

三角瓦楞缓冲衬垫设计及缓冲性能研究

刘武¹, 钟云飞²

(1. 苏州万国纸业包装有限公司, 江苏 苏州 215000;

2. 湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: **目的** 针对瓦楞缓冲结构设计未形成完整体系的问题, 研究三角瓦楞缓冲衬垫的设计及缓冲性能。**方法** 首先, 对三角瓦楞结构件缓冲机理及理论进行分析, 得到三角瓦楞结构的缓冲临界承载特性; 然后, 以三角形支撑结构件为基础, 依据三角瓦楞结构缓冲和临界承载特性建立三角瓦楞缓冲衬垫总体方案; 最后, 将三角瓦楞缓冲衬垫结构设计和步骤应用到瓦楞缓冲结构件实际设计案例中, 并通过静态压缩测试试验来验证三角瓦楞缓冲衬垫的缓冲性能。**结果** 三角瓦楞缓冲衬垫设计实例表明, 三角瓦楞缓冲衬垫设计方案可用于实际瓦楞缓冲结构设计开发中, 为瓦楞缓冲结构件设计提供了计算依据。**结论** 得到了应力-应变曲线及三角瓦楞衬垫厚度和承载面积设计方法, 可指导实际应用中三角瓦楞衬垫结构的缓冲设计, 提升缓冲结构设计的效率。

关键词: 瓦楞包装; 缓冲衬垫; 结构设计; 应力-应变曲线

中图分类号: TB484.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)11-0090-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.11.014

Design and Cushioning Performance of Triangular Corrugated Cushioning Insert

LIU Wu¹, ZHONG Yun-fei²

(1. United Creation Packaging Solution (Suzhou) Co., Ltd, Suzhou 215000, China;

2. School of Packaging and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

ABSTRACT: The work aims to research the design and cushioning performance of triangular corrugated cushioning insert aiming at the problem that the design of corrugated cushioning structure fails to form a complete system. First, through an analysis on the cushioning mechanism and theory of triangular corrugated structural members, the cushioning and critical load characteristics of triangular corrugated cushioning insert were obtained. Then, on the basis of triangular support structure, the overall plan of triangular corrugated cushioning insert was established according to the cushioning and critical load characteristics of triangular corrugated structure. Finally, the structural design method and procedure of triangular corrugated cushioning insert were applied to the actual design case of corrugated cushioning structure, and the cushioning performance of triangular corrugated cushioning insert was verified through the static compression test. The design example of triangular corrugated cushioning insert showed that the design scheme of triangular corrugated cushioning insert could be used in the actual design and development of corrugated cushioning structure, providing a basis for the calculation of corrugated cushioning structural members. The stress-strain curve and the design method of triangular corrugated insert thickness and bearing area obtained herein can guide the cushioning design of triangular corrugated insert structure in practical application and improve the design efficiency of cushioning structure.

收稿日期: 2019-10-24

作者简介: 刘武 (1981—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为包装材料及工艺。

通信作者: 钟云飞 (1975—), 男, 湖南工业大学教授, 主要研究方向为图像处理与印刷技术。

KEY WORDS: corrugated packaging; cushioning insert; structural design; stress-strain curve

在电子产品、家用电器、化妆品、食品以及快递等包装中,为了使包装更好地保护产品,通常在包装中采用缓冲包装材料,以防止产品在运输途中受到损坏^[1-2]。目前,传统的缓冲包装材料主要以泡沫塑料、气泡膜、气柱袋等为主,其缓冲性能好、价格低廉,但是传统缓冲包装材料回收利用率低,且非常难以降解,并在降解过程中产生有毒物质,对环境造成较大影响。随着绿色环保包装理念不断深入,以瓦楞纸板、纸浆模塑、蜂窝纸板等对环境友好的缓冲包装材料得到越来越广泛地使用^[3]。瓦楞纸板缓冲包装材料具有绿色环保、成型加工简单、生产成本低、缓冲性能好等特点,同时通过组合、折叠、插装、粘接等处理后,还可以制作成瓦楞衬垫缓冲结构件代替传统泡沫塑料,广泛用于电子产品和家用电器等产品的运输包装中。基于瓦楞包装优异的环保性能,以及瓦楞缓冲结构件技术的不断发展,在汽车零部件及重型家电等相关领域,已经在逐步开展全瓦楞缓冲包装研究,以期将瓦楞材料更加广泛应用到各类缓冲包装中^[4-5],因此需要对瓦楞缓冲结构件的缓冲机理和性能进行深入研究,以进一步提高瓦楞缓冲包装的缓冲性能,提升瓦楞缓冲结构及包装的保护性能。

