

文章编号: 1001-4888(2015)03-0322-09

## 纸页受力微损伤演化过程的 声发射及多元统计特征\*

张亮<sup>1</sup>, 李建宇<sup>1</sup>, 齐刚<sup>1,2</sup>

(1. 天津科技大学 机械工程学院, 天津 300222;

2. The Department of Mechanical Engineering, University of Memphis, Memphis TN 38152, USA)

**摘要:** 纸页受载后的损伤断裂行为涉及其使用性能,对其损伤断裂过程的研究不仅有助于揭示纸页破坏行为的物理本质,而且有助于对纸页质量及其生产、加工工艺作出更加科学合理的评定。本文基于声发射(Acoustic Emission, AE)实验研究纸页内部微损伤演化过程,给出了评估纸页宏观损伤断裂性能的定量描述方法。首先,根据 AE 信号与微损伤事件之间存在本质上的关联性,通过采集和观测纸页试样受载过程中的 AE 信号来研究纸页损伤断裂的基本特征;其次,针对所采集 AE 信号的数据量大、蕴含信息丰富导致数据分析和处理困难的特点,本文采用多元随机变量的分析方法。利用概率熵和 Andrews 曲线法等统计分析手段对 AE 数据展开研究分析,并最终利用一条损伤状态轨迹曲线实现了对纸页微损伤演化过程的完整宏观描述。结果表明,纸页微损伤演化过程呈现明显阶段性变化特征;Andrews 曲线的聚类结果有效地区分了不同损伤阶段的相似性和差异性,同时,不同损伤阶段中纸样的微观形貌观测提供了实验性的证据。本文以一种典型的牛皮箱板纸为试件,验证了上述方法的有效性。

**关键词:** 纸页; 微损伤演化; 声发射(AE); 多元随机损伤变量; 概率熵; Andrews 曲线; 损伤状态轨迹曲线

中图分类号: TS77

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-14-186

### 0 引言

纸由于来源广泛、经济环保、加工性能好以及具有一定机械性能等优点被广泛用于印刷和包装等领域<sup>[1,2]</sup>,然而在其使用过程中不可避免地发生受载损伤,尤其是涉及重要使用性能的包装纸的受载损伤,比如在包装、运输和印刷过程中包装纸要承受撕裂、强力拉伸以及冲击载荷作用等<sup>[3]</sup>。对于包装纸的损伤问题,虽然也有其专用力学及机械性能检测方法<sup>[4]</sup>,但是传统检测一直处于经验和定性研究阶段,而且仅涉及宏观的力学性能(通常以纸张的抗张强度、耐折度、耐破度、撕裂度等作为纸张力学性能的指标),缺乏对于微观损伤过程的探讨。从断裂力学角度我们抽象出最基本的断裂形式——平面内裂纹张开型,即拉应力使裂纹在纸所在平面内张开<sup>[5]</sup>。按照损伤断裂力学的观点,纸页宏观力学失效现象发生的起点是微观损伤的存在和产生,其演化过程是架起破坏过程起点和终点的桥梁,即在载荷持续作用下损伤逐渐累积、演化和相互耦合,发展成宏观裂纹并扩展,最终导致材料结构的力学性能劣化<sup>[6,7]</sup>。因此,本文对纸页在平面内裂纹张开型形式下的微损伤演化过程的研究,将从对微损伤及其演化过程的

\* 收稿日期: 2014-09-22; 修回日期: 2014-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11272234);天津科技大学“十二五”综合投资规划学科建设项目青年学术团队资助计划

通讯作者: 李建宇(1978-),男,博士,主要研究领域:计算力学和声发射检测。Email: lijianyu@tust.edu.cn

描述和刻画入手<sup>[8]</sup>。

目前,已有关于纸页微损伤及其演化过程的研究,大致可分为两大类方法。一类是利用基于本构模型的力学方法(如连续介质损伤力学)来处理<sup>[6,7,9-12]</sup>,比如利用损伤因子及其演化方程描述损伤过程。虽然经典的力学方法有着成熟的理论,在宏观尺度上取得极大成功,但是单一依靠力学中的损伤因子及其演化方程来描述涉及时间、空间多尺度耦合等复杂物理背景的损坏断裂问题是不现实的,其最大难点在于如何准确把握一个或多个抽象外力的外因作用以及损伤的随机性等客观规律<sup>[13]</sup>。另一类是直接以微裂纹或微孔洞为对象,利用统计学方法研究其萌生、扩展及连接等物理过程,从而获得材料的宏观损伤断裂规律。在破坏过程中微损伤演化是一个异常复杂的系统,因而很难给出确定性的理论模型。目前一种有效的途径是借助实验的手段建立微损伤演化系统的统计描述。相对于其它宏观测量,AE信号被认为与微损伤事件之间有着更本质的关联,因而可为材料内部的损伤演化以及最终的断裂程度提供大量有价值的信息<sup>[14-18]</sup>。因此,借助声发射的技术能够实现微损伤及其演化过程的描述和刻画。截至目前,利用声发射对纸页损伤破坏性能的研究已经很多。上世纪80年代末,Yamauchi等<sup>[17-21]</sup>开始利用纸页的AE特性检验不同造纸工艺对纸页质量产生的影响。本世纪初Salminen等<sup>[22-24]</sup>尝试将AE与损伤断裂力学理论相结合。近年来Rosti等<sup>[25]</sup>尝试利用AE的统计规律预测纸样的破坏。但是发展至今,研究仍未涉及纸页微损伤演化过程的整体量化描述,仍未有效解决其中的多尺度耦合问题。

