

# 发泡木塑复合材料发泡及成型工艺研究

曾广胜, 徐 成, 江太君

(湖南工业大学包装新材料与技术重点实验室, 先进包装材料与技术湖南省普通高校重点实验室, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 介绍了发泡木塑复合材料的基本原料及发泡方法, 同时对发泡木塑复合材料的主要成型工艺及其影响因素进行了说明, 在此基础上指出了发泡木塑复合材料的研究趋势。

**关键词:** 木塑复合材料; 化学发泡; 物理发泡; 超临界; 成型工艺

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2011)04-0027-06

## Investigation of Foaming and Molding of Micro-Foamed Wood Plastic Composites

Zeng Guangsheng, Xu Cheng, Jiang Taijun

(Key Laboratory of New Materials and Technology for Packaging, Key Laboratory of Advanced Materials and Technology for Packaging of Hunan Colleges and Universities, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Two typical foaming methods called physical and chemical foaming as well as molding technique and equipments for foamed wood/plastic composites were introduced in detail. Effects of processing parameters in compression molding, injection molding and extrusion molding on end products were also summarized. Finally, the trend and perspective of micro-foamed wood/plastic composites were presented.

**Key words:** wood plastic composites; chemical foaming; physical forming; supercritical; forming process

## 0 引言

木塑复合材料 (wood plastic composites, WPC) 在美国材料试验协会标准 (american society for testing and materials, ASTM) 中的定义是: “一种主要以木材或纤维素为基础材料, 与一种或多种塑料制成的复合材料”。这个概念 20 世纪 70 年代诞生于意大利, 20 世纪 90 年代, 其产品北美得到迅猛发展, 21 世纪初, 迅速传到了印度、新加坡、马来西亚、日本、中国<sup>[1]</sup>。木塑复合材料既保留了木材在加工性能方面的优势, 又克服了木材不耐用的缺陷, 并且原料丰富, 可回收, 其废弃物能重新利用, 因而能有效减少环境污染, 保护

森林资源<sup>[2]</sup>。

尽管木塑复合材料具有上述优点, 但由于植物纤维在加工过程中被压缩导致制品密度大于普通木材, 纤维的加入降低了塑料的韧性, 而亲水性纤维与疏水性塑料之间的低黏结力又导致复合材料的抗冲击强度和抗弯曲强度等力学性能逊色于纯塑料<sup>[3]</sup>。这使得木塑复合材料的应用范围受到了一定限制, 阻碍了它在工民用领域的发展。

发泡木塑复合材料是将塑料、木粉、填料、发泡剂和各种助剂按一定比例混合, 在成型过程中通过成核剂作用向复合材料内部引入非常小的泡孔而形成的。该材料除具备普通木塑复合材料的优点外, 内部

收稿日期: 2010-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10972076, 10672197), 湖南省杰出青年基金资助项目 (07JJ1001), 湖南省自然科学基金资助项目 (09JJ6083), 湖南省教育厅基金资助项目 (09C317, 09C318)

作者简介: 曾广胜 (1975-), 男, 湖南洞口人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事包装工程及高聚物加工工程方面的研究, E-mail: Guangsheng\_zeng@126.com

良好的泡孔结构可以钝化裂纹尖端,阻止裂纹扩展,克服了一般木塑复合材料脆性大、抗冲击强度弱和伸长率低的缺点<sup>[4]</sup>。其工程力学性能大大超过了木材,而树脂用量却大量削减,相对节约了成本,同时降低了材料的密度,提高了隔音、隔热效果<sup>[3]</sup>。此外,发泡还赋予了产品更精确的外观尺寸和优良的表面质感,并且便于安装,成为物流包装等行业代木代塑产品发展的主要趋势<sup>[5]</sup>。下面笔者将主要从基本原材料、发泡技术、加工成型设备及工艺参数等方面对发泡木塑复合材料进行系统介绍,以引起人们对该材料的重视,使发泡木塑复合材料产业形成一定的规模,以缓解目前森林资源短缺和石油资源匮乏的问题,并提高社会经济产值。

