

第 16 届全国包装工程学术会议专栏

非均布载荷下瓦楞纸箱的承载性能

吕维亮¹, 王军^{1,2}

(1.江南大学, 无锡 214122; 2.江苏省先进食品装备制造技术重点实验室, 无锡 214122)

摘要: **目的** 研究非均布载荷下瓦楞纸箱变形与抗压强度的变化规律。**方法** 对 2 种不同类型的纸箱进行局部抗压试验。首先对纸箱的不同箱面位置进行局部抗压试验, 然后对纸箱的同一箱面位置进行变加载面积的抗压试验, 最后分析试验数据。**结果** 在确定加载面积的情况下, 纸箱中心位置抗压强度最差, 周边位置抗压强度最高; 对于长方形纸箱面, 其短边位置的抗压强度大于长边位置的抗压强度。在确定纸箱加载位置的情况下, 加载面积越大, 纸箱抗压强度越大; 随着加载面积的增大, 纸箱的抗压强度呈指数型增加。**结论** 非均布载荷对纸箱抗压强度影响较大。当纸箱箱面中部承受非均布载荷时, 纸箱垂直方向上会产生较大的变形, 因此在瓦楞纸箱的转运过程中应尽量避免承受因局部或交错堆码产生的非均布载荷。

关键词: 瓦楞纸箱; 非均布载荷; 抗压强度

中图分类号: TB484.1; TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)23-0001-05

Load-carrying Property of Corrugated Cartons under Non-uniform Load

LYU Wei-liang¹, WANG Jun^{1,2}

(1.Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: It aims to study varying pattern of deformation and compressive strength of corrugated cartons under non-uniform load. Local compression tests were firstly carried out to two different types of cartons, and then compressive tests with variable loading area were carried out to the same position of cartons. Finally, the experiment data was analyzed. Provided that the loading area was constant, compressive strength in the center of cartons was the worst while that in edges was the best. For rectangular cartons, the compressive strength in short edges was greater than that in long edges. Provided that the loading position of cartons was constant, the larger the loading area was, the greater the compressive strength of cartons was. With the increase of the loading area, the compressive strength of cartons increased exponentially. Non-uniform load had great influence on the compressive strength of cartons. Substantial deformation will be present in vertical direction of cartons when central section of the cartons carried non-uniform load. Therefore, corrugated cartons should be free from non-uniform load caused by local or staggered stacking during transshipment.

KEY WORDS: corrugated cartons; non-uniform load; compressive strength

随着电子商务的崛起, 瓦楞纸箱在物流中的使用量呈井喷式的增长。瓦楞纸箱是以瓦楞纸板为基材制

得的一种各方面性能都较为理想的包装容器, 被广泛用于家电、机电产品等的缓冲包装、运输包装。

收稿日期: 2016-07-19

基金项目: 国家自然科学基金 (51205167); 江苏省自然科学基金 (BK20151128)

作者简介: 吕维亮 (1992—), 男, 安徽滁州人, 江南大学硕士生, 主攻运输包装。

通信作者: 王军 (1982—), 男, 安徽巢湖人, 江南大学教授, 主要研究方向为运输包装、包装动力学等。

国内外有不少学者对瓦楞纸板、纸箱的力学性能进行了研究, Panyarjun^[1]通过试验的方法研究了纸箱结构参数、边压强度、楞向对抗压强度的影响, 研究结果表明了边压强度是影响抗压强度的主要因素。Urbanik^[2]分别将瓦楞纸板看成线性和非线性材料, 通过计算得出相应的抗压强度经验计算公式。Benjamin^[3]通过总结抗压强度的影响因素, 提出了Urbanik模型。鄂玉萍、何理、王志伟等^[4-6]修正得出了基于湿度的抗压强度公式。王冬梅^[7]研究了不同应变率下的瓦楞纸板的力学性能, 结果表明由于变形机制的不同造成了动态平台应力值比静态平台应力值有明显的增加。高德等^[8-9]通过试验得到钙塑瓦楞复合纸板的静态压缩曲线, 并建立了其静态压缩模型。滑广军、朱丽萍^[10-11]等通过对照试验, 提出了纸箱抗压力与纸箱高度、材质、楞向及接合方式的关系。鄢腊梅^[12]对计算抗压强度的凯里卡特公式和马基公式进行了修正研究。王建清^[13]通过大量试验, 提出了纸板边压强度的修正系数。王鹤腾、王小燕^[14-15]通过有限元分析纸板的受压过程, 得到其变形分布特点, 其结果可帮助优化瓦楞纸箱的结构设计。以上文献均为研究瓦楞纸箱顶部在承受均匀载荷时表现出的抗压性能, 对纸箱顶部承受非均布载荷的研究文献鲜有报道。为此, 文中对瓦楞纸箱进行非均布载荷试验, 研究非均布载荷对瓦楞纸箱的形变和抗压强度的影响。

