

文章编号:1673-5005(2009)05-0095-05

钢制试件拉伸断裂及疲劳开裂声发射特征分析

徐长航¹, 刘立群², 陈国明¹

(1. 中国石油大学 机电工程学院, 山东 东营 257061; 2. 胜利工程设计咨询有限公司, 山东 东营 257026)

摘要:设计钢制试件拉伸断裂和疲劳开裂两种损伤过程的声发射监测试验,对采集到的声发射信号进行参数分析,结合红外热成像检测结果,研究声发射信号特征参数与试验过程中试件力学行为之间的相关性。研究结果表明:拉伸断裂和疲劳开裂过程中试件声发射信号的能量、振铃计数、幅值等声发射信号特征参数能够很好地表征试件损伤过程的力学性能演化规律;试件出现损伤时所发出的声发射信号能量幅值主要分布在 65 ~ 80 dB;声发射技术用于工程结构的健康监测是可行和有效的。

关键词:参数分析;声发射信号;疲劳开裂;拉伸断裂;实时监测

中图分类号:TB 52 **文献标识码:**A

Characteristics analysis of acoustic emission signals from steel specimens under tensile fracture and fatigue crack condition

XU Chang-hang¹, LIU Li-qun², CHEN Guo-ming¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. Shengli Engineering & Consulting Company Limited, Dongying 257026, China)

Abstract: The experiments of acoustic emission (AE) monitoring were designed for several steel specimens. The acquisition parameters of AE signal were analyzed. Based on the results of infrared thermographic images, the relationship between characteristic parameters of AE signal and mechanical behavior of the specimens was investigated. The results show that the characteristic parameters including energy, count and amplitude can be used to represent the dynamic evolution of mechanical behavior of steel specimens, and the energy amplitude range of AE signals is mainly from 65 dB to 80 dB. The AE technique can be useful for health monitoring of engineering structures.

Key words: parametric analysis; acoustic emission signal; fatigue crack; tensile fracture; real-time monitoring

金属材料在塑性变形、快速相变、裂纹萌生、裂纹扩展直至断裂的破坏过程中,部分能量以弹性应力波的形式释放出来,即有声发射(AE)现象发生。AE作为检测材料破坏程度的一种无损检测技术,具有以下特点:①整体性,对于传感器定位覆盖区域,无须进行逐一检测就能得到材料损伤位置;②动态性,AE技术是被动检测,只要材料有损伤正在发生,就能实时监测到该动态过程;③灵敏度高,理论上,能够检测到金属材料晶格滑移等微小变化^[1]。因此,研究声发射技术在大型金属构件上的预警应用具有重要意义。抽油杆材料具有很好的抗疲劳性,

夏永发曾对抽油杆试件疲劳损伤过程进行声发射监测试验^[2],并对未处理的声发射参数图进行分析,从而找到裂纹起始时间和位置。笔者设计抽油杆试件拉伸断裂与疲劳开裂的声发射监测试验,并基于试验数据研究该试件损伤过程中的声发射特征及表征方法,分析AE作为钢制构件损伤的预测预报技术的应用方法。

1 试验装置

声发射监测钢制构件拉伸断裂试验中,加载装置为100 t电子万能材料试验机,负荷加载为80 N/s。

收稿日期:2008-12-05

基金项目:国家“863”高技术研究发展计划项目(2006AA09Z355);国家自然科学基金项目(50679083)

作者简介:徐长航(1976-),男(汉族),山东巨野人,讲师,博士,主要从事海洋油气装备安全监测与评估方面的研究。

疲劳开裂试验中加载装置为 PLG-300C 型微机控制高频疲劳试验机,动载为 20.7 kN,应力比为 0.1,频率为 83.5 Hz。试验过程中采用广州飒特 HY6850 红外热像仪对试件的温度进行实时录像。声发射检测仪器采用美国 PAC 公司的 PCI-2 型 2 通道声发射检测仪,具体配置为:谐振式探头 R15,2/4/6 前置放大器,PCI-2 采集卡。试验时前置放大器门电压值设为 40 dB,采样频率为 1 MHz。选择 6 个钢制试件进行试验(如图 1 所示),材料为 20Cr2MoNi,长 400 mm,带螺纹处直径为 24 mm,光滑处直径为 12 mm;预制两平台($D > 15$ mm)在同一平面内,用于放置声发射传感器;采用线切割的方式在试件上预制裂纹(拉伸试件的裂纹深度为 0.2 mm,疲劳试件裂纹深度为 0.5 mm)。



