

# 基于声发射技术的起重机箱型梁疲劳数据分析

田乾乾<sup>1</sup>, 骆红云<sup>2,3</sup>, 石多奇<sup>1</sup>, 康从杰<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100091)

(2. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100091)

(3. 北京航空航天大学 生物医学工程高级创新中心, 北京 100091)

**摘要:** 基于声发射技术监测起重机箱型梁疲劳裂纹的扩展, 对比 Q235B 标准试样和箱型梁在疲劳试验中的声发射累积计数/幅值 *vs.* 循环周次曲线、声发射累积计数/裂纹扩展速率 *vs.* 应力强度因子幅曲线和声发射信号频谱特征。结果表明: 箱型梁和标准试样的声发射累积计数/幅值 *vs.* 循环周次曲线均呈现基本相似的特征。频谱分析显示, 虽然箱型梁和标准试样的声发射累积计数曲线在第二、三阶段产生的主要信号的峰值频率分布范围不尽相同, 但是在相应两阶段产生的主要信号的类型(第二阶段 2 种信号、第三阶段 1 种信号)、相应频谱的峰数(第二阶段出现单峰和双峰, 第三阶段出现多峰)以及两个阶段频谱峰数之间的变化(第三阶段频谱峰数均多于第二阶段)均相似, 说明两者的疲劳机制存在着诸多相似之处。因此, 一定程度上, 能够通过标准试样的疲劳机制来映射箱型梁的疲劳机制, 并为大型构件的设计与应用提供指导。

**关键词:** 箱型梁; 标准试样; 疲劳损伤; 声发射技术; 频谱分析

**中图分类号:** TH215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2020)05-0373-06

## Fatigue Data Analysis of Crane Box Beam Based on Acoustic Emission Technique

TIAN Qianqian<sup>1</sup>, LUO Hongyun<sup>2,3</sup>, SHI Duoqi<sup>1</sup>, KANG Congjie<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100091, China)

(2. School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100091, China)

(3. Beijing Advanced Innovation Centre for Biomedical Engineering, Beihang University, Beijing 100091, China)

**Abstract:** In this paper, acoustic emission technique is used to monitor the fatigue crack growth behavior of crane box beam. Acoustic emission (AE) cumulative count/amplitude *vs.* cycle times, cumulative count/crack growth rate *vs.* stress intensity factor amplitude and AE signal spectrum characteristics of Q235B standard sample and crane box beam are compared. The results show that AE cumulative count/amplitude *vs.* cycle times curves of the box beam and the standard sample display similar characteristics. Spectrum analysis shows that although the corresponding peak frequency distribution range of the main signals generated in the second and third stages of AE cumulative count/amplitude *vs.* cycles times curve is not the same relatively, the types of main signals generated in the two stages (two kinds of signals in the second stage and one kind of signals in the third stage), the number of peaks of the corresponding spectrum (single peak and bimodal peaks in the second stage and multiple peaks in the third stage) and the change between the spectral peaks of the two stages (the number of spectral peaks in the third stage is more than that of the second stage) are consistent, which indicate that there are many similarities in the fatigue mechanism between them. Therefore, to a certain extent, the fatigue mechanism of crane box beam could be mapped through the fatigue mechanism of the standard sample, which provides guidance for the design and application of large workpieces.

**Key words:** box beam; standard sample; fatigue damage; acoustic emission technique; spectrum analysis

收稿日期: 2019-06-30 修回日期: 2019-10-25

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFF0203305); 国家科技支撑计划资助项目(2015BAF06B01)

第一作者: 田乾乾, 男, 1989 年生, 博士研究生,

Email: t1413021@163.com

通讯作者: 骆红云, 女, 1970 年生, 教授, 博士生导师,

Email: luo7128@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201906044

## 1 前言

Q235B 钢具有优良的综合性能, 与异种金属材料可以较好地配合, 因此广泛应用于建筑、船舶、桥梁、机械等领域。其构件在服役期间长期受到交变载荷的作用, 强度和刚度等性能可能下降。为了保障设备的安全性和可靠性, 对大型构件在服役期间的损伤监测是必不可少的。

声发射技术作为一种高效的无损检测方法,已经被广泛地应用于金属<sup>[1]</sup>、混凝土<sup>[2]</sup>以及人工骨<sup>[3]</sup>等材料的监测,其中对金属材料疲劳裂纹扩展的实时在线监测是它的一项重要应用。Harris 等在对钢和铝合金的疲劳研究中发现,在相当低的疲劳裂纹扩展速率( $2.5 \times 10^{-8}$  m/cycle)下,均可以检测出声发射信号<sup>[4]</sup>。

