

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.04.021

玻璃纤维含量对不同ABS微孔发泡行为与力学性能的影响

张翔, 蒋团辉, 李胜男, 曾祥补, 郭建兵

(贵州省材料产业技术研究院贵州省重晶石及其伴生资源高端化利用全省重点实验室, 贵阳 550016)

摘要:采用化学发泡注塑成型工艺制备了丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)/短切玻璃纤维(SGF)发泡复合材料,研究了SGF含量、ABS类型对ABS/SGF发泡复合材料泡孔结构和力学性能的影响。结果表明,随着SGF质量分数由0%增至20%,在低频率区的高冲击ABS(HIABS)/SGF复合材料的复数黏度呈增加趋势,而高流动ABS(HFABS)/SGF复合材料的复数黏度变化不明显,且未发泡HIABS/SGF的复数黏度明显高于未发泡HFABS/SGF的复数黏度;同时在低频率区,随着SGF含量的增加,未发泡HFABS/SGF复合材料的损耗因子增加,而未发泡HIABS/SGF复合材料的损耗因子降低。添加15%SGF时,HFABS/SGF发泡复合材料的泡孔直径达到最小,为37.19 μm ,泡孔密度最大,为 6.60×10^6 个/ cm^3 ,而HIABS/SGF发泡材料在添加5%SGF时的泡孔直径达到最小,为54.59 μm ,泡孔密度最大,为 1.51×10^6 个/ cm^3 ,且在相同SGF含量下,HFABS/SGF发泡复合材料的泡孔直径均小于HIABS/SGF发泡复合材料,而其泡孔密度均高于HIABS/SGF发泡复合材料。同时随着SGF含量的增加,HFABS/SGF发泡材料的拉伸强度均整体增加,而HIABS/SGF发泡材料的拉伸强度先降低后升高。HFABS/SGF发泡材料拉伸强度增幅为44.33%,比拉伸强度增幅为35.79%,而HIABS/SGF发泡材料拉伸强度增幅为29.51%,比拉伸强度增幅为16.24%;然而冲击强度均随着SGF含量的增加而降低,在相同SGF含量下,HIABS/SGF发泡复合材料的缺口冲击强度明显高于HFABS/SGF发泡复合材料。

关键词:玻璃纤维;丙烯腈-丁二烯-苯乙烯;化学发泡;力学性能;流变性能

中图分类号: TQ328.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)04-0185-09

Influence of glass fiber content on microcellular foaming behavior and mechanical properties of different ABS

ZHANG Xiang, JIANG Tuanhui, LI Shengnan, ZENG Xiangbu, GUO Jianbing

(Guizhou Key Laboratory of Advanced Utilization of Barite and Associated Resources, Guizhou Material Industrial Technology Institute, Guiyang 550016, China)

Abstract: Acrylonitrile-butadiene-styrene plastics(ABS)/ short glass fiber (SGF) foaming composites were prepared by chemical injection molding foaming process. The effects of SGF contents and ABS type on the structure of cells and mechanical properties of ABS/SGF composites were investigated. The results show that as the mass fraction of SGF increases from 0wt% to 20wt%, the complex viscosity of high-impact ABS (HIABS)/SGF unfoamed composite in the low-frequency range shows the increasing trend, while the complex viscosity of high-flow ABS (HFABS)/SGF unfoamed composite has no significant changes. Moreover, the complex viscosity of unfoamed HIABS/SGF is significantly higher than that of unfoamed HFABS/SGF. Furthermore, in the low-frequency range, the loss tangent of unfoamed HFABS/SGF composite increases and the loss tangent of unfoamed HIABS/SGF composite decreases as the content of SGF increases. When 15wt% SGF is added, HFABS/SGF foamed composite reaches the minimum cell diameter and the maximum cell density, 37.19 μm and 6.60×10^6 cells/ cm^3 respectively. When SGF content is 5wt%, HIABS/SGF foamed composite reaches the minimum cell diameter and the maximum cell density, 54.59 μm and 1.51×10^6 cells/ cm^3 , respectively. At the same SGF content, the cell diameters of HFABS/SGF foamed composites are all smaller than those of HIABS/SGF foamed composites, while their cell densities are all higher than those of HIABS/SGF foamed composite. Meanwhile, with the increase in SGF content, the tensile strength of HFABS/SGF foamed composite exhibits an overall increasing trend. But the

基金项目: 贵州省科技(人才)计划项目(黔科合人才[2025]010,黔科合重大专项字[2024]007,黔科合基础[2016]1077)

通信作者: 张翔,副研究员,主要从事纤维增强树脂基复合材料研究

收稿日期: 2026-02-05

引用格式: 张翔,蒋团辉,李胜男,等.玻璃纤维含量对不同ABS微孔发泡行为与力学性能的影响[J].工程塑料应用,2026,54(4):185-193.

