

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2013.11.003

固化温度对液化竹基酚醛泡沫塑料热稳定性影响^{*}

刘晓欢¹,傅深渊²,许玉芝¹,王春鹏¹,储富祥¹

(1. 中国林业科学研究院林产化学工业研究所; 生物质化学利用国家工程实验室; 国家林业局林产化学工程重点开放性实验室; 江苏省生物质能源与材料重点实验室, 南京 210042; 2. 浙江农林大学工程学院, 杭州 311300)

摘要:以竹材液化物为原料,以氢氧化钠为催化剂,制备成热固性液化竹基酚醛树脂(PBF)。通过对PBF的合成,对其物理化学特性及液化竹基酚醛树脂泡沫塑料(PBFM)的热稳定性进行了研究。凝胶色谱分析表明,PBF树脂的重均分子量(M_w)和分散度(M_w/M_n)都高于常规酚醛树脂(PF)。PBFM的密度和压缩强度都高于常规PF泡沫。通过对PBFM在不同固化温度条件下的热降解性能的研究发现,当固化温度从100℃升高到140℃时,泡沫体的失重率从45.31%降低到29.09%,热降解表观活化能从22.82 kJ/mol提高到31.03 kJ/mol,这说明适当地提高PBFM固化温度可以提高其耐热性。

关键词:竹材; 液化竹基酚醛树脂; 分子量; 热稳定性

中图分类号: TQ351.36 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2013)11-0014-05

Influence of Curing Temperature on Thermal Stability of Phenol-Liquefied Bamboo-Based Phenolic Foam

Liu Xiaohuan¹, Fu Shenyuan², Xu Yuzhi¹, Wang Chunpeng¹, Chu Fuxiang¹

(1. Institute of Chemical Industry of Forestry Products, Chinese Academy of Forestry; National Engineering Lab for Biomass Chemical Utilization; Key and Lab on Forest Chemical Engineering; State Forestry Administration Key Lab of Biomass Energy and Material, Nanjing 210042, China; 2. College of Engineering, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China)

Abstract: A phenol-liquefied bamboo-based phenolic resin(PBF) was prepared by a reaction of liquefied bamboo and formaldehyde under alkaline conditions. The properties of co-condensated PBF resin and thermal stability of PBF foam(PBFM) were studied. GPC results show that the weight average molecular mass(M_w) and polydispersity index(M_w/M_n) of the PBF are higher than conventional PF. The obtained PBFM shows satisfactory densities and compressive properties, comparable to those of foams obtained from conventional PF. It is found that the weight loss rate is decreased from 45.31% to 29.09% and the apparent activating energy of thermal decomposition is increased from 22.82 kJ/mol to 31.03 kJ/mol, when the curing temperature is risen from 100℃ to 140℃. It indicates that properly increasing the PBFM curing temperature can improve its heat resistance.

Keywords: bamboo; PBF resin; molecular weight; thermostability

随着石油等非可再生资源的日益枯竭,开发利用生物质资源已成为各国研究人员研究的热点。竹子是生物质资源的重要组成部分,尤其在我国南方各省分布甚为广泛。近几年随着竹制品加工产业的进一步兴起,各种竹材加工下脚料增加,大都将其当作燃料,利用价值低,且污染环境。将竹材废料作为生物质原料,可提高其利用价值,减缓能源压力,因此开展这种孕育巨大能量的生物质资源的深加工意义非常大。苯酚作为溶剂,酸作为催化剂可以将生物质残废料转化为应用价值、产品附加值较高的物质^[1-4]。

开发高性能液化竹基酚醛泡沫塑料(PBFM)主要有以下原因:(1)酚醛树脂(PF)泡沫塑料被称为“保温之王”,作为一种新型的多用途泡沫材料,PF泡沫塑料以其耐热、难燃自熄、耐火焰穿透、遇火无

