DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-0976-06

用于柱形爆炸容器周向大变形历程测量的应变丝技术*

李 进,熊 琛,张德志,马艳军,李运良,秦学军
(西北核技术研究所,陕西 西安 710024)

摘要: 为了测量柱形爆炸容器的动态周向大变形历程,开发了应变丝测量技术。选用性能良好的合金丝沿爆炸容器周向固定,容器膨胀变形驱动合金丝同步伸长,配合适当的电路,检测合金丝的电阻变化,从而获得容器的变形历程。在钢筒的中心进行了 120 g TNT 当量球形装药下的爆炸加载实验,获得了峰值超过 20%的钢筒周向变形历程。测量结果与实验后钢筒变形实测结果及数值模拟结果吻合较好。

关键词: 柱形容器;动态大变形;应变;应变丝
中图分类号: O389 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

应变测量是材料性能分析[1]、结构设计和安全监测[2-3]等工作的重要依据。目前,测量柱形爆炸容器变形的主要手段有:在容器表面粘贴应变片对容器的动态变形进行测量[4];利用高速相机对容器的变形进行连续拍照[5],进而得到容器的变形情况;利用激光多普勒效应测量容器的径向变形[6];利用电探针测量容器的动态变形过程[7]。

应变片只能测量容器局部位置的变形,且量程通常小于 2%,由于径向应力波的剥离作用,应变片也难以获得理想的大应变全时间历程;高速相机拍照测量容器变形的方法对设备的要求较高,一般实验室不具备条件;激光多普勒效应和电探针的测量方法只能获得容器局部点的径向变形。为此,根据应变片技术的基本原理,开发了用于环向平均应变测量的应变丝技术,实践证明,该技术可测量超过 20%的大应变。

应变丝技术的基本原理为:选用电阻变化率与伸长率性能稳定、且塑性良好的合金丝沿容器周向固定,容器膨胀变形驱动合金丝同步伸长,配合适当的电路,检测合金丝的电阻变化,进而获得容器的变形历程。

1 应变丝电阻变化与伸长量关系的标定

选用商品级漆包康铜丝作为应变丝材料,康铜是制作应变片敏感栅的常用材料。若对精度有更高的要求,可选择科学级的合金丝。研制了用于标定合金丝电阻变化与伸长关系的装置,该装置由丝杠、光栅尺和精密电阻测试仪组成,如图 1 所示。将选定长度的合金丝固定在丝杠上,丝杠可精确控制合金丝的伸长,步进最小伸长量为 0.125 mm;合金丝的伸长量由光栅尺测量,光栅尺的测量精度为 10 μm;合金丝的电阻由精密电阻测试仪测量,精度达 0.01%。

测试获得了规格为∅0.2 mm、∅0.3 mm 和∅0.4 mm 的漆包康铜丝的电阻变化与伸长量的关系,每种规格测试了 2~3 个样品,如图 2 所示。由图 2 可见,三种规格 7 个试样的电阻变化与伸长量关系非常一致,对 7 组数据按过原点的二次函数拟合,结果如表 1 所示。其中,a 为拟合式中一次项系数,b 为二次项系数。考虑安装固定时对强度的要求,爆炸实验选定使用∅0.4 mm 漆包康铜丝,电阻变化与伸长量的关系为:

* **收稿日期**: 2016-04-12; **修回日期**: 2017-01-12
第一作者: 李 进(1985—),男,博士研究生,工程师,lijin@nint.ac.cn。

$$\frac{\Delta R_L}{R_L}=2.20\frac{\Delta L}{L_0}+0.012\left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)^2 \tag{1}$$