鉴于此,本文以单轴拉伸载荷作用下的纸页为研究对象,通过在线监测其微损伤演化过程的AE数据,继而建立蕴含多尺度和多场耦合关系的多元随机损伤变量,然后在多元随机损伤变量的框架下,利用概率熵和Andrews曲线法等统计手段分析纸页的损伤断裂问题,进而实现表征纸页微损伤演化过程的定量描述。本研究是基于AE数据对纸页微损伤演化过程展开的统计性描述方法,是与损伤理论、断裂理论同属于纸页的变形和破坏研究中不可或缺的一部分。

## 1 基于概率熵的纸页损伤状态的衡量

发生在纸页材料内部微损伤演化过程的最直接的表现是材料微结构的变化,即材料结构响应信息,这也是我们可测和易测的部分。所有可能的损伤源如纤维断裂、纤维抽出、纤维键断裂、非纤维类成分的损伤破坏等,都可以形成AE信号源,我们称之为随机损伤事件 $x_i(i=1,2,3,\dots)$ <sup>[26]</sup>。囊括基于AE的随机损伤事件 $x$ 所有参数(如时间、数量、幅度、能量、位置、发生率以及发展趋势等)以及其它用于描述损伤场的参数所构成的损伤状态空间 $\Omega$ 的数据特征足以用来表征微损伤演化的特征<sup>[26,28]</sup>。这样,可以从 $\Omega$ 中挖掘出基于AE的随机损伤事件的特征元素 $\alpha_{kj}$ 建立一个蕴含多尺度和多场耦合关系的多元变量,并将其定义为多元随机损伤变量 $D$ ,如下所示<sup>[26-28]</sup>:

$$D = \{X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_N\} = \begin{Bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_k \\ \vdots \\ Y_M \end{Bmatrix} = [\alpha_{kj}]_{M \times N} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \cdots & \alpha_{1j} & \cdots & \alpha_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{k1} & \cdots & \alpha_{kj} & \cdots & \alpha_{kN} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{M1} & \cdots & \alpha_{Mj} & \cdots & \alpha_{MN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,元素 $\alpha_{kj} = \text{Index}\{x\}_{kj}$ ,索引函数 $\text{Index}\{\cdot\}$ 是表示同时处在第 $j$ 个尺度区间和第 $k$ 个观察区间内的随机损伤事件 $x$ 的总计数; $k=1,2,\dots,M$ ;  $j=1,2,3,\dots,N$ 。多元随机损伤变量 $D$ 的列向量 $X_j$ 表征尺度<sup>①</sup>向量,行向量 $Y_k$ 表征观察向量。 $N$ 值代表尺度等级的数目,是根据AE特征中用于表征信号强弱的幅度作为尺度标准划分的尺度区间数;对微损伤的多尺度统计模式充分考虑了不同尺度效应上的损伤对材料失效影响的差异性。 $M$ 值代表观察窗口的数目,是根据损伤演化的时间作为观察标准划分

① 本文“尺度”一词的概念与力学中的尺度有一定区分,此尺度与彼尺度不同,因为此尺度是从能量间接而来;此尺度是材料损伤瞬间能量大小的度量,而不是某一裂纹累计后的物理长度;此尺度定义的好处是:a)反映了材料在受力不同瞬间的损伤响应,这种响应与受力大小不同而不同、与受力时间不同而不同、与受力状态不同而不同、与受力点位置不同而不同,我们把这一点称之为作用力与损伤的对应性。b)这一对应性不受作用力是否已知的限制。

的观察区间数;划分的观察区间上的观察向量物理意义是幅度谱分布。

本文采用幅度作为划分尺度标准,从门槛值  $A_{\min}$  到最大幅度值  $A_{\max}$  划分成  $n$  个尺度区间,即  $[A_{\min}, A_{\min} + (A_{\max} - A_{\min})/n], (A_{\min} + (A_{\max} - A_{\min})/n, A_{\min} + 2(A_{\max} - A_{\min})/n], \dots, (A_{\min} + (j-1)(A_{\max} - A_{\min})/n, A_{\min} + j(A_{\max} - A_{\min})/n], \dots, (A_{\min} + (n-1)(A_{\max} - A_{\min})/n, A_{\min} + (A_{\max} - A_{\min})]$ 。在纸页材料损伤断裂研究领域内,根据损伤演化对于时间的依赖性,在此以时间为统计基准设定观察窗口,材料损伤失效时的时间为  $T_{\max}$ ,观察窗口的长度  $0 < \omega < T_{\max}$ ,观察窗口的数量  $m$  决定多元随机变量中谱向量的数目,  $m = T_{\max}/\omega$ 。本文数据采集采用断续模式,也就是说观察窗口之间完全没有重叠和间隙的向前移动整合数据。

