

# V 型切口板材试件拉伸断裂过程中的声发射特征

刘立群, 陈国明, 徐长航

(中国石油大学(华东)机电工程学院, 东营 257061)

**摘要:** 制作了直 V 型切口和斜 V 型切口板材试件, 设计了板材拉伸断裂声发射监测试验。结合金属断裂力学性能和红外热图, 分别对两种切口板材主要声发射参数与断裂过程的相关性进行深入分析, 研究试件损伤过程的声发射参数表征以及某些参数特征。结果表明, 声发射能量计数、振铃计数、撞击、幅度和频谱峰值能较好地表征试件损伤过程。证明了声发射技术应用于钢制结构损伤实时监测和预警的可行性, 并得出某些声发射参数的重要特征。

**关键词:** 声发射检测; V 型切口; 实时监测; 拉伸断裂; 损伤过程

中图分类号: TB52; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2009)05-0360-04

## AE Feature Analysis on Tensile Fracture for Plate Specimens with Pre-Cracked V Cut

LIU Li-Qun, CHEN Guo-Ming, XU Chang-Hang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum, Dongying Shandong 257061, China)

**Abstract:** The plate specimens with V cut pre-cracked were fabricated and the test using acoustic emission(AE) to monitor the process of tensile fracture of plate specimens was designed. Associated with fracture mechanical behavior during tensile and some IR images, the correlations of some AE parameters with fracture process of the two kinds of specimens were deeply analyzed, the AE feature during tensile fracture and its description of damage process was studied. The results showed that the AE energy, hits, counts, amplitude, peak value of frequency contents and so on. during tensile fracture for plate specimens could describe the corresponding damage process. This further proved the feasibility of AE monitoring and early warning application on steel structures, and some conclusions about AE parameters were gained.

**Keywords:** Acoustic emission testing; V cut; Real-time monitoring; Tensile fracture; Damage process

材料或结构受外力或内力作用发生变形或断裂, 以弹性波形式释放出应变能的现象称为声发射。声发射检测是一种动态无损检测, 且声发射信号来自缺陷本身<sup>[1]</sup>, 由于声发射具有这两个本质特征, 声发射技术可以判断缺陷的严重性, 进而可以将声发射作为预警技术应用于实际工程中, 及时发现大型构件存在的安全隐患。笔者设计了直 V 型切口和斜 V 型切口板材试件拉伸断裂声发射监测试验, 研

究了两种试件在拉伸断裂损伤过程的声发射表征, 并分析了试件损伤过程主要声发射参数的特征, 为声发射技术监测并预报金属构件损伤过程提供参考。

### 1 板材试件拉伸断裂声发射监测试验

设计声发射监测试验的加载装置为 100 kN 电子万能材料试验机, 负荷加载为 60 N/s; 试验过程中采用广州飒特 HY6850 红外热像仪, 对试件的温度变化进行实时录像。声发射检测仪器采用美国 PAC 公司的 PCI-2 型两通道声发射检测仪, 配有谐振式探头 R15, 2/4/6 前置放大器, PCI-2 采集卡, 主机采用方正 Pentium(R)4, 其声发射参数设置参考文献<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2008-06-24

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)专项经费资助项目(2006AA09Z355)

作者简介: 刘立群(1980—), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋油气设备腐蚀、泄露等安全检测技术方面的研究工作。

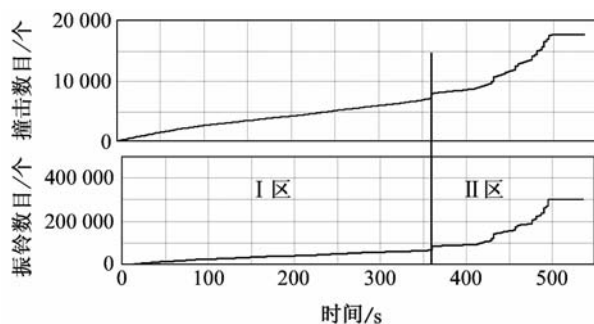
试件采用 A3 钢材,尺寸为  $290\text{ mm} \times 35\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ ,在长度中间预制 V 型切口,分别为直 V 型和斜  $30^\circ\text{V}$  型,其深度为  $12\text{ mm}$ 、角度为  $\arctg\left(\frac{1}{6}\right)$ 。

