纸/塑/铝复合结构纸板强度性能的试验研究

刘 璐
(西安工业大学，西安 710021)

摘要：阐述了纸/塑/铝复合材料的结构，并对其拉伸、抗压等力学性能进行了测试，根据 Matlab 绘制的 σ-ε 曲线，讨论分析了纸/塑/铝复合结构纸板在外界压力下的具体变化过程，并采用最小二乘法得到了 σ-ε 曲线的经验公式及其特征系数。

关键词：纸/塑/铝复合材料；拉伸强度；抗压强度；特征系数
中图分类号：TB484；TB487　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-3563(2012)09-0049-05

Experimental Research on Strength Properties of Paper/Plastic/Aluminum Composite Board

LIU Lu
(Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: The structure of paper/plastic/aluminum composite board was elaborated. The tensile and compressive mechanical properties of the composite board were tested. Specific change processes of the composite board under outside pressure were discussed according to the σ-ε curve drawn by Matlab. The σ-ε curve empirical formula and characteristic coefficients were obtained by using least square method.

Key words: paper/plastic/aluminum composite material; tensile strength; compressive strength; characteristic coefficient

瑞典 Tetra Pak 公司生产的纸/塑/铝复合材料在无菌液体包装(尤其是液体牛乳的包装)上，广泛应用，其在我国已有 3 家独资企业，为我国液体牛乳提供最佳的包装材料[1]。与塑料瓶、玻璃瓶相比，砖型和枕型的利乐包容积率相对较大，而且更易于装箱、运输和存储。从技术角度来看，利乐包是由纸、铝、塑组成的 6 层复合纸包装，能够有效阻隔空气和光线。因此，利乐包让牛奶和饮料的消费更加方便而安全，而且保质期更长，实现了较高的包装效率。考虑到在运输过程中，利乐包会收到来自内部液态奶的冲击及外界货物的挤压，所以对其材料的抗张强度有一定的要求。文中比较分析了纸/塑/铝复合结构纸板的抗张性能，以促进纸/塑/铝复合结构纸板在液体包装领域的研究和应用。

1　材料及测试方法

纸/塑/铝复合材料结构为 PE/纸板/PE/铝箔/PE/PE，见图 1。该结构共包括 6 层：第 1 层是聚乙烯

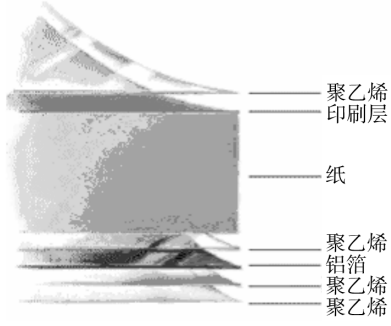

图 1　纸/铝/塑复合材料结构

Fig. 1 Paper/plastic/aluminum composite material structure

收稿日期：2011-07-07

作者简介：刘璐(1984－)，女，陕西宝鸡人，西安工业大学硕士生，主攻运输包装与现代物流。

层(Polyethylene),它阻止纸板吸收外界的水分,保护外包上的图案、便于热封成盒;第 2 层是纸板(Paper)(厚度为 245 μm),这是复合材料的基材,能在其表面印刷图文信息,有效保护材料的强度和韧度;第 3 层是聚乙烯层(Polyethylene),是连接铝箔和纸板的粘附层(介质);第 4 层是铝箔(Aluminum foil)(厚度为 6～8 μm),可以阻挡紫外线、细菌进入包装内部,也是灌装过程中加热的媒介;第 5 层是粘性塑料(Polyethylene)(厚度为 30～35 μm),这是内层聚乙烯和铝箔的粘附介质、能够有效地对酸性饮品实现无菌包装;第 6 层是聚乙烯层,是通过热封成盒,形成无菌包装的必要材料。由于铝箔、纸层、聚乙烯层是通过热压或粘合结合在一起,粘合强度较好,所以各层之间难以分离[2-4]。

