

湿度和运输距离对瓦楞纸箱抗压强度的影响研究

郑银环, 王思远, 吴飞*, 李虎胜
(武汉理工大学, 武汉 430070)

摘要: **目的** 研究瓦楞纸箱抗压强度变化规律, 提高瓦楞纸箱循环使用效率, 减少资源浪费。**方法** 通过有限元仿真模拟不同湿度下瓦楞纸箱抗压强度以及振动时瓦楞纸箱应力情况。通过试验的方法测试模拟循环后瓦楞纸箱抗压强度变化, 找出变化规律。**结果** 有限元分析结果得出, 湿度越大, 瓦楞纸箱抗压强度越低, 振动时受到的应力越大; 试验得出振动时间相同时, 湿度越大抗压强度越低, 抗压强度降低得越多。**结论** 通过有限元和试验的方法得出抗压强度相关公式指导判断瓦楞纸箱能否继续循环使用, 可以有效提高瓦楞纸箱循环使用效率。

关键词: 瓦楞纸箱; 湿度; 振动; 抗压强度

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)19-0258-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.19.033

Effect of Humidity and Transportation Distance on Compressive Strength of Corrugated Cartons

ZHENG Yin-huan, WANG Si-yuan, WU Fei*, LI Hu-sheng

(Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

ABSTRACT: The work aims to study the changes in the compressive strength of corrugated cartons, improve the efficiency of corrugated carton recycling, and reduce the waste of resources. Through finite element simulation, the compressive strength of corrugated cartons at different humidity levels and the stress on corrugated cartons during vibration were simulated. The compressive strength of corrugated cartons was tested by means of experiments to summarize the law of change in compressive strength. The finite element analysis showed that the higher the humidity, the lower the compressive strength of the corrugated carton and the greater the stress during vibration. The test showed that the higher the humidity, the lower the compressive strength and the greater the reduction in compressive strength when the vibration time was the same. The compressive strength related formulae derived from finite element and test methods are used to judge whether corrugated cartons can continue to be recycled or not, which can effectively improve the recycling efficiency of corrugated cartons.

KEY WORDS: corrugated carton; humidity; vibration; compressive strength

随着物流行业快速发展, 瓦楞纸箱使用量随之增大, 环境压力与日俱增。瓦楞纸箱循环使用可以减缓资源消耗压力^[1-2]。在回收的瓦楞纸箱外观无损伤时, 靠工人经验判断瓦楞纸箱是否可以继续使用的效率低下, 因此研究物流环境下瓦楞纸箱力学性能变化规律尤为重要。

国内外研究学者研究了各种因素对瓦楞纸箱强度的影响。李秀华等^[3]研究了湿度对瓦楞纸箱的影响, 得出湿度的增加与瓦楞纸箱抗压强度的降低成正比。张惠忠^[4]研究了含水率对瓦楞纸箱力学性能的影响, 得出含水率低时纸箱脆性增加, 容易开裂, 含水率高会导致纸箱变软。李德鹏^[5]研究了环境湿度对瓦

楞纸箱的影响, 在梅雨季节库房中最底层纸箱会严重变形。刘雪雪等^[6]研究了物流条件下瓦楞纸箱尺寸及环境温度分别对瓦楞纸箱抗压强度的影响。卞维红等^[7]研究了特殊结构对瓦楞纸箱抗压强度的影响。许欣等^[8]对冷链运输环境下的纸板力学性能进行了研究。金燕^[9]从瓦楞纸箱尺寸方向对其抗压性能提高进行了研究。Zang 等^[10]研究了瓦楞纸箱有限元分析方法。梁友珍等^[11]研究了五层瓦楞纸箱压溃模型。Pyr'ev 等^[12]通过研究不同几何参数、纸板类型, 估算出纸箱临界压力值。Wang 等^[13]研究了振动与瓦楞纸箱疲劳之间的关系。王立军等^[14]研究了瓦楞包装系统物流振动损伤。Rouillard 等^[15]对纸箱运输道路谱进行了研究, 认为振动试验中需要选择合适的道路谱。