## 2 拉伸断裂过程的声发射表征

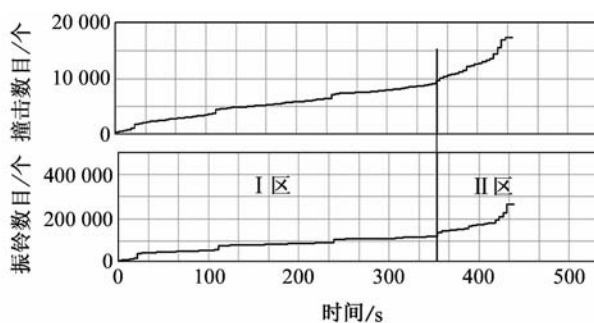
文献[3]首先根据力学性能和电压差结果,将带有预制裂纹块状碳钢试件拉伸断裂过程分为预制裂纹尖端开裂、裂纹尖端弹性变形、裂纹尖端塑性变形、塑性区微裂纹的产生、裂纹稳定扩展、裂纹失稳扩展至断裂六个阶段;然后根据声发射幅度特征将该断裂过程分为塑性区、微裂纹产生和扩展、裂纹稳定扩展以及裂纹失稳扩展至断裂四个阶段。笔者首先根据声发射撞击和振铃累积量将该试件拉伸断裂过程分为弹性阶段和塑性阶段;然后根据能量和振铃历程图将该过程分为微裂纹的产生和扩展、裂纹稳定扩展以及裂纹失稳扩展至断裂三个阶段。

### 2.1 撞击和振铃累积量

图 1 为直 V 型切口和斜 V 型切口板材拉伸断裂声发射撞击和振铃累积量图。其中相同之处为:两个声发射信号变化过程均有明显拐点,可将试件断裂过程分为两个阶段,即 I 区和 II 区。I 区声发射信号累积量增长较慢,称为弹性变形阶段;II 区撞击和振铃累积量有较快的增长,称为塑性变形阶段。



(a) 直 V 型切口板材



(b) 斜  $30^\circ\text{V}$  型切口板材

图 1 拉伸断裂声发射撞击和振铃累积量

不同之处在 I 区:直 V 型切口板材声发射信号增长缓慢且平滑;斜 V 型切口板材声发射信号增长较快且有多次明显突起。

需要说明的是,该试件在弹性变形过程产生声发射信号是由于受力,预制裂纹尖端首先产生应力集中,超过材料的屈服点发生塑性变形<sup>[1]</sup>。由于直 V 型切口试件裂纹方向与受力方向垂直,是典型的张开型断裂,塑性变形及微裂纹的形成和扩展过程较连续,且积蓄能量较小,因此声发射信号增长平滑且较缓慢;斜 V 型切口试件预制裂纹的方向与受力方向成  $30^\circ$ ,所受拉力要改变试件裂纹原来的方向,一定时间后,力到一定大小,积蓄了一定能量,微裂纹就要改变一点原有的方向,向最终裂纹开裂方向扩展一步,积蓄的能量以声发射形式释放出来,就形成一次明显突发释放,多次突发释放将裂纹方向调整后进入 II 区。在 II 区,试件开始全面塑性变形,逐渐形成一条主裂纹,宏观裂纹扩展到接近临界长度时,就开始失稳扩展,接着快速断裂,产生最大强度的声发射信号。因此两种类型试件的 II 区声发射信号变化趋势是相同的。

