·包装与印刷工艺·

# 基于碳足迹分析的手提电脑缓冲包装方案比较

史晓娟，王文生，王晓敏，王 迪
（大连工业大学，大连 116034）

**摘要：** 指出了碳足迹分析在包装行业中应用的意义，分别选用 EPE、瓦楞纸板和纸浆模塑作为缓冲包装材料，对手提电脑进行了缓冲包装设计，在保证缓冲作用的前提下，计算了分别生产一套上述 3 种材料的缓冲包装所产生的碳足迹，为手提电脑生产企业选择低碳环保型包装提供数据参考。

**关键词：** 碳足迹；缓冲包装；EPE；瓦楞纸板；纸浆模塑
**中图分类号：** TB485.1；TB488 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3563(2012)19-0104-04

## Cushioning Package Design of Portable Computer Based on Carbon Footprint

*SHI Xiao-juan*, *WANG Wen-sheng*, *WANG Xiao-min*, *WANG Di*
(Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

**Abstract:** The significance of carbon footprint in packaging application was put forward. EPE, corrugated cardboard and molded pulp were selected as package material and cushioning package was designed for portable computer. Under the precondition of good cushioning effect, the carbon footprint of cushioning package produced by the three kinds of material was calculated. The purpose was to provide reference for portable computer production enterprises in selection of low carbon and environmental protection packaging material.

**Key words:** carbon footprint; cushioning package; EPE; corrugated cardboard; molded pulp

碳足迹越多，对环境的影响越大[1]，产品的碳足迹评估必将成为“绿色产业”的重要衡量标准，企业以此明确社会责任，提高声誉，优化生产流程，降低成本，更能为碳关税、碳贸易提供基础信息。包装作为产品的附加物，更应减少对环境的影响，不能“过碳包装”。通过碳足迹分析选择最优包装方案，减少碳的排放量，对发展“绿色环保包装”具有重要意义[2]。

笔者对某型号手提电脑的主机采用 EPE、瓦楞纸板、纸浆模塑 3 种材料进行了缓冲包装设计，比较了这 3 种缓冲包装生产过程中产生的碳足迹。

## 1 产品的参数和流通环境

产品（手提电脑）要经过从生产工厂为起点，消费者为终点的流通过程。一般包括运输、中转、装卸、仓储、陈列、销售等环节，缓冲包装的目的是在流通过程中减少产品的冲击、振动等外力作用，保护产品的形态和性能。缓冲包装设计需要考虑的因素有产品的形状、尺寸、质量、许用脆值、跌落高度等因素。

### 1.1 产品的基本参数

产品尺寸为 334 mm×237 mm×39 mm；产品质量为 2.54 kg。

### 1.2 产品脆值的确定

先进的工业化国家多年来已对多种产品的脆值进行过大量的试验测定，制定出若干参考标准作为缓冲包装设计的参考依据。采用类比法，参考美国电子产品常用数据[3]，取产品脆值 $G=50\ g$。手提电脑的硬盘是在流通中最易损坏的部件，应重点保护。

### 1.3 跌落高度的确定

根据《自由跌落试验测试规范》关于跌落高度选择的规定和产品质量，取跌落高度 $H=60$ cm。

**收稿日期：** 2012-06-08
**作者简介：** 史晓娟（1983－），女，蒙古族，辽宁人，硕士，大连工业大学助理实验师，主要研究方向为印刷包装材料。
**通讯作者：** 王晓敏（1959－），女，辽宁人，大连工业大学教授，主要从事印刷包装工程的教学与研究。

## 2　缓冲包装设计方案

### 2.1　EPE 缓冲包装设计方案

综合考虑环保性能、缓冲性能及碳足迹分析价值，选取密度为 0.035 g/cm³ 的 EPE 作为缓冲包装材料之一。采用局部缓冲包装法，对手提电脑的 2 条侧棱进行保护。