我们引进概率熵来定量表征损伤状态的不确定性,其公式如下<sup>[29,30]</sup>:

$$s = \int_0^1 \rho(x) \ln(1/\rho(x)) dx \quad (2)$$

式中,  $k = 1, 2, \dots, M$ , 第  $k$  个幅度谱对应的损伤状态的不确定性用熵值  $S_k$  来度量。在第  $k$  个幅度谱(观察区间)上,处于第  $j$  个尺度区间内的随机损伤事件  $x$  发生的概率为  $\rho_{kj}^A$ , 那么

$$\rho_{kj}^A \approx \frac{1}{(1/N)} \int_{j-1}^j \rho_{kj}^A(x) dx = N p_{kj}^A \quad (3)$$

式中  $p_{kj}^A = \frac{\alpha_{kj}}{L_k^A}$ , 其中  $L_k^A = \sum_{j=1}^N \alpha_{kj}$ 。

最终得到熵的公式

$$S_k \approx \sum_{j=1}^n p_{kj}^A \ln(1/(N p_{kj}^A)) \quad (4)$$

假设在某一观察窗口内,随机损伤事件发生在每一个尺度区间上的概率是相同的,即  $P_1 = P_2 = \dots = P_j = \dots = P_N = 1/N$ , 则  $S_k$  达到最大值 0;如果在某一观察窗口内,随机损伤事件集中发生在同一尺度区间,那么  $S_k$  达到最小值  $\ln(1/N)$ 。由此可以推断熵值增加,代表损伤状态的不确定性增加,随机损伤事件可能性的结果增多;反之,熵值减少,随机损伤状态分布的不确定性减小,事件朝着确定性方向发展。需要特别指出,基于随机损伤事件的多元随机损伤变量  $D$  具有实际的源物理背景,因此熵值在某一特定条件下的相对变化趋势才具有物理意义。另外,熵值在时间序列上演变成损伤状态轨迹曲线,用来表征纸页微损伤演化过程的变化趋势。

## 2 纸页微损伤的探索性聚类分析

本文利用探索性的聚类分析——Andrews 曲线法研究幅度谱的相关性。大量研究已经表明这是一种行之有效的多维数据可视化方法<sup>[31-37]</sup>。在 Andrews 曲线法中,以随机损伤变量  $D$  的观察向量  $Y_k = (\alpha_{k1}, \alpha_{k2}, \dots, \alpha_{kj}, \dots, \alpha_{kN})$  作为一数据点,标准化后,映射到连续的 Andrews 函数式中<sup>[38]</sup>:

$$f_k^S(t) = \alpha_{k1}^S / \sqrt{2} + \alpha_{k2}^S \sin(2\pi t) + \alpha_{k3}^S \cos(2\pi t) + \dots + \left\{ \begin{array}{l} \alpha_{kj}^S \sin(j\pi t), j \text{ 为偶数} \\ \alpha_{kj}^S (\cos(j-1)\pi t), j \text{ 为奇数} \end{array} \right\} + \dots \quad (5)$$

式中  $j=1, 2, \dots, N$ ; 虚拟变量  $t \in [0, 1]$ ;  $\alpha_{kj}^S$  是标准化的多元随机损伤变量  $D$  中的对应元素。很明显,多元随机变量  $D$  中所有的幅度谱可以通过 Andrews 曲线一一对应的表示出来,并且具有相似性的曲线会紧密地聚集在一起,表示材料中形成此损伤状态的物理场或者损伤模式具有很高的相似性<sup>[26,27]</sup>。

## 3 试验设计

试验材料为定量  $200\text{g}/\text{m}^2$  的单层涂布 A 级牛皮箱板纸,制作成长  $l$  为  $140\text{mm}$ ,宽  $b$  为  $25\text{mm}$  的长方形试样 30 个,长边方向与纸页的纵向一致(即纸样取 MD 方向),试样中心线边缘预制  $1\text{mm}$  缺口。数据采集由美国物理声学公司(Physical Acoustic Co., PAC)的声发射采集系统(Micro-II Digital AE System)和美特斯公司的微机控制电子万能试验机 MTS4304 实现,其中声发射传感器 Nano-30 的前置放大器增益  $40\text{dB}$ 。利用日本日立公司扫描电子显微镜 JSM-6380LV 观测纸页在不同损伤状态阶段的微观形貌。试验装置和数据采集过程如图 1 所示,试验条件保持在室温约  $25^\circ\text{C}$ ,相对湿度  $55\% \sim 60\%$ 。

声发射探头距中心线 10mm 对称粘贴在试样上。声发射采集设定阈值为 32dB，模拟滤波器频率为 1kHz~3MHz。微机控制电子万能试验机以 0.25mm/min 恒速拉伸，同时声发射采集系统以 1MSPS 的采样率同步采集信号。

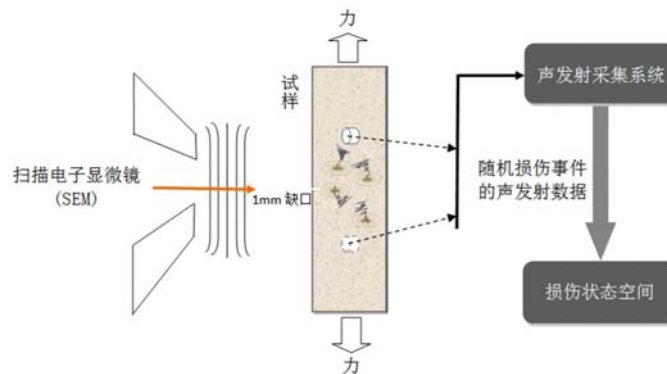


图1 纸页受力微损伤演化过程的 AE 数据采集及扫描电子显微镜观测

Fig. 1 AE data acquisition of micro-damage evolution process in paper sample under tensile load and scanning electron microscope (SEM) observation