### 2.2 能量和振铃历程图

图 2 中 I 区声发射信号较平坦,只有 250 s 左右时有声发射小突起,认为该区试件发生了塑性变形和微裂纹产生和扩展,250 s 是预制裂纹尖端开始变形的标志。II 区声发射突起较频繁,为裂纹稳定扩展阶段。III 区在声发射信号较弱时突然有最大的能量和振铃数产生,为失稳扩展至断裂阶段。

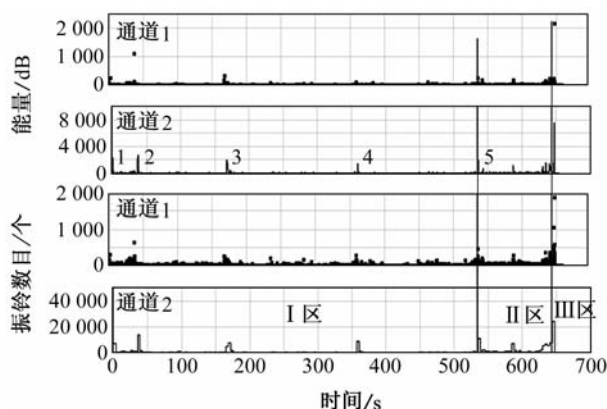


图 2 直 V 型切口板材拉伸断裂声发射能量和振铃历程图

图 3 中 I 区开始加载就有突起 1,其损伤机理中存在夹具夹紧和裂纹尖端小开裂;突起 2~5 的时间间距较长,认为该区试件不断发生塑性变形和微裂纹的产生和扩展。II 区声发射突起较频繁,突起时间间隔较短,为裂纹稳定扩展阶段。III 区为失稳

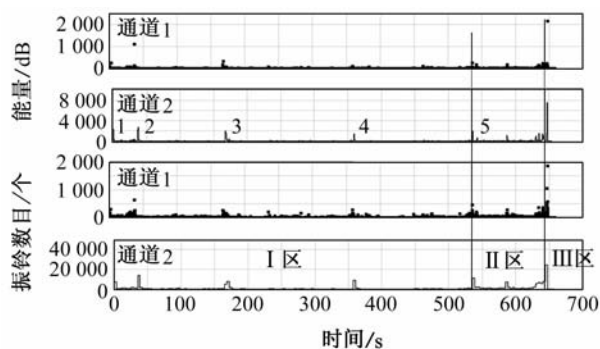
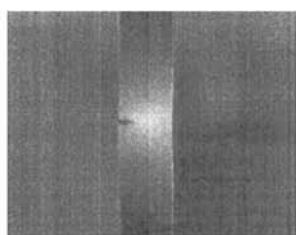


图3 斜30°V型切口板材拉伸断裂声发射能量和振铃历程图



(a) I区末期

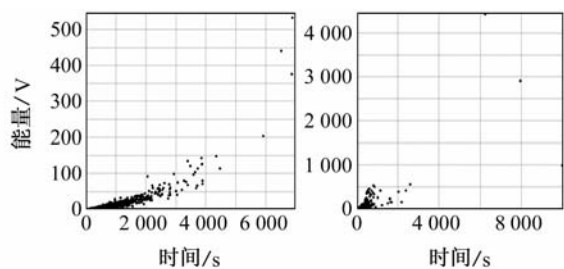


(b) II区



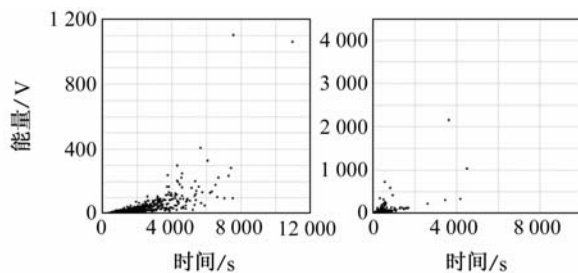
(c) III区

图4 三个阶段红外热像图



(a) I区(0~360 s) (b) II区(360~500 s)

图5 直V型切口板材拉伸断裂能量-持续时间图



(a) I区(0~530 s) (b) II区(530~650 s)

