

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.03.012

## 复合纸板力学性能和应变率相关性测试与表征

廉晓根<sup>1</sup>, 卢立新<sup>1,2</sup>, 吴健<sup>3</sup>, 潘嘹<sup>1,2</sup>

(1. 江南大学包装工程系, 无锡, 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡, 214122;  
3. 中国船舶科学研究中心, 无锡, 214082)

**摘要:** 为了研究复合纸板材料在不同应变率下的力学响应, 利用万能材料试验机和高速率拉伸试验机进行了准静态和动态拉伸试验, 同时利用高速摄像机和数字图像相关法(Digital image correlation, DIC)记录拉伸破坏过程和应变场。试验结果显示, 纸板材料的拉伸力学性能和破坏机制具有明显的应变率相关性。随着应变率的增大, 材料的拉伸强度显著增大, 断裂应变在中应变率范围内也表现出明显的应变率效应。对比试验结果和 3 种应变率效应比表征模型的拟合结果, 基于 Cowper-Symonds 表达式的表征模型, 能够很好地描述纸板材料在中低应变率下的应变率效应。该模型对薄壁纸管能量吸收性能的模拟和理论研究, 以及冲击防护结构设计提供了理论支撑。

**关键词:** 纸板; 力学性能; 应变率效应; 数字图像相关法

**中图分类号:** O347.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2020)03-0438-07

## Testing and Characterization of Mechanical Properties and Strain Rate Dependence of Composite Paperboard

LIAN Xiaogen<sup>1</sup>, LU Lixin<sup>1,2</sup>, WU Jian<sup>3</sup>, PAN Liao<sup>1,2</sup>

(1. Department of Packaging Engineering, Jiangnan University, Wuxi, 214122, China;  
2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi, 214122, China;  
3. China Ship Scientific Research Center, Wuxi, 214082, China)

**Abstract:** To investigate the mechanical properties of composite paperboard at different strain rates, quasi-static and dynamic tensile tests were carried out by universal material testing machine and high-speed testing machine. Meanwhile, the tensile failure process and strain field were recorded by using high-speed camera and digital image correlation (DIC) method. The test results reveal that the mechanical properties and failure mechanism of paperboard show significant strain rate dependence. With the increase of strain rate, the tensile strength of the studied material increases significantly, and the fracture strain also shows obvious strain rate dependence at intermediate strain rate. By comparing the test results with the fitting results of the three models of strain rate dependence ratio, the characterization model based on Cowper-Symonds equation can well describe the strain rate dependence of composite paperboard at low and intermediate strain rates. The proposed model can be used not only for the simulation and theoretical research on the energy absorption performance of thin-walled paper tube, but also for the design of impact protection structure.

**Key words:** paperboard; mechanical properties; strain rate dependence; digital image correlation (DIC)

纸板材料具有质轻、易加工, 以及良好的能量吸收性能等特点, 广泛应用于能量吸收领域, 如航空航天、空投系统、产品运输防护和建筑抗震结构等。在工程应用中, 复合纸板材料常被加工成薄壁

**收稿日期:** 2020-03-26; **修订日期:** 2020-04-10

**通信作者:** 卢立新, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: lux@jiangnan.edu.cn。

**引用格式:** 廉晓根, 卢立新, 吴健, 等. 复合纸板力学性能和应变率相关性测试与表征[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 438-444. LIAN Xiaogen, LU Lixin, WU Jian, et al. Testing and characterization of mechanical properties and strain rate dependence of composite paperboard[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 438-444.

圆管和方管结构,用作缓冲吸能装置。这些结构有时在极短的持续时间内会承受迅速增长的动载荷。在这种情况下,材料的负载和应变率都很高。因此,通过数值模拟和理论方法分析结构的强度,以及设计吸能装置时,准确的材料性能是至关重要的。一般来说,大多数纸板结构设计和研究是基于准静态试验获得的材料特性<sup>[1]</sup>。然而,研究表明:在许多情况下,纸板等复合材料的力学性能具有显著的应变率相关性<sup>[2-6]</sup>。