式中：R_L 为合金丝电阻值，ΔR_L 为合金丝电阻变化量，L_0 为合金丝长度，ΔL 为合金丝长度变化量。

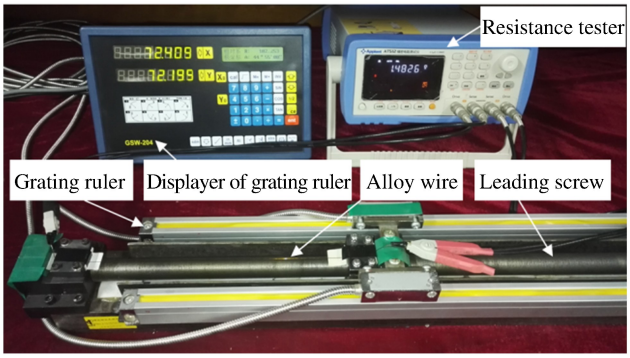

图 1 康铜丝电阻变化量与长度变化量标定装置

Fig. 1 Calibration device of resistance and length variation of constantan wires

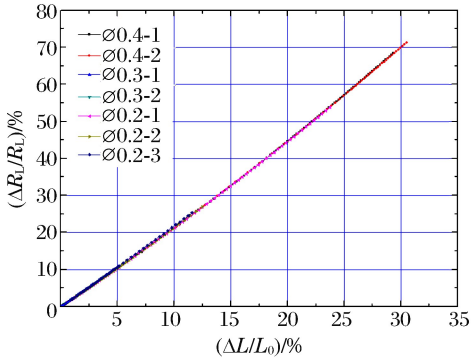

图 2 康铜丝电阻变化量与长度变化量标定结果

Fig. 2 Calibration results of resistance and length variation of constantan wires

表 1 康铜丝电阻变化与伸长量关系拟合参数

Table 1 Fitting parameters of resistance and length of constantan wires

参数	∅0.4 mm	∅0.4 mm	∅0.3 mm	∅0.3 mm	∅0.2 mm	∅0.2 mm	∅0.2 mm
a	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20
b	0.012	0.012	0.008	0.010	0.011	0.010	0.008

2　应变丝测量技术的实现

2.1　测试电路

用于检测动态电阻变化的常用方法包括直流电桥[8]和脉冲恒流源[9-10]。直流电桥常用于检测微小电阻变化量，一般要与放大器配合使用。此处选用脉冲恒流源技术，图 3 为其电路示意图。

脉冲恒流源在工作时间范围内输出恒定电流 I_0，R_L 为应变丝初始电阻，$\triangle R_L$ 为应变丝电阻变化量，当应变丝电阻未发生变化时，电路输出电压 U_x 为：

$$U_x=I_0R_L \tag{2}$$

应变丝电阻变化时，电路输出电压的变化量为 $\triangle U_x$：

$$U_x+\Delta U_x=I_0(R_L+\Delta R_L) \tag{3}$$

由此可得：

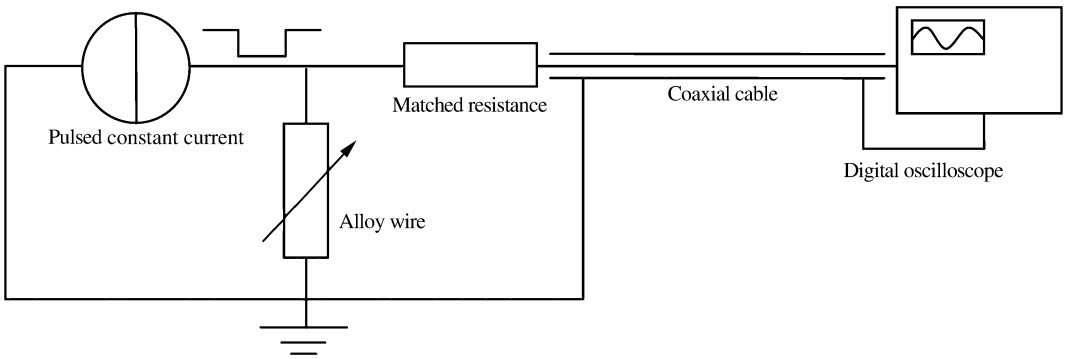

图 3 用于应变丝电阻变化量检测的恒流源电路

Fig. 3 Constant-current source circuit for detecting resistance variation of strain wires

$$\frac{\Delta R_{\mathrm{L}}}{R_{\mathrm{L}}}=\frac{\Delta U_{\mathrm{x}}}{U_{\mathrm{x}}} \tag{4}$$