## 1 发泡木塑复合材料的基本原材料

### 1.1 植物纤维填料

植物纤维原料大体可分为木材纤维原料类(如木材、木粉、刨花、锯末、废旧木材)和非木材纤维原料类(如竹类、棉杆、麻杆、麦秸、稻草、稻壳、甘蔗渣等)。其主要化学成分包括纤维素、半纤维素、木质素,其中纤维素可有效增强复合材料的力学性能,是复合材料的功能组成部分,在对植物纤维进行选择时,这是一个需要考虑的重要因素。木塑复合材料发泡改性对植物纤维填料的材质及处理方法提出了更高的要求,特别是在对新材料性能要求较高的情况下进行木塑复合材料发泡改性,对植物纤维填料材质及处理方法要求会更高。采用非木材植物纤维生产发泡木塑复合材料也是近年来木塑复合材料研究的方向,在国外,麦秸、稻草、稻壳等非木材纤维原料已经实现工业化应用。

### 1.2 塑料基体

木塑复合材料所采用的塑料基体都是热塑性的,是在基体材料加热熔融状态下复合成型的。对于发泡木塑复合材料,基体塑料的选择还与该材料的加工温度密切相关。当加工温度高于 200 °C 时,植物纤维就可能发生降解,而且木塑复合材料的热传导率低,黏度较大,剪切产生的热量聚集也会促使植物纤维的降解与裂化,因此木塑复合材料中的热塑性塑料通常只能选用加工温度低的塑料,如聚乙烯(polyethylene, PE)、聚丙烯(polypropylene, PP)、聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)、聚苯乙烯(polystyrene, PS)等。此外,熔融流动指数(melt flow index, MFI)也是选择木塑复合材料基体塑料时所需考虑的因素之一。熔融流动指数越高,熔体黏度越低,植物纤维在熔体中的浸

润性越好,分布越均匀,发泡过程中产生的气泡也更加均匀。

### 1.3 发泡剂

依据发泡过程中产生气体方式的不同,用于发泡木塑复合材料的发泡剂可分为物理发泡剂和化学发泡剂 2 种。

物理发泡剂是在材料成型过程中受热自身挥发或升华产生大量气体使混合物发泡的特殊助剂,如惰性气体  $N_2$ , 温室气体  $CO_2$  或低沸点液体丁烷、戊烷、二氯氟甲烷等。其中的丁烷、戊烷易燃易爆,挤出过程的静电聚集易放电产生火花而引燃制品;氯氟烃系列对地球臭氧层具有破坏作用,各国已禁用<sup>[6]</sup>。

利用超临界流体发泡技术制备发泡木塑复合材料是近年来研究的热点。超临界流体是指物质处于临界温度和临界压力以上的流体,其状态介于气体和液体之间,具有与气体相近的黏度和与液体相近的密度,它可以像气体一样扩散,也能像液体一样溶解<sup>[7]</sup>。因此,采用超临界流体发泡可有效缩短气体在混合物熔体中的饱和时间,增加成核密度,改善对泡孔尺寸的控制。在超临界液体中,  $CO_2$  以其温和的临界条件(超临界点的温度为 31.1 °C, 压力为 7.3 MPa)、无毒、无味、阻燃、经济易得等特点而倍受青睐<sup>[7]</sup>, 成为木塑复合材料超临界发泡的首选发泡剂。

化学发泡剂是在材料成型过程中经过热降解或化学反应释放出气体,并在熔体基体中形成气泡的一类助剂。在发泡过程中,发泡剂本身也会产生热效应,按照发泡过程中热量变化的不同可分为吸热型发泡剂(如  $NaHCO_3$ ) 和放热型发泡剂(如偶氮二甲酰胺和偶氮二异丁腈等)。化学发泡剂使用方便,无毒,无污染,价格便宜,但在成型过程中,释放气体的速度和泡孔大小难以控制,泡孔的分散性也比物理发泡剂差。

