

蜂窝集装箱地板结构优化设计及强度校核

刘旺玉¹, 赖基平¹, 龚洋¹, 金菁²

(1. 华南理工大学, 广州 510641; 2. 中国国际海运集装箱(集团)股份有限公司, 深圳 518067)

摘要:研究了蜂窝地板在弯曲载荷作用下的失效形式,并基于失效因子建立了优化模型。根据地板结构的优化设计准则,以地板的高抗弯刚度、高强度要求、高固有频率和小质量为目标函数,以稳定性、屈曲极值、剪切强度和刚度为约束条件,构造了评价函数,得出了最优尺寸以及对应的力学性能参数。最后利用强度计算公式对该设计进行了校核,计算结果表明,优化后的蜂窝集装箱地板能满足使用要求。

关键词:蜂窝集装箱地板;优化设计;评价函数;强度

中图分类号: TB482.2; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)11-0046-05

Structural Optimization Design and Strength Check of Honeycomb Container Flooring

LIU Wang-yu¹, LAI Ji-ping¹, GONG Yang¹, JIN Jing²

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. China International Marine Containers (Group) Co., Ltd, Shenzhen 518067, China)

Abstract: Main failure modes of honeycomb flooring undergoing bending load were studied and an optimization model based on failure factors was set up. According to the optimization design criterion of the flooring structure, the evaluation function based on four objective functions was constructed, which were high flexural rigidity, high strength requirement, high inherent frequency, and low mass of the flooring, with four constraint conditions, which were stability, buckling extreme, shear strength, and stiffness. The optimal value of dimensional parameters was obtained and the parameters of mechanical property were calculated through them. Strength calculation formula was utilized to check the strength of the structure. The computational results showed that the optimized honeycomb container flooring meets the application demand.

Key words: honeycomb container flooring; optimization design; evaluation function; strength

集装箱地板是集装箱的重要组成部分和主要承载配件。传统地板通常为 28 mm 厚的 19 层胶合板,主要采用印尼、马来西亚等地产的大花龙脑香,如阿必通、克隆等热带硬阔叶树材制造^[1]。然而随着硬木资源的逐年锐减以及地板生产工艺的落后,集装箱地板产业的发展已经受到严重制约。随着现代运输业的发展,我国已成为集装箱地板第一生产大国。但生产集装箱地板的大部分原材料来源于进口,其中大部分为不合格的非法进口原木,因此对集装箱地板可替代材料以及结构优化的研究迫在眉睫。鲍逸培和文家骅^[2]研究开发了年产 2 万立方米竹木复合集装箱

底板的生产工艺及设备,为胶合板厂家利用过剩设备能力探索一条出路;林利民和曹胜利^[3]以桦木和落叶松混合材为原料,根据其材性特点对底板的结构设计、生产工艺技术进行了初步研究和探讨;黄荣文、吴永梅和鹿杉^[4]提出了采用杨木复合材料作为集装箱底板的结构设计,并对其组坯、热压等工艺进行了研究,通过成本及性能对比,证明其结构的可行性;杨小俊和兰青山^[5]介绍了纸蜂窝夹芯结构复合板的优良性能,指出这种新型复合板材符合低碳时代的消费理念,具有广阔的应用前景。以上的研究更多的是针对集装箱地板的制造原料进行了大量的探索,并没有进

收稿日期: 2013-04-08

基金项目: 广东省教育部产学研结合项目(2012B091100406)

作者简介: 刘旺玉(1966-),女,湖北人,博士,华南理工大学教授、博士生导师,主要从事材料与结构一体化设计与拓扑优化研究。

行定量的研究,更没有涉及到对地板的结构进行优化设计。因此,文中提出了从蜂窝夹层结构入手,采用铝合金作为面层材料,增强铝蜂窝芯作为中间层,使用胶粘剂将蜂窝芯与面板粘结、定型、固化,制造出高性能轻质的铝蜂窝地板代替传统的硬木胶合板;在这个基础上,文中还对新型的蜂窝集装箱地板进行了结构上的优化,使得蜂窝地板具有更大的强度和刚度,扩大了它的使用范围,同时所做的优化工作能够最大限度地减轻集装箱地板质量,降低了运输能耗,提高原材料的利用率。

