

X-PLY 型瓦楞纸板与原纸强度关系的研究

李雪佳¹, 钱静^{1,2}, 张敏³, 卞永明³

(1.江南大学, 无锡 214122; 2.江苏省食品先进装备制造技术重点实验室, 无锡 214122;

3.宜兴宝艺新材料有限公司, 宜兴 214205)

摘要: **目的** 建立普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板的边压强度和侧压强度的回归计算方程。

方法 通过分析 X-PLY 型瓦楞纸板的结构特征, 并进行边压强度和侧压强度的对比试验。基于应力-应变曲线实验数据, 讨论 BBB, BAB, BCA, X-PLY (BBB), X-PLY (BAB), X-PLY (BCA) 型组合板材的强度特性和承压规律, 并利用 SPSS 软件对试验结果进行回归分析。**结果** 因为结构的特殊性, X-PLY 型瓦楞纸板两方向的压缩强度同普通七层瓦楞纸板相比差异性较小, 得到普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板的边压强度和侧压强度的回归计算方程误差在 5%以内, 模型的拟合性能较优。

结论 该方程可以为 X-PLY 型瓦楞纸板强度的预测和纸板的配纸提供参考依据。

关键词: X-PLY 型瓦楞纸板; 边压强度; 侧压强度; 回归方程

中图分类号: TB484.1; TB487 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)07-0038-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.07.006

Strength Relationship between X-PLY Corrugated Board and Base Paper

LI Xue-jia¹, QIAN Jing^{1,2}, ZHANG Min³, BIAN Yong-ming³

(1.Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2.Jiangsu Key Laboratory of Food Advanced Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China; 3.Yixing Baoyi New Material Co., Ltd., Yixing 214205, China)

ABSTRACT: The work aims to establish a regression equation for calculation of edge compressive strength and lateral compressive strength of ordinary seven-layer corrugated board and X-PLY corrugated board. Firstly, the structural characteristics of X-PLY corrugated board were analyzed, and the comparative tests of edge compressive strength and lateral compressive strength were carried out. Secondly, based on the experimental data of stress-strain curve, the strength characteristics and pressure law of BBB, BAB, BCA, X-PLY (BBB), X-PLY (BAB) and X-PLY (BCA) corrugated paper-board were discussed. Lastly, Regression analysis of test results was carried out with SPSS software. Because of the special structure, the X-PLY corrugated board had a small difference in the compressive strength between the two directions compared with the ordinary seven-layer corrugated board. The regression equation for the calculation of the edgewise compressive strength and lateral compressive strength of the ordinary seven-layer corrugated board and X-PLY corrugated board was within 5%. The model has better fitting performance. This equation can provide a reference for the prediction of the strength of X-PLY corrugated board and the paper for corrugated board.

KEY WORDS: X-PLY corrugated board; edge compressive strength; lateral compressive strength; regression equation

收稿日期: 2018-12-11

作者简介: 李雪佳 (1994—), 女, 江南大学硕士生, 主攻物流运输包装。

通信作者: 钱静 (1968—), 女, 博士, 江南大学教授, 主要研究方向为运输包装、包装设计。

原纸是制造瓦楞纸板的原材料,瓦楞纸板的抗压性能取决于原纸的特性。瓦楞纸板的性能与瓦楞纸板的结构有关,如瓦楞的齿形、楞型和层数。近些年,国内外学者都致力于研究开发瓦楞纸板的新品种,通过提高瓦楞纸板的强度可以更好地节约原材料^[1]。不同瓦楞方向的成型纸箱所拥有的强度特性不同^[2-3]。Panyarjun^[4]通过试验研究,认为瓦楞纸板边压强度是影响纸箱抗压强度的主要因素。在重型商品包装领域,Wang^[5]、Cao 等^[6]研究了多层瓦楞夹层结构异面压缩冲击载荷下的力学行为,揭示了相邻层之间的相互作用。付云岗^[7]、刘加红^[8]等研究了瓦楞纸板的压缩变形和缓冲性能。李光、李津乐^[9]通过试验和有限元分析方法得到了 A 楞、AB 楞、B 楞立式瓦楞复合纸板的静态压缩性能。刘晔、王振林等^[10-11]通过实验研究了三重组合瓦楞纸板压缩承载规律。