即电阻变化量正比于电路输出电压的变化量。

2.2 应变丝的固定

设计了如图 4(a)所示的双槽型应变丝固定工装,该工装由硬塑料加工。将应变丝固定工装粘贴在容器表面,然后在容器表面待测位置环面敷设一层塑料绝缘膜,单根应变丝对折成双股,一端固定在双槽中间的凸起处,应变丝绕容器壁一周,施加一定的预紧力,然后用 302 型改性丙烯酸酯胶黏剂固定在工装的槽内,如图 4(b)所示。同时,在应变丝、塑料绝缘膜和容器之间均匀涂抹 302 型胶黏剂,确保三者牢固粘接。图 4(c)为安装完成后的整体状态

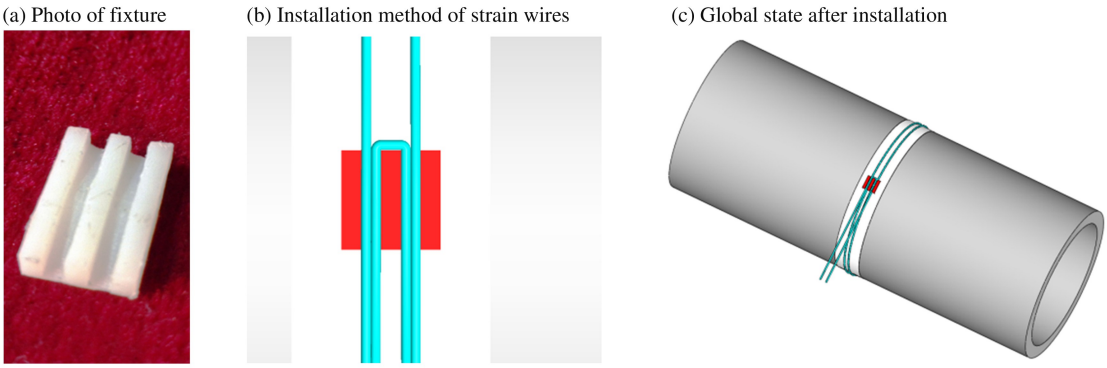

图 4 应变丝固定安装结构示意图

Fig. 4 Schematic of installation structure of strain wires

应变丝固定工装尺寸为 15 mm×10 mm×3 mm,质量仅 0.42 g,其作用在于将应变丝自身粘接成环状,靠预紧力固定于容器表面,测量过程中不需要保证固定工装与容器紧密粘接,这样也避免了径向应力波的剥离作用给测量带来困难。

3 测量性能分析

应变丝测量技术主要针对柱形爆炸容器的环向平均应变测量,无法实现容器局部变形的测量。同时,对于容器的非对称环向变形,应变丝测量技术无法反映其真实变形历程。这是应变丝测量技术的局限性所在。

下面,假定容器发生周向对称变形,对应变丝测量技术的动态响应能力进行分析。本文中选用康铜应变丝的直径 $d=0.4$ mm,取其中的弹性波速 $c_1=3\ 500$ m/s,塑料绝缘膜为厚度 $\delta=0.1$ mm 的聚氯乙烯膜,取其中的弹性波速 $c_2=2\ 300$ m/s。考虑应力波在应变丝和聚氯乙烯膜中来回反射 3～4 次后才达到动力学平衡,可得测量系统的上升时间约为:

$$t=7d/c_1+7\delta/c_2=1.104\ \mu\mathrm{s} \tag{5}$$

可见,应变丝的直径越大,聚氯乙烯膜的厚度越大,应变丝测量系统的上升时间越长,动态响应能力越差。而常见爆炸容器的上升时间在 100 μs 量级以上,所以应变丝测量技术可以很好地满足该动态响应需求。

