

# 装甲车辆扭杆裂纹的声发射检测

李爱民, 张耀辉

(北京市丰台区杜家坎 21 号院技术保障工程系, 北京 100072)

**摘要:**采用常规的无损检测手段检测装甲车辆悬挂系统扭杆裂纹损伤比较困难。为了方便地检测扭力轴上的裂纹缺陷,提出了利用声发射技术在扭杆加载状态下,检测裂纹损伤的方法。为此基于虚拟仪器的原理,采用便携式工控机、高速数据采集卡、高灵敏传感器、手动液压加载装置构建了扭杆检测硬件系统,并编制了专用的检测定位软件。通过实际应用试验,成功地检测到了被测装备扭杆上的损伤。通过对比分析可得,基于声发射技术的动态检测方法是解决扭杆裂纹静态检测的有效办法。

**关键词:**声发射检测;扭杆;裂纹;监测

中图分类号:TJ810.6;TG115.28 文献标识码:A 文章编号:1000-6656(2007)09-0529-03

## Detecting of Torsion Bar Crack of the Armored Vehicle Based on Acoustic Emission Technique

LI Ai-min, ZHANG Yao-hui

(Department of Technical Support Engineering, 21 Dujiakan, Fengtai District, Beijing 100072, China)

**Abstract:** It is very difficult to detect the crack of torsion bar of armored vehicles suspension system by ordinary nondestructive testing method. In order to detect the crack damage of torsion bar expediently, the method for crack detecting by AE technique under loading condition was given. Based on the principle of virtual instrument, a detecting hardware system was built, using the devices, such as portable industrial control computer, data acquisition card, high sensitive sensors and manual hydraulic loading device. Also, appropriate detecting and locating software system were programmed. The studying process and the nondestructive detecting system built for this study were summarized and analyzed. The crack of torsion bar tested was detected successfully in the experiment on real equipment. And the following result can be found out: the dynamic detecting method based on AE technique is an effectual method to solve the problem that is difficult to detect crack damage of torsion bar under static condition.

**Keywords:** Acoustic emission testing; Torsion bar; Crack; Monitoring

装甲车辆悬挂系统的作用基于扭杆的扭转变形特性,而装甲车辆在越野行驶过程中的动态载荷的变化非常大,扭杆将反复承受很大的交变应力,在扭杆的某一位置因疲劳易产生非常小的微观裂纹(即疲劳源)。疲劳源的产生和扩展是在工作过程中,在静态时使用常规方法无法对尺寸过小的裂纹进行检测。为了实时监测扭杆裂纹的发展变化,准确预测

断裂损伤的发生时机,笔者采用声发射技术动态监测扭杆裂纹的产生及扩展情况。

### 1 声发射技术的特点

扭杆在内部或外部产生微观裂纹或发生裂纹扩展时,会在疲劳源释放应力,从而产生弹性应力波的传递,即声发射现象。声发射技术有如下特点:

(1) 整体性 无需对各缺陷位置进行逐一检测,而是通过布置在构件(或整体结构)外部若干 AE 传感器对所覆盖区域内任一位置的缺陷信号进

收稿日期:2007-03-14

作者简介:李爱民(1970-),男,副教授,主要从事装备维修理论与技术方面的教学与科研工作。

行检测,便于在无法准确知道裂纹损伤位置时实施监测。

(2) 动态实时性 无需拆卸分解零部件即可检测,AE技术能实时监测到裂纹及故障现象并能监测到裂纹产生、扩展及断裂的动态过程。

(3) 精度高 AE技术理论上讲不存在最小缺陷的限制,严格来讲在裂纹产生的塑性屈服阶段都可以检测到。

## 2 扭杆裂纹的声发射检测

### 2.1 声发射法的定位原理

声发射法的定位原理是根据缺陷位置(声发射源)在加载过程中产生损伤扩展时发射声信号的传递特性。当声发射信号沿扭杆向两侧传递时,利用其传递的时间差与信号的传递速度两个主要参数进行计算,即可计算出缺陷的位置。在扭杆系统中进行缺陷定位,理论上可以做得非常精确,但在实际上,系统的误差、声发射信号复杂的传递过程以及硬件检测系统的灵敏度等因素会使定位精度受到影响。扭杆裂纹的声发射检测定位原理如图1所示。

