

# 声发射特性与材料断裂韧性相关性研究\*

朱 波<sup>1)†</sup> 蔡 2) 王成国<sup>1)</sup> 蔡华 1)

<sup>1)</sup> 山东大学材料科学与工程学院, 济南 250061)

<sup>2)</sup> 山东大学计算机科学与技术学院, 济南 250014)

(2002 年 12 月 26 日收到, 2003 年 4 月 10 日收到修改稿)

以高强度铝合金的断裂过程为研究对象, 利用先进的声发射试验系统, 考察了拉伸试样和带有预制疲劳裂纹的 DCB 试样在断裂时的声发射事件特性, 揭示了材料断裂韧性和声发射特性间的关系. 试验结果表明, 材料稳态裂纹扩展起始于  $K_{Ic}$  并发射出许多幅值超过阈值 35 dB 的信号, 材料裂纹失稳扩展时爆发出强烈的声发射信号, 材料断裂的累积声发射能与宏观断裂能呈线性关系.

关键词: 声发射, 断裂韧性, 铝合金

PACC: 4385G, 4630N

## 1. 引 言

材料或构件在外载荷的作用下产生变形或断裂时, 会以弹性波的形式释放出具有一定特征的声发射信号, 这些信号反映了材料破坏过程中的一些物理特性, 并能被安置于材料表面的传感器所接收. 国内外一些科研工作者曾利用它们对碳钢进行了一些探索性研究, 并发现声发射参数与断裂韧性及材料中的塑性变形、显微裂纹的形成及扩展均有关系<sup>[1-5]</sup>. 本研究的目的即是通过材料中所发射出的应力波分析来研究材料裂纹扩展的特征, 并建立声发射特性与材料断裂能之间的定量关系.

## 2. 材料及试验方法

### 2.1. 试验材料

本研究所用材料为自行冶炼的高强度铝合金, 其化学成分为 Zn5.7%, Mg2.25%, Cu1.6%, Mn0.06%, Cr0.22%, Fe $\leq$ 0.12%, Si $\leq$ 0.10%, 其余为 Al.

### 2.2. 试样制备及处理

试样以 SL, LT 及 TS 三个方位从板材上切削加

工出来. 这里, 第一个字母代表垂直于主断裂面的方向, 第二个字母代表预期的裂纹扩展方向. L 为板材的长度方向(即轧制方向), S 为板材的厚度方向, T 为板材的宽度方向.

材料进行三种热处理, 分别为 (1) 直接将原始态材料时效至峰值强度 (2) 于 460 °C 再固溶 0.5 h, 20 °C 水淬, 然后进行峰值时效 (3) 于 510 °C 再均匀化 24 h, 20 °C 水淬, 然后进行峰值时效. 经过这些处理后可以使试验材料具有不同的物理力学性能.

采用矩形横截面表面经抛光的试样作拉伸试验.

采用螺栓加载的双悬臂梁 (DCB) 试样 (图 1) 进行稳态与失稳断裂试验. 试验时将两个相互顶着的螺栓拧紧, 使预制裂纹张开直至出现突然的裂纹扩展, 然后由线性夹式引伸仪测出的缺口嘴位移来计算加载线处的位移. 裂纹扩展后, 对试样再次疲劳加载以显露裂纹前沿位置, 因而预制的裂纹及最终的裂纹长度可在破断表面上测出.

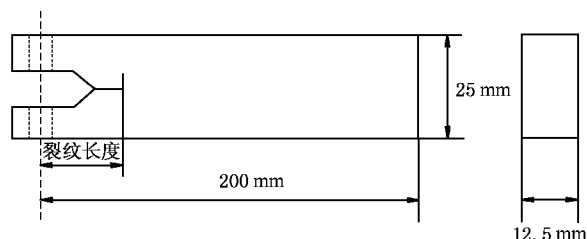


图 1 DCB 试样的外形尺寸

\* 国家高技术研究发展计划(批准号 2002AA304090)资助的课题.

