

文章编号:0253-9721(2010)03-0027-05

# 聚乙烯自增强复合材料损伤行为的声发射特征

王旭, 晏雄

(东华大学 纺织面料技术教育部重点实验室, 上海 201620)

**摘要** 为揭示聚乙烯自增强复合材料损伤机制的声发射(Acoustic Emission, AE)特征,分别对低密度聚乙烯(LDPE),单层板的轴向和横向进行准静态拉伸破坏实验,诱导产生基体损伤、界面损伤和纤维损伤并讨论了损伤机制的AE特征。实验表明,不同损伤机制的AE特征具有明显的差异。基体塑性变形的AE幅度和延时分别为40~60 dB、低于800  $\mu\text{s}$ ;基体断裂分别为75~90 dB、2 300~2 600  $\mu\text{s}$ 。不同程度界面损伤的AE幅度和延时分别为40~60 dB、低于500  $\mu\text{s}$ 、40~80 dB、500~2 000  $\mu\text{s}$ 、高于90 dB、3 000~7 000  $\mu\text{s}$ 。单纤维断裂的AE幅度和延时分别为40~75 dB、低于1 000  $\mu\text{s}$ ;纤维束断裂的分别为高于90 dB、1 500~2 000  $\mu\text{s}$ 。

**关键词** 超高分子量聚乙烯纤维;声发射;聚乙烯自增强复合材料;损伤机制

中图分类号:TB 332 文献标志码:A

## Acoustic emission features on damage behaviors of PE self-reinforced composites

WANG Xu, YAN Xiong

(Key Laboratory of Textile Science & Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract** The purpose of the present study is to investigate acoustic emission features on damage mechanisms of PE self-reinforced composites. According to quasi-static tensile test on LDPE resin, axial and transverse of unidirectional laminate, matrix damage, interface damage and fiber damage were activated and their AE features were investigated. Experiment revealed that various damage mechanisms resulted in distinct difference in AE features. Matrix plastic transformation and matrix fracture generated AE signal with amplitude 40~60 dB duration less 800  $\mu\text{s}$  and amplitude 75~90 dB duration 2 300~2 600  $\mu\text{s}$  respectively. Based on damage level, interface damage generated AE signals with 40~60 dB, less than 500  $\mu\text{s}$ , 40~80 dB, 500~2 000  $\mu\text{s}$  and over 90 dB, 3 000~7 000  $\mu\text{s}$ , respectively. Single fiber breakage and fiber bundle breakage generated AE signals with amplitude 40~75 dB, duration less than 1 000  $\mu\text{s}$  and over 90 dB, duration 1 500~2 000  $\mu\text{s}$ , respectively.

**Key words** UHMWPE fiber; acoustic emission; PE self-reinforced composites; damage mechanism

超高分子量聚乙烯(Ultra High Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE)纤维具有密度小,轴向比强度、比模量高,抗冲击,耐腐蚀等优点,广泛应用于航空、航海用各类绳索,防弹材料,复合材料的增强材料等。由于UHMWPE纤维表面的非极性,导致它与基体之间的界面黏结强度低,限制了其作为复合材料增强体的应用。1975年Capiati等<sup>[1]</sup>提出“同种异性态”的概念,有效改善了聚乙烯纤维和基体

的界面黏结性能。此后Mead、Marais、Rolel和Amer等<sup>[2-5]</sup>学者基于此概念开展了聚乙烯自增强复合材料的成型工艺、力学性能方面的研究。

复合材料的损伤过程比单一材料复杂,通常表现为基体开裂、界面开裂、纤维断裂和层间分离等损伤形式。对复合材料损伤行为的研究是安全使用的基础。由于材料的损伤过程伴随着局部能量的快速释放而产生声发射(Acoustic Emission, AE)现象。

目前,AE 技术已经成为研究复合材料损伤和失效机制的重要手段之一。已有的研究结果<sup>[6-10]</sup>表明,对复合材料损伤过程中产生的 AE 信号进行分析,可以建立 AE 特征与损伤行为的关系。对碳纤维<sup>[6,11]</sup>、玻璃纤维<sup>[12]</sup>增强复合材料和陶瓷基复合材料<sup>[13]</sup>等研究发现,断裂应变较小的纤维和脆性基体复合材料,损伤过程伴随着大量的 AE 事件。聚乙烯自增强复合材料是一种热塑性基体复合材料,其损伤行为和脆性基体复合材料的显著差异表现在断裂应变相对较大,对其损伤行为 AE 特征的研究尚不多见<sup>[14-15]</sup>。本文对纯基体和超高分子量聚乙烯/低密度聚乙烯(UHMWPE/LDPE)单向层合板进行拉伸测试,分别诱导产生基体损伤、界面损伤和纤维断裂,结合材料的力学性能讨论了损伤行为和 AE 信号特征的关系,为 AE 技术在聚乙烯自增强复合材料损伤机制研究和安全性能评估方面提供参考。