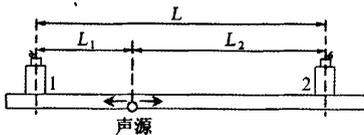


图1 声发射源定位原理

声发射源位置的计算公式为:

$$L_1 = \frac{L}{2} - (t_2 - t_1)v \quad (1)$$

$$L_2 = \frac{L}{2} + (t_2 - t_1)v \quad (2)$$

式中  $t_1$  和  $t_2$  为声信号传递至第1,2传感器的时间,  $v$  为声信号在零件中传递的平均速度。

### 2.2 声发射检测定位系统

设计研制了扭杆损伤声发射检测软硬件系统。其中 AE1~AE5 五个声发射传感器,另有一个压力传感器用于测试动态加载过程中施加在被测系统上的力。各传感器信号分别经过独立的前置放大器、滤波器和检波器,再经由多路高速同步数据采集卡,将模拟信号转换成数字信号送入便携式工控计算机,进行分析处理,计算出可能的缺陷位置。

经过测试和仿真,前置电路和检测系统核心模块的实际指标为:通频带为  $119 \pm 8$  kHz;增益为 33 dB;衰减为大于每倍频程 24 dB;采样频率为 100 kHz;采

样精度为 12 位;系统数据采集实际贯通率为 1 000 ksp/s;采样幅值综合误差为  $\pm 0.5$  LSB(least significant bit);输入阻抗为 100 k $\Omega$ ;采样间隔误差为 200 ns。实物检测系统如图2所示。

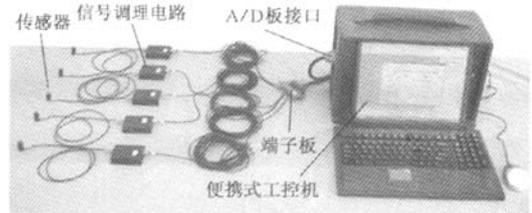


图2 检测系统外观图

### 2.3 应力波传递速度的测定及分析

声发射信号在不同材料中传递的速度不同,所以需要确定信号在扭杆中传递的实际速度。

#### 2.3.1 理论计算法

采用材料的机械物理特性公式计算材料声速。固体介质中声发射传播分为横波与纵波,纵波波速  $v_l$  与横波波速  $v_t$  的理论计算公式为<sup>[1]</sup>:

$$v_l = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (3)$$

$$v_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} \quad (4)$$

式中  $E$ ——杨氏弹性模量, N/m<sup>2</sup>;

$\mu$ ——泊松比;

$\rho$ ——固体密度, N/m<sup>3</sup>。

除存在纵波和横波外,在零件上传播的还有表面波。横波波速是纵波波速的 60%,表面波波速是横波波速的 90%左右。在此只考虑声波被传感器接收到的最先时刻,不考虑声波类型及是否叠加,因此简化了系统的硬件设计和信号分析处理过程。

由材料手册可查得扭杆的  $E=200 \times 10^9$  N/m<sup>2</sup>,  $\mu=0.3$ ,  $\rho=7.8 \times 10^3$  N/m<sup>3</sup>。将此三个参数代入式(3)和(4)中,得  $v_l=5\ 875$  m/s,  $v_t=3\ 140$  m/s。

#### 2.3.2 实验测定法

实验测定法是通过组建硬件测试系统,实际测试声波在系统中的传播速度(图3)。该方法针对性强、准确度高,但受测试系统精度的影响。设  $\Delta t$  为两传感器接收到信号的时间差,得其计算公式为:

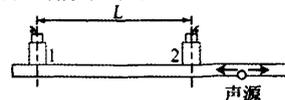


图3 扭杆中声波传递速度测定示意图

$$v = \frac{L}{\Delta t} \quad (5)$$

实际测试中,用折断铅笔芯作为模拟声发射源,采样频率为 100 kHz,实测数据见表 1。测试系统的激励信号以横波为主,根据实测数据计算出的在扭杆中声速平均值为 3 388 m/s。与理论计算值的误差约为 7%。