为了使瓦楞纸板更加广泛地应用到缓冲包装中,在瓦楞缓冲机理和性能研究方面,相关研究学者已经取得了一定的研究成果。鄂玉萍等^[6]对纸质缓冲材料能量吸收特性展开研究,建立蜂窝纸板和瓦楞纸板能量吸收理论预报模型用于缓冲包装优化设计;徐长妍^[7]、王行宁^[8]、刘晔^[9]、徐长妍^[10]等学者通过对瓦楞衬垫缓冲性能进行分析和研究,得到了矩形波冲击、折叠三角形、组合瓦楞等不同情形下瓦楞衬垫缓冲性能参数;Sekm 等^[11-12]通过采用动态冲击的方法,对多层瓦楞缓冲材料的缓冲性能进行测试,获得了影响瓦楞纸板缓冲性能的影响参数,以此提升瓦楞纸板缓冲性能;史奥^[13]、郭彦峰^[14]、王冬梅^[15-16]等分别对瓦楞纸板静态和动态缓冲特性展开研究,分别得到了瓦楞纸板缓冲系数-最大静应力曲线和最大加速度-静应力曲线,为瓦楞缓冲包装的设计及其在运输包装中的应用提供理论数据支撑;王小芳等^[17-19]以三角瓦楞衬垫为基础,提出基于三角形支撑型瓦楞缓冲结构,通过构建三角形瓦楞缓冲试验模型,获得了缓冲结构的静态及动态缓冲性能数据,为三角形支撑型瓦楞缓冲结构实际开发提供了理论依据。由于现有的瓦楞缓冲结构设计大多依靠经验数据,瓦楞缓冲结构设计暂未形成完善的理论体系,因此存在缓冲结构件的设计效率不高和缓冲性能不好等缺陷。

针对现有瓦楞缓冲衬垫结构设计存在的缺陷,文中对三角瓦楞缓冲衬垫设计及缓冲性能展开研究。首

先,对三角瓦楞结构件缓冲机理及理论进行分析,获得三角瓦楞结构缓冲和临界承载特性;然后,以三角形支撑结构件为基础,依据三角瓦楞结构缓冲和临界承载特性建立缓冲试验模型,通过静态压缩获得不同状态下缓冲结构的变形量,采用曲线拟合获得缓冲结构应力-应变曲线,并结合计算公式得到符合产品特性的瓦楞缓冲结构尺寸;最后,通过静态载荷试验测试瓦楞缓冲结构的缓冲性能。

1 三角瓦楞结构件缓冲机理及理论

瓦楞包装的缓冲机理指通过采用不同瓦楞结构,当静态或动态冲击载荷作用在包装上时,瓦楞包装对相应载荷做出的缓冲响应。通过瓦楞包装的缓冲响应,以达到保护包装内容物或产品的目的。目前,常见的瓦楞缓冲结构主要有层叠型、三角支撑型、错楞型、斜撑型等,在实际应用过程中,将根据产品特性和不同缓冲结构的特点,采用不同组合的缓冲结构组合来保护产品,使其具有更好的缓冲性能。

1.1 瓦楞缓冲机理

瓦楞纸板为各项异性缓冲材料,当静态载荷或动态冲击作用到瓦楞缓冲结构件上时,压力载荷开始加载时,瓦楞纸板通过顶部产生形变,将载荷传递给外层侧翼板和内层支撑板后,通过能量吸收把载荷传递到地面。瓦楞缓冲结构件在载荷的作用下将经历以下3个阶段。