图 1 钢制试件
Fig. 1 Steel specimen

2 钢制试件拉伸断裂声发射特征

试件材料属于低碳合金钢,具有典型的四阶段拉伸力学性能^[4]:①弹性阶段。发生弹性变形,在外力解除后,变形可完全消失。②屈服阶段。表现为屈服特性,应变有明显增加,应力不变或稍微下降,此阶段有显著的塑性变形。③强化阶段。材料

又恢复了抵抗变形的能力,要使它继续变形必须增加拉力,此阶段试件的横向尺寸明显缩小。④局部变形阶段。试件在某一局部范围内发生缩颈现象,由于缩颈部分横截面积迅速减小,试样继续伸长所需拉力也相应减小,即应力减小,应变增加,直到试件断裂。

屈服阶段为弹性变形和塑性变形的分界阶段,此阶段之前的变形均为弹性变形,之后的变形均为塑性变形,此阶段中则既有弹性变形又有塑性变形,且塑性变形已经非常显著。

2.1 撞击和振铃累积量分析

图 2 为 3 个试件的撞击和振铃累积计数曲线。由图 2 可见,撞击和振铃累积计数随时间变化均存在拐点(380, 538, 675 s),参照拉伸断裂的应力应变曲线,根据拐点可将该试件的拉伸断裂过程分为两个阶段^[5]。

(1)弹性变形阶段。相对整个过程来说,此阶段振铃和撞击累积计数增长十分缓慢。在弹性变形阶段金属材料不产生永久性变形,因此没有声发射信号出现。但是,由于此试件带有裂纹,与光滑无裂纹的试件不同,带裂纹试件在弹性阶段观察到个别声发射是因为试样在普遍屈服之前,裂纹尖端局部区域应力集中已进入了屈服或超过了屈服^[6]。

(2)塑性变形阶段。试件开始进入全面塑性变形阶段,声发射撞击和振铃累积计数迅速增加,一定时间后趋于稳定,直至断裂。

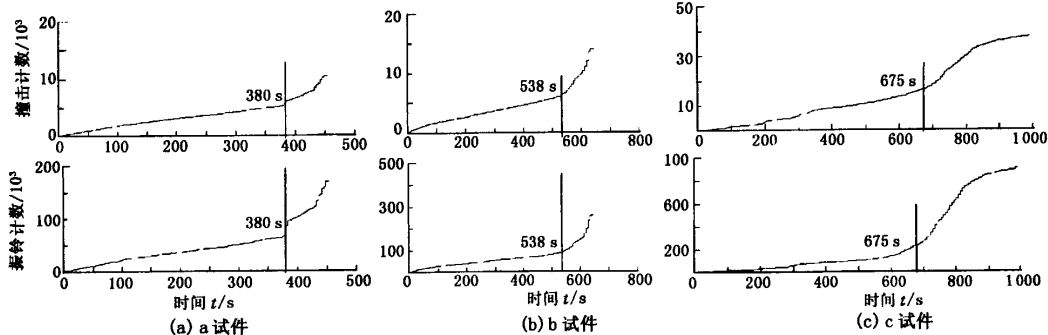


图 2 拉伸试件的撞击和振铃累积计数曲线

Fig. 2 Accumulative number curve of hit and count of tensile specimens

2.2 能量时间历程与振铃时间历程分析

振铃计数及能量计数描述声发射信号特征时,能够较好地反映材料性能变化^[7],因此本试验将振铃次数和能量次数设为声发射特征参数,以 c 试件为例,详细分析能量时间历程和振铃时间历程。图

3 为试验过程中采集的红外热图。可以看出:740 s 时试件局部温度开始明显高于周围温度,说明此处开始应力集中,发生塑性变形;765 s 时试件局部发生缩颈现象,横向尺寸突然缩小;990 s 时试件刚刚断裂,断裂处温度最高,能量最大。

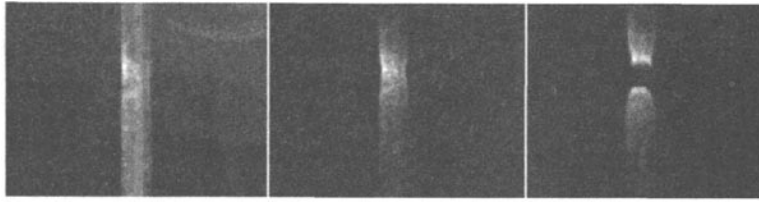


图3 740 s(左),965 s(中)和990 s(右)时的红外热图

Fig.3 IR images at 740 s, 965 s and 990 s

图4为能量与振铃时间历程图。由图中可看出:732 s时声发射能量计数与振铃计数开始明显快速增加,认为732 s为塑性变形显著开始时刻;960 s时振铃数目和能量计数有小幅增加,认为960 s为试件缩颈开始时刻;985.6 s时能量有最大释放,振铃数目也突然增大,此时刻为试件突然断裂时刻。因此,声发射信号与红外热图反映的试件能量变化规律吻合程度较好,进一步验证了声发射信号表征结构损伤的有效性。