X-PLY 型瓦楞纸板是一种七层瓦楞纸板,它将三层瓦楞芯纸以纵横交替排列的方式与纸板粘结,中层瓦楞与两面瓦楞楞向呈垂直排列,与相同定量的普通型七层瓦楞纸板相比,其具有更好的强度特性。陶良毅^[12]、李佳^[13]研究了 X-PLY 型瓦楞纸板的力学性能和静态缓冲特性。朱琼^[14]研究了 X-PLY 型瓦楞纸板结构的动力学特性。众所周知,目前国内纸板纸箱企业都是通过原纸、楞型和层数等的配比预测瓦楞纸板和纸箱强度,满足客户对产品强度的要求。国内外学者对瓦楞纸板的承载性能、压缩变形规律、力学模型、抗压强度计算公式等进行了深入的研究。Mckee 等^[15]以瓦楞纸板的边压强度为基础,推导出瓦楞纸箱的抗压强度简化公式。王文鹏^[16]、Duong V. H^[17]等对常用公式进行了修正,得到了适用于企业使用的纸箱抗压强度估算方法。Baum G. A^[18]等提出了测试边压强度的试验方法。黄剑宗^[19]研究了不同温湿度下瓦楞纸板强度的数学模型。张书彬等^[20]通过试验研究了瓦楞原纸的综合环压强度与纸箱抗压强度之间的关系。

综观现有 X-PLY 型瓦楞纸板研究结果发现,有关通过原纸强度推导 X-PLY 型瓦楞纸板的强度研究尚未见报道。文中以瓦楞夹芯铺层形式为[90/0/90],组合型为 BCA 的 X-PLY 型瓦楞纸板的压缩强度为研究对象,研究 X-PLY 型瓦楞纸板强度与原纸强度的关系,用于预测 X-PLY 型瓦楞纸板的强度,为 X-PLY 型瓦楞纸板的实际应用提供进一步的理论基础。

1 2 种瓦楞纸板的结构特征

X-PLY 型瓦楞纸板属于七层瓦楞纸板,与普通型七层瓦楞纸板结构有所不同。

普通型七层瓦楞纸板 L 方向与各层瓦楞方向均垂直,其铺层方式可表示为[0/90/0/90/0/90/0],见图 1。X-PLY 型瓦楞纸板具有对称正交铺层,其铺层方式有

2 种,即 [0/90/0/0/0/90/0] 和 [0/0/0/90/0/0/0]。普通型七层瓦楞纸板的三层瓦楞芯纸铺设方向相同,纸板纵横纤维排列均匀性欠佳,X-PLY 型瓦楞纸板的三层瓦楞芯纸铺设方向相互垂直,所以纸板纤维的纵横排列方向相对比较均匀。由于受到纸板结构的影响,因此 X-PLY 型瓦楞纸板的力学性能与普通七层瓦楞纸板相比,具有一定的差异。

这里以普通型七层瓦楞纸板和铺层方式为 [0/90/0/0/0/90/0] 的 X-PLY 瓦楞纸板为研究对象(见图 1—2),制作尺寸为 25 mm×100 mm 的试样。在平行于上下层瓦楞方向对试样施加压缩载荷,待试样压溃,测得的压缩强度最大值为边压强度。在垂直于上下层瓦楞方向对试样施加压缩载荷,待试样压溃,测得的压缩强度最大值为侧压强度。

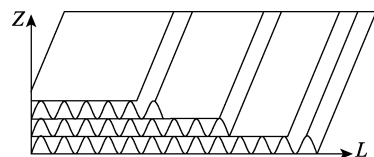


图 1 普通型七层瓦楞纸板

Fig.1 Ordinary seven-layer corrugated board

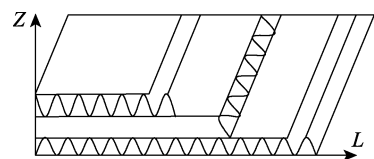


图 2 铺层形式为[0/90/0/0/0/90/0]的 X-PLY 型瓦楞纸板

Fig.2 X-PLY corrugated board in the form of [0/90/0/0/0/90/0]

2 瓦楞纸板边压强度分析

瓦楞原纸物性参数、瓦楞纸板结构参数均对瓦楞纸板边压强度有决定性的影响^[21]。实验证明,瓦楞纸板的边压强度为所用原纸的综合环压强度:

$$E = \sum_{i=1}^n R_i \quad (1)$$

由此,普通型七层瓦楞纸板的边压强度可以表示为:

$$E = R_{11} + R_{31} + R_{51} + R_{71} + f_1 R_{21} + f_2 R_{41} + f_3 R_{61} \quad (2)$$

式中: R_{11} , R_{31} , R_{51} , R_{71} , R_{21} , R_{41} , R_{61} 分别为瓦楞纸板面纸、夹芯纸 1、夹芯纸 2、里纸、瓦楞芯纸 1、瓦楞芯纸 2、瓦楞芯纸 3 的横向环压强度 (kN/m); f_1 , f_2 , f_3 为瓦楞系数。