1 试验

1.1 材料和设备

试验所用纸箱由上海 Worthpack 包装技术有限公司提供, 纸箱尺寸规格有 2 种, 300 mm×300 mm×300 mm 和 450 mm×300 mm×300 mm, 箱型为 0201, 采用边压强度为 3.8 kN/m, 厚度为 3 mm 的 B 型瓦楞纸板进行制作。

利用 THS-AOC-100AS 程式恒温恒湿试验机对瓦楞纸箱进行预处理, 利用 GOTECH 抗压强度试验机对瓦楞纸箱进行抗压试验。

1.2 过程

文中对纸箱的非均布载荷的试验, 主要是对 2 种纸箱面进行不同加载位置 and 不同加载面积的抗压试验。为了实现不同加载面积的试验, 该试验采

用质量较轻、面积不同的木块来充当压头。试验主要分为 2 方面: 对纸箱面的同一位置进行变加载面积的试验; 采用面积相同的压头对纸箱的不同位置进行加载, 加载位置见图 1。基于纸箱面尺寸和压头尺寸的考虑, 1 号纸箱采用 6 种加载位置, 2 号采用 9 种加载位置。加载位置的分布基于平均分布原则, 并且每个位置到箱角或箱中心的距离都不同。

1) 试样和压头的准备。纸箱的尺寸规格如 1.1 节所述; 压头的尺寸为 20 cm×20 cm, 18 cm×18 cm, 16 cm×16 cm, 14 cm×14 cm, 12 cm×12 cm, 10 cm×10 cm, 8 cm×8 cm, 6 cm×6 cm。

2) 试样的预处理。将瓦楞纸箱试样放入恒温恒湿箱内, 在温度 23 ℃, 相对湿度 50% 下处理 24 h 以上, 并参照 GB/T 10739《纸、纸板和纸浆试样处理和试验的标准大气条件》进行处理。

3) 非均布载荷试验。纸箱的外摇盖采用宽 43 mm 的透明胶带粘合。将纸箱置于抗压强度试验机下压板中心位置, 然后将压头放置于纸箱面上, 进行抗压试验, 参照 GB/T 4857.4—2008 的试验方法。纸箱在每种加载面积下的每个位置分别试验 10 次, 试验数据取平均值。

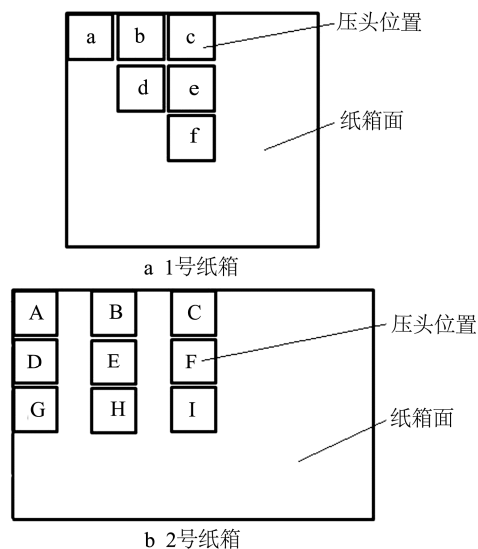


图 1 压头加载位置

Fig.1 The diagram of loading position of pressure head

2 结果与分析

瓦楞纸箱的抗压强度是指其在均匀施加动态压力下压缩至箱体破损的最大负荷。当纸箱承受非均布载荷时, 其压溃时的抗压强度和对应的竖直方向上的变形量会发生变化。通过以上非均布载荷试

