

# 16MnR/0Cr18Ni9Ti 复合钢板损伤与断裂 过程的声发射特性试验

梁志刚<sup>1</sup>,吴艳红<sup>2</sup>,丁利伟<sup>3</sup>,沈玉娣<sup>4</sup>

(1. 西北核技术研究所, 西安 710613; 2. 西安建筑科技大学 理学院, 西安 710055;  
3. 中国空空导弹研究院, 洛阳 471002; 4. 西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049)

**摘要:**研究了16MnR/0Cr18Ni9复合钢板在承受拉伸载荷时的损伤与断裂行为。给出了损伤类型、阶段和恒载等关键声发射特性,发现了不同损伤类型表现出不同的声发射特性。损伤与断裂的不同阶段,可用声发射信号的几种关联图进行区分。

**关键词:**声发射检测;16MnR/0Cr18Ni9Ti复合钢板;损伤与断裂

中图分类号:TQ050.3; TG115.28 文献标志码:A 文章编号:1000-6656(2010)07-0493-04

## Experiment on Feature of Acoustic Emission for 16MnR/0Cr18Ni9Ti Composite Armor Plate in the Damage and Fracture

LIANG Zhi-Gang<sup>1</sup>, WU Yan-Hong<sup>2</sup>, DING Li-Wei<sup>3</sup>, SHEN Yu-Di<sup>4</sup>

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710613, China; 2. School of Science, Xi'an University of  
Architecture & Technology, Xi'an 710055, China; 3. China Academy of Air-to-Air Missile, Luoyang 471002, China;  
4. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The damage and fracture of composite armor plate of 16MnR/0Cr18Ni9Ti in the state of trending were researched. It was discovered that different damages showed different acoustic emission feature, and different stages of damage in composite armor plate could be differentiated by some relational graphs of acoustic emission signal.

**Keywords:** Acoustic emission testing; 16MnR/0Cr18Ni9Ti composite armor plate; Damage and fracture

16MnR/0Cr18Ni9Ti复合钢板通常采用爆轰法进行焊接复合而成。复合钢板界面呈波状结合,由波峰、波谷的直接结合区和前后漩涡区组成,漩涡区在爆炸焊接状态为一种铸态新合金。16MnR和0Cr18Ni9Ti分别称作基层和复层。基层16MnR是压力容器常用钢材,一般用以满足复合钢板对强度、刚度和韧性等力学性能的要求,复层0Cr18Ni9Ti属不锈钢,一般用以满足复合钢板对耐蚀性、耐氧化的要求。因此16MnR/0Cr18Ni9Ti复合钢板同时具备了不锈钢及基层16MnR的优点,既降低了成本,又能满足实际需求,被广泛应用于食品、化工、医

药和原子能工业,制造各种耐酸容器、管道、换热器和耐酸设备等。因此对这种复合钢板的损伤与断裂特性进行研究,在其结构设计及力学分析、设备的故障诊断等方面有十分重要的意义。

## 1 试验方法

目前研究复合材料的损伤断裂行为多通过传统均质材料力学试验和微观观察相结合的研究方法,但由于力学试验参量对复杂的微观断裂不敏感,不能区分和识别不同的损伤断裂源;而显微观察也只是在事后观察断口,研究局部断裂形貌,因而无法研究断口的形成过程,也无法研究复合材料中各断裂源特征,因此传统研究方法不能适应复合材料损伤断裂过程的研究。由于声波<sup>[1-2]</sup>对材料中的缺陷十分敏感,可通过分析材料破坏过程中的声发射信号

收稿日期:2009-08-19

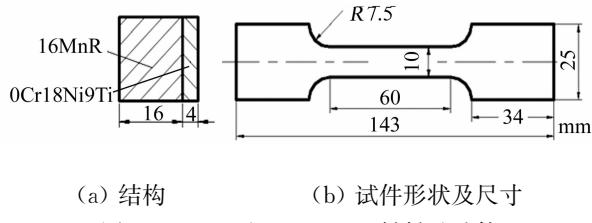
作者简介:梁志刚(1976—),男,博士研究生,工程师,主要从事爆炸与冲击动力学方面的研究工作。