1 蜂窝集装箱地板优化模型的建立

1.1 结构设计基准

蜂窝夹层结构的常见失效模式及原因^[6],见表1。

表1 蜂窝板的失效模式及原因

Tab.1 Failure modes and causes of honeycomb panel

失效模式	原因
总体失稳	蜂窝板剪切刚度低或面板的厚度较小,导致蜂窝板弯曲刚度不够
面板破裂	整个板的厚度不够,面板厚度不够或强度不够
剪切皱损	因蜂窝芯横向剪切模量较低或胶粘剂的剪切强度不足引起,剪切皱损指在外观上为局部失稳,实质是蜂窝夹层结构整体失稳的特殊表现形式,会引起面板与芯子之间脱胶或芯子剪切破坏
蜂窝横向剪切破坏	蜂窝剪切强度不够,或整个板厚度不够
蜂窝局部压损	蜂窝压缩强度太小

基于上述结构的特点,蜂窝夹层板的设计需要满足多种不同的强度、刚度和局部屈曲的需要:(1)面板的设计应具有足够厚度、剪切强度和抗弯刚度,使得夹层板在设计应力下不发生皱曲、格间屈曲、剪切皱折等破坏;(2)蜂窝芯边长设计应足够小,使得面板不会出现孔间屈曲,且蜂窝芯需具有足够的压缩强度,以避免蜂窝局部压损;(3)蜂窝板必须满足集装箱地板力学性能和减振性能的要求,且质量较轻。

1.2 设计变量的选取

在最优化理论中,选取设计变量的原则是:尽量减少设计变量的数目,以简化优化设计问题,且各个设计变量应当相互独立。

针对上述设计原则,选取上、下面板的厚度(假定两者相同) h_f 、蜂窝芯层高度 h_c 、蜂窝格边长 l 和壁厚 t 作为蜂窝夹层结构设计的4个变量。其具体尺寸见图1,图1a为蜂窝板的整体结构,其长和宽分别为 a

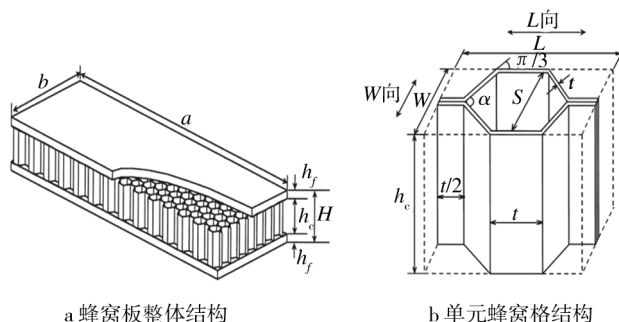


图1 蜂窝夹层板结构尺寸示意

Fig.1 Diagram of honeycomb sandwich panel structural dimension

和 b 。为了统一,这里规定沿着尺寸 a 的方向为纵向,记为 L 向,而沿着尺寸 b 的方向定义为横向,记为 W 向。图1b为单元蜂窝格结构,对边的距离为 S ,其中 $S = \sqrt{3}l$ 。

1.3 目标函数的确定

该目标函数是根据蜂窝板的弯曲性能、蜂窝芯的强度要求(压缩强度和剪切强度)、夹层板的固有频率和质量这5个方面来建立的。

1) 两块面板被蜂窝夹层分隔,这使得蜂窝夹层结构的截面惯性矩变大,从而提高了结构的抗弯刚度,这是蜂窝夹层结构的主要特征。其计算公式为^[7]:

$$f_1(X) = (EI)_{eq} = \frac{E_f b h_f^3}{6} + \frac{E_f b h_f (h_f + h_c)^2}{2} \quad (1)$$

式中: E_f 为面板的弹性模量; b 为蜂窝板的宽; h_f 为面层的高度; h_c 为芯层的高度。

2) 蜂窝夹层常见的破坏形式是蜂窝夹层在压缩破坏前就发生了蜂窝格壁板的失稳,使得蜂窝芯丧失了承载的能力。依据弹性屈曲理论^[8],蜂窝芯临界压缩强度为:

$$f_2(X) = \sigma_{cc} = \frac{8\sqrt{3}}{9} \frac{t}{l} \sigma_{sr} = \frac{2\sqrt{3} K \pi^2 E_s}{27(1-\mu_s^2)} \left(\frac{t}{l} \right)^3 \quad (2)$$