验,得出瓦楞纸箱在不同加载位置和面积下的抗压强度和变形量的变化规律。

2.1 1 号纸箱

1 号纸箱的尺寸为 30 mm×30 mm×30 mm, 纸箱面为正方形; 纸箱面受均匀载荷的抗压强度为 1412.13 N, 竖直方向上对应的变形量为 11.35 mm。不同加载面积和不同加载位置的抗压强度和对应的变形量见图 2。非均布载荷对 1 号纸箱抗压强度的影响较大, 如当纸箱箱角处承受 0.04 m² (面积比为 4:9) 的非均布载荷时, 纸箱的抗压强度下降至纸箱完全抗压强度的 40.4%。面积比为纸箱受压面积与箱面面积之比, 完全抗压强度指的是面积比值为 1 时的抗压强度。通过对 1 号纸箱的非均布载荷试验数据进行分析, 可以得出以下结论。

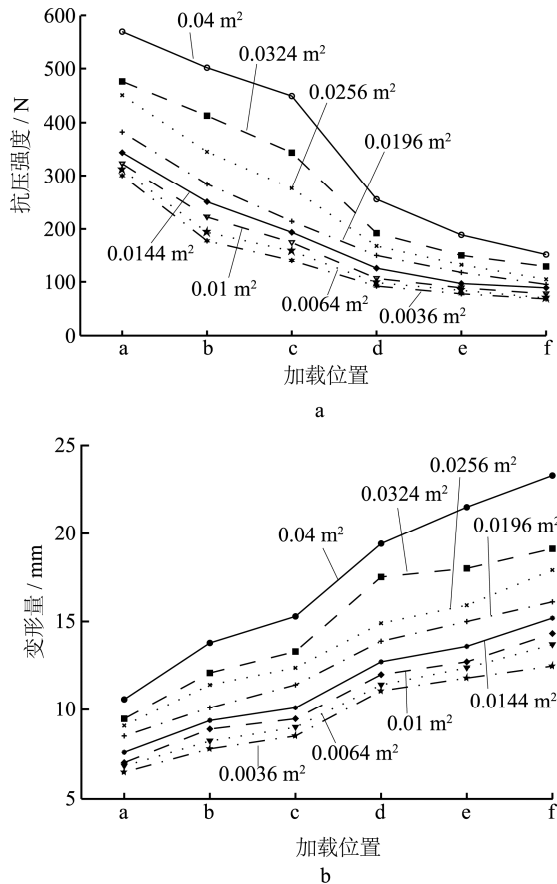


图 2 1 号纸箱不同加载位置的抗压强度和变形量
Fig.2 The variety of compressive strength and deformation of 1 on different loading position

1) 在确定加载面积的情况下, 纸箱不同位置所能承受的载荷不同, 其大小关系是位置 $a>b>c>d>e>f$, 如图 2a; 其中位置 a, b, c 的抗压强度明显高于位置 d, e, f, 这主要是因为位置 a, b, c 靠近箱边或箱角, 加载位置越靠近纸箱角,

抗压强度越高。

2) 在相同的加载面积下, 纸箱不同位置的变形量大小关系是位置 $f>e>d>c>b>a$, 如图 2b; 其中位置 f, e, d 的变形量明显大于位置 a, b, c, 这主要是因为位置 a, b, c 靠近箱边或箱角, 加载位置越远离纸箱角, 其变形量越大。

3) 在 1 号纸箱箱面的所有加载位置上, 非均布载荷下的抗压强度随加载面积增大而增大。为了得到非均布载荷对瓦楞纸箱承载性能的影响规律, 采用 Matlab 的 curve fitting tools 对试验数据进行拟合, 得到相关经验公式, 拟合曲线见图 3。

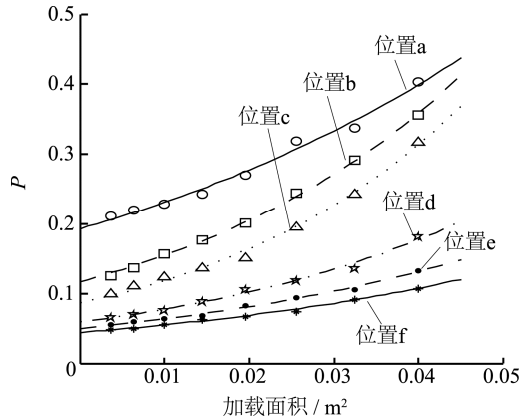


图 3 非均布载荷下“1”号瓦楞纸箱加载面积与 P 的关系拟合
Fig.3 The fitting of loading position and P of “1” under non-uniform loading