滴落等优点而得到广泛重视,在空调风管、建筑、高温隔热、超低温保冷材料上具有实用价值;(2)目前PF泡沫原料价格高限制了其使用量;(3)常规PF泡沫塑料具有硬脆、易粉化和掉渣等缺点限制了其应用范围。因此对于兼顾环保,生产成本低等多功能的PF泡沫塑料是泡沫材料加工领域的技术瓶颈,液化竹基PF(PBF)以及PBFM是解决泡沫塑料制品领域的这一技术空白的关键。

本实验室已经在竹材常温液化方面取得大量成果,在具备成熟的竹材液化技术以及竹材苯酚液

^{*} 国际合作项目(2011DFA32440); 国家自然科学基金项目(31200448)

联系人:王春鹏,博士生导师,主要从事乳液聚合,胶黏剂的研究工作

收稿日期:2013-08-11

化物树脂化技术的基础上,以氢氧化钠为催化剂,制备成热固性PBF。然后在现有的发泡技术的基础上,开发出一种新型发泡材料,该材料一方面具有可降解性,对环境的污染小;另一方面能有效地降低生产成本。随着生物质液化技术的成熟发展,利用竹材液化物生产节能保温泡沫材料,具有重要的现实意义。笔者以竹材液化物为原料,以氢氧化钠为催化剂,制备成热固性PBF,进一步合成了PBFM。对比了PBF和常规PF物理化学及力学性能;对不同固化温度条件下制备的PBFM的热稳定性进行了热重(TG)分析及热降解动力学研究和对比,为其应用研究提供了理论基础。

1 实验部分

1.1 原材料

多聚甲醛(96%):工业纯,天津联发化工贸易有限公司;

苯酚(95%):工业纯,上海高桥化工有限公司;

浓硫酸(96%):工业纯,浙江双林化工试剂厂;

氢氧化钠、磷酸:分析纯,宁波市化学试剂厂;

异丙醚:分析纯,浙江双林化工试剂厂;

吐温-80:分析纯,天津联发化工贸易有限公司;

竹粉:由5年生毛竹材经植物粉碎机粉碎得到,细度150~297 μm 。

1.2 实验仪器及设备

TG分析仪和差示扫描量热(DSC)仪:Netzsch STA409型,德国耐驰公司;

凝胶渗透色谱(GPC)仪:PL-GPC 50 Integrated GPC System型,英国Polymer Laboratories公司。

1.3 试样制备

(1) PBF和常规PF的制备。

竹材液化物按照文献[5]工艺制备,称取一定量竹材液化物,将竹材液化物、多聚甲醛和氢氧化钠按物质的量之比为1:1.6:0.4加入装有搅拌器、温度计、冷凝管的1000 mL四口烧瓶中,加热至80℃反应,反应2 h后出料。PBF最佳反应条件为^[6]:树脂化时间为2 h,甲醛与苯酚物质的量之比为1.2,NaOH与苯酚物质的量之比为0.6,树脂化温度为70℃。常规PF的树脂化温度为90℃,其它反应条件与PBF相同,固体含量都控制在80%左右。

(2) PBFM的制备工艺。

称取PBF 100 g于250 mL的烧杯中,加入2~6 g竹粉、2~8 g表面活性剂吐温-80和4~8 g

发泡剂异丙醚,快速搅拌1 min后加入8~16 g固化剂磷酸水溶液(质量分数85%),继续快速搅拌至有乳白色泡体出现,迅速倒入已预热好的不同固化温度(100,110,120,130和140℃)的不锈钢杯(直径为10 cm)中发泡,固化30 min后冷却。不同温度条件下制备的PBFM分别标记为PBFM₁₀₀,PBFM₁₁₀,PBFM₁₂₀,PBFM₁₃₀和PBFM₁₄₀。常规PF制备和发泡按文献[7]进行。

1.4 性能测试与表征

压缩强度按GB 8813-2008测试;

密度按GB/T 6343-2009测试;