式中: $K = \left(\frac{m}{\phi} + \frac{\phi}{m} \right)^2$ 为四边简支板的临界应力系数; $\phi = \frac{a}{b}$ 为蜂窝板的长宽比; E_s 为蜂窝格壁板材料的弹性模量; μ_s 为蜂窝格壁板材料的泊松比。

3) 实际的单元蜂窝格,其单格壁是由双格壁、面板弹性支持的。根据弹性支持压杆,蜂窝芯纵向临界剪切强度为^[9]:

$$f_3(X) = \tau'_{\text{czz}} \approx 0.5774(\tau_{\text{sr}} + \tau_{\text{op}}) \left(\frac{t}{l} \right) \quad (3)$$

式中: τ_{sr} 为蜂窝格壁临界剪应力;对于铝蜂窝芯来说,单格壁以剪切强度计算式中 τ_{sr} 计算,双格壁以 τ_{op} 计算。

4) 在四边简支下,蜂窝板固有频率为^[10]:

$$f_4(X) = f = \frac{\tilde{\omega}}{2\pi} = \frac{\pi}{2b^2} \cdot \sqrt{\frac{D}{\rho} \left[k_{\omega} \frac{(m^2\beta^2 + n^2)^2}{1 + \delta_b(m^2\beta^2 + n^2)} + k_f(m^2\beta^2 + n^2)^2 \right]} \quad (4)$$

式中: $\delta_b = \frac{\pi^2 D}{b^2 C}$, $\beta = \frac{b}{a}$, $k_f = \frac{2D_f}{D}$, $D = \frac{E_t(H-h_f)^2 h_f}{2(1-\mu_f^2)} + \frac{2E_t h_f^3}{12(1-\mu_f^2)}$, $\rho = h_c \rho_c + 2h_f \rho_f$ 。

5) 根据质量等效原则,蜂窝板的质量=面板质量+辅助剂质量+芯材质量,蜂窝板质量^[11]:

$$f_5(X) = m = m_f + m_c = ab\rho_{\text{eq}}(2h_f + h_c) = ab \left(2\rho_f h_f + \frac{8\rho_s t}{3\sqrt{3}l} \right) \quad (5)$$

式中, ρ_f 为面层材料的密度; ρ_s 为芯层原材料的密度; a 为蜂窝板长; b 为蜂窝板宽。

1.4 约束条件的确定

约束条件是依据集装箱地板性能及蜂窝板工艺要求得出,各约束条件相互独立且各具代表性。

1) 稳定性约束:为获得较大的弯曲刚度和提高结构稳定性,芯层的厚度应大于面板厚度^[12],即: $l \leq \frac{25\sqrt{3}}{3} h_{f0}$

2) 屈曲极值约束:在实际工程中,为防止面板发生孔间屈曲,要求正六边形蜂窝格的内径 $S \leq 25 \cdot h_f^{[13]}$,即 $l \leq \frac{25\sqrt{3}}{3} h_{f0}$

3) 剪切强度校核约束:根据强度校核准则,纵向剪切强度要满足剪切强度校核条件^[14],即: $\tau_{\text{czz}} = \frac{T_{\text{zx}}}{\sqrt{3}l \cdot \frac{3}{2}l} = \frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{t}{l} \tau_{\text{sb}} \leq \tau_{\text{sb}}$,得出 $t \leq \frac{\sqrt{3}}{2} l$ 。

4) 地板刚度约束。工程上,受弯曲板件的结构需要进行变形核算,即:

$$\omega = \left\{ \frac{1}{D} \int \left[\int M(x) dx \right] dx + c_1 x + c_2 \right\} \cdot \gamma \leq [\omega] \quad (6)$$

式中: D 为地板的等效弯曲刚度; $M(x)$ 为截面上的弯矩; c_1, c_2 为边界条件确定的积分常数; $[\omega]$ 为模板变形的允许值,对结构表面外露的模板, $[\omega]$ 为模板构件计算跨度的 $1/400$,对结构表面隐蔽的模板, $[\omega]$ 为模板构件计算跨度的 $1/250$ ^[15]。