拟合的经验公式为指数型函数, 这与实际试样检测结果一致, 具有一定的适用性, 如式(1)—(2):

$$P=u \cdot e^{vs}$$
(1)

$$P=F / F_0$$
(2)

式中: P 为纸箱在非均布载荷下的抗压强度与完全抗压强度的比值; F 为纸箱在非均布载荷下的抗压强度(N); F_0 为纸箱完全抗压强度(N); s 为某位置的加载面积(m^2); u 和 v 为常数, 与加载位置和纸箱材料有关。

拟合经验公式的参数见表 1, 其中 R^2 为拟合优度。

表 1 1 号纸箱模型参数
Tab.1 The parameter of model 1

位置	u	v	R^2
a	0.193	18.18	0.988
b	0.117	28.02	0.998
c	0.086	32.36	0.995
d	0.059	27.54	0.989
e	0.050	24.18	0.994
f	0.044	22.32	0.993

2.2 2号纸箱

2号纸箱的尺寸为45 mm×30 mm×30 mm, 纸箱面为长方形。纸箱面受均匀载荷的抗压强度为1507.52 N, 竖直方向上对应的变形量为10.98 mm。不同加载面积和不同加载位置的抗压强度和变形量见图4。非均布载荷对2号纸箱抗压强度的影响较大, 如当纸箱箱角处承受0.04 m² (面积比为8:27) 的非均布载荷时, 纸箱的抗压强度下降至纸箱完全抗压强度的35.9%。

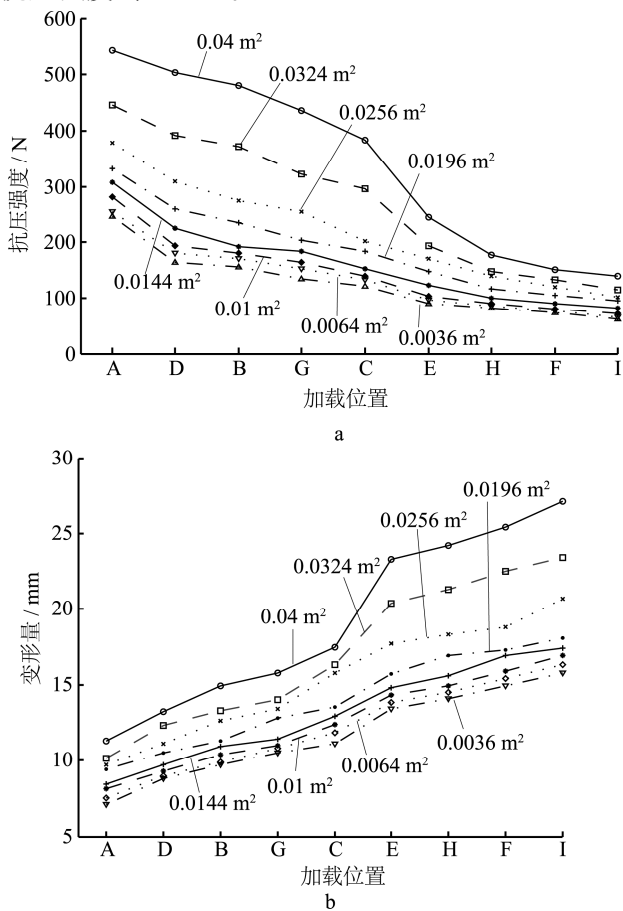


图4 1号纸箱不同加载位置的抗压强度和变形量
Fig.4 The variety of compressive strength and deformation of 2ondifferent loadingposition

通过对2号纸箱的非均布载荷试验数据进行分析, 可以得出以下结论。

1) 在确定加载面积的情况下, 纸箱面不同位置所能承受的载荷不同, 其大小关系是位置A>D>B>G>C>E>H>F>I, 见图4a; 可以看出靠近箱边的位置A, B, C, D, G的抗压强度明显高于靠近箱面中心的位置E, F, H, I, 其中箱角的位置A抗压强度最高, 中心的位置I抗压强度最低, 短边中心位置(位置D)的抗压强度高于长边中心位置(位置B)。