图6 斜V型切口板材拉伸断裂能量-持续时间图

图5和6为直V型切口和斜V型切口I区(弹性阶段)和II区(塑性阶段)的能量-持续时间图。观察四图得出①两试件I区声发射能量和持续时间均较II区小很多,II区有最大值出现。②图5中I区图较规则,数据形成一束,其余三图如花束,从原点向外扩散。根据上一节的分析,原因是由于该三

扩展至断裂阶段。

图4为记录直V型切口断裂过程的红外录像截取热图,从左到右依次为I区末期、II区和III区热图。可以看出,I区已经开始应力集中,发生局部塑性变形,局部声发射信号明显;II区裂纹尖端处温度很高,裂纹开始扩展,声发射信号强烈;III区为裂纹最后断裂阶段,断裂处温度最高,声发射信号最大,能够与声发射分析过程相吻合。

### 3 声发射参数特征分析

#### 3.1 能量-持续时间关系特征

个区域发生了较不连续的裂纹开裂和扩展,损伤机理较多所致。

将图5中I区图用Matlab拟合工具箱进行拟合,得出能量与持续时间成3次方关系(图7)。

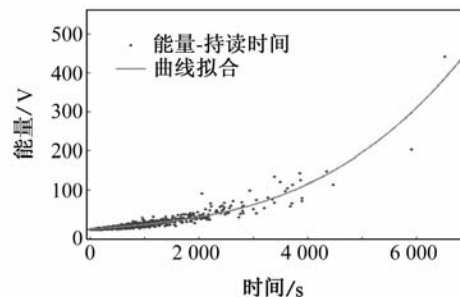


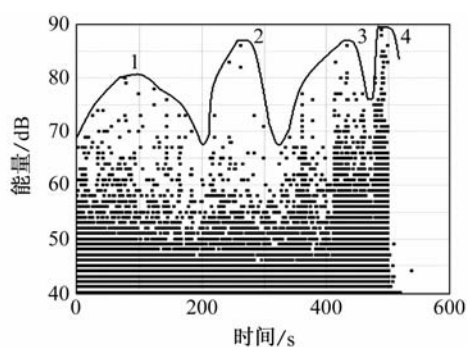
图7 直V型切口板材I区能量-持续时间数据拟合图

#### 3.2 幅值特征

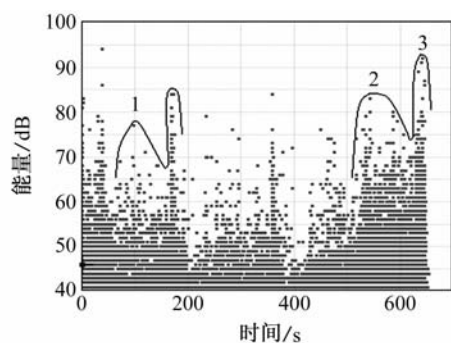
观察图8两种切口板材声发射幅值分布,得出①斜V型切口幅值变化比直V型切口起伏大,且最大值大于直V型切口。②A3材料试件拉伸断裂过程中最高幅值在90 dB左右,75 dB以上的信号较少,说明该材料的强度和韧性属于中高水平。

将图8中各区极大值圈出,发现直V型切口幅值分布较规则,能够很好地与试件损伤过程吻合:其峰值区1幅值较低,时间长,可认为裂纹尖端受力发生了塑性变形;2幅值较高,时间较短,认为发生了微裂纹的产生和扩展;3幅值逐渐增高,为裂纹稳定