#### 2.1.1　缓冲衬垫厚度的确定

根据跌落高度 $H=60$ cm，选择 EPE 相应的 $G_m \sim \sigma_s$ 曲线，见图 1[3]。过脆值 $G=50$ g 作一条水平直

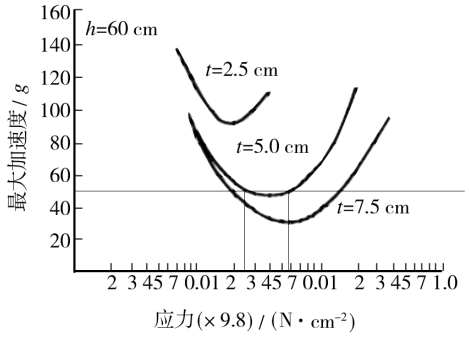


图 1　EPE 最大加速度-静应力曲线

Fig. 1 Curve of EPE $G_m$-$\sigma_s$

线与曲线相交，2 个交点之间的每一点对应的加速度值均小于脆值，在设计中均可用。为节省材料，选择厚度较小的曲线作为设计依据，因此缓冲衬垫的厚度 $t=5$ cm。为避免缓冲材料在长时间静压力作用下发生蠕变，使缓冲能力下降，设计衬垫尺寸时应加一个蠕变补偿值，依据蠕变校核公式 $T_c=T(T+C_r)$，计算校正后缓冲衬垫厚度为 5.5 cm（蠕变系数 $C_r$ 这里取 10%）。

#### 2.1.2　缓冲面积的确定

从上述交点向应力轴作垂线，得出应力值，考虑到手提电脑结构精密、价格高，取缓冲性能最好的最低点对应的 $\sigma_s=0.04\times9.8$ N/cm²，依据缓冲包装设计常用公式 $A=W/\sigma_s$，计算缓冲面积为 62.23 cm²。为避免挠弯，衬垫的最小缓冲面积 $A_{min}$ 与厚度之比应符合以下规定：$A_{min}/(1.33T)^2>1$，经计算，本设计符合要求，为方便后续设计，缓冲面积取整数 64 cm²。

根据局部缓冲包装设计原理，将计算面积考虑为手提电脑 4 个角的缓冲面积，则一个角的缓冲面积为 16 cm²，由手提电脑尺寸得开槽宽度 4 cm，则深度不小于 4 cm，侧面和底面缓冲效果均可达要求。手提电脑的硬盘是最易损坏的部件，位于电脑底部，EPE 缓冲衬垫在手提电脑底部的厚度为 5.5 cm，其他部分的厚度可适当减少。EPE 缓冲衬垫立体效果见图 2。

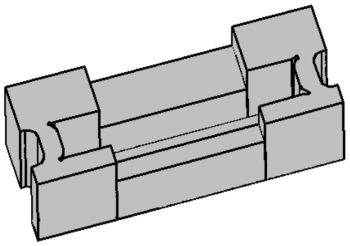

图 2　EPE 缓冲衬垫立体效果

Fig. 2 Three-dimensional effect map of EPE cushion pad

### 2.2　瓦楞纸板缓冲包装设计方案

综合考虑瓦楞纸板的回复性和手提电脑的包装要求，在手提电脑底部采用全面缓冲包装法进行设计，由手提电脑的尺寸，得出缓冲面积为 791.58 cm²，由公式 $A=W/\sigma_s$ 可计算静应力 $\sigma_s=0.0314\times9.8$ N/cm²。侧棱采用局部缓冲包装进行加固保护。

