DOI: 10.13801 /j.cnki.fhclxb.2001.03.022				
复合材料学报	第 18卷	第 3期	8月	2001年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA	V ol. 18	No. 3	August	2001

文章编号: 1000-3851(2001)03-0097-04

电场对 PZT /复合材料层合板破坏 强度影响的实验研究

程锦泉1.张统一2.王 彪1. 杜善义1

(1.哈尔滨工业大学 复合材料研究所,哈尔滨 150001; 2.香港科技大学 清水湾道,九龙 香港) 摘 要: 采用三点弯曲方法测量在不同外加电场作用下 PZT复合材料层合板的破坏强度(MOR),分析得到了正 电场能增强 PZT复合材料层合板的破坏强度,而负电场降低了 PZT复合材料层合板的破坏强度。本文作者还建立 了一套 AF测试系统来实时探测在加载过程中由于损伤引起的声信号,进而分析并证实了不同载荷下的 PZT复合 材料层合板的破坏模式,并用超声扫描成像图加以验证。

PZT复合材料层合板:破坏强度: AE测试系统 关键词: 中图分类号: TB330 文献标识码: A

EXPERIMENTAL STUDY ON THE INFLUENCE OF APPLIED ELECTRIC FIELD ON THE MODULUS OF RUPTURE OF PZT /COMPOSITE LAMIN ATES

CHENG Jin-quan¹, ZHANG Tong-vi², WANG Biao¹, DU Shan-vi¹

(1. Center for composite materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2 Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong, China)

The three-point test was carried out to test the modulus of rupture of PZT composite lam-Abstract inates. It is evident that the positive electric field can improve the modulus of rupture of PZT composite laminates but the negative one can decrease its modulus of rupture. A setup of in-situ AE measuring system was established to determine the different damage models of PZT composite laminates during the process of loading, and the damage model of PZT composite laminates was also verified by the scanning acoustic microscopic images.

PZT composite laminate; modulus of rupture; AE measuring system Key words

近年来,由于铁电材料具有良好的压电和热电 特性以及很强的结构可设计性,已被制备成许多新 颖的固态设备器件,其既可作为致动器,又可作为传 感器 为了提高这些器件的功率和敏感性 .通常这些 压电部件是由几个单层材料叠加层合而成的,诸如 致动器、传感器、位移定位器等铁电器件大都是层合 结构^[1~4]。然而.在应用过程中这些器件通常要承受 电场和力场的作用,这种层合结构器件的可靠性已 经越来越引起人们的重视 在实际应用中,铁电材料 的层合器件由于层与层之间的粘接、各层材料的性 能不同等的结构问题,特别在较高的、长时间周期性 应力或电场作用驱动下,人们除了常常发现铁电材 料发生断裂破坏外,通常可以观察到器件的性能退

化 分层等现象^[~7] Lee等^[8]新近发展了利用各向 异性 PZT夹芯复合材料层合板作为马达的驱动部 件的新型马达,其以 PZT板作为致动器引起反对称 复合材料层合板产生拉扭耦合作用来带动马达定子 转动。由于这种结构的力学行为的复杂,使得其破坏 问题更为复杂。虽然这些实际应用中遇到的可靠性 问题,已经引起人们的重视,但到目前为止还未见有 关铁电复合材料层合板断裂特性定量的实验观测方 面和理论方面的报导^[5~8]。基于 PZT复合材料层合 板在实际应用中的破坏情况,本文作者采用三点弯 曲方法测量在不同外加电场作用下 PZT 复合材料 层合板的破坏强度(MOR),并分析了电场对 MOR 的影响。为了分析 PZT 复合材料层合板的破坏模

收稿日期: 1999-10-29;收修改稿日期: 2000-04-30

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目 (19725209)

基金坝目: 国家杰出育午泰亚页助坝口(19/23209) 作者介绍: 程锦泉(1971),男,博士,研究方向:主要从事压电 秩电材料、智能材料结构与系统的研究。 作者介绍: 程锦泉(1971),男,博士,研究方向:主要从事压电 秩电材料、智能材料结构与系统的研究。

式,还建立了一套 AE测试系统来实时探测在加载 过程中由于损伤引起的声信号,进而根据所探测到 的 AE信号的频率和能量关系分析并证实了不同载 荷下的 PZT复合材料层合板的破坏模式,并用超声 扫描成像图加以验证