来判断材料中缺陷的类型和位置,同时声发射信号的产生几乎不受材料类型的限制,所以,声发射技术成为材料破坏机理和强度研究的有效手段之一,是检测材料缺陷的新技术。Huguet 和 Siron 等人<sup>[3-4]</sup>分别利用声发射技术研究了纤维增强复合材料的损伤机理,Xu 等人<sup>[5]</sup>研究了颗粒填充聚合物材料断裂的声发射特性,阳建红等<sup>[6]</sup>对 HTPB 复合固体推进剂的声发射特性及损伤进行了研究,并给出了损伤演化模型。

通过研究 16MnR/0Cr18Ni9Ti 复合钢板的拉伸变形和断裂过程,对所采集声发射信号的参数进行分析,表征了材料损伤在不同破坏阶段的发生、发展及演变的过程、机理及声发射特性,为建立 16MnR/0Cr18Ni9Ti 复合钢板试件的声发射检测方法与评价判据提供了基础数据。

### 1.1 试验材料及试件

试验用试件材料取自由 16 mm 厚的 16 MnR 钢板与 4 mm 厚的 0Cr18Ni9Ti 钢复合而成的复合钢板(图 1)。其中 16MnR 钢板成分及技术要求符合 GB 6654《压力容器用钢板》标准的规定,使用状态为热轧、正火。采用线切割将该复合板材加工成如图 1(b)所示的复合钢板拉伸试样,试样取复合结合部分,基层和复层各占 2 mm,试件总厚度为 4 mm。



(a) 结构 (b) 试件形状及尺寸  
图 1 16MnR/0Cr18Ni9Ti 材料及试件

### 1.2 试验仪器及设备

加载设备为美国 INSTRON 公司生产的 INSTRON-1195 型万能材料试验机,监测仪器为美国 PAC 公司生产的 PCI-2 型数字化声发射监测系统。图 2 是试验过程原理图<sup>[7]</sup>。试验中,声发射监测仪器的系统参数设置如表 1 所示,其采集参数有时间、幅值、能量计数和持续时间。

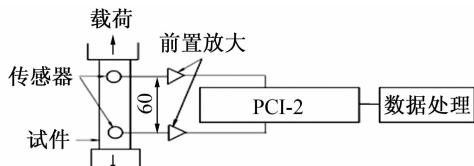


图 2 试验原理

表 1 声发射仪器参数设置

参数	设置值	参数	设置值
通道	选择 1,2 通道	峰值定义时间 PDT	200 $\mu$ s
门槛值	45 dB	撞击定义时间 HDT	800 $\mu$ s
前置放大器增益	40 dB	撞击闭锁时间 HLT	1 000 $\mu$ s
采样率	1 MB	波形采集	打开
预触发时间	256 $\mu$ s	传感器	R15 型
采样长度	1 k		

注:以上参数根据常用值设定,门槛值需根据现场情况试验确定,一般以能排除现场噪声为准。

### 2 试验结果及分析

试验内容是对 16MnR/0Cr18Ni9Ti 复合钢板试件的拉伸过程进行全程声发射监测,直至试件断裂。试验采用位移控制加载,材料试验机的加载速率为 2mm/min,匀速单向拉伸。传感器安装在不锈钢板面。

图 3 为 16MnR/0Cr18Ni9Ti 复合钢板拉伸时位移-载荷曲线。可以看出,材料屈服至断裂表征不明显,所以不易判别材料损伤破坏的不同阶段及危险性。

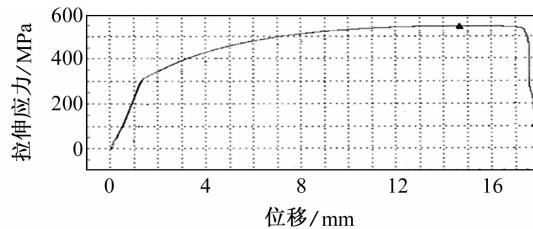


图 3 试件拉伸载荷-位移曲线

由于复合材料结构不均匀,组成相对复杂,并且在遭受损伤时,多种损伤断裂源叠加在一起同时作用,加上声发射波的传播比较复杂,接收的声发射信号畸变严重,这样很难用单个声发射参量跟踪、识别受载材料的形变断裂过程。而多参数分析可以大大提高分析结果的准确性,因此笔者拟对多个声发射参数综合分析。