1) 弹性变形。在弹性变形阶段,瓦楞纸板变形遵循胡克定律,当载荷或冲击撤除时,在瓦楞纸板自身作用力下,缓冲结构将自行恢复到变形前状态。

2) 塑性变形。随着载荷不断加大或冲击持续的作用,瓦楞纸板将进入塑性变形阶段,当作用力撤除后,变形不可再完全恢复,瓦楞纸板也将发生弯折及屈曲等情况。

3) 结构屈服。瓦楞纸板进入塑性变形阶段后,再增加载荷或冲击持续,瓦楞纸板进入屈服阶段,产生严重变形,甚至击溃,从而失去对产品的保护作用。

瓦楞缓冲结构形变在不同的阶段变化趋势不一样,尤其是在结构屈服后期,瓦楞缓冲结构仍具备一定的承载能力,因此瓦楞缓冲结构相对于纸浆模塑或其他缓冲结构件,可以吸收更多变形能,在缓冲材料选择及应用方面更加广泛。

1.2 瓦楞缓冲结构件屈曲载荷理论分析

为了提升瓦楞缓冲衬垫的设计效率,使其具有更好的缓冲性能,需要对不同结构的瓦楞衬垫承载力进

行深入分析,以获得不同结构的瓦楞缓冲衬垫承载力的影响因素。三角瓦楞结构件的主受力板为两外层侧翼板,其他承力件还包括内层支撑板。当三角瓦楞结构件受到外部承载力或冲击时,结构件顶部先发生变形,然后通过顶部将载荷受力传递到两外层侧翼板和内层支撑板,最后再将受力传递到地面。通过对三角瓦楞结构进行受力分析,可将其空间结构分解成平面结构,即简化成具有两对边简支的受压薄板,具体见图1。

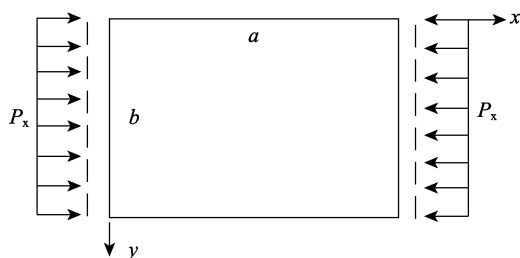


图1 瓦楞纸板受力简图

Fig.1 Corrugated board stress diagram

根据图1受力分析图可知,在最初加载压力载荷时,整个三角瓦楞缓冲结构件变形不大,此时瓦楞缓冲结构件处于弹性变形阶段,当继续增加一定量的载荷时将发生塑性变形,两外层侧翼板将逐步出现弯曲变形,同时内层支撑板也发生屈曲,再继续增加载荷,瓦楞缓冲结构件将发生结构屈服,从而进入压溃失效状态,失去缓冲作用。

根据三角瓦楞缓冲结构件典型受力情况和失效形式,利用瓦楞纸板屈曲计算模型和方法^[20],推导得到三角瓦楞缓冲结构临界载荷的计算方法,为三角瓦楞缓冲结构件设计提供理论基础。

通过以上分析可知,三角瓦楞缓冲结构件失效主要表现为两外层侧翼板及内层支撑板失稳。假设在三角瓦楞缓冲结构件垂直方向上施加载荷集度为 F ,两外层侧翼板夹角为 α ,根据文献^[20]的瓦楞纸板受力平衡方程,可计算得到:

1) 在垂直瓦楞缓冲结构件方向上,载荷集度为

$$\frac{F}{3}。$$

2) 在瓦楞缓冲结构件内层方向上,载荷集度为

$$\frac{F}{6 \cos \frac{\alpha}{2}}。$$

当 $0^\circ \leq \frac{\alpha}{2} \leq 60^\circ$ 时, $\frac{1}{2} \leq \cos \frac{\alpha}{2} \leq 1$, 此时,

$$\frac{F}{6 \cos \frac{\alpha}{2}} \leq \frac{F}{3}; \text{当 } 60^\circ \leq \frac{\alpha}{2} \leq 90^\circ \text{ 时, } 0 \leq \cos \frac{\alpha}{2} \leq \frac{1}{2},$$

$$\text{此时, } \frac{F}{6 \cos \frac{\alpha}{2}} > \frac{F}{3}。$$

由此,根据瓦楞纸板屈曲计算模型,当三角瓦楞缓冲结构件发生弯折及屈曲时,三角瓦楞缓冲结构件的临界载荷集度为:

$$(P_x)_c = \begin{cases} 3D_1 \frac{m^2 \pi^2}{a^2} & \text{外层侧翼瓦楞板发生屈曲} \\ 6 \cos \frac{\alpha}{2} D_1 \frac{m^2 \pi^2}{a^2} & \text{内层支撑瓦楞板发生屈曲} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $D_1 = \frac{E x(h+t)^2 t}{2(1-\mu_{xy}\mu_{yx})}$; α 为两外层侧翼板夹