1 试件准备和实验方法

1.1 试件制备

根据 Lee等^[8]制作的马达驱动部件的结构,在 本实验中用的试件是一个三层 PZT夹芯复合材料 层合板,如图 1所示。其中 PZT夹芯复合材料层合 板的夹芯是属干软性铁电材料的 PZT-5H陶瓷材料 (Morgan Matroe Inc) 顶层和底层是成角度铺设的 AS4/3501-6石墨 环氧树脂复合材料板,它们是从 Hercules公司提供的单向复合材料板沿一定角度方 向剪裁而成。相应的上下两层复合材料板的增强纤 维的方向分别为+ 45° 和 - 45° (见图 1).其大小为 114 28 1(mm³)。然后,用环氧树脂 302胶(Epoxy Technology Inc 将纤维增强复合材料板粘贴在尺寸 为 11¥ 30× 0.87(mm³)的 PZT-5H陶瓷板上.在 室温下放置 6个小时进行固化:接着再用钻石锯将 (mm³)的小试件,其切割面四周用 600目二氧化硅 抛光纸进行抛光。为了确定复合材料板与 PZT板之 间的粘贴面是否粘贴完好,用超声扫描成像仪 (SONIX)进行粘贴面的检测



图 1 PZT复合材料层合板的结构示意图

Fig. 1 A schematic diagram of PZT composite laminate structure

1.2 实验测试系统和过程

图 2是测试 PZT复合材料板的断裂模量 (MOR)的三点弯曲实验系统设备示意图。在室温 下,在 MTS SINTECH公司的材料测试系统上进行 三点弯曲实验 为了确定在加载过程中 PZT复合材 料板的破坏模式,实验中安装了声发射(AE)传感器 (Physic Acoustic Inc)来实时探测由于材料破坏而_



图 2 三点弯曲实验测试系统示意图

Fig. 2 The experimental setup for three-bending point test and AE measurement system

发出的声信号。接收到的 AE信号由 6103型触发式 放大器放大后再经 LECROY 8828型数字转换器进 行转换,传给计算机进行记录和分析。其中,AE传 感器用胶固定于试件的一端,通过分析系统探测实 时声信号,如图 2所示 在实验中,所施加的电场方 向平行于 PZT板的极化方向,其中电场与极化方向 同向时定义为正电场,反向时为负电场。由于施加的 电场强度很大,为了避免在强电场下电极放电,试件 裸露的电极部分都涂上脂状硅油与空气隔开。利用 直流高压电源,对 PZT板两极分别施加 0V, \pm 150 V, \pm 380 V, \pm 900 V的电压(7组),然后加载,测试 PZT夹芯复合材料层合板的破坏强度,而且每种电 压下至少测量 30个试件。

PZT复合材料层合板的两极施加电压后,加载 压头以 0.25 mm/min速率加载直至试件破坏;在开 始加载的时候,同时打开 AE测试系统实时探测加 载过程中材料由于损伤破坏产生的声信号;而材料 的载荷 拉伸曲线由 MTS的计算机软件系统记录。 根据试件破坏时所施加的载荷的峰值,可利用材料 破坏时的最大载荷来计算 PZT复合材料层合板的 破坏强度(MOR)

$$e_{\rm mr} = \frac{3PL}{2bd^2} \tag{1}$$

式中的 e_m 表示材料的破坏强度 (MOR), *P* 为破坏时的最大载荷, *L* 为试件的跨度长, *b* 为试件的宽度, *d* 为试件的厚度。

2 实验结果与讨论

经过对计算机纪录的结果分析,我们发现试件 在不同电场作用下破坏过程的载荷 位移曲线基本 相同,其中图 3给出了典型的不加电场作用下的力 载荷 位移曲线与实时探测到的全部声发射信号的 相互对应关系 根据载荷 位移曲线和实时探测到的

全部声发射信号的相互关系,很明显, PZT复合材 料层合板的破坏过程可分成三个阶段,而且,不同阶 段的破坏机理可以由经过快速傅立叶转换后得到的 AE信号的能量的峰值和所对应的频率间的关系加 以区分,并辅以超声扫描图加以验证。在第一阶段[中,AE探测系统没有探测到声信号,这表明了材料 还没有发生破坏,此时的 PZT复合材料层合板的性 能表现为线弹性。但是随着载荷的增加,载荷与位移 间的关系突然发生小的变化,而且此时 AE探测系 统探测到了声信号,说明 PZT复合材料层合板发生 了损伤,如图 3所示 图中用点" A"代表阶段Ⅱ 的开 始,其相应的应力大约为 90 M Pa.这个值与纯 PZT 陶瓷的破坏强度相一致。从图 4所示的破坏的 PZT 复合材料层合板的超声扫描成像图来看, PZT复合 材料板的第二阶段的破坏主要是由于脆性 PZT陶 瓷在中部发生横向断裂 从图 5(a)的 AE能量分析 图,可以看出在阶段II处 AE信号的能量在频率大 约为 200 k Hz处出现一峰值。当载荷达到点" B"时, 载荷与位移关系将出现与塑性材料类似的屈服现 象,并且此时探测到的 AE信号也明显地增多;所有 这些观测结果都表明 PZT复合材料板的破坏方式 已经发生了变化,进入了第三阶段。图 6(a)给出了



图 4 典型的 PZT板开裂的超声扫描照片

Fig. 4 The ultrasonic image of the typical damage of PZT core plate

(a) StageII , (b) StageIII , (c) At the point "C"