杨嫣红等<sup>[7]</sup>综述了缓冲吸能材料性能的相关研究进展,但主要集中在瓦楞纸板、蜂窝纸板的力学特性。而复合纸板材料一般是由若干原纸层通过胶粘剂粘合而成的多层复合结构。Stenberg等<sup>[8-9]</sup>对TRIPLEX复合纸板进行了广泛的试验研究,记录了纸板的应力-应变行为。值得注意的是,纸板的化学浆层通常比机械层强度更高。Xia等<sup>[10-11]</sup>在Stenberg等人的研究基础上建立了纸和纸板的弹塑性本构模型,使模拟纸板在复杂、有限变形下的力学行为成为可能。Li等<sup>[12-13]</sup>通过使用单一的硬化函数简化了上述模型,并将其与Xia等人提出的非二次本构模型进行了比较和试验验证。Huang等<sup>[14]</sup>对工业用4层纸板进行了数值模拟,对材料性能、不同变形损伤机制进行了研究。然而,相关理论模型和试验研究都集中在纸和纸板在准静态拉伸、折叠过程中的损伤发展机制,并未考虑纸板动态载荷下的力学性能。

复合材料的应变率行为具有多方面的试验研究。Sierakowski<sup>[15]</sup>列出了超过120篇关于复合材料在高应变率下力学性能的文献。李素云等<sup>[16]</sup>研究了铝基碳化硅复合材料的力学性能,并对比了Johnson-Cook及Cowper-Symonds模型,结果显示Cowper-Symonds模型能更准确地描述该材料的应变率效应。鄂玉萍<sup>[17]</sup>研究了蜂窝纸板在动态冲击时的平台应力。考虑了动态压缩载荷下结构内部封闭的气体对蜂窝纸板平台应力的贡献,并未考虑应变率效应对材料本身力学性能的影响。薄壁纸管等结构作为能量吸收装置主要应用在应变率 $1\sim 100\text{ s}^{-1}$ 的中低速冲击场景,而纸板材料在动态载荷下力学性能的相关试验和理论模型的研究较少<sup>[5, 18-20]</sup>。

本文的研究目的是对用于薄壁纸管等能量吸收结构的复合纸板材料的力学性能和应变率相关性进行试验研究和模型表征。采用准静态及动态高速单向拉伸试验方法,得到材料不同应变率下的应力-应变关系。利用数字图像相关法记录材料拉伸破坏过程和应变场,通过拟合试验结果确定纸板材料应变率效应比模型参数。本研究可用于模拟

和预测纸板材料在使用过程中的变形行为,为薄壁管在动态冲击下的能量吸收性能等相关研究提供理论依据。

## 1 试 验

### 1.1 材料和试件

本文研究的复合纸板材料,由广州海方科技股份有限公司生产的方形纸管管壁机械裁切得到。构成纸管的主体原纸为衡山新金龙纸业有限公司生产的C级纱管纸,定量 $360\text{ g/m}^2$ ,厚度 $0.48\text{ mm}$ ;表层原纸为广东玖龙纸业(控股)有限公司生产的牛卡纸,定量 $160\text{ g/m}^2$ ,厚度为 $0.22\text{ mm}$ ;所用胶粘剂为广州一江化工有限公司生产的“江与海”白乳胶,其主要成分为醋酸乙烯和聚乙烯醇。方形纸管在广州海方科技股份有限公司的专用设备HF-中型机上制备,首先将工业原纸分切成宽度 $104\sim 106\text{ mm}$ 纸带,然后将涂布胶粘剂后的1层表层原纸带和6层主体原纸带逐层错位,螺旋缠绕在设备的方形模具上,经过滚轮挤压出管,制成试验用方形纸管。纸管裁切后需要在 $75\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 烘房中干燥 $8\sim 15\text{ h}$ 。

根据高速拉伸试验机专用快速夹紧夹具的要求,中应变率拉伸试验的试件规格如图1(a)所示。为了避免试件尺寸对测试结果的影响,低应变率拉伸试件采用相同的标距和横截面尺寸,试件的几何尺寸如图1(b)所示。