纸/铝/塑复合材料之所以采用铝箔进行复合,是因为复合材料要达到对水汽及气体有较强的阻隔性能,并且能有效阻止内容物潮解和变质失效,延长内容物的保质期。这样复合材料就需要很低的透氧率及透湿率,而加入铝箔恰恰能够解决这一问题。纸/铝/塑复合材料的透氧率和铝箔性能有很直接的关系,随着铝箔厚度的增加,透过氧气、光线、水蒸气等的能力会逐步降低,其阻隔性能也就越高(通常在复合包装中所使用的铝箔厚度在 7～9 μm 之间)。若铝箔表面清洁度较差,并残留有油污,则复合强度相对较差[5-6]。

另外,采用纸板进行复合,是考虑到纸的印刷性较好,在表面可以印刷出精美的图案。同时,纸具有良好的机械适应性及挺度,适用于高速包装机,同时纸可降解,有利于环保。

为了比较分析纸/塑/铝复合材料的拉伸性能,文中选用伊利优酸乳 250 mL 利乐砖牛奶包装件及卷材为试验材料,纸/塑/铝复合结构纸板,定量为 270 g/m^2,纸板厚度 327 μm。

测试项目包括纸/塑/铝复合结构纸板纵向及横向的拉伸强度。试验温度为 25 ℃、相对湿度为 60%。试验之前,对所有试样在该温度、湿度条件下预处理至少 24 h,主要参考 GB/T 450－2002《纸和纸板试样的采取》和 GB/T 10739－2002《纸、纸板和纸浆试样处理和试验的标准大气条件》。试验仪器分别选用 EMT2503-A 液晶电子拉力试验机、YQ-Z-40A 型电子式压缩试验仪[7]。

2 结果与分析

2.1 拉伸试验

拉伸试验一般是指在常温、单向静拉伸载荷作用下,用光滑试样测定材料力学性能。将试样(15 mm×250 mm)夹于夹具之间,保证试样在试验过程中上下保持 90°的垂直度,设置厚度为 327 μm、宽度为 15 mm、拉伸速度为 100 mm/min 等参数,在试样两端缓慢地施加单向载荷,使试样的工作部分受轴向拉力沿轴向伸长,直到断裂为止。通过该项拉伸试验,可以获得纸/塑/铝复合材料的弹性、塑性、强度等重要而又基本的力学性能指标。试验结果见表 1。

表 1 纸/塑/铝复合材料拉伸性能试验结果

Tab.1 Tensile test results of paper/plastic/aluminum composite board

	试样序号	最大力 P_b/N	变形量 ΔL/ mm	拉伸强度 σ_b/MPa	平均拉伸强度/MPa	比例极限 σ_p/kPa
纵向	1	279.7	6.82	56.68		
	2	287.2	6.91	58.21	54.47	354.61
	3	239.5	6.76	48.53		
横向	1	166.1	12.89	33.67		
	2	163.2	11.79	33.08	34.04	154.71
	3	174.5	12.75	35.36		

试样的断裂情况见图 2。

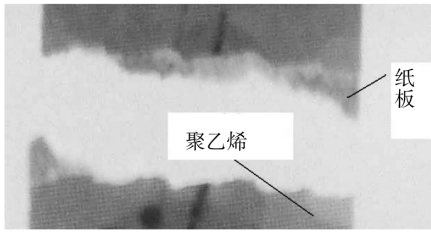

图 2 纸/塑/铝复合材料拉伸断裂情况

Fig. 2 Tensile fracture of paper/plastic/aluminum composite board

纸/塑/铝复合材料将高强度、高模量的 PE 纤维材料和韧性好的纸基材料经过一定的工艺过程制成,假定基体和纤维材料都是连续、均匀的各项同性体,纤维和基体结合良好,其性能与未复合前相同[8-9]。依据应力、应变关系:

$$\begin{cases}\sigma=\dfrac{F}{A}\\ \varepsilon=\dfrac{\Delta L}{L}\end{cases} \tag{1}$$