Q235B 碳素钢的屈服强度和抗拉强度虽然低于 Q345B,但其成本相对较低,利于大范围的应用。此外,本研究依托于国家科技支撑计划资助项目“桥式起重机械轻量化共性技术研究”(2015BAF06B01),试验的对象是 Q235B 起重机主梁。该主梁采用了新的结构工艺——箱型结构,与常规桥式起重机主梁相比,其重量得到大幅度的减轻,在满足工程需要的同时,也缩减了经济成本。在交变载荷下, Q235B 标准试样的声发射特征及其微观损伤机制已为人所知。然而,大型构件(箱型梁)在交变载荷下表现出的声发射特征与标准试样有何不同?能否参照标准试样来判别箱型梁的损伤程度?这些问题都还有待于研究。

## 2 实验

### 2.1 实验材料

实验所选用的材料是 16 mm 厚的 Q235B 热轧钢板。钢板具体成分如表 1 所示,其组织是典型的铁素体和珠光体共存,如图 1a 所示。在三点弯曲疲劳试验时,在试样中间位置的压头可能产生加载噪音,影响实验结果,因此实验采用四点弯曲疲劳。实验所用的具有单边缺口的试样是参照《GB/T 6398—2000 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》<sup>[5]</sup>设计的。标准四点弯板试样尺寸和箱型梁疲劳试验示意图分别如图 1b 和 1c 所示。在试样中心位置的凹槽和缺口是通过线切割方法制备。

表 1 Q235B 钢的组成成分(w/%)  
Table 1 Composition of Q235B steels

C	Mn	Si	P	S
0.20	0.40	0.15	0.03	0.04

### 2.2 实验仪器及实验方法

室温下,在 Instron8801 液压疲劳试验机上对标准试样进行疲劳加载。载荷为正弦循环载荷,加载频率为  $f=8$  Hz,应力比为  $R=0.1$ 。为了保证循环周次不在低周疲劳范围内,把最大载荷设定为 20 kN。至少准备 3 个标准试样。通过引伸计测量裂纹尖端张开位移(CTOD)并根据柔度法计算疲劳裂纹长度,精确度达到 0.01 mm,然后由疲劳裂纹长度计算出应力强度因子幅  $\Delta K$ 。

采用正弦循环载荷对 Q235B 箱型梁进行加载,加载频率  $f=2$  Hz,应力比  $R=0.1$ ,平均载荷是 50 kN,最大

载荷是 55 kN,且加载周期位于高周疲劳范围内。

声发射信号的监测和疲劳试验同时进行。在监测期间均采用线性定位,利用凡士林耦合剂将传感器紧贴在标准试样和箱型梁的表面,具体的位置分别如图 1b 和 1c 所示,并固定,以保证传感器和被测试物件的表面有良好接触。详细的操作参照国标《GB/T 32544—2016 桥式与门式起重机金属结构声发射检测及结果评定方法》<sup>[7]</sup>。

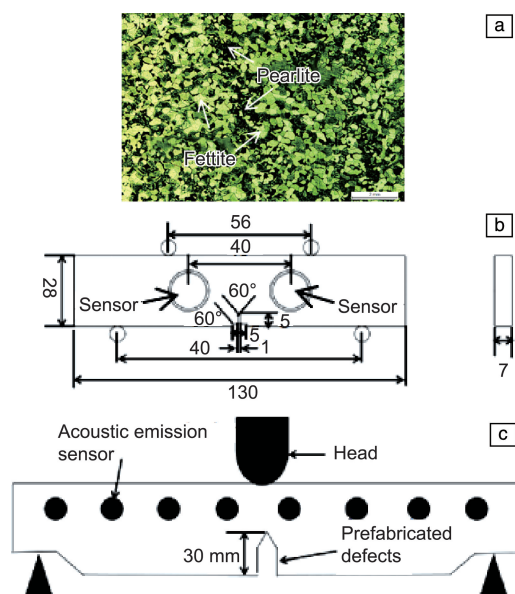


图 1 Q235B 钢热轧态金相照片(a),标准四点弯板试样尺寸(b)<sup>[6]</sup>,箱型梁疲劳试验示意图(c)