### 1.4 其它助剂

植物纤维中含有大量的羟基,具有很强的极性和亲水性,而热塑性塑料大部分都属于非极性或弱极性的疏水性材料,两者界面相容性较差,黏结力较小。植物纤维与塑料之间的相容性对木塑材料的力学性能有直接影响。由于黏结力小,复合材料受到外部载荷时,塑料部分所应力不易传递到植物纤维上,从而导致纤维与塑料间的缺陷逐渐扩大,时间一长,纤维就易从复合材料中析出<sup>[8]</sup>,并吸湿使材料膨胀,降低了材料的机械性能和尺寸稳定性。因此,制备发泡木塑复合材料之前必须改善两者之间的界面相容性。目前最常用的方法是采用增容剂来改善两者的界面相容性,如采用马来酸酐接枝聚烯烃、硅烷偶联剂、钛酸酯类偶联剂以及铝酸酯类偶联剂等。由于植物纤维中含有

大量的羟基,会形成氢键,使纤维易聚集成团,造成复合材料的流动性较差,极易磨损设备,同时纤维的团聚还可能恶化气泡结构。故必须在生产过程中加入一定量的润滑剂以降低混合体系熔融黏度,改善流动性能。例如马来酸酐接枝聚乙烯(polyethylene-graft-maleic anhydride, PE-g-MAH)可成为复合材料良好的内润滑剂,在植物纤维与聚合物间起润滑作用<sup>[9]</sup>。

## 2 发泡木塑复合材料的发泡方法

发泡木塑复合材料是在木塑复合材料配方的基础上引入气体成分,在材料内部形成微小气泡来实现的,根据引入气体方法的不同可分为化学发泡法和物理发泡法。由于物理发泡法对工艺条件和设备要求较高,目前应用最广泛的还是化学发泡方法。

### 2.1 化学发泡法

化学发泡法与传统塑料发泡类似,是通过在复合材料的配方中加入适量发泡剂和其它助剂来实现的。

化学发泡法中2种发泡剂热分解行为的不同会影响复合材料熔体的粘弹性和泡孔的结构。其中,吸热型发泡剂可冷却基体,稳定气泡结构;放热型发泡剂则可能导致不可控制的热量发展并降低熔体黏度,进而出现气泡合并或产生大气泡现象。L. M. Matuana等研究了用吸热型和放热型发泡剂挤出发泡成型硬质PVC/木粉复合材料的过程,发现放热型发泡剂得到的气泡平均尺寸比吸热型的小,发泡后复合材料的延展性能得到提高,空隙率可达35%;但拉伸性模量和拉伸强度降低<sup>[10]</sup>。

不仅发泡剂类型会对复合材料的发泡效果产生影响,发泡剂的用量也是泡孔尺寸与分布的影响因素之一。Li Qingxiu研究了化学发泡剂的用量、种类及是否制成发泡母料对发泡高密度聚乙烯(high-density polyethylene, HDPE)/植物纤维复合材料孔隙率以及泡孔形态的影响。结果表明:1)发泡剂的种类(放热型或吸热型)及是否做成母料不会影响材料的孔隙率;2)无论采用何种发泡剂,其用量对复合材料中气泡的平均孔径影响显著,当发泡剂质量为木料总质量的0.5%时材料的孔隙率达到最大值;3)选用合适的偶联剂有助于获得较高的孔隙率<sup>[11]</sup>。

在发泡过程中,单一的发泡剂往往很难达到令人满意的效果,人们通常采用两种或多种发泡剂并用或者添加适当的活化剂来调节发泡分解温度和速率的方法来改进发泡工艺,稳定泡沫结构,提高发泡质量。阎春棉等人研究了ZnO和Zn(St)<sub>2</sub>对丙烯腈-苯乙烯树脂(acrylonitrile-styrene resin, AC)发泡剂的活化作用,发

