

金属管裂纹声发射电磁激发试验研究

张晓涛¹, 李建中², 唐力伟¹, 王 平¹, 王晓明³

(1. 军械工程学院 火炮工程系, 河北 石家庄 050003; 2. 中国华阴兵器试验中心, 陕西 华阴 714200; 3. 63981 部队, 湖北 武汉 430311)

摘 要:针对电磁激发实现身管裂纹检测的问题, 对电磁激发原理及实现进行深入分析, 采用大容量高压电容放电方式, 在金属管上实现裂纹声发射电磁激发试验。通过对有、无裂纹试件, 在不同激发电压下采集信号的频域对比分析, 获得了金属管裂纹的声发射激发规律, 为常态下火炮身管裂纹的声发射检测提供了基础。

关键词:电磁声发射; 脉冲放电; 身管裂纹; 功率谱

中图分类号: TM15

文献标识码: A

The Experiment Research of Electromagnetic Acoustic Emission Excitation on Metal Pipe Crack

ZHANG Xiaotao¹, LI Jianzhong², TANG Liwei¹, WANG Ping¹, WANG Xiaoming³

(1. Dept. of Artillery Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. China Huayin Ordnance Test Centre, Huayin 714200, China; 3. 63981 Troops, Wuhan 430311, China)

Abstract: Aiming at electromagnetic excitation acoustic emission for barrel crack detecting, the principle and implementation of electromagnetic acoustic emission was analyzed in detail. The excitation experiment of acoustic emission of metal pipe crack was carried on by a large-capacity and high-voltage capacitor discharge method. Acoustic emission signals was collected on cracks and no crack specimens under different excitation voltages; then the signals were comparative analyzed in frequency domain. The law of electromagnetic excitation acoustic emission of metal pipe crack was obtained which provided a basis for the barrel crack detection by acoustic emission under normal.

Key words: electromagnetic acoustic emission; pulse discharge; barrel crack; power spectrum

0 引言

火炮身管通常工作在高温、高压、重载荷工况下, 不可避免地会产生裂纹缺陷, 对身管的裂纹缺陷做出快速正确的检测和评估具有重要作用。声发射在快速检测身管裂纹方面比之其他无损检测方法具有先天优势, 但声发射是一种动态检测方式, 需被检对象处于受载状态, 限制了其在火炮身管裂纹检测中的应用, 因此需要一种能在常态下对身管裂纹进行声发射现象激发及检测的方法。利用电磁激发裂纹声发射法为此提供了可能。

声发射是指材料受外力或内力作用产生变形或断裂, 以弹性波形式释放出应力-应变的现象, 作为一种无损检测方式, 通过对构件声发射信号参数的分析和研究, 可对构件的状态和性能进行评估预测^[1-2]。声发射检测广泛应用于管道泄漏, 油罐腐蚀点及机加工中刀具状态的监测等^[3]。

电磁声发射技术是一种新型的无损检测法, 美

国物理声学公司的试验工作证实, 金属材料缺陷尖端处电流的重新分配会产生声发射现象, 并在铝板裂纹上成功激发出了声发射信号, 其原理是由于金属材料局部电流的重新分配形成了电流绕流集中效应, 由于电磁效应产生洛伦兹力, 从而在缺陷部位激发出声发射信号^[4]。电磁激发技术为被检对象在非工作受载状况下的声发射检测提供了技术基础。

以火炮身管裂纹快速检测为目的, 本文在金属管上进行了裂纹声发射检测原理的研究, 深入分析了电磁声发射的基本原理, 利用大容量电容脉冲放电的方式, 成功激发和检测出了金属管裂纹声发射现象。

1 电磁声发射原理

金属材料通过脉冲电流时, 由于材料缺陷的存在, 流动的电流会重新分配, 并在缺陷尖端处出现集中效应, 导致缺陷处的电流密度急剧增大, 如图 1 所示。通电导体的周围会产生磁场, 而裂纹尖端处的

收稿日期: 2013-09-29

基金项目: 军队科研基金资助项目([2011]107)

作者简介: 张晓涛(1987-), 男, 陕西渭南人, 博士生, 主要从事机械故障诊断相关研究。E-mail: headic@163.com。唐力伟(1961-), 男, 天津人, 教授, 博士生导师, 主要从事机械系统性能检测与故障诊断。E-mail: tom5157@163.com。