角; E_x 为 x 方向的弹性模量; μ_{xy}, μ_{yx} 为泊松比; m 瓦楞纸板变形后沿 x 方向的正弦半波数目; a, h, t 分别为瓦楞缓冲结构件的长度、高度、厚度。通过以上分析可知,三角瓦楞缓冲结构件的长度、高度、厚度以及两支撑板间的夹角大小将影响其屈曲临界载荷。

2 三角瓦楞缓冲衬垫设计及应用

2.1 三角瓦楞缓冲衬垫总体方案

在四角固支型瓦楞缓冲结构中,其4个角以特定形状的瓦楞结构作为主要的缓冲支撑结构,可有效对产品进行固定和支撑,缓冲性能好,并避免产品与外包装箱接触导致产品及包装破坏,节省瓦楞材料。文中以四角固支型瓦楞缓冲结构为基础,根据三角瓦楞缓冲结构缓冲特性,重新设计三角瓦楞缓冲衬垫作为四角固支瓦楞缓冲结构,具体结构见图2。

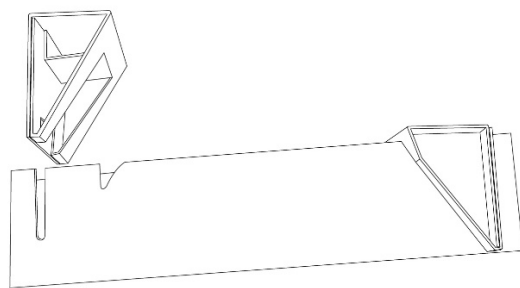


图2 三角瓦楞缓冲衬垫结构

Fig.2 Structure of triangular corrugated cushioning insert

根据三角瓦楞结构件缓冲机理及理论,建立三角瓦楞缓冲衬垫设计总体方案。首先,根据三角瓦楞受力分析情况简化三角瓦楞缓冲衬垫结构及尺寸,制作一系列不同边长的正三角瓦楞缓冲衬垫试样模型;其次,对试样进行静态压缩试验,对试验数据进行分析、处理及计算,得到不同边长试样的缓冲系数-最大静应力曲线;然后,根据包装产品的尺寸、重量、脆值、等效跌落高度等特性,结合瓦楞纸板的环压指数、楞常数及缓冲系数-最大静应力曲线,建立满足产品缓冲特性的瓦楞缓冲结构尺寸计算模型;最后,利用凯里卡特公式核验三角形瓦楞缓冲结构的抗压强度是

否满足产品缓冲性能要求。

2.2 三角瓦楞缓冲衬垫结构设计

根据 2.1 节所述的三角瓦楞缓冲衬垫设计总体方案,需要建立不同边长的三角瓦楞缓冲结构的缓冲系数-最大静应力曲线。

2.2.1 试验条件、标准及设备

试验温度为 $(25\pm 2)^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 $(50\pm 2)\%$,试验开始前在该试验条件下对试样预处理 24 h。

采用 WDW 3050 微机控制电子万能试验机、游标卡尺作为试验仪器及设备,按照 GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》,以速度 12 mm/min 进行准静态压缩试验,载荷加载方向为瓦楞纸板瓦楞方向。

2.2.2 试验结果

缓冲系数-最大静应力曲线主要通过静态压缩性能试验获得,通过模拟产品储存、堆码等静止状态下的受力情况,测量不同载荷下瓦楞厚度的变形量,通过分析换算及曲线拟合得到其缓冲系数-最大静应力曲线。通过静态压缩性能试验,分别获得边长为 40, 50, 60, 80, 100 mm 的正三角瓦楞缓冲结构缓冲系数-最大静应力曲线。

