

文章编号: 1006-9941(2004)04-0252-04

浅谈声发射技术在含能材料研究中的应用

高登攀^{1,2}, 郑家贵¹, 田勇², 张伟斌²

(1. 四川大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610064;

2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 综述了国内外声发射技术的发展及其在含能材料研究中应用进展。从含能材料的声发射特性研究和多项性能试验等方面对含能材料的声发射检测技术和应用途径进行分析和比较, 结果表明声发射检测技术作为一种动态无损检测技术, 在含能材料的产品质量控制、性能研究、内部损伤的监测与评估以及加工安全监测等方面都有其独特的可靠性和优越性。

关键词: 声学; 声发射(AE); 含能材料; 无损检测; 损伤

中图分类号: TQ56; O42

文献标识码: A

1 引言

声发射(AE)是指材料局部因能量的快速释放而发出瞬态弹性波的现象^[1]。作为一种现代检测技术, 声发射检测技术起步于20世纪50年代德国凯塞尔所作的研究工作。他在铜、锌、铝、铅、锡、黄铜、铸铁和钢等金属和合金材料的变形过程中观察到了声发射现象, 并提出了著名的声发射不可逆效应, 即凯塞尔效应, 随后的几十年里, 随着微机技术、基础研究的进展, 声发射技术获得迅速发展, 其研究与应用从实验室研究扩展到结构评价、材料试验、航空航天、地震、地质、电力、石油化工、金属加工和交通运输等领域^[2~7]。

与其他常规无损检测方法相比, 声发射检测技术的特点在于^[1,3,4]: (1) 检测动态缺陷, 如缺陷扩展; (2) 缺陷的信息直接来自缺陷本身, 而不是靠外部输入扫查缺陷; (3) 可提供活性缺陷随载荷、时间、温度等外变量而变化的实时或连续信息; (4) 对线性缺陷较为敏感, 探测到在外加结构应力下这些缺陷的演变情况; (5) 对构件几何形状不敏感, 可检测其他方法受到限制的形状复杂的构件; (6) 利用多通道声发射装置可以确定缺陷所在位置。

其中, 材料内部声发射技术用于含能材料研究的主要特征参数包括: 声发射事件数、振铃记数、幅度和幅度分布、能量和能量分布、上升时间、持续时间、频

谱、波形及声发射源位置坐标等。由于应力集中而产生声发射事件, 利用声发射检测仪器获取含能材料内部损伤的声发射事件信号, 提取声发射特征参数组成关联图, 通过分析比较以获得材料内部损伤演变各阶段的声发射特性, 从而实现材料内部质量的监控、损伤模式的鉴别以及损伤规律的研究。

2 声发射技术在含能材料研究中的应用现状

2.1 含能材料声发射特性的研究

在含能材料声发射检测技术的研究中, 应对含能材料的声发射特性有广泛而深入的了解, 而力学加载试验和温度冲击试验又是获取材料声发射特性的重要途径。在这方面全俄实验物理研究所、航天部703所、第二炮兵工程学院和中国工程物理研究院都做了大量的试验和研究, 并取得了很好的效果。这主要表现在:

(1) 含能材料表现出较好的凯塞尔效应^[8]。即当材料一旦承受过压力, 再次进行加载试验而压力又不超过前者时, 不会出现声发射。

(2) 含能材料材料内部损伤的扩展和大多数材料一样, 可分为三个阶段: 起始扩展阶段 I、减速阶段 II 和加速阶段 III。在第一个阶段是微小缺陷的积累; 第二阶段产生局部裂纹, 但不会引起部件的宏观破坏; 第三阶段, 声发射计数率急剧增大, 说明有大裂纹产生或者部件发生断裂^[9]。

(3) 炸药件压缩恒载实验中出现 Felicity 效应, 而三点弯曲恒载实验中没有出现, 表明压缩载荷作用下材料内部有大量的界面摩擦存在^[8]。

(4) 对于颗粒填充聚合物而言, 大晶体填充料

收稿日期: 2003-12-08; 修回日期: 2004-02-06

作者简介: 高登攀(1976-), 男, 在读硕士, 从事含能材料无损检测技术应用研究。e-mail: chinagdp@126.com

(颗粒度 > 100 μm) 是其主要的声发射源, 试验结果表明, 声发射的强度随小颗粒填充物(颗粒度 < 100 μm) 含量的增加而降低^[9]。

(5) 力学试验中, 恒载声发射与炸药材料损伤演化密切相关, 不同恒载阶段中声发射的延续性和收敛性表征了材料损伤的严重程度。当试样处于安全载荷下, 声发射信号很快收敛; 而当试样所承受的载荷有可能对其造成破坏时, 声发射信号持续产生, 收敛得很慢或者不收敛, 甚至呈发散趋势^[8]。