综上所述, 物流过程中, 对瓦楞纸箱力学性能影响最大的是环境湿度和运输振动冲击这 2 个因素。其中, 环境湿度通过影响瓦楞纸箱含水率, 从而导致瓦楞纸箱力学性能变化, 运输振动冲击对瓦楞纸箱会产生振动疲劳效应, 从而影响瓦楞纸箱力学性能。本文主要研究湿度与振动 2 个因素对瓦楞纸箱抗压强度的影响规律, 为快速判别回收的瓦楞纸箱是否能继续使用提供理论依据。

1 瓦楞纸箱有限元分析

1.1 模型建立

本研究采用某卷烟厂使用的五层瓦楞纸箱, 该瓦楞纸箱产量大, 通用性好, 回收方便。瓦楞形状为 UV 瓦, 楞型为 BE 型, 瓦楞纸箱内尺寸为 455 mm×255 mm×575 mm。瓦楞纸箱原纸板厚度为 5 mm。对瓦楞纸箱完整瓦楞结构进行有限元分析时, 节点数量庞大导致计算量大, 因此将瓦楞结构简化为实心板进行分析有助于提高分析效率。瓦楞纸箱模型如图 1a 所示, 为模拟实际抗压试验。在瓦楞纸箱模型基础上增加上压和底板得到抗压模型, 如图 1b 所示。

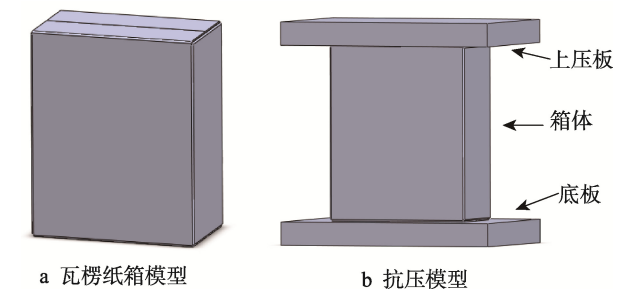


图 1 瓦楞纸箱三维模型
Fig.1 Three dimensional model of corrugated cartons

通过对不同相对湿度处理后的瓦楞纸板进行称量以及三点弯曲测试, 得到不同相对湿度下瓦楞纸箱的密度与弹性模量, 并根据相关文献^[5]得到瓦楞纸箱泊松比, 瓦楞纸箱的材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数 Tab.1 Material parameters			
相对湿度/%	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
40	1 086	840.5	0.3
50	1 086	831	0.3
60	1 088	711.8	0.3
70	1 091	535.4	0.3
80	1 094	409.3	0.3
90	1 097	302.1	0.3

1.2 瓦楞纸箱有限元仿真分析

将瓦楞纸箱模型导入 Workbench 中进行仿真分析。空箱抗压仿真模型中瓦楞纸箱与压板之间接触类型设置为摩擦接触。对瓦楞纸箱模型进行网格划分, 有限元网格划分主要使用四面体网格划分以及六面体网格划分, 四面体网格划分较为精细但计算速度慢, 六面体网格划分计算速度较快但不够精细。因此对瓦楞纸箱采用四面体网格划分, 对上压板和底板采用六面体网格划分, 如图 2 所示。对模型施加向下的压力模拟空箱抗压, 并采用非线性屈曲分析对瓦楞纸箱抗压时的极限屈曲进行计算, 外部载荷及约束如图 3a 所示。

由于瓦楞纸箱在物流过程中主要受到垂直方向的激励, 模拟瓦楞纸箱随机振动时, 在瓦楞纸箱垂直方向施加振动激励, 将瓦楞纸箱模型顶面以及底面设置固定约束, 约束及振动加载方向如图 3b 所示。