根据跌落高度 $H=60$ cm，选择不同楞型瓦楞纸板的 $G_m \sim \sigma_s$ 曲线，见图 3[3]。过纵坐标 $G=50$ g 作水

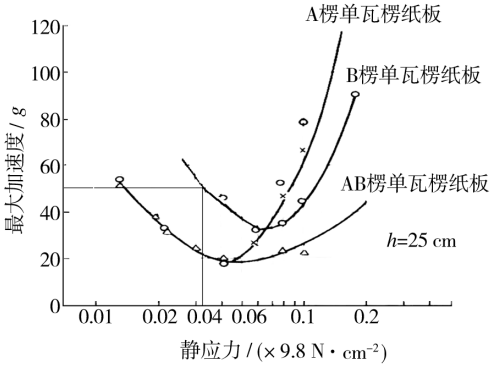


图 3　不同楞型瓦楞纸板的最大加速度-静应力曲线

Fig. 3 Curve of different type corrugated cardboard $G_m$-$\sigma_s$

平直线，过 $\sigma_s=0.0314\times9.8$ N/cm² 作垂线，交点在 B 楞单瓦楞纸板的曲线上，则缓冲衬垫选取 B 型瓦楞纸板，楞高 3 mm。根据生产经验，选取定量 200 g/m² 的面纸和 125 g/m² 的芯纸，瓦楞纸板厚度约为3.8 mm。

缓冲衬垫立体效果见图 4，由 2 部分组成，a 为底部全面缓冲包装衬垫，b 为侧棱部分缓冲包装衬垫，其具体尺寸依据手提电脑的尺寸进行设计。a 衬垫为一端开口的中空长方体，并在衬垫中间设计了支撑

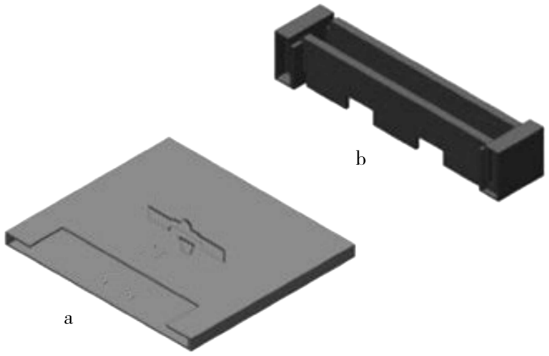


图 4 瓦楞纸板衬垫立体效果

Fig. 4 Three-dimensional effect map of corrugated cardboard cushion pad

结构[4],以提高衬垫的缓冲性能。b 衬垫是将瓦楞纸板进行 4 次折叠,形成敞口式的长方体形状,配合两边锁扣结构,采用交错插槽式固定。a,b 衬垫配合,使手提电脑牢固地固定在包装盒内,起到了良好的缓冲保护作用。

### 2.3 纸浆模塑缓冲包装设计方案

采用局部缓冲包装法,对手提电脑 2 条侧棱进行保护。由于手提电脑的质量相对较轻,纸浆模塑缓冲衬垫的结构选用小边沿结构。纸浆模塑缓冲包装的缓冲效果,主要是利用纸壁受到冲击时弹性形变减缓,抵消外力来实现的,其自身的弹性并不高,主要依赖于加强筋和型腔来提高缓冲性能。设置型腔的目的是保证纸浆模塑制品的动态缓冲性能,而加强筋的设计是为了提高纸模自身的强度[5]。

本设计分别在纸模的型腔内部、纸模外部均设有加强筋。此外,在纸浆模塑缓冲衬垫的 2 个侧面设计有可折叠式纸模结构,通过向缓冲衬垫侧面凹槽处的折叠,使其与凹槽紧密结合,既加强了缓冲衬垫侧面的强度及缓冲性能,又便于成型,节省材料和时间。在可折叠结构上也有 4 条加强筋的设计。

衬垫具体尺寸依据手提电脑的尺寸和纸浆模塑工厂的生产经验进行设计,见表 3。立体效果见图 5。

**表 3 纸浆模塑缓冲衬垫尺寸**

**Tab. 3 The size of molded pulp cushion pad**

| 项目 | 数值 |
|---|---|
| 型腔的表面尺寸/mm | 240×40 |
| 纸模壁厚/mm | 3～4 |
| 脱模斜度/(°) | 3～6 |
| 过渡圆弧/mm | 2～5 |

