瓦楞纸箱生产碳足迹的计算方法与实例分析

年 鹤，王晓敏
（大连工业大学，大连 116034）

摘要：针对瓦楞纸箱企业生产中的碳排放量大、对环境影响严重的情况，提出了瓦楞纸箱生产碳足迹的计算方法，计算了3种瓦楞纸箱生产的碳排放量，并对其碳足迹主要影响因素进行了初步分析，同时提出了几点节能建议。为瓦楞纸箱企业节能减排及制定碳排放标准提供参考依据。

关键词：瓦楞纸箱；碳足迹；碳排放；计算；节能
中图分类号：TB484.1；TB488 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-3563(2012)05-0086-04

Calculation Method and Case Analysis of Carbon Footprint in Corrugated Carton Production

NIAN He, *WANG Xiao-min*
(Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: Aiming at the large carbon emission and environmental pollution problems of corrugated carton production, a calculation method of carbon footprint was put forward. Three kinds of corrugated carton production carbon emission were calculated and the main influence factors of the carbon footprint were analyzed. Some energy-saving suggestions were put forward. The purpose was to provide reference for energy-saving and drafting carbon emissions standards.

Key words: corrugated carton; carbon footprint; carbon emission; calculation; energy saving

对瓦楞纸箱生产碳排放量的统计，多以最终实际消耗的煤、电等资源统计，是统计已产生的碳排放。企业通常以一年或一季度为时间单位统计，而在此时间内企业生产的瓦楞纸箱种类繁多，生产不同种类纸箱的碳排放无法估算。再由于设备落后及工艺设计不合理造成的能源浪费现象，不同纸箱企业的碳排放量相差巨大，使企业制定节能目标及瓦楞纸箱生产碳排放标准无从下手。这就需要一种理论的计算方法，排除能源浪费、环境差异、纸箱种类差异等因素，计算生产不同类型瓦楞纸箱的能源消耗量及碳排放量，使企业在生产开始前便可预估能源消耗及碳排放情况。

1 瓦楞纸箱生产碳足迹及其组成

1.1 瓦楞纸箱生产碳足迹

针对温室效应所引起的气候变暖现象，国际气候大会提出了“碳足迹”这一新概念。瓦楞纸箱生产碳足迹意指在瓦楞纸箱生产过程中，由于消耗化石能源、电力等，直接或间接排放到大气中的温室气体的量，以产生的 CO_2 量来衡量，用于评价瓦楞纸箱生产过程中所排放的温室气体对环境的影响[1]。

1.2 瓦楞纸箱生产碳排放的温室效应潜能值

瓦楞纸箱生产需要高温高压蒸汽提供能量，这就意味着消耗大量的煤。煤的燃烧会产生 CO_2，CH_4 和 N_2O 等温室气体，它们对地球变暖的影响程度不同，以 CO_2 在大气中含量最大，影响最大。通过温室效应潜能值（GWP值）可将其他温室气体排放转化为 CO_2 的排放，从而用总的 CO_2 排放值来表示碳足迹。

GWP值用于度量各种温室气体对地球变暖影响的程度，规定 CO_2 气体的GWP值为1，其他气体与 CO_2 温室效应的比值，就是该气体的温室效应潜能值。瓦楞纸箱生产产生的温室气体GWP值如下[2]：

收稿日期：2012-01-08
作者简介：年鹤（1986－），女，抚顺人，大连工业大学硕士生，主攻印刷包装材料。
通讯作者：王晓敏（1959－），女，大连人，大连工业大学教授，主要研究方向为印刷包装材料。

CH_4 为 25；N_2O 为 298。

1.3　瓦楞纸箱生产碳排放的组成

瓦楞纸箱生产碳排放由直接排放和间接排放 2 部分组成。

直接排放指静止燃烧产生的碳排放，即锅炉烧煤产生蒸汽的过程。瓦楞纸板生产线所需的热量全部由锅炉烧煤得到的蒸汽提供，因此在生产过程中，这是很重要的一部分碳排放。其计算式为：直接排放量＝耗煤量×煤的碳排放因子。

间接排放指耗电所产生的碳排放。包括各种机械设备运行耗电、计算机耗电、工作照明耗电等。其计算式为：间接碳排放量＝用电量×电的碳排放因子。

根据联合国政府间气候变化专门委员会收录的各种燃料 CO_2 排放系数和 GWP 值，可知原煤的碳排放因子如下：CO_2 排放因子为 1.825 3 tCO_2/t；CH_4 排放因子为 0.000 5 tCO_2/t；N_2O 排放因子为 0.009 3 tCO_2/t；电的排放因子为 1.129 3 tCO_2/MWh。一定量瓦楞纸箱生产碳足迹是否符合低碳要求，需要计算其生产过程中的耗煤量和用电量。