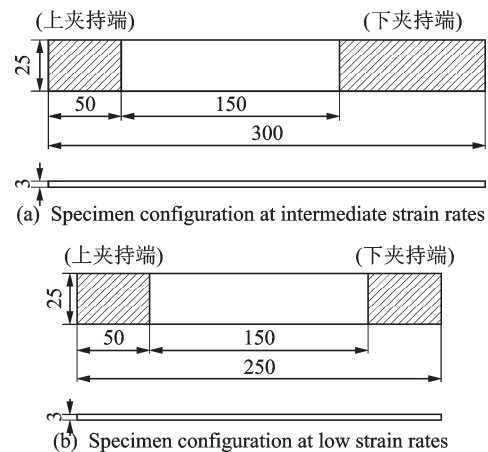


图1 试件尺寸图

Fig.1 Specimen configurations

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 中低应变率单轴拉伸试验

低应变率拉伸试验设备为美特斯工业系统(中国)有限公司生产的微机控制电子万能试验机MTS E43.104。试验参照国家标准GB/T 1040.1—2006<sup>[21]</sup>,3组低应变率试验的加载速度如表1所示。

表1 3组低应变率试验的试验条件与参数

Table 1 Test conditions and parameters of low strain rate tests of three groups

目标应变率/ $s^{-1}$	标距段长度/mm	加载速度/ $(m \cdot s^{-1})$	试验应变率/ $s^{-1}$
0.000 1	150	$1.67 \times 10^{-5} (1)^a$	$7.84 \times 10^{-5} \pm 6.62 \times 10^{-7}$
0.001	150	$1.67 \times 10^{-4} (10)^a$	$8.09 \times 10^{-4} \pm 7.29 \times 10^{-6}$
0.01	150	$1.67 \times 10^{-3} (100)^a$	$7.83 \times 10^{-3} \pm 1.45 \times 10^{-4}$

注:a表示括号内为mm/min单位下的速度。

中应变率拉伸试验在英国英斯特朗公司的 INSTRON VHS 80/20 高速率试验机上进行。该设备的执行机构能够在测试期间保持恒定的加载速度。图2所示为该设备的快速夹紧夹具和原理图。楔形块用于保持夹具分开。开始时,驱动器下降并加速,此时试件可以在夹具内侧自由通过。当达到试验要求的速度时,两根穿过楔形块的垂直分离杆到达行程终点,将楔形块拉出,夹具快速夹紧试件下拉,直至试件断裂。3组中应变率试验的加载速度如表2所示。

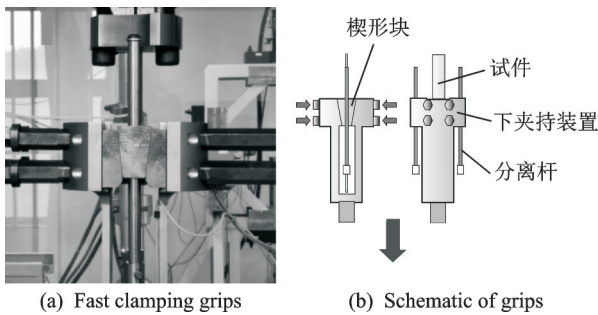


图2 高速率试验机快速夹紧夹具和原理图

Fig.2 Grips in HTM machine and schematic of grips

表2 3组中应变率试验的试验条件与参数

Table 2 Test conditions and parameters of intermediate strain rate tests of three groups

目标应变率/ $s^{-1}$	标距段长度/mm	加载速度/ $(m \cdot s^{-1})$	试验应变率/ $s^{-1}$
1	150	0.15	$9.19 \times 10^{-1} \pm 3.15 \times 10^{-2}$
10	150	1.50	$1.02 \times 10^{+1} \pm 1.08 \times 10^{-1}$
100	150	15.50	$1.63 \times 10^{+2} \pm 1.62 \times 10^{+0}$

所有试件在测试前均使用恒温恒湿箱 KTHA-015TBS (昆山庆声电子科技有限公司) 进行温湿度处理。按照国家标准 GB/T 10739—2002<sup>[22]</sup>, 预处理温度为  $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为  $50\% \pm 2\%$ 、时间

为 72 h。试样取出后,需在 5 min 内完成测试。

### 1.2.2 应变测量系统

试验中的应变测量是基于数字图像相关法 (Digital image correlation, DIC), 搭建的非接触式全场应变测量系统<sup>[23]</sup>。该方法通过将试件表面随机分布的斑点作为变形载体, 通过连续拍摄数字图像, 跟踪斑点运动, 从而计算被测试件表面的位移和变形场<sup>[24-25]</sup>。