## 1 实验

### 1.1 原料和试样

基体材料为 LDPE 薄膜,厚度为 0.05 mm,密度为 0.92 g/cm<sup>3</sup>,熔点为 105 ℃。增强材料为 UHMWPE 纤维(宁波大成新材料股份有限公司),纤维束规格为 145 tex/240 f,密度为 0.97 g/cm<sup>3</sup>,单丝直径为 28 μm,纤维强度为 3.013 GPa,模量为 91.25 GPa,断裂应变为 3.3%,熔点为 140 ℃。按照熔融模压法制作 LDPE 树脂和单层板。LDPE 树脂制作工艺参数为:温度 120 ℃,压力 1.0 MPa,加压时间 5 min。单向层合板工艺参数为:温度 120 ℃,压力 1.5 MPa,加压时间 10 min。根据实验要求制作 3 类拉伸试样:LDPE 基体试样、平行载荷方向的 0°单层板、垂直载荷方向的 90°单层板,长×宽×高均为 180 mm×20 mm×0.8 mm。

### 1.2 声发射实验

将试样在华龙 WDW-20 型材料试验机上分别重复进行 5 次拉伸测试,速度:LDPE 树脂为 20 mm/min;0°、90°单层板均为 1 mm/min。美国物理声学公司 PCI-2 型 AE 系统对破坏全程进行了 AE 信号的采集。2 个 R15 型谐振式传感器,距离为 60 mm,用真空脂作为耦合剂沿试样中心位置线定位对称布置,并用松紧带固定,测试装置如图所示 1。

实验前测试环境噪声小于 35 dB,设定 AE 采集系统阈值设置为 40 dB。对材料进行断铅模拟信号

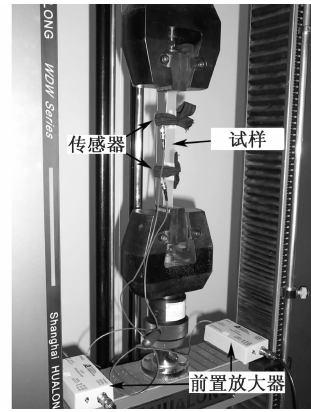


图 1 声发射测试系统线定位示意图

Fig. 1 Scheme of AE system with linear location

测试,根据首次跃过门槛的 AE 信号在 2 个传感器的时差,测量出 AE 信号在试样中的波速,其中 LDPE 为 2 800 m/s,0°单层板为 3 470 m/s,90°单层板为 2 780 m/s。通过线定位方式,记录发生在传感器之间的 AE 信号供统计分析使用。设定 AE 系统的参数如下:峰值鉴别时间 50 μs;波击鉴别时间 100 μs;波击闭锁时间 300 μs;前置放大器 40 dB。

## 2 结果和讨论

### 2.1 声发射波形信号的参数表征

AE 系统将弹性波位移通过压电传感器转换为电压波形信号并通过数字化处理,提取 AE 特征参数,如幅度、波击计数、持续时间、上升时间、能量等,如图 2。不同损伤行为可以通过上述参数进行表征<sup>[14]</sup>。