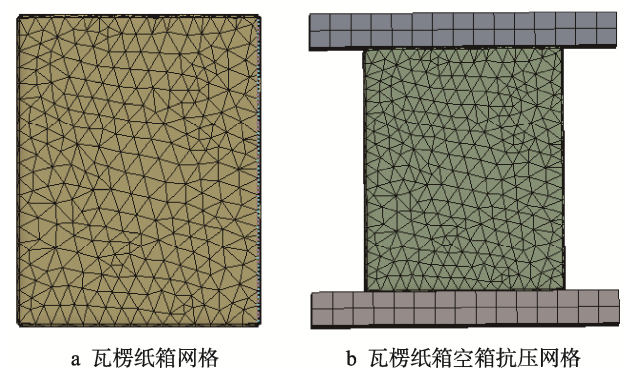


图 2 网格划分
Fig.2 Mesh division

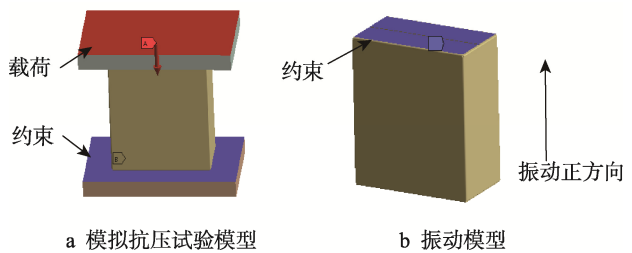


图 3 瓦楞纸箱试验模型
Fig.3 Corrugated carton test model

烟用瓦楞纸箱主要通过钢簧减震卡车运输, 振动激励条件按照 GB/T 4857.23—2022《包装 运输包装件基本试验 第 23 部分: 随机振动试验方法》公路运输中等严酷水平(加速度均方根 $G_{\text{rms}}=0.58$) 进行, 如表 2 所示。

表 2 振动条件
Tab.2 Vibration conditions

频率/Hz	功率谱密度/($g^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$)
1	0.000 018
3	0.03
4	0.03
8	0.003 5
12	0.008
30	0.003
40	0.007 5
60	0.000 7
100	0.000 5
200	0.000 024

瓦楞纸箱抗压有限元仿真分析如图 4 所示, 此处为相对湿度 40% 时瓦楞纸箱有限元分析。由于瓦楞纸箱模型结构上一致, 不同相对湿度下瓦楞纸箱应力分布趋势大致相同, 应力集中主要出现在角、底边的楞以及面中心位置。

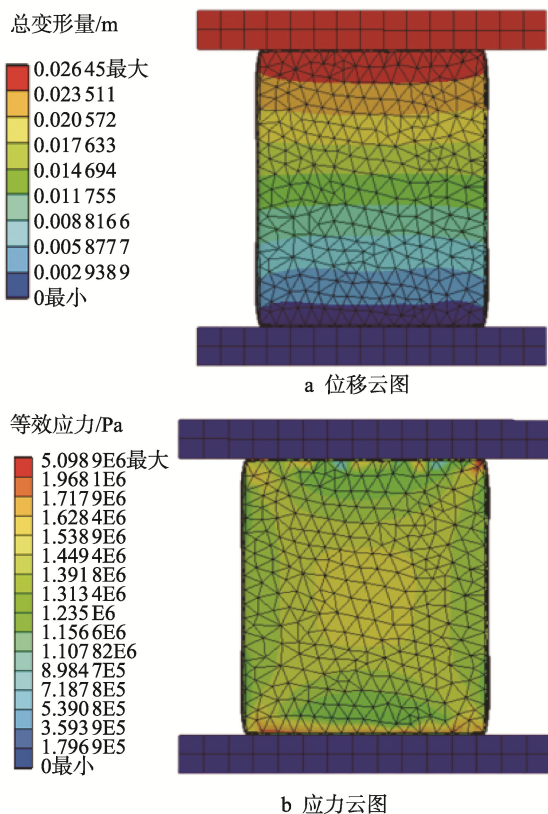


图 4 抗压有限元仿真

Fig.4 Compressive finite element simulation

抗压有限元仿真数据如表 3 所示, 结果显示相对湿度越高的情况下, 瓦楞纸箱抗压强度越低, 变形量也有所增加。

表 3 瓦楞纸箱抗压仿真结果
Tab.3 Compression simulation results of corrugated cartons

相对湿度/%	抗压强度/N	位移/mm
40	5 133	26.45
50	5 068	26.47
60	4 856	26.91
70	4 018	27.63
80	3 685	28.84
90	2 876	30.02