Fig. 1 Metallograph of hot rolled Q235B steel (a), standard four-point bending plate sample diagram (b)<sup>[6]</sup>, schematic diagram of fatigue test for box beam (c)

本研究中采用的声发射信号检测设备是由美国 Physical Acoustic Corporation (PAC) 公司研发的 AEwin v2.19 系统。声发射信号检测设备的硬件参数为:采样频率 1 MHz,峰值定义时间(PDT)300  $\mu$ s,撞击定义时间(HDT)600  $\mu$ s,撞击锁定时间(HLT)1000  $\mu$ s。根据实践经验以及国标的建议,把前置放大器设置为 40 dB。实验中采用的传感器均是频率范围为 100~400 kHz 的窄频传感器 R15a,能量门槛为 1 V $\cdot\mu$ s。

## 3 结果与讨论

### 3.1 疲劳裂纹扩展速率

根据断裂力学理论,疲劳试验时材料的应力强度因子幅  $\Delta K$  是疲劳裂纹扩展速率  $da/dN$  的决定性因素。 $da/dN$  与  $\Delta K$  之间的关系可以通过 Paris-Erdogan 公式来描述<sup>[8]</sup>,如公式(1):

$$\frac{da}{dN} = u\Delta K^v \text{ 或 } \log\left(\frac{da}{dN}\right) = \log u + v\log\Delta K \quad (1)$$

其中, 对于特定的材料和测试条件,  $u$ ,  $v$  是常数。对于钢材料,  $v$  大约在 2~4 之间。

由于 Q235B 箱型梁属于非标准试样, 所以不能根据国标《GB/T 6398—2000 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》中的方法来求解  $\Delta K$ 。本研究中使用公式 (2) 近似求解 Q235B 箱型梁的  $\Delta K$ <sup>[9]</sup>:

$$\Delta K = S_r \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

其中  $\Delta K$  为应力强度因子幅,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;  $S_r$  为裂纹处的应力幅, 近似取 140 MPa;  $a$  为裂纹长度, m。

根据公式 (1), 对  $da/dN$  和  $\Delta K$  取对数并线性拟合, 如图 2 所示。在对数坐标下 Q235B 标准试样和箱型梁的  $da/dN$  vs.  $\Delta K$  均基本呈线性关系。通过取对数线性拟合得到两者的 Paris 常数及指数分别是 -9.83013, 3.96776; -9.89197, 3.84817。其中  $v$  值均在 2~4 之间, 符合钢材料的  $v$  值。

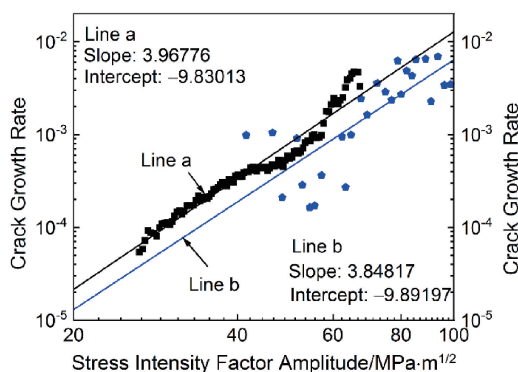


图2 在对数坐标下裂纹扩展速率与应力强度因子幅的关系曲线: (a) 标准试样, (b) 箱型梁

Fig. 2 Relationship curve between crack growth rate and stress intensity factor amplitude in logarithmic coordinates: (a) standard sample, (b) box beam

### 3.2 声发射特征

对于多数材料, 疲劳断裂过程中声发射信号累积数变化呈现出 3 个阶段<sup>[6]</sup>。图 3 中, 标准试样的声发射累积计数曲线的第一阶段, 声发射信号计数在短时间内迅速增加, 且幅值相对较高, 最高幅值达到 60 dB 左右。对于箱型梁, 可能是预制缺陷的影响, 导致其声发射累积计数曲线提前进入第二阶段。Han 等<sup>[10]</sup>的研究表明第一阶段主要和裂纹的萌生有关。在实验初始阶段, 由于材料内部裂纹源的形成和缺口尖端的强烈塑性变形都会产生大量的声发射信号, 使得声发射计数在短时间内迅速增加。此外, Shi 等<sup>[6]</sup>提出在实验的初始阶段, 压头处的摩擦噪音可能依然存在, 并增加第一阶段出现的声发射信号量。标准试样的声发射累积计数曲线的第二阶段占据了其疲劳寿命的大部分时间, 箱型梁的声发射累积

