

基于声发射技术的 30CrMnSi 钢断裂机理研究

Fracture Mechanism for 30CrMnSi Steel Based on

Acoustic Emission Technology

龙宪海, 阳能军, 王汉功

(第二炮兵工程学院, 西安 710025)

LONG Xian-hai, YANG Neng-jun, WANG Han-gong

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

摘要: 采用三点弯曲试样加载过程声发射监测实验, 结合断口 SEM 观察及 X 射线能谱分析, 考察了 30CrMnSi 合金钢延性断裂的整个物理过程。结果表明: 30CrMnSi 钢的断裂过程从宏观上可以分为裂尖塑性变形、裂纹亚临界扩展和裂纹失稳扩展三个阶段。其机理如下: 裂尖塑性变形过程是位错的滑移、堆积而引起的孔洞形核和长大; 裂纹亚临界扩展过程为韧窝之间的连通; 裂纹失稳扩展过程则是晶体的大规模解理。随着延性断裂过程的进行, 各阶段均呈现脆性断裂特征逐渐增强的趋势, 表现为韧窝尺寸的减小和声发射高幅值信号的增加。断裂过程各阶段声发射信号特征明显, 声发射技术是监测 30CrMnSi 钢断裂损伤发展的有效手段。

关键词: 高强度合金钢; 声发射; 断裂机理; 断裂韧度

中图分类号: TG113.25      文献标识码: A      文章编号: 1001-4381(2011)01-0017-06

**Abstract:** The whole physics process of ductile fracture in 30CrMnSi steel was investigated by the experiment of three-point bending specimen, which was monitored by acoustic emission system and the analysis of fracture by SEM and X-ray spectrometer. The results indicate that the whole process of the fracture includes three stages: the plastic deformation of crack tip, the crack pre-critical propagation and the crack critical propagation. The process of plastic deformation of crack tip is the formation and growth of cavity. The essential of crack pre-critical propagation is the connection of the dimples and the crack critical propagation is attributed to large-scale cleavage. There is a tendency to be more brittle during ductile fracture propagation for all stages. It is testified that acoustic emission technology is an efficient means to monitor the damage propagation for the high strength steel.

**Key words:** high strength steel; acoustic emission; fracture mechanism; fracture toughness

30CrMnSi 钢是工程应用中相当广泛的合金结构钢, 该钢韧性较大, 其断裂过程呈现出延性断裂特征。而对于延性断裂现象的力学描述, 现有的宏观断裂理论已经不能给出令人满意的结果。究其原因是因为非脆性断裂的物理机制更为多样, 断裂过程更为复杂<sup>[1]</sup>。故而对于 30CrMnSi 延性断裂机理的研究和认识, 无论是对材料本身的研究还是对延性断裂力学的研究均有重要的意义。

声发射(Acoustic Emission, AE)是材料断裂过程应变能以弹性波的形式释放的现象, 是断裂过程中材料微观变化的直接反映<sup>[2]</sup>。大量研究已经表明<sup>[3-9]</sup>, 声发射技术是研究材料断裂损伤过程的有力工具。这些研究中有的工作主要集中在声发射信号参数与宏观力学量之间的关系上<sup>[3-7]</sup>, 有的工作则关注于某种特定断裂类型的声发射信号特性<sup>[8,9]</sup>, 然而应用声发射

技术对材料非脆性断裂过程物理机制的研究却少见报道。

本工作采用三点弯曲试样加载过程声发射监测实验, 结合电镜及断口元素能谱分析等微观分析手段, 研究 30CrMnSi 合金钢延性断裂的物理过程。根据断裂过程不同阶段的宏观与微观特征, 深入探讨断裂过程中不同阶段的断裂机理。

### 1 实验材料及方法

#### 1.1 实验材料与试样制备

本研究的实验材料为 30CrMnSi 合金钢, 其化学成分和常规力学性能如表 1 所示。试样加工前, 母材经过如下热处理: 在 880℃下油淬, 然后从 520℃回火至常温。