瓦楞纸箱振动仿真分析如图 5 所示, 不同相对湿度下最大应力有所差别, 应力集中出现的位置相差不大, 振动时最大应力主要集中在瓦楞纸箱底角, 其次是箱体正面两侧靠下、箱体中心以及箱体顶部位置。根据疲劳损伤理论, 有限元仿真中的应力集中处也是箱体受到振动疲劳最严重的部位。

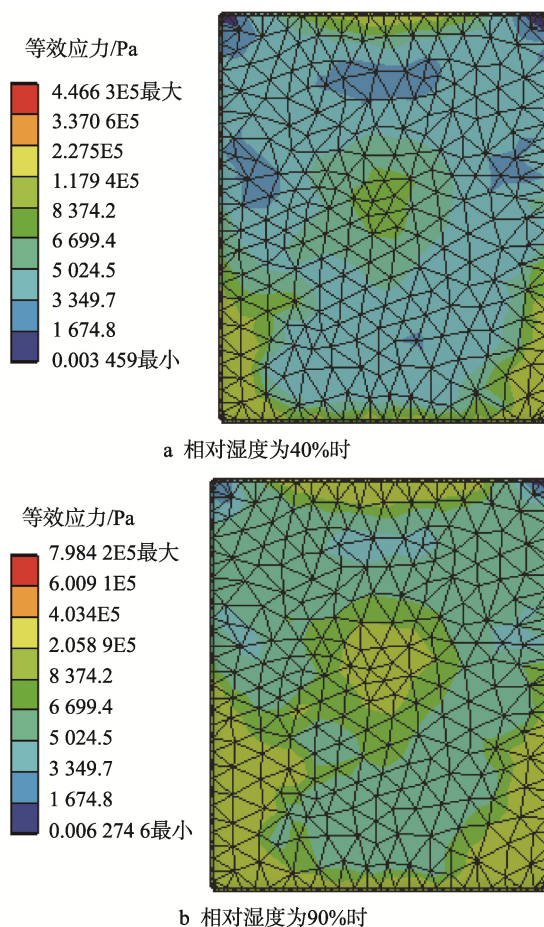


图 5 瓦楞纸箱振动仿真应力云图

Fig.5 Vibration simulation stress diagram of corrugated cartons

不同相对湿度下瓦楞纸箱在振动时的最大应力如表 4 所示。

表 4 最大应力及平均应力
Tab.4 Maximum stress and average stress

相对湿度/%	最大应力/MPa	平均应力/Pa
40	0.446	10 298
50	0.457	10 543
60	0.513	11 407
70	0.596	12 968
80	0.689	15 114
90	0.798	17 855

1.3 结果分析

通过有限元仿真分析可知,相对湿度越高时,瓦楞纸箱抗压强度越低;振动时,相对湿度越高的瓦楞纸箱受到的最大应力以及平均应力也越大。说明环境湿度越大,在运输过程中越容易出现振动疲劳,抗压性能降低得越快。

2 瓦楞纸箱抗压试验

2.1 试验过程

瓦楞纸箱进行试验时先进行湿度处理,再进行振动试验,最后进行抗压强度试验。温湿度处理使用温湿度试验箱,可控相对湿度范围为 5%~99%,振动试验使用的设备为电动振动台,频率为 1~3 000 Hz,最大推力为 10 000 N;抗压试验使用纸箱抗压强度试验机,量程为 0~15 kN。