在低应变率试验中, 图像采集通过 Point Grey 的中速相机 GZL-CL-22C5M 实现。试验前, 在试件表面制作高质量的黑白散斑。测量系统需要搭建一组小型补光灯以满足光强要求, 如图3所示。试验过程中, 通过数据采集盒 (Data acquisition, DAQ) 实时同步电子万能试验机载荷信号。试验结束后, 使用 Correlated Solutions 的 DIC-3D 分析软件对试件表面散斑信息进行分析, 获取试件表面的应变场, 再结合采集到的应力信息, 即可获得试件在低应变率下的应力-应变曲线。中应变率试验加载速度较高, 通过 Redlake 的 MotionXtra HG-100K 高速摄像机进行图像采集。试验过程中使用一组高功率补光灯进行光照补偿。

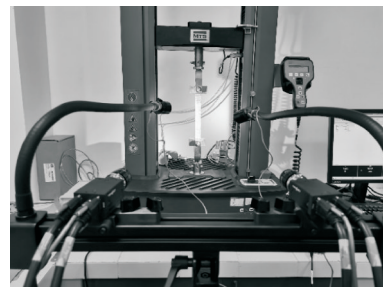


图3 应变测量系统

Fig.3 Strain measurement system

## 2 结果与讨论

### 2.1 应变场与破坏结果分析

通过对相机采集到的散斑图像进行分析计算, 可以得到试件表面变形的应变场。图4为试件在单向拉伸试验中不同时刻的应变场分布。从图中可以看出, 低应变率 ( $0.000 1 s^{-1}$ ) 单向拉伸试验中, 在 70~110 s 阶段, 试件加载方向的应变分布是比较均匀的。在 110~150 s 阶段, 试件局部应变迅速增大, 说明载荷达到试件损伤临界, 试件局部抵抗变形能力减弱。如图中  $t=150 s$  所示, 试件最终形成斜向薄弱区。中应变率 ( $1 s^{-1}$ ) 单向拉伸试验中, 试件在初始阶段保持了均匀的应变分布。不同的是, 从图中  $t=23 ms$  看出, 在应变率增大的影响下, 试件两处达到了损伤临界, 局部应变迅速增大, 从而可以推断断裂应变也将相应增大。

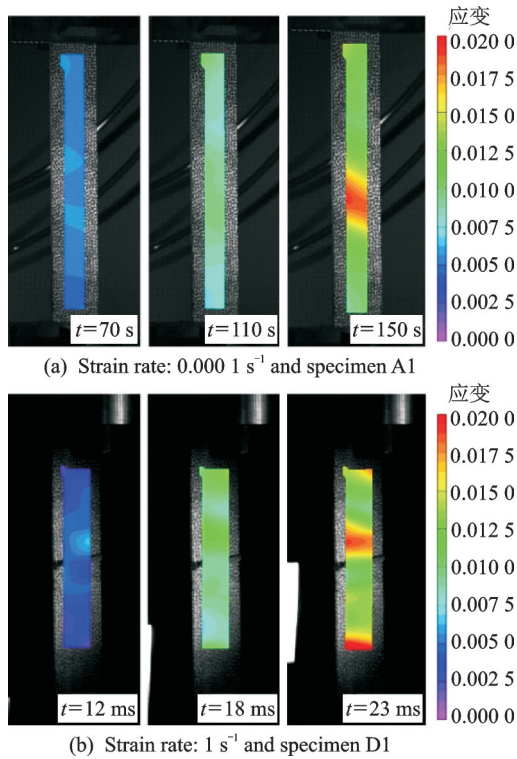


图 4 试件不同时刻的应变场云图

Fig.4 Contour plot of strain distribution at different time

复合纸板材料在不同应变率下的拉伸断裂照片如图 5 所示。可以看出:(1)在应变率  $10^{-4}$  和  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  条件下,可以观察到断口呈锯齿状且十分粗糙,这是由于低应变率下,应变分布十分均匀,试件损伤区域向相邻最薄弱点缓慢扩展形成粗糙的断口面。(2)在应变率  $10^{-2}$  和  $1 \text{ s}^{-1}$  条件下,可以观察到断口比较平整,这是由于试件损伤区域迅速扩展为断裂破坏。(3)在应变率 10 和  $100 \text{ s}^{-1}$  条件下,试件除了断裂破坏外,还发生了明显的层间分离,反映了随着应变率的增大,材料拉伸强度增强。试