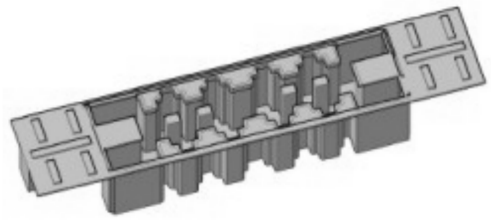

图 5 纸浆模塑衬垫立体效果

Fig. 5 Three-dimensional effect map of molded pulp cushion pad

## 3 缓冲包装方案的碳足迹分析

碳足迹计算分为 3 个步骤:确定计算边界和气体排放源;收集数据,查询碳排放因子;计算碳足迹。

### 3.1 确定计算边界和气体排放源

缓冲包装生命周期中的碳足迹主要分为 3 个阶段:一是原料生产阶段,二是由原料到缓冲包装的生产阶段,三是缓冲包装的回收利用阶段。文中主要计算前 2 个阶段的碳排放,这 2 阶段的碳排放一般包括以下 3 部分。

1) 直接碳排放。指化石能源燃烧的碳排放,如煤、石油、天然气等。这 3 种缓冲包装生产过程中用到的主要能源是煤,通过锅炉的煤燃烧,提供生产过程中所需的蒸汽。

2) 间接碳排放。指生产中的耗电量所产生的排放,包括各种机器设备的运行、生产工作所需的照明等。

3) 其他间接碳排放。指生产中涉及的辅助物,员工通勤、差旅,交通运输等所产生的排放。这部分的碳排放的计算复杂,工作量大,且类似企业这部分碳排放大致相同,故不予考虑[6]。

### 3.2 计算的理论依据和数据来源

计算的理论依据为热力学定律和碳排放计算公式,涉及到的实际生产数据经咨询相关企业得来。直接碳排放的计算公式:用煤量×煤的排放因子=直接排放量[6]。参考《中国能源统计年鉴》,原煤的平均低位发热量是 20 908 MJ/t;$CO_2$ 排放因子 1.8253 t/t[7]。间接碳排放的计算公式:耗电量×电的排放因子=间接排放量,取东北区域电网电的排放因子 1.0852 t/(MW·h)。

### 3.3 计算碳足迹

#### 3.3.1 生产 EPE 缓冲包装产生的碳足迹

生产 EPE 的原材料是 PE 颗粒,据企业调研,生产适用于 EPE 缓冲包装衬垫的 PE 颗粒约耗电 450 kWh/t,计算得生产 1 t 原料带入的碳排放为 0.488 t。

用 PE 颗粒批量生产与本设计方案结构类似的 EPE 缓冲包装衬垫，约耗电 750 kWh/t，计算得 EPE 缓冲包装生产阶段产生的碳排放为 0.814 t，碳排放总量为 1.3 t。由缓冲衬垫尺寸和密度，考虑模切废料率，计算生产一套 2 个缓冲衬垫约消耗 EPE 160 g，则生产一套 EPE 缓冲包装衬垫产生的碳排放总量约为 0.208 kg。

3.3.2　生产瓦楞纸板缓冲包装产生的碳足迹

生产瓦楞纸板的原材料是瓦楞芯纸和面纸，参考《中国能源统计年鉴》，估算生产 1 t 瓦楞芯纸的煤消耗量为 0.25 t，耗电量为 1500 kWh，生产 1 t 面纸的煤消耗量为 0.3 t，耗电量为 1650 kWh。经计算，生产 1 t 瓦楞芯纸和面纸的碳排放总量分别为 2.084，2.338 t。根据缓冲衬垫尺寸和模切废料率计算一套缓冲包装所需芯纸、面纸质量分别为 90.3，212.4 g。计算得原料带入的碳排放量为 0.685 kg。

瓦楞纸板的生产过程中，通过锅炉燃烧煤提供各环节所需的蒸汽热量。根据生产设备的工作能力、进出纸质量和温度，依据热力学公式计算蒸汽热量，根据煤的低位发热量，计算用煤量，进而计算碳排放量。经计算和调研，运行瓦楞纸板生产线每秒钟所需蒸汽热量约为 1534.96 kJ，耗电量约 0.15 kWh，根据瓦楞机幅宽和运行速度，计算生产一套缓冲衬垫所用的瓦楞纸板时间约为 2.4 s，则碳排放量为 0.712 kg。

