

基于声发射技术的 CFRP 钢管混凝土 受弯破坏过程

张力伟¹, 赵颖华¹, 江阿兰²

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 大连 116026;

2. 大连交通大学 土木与安全工程学院, 大连 116028)

摘要:研究了 CFRP 钢管混凝土在弯曲荷载作用下的破坏过程及声发射变化规律。结果显示, 整个破坏过程可分为弹性段、弹塑性段、下降段和软化段四个阶段, 而声发射参数变化及波形特征与试件破坏过程表现出较好的对应关系。证明了利用声发射技术能有效地监测 CFRP 钢管混凝土弯曲过程损伤程度和破坏历程。

关键词:声发射检测; CFRP 钢管混凝土; 弯曲荷载; 破坏过程

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2011)02-0027-04

AE Based Damage Study on Concrete Filled CFRP-Steel Tube Under Bending Load

ZHANG Li-Wei¹, ZHAO Ying-Hua¹, JIANG A-Lan²

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. Civil and Safety Engineering College, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: The damage process and acoustic emission (AE) characteristic of concrete filled CFRP-steel tubular members under bending load was investigated. The results indicated that the loading process could be divided into four stages including elastic, elastic-plastic, descending and softening stages, and AE parameters and waveforms were showed to explain this process properly. The damage degree and the destroy course of concrete filled CFRP-steel tubular members under bending load can be supervised efficiently through AE technology.

Keywords: Concrete filled CFRP-steel tube; Bending load; Acoustic emission; Damage process

CFRP 钢管混凝土是在钢管混凝土结构^[1]和 FRP 筒混凝土结构^[2-4]基础上发展起来的一种新型结构形式。通过在钢管内浇注混凝土、管外粘贴 CFRP(碳纤维增强聚合物)片材,使得 CFRP、钢管和混凝土三种材料的性能优势得以充分发挥,既提高了钢管混凝土结构的强度和刚度,又弥补了 FRP 筒内填混凝土结构延性不足的问题,同时具有很好的经济性能和易于施工的特点。从 2003 年沈阳建筑大学最早提出这种构想并进行研究开始^[5],很多专家和学者在这方面做了大量工作,取得了显著的

成果^[6-9]。但是,由于 CFRP 钢管混凝土的结构复杂性及损伤不可观测性,导致此类结构的安全监测比较困难,需要做深入研究。

声发射技术作为一种新型无损检测方法,具有实时监测、操作简单等优点,近年来在材料性能评价和结构损伤检测方面得到广泛应用。笔者利用声发射技术研究 CFRP-钢管混凝土结构在弯曲条件下的受力特点和破坏过程,拟为这种构件在弯曲荷载作用下损伤过程监测提供一种有效的方法。

1 声发射技术简介

声发射是指材料在外力作用下产生变形和断裂,以声波的形式释放能量的一种物理现象^[10]。这种应力波传播到材料表面作为表面振动可被传感器接收,然后经过信号放大、模数转换和特征提取,对

收稿日期: 2010-04-16

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20080431133)

作者简介: 张力伟(1982—),男,博士研究生,主要从事混凝土结构分析和损伤检测方面的研究。

声发射源特征作出分析和研究,进而推断出材料或结构内部缺陷的位置、大小和变化趋势。图 1 是典型声发射波形及参数示意图。每采集一次波形定义为一次撞击;波形中超过阈值电压的脉冲数称为振铃计数;而声发射能量是指波形包络线对时间的积分。当一个源波形经过传播,先后被一组传感器接收,便可以根据到达时间的差异来进行源定位,称为一个声发射事件。声发射波形分析、参数分析及源定位是声发射技术研究的主要内容。