(6) 采用不同加载方式和应变速率对材料声发射特性和产生机理都有较大影响^[10]。不同加载速率下的声发射幅度分布有所不同, 表明其各自内部损伤模式、损伤程度、损伤演变趋势也各不相同, 可见, 在力学性能试验中, 声发射技术的引入对于进一步研究损伤机理、损伤预报提供了很好的试验手段和研究思路。

(7) 含能材料在经受温度冲击时会产生十分丰富的声发射信号, 有可能通过这些信号分析材料内部出现损伤的情况^[8]。

2.2 含能材料损伤模式识别及损伤模型的研究

对材料损伤模式的精确识别和建立损伤模型的研究向来是材料研究领域的重点, 对于含能材料同样如此, 对它们的深入研究可更加全面地了解含能材料的损伤机理和老化机理, 准确进行损伤预测和寿命评估。

第二炮兵工程学院利用声发射检测技术对 HTPB 复合固体推进剂做了有关损伤模型的试验和理论研究^[11]。通过试验和研究, 假设材料微元强度分布符合 Weibull 分布, 并初步建立了 HTPB 复合固体推进剂损伤变量与声发射能量关系的损伤数学式, 即

$$D = U/U_{AE} = 1 - \exp[-(x - x_0)m/a] \quad (1)$$

式中, D 为损伤变量; U 为声发射累计能量; U_{AE} 截面全破坏时声发射累计能量; a, m, x_0 均为常数。

由此可见, 只要测得 U/U_{AE} 值, 便可确定系数 a, m, x_0 。根据式(1) 损伤变量定义和声发射试验结果, 可以分别计算出材料在各种应变率下随应变和应力变化的损伤变量值, 因此, 声发射试验为研究在外载荷作用下材料内部微观损伤规律提供了有效的试验方法。

另外, 利用炸药材料断裂时的声发射信号幅度、持续时间等参数对材料裂纹尖端的细观损伤模式的识别进行了初步研究, 研究结果表明^[12], 颗粒断裂产生的声发射信号幅度较高, 持续时间较短; 基体开裂产生的声发射信号幅度偏低, 持续时间较长; 界面分离的参数则处于前两者之间。以此为依据, 对不同载荷、不同状态下发生断裂的炸药材料的损伤模式进行了鉴别

和分类, 并通过体视显微镜、金相显微镜和扫描电镜对断口形貌进行了观察。

2.3 含能材料加工过程中的安全监控

由于含能材料在机械加工过程中与金属刀具直接接触, 因而材料内部质量和刀具状态就成为决定安全生产的重要因素。一般来说, 含能材料在机械加工前, 首先要经过 X 射线的检测以保证其内部无超标杂质, 避免加工过程中杂质与刀具碰撞产生火花而引起事故。但是, 加工过程中由于刀具断裂产生金属飞片同样也是加工过程中的一大事故隐患, 因此, 有必要在加工过程中对刀具的状态进行实时监控, 并能够在刀具断裂之前做出及时预报, 提醒工作人员停车检查以避免事故的发生。

全俄实验物理研究所正研究将声发射技术应用到刀具的在线监控中, 他们将声发射传感器置于刀具上, 在加工过程中对刀具状况进行全程实时监控。实验研究证明: 对含能材料进行机械加工过程中的声发射参数的改变可以作为建立特殊情况下预防事故发生系统的基础方法^[9]。

3 结论

声发射技术在含能材料领域里目前还处在试验研究和初步应用的阶段, 虽然对于含能材料的声发射特性已有了一定的认识, 对地声发射信号处理, 材料损伤模式识别, 损伤建模和实际监控运用等方面今后还需要进行广泛而深入的试验和理论研究。

3.1 声发射信号处理技术的研究

一般来说, 对确定性声发射时域信号的处理技术可分为参数分析方法和波形分析方法^[13]。本文所提到的含能材料声发射信号的分析都是采用的参数分析方法, 虽然在许多应用领域都已形成一套较为完整的参数分析技术, 但是, 参数分析方法的最大缺点是有关 AE 源本质的信息往往被谐振式传感器自身的特点所掩盖或模糊掉, 因为这种谐振式传感器所获得的 AE 信号基本是一种衰减的正弦波, 由这样的波形得到的各种参数与真正的物理量之间缺少必然的联系并往往随所用传感器谐振频率和测试系统(放大倍数、阈值)而变化, 因此, 实验结果的重复性还很差^[14]。此外, 利用传统的参数分析方法来区分诸如含能材料颗粒断裂、基体开裂和界面分离等缺陷总是十分困难, 虽然之前的研究工作表明, 声发射信号幅度与损伤模式之间存在一定的联系^[12], 但并没有得出可靠的规律性的研究结论和理论依据, 而利用波形分析技术却有可能比

较容易地解决这一问题。

另外,在声发射信号处理中,小波分析和神经网络分析得到了越来越多的应用^[15~18],因此,将小波分析技术和人工神经网络分析技术运用到含能材料声发射信号的噪声去除、特征提取、频谱分析以及损伤建模等方面也是今后的重点研究方向。