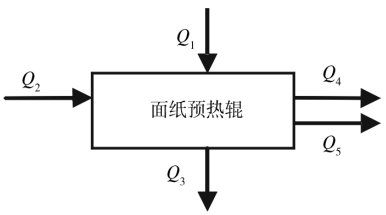
2　耗煤量的计算方法及计算实例

2.1　理论依据

瓦楞纸板生产线中各生产单元的供热与消耗应遵循能量守恒，锅炉烧煤得到的过热蒸汽，被输入到各个生产单元中，为纸板预热、瓦楞成型定型、粘合固化等提供热量[3]，输出的蒸汽凝结水又送回锅炉再次加热，形成一个蒸汽循环系统。

计算过程应逐一分析瓦楞纸板生产线的各个蒸汽供热单元，例如面纸预热辊、芯纸预调辊、瓦楞辊、压力辊、三联预热器、上胶机预热辊、加热板及制胶系统等，通过计算各生产单元的热量平衡，可以求出每一生产单元需要的热量，进而算出所需的蒸汽量和消耗的原煤量，得到直接碳排放量。

以面纸预热辊为例，依据能量守恒原理，在一定时间或一定质量产品生产中，热量平衡框图如下：



其热平衡公式为：$Q_1+Q_2=Q_3+Q_4+Q_5$　　(1)

式中：Q_1 为面纸带入的热量；Q_2 为蒸汽带入的热量；Q_3 为面纸带出的热量；Q_4 为热传递损失；Q_5 为凝结水带出的热量。

2.2　以预热辊为例的耗煤量计算

生产中锅炉向预热辊输入压力为 1 MPa、温度为 190 ℃的过热蒸汽，经过纸幅吸收热量、预热辊传导热量、热损耗等，最终输出压力为 0.6 MPa、温度为 130 ℃的蒸汽凝结水。面纸预热辊的具体参数见表 1。

表 1　面纸预热辊的参数

Tab.1 Parameters of top-paper preheating roll

技术参数	代号	目标值或检测数据
机器工作速度	v_w	150 m/min
面纸的定量	W_ω	250 g/m^2
纸的比热容	C	1.76 kJ/(kg·K)
进纸温度	t_1	25 ℃
出纸温度	t_2	85℃
热辊外表面温度	t_{w2}	167 ℃
热辊内表面温度	t_{w1}	190 ℃
壁厚	δ	10 mm
热辊表面积	A	5.27 m^2
钢的导热系数	λ	25.5 W/(m·K)
周围空气温度	t_f	50 ℃
表面发射率	ε	0.08
黑体辐射系数	c_b	5.67 W/(m^2·K^4)
对流传热系数	a_k	8.42 W/(m^2·K)

1）面纸带入热量 Q_1。

若面纸幅宽 1 800 mm，设备工作 1 min，则通过预热辊的面纸面积是 1.8×150＝270（m^2），$Q_1=Cm_1(t_1-t_0)$＝2 970 kJ。

2）输入的过热蒸汽热量 Q_2

P＝1 MPa，t＝190 ℃时，蒸汽的热焓值 h＝2 802 kJ/kg[4]。假设需要的过热蒸汽质量为 m_2，根据焓的定义，输入蒸汽的总热量为：$Q_2=m_2h_1$＝2 802m_2 kJ。

3）面纸带出热量 Q_3。

$Q_3=Cm_1(t_2-t_0)$＝10 098 kJ

4）热传递损失 Q_4。

热量损失包括预热辊的传导传热、空气对流传热、辐射传热，可以分别由工程热力学的傅里叶定律、牛顿冷却定律、斯蒂芬-波尔兹曼定律计算[5]，总的热量传递即 3 种传热之和，综合表示如下：

$$Q_4=\left[\frac{\lambda}{\delta}(t_{w1}-t_{w2}+a_k(t_w-t_f)+\varepsilon c_b\left(\frac{T}{100}\right)^4\right]A\times$$

60=18 910.37 kJ

5) 凝结水带走热量 Q_5。

P=0.6 MPa,t=130 ℃时,凝结水的热焓值为 h=546.5 kJ/kg。$Q_5=m_2h_2=546.5m_2$ kJ。

由热平衡原理,将以上数据代入式(1),可以求出所需的蒸汽量 m_2,得到工作 1 min,加热通过预热辊的 270 m^2 面纸需要蒸汽 11.54 kg。

在正常生产过程中,生产线输出的凝结水返回锅炉时温度降至 90 ℃,将其重新加热为过热蒸汽再次输入到预热辊中,循环使用。若每次循环过程中有 5%的凝结水损失,则以上计算的 11.54 kg 蒸汽是由 10.96 kg 温度为 90 ℃的回水和 0.58 kg 温度为 5 ℃的锅炉补水加热产生的。将这 2 部分水加热为 190 ℃的过热蒸汽,所需的热量为 28 191.63 kJ。根据原煤的平均低位发热量 20 908 MJ/t[6],得到消耗原煤 1.3 kg,直接排放 CO_2 为 2.39 kg,得出将 1 m^2 的面纸预热到所需温度排放 CO_2 为 8.9 g。