4 典型实验及数据处理

在内直径 100 mm、长 600 mm、壁厚 6 mm 的钢筒内进行 120 g TNT 当量的爆炸实验,炸药球由有机玻璃架固定于钢筒中心,经 300 mm 柔爆索与起爆雷管连接。在钢筒爆心环面及左、右距爆心环面约 10 mm 的三个环面对应布设 1、2、3 三路应变丝,利用固定工装和 302 型改性丙烯酸酯胶黏剂固定。测试系统时序关系为:在雷管上安装等离子体电探针,雷管爆炸时,电探针输出信号触发脉冲恒流源给应变丝供电,电路输出负极性脉冲自触发示波器采集信号。

在正式爆炸实验前，利用剪刀剪断电探针头部，可以模拟雷管爆炸对电探针的导通作用，测试系统输出没有应变变化的基准波形，多次模拟实验的输出波形在时间特性和幅值特性上均完全一致，测试系统重复工作的稳定性很高，为数据处理奠定了基础，图 5 为典型波形。由图 5 可见，在应变丝电阻没有发生变化的情况下，输出电压仍存在轻微下降，可见恒流源输出电流并不是绝对恒定。图 6 为爆炸实验输出信号原始波形，在图 5 负向平台的基础上叠加了由电阻变化引起的电压变化。图 6 和图 5 对应时刻的电压差与图 5 的电压对应相除即可得到电压变化量，电压变化量即电阻变化量，由标定拟合的函数关系可以解算出应变丝的长度变化，由此得到钢筒的变形历程，如图 7 所示。这种数据处理方法无需精确测定应变丝的初始电阻，也无需要求恒流源电流的绝对恒定，但对恒流源和触发系统重复工作的稳定性要求较高。