TG-DSC分析:采用TG分析仪,氮气氛围,升温速率20℃/min,温度范围30~900℃,氮气流量20 mL/min。

2 结果与讨论

2.1 PBF和常规PF特性及其泡沫塑料性能分析

表1为PBF和常规PF及其泡沫塑料的特性。

表1 PBF和常规PF及其泡沫塑料的特性

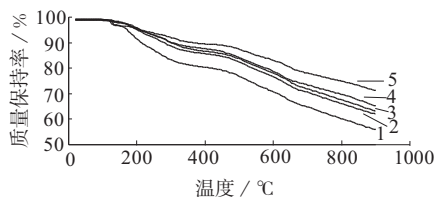
试样	树脂性能				泡沫塑料性能	
	黏度/(Pa·s) (65℃)	M_w	M_w/M_n	凝胶时间/s	密度/(kg·m ⁻³)	压缩强度/KPa
PBF	5.17	784	1.65	868	60~120 ^[6]	90~454 ^[8]
常规PF	1.23	568	1.26	521	40~75 ^[6]	161~215 ^[9]

从表1可知,PBF树脂凝胶时间和重均分子量(M_w)都很大,一般情况下,凝胶时间与 M_w 成反比的关系,树脂的 M_w 越大,其凝胶时间就越短,可能是由于PBF树脂的反应活性不够高,因此即使PBF树脂的 M_w 很大,其树脂的凝胶时间也很长;还可以看出PBF树脂的 M_w 和分散度(M_w/M_n)都高于常规PF,一方面可能是因为竹材苯酚液化物(纤维素、半纤维素、木质素降解后产物)本身是具有较高分子量且化学成分复杂的混合物^[10]。另一方面PBF的加成缩聚反应历程比常规PF复杂。这均导致了PBF树脂具有较高的分散度^[11-13]。PBFM的密度明显高于常规PF泡沫,这可能是由于PBF的黏度远高于常规PF所致,黏度高可能也是导致PBFM压缩强度大的原因。这点与利用木材液化物制备泡沫塑料的研究结果一致^[8]。

2.2 固化温度对泡沫塑料的热稳定性及热降解活化能影响的研究

PF泡沫塑料应用于建筑材料,其热稳定性不仅关系到其使用寿命,更关系到其使用安全性。采用TG分析法研究了不同固化温度条件下制备的

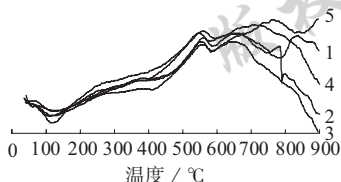
PBFM在氮气介质中,20~900℃(升温速度20℃/min)时的热失重情况,如图1所示。由于泡沫塑料体系中含有异丙醚发泡剂、吐温-80表面活性剂等挥发性组分,因此图1中TG曲线中的起始分解温度的重复性不理想,不能够准确地反映泡沫的热解性能。一般采用最大失重速率点的温度即TG曲线的一次微分的峰顶温度,共同反应基体的热稳定性[14]。



固化温度:1—100℃; 2—110℃; 3—120℃; 4—130℃; 5—140℃

图1 PBFM₁₀₀, PBFM₁₁₀, PBFM₁₂₀, PBFM₁₃₀, PBFM₁₄₀的TG曲线

从图1可以看出,所有PBFM的TG曲线都有明显的极大速率失重点,PBFM的第1阶段最大失重峰顶温度都在200℃左右,并且失重率随着固化温度的升高而逐渐降低,这可能是由于前一个峰对应的热失重主要是由树脂再缩聚产生的水^[15]和泡沫塑料体系中含有的异丙醚发泡剂、吐温-80表面活性剂等挥发性组分挥发所致。图2为PBFM₁₀₀, PBFM₁₁₀, PBFM₁₂₀, PBFM₁₃₀, PBFM₁₄₀的DSC曲线。