同理,铺层形式为[0/90/0/0/0/90/0]的 X-PLY 型瓦楞纸板的边压强度可以表示为:

$$E = R_{11} + R_{31} + R_{51} + R_{71} + f_1 R_{21} + f_3 R_{61} \quad (3)$$

式中: R_{11} , R_{31} , R_{51} , R_{71} , R_{21} , R_{61} 分别为瓦楞纸板面纸、夹芯纸 1、夹芯纸 2、里纸、瓦楞芯纸 1、瓦楞芯纸 3 的纵向环压强度 (kN/m); f_1 , f_3 为瓦楞系数。

铺层形式为[0/90/0/0/0/90/0]的 X-PLY 型瓦楞纸板的侧压强度可以表示为:

$$E = R_{12} + R_{32} + R_{52} + R_{72} + f_2 R_{41} \quad (4)$$

式中: R_{41} 为瓦楞纸板瓦楞芯纸 2 的纵向环压强度 (kN/m), R_{12} , R_{32} , R_{52} , R_{72} 分别为瓦楞纸板面纸、夹芯纸 1、夹芯纸 2、里纸的纵向环压强度 (kN/m); f_2 为瓦楞系数。

3 实验

3.1 材料

试验所用 B, C 单面单瓦楞纸板, A, B 双面单瓦楞纸板及淀粉胶粘剂均来自宝艺新材料有限公司。将尺寸大小相同的 B, C 单面单瓦楞纸板, A, B 双面单瓦楞纸板经过覆面机涂胶, 进行排列组合, 然后粘合干燥, 得到组合类型为 BBB、BAB、BCA 的普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板。每种瓦楞纸板所使用瓦楞原纸的厚度、定量和环压强度见表 1。

表 1 原纸的定量和环压强度
Tab.1 Quantity and RCT of base paper

类型	定量/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)			厚度/mm			纵向环压强度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)			横向环压强度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)		
	BBB	BAB	BCA	BBB	BAB	BCA	BBB	BAB	BCA	BBB	BAB	BCA
面纸	110	110	190	0.15	0.15	0.27	1.159	1.159	1.765	1.098	1.098	1.193
瓦楞芯纸 1	130	130	170	0.2	0.2	0.24	1.678	1.678	1.235	1.278	1.278	0.771
夹芯纸 1	130	250	130	0.18	0.33	0.17	1.674	5.251	0.903	1.635	3.951	0.534
瓦楞芯纸 2	130	170	130	0.22	0.23	0.17	1.803	2.588	0.89	1.327	2.082	0.532
夹芯纸 2	110	230	170	0.17	0.3	0.22	1.098	4.992	1.156	0.856	3.628	0.814
瓦楞芯纸 3	130	130	130	0.2	0.2	0.16	1.678	1.678	0.718	1.278	1.278	0.476
里纸	110	110	230	0.15	0.15	0.3	1.159	1.159	2.852	1.098	1.098	1.876

注: 相同组合类型的普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板所用原纸材料相同

表 2 边压强度试验数据
Tab.2 Test data of ECT

纸板组合类型	纸板种类	边压强度			侧压强度		
		试验值/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	提高率/%	理论值/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	试验值/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	提高率/%	理论值/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)
BBB	普通型	9.218	-20.9	9.967	1.569	193.4	5.090
	X-PLY 型	7.289		8.444	4.604		6.614
BAB	普通型	16.012	-13.6	16.561	5.033	124.5	9.531
	X-PLY 型	11.784		15.915	11.297		13.207
BCA	普通型	6.459	-19.2	6.967	2.103	135.7	6.676
	X-PLY 型	5.221		6.591	4.958		7.052

3.2 仪器与方法

试验仪器来自江南大学包装工程实验室。主要试验设备有 LRX PLUS 万能材料试验机 (英国 Lloyd Instruments 公司)、DCZ-2516 型纸箱纸盒电脑打样机 (澳洲温科) 和恒温恒湿箱等。

试验方法严格参照国标规定。

1) 取样。每种瓦楞纸板选取纵向和横向各 10 个试样, 试样尺寸为 $25\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 。

2) 预处理。参照 GBT 10739—2002《纸浆、纸和纸板试样处理和试验的标准大气》, 将裁切好的瓦楞纸板试样放入恒温恒湿箱内, 在温度 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 50% 下处理 24 h 以上。

3) 试验。按照 GBT 6546—1998《瓦楞纸板边压强度的测定方法》, 采用 LRX PLUS 万能材料试验机进行压缩实验, 压缩速率设定为 12 mm/min , 完成试验后试验机自动停止并出图, 进行重复实验。

4 结果与分析

表 2 中边压强度和侧压强度的试验值为实验所得, 理论值分别由式 (2—4) 计算得到。其中 A 楞、B 楞和 C 楞的瓦楞系数分别为 1.59, 1.36, 1.40。