#### 4 试验结果与分析

通过试验获得在单轴荷载下牛皮箱板纸试样损伤破坏过程中的力学及声发射特性，纸试样(MD 方向)AE 幅度值、载荷和时间的关系如图 2 所示。由于纸页材料结构和特性的复杂性，在其受载发生损伤断裂的过程中呈现出复杂的 AE 特征。在加载初期，基本没有或者极少量幅度较低的 AE 产生，说明几乎没有产生不可逆的损伤，材料仍处于可恢复的变形阶段，这主要是由构成纸页的植物纤维本身的柔韧性和环绕纤维的纤维素分子间的作用力所决定的<sup>[10,11,39]</sup>。随着载荷的增加，大约 80N 以后，直到峰值载荷(约 140N)之前 AE 数量开始缓慢增加，同时较大幅度的 AE 也开始出现。此时，纸页结构内部的薄弱部位开始产生应力集中，微观上纸页的孔隙周围造成应力集中，或在纤维最薄弱处，或在纤维结合部位，纤维局部发生交错滑动甚至断裂以及纤维键发生破坏，形成不可逆的损伤，逐渐增加的载荷促使这种不可逆损伤发生的数量和速率逐渐增加<sup>[39]</sup>。当载荷超过峰值(约 140N)后，AE 迅速发展，一直持续到材料最终破坏。此阶段可以明显地观察到宏观大尺度的裂纹由试样缺口一端沿着非线性轨迹朝着另外一端扩展。最终，纸样材料在断裂的时刻发出“啪”的一声，说明断裂瞬间 AE 能量较大，且可观察到纸样的断裂轨道间有似网状细长纤维连接，似破断而又非完全破断。总体而言，峰值载荷之前，AE 数量随载荷的增加而增加，峰值载荷之后，AE 数量迅速增加直至断裂；整个过程 AE 幅度分布趋于均匀分布。此处仅限于粗略的经验性描述，还不能对纸样各个阶段的损伤状态给予科学的量化度量。

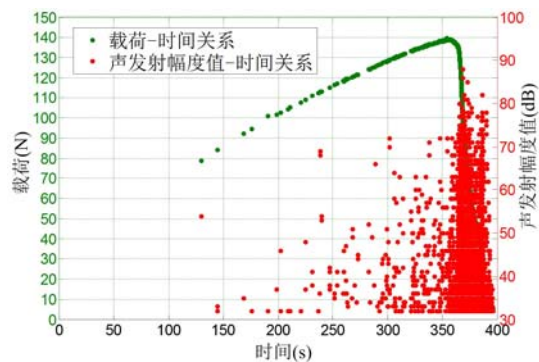


图2 单轴拉伸荷载下纸页载荷、声发射幅度值和时间关系图

Fig. 2 AE amplitude-load-time plot of paper sheets under uniaxial load

由牛皮箱板纸样 MD 方向的微损伤演化过程的 AE 数据得到多元随机损伤变量  $D$ ，其幅度由 32dB 到 99dB 划分成 10 个尺度等级，即  $N=10$ ，观察窗口的长度  $\omega=5s$ 。多元随机损伤变量的幅度谱分布图如图 3 所示，从中可以看出：(1)随着时间  $t$  的增加，幅度谱涵盖的幅度范围逐渐扩大，从  $t=320s$  开始基本不再扩大，之后的谱线形具有一定相似性，且明显区别于  $t=320s$  之前的线形，说明损伤模式在  $t=320s$  前后明显不同<sup>[27]</sup>；(2)在纸样微损伤演化的整个过程中，低幅度信号数量始终多于高幅度信号数

量,且基本随幅度升高,声发射信号数量减少。

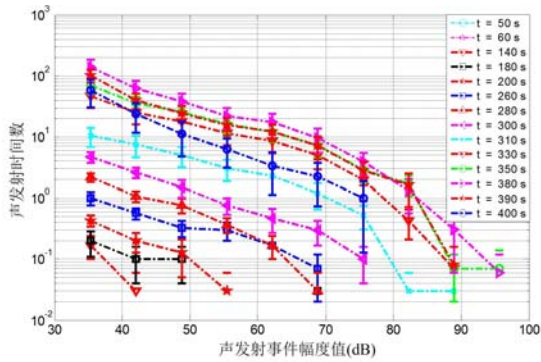


图3 随机损伤变量的幅度谱分布图

Fig. 3 The distribution plot of amplitude spectrum of multi-variate of random damage