从图 4 可以看出,试件拉伸时的声发射过程大致可分为三个阶段:初始阶段、中间阶段和断裂阶段。这与 C/SiC 复合材料的拉伸损伤过程<sup>[8]</sup>比较相似。对比图 4 和 5 可以看出,试件拉伸过程中,声发射信号的能量累计数和振铃计数累计数随时间的变化趋势基本一致。

(1) 初始阶段 在这个阶段,试件拉伸的应力与应变呈线性关系,材料处于弹性变形阶段。从图

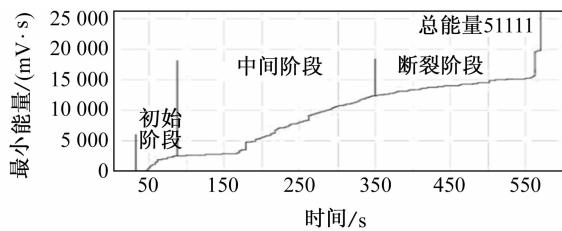


图4 累计能量-时间曲线

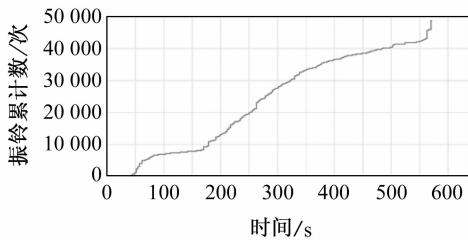
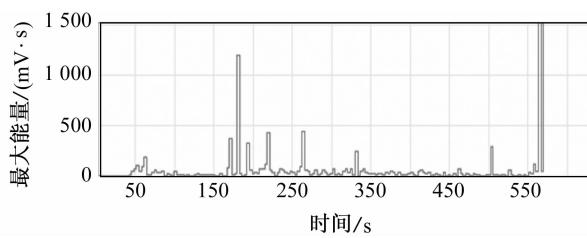
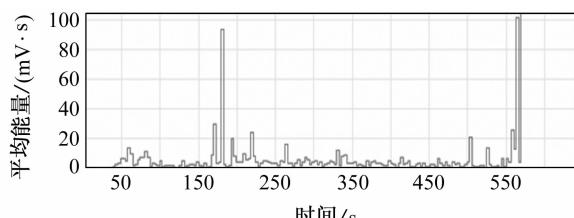


图5 振铃累计数-时间关系曲线

3可知该阶段应力值增长很快,达到最大应力(544 MPa)的55%。由图6~9可以看出,该阶段内单个声发射波信号的能量均<200 mV·s,振铃计数均<350个,幅值都低于80 dB,持续时间均<5 000  $\mu$ s;而该阶段内的声发射信号的单元平均能量<15 mV·s,平均振铃计数<35次,平均幅值<60 dB,平均持续时间≤800  $\mu$ s。



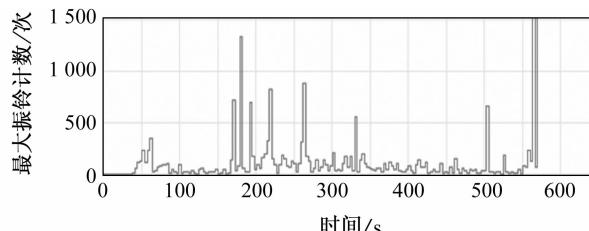
(a) 最大能量-时间曲线



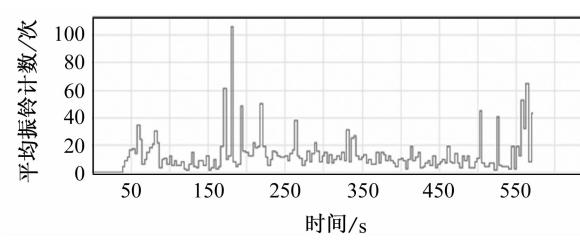
(b) 平均能量-时间曲线

图6 能量-时间曲线

(2) 中间阶段 试件内部因受拉伸所引起的声发射活动比较强烈,其振铃计数、能量、持续时间和幅值等参数的最大值比初始阶段增大了许多。该阶段,试件拉伸变形主要是塑性变形,声发射活动逐渐由弱到强。如图3可以看出,80~170 s期间,试件拉伸的声发射活动较弱,试件内部的拉伸应力约为