表 2 中列出了普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板的边压强度和侧压强度的试验数据。通过分析可知，对于每一种纸板组合类型，由于 X-PLY 型瓦楞纸板瓦楞方向与边压强度压缩方向平行的铺设层数为 2 层，相对于普通型瓦楞纸板，边压受力瓦楞层少了 1 层，因此 X-PLY 型瓦楞纸板的边压强度都低于普通型瓦楞纸板，侧压强度却远远高于普通型瓦楞纸板，并且 X-PLY 型瓦楞纸板的边压强度和侧压强度的差异性较小，2 种瓦楞纸板不同方向的压缩强度与三层瓦楞芯纸的铺设方向有很大关系。另一方面，瓦楞纸板试验值均小于理论值，且相差很大，相对误差平均值为 28.1%。由此可见，如果按式（2—4）预测普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板的边压强度和侧压强度，则其结果必将与实测数据不相符，说明公式有待进一步优化。

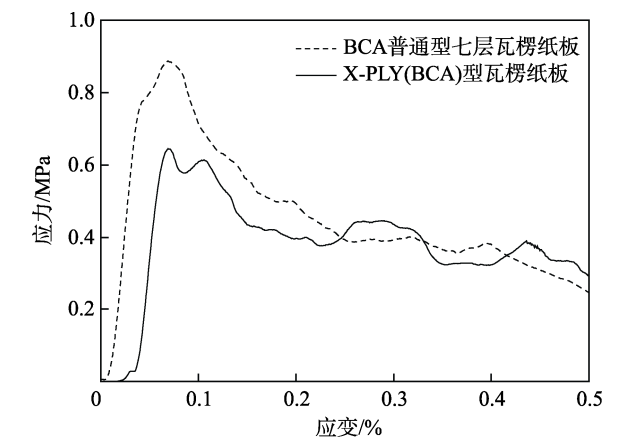


图 3 边压应力-应变对比曲线
Fig.3 ECT stress-strain comparison curve

组合型为 BCA 的普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板边压强度的应力-应变曲线见图 3，BCA 有一个很明显的失效力，X-PLY（BCA）出现了多个失效力，呈递减趋势，说明在较早的失效层尚残留一定的承压能力。从机理方面来说，应是对称正交铺层在变形过程中可以更加充分地发挥协调、联合承载优势。

4.1 X-PLY 型瓦楞纸板强度与原纸强度的关系

选取 10 种不同材质的普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板进行实验，纸板组合类型选择使用较多的 BCA 类型。将 B、C 单面单瓦楞纸板，A 双面单瓦楞纸板经过覆面机涂胶，进行排列组合，然后粘合干燥，得到 BCA 的普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板。纸板不同材质的横向和纵向环压强度见表 3。由于 B 和 C 单面单瓦楞纸板无面纸，因此表 3 里无其面纸的原纸环压强度数据。

表 3 纸板不同材质的横向和纵向环压强度
Tab.3 Horizontal and longitudinal RCT of different materials of cardboard

纸板 楞型	原纸环压强度/(kN·m ⁻¹)					
	面纸		瓦楞芯纸		里纸	
	横	纵	横	纵	横	纵
B1			0.771	1.235	1.193	1.765
B2			0.532	0.890	0.793	1.192
B3			0.532	0.890	0.534	0.903
C1			0.532	0.890	0.534	0.903
C2			1.128	1.588	1.876	2.852
A1	0.814	1.156	0.476	0.718	1.876	2.852
A2	2.152	2.970	1.128	1.588	1.806	2.751
A3	1.876	2.852	1.128	1.588	1.876	2.852

普通型 BCA 七层瓦楞纸板的边压强度可以表示为：

$$E = R_{11} + R_{31} + R_{51} + R_{71} + f_B R_{21} + f_C R_{41} + f_A R_{61} \quad (5)$$

式中： R_{11} ， R_{31} ， R_{51} ， R_{71} ， R_{21} ， R_{41} ， R_{61} 分别为瓦楞纸板面纸、夹芯纸 1、夹芯纸 2、里纸、瓦楞芯纸 1、瓦楞芯纸 2、瓦楞芯纸 3 的横向环压强度（kN/m）； f_A ， f_B ， f_C 为瓦楞系数，分别为 1.59，1.36，1.40。

根据实际的 X-PLY（BCA）型瓦楞纸板铺层形式，其边压强度可以表示为：

$$E = R_{11} + R_{32} + R_{51} + R_{71} + f_B R_{21} + f_A R_{61} \quad (6)$$

式中： R_{11} ， R_{51} ， R_{71} ， R_{21} ， R_{61} 分别为瓦楞纸板面纸、夹芯纸 2、里纸、瓦楞芯纸 1、瓦楞芯纸 3 的横向环压强度（kN/m）； R_{32} 为瓦楞纸板夹芯纸 1 的纵向环压强度（kN/m）； f_A ， f_B 为瓦楞系数，分别为 1.59，1.36。