3 几种瓦楞纸箱的碳排放

使用 3 种不同的瓦楞纸板制造瓦楞纸箱,瓦楞纸板幅宽 1 800 mm。瓦楞纸板类型表示方式为:楞形-面纸定量/芯纸定量/面纸定量(g/m^2),3 种瓦楞纸板分别为:①B-140/110/170;②B-250/140/175;③CB-250/140/140/140/175。计算生产 100 m^2 以上 3 种瓦楞纸板的碳排放量(其中纸板③以 2 种车速生产),以分析其影响因素。

3.1 纸板生产部分

直接排放为瓦楞纸板生产线耗煤产生的碳排放。生产瓦楞纸板 100 m^2,3 种纸板的能源消耗及碳排放量见表 2。

表 2 生产 3 种瓦楞纸板的能源消耗及直接碳排放量

Tab.2 Energy consumption and direct carbon emission of three kinds of corrugated board(100 m^2)

纸板类型	车速 /(m·min^{-1})	耗蒸汽 /kg	耗煤 /kg	直接排放 CO_2 /kg
①	150	42.53	9.11	41.98
②	140	46.36	9.87	45.47
③	130	78.03	13.94	64.27
	60	148.75	28.45	131.15

间接排放为纸板生产过程中耗电所产生的碳排放,耗电设备包括:瓦楞纸板生产线、生产线上方 20 盏节能灯泡、全自动制胶机。经计算,生产 100 m^2 3 种类型纸板所用的时间非常接近,则设备工作时间均按 0.4 min 计算;全自动制胶机制胶一次工作 1 h,出胶 800 kg,若单面单楞纸板消耗胶黏剂 0.015 kg/m^2,可计算出生产 100 m^2 3 层和 5 层纸板所需的胶黏剂质量,进而得到两者的制胶时间。生产 3 种纸板的设备耗电情况及间接碳排放量见表 3。

表 3 生产 3 种纸板的耗电情况及间接碳排放量

Tab.3 Power consumption and indirect carbon emission of three kinds of corrugated board(100 m^2)

项目	功率 /kW	设备工作时间/min	耗电量 /kWh	间接排放 CO_2/kg
瓦楞纸板生产线	500	0.4	3.33	3.76
20 盏节能灯泡	0.11	0.4	0.01	0.01
全自动 ①②	32	0.23	0.12	0.14
制胶机 ③		0.45	0.24	0.27

比较生产 3 种纸板的直接碳排放情况。纸板②比①的车速慢、纸张定量大、碳排放量较多。生产中要求纸幅通过每一生产单元被加热到同一标准温度,而生产单元表面温度保持不变。加热相同面积的纸板,纸张定量越大吸收热量越多,车速越慢,同时各蒸汽单元的热传递损失越多,碳排放量越大。

生产 5 层纸板比 3 层纸板增加了面纸预热辊、芯纸预热辊、单面机等生产单元,用于纸幅预热、粘合剂固化、瓦楞成形的热量更多,同时增加生产单元将有更多的热传递损失;由于 5 层纸板厚度大,在双面机中传热距离大,并需固化 2 层胶膜,需要的时间更长,故车速较生产 3 层纸板慢,从而使各生产单元的热传递损失增加。因此与纸板①和②相比,生产纸板③的碳排放量明显增加。

经比较可以得出:纸板层数越多、原纸定量越大,生产碳排放量越大;而当纸板层数和原纸定量相同时,车速对瓦楞纸板生产的碳排放影响很大,车速越慢,各生产元件热传递损失越多,生产碳排放量越大。

3.2 纸箱成型部分

纸箱成型部分的碳排放是由设备耗电产生的间接排放,此计算暂时只考虑生产设备耗电产生的碳排放。制造 0201 型纸箱用到的设备有印刷开槽机和自动粘箱机。100 m^2 的瓦楞纸板可制造展开尺寸为 1 800 mm×1 300 mm 的瓦楞纸箱 42 个,根据各设备的工作速度,工作时间不到 1 min。纸箱成型部分耗电及碳排放情况见表 4。