生产一套瓦楞纸板缓冲包装产生的碳排放总量约为 1.397 kg。

3.3.3　生产纸浆模塑缓冲包装产生的碳足迹

纸浆模塑制品的主要原料为废纸，废纸回收过程中的人力、运输等费用属于其他间接碳排放，不考虑。

纸浆模塑的生产过程中，通入蒸汽的主要部分是干燥机。由缓冲衬垫的尺寸和密度及干燥前含水率，可计算一套缓冲衬垫进入干燥机之前的质量约为 845.6 g，将产品中的水分从常温加热到 100 ℃所需热量包括：蒸发产品中的水分所需热量、加热纤维所需热量、干燥机部件带走的热量和干燥机散热。依据热力学公式计算得总热量，并换算成用煤量，进而计算直接碳排放量约为 0.204 kg。

生产中用到的主要设备有水力碎浆机、高浓除渣器、成型机、干燥机和热压整形机，根据设备的工作参数，计算生产一套缓冲包装衬垫的耗电量约为 0.256 kWh，则间接碳排放约为 0.278 kg。

生产一套纸浆模塑缓冲包装产生的碳排放总量约为 0.482 kg。

## 4　结语

生产 EPE 缓冲包装过程中产生的碳足迹低于纸浆模塑和瓦楞纸板缓冲包装，但 EPE 对环境的影响较大。在满足缓冲保护作用的前提下，通常瓦楞纸板缓冲包装价格高于 EPE 缓冲包装和纸浆模塑缓冲包装，综合考虑成本和碳足迹两方面因素，纸浆模塑是用于缓冲包装比较理想的材料。企业可以根据所能接受的价格和对环保的重视程度，来选择适合的包装方案。

**参考文献：**

[1]　钱志新. 第四次浪潮—低碳新文明[M]. 南京：江苏人民出版社，2010.
QIAN Zhi-xin. Fourth Wave-low Footprint New Civilization[M]. Nanjing：Jiangsu People's Press，2010.

[2]　PASQUALINO Jorgelina，MENESES Montse，CASTELLS Francesc. The Carbon Footprint and Energy Consumption of Beverage Packaging[J]. Selection and Disposal Journal of Food Engineering，2011，103：357－365.

[3]　彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京：印刷工业出版社，2008.
PENG Guo-xun. Logistics and Transport Packaging Design[M]. Beijing：Printing Industry Press，2008.

[4]　黄涛，陈满儒. 基于瓦楞纸板缓冲系统的电子产品绿色包装解决方案[J]. 包装工程，2009，30(4)：61－64.
HUANG Tao，CHEN Man-ru. Electronic Product Green Packaging Solution Based on Corrugated Fiberboard Cushioning System[J]. Packaging Engineering，2009，30(4)：61－64.

[5]　黄俊彦，朱婷婷. 纸浆模塑生产实用技术[M]. 北京：印刷工业出版社，2008.
HUANG Jun-yan，ZHU Ting-ting. Molded Pulp Producion Technology[M]. Beijing：Printing Industry Press，2008.

[6]　郝发义. 具有可操作性的碳足迹计算方法及具体实践[J]. 印刷技术，2008，8(16)：31－34.
HAO Fa-yi. Operable Carbon Footprint Calculation Method and Practice[J]. Printing Technolog，2008，8(16)：31－34.

[7]　年鹤，王晓敏. 瓦楞纸箱生产碳足迹的计算方法与实例分析[J]. 包装工程，2012，33(3)：86－89.
NIAN He，WANG Xiao-min. Calculation Method and Case Analysis of Carbon Footprint in Corrugated Carton Production[J]. Packaging Engineering，2012，33(3)：86－89.