ZHANG Xiang, JIANG Tuanhui, LI Shengnan, et al. Influence of glass fiber content on microcellular foaming behavior and mechanical properties of different ABS[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(4): 185-193.

tensile strength of HIABS/SGF foamed composite first decreases and then increases. The tensile strength and the specific tensile strength of HFABS/SGF foamed composite has been increased by 44.33%, 35.79%, respectively, and the tensile strength and the specific tensile strength of HIABS/SGF foamed composite has been risen by 29.51%, 16.24%, respectively. However, the impact strengths have all been decreased as the content of SGF increases. Under the same SGF content, the impact strength of HIABS/SGF foamed composite is significantly higher than that of HFABS/SGF foamed composite.

Keywords: glass fiber; acrylonitrile-butadiene-styrene; chemical foaming; mechanical performance; rheological property

丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)作为一种工程塑料,因具有抗冲击性、耐低温性、优良的绝缘性能,良好的表面光泽性等优点,被广泛应用于汽车、机械、建材和电子电器工业中^[1-3],国内市场ABS树脂需求量巨大^[4],但其价格较通用塑料高,进而造成生产成本的提高。塑料部件轻量化技术是降低生产成本的重要方法^[5-7],其中发泡技术可以使密度降低5%~90%,进而降低原材料消耗和成本,同时赋予材料良好的隔音隔热性能、吸收冲击载荷、缓冲性能等^[8-10]。关于微孔发泡ABS的研究已有部分报道。解浩轩等^[11]采用超临界CO₂技术制备了碳纳米管(CNTs)/ABS泡沫,研究发现增加CNTs质量分数可以促使平均泡孔尺寸减小,泡孔密度增加,电磁屏蔽效能(EMISE)随着CNTs含量的增加而逐渐增大。虞吉钧等^[12]利用化学交联模压法研究了化学发泡剂、活化剂和交联剂对ABS发泡材料力学性能和泡孔形态的影响,所得到的平均泡孔直径达到24 μm,泡孔密度达到1.31×10⁸个/cm³。Wille等^[13]以热膨胀微球为发泡剂,采用挤出工艺制备了ABS泡沫,热膨胀微球质量分数为2%时泡沫密度降幅达到50%,最佳工艺窗口为温度220~230℃、转速140~200 r/min。Yoon等^[14]使用亚临界和超临界二氧化碳制备了微孔和纳米孔ABS泡沫,结果表明吸附量遵循阿伦尼乌斯定律,与饱和温度有关,而扩散率并不遵循阿伦尼乌斯关系,在低饱和温度和高发泡温度下观察到了直径为600~700 nm的闭孔和直径为100 nm的纳米孔。Gómez-Monterde等^[15]研究了超临界N₂注塑工艺参数对微孔发泡ABS材料的泡孔形态、力学性能和表面粗糙度的影响,结果表明较低的注塑量可以获得更高的泡孔密度和更窄的泡孔尺寸分布,但增加注射量可以提高弹性模量和拉伸强度;较高的模具温度和注射速率能够得到更细小的泡孔形态,而对弹性模量和拉伸强度的影响微乎其微;减少注塑量和增加气体含量会导致表面质量下降,而提高模具温度和注射速率则能显著改善表面质量。上述研究主要集中于间歇釜压

发泡、模压发泡、超临界物理注塑发泡和热膨胀微球挤出发泡工艺制备ABS发泡材料以及进行性能研究,另一方面,ABS发泡后会导致力学性能显著降低,为此通过添加纤维增强体对力学性能进行补偿成为一种有效方法^[16],其中玻璃纤维(GF)因具有较高的力学性能和性价比而得到了应用,Kamran等^[17]研究了釜压发泡工艺对ABS、ABS/GF等发泡制品的泡孔结构和力学性能的影响。目前采用化学注塑发泡工艺制备ABS发泡材料的研究较少,笔者团队自主开发了化学发泡注塑系统,前期研究了注塑温度、增韧剂和发泡母粒载体等对ABS发泡材料性能的影响^[18-20],因此本文利用化学发泡注塑成型工艺,采用不同特性的ABS制备了ABS/SGF发泡复合材料,讨论了GF含量对ABS/SGF发泡复合材料发泡行为和性能的影响,以期对ABS/SGF发泡复合材料的开发和应用提供实验依据。

1 实验部分

1.1 主要原料

高流动ABS(HFABS):AF365F,熔体流动速率(MFR)约为75 g/10 min (220℃/10 kg),密度约为1.18 g/cm³,缺口冲击强度约为16 kJ/m²,韩国LG化学公司;