根据集装箱地板 ISO 1496—1 要求,胶合板进行三点弯曲实验,见图2。

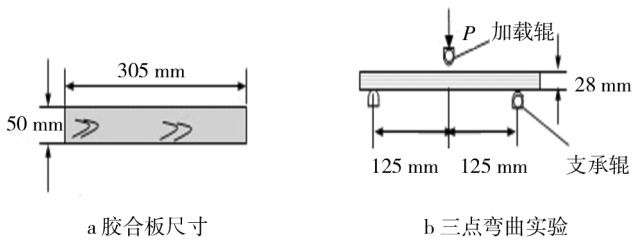


图2 胶合板尺寸和弯曲实验示意

Fig. 2 Diagram of plywood size and bending experiment

标准承载力 $P \geq 6900 \text{ N}$,由材料力学知识可知,简支受集中力 P 作用时挠度计算公式:

$$\delta = \frac{PL^3}{48D} \cdot \gamma = \frac{6900 \times 0.25^3}{48D} \times 1.2 \quad (7)$$

变形校核得:

$$\delta \leq [\omega] = \frac{305}{400} \text{ mm} \quad (8)$$

转化为刚度条件:

$$D \geq 3.5348 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \quad (9)$$

1.5 评价函数的构造

基于力学性能对上述5个目标函数进行分析,蜂窝夹层板抗弯刚度、蜂窝芯平面临界压缩强度与纵向临界剪切强度、固有频率这4个函数,希望其值越大越好,而仅有蜂窝板的质量希望其越小越好。蜂窝板的单一目标函数可以表示为:

$$V - \min_{x \in R^n} F(X) = \min_{x \in R^n} \prod_{j=1}^s \hat{f}_j(X) = \min_{x \in R^n} \frac{f_5(X)}{f_1(X)f_2(X)f_3(X)f_4(X)} \quad (10)$$

2 优化结果

依据经验及工艺需求,对4个设计变量进行上、下限约束,从而减少程序的运算量。设计变量的取值

范围见表 2。基于集装箱行业 ISO 1496—1 地板试验

表 2 设计变量取值范围

Tab.2 Value range of design variables

项目	面层高度 h_f / m	芯层高度 h_c / m	单元边长 l / m	蜂格壁厚 t / m
最小值	0.75×10^{-3}	5×10^{-3}	3×10^{-3}	0.01×10^{-3}
最大值	8×10^{-3}	26×10^{-3}	6×10^{-3}	0.70×10^{-3}

标准,选用三点弯曲试验板尺寸 305 mm×50 mm 在四边简支条件下对蜂窝板进行结构优化。面层选用铝和玻璃钢,蜂窝板尺寸和面层材料的性能参数见表 3。蜂窝芯主要选用 LF-2 防锈铝,其材料的性能见表 4。

表 3 结构和性能参数

Tab.3 Structure and property parameters

面层材料	ρ_f /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	E_f / GPa	σ_f / MPa	μ_f	a / m	b / m
铝	2700	69	295	0.3	0.305	0.050
玻璃钢	1850	20.9	170	0.33	0.305	0.050

表 4 LF-2 铝合金材料性能

Tab.4 Property of LF-2 aluminium alloy

参数	E_s / GPa	G_s / GPa	σ_b / MPa	τ_b / MPa	τ_{op} / MPa	ρ_s /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	μ_s
值	68.6	26.4	245	196	147	2680	0.3

在四边简支的条件下,各阶固有频率成比例变化,取一阶固有频率进行优化分析,则模数 $m=1, n=1$; 由于 $\phi = \frac{a}{b} = 6.1$, 而且系数 m 取为 1, 则临界压缩应力系数 $K=4$ 。从而得出面板材料分别为铝和玻璃钢,芯层材料为 LF-2 铝合金的蜂窝板,设计变量的最优值见表 5,对应的力学性能的计算值见表 6。

表 5 设计变量最优值

Tab.5 Optimal value of design variables

面板材料	面层高度 h_f / m	芯层高度 h_c / m	单元边长 l / m	蜂格壁厚 t / m
铝	5.16×10^{-3}	16.837×10^{-3}	4.423×10^{-3}	0.255×10^{-3}
玻璃钢	11.296×10^{-3}	14.830×10^{-3}	4.131×10^{-3}	0.439×10^{-3}