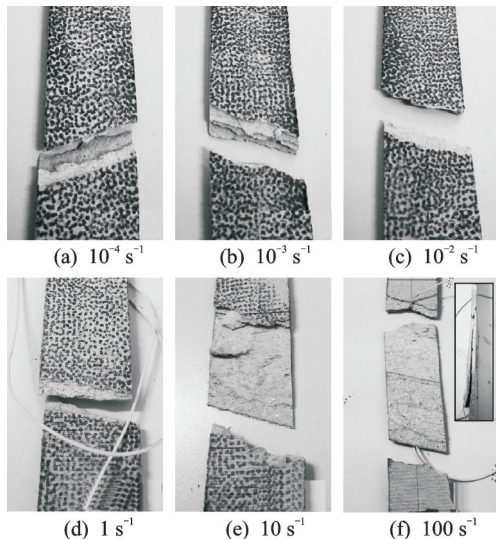


图 5 复合纸板不同应变率下的拉伸断裂结果

Fig.5 Tensile fracture of paperboard at different strain rates

件不仅出现多处薄弱区,轴向拉伸载荷也超过了材料的层间结合强度,试件破坏模式转变为剪切、拉伸断裂和层间分离。(4)根据不同应变率下的拉伸断裂照片可以看出,在应变率  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  到  $1 \text{ s}^{-1}$  条件下,试件在某一薄弱区发生沿原纸纤维方向的整体断裂,试件表现出剪切和拉伸断裂的混合损伤破坏机制。随着应变率的增大,试件发生了明显的层间分离行为,在应变率  $10 \text{ s}^{-1}$  到  $100 \text{ s}^{-1}$  条件下表现出剪切、拉伸断裂和层间分离的混合损伤破坏机制。

### 2.2 数据拟合

在中应变率高速拉伸试验中经常会遇到载荷信号振荡的问题,这通常是由于载荷传感器和上夹持夹具引起的<sup>[26]</sup>。如图 6 所示,是一个复合纸板试样的典型测试结果。使用滤波器降低振荡信号的振幅,同时会丢失真实信号的振幅,同时会丢失真实信号。在保持真实信号曲线特征不变的情况下,从根本上滤除所有的振荡信号几乎是不可能的。从图中可以看出,真实应力和应变信号的振荡是同步的。因此,在分析测试结果时,使用原始数据绘制应力-应变曲线,即可“消除”振荡信号的影响。

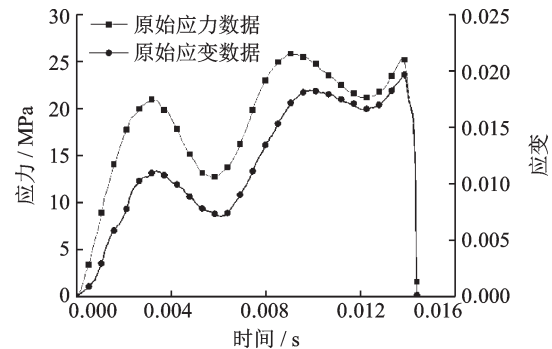


图 6 纸板试样的典型测试结果(加载速度:1.5 m/s)

Fig.6 Typical test results of a paperboard specimen at loading speed of 1.5 m/s

### 2.3 应变率相关性

由于设备本身存在一些误差<sup>[27]</sup>,实际应变率与目标应变率之间具有一定差异,但是该差异一般较小,可以认为试验已符合目标应变率的量级。拉伸试验实际应变率由原始应变-时间线性拟合后求取平均值得到,加载速度和应变率如表 1 和表 2 所示。

图 7 为 3 组低应变率条件下测得的纸板试样应力-应变曲线。可以看出,材料表现出一定的应变率效应。随着应变率的增大,材料的拉伸强度从 17.15 MPa 增加到了 20.14 MPa,但断裂应变变化不显著。