侧压强度可以表示为：

$$E = R_{12} + R_{31} + R_{52} + R_{72} + f_C R_{41} \quad (7)$$

式中： R_{31} ， R_{41} 为瓦楞纸板瓦楞芯纸 2 的横向环压强度（kN/m）； R_{12} ， R_{52} ， R_{72} 分别为瓦楞纸板面纸、夹芯纸 2、里纸的纵向环压强度（kN/m）； f_C 为瓦楞系数，取为 1.40。

通过多组试验数据的分析整理，得到了普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板的边压强度和侧压强度试验值，利用式（5—7）计算得到理论值，见表 4。

瓦楞纸板边压强度与原纸环压强度基本为线性关系，因此瓦楞纸板边压强度和侧压强度的线性回归模型建立为：

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad (8)$$

式中： x_1 为面层箱板纸的环压强度之和； x_2 为瓦楞原纸的环压强度与瓦楞系数乘积之和； a_0 ， a_1 ， a_2 为回归系数。

表 4 七层瓦楞纸板边压强度试验值与理论值的比较
Tab.4 Comparison of measured ECT values and theoretical values of seven-layer corrugated board

代号	边压强度/(kN·m ⁻¹)				侧压强度/(kN·m ⁻¹)	
	普通型七层瓦楞纸板		X-PLY 型瓦楞纸板		X-PLY 型瓦楞纸板	
	试验值	理论值	试验值	理论值	试验值	理论值
D1/B1C1A2	8.642	9.272	7.691	8.896	6.671	8.765
D2/B3C1A1	5.648	5.983	4.497	5.607	3.781	5.858
D3/B1C2A2	10.759	11.448	9.624	10.845	8.925	10.941
D4/B2C1A1	6.142	6.567	4.877	6.191	4.184	6.479
D5/B2C1A3	8.212	8.666	7.048	8.290	5.921	8.175
D6/B2C2A2	10.169	11.048	9.137	10.445	8.229	10.368
D7/B2C2A3	9.725	10.842	8.934	10.239	8.196	10.351
D8/B3C2A2	9.601	10.464	8.520	9.861	7.947	10.079
D9/B1C2A3	10.401	11.242	9.439	10.639	8.765	10.924
D10/3C1A2	7.702	8.288	6.596	7.912	5.848	7.903

将各组实验数据分析整理,通过 SPSS 软件进行线性回归分析,结果输出分别通过强行进入法和逐步回归法进行计算^[22]。通过回归方程的统计量 F 检验回归方程的显著性^[23],回归方程方差分解及检验结果得出 F 值分别为 314.234, 351.819, 2052.520, P 值为 0.000,可见方程极其显著。因为多元回归处理多个变量,因此采用调整决定系数评价方程是否理想,得出的调整决定系数分别为 0.986, 0.987, 0.998,模型的拟合性能较优,回归方程比较理想。得到用于计算普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板边压强度和侧压强度的公式如下所述。

1)普通型 BCA 七层瓦楞纸板边压强度的回归计算公式(普边):

$$E_{\text{普边}} = 0.609 + 1.098(R_{11} + R_{31} + R_{51} + R_{71}) + 0.529(f_B R_{21} + f_C R_{41} + f_A R_{61}) \quad (9)$$

式中: R_{11} , R_{31} , R_{51} , R_{71} , R_{21} , R_{41} , R_{61} 分别为瓦楞纸板面纸、夹芯纸 1、夹芯纸 2、里纸、瓦楞芯纸 1、瓦楞芯纸 2、瓦楞芯纸 3 的横向环压强度(kN/m); f_A , f_B , f_C 为瓦楞系数,分别为 1.59, 1.36 和 1.40。

2) X-PLY (BCA) 型瓦楞纸板边压强度的回归计算公式:

$$E_{\text{X-PLY边}} = -0.708 + 1.039(R_{11} + R_{32} + R_{51} + R_{71}) + 0.723(f_B R_{21} + f_A R_{61}) \quad (10)$$

式中: R_{11} , R_{51} , R_{71} , R_{21} , R_{61} 分别为瓦楞纸板面纸、夹芯纸 2、里纸、瓦楞芯纸 1、瓦楞芯纸 3 的横向环压强度(kN/m); R_{32} 为瓦楞纸板夹芯纸 1 的纵向环压强度(kN/m); f_A , f_B 为瓦楞系数,分别为 1.59, 1.36。

3) X-PLY (BCA) 型瓦楞纸板侧压强度的回归计算公式(X-PLY 侧):

$$E_{\text{X-PLY侧}} = -2.622 + 1.072(R_{12} + R_{31} + R_{52} + R_{72}) + 0.908(f_C R_{41}) \quad (11)$$

