

# 化学发泡剂含量对秸秆纤维/聚丙烯复合材料性能的影响机理

李伟<sup>1,2a,2b</sup>, 郝加杰<sup>1</sup>, 李文鹏<sup>2a,2b</sup>, 袁泉<sup>2a,2b</sup>, 郭巍<sup>2a,2b</sup>, 孟正华<sup>2a,2b\*</sup>

(1.上汽通用五菱汽车股份有限公司, 广西 柳州 545007; 2.武汉理工大学 a. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室 b.汽车工程学院, 武汉 430070)

**摘要:** 目的 揭示发泡剂含量对微发泡注塑成型秸秆纤维/聚丙烯复合材料 (SF/PP) 密度及力学性能的影响规律, 提供制备低密度高性能 SF/PP 材料的发泡剂用量工艺参考。方法 以偶氮二甲酰胺 (AC) 为化学发泡剂, 制备了注塑发泡 SF/PP, 利用扫描电子显微镜、电子万能实验机和红外光谱测试等手段, 分析了不同发泡剂含量下 SF/PP 的拉伸、弯曲、冲击性能、泡孔微观形貌和分布以及复合材料红外光谱图, 通过实验对比分析了不同发泡剂含量下材料性能的变化规律。结果 当 AC 含量增加时, 微发泡 SF/PP 的密度先降低后升高, 冲击强度则先升高后降低, 拉伸和弯曲强度为逐渐降低。当 AC 的质量分数为 4% 时, 微发泡 SF/PP 的综合性能最佳, 泡孔结构最好; 微发泡 (SF/PP) 红外光谱图结果显示, 在  $3\ 420\ \text{cm}^{-1}$  处的—OH 伸缩振动峰强度高于未发泡复合材料的, 这表明秸秆纤维表面极性增大, 秸秆纤维与树脂之间的结合性变差, 导致微发泡 SF/PP 的拉伸强度低于未发泡材料的。结论 适当增加 AC 含量可使复合材料获得微小、致密的泡孔微观结构, 降低材料密度, 提升产品的力学性能; 但当 AC 含量过多时, 泡孔坍塌会使泡孔直径增大、泡孔结构变差, 从而影响复合材料的力学性能。

**关键词:** 微发泡注塑; 植物纤维复合材料; 泡孔结构; 力学性能

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.09.007

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2023)09-0057-08

## Effects of Chemical Blowing Agent Content on Properties of Straw Fiber/Polypropylene Composites

LI Wei<sup>1,2a,2b</sup>, HAO Jia-jie<sup>1</sup>, LI Wen-peng<sup>2a,2b</sup>, YUAN Quan<sup>2a,2b</sup>, GUO Wei<sup>2a,2b</sup>, MENG Zheng-hua<sup>2a,2b\*</sup>

(1. SAIC GM Wuling Automobile Co., Ltd., Guangxi Liuzhou 545007, China; 2. a. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, b. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate the effects of foaming agent content on the density and mechanical properties of straw fiber/polypropylene composites (SF/PP) under micro-foaming injection and provide a process reference for dosage of foaming agent for preparing low density high performance SF/PP materials. Foamed SF/PP was prepared with azodicarbonamide (AC) as chemical foaming agent. The tensile, bending and impact properties, cell morphology and distribution, infrared spectra tests were performed with a scanning electron microscope, an electronic universal testing machine and infrared spec-

收稿日期: 2022-10-08

Received: 2022-10-08

引文格式: 李伟, 郝加杰, 李文鹏, 等. 化学发泡剂含量对秸秆纤维/聚丙烯复合材料性能的影响机理[J]. 精密成形工程, 2023, 15(9): 57-64.

LI Wei, HAO Jia-jie, LI Wen-peng, et al. Effects of Chemical Blowing Agent Content on Properties of Straw Fiber/Polypropylene Composites[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(9): 57-64.

troscopy to analyze the changing rules of SF/PP with different foaming agent contents. The experimental results showed that, with the increase of AC content, the density of micro-foamed SF/PP decreased first and then increased, the impact strength increased first and then decreased, and the tensile and bending strength gradually decreased. When the AC content (wt.%) was 4%, the comprehensive performance of the micro-foamed SF/PP was optimal along with the suitable foam size and distribution. The infrared spectroscopy of SF/PP showed that the strength of the —OH stretching vibration peak of the micro-foamed composite at  $3\,420\text{ cm}^{-1}$  was higher than that of the un-foamed composite, which resulted in the increase of the cellular of the straw fiber surface and the poor bonding between the straw fiber and PP resin, leading to the lower tensile strength of the micro-foamed SF/PP than that of the un-foamed material. Suitable AC additions makes the cell tiny and dense during the injection, reduces the material density and improves the mechanical property of product, while overdose AC additions causes cell collapses, which increases the cell diameter and worsens the foam structure, and thus affects the chemical property of composites.

