

# 陶瓷材料破坏的声发射特性

## Acoustic Emission Characterization of Ceramic Fracture

任会兰, 宁建国, 王 颖

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

REN Hu+lan, NING Jian-guo, Wang Ying

(State Key Laboratory of Explosion Science and

Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**摘要:** 采用先进的多通道声发射系统监测了 AD95 氧化铝陶瓷在三点弯曲加载下的破坏过程。对有缺口和无缺口两种试件的声发射能量数, 事件数, 振铃数随时间变化特征的对比分析, 讨论了预制缺口对材料损伤破坏过程和断裂的影响。声发射幅值随时间的变化曲线直接反映了材料内微裂纹成核前期, 成核, 扩展至宏观裂纹形成和断裂过程。实验结果表明, 声发射参数可以表征材料的内部损伤演化过程。

**关键词:** 声发射; 陶瓷材料; 三点弯曲实验

**中图分类号:** O347.1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2009)02-0054-04

**Abstract:** Advanced multi-channels acoustic emission system was used to study the fracture process of ceramic subjected by three-point-bending. Compared with the acoustic emission (AE) signals from none-edge-notched and single-edge-notched specimen of ceramic, the pre-made notch played important role on the damage and fracture of ceramic. The results were shown that amplitude of AE changing with loading time reflected the damage state of ceramic, such as the nucleation, the growth, the interaction, the coalesce of micro-cracks and occurrence of macro-cracks. It is indicated that AE technique has been an important means in the studies of the damage and fracture to materials.

**Key words:** acoustic emission; ceramic; three-point-bending experiment

固体物质在应力作用下发生塑性变形或材料中裂纹产生与扩展时, 其内部因为从不稳定的高能量应力集中状态快速过渡到稳定的低能量状态, 在此平衡过程中释放出来的多余能量会以弹性应力波形式表现, 从而产生声发射现象<sup>[1]</sup>。声发射技术由于具有实时、动态、可测、方便等特点, 在航空器、海洋石油平台的检测、埋地管道的泄露检测等工程应用中发挥了重要作用。声发射作为一种研究材料力学性能和断裂机理的手段, 可以检测材料中裂纹的产生、扩展、导致断裂这样的动态过程, 在混凝土、岩石等准脆性材料的损伤、断裂中得到了广泛的应用<sup>[2-5]</sup>。

陶瓷材料是典型的脆性材料, 其内部的微裂纹形成有很多种, 如材料在烧结过程中的原始气孔和微裂纹, 或者由于基体与夹杂物之间的热膨胀系数和弹性模量不匹配而形成的微裂纹, 这些微裂纹一般比金属或复合材料内的裂纹小 1~2 个数量级, 而陶瓷的脆性破坏主要是由大量的微裂纹成核和扩展引起<sup>[6,7]</sup>。陶瓷材料在破坏前的应变很小, 但开裂时的声发射具有幅度高而且容易与噪音相区别的特点, 从而声发射技

术在陶瓷材料研究领域具有广阔的应用背景。

本研究利用 DISP 多通道声发射系统对陶瓷试件在三点弯曲载荷作用下的破坏过程进行了监测, 对陶瓷材料破坏过程中的声发射特性进行了详细的分析, 力图寻找陶瓷破坏过程的声发射参数与损伤之间的变化特性, 从而为陶瓷材料损伤本构模型的建立、陶瓷装甲材料的结构设计和选材、抗侵彻能力的提高提供分析方法。

### 1 实验原理

陶瓷材料在外载作用下发生变形和破坏, 材料内部微裂纹在扩展时释放能量, 形成声源而产生声发射现象。利用声发射源发出的弹性波, 经介质传播到达被检测体表面, 引起表面的机械振动。声发射传感器将表面的瞬态位移转换成电信号, 该信号经放大、处理后, 其波形和特性参数被纪录与显示。最后, 经数据的分析与解释, 评定出声发射源的特性(见图 1)。