现它可以使AC发泡剂的分解温度明显降低,与PE挤出温度相适应。当ZnO与Zn(St)<sub>2</sub>的质量比为3:1时,发泡助剂对泡孔结构影响很大,随着其用量的增加,泡孔直径变大,泡孔开始破裂,材料表面粗糙,回弹性不好,泡沫收缩严重<sup>[12]</sup>。

发泡木塑复合材料是在塑料熔体中引入了大量的木粉,而木粉一般是作为分散相分布于塑料基体中的,在加工过程中可以充当成核剂促进发泡,提高发泡效果。D. Rodrigue等人证明木粉可以作发泡成核剂,在一定的范围内增加木粉用量有助于提高泡孔密度,减小泡孔的平均尺寸<sup>[13]</sup>。除了木粉可以作为发泡过程中的成核剂外,蔡剑平还发现木粉中的水分在物料挤出过程中也可起成核剂的作用,可使制品获得均匀的泡孔结构<sup>[14]</sup>。然而当木粉中的水分超过一定量时,又会降低物料的黏度,破坏发泡剂所形成的均匀泡孔,使得制品泡孔大小不一;且在模头出口逸出大量水汽,导致表面结皮。由此可见,在加工过程中一定要对木粉进行干燥处理,并且严格控制木粉的含水量。

### 2.2 物理发泡法

物理发泡法是在一定条件下先将气体(惰性气体或低沸点液体)直接渗透到制备完成的木塑复合材料中,再通过降压或升温的方法使其中的气体释放,从而在材料中间产生微孔结构的过程。

1997年,S. Doroudiani等人成功将HDPE与牛皮纸浆、木粉进行混合,经过造粒,注射成样条;然后向样条中注入超临界CO<sub>2</sub>达到饱和状态;最后快速加热使其发泡<sup>[15]</sup>。P. Rachtanapun等人采用分步发泡法制备了HDPE/PP/植物纤维的微发泡复合材料<sup>[16]</sup>。他先将HDPE/PP/植物纤维复合物浸泡在CO<sub>2</sub>气体中;然后将已浸透了CO<sub>2</sub>的试样迅速放入热的甘油浴中,在不同的温度下发泡;发泡一定时间后迅速将试样放入冷水中冷却。结果表明:植物纤维的加入不但降低了CO<sub>2</sub>在复合材料中的溶解度,而且还加速了CO<sub>2</sub>在发泡时的逸出,不利于微泡体结构的产生。所以,在物理发泡过程中发泡木塑复合材料中木粉的含量不能过高,通常要远低于未发泡的最大含量。

气体发泡过程中浸透压力是一个非常重要的工艺参数,会直接影响复合材料物理发泡效果。S. Doroudiani等人比较了物理发泡中浸透压力及植物纤维含量对CO<sub>2</sub>气体在复合材料中的溶解及扩散能力的影响,发现气体压力的影响显著。除了浸透压力外,发泡木塑复合材料组分比例也会对材料的发泡效果产生影响。S. Doroudiani等人采用物理发泡法生产PS/植物纤维复合材料,研究了复合材料植物纤维的含量与材料力学性能之间的关系。发现植物纤维用量对泡孔

大小和分布的影响最大,还会影响到材料的拉伸强度和冲击强度。研究表明:当植物纤维质量分数为20%时,复合材料的冲击强度相对于未发泡材料提高了近3倍<sup>[15]</sup>。

### 3 发泡木塑复合材料的成型工艺

发泡木塑复合材料的基体是热塑性塑料,以植物纤维作为填充料,因而生产的制品表面会有一层结皮,内层形成发泡,是一种低发泡材料,这种发泡工艺是一种可控发泡工艺<sup>[15]</sup>。目前发泡木塑复合材料的成型工艺主要有模压成型、注射成型和连续挤出成型3种。这3种成型工艺不仅所需设备及产品形态有所区别,在成本控制、工艺路线设计上也不尽相同。