表 1 30CrMnSi 钢化学成分及其常规力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of 30CrMnSi steel

Mass fraction of chemical composition/ %				Mechanical property/MPa	
C	Si	Mn	Cr	$\sigma_b$	$\sigma_s$
0. 27-0. 34	0. 90-1. 20	0. 80-1. 10	0. 80-1. 10	$\geq 110$	$\geq 90$

根据 GB4161—84, 采用机械加工的方法从母材加工出三点弯曲试样, 其长、宽、高分别为  $L=120\text{mm}$ ,  $B=12\text{mm}$ ,  $W=24\text{mm}$ 。首先在试样正中间用线切割加工出机械缺口, 然后在高频疲劳机上预制疲劳裂纹。预制裂纹长度为  $16\text{mm}$ 。

1.2 实验方法及设备

本实验采用的声发射仪为 AMSY5, 其波形数据采集频率高达  $10\text{MHz}$ , 传感器带宽可达  $1\text{MHz}$ 。图 1 为加载过程中试样与声发射仪连接示意图。图 2 为一个声发射撞击信号的典型波形及常用波形参数的定义。

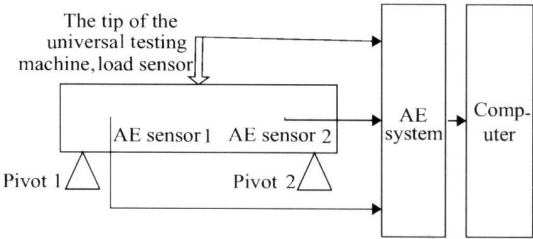


图 1 声发射监测实验图  
Fig. 1 Sketch of the AE monitoring experiment

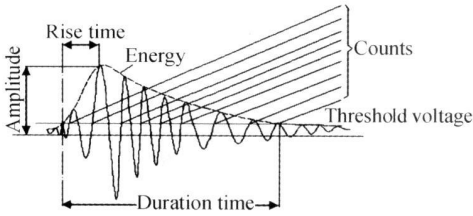


图 2 典型的声发射信号及参数  
Fig. 2 The parameters of typical AE signal

2 实验结果与分析

2.1 断口宏观形貌

图 3 为试样压断之后典型断口的宏观形貌。图 3 中 A 区为机械切口, B 区为疲劳裂纹区。C 区为裂纹亚临界扩展区, 该区色泽较暗, 形状呈弓形, 两边靠近试样表面处面积较小, 中间则较大。这种差异是两边处于平面应力状态而中间处于平面应变状态造成的。D 区为试样快速断裂的裂纹失稳扩展区; 该区非常粗糙, 色泽鲜亮, 在强光下转动可以看到很多闪光小刻

面, 显示结晶状断口的特征。

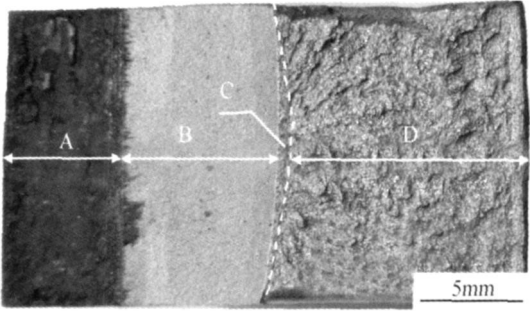


图 3 断口宏观形貌  
Fig. 3 Macrograph of fracture surface

2.2 断口 SEM 形貌及能谱分析

图 4 是裂纹亚临界扩展区断口的 SEM 形貌。图 4(a) 为亚临界扩展区的初始起裂部位, 图 4(b) 则是亚临界区接近失稳扩展部位的形貌。从图 4(a) 可以看出, 亚临界扩展区刚开始起裂时是明显的韧性开裂。断面含有很多大而深的 A 处韧窝, 较大的直径可达  $10\mu\text{m}$  左右。图 4(b) 显示的也是韧窝型断裂, 但是与图 4(a) 相比韧窝相对较小较浅。金属物理理论<sup>[10]</sup>认为, 韧窝大说明断裂之前经受的塑性变形较大, 反之则塑性变形较小, 材料趋于脆性断裂。这说明裂纹亚临界扩展过程中断裂机制有微小变化, 其韧性特征呈逐渐减弱的趋势。