高冲击ABS(HIABS):PA-709,MFR约为6.18 g/10 min (220℃/10 kg),密度约为1.03 g/cm³,缺口冲击强度约为37 kJ/m²,台湾奇美实业股份有限公司;

短玻纤(SGF):直径约为13 μm,长度约为3 mm,重庆国际复合材料股份有限公司;

发泡母粒:F-76,分解温度为200~220℃,发气量约为30 mL/g,发泡剂的主成分分解后为CO₂,载体为ABS,永和精细化工(常熟)有限公司。

1.2 主要仪器及设备

注塑机:EM120-V,震德塑料机械有限公司,配备自主研发化学微孔发泡装置;

双螺杆挤出机:CET-20,科倍隆科亚(南京)机械有限公司;

旋转流变仪:MARS60,赛默飞世尔公司;

微机控制电子万能试验机:CMT6104,美特斯工业系统(中国)有限公司;

摆锤式冲击试验机:ZBC8400-B,美特斯工业系统(中国)有限公司;

电子分析天平:X5205 DualRange,瑞士梅特勒-托利多公司;

扫描电子显微镜(SEM):KYKY-EM6200,北京中科科仪股份有限公司;

电热鼓风干燥箱,101-2AB,天津市泰斯特仪器有限公司。

1.3 试样制备

(1) ABS/SGF 母粒制备。

首先将ABS、SGF等在高混机中混合均匀,混合时间为5 min,转速为200 r/min;然后通过双螺杆挤出机造粒制备ABS/SGF母粒,从料筒到口模的温度为170~210 °C,螺杆转速约为220 r/min,喂料速度约为22 r/min。

(2) ABS/SGF 发泡复合材料制备。

将ABS/SGF母粒与发泡剂按质量比100:3混合均匀后,在注塑机上采用“二次开模”发泡工艺制备ABS/SGF发泡复合材料标准样条,用于力学性能测试,注射温度从料斗到喷嘴依次为180、190、200 °C,注射压力约为45 MPa,注射速度约为70 mm/s,冷却时间约为25 s。同时制备了ABS/SGF未发泡复合材料样条作为对比样,注射温度从料斗到喷嘴依次为180、200、220 °C,注射压力约为45 MPa,注射速度约为70 mm/s,冷却时间约为25 s。

1.4 测试与表征

密度按照GB/T1033.1-2008进行测试。

拉伸性能按照GB/T1040.2-2006进行测试,拉伸速率为50 mm/min。

冲击强度按照GB/T1843-2008进行测试,A型缺口,缺口底部半径为0.25 mm。

流变性能利用旋转流变仪进行测试,试样直径为20 mm,圆形平行板间距为1 mm,测试温度为220 °C,频率为0.05~100 Hz。

泡孔结构采用SEM进行观察,首先将样品在液氮中冷冻3 h,随后进行冲断并在断口表面进行喷金;同时通过图像分析软件对泡孔进行统计分析后计算泡孔平均直径和泡孔密度。

泡孔平均直径 $\bar{D}$ 的计算公式见公式(1)。

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (1)$$

泡孔密度 N_0 ,即每立方厘米泡孔数的计算公式见公式(2)^[19,21]。发泡材料孔隙率 V_f 的计算公式见公式(3)。

$$N_0 = \left[\frac{nM^2}{A} \right]^{\frac{3}{2}} \left[\frac{1}{1 - V_f} \right] \quad (2)$$

$$V_f = 1 - \frac{\rho_f}{\rho} \quad (3)$$

式中: n 为扫描电镜图片中泡孔数; M 为放大倍数; A 为显微图面积,cm²; V_f 为发泡材料孔隙率; ρ 为未发泡材料密度,g/cm³; ρ_f 为发泡材料密度,g/cm³。

2 结果与讨论

2.1 ABS/SGF 复合材料的流变性能

图1为ABS/SGF未发泡复合材料复数黏度 η^* 与SGF含量的关系。随着SGF含量的增加,在低频率区HIABS/SGF复合材料的 η^* 呈增加趋势(图1b),而HFABS/SGF复合材料的 η^* 变化不明显(图1a),且HIABS/SGF的 η^* 明显高于HFABS/SGF的 η^* 。同时随着频率的增加,复合材料的 η^* 降低,HIABS/SGF和HFABS/SGF复合材料均发生了非牛顿流体的剪切变稀现象。这主要是因为HIABS黏度较高,SGF限制了HIABS分子链的运动能力,提高了复合