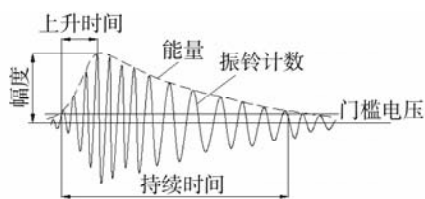


图 1 声发射参数示意图

2 试验介绍

2.1 材料和试件

试验试件总长度为 1 400 mm, 支点跨度 1 200 mm。内部混凝土为 C60 的高强混凝土, 钢管采用 120 mm×120 mm×3 mm 标准型钢。钢管表面粘贴两层 CFRP, 内层纤维方向为纵向, 外层纤维为环向。试件横截面形式如图 2 所示。纤维采用的是日本 TORAY T70012 K 碳纤维编织的单向布, 主要技术性能为: 单丝拉伸强度 4 900 MPa, 弹性模量 230 GPa, 拉断伸长率约 2%, 纤维布单位重量 300 g/m², 厚度 $t=0.167$ mm。采用由辽宁省建设科学研究院研制生产的 JGN-C 和 JGN-P 建筑结构粘合剂作为粘浸胶和底胶。试件具体制作过程和制作工艺及混凝土配合比可参考文献[11]。

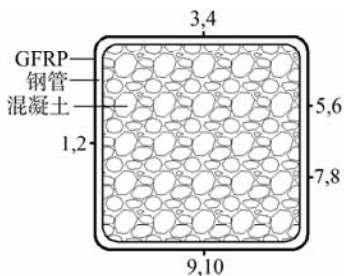


图 2 试件截面形式及应变片布置

2.2 试验方法

试验在沈阳建筑大学结构工程实验室完成。图 3 为试验加载装置示意图。加载方法为手动加载, 荷载单调增加至试件破坏失去承载能力, 每次加载后保持 2~3 min 以便观察试验现象。应变片沿跨

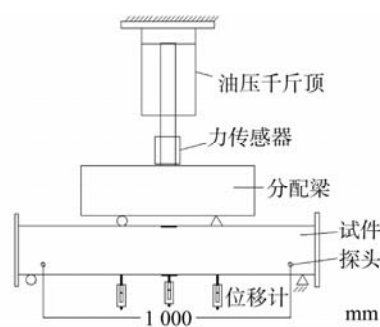


图 3 试验加载装置示意图

中截面圆周方向粘贴在钢管表面, 如图 2 所示, 其中 1,3,5,7 和 9 测环向应变, 2,4,6,8 和 10 测量纵向应变。声发射设备采用美国 PAC 公司 PCI-2 型声发射系统, 传感器对称布置在试件相应的位置, 如图 3 所示。传感器与试件接触面须平整, 使用真空绝缘脂将两者粘合在一起, 然后用胶带将其固定。根据实验室环境条件, 设置阈值 45 dB, 前置放大器和主放大器增益均为 40 dB。加载过程中荷载、应变和声发射数据均为实时采集, 中间不间断。

3 试验结果与分析

3.1 荷载分析

图 4 表示荷载随跨中挠度变化的关系曲线。由图可见, 整个受载过程可分为四个阶段: AB 弹性阶段, BC 弹塑性阶段, CD 下降阶段, DE 软化阶段。其中屈服荷载为 200 kN, 约为极限荷载的 75%。文献[9]指出, CFRP 钢管混凝土受弯构件出现明显的下降段是由于纵向纤维的断裂失效所致。由试验过程中现场观察也可证实, 当试件接近极限荷载时, 试件底部 CFRP 布发生大面积断裂和剥落, 因此造成了试件承载能力的迅速降低, 出现了明显的下降段。

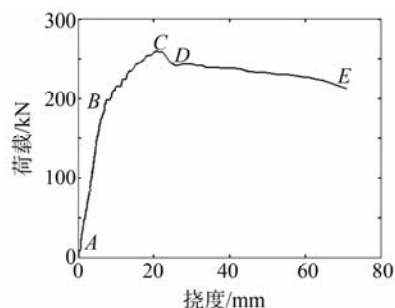


图 4 荷载与跨中挠度关系曲线

图 5 是加载过程中试件跨中荷载-应变曲线, 其中应变 3,4 和 10 为相应的应变片数值, 分别表示受压区环向、纵向应变及受拉区纵向应变。图中显示, 应变 10 在荷载达 150 kN 后开始迅速增大, 但由于