图 8 为 3 组中应变率条件下测得的纸板试样应力-应变曲线。与低应变率试验结果对比得出,随

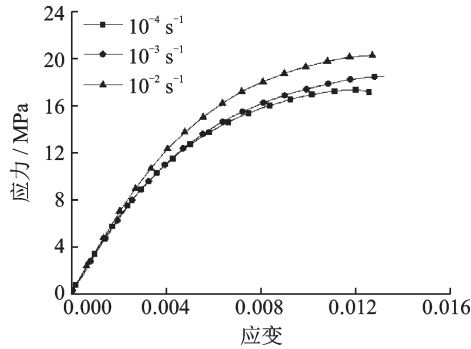


图7 纸板材料低应变率下的应力-应变曲线对比  
Fig.7 Comparison of stress-strain curves of paperboard under low strain rate

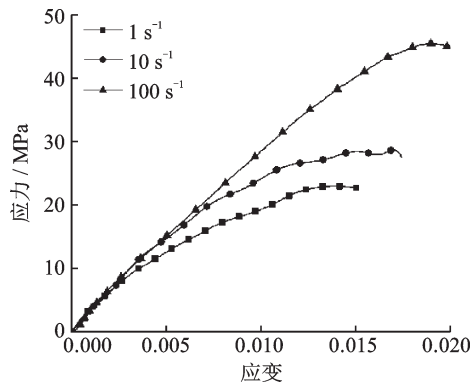


图8 纸板材料中应变率下的应力-应变曲线对比  
Fig.8 Comparison of stress-strain curves of paperboard under intermediate strain rate

随着应变率的增大,应变率强化效应逐渐增强。材料的拉伸强度和断裂应变从应变率  $1 \text{ s}^{-1}$  时的  $23.00 \text{ MPa}$ 、 $1.51\%$ ,分别增大到应变率  $100 \text{ s}^{-1}$  时的  $45.00 \text{ MPa}$ 、 $1.98\%$ 。从理论上讲,复合纸板材料的断裂应变通常与纤维间的结合强度、纤维与胶粘剂之间的强度有关,与变形速率关系不大。然而,试验结果表明,在较高应变率条件下,试件的实测断裂应变通常大于静态条件下的断裂应变值。这与纸板材料的不均匀性和加载应变率有关。在较高应变率下,材料拉伸强度增大,同时材料内部多处产生局部损伤和薄弱区,材料整体的极限应变增大。这也解释了在较高应变率下,材料会出现多段断裂的现象。

2.4 应变率效应表征模型

为了更好地分析材料的应变率效应,计算不同应变率下的拉伸强度与参考应变率( $0.000 \text{ s}^{-1}$ )下拉伸强度的比值,作为应变率效应比。并通过应变率效应公式对计算结果进行表征。

Cowper-Symonds 模型<sup>[28]</sup>是应变率效应的常用模型

$$f_{\text{Rate}}^{\text{CS}}(\dot{\epsilon}_p) = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{Q_1}\right)^{Q_2} \quad (1)$$

另外,LS-DYNA 软件<sup>[20]</sup>中提供了两种其他考虑应变率影响的表达式。幂指数函数表达式

$$f_{\text{Rate}}^{\text{linear}}(\dot{\epsilon}_p) = e^{Q_1(\ln \dot{\epsilon}_p - \ln \dot{\epsilon}_p^0)} \quad (2)$$

和对数-二次函数的表达式

$$f_{\text{Rate}}^{\text{poly}}(\dot{\epsilon}_p) = 1 + Q_1(\ln \dot{\epsilon}_p - \ln \dot{\epsilon}_p^0) + Q_2(\ln \dot{\epsilon}_p - \ln \dot{\epsilon}_p^0)^2 \quad (3)$$