固化温度:1—100℃; 2—110℃; 3—120℃; 4—130℃; 5—140℃

图2 PBFM₁₀₀, PBFM₁₁₀, PBFM₁₂₀, PBFM₁₃₀, PBFM₁₄₀的DSC曲线

由图2可知,随着固化温度的升高,其固化吸热峰逐渐减弱,到200℃时,几乎无吸热峰,表明固化已完全。此阶段对树脂热稳定性没有直接影响,因此对于其热分解动力学的不予求解。每条TG曲线都呈现两个不同阶段的热失重过程,这与前人对常规PF热失重的研究结果相似^[16]。其中第1阶段主要是在400℃以前,树脂的进一步交联、未参与固化交联的羟甲基、醚键和羰基的氧化和分解以及泡沫塑料体系中含有的异丙醚发泡剂、吐温-80表面活性剂等挥发性组分挥发所致,而第2阶段热失重主要在400~750℃内,部分芳环的分解与碳化是第2阶段的主要反应^[16]。表2列出不同固化温度PBFM的DSC特征温度及对应的第2阶段热失重

率。

表2 不同固化温度PBFM的DSC特征温度及对应

试样	的第2阶段热失重率		
	第2阶段起始热失重温度/℃	第2阶段最大失重速率温度/℃	失重率/%
PBFM ₁₀₀	413	536	45.31
PBFM ₁₁₀	406	521	38.97
PBFM ₁₂₀	412	525	38.28
PBFM ₁₃₀	420	530	37.06
PBFM ₁₄₀	417	532	29.09

由表2可知,PBFM₁₀₀, PBFM₁₁₀, PBFM₁₂₀, PBFM₁₃₀, PBFM₁₄₀的第2阶段起始热失重温度均在410℃左右,最大失重率在525℃左右,该阶段失重率随着固化温度的升高呈下降趋势,说明提高固化温度可有效地增加PBFM的热稳定性,从而提高PBFM的耐热性。

由于PBFM体系的热降解可视为一级反应^[17],故采用Blold法^[18]可计算热分解阶段的热降解活化能,计算如式(1)和式(2)。

$$\ln \ln(1/y) = -(E_a/R)(1/T) + \text{constant} \quad (1)$$

$$y = (w_t - w_\infty)/(w_0 - w_\infty) \quad (2)$$

式中: E_a ——热降解表观活化能,kJ/mol;

T ——固化温度,℃;

constant——常数;

w_t ——时间 t 试样的质量分数,%;

w_0 ——起始时试样的质量分数,%;

w_∞ ——热降解终点时试样的质量分数,%。

试样PBFM₁₀₀, PBFM₁₁₀, PBFM₁₂₀, PBFM₁₃₀, PBFM₁₄₀的 $\ln \ln(1/y)$ 和 $1/T$ 的关系图如图3~图7所示。根据计算公式进行线性拟合作图由图中斜率可计算得出PBFM热降解阶段的 E_a ,结果

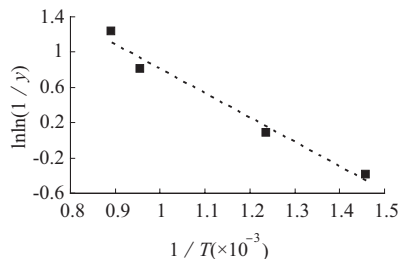


图3 PBFM₁₀₀第2热降解阶段 $\ln \ln(1/y)$ 与 $1/T$ 曲线图

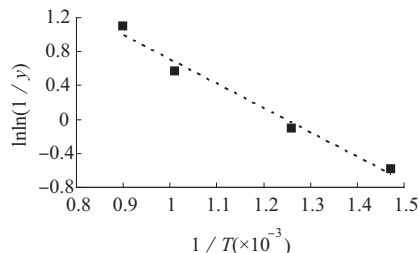
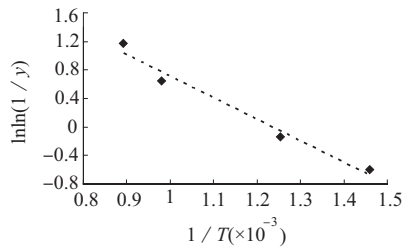
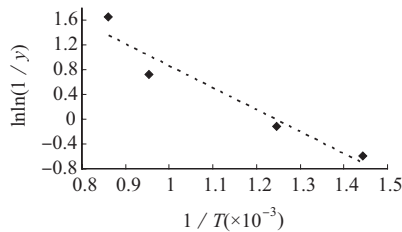
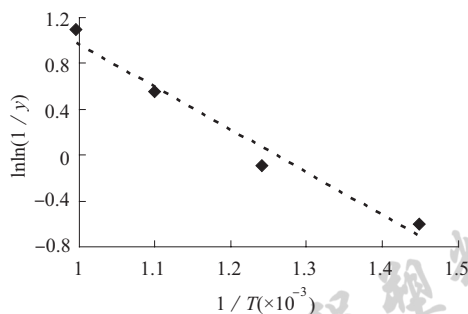