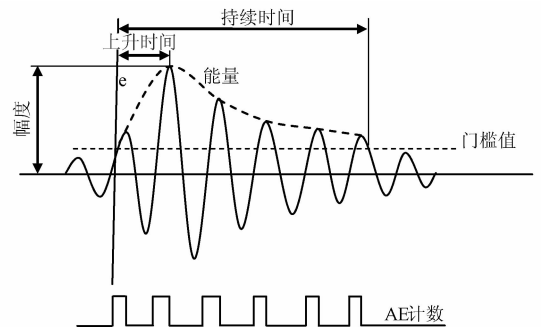


图 2 声发射波形信号简化参数示意图

Fig. 2 Scheme of AE parameters

### 2.2 试样损伤过程中的声发射响应

AE 累积计数是反映 AE 活动性的主要指标,其变化反映了材料损伤程度的演化。图 3 显示了试样在损伤过程中的 AE 响应。

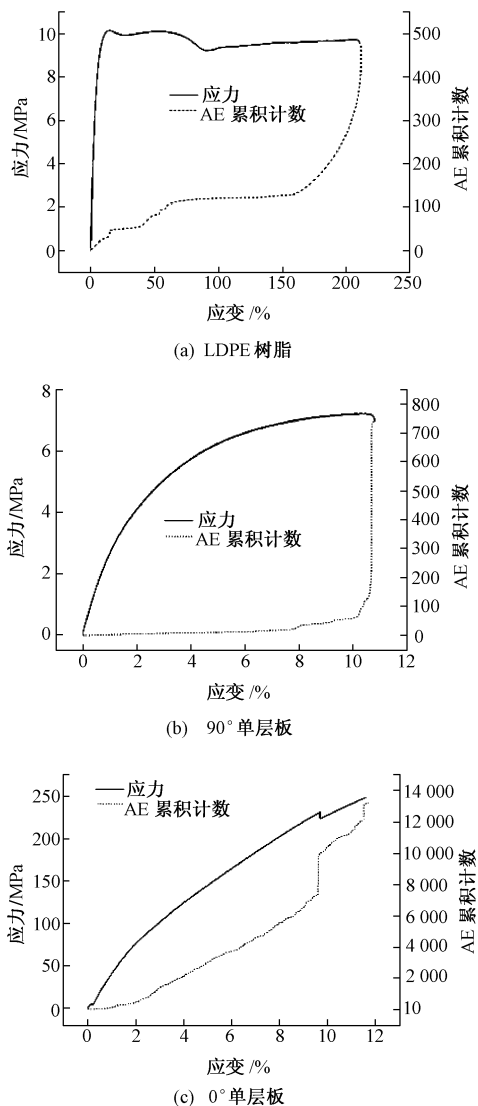


图3 试样损伤过程的声发射响应

Fig. 3 AE response of specimens during damage process.

(a) LDPE; (b) 90° laminate; (c) 0° laminate

图3(a)显示了基体LDPE屈服、断裂应力分别为9.2 MPa和8.8 MPa,断裂应变在220%附近,具有很高的柔韧性,AE活动性明显较低。AE累积计数伴随着损伤过程的发展而变化,应变达到70%时,材料开始出现“颈缩”现象,塑性变形加大,此后AE累积计数几乎没有增加,说明大量的塑性变形释放了变形过程中的应变能,只有少部分以声发射方式释放。应变达到160%以后,材料出现局部出现“白化”并伴有多条垂直于载荷方向的条纹,此时AE累积计数快速增加,说明材料的损伤进一步加大,最终材料在损伤最严重的部位发生韧性断裂。

图3(b)显示了90°单层板断裂应力、断裂应变分别为7.1 MPa和11%,AE累积计数较少且几乎

全部产生于断裂应变附近,说明损伤行为是集中和突发的。根据断裂应力小于基体断裂应力和纤维表面非极性导致的弱界面黏结性能可以推测,界面损伤是导致材料最终断裂的因素。90°单层板的断口位置全部发生在界面处的实验结果,也证明了弱的界面黏结性能是导致其最终断裂的原因。

图3(c)显示了0°单层板的断裂应力、断裂应变分别为250 MPa和11.7%,拉伸曲线基本呈线性,AE累积计数明显高于基体LDPE和90°单层板,说明伴随着材料的损伤过程有大量的AE事件产生。AE响应能较好地反映材料的损伤过程。当应变超过2%后,随着应力的平稳增加,AE累积计数相应的平稳增加,这一阶段存在少量的损伤,如纤维束中由于各单纤维受力状态不平衡导致少量单纤维的随机断裂,以及单纤维断裂处发生界面的损伤等。随着载荷的不断增大,单纤维断裂现象不断增多,损伤程度逐渐加大。应变在9.6%时,应力和AE累积计数同时发生波动,说明局部产生了大量纤维的断裂,随后应力重新分布,载荷继续增加,直至最终材料整体断裂。损伤行为主要包括纤维断裂和界面损伤,其中纤维断裂是导致0°单层板最终破坏的主要因素。AE响应较好地反映了材料损伤的整个过程。