可以求出 F-ΔL 对应的 σ-ε（横截面积 $A=4.935$ mm^2，$L=250$ mm），并用 Matlab 软件绘制 σ-ε 曲线，见图 3。

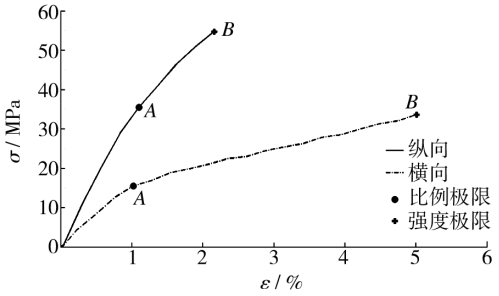

图 3　纸/塑/铝复合材料试样拉伸强度 σ-ε 曲线

Fig. 3 σ-ε curve of paper/plastic/aluminum composite board in tensile test

从图 3 可知，复合材料拉伸过程的 σ-ε 曲线，按其变形过程分为 4 个阶段。

1）第 1 阶段（图 3 中 OA 段），变形刚开始，应力比较小，试样的伸长随应力成正比增加，呈直线状，复合材料完全属于弹性变形，变形量的大小与弹性模量 E 有关。

2）第 2 阶段（图 3 中的 A 点），聚乙烯材料是弹性变形，纸材料是塑性变形。第 2 阶段和第 1 阶段间有一个拐点，这拐点为比例极限 σ_p（图 3 中 A 点），相当于纸发生屈服时的应力。在实际拉伸过程中，完全精确地测定达到比例极限的点很不容易，试验中规定过载荷-变形量曲线上某点的切线和纵坐标的夹角的正切值（$\tan\theta'$）比直线部分和纵坐标夹角的正切值（$\tan\theta$）增加 10%时，对应的应力点（纵向 $\sigma_p=35.461$ MPa、横向 $\sigma_p=15.471\ 1$ MPa）为比例极限 A 点。

3）第 3 阶段（图 3 中 AB 段），是塑性变形阶段，聚乙烯材料和纸材料都发生塑性变形，σ-ε 曲线光滑连续，呈上升趋势。这是因为由于随着塑性变形不断进行，材料不断硬化，抗变形力不断增加，曲线继续上升，直至断裂。

4）第 4 阶段（图 3 中的 B 点）是断裂阶段，由于聚乙烯材料的强度高，但塑性差，断裂从聚乙烯材料开始，而拉断前复合材料所能承受的最大载荷除以原始截面积，即为拉伸强度 σ_b。

如图 3 所示，材料断裂口呈锯齿状、不平滑，主要是由于复合材料中含有塑料、铝箔、纸等成分。塑料分子间具有黏性，分子排列具有同向性，并且铝箔、纸等材料在拉伸过程中的变形情况有差别，各层材料又相互牵制，以致拉伸的时候造成裂口呈不规则锯齿状，3 种材料的断裂面不重合。

2.2　抗压试验

砖型盒体压缩试验就是测试使盒体包装破坏、失稳或变形超过极限值时的破坏载荷，以此来分析纸/塑/铝复合材料砖型包装盒的抗压性能。抗压试验在 YQ-Z-40A 型压缩试验仪上进行，压缩速度为（12.5±2.5）mm/min，平压以 104 mm×60 mm 面为上下底面，侧压以 104 mm×40 mm 面为上下底面，顶压以 60 mm×40 mm 为上下底面。

抗压强度按式（4）计算：

$$\begin{cases}\sigma_c=\dfrac{F}{A}\\ E_c=\dfrac{L\,F}{A\,\Delta L}\end{cases}\tag{4}$$

式中：σ_c 为压缩应力；F 为破坏载荷或最大载荷；A 为试样横截面积（平压时为 1.07 cm^2，侧压时为 0.94 cm^2，顶压时为 0.65 cm^2）；E_c 为压缩弹性模量；L 为标距（平压时为 40 mm，侧压时为 60mm，顶压时为 104 mm）。试验结果见表 2。

表 2　纸/塑/铝复合材料纸盒抗压性能试验结果

Tab. 2 Compressive performance test results of paper/plastic/aluminum composite carton