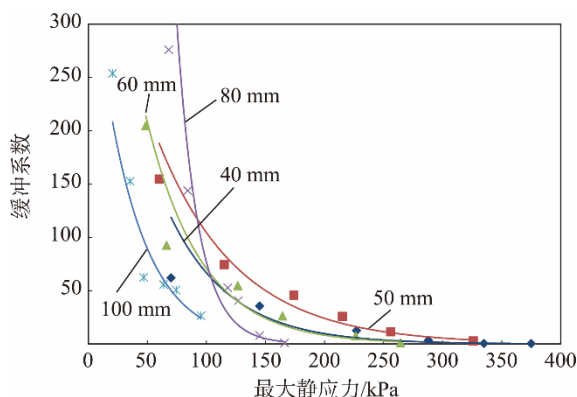


图 3 不同边长三角瓦楞缓冲结构静态压缩缓冲系数-最大静应力曲线

Fig.3 Curve of static compression cushioning coefficient-maximum static stress of triangular corrugated cushioning structure with different side length

获得缓冲系数-最大静应力曲线后,三角瓦楞缓冲衬垫结构设计步骤如下所述。

1) 选择边长 a 的三角形结构缓冲衬垫,计算得到其对应的等效承载面积 $A = \frac{\sqrt{3}a^2}{4}$;

2) 根据包装产品的质量 m 和脆值 G ,计算得到满足产品脆值的要求的最大静应力 $\sigma_m = \frac{Gmg}{4A}$;

3) 利用凯里卡特公式计算得到三角形缓冲结构的抗压强度 P_c 和最大承载压力 W ;

4) 如果 $P_c < W$,则所选边长三角瓦楞缓冲衬垫不符合要求,选择边长更大的三角瓦楞缓冲衬垫重复步骤 1—3;如果 $P_c > W$,则表明三角瓦楞缓冲衬垫强度符合要求,继续步骤 5;

5) 根据静态压缩试验获得的缓冲系数-最大静应力曲线,查找对应最大静应力 σ_m 所对应的缓冲系数 C ,最后根据等效跌落高度 h 计算得到三角瓦楞缓冲衬垫等效厚度 $t = \frac{CH}{G}$ 。

2.3 三角瓦楞缓冲衬垫设计实例

已知某产品质量 $m=20$ kg,底面尺寸为 40 cm×50 cm,等效跌落高度 $h=50$ cm,产品脆值 $G=50g$,下面计算三角瓦楞缓冲衬垫的厚度,以满足产品脆值要求。瓦楞纸板性能参数见表 1。

表 1 瓦楞纸板性能参数

Tab.1 Corrugated board performance parameters g/m²

瓦楞类别	面纸(Q)	芯纸(Q_m)	里纸(Q)
B 型	175	135	175

选择边长 $a=40$ mm 的三角瓦楞缓冲衬垫,其对应的等效承载面积为:

$$A = 4\sqrt{3} \text{ cm}^2 \quad (2)$$

对应脆值的最大静应力为:

$$\sigma_m = \frac{Gmg}{4A} = 360.84 \text{ kPa} \quad (3)$$

根据凯里卡特公式及瓦楞纸板对应的性能参数,环压强度 P_x 为:

$$P_x = \sum rQ + \sum r_m Q_m = 25.865 \text{ N/cm} \quad (4)$$

三角瓦楞缓冲衬垫周长 $Z=3a=12$ cm,则:

$$P_c = 1.86P_x \left(\frac{aX_z}{Z/4} \right)^{\frac{2}{3}} = 551.842 \text{ N} \quad (5)$$

三角瓦楞缓冲衬垫最大承载压力为:

$$F = \frac{1}{4}mg = 50 \text{ N} \quad (6)$$

$P_c > W$,该边长三角瓦楞缓冲衬垫满足要求。边长为 40 mm 的三角瓦楞缓冲衬垫的缓冲系数-最大应力曲线,对应产品脆值的最大静应力的缓冲系数 $C=4.5$ 。

三角瓦楞缓冲衬垫对应等效厚度为:

$$t = \frac{CH}{G} = 4.5 \text{ cm} \quad (7)$$

边长为 4 cm,厚度为 4.5 cm 的三角瓦楞缓冲衬垫可满足对应产品脆值要求。

3 瓦楞衬垫缓冲性能测试试验及分析

为了验证采用文中方法所设计三角瓦楞缓冲衬垫的缓冲性能,以 2.3 节计算得到三角瓦楞缓冲衬垫

为测试试样,采用静态缓冲试验模型测试试样变形量,根据测试试验数据绘制所设计三角瓦楞缓冲衬垫的应力-应变曲线及缓冲系数-最大静应力曲线,以此分析验证三角瓦楞缓冲衬垫的缓冲性能。