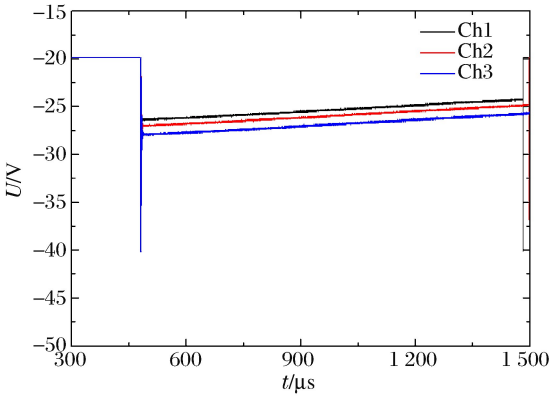

图 5 手动剪电探针时触发记录的信号

Fig. 5 Voltage profiles for cutting electric probes

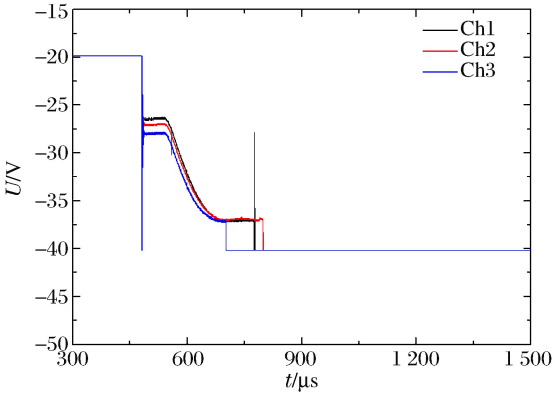

图 6 爆炸实验应变丝输出的原始信号

Fig. 6 Original profiles outputted by strain wires in the explosive experiment

由图 7 可见，应变已达到最大变形的平台期，1、2、3 三路应变丝所测得的最大形变量分别为 21.1%、20.6%和 18.1%，爆后实测筒壁变形分别为 21.5%、21.4%和 20.3%，两者的相对误差分别为 1.86%、3.74%和 10.84%。应变丝测量结果和爆后实测结果均出现了 1、2 两路变形相对第 3 路较大的现象，这表明炸药球的安装位置与三路应变丝并未呈对称关系，而是偏向了第 2 路，即偏向爆心环面左侧。另外，第 3 路应变丝所测结果幅度较小，却最先失效。这可能是由于应变丝自身缺陷所导致的，应变丝粗细不均会导致径缩过早出现，断裂失效也会提前出现。同时，也会导致应变丝电阻与伸长量关系发生变化，这也解释了第 3 路测量结果偏差较大的现象。

图 8 为钢筒爆心环面处应变丝测量结果与数值模拟结果的对比，两者的上升时间较为接近，但应变丝的测量结果偏小。该误差主要来源于以下几个方面：(1)炸药球的安装误差，即炸药球的安装位置偏

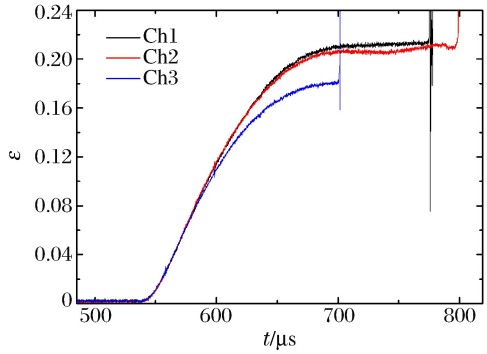

图 7 应变丝获得的完整钢筒变形历程

Fig. 7 Complete deformation curve of cylindrical shell obtained by strain wires measurement

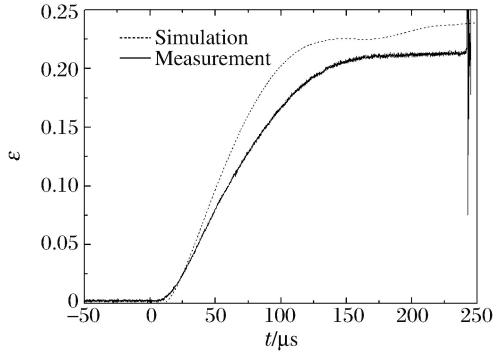

图 8 应变丝测量结果与数值模拟的对比

Fig. 8 Comparison between results of simulation and strain wires measurement

向了爆心环面左侧,导致应变丝测量结果偏小;(2)应变丝电阻变化与伸长量关系的标定误差,包括光栅尺的测量误差、电阻测试仪的测量误差以及应变丝在拉伸工装上的安装误差等;(3)应变丝固定工装的影响误差,即固定工装的体积效应和变形效应带来的误差;(4)应变丝的人为安装误差,包括应变丝缠绕角度、预紧力施加的不同所带来的误差等。

目前,在爆炸容器设计及其动力学研究中,获取容器动态周向大变形历程较为困难,而变形历程对于数值模拟的校准以及容器的设计都有重要的参考价值。因此,上述测量结果的最大价值不在于给出了变形的最大值,而在于变形的全时间历程。

5 结 论

(1)设计了应变丝标定装置,精确标定了应变丝电阻变化与伸长量的对应关系,并按过原点的二次函数完成了拟合,为应变丝测量技术的实现奠定了基础;

(2)设计了应变丝安装工艺及配套的恒流源测量电路,实现了用于柱形爆炸容器周向大变形历程测量的应变丝技术,并对应变丝测量技术的测量性能进行了分析,可得测量系统的上升时间约为 1.1 μs;

(3)为了验证应变丝技术的可行性,利用钢筒模拟爆炸容器开展了爆炸实验,获得了钢筒不同位置的周向变形历程,变形峰值分别为 21.1%、20.6%和 18.1%,测量效果良好。

(4)本文开发的应变丝技术,用于测量柱形爆炸容器周向大变形,可以测量最大平均值超过 20%的大变形,并且可以获得容器的整个变形历程,对爆炸容器动力学研究有重要的实用意义。

参考文献:

[1] Gao Chongyang, Shi Huifen, Yao Zhenhan, et al. Measurement of dynamic fracture parameters in the expanding process at high-strain rates[J]. Key Engineering Materials, 2000,183-187(187):277-282.