**KEY WORDS:** micro-foaming injection; plant fiber composite; cell structure; mechanical property

天然植物纤维（韧皮纤维、叶纤维、种子纤维、秸秆纤维、草茎纤维、木纤维等）具有可再生、可降解和强度高等优点，作为热塑性树脂的增强填充材料，越来越多地被用来制备高强度复合材料<sup>[1-2]</sup>。植物纤维复合材料具有成本低、力学性能好、VOC含量低等优点，在飞机、高铁、汽车零件上具有较好的应用前景<sup>[3-4]</sup>。相关研究表明<sup>[5-6]</sup>，植物纤维的种类、含量及填料成分等对植物纤维复合材料的力、热、气味和注塑成型性能有较大影响。秸秆纤维（SF）具有成本低、气味性好、密度低等优点<sup>[7]</sup>，是制备植物纤维复合材料常用的填充物之一。刘丁宁等<sup>[8]</sup>通过比较不同种类秸秆的纤维素、半纤维素和木质素含量，发现纤维成分的不同对复合材料的界面结合和力学性能有较大影响。杜珂珂等<sup>[9]</sup>研究发现，通过接种微生物菌剂（秸秆腐熟剂）进行生物预处理改性，能够提升秸秆纤维与酚醛树脂的界面结合强度，从而提升复合材料的性能。韩帮军等<sup>[10]</sup>研究发现，对秸秆纤维进行碱溶液蚀刻和微波辐照处理，可以有效降低纤维的表面极性，提高纤维在PVC内部的分散性，从而达到增强界面兼容性的效果。从整体性能来看，全秸秆纤维复合材料可作为木粉填充类木塑复合材料的潜在替代品，具有较高的研究价值<sup>[11]</sup>。改性聚丙烯（PP）是汽车内饰产品最常用的材料<sup>[12]</sup>，采用秸秆纤维/聚丙烯复合材料（SF/PP）注塑成型零件可满足汽车内饰质轻、环保和气味性优良的要求，在汽车内饰零件方面具有广泛的应用前景<sup>[13-14]</sup>。但随着秸秆纤维含量的增加，复合材料的密度会随之增大，不利于汽车内饰零件的轻量化。

微发泡注塑成型工艺是制备轻量化汽车内饰零件的有效手段之一<sup>[15-16]</sup>。翟玉娇等<sup>[17]</sup>研究发现，微发泡注塑时采用低压长时注气工艺和延长冷却时间可以有效消除微发泡注塑制品表面的大气泡，熔体温度、注气压差、储料长度都与消除大气泡所需的最佳冷却时间呈正相关。Bledzki等<sup>[18]</sup>研究发现，采用放热型发泡剂的微发泡木纤维/PP复合材料密度最小，泡孔直径最小，泡孔分布最均匀。Li等<sup>[19]</sup>揭示了化

学发泡过程中的气体反压工艺对熔体发泡作用的影响机理。龚世海<sup>[20]</sup>通过化学发泡注塑工艺生产了汽车翼子板踏护板，结果显示，重量减轻了12.52%，并且制件可以同时通过力学性能指标、常低温冲击性能、冷热交变性能等各项试验。

化学发泡工艺具有工艺成熟、设备简单等优势，能够实现汽车内饰的低成本制造。采用化学发泡注塑成型工艺制备SF/PP制品可进一步减轻植物纤维复合材料汽车内饰产品的重量，具有较好的应用价值。在微发泡注塑成型中，材料成分与成型工艺对产品力学性能的影响显著<sup>[21-22]</sup>，本文以偶氮二甲酰胺（AC）为化学发泡剂，采用微发泡注塑成型工艺制备微孔SF/PP，分析了发泡剂含量对SF/PP力学性能的影响规律和机理，以期汽车植物纤维复合材料内饰零件制造提供工艺参考，促进植物纤维复合材料微发泡零件在汽车上的应用。

## 1 实验

### 1.1 主要原料

通过实验研究发泡剂含量对SF/PP复合材料密度及力学性能的影响规律，使用热塑性树脂PP规格为K8303，生产厂家为燕山石化，复合材料中添加的材料主要有秸秆纤维、AC发泡剂、滑石粉以及ZnO，其材料规格属性及生产厂家如表1所示。

表1 实验材料及生产厂家  
Tab.1 Experimental materials and manufacturers

Experimental material	Specification	Manufacturers
PP	K8303	Sinopec Yanshan Petrochemical
Straw fiber masterbatch	80 Mesh	Jianglin High-tech
AC	A80	Shanghai Yuanye
Talc	100 Mesh	Guangxi Longguang
ZnO	40 nm	Shandong Xinya

1.2 主要设备及仪器

通过微发泡注塑成型工艺制备秸秆纤维/聚丙烯复合材料,使用的仪器主要有恒温干燥箱、混料机、造粒机、双螺杆挤出机以及单螺杆注塑机。对制备的复合材料进行泡孔微观形貌观察、力学性能测试以及红外光谱分析。实验中使用的仪器及生产厂家如表 2 所示。

表 2 实验仪器及生产厂家  
Tab.2 Experimental instruments and manufacturers

Equipment name	Types	Manufacturers
Thermostatic drying chamber	101A-1	Huyueming
Blending machine	SHR-10	Zhonghan
Pelletizer	LQ-20	Huiteng
Double screw extruder	SHJ-20	Hone
Melt flow rate instrument	MFI-1211	Gotech
Mletronic universal testing machine	CMT6104	Suns
Cantilever beam impact strength test machine	XJUD-5.5	HS-TEST
Scanning electron microscope	JSM-IT300	JEOL
Single screw injection molding machine	HDX50	Haiteng
Infrared spectrum measuring instrument	Nicolet IS10	Thermo Fisher
Electronic balance	FA2204B	Hengping

1.3 样品制备

将聚丙烯与秸秆纤维母粒干燥处理后称重,按照秸秆纤维质量分数为 20%进行配比,然后通过高速搅拌混合机将聚丙烯与秸秆纤维母粒混匀。通过双螺杆挤出机将混合粒料挤出造粒,得到 SF/PP 粒料备用。挤出机的工艺条件如下:机头温度为 185℃,机筒区域温度分别为 190、195、195、195℃,喂料机转速为 5 r/min,主机转速为 5.5 r/min。

对获得的 SF/PP 粒料进行干燥处理,不同组别发泡剂含量如表 3 所示,按表 3 进行配比得到 5 组 AC 含量不同的组别。将其分别在混料机中混合 5 min,之后在单螺杆注塑机中发泡注塑制备试验标准样条。