在韧窝中心处都存在着一个核, 如图 4(a) 中的 A 处。在该区选取小块区域进行能谱分析, 同时为了便于对比, 在韧窝外的 B 处取一小块区域也进行能谱分析。结果示于表 2。从表 2 可以看出, 与韧窝周边区域相比较, 韧窝内形核区域含有硫和氧元素, 且碳的含量也比 B 处高。研究表明<sup>[1]</sup>, 钢中存在的夹杂物或其与基体相结合的界面强度都比较弱。这说明 30CrMnSi 在受载过程中孔洞的形成可能起始于夹杂物或其界面。

图 5 为失稳扩展区的 SEM 形貌, 其中图 5(a) 为失稳扩展刚开始部位照片, 图 5(b) 是失稳扩展区靠后部分的照片。可以看出, 30CrMnSi 失稳断裂的微观机制主要为穿晶解理断裂。在失稳扩展的起始部分, 断口的解理面较小, 其边缘伴有一些撕裂棱, 各解理面呈台阶分布。

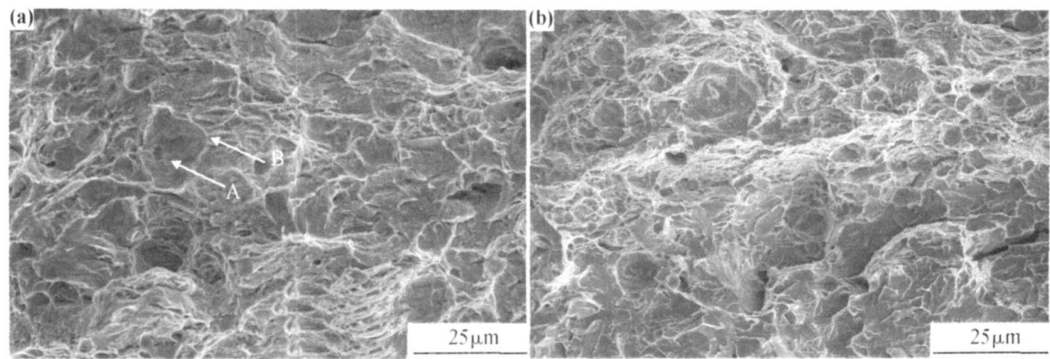


图 4 亚临界扩展区 SEM 形貌 (a) 起裂区域; (b) 靠近失稳扩展区域  
Fig. 4 SEM fractographs in pre-critical propagation zone  
(a) fracture initiation zone; (b) zone near the critical propagation

表 2 区域 A、B 的化学成分(质量分数/ %)

Table 2	Composition of A and B zones ( mass fraction/ % )						
	C	Si	Mn	Cr	S	O	Fe
A	1.03	0.51	1.43	1.26	0.34	1.55	93.88
B	0.52	1.24	1.33	1.31	—	—	95.59

在失稳扩展的末区, 解理特征明显增加, 解理断面呈宽大的扇形花样, 如图 5(b) 中解理扇 I, II, III。各扇面之间的连接是平滑的, 如图中扇面 I 和 II, III 之间的连接区域 A 和 B。这说明在失稳扩展末区其断裂的脆性特征较失稳扩展区的开始部分强, 且裂纹的扩