(a) 直 V 型切口板材



(b) 斜 V 型切口板材

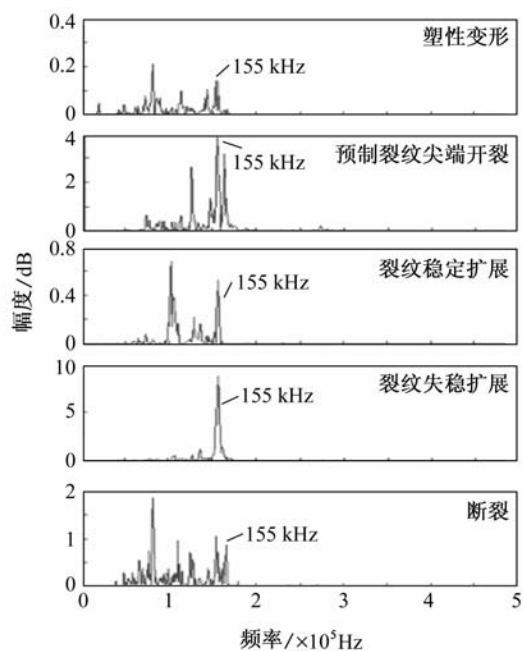
图 8 幅值-时间图

扩展阶段;4 为试件失稳扩展至断裂,时间极短且幅值最高。斜 V 型切口中,由于 I 区裂纹方向的不断改变,其幅度不是很规则,观察峰值区 1,可以看出其左边突峰较低,时间较长,而右边突峰较高,时间短,认为裂纹局部发生了塑性变形及微裂纹开裂,可以认为 I 区阶段就是不断发生塑性变形、不断有微裂纹开裂然后将裂纹方向调整过来的过程;2 和 3 与直 V 型切口相同,分别为裂纹稳定扩展阶段和失稳扩展至断裂阶段。

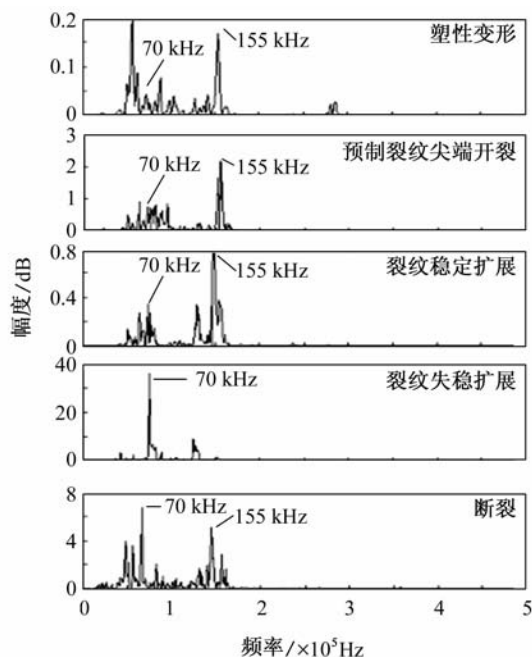
### 3.3 频谱特征

根据上述分析,分别从直 V 型切口和斜 V 型切口板材声发射信号中选出具有代表性的信号进行 FFT 变换,结果如图 9,从上向下依次代表不同时期的损伤机理。

如果两个声发射信号的频谱图能够很好地吻合,那么认为这两个信号产生的机理相同<sup>[4]</sup>。分析图 9 相同机理的频谱图得出:只有塑性变形、预制裂纹尖端开裂和断裂的频谱图近似,说明两板材此三类信号的损伤机理相同;裂纹稳定扩展和裂纹失稳扩展的频谱图有很大差别,说明两板材裂纹扩展过程的机理不同,估计由于斜 V 型切口有倾斜角度,使得板材两端受力不均匀所致。证明了预制 V 型



(a) 直 V 型切口板材



(b) 斜 V 型切口板材

图 9 不同声发射事件的频谱图

切口的方向影响裂纹的扩展机理,导致声发射信号不同。

观察频谱图,对比两板材声发射信号频谱特征,得到:① 直 V 型切口板材损伤频率在 155 kHz 处较明显。② 斜 V 型切口板材除了 155 kHz 频谱峰值较高,70 kHz 也较明显。这是因为受力要改变原来裂纹扩展方向,开裂两面存在摩擦和碰撞,导致

(下转第 373 页)