式中: $\dot{\epsilon}_p$ 为塑性应变率; $\dot{\epsilon}_p^0$ 为参考应变率; $Q_1$ 和 $Q_2$ 为待定常数。

表3给出了各个表征模型的相应拟合参数,应变率效应比的试验结果和表征模型结果如图9所示。从图9和表3中的相关性系数可以看出,LS-DYNA(式(2))模型相关性系数最小,在中低应变率范围内表征效果都比较差。这是由于该模型常用于描述材料的超塑性行为,而复合纸板材料的延伸率较低。另外,式中单一的应变率参数 $Q_1$ (应变速率敏感性指数)也很难准确表征复合纸板材料在中应变率拉伸试验中应变率硬化加速的行为。LS-DYNA(式(3))表征模型是Johnson-Cook模型<sup>[29]</sup>中应变率效应项拓展后得到的二次函数。在低应变范围内模型表征精度很高,但是在中应变率范围内模型与试验结果相差较大。这是由于该模型一般用于表征超弹材料或超塑性材料的大应变问题的应变率影响。并且可以根据材料的应变范围,增加LS-DYNA(式(3))的阶次。Cowper-Sy-

表3 应变率效应比模型的拟合参数和相关性系数  
Table 3 Fitting parameters and correlation coefficients of strain rate dependence ratio model

表征模型	$Q_1$	$Q_2$	相关性系数
Cowper-Symonds(式(1))	38.155 6	0.249 6	0.960 61
LS-DYNA(式(2))	0.043 9	—	0.854 64
LS-DYNA(式(3))	0.021 2	0.058 9	0.872 91

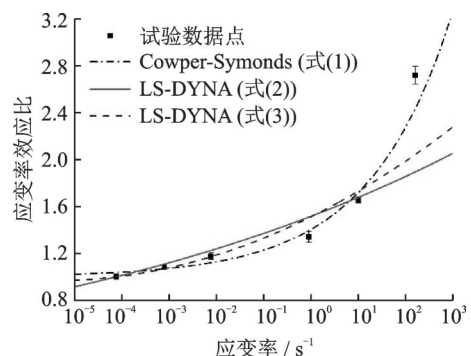


图9 应变率效应比试验结果和表征模型  
Fig.9 Test results and characterization models of strain rate dependence ratio

monds 表征模型相关性系数最大,精度最高,在中低应变率范围内都可以很好地覆盖试验数据点。Cowper-Symonds 模型能够很好地表征和预测复合纸板材料的应变率效应,为后续薄壁纸管等缓冲吸能结构的动态力学性能相关研究提供理论支撑。

### 3 结 论

(1)复合纸板材料在单向拉伸试验中表现出了明显的应变率效应。随着应变率的增大,材料的拉伸强度显著增大,断裂应变在中应变率范围内也随着应变率的增大而显著增大。

(2)通过对单向拉伸破坏结果和应变场的分析,表明复合纸板材料的损伤破坏机制与应变率相关。在低应变率范围内表现出剪切和拉伸断裂的混合损伤破坏机制,随着应变率的增大,材料逐渐发展成剪切、拉伸断裂和层间分离的混合损伤破坏机制。