† E-mail: zhubo@sdu.edu.cn

### 2.3. 试验设备及方法

本研究用 LOCAN-AT 系统进行声发射试验,试验系统如图 2 所示.传感器接收的声发射信号首先经预放大并在 100—300 kHz 间滤波以去除外来噪声,然后记录并确定出每一声发射事件的各种信号参数,如振幅峰值、计数及能量等.应变及裂纹张开位移也和声发射信号同时被记录下来,以系统所附计算机软件来分析记录结果.

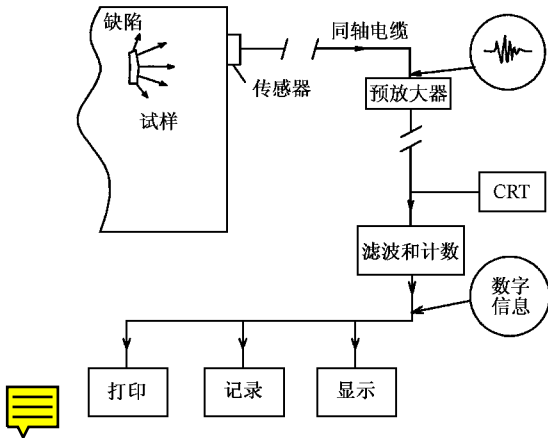


图 2 声发射试验系统

所谓计数是指振幅超过预先设定的阈值的信号数.描述声发射事件的参数如图 3 所示.声发射能量值代表整流后信号包络线下的面积.经计算机分析处理后系统给出的声发射参数主要有:累积事件数、累积计数、累积能量、各事件的波幅峰值.

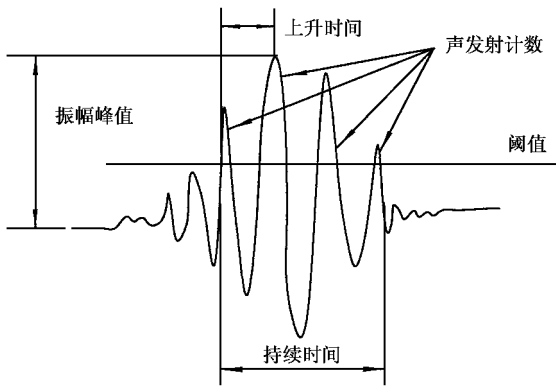


图 3 声发射事件参数描述

## 3. 试验结果及分析

### 3.1. 拉伸试样声发射特性

拉伸试验各试样的累积声发射计数与拉伸应变

的关系示于图 4(a)中,由图中可见,较脆合金在应变的早期阶段即产生较多的声发射信号.较韧材料在低应变时的声发射信号较少,仅当试样发生颈缩及最后断裂时才有大量信号出现.声发射事件的累积能与应变间也有相似关系(图 4(b)).较韧材料的试样在低应变时仅发射低能量信号.声发射事件的波幅峰值与应变的关系示于图 4(c)中.在低应变时事件具有较大的峰值,随应变的增加峰值有所降低,尔后急剧增加.

这种现象表明,较大的脆性相在较低的应变条件下破裂,而大量的较小脆性相仅当应变增加到一定程度后才破裂.当发生颈缩及最后断裂时应力波峰值又急剧增加达最大值.

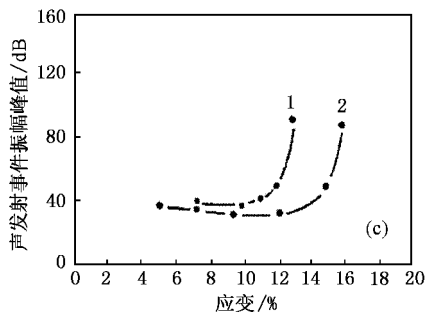
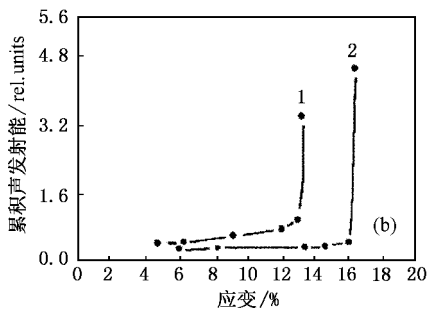
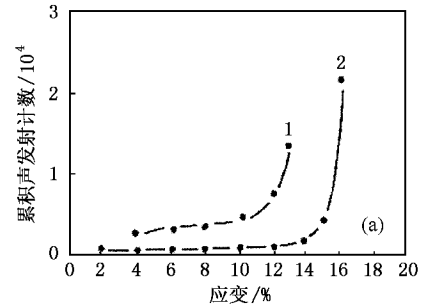