图4 PBFM₁₁₀第2热降解阶段 $\ln \ln(1/y)$ 与 $1/T$ 曲线图


 图5 PBFM₁₂₀第2热降解阶段 $\ln\ln(1/y)$ 与 $1/T$ 曲线图

 图6 PBFM₁₃₀第2热降解阶段的 $\ln\ln(1/y)$ 与 $1/T$ 曲线图

 图7 PBFM₁₄₀第2热降解阶段 $\ln\ln(1/y)$ 与 $1/T$ 曲线图

列于表3。试验结果表明,随着固化温度的升高,PBFM的 E_a 逐渐增大,PBFM₁₀₀(22.82 kJ/mol)较PBFM₁₄₀(31.03 kJ/mol)的低;说明泡沫体固化温度对泡沫塑料的热稳定性有较大影响, E_a 越大,降解反应越难进行,泡沫塑料热稳定性越大,这同样说明适当地提高PBFM固化温度可以提高其耐热性。

表3 PBFM₁₀₀, PBFM₁₁₀, PBFM₁₂₀, PBFM₁₃₀, PBFM₁₄₀ 的第2热降解阶段的 E_a

试样	$E_a/(kJ \cdot mol^{-1})$	相关系数	线性拟合方程
PBFM ₁₀₀	22.82	0.978 5	$y = -2.7453x + 3.5088$
PBFM ₁₁₀	23.83	0.981 1	$y = -2.8645x + 3.5668$
PBFM ₁₂₀	25.01	0.975 0	$y = -3.0189x + 3.7328$
PBFM ₁₃₀	29.29	0.929 9	$y = -3.5469x + 4.4115$
PBFM ₁₄₀	31.03	0.969 8	$y = -3.7322x + 4.7037$

3 结论

(1) 通过PBF和常规PF的特性比较,得出PBF的重均分子量 M_w 和分散度都高于常规PF,说明PBF的加成缩聚反应历程比常规PF复杂,同时PBFM泡沫的压缩强度和密度也高于常规PF泡沫。

(2) 随着固化温度的升高,PBFM的失重率逐渐降低, E_a 逐渐增大,PBFM₁₀₀的 E_a (22.82 kJ/mol)低于PBFM₁₄₀的 E_a (31.03 kJ/mol);说明固化温度

