2):411-422.
- [4] Altnova M, Hu X Y, Daehn G S. Increased ductility in high velocity electromagnetic ring expansion[J]. Metallurgical and Materials Transactions, A, 1996,27:1837-1844.
- [5] 丰树平,孙承纬. 高速电磁自由膨胀环实验技术[A]. 第四届全国冲击动力学学术会议[C]. 太原:中国力学学会爆炸力学专业委员会,1994:267-271.
- [6] 清华大学电力系高电压技术专业编著. 冲击大电流技术[M]. 北京:科学出版社,1978:35-42.
- [7] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985,21(1):31-48.

Experimental studies on dynamic tension of metal ring by electromagnetic loading

GUI Yu-lin*, SUN Cheng-wei, LI Qiang, ZHANG Guang-sheng

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

Abstract: The dynamic tension experimental technique of electromagnetically driven thin metal rings' expansion was described, and quick-discharge switch and cut-off switch were improved to achieve ring's free expansion. The approach is useful for studies on material constitutive relationship, dynamic fracture and fragmentation. The main circuit current was measured by Rogowski probe, and the expansion velocity was obtained from slit scanning camera's displacement measurement. The flow stress, strain, strain rate, expansion velocity and temperature rise of ring was obtained by electro-dynamics analysis calculation.

Key words: mechanics of explosion; electromagnetically driven ring expansion; dynamic tension; metal ring; Rogowski probe; slit-scanning camera

* Corresponding author: GUI Yu-lin
E-mail address: guiyulin@21cn.com
Telephone: 0816-2494732