#### 3.1 模压成型及其影响因素

模压发泡成型一般采用两步成型方法,即先把改性过的植物纤维、热塑性塑料、发泡剂及各种其它助剂在挤出机上进行混合造粒,使材料中的各组成部分混合均匀,得到发泡母料,这一阶段的加工温度低于发泡剂的分解温度。然后再将上述母料放入硫化机中发泡成型。该种成型方法制得的产品外观平滑、理化性能优良,但是工艺复杂,往往不能连续生产,生产效率低下。

##### 3.1.1 温度

对模压成型,不同植物纤维含量和塑料基体的复合材料对温度要求也不一样。植物纤维含量越高,所需温度相应也会提高,但不能过高,要防止发泡剂的提前分解和植物纤维的碳化<sup>[17]</sup>。模压时,不同的塑料基体成型温度也是不同的。模压前,用低于成型温度20~40℃的温度对物料进行预热可以确保物料在模具内充满,并且制得的产品外观平滑,尺寸规整。在成型时,温度能使塑料基体熔融、发泡剂分解即可;而脱模温度一般控制在90~100℃。

##### 3.1.2 时间和压力

不同材料对模压时间和压力也有不同要求。模压时间和压力一般根据材料的流动性能进行判断,流动性好的物料,模压压力和时间均较小,若压力过大,释放压力时,物料易从模具溢出,同时由于压力骤降,物料的黏性较小,发泡剂分解出的气泡会从熔体中逸出,使得泡孔坍塌,得不到泡孔分布均匀、泡孔大小合适的发泡材料。加压以后还要进行一定时间的保压,可以使模腔内的物料充分熔融并形成均匀的体系,这样制品的性能会有很大提高。

#### 3.2 注射成型及其影响因素

注射成型是发泡木塑复合材料成型加工中一个崭

新的研究领域,目前还处于探索阶段。低压结构发泡是当前主要采用的木塑共混复合材料注塑成型方法,注塑出的制品表面致密,制造过程中模腔压力小,合模力小,生产成本较低,故在实际工业生产中被广泛采用,特别是利用它进行小配件成型优势更为明显。但由于不能实现连续化生产,所以生产效率不高。发泡木塑复合材料注塑成型工艺通常可采用两步法和一步法2种工艺路线<sup>[18]</sup>。两步法与模压成型的两步法类似,即先造粒后成型,将经干燥处理和表面改性的纤维填料、基体树脂、化学发泡剂等添加剂置于高速混合机中,经充分搅拌后由单螺杆或双螺杆挤出机挤出造粒,再用注塑机注射发泡成型。这种工艺由于经过挤出机的挤出造料,提高了纤维填料在树脂基体中的分散性能,且造粒后加料也较容易。但会使整个工艺过程变得复杂,生产效率受到限制。一步法即采用表面改性后的植物纤维、基体树脂、化学发泡剂等添加剂经高速混合后直接加料注塑,可省去造粒这一工序,生产效率高。但这一工艺对设备的要求较高,且混合发泡过程完全在注塑机中完成,混合与发泡效果受到一定影响。

##### 3.2.1 模具温度

模具温度对制品表面粗糙度、表层结皮厚度、生产周期等有一定的影响,对泡孔直径大小影响较弱。模具温度高,则制品的表面粗糙度低、表层较薄,但生产周期较长。相反,则制品表面粗糙、表层较厚,生产周期缩短。

##### 3.2.2 注塑压力

压力越高,气体在熔体中的溶解度就越高。注塑压力较高,则带有应力的熔体流经通道时会生成较多的泡孔;注塑压力小则生成的泡孔大,且分布不均匀,同时,熔体难以充满模腔,制品表面容易产生缺陷。可根据制品的要求改变压力大小,从而得到所需产品。