实验试件为 AD95 氧化铝陶瓷, 由质量分数为

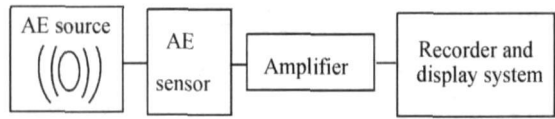


图 1 声发射技术原理  
Fig 1 Scheme of acoustic emission

95%的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 5%的  $\text{CaO}$  和  $\text{SiO}$  烧结而成, 密度为  $3.69\text{g}/\text{cm}^3$ 。试件尺寸参照国家标准中关于三点弯曲试件的规定, 基本尺寸为  $40\text{mm} \times 10\text{mm} \times 5\text{mm}$ , 其与横截面垂直的试件两相对侧面之间的不平行度小于  $0.02\text{mm}$ , 横截面两相邻边棱之间夹角为  $(90 \pm 0.5)^\circ$ , 表面粗糙度按国家标准规定不大于  $3.2\mu\text{m}$ 。加载中设计了光滑无缺口和预制缺口两种试件, 预制缺口试件在试件受拉面跨中位置有一切口, 深度约为  $5\text{mm}$ 。

2 实验方法和系统

三点弯曲实验的载荷作用点确定, 损伤形成和发展的区域相对集中, 损伤模式和破坏机理相对简单, 得到的声发射信号比较单纯, 是利用声发射技术研究材料损伤与断裂的首选加载方式。因此, 本实验中对陶瓷试件在材料实验机上进行三点弯曲加载。

实验系统分为两部分: 一是加载系统, 用来进行三点弯曲实验的力和位移控制。加载设备为 WDW3050 型微机控制电子万能实验机, 该实验机最大载荷为  $50\text{kN}$ , 加载速率在  $0.05 \sim 200\text{mm}/\text{min}$  范围内可调并保持良好的线性。实验系统如图 2 所示。

二是声发射监测系统。实验中采用的是 DISP 4 通道声发射系统。该系统采用插卡式并行处理结构,

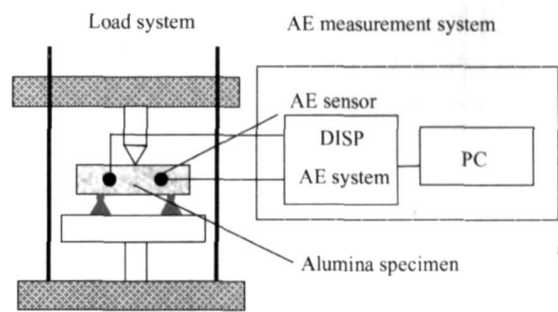


图 2 实验系统示意图  
Fig 2 Schematic of experimental setup

由 PCI 总线的 PC 机、前置放大器、传感器和多个并行处理的 PCI-DSP-4 卡构成。实验采用压电传感器, 频率为  $150\text{kHz}$ , 滤波带宽为  $100 \sim 400\text{kHz}$ , 灵敏度为  $65\text{dB}$ 。两个前置放大器分别连接在两个传感器上, 滤波带宽  $100 \sim 400\text{kHz}$ , 为传感器提供  $40\text{dB}$  的增益, 有效排除环境噪声。

3 结果分析

声发射系统所收集到的数据包括声发射事件数、振铃计数、信号能量、持续时间、幅度等信号特征值, 分别从不同的角度反映了材料内细观损伤的演化历程, 经系统软件分析, 其结果以更直观的图表形式显示出来。

3.1 活动性显示

当采用活动性显示时, X 轴是时间轴, Y 轴可以是撞击信号、定位的事件数或总能量的显示, 表明了声发射事件发生的时间以及活动性大小。图 3, 4 分别为无缺口陶瓷试件和预制缺口陶瓷试件得到的声发射活