表 1 不同间距测得的扭杆中声速

间距 L /mm	第 1 次实验		第 2 次实验		第 3 次实验	
	时差 / $\mu\text{s}$	速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	时差 / $\mu\text{s}$	速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	时差 / $\mu\text{s}$	速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
500	140	357.1	120	4167	160	3125
	140	357.1	140	3571	130	3846
	170	294.1	170	2941	130	3846
1 000	280	3571	290	3448	350	2857
	320	3125	290	3448	280	3571
	290	3448	300	3333	310	3226
1 500	490	3061	420	3571	430	3488
	450	3333	430	3488	450	3333
	470	3191	500	3000	440	3409

#### 2.4 实车检测实验

在实验室进行模拟实验的基础上,在某部水陆坦克实车上对悬挂系统进行了动态声发射检测。检测系统组成见图 4,检测记录见表 2。



图 4 实车实验

根据检测系统定位结果,在缺陷位置向左和向右各 20 mm 的范围内清除扭杆表面涂漆并清洗,然后使用微磁裂纹检测仪进行验证,发现在报告的缺陷位置向花键一侧 112 mm 处存在实际微裂纹,折算加载力为 1.7 t。这一位置符合扭杆裂纹损伤的统计经验,结果可以采信。实验证明,该检测系统现场使用方便,可以在大修和中修过程中对装甲车辆悬挂系统进行动态无损检测。

表 2 实车动态声发射检测记录

悬挂单元编号	缺陷数 /个	缺陷位置	裂纹检测仪验证结果	虚警 /次
左 1	0	—	—	0
左 2	0	—	—	0
左 3	0	—	—	0
左 4	0	—	—	0
左 5	0	—	—	0
左 6	0	—	—	0
右 1	2	距右花键根 100 mm	同向 112 mm	0
右 2	0	—	—	0
右 3	0	—	—	0
右 4	0	—	—	0
右 5	0	—	—	0
右 6	0	—	—	0

### 3 影响定位精度和准确性的因素分析

误差在测试系统中不可避免的,对于装甲车辆悬挂系统扭杆中缺陷的检测,影响因素很多,如:

(1) 采样频率 当采样频率过低时,由于每次采样的间隔时间过长,将不能准确地捕捉到声发射信号触发检测系统的第一个信号,采样间隔时间越长,精度将越低。因此测试用的数据采集卡不仅要求具有同步采集功能,还要确保其最小的采集频率不低于 100 kHz。

(2) 测试部分的电气特性 为提高整个系统检测的灵敏度和定位精度,系统采用多传感器和独立前置滤波电路的设计方法。这样虽然避免了数据相互干扰的问题,但各传感器、前置器及滤波器的灵敏度和频响是否一致将影响各通道数据是否能真实再现声音信号的原始状态。

(3) 系统中存在的干扰 存在于测试系统供电回路中的干扰脉冲会在系统中形成误触发。误触发信号一旦被采集到,就会出现数据分析与缺陷定位的错误。另外,扭杆在加载过程中,各零件连接的界面以及扭杆内部扭转时出现的随机噪声也有影响,当系统中的噪声信号超过阈值时,形成的脉冲同样会影响数据采集真实性。

(4) 传感器的使用精度 理论上,传感器接收声信号的点应在传感器贴合面的正中心,其偏差对定位精度有一定影响;另外,传感器在被测试扭杆上

(下转第 534 页)

$v'$ ——受腐蚀混凝土的超声声速;  
 $v$ ——混凝土的初始超声声速。

对式(2)两侧取对数,得:

$$\ln \frac{f'_c}{f_c} = \ln(A) + B \ln \frac{v'}{v} \quad (3)$$

令  $y = \ln \frac{f'_c}{f_c}, a = \ln(A)$

$$b = B, x = \ln \frac{v'}{v} \quad (4)$$

则有:  $y = a + bx \quad (5)$

按式(5)进行拟合分析(图2和图3),结果为:

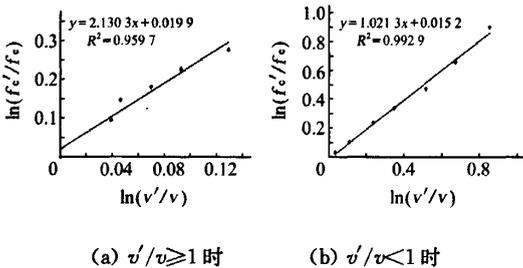


图2 硫酸钠溶液中受腐蚀混凝土强度与超声声速的关系

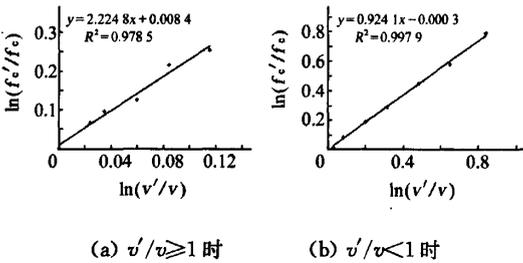


图3 硫酸镁溶液中受腐蚀混凝土强度与超声声速的关系

在  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  中:

$$\begin{cases} y = 2.1303x + 0.0199 & \frac{v'}{v} \geq 1 \\ y = 1.0213x + 0.0152 & 0 < \frac{v'}{v} < 1 \end{cases} \quad (6)$$

在  $\text{MgSO}_4$  中:

$$\begin{cases} y = 2.2248x + 0.0084 & \frac{v'}{v} \geq 1 \\ y = 0.9241x - 0.0003 & 0 < \frac{v'}{v} < 1 \end{cases} \quad (7)$$

按式(4)换算后得受腐蚀混凝土抗压强度与超声声速的关系为:

在  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  中:

$$\begin{cases} \frac{f'_c}{f_c} = \left(\frac{v'}{v}\right)^{2.1303} & \frac{v'}{v} \geq 1 \\ \frac{f'_c}{f_c} = \left(\frac{v'}{v}\right)^{1.0213} & \frac{v'}{v} < 1 \end{cases} \quad (8)$$

在  $\text{MgSO}_4$  中:

$$\begin{cases} \frac{f'_c}{f_c} = \left(\frac{v'}{v}\right)^{2.2248} & \frac{v'}{v} \geq 1 \\ \frac{f'_c}{f_c} = \left(\frac{v'}{v}\right)^{0.9241} & \frac{v'}{v} < 1 \end{cases} \quad (9)$$

### 3 结论与建议

(1) 超声波在不同腐蚀程度的混凝土中的传播速度是不同的。由检测数据知,在腐蚀的初期,超声声速有所增加,随着腐蚀的进行,超声声速最终是下降的。

(2) 超声波在受腐蚀混凝土内的传播速度与受腐蚀混凝土的抗压强度具有一定的回归关系,仍可用  $f_{cu} = Av^B$  的曲线形式进行拟合;在实验基础上,建立了超声声速与受腐蚀混凝土强度之间的函数关系,为用超声波法无损检测受腐蚀混凝土强度提供数学依据。

(3) 不同硫酸盐侵蚀环境下(硫酸钠或硫酸镁)混凝土的强度变化规律是不同的。

(4) 超声波法测定受腐蚀混凝土强度是一种简便而有效的方法,若能与其他方法(如回弹法)综合运用,将会取得更好的效果。

#### 参考文献:

[1] 《新编混凝土无损检测技术》编写组. 新编混凝土无损检测技术[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.  
 [2] 国家建筑工程质量监督检验中心. 混凝土无损检测技术[M]. 北京:中国建材工业出版社,1996.



(上接第531页)

的安放位置精度直接影响各传感器的间距,在计算声信号传递的时间距离差时,会影响其计算精度,造成最终的检测误差。

根据声发射技术的原理,结合扭杆裂纹检测的需求进行的实际测试和应用表明,声发射技术能够有效地用于装甲车辆扭杆裂纹损伤的检测,技术上可行,效果比较明显,具有一定的应用价值。

#### 参考文献:

[1] 廖财楚,吴克成,顾柏良,等. 声弹性方法测量金属材料塑性损伤[J]. 实验力学,1997,12(3):364-369.

## 装甲车辆扭杆裂纹的声发射检测

作者: [李爱民](#), [张耀辉](#), [LI Ai-min](#), [ZHANG Yao-hui](#)  
作者单位: [北京市丰台区杜家坎21号院技术保障工程系, 北京, 100072](#)  
刊名: [无损检测](#) [ISTIC](#) [PKU](#)  
英文刊名: [NONDESTRUCTIVE TESTING](#)  
年, 卷(期): 2007, 29(9)  
引用次数: 0次

### 参考文献(1条)

1. [廖财楚](#), [吴克成](#), [顾柏良](#) [声弹性方法测量金属材料的塑性损伤](#) 1997(03)

### 相似文献(0条)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wsjc200709011.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wsjc200709011.aspx)

下载时间: 2010年5月27日