3.2 检测手段综合应用的研究

将声发射技术和超声波检测技术相结合,可以提供检测材料分层、气孔、脱粘以及胶接结构脱粘、气孔等宏观不连续与结构分散微观不连续的多种信息,它已在一些领域得到了应用^[19],用以对损伤级别作出评估。因此,声-超声检测技术在评估含能材料,特别是高聚物粘结炸药宏观不连续缺陷和微观结构方面都有较好的应用前景,也是今后含能材料无损检测领域加强研究的重点内容。

综上所述,利用声发射动态检测技术不仅可以实现动态监测含能材料损伤的发生、发展及演变过程,而且还能在损伤规律、失效机理、损伤模式识别以及损伤模型建立等方面发挥更大的作用。将声发射检测技术与其他无损检测手段相结合,还会对含能材料性能研究、安全评估、库存可靠性研究以及损伤、老化数值模拟等方面提供可靠的试验数据和理论依据。

参考文献:

- [1] 李家伟,陈积懋,主编. 无损检测手册[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
LI Jia-wei, CHEN Ji-mao. Nondestructive Testing Handbook[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [2] Nichols R W. Acoustic Emission[M]. LONDON: Applied Science Publishers LTD. ,1976.
- [3] 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.
YUAN Zhen-ming, MA Yu-kuan, HE Zhe-yun. The Application of Acoustic Emission Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 1985.
- [4] 沈功田,戴光,刘时风. 中国声发射技术进展[M/CD]. 2003 苏州无损检测国际会议论文集,2003.
SHEN Gong-tian, DAI Guang, LIU Shi-feng. Acoustic Emission Progress in China[M/CD]. 2003 SUZHOU International Symposium on Nondestructive Testing, 2003.
- [5] GENG Rong-sheng. Acoustic Emission Evaluation of Calendar Damage of Aircraft Main Structures [M/CDM]. 2003 SUZHOU International Symposium on Nondestructive Testing, 2003.
- [6] 王荣山,王世华,倪晓东. 电力工业中的声发射检测技术[M/CDM]. 2003 苏州无损检测国际会议论文集,2003.
WANG Rong-shan, WANG Shi-hua, NI Xiao-dong. Application of Acoustic Emission Testing in Power Industry[M/CD]. 2003 SUZHOU International Symposium on Nondestructive Testing, 2003.
- [7] Seto M, Utagawa M, Katsuyama K. Some fundamental studies on the AE method and its application to *in-situ* stress measurements in Japan[A]. 5th Proc. International Workshop on the Application of Geophysics in Rock Engineering[C], 2002.
- [8] 赵方芳. 利用声发射技术研究高聚物粘结炸药的损伤与断裂特性[D]. 四川:中国工程物理研究院,2000.
ZHAO Fang-fang. Study on damage and fracture mechanism of PBX by acoustic emission[D]. Sichuan: CAEP, 2000.
- [9] Костюков Е Н . ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ [R]. КИТАЙСКО-РОССИЙСКИЙ СЕМИНАР ПО ФИЗИКЕ ВЗРЫВА И ЭНЕРГОЁМКИМ МАТЕРИАЛАМ, Mianyang, 2001.
- [10] 祖小涛,吴继红,刘民治. 几种高聚物拉伸过程中的声发射现象[J]. 高等学校化学学报, 1996, 17(6): 987-990.
ZU Xiao-tao, WU Ji-hong, LIU Min-zhi. The phenomena of tensile acoustic emission of PS, POM, ABS and PC[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 1996, 17(6): 987-990.
- [11] 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试验和理论研究[J]. 固体火箭技术, 2000, 23(3): 37-40.
YANG Jian-hong, WANG Fang-wen, QIN Shi-yong. Experimental and theoretical study on AE characteristic and damage model of HTPB composite solid propellant [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2000, 23(3): 37-40.
- [12] 赵方芳,罗景润,田常津. 利用声发射技术监测颗粒填充聚合物材料的裂纹扩展过程[J]. 高压物理学报, 2000, 14(3): 235-240.
ZHAO Fang-fang, LUO Jing-run, TIAN Chang-jin. The crack growth of particulate filled polymer monitored by acoustic emission [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2000, 14(3): 235-240.
- [13] 沈功田,耿荣生,刘时风. 声发射信号的参数分析方法[J]. 无损检测, 2002, 24(2): 72-77.
SHEN Gong-tian, GENG Rong-sheng, LIU Shi-feng. Parameter analysis of acoustic emission signals [J]. *Nondestructive Testing*, 2002, 24(2): 72-77.
- [14] 耿荣生,沈功田,刘时风. 基于波形分析的声发射信号处理技术[J]. 无损检测, 2002, 24(6): 257-261.