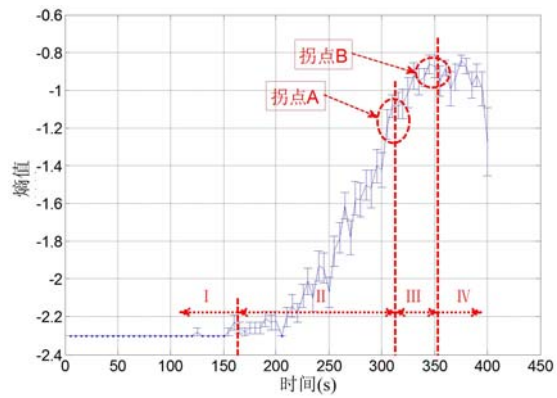


图4 损伤状态轨迹曲线

Fig. 4 The trajectory of damage states

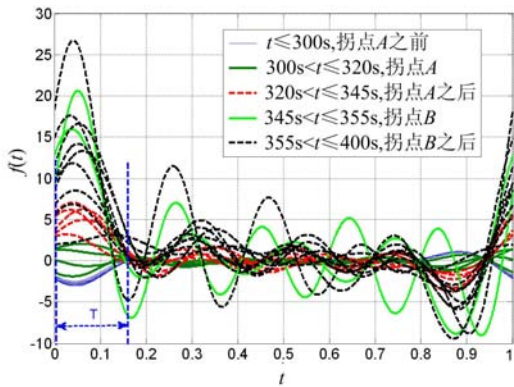


图5 多元随机损伤变量的 Andrews 曲线

Fig. 5 Andrews plots of multi-variate of random damage

对应图2中纸样的弹性阶段,基本无不可逆损伤发生;在SEM观测图6(a)中,纸样表面涂布层平整完好,未有损伤痕迹发现。因此,纸样处于无显著损伤状态。

(2) 在II阶段(160s ≤ t < 300s),其损伤状态轨迹曲线中熵值显著增加, ∂s/∂t > 0 且 ∂²s/∂t² > 0,曲线形态呈上凹形,表明损伤状态的不确定性迅速增加;这一阶段在图5的Andrews曲线(位于 t ≤ 300s 的曲线组里)明显地聚集在一起,并且与无损伤状态时的曲线基本聚集到了一起,两者表现出高度的相似性,表明此时的损伤模式变化的一致性,由此推测该阶段出现的损伤对纸样造成的影响很小;在图2中,载荷不断增加,AE信号在数量和发生速率上逐渐增加,纸样切口处由于应力集中开始萌生少量损伤;这一阶段在SEM观测图6(b)中,纸样断口处涂布层表面的有一条明显的非线性主裂纹(其有效长度大约1mm)出现,附近伴有数量较多且尺度大小不一的微裂纹出现,其代表微损伤演化的结果,我们推测损伤场覆盖的区域都可能不同程度地损伤,产生的主要损伤机制是小范围的纤维断裂、纤维键断裂和涂布层的破裂,其特点是范围小,对纸样造成的危害较小。此时,纸样处于初始损伤阶段。

(3) 在拐点A处(300s < t ≤ 320s),确切来讲是纸样损伤状态不确定性增长趋势由快变缓的一个过渡阶段,拐点A表明存在具有明显差异的两种损伤模式的转换;在图5这一阶段的Andrews曲线明显位于相差180°的两组曲线的过渡位置,证实这个拐点的存在。另外在图3中,其幅度谱分布也由此开始呈现出与之前完全不同的变化趋势,线性覆盖的幅度比之前的都要多出十几个分贝,且之后覆盖范围基本不再扩大。

(4) 在III阶段(320s < t ≤ 345s),其损伤状态轨迹曲线中的熵值继续增加,但是增速明显减缓, ∂s/∂t > 0 且 ∂²s/∂t² < 0,曲线形态经过拐点A由上凹形变为上凸形,表明损伤状态向趋于稳定的方向发展,大

牛皮箱板纸试样基于信息熵的损伤状态轨迹曲线示于图4,下面将结合AE幅度值—载荷—时间关系(见图2)、Andrews曲线法的聚类结果(见图5)和SEM(Scanning Electron Microscope,扫描电子显微镜)的观测结果(见图6)进行分析,可以得出:

(1) 在I阶段(t ≤ 160s),损伤状态轨迹曲线中的熵值基本保持在最小值  $S_{min} = \ln(1/10) = -2.3025851$ ,表明损伤状态的不确定性最高;在图5这一阶段的Andrews曲线(位于 t ≤ 300s 的曲线组里)也明显的紧密聚集在一起,说明无损伤模式下幅度谱的高度相似;对

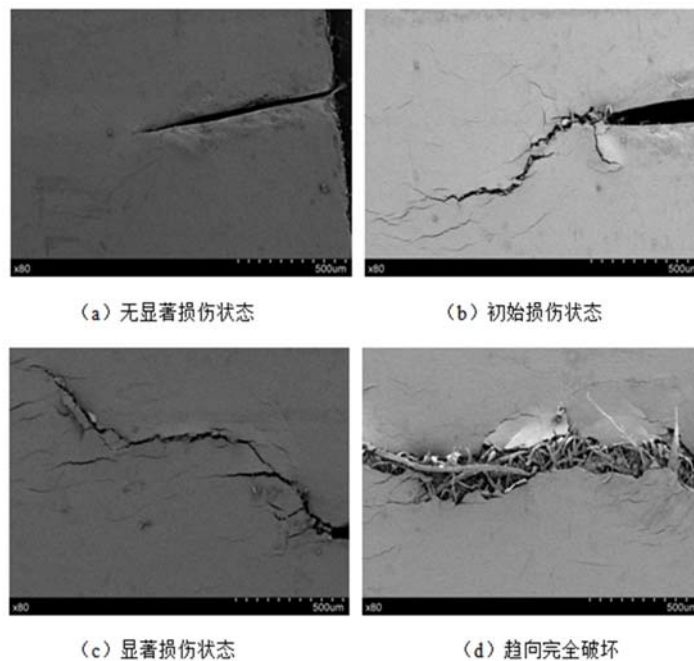


图6 纸样微损伤演化过程中不同阶段的损伤状态 SEM 观测结果

Fig. 6 The results of SEM of damage states in paper samples in different stages of micro-damage evolution process