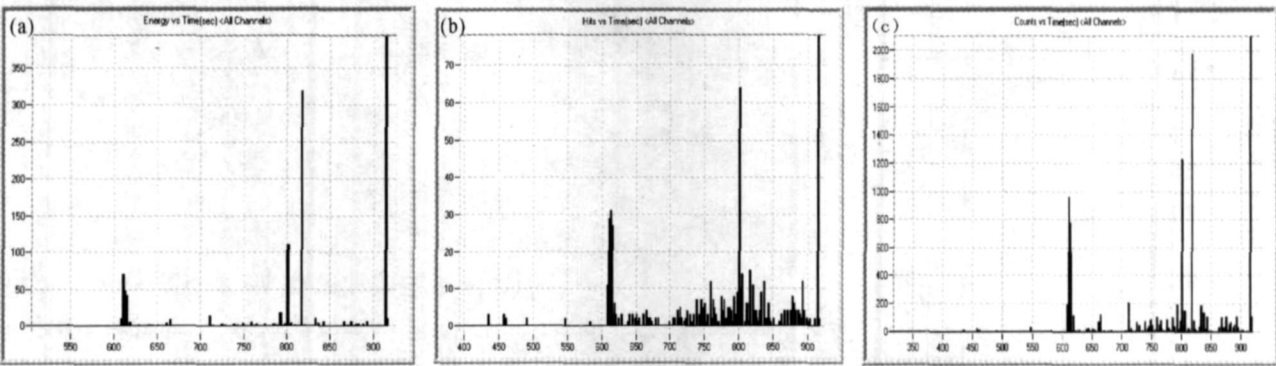


图 3 无缺口试件声发射活动性显示 (a) 声发射能量; (b) 声发射事件数; (c) 声发射振铃数  
Fig 3 AE activity of specimen ceramic (a) AE energy; (b) AE hit; (c) AE count

动性显示。

对于无缺口试件, 见图 3, 在刚开始的  $400\text{s}$  内几乎没有声发射发生。从  $420\text{s}$  左右开始, 出现声发射现

象且数目逐渐增多, 在  $615\text{s}$  附近达到第一个峰值, 此时, 能量 (Energy)、振铃数 (Counts)、事件数 (Hits) 都有了一个突跃。  $620 \sim 780\text{s}$  之间声发射现象又趋于平

稳; 在 820s 时声发射能量、事件数和振铃数突然增加, 比第一峰值高许多。在第二次峰值之后, 声发射信号又趋于短暂的平稳(约 830~ 910s), 随后三个信号特征量均急速地增加, 920s 达到峰值, 试件在此时断裂。

同无缺口试件相比, 预制缺口试件声发射活动性(见图 4)有如下特征:

(1) 信号能量、振铃计数明显减少; 无缺口总振铃计数为 67712 个, 而预制缺为 41547 个。声发射事件数增多主要是由于在预制缺口处容易形成应力集中而产生微小裂纹, 产生声发射事件, 但释放的能量很少。

(2) 试件破坏之前声发射信号特征参数的突跃并

没有无缺口试件中明显。虽然事件数在 460s 附近有个突跃, 振铃计数在 540s 左右有个峰值。但 460s 处, 事件数很多, 振铃计数较少, 能量也比较低, 说明声发射检测到的主要是噪声信号或是十分小的声发射信号; 在 540s 左右, 振铃计数和信号能量都比较高, 但是事件数比较少, 表明此时的信号持续时间比较长。

(3) 无缺口试件中从声发射发生到断裂持续时间约为 300s, 而有缺口试件中约为 170s。声发射实验的数据表明, 在预制缺口试件中, 微缺陷的成核、长大、贯穿的发展过程是非常迅速的, 在微裂纹急速成长之后, 试件瞬间脆性断裂。

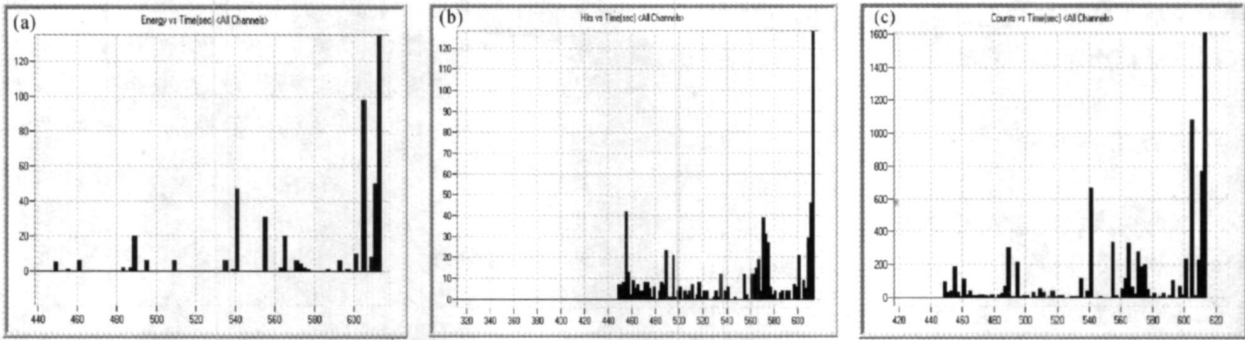


图 4 预制缺口试样声发射活动性显示 (a) 声发射能量; (b) 声发射事件数; (c) 声发射振铃数  
Fig. 4 AE activity of specimen ceramic with single-edge notched (a) AE energy; (b) AE hits; (c) AE counts