式中: R_{31} , R_{41} 为瓦楞纸板瓦楞芯纸 2 的横向环压强度(kN/m); R_{12} , R_{52} , R_{72} 分别为瓦楞纸板面纸、夹芯纸 2、里纸的纵向环压强度(kN/m); f_C 为瓦楞系数,为 1.40。

由前面的公式可以看出,普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板的边压强度在很大程度上取决于瓦楞芯纸,瓦楞方向与压缩方向平行的铺设层数越少,瓦楞芯层对边压强度的影响越大,这与实际情况相符。

表 5 中计算值为利用回归计算公式(8—10)计算得到的值,基本上都接近于试验值,最大的偏差不超过 5%,所拟合的普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板边压强度和侧压强度计算模型基本符合要求,可靠性比较高。

表 5 七层瓦楞纸板边压强度试验值与计算值的比较
Tab.5 Comparison of measured ECT values and calculated values of seven-layer corrugated board

代号	边压强度						侧压强度		
	普通型七层瓦楞纸板			X-PLY 型瓦楞纸板			X-PLY 型瓦楞纸板		
	试验值/ (kN·m ⁻¹)	计算值/ (kN·m ⁻¹)	误差/%	试验值/ (kN·m ⁻¹)	计算值/ (kN·m ⁻¹)	误差/%	试验值/ (kN·m ⁻¹)	计算值/ (kN·m ⁻¹)	误差/%
D1	8.642	8.749	1.24	7.691	7.637	-0.70	6.671	6.652	-0.29
D2	5.648	5.192	4.68	4.497	4.650	3.44	3.781	3.891	2.92
D3	10.759	10.664	-0.88	9.624	9.662	0.39	8.925	8.848	-0.86
D4	6.142	6.197	0.89	4.877	4.919	0.87	4.184	4.201	0.41
D5	8.212	7.911	-3.66	7.048	6.772	-3.91	5.921	6.019	1.66
D6	10.169	10.05	-1.17	9.137	9.011	-1.38	8.229	8.234	0.06
D7	9.725	9.826	1.04	8.934	8.797	-1.53	8.196	8.215	0.24
D8	9.601	9.768	1.74	8.520	8.742	2.61	7.947	7.924	-0.29
D9	10.401	10.437	0.35	9.439	9.447	0.09	8.765	8.830	0.74
D10	7.702	7.853	1.96	6.596	6.717	1.84	5.848	5.728	-2.06

4.2 回归计算公式的验证

为了验证回归计算公式的准确性,再另取 5 组不同材质的普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板,按照 3.2 所述试验方法进行试验,将试验测得的值与回归计算公式(8—10)的计算值进行比较,计算误差百分比,见表 6。

从表 6 中可以得到,回归计算公式的的计算值与试验值的偏差较小,且误差在 4%以内。图 4—6 为计算值与试验值的对比,分析结果表明,普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板强度试验值与回归计算公式计算的结果比较接近,拟合结果较优,所得普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板强度回归计算公式基本符合要求。

表 6 七层瓦楞纸板边压强度的验证
Tab.6 Verification of results: ECT of seven-layer corrugated board

代号	边压强度						侧压强度		
	普通型七层瓦楞纸板			X-PLY 型瓦楞纸板			X-PLY 型瓦楞纸板		
	试验值/ (kN·m ⁻¹)	计算值/ (kN·m ⁻¹)	误差%	试验值/ (kN·m ⁻¹)	计算值/ (kN·m ⁻¹)	误差%	试验值/ (kN·m ⁻¹)	计算值/ (kN·m ⁻¹)	误差%
D11/B3C1A3	7.474	7.627	2.05	6.485	6.503	0.28	5.842	5.709	2.27
D12/B3C2A3	9.678	9.542	-1.41	8.531	8.528	-0.03	8.102	7.906	-2.42
D13/B1C1A3	8.618	8.522	-1.11	7.284	7.423	1.91	6.524	6.634	1.67
D14/B2C1A2	8.101	8.137	0.45	7.246	6.986	-3.56	6.131	6.037	-1.52
D15/B1C1A1	6.689	6.808	1.78	5.421	5.570	2.75	4.758	4.815	1.21