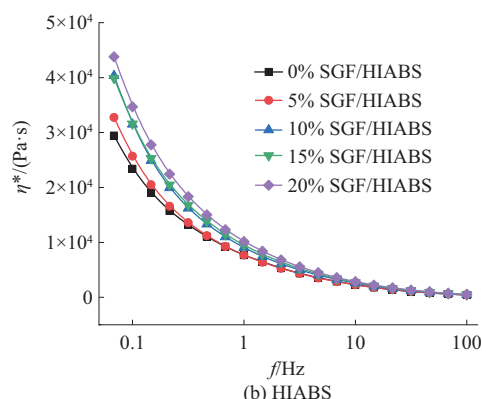
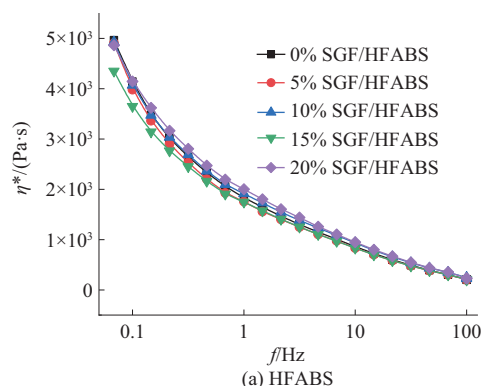


图1 不同SGF含量下未发泡ABS/SGF复合材料的复数黏度(η^*)

Fig. 1 Complex viscosity (η^*) of unfoamed ABS/SGF composites with different SGF contents

材料体系的内部摩擦,导致 η^* 增加,而HFABS黏度低,分子链的相对运动能力强,SGF的存在对HFABS分子链运动的抑制作用较弱, η^* 对复合材料的发泡行为有着重要影响,适中的复数黏度可以获得所需的泡孔结构^[22]。

图2为ABS/SGF未发泡复合材料损耗角因子 $\tan\delta$ 与SGF含量的关系。一般认为, $\tan\delta$ 值反映了材料的弹性响应,对于同一类型材料而言,弹性响应越快其可发泡性越高^[23]。如图2所示,随着频率的增加,所有ABS/SGF复合材料的 $\tan\delta$ 均呈现先增大后降低的趋势,这是由损耗模量和储能模量随频率的变化幅度不同引起的,在低频率下,损耗模量随频率的变化更快,而在高频率下,储能模量随频率的变化快于损耗模量。同时发现,在低频率区,随着SGF含量的增加,HFABS/SGF未发泡复合材料的 $\tan\delta$ 增加,而HIABS/SGF未发泡复合材料的 $\tan\delta$ 降低。也就是说,对HIABS/SGF复合材料体系而言,SGF提高了其黏弹性行为中的弹性响应,降低了黏性耗散现象,对可发泡性有增强作用,但对于HFABS/SGF复合材料体系,SGF的存在降低了弹性响应,提高了黏性耗散,反而降低了体系的可发泡性。

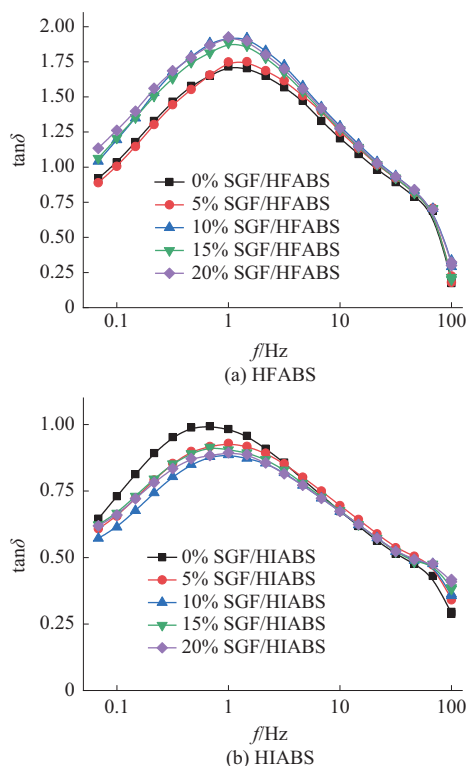


图2 不同SGF含量时未发泡ABS/SGF复合材料的损耗因子($\tan\delta$)

Fig. 2 Loss tangent ($\tan\delta$) of unfoamed ABS/SGF composites with different SGF contents

2.2 ABS/SGF发泡复合材料形貌分析

图3为不同SGF含量下ABS发泡复合材料断面的芯层泡孔结构图。由图3a1、图3b1、图3c1、图3d1、图3e1可知,随着SGF含量的增加,HFABS发泡复合材料的泡孔尺寸先减小后增大,与纯HFABS发泡材料相比,HFABS/SGF发泡复合材料的泡孔数量整体显著增加,而添加15%SGF的HFABS/SGF发泡复合材料的泡孔尺寸最小,泡孔数量最多,但当SGF质量分数为20%时,HFABS/SGF发泡复合材料的泡孔尺寸开始有所增大,主要原因为SGF的存在起到了异相形核作用,有效降低了泡孔的形核能