表 3 不同组别发泡剂含量  
Tab.3 Contents of blowing agent in different groups wt. %

Group	AC	ZnO	SF	PP
1	0	0	20	80
2	2	0.5	19.5	78
3	4	0.5	19.1	76.4
4	6	0.5	18.7	74.8
5	8	0.5	18.3	73.2

注塑机的工艺条件如下: I 区温度为 180℃, II 区、III 区、IV 区温度均为 185℃,注射压力为 70 MPa,保压压力为 60 MPa,冷却时间为 20 s。

1.4 性能测试与结构表征

密度测试。通过精密电子天平称重得到标准样条的质量,利用排水法得到标准样条的体积,根据密度公式计算得标准试样的密度,每组样品测试 5 次结果取平均值。

力学性能分析。根据 GB/T 1040—2006 测试拉伸性能,根据 GB/T 9341—2008 测试弯曲性能,根据 GB/T 1843—2008 测试悬臂梁缺口冲击强度。

红外光谱 (FTIR) 分析。使用压片法制样,对仪器进行校准后,将干燥的样品放置于红外光谱测试仪中进行数据采集。

泡孔结构分析。将发泡注塑工艺制备的测试样条在液氮中浸泡 3 h,在液氮的低温作用下,样条处于脆性阶段,取出样条对标记位置进行脆断处理,对脆断后的断面进行适当清理,之后进行喷金处理以改善样品的导电性能,最后通过扫描电子显微镜 SEM 观察脆微观形貌。本文测试样品的尺寸及样条标记位置如图 1 所示。通过 Image-pro 软件对脆断面 SEM 微观形貌进行处理,然后计算平均泡孔直径  $D(\mu\text{m})$  和泡孔密度  $N_f(\text{个}/\text{cm}^3)$ 。

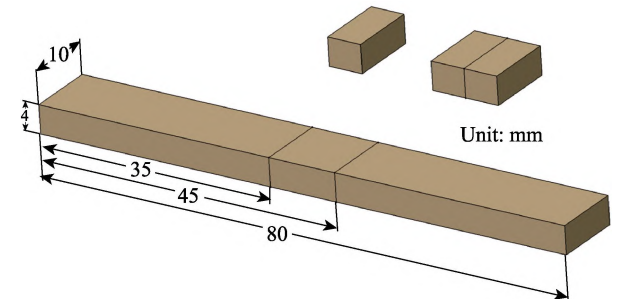


图 1 SEM 取样位置  
Fig.1 SEM sampling locationz

2 结果与讨论

2.1 发泡剂含量对密度的影响

图 2 为不同发泡剂含量下 SF/PP 样条的密度。可知,微发泡 SF/PP 的密度会随着 AC 添加量的增加而先降低后升高,发泡复合材料的密度均低于未发泡复合材料的密度。当 AC 的质量分数从 2%增大到 4%时,复合材料的密度快速降低,在质量分数为 4%时达到最低点,相比于未发泡复合材料密度,降低了 12%左右;随后当发泡剂的质量分数增大到 6%时,材料密度又快速增大;当发泡剂的质量分数为 8%时,材料密度已经超过质量分数为 2%时的材料密度,这表明发泡效果不理想。



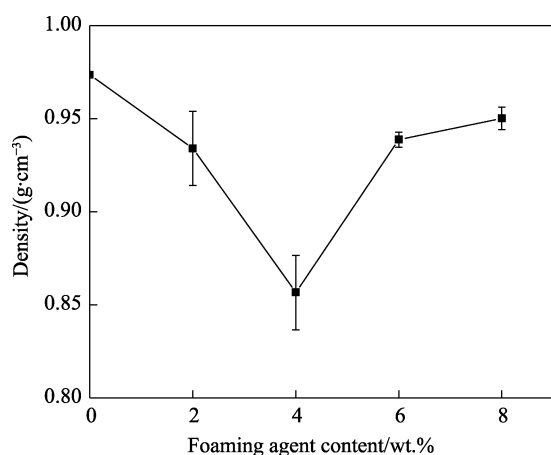


图2 发泡剂含量对密度的影响

Fig.2 Effect of foaming agent content on density

图3为不同发泡剂含量对应的复合材料微观结构。可以看出,当AC的质量分数为2%时,因发泡剂分解而产生的气体量少,泡孔数量较少,尺寸偏大,因而发泡SF/PP密度降低到0.93 g/cm<sup>3</sup>;当AC的质量分数增大到4%时,由于发泡剂受热分解产生的气体浓度升高,气体溶解度增大,从而导致发泡成核点数目增多,泡孔内气体压力也随之增大<sup>[23]</sup>,发泡SF/PP密度进一步下降为0.85 g/cm<sup>3</sup>;当发泡剂的质量分数增大至6%时,气体浓度超过临界值,导致泡

孔成核点数目过多,发泡剂受热分解速度加快,泡孔内部的压力增加导致部分气体从熔体内部逃逸出来造成泡孔破裂,发泡复合材料内部被压实、发泡复合材料密度增大。

图4为不同发泡剂含量下的泡孔尺寸图。可知,当AC的质量分数从2%增大到4%时,平均泡孔直径从85.55 μm降低到56.32 μm,泡孔密度从3.6×10<sup>9</sup>个/cm<sup>3</sup>增大到9.2×10<sup>9</sup>个/cm<sup>3</sup>;但随着AC的质量分数进一步增大至6%,平均泡孔直径大幅增大到181.68 μm,泡孔密度则大幅降低至4.6×10<sup>8</sup>个/cm<sup>3</sup>;当AC的质量分数为8%时,复合材料的平均泡孔直径处于最大值(187 μm),此时泡孔密度为2.0×10<sup>8</sup>个/cm<sup>3</sup>。