约  $t=355\text{s}$  时熵值达到一个稳定值。在图 5 这一阶段的曲线在  $T$  范围内分布呈现出朝  $f(t)$  轴正方向分散分布的趋势,而且本阶段的曲线的间距较 I 阶段明显增加,相位上也呈现出细微差别,总之本阶段曲线特征存在相似性但是相似度相对下降,表明损伤状态改变的跨度增加,这个可能与材料物质属性的改变有关,由此状态的材料与彼状态的材料差异性导致,随着微损伤演化,材料物质属性的响应趋于无序性;在图 2 中载荷在这一阶段达到最大值,AE 在数量和速率上呈现急剧增长,由于纸样个体差异性的存在,我们尚不清楚这个载荷最大值与熵值趋于稳定最大值的确切关系。这一阶段在 SEM 观测图 6 (c) 中,主裂纹的尺度进一步增长,大量微裂纹也随之萌生,损伤显著性增强,但是其承受载荷的能力并未显著减小(见图 2),表明宏观裂纹处于形成阶段,还未进入快速扩展。此时,纸样处于显著损伤阶段。

(5) 在拐点 B 处( $345\text{s} < t \leq 355\text{s}$ ),确切来讲其损伤状态不确定性达到最大,之后减小,在此表明纸样的微损伤演化过程的稳定增长阶段即将结束,预示纸样趋于完全破坏的发展方向。在图 5 这一阶段明显对应振幅较大的 Andrews 曲线,在  $T$  范围内曲线呈现朝  $f(t)$  轴正方向分散分布的趋势结束,开始转向朝  $f(t)$  轴负方向分散分布或者不确定。

(6) 在 IV 阶段( $355\text{s} < t \leq 400\text{s}$ ),其损伤状态轨迹曲线中的熵值减小或者偶然增加,表明材料开始朝着完全破坏方向发展;在图 2 中,载荷急剧减小,AE 信号的数量和发生率进一步增强;在图 5 这一阶段 Andrews 曲线分布在间距和相位上的无序性进一步增大;而这一阶段在 SEM 观测图 6(d) 中,宏观大尺度裂纹的出现和增长,明显证明材料趋于完全破坏。

## 5 结论

本文在一个基于 AE 的试验及分析框架下研究了纸页内大量纤维及非纤维组织间的微损伤演化过程,给出了评估其宏观损伤断裂性能的定量描述方法。借助试验的手段,直接以单轴荷载微裂纹系统为研究对象,研究纸页的损伤断裂过程。通过研究发现:

(1) 根据损伤状态轨迹曲线,在单轴拉伸荷载作用下纸页微损伤过程主要分为四个不同的连续阶段: I 无显著损伤阶段, II 初始损伤阶段, III 显著损伤阶段和 IV 趋于完全破坏阶段,其中损伤状态轨迹曲线中的关键拐点 A 预示 II 阶段向 III 阶段的转变,拐点 B 预示 III 阶段向 IV 阶段的转变。在此也表明概率熵在定量描述纸页微损伤演化过程中表现出可靠的适用性。

(2) 利用 Andrews 曲线法对多元随机损伤变量的幅度谱进行探索性聚类分析,其结果中 Andrews 曲线组的划分与损伤状态轨迹曲线中的四个阶段和两个拐点基本对应: $t \leq 300\text{s}$  时的曲线组对应 I 和 II 阶段, $300\text{s} < t \leq 320\text{s}$  时的曲线组对应拐点 A, $320\text{s} < t \leq 345\text{s}$  时的曲线组对应 III 阶段, $345\text{s} < t \leq 355\text{s}$  时的曲线对应拐点 B, $355\text{s} < t \leq 400\text{s}$  时的曲线组对应 IV 阶段。该聚类方法有效地区分了不同损伤阶段的相似性和差异性。另外,利用扫描电子显微镜对纸样损伤状态观测的结果又为不同损伤阶段提供了确凿的试验证据。

(3) 基于多元随机变量对纸页微损伤演化过程展开的统计性描述方法,一方面可以有效弥补经验性描述的不足,另一方面可以有效把握复杂损坏断裂问题中的多场多尺度耦合问题。

同时,本文研究难免存在不足之处,比如对于纸页损伤的具体物理机制的认识尚不清晰,预制裂纹对纸样材料损伤状态影响的程度无法确定等。目前对于纸页微损伤演化的研究只限于初步阶段,更加深入、细致的研究还会继续。