此时 CFRP 约束作用较强,整个构件尚处于弹性阶段。200 kN 以后跨中受拉区应变迅速增加到约 20 000 $\mu\epsilon$ ($\mu\epsilon$ 表示微应变,即 $10^{-6} \epsilon$),即达到了 CFRP 内纤维的拉断伸长率,这也证实了受拉区 CFRP 是在 200 kN 至构件极限荷载之间发生断裂。而受压区应变的变化则完全不同,即试件进入下降段以后应变才由 10 000 $\mu\epsilon$ 迅速增加到 20 000 $\mu\epsilon$,说明受压区 CFRP 断裂发生在极限荷载之后,这是因为极限荷载后受拉区纵向变形较大,造成受压区有效受压面积减小,受压区混凝土迅速被压碎膨胀,从而使得受压区钢管发生向外鼓屈,外侧 CFRP 被拉断。与此同时,应变 4 则迅速由受压转变为受拉。

3.2 声发射参数分析

由前面分析可知,当试件达到极限荷载时,受拉区 CFRP 已完全断裂失效,钢管处于屈服软化阶段,不仅试件的承载力急剧下降,而且试件的跨中挠度与跨度之比超过 2%,构件失去安全使用性能。因此有必要在试件达到极限荷载之前对其损伤程度进行有效监测,以实现安全预警的目的。

图 6 表示荷载、声发射撞击率随加载时间的变化关系。图中左纵坐标表示声发射撞击率,右纵坐标则为荷载变化值。由图可见,在弹性阶段早期,即荷载达 120 kN 之前,撞击率随着荷载的增加逐渐增大,这说明试件从一开始就产生较多损伤。这个时期钢管和碳纤维还处在弹性变形范围内,因此损伤信号主要是由于变形能力较小的混凝土受拉开裂

所致。弹性阶段后期,由于混凝土受拉开裂已基本完成,声发射信号有所减少。200 kN 之后,声发射撞击率迅速增大,持载阶段撞击率也较高,说明荷载超过 200 kN 以后,即便荷载保持不变,也会有较多的损伤产生,这是钢管发生屈服变形并造成部分纤维丝开始断裂的结果。

图 7 表示试件在达到极限荷载之前声发射释能率随荷载变化趋势图。由图可以看出,200 kN 以前,试件损伤信号蕴含的能量微弱;荷载达到 200 kN 左右时,能量明显增大;220 kN 以后,出现第二次阶跃,其增长幅度远高于第一次,并在荷载接近极限荷载时增加至最大值。因此可以看出,声发射撞击率和释能率均能够形象地表示构件在不同加载阶段受力大小和损伤程度。

3.3 声发射信号波形分析

图 8 显示的是从荷载-挠度曲线(图 4)的 AB 段和 BC 段,即弹性和弹塑性段,提取的典型声发射信号的波形和功率谱。由图 8(a)和(b)可见,在弹性阶段,由于信号主要是由变形能力较小的混凝土开裂引起的,声发射信号幅值相对较小,峰值频率在 20~50 kHz 范围内。而弹塑性阶段,图 8(c)和(d)声发射信号主要是 CFRP 的损伤断裂所致,声发射信号幅值有很大程度提高,功率谱也表现出明显不同,信号具有更多的高频分量。因此,利用声发射信号在波形和功率谱图方面的变化规律,可以鉴别出构件的损伤类别。