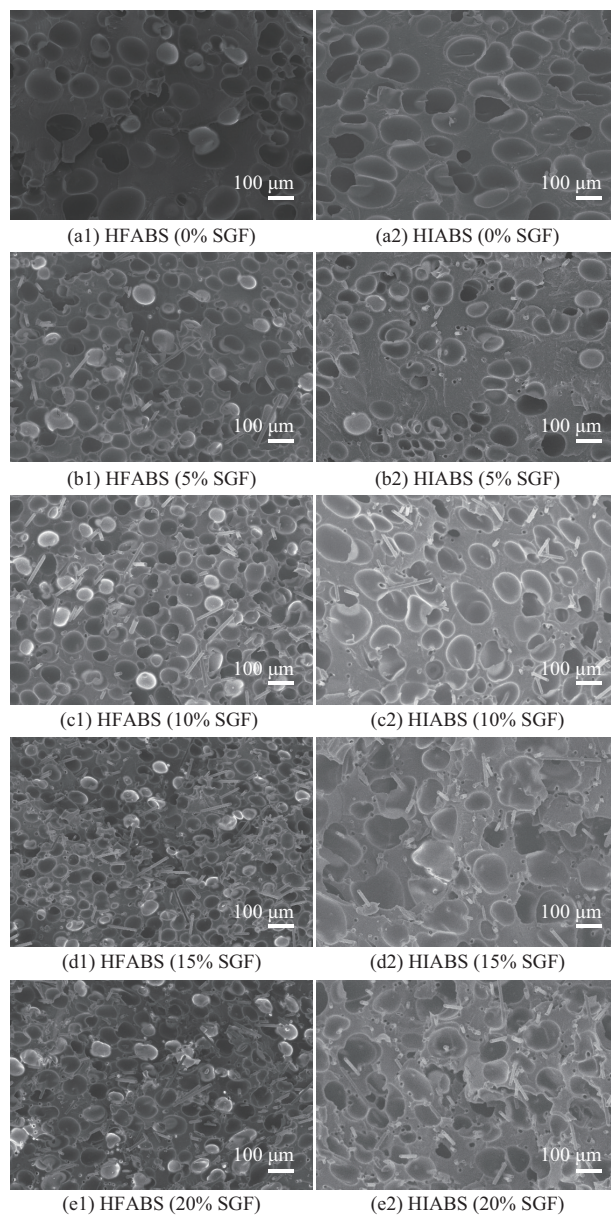


图3 不同SGF含量时发泡ABS/SGF复合材料断面泡孔结构SEM照片

Fig. 3 SEM images of pore structures of fracture surfaces in foamed ABS/SGF composites with different SGF contents

垒,泡孔形核数量增加,在相同的气体溶解量下,泡孔数量增多,泡孔尺寸减小,而当SGF质量分数达到20%时,SGF出现了较明显的聚集现象,有效的形核位点数相对减少,相对于含15%SGF的发泡复合材料,泡孔密度有所下降,泡孔尺寸有所增大,但泡孔结构依然明显优于未添加SGF的纯ABS发泡材料。如图3a2、图3b2、图3c2、图3d2、图3e2所示,不同SGF含量的HIABS发泡复合材料的泡孔尺寸和泡孔数量没有呈现出明显的变化趋势,这主要是因为HIABS中橡胶相的含量很高,熔体黏度大,SGF的分散相对不均匀,异相形核作用大大减弱,导致泡孔尺寸相对较大,变化规律不明显。

2.3 SGF含量对泡孔结构的影响

图4为不同SGF含量对ABS材料泡孔尺寸与泡孔密度的影响。如图4a所示,纯HFABS发泡材料的泡孔直径为63.42 μm ,泡孔密度为 1.46×10^6 个/ cm^3 ,当SGF质量分数为15%时,泡孔直径为37.19 μm ,泡孔密度为 6.60×10^6 个/ cm^3 ,当SGF质量分数为5%和20%时,泡孔直径和泡孔密度差异不明显,泡孔直径分别为49.16 μm 和48.89 μm ,泡孔密度分别为 3.78×10^6 个/ cm^3 和 3.28×10^6 个/ cm^3 ,当SGF质量分数