## 2.2 发泡剂含量对力学性能的影响

拉伸强度。图5为不同发泡剂含量下复合材料的拉伸应力-应变图与拉伸性能变化图。可知,微发泡SF/PP的拉伸强度随AC含量的增加而逐渐降低。未添加AC的SF/PP拉伸强度最大为22.32 MPa,而添加2% (质量分数) 发泡剂后,拉伸强度降至18.95 MPa,降低了约17.3%。随着发泡剂的质量分数增大到2%~4%,微发泡SF/PP的拉伸强度降低幅度减小。当发泡剂的质量分数增大到8%时,微发泡SF/PP的拉伸强度降低较多,较未发泡复合材料的下降了约30.4%。

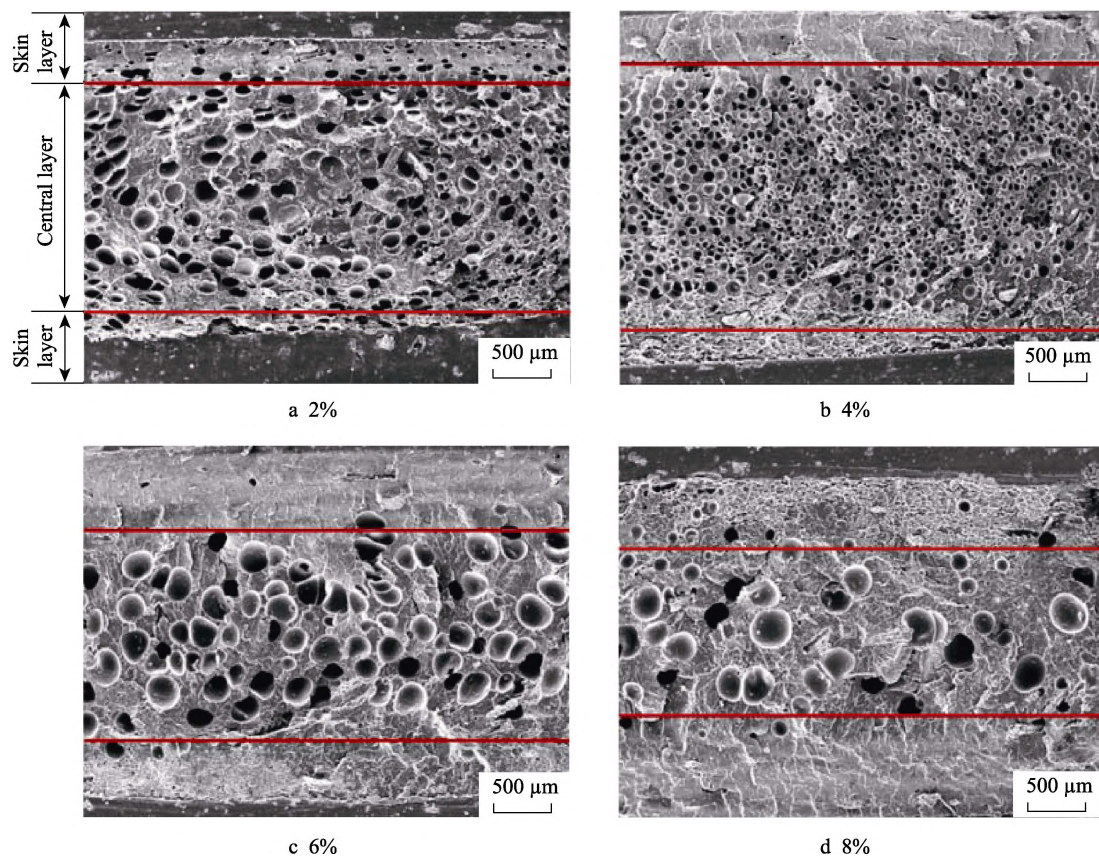


图3 不同发泡剂含量(质量分数)对应的复合材料微观形貌

Fig.3 Microstructure of composite materials with different blowing agent contents (wt.%)

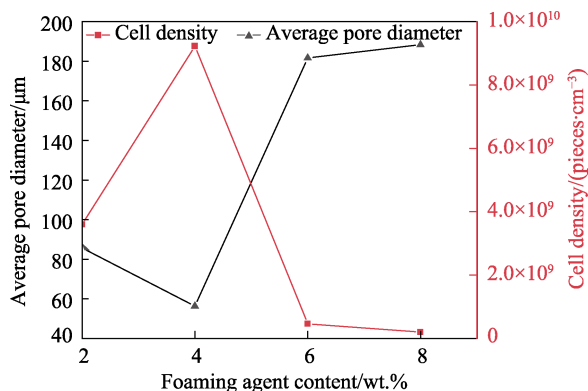


图 4 发泡剂含量对平均泡孔直径和泡孔密度的影响  
Fig.4 Effect of blowing agent content on average cell diameter and cell density