[2] Zingoni A. Structural health monitoring, damage detection and long-term performance[J]. Engineering Structures, 2005,27(12):1713-1714.

[3] 刘钰,韩峰,董楠,等.爆炸容器安全概率的统计分析方法[J].现代应用物理,2012(3):155-160.
Liu Yu, Han Feng, Dong Nan, et al. Statistical analysis of the security probability for explosion-containment vessels[J]. Modern Applied Physics, 2012(3):155-160.

[4] 钟方平,陈春毅,林俊德,等.带平板封头的双层爆炸容器动力响应的实验研究[J].爆炸与冲击,1999,19(3):199-203.
Zhong Fangping, Chen Chunyi, Lin Junde, et al. Experimental study of dynamic response of double-walled explosion vessels with flat head[J]. Explosion and Shock Waves, 1999,19(3):199-203.

[5] 汤铁钢,谷岩,李庆忠,等.爆轰加载下金属柱壳膨胀破裂过程研究[J].爆炸与冲击,2003,23(6):529-533.
Tang Tiegang, Gu Yan, Li Qingzhong, et al. Expanding fracture of steel cylinder shell by detonation driving[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(6):529-533.

[6] 胡永乐,陈子辰,王文,等.爆炸容器动态径向变形非接触测量技术[J].机械强度,2009,31(5):759-763.
Hu Yongle, Chen Zichen, Wang Wen, et al. Non-contact measurement technique for dynamic radial deformation of explosion containment vessels[J]. Journal of Mechanical Strength, 2009,31(5):759-763.

[7] 秦学军,张德志,杨军,等.内部爆炸作用下钢筒变形过程的电探针测量技术[J].爆炸与冲击,2014,34(1):115-119.
Qin Xuejun, Zhang Dezhi, Yang Jun, et al. Electric probe measurement technique on deformational process of cylindrical steel shell under inside-explosion loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(1):115-119.

[8] 张挺.爆炸冲击波测量技术[M].北京:国防工业出版社,1984:106.

[9] 黄正平.爆炸与冲击电测技术[M].北京:国防工业出版社,2006:159-165.

[10] 习友宝,古天祥.基于双恒流源法的高精度应变测量技术[J].电子科技大学学报,2005,34(3):407-409.
Xi Youbao, Gu Tianxiang. High-accuracy strain measuring technology based on the method of dual invariable-current[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2005,34(3):407-409.

Strain wire measurement technique used in calibrating circumferential large deformation of cylindrical explosion vessels

Li Jin, Xiong Chen, Zhang Dezhi, Ma Yanjun, Li Yunliang, Qin Xuejun

(*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an* 710024, *Shaanxi, China*)

Abstract: In the present work we developed a strain wire measurement technique that can be used to measure the dynamic deformation process of cylindrical explosion vessels. The strain wires, compactly fixed along the circumference of the explosion vessels, extended synchronously when the vessels deformed due to the wires' good ductility. Coupled to appropriate circuitry, the resistance profiles of the alloy wires were measured to determine the dynamic deformation process of the explosion vessels. A 120 g TNT spherical high explosive experiment was performed in a cylindrical steel shell. The circumferential deformation curve of the shell was obtained, the peak value of which exceeded by 20%. The result of the strain wires measurement accorded with both the simulation result and the deformation data from the cylindrical steel shell experiment.

Keywords: cylindrical explosion vessel; dynamic large deformation; strain; strain wire

(责任编辑　曾月蓉)