试验温度为 23 ℃,相对湿度为 40%~90%,每间隔 10%取值,放置时间设置为 24 h;振动试验按照 GB/T 4857.23—2022《包装 运输包装件基本试验 第 23 部分:随机振动试验方法》公路运输中等严酷水平(加速度均方根 $G_{rms}=0.58$)进行加速振动试验,试验条件如表 2 所示。时间取 0 min(对照组)、15 min、30 min、1 h、1.5 h、2 h、3 h,进行振动试验时保持与瓦楞纸箱湿度处理时相同的湿度条件。振动时间对应的运输距离按照 GB/T 4857.23—2022《包装 运输包装件基本试验 第 23 部分:随机振动试验方法》中给出的经验公式 $S=t \cdot K$ 计算。式中: S 为运输距离,km; t 为试验时间,min; K 为估算常数, K 取 6 km/min。对应的运输距离为 0、90、180、360、540、720、1 080 km。抗压强度的检测方法:将纸箱放置于抗压测试机下压板靠中间的位置,启动测试机,上压板按照 12.7 mm/min 速度匀速下降,直到纸箱被压溃,读取力值最大值即为瓦楞纸箱抗压强度。为了不损坏瓦楞纸箱结构,对瓦楞纸箱含水率测量时采用接触式测量的方法,使用 CT-7822E 水分仪对经过湿度(40%~90%)处理后的瓦楞纸箱进行含水率测试,得到瓦楞纸箱含水率分别为 6%、7%、9%、11%、14%、17%。振动试验中采用木压条的方式将瓦楞纸箱固定约束在振动台上,模拟实际运输环境试验,如图 6a 所示。抗压试验如图 6b 所示。

在振动试验过程中箱体外观上无明显变化。振动结束后对瓦楞纸箱进行含水率测试,含水率与振动前的相同,表明经过湿度处理后瓦楞纸箱含水率达到了一个稳定水平。在抗压强度试验中,瓦楞纸箱被压溃时在立面的顶部和底部出现圆弧形折痕,圆弧起点在纸箱最大的面靠近 4 个角的位置,压溃如图 7 所示。



图 6 瓦楞纸箱试验
Fig.6 Corrugated carton test

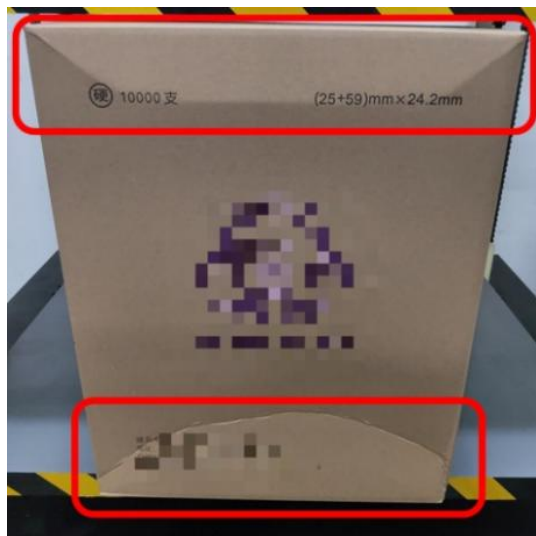


图 7 瓦楞纸箱压溃失效
Fig.7 Crush failure of corrugated cartons

压溃折痕出现位置与瓦楞纸箱有限元仿真中应力集中部位相同,证明了瓦楞纸箱有限元分析中应力分布求解的准确性。

2.2 试验数据分析

相对湿度、振动时间,对瓦楞纸箱空箱抗压性能影响试验数据如表 5 所示。将表 5 数据绘制成曲面得到相对湿度及振动对瓦楞纸箱抗压强度的影响曲面,如图 8 所示。

由表 5 和图 8 可知,瓦楞纸箱空箱抗压强度随着相对湿度增加而降低;在相对湿度超过 60%时,抗压强度下降明显;在相对湿度为 90%时,抗压强度最低。将瓦楞纸箱初始抗压强度试验数据与有限元仿真分析进行对比,有限元仿真计算出的抗压强度及位移误差在 5%以内,说明瓦楞纸箱有限元模型可以准确预测各相对湿度下瓦楞纸箱初始抗压强度。瓦楞纸箱抗压强度随着振动时间发生变化,在

相对湿度不超过 70%时,瓦楞纸箱纤维较为干燥,纤维之间空隙较大,振动使得纤维结合更紧密,长时间的振动使振动疲劳效应显著,降低了瓦楞纸箱的抗压强度,因此导致瓦楞纸箱空箱抗压强度随着振动时间的增加呈现先上升后下降的趋势。在相对湿度超过 70%的环境下,瓦楞纸箱纤维吸水饱和,振动疲劳效应更为明显,瓦楞纸箱空箱抗压强度随着振动时间的增加而降低。在相对湿度为 40%的条件下,振动 3 h 后,瓦楞纸箱抗压强度降低 569 N,下降了 11%;在相对湿度为 90%的条件下,振动 3 h 后,瓦楞纸箱抗压强度降低了 1 387 N,下降了 46%。由此可得在振动相同时间时,相对湿度越大的环境中,瓦楞纸箱疲劳损伤越大。通过抗压强度试验以及振动试验结果,证明了瓦楞纸箱有限元仿真得出的结果的准确性。