对泡沫塑料的热稳定性有较大影响, E_a 越大,分解反应越难进行,泡沫塑料树脂热稳定性越高,因此适当地提高PBFM固化温度可以提高其耐热性。

参考文献

- [1] 孙丰文,李小科. 竹材苯酚液化及胶黏剂制备工艺[J]. 林产化学与工业,2007,27(6):65-70.
Sun Fengwen, Li Xiaoke. Technologies of liquefaction of bamboo and preparation of adhesive[J]. Chemistry and Industry of Forest Products,2007,27(6):65-70.
- [2] Lee S H, Teramoto Y, Shiraishi N. Acid-catalyzed liquefaction of waste paper in the presence of phenol and its application to novolak-type resin[J]. Journal of Applied Polymer Science,2002,83:1 473-1 481.
- [3] Lee W J, Chen Y C. Novolak PF resins prepared from phenol liquefied cryptomeria japonica and used in manufacturing moldings[J]. Bioresource Technol,2008,99:7 247-7 254.
- [4] 张求慧,赵广杰. 我国生物质废料液化及产物利用的研究进展[J]. 林产化学与工业,2009,29(1):120-126.
Zhang Qiuhui, Zhao Guangjie. Research progress on liquefaction of waste biomass and utilization of products in china[J]. Chemistry and Industry of Forest Products,2009,29(1):120-126.
- [5] 傅深渊,余仁广,杜波. 竹材废料液化及其液化物胶粘剂的制备[J]. 林产工业,2004,31(3):35-38.
Fu Shenyuan, Yu Renguang, Du Bo. Liquefaction of bamboo and preparation of liquefied bamboo adhesive [J]. China Forest Products Industry,2004,31(3):35-38.
- [6] 刘晓欢,傅深渊,宗恩敏. 发泡性竹材苯酚液化物/多聚甲醛树脂的合成研究[J]. 粘接,2011(6):56-58.
Liu Xiaohuan, Fu Shenyuan, Zong Enmin. On synthesis of phenol-liquefied bamboo based foamable phenolic resin[J]. Adhesion,2011(6):56-58.
- [7] 欧阳昆,吴幼青,吴诗勇. 酚醛泡沫的制备及改性研究[J]. 广西轻工业,2009(3):32-34.
Ouyang Kun, Wu Youqing, Wu Shiyong. Study on preparation and modification of phenolic foam[J]. Guangxi Journal of Light Industry,2009(3):32-34.
- [8] Lee S H, Teramoto Y, Shiraishi N. Resol-type phenolic resin from liquefied phenolated wood and its application to phenolic foam[J]. J Applied Polymer Science,2002,84:468-472.
- [9] 庄晓伟,张伟,王基夫,等. 低温发泡制备酚醛泡沫材料及其表征[J]. 化工新型材料,2010,38(4):145-147.
Zhuang Xiaowei, Zhang Wei, Wang Jifu, et al. Preparation and characterization of phenolic foam used low-temperature foaming and curing method[J]. New Chemical Materials,2010,38(4):145-147.
- [10] Li Gaiyun, Qin Tefu, Tohmura S I, et al. Preparation of phenol formaldehyde resin from phenolated wood[J]. Journal of Forestry Research,2004,15(3):212-213.

- [11] 张建辉,赵广杰. 竹质碳纤维原丝制备过程中化学基团的变化[J]. 林产工业,2010,37(5):28-31.
Zhang Jianhui, Zhao Guangjie. Study on chemical group changes during carbon fiber precursor preparation from liquefied bamboo[J]. China Forest Products Industry, 2010, 37(5):28-31.
- [12] 黄发荣,焦杨声. 酚醛树脂及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
Huang Farong, Jiao Yangsheng. Phenolic resins and it's application[M]. Beijing:Chemistry Industry Press, 2003.
- [13] Chow S. Morphologic accessibility of wood adhesives[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1974, 18(9):2 785-2 796.
- [14] 马德柱,何平笙,徐种德. 高聚物的结构与性能[M]. 北京:科学出版社,1999:47-265.
Ma Dezhu, He Pingsheng, Xu Zhongde. The structure and function of polymer[M]. Beijing:Science Press, 1999:47-265.
- [15] Maldas D, Shiraishi N, Harada Y. Phenolic resol resin adhesives prepared from alkali-catalyzed liquefied phenolated wood and used to bond hardwood[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 1997, 11(3):305-316.
- [16] 王晓叶,刘亮,冯志海. 酚醛树脂热解性能研究[J]. 武汉理工大学学报,2009,31(12):21-23.
Wang Xiaoye, Liu Liang, Feng Zhihai. Research of phenol resin phrolysis behavior by pyrolysis-gas chromatograph mass spectrometry[J]. Journal of Wuhan University Technology, 2009, 31(12):21-23.
- [17] Ward J R, Decker L J. Determination of the thermal decomposition kinetics of polyurethane foam by guggenheim's method[J]. Industrial Engineering Chemistry Product Research and Development, 1982, 21(3):460-461.
- [18] Broido A. Simple, sensitive graphical method of treating thermogravimetric analysis data[J]. Journal of Polymer Science, Part A-2, 1969, 7(10):1 761-1 773.