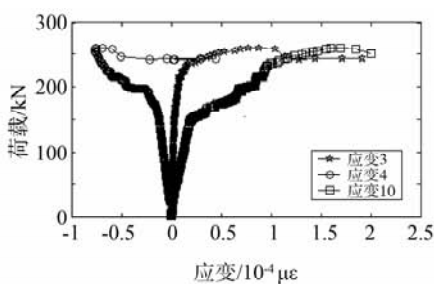


图 5 荷载-应变关系曲线

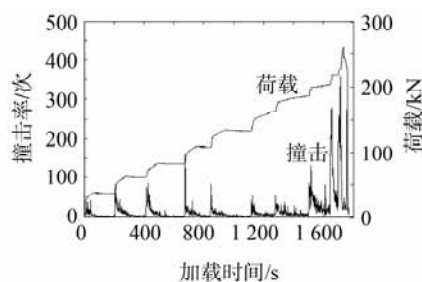


图 6 声发射撞击率与荷载的关系

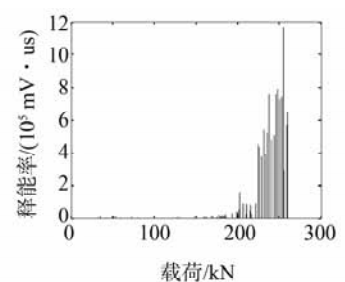
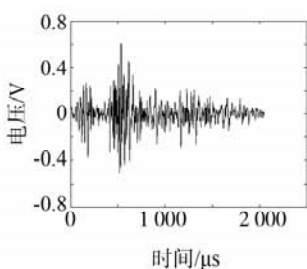
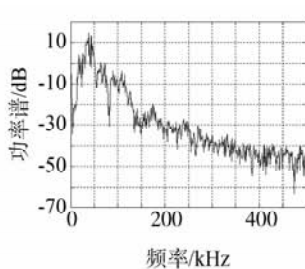


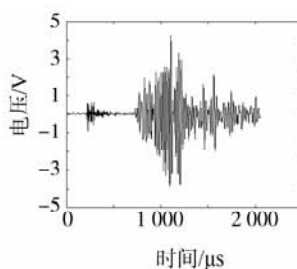
图 7 声发射释能率与荷载关系



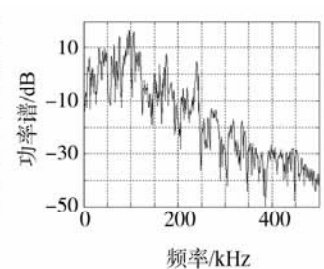
(a) AB 段信号时间-电压



(b) AB 段信号频率-功率谱



(c) BC 段信号时间-电压



(d) BC 段信号频率-功率谱

图 8 AB 段和 BC 段声发射信号波形及功率谱

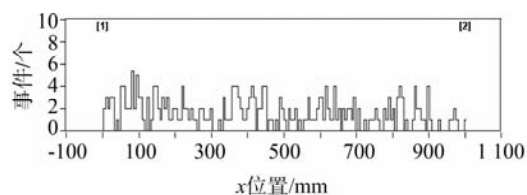
3.4 声发射定位分析

声发射技术的另一应用是材料和结构的损伤源定位,定位方法分为线性定位、平面定位和立体定位。由于试验采用的试件属于细长构件,因此选择线性定位的方法基本可以满足实际应用。线性定位需要用两个传感器来形成传感器组,定位原理可用下式表示:

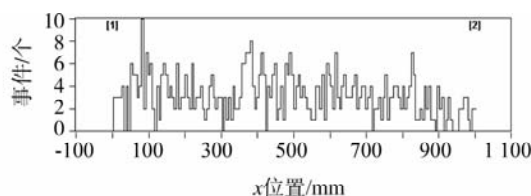
$$\Delta d = \Delta t \cdot v = 2x - 1000$$

式中 Δt 为信号到达时间差,由声发射仪记录, v 为声发射信号在构件中的传播速度,由断铅试验测得, x 表示损伤源与一端传感器之间的距离。

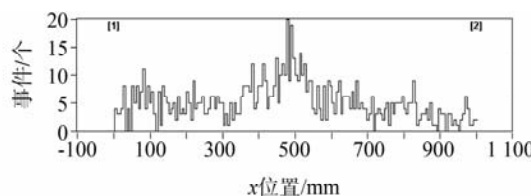
图 9 表示构件在极限荷载 30%,50%,60%和 90%时的声发射源定位图,横轴表示声发射源位置,纵轴表示声发射定位事件的累积。由图可以看出,在极限荷载 50%之前,声发射定位基本呈均匀分布;极限荷载 60%后,声发射定位才开始出现集中趋势。这主要是因为试件的跨度较小,在极限荷载