图 4 拉伸试样的声发射 (a)为累积声发射计数与应变的关系 (b)为声发射事件累积能与应变的关系 (c)为声发射事件波幅峰值与应变的关系.曲线 1 为 ST,RS,曲线 2 为 L,RS.RS 表示再固溶处理 (各图同)

### 3.2. 带预制疲劳裂纹的 DCB 试样断裂声发射特性

带预制疲劳裂纹的 DCB 试样的断裂与拉伸试样的断裂不同, 这种差异是由在裂纹尖端处大的三向拉伸应力引起的, 试样的稳态穿晶裂纹扩展后, 失稳沿小角度晶界断裂<sup>[6]</sup>.

声发射试验结果如图 5 所示. 其中图 5(a) 显示在稳态裂纹扩展范围内声发射计数与应力强度因子  $K$  之间的关系(图中超过虚线的  $K$  值并不严格满足平面应变条件); 图 5(b) 显示幅值在 35—45 dB 及 45—55 dB 范围内的声发射事件数与  $K$  之间的关系; 图 5(c) 显示在较韧及较脆试样中稳态裂纹扩展时声发射事件峰值振幅分布的比较; 图 5(d) 显示声发射累积能与  $K$  之间的关系(曲线中虚线部分表示裂纹的失稳扩展).

对于给定的试样, 在稳态裂纹扩展阶段累积声发射计数与断裂韧性  $K$  呈线性关系(图 5(a)). 幅值

高于阈值的声发射起始于  $K_{1c}$ , 声发射信号随  $K$  的增高而急剧增加, 直至最大值  $K_{max}$ . 稳态裂纹扩展随材料韧性的增加而增加. 图 5(a) 中各曲线的斜率相差不大, 对较脆的材料  $K_{max}$  值仅略大于  $K_{1c}$ .

对于给定的试样, 在稳态裂纹扩展阶段应力波峰值分布基本上不发生变化. 幅值在 35—45 dB 的信号事件数对幅值在 45—55 dB 的事件数之比, 在整个稳态裂纹扩展过程中基本保持不变(图 5(b)). 脆性材料的大多数声发射事件的应力波峰值比韧性材料大多数事件的峰值要高(图 5(c)). 稳态与失稳裂纹扩展的声发射事件的累积能量示于图 5(d). 与声发射计数相似, 在稳态裂纹扩展范围内累积能与  $K$  呈线性关系. 当  $K$  达临界值  $K_{max}$  时, 随裂纹的失稳扩展, 能量瞬时增加. 由于速度极快而不可能分解其发射的细节, 只能记录到累积能. 与其它的实验观察相符, 随材料的韧性降低失稳裂纹扩展所发射的能量占总发射能的比例也增加(图 5(d)).