根据计算得到振动时间与运输距离的关系。通过瓦楞纸箱材料特性以及振动前后瓦楞纸箱含水率测试数据分析可知,环境相对湿度与瓦楞纸箱含水率之间存在对应的关系,并且在实际工程应用时,可以通过扫描纸箱二维码信息得到纸箱运输距离,通过接触式测量得到纸箱含水率的信息。因此,将表 5 中相对湿度、振动时间分别替换为含水率、运输距离,估算瓦楞纸箱抗压强度,使用 Matlab 对数据进行拟合得到式(1)。

$$z = 6\,926 + 0.110\,2x - 254.3y - 0.000\,380\,9x^2 - 0.062\,67xy - 0.835\,2y^2 \quad (1)$$

式中: z 为抗压强度, N; x 为运输距离, km; y 为瓦楞纸箱含水率, %。

将回收的瓦楞纸箱运输距离与含水率带入式(1)中得到抗压强度估算值。将瓦楞纸箱抗压估算值与瓦楞纸箱抗压强度标准进行对比,若估算值高于标准值,则可以继续使用;若估算值低于标准值,则建议停止循环使用。

表 5 抗压强度-位移试验数据
Tab.5 Compressive strength-displacement test data

相对 湿度/%	0		0.25 h		0.5 h		1 h		1.5 h		2 h		3 h	
	抗压 强度/N	位移/ mm	抗压 强度/N	位移/ mm	抗压 强度/N	位移/ mm	抗压 强度/N	位移/ mm	抗压 强度/N	位移/ mm	抗压 强度/N	位移/ mm	抗压 强度/N	位移/ mm
40	5 195	26.02	5 384	26.07	5 463	26.06	5 190	26.01	5 049	25.83	4 872	25.85	4 626	25.46
50	5 172	26.05	5 319	26.16	5 407	26.11	5 105	26.04	4 998	25.82	4 836	25.74	4 561	25.48
60	4 735	26.71	4 803	26.75	4 687	26.65	4 516	26.59	4 341	26.15	4 180	25.95	3 969	25.48
70	4 074	27.82	4 095	27.66	3 975	27.75	3 847	28.19	3 643	28.43	3 469	28.96	3 256	29.42
80	3 561	29.12	3 493	29.04	3 329	28.91	3 148	29.17	2 977	29.39	2 704	29.51	2 473	29.79
90	2 982	31.05	2 833	31.26	2 694	31.34	2 358	31.47	2 136	31.65	1 925	31.98	1 595	30.66