当载荷施加到"*B*"点附近突然降低时就停止加载情况下的试件的超声扫描成像结果,表明 PZT与复合材料层已经有界面脱粘出现;而图 5(b)所示的此时的 AE信号能量分析图表明,AE能量峰值处的对应频率大约为 430 k Hz 从破坏的 PZT复合材料板的横截面 (图 6(a))及对探测到的声信号的能量分析结果来看,PZT复合材料层合板的粘接面从"*B*"点开始脱粘。在图 3所示的第三阶段III,PZT板与下层复合材料板的界面脱粘首先在 PZT陶瓷板破

粘,这时载荷急剧地下降 图 6(b)给出的破坏后的 PZT复合材料板的超声扫描成像图也表明了试件 的脱粘是最终的破坏模式 所有探测到的声信号中 能量最高的信号是出现在点"C"处,其对应频率为 130 k Hz,如图 5(c)所示。该图也表明 PZT板与下层 复合材料板间发生了脱层

图 6 不同加载阶段的 PZT层合复合 材料的破坏情况超声扫描图

Fig. 6 Ultrasonic images for the failed PZT composite laminate to show the broken PZT core. debonding and delamination: (a) at "B", (b) at "C"

图 / 小同电场作用下的 PZT层音 复合材料板的断裂强度

Fig. 7 The relation between the applied electric field and MOR of PZT composie laminates

根据公式 (1),可以计算得到在不同电场作用下 所有 PZT 复合材料层合板试件的破坏强度 图 7 给出了不同电场作用下 PZT 复合材料层合板的 MOR的分布情况,而 PZT 层合复合材料板 MOR 的标准偏差则如表 1所示。从以上结果可以看出 PZT复合材料层合板的 MOR在一个区域内呈较大 的分散性分布,针对于 PZT 复合材料层合板的破 坏起因来说,即由 PZT 板首先发生横向断裂引起 的,这是合理的 因为 Fu和 Zhang¹⁹对纯 PZT 陶瓷 破坏强度 (MOR)的实验结果已表明了其分散性虽 很大但呈一定的概率分布。本文作者针对破坏强度 实验结果进行了概率分布分析,表明了正电场能明 显提高 PZT复合材料层合板的 MOR,而在一定范 围内,负电场能使材料的 MOR略微降低。

表 1 PZT层合复合材料板的破坏强度平均值与标准偏差

Table 1 The standard deviation of the MOR of PZT composite laminate

Electric fiel	d /kV° m ⁻¹	MOR/M Pa	C _v ¶%
	0	124. 08± 5.73	4.618
1	72	128.36± 9.54	7.43
4	37	129.76± 5.30	4.08
10)34	140.89± 5.83	4.138
-	172	125. 04± 8.86	7.08
	437	125.33± 10.32	8.23
- 1	034	120.39± 7.79	6.47

3 结 论

(1) 正电场能增强 PZT复合材料层合板的破 坏强度,而负电场能降低了 PZT复合材料层合板的 破坏强度。

(2) PZT复合材料层合板的破坏模式是:首先 PZT板在中部断裂,然后沿 PZT板与下层复合材料 板的粘界面脱粘,最后分层破坏。

(3)利用 AE系统分析了 PZT复合材料层合板 不同的破坏模式声信号的特征频率为: PZT板断 裂: 200 k Hz, PZT板和复合材料板脱粘: 430 k Hz, 分层破坏: 130 k Hz

参考文献:

- Ueha S, Tomikawa Y. Ultrasonic motors [M]. Oxford: Oxford Science, 1993. 5-13.
- [2] Uchino K. Piezoelectric actuators and ultrasonic motors [M]. Deventer Kluwer, 1996. 56-78.
- [3] Uchino K. Piezoelectric ultrasonic motors overview [J]. Smart Mater Struct, 1998, 7(3): 273-285.
- [4] Haertling G H Rainbow ceramics-a new type of ultra-high-displacement actuator [J]. Am Ceram Soc Bullt, 1994, 73(1): 93 - 96.
- [5] Seeley C E. Experimental investigation of composite beams with piezoelectric actuation and debonding [J]. Smart Mater Struct, 1998, 7(4): 502-511.
- [6] Winzer S R, Shankar N, Ritter A P. Designing cofired multikyer electrostrictive actuators for reliability [J]. J Am Ceram Soc, 1989, 72 2246-2257.
- [7] Zheng J H, Takahashi S, Yoshikawa S, Uchino K. Heat generation in multilayer piezoelectric actuators [J]. J Am Ceram Soc, 1996, 79(12): 3193-3198.
- [8] Lee S W, Li H L. Development and characterization of a rotary motor driven by anisotropic piezoelectric composite laminate [J]. *Smart Mater Struct*, 1998, 7(3): 327-336.
- [9] Fu R, Zhang Ti yi Effects of applied electric field on the modulus of rupture of poled lead zirconate titanate ceramics [J]. J Am

数坏强度(MOR)的实验结果已表明了其分散性虽。 1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net