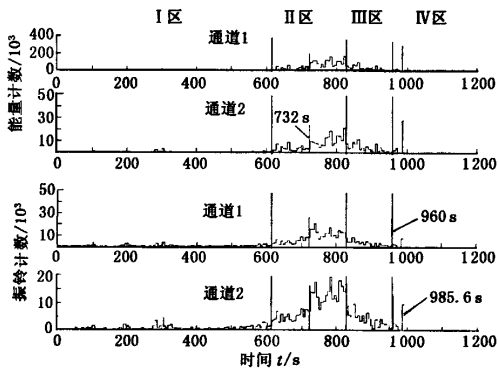


图4 能量与振铃时间历程图

Fig.4 Energy-time history and count-time history

根据低碳钢拉伸断裂力学性能,将该试件拉伸断裂过程分为I,II,III和IV4个区域(图4)。其中I区为试件的弹性阶段,特点是信号能量和振铃计数曲线较为平坦,期间出现少量声发射信号是由于存在试件、夹具的预拉紧等作用造成了裂纹尖端局部应力集中。II区为屈服阶段,此阶段经过很显著的塑性变形,晶格发生较大变化,声发射信号活跃,因此信号能量和振铃计数总体呈上升趋势。III区信号的能量和振铃计数快速减少,属于试件的强化阶段,此阶段试件恢复了抗变形能力,晶格变化困难。IV区为局部变形阶段,此阶段开始时由于发生缩颈现象,信号能量和振铃计数有小幅上升,在最后断裂时刻,由于释放出最大能量,因此振铃数目也陡增。

2.3 幅度特征

不同材料,其拉伸断裂过程的AE信号幅度有

很大差别,一般认为在断裂时刻幅度最大。试验过程中发现,试件拉伸断裂过程中声发射信号幅值主要集中于70~80 dB范围,在最终断裂时有90 dB声发射信号的出现,而且第一次高幅度信号群大约出现在裂纹尖端应力集中并开始塑性变形的时刻(300 s),第二次高幅度信号群则发生在塑性变形显著时期及断裂时刻(屈服阶段)。

3 钢制试件疲劳开裂声发射特征

对a1,b1,c1 3个试件进行了整个疲劳开裂过程的声发射监测,并从能量时间历程、振铃时间历程和幅度分布3方面对声发射信号的特征进行了分析。试验时3个试件的阈值分别设为40,40,53 dB,加载方式为先对试件施加静载荷(0~40 s),然后进入持续动载加载阶段。一般说来,材料发生疲劳破坏时要经过裂纹萌生、裂纹稳定扩展和瞬断3个阶段^[8],但是由于试验机设置了频率降,本次疲劳开裂试件试验过程中裂纹没有经过充分的扩展,而是经历了裂纹萌生阶段和裂纹稳定扩展阶段。

3.1 阈值滤波前能量和振铃时间历程分析

图5为3个试件阈值滤波前声发射能量和振铃时间历程图。从图中可以看出:

(1)阈值对高噪声环境下试验结果有很大影响。图5(a)和(b)由于阈值低,很明显静载时能量和振铃计数与动载时相比几乎为零,足以说明动载过程噪声较大。图5(c)中,静载时与动载时的声发射信号参数相比较,而且最大值有显著降低,说明阈值53对动载噪声有较好的抑制效果。

(2)能量计数总体呈缓慢增加的趋势。由于声发射信号强度与疲劳裂纹扩展速度成正比,因此在疲劳载荷的作用下,试件疲劳裂纹扩展速度是缓慢增加的。能量图有较明显的几个突起,说明由于动载突然增加,金属晶体由原来拉伸状态下的塑性变形转变为某晶格方向的滑移,从而引起部分能量的释放,而振铃计数由于受部分噪声影响,在相应处只有较小变化。