**致谢:** 作者衷心感谢天津科技大学刘忠教授和美国孟菲斯大学机械工程学院樊明博士对本研究提供的帮助。同时也感谢作者所在实验室朱应利博士和邢鸿雁教授对于本研究提供的宝贵意见。

#### 参考文献:

- [1] 李念, 杨坚. 纸包装材料的发展趋势[J]. 中国包装, 2006(1):49-51 (Li Nian, Yang Jian. The developmental tendency and direction of paper packing material[J]. China Packaging, 2006(1):49-51 (in Chinese))
- [2] 郑元林, 周世生. 纸张的印刷适性[J]. 西北轻工业学院学报, 2002, 20(3):103-106 (Zheng Yuanlin, Zhou Shisheng. Printability of paper[J]. Journal of Northwest University of Light Industry, 2002, 20(3):103-106 (in Chinese))
- [3] 刘洪斌. 纤维特性与纸页撕裂性能关系的研究[D]. 天津科技大学, 2004:1-2 (Liu Hongbin. Study of the relationship between fiber properties and tearing strength[D]. Tianjin University of Science and Technology, 2004 (in Chinese))
- [4] Caulfield D F, Gunderson D E. Paper testing and strength characteristics[C]. TAPPI Proceedings of the 1988 Paper Preservation Symposium, Wahsington, DC. Atlanta, TAPPI Press, 1988:31-40.
- [5] 张正键, 周林杰, 董荣业. 纸张的断裂韧性[J]. 西南造纸, 2005, 34(5):45-47 (Zhang Zhengjian, Zhou Linjie, Dong Rongye. Fracture toughness of paper[J]. South West Pulp and Paper, 2005, 34(5):45-47 (in Chinese))
- [6] 蔡秋香, 胡开堂. 损伤力学理论在造纸领域的应用—纸页网格型纤维材料的损伤力学[J]. 黑龙江造纸, 2001(3):7-9 (Cai Qiuxiang, Hu Kaitang. Applying the damage mechanics theory to the papermaking field[J]. Heilongjiang Pulp & Paper, 2001(3):7-9 (in Chinese))
- [7] 蔡秋香. 纸页损伤力学的初步研究[D]. 天津轻工业学院, 2001 (Cai Qiuxiang. Elementary study on the damage mechanics of papersheet[D]. Tianjin University of Light Industry, 2001(in Chinese))
- [8] 白以龙, 柯孚久, 夏梦芬. 固体中微裂纹系统统计演化的基本描述[J]. 力学学报, 1991, 23(3):290-297 (Bai Yilong, Ke Fujiu, Xia Mengfen. Formulation of statistical evolution of microcracks in solids[J]. Acta Mechanica Sinica, 1991, 23(3):290-297(in Chinese))
- [9] 卢春生, 白以龙. 材料损伤断裂中的分形行为[J]. 力学进展, 1990, 20(4):468 (Lu Chunsheng, Bai Yilong. Fractals in damage and fracture of materials[J]. Advances in Mechanics, 1990, 20(4):468(in Chinese))
- [10] Qingxi S Xia, Mary C Boyce, David M Parks. A constitutive model for the anisotropic elastic-plastic deformation of paper and paperboard[J]. International Journal of Solids and Structures, 2002(39):4053-4071.
- [11] Bronkhorst C A. Modelling paper as a two-dimensional elastic-plastic stochastic network[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(20):5441-5454.
- [12] Isaksson P, Hägglund R, Gradin P. Continuum damage mechanics applied to paper[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41(20):4731-4755.
- [13] 齐刚, 樊明. 论固有结构与损伤之间的矛盾在材料受载分析中的主导性——固体力学的“弹性化思维”[J]. 自然辩证法, 2012, 2(34):114-122 (Qi Gang, Fan Ming. The dominance of the antinomy between the inherent structure and irreversible damage in evaluating material's performance: an experimental foundation for a novel