	试样序号	最大载荷/N	变形量/cm	抗压强度/MPa	平均抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	平均弹性模量/MPa
平压	1	650	3.52	1.08		8.85	
	2	685	3.50	1.08	1.07	7.48	7.47
	3	592	3.62	1.05		6.07	
侧压	1	884	5.53	1.26		13.91	
	2	1 427	5.60	1.35	1.37	14.21	14.75
	3	1 051	5.57	1.49		16.13	
顶压	1	—	—	1.97		—	—
	2	—	—	1.81	1.90	—	—
	3	—	—	1.91		—	—

由于试验仪器的问题，顶压并没有测得变形量，只测得抗压强度。将盒体压缩变形过程记录，用 Matlab 软件绘制出 σ-ε 曲线，见图 4。

纸/塑/铝复合材料盒体的静态压缩变形过程可以分为 4 个阶段：线弹性阶段、弹塑性阶段、塑性坍塌阶段、密实化阶段[10]。图 4 中 A 点，对应 $\sigma_e=1.07$，1.37 MPa 分别为纸盒平压、侧压弹性屈曲临界应力；B 点，对应 $\sigma_p=0.88$，0.72 MPa 分别为平压、侧压时

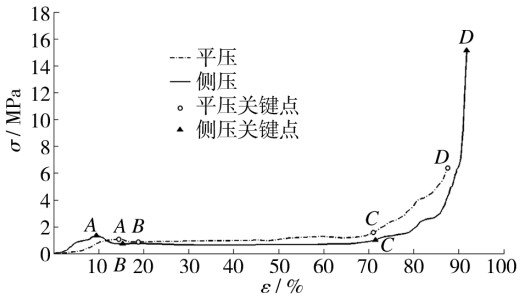

图 4 纸/塑/铝复合材料纸盒试样抗压强度 σ-ε 曲线

Fig. 4 σ-ε curve of paper/plastic/aluminum composite cartons in compressive strength test

侧壁纸板塑性屈曲坍塌应力;C 点,对应 ε_c=71.1%,71.8%为复合纸板压缩进入密实化区的应变量;D 点,对应 ε_p=87.5%,91.8%为蜂窝纸板压缩密实化应变量。

1) 线弹性区(OA 段)。

复合材料在初始压缩状态,弹性变形在加载瞬间产生,线性、可逆,变形情况与压力的压缩过程对应,符合胡克定律。在线弹性区,复合纸板的应力-应变曲线可由式(5)表示:

$$\sigma=E\varepsilon \tag{5}$$

当线弹性应力等于弹性屈曲临界载荷 σ_e 时,在应力-应变曲线中表现出一个弹性屈曲应力峰值(见图 3 中 A 点)。

2) 弹塑性区(AB 段)。

随着侧壁纸板垂直载荷的加载,复合材料的变形由局部的弹性坍塌转化为以塑性为特征的塑性屈曲。此时,材料产生微小的压缩应变,其压缩应力迅速下降,边界条件为:

$$\frac{\sigma_e}{E}\leqslant\frac{\sigma}{E}\leqslant\frac{\sigma_p}{E} \tag{6}$$

3) 塑形坍塌区(平台区,BC 段)。

塑性坍塌区表现为以复合材料的塑性坍塌为主的持续压溃模式,压溃载荷随压缩应变的增大呈一定规律性地上下稍有波动,直至盒体壁板几乎完全坍塌以至于上下相对的壁面相接触。在复合纸板压缩应力-应变图中,塑性坍塌区表现为一段很长的近似平台区,该平台区的平面应力即为塑性坍塌应力。

4) 密实化区(CD 段)。

随着复合纸板胞壁之间互相挤压,纸板本身几乎失去弹性,其压缩应力随着应变的增加迅速增大。当复合纸板的应变量达到密实化应变量 ε_D 后,其压应力几乎呈直线上升。

2.3 经验公式

1) 根据纸/塑/铝复合材料拉伸 σ-ε 曲线的特征,采用分段式经验公式给出纸板纵横向拉伸特性的数学表达式,即:

$$\sigma=\begin{cases}k\varepsilon & (0\leqslant\varepsilon\leqslant\varepsilon_p)\\ a_0+a_1\varepsilon+a_2\varepsilon^2 & (\varepsilon_p\leqslant\varepsilon\leqslant\varepsilon_b)\end{cases} \tag{7}$$