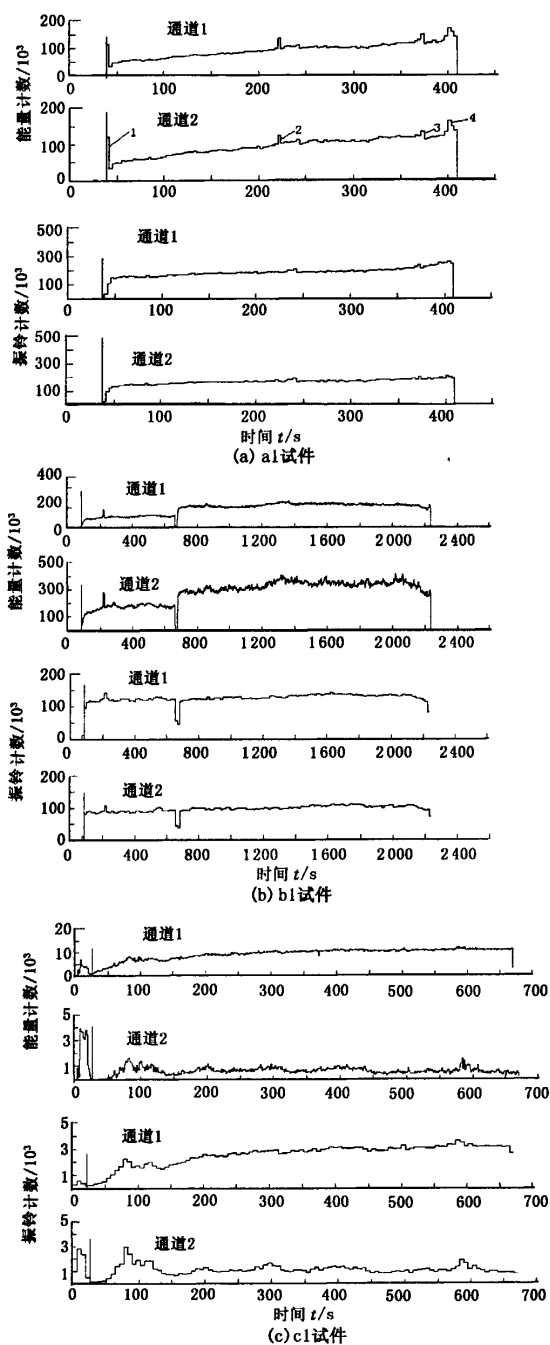


图 5 阈值处理前能量和振铃时间历程图

Fig. 5 Energy-time history and count-time history before setting threshold for three specimens

3.2 阈值滤波后能量和振铃时间历程图分析

高幅度信号或强噪声环境下的检测,声发射阈值选用范围一般为 55 ~ 65 dB^[2]。以 a1 试件为例,重新设定阈值为 55 dB,对疲劳试验数据进行阈值

滤波(图 6)。比较图 5 和图 6 可以看出,阈值滤波处理可以消除大量疲劳试验噪声成分,从而使得声发射信号的特征更加突出。

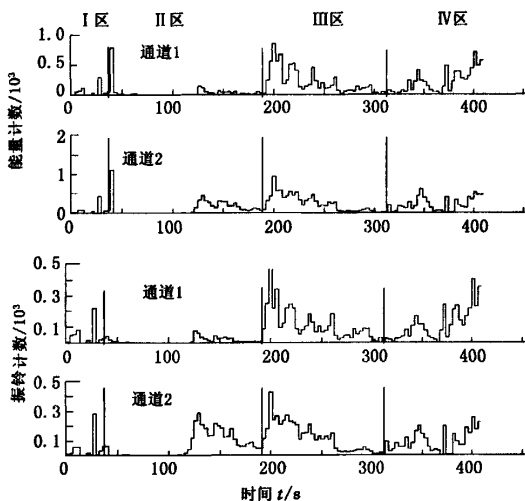


图 6 阈值滤波后能量和振铃时间历程图

Fig. 6 Energy-time history and count-time history after setting threshold

结合试验过程及低碳钢疲劳断裂力学性能,将图 6 所示试件试验过程分为 4 个区域。I 区为静载加载阶段,期间振铃计数有明显的突起,能量也有突起,认为试件在较大静载荷(25.3 kN)下已经有显著塑性变形发生。II 区为疲劳裂纹萌生阶段,该阶段初期由于施加疲劳载荷而造成部分声发射信号的出现;随后由于受力方向的变化,且试验频率较高,疲劳载荷正应力无法体现作用,因此在很长一段时间内没有声发射信号出现;随着循环次数增加,开始出现疲劳裂纹源,导致声发射信号又开始有微小幅度增加。III 区为裂纹扩展的第一阶段,此阶段疲劳裂纹源的微小裂纹继续扩展,根据断裂力学原理,许多裂纹不到 0.05 mm 就会停止扩展^[8],因此振铃和能量计数呈现开始时大幅度增加,随后又逐渐降低的趋势。IV 区为疲劳裂纹扩展第二阶段的一部分,该段中只有一条主裂纹继续扩展,随裂纹扩展速度的增大,声发射信号也大幅度增加,直到试件发生开裂,试验停止。