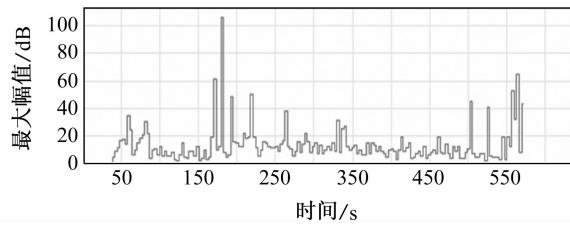


(a) 最大振铃计数-时间曲线

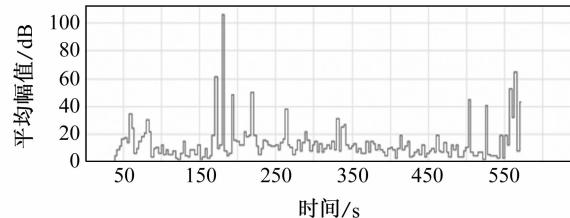


(b) 平均振铃计数-时间曲线

图7 振铃计数-时间曲线



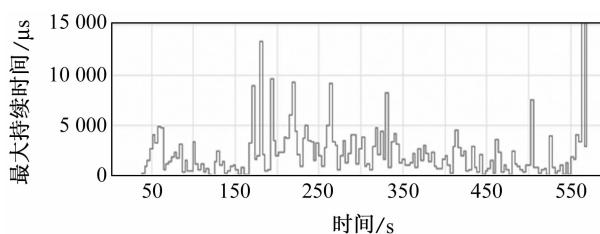
(a) 最大幅值-时间曲线



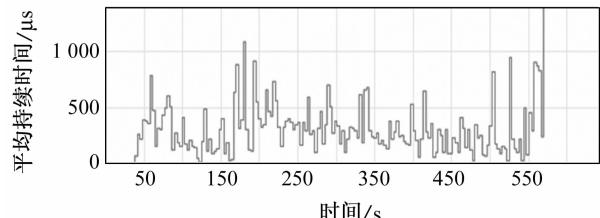
(b) 平均幅值-时间曲线

图8 幅值-时间曲线

440 MPa,约达到最大载荷的80%。而170~350 s期间,声发射活动比较活跃。这是因为,试件基层(16MnR)和复层(0Cr18Ni9Ti)的塑性变形能力不同,当拉伸应变较大时,两者结合面将会发生局部的层间开裂和分离,材料便会释放出大量能量,从而激发出大量高强度的声发射信号。由图6,7可知,本阶段内,有一些声发射信号能量超过了300 mV·s,最大达到了1 200 mV·s,阶段平均能量也比较大;同样某些声发射信号的振铃计数也超过了700次,最高为1 300多个,阶段平均振铃计数也超过40次。由图8和9可看出,一些高强度声发射信号的幅值越过80 dB,持续时间超过5 000  $\mu$ s,几乎每个



(a) 最大持续时间-时间曲线



(b) 平均持续时间-时间曲线

图 9 持续时间-时间曲线

单元时间内都有幅值在 60 dB 以上的信号。但是该阶段的平均幅值和平均持续时间却不是很大,这说明高强度声发射信号的发生频率不是很大。

(3) 断裂阶段 从图 3 可看出,该阶段其最大拉伸应力几乎没有增长,并且在试件即将断裂时迅速减小。由于临近断裂,故一些参数的最大值又有所增加,表明试件的破坏更加严重。由图 4 可知,断裂前该阶段声发射能量大量集中在断裂前几秒时间内。同时试件在断裂时产生了一个极高强度声发射信号。断裂前该阶段声发射能量累计为 8 000 mV·s 左右,而且约 50% 的能量集中在断裂前几秒时间内,其余拉伸时间里能量增长则比较缓慢。此外,在试件断裂时产生了一个能量超过 30 000 mV·s 的极高强度声发射信号。开始时,这个阶段的能量累计越来越缓慢,直到试件快要断裂时,能量才又迅速增加。这是因为,当试件的层间开裂和分离发生以后,试件拉伸的弹性阻力减小,故而声发射活动比较弱,继续拉伸试件,细小裂纹开始扩展,引起应力集中,积累大量能量,当试件临近断裂时,较大的宏观裂纹开始出现并扩展,能量以弹性波的形式释放出来,试件的声发射活动又强烈起来。由图 6~9 可知,这个阶段的高强度声发射信号数量较少,其能量、振铃计数、幅值和持续时间与第二个声发射高峰期的信号强度相当,但是其发生频率比较小。