### 2.3 损伤行为的声发射特征

根据力学性能和实验观察,基体试样的拉伸破坏诱导出基体塑性变形和基体断裂2种损伤模式。90°单层板的拉伸破坏诱导出界面脱黏模式,0°单层板的拉伸破坏诱导出纤维断裂和界面损伤。根据损伤行为的发展,分别对AE特征进行了分析。

图4示出试样损伤过程的AE信号幅度和延时特征。

图4(a)示出了LDPE试样破坏产生的56个AE信号,幅度主要分布在40~60 dB之间,延时低于800  $\mu\text{s}$ 。少量信号幅度在75~90 dB之间,延时介于2 300~2 600  $\mu\text{s}$ 之间。图4(b)为90°单层板拉伸破坏产生的294个AE信号,幅度主要分布在40~60 dB之间,并出现了60~80 dB之间的中高幅度AE事件和少量的超过90 dB的高幅度AE事件。中低幅度事件延时基本在500  $\mu\text{s}$ 以下,中高幅度事件延时分布在500~2 000  $\mu\text{s}$ 之间,高幅度事件分布在3 000~7 000  $\mu\text{s}$ 之间。图4(c)为0°单层板破坏产生的1 076个AE信号。信号主要分布在40~75 dB之间,并出现了80~90 dB之间的中高幅度AE事件和少量的超过90 dB的高幅度AE事件。40~75 dB之间幅度事件延时基本在1 000  $\mu\text{s}$ 以下,中高幅度

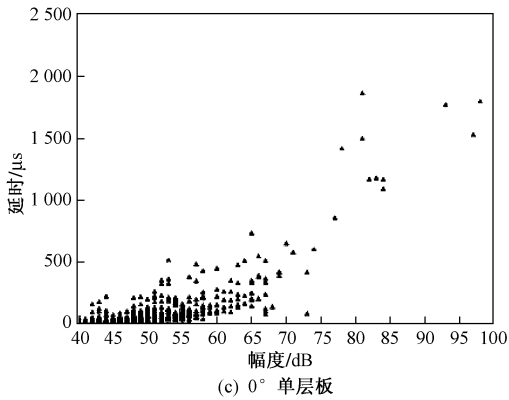
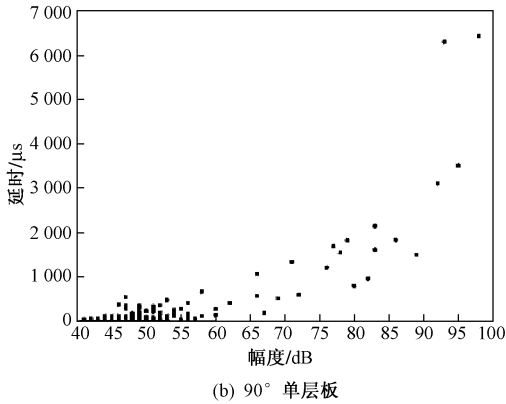
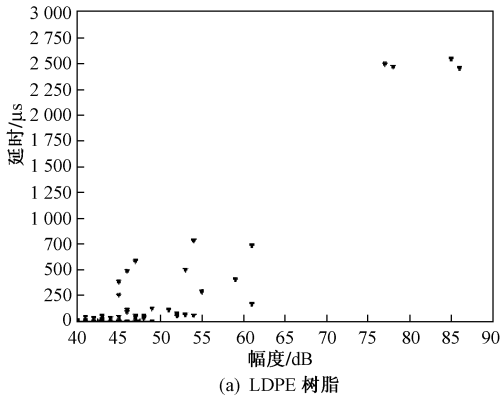


图 4 声发射信号延时-幅度分布

Fig. 4 Duration - amplitude scatter plot of AE signals.