##### 3.2.3 注塑速率

注射速率对发泡材料泡孔大小和分布均匀程度有重要影响。注射速率过慢,熔体在模腔内过早冷却,流动性变差,使得气泡在熔体中的数量减少;注射速率过快,泡孔在熔体中的分布不均匀,同时熔体与模腔的剪切作用增强,使制品表面粗糙,结皮严重。因此,确定适当的注塑速率是制得良好制品的关键。

##### 3.2.4 成型温度

成型温度也是影响木塑发泡材料泡孔大小和数量的重要因素。成型温度过高,熔体强度下降,气泡在熔体中易合并、逸出,得到的制品泡孔大小不均匀,泡孔数量少。同时,植物纤维在过高的温度下易分解,制品的强度也会受到较大影响。成型温度过低,熔体黏

度大,气泡在熔体中扩散困难,就会使得制品泡孔数量少。

### 3.3 挤出成型及其影响因素

挤出发泡成型是发泡木塑复合材料实际生产中运用最多的一种成型方法,可以实现连续化生产,生产效率高,但产品多为直线型型材。其成型设备主要有单螺杆挤出机、双螺杆挤出机及串连阶式挤出系统。单螺杆挤出机的排气效果较差,不能有效地排出植物纤维中的水分和挥发物,因而应用受到较大限制。为了解决这一问题,人们发明了一种新型的复合材料挤出发泡系统—串连阶式挤出机<sup>[16]</sup>。该装置在两阶挤出机的交接处设有排气口,可连续地去除水分和注入物理发泡剂或化学发泡剂。同无排气口的单螺杆挤出机相比,串连系统可均匀地混合和有效地脱挥,因而可显著改善泡孔形态,明显提高制品的表面质量<sup>[19-20]</sup>。

#### 3.3.1 温度

在发泡木塑复合材料制备过程中,温度是影响木塑产品发泡质量的主要因素之一。

物料输送段温度不可过高,既要保证物料能够快速熔融,也要防止发泡剂等一些助剂提前分解。熔融段要使发泡剂能够分解并产生大量的气泡,同时要避免植物纤维在过高的温度下碳化。在挤出机机头,在确保熔体具有一定的流动性的同时,熔体的黏度也要能包裹住气体,避免在机头内发泡。阎春绵研究发现口模温度对发泡制品的品质影响较大:当温度过高时,熔体弹性变差,气泡破裂,气体散失,制品表面毛糙,发泡出现不均匀大孔,密度有上升趋势;当口模温度太低时,发泡剂分解不均匀,也不会得到均匀、密度较低的发泡制品<sup>[12]</sup>。因此,在挤出发泡过程中,要求熔体的流变状态、发泡剂的分解和塑料的交联行为相适应。

#### 3.3.2 挤出压力

挤出压力对木塑发泡材料制品表面粗糙度、弯曲强度、发泡率等都有影响。较高的挤出压力既能控制机头内的含气熔体,避免提前发泡,而且还能增大挤出机口模内外压力差,从而增大压降速率,有利于提高发泡率,得到均匀细密的泡孔结构<sup>[21]</sup>。口模压力可以通过调节挤出机螺杆转速、口模温度及口模形状来实现。

#### 3.3.3 螺杆转速

挤出机螺杆转速决定了熔体压力和剪切应力大小。熔体黏度对剪切应力的敏感性较大,即塑料熔体的黏度直接受螺杆转速的影响,也即螺杆转速影响发泡木塑复合材料的性能<sup>[22]</sup>。螺杆转速高,则剪切应力大,熔体黏度低,此时熔体包裹气体困难,易造成气泡合并和坍塌;螺杆转速低,则剪切应力小,熔体黏