不同类型的声发射源会产生不同特征的声发射信号。实际上试件拉伸过程中声发射信号的来源是很复杂的,每个阶段的声发射源类型并不是唯一的,

应该是多种声发射源的叠加,以上分析只是说明了各个阶段最主要的声发射源类型。第二个声发射活动高峰开始时的拉伸应力约为 440 MPa,此后的拉伸对试件破坏比较严重,会引起基层和复层的开裂和分离,使材料失去原有功能(图 10)。故此,可以把第二个声发射高峰作为严重破坏的标志。

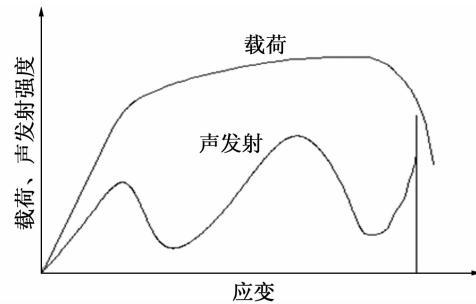


图 10 拉伸过程的声发射活动

### 3 结论

(1) 经过对试验中所采集声发射原始数据的初步分析,得到了多种参数关联图。比较分析后发现,时间-能量、时间-振铃计数、时间-幅度和时间-持续时间较好地反映了试件拉伸的声发射过程。

(2) 16MnR/0Cr18Ni9Ti 复合钢板拉伸断裂过程声发射源主要来自位错运动、层间开裂和分离、宏观裂纹的扩展等,每种损伤模式在其发生发展过程中都有丰富明显的声发射信号产生,而且这些声发射信号对损伤信息的反映都非常及时准确,可测性良好。

(3) 利用声发射技术可以反映材料的损伤过程,可用于检测其损伤试验研究。

(4) 试验表明,声发射监测可以发现应力-应变曲线所不能反映出来的材料损伤。

(5) 根据声发射信号可以分析不同破坏阶段的损伤机理。利用声发射累计相对能量的变化趋势可以将试件拉伸过程分为不同的阶段。通过对各个阶段声发射信号能量、振铃计数、幅值和持续时间等特征参数的联合分析,结合材料拉伸曲线,可以揭示材料拉伸破坏的演化进程。

### 参考文献:

- [1] 何舒,马羽宽,杨建波.含不同缺陷的金属材料声发射特性[J].吉林大学学报(工学版),2002,33(4):21~25.
- [2] 许凤旌,陈积懋.声发射技术在复合材料发展中的应用[J].机械工程材料,1997,21(4):30~34.

(下转第 499 页)