计数曲线的第二阶段相对于标准试样的却较短。然而, 两种试样在此期间的计数率均保持基本恒定, 幅值分别集中在 50 和 75 dB 以下, 都相对较低, 原因是在第二阶段只有较少量的微弱事件, 声发射信号主要来自于裂纹的慢速或稳定扩展<sup>[3]</sup>。在第三阶段, 由于疲劳裂纹快速或失稳扩展<sup>[1]</sup>, 导致材料瞬间断裂, 能量快速释放, 产生的高幅值信号量相对较多, 标准试样和箱型梁的声发射累积计数曲线幅值分别达到了 85 和 95 dB 左右。此外, 箱型梁的声发射累积计数曲线的第三阶段占据的时间比标准试样长, 且裂纹扩展速率相对较慢。这可能是因为箱式梁尺寸过于庞大, 其疲劳裂纹不是沿着同一个方向进行扩展, 导致箱型梁进入疲劳裂纹失稳扩展阶段, 其能量释放更快, 裂纹扩展速率小于裂纹沿单一方向扩展的标准试样<sup>[9]</sup>。

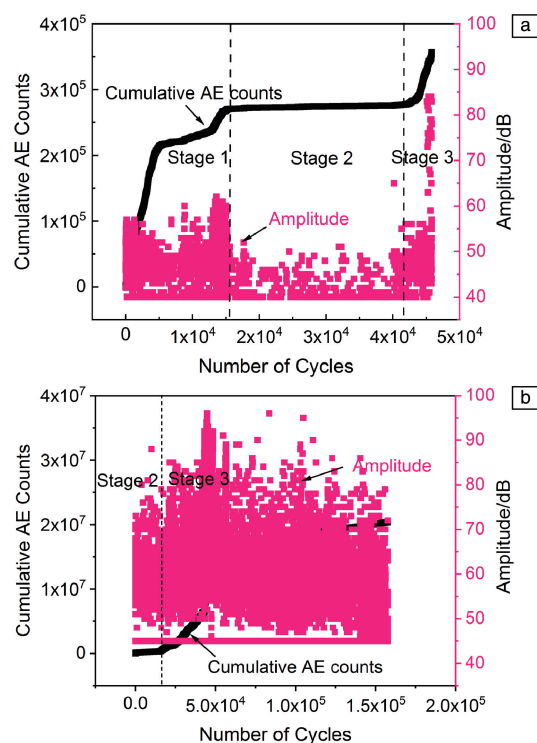


图3 声发射累积计数/幅值-循环周次的关系: (a) 标准试样, (b) 箱型梁

Fig. 3 Relation of acoustic emission cumulative count/amplitude vs. cycles: (a) standard sample, (b) box beam

在线弹性断裂力学中, 根据  $da/dN$ - $\Delta K$  曲线 (Paris 曲线) 斜率的明显转变将疲劳裂纹扩展分为稳定扩展和失稳扩展两个阶段。而声发射累积计数曲线的第二阶段向第三阶段的转变也可以被认为是声发射源机制发生了转变, 即由塑性区的塑性活动转变为微孔洞微裂纹间韧带的撕裂<sup>[6]</sup>。图 4 为标准试样以及箱型梁的声发射累积计数- $\Delta K$  曲线和 Paris 曲线。标准试样的声发射累积计数曲线

在  $\Delta K = 47 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  附近发生第二阶段向第三阶段的转变, 此刻 Paris 曲线显示仍然保持基本恒定的裂纹扩展速率, 直至  $\Delta K = 55 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , 裂纹扩展速率才明显增加, 如 4a 所示。箱型梁的声发射累积计数曲线在  $\Delta K = 45 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  时发生第二阶段向第三阶段的转变, 直至  $\Delta K = 55 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , 裂纹扩展速率显著增加, 如图 4b 所示。以上均显示了标准试样和箱型梁声发射累积计数曲线第二阶段向第三阶段的转变先于 Paris 曲线中的转变, 说明声发射技术能够在试件的裂纹扩展转变为失稳扩展前进行安全预警。