表 6 力学性能最优值

Tab.6 Optimal value of mechanical properties

面板材料	M /($\text{N} \cdot \text{m}$)	$(EI)_{eq}$ /($\text{N} \cdot \text{m}$)	σ_{cc} / MPa	τ'_{cz} / MPa	f / kHz	m / kg
铝	1281.5	4385.9	73.17	4.894	9.955	0.4860
玻璃钢	1423.9	4279.7	458.24	9.020	14.256	0.7524

玻璃钢优化的力学性能略优于铝,但是其所用材料更多,成本有待计算比较,见表 6。

传统集装箱地板的尺寸见图 3,地板总厚度为 28

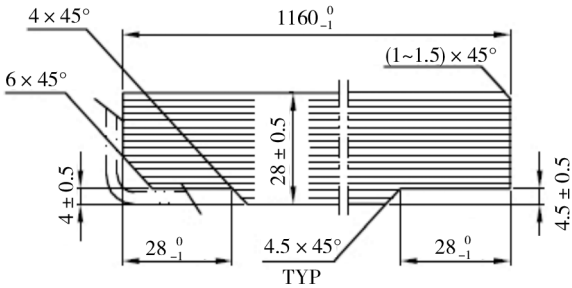


图 3 集装箱地板截面尺寸

Fig.3 Section sizes of container flooring

mm,而玻璃钢蜂窝夹层结构的总厚度接近 37 mm,远大于传统集装箱地板的厚度,玻璃钢集装箱地板不能满足装配要求,所以选择铝作为面层材料。根据工艺要求,对设计的尺寸作处理,得出完整的蜂窝集装箱地板的参数为:地板规格 305 mm×50 mm×28 mm,受到集中载荷 $P=6900 \text{ N}$,支点跨距 $L=250 \text{ mm}$,面板的高度 $h_f=5.5 \text{ mm}$ 。面板弯曲模量 $E_f=69 \text{ GPa}$,弯曲强度 $\sigma_f=295 \text{ MPa}$,密度 $\rho_f=2700 \text{ kg/m}^3$;芯材为 LF-2 铝合金六边形蜂窝,芯层高度取 $h_c=17 \text{ mm}$,蜂窝格尺 $l \times t=4.5 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$,平压模量 $E_c=6.09 \text{ GPa}$,剪切模量 $G_c=1.05 \text{ GPa}$,密度 $\rho_c=237.95 \text{ kg/m}^3$ 。

3 蜂窝集装箱地板结构强度校核

对上节优化后的铝蜂窝集装箱地板进行强度校核:

1) 面板弯曲应力^[16]: $\sigma_{f \max} = \frac{PL}{4h_f b h_0} = 56.006 \text{ MPa} < 295 \text{ MPa}$,满足设计要求。

2) 蜂窝芯的剪切应力^[17]: $\tau_{c \max} = \frac{P}{2bh} = 2.46 \text{ MPa} < 4.894 \text{ MPa}$,满足设计要求。

3) 地板挠度校核: $\delta = \frac{PL^3}{48D} \cdot \gamma = 0.5612 \text{ mm} < 0.625 \text{ mm}$,满足要求。

4) 核算面板是否屈曲^[18]:受压面板的起皱临界应力: $\sigma_{fb}^- = 3806 \text{ MPa} > 56.006 \text{ MPa}$,面板不会皱折屈曲。

5) 核算面板是否凹陷^[18]:受压面板的凹陷临界应力: $\sigma_{fb}^- = \frac{2}{3} E_f \left(\frac{h_f}{l} \right)^2 = 68.716 \text{ GPa} > 56.006 \text{ MPa}$,面

板不会发生凹陷。

4 结论

在选定的地板模型上提取了4个设计变量,依据经验以及工艺需求,对4个设计变量进行了上、下限的约束,并对蜂窝集装箱地板的各个方面进行了衡量,以此设计了5个目标函数来对蜂窝集装箱地板的结构进行优化。在稳定性条件、屈曲极值条件、剪切强度条件和地板刚度条件的约束下,构造了一个单一的评价函数。通过该评价函数计算可以得到最优的尺寸参数值以及对应的力学性能参数值,并对该结构进行强度校核,结果表明优化出来的蜂窝集装箱地板能满足使用要求。如果能够解决实际加工过程中的制造工艺问题以及不同材料之间的粘合问题,那么提出优化的蜂窝集装箱地板将具有非常广阔的市场前景,有望在集装箱地板行业进行产业化。