表 4　纸箱成型部分耗电情况及间接碳排放

Tab.4 Electricity consumption and indirect emission of carton forming part(100 m²)

项目	功率/kW	工作速度 (strokes/min)	工作时间/min	耗电量/kWh	间接排放 CO_2/kg
印刷开槽机	47	100	0.42	0.33	0.37
自动粘箱机	2.2	50	0.84	0.03	0.03
总计				0.36	0.4

依照上述计算结果,生产 100 m² 以上 3 种瓦楞纸箱,总的能源消耗及碳排放情况见表 5。

表 5　能源消耗及碳排放情况(100 m²)

Tab.5 Energy consumption and carbon emission

纸箱类型	耗蒸汽/kg	耗煤/kg	直接排放 CO_2/kg	耗电量/kWh	间接排放 CO_2/kg	总排放 CO_2/kg
①	42.53	9.11	41.98	3.82	4.31	46.29
②	46.36	9.87	45.47			49.78
③	78.03	13.94	64.27	3.94	4.45	68.72
	148.75	28.45	131.15			135.6

由表 5 可知,生产 3 种纸箱的直接碳排放量占总排放量的 90.69%～96.72%,因此在瓦楞纸箱生产过程中,燃烧煤所产生的直接碳排放是最主要的部分,对环境影响最大。

4　节能建议及减排计算

瓦楞纸板生产线中的加热板单元,表面温度在 160 ℃左右,较其他生产单元低,所需的蒸汽压力较低。如果通过闪蒸容器,将从其他生产单元出来的凝结水转变为二次蒸汽供给加热板单元,而不是使用从锅炉出来的过热蒸汽,将节省很多能量。经过计算,生产 100 m² 的 3 层瓦楞纸板,将节省大约 110 819 kJ 能量,节约 5.3 kg 煤,减少排放 CO_2 达 9.7 kg。

上述计算没有考虑车间照明产生的碳排放,瓦楞纸箱企业车间宽阔,采光不够,而且工作时间长,因此照明灯多且长时间点亮,耗电量很大。在实际生产中,照明耗电不亚于生产设备耗电,是碳排放内容中必须计算的部分。建议将车间中的普通灯泡换为节能灯泡,经计算,每 100 只节能灯泡每小时将省电 4 kWh,减少排放二氧化碳 4.5 kg。

此外,瓦楞纸箱企业应加大能源新技术、新工艺、新设备和新材料的研究开发和推广利用,淘汰高耗能落后工艺、技术和设备,调整企业产品、工艺和能源消费结构,促进企业生产工艺优化和产品结构的升级,实现技术节能和结构节能。同时要加强企业节能宣传与培训,提高员工资源忧患意识、节约意识和环境意识,增强社会责任感。

5　结语

计算碳排放的影响因素非常多,所采集数据的准确性尤为重要。计算瓦楞纸箱生产的碳足迹,是企业减少碳排放的第一步。企业可利用能量守恒原理计算自己的碳足迹,根据企业自身情况进行工艺创新及技术改造,从而提高蒸汽系统热效率,减少碳排放,达到节能降耗的目的。

参考文献:

[1] 董文海.造纸业"碳足迹"评估——环保升级的又一标志[J].造纸信息,2009(5):21－23.
DONG Wen-hai. "Carbon Footprint" Assessment of the Paper Industry—Another Flag of Environmental Upgrade[J]. China Paper Newsletter,2009(5):21－23.

[2] 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):31－34.
HAO Fa-yi. Operable Carbon Footprint Calculation Method and Practice[J]. Printing Technology, 2008(8): 31－34.

[3] 杨皓,杨小俊.瓦楞纸板生产线的蒸汽系统建模[J].包装工程,2010,31(17):97－100.
YANG Hao, YANG Xiao-jun. Modeling for the Steam System of Corrugated Board Production Line[J]. Packaging Engineering,2010,31(17):97－100.

[4] 赵兆颐.国际单位制的水和水蒸气性质[M].北京:水利电力出版社,1983.
ZHAO Zhao-yi. Water and Steam Properties for International System Units[M]. Beijing: China Waterpower Press,1983.

[5] 李长友,钱东平.工程热力学与传热学[M].北京:中国农业大学出版社,2004.
LI Chang-you, QIAN Dong-ping. Engineering Thermodynamics and Heat Transfer[M]. Beijing: China Agricultural University Press,2004.

[6] 谢伏瞻.中国统计年鉴－2008[M].北京:中国统计出版社,2008.
XIE Fu-zhan. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press,2008.

[7] CHOWDHURY G. Carbon Footprint of the Knowledge Sector: What's the Future? [J]. J of Documentation, 2010,66(6):934－946.