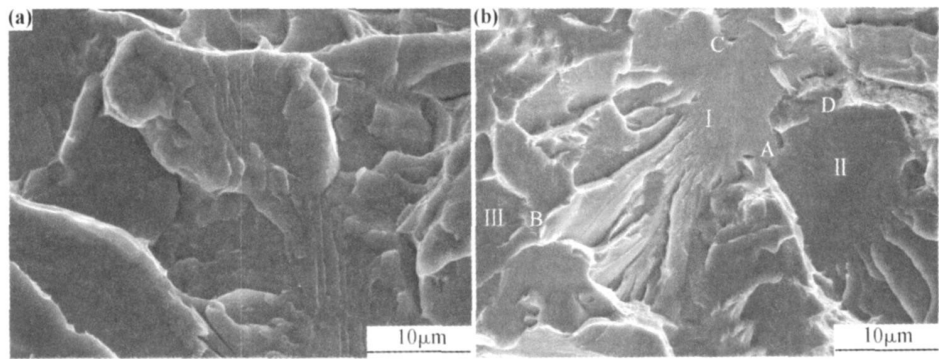


图 5 失稳扩展区 SEM 形貌 (a) 初始部位; (b) 中后部位  
Fig. 5 SEM fractographs in critical propagation zone  
(a) initiation location of the zone; (b) middle and rear location of the zone

展速度大。同时发现解理扇根部有小缺口, 如图 5(b) 中 I 和 II 扇面的 C, D 处, 并且这些小缺口沿着裂纹前进方向扩展出反射状的小条纹, 说明这些小缺口为解理扇的裂纹源。通过能谱分析发现, C, D 区域都是富含 S, O 元素的区域, 这表明在裂纹失稳扩展的后面阶段, 裂纹沿着晶体中较弱的解理面解理, 而对于每个解理面, 裂纹又是从最薄弱的地方, 即含有夹杂较多的部位开始起裂。

对比图 5(a), (b), 发现在失稳扩展区域, 也是越到后面脆性断裂的特征越强。

2.3 断裂过程的声发射特性

图 6(a), (b) 为试样加载过程中撞击计数率、载荷与时间关系图和加载过程中声发射信号幅值、载荷与时间关系图。从图 6 不难看出, 断裂过程可以根据声

发射信号的特点分为三个阶段。第一和第二阶段以第 58s 处的撞击计数率突然增加作为分界线。在第 58s 以前, 撞击计数率较小但是比较平稳, 在时间轴上比较密集。第二阶段在第 58s 以后至第 193s 的失稳断裂前, 撞击计数率也比较低但是很不平稳, 在时间轴上呈高低相间分布的趋势非常明显, 而且分布很稀疏, 在很多时刻都没有声发射信号产生。第 193s 以后为断裂第三阶段, 该阶段声发射撞击计数率有大幅度的增加并且非常密集、平稳。

从图 6(b) 可以看出, 参照上述划分的时刻, 各个阶段声发射信号在幅值上也有其各自的显著特征。在 0~ 58s, 声发射信号的特点是幅值较低, 均在 50dB 以下, 随着加载时间有缓慢增加的趋势。在第 58s 附近, 声发射信号幅值突然增大至 83dB, 并且随着加载时间