参考文献:

- [1] 张双燕,费本华,陶仁中.我国集装箱底板的开发及应用现状[J].木材工业,2011,25(1):26-29.
ZHANG Shuang-yan, FEI Ben-hua, TAO Ren-zhong. Container Flooring Manufacturing and Development in China [J]. China Wood Industry, 2011, 25(1): 26-29.
- [2] 鲍逸培,文家孺.竹木复合集装箱底板开发与研究[J].建筑人造板,1997(3):13-16.
BAO Yi-pei, WEN Jia-ru. Development and Research of Bamboo-wood Composite Container Flooring [J]. Building Artificial Boards, 1997(3): 13-16.
- [3] 林利民,曹胜利.用桦木和落叶松混合材制造集装箱底板的初步试验研究[J].林业科技,1999,24(6):36-39.
LIN Li-min, CAO Sheng-li. Preliminary Experimental Study of Birch and Larch Mixed Material Manufacturing Container Flooring [J]. Forestry Science & Technology, 1999, 24(6): 36-39.
- [4] 黄荣文,吴永梅,鹿杉.杨木复合集装箱底板结构研究[J].林业机械与土木设备,2010,38(3):21-23.
HUANG Rong-wen, WU Yong-mei, LU Shan. Structure Study on Aspen Composite Construction for Container Flooring [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2010, 38(3): 21-23.
- [5] 杨小俊,兰青山.新型纸蜂窝夹芯结构复合板及其应用前景[J].包装工程,2010,31(19):121-123.
YANG Xiao-jun, LAN Qing-shan. New Structure of Paper Honeycomb Filled Board and Its Application Prospect [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19): 121-123.
- [6] ZHOU H B, LI G Y. Free Vibration Analysis of Sandwich Plates with Laminated Faces Using Spline Finite Point Method [J]. Composite Structure, 1996, 59: 257-263.
- [7] 徐朝阳,李大纲.木质蜂窝夹芯包装材料抗弯性能研究[J].包装工程,2007,28(8):16-18.
XU Chao-yang, LI Da-gang. Bending Properties of the Packaging Material of Sandwich Construction with Wood Facings and Paper Honeycomb Core [J]. Packaging Engineering, 2007, 28(8): 16-18.
- [8] 陈骥.钢结构稳定理论与应用[M].北京:科学技术文献出版社,1994.
CHEN Ji. Theory and Application of Steel Structure Stability [M]. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 1994.
- [9] 周祝林.蜂窝芯子剪切强度研究[J].纤维复合材料,1998,3(13):13-17.
ZHOU Zhu-lin. Study on Shear Strength of Honeycomb Core [J]. Fiber Composites, 1998, 3(13): 13-17.
- [10] RAO M K, DESAI Y M. Analytical Solutions for Vibrations of Laminated and Sandwich Plates Using Mixed Theory [J]. Composite Structure, 2004, 63: 361-373.
- [11] 胡金萍.蜂窝夹芯板动态力学行为研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
HU Jin-ping. Study on Dynamic Properties of Honeycomb Sandwich Panels [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [12] 何美凤.钢质蜂窝夹芯减振板的结构设计及开发[D].北京:北京科技大学,2005.
HE Mei-feng. Structural Design and Development of Steel Honeycomb Sandwich Vibration Damping Panels [D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2005.
- [13] 尹祥址.蜂窝夹层材料的设计和工艺[M].北京:国防科技大学出版社,1982.
YIN Xiang-zhi. Design and Technology of Honeycomb Sandwich Materials [M]. Beijing: National University of Defense Technology Press, 1982.
- [14] 范秋习.蜂窝夹层复合材料[J].北京轻工业学院学报,1998,16(2):78-81.
FAN Qiu-xi. Honeycomb Sandwich Composite [J]. Journal of Beijing Institute of Light Industry, 1998, 16(2): 78-81.
- [15] 谢遵渊.建筑施工[M].第3版.北京:中国建筑工业出版社,1998.
XIE Zun-yuan. Building Construction (third edition) [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1998.