六方面提升技术实现塑料包装绿色化

包装行业已经逐渐成为我国国民经济发展的重要组成部分之一。但就目前来看,我国的包装行业存在着许多不和谐的现象。这种不和谐,跟企业的功利性有关,也跟国家的相关技术标准未能及时更新相关,更跟企业的违法成本过低相关。

绿色包装是世界包装行业发展的大趋势,安全则是我国当前乃至今后几年的重点整治领域,这两者对塑料包装材料的发展都有着直接影响。绿色塑料包装材料不仅要卫生、环保,还要具备包装的功能化和高性能化。这就要求塑料包装材料企业在以下几个方面进一步改进和提升:

一是创新和研发塑料新材料和新加工技术,使更多性能优异的塑料成为包装材料,并利用新材料的高性能,实现包装材料减量化;

二是推动塑料共混技术、塑料助剂新品及应用技术的进步和发展,在保证塑料包装材料无毒、卫生、环保前提下,用低成本技术使塑料包装材料性能提升,为减量化提供可能;

三是提高和改进塑料回收利用加工技术,使塑料包装材料回收利用率大幅提高,改善和消除塑料包装材料造成“白色污染”的隐患,提高资源利用率;

四是发展生物基塑料,有效地调控生物塑料降解时间和周期,在充分发挥生物塑料包装材料功用的同时,减少和消除塑料包装材料对生态环境的污染和影响;

五是通过自主研发和技术创新,降低塑料包装新材料、新技术的成本,避免因成本过高,许多符合绿色包装的塑料材料不能大面积应用的问题;

六是发展智能化等先进包装技术手段,利用部分塑料包装材料具有的可食性、水溶性等特点,减少包装废弃物的产生量,提高塑料包装的安全环保性能。

同样,塑料包装材料也常用于食品包装。为了避免材料

内部残留的有毒有害化学污染物的迁移与溶出,从而出现食品安全事故,塑料包装材料企业还应把好安全关。

作为企业,在原材料来源上,可降解的生物材料现已成为包装领域的一大亮点。虽然不能完全替代石油基塑料,但在国家政策的鼓励以及企业的推广下,应用比例正在逐年提高;作为包装材料,尤其是食品包装材料,安全性是应该遵守的最基本的原则。如何在保证产品性能的同时避免塑化剂、金属元素等对食物的污染是企业获得生存、发展所必须解决的问题;再次,作为社会的一份子,企业必须承担相应的社会责任,抓好包装废弃物处理和资源的回收再利用工作,实现可持续发展要求。

企业首先是应该加强自律,使用符合制品的原料生产相应的包装产品。食品是进入入口的物质,做为保障食品安全的最后一道屏障,包装不能有毒。同时,企业应该开展科技创新,技术转型升级,真正向着绿色、环保方向前进,而不只是炒作概念上的绿色包装。

(中聚网)

阿博格 K 展演示最新独特机器 Freeformer

阿博格最新成功开发了独特机器 Freeformer 和一种新工艺,即已获得专利的 Arburg Plastic Freeforming(AKF),并在 2013K 展上展出其中的两台机器,演示生产单组分和双组分零件。该新机器在塑料自由成型时,不需要模具或预制的模腔。利用 AKF, Freeformer 可直接处理 3D CAD 文件,与在注塑机中一样,标准塑料粒料以整体方式熔化,由熔体形成液滴,再采用增材方法,即逐层制造全功能零件。这样就可以经济地单个制造零件,完全不需要注塑模具。

AKF 可采用传统的塑料粒料,不需要供应预制的形式,如粉状或条状;采用预制形式的材料会使材料、工艺,以及所制造的零件具有较高的成本。Freeformer 可以在无支撑结构的条件下工作,因而不会产生废料,从而大大降低了成本。

(中聚网)