2) 在同样的加载面积下, 纸箱不同位置的变形量大小关系是位置I>F>H>E>C>G>B>D>A, 见图4b; 可以看出, 靠近箱边的位置A, B, C, D, G的变形量明显小于靠近箱面中心的位置E, F, H, I, 其中箱角位置(位置A)变形量最小, 中心位置(位置I)变形量最大。

3) 在2号纸箱面的所有加载位置上, 非均布载荷下的抗压强度随加载面积增大而增高。为了得到非均布载荷对瓦楞纸箱承载性能的影响规律, 根据以上拟合方法, 得到基于2号纸箱的加载面积和P的经验公式, 其拟合曲线见图5。拟合的经验公式的参数见表2。

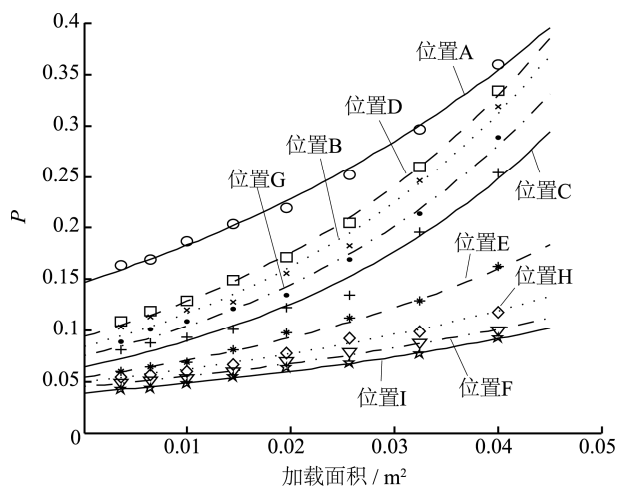


图5 非均布载荷下2号瓦楞纸箱加载面积与P的关系拟合
Fig.5 The fitting of loading position andP of 1 under non-uniform loading

表2 2号纸箱模型参数
Tab.2 The parameter of model 2

位置	u	v	R^2
A	0.147	22.02	0.995
D	0.094	31.35	0.998
B	0.084	32.84	0.989
G	0.075	32.96	0.990
C	0.064	33.89	0.979
E	0.054	27.14	0.994
H	0.050	21.76	0.986
F	0.045	20.29	0.991
I	0.039	21.38	0.989

3 结语

首次通过试验研究了非均布载荷对瓦楞纸箱承载性能的影响, 得到了以下结论。

1) 文中所选取的2种不同尺寸的纸箱, 在非

均布载荷下的抗压强度和变形量的变化规律基本一致。在同样的加载面积下,越靠近箱边位置的抗压强度明显高于靠近箱面中心的位置,其中箱角位置的抗压强度最高,中心位置的抗压强度最低;对于长方形的纸箱面,其短边中心位置的抗压强度高于长边中心位置。

2) 在同样的加载面积下,靠近箱边位置的变形量明显小于靠近箱面中心的位置,其中箱角位置变形量最小,中心位置的变形量最大。

3) 根据试验数据点,拟合出的经验公式与实际试样检测规律一致,具有一定的参考意义。在确定纸箱加载位置的情况下,加载面积越大,纸箱抗压强度越大,随着加载面积的增大,纸箱的抗压强度呈指数型增加。

通过以上的试验结论表明,非均布载荷对纸箱抗压强度影响较大。以1号纸箱为例,当纸箱箱角处承受 0.04 m^2 (面积比为4:9)的非均布载荷时,纸箱的抗压强度下降至纸箱完全抗压强度的40.4%。此外,当纸箱箱面中部承受非均布载荷时会造成纸箱在垂直方向上较大的变形。在瓦楞纸箱的转运过程中应尽量避免承受因局部或交错堆码产生的非均布载荷,若无法避免,堆码应尽量靠近箱角部位。

参考文献:

- [1] PANYARJUN O, BUDRGESS G. Prediction of Bending Strength of Long Corrugated Boxes[J]. Packaging Technology and Science, 2001(2): 49—53.
- [2] URBANIK T J. Linear and Nonlinear Material Effects on Post Buckling Strength of Corrugated Container[J]. Mechanics of Cellulosic Materials, 1997(7): 93—99.
- [3] BENJAMIN F. Corrugated Box Compression: A Literature Survey[J]. Packaging Technology and Science, 2013(2): 105—128.
- [4] E Y P, WANG Z W. Stress Plateau of Multilayered Corrugated Paperboard in Various Ambient Humidities[J]. Packaging Technology and Science, 2012(5): 187—202.
- [5] 何理, 丁毅, 贾丽萍. 不同湿度条件下瓦楞纸箱抗压强度的实验研究[J]. 包装工程, 2012, 33(17): 68—70.
HE Li, DING Yi, JIA Li-ping. Study of Corrugated Box Compression Strength under Different Humidity[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(17): 68—70.
- [6] 王志伟, 方艳平. 湿度对瓦楞纸箱抗压强度的影响[J]. 包装学报, 2012, 4(1): 1—4.
WANG Zhi-wei, FANG Yan-ping. Effect of Humidity on Compression Strength of Corrugated Box[J]. Packaging Journal, 2012, 4(1): 1—4.
- [7] 王冬梅, 柏子游, 龚户祥, 等. 瓦楞夹层结构动态力学性能评估[J]. 振动与冲击, 2014(3): 94—97.
WANG Dong-mei, BAI Zi-you, GONG Hu-xiang, et al. Dynamic Property Evaluation for a Corrugated Sandwich Structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014(3): 94—97.
- [8] 高德, 冯军, 卢富德, 等. 平压单瓦钙塑瓦楞纸板本构模型[J]. 振动工程学报, 2014(6): 852—857.
GAO De, FENG Jun, LU Fu-de, et al. Study on Constitutive Model of Single-wall Calcium Plastic Composite Corrugated Cardboard under Flat Compression Loadings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014(6): 852—857.
- [9] 高德, 武剑锋, 卢富德, 等. 预压缩多层钙塑瓦楞纸板准静态压缩与动态缓冲性能研究[J]. 振动与冲击, 2016(3): 221—225.
GAO De, WU Jian-feng, LU Fu-de, et al. Mechanical and Cushioning Properties of Multilayer Calcium Plastic Corrugated Paper Board with Different Pre-compression Ratio[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016(3): 221—225.
- [10] 滑广军. 大长宽比对纸箱抗压能力影响的研究与分析[J]. 包装工程, 2010, 31(21): 45—47.
HUA Guang-jun. Research and Analysis of Influence of Big Aspect Ratio on the Compression Strength of Corrugated Box[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(21): 45—47.
- [11] 朱丽萍, 赵创灼, 汪文陆. 瓦楞纸箱结构对抗压力的影响[J]. 包装工程, 1998, 19(1): 20—22.
ZHU Li-ping, ZHAO Chuang-shao, WANG Wen-lu. Effect of Structures of Corrugated Boxes on the Compressive Resistance[J]. Packaging Engineering, 1998, 19(1): 20—22.
- [12] 鄢腊梅, 袁友伟. 瓦楞纸箱的抗压强度计算方法及计算机辅助设计[J]. 包装工程, 2000, 21(1): 24—27.
YAN La-mei, YUAN You-wei. On How to Calculate the Compression Strength of Corrugated Paper Boxes and Computer-aided Design[J]. Packaging Engineering, 2000, 21(1): 24—27.
- [13] 王建清. 国产原纸环压强度与瓦楞纸板、纸箱抗压强度之间关系的研究[J]. 包装工程, 2000, 21(2): 9—13.
WANG Jian-qing. Study of Relation BETWEEN RCT of the Homemade Base Paper and ECT, BCT[J]. Packaging Engineering, 2000, 21(2): 9—13.
- [14] 王鹤腾, 高德. 基于非线性有限元的瓦楞纸板静态压缩性能仿真研究[J]. 包装工程, 2006, 27(5): 1—3.
WANG He-teng, GAO De. Research on Simulation of Static Compression Performance of Corrugated Board with Nonlinear Finite Element[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(5): 1—3.
- [15] 王小燕, 郭开华. 瓦楞纸箱结构参数对其承压能力的影响[J]. 包装工程, 2007, 28(7): 34—35.
WANG Xiao-yan, GUO Kai-hua. Corrugated Paper Boxes on the Pressure Resisting Capability[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(7): 34—35.