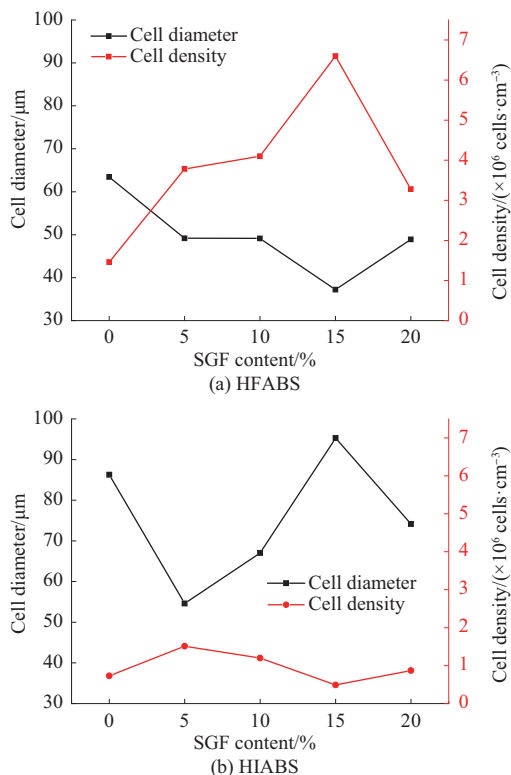


图4 不同SGF含量时发泡ABS/SGF复合材料的泡孔直径和泡孔密度
Fig. 4 Cell size and cell density of foamed ABS/SGF composites with different SGF content

为10%时,泡孔直径为49.11 μm ,泡孔密度为 4.10×10^6 个/ cm^3 ,且随着SGF含量的增加,发泡材料的减重幅度(未发泡与发泡材料密度之差与未发泡材料密度之比)由13.3%增加至17.5%(图5a)。由图4b可知,当SGF质量分数为5%时,HIABS/SGF发泡复合材料的泡孔直径相对较小为54.59 μm ,泡孔密度相对较大为 1.51×10^6 个/ cm^3 。但不同SGF含量的发泡材料的泡孔直径和泡孔密度整体相差不大,基本处于同一个数量级。所有ABS发泡材料的泡孔直径均小于100 μm 。由上述所知,在相同SGF含量下,HFABS/SGF发泡复合材料的泡孔尺寸均小于HIABS/SGF发泡复合材料,而其泡孔密度均高于HIABS/SGF发泡复合材料,HFABS/SGF复合材料的黏度几乎比HIABS/SGF复合材料低了一个数量级(图1),ABS/SGF黏度较低有利于气体扩散,降低泡孔成核能垒,而黏度较高时泡孔成核阻力较大,气体扩散不均匀,导致易生成分布不均匀且尺寸较大的泡孔^[24]。

2.4 SGF含量对力学性能的影响

图5为不同SGF含量时ABS/SGF发泡复合材

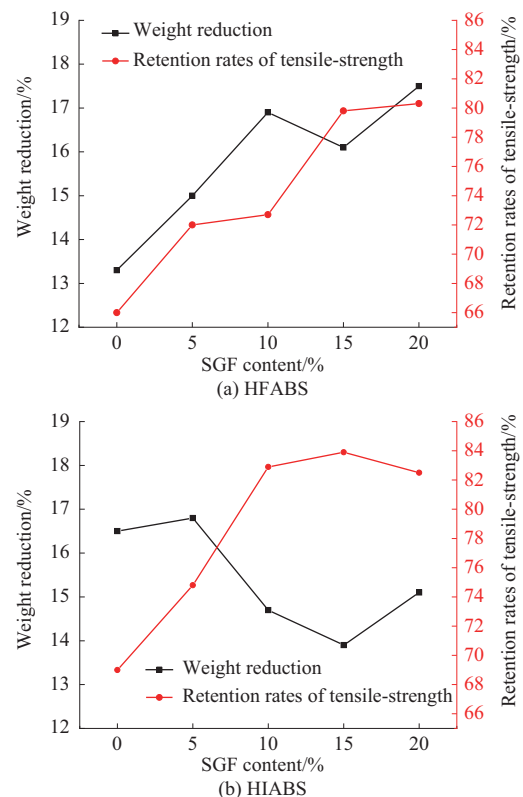


图5 不同SGF含量时发泡ABS/SGF复合材料的减重幅度和拉伸强度保留率

Fig. 5 Weight reduction and retention rate of tensile strength of foamed ABS/SGF composites with different SGF content