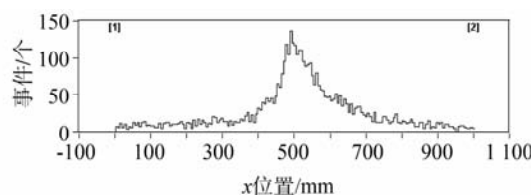
(a) 30%极限载荷时



(b) 50%极限载荷时



(c) 60%极限载荷时



(d) 90%极限载荷时

图 9 声发射损伤定位

50%之前,受拉区拉应力分布较均匀,混凝土开裂沿试件长度方向分布也比较均匀;而极限荷载 60%,即 150 kN 之后,跨中纯弯曲段应力集中加剧,跨中损伤明显增多,因此可以看到声发射定位事件逐渐向跨中集中。加载至极限荷载 90%时,跨中损伤事件的累积量是两端支点处的 15 倍,说明此时跨中破坏程度已非常严重。由此可见,声发射损伤定位随着荷载的变化表现出不同的特征,可以用于监测构件在不同时期所承受的荷载大小及损伤集中程度。

4 结论

(1) CFRP 钢管混凝土纯弯曲破坏过程可分为弹性阶段、弹塑性阶段、下降阶段和软化阶段。其中 CFRP 的断裂发生在弹塑性阶段,之后试件承载力出现突降并迅速软化失效。

(2) 利用声发射信号撞击和能量参数能有效区分弹性阶段和弹塑性阶段。弹性阶段主要为混凝土开裂损伤,能量值很低,撞击率呈先增大后减小趋势;而在弹塑性阶段由于 CFRP 的破坏,声发射撞击率和能量值都较高。

(3) 弹性阶段声发射信号的幅值较小,信号频率在 20~50 kHz;进入弹塑性阶段以后,信号的幅值有较大程度提高,同时信号具有较多的高频分量。

(4) 极限荷载 50%以前,试件受弯矩影响较小,声发射损伤定位分布较均匀;极限荷载 60%以后,声发射定位才开始逐渐有向跨中纯弯段集中。这说明声发射定位不仅能反映试件的损伤位置,还能反映出构件所受荷载的大小和损伤程度。

参考文献:

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] Samaan M, Mirmiran A. Model of concrete confined fiber composite[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1998, 124(9): 1025—1031.
- [3] Amir Z F, Sami H R. Confinement model for axially loaded concrete confined by circular FRP tubes[J]. Structure Journal, 2001, 98(4): 451—461.
- [4] 于清. FRP 约束混凝土柱研究与应用中的若干关键问题[J]. 工业建筑, 2001, 31(4): 1—4.
- [5] 王庆利, 赵颖华. 碳纤维-钢管混凝土结构的研究设想[J]. 吉林大学学报(工学版), 2003, 33(8): 352—355.
- [6] 王庆利, 赵颖华, 顾威. 圆截面 CFRP-钢复合管混凝土结构的研究[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 2003, 19(4): 272—274.

(下转第 61 页)

用时域信号的均值、峰值、方差、上升时间、下降时间和能量等进行考察。试验表明,不同性质、不同形状及尺寸的缺陷所产生的回波信号,在能量、峰值和波形持续时间(上升时间与下降时间之和)上有所变化,但有时并不明显。通过 Fourier 变换将信号映射到频域内来提取特征量,经过对幅值谱、相位谱和功率谱等的考察,发现变化明显的特征量,以此进行成像缺陷判别^[4]。