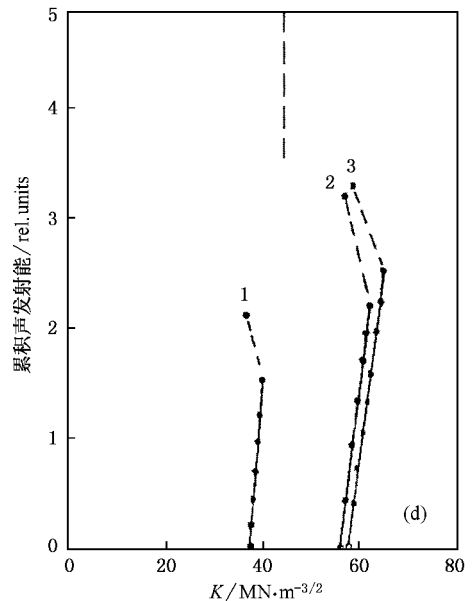
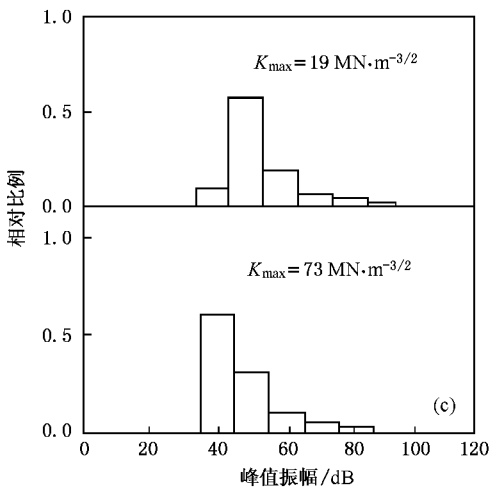
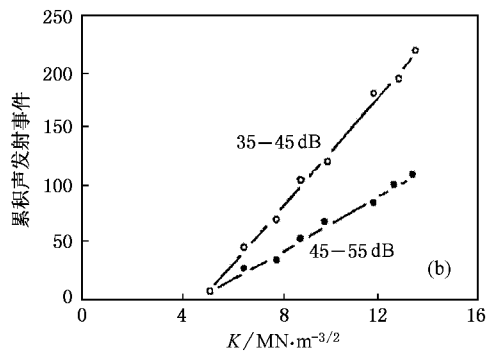
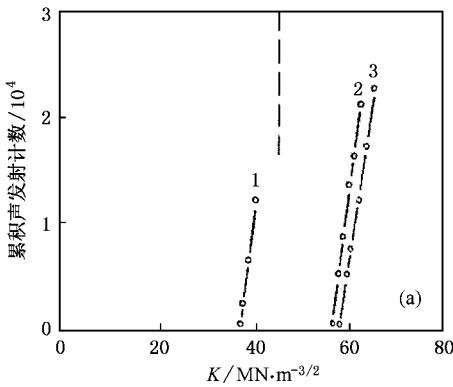


图 5 在预制裂纹试样的试验中幅值超过阈值 35 dB 的声发射信号 (a) 声发射计数与  $K$  的关系 (b) 声发射事件数与  $K$  的关系 (c) 声发射事件峰值振幅分布的比较 (d) 声发射累积能与  $K$  的关系. 曲线 1 为 SL, RS; 曲线 2 为 LT, RS; 曲线 3 为 TS, RS

示于图 5(d) 中的结果显示, 声发射的累积能可能与宏观断裂能有某种关系. 为了弄清这一点, 作出在稳态裂纹扩展末端记录的声发射累积能与断裂能  $W_s$  的关系图, 如图 6 所示. 由图 6 可见, 稳态裂纹扩展的声发射累积能与  $W_s$  成比例. 同样, 失稳扩展的声发射累积能 (总的累积能减去稳态扩展末端的累积能) 也与宏观失稳断裂能  $W_u$  成比例, 其结果也示于图 6 中.

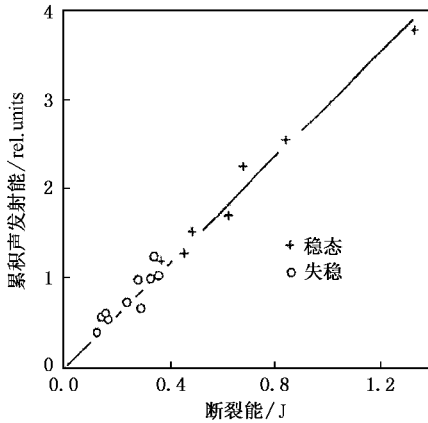


图 6 稳态与失稳裂纹扩展的声发射事件累积能与宏观断裂能之间的关系

如图 6 所示, 不论稳态或失稳断裂, 其声发射累积能均与宏观断裂能呈线性关系. 如断裂能以焦耳为单位, 对本研究所用声发射系统而言, 它们之间的比例常数约为  $3 \times 10^4$ . 这意味着断裂时发射的应力波的能量在稳态与失稳两种情况中与宏观断裂能均有相同关系, 而与断裂机理无关. 图 6 所示关系只是相对的, 这是因为声发射能量不能以绝对单位来表示, 其数值取决于试验方法及所用设备.