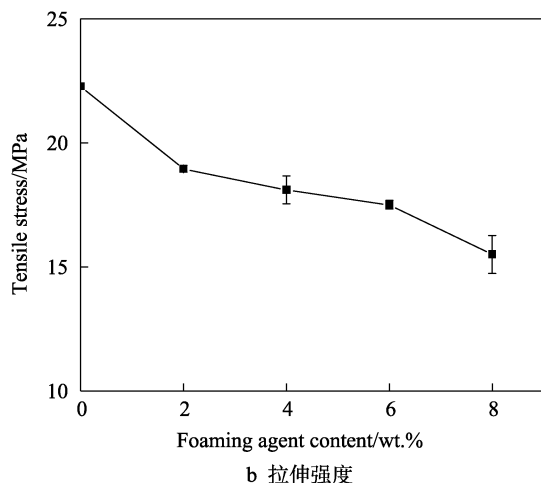
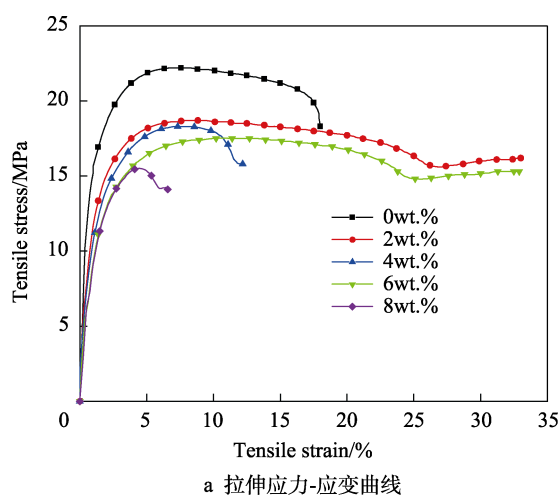


图 5 不同发泡剂含量下微发泡 SF/PP 的拉伸性能  
Fig.5 Tensile properties of micro-foamed SF/PP with different foaming agent contents: a) tensile stress-strain curve; b) tensile strength

由图 3 复合材料内部微观结构 SEM 图可以看出, 随着发泡剂含量的增加, 发泡剂受热分解产生的气体增加, 熔体内部气体浓度变大, 泡孔直径也随之变大, 导致有效横截面积减小, 这会影响复合材料的拉伸强度。当添加过量的发泡剂时, 内部泡孔会出现并泡等缺陷, 泡孔结构进一步变差, 容易产生应力集中, 导

致样条的拉伸强度进一步下降。

对发泡和未发泡材料进行红外光谱分析, 测试结果如图 6 所示。可以看到, 发泡和未发泡材料的红外光谱图曲线的走向及趋势大致相同, 对应的各个峰值也处于同一位置。结果表明, AC 并不改变发泡复合材料的官能团, 影响的是复合材料的物理属性。在  $1737\text{ cm}^{-1}$  位置, 半纤维素  $\text{C}=\text{O}$  官能团的伸缩振动吸收峰的峰强增大, 这是由于 AC 未完全分解, 残留物中仍含有  $\text{C}=\text{O}$  官能团<sup>[24]</sup>。在  $3420\text{ cm}^{-1}$  位置,  $-\text{OH}$  伸缩振动峰强度比未发泡复合材料的高, 这是由于发泡剂的添加导致发泡注塑成型材料内部产生的气体浓度过高, 植物纤维表面极性增大, 从而降低了秸秆纤维与树脂间的界面结合性。

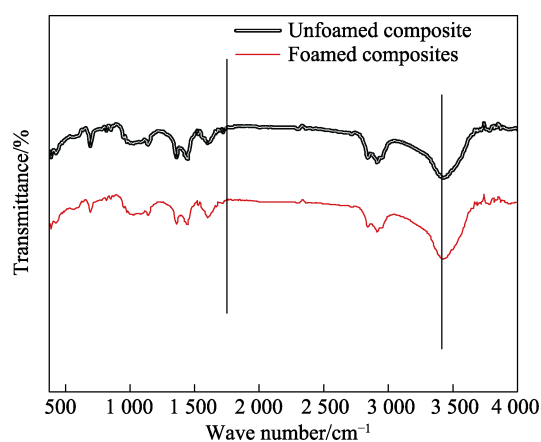


图 6 发泡与未发泡复合材料 FTIR 对比图  
Fig.6 Comparison of FTIR of foamed and un-foamed composites

弯曲强度。图 7 为 AC 含量对微发泡 SF/PP 弯曲性能的影响关系。可以看到, 微发泡 SF/PP 的弯曲强度随着 AC 含量的增加而降低, 未发泡时弯曲强度最大为  $21.63\text{ MPa}$ , 当 AC 的质量分数增大至 8% 时, 弯曲强度降至最低, 为  $17.35\text{ MPa}$ , 降幅约为 19.8%。这是由于添加了适量的发泡剂, 发泡剂受热分解产生气体的速率较低, 此时发泡分解产生的气体不会逸出, 复合材料内部的泡孔分布情况较为均匀且处于稳定成长状态, 而泡孔壁也随之逐渐减薄。当复合材料受到外部的作用力时, 由于内部存在分布均匀的泡孔与气体, 复合材料受力的有效面积减小, 导致弯曲强度较未发泡时的低; 当添加了过量的发泡剂时, 产生的大量气体未能全部包裹, 少量气体逸出, 在外力作用下容易导致泡孔结构产生裂纹, 进一步降低了复合材料的弯曲强度, 这与拉伸强度变化规律及原因相类似。

冲击强度。不同发泡剂含量下微发泡 SF/PP 冲击性能如图 8 所示。可知, 随着发泡剂的质量分数增大至 2%, 冲击强度增大至  $30.49\text{ kJ/m}^2$ 。当发泡剂质量分数增大为 4% 时, 冲击强度增大到最大值, 为