(a) LDPE; (b) 90° laminate; (c) 0° laminate

事件延时介于 1 000 ~ 2 000 μs, 高幅度事件介于 1 500 ~ 2 000 μs 之间。以上分析可以看出, 不同损伤行为的 AE 信号具有不同的幅度和延时特征。

图 5 显示了 AE 信号伴随着损伤过程的发展而变化的过程。

图 5(a) 示出 LDPE 随着应变的增加, AE 信号的幅度和延时特征分布。幅度为 40 ~ 60 dB, 延时在 800 μs 以内的低幅度、短延时 AE 信号, 主要发生在应变低于 50% 的早期损伤过程。此后材料进入“颈缩”阶段, 塑性变形加大释放了变形过程中的应

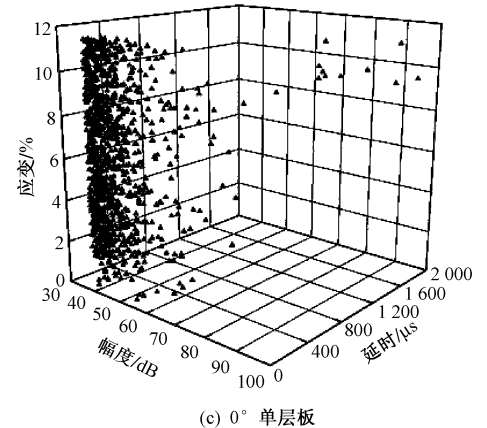
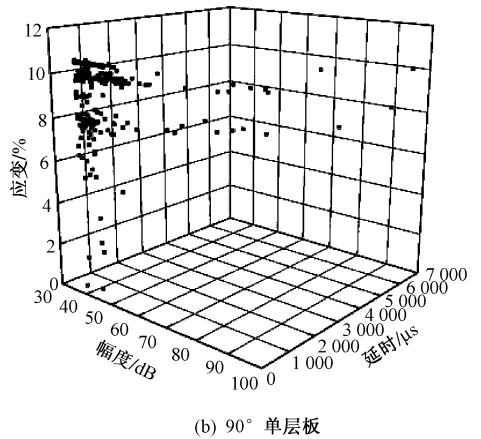
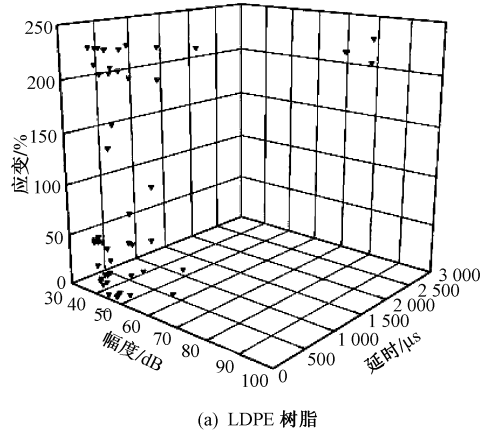


图 5 损伤过程的 AE 信号分布特征

Fig. 5 Distribution of AE signals during damage process.

(a) LDPE; (b) 90° laminate; (c) 0° laminate

变能, 只产生少量的低幅度、短延时的 AE 信号。达到断裂应变时出现了大量低幅度、短延时 AE 信号, 并产生幅度在 75 ~ 90 dB, 延时在 2 300 ~ 2 600 μs 的信号。据此可以推测, 基体断裂损伤的 AE 特征为幅度在 75 ~ 90 dB、延时在 2 300 ~ 2 600 μs 的 AE 信号。基体塑性变形损伤 AE 特征为幅度在 40 ~ 60 dB、延时小于 800 μs 的 AE 信号。图 5(b) 示出早期的界面损伤产生少量 40 ~ 60 dB、低于 500 μs 的低

幅度、短延时信号。应变达到5%以后,界面损伤逐渐扩展,形成了40~80 dB、500~2 000  $\mu\text{s}$ 的信号,幅度和延时分布范围有所扩大。达到断裂应变时,还出现了少量超过90 dB、延时达到3 000~7 000  $\mu\text{s}$ 的信号。可以看出,界面损伤根据程度不同,具有幅度、延时分布范围大的特征。早期开始的界面损伤程度低,伴随着低幅度、短延时的信号。随着界面损伤的累积,同时出现了中幅度、中延时信号和低幅度、短延时的信号。最终伴随界面的脱黏形成了高幅度、长延时信号,同时夹杂着大量的中、低幅度、中、短延时的信号。由图5(c)可以明显看出,早期的损伤过程主要产生大量的幅度介于40~75 dB、延时基本在1 000  $\mu\text{s}$ 以内的信号,同时此类信号出现在整个损伤过程。应变达到8%以后,开始出现80~90 dB之间的中高幅度、延时分布在1 000~2 000  $\mu\text{s}$ 的AE事件,达到断裂应变时出现超过90 dB的高幅度、延时分布在1 500~2 000  $\mu\text{s}$ 的AE事件。对比界面损伤和基体损伤的AE特征分析可以推测,早期损伤主要是单纤维断裂损伤,其主要产生幅度介于40~75 dB、延时基本在1 000  $\mu\text{s}$ 以内的AE特征。随后单纤维随机断裂程度增加,并产生大量由于单纤维断裂引起的局部界面损伤,其主要产生幅度介于40~90 dB、延时基本在1 000~2 000  $\mu\text{s}$ 以内AE特征。最终纤维束整体断裂则产生了90 dB的高幅度、延时分布在1 500~2 000  $\mu\text{s}$ 的AE特征。