3.3 幅度特征

图 7 为阈值滤波前、后幅度时间历程图。0 ~ 40 s 时,阈值滤波前的声发射幅度带基本在 40 ~ 60 dB;40 s 以后,幅度带从 60 ~ 70 dB 呈一定斜率递增到 70 ~ 80 dB。阈值滤波后的声发射幅度带基本在 65 dB 以下,高幅值零星分布在 0 ~ 40 s 和 400 s 左右,分别是

试件的显著塑性变形阶段和最后开裂时期。因此,抽油杆试件疲劳开裂过程中,幅值随疲劳载荷循环次数增加而增大,疲劳载荷的施加提高了声发射信号幅

值,使得动载幅值均较大,但较高幅值分别分布在静载裂纹尖端塑性变形期和试件开裂期,较高幅值(65 ~ 90 dB)的出现主要由于试件发生了显著塑性变形。

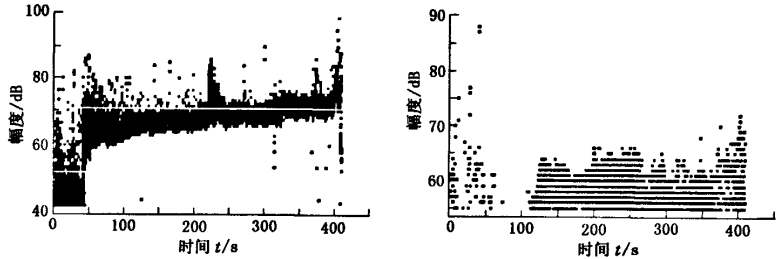


图 7 阈值滤波前(左)、后(右)幅度时间历程图

Fig. 7 Amplitude-time history before and after setting threshold

4 结论与建议

(1)声发射振铃计数和能量计数与抽油杆试件的损伤演化过程能够很好地吻合,结合抽油杆材料的力学性能,能够根据声发射能量和振铃累积计数对抽油杆的状态进行实时评价。

(2)拉伸断裂和疲劳开裂试验过程中,当钢制试件发生塑性变形、断裂以及裂纹扩展现象时,声发射信号的数量明显增多,且幅度多分布于 65 ~ 80 dB,也有极少数信号的幅度可达 90 dB。

(3)利用声发射技术可以对构件的损伤程度实现定量评估。下一步有必要对不同构件进行多次试验,根据试验结果制定构件的风险等级,从而促进声发射技术在结构损伤预警和剩余寿命预测中的应用。

参考文献:

[1] 李爱民,张耀辉. 装甲车辆扭杆裂纹的声发射检测[J]. 无损检测, 2007,29(9):529-534.
LI Ai-min, ZHANG Yao-hui. Detecting of torsion bar crack of the armored vehicle based on acoustic emission technique[J]. Nondestructive Testing, 2007, 29(9): 529-534.
[2] XIA Yong-fa, LI Hai-ling. Application of acoustice mission(AE) technique in crack monitor during fatigue test

of pump rod[J]. 材料与冶金学报, 2007, 6(1): 60-61.
[3] 国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材编委会. 声发射检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
[4] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
[5] 金周庚, 刘哲军, 王健, 等. B/Al 复合材料变形和断裂过程声发射特性[J]. 稀有金属, 1999,23(3):161-163.
JIN Zhou-geng, LIU Zhe-jun, WANG Jian, et al. Acoustic emission characteristics of deformation and fracture process for B/Al composite[J]. Rare Metals, 1999,23(3):161-163.
[6] 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, 1985.
[7] 周洁, 毛汉领, 黄振峰, 等. 金属疲劳断裂的声发射检测技术[J]. 中国测试技术, 2007,33(3):7-9.
ZHOU Jie, MAO Han-ling, HUANG Zhen-feng, et al. Acoustic emission technique for the detecting of metal fatigue fracture [J]. China Measurement Technology, 2007,33(3):7-9.
[8] 陈传尧, 高大兴. 疲劳断裂基础[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1989.

(编辑 修荣荣)