### 3.3 声发射信号分析

为了研究材料在疲劳断裂过程中的潜在损伤机制, 利用双谱估计方法, 将声发射信号波形中携带的与损伤有关的信息从噪声、干扰信号、混杂信号等中分离出来, 进而进行研究。本研究针对声发射累积计数曲线第二、第三阶段的信号进行研究, 并对其进行了频谱分析, 结果如图 5 和图 6 所示。在标准试样的声发射累积计数曲线的第二阶段, 主要出现两种不同波形的信号, 如图 5a 和 5b。图 5a 显示的信号为连续型信号, 对应的频谱为单峰分布, 主频位于  $200 \sim 300 \text{ kHz}$ 。图 5b 显示的信号为混

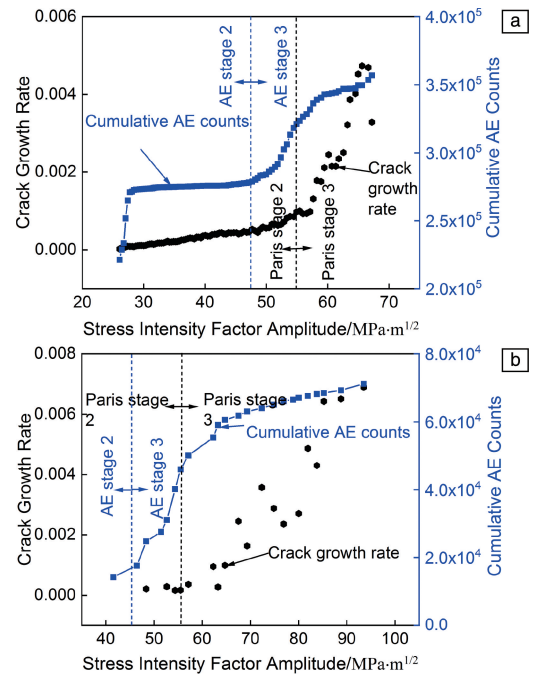


图 4 声发射累积计数- $\Delta K$  曲线和 Paris 曲线阶段转变的比较: (a) 标准试样, (b) 箱型梁

Fig. 4 Comparison of transformation of acoustic emission cumulative count vs.  $\Delta K$  curve and Paris curve: (a) standard sample, (b) box beam

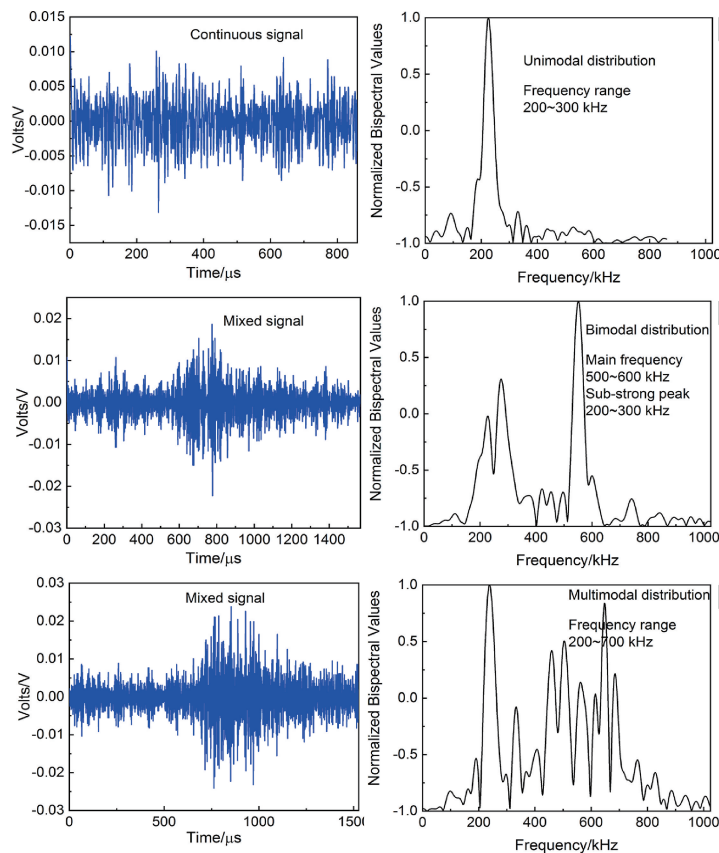


图 5 标准试样声发射信号波形图 (左) 和归一化双谱图 (右)

Fig. 5 The waveform figures of the acoustic emission signals of standard sample (left), and the normalized bispectra of the corresponding signals (right)