- [3] THIJSE B J. Freestyle Data Fitting and Global Temperatures[J]. Computing in Science & Engineering, 2008, 10(1):49-59.
- [4] JIN Yi-su, YUE Hong, BROWN Martin, et al. Improving Data Fitting of A Signal Transduction Model by Global Sensitivity Analysis[C]. New York: American Control Conference, 2007:2708-2713.
- [5] PENNA M A, DINES K A. A Simple Method for Fitting Sphere-like Surfaces[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(9):1673-1678.
- [6] SONG Rui-yin, LI Wei, YANG Can-jun, et al. Data Fitting and Analysis of Performance for Micro-thermoelectric Generator[C]. Guangzhou: IEEE International Conference on Control and Automation, 2007:198-202.
- [7] 于惠, 刘真. 基于 LSM 分段拟合技术的喷墨输出反馈控制研究[J]. 包装工程, 2011, 32(17):98-101.
- YU Hui, LIU Zhen. Study of the Inkjet Output's Feedback Control Based on the LSM Piece Wise Curve-fitting Technology[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(17):98-101.
- [8] 孔玲君, 刘真, 姜中敏. 基于 CCD 的数字印刷质量检测与分析技术[J]. 包装工程, 2010, 31(3):92-95.
- KONG Ling-jun, LIU Zhen, JIANG Zhong-min. CCD based Digital Print Quality Measurement and Analysis Techniques[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(3):92-95.
- [9] 刘明. 普通最小二乘法的几何分析[J]. 统计与决策, 2008, 32(2):21-23.
- LIU Ming. Geometric Analysis of Ordinary Least Squares[J]. Statistics and Decision, 2008, 32(2):21-23.
- [10] 贾永峰, 谷立臣. 基于数据拟合的机械参数模型研究[J]. 起重运输机械, 2009:59-61.
- JIA Yong-feng, GU Li-chen. The Mechanical Parameter Model Based on Data Fitting[J]. Lifting the Transport Machinery, 2009:59-61.

(上接第 45 页)

塑瓦楞复合纸板的戳穿口呈现先拉伸后裂开的现象。这就说明钙塑瓦楞复合纸板在戳穿实验过程中先进行力的缓冲然后开裂, 所以钙塑瓦楞复合纸板的戳穿强度要高于 5 层瓦楞纸板的戳穿强度。

4 结语

通过试验可以得出, 钙塑瓦楞复合纸板的各项力学性能均优于 5 层瓦楞纸板。从经济性能考虑, 钙塑复合瓦楞纸板在一定范围内强度高、定量低, 包装空间小, 而且由于单张纸板壁厚降低, 使纸箱本身的体积也减小, 变相地扩大了单位体积仓储量, 节省了一定的仓储运输费用。同时可以在提高纸箱强度基础上降低纸箱成本, 与 5 层瓦楞纸板相比, 节约了一层面纸, 可节省一定的资源^[5]。对钙塑瓦楞复合纸板的

研究, 对钙塑瓦楞复合纸板在包装行业的推广应用有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 熊慧文, 孙剑. 钙塑瓦楞板及其生产方法[P]. CN 102700213A, 2012-6-7.
- [2] 扈响亮, 吕广志. 双层钙塑瓦楞板及其制造方法和双层钙塑瓦楞板热粘合机: CN 1030381A[P]. 1989-01-18.
- [3] 颜荣森, 袁良. 钙塑瓦楞板周转箱: CN 2344300Y[P]. 1999-10-20.
- [4] WANG Zhao-xia, GAO De, XU Wen-cai. Effect of Coupling on the Mechanical Properties of calcium Carbonate-Plastic Composite Packaging Materials[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 200:321-324.
- [5] 张志刚. 4 层复合瓦楞纸板及其成型机械的效益空间[J]. 包装工程, 2004, 25(1):156-157.

(上接第 50 页)

- [16] 翁祖棋, 陈博, 张长发. 中国玻璃钢工业大全[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.
- WENG Zu-qi, CHEN Bo, ZHANG Chang-fa. Complete Works of Chinese Glass Fiber Industry[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1992.
- [17] 谢莉. 新型玻璃钢蜂窝夹层结构模板研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2004.

- XIE Li. Study on a New Type of GFRP Sandwich Formwork[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2004.
- [18] 姜作义, 张和善. 纤维-树脂复合材料技术与应用[M]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
- JIANG Zuo-yi, ZHANG He-shan. Fiber-Resin Composite Technology and Application[M]. Beijing: China Standard Press, 1990.