3.1 瓦楞缓冲衬垫试样

测试试样是边长为 4 cm,厚度为 4.5 cm 的三角瓦楞缓冲衬垫,其具体配材性能见表 2,测试试样数量为 5,最终测试数据为所有试样平均值。试验参照 GB/T 4857.2—9《包装温湿度调节处理方法》,利用 HC-302K 型恒温恒湿箱进行处理,环境温度为 $(25\pm 2)^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 $(50\pm 2)\%$ 。

表 2 B 型瓦楞性能指标

Tab.2 B type corrugated performance index

纸板 环压指数/ ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{g}^{-1}$)	瓦楞原纸 环压指数/ ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{g}^{-1}$)	B 型 瓦楞展开 系数	B 型 瓦楞楞 常数	箱 常 数
5.5	3.5	1.4	5.0	0.68

3.2 缓冲性能测试原理及方法

试验原理:静态压缩试验以 GB 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》为依据,采用 WDW 3050 微机控制电子万能试验机及游标卡尺作为试验仪器及设备,以 12 mm/min 的速度进行准静态压缩试验,载荷加载方向为瓦楞纸板瓦楞方向。

试验方法:采用游标卡尺测量试样 4 个角的厚度,以平均值作为初始厚度。在瓦楞方向逐渐加载载荷,载荷到达设定数值时停止加载,测量压缩形变量。

3.3 缓冲试验数据分析

通过对测试试样进行静态压缩,测量压缩变形量,得到试样在不同载荷下压缩-形变数据,利用换算和曲线拟合,得到应力-应变曲线及缓冲系数-最大应力曲线。

3.3.1 应力-应变曲线

压缩应力和应变计算见式(8—9)。

$$\sigma = \frac{F}{A} \times 10^6 \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta t}{t} \quad (9)$$

式中: F 为静态压缩载荷; A 为试样承载面积; t 为试样初始厚度; Δt 为试样变形量。经过数据换算处理和曲线拟合,试样的应力-应变曲线见图 4。

3.3.2 缓冲系数-最大静应力曲线

根据应力-应变曲线,经数值积分求得变形能后可算出相应的缓冲系数,经过数据处理和曲线拟合,试样的缓冲系数-最大静应力曲线见图 5。

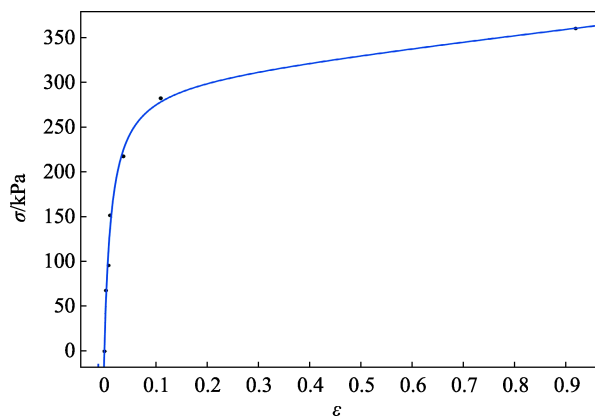


图 4 三角瓦楞缓冲衬垫应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curve of triangular corrugated cushioning insert

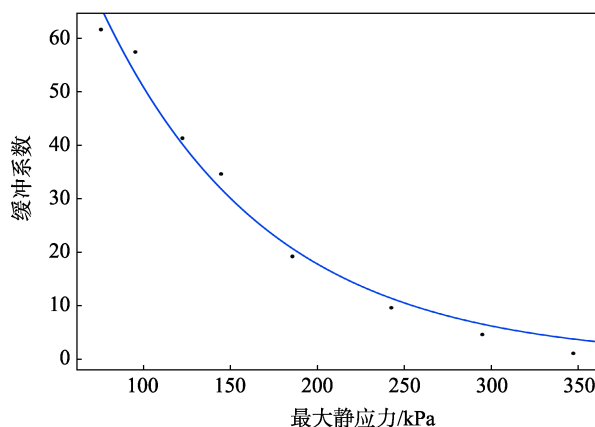


图 5 三角瓦楞缓冲衬垫缓冲系数-最大静应力曲线

Fig.5 Cushioning coefficient-maximum static stress curve of triangular corrugated cushioning insert