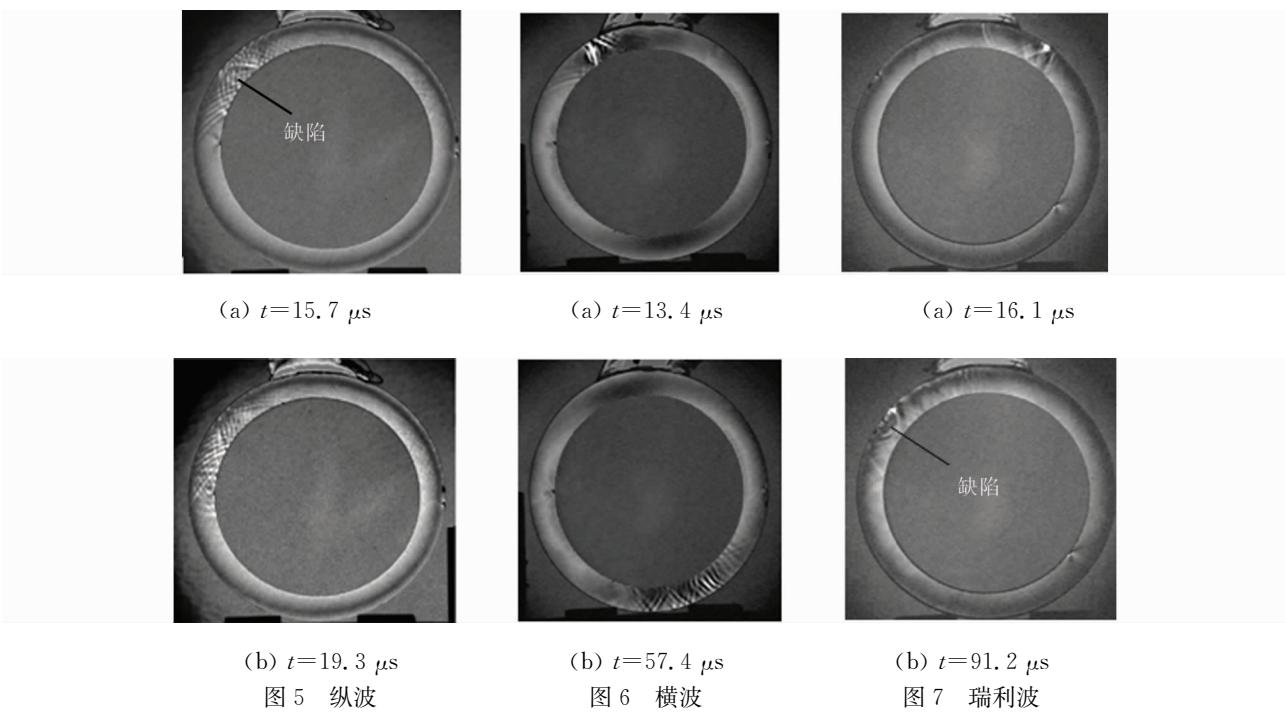


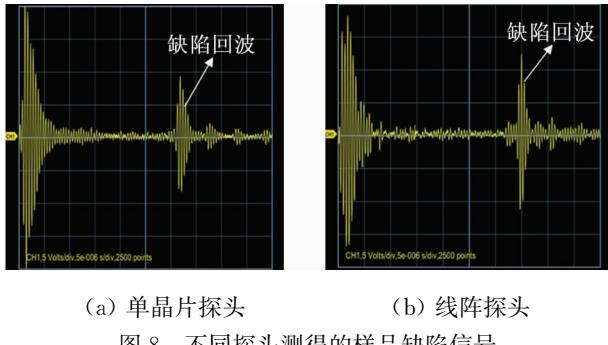
图 5 纵波

图 6 横波

图 7 瑞利波

部,并且在传播很远距离后还有很大能量。由图 7 可见,瑞利波能量主要集中在圆环外表面,传播很远距离到达缺陷时,可以清楚地看到反射波。

图 8 是在相同测试条件下,单晶片探头和线阵探头测量的图 1 所示样品中外壁缺陷的回波信号。从图中可以看出,采用单晶片探头获得的回波信号



(a) 单晶片探头 (b) 线阵探头  
图 8 不同探头测得的样品缺陷信号

(上接第 496 页)

- [3] Huguet S, Godin N, Gaertner R, et al. Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester [J]. Composites Science and Technology, 2002, 62(10/11): 1433—1444.
- [4] Siron O, Tsuda H. Acoustic emission in carbon fibre reinforced plastic materials [J]. Annales de Chimie Science des Matériaux, 2000, 25(7): 533—537.
- [5] Xu T, Lei H, Xie C, et al. Investigation of impact fracture process with particle—filled polymer materi-

的幅值在示波器中为 3.5 格,线阵探头获得的回波信号的幅值为 5 格,幅值提高了 1.5 倍。

### 3 结论

(1) 瑞利波对玻璃圆环外表面缺陷比较敏感,横波对圆环内部缺陷敏感,而纵波对圆环内表面的缺陷敏感。

(2) 设计的线性探头可以加强所需波型的能量,以用于实际检测工作。

### 参考文献:

- [1] 何得安,易勇,刘镇清. 传播距离对管中导波传播特性的影响[J]. 无损检测,2003,25(11): 553—556.
- [2] 李隆涛,何存富,吴斌. 周向超声导播对管道纵向曲线检测的研究[J]. 声学学报,2005,30(4): 344—345.
- [3] als by acoustic emission[J]. Polymer Testing, 2002, 21(3): 319—324
- [6] 阳建红,王芳文,覃世勇. HTPB 复合固体推进剂的声发射特性及损伤模型的实验和理论研究[J]. 固体火箭技术,2000,23(3): 37—40.
- [7] 庄兴民,张慧萍,晏雄. 聚乙烯自增强复合材料损伤过程的声发射特征[J]. 复合材料学报,2006,23(2): 82—87.
- [8] 方鹏,成来飞,张立同,等. C/SiC 复合材料拉伸过程的声发射研究[J]. 无损检测,2006,28(7): 358—361.