料的减重和拉伸强度保留率(发泡材料与未发泡材料的拉伸强度之比)。由图5可知,所有ABS/SGF发泡复合材料的拉伸强度保留率均在90%以内,表明与ABS/SGF未发泡复合材料相比,不同SGF含量的发泡材料的拉伸强度均有一定程度的降低,主要原因为泡孔的存在减少了材料抵抗拉伸断裂所需的有效承载面积^[18]。然而,由图5a可知,随着SGF含量的增加,HFABS/SGF发泡复合材料拉伸强度保留率由66%增加至80.3%,而由图5b可知,HIABS/SGF发泡复合材料在10%~20% SGF含量下的拉伸强度保留率达到了80%以上,且在10%~20% SGF含量下,HIABS/SGF发泡复合材料的拉伸强度保留率高于HFABS/SGF发泡复合材料,主要是因为随着SGF含量的增加,ABS/SGF发泡复合材料的刚性增加,整体强度增加。

图6为不同SGF含量下ABS/SGF发泡复合材料的拉伸性能。由图6a和图6b可知,随着SGF质量分数由0%增加至20%,HFABS/SGF发泡复合材料的拉伸强度和比拉伸强度均呈现整体增加趋势,拉伸强度由24.61 MPa增至35.52 MPa,增幅为44.33%,比拉伸强度由24.67 MPa·cm³/g增至33.50 MPa·cm³/g,增幅为35.79%,而HIABS/SGF发泡复合材料的拉伸强度和比拉伸强度均呈现先降低后升高的趋势,SGF质量分数为20%时的拉伸强度最高为34.41 MPa,相对于5% SGF时的最低拉伸强度26.57 MPa,增幅为29.51%,同时,SGF质量分数为20%时的比拉伸强度最高为35.07 MPa·cm³/g,相对于5% SGF时的最低比拉伸强度30.17 MPa·cm³/g,增幅为16.24%,同时在相同SGF含量下,HFABS/SGF与HIABS/SGF发泡复合材料的拉伸强度并没有显著差异,这是因为刚性SGF自身拉伸强度比ABS高得多,当ABS/SGF发泡复合材料受到外部载荷作用时,载荷有效地传递到SGF上,SGF承担了大部分的荷载,且当SGF含量增加时,单位截面积上有更多的SGF来承载更高的应力,进而导致拉伸强度增加^[25-26];另一方面,HFABS/SGF与HIABS/SGF发泡材料的泡孔尺寸和泡孔密度几乎处于同一个数量级上,泡孔尺寸没有决定性的差异,在高力学强度SGF存在的条件下,泡孔结构的影响较弱^[27]。同时如图6b所示,当SGF质量分数为5%时,相对于纯HIABS发泡材料,HIABS/SGF发泡复合材料的拉伸强度和比拉伸强度均发生了一定的衰

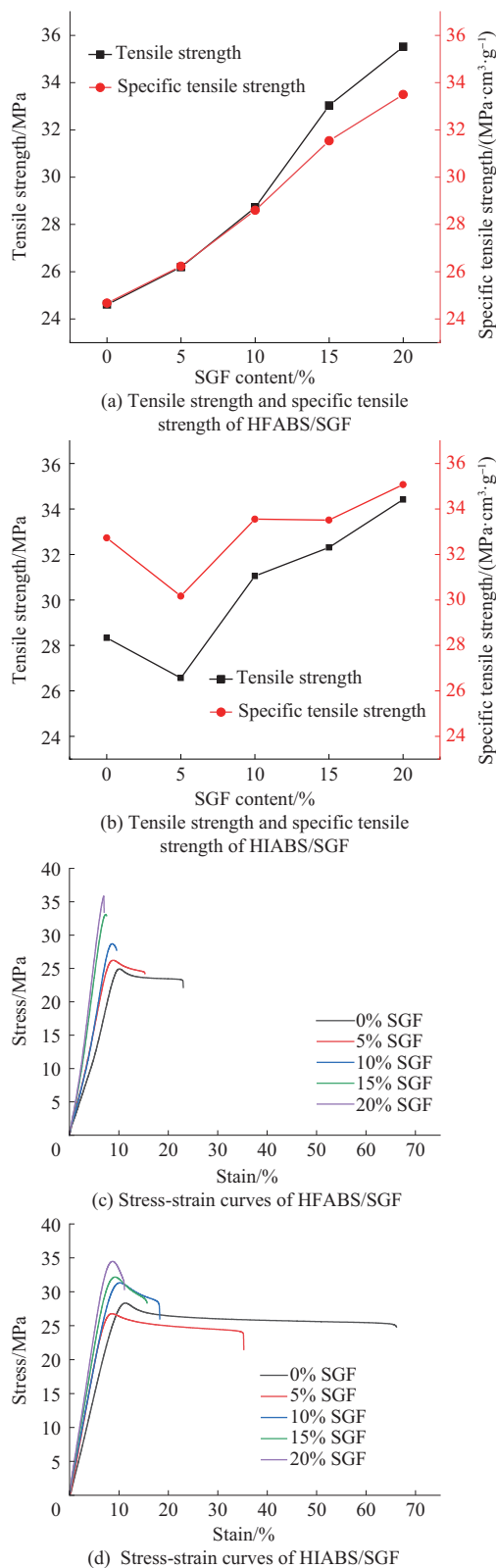


图6 不同SGF含量时发泡ABS/SGF复合材料的拉伸性能

Fig. 6 Tensile properties of foamed ABS/SGF composite with different SGF contents