电流集中且流向近乎相反,这会导致裂纹周围磁场显著增强,由于电磁场的互相作用,会在裂纹尖端处产生洛伦兹力,该力的作用使裂纹具有向外扩张趋势。

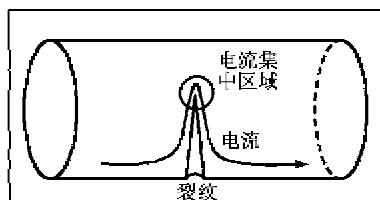


图1 金属管电磁声发射原理图

对于裂纹尖端产生声发射的区域中的任意一点,其洛伦兹力为

$$f_i = (J + J_m) \times B \quad (1)$$

式中: B 为磁感应强度; J 为导体的传导电流密度; J_m 为磁化电流密度,仅在铁磁质材料中存在,非铁磁质材料中 $J_m=0$ 。正是裂纹尖端区域所有点洛伦兹力的综合作用,导致裂纹出现扩张,发生声发射现象。

2 电磁声发射实验研究

2.1 脉冲电流加载装置

2.1.1 加载装置原理及理论仿真分析

脉冲电流激发电磁声发射现象需要短时,高密度的电流脉冲,文中选用高压大容量电容放电的方式实现工件电流加载,放电电路原理图如图2所示。

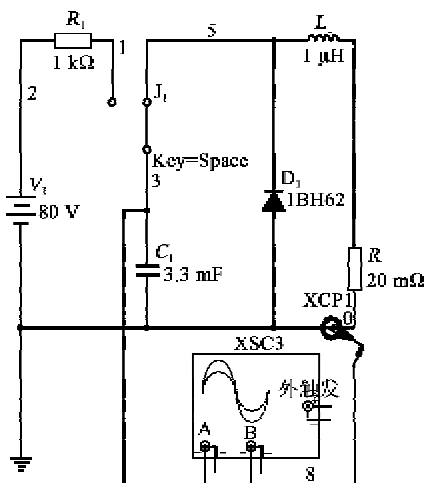


图2 放电电路原理图

图2中左侧为电容充电电路,电阻 R_1 为限流电阻,保证充电电流不至于过大,防止元器件损毁。脉冲电容充放电的过程实质是一RLC电路响应分析,其中 C_1 为3300 μ F高压电容, R 为回路电阻,实验中为0.02 Ω ,回路电感约1 μ H,续流二极管是为了

防止反向电压过大损毁电容。实验中的回路电阻极小,满足 $R < 2\sqrt{L/C}$,是一次阻尼放电过程,放电过程中回路电流为

$$i = \frac{U}{\omega L} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin(\omega t) \quad (2)$$

式中: $\omega = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$, R 为放电回路电阻; U 为电容充电电压。

欠阻尼放电电路中,由于电感的影响,放电回路的峰值电流并不等于 U/R ,而是小于该值,从式(2)可知,当 $t = \arctan(2L\omega/R)/\omega$,电流出现最大值,利用该方法对放电回路的峰值电流进行计算。

利用Multisim对电路放电过程进行仿真。充电电压80V,回路电阻0.02 Ω ,回路分布电感1 μ H的放电仿真曲线如图3所示。由图可知,放电时间持续约115 μ s,电流最大值约2606A。

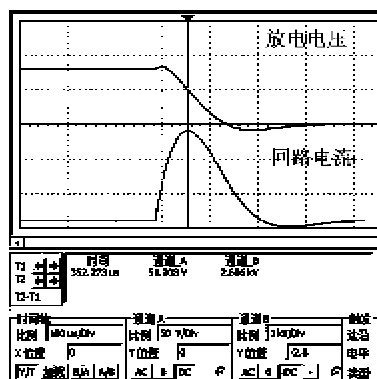


图3 电容放电仿真曲线

2.1.2 加载装置实测放电特性

根据电路仿真的结果,搭建实际电路,电容为3300 μ F,放电过程的通断由继电器控制,充电电压80V时的放电曲线如图4所示,实测回路电阻为0.02 Ω ,电流持续时间约110 μ s,回路中总电流峰值估算为2579.2A,由于金属管裂纹两侧都能绕流形成回路,放电电路相当于并联分流,单一裂纹处的峰值电流约为回路峰值电流的一半,即1289.6A。

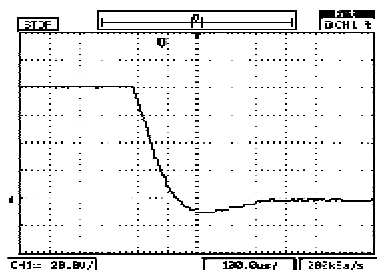


图4 80V时的放电电压曲线

对比图4和图3可知,实际电路的放电时间、电压峰值及反向感应电压变化规律都基本一致,说明实际电路在放电性能上满足预先要求。

2.2 试验试件及采集设备

实验中试件钢管的外径为 $\varnothing 27$ mm,壁厚3 mm,其中试件1钢管完好无损,试件2通过弯曲加工出裂纹。实验测试设备为4通道声发射采集仪一台,采样频率3 MHz,16位A/D,声华R15型声发射传感器,前置放大器40 dB,实验设备及试件如图5所示。