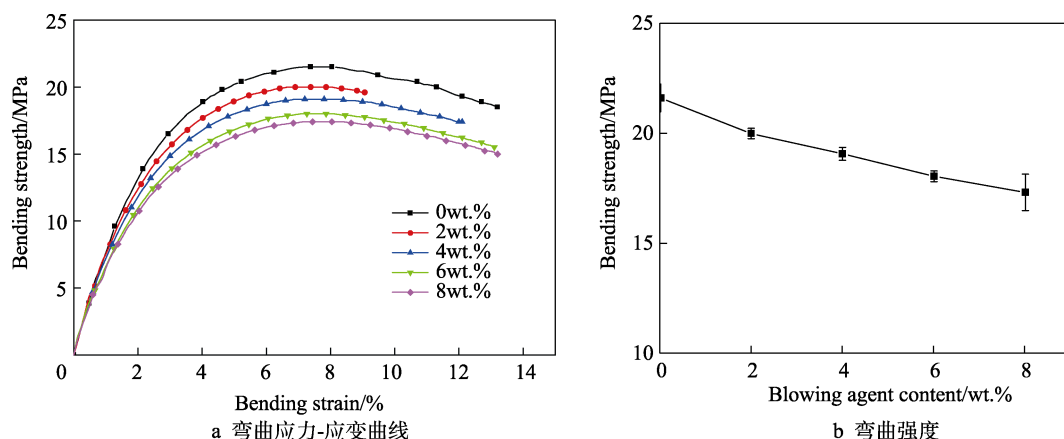


图7 不同发泡剂含量下微发泡 SF/PP 弯曲性能

Fig.7 Bending properties of micro-foamed SF/PP with different foaming agent contents: a) bending stress-strain curve; b) bending strength

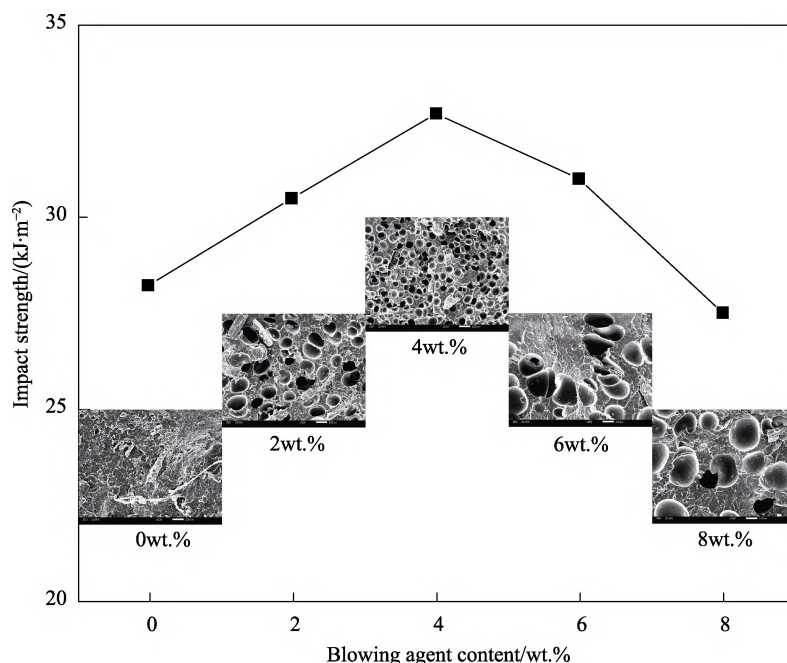


图8 不同发泡剂含量下微发泡 SF/PP 冲击性能

Fig.8 Impact properties of micro-foamed SF/PP with different foaming agent contents

32.71 kJ/m<sup>2</sup>。当发泡剂的质量分数为 6%和 8%时,添加过量,冲击强度分别降低至 31.01 kJ/m<sup>2</sup>和 27.52 kJ/m<sup>2</sup>。从图 8 曲线下方的 SEM 图可以看出,发泡剂含量对泡孔形态产生了一定的影响,从而导致复合材料冲击性能发生变化。

在未添加 AC 时,秸秆纤维与树脂的界面结合情况较好,在外力作用下 SF/PP 具有一定的冲击强度。当发泡剂的质量分数为 2%~4%时,微发泡 SF/PP 的泡孔结构较好。当复合材料受到冲击时,泡孔会在外力作用下先行吸收一部分能量而被压缩,有效提升了复合材料的韧性;此外,泡孔的存在有效遏制了样品内部裂纹的进一步扩展,从而提升了微发泡复合材料的抗冲击性能<sup>[8]</sup>。但添加过量的发泡剂会导致复合材料内部的泡孔结构状态不稳定,从而容易产生缺陷,

容易在外力作用下导致裂纹进一步延伸甚至断裂,使冲击强度降低。

对微发泡 SF/PP 的泡孔尺寸进行了统计,发泡剂含量对泡孔尺寸分布的影响如图 9 所示。从图 9a 可以看出,当 AC 的质量分数为 2%时,中心层的泡孔尺寸大部分为 40~120 μm,且有 23%的泡孔尺寸超过 100 μm;从图 9b 可以看出,当 AC 的质量分数为 4%时,泡孔尺寸进一步集中分布在 30~70 μm,呈现近似正态分布,这主要是由于 AC 含量的增加使复合材料内部产生了更多的成核点,导致泡孔尺寸变小,泡孔分布更加均匀密集;从图 9c—d 可以看出,进一步增加 AC 含量,生成的尺寸超过 100 μm 的泡孔占比进一步增加,导致泡孔尺寸分布趋于不均匀,泡孔结构变差,从而影响复合材料的力学性能。