度高,气泡在熔体中难以分散均匀,得到的发泡木塑制品泡孔不均匀、数量少。同时,木塑发泡材料加工成型也较困难,生产效率低下。L. M. Matuana 等<sup>[23]</sup>用因子分析法研究了材料组分和挤出加工参数对发泡 PP/木粉的统计学影响,并通过专家系统软件分析了螺杆转速对样本孔隙率的影响,结果表明:孔隙率数据与转速较符合线性模型,螺杆转速在 20~50 r/min 狭窄范围内对孔隙率影响不大。

## 4 发泡木塑复合材料的研发趋势

1) 开发高性能复合发泡剂和发泡助剂,改进材料配方,在降低制品密度的同时提高制品的工程力学性能;促进发泡木塑复合材料在物流包装等行业取代现有木材和塑料制品的进程,以提高环保水平,降低材料成本。

2) 加大对发泡木塑复合材料专用设备的研发力度,改进现有成型工艺,开发适用多种材料生产的一体机,提高材料生产效率和产品性能。

3) 将先进的计算机模拟与控制技术引入发泡木塑复合材料的配方设计和工艺控制中,实现从配方到设备各个参数确定的高度智能化控制。L. M. Matuana 等已在这方面做了探索性研究<sup>[21]</sup>。

4) 对发泡木塑复合材料的综合性能进行研究,改善复合材料对水的高阻碍性能,提高制品防腐性能、色泽稳定性能、抗紫外线性能等。

5) 加大对废旧塑料和回收木塑复合材料综合利用的研究,拓宽发泡木塑复合材料原材料的来源,更好地实现新材料的环保效应。

### 参考文献:

- [1] Pritchard G. Two Technology Merge: Wood Plastic Composites[J]. *Plastics, Additives and Compounding*, 2004, 6(4): 18-21.
- [2] 刘涛,何慧,洪浩群,等.木塑复合材料研究进展[J]. *绝缘材料*, 2008, 41(2): 38-41.  
Liu Tao, He Hui, Hong Haoqun, et al. Process in Study on Wood-Plastic Composites[J]. *Insulating Materials*, 2008, 41(2): 38-41.
- [3] 薛平,贾明印,王哲,等.PVC/木粉复合材料挤出发泡成型研究[J]. *工程塑料应用*, 2004, 32(12): 66.  
Xue Ping, Jia Mingyin, Wang Zhe, et al. Study on Extrusion Foaming Processing of PVC/Wood-Flour Composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2004, 32(12): 66.
- [4] 国明成,王洪,彭玉成.PVC/植物纤维微孔发泡技术的研究[J]. *塑料*, 2002, 31(4): 20-24.