3 2 损伤特性分析

图 5, 6 记录了无缺口试件的外加载荷和加载过程中信号幅度随时间的分布。图 6 中的每一个小点代表一个声发射事件, 点的密度直观的反映了声发射信号出现的频率, 反映了无缺口试件在受载时的损伤程度。信号幅度集中在 40~ 50dB 区间。试件断裂时产生大量高幅值信号, 幅值上升非常迅速, 最高达到 95dB。

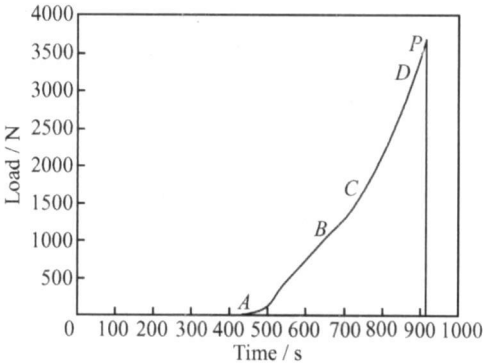


图 5 载荷-时间曲线  
Fig. 5 Loading vs time

幅值-时间分布图形直接地反映了试件内部损伤的起始、演化、扩展直至断裂的过程, 大致可分以下几

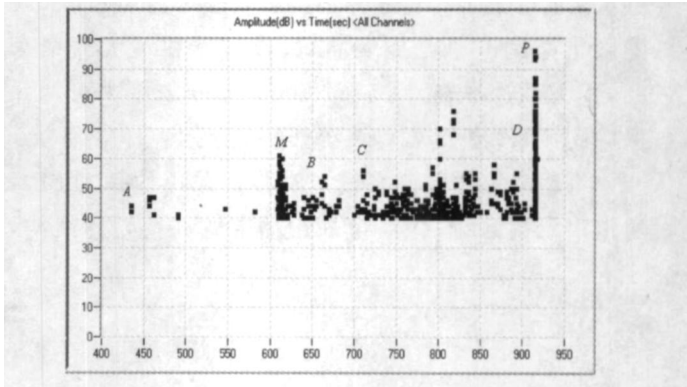


图 6 幅值-时间曲线  
Fig. 6 Amplitude vs time

个阶段:

阶段 I : 微缺陷成核前期(A 点之前)。此时载荷很小, 未出现典型的声发射信号, 说明材料中的微缺陷并没有被诱发。

阶段 II : 微缺陷成核阶段(AB 段)。该阶段只出现零散的几个声发射信号。此阶段内声发射信号的典型特点是脉冲幅值小, 能量小, 声发射事件数稀疏。随着局部应力的增加或内应力的产生, 陶瓷内部的微缺陷, 比如气孔缺陷或杂质等在局部应力作用下被诱发

成核, 萌生出微裂纹, 即  $M$  点, 此时声发射的各个特征量也第一次达到一个小峰值。

阶段 III 微裂纹滞带期( $BC$  段)。从图 6 可看出, 事件出现频率增多, 密度增大, 但并没有剧烈地增加。这表明, 微裂纹在材料中萌生以后, 虽然外加载荷继续增加, 但是微裂纹出现了短暂的停滞状态, 并没有进一步有比较大的发展。

阶段 IV: 微裂纹扩展期( $CD$  段)。在  $C$  点载荷-时间曲线斜率出现了突变,  $CD$  段的斜率基本保持不变。表明该阶段内微裂纹快速扩展, 产生了大量的高幅信号, 声发射信号跨过门槛的振铃计数激增。

阶段 V: 突然断裂期。随着载荷的进一步增加, 微裂纹扩展成宏观裂纹, 之后便非稳定扩展。最终导致突然断裂(即点  $P$ ), 释放大量的弹性能, 导致声发射信号幅值达到最大值。