- epistemological methodology in solid mechanics[J]. *Journal of Dialectics of Nature*, 2012, 2(34):114—122 (in Chinese))
- [14] Sarfarazi M P. Acoustic emission and damage constitutive characteristics of paper[R]. Atlanta, Georgia: The Institute of Paper Science and Technology, 1992.
- [15] Isaksson P, Gradin P A, Kulachenko A. The onset and progression of damage in isotropic paper sheets[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, 43(3-4):714.
- [16] Hugueta S, Godina N, Gaertner R. Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester[J]. *Composites Science and Technology*, 2002, 62:1433.
- [17] Yamauchi T, Okumura S, Murakami K. Measurement of acoustic emission during the tensile straining of paper [J]. *Measurement of Acoustic Emission During the Tensile Straining of Paper*, 1989, 15(1):23—27.
- [18] Yamauchi T, Okumura S, Noguchi M. Acoustic emission as an aid for investigating the deformation and fracture of paper[J]. *Transactions of the Technical Section—Canadian Pulp and Paper Association*, 1990, 16(2):44—47.
- [19] Yamauchi T, Murakami K. Acoustic and optical measurements of paper under strain[J]. *Tappi Journal*, 1991, 76(2):101—104.
- [20] Yamauchi T, Hatanaka T. Acoustic emission during the tensile straining of paper from hardwood pulp-effects of beating and addition of dry strength resin[J]. *Japan Tappi Journal*, 2003, 57(8):89—95.
- [21] Yamauchi T. Effect of notches on micro failures during tensile straining of paper[J]. *Japan Tappi Journal*, 2004, 58(11):105—112.
- [22] Salminen L, Tolvanen A, Alava M. Acoustic emission from paper fracture[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(18):185503.
- [23] Salminen L. Aspects of fracture processes in paper[D]. Finland, Espoo: Helsinki University of Technology, 2003.
- [24] Gradin P A, Graham D, Nygård P, et al. The use of acoustic emission monitoring to rank paper material with respect to their fracture toughness[J]. *Experimental Mechanics*, 2008, 48(1):133—137.
- [25] Rosti J, Koivisto J, Alava M J. Statistics of acoustic emission in paper fracture: precursors and criticality[J]. *Journal of Statistical Mechanics*, 2010:P02016.
- [26] Qi G, Li J Y, Fan M, et al. Assessment of statistical responses of multi-scale damage events in an acrylic polymeric composite to the applied stress[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2013, 33:103—115.
- [27] Qi G, Fan M, Wayne S F. Measurements of a multicomponent variate in assessing evolving damage states using a polymeric material[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011, 60(1):206—213.
- [28] Qi G, Wayne S F. A framework of data-enabled science for evaluation of material damage based on acoustic emission[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2014, 33(4):597—615.
- [29] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27:379—423.
- [30] Gibbs J W. Elementary principles in statistical mechanics[J]. *Bull. Amer. Math. Soc.*, 1906, 12(4):194—210.
- [31] Kromesch S, Juhász S. High dimensional data visualization[C]. 6th International Symposium of Hungarian Researchers on Computational Intelligence, 2005:1—12.
- [32] Embrechts P, Herzberg A M, Kalbfleisch H K, et al. An introduction to wavelets with applications to Andrews' plots[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 1995, 64(1): 41—56.
- [33] Khattree R, Naik D N. Andrews plots for multivariate data: some new suggestions and applications[J]. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2002, 100(2):411—425.
- [34] César Carcía-Osorio C, Fyfe C. Visualisation in high dimensional feature spaces[C]. *International Workshop on Practical Applications of Agents and Multiagents Systems (IWPAAMS 2003)*, 2003.
- [35] César Carcía-Osorio C, Fyfe C. Visualization of high-dimensional data via orthogonal curves[J]. *Journal of Universal Computer Science*, 2005, 11(11):1806—1819.
- [36] 芮小平, 赵扬, 杨崇俊 等. 空间信息多维可视化技术综述[J]. *小型微型计算机系统*, 2004, 25(9):1638 (Rui Xiaoping, Zhao Yang, Yang Chongjun, et al. Survey on the visualization of multidimensional spatial information [J]. *Mini-micro Systems*, 2004, 25(9):1638 (in Chinese))



- [37] 孙扬, 封孝生, 唐九阳 等. 多维数据可视化技术综述[J]. 计算机科学, 2008, 35(11):3 (Sun Yang, Feng Xiaosheng, Tang Jiuyang, et al. Survey on the research of multidimensional and multivariate data visualization[J]. Computer Science, 2008, 35(11):3(in Chinese))
- [38] Ansreus D F. Plots of high-dimensional data[J]. Biometrics, 1972, 28(1):125-136.
- [39] 胡开堂. 纸页的结构与性能[M]. 中国轻工业出版社, 2006:46-108 (Hu Kaitang. The structure of paper sheets and its properties[M]. Chinese Light Industry Press, 2006(1st Ed):46-108(in Chinese))

## On the Characteristics of Acoustic Emission and Multivariate Statistics in Micro-Damage Evolution Process of Paper Sheet Subjected to Force Action

ZHANG Liang<sup>1</sup>, LI Jian-yu<sup>1</sup>, QI Gang<sup>1,2</sup>

(1. The School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China;

2. The Department of Mechanical Engineering, University of Memphis, Memphis, TN 38152, USA)

**Abstract:** Damage and fracture behavior of paper sheet subjected to force action involves its service performance. So, investigation on its damage and fracture process not only helps to reveal the physical nature of paper sheet damage, but also helps to more scientifically and reasonably assess the paper sheet quality, improving the production and processing technology of paper sheets. This paper presents a quantitative description method for the assessment of micro-damage and fracture behavior of paper sheets. Firstly, according to the essential correlation between AE signal and micro-damage event, basic characteristics of paper sheet damage and fracture were studied by collecting and observing AE signals emitted during loading process. Secondly, since collected AE signals contain large amount of data and information, resulting in the difficulty in data analysis and processing, so multivariate of random damage method was adopted. AE data were analyzed by using probability entropy and Andrews curve. Finally, a complete macroscopic description of micro-damage evolution of paper sheets was achieved by using a trajectory of damage states. Results show that paper sheet micro-damage evolution presents obvious stepped change characteristics. Andrews curve clustering results effectively discriminate the similarity and difference among different damage stages. At the same time, scanning electron microscope observation of paper sheet on different damage stages provides experimental evidence. Taking typical kraftliner as a case the validity of above-mentioned method was verified.

**Keywords:** paper sheet; micro-damage evolution; acoustic emission (AE); multivariate of random damage; probability entropy; andrews curve; trajectory of damage states