- Guo Mingcheng, Wang Hong, Peng Yucheng. Study on Microcellular Foaming Technology of PVC/Plant Fiber [J]. *Plastics*, 2002, 31 (4): 20-24.
- [5] Schut J H. Foaming Expands Possibilities for Wood-Fiber Composites [J]. *Plastic Technology*, 2001, 47(7): 10.
- [6] 马立波, 王自瑛. 发泡PE木塑复合材料的研究进展[J]. *塑料工业*, 2008, 36(增刊): 52-53.  
Ma Libo, Wang Ziyang. Advance in Research on Wood/Foamed PE Composites[J]. *China Plastics Industry*, 2008, 36(S1): 52-53.
- [7] 陈秀娟, 许国志. 超临界流体在聚合物中应用现状及发展前景 [J]. *中国塑料*, 2002, 16 (2): 11-14.  
Chen Xiujuan, Xu Guozhi. Application Situations of SCF in Polymers and Their Development Prospect[J]. *China Plastics*, 2002, 16 (2): 11-14.
- [8] Geng Y, Li K, Simonsen J. Effects of a New Compatibilizer System on the Flexural Properties of Wood-Polyethylene Composites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, 91(6): 3667-3672.
- [9] Li T Q, Wolcott M P. Rheology of Wood Plastics Melt, Part 2: Effects of Lubricating Systems in HDPE/Maple Composites[J]. *Polym. Eng. Sci.*, 2006, 46(4): 464-473.
- [10] Matuana L M, Mengelglu F. Microcellular Foaming of Impact-Modified Rigid PVC/Wood-Flour Composites[J]. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 2001, 7 (3): 142.
- [11] Li Qingxiu, Matuana L M. Foam Extrusion of High Density Polyethylene/Wood-Flour Composites Using Chemical Foaming Agents[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2003, 88(14): 139.
- [12] 阎春棉, 刘冬亮, 王振保, 等. 化学发泡法挤出PE低发泡材料研究[J]. *郑州轻工业学院学报*, 1999, 14(2): 58-61.  
Yan Chunmian, Liu Dongliang, Wang Zhenbao, et al. Study on Extrude PE Low Expanding Material with Method of Chemical Foaming[J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Light Industry*, 1999, 14 (2): 58-61.
- [13] Rodrigue D, Souici S, Twite-Kabamba E. Effect of Wood Powder on Polymer Foam Nucleation[J]. *Journal of Vinyl Additive Technology*, 2006(12): 19.
- [14] 蔡剑平. 木粉/聚乙烯复合发泡挤出技术研究[J]. *中国塑料*, 2004, 18(6): 54-58.  
Cai Jianping. Study on Wood Powder Filled Polyethylene Foam [J]. *China Plastics*, 2004, 18 (6): 54-58.
- [15] Doroudiani S, Kortschot M T, Park C B. Structure and Mechanical Properties Study of Foamed Wood-Fiber/Polyethylene Composites[J]. *SPE ANTEC Technical Papers*, 1997, 43: 2046-2050.
- [16] Rachtanapun P, Selke S E M, Matuan L M. Microcellular Foam of Polymer Blends of HDPE/PP and Their Composites with Wood Fiber[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2003, 88: 2843-2850.
- [17] 肖亚航, 傅敏士. PP/秸秆复合材料的热压成型工艺研究 [J]. *工程塑料应用*, 2005, 33(1): 34-36.  
Xiao Yahang, Fu Minshi. Forming Technology of PP/Straw Composites by Hot Pressing [J]. *Engineering Plastics Application*, 2005, 33 (1): 34-36.
- [18] 王超, 何继敏. 木塑复合材料注射成型的研究进展 [J]. *工程塑料应用*, 2008, 36(6): 81-84.  
Wang Chao, He Jimin. Development of Injection Molding of Wood-Plastics Composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2008, 36 (6): 81-84.
- [19] Zhang H, Rizvi G M, Park C B. Development of an Extrusion System for Producing Fine-Celled HDPE/Wood-Fiber Composite Foams Using CO<sub>2</sub> as a Blowing Agent[J]. *Advance Polymer Technology*, 2004, 23(4): 263.
- [20] Rizvi G M, Pop-Iliev R Parky C B. A Novel System Design for Continuous Processing of Plastic/Wood-Fiber Composite Foams with Improved Cell Morphology[J]. *Journal of Cellular Plastics*, 2002, 38(5): 367.
- [21] Matuana L M, Li Qingxiu. Statistical Modeling and Response Surface Optimization of Extruded HDPE/Wood-Flourcomposite Foams[J]. *Thermoplastic Composites Material*, 2004(17): 185.
- [22] 江波, 许澎华, 张金斌. 木塑复合材料成型技术装备的研究现状与发展方向[J]. *橡塑技术与装备*, 2004, 31(12): 4-13.  
Jiang Bo, Xu Penghua, Zhang Jinbin. The Present Status and Developing Trend of Wood and Plastic Composite Molding Technology and Equipment[J]. *China Rubber/Plastic Technology and Equipment*, 2004, 31 (12): 4-13.
- [23] Matuana L M, Li Qingxiu. Factorial Design Applied to the Extrusion Foaming of Polypropylene/Wood-Flour Composites [J]. *Cellular Polymers*, 2001, 20(2): 115.

(责任编辑: 蔡燕飞)