### 3.3. 讨 论

拉伸试验结果表明较大脆性相在低应变下即开裂, 这与低应变下出现一些具有较高应力波幅值的声发射信号有关(图 4). 在试样出现颈缩及最终断裂前, 随应变量的增加, 大量的较小脆性相也开始破裂, 并产生许多幅值较小的应力波信号. 带预制裂纹的 DCB 试样的断裂过程与拉伸试样有所不同, 在稳态裂纹扩展前未见大于 35 dB 的应力波信号出现, 低幅峰值应力波的信号数与高幅峰值应力波信号数之比在裂纹扩展过程中基本上保持不变(图 5(b)), 这是因为在拉伸试验中, 声发射同时产生于整个材料内, 而在有预制裂纹的 DCB 试样中声发射仅出现于扩展裂纹前沿部分, 脆性相仅当进入扩展裂纹前沿的“过程区”(或称“剧烈应变区”)时才开裂.

## 4. 结 论

- 1) 一些高强度铝合金的断裂特性可用声发射试验来进行分析.
- 2) 材料的断裂韧性与材料中脆性相的含量及取样方位有关. 粗大脆性相的开裂可从声发射信号分析中反映出来.
- 3) 用带有预制疲劳裂纹的试样进行试验时, 一个长度很短的稳态裂纹扩展起始于  $K_{IC}$ , 并有幅值超过阈值 35 dB 的声发射信号出现. 在稳态裂纹扩展阶段声发射的累积计数及累积能与施加的应力强度因子呈线性关系.
- 4) 失稳断裂时爆发出强烈的声发射信号, 由于信号产生速度太快而难以分辨出其中的细节.
- 5) 稳态及失稳断裂的累积声发射能均与宏观断裂能有相同的线性关系.

[1] Du Q H 1994 *Handbook of Engineering Mechanics* (Beijing: Higher Education Press) pp2961—2971 (in Chinese) [杜庆华 1994 工程力学手册(北京:高等教育出版社)第 2961—2971 页]

[2] Yuan Z M *et al* 1985 *Technology and Application of Acoustic Emission* (Beijing: Mechanical Industry Press) pp50—62 (in Chinese) [袁振明等 1985 声发射技术及其应用(北京:机械工业出版社)第 50—62 页]

[3] Guo Y Y *et al* 1997 *J. Comp. Mater.* 2 58 (in Chinese) [郭艳阳等 1997 复合材料学报 2 58]

[4] Liu H K *et al* 2000 *J. Mater. Sci.* 35 3389

[5] Fang C K *et al* 1999 *NDT Sci. Tech.* 16 4

[6] Cai H S 1991 *Ph. D. Thesis* (Newcastle: University of Newcastle) pp102—106

# Studies on the relationship between acoustic emission characteristics and fracture toughness of materials \*

Zhu Bo<sup>1)</sup> Cai Xun<sup>2)</sup> Wang Cheng-Guo<sup>1)</sup> Cai Hua-Su<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> *School of Material Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China*

<sup>2)</sup> *School of Computer Science and Technology, Shandong University, Jinan 250014, China*

( Received 26 December 2002 ; revised manuscript received 10 April 2003 )

## Abstract

The correlation between acoustic emission characteristics and their fracture toughness has been investigated in this paper based on the study of high-strength aluminum alloy cracking process by using advanced acoustic emission experiment system and smooth tensile specimens as well as DCB specimens with premade cracks. Experimental results showed that the specimens emitted strong signals with an amplitude above 35 dB when a stable crack extension started at  $K_{1C}$ . Stronger and more complicated acoustic emission signals were found during unstable crack extension, and the cumulative energy of acoustic emission events were found to be linearly related with the macroscopic fracture energy.

**Keywords** : acoustic emission , fracture toughness , aluminum alloy

**PACC** : 4385G , 4630N

---

\* Project supported by the National High Technology Development Program of China( Grant No.2002AA304090 ).