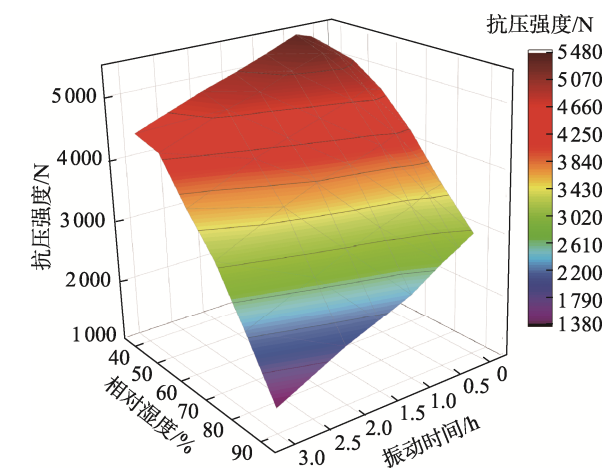


图 8 瓦楞纸箱空箱抗压趋势
Fig.8 Compressive tendency of empty corrugated cartons

2.3 拟合公式验证

使用回收的瓦楞纸箱对式（1）进行验证，回收后的瓦楞纸箱如图 9 所示。

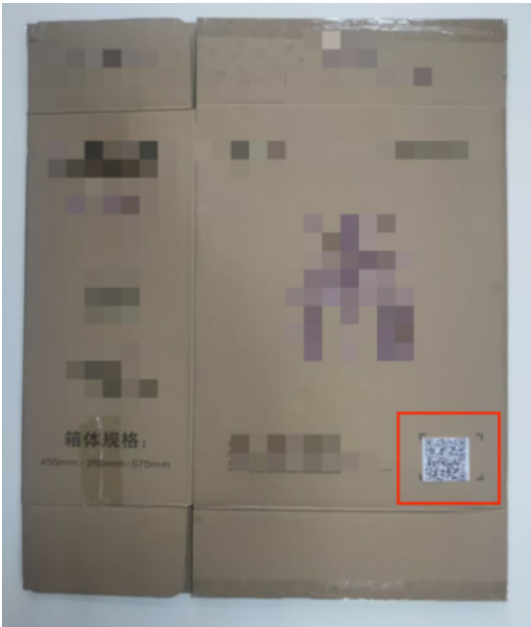


图 9 回收后的瓦楞纸箱
Fig.9 Recycled corrugated cartons

扫描回收的瓦楞纸箱上物流信息获取运输距离，使用 CT-7822E 水分仪对其进行含水率测量，将得到的运输距离和含水率代入式（1）进行计算得到抗压强度的计算值。对回收的瓦楞纸箱进行抗压试验，得到抗压强度的试验值。将抗压强度的计算值与抗压强度的试验值进行对比，验证公式计算的误差，得到如表 6 所示数据。

由表 6 可知，对比回收的瓦楞纸箱的抗压强度试验值与抗压强度计算值，计算误差最大为 6.34%，表

明该公式可以有效计算回收瓦楞纸箱的抗压强度。依据卷烟行业标准 YC/T 224—2018《卷烟用瓦楞纸箱》中瓦楞纸箱的力学性能标准可知，抗压强度大于等于 2 000 N，因此考虑计算误差后，当回收的瓦楞纸箱抗压强度大于等于 2 200 N 时就可以继续使用。

表 6 抗压强度计算值与试验值
Tab.6 Calculated value and test value of compressive strength

序号	运输距离/km	含水率/%	抗压强度/N	计算值/N	误差/%
1	250	8	4 535	4 716.6	3.85
2	300	9	4 215	4 432.4	5.14
3	400	10	3 826	4 031.9	5.38
4	600	10	3 677	3 852.5	4.56
5	750	11	3 165	3 379.1	6.34

3 结语

通过有限元仿真得到了不同相对湿度下，瓦楞纸箱受到静压力以及随机振动时应力状态。从试验结果可以得出，相对湿度低于 70%时，短时间的振动可以提高瓦楞纸箱抗压强度，长时间振动后瓦楞纸箱抗压强度均呈现下降趋势；相对湿度越大，随着振动时间增加，瓦楞纸箱抗压强度衰减幅度越大。根据试验得到抗压强度变化趋势、环境相对湿度与瓦楞纸箱含水率关系、振动试验时长与实际运输距离关系，拟合出了瓦楞纸箱抗压强度与纸箱含水率、运输距离的关系式，并通过回收的瓦楞纸箱验证了关系式的准确性，证明了本试验方法的可行性。因此，由瓦楞纸箱运输距离和含水率，可以估算出回收瓦楞纸箱的抗压强度，将计算的抗压强度估计值与瓦楞纸箱抗压强度标准进行对比，可快速判断出回收的瓦楞纸箱能否继续使用。该方法为实际应用提供了理论依据。

参考文献：

[1] 王姿怡, 义艺, 孙锲. 快递包装的能耗现状及对策分析[J]. 包装工程, 2019, 40(3): 143-148.
WANG Zi-yi, YI Yi, SUN Qie. Present Situation and Countermeasures of Energy Consumption of Express Package[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(3): 143-148.