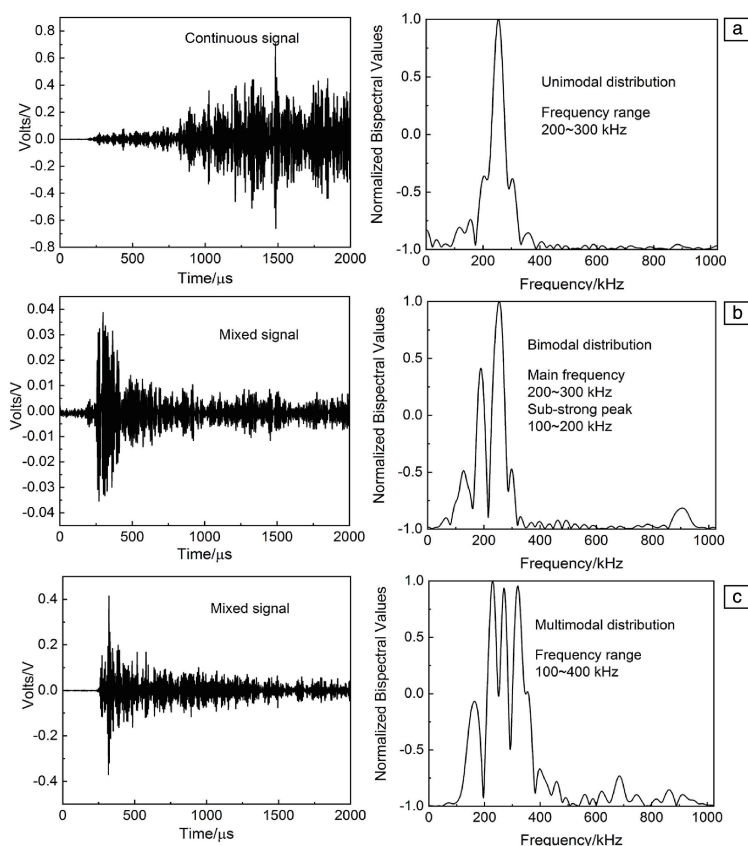


图6 箱型梁声发射信号波形图(左)和归一化双谱图(右)

Fig. 6 The waveform figures of the acoustic emission signals of box beam (left), and the normalized bispectra of the corresponding signals (right)

合型信号, 可以看作是由突发型信号和连续型信号混合而成, 呈现出多峰分布, 对应的主频在 500~600 kHz 之间, 次强峰位于 200~300 kHz 之间。而第三阶段出现的主要信号只有一种波形, 如图 5c 所示。图 5c 显示的信号是混合型信号, 多峰分布, 但是峰数却远多于图 5b, 在频率 200~700 kHz 范围均有分布。箱型梁的声发射累积计数曲线的第二阶段, 产生的主要信号有两种, 如图 6a 和 6b 所示。图 6a 显示的信号近似为连续型的, 对应的频谱为单峰分布, 频率值在 200~300 kHz 之间; 图 6b 显示的信号为混合型信号, 对应的频谱为多峰分布, 主频也分布在 200~300 kHz, 此外, 在 100~200 kHz 之间还存在一个次强峰。而第三阶段产生的主要信号也为一种混合信号, 如图 6c 所示, 对应的频谱呈现为多峰分布, 在频率为 100~400 kHz 范围之间都有分布, 且其主峰的频率在 200 kHz 左右。

在标准试样的声发射累积计数曲线的第一阶段, 由于是加载初期, 缺口尖端以及夹头处发生强烈塑性变形, 此时可动位错较少; 随着加载时间的延长, 位错大量增殖, 可动位错数量增加, 微裂纹聚合成为宏观裂纹, 产生大量的声发射信号。进一步提高应力, 位错缠结交割

等相互作用加剧, 使得可动位错数目迅速减少, 位错的运动速度和自由度降低, 进入裂纹稳定扩展阶段, 即第二阶段。该阶段的声发射信号量减少, 能量减弱, 裂纹增长单位长度所产生的声发射计数也相对降低<sup>[11]</sup>。在第三阶段, 由于裂纹的扩展, 使得裂纹尖端的韧带宽度过小, 此时已不属于线弹性断裂力学的范畴, 裂纹扩展机理发生变化, 即裂纹尖端出现了一定程度的屈服, 位错运动加剧, 产生大量的声发射信号<sup>[11]</sup>, 材料颈缩、断裂, 能量迅速被释放。