通过以上试验结果可知,文中所设计的三角瓦楞缓冲衬垫结构简单,充分利用了三角瓦楞结构的承载特性,其可承受的静态载荷较大,抗压能力和缓冲性能较好,基本满足缓冲性能的标准。此外,结合应力-应变曲线及缓冲系数-最大应力曲线进一步分析可知,当载荷较小时,三角瓦楞缓冲衬垫呈现弹性特性,试样的形变快速、稳定,且形变量小;当载荷继续增加到一定程度时,试样为塑性变形,试样变形稳定时间明显增加,且形变量表现为连续、缓慢增加;当载荷增大到应变 20% 左右时,三角瓦楞缓冲衬垫抗压强度达到应力极限,瓦楞缓冲衬垫被压溃,以致失去缓冲能力。

4 结语

对三角瓦楞缓冲衬垫结构设计及缓冲性能方法进行了研究,包括总体设计方案、应力-应变曲线的获取、缓冲衬垫边长、厚度的计算等,实现了三角瓦楞缓冲衬垫的设计,通过具体设计案例分析,验证了设计方法的可行性。文中所提出的方法,可指导实际应用中三角瓦楞衬垫结构的缓冲设计,提升了缓冲结构的设计效率,为合理设计瓦楞缓冲结构,提升瓦楞

缓冲结构的缓冲性能提供了数据和理论支撑。

参考文献:

- [1] 郑守斌, 田大钢. 快递包装中存在的问题及对策研究[J]. 物流科技, 2015, 38(1): 123—124.
ZHENG Shou-bin, TIAN Da-gang. Express Packing Problems and Countermeasures Research[J]. Logistics Sci-tech, 2015, 38(1): 123—124.
- [2] 胡志军. 绿色缓冲包装材料的现状及研究进展[J]. 浙江科技学院学报, 2009, 4(21): 327—331.
HU Zhi-jun. Research Progress and Status Quo of Green Cushion Packaging Materials[J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2009, 4(21): 327—331.
- [3] 刘冰, 于志彬, 陈志周. 基于蜂窝-瓦楞复合纸板的空调室外机缓冲包装设计[J]. 中国包装工业, 2015(15): 32—33.
LIU Bing, YU Zhi-bin, CHEN Zhi-zhou. Cushion Packaging Design for Outdoor Air Conditioning Unit Based on Honeycomb-corrugated Composite Board [J]. China Packaging Industry, 2015(15): 32—33.
- [4] 刘功, 刘占胜, 宋海燕. 瓦楞纸板缓冲包装结构的缓冲性能研究[J]. 中国包装, 2003(6): 61—62.
LIU Gong, LIU Zhan-sheng, SONG Hai-yan. The Research on the Cushion Performance of Corrugated Cardboard as Package Structure[J]. China Packaging, 2003(6): 61—62.
- [5] 韦伽. 包装用瓦楞纸板的性能研究及发展趋势[J]. 中国包装工业, 2012(19): 9—11.
WEI Jia. Research and Development Trend of Corrugated Board for Packaging[J]. China Packaging Industry, 2012(19): 9—11.
- [6] 鄂玉萍, 王志伟. 纸质缓冲材料能量吸收特性研究进展[J]. 振动与冲击, 2010, 29(5): 40—45.
E Yu-ping, WANG Zhi-wei. Advance in Study on Energy-absorbing Property of Paper Based Cushion Packing Materials[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(5): 40—45.
- [7] 徐长妍, 张云. 组合瓦楞纸板缓冲衬垫的力学性能研究[J]. 中国包装, 2010, 30(3): 71—74.
XU Chang-yan, ZHANG Yun. Research on Mechanical Properties of Combined Corrugated Board Cushion[J]. China Packaging, 2010, 30(3): 71—74.
- [8] 王行宁, 郭彦峰, 付云岗, 等. 纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构的静态缓冲性能研究[J]. 实验力学, 2019, 34(5): 853—863.
WANG Hang-ning, GUO Yan-feng, FU Yun-gang, et al. Research on the Static Buffering Performance of Paper Corrugated Honeycomb Sandwich Structure[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(5): 853—863.
- [9] 刘晔, 王振林, 杨小俊. 三重组合瓦楞纸板缓冲防护特性研究[J]. 中国包装, 2003(2): 56—58.
LIU Ye, WANG Zhen-lin, YANG Xiao-jun. Research on the Cushioning Protection Characteristics of Triple Combination Corrugated Board[J]. China Packaging, 2003(2): 56—58.
- [10] 徐长妍, 张云. 组合瓦楞纸板缓冲衬垫的力学性能研究[J]. 中国包装, 2010, 30(3): 71—74.
XU Chang-yan, ZHANG Yun. Research on Mechanical Properties of Combined Corrugated Board Cushion[J]. China Packaging, 2010, 30(3): 71—74.
- [11] SEK M, ROUILLARD V, TARASH H. Enhancement of Cushioning Performance with Paperboard Crumple Inserts[J]. Journal of Packaging Technology and Science, 2005, 5(18): 273—278.
- [12] SEK M, ROUILLARD V. Behavior of Multi-layered Corrugated Paperboard Cushioning Systems under Impact Loads[J]. Applied Mechanics and Materials, 2005, 3(4): 383—388.
- [13] 史奥, 钱怡. EPS-BC 瓦楞串联缓冲包装结构试验研究[J]. 包装与食品机械, 2017, 35(3): 21—24.
SHI Ao, QIAN Yi. Experimental Study on EPS and BC-flute Corrugated Combination[J]. Packaging and Food Machinery, 2017, 35(3): 21—24.
- [14] 郭彦峰, 付云岗, 马宴苹. 折叠型双瓦楞纸板衬垫动态缓冲特性的试验研究[J]. 包装工程, 2008, 29(2): 1—3.
GUO Yan-feng, FU Yun-gang, MA Yan-ping. Experimental Research on Dynamic Cushioning Property of Folded-type Double-wall Corrugated Paperboard Cushion[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2): 1—3.
- [15] 王冬梅. 瓦楞复合材料静态压缩吸能性能研究[J]. 包装工程, 2007, 28(12): 71—73.
WANG Dong-mei. Static Compression and Energy Absorption Properties of Corrugated Composites [J]. Packaging Engineering, 2007, 28(12): 71—73.
- [16] 王冬梅, 王志伟. 纸质结构型包装材料缓冲性能研究进展[J]. 材料导报, 2007(6): 43—46.
WANG Dong-mei, WANG Zhi-wei. Research Advance in Paper Structure Cushioning Packaging Materials[J]. Materials Reports, 2007(6): 43—46.
- [17] 王小芳, 李昭, 孙建明, 等. 三角形支撑型四角固支瓦楞缓冲结构设计[J]. 包装与食品机械, 2018, 36(4): 31—35.
WANG Xiao-fang, LI Zhao, SUN Jian-ming, et al. Design of Triangle-supported Four-corner Fixed Corrugation Cushion Structure[J]. Packaging and Food Machinery, 2018, 36(4): 31—35.
- [18] 王小芳, 孙建明, 李昭, 等. 用于四角固支的三角形瓦楞衬垫静态缓冲特性分析[J]. 物流科技, 2018, 41(5): 54—58.
WANG Xiao-fang, SUN Jian-ming, LI Zhao. Static Cushioning Performance Analysis of Triangle Inserts Based on Four-corner Fixed Corrugation[J]. Logistics Sci-tech, 2018, 41(5): 54—58.
- [19] 王小芳, 李昭, 孙建明, 等. 用于四角固支的三角形瓦楞衬垫动态缓冲特性分析[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(36): 56—59.
WANG Xiao-fang, LI Zhao, SUN Jian-ming, et al. Dynamic Cushioning Performance Analysis of Triangle Inserts Based on Four-corner Fixed Corrugation[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(36): 56—59.
- [20] 张涛, 张新昌. 瓦楞纸板弯曲问题的基本方程[J]. 包装工程, 2007(4): 76—78.
ZHANG Tao, ZHANG Xin-chang. Basic Equation of the Bending of Corrugated Board[J]. Packaging Engineering, 2007(4): 76—78.