图5 实验设备及试件

3 实验结果及分析

在试件1、2上分别进行脉冲放电,放电电压从20 V开始每次增加10 V,最大放电电压为120 V,共11组。

首先对试件1、2的信号进行频域分析,鉴别是否有声发射现象发生,大量的金属材料的实验表明,其声发射信号的频率范围为100~550 kHz,这个频带范围内包含了声发射物理过程的主要信号成分及能量^[6]。

对于无裂纹的试件1来讲,不同放电电压下的信号功率谱主要频率成分基本一致,100 kHz以上的范围几乎无信号,但都存在一个约50 kHz的低频电磁激发声发射干扰噪声信号,该噪声主要是由电磁加载过程中电极与金属试件间的电动力作用引起,部分加载电压下的信号功率谱如图6所示,从图中可看出,随着加载放电电压的不同,信号功率谱主要频率成分集中在50 kHz以下,信号的主要成分为电磁加载噪声,此时无声发射现象发生。

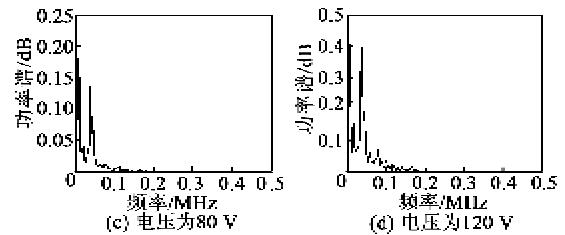
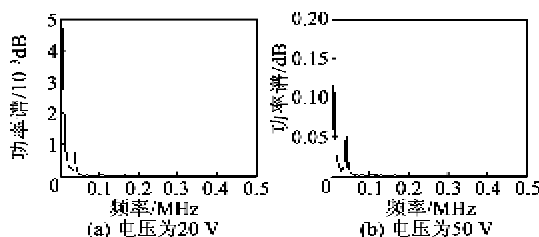


图6 试件1电磁声发射信号功率谱

对试件2所采集的信号进行频域分析可发现,放电电压达到60 V以后,信号频谱在100 kHz以上的频率分量开始占主要成分,100 kHz以上信号的强度明显大于低频噪声信号,部分加载电压下的信号功率谱如图7所示。

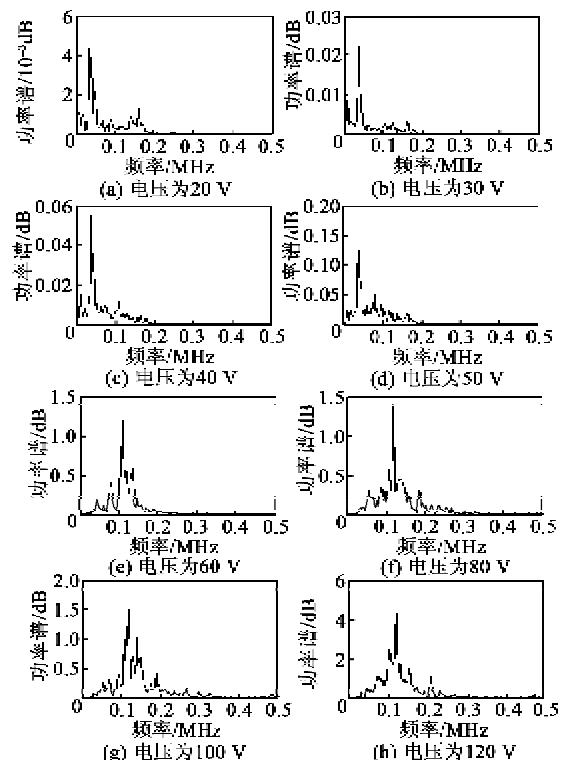


图7 试件2电磁声发射信号功率谱

由图7可知,试件2的功率谱主要集中在0~100 Hz和100~200 Hz两个范围内,计算试件2各个放电电压下两个频带范围内的平均功率,以表征在该频带内信号分量的强度(见图8),同时在图中绘制出不同加载情况下的峰值电流变化情况。100~200 kHz范围内的曲线为声发射信号,0~100 kHz范围内的曲线为电磁加载噪声。由图8可知,100~200 kHz范围内的曲线在60 V电压出现明显增大,此时的放电峰值电流为879.5 A,随着放电电压的增大,该频带内的信号分量强度逐步增加,可知当脉冲放电的峰值电流大于879.5 A时,则可