由以上五个阶段可以看出, 在陶瓷的断裂过程中, 微裂纹的成核、扩展及贯穿都会引起声发射特征参数的相应变化。声发射幅值-时间图形和载荷-时间曲线的变化趋势是一致的, 这是因为实验数据是来自于同一个试件, 虽然参数的定义不一样, 但都携带着声发射源的信息, 反映了试件内部损伤演化过程。

## 4 结论

(1) 本研究利用声发射技术, 对陶瓷试件在三点弯曲载荷下的破坏断裂过程进行了监测, 得到了丰富的声发射信号。

(2) 通过对声发射特征参数的采集、统计和分析, 研究了陶瓷试件内部损伤演化、发展至宏观断裂阶段的声发射特征表现; 结合载荷时间曲线, 声发射幅值分布直

接反映了材料内微裂纹的成核、扩展和形成宏观裂纹至断裂的破坏过程, 可以描述材料内部的损伤状态。

(3) 声发射技术作为一种有效的动态监测手段, 对陶瓷内部损伤演化过程可以有效地监测和观察, 为陶瓷材料的广泛应用提供保证。

## 参考文献

- [1] 腾山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭译. 北京: 冶金工业出版社, 1997.
- [2] WU Ke-ru, CHEN Bing. Study of the influence of aggregate size distribution on mechanical properties of concrete by acoustic emission technique[J]. Cement and Concrete Research, 2001, (31): 919-923.
- [3] TAKESHI WATANABE, SAYAKA NISHIBATA. Compressive failure in Takeshi watanabe concrete of recycled aggregate by acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2007, (21): 470-476.
- [4] 夏明安, 杨虹. 声发射在陶瓷材料试验中的应用[J]. 湖北工学院学报, 2002, 17(4): 94-96.
- [5] 黄志鹏. 单轴压缩下岩石声发射与损伤变量关系试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(增刊): 784-787.
- [6] NING Jian-guo, REN Hui-lan, LI Ping. Mechanical behaviors and damage constitutive model of ceramics under shock compression[J]. Acta Mech Sin, 2008, (24): 305-315.
- [7] LONGY F, CAGNOUX J. Plasticity and microcracking in shock-loaded alumina[J]. Journal American Ceramics Society, 1989, 72(6): 971-979.

基金项目: 国家自然科学基金资助(10772027, 10632080)

收稿日期: 2007-03-15; 修订日期: 2008-11-06

作者简介: 任会兰(1973—), 女, 副教授, 主要从事材料动力学特性、损伤本构模型的研究, 联系地址: 北京理工大学宇航科学技术学院(100081), E-mail: huilanren@bit.edu.cn

(上接第 53 页)

- [11] SUGIMOTO K, NAGASAKA A, KOBAYASHI M, et al. Effects of retained austenite parameters on warm stretch-flangeability in TRIP-aided dual phase sheet steels[J]. ISIJ Inter, 1999, 39(1): 56-63.
- [12] 张迎晖, 康永林, 于浩, 等. TRIP 钢变形奥氏体连续冷却过程的组织相变及组织研究[J]. 金属热处理, 2005, 30(12): 79-81.
- [13] GIRAULT E, JACQUES P, HARLET P, et al. Metallographic methods for revealing the multiphase microstructure of TRIP-assisted steel[J]. Mater Character, 1998, 40: 111-118.
- [14] SUGIMOTO K, KOBAYASHI M, SHIRSAWA H. Effects of second phase morphology on retained austenite morphology and tensile properties in a TRIP-aided dual-phase steel sheet[J]. ISIJ Inter, 1993, 33(7): 775-782.

- [15] HANZAKI A Z, HODGSON P D, YUE S. Ferrite formation characteristics in S+Mn TRIP steels[J]. ISIJ Inter, 1997, 37(6): 583-589.
- [16] 雍岐龙, 孙新军, 刘清友, 等. 薄板坯连铸连轧时夹杂物在奥氏体中形成与控制的理论考虑[J]. 特殊钢, 2005, (1): 1-5.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50334010)

收稿日期: 2007-09-24; 修订日期: 2008-04-01

作者简介: 张迎晖(1968—), 女, 教授, 博士, 现从事金属材料加工工艺、组织及性能研究, 联系地址: 江西省赣州市红旗大道 86 号江西理工大学 254# 信箱(341000), E-mail: zyh0727@sohu.com