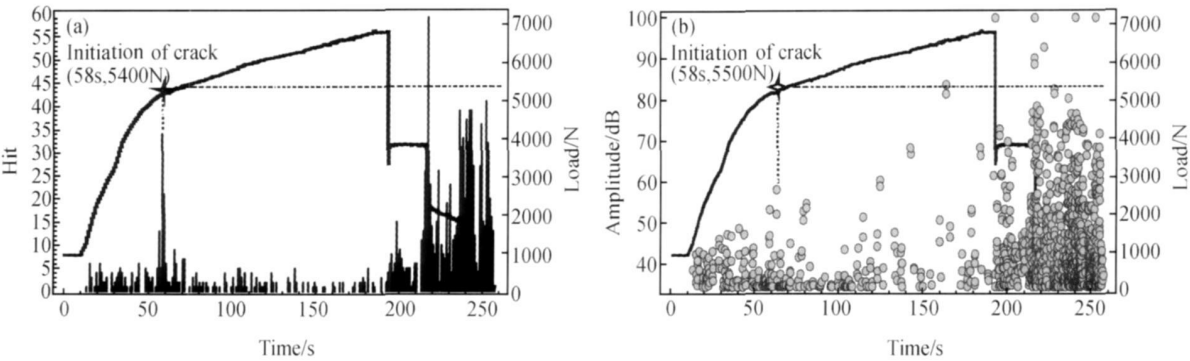


图 6 试样断裂过程声发射信号参数关联图

(a) 振铃计数率-时间-载荷; (b) 幅值-时间-载荷

Fig. 6 The correlation of AE signal parameters from fracture propagation

(a) correlation of hit, load and time; (b) correlation of amplitude, load and time

信号幅值有较快的增加趋势,同时低幅值信号数量愈来愈少。第 193s 以后的第三阶段,产生大量高于 90dB 的高幅值声发射信号。另外从载荷曲线上看,在第 58s 处,曲线的斜率迅速减小,载荷上升速度放缓,试样刚度下降,说明试样的损伤程度在该点可能有较大变化。在试样失稳断裂的第 193s,试样突然脆断,发出“嘭”的响声,载荷大幅卸载。

可以看出,声发射信号在发生速率、信号幅值以及载荷曲线的斜率等均有明显的阶段特征,而且在时间上吻合得很好,说明这几个阶段反映了损伤的不同进程。

2.4 声发射信号特性与断裂各阶段的相关性

从断口分析可知,30CrMnSi 钢的延性断裂过程

包含裂尖塑性变形、裂纹亚临界扩展和裂纹失稳扩展阶段。而从声发射信号特征图上看,断裂过程沿着时间轴也可以分为三个阶段。从图 6 可以看出,193s 以后对应的是裂纹失稳扩展阶段。因为在该时刻,试样断裂,载荷迅速卸载。较难判断的是图 6 的第 58s 是否就是裂纹的起裂点,即塑性变形和亚临界扩展的分界点。为此本工作采用小波技术对信号进行时频转换,从时域和频域同时考察这两个阶段的声发射信号特征。

分别对 0~ 58s 声发射信号以及 58~ 193s 之间大于 50dB 的声发射信号进行小波分析,典型的时间-频率-小波系数关系如图 7 所示。

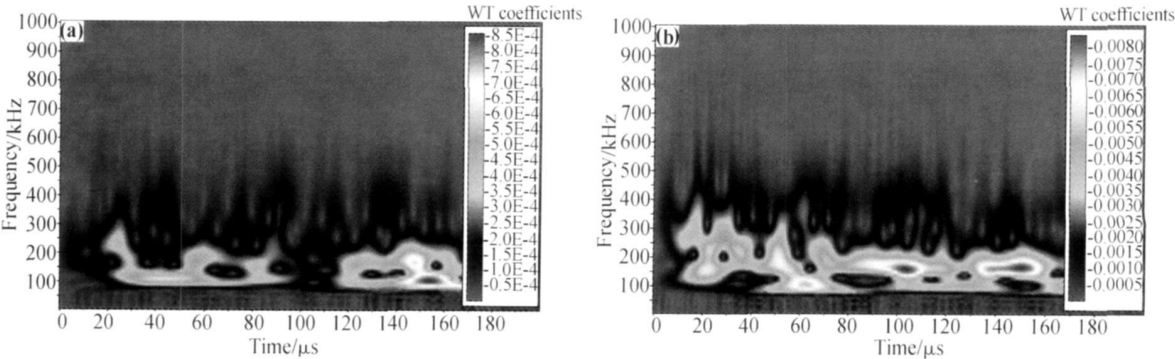


图 7 声发射信号小波变换图 (a) 第一阶段声发射信号; (b) 第二阶段声发射信号

Fig. 7 Wavelet transforms diagram for AE signals

(a) signals from the first stage; (b) signals from the second stage

从图 7 可以看出,前一阶段的信号其能量主要分布在 100kHz 左右,比较集中,在时间轴上变化较小;第二阶段大于 50dB 的信号其能量的主峰值提高到 150kHz 左右。与图 7(a) 不同的是,图 7(b) 出现了很明显的第二峰值,这些第二峰值主要分布在 220~ 450kHz 之间,并且随着时间间歇出现。