### 3 结论

通过对LDPE树脂、单层板轴向和横向准静态拉伸的破坏实验,结合力学性能变化,讨论了基体损伤、界面损伤和纤维损伤行为的AE特征。研究发现,不同损伤模式的AE特征具有明显的差异。基体塑性变形和基体断裂分别产生了幅度在40~60 dB、延时低于800  $\mu\text{s}$ 和幅度在75~90 dB、延时介于2 300~2 600  $\mu\text{s}$ 的AE特征。界面损伤按严重程度不同,分别产生了40~60 dB、低于500  $\mu\text{s}$ 、40~80 dB、500~2 000  $\mu\text{s}$ 、高于90 dB、3 000~7 000  $\mu\text{s}$ 的AE特征。单纤维断裂和纤维束整体断裂,前者幅度在40~75 dB、延时在1 000  $\mu\text{s}$ 以内,后者幅度在90 dB以上,延时在1 500~2 000  $\mu\text{s}$ 。 **FZXB**

#### 参考文献:

[1] CAPIATI N J, PORTER R S. The concept of one polymer composites modeled with high density

polyethylene [J]. Journal of Materials Science, 1975(10):1671-1677.

- [2] MEAD W T, PORTER R S. The preparation and tensile properties of polyethylene composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1978(22):3249-3265.
- [3] MARIAS C, FEILLARD P. Manufacturing and mechanical characterization of unidirectional polyethylene-fiber/polyethylene-matrix composites [J]. Composite science and technology, 1992(45):247-255.
- [4] ROLEL D, YAVIN E, WACHTEL E, et al. Experimental study of transcrystallinity in UHMWPE/LLDPE composites [J]. Composites Interfaces, 1993(3):225-242.
- [5] AMER M S, GANAPATHIRAJU S. Effects of processing parameters on axial stiffness of self-reinforced polyethylene composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2001(81):1136-1141.
- [6] BHAT C, BHAT M R, MURTHY C R L. Acoustic emission characterization of failure modes in composites with ANN [J]. Composite structures, 2003(61):213-220.
- [7] GIORADANO M, CALABRO A, ESPOSITO C, et al. An acoustic emission characterization of the failure modes in polymer composite materials [J]. Composite Science and Technology, 1998(58):1923-1928.
- [8] YU Y H, CHOI J H, KWEON J H, et al. A study on the failure detection of composite materials using an acoustic emission [J]. Composite Structures, 2006(75):163-169.
- [9] WOO S C, GOO N S. Analysis of the bending fracture process for piezoelectric composite actuators using dominant frequency bands by acoustic emission [J]. Composite Science and Technology, 2007(67):1499-1508.
- [10] MIKAEL J, PETER G. Broad-band transient recording and characterization of acoustic emission events in composite laminates [J]. Composite Science and Technology, 2000(60):2803-2818.
- [11] PAPPAS Y Z, MARKOPOULOS Y P, KOSTOPOULOS V. Failure mechanisms analysis of 2D carbon/carbon using acoustic emission monitoring [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 1998(31):157-163.
- [12] BARRE S, BENZEGGAGH M L. On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fiber-reinforced polypropylene [J]. Composites Science and Technology, 1994(52):369-376.
- [13] KOSTOPOULOS V, LOUTAS T H, DASSIOS K. Fracture behavior and damage mechanisms identification of SiC/glass ceramic composites using AE monitoring [J]. Composites Science and Technology, 2007(67):1740-1746.
- [14] ZHUANG X M, YAN X. Investigation of damage mechanisms in self-reinforced polyethylene composites by acoustic emission [J]. Composites Science and Technology, 2006(66):444-449.
- [15] ZHANG T H, WANG X, YAN X, et al. An investigation into the propagation characteristics of AE signals in PE/PE composite laminates [J]. Insight, 2007(49):665-668.