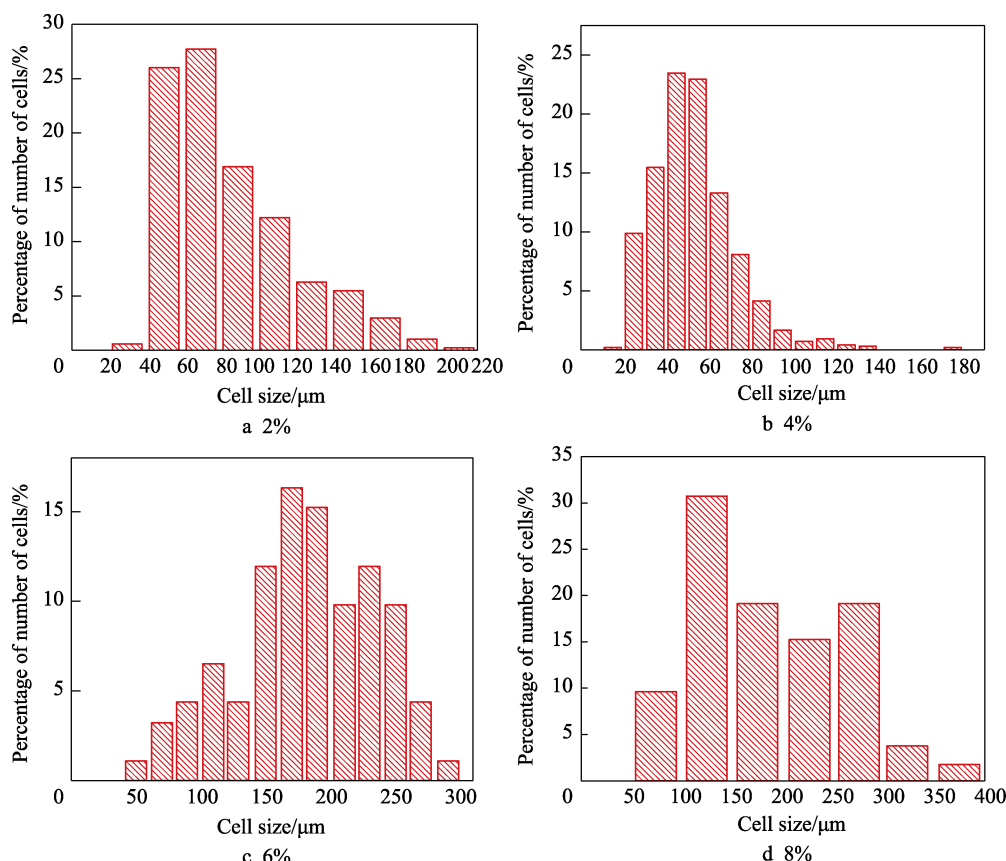


图9 发泡剂含量(质量分数)对泡孔尺寸分布的影响  
Fig.9 Effect of blowing agent content (wt.%) on cell size distribution

### 3 结论

1) 随着 AC 含量的增加, 微发泡 SF/PP 的密度先降低后升高, 冲击强度先升高后降低, 而拉伸和弯曲强度则逐渐降低。

2) 增加 AC 含量可以降低泡孔直径, 增加发泡密度与区域, 使泡孔的尺寸集中分布在 30~70 μm, 获得更加微小、致密的泡孔结构, 有利于提升 SF/PP 产品的力学性能; 当 AC 含量过多时, 会出现泡孔坍塌现象, 从而使泡孔直径增大, 泡孔结构变差, 降低 SF/PP 产品的力学性能; 当 AC 的质量分数为 4% 时, 微发泡秸秆纤维/聚丙烯复合材料的综合性能最佳。

3) 微发泡 SF/PP 在  $3420\text{ cm}^{-1}$  处的—OH 伸缩振动峰强度高于未发泡复合材料的, 发泡产生过量气体会降低复合材料的界面结合性能, 增大植物纤维表面极性, 进而导致微发泡 SF/PP 的拉伸强度低于未发泡材料的。

#### 参考文献:

[1] 张显, 蔡明, 孙宝忠. 植物纤维增强复合材料的湿热老化研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(5): 226-236.  
ZHANG Xian, CAI Ming, SUN Bao-zhong. Research Progress of Hygrothermal Aging of Plant Fiber Reinforced Composites[J]. Materials Reports, 2022, 36(5):

226-236.

- [2] 唐平, 曹红锦, 李佳蒙, 等. 天然植物纤维增强复合材料抗弹性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(8): 222-227.  
TANG Ping, CAO Hong-jin, LI Jia-meng, et al. Study on Elastic Resistance of Natural Plant Fiber Reinforced Composites[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(8): 222-227.
- [3] 任保胜, 王瑞, 任金芝, 等. 纳米  $\text{TiO}_2$ /碳化植物纤维复合材料的制备与光催化性能[J]. 复合材料学报, 2020, 37(5): 1138-1147.  
REN Bao-sheng, WANG Rui, REN Jin-zhi, et al. Preparation and Photocatalytic Properties of Nano  $\text{TiO}_2$ /Carbonized Plant Fiber Composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2020, 37(5): 1138-1147.
- [4] 张军, 何继敏. 注射发泡成型聚丙烯/木粉复合材料配方体系的研究[J]. 中国塑料, 2010, 24(8): 49-54.  
ZHANG Jun, HE Ji-min. Research on the Formula System of Injection Molded Foamed PP/Wood-flour Composites[J]. China Plastics, 2010, 24(8): 49-54.
- [5] FENG Y, LI Y, XU B, et al. Effect of Fiber Morphology on Rheological Properties of Plant Fiber Reinforced Poly(Butylene Succinate) Composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 44(1): 193-199.
- [6] TAKAGI H, LIU K, NAKAGATION A, et al. Enhanced Functional Properties of Natural Fiber-reinforced Composites[J]. Advanced Materials Research, 2013, 845:

- 845.
- [7] 王哲, 张效林, 徐冲, 等. 聚乳酸/麦秸秆纤维复合材料力学及吸水性能研究[J]. 中国塑料, 2018, 32(8): 46-51.  
WANG Zhe, ZHANG Xiao-lin, XU Chong, et al. Study on Mechanical and Absorbent Properties of Poly(Lactic Acid)/Wheat Straw Fiber Composites[J]. China Plastics, 2018, 32(8): 46-51.
- [8] 刘丁宁, 何春霞, 常萧楠, 等. PVC/秸秆类纤维复合材料性能[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(10): 6-11.  
LIU Ding-ning, HE Chun-xia, CHANG Xiao-nan, et al. Properties of PVC/Straw Fibers Composite[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(10): 6-11.
- [9] 杜珂珂, 雍宸, 孙恩惠, 等. 生物预处理秸秆纤维特性及复合材料的性能研究[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(4): 869-875.  
DU Ke-ke, YONG Cheng, SUN En-hui, et al. Properties of Bio-Pretreated Straw Fiber and Its Composite Materials[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2022, 39(4): 869-875.
- [10] 韩帮军, 顾仁政, 鹿钦礼. 农业废弃秸秆纤维填充聚氯乙稀复合材料兼容性的实验探究[J]. 塑料科技, 2021, 49(8): 11-15.  
HANG Bang-jun, GU Ren-zheng, LU Qin-li. Experimental Study on the Compatibility of Polyvinyl Chloride Composites Filled with Agricultural Discarded Straw Fiber[J]. Plastic Science and Technology, 2021, 49(8): 11-15.
- [11] CHEN J, SU M, YE J, et al. All-Straw-Fiber Composites: Benzylated Straw as Matrix and Additional Straw Fiber Reinforced Composites[J]. Polymer Composites, 2014, 35(3): 419-426.
- [12] 方鹤, 赵学诗, 陈廷勇, 等. 汽车内饰专用高性价比改性聚丙烯的制备[J]. 合成树脂及塑料, 2018, 35(2): 53-57.  
FANG He, ZHAO Xue-shi, CHEN Ting-yong, et al. Preparation of Cost-effective Modified PP for Automotive Interior Part[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2018, 35(2): 53-57.
- [13] AHMED A, SAPUAN S, ZAINUDIN E, et al. Implementation of the Expert Decision System for Environmental Assessment in Composite Materials Selection for Automotive Components[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 107: 557-567.
- [14] AYRILMIS N, JARUSOMBUTI S, FUEANGVIVAT J, et al. Coir Fiber Reinforced Polypropylene Composite Panel for Automotive Interior Applications[J]. Fibers and Polymers, 2011, 12(7): 919-926.
- [15] 王惠添, 殷莎, 陈正伟, 等. 微孔发泡注塑技术研究进展[J]. 中国塑料, 2021, 35(10): 154-165.  
WANG Hui-tian, YIN Sha, CHEN Zheng-wei, et al. Research Progress in Microcellular Foam Injection Molding Technology[J]. China Plastics, 2021, 35(10): 154-165.
- [16] 任亦心, 刘君峰, 许忠斌, 等. 微孔发泡注塑成型工艺及其设备的技术进展[J]. 塑料工业, 2021, 49(2): 12-15.  
REN Yi-xin, LIU Jun-feng, XU Zhong-bin, et al. Technical Progress of Microcellular Foam Injection Molding Process and Equipment[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(2): 12-15.
- [17] 翟玉娇, 信春玲, 何亚东, 等. 微发泡注塑制品表面质量的优化研究[J]. 中国塑料, 2022, 36(2): 19-26.  
ZHAI Yu-jiao, XIN Chun-ling, HE Ya-dong, et al. Study on Surface Quality Optimization of Microfoaming Injection-Molded Products[J]. China Plastics, 2022, 36(2): 19-26.
- [18] BLEDZKI A, FARUK O. Effects of the Chemical Foaming Agents, Injection Parameters, and Meltflow Index on the Microstructure and Mechanical Properties of Microcellular Injection-molded Wood-Fiber/olypropylene Composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 97(3): 1090-1096.
- [19] LI S, SUN X, WANG R, et al. Experimental Investigation on the Forming and Evolution Process of Cell Structure in Gas Counter Pressure Assisted Chemical Foaming Injection Molded Parts[J]. Journal of Cellular Plastics, 2021, 57(5): 659-674.
- [20] 龚世海. 化学发泡工艺在汽车关键零部件轻量化中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.  
GONG Shi-hai. Application Research of Chemical Foaming and Simulation in Light Weight of Automobile Fender[D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [21] 段涛, 闫宝瑞, 代俊锋, 等. 模具温度对 SCF 微发泡注塑成型制品性能的影响[J]. 塑料科技, 2018, 46(7): 67-72.  
DUAN Tao, YAN Bao-rui, DAI Jun-feng, et al. Effect of Mold Temperature on Properties of SCF Microcellular Foam Injection Molding Products[J]. Plastics Science and Technology, 2018, 46(7): 67-72.
- [22] 张亚涛, 李海梅, 黄世欣, 等. 微发泡注塑成型 PC 制件的表面缺陷及形态分析[J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(4): 127-130.  
ZHANG Ya-tao, LI Hai-mei, HUANG Shi-xin, et al. Surface Defects and Morphology of Microcellular Injection Molded PC Parts[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2010, 26(4): 127-130.
- [23] 曾广胜, 黄鹤, 张礼. HDPE/杨木粉复合发泡材料的制备及其性能研究[J]. 塑料工业, 2015, 43(10): 66-70.  
ZENG Guang-sheng, HUANG He, ZHANG Li. Preparation and Characterization of HDPE /Poplar-wood Foamed Composites[J]. China Plastic Industry, 2015, 43(10): 66-70.
- [24] 吴振增, 魏起华, 谢拥群, 等. 植物纤维基发泡材料中有机—无机两相杂化效果表征[J]. 福建林学院学报, 2014, 34(3): 283-288.  
WU Zhen-zeng, WEI Qi-Hua, XIE Yong-qun, et al. Characterization of Organic-Inorganic Two Phase's Hybridized Effect in Plant Fiber-Based Foam Materials[J]. Journal of Forest and Environment, 2014, 34(3): 283-288.

责任编辑: 蒋红晨