时还要注意下述因素:① 提离效应对信号响应的影响,如焊接和氧化皮会导致提高信号的响应。② 服役过程中,炉管因过热而形成铬迁移、氧化皮等,对涡流响应信号(相位、幅度)产生较大影响。③ 材料相对磁导率的变化造成的影响。

### 1.6 射线检查

随机射线检验通常可以作为辅助技术确认蠕变损伤的严重情况。如果损伤扩展到一定程度,如出现一定尺寸的蠕变裂纹时,X射线图像可以清晰地确定损伤的位置和程度。由于现场条件的限制,一般很少采用射线检测来确定早期的蠕变损伤。

### 1.7 复膜金相

复膜技术是一种现场检验外表面蠕变损伤的有效方法,可以用来检测过热引起的微观结构变化。复膜是点状评价,一般用作辅助技术,仅在蠕变损伤的发展阶段使用现场复膜技术。就炉管而言,因为损伤是在炉管内壁发生,对炉管外壁金相检测不会提供次表面损伤的清晰指示。但是,蠕变并不是高温损伤的唯一形式,复膜金相技术是发现渗碳、珠光体球化等材质劣化现象的最好方法。

(上接第 363 页)

70 kHz 左右的频率成分谱值的存在。③ 该板材的相同损伤机理频率对应的谱值幅度大小相近,且试件的频谱值均在裂纹失稳扩展时最大,最后断裂时刻有大幅度的降低。这样有理由将频谱峰值作为考察构件损伤程度的一个参数,而且该参数起伏比幅值大,这对于 AE 检测时及早发现构件严重损伤有重大意义。

## 4 结论

(1) 通过对板材试件拉伸断裂过程声发射撞击、能量、振铃计数参数随时间的变化分析,结合试件损伤过程的红外热图,在材料断裂力学性能的基础上,发现上述声发射参数能够很好地表征试件损伤过程。幅值与事件大小有直接关系,不但能够表征试件损伤过程,还能较好地描述其损伤机理。

(2) 分析声发射能量和持续时间图,发现试件在有较少的塑性变形及裂纹开裂情况下,能量同持续时间成 3 次方关系,该结论进一步证明声发射参数能够表征构件不同的损伤阶段。

## 2 讨论

高温环境下的蠕变损伤是承压设备出现失效的重要模式之一,研究早期蠕变损伤的检测方法是评价损伤程度,预测设备寿命的重要课题。目前任何一种检测手段都还不能达到理想的检测效果,只有在多种方法综合使用下方能得到较为理想的效果。研究空洞、空隙、微裂纹萌生和扩展的有效无损检测方法,不仅对于防止承压设备失效,避免重大安全事故的发生具有重要意义,而且应用前景也十分广阔。

### 参考文献:

- [1] Brian Shannon. Assessing Creep Damage in Cast Materials for High Temperature Reformer Tube Application[C]. ASME PVP2007/CREEP8 Conference. San Antonio, Texas, USA:[s. n.],2007.
- [2] 石油化工装置设备腐蚀与防护手册[M]. 北京:中国石化出版社,1996.
- [3] API RP 579—2007 Fitness for Service[S].
- [4] API RP 941—2004 Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants[S].

(3) 利用声发射监测某金属构件损伤过程,并对该材料的声发射撞击、能量、振铃计数、幅值和频谱值等进行深入分析,可以对该构件的损伤程度实现定量评估。证明了声发射技术在结构损伤预警和剩余寿命预测中有广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Ennaceur C, Laksimi A, Herve C, et al. Monitoring crack growth in pressure vessel steels by the acoustic emission technique and the method of potential difference[J]. Pressure Vessels and piping,2006,83(3):197—204.
- [4] Vibhor Chaswal, Sasikala G, Ray S K, et al. Fatigue crack growth mechanism in aged 9Cr-1Mo steel: threshold and Paris regimes[J]. Materials Science and Engineering,2005,395(1—2):251—264.