由金属断裂理论可知,塑性变形其实质是晶格内位错的滑移和堆积,从而形成孔洞。故而塑性变形所引发的能量释放机制较为单纯,该阶段采集到的声发射信号频率成分应该较为单一。而图 7(a) 所示的信号正好符合这个特性。在裂纹的扩展阶段,虽然也有塑性变形发生,但是各个孔洞之间的连通才是这一阶

段的主要物理过程, 因为相对微观的位错滑移来说, 孔洞的连接已经是宏观过程了, 它直接表现为裂纹的扩展。图 8 为亚临界扩展区的高倍 SEM 照片, 可以看出韧窝内壁很光滑, 这说明孔洞是由位错滑移而不断积累长大, 其过程较为缓慢而均匀。而韧窝与韧窝之间则有明显的断裂沿, 这是由孔洞之间连通而产生。断裂沿表面很不平整, 而且含有很多与正应力方向相同的撕裂棱。撕裂棱的存在一方面说明孔洞之间连接的速度很快, 另一方面由其分布的不均匀性说明了所含断裂机制的复杂性: 即撕裂可能由一些较弱的第二相粒子处开始, 期间同时伴有第二相粒子的碎裂或者由其引起的撕裂以及小规模的晶体面的断裂。以上分析可以从声发射信号的特征中得到证实。从图 7(b) 可以看出, 信号能量的主峰值由图 7(a) 的 100kHz 提高到 150kHz, 而声发射信号的频率由能量的释放速率决定, 能量释放速率越大, 声发射信号频率越高, 故而图 7(b) 的声发射信号是由孔洞之间的迅速连通所引发。另外孔洞之间的连通包含的断裂机制复杂, 除了有金属原子键在晶体内的断裂外, 在断裂过程中还

遇到了很多较弱的第二相或者夹杂等粒子的破碎, 这些粒子在金属中往往是脆性相, 其破碎产生的声发射信号频率必然较高。从图 7(b) 可以看出, 信号中较高频率的部分显然是由这些粒子的碎裂产生, 因为从时间上看它是间隔出现的, 这与这些粒子在金属基体中的分布规律相符。

通过上述分析, 可以认为第二阶段即 58~ 193s 间的高幅值声发射信号是由裂纹亚临界扩展过程中孔洞的连通所产生。所以, 起裂时刻为第 58s, 该时刻对应的载荷即起裂载荷为 5400N。

3 讨论

由断口分析可以初步推断裂纹的亚临界扩展阶段含有脆性特征逐渐增强的趋势, 这一点可以从声发射信号的分析中得到更为细腻的验证。图 9(a), (b) 分别为亚临界扩展过程中大于 50dB 及小于 50dB 声发射撞击计数率随着时间变化图。从图 9 可以看出, 小于 50dB 的信号数量随着时间呈指数减小, 而大于 50dB 的信号数量基本没有变化。从 2.4 节的分析可知, 大于 50dB 信号对应的是孔洞之间连通的断裂信号, 而小于 50dB 的信号则主要由孔洞的增大即塑性变形所产生。这说明随着亚临界扩展的进行, 材料经受的塑性变形程度越来越小, 裂纹的扩展更多显示出脆断的特性。大于 50dB 信号数量基本没有变化, 这是因为该类信号主要与材料中孔洞形核的数量有关, 而材料孔洞形核的数量则主要由材料本身所决定。注意到图 6(b) 中, 在亚临界扩展段内, 声发射信号幅值不断增高, 这是由于亚临界扩展过程中, 因新生成的孔洞尺寸减小, 孔洞与孔洞之间距离增大, 因而它们的连通瞬间所释放的能量变大。