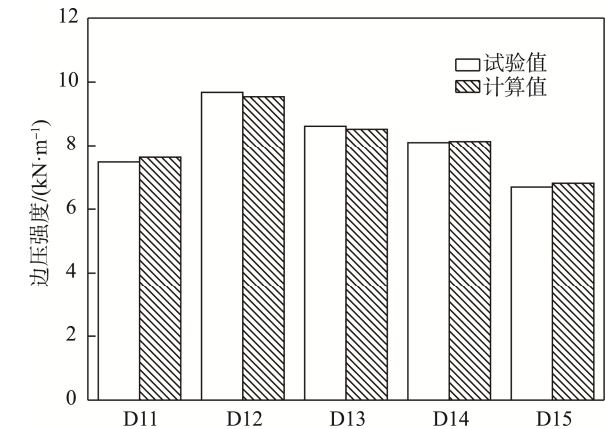


图 4 普通型 BCA 七层瓦楞纸板边压强度公式的验证
Fig.4 Formula verification of the ECT of BCA

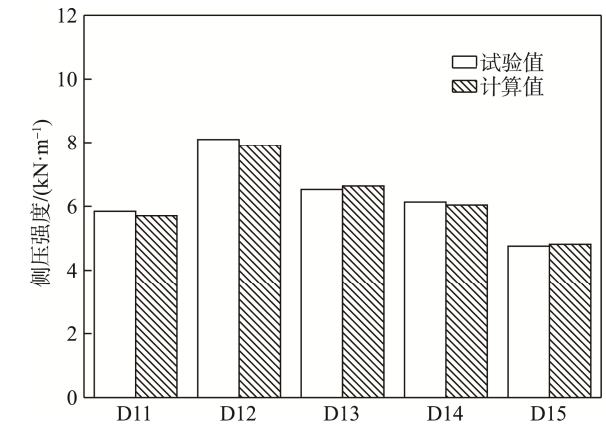


图 6 X-PLY (BCA) 型瓦楞纸板侧压强度公式的验证
Fig.6 Formula verification of lateral compressive strength of X-PLY (BCA)corrugated board

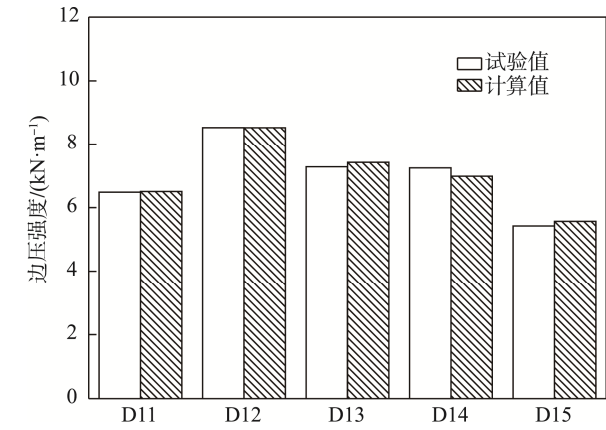


图 5 X-PLY (BCA) 型瓦楞纸板边压强度公式的验证
Fig.5 Formula verification of the ECT of X-PLY (BCA) seven-layer corrugated board

5 结语

以不同方向,试样规格为 25mm×100mm 的普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板为研究对象,通过试验与理论相结合的方法,分析了普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板的强度特性,在定量与普通七层瓦楞纸板相同的情况下,X-PLY 型瓦楞纸板的边压强度都低于普通型瓦楞纸板,但侧压强度却远远高于普通型七层瓦楞纸板。通过对不同材质、组合类型为 BCA 的普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板进行试验,将实验数据输入 SPSS 软件,通过进行线性回归分析,得到了比较理想的边压强度和侧压强度回归计算公式。在瓦楞纸板纸箱企业实际生产

中,可以运用上述回归计算公式,估算出普通型七层瓦楞纸板和 X-PLY 型瓦楞纸板的边压强度和侧压强度,以满足客户的需求,也为 X-PLY 型瓦楞纸板的实际应用推广提供进一步的理论研究。此外,这里对 X-PLY 型瓦楞纸板强度和原纸强度之间关系的研究尚处于初步阶段,仅仅对组合类型 BCA 进行了研究,可进一步研究其他组合类型的 X-PLY 型瓦楞纸板强度计算模型,以寻求对于不同组合类型的 X-PLY 型瓦楞纸板都适应的计算模型。

参考文献:

- [1] 王建清. 包装材料学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2010.
WANG Jian-qing. Packaging Material[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2010.
- [2] 王斐, 母军. 瓦楞纸箱抗压强度的研究进展[J]. 包装工程, 2014, 35(11): 133—138.
WANG Fei, MU Jun. Research Progress on Compressive Strength of Corrugated Box[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(11): 133—138.
- [3] 孙德强, 李耿, 李国志, 等. 层合方式和压缩方向对层合瓦楞纸板压缩性能的影响[J]. 包装工程, 2018, 39(17): 1—5.
SUN De-qiang, LI Geng, LI Guo-zhi, et al. Influence of Laminating Style and Compression Direction on Compression Properties of Laminated Corrugated Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(17): 1—5.
- [4] PANYARJUN O, BUDRGESS G. Prediction of Bending Strength of Long Corrugated Boxes[J]. Packaging Technology and Science, 2001(2): 49—53.
- [5] WANG D M. Cushioning Properties of Multi-layer Corrugated Sandwich Structures[J]. Journal of Sandwich Structures and Materials, 2009, 11(1): 57—66.
- [6] CAO B T, HOU B, LI Y L, et al. An Experimental Study on the Impact Behavior of Multilayer Sandwich with Corrugated Cores[J]. International Journal of Solids and Structures, 2017, 109: 33—45.
- [7] 付云岗, 郭彦峰, 王忠民. 瓦楞纸板的压缩变形及吸能特性研究[J]. 中国造纸学报, 2015, 30(3): 31—35.
FU Yun-gang, GUO Yan-feng, WANG Zhong-min. Compression Deformation and Energy Absorption Properties of Corrugated Paperboard[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2015, 30(3): 31—35.
- [8] 刘加红, 温时宝, 王泽鹏. 立方体层合瓦楞复合纸板的三向静态压缩性能研究[J]. 机械, 2014, 41(9): 30—34.
LIU Jia-hong, WEN Shi-bao, WANG Ze-peng. Study on Three-way Static Compressive Properties of Cubelaminated Corrugated Composite[J]. Machinery, 2014, 41(9): 30—34.
- [9] 李光, 李津乐. 立式瓦楞复合纸板静态压缩试验与有限元分析[J]. 包装工程, 2018, 39(13): 52—56.
LI Guang, LI Jin-le. Static Compression Experiment and Finite Element Analysis of Vertical Corrugated Composite Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(13): 52—56.
- [10] 刘晔, 王振林, 周建伟, 等. 三重组合瓦楞纸板压缩承载规律的实验研究[J]. 包装工程, 2003, 24(3): 43—45.
LIU Ye, WANG Zhen-lin, ZHOU Jian-wei, et al. An Experimental Study of the Compressive Intensity Rule of Triple Wall Corrugated Fiber Board[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(3): 43—45.
- [11] 刘晔, 王振林, 高德, 等. 三重组合瓦楞纸板静态平压性能的理论建模[J]. 包装工程, 2004, 25(5): 162—164.
LIU Ye, WANG Zhen-lin, GAO De, et al. Modeling of the Static Plain Compression Performance of Triple Wall Corrugated Fiber Board[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(5): 162—164.
- [12] 陶良毅. X-PLY 型瓦楞纸板的强度特性的试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
TAO Liang-yi. Experimental Research on Compression Performance of X-PLY Corrugated Paperboard[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [13] 李佳. X-PLY 超强瓦楞纸板的动力学特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
LI Jia. Dynamic Characteristics of X-PLY Corrugated Paperboard[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [14] 朱琼. X-PLY 超强瓦楞纸板的力学建模及振动特性分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2011.
ZHU Qiong. Mechanical Modeling and Vibration Analysis of X-PLY Corrugated Paperboard [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011.
- [15] MCKEE R C, GANDER J W, WACHUTA J R. Compression Strength Formula for Corrugated Boxes[J]. Paperboard Packaging, 1963, 48(8): 149—159.
- [16] 王文鹏. 瓦楞纸箱抗压强度优化设计研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2014.
WANG Wen-peng. The Compression of Corrugated Box[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technolog, 2014.
- [17] DUONG V H, YUSUKE N, FUMIHIKO T, et al. Preserving the Strength of Corrugated Cardboard under High Humidity Condition Using Nano-sized Mists[J]. Composites Science and Technology, 2010, 70(14): 2123—2127.
- [18] BAUM G A, BRENNAN D G, HABEGER C C. Orthotropic Elastic Constants of Paper[J]. TAPPI, 1981, 64(8): 97—101.
- [19] 黄剑宗. 模拟流通环境下温湿度对瓦楞纸板力学性能影响[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
HUANG Jian-zong. Temperature and Humidity on the Mechanical Properries of Corrugated Cardboard in

- Transport Circulation Environment[D]. Nanning: Guangxi University, 2015.
- [20] 张书彬, 冯学正. 瓦楞纸箱抗压强度的试验研究[J]. 包装工程, 2008, 29(9): 10—11.
- ZHANG Shu-bin, FENG Xue-zheng. Experimental Investigation of Corrugated Box's Compression Strength[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(9): 10—11.
- [21] 肖心明. 瓦楞纸板边压强度影响因素分析[J]. 包装工程, 2017, 38(13): 108—112.
- XIAO Xin-ming. Influence Factors of Edgewise Compression Strength of Corrugated Board[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(13): 108—112.
- [22] 章文波, 陈红艳. 实用数据统计分析及 SPSS 12.0 应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- ZHANG Wen-bo, CHEN Hong-yan. Practical Data Statistical Analysis and SPSS 12.0 Application[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2006.
- [23] 何晓群, 刘文卿. 应用回归分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2015.
- HE Xiao-qun, LIU Wen-qin. Applied Regression Analysis[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2015.