将表 1 中的数据代入式(7)中,ε_p,ε_b 分别代表拉伸比例极限、强度极限对应的应变,采用最小二乘法得到纸/塑/铝复合材料拉伸 σ-ε 曲线的特征系数,见表 3。

表 3 纸/塑/铝复合材料拉伸 σ-ε 曲线的特征系数

Tab. 3 The tensile σ-ε curve characteristic coefficient of the paper/plastic/aluminum composite material

	$\sigma=k\varepsilon$	$\sigma=a_0+a_1\varepsilon+a_2\varepsilon^2$
纵向	$\sigma=32.18\varepsilon$	$\sigma=4.876\ 5+32.481\ 7\varepsilon-4.356\ 7\varepsilon^2$
横向	$\sigma=15.1\varepsilon$	$\sigma=11.036\ 5+4.861\varepsilon-0.085\ 2\varepsilon^2$

2) 根据纸/塑/铝复合材料砖型盒体压缩 σ-ε 曲线的特征,采用高阶经验公式给出抗压特性的数学表达式,即:

$$\sigma=\sum_{n=0}^{n}a_n\varepsilon^n \tag{8}$$

将表 2 中的数据代入式(8)中,采用最小二乘法得到纸/塑/铝复合材料砖型盒体平压 σ-ε 曲线的特征系数,代入经验公式即为:

$$\sigma=105.893+41.421\ 7\varepsilon-52.043\ 9\varepsilon^2-97.781\ 7\varepsilon^3+263.271\ 1\varepsilon^4+266.464\ 6\varepsilon^5-84.71\varepsilon^6-81.505\ 3\varepsilon^7 \tag{9}$$

3 结语

1) 纸/塑/铝复合材料的拉伸强度性能受纤维排列方向影响较大,平行纤维方向(纵向)的拉伸强度比垂直纤维方向(横向)的拉伸强度高 60%,但拉断伸长量仅为横向伸长量的 45.3%。这主要是由于纤维在纵向与横向中分子微粒间的结合力不同,进而造成一些机械性能在方向上的差异。

2) 在弹性形变发生时,组成纤维的分子微粒彼此之间的相对位置发生了变化,整个纤维的形状也发生了变化,使得纸/塑/铝复合材料的弹性形变具有线性特征;在塑性变形发生时,随着纤维接触面分子键的破坏,纤维发生不逆转移动,形成永久变形,无法恢复。

3）文中通过试验获得了纸/塑/铝复合材料的拉伸、盒体抗压力学特性及其 σ-ε 曲线，对进一步研究建立纸/塑/铝复合材料包装力学模型奠定了理论基础。

参考文献：

[1] 周祥兴. Tetra Pak 无菌包装膜的生产及应用[J]. 塑料包装，2007，17(4)：19－20.
ZHOU Xiang-xing. Tetra Pak Aseptic Packaging Film Production and Application[J]. Plastic Packaging，2007，17(4)：19－20.

[2] 王莉. 利乐包的印制及回收工艺探讨[J]. 包装工程，2006，27(3)：79－80.
WANG Li. Discussion on Production and Recovery of Tetra Pak[J]. Packaging Engineering，2006，27(3)：79－80.

[3] 李宁，熊晓莉. 铝塑纸复合包装的分离研究[J]. 包装工程，2008，29(12)：56－57.
LI Ning，XIONG Xiao-li. Study on the Separation of Aluminum-plastic-paper Composite for Packaging[J]. Packaging Engineering，2008，29(12)：56－57.

[4] 孟宪文. 利乐无菌包装产品加热方法的研究[J]. 包装工程，2007，28(2)：52－54.
MENG Xian-wen. Research on the Heating Method of the Tetra Pak Aseptic Products[J]. Packaging Engineering，2007，28(2)：52－54.