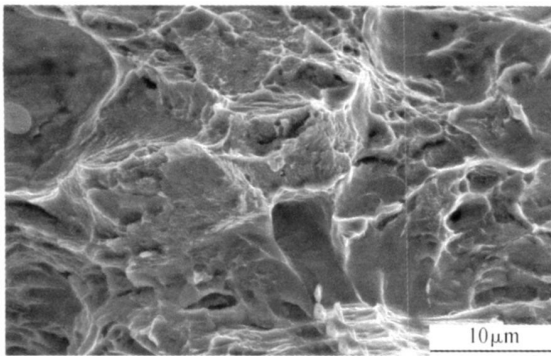


图 8 亚临界扩展区高倍 SEM 形貌

Fig. 8 SEM fractograph in pre critical propagation zone

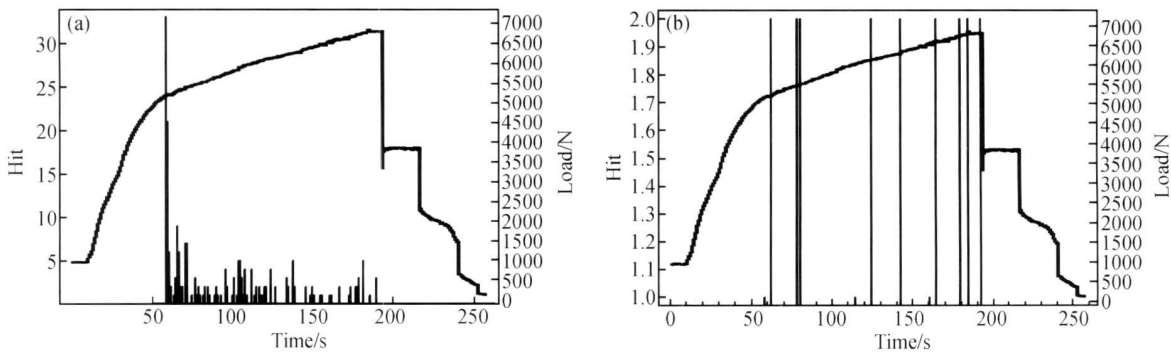


图 9 亚临界扩展阶段声发射撞击计数率与时间的关系

(a) 幅值> 50dB; (b) 幅值≤50dB

Fig. 9 The correlation of time and hits for the AE signals from pre-critical propagation stage

(a) amplitude> 50dB; (b) amplitude≤50dB

对于裂纹的失稳扩展,因其断裂的时间非常短,所以无法通过声发射信号监测其断裂的过程。但是,通过 2.2 节分析,对断口的显微观察来看,发现它也是脆性特征不断增强的过程。总之,无论是裂纹的亚临界扩展还是失稳扩展,其断裂的物理实质都含有由韧性向脆性不断转变的趋势。

综合本工作的实验结果及分析可知,合金钢 30CrMnSi 的断裂过程不能以简单的韧性断裂或脆性断裂来说明,因为其断裂过程前后经历了不同的断裂

机制。图 10 描述了合金钢 30CrMnSi 不同断裂阶段的物理本质:即材料受载后裂尖区域开始塑性变形,主要的物理过程是晶格内的位错滑移、孔洞形核及孔洞长大,如图 10(a);孔洞长大到一定程度后,孔洞之间断裂连通,宏观上材料表现为起裂,如图 10(b);随着应力增大和裂纹的扩展,新生成的孔洞尺寸减小,孔洞与孔洞之间距离变大(即  $D_2 > D_1$ ),如图 10(c);当应力达到一定值时,裂纹沿晶体的解理面迅速开裂,宏观上表现为试样失稳断裂,如图 10(d)。