(3)通过对比试验结果和3种应变率效应比表征模型的拟合结果,基于Cowper-Symonds表达式的表征模型,可以很好地描述纸板材料在中低应变率下的应变率效应。对纸板材料用于缓冲吸能结构设计,以及后续薄壁纸管能量吸收性能的模拟和理论研究具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] LIAN X G, PAN L, LU L X, et al. Investigation of energy absorption characteristics of square paper tubes subjected to axial loading[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106685>.
- [2] 余同希, 卢国兴, 华云龙. 材料与结构的能量吸收[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.  
YU Tongxi, LU Guoxing, HUA Yunlong. Energy absorption of structures and materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [3] DIOH N N, IVANKOVIC A, LEEVERS P S, et al. The high strain rate behaviour of polymers[J]. *Le Journal de Physique IV*, 1994, 4(C8): 119-124.
- [4] HSIAO H M, DANIEL I M. Strain rate behavior of composite materials[J]. *Composites Part B: Engineering*, 1998, 29(5): 521-533.
- [5] BANK L C, GERHARDT T D, GORDIS J H. Dynamic mechanical properties of spirally wound paper tubes[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1989, 111: 489-490.
- [6] 荆臻, 田常录, 吴健, 等. 带孔复合材料层板动态拉伸破坏的应变率效应[J]. *南京航空航天大学学报*, 2019, 51(1): 55-62.  
JING Zhen, TIAN Changlu, WU Jian, et al. Strain rate effects on dynamic tensile failure of composite laminated plates with holes[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2019, 51(1): 55-62.
- [7] 杨嫣红, 王志伟. 缓冲包装材料及其性能研究进展[J]. *包装工程*, 2002, 23(4): 96-99.  
YANG Yanhong, WANG Zhiwei. Research progress in cushioning materials and their properties[J]. *Packaging Engineering*, 2002, 23(4): 96-99.
- [8] STENBERG N, FELLERS C, ÖSTLUND S. Measuring the stress-strain properties of paperboard in the thickness direction[J]. *Journal of Pulp and Paper Science*, 2001, 27(6): 213-221.
- [9] STENBERG N, FELLERS C, ÖSTLUND S. Plasticity in the thickness direction of paperboard under combined shear and normal loading[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2001, 123(2): 184-190.
- [10] XIA Q. Mechanics of inelastic deformation and delamination in paperboard[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [11] XIA Q S, BOYCE M C, PARKS D M. A constitutive model for the anisotropic elastic-plastic deformation of paper and paperboard[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, 39(15): 4053-4071.
- [12] LI Y, STAPLETON S E, REESE S, et al. Anisotropic elastic-plastic deformation of paper: In-plane model[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2016, 100: 286-296.
- [13] BEDZRA R, LI Y, REESE S, et al. A comparative study of a multi-surface and a non-quadratic plasticity model with application to the in-plane anisotropic elastoplastic modelling of paper and paperboard[J]. *Journal of Composite Materials*, 2019, 53(6): 753-767.
- [14] HUANG H, NYGARDS M. Numerical investigation of paperboard forming[J]. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2012, 27(2): 211-225.
- [15] SIERAKOWSKI R L. Strain rate effects in composites[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1997, 50(12): 741-761.
- [16] 李素云, 杜志鹏, 眭明斌, 等. 石墨烯增强铝基SiC复合材料力学性能研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2018, 41(1): 57-61.  
LI Suyun, DU Zhipeng, SUI Mingbin, et al. Mechanical properties of graphene reinforced Al/SiC composite[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2018, 41(1): 57-61.
- [17] 鄂玉萍. 湿度和应变率对纸质缓冲材料能量吸收特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2010.  
E Yuping. Influence of relative humidity and strain rate

- on the energy absorption properties of paper-based cushioning materials[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010.
- [18] PARDO S, BAPTISTE D, DECOBERT F, et al. Tensile dynamic behaviour of a quasi-unidirectional E-glass/polyester composite[J]. *Composites Science and Technology*, 2002, 62(4): 579-584.
- [19] DANIEL I M, LABEDZ R H, LIBER T. New method for testing composites at very high strain rates[J]. *Experimental Mechanics*, 1981, 21(2): 71-77.
- [20] 朱俊儿. 应变率相关的高强钢板材屈服准则与失效模型研究及应用[D]. 北京: 清华大学, 2015.  
ZHU Jun'er. Modeling the strain-rate dependent yielding and failure behavior of high strength steel sheets [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [21] 全国塑料标准化技术委员会. 塑料拉伸性能的测定—第1部分: 总则: GB/T 1040.1—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [22] 全国造纸工业标准化技术委员会. 纸、纸板和纸浆试样处理和试验的标准大气条件: GB/T 10739—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [23] SUTTON M A, ORTEU J J, SCHREIER H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2009.
- [24] GU G, LIN S, XIA Y, et al. Characterization of mechanical behavior of thermoplastics with local deformation measurement [R]. Detroit: SAE Technical Paper, 2012.
- [25] CAO X, BI Z, WEI X, et al. Determination of Poisson's ratio of kraft paper using digital image correlation [C]//Proceedings of Mechanical Engineering and Technology. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 51-57.
- [26] WANG W, MAKAROV G, SHENOI R A. An analytical model for assessing strain rate sensitivity of unidirectional composite laminates[J]. *Composite Structures*, 2005, 69(1): 45-54.
- [27] XIA Y, ZHU J, ZHOU Q. Verification of a multiple-machine program for material testing from quasi-static to high strain-rate[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 86: 284-294.
- [28] COWPER G R, SYMONDS P S. Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams[R]. [S.l.]: Brown University, 1957.
- [29] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]//Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics. The Hague, the Netherlands: American Defense Preparedness Association, 1983: 541-547.

(编辑: 胥橙庭)