主要功能有测量参数设置、传感器拟合标定、数据采集读取及保存,报表生成及历史记录查询等功能。

软件完成了数据的读取和处理,得到试验的最终结果。它将试验结果通过计算机和打印机等设备呈现出来,更利于试验者对试验结果做出判断。此部分要实现的功能有:报表显示检测数据;自动建立检测结果数据库;提供对检测结果数据的搜索、查询和统计等功能;报表、曲线的打印功能。

数据分析处理软件的参数设置包括测量人员、时间日期、路段区域和磨损超限值,设置完毕后开始读取数据采集,采集回来的数据应该是在 0~5 V 之间,若不在 0~5 V 之间的数据就应该剔除不用,显示磨损量的数值。读取结束后对采集的数据进行处理,存储采集数据,可显示打印本次测量的结果报表,可查询这段钢轨的检测、磨损状况以及使用寿命等。

在数据采集中,由于操作不当或外界干扰,或仪器的临时故障等原因,有时会出现异常数据,即所谓异点。异点的存在会影响分析结果,必须加以剔除。

在软件的设计中,为了增强系统的稳定性、可靠性和易操作性,特为用户提供了良好的人机界面。利用虚拟仪器技术开发此系统,不仅可以很方便地实现复杂的数据处理功能,而且用户界面具有美观、交互性和个性化等特点;其模块化的设计,大大方便了程序的修改和维护^[4]。

6 试验结果与分析

试验样品为布纤复合材料,其厚度为 40 mm;缺陷直径为 $\phi 1$ mm 的横孔,距离水与试样界面 10 mm;检测方式采用脉冲式反射法;采用点聚焦探头(2.5 MHz),其焦距为 20 mm 焦点直径 1 mm,焦柱长度 3 mm。图 2 为采用自行研制的 C 扫描成像系统对玻纤材料检测得到的结果。图中左边为缺陷处,所得图形与实际情况相符,以此可以判断缺陷的大小和位置。

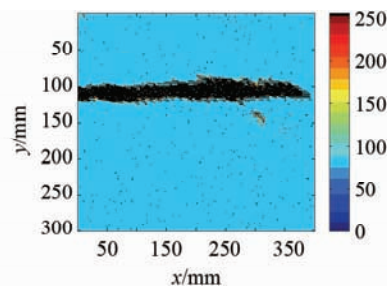


图 2 C 扫描图像

7 结论

通过精密扫描获得的扫描图像,可以较好地分析和了解材料中缺陷分布和密度情况。该技术具有较小的缺陷检测能力,不仅能够在厚度较薄的材料中检测出直径为 $\phi 1$ mm 的气孔,而且对夹渣也能够较为准确地检测。

参考文献:

- [1] 西拉德 J, 主编. 超声检测新技术[M]. 陈积懋, 余南廷, 译. 北京: 科学出版社, 1991: 471.
- [2] 陈以方, 骆巍, 陈玉宝, 等. 复合材料的特征扫描成像检测[J]. 无损检测, 2001, 23(10): 427—431.
- [3] 刘松平, 郭恩明, 张谦琳, 等. 复合材料深度方向 C 扫描检测技术[J]. 无损检测, 2001, 23(1): 13—15.
- [4] 王浩全, 曾光宇, 韩焱. 玻纤复合材料超声 C 扫描检测研究[J]. 兵工学报, 2005, 26(4): 570—572.

(上接第 30 页)

- [7] 陶忠, 庄金平, 于清. FRP 约束钢管混凝土轴压构件力学性能研究. 工业建筑, 2005, 35(9): 20—23.
- [8] 王庆利, 张永丹, 谢广鹏, 等. 圆截面 CFRP-钢管混凝土柱的偏压实验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005, 21(5): 425—428.
- [9] 王庆利, 姜桂兰, 高铁夫. CFRP 增强圆钢管混凝土受

弯构件试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2006, 22(2): 224—227.

- [10] 袁振明, 马羽宽, 何泽云. 声发射技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [11] 叶茂. 方截面 CFRP-钢管混凝土受弯性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学土木工程学院, 2009.