减,这可能是由于泡孔分布不均匀所致(图3b2),虽然此时发泡材料的泡孔直径较小,泡孔密度较大,

但泡孔的不均匀分布导致了拉伸过程中的应力集中,导致SGF的增强作用未能充分发挥,进而降低了发泡复合材料抵抗断裂的能力。

图6c和图6d为不同SGF含量的ABS/SGF发泡复合材料的应力-应变曲线。如图所示,随着SGF含量的增加,ABS/SGF发泡复合材料的延展性明显降低,这是因为SGF与ABS基体的界面结合较好,SGF与ABS基体之间的相互作用较强,高含量SGF显著抑制了ABS分子链的运动能力,促使延展性明显降低^[28],同时泡孔的存在并没有明显地将GF和ABS基体分离开(图3),SGF的增强作用在复合材料发泡后依然得到很好的体现;同时发现HIABS/SGF发泡复合材料的延展性明显好于HFABS/SGF发泡复合材料,主要归因于HIABS中高橡胶相的增韧作用,使HIABS/SGF发泡复合材料在高SGF含量下依然保持较高的延展性。

图7为不同SGF含量发泡复合材料的冲击强度。如图7a所示,HFABS/SGF发泡复合材料的缺口冲击强度随SGF含量增加而降低,但在SGF为5%~10%和15%~20%范围时变化不大,高冲击HIABS/SGF发泡复合材料的冲击强度也随着SGF

含量的增加呈下降趋势(图7b),这归因于刚性SGF纤维比ABS具有更高的刚性和脆性,导致ABS/SGF发泡复合材料的韧性随SGF的增加而降低^[29],同时SGF的加入限制了ABS中丁二烯橡胶相的变形,进而阻止橡胶粒子空穴的形成^[30],导致ABS/SGF发泡复合材料韧性降低,而泡孔的存在也没有起到钝化裂纹作用,反而可能成为裂纹的起始点^[31],进而降低了发泡复合材料的整体冲击强度;同时发现在相同SGF含量下,HIABS/SGF发泡复合材料的缺口冲击强度明显高于HFABS/SGF发泡复合材料,HIABS含有更高含量的丁二烯橡胶相,更有助于吸收冲击能,提供了更高的韧性^[32],因此在泡孔尺寸和泡孔密度处于同一个数量级的情况下,刚性SGF和韧性橡胶相之间的协同作用是影响ABS/SGF发泡复合材料冲击强度的主要因素。同时考察了HIABS/SGF发泡复合材料的无缺口冲击强度,如图7b所示,发现其明显高于缺口冲击强度,这主要归因于在无缺口冲击时发泡材料的密实皮层首先充当第一个能量吸收区,进而提高了发泡材料整体吸收冲击能的能力^[33]。

3 结论

(1)在相同SGF含量下,HFABS/SGF发泡材料的泡孔尺寸均小于HIABS/SGF发泡材料,而其泡孔密度均高于HIABS/SGF发泡复合材料。

(2)随着SGF含量的增加,HFABS/SGF发泡材料的拉伸强度呈现整体增加趋势,而HIABS/SGF发泡材料的拉伸强度呈现先降低后升高的趋势,同时当SGF含量较高(10%~20%)时,HIABS/SGF发泡材料的拉伸强度保留率优于HFABS/SGF发泡材料。

(3)SGF的加入明显降低了HFABS/SGF和HIABS/SGF发泡材料的延展性和冲击强度,但在相同SGF含量下,HIABS/SGF发泡材料的延展性和缺口冲击强度依然明显好于HFABS/SGF发泡材料。

参考文献

- [1] 邓智涛. 本体法ABS在汽车内饰低VOC控制中的应用研究[J]. 商用汽车, 2025(5):97-99.
DENG Zhitao. Research on the application of bulk ABS in low VOC control of automotive interior materials[J]. Commercial Vehicle, 2025(5):97-99.
- [2] 姜婷婷. 再生ABS/PC轻骨料混凝土力学性能及耐久性性能研究[D]. 长春:吉林建筑大学, 2024.
JIANG Tingting. Research on the mechanical and durability properties of recycled ABS/PC lightweight aggregate concrete[D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2024.