[2] 孙俊军, 鄂玉萍, 田亚利. 基于产品全生命周期的纸包装绿色生态发展模式[J]. 包装工程, 2022, 43(1): 259-265.
SUN Jun-jun, E Yu-ping, TIAN Ya-li. Green Ecological Development Model of Paper Packaging Industry Based

- on Life Cycle Assessment[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(1): 259-265.
- [3] 李秀华, 宋媛. 环境温湿度变化对快递包装箱抗压强度影响的试验研究[J]. 合肥学院学报(综合版), 2020, 37(2): 107-111.
LI Xiu-hua, SONG Yuan. Experimental Study of Environmental Temperature and Humidity on the Compressive Strength of Express Package[J]. Journal of Hefei University, 2020, 37(2): 107-111.
- [4] 张惠忠. 谈谈瓦楞纸板与纸箱的含水率[J]. 中国包装, 2021, 41(8): 31-33.
ZHANG Hui-zhong. Talking about the Moisture Content of Corrugated Board and Boxes[J]. China Packaging, 2021, 41(8): 31-33.
- [5] 李德鹏. 环境湿度对瓦楞纸箱性能影响的分析与研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
LI De-peng. Analysis and Research on the Influence of Environmental Humidity on the Performance of Corrugated Boxes[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019.
- [6] 刘雪雪, 杨志鹏. 物流包装用瓦楞纸的抗压强度数值模拟研究[J]. 造纸科学与技术, 2022, 41(3): 18-22.
LIU Xue-xue, YANG Zhi-peng. Numerical Simulation of Compressive Strength of Corrugated Paper for Logistics Packaging[J]. Paper Science & Technology, 2022, 41(3): 18-22.
- [7] 卞维红, 张惠忠. 特殊结构的重载荷楞柱型纸箱的抗压强度[J]. 中国包装, 2022, 42(4): 11-16.
BIAN Wei-hong, ZHANG Hui-zhong. Compressive Strength of Heavy-Duty Corrugated Carton with Special Structure[J]. China Packaging, 2022, 42(4): 11-16.
- [8] 许欣, 郑丰, 孔俊, 等. 冷链运输包装纸板的研究现状及发展趋势[J]. 包装工程, 2021, 42(21): 133-142.
XU Xin, ZHENG Feng, KONG Jun, et al. Research Status and Development Trend of Cold Chain Transport Packaging Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(21): 133-142.
- [9] 金燕. 如何提高瓦楞纸箱强度[J]. 印刷杂志, 2021(5): 62-63.
JIN Yan. How to Improve the Strength of Corrugated Box[J]. Printing Field, 2021(5): 62-63.
- [10] ZANG S, XU L, SUN H. Research on Compressive Strength of High Strength Corrugated Box Based on Finite Element Analysis[J]. Integrated Ferroelectrics, 2021, 213(1): 21-34.
- [11] 梁友珍, 王军, 范慧丽. 多层 UV 形瓦楞纸板的准静态轴向压溃模型研究[J]. 包装工程, 2022, 43(19): 180-189.
LIANG You-zhen, WANG Jun, FAN Hui-li. Modelling for Multi-Layer UV-Shaped Corrugated Board under Quasi-Static Axial Crushing[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(19): 180-189.
- [12] PYR'YEV Y, KIBIRKS E, GECECKIENE L, Et Al. Empirical Models for Prediction Compression Strength of Paperboard Carton1[J]. Wood And Fiber Science, 2022, 54(1): 60-73.
- [13] WANG Z W, WANG L J. Accelerated Random Vibration Testing of Transport Packaging System Based on Acceleration PSD[J]. Packaging Technology and Science, 2017, 30(10): 621-643.
- [14] 王立军, 刘慧华. 物流过程中瓦楞纸箱的抗压及振动损伤评价[J]. 天津造纸, 2021, 43(2): 39-43.
WANG Li-jun, LIU Hui-hua. Pressure Resistance and Vibration Damage Assessment of Corrugated Paperboard Box in Distribution[J]. Tianjin Paper Making, 2021, 43(2): 39-43.
- [15] ROUILLARD V, LAMB M J, LEPINE J, et al. The Case for Reviewing Laboratory-Based Road Transport Simulations for Packaging Optimization[J]. Packaging Technology and Science, 2021, 34 (6): 339-351.

责任编辑: 曾钰婵