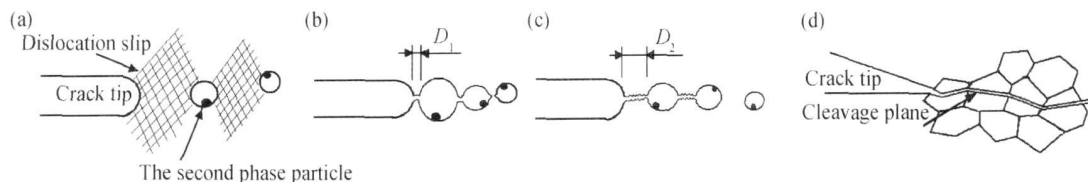


图 10 30CrMnSi 钢断裂机理示意图 (a) 孔洞形核及长大;

(b) 孔洞连通,材料宏观起裂;

(c) 孔洞之间的连通距离增大; (d) 失稳断裂阶段的解理断裂

Fig. 10 Sketch of fracture mechanism in 30CrMnSi steel (a) initiation of cavity and its growth;

(b) connection of dimples which arousing crack's initiation; (c) connection distance between dimples becoming larger;

(d) cleavage in the crack critical propagation stage

## 4 结论

(1) 含有预制裂纹的合金钢 30CrMnSi 的断裂过程可以分为三个阶段:裂尖塑性变形、裂纹亚临界扩展、裂纹失稳扩展。

(2) 合金钢 30CrMnSi 断裂过程各个阶段的物理本质:裂尖塑性变形主要是位错滑移并在第二相粒子处积塞,从而产生孔洞并引起孔洞长大;裂纹的亚临界扩展是孔洞的连通引起裂纹的增长;裂纹的失稳扩展是材料晶体沿解理面迅速开裂。

(3) 虽然裂纹的亚临界扩展和失稳扩展的断裂机理不相同,但是在其各自阶段的损伤进程中越到后面脆性断裂特征越强。

(4) 声发射技术能从物理本质上准确地分析出材料延性断裂的起裂点,从而提高了断裂韧度和 J 积分测量的精确性,并使它们的物理意义更加明确。

### 参考文献

- [1] 蔡泽高,刘以宽.金属磨损与断裂[M].上海:上海交通大学出版社,1985.
- [2] 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.

- [3] 朱波,蔡珣,王成国.声发射特性与材料断裂韧性相关性研究[J].物理学报,2003,52(8):1960-1964.
- [4] LIU H K, DAI W L, LEE Y C. Moisture effects and acoustic emission characterization on lap shear strength in ultrasonic welded nylon composites [J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(13): 3389-3396.
- [5] FANG C K, CHUANG T H. Principles of acoustic emission and its application [J]. NDT Science and Technology, 1999, 16(1): 4-9.
- [6] ONO K, OHTSU M. Wavelet transform of acoustic emission signals [J]. Journal of Acoustic Emission, 1995, 4(1): 316-320.
- [7] DUNEGAN H L, HARRIS D O. Fracture analysis by use of AE [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1968, 1(1): 105-108.
- [8] 朱波,刘玉军,钱宇白.高强铝合金沿晶断裂声发射研究[J].材料热处理学报,2003,24(3):27-30.
- [9] 何舒,马羽宽,杨建波.含不同缺陷的金属声发射特性[J].吉林大学学报:工学版,2003,33(4):21-25.
- [10] 哈宽富.断裂物理[M].北京:科学出版社,2000.

收稿日期:2009-05-11;修订日期:2010-04-02

作者简介:龙宪海(1979—),男,博士研究生,研究方向为声发射检测技术,联系地址:陕西省西安市洪庆镇第二炮兵工程学院(710025),E-mail: xianhai\_long@163.com