比较标准试样和箱型梁的声发射信号双谱分析结果, 发现二者有诸多相似之处。在第二阶段, 均出现两种不同波形的信号, 第三阶段均产生了一种混合型的信号。虽然相应两个阶段对应信号的损伤频率的峰分布区间不尽相同, 但是两个阶段的频谱特征相同, 即第二阶段都有一种是单峰分布(连续型信号), 另一种是双峰分布(混合型信号), 第三阶段均是多峰分布(混合型信号), 且第三阶段出现的信号所对应的损伤频率峰均多于第二阶段。因此, 一定程度上, 可以根据标准试样的疲劳损伤机制来映射箱型梁的, 进而预测箱型梁这种大型工件的损伤程度, 以降低损失, 保障安全生产。

## 4 结 论

利用声发射技术对标准试样和箱型梁的疲劳加载过程进行定量表征, 并采用双谱估计方法分析两者在疲劳断裂过程中产生的声发射信号, 得到以下结论:

(1) 箱型梁和标准试样的声发射累积计数/幅值 *vs.* 循环周次曲线特征基本一致, 且根据声发射累积计数曲线判定的失稳转变时间早于 Paris 曲线转变点, 因此, 声发射技术也可以用来预测类似箱型梁这种大型构件的损伤程度。

(2) 箱型梁和标准试样的声发射信号频谱分析结果表明, 虽然两者在声发射累积计数曲线第二、三阶段产生的主要信号的峰值频率分布范围不尽相同, 但是在对应两阶段产生的主要信号的类型(第二阶段 2 种信号, 第三阶段 1 种信号)、相应频谱的峰数(第二阶段出现单峰和双峰, 第三阶段出现多峰)及两阶段频谱峰数之间的变化(第三阶段频谱峰数均多于第二阶段的)相似, 表明它们的疲劳机制之间存在着诸多相似之处。因此, 一定程度上能够通过标准试样的疲劳机制来映射箱型梁的疲劳机制, 为大型构件的设计与应用提供指导。

## 参考文献 References

- [1] KOHN D H, DUCHEYNE P, AWERBUCH J. *Journal of Materials Science*[J], 1992, 27(12): 3133-3142.
- [2] YUYAMA S, LI Z W, YOSHIZAWA M, *et al.* *NDT & E International* [J], 2001, 34(6): 381-387.
- [3] NG E T, QI G. *Engineering Fracture Mechanics*[J], 2001, 68(13): 1477-1492.
- [4] HARRIS D O, DUNEGAN H L. *Experimental Mechanics*[J], 1974, 14(2): 71-81.
- [5] 中国钢标准化技术委员会. 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法: GB/T 6398-2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.  
The Technical Committee on Steel of Standardization Committee of China. Standard Test Method for Fatigue Crack Growth Rates of Metallic Materials: GB/T 6398-2000 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2000.
- [6] 韩志远. 金属结构材料形变及疲劳损伤声发射源微观机制及表征[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2014.  
HAN Z Y. Acoustic Emission Source Mechanisms and Characterization during Deformation and Fatigue Damage Process in Metallic Structural Materials[D]. Beijing: Beihang University, 2014.
- [7] 全国起重机械标准化技术委员会. 桥式与门式起重机金属结构声发射检测及结果评定方法: GB/T 32544-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.  
National Technical Committee for Standardization of Lifting and Transporting Machinery. Acoustic Emission Examination and Evaluation Methods of Steel Structures of Bridge and Gantry Cranes: GB/T 32544-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [8] MORTON T M, SMITH S, HARRINGTON R M. *Experimental Mechanics*[J], 1974, 14(5): 208-213.
- [9] 杨浩宇, 骆红云, 陈国伟, 等. 起重运输机械[J], 2018(1): 67-72.  
YANG H Y, LUO H Y, CHEN G W, *et al.* *Lifting and Transporting Machinery*[J], 2018(1): 67-72.
- [10] HAN Z Y, LUO H Y, CAO J W, *et al.* *Materials Science and Engineering: A*[J], 2011, 528(25/26): 7751-7756.
- [11] 王宏伟. 声发射监测钢的形变与裂纹扩展行为和技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2009.  
WANG H W. Research on Deformation and Crack Growth Behavior and Technology of Steel by Acoustic Emission Monitoring [D]. Beijing: Beihang University, 2009.

(编辑 惠 琼)