在金属管中激发出声发射信号。 $0\sim 100\text{ kHz}$ 范围内的电磁噪声信号在整个放电过程中虽然也逐步增大,但当试件2产生明显声发射现象时,电磁噪声强度远小于声发射信号强度,说明此时声发射信号占主要成分且易从频域进行识别。

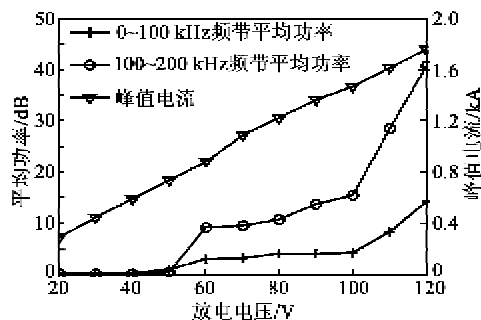


图8 分频带内信号平均功率及峰值电流

4 结论

1) 试件1无裂纹,当通过大电流时信号功率谱仅有低于 50 kHz 的频率分量,且信号强度微弱,由于金属材料的声发射信号频率范围为 $100\sim 550\text{ kHz}$,说明采集到的信号不是声发射信号,是电磁加载噪声,主要由电极与试件间的电动力作用引起,此时试件1中没有发生声发射现象。

2) 试件2有裂纹,当放电电压低于 60 V 时不能激发声发射现象,当放电电压大于 60 V 时可激发声发射现象。 60 V 时裂纹尖端峰值电流 879.5 A ,说明当加载电流大于 879.5 A 时会激发声发射信号,且随着加载峰值电流的增大,声发射信号强度逐步增强,该过程同时伴有电磁加载噪声的增强,但噪声信号强度相比声发射信号强度非常微弱,并不会

对声发射现象的识别判断带来影响。

3) 电磁声发射技术解决了传统声发射检测需要整体加载的问题,为声发射检测提供了一种辅助加载手段,并且易于实现特定区域的裂纹检测。

参考文献:

- [1] 孙立瑛,李一博,王伟魁,等. 突发型声发射信号的传播特性及定位研究[J]. 压电与声光, 2009, 31(5): 745-748.
SUN Liying, LI Yibo, WANG Weikui, et al. Research on propagation characteristics and location of burst acoustic emission signal traveling along pipeline[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, 31(5): 745-748.
- [2] 成建国,毛汉领,黄振峰,等. 金属材料声发射信号特征提取方法[J]. 声学技术, 2008, 27(3): 309-312.
CHENG Jianguo, MAO Hanling, HUANG Zhenfeng, et al. AE signal feature extraction method of metal materials[J]. Technical Acoustic, 2008, 27(3): 309-312.
- [3] 伍蒋军,黄振峰,毛汉领. 金属拉丝声发射信号特征分析[J]. 浙江工业大学学报, 2011, 29(3): 301-303.
WU Jiangjun, HUANG Zhenfeng, MAO Hanling. The feature analysis for acoustic emission signal of metal strength[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2011, 29(3): 301-303.
- [4] 刘素贞,杨庆新,金亮,等. 电磁声发射技术在无损检测中的应用研究[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 23-27.
LIU Suzhen, YANG Qingxin, JIN Liang, et al. Application of electromagnetic acoustic emission technology in non-destructive testing[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 23-27.
- [5] GONG Z, NYBORG E O, OOMMEN G. Acoustic emission monitoring of steel railroad bridges[J]. Materials Evaluation, 1992, 50(6): 883-887.

(上接第559页)

- [9] ROUNDY S, WRIGHT P K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics[J]. Smart Materials and Structures, 2004, 13: 1131-1142.
- [10] 张福学,王丽坤. 现代压电学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [11] 于慧慧,温志渝,温中泉,等. 宽频带微型压电式振动发电机的设计[J]. 传感技术学报, 2010, 23(5): 643-646.
YU Huihui, WEN Zhiyu, WEN Zhongquan, et al. The

design of piezoelectric vibration based generator with wide bandwidth[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(5): 643-646.

- [12] 黄国平. 基于压电复合材料的振动能量捕获关键技术研究[D]. 江西: 江西理工大学, 2011.
- [13] RICHARDS, ANDERSON, BAHR. Efficiency of energy conversion for devices containing a piezoelectric component[J]. Journal of Micromechanics and Micro-engineering, 2004, 14: 717-72.