[5] 赵振平. 纸塑铝无菌复合包装材料的现状及发展趋势[J]. 塑料包装，2008，18(4)：37－38
ZHAO Zhen-ping. Plastic Aluminum Aseptic Composite Packaging Materials Present Situation and Development Trend[J]. Plastic Packaging，2008，18(4)：37－38.

[6] 张翼飞，闫大海，黄泽春，等. 纸基复合包装中铝塑分离的湿法工艺条件研究[J]. 环境科学研究，2008，21(6)：100－101.
ZHANG Yi-fei，YAN Da-hai，HUANG Ze-chun，et al. Research on the Wet Process Conditions of the Separation of Aluminum and Plastic in Post-consumer Aseptic Packages[J]. Research of Environmental Sciences，2008，21(6)：100－101.

[7] 郭彦峰，许文才. 包装测试技术[M]. 北京：化学工业出版社，2006.
GUO Yan-feng，XU Wen-cai. Packaging Testing Technology[M]. Beijing：Chemical Industry Press，2006.

[8] 王震鸣. 复合材料力学和复合材料结构力学[M]. 北京：机械工业出版社，1991.
WANG Zhen-ming. Mechanics of Composite Materials and Mechanics of Composite Structures[M]. Beijing：Mechanical Industry Press，1991.

[9] 杨光松. 损伤力学与复合材料损伤[M]. 北京：国防工业出版社，1995.
YANG Guang-song. Damage Mechanics and Damage of Composite Materials[M]. Beijing：National Defence Industry Press，1995.

[10] 王冬梅，廖强华. 蜂窝纸板静态压缩力学性能建模研究[J]. 包装工程，2006，27(4)：129－132.
WANG Dong-mei，LIAO Qiang-hua. Research on the Mechanical Performance Modeling of Honeycomb Paperboard under Quasi-static Compression[J]. Packaging Engineering，2006，27(4)：129－132.

（上接第 40 页）

[4] 奚德昌，高德. 缓冲包装材料的本构建模研究进展[J]. 包装工程，2011，32(1)：1－4.
XI De-chang，GAO De. The Review on Constitutive Modeling of Cushion Packaging Materials[J]. Packaging Engineering，2011，32(1)：1－4.

[5] 卢富德，张绍云，杜启祥. 发泡聚乙烯隔振性能研究[J]. 包装工程，2011，32(11)：1－4.
LU Fu-de，ZHANG Shao-yun，DU Qi-xiang. Study of Vibration Isolation Performance of EPE[J]. Packaging Engineering，2011，32(11)：1－4.

[6] 李德宝，陆秋海. 工程振动试验分析[M]. 北京：清华大学出版社，2004.
LI De-bao，LU Hai-qiu. Analysis of Experiments in Engineering Virbration[M]. Beijing：Tsinghua University Press，2004.

[7] 宫建平. 阻尼系数的测定[J]. 晋中学院学报，2011，28(3)：1－3.
GONG Jian-ping. Measurement of Damping Coefficient[J]. Journal of Jinzhong University，2011，28(3)：1－3.

[8] 唐家德. 基于 MATLAB 的非线性曲线拟合[J]. 计算机与现代化，2008(6)：15－19.
TANG Jia-de. Nonlinear Curve Fitting Based on MATLAB[J]. Computer and Modernization，2008(6)：15－19.

[9] 冯涛，王晶，刘斌，等. 泡沫材料动刚度及阻尼系数的声阻抗管测量方法研究[J]. 包装工程，2011，32(7)：1－4.
FENG Tao，WANG Jing，LIU Bin. Study of Sound Impedance Tube Method to Measure Dynamic Stiffness and Damping Coefficient of Foam Material[J]. Packaging Engineering，2011，32(7)：1－4.

[10] 杜功焕，朱哲民，龚秀芬. 声学基础[M]. 第 2 版. 南京：南京大学出版社，2001.
DU Gong-huan，ZHU Zhe-min，GONG Xiu-fen. Fundamental of Acoustics[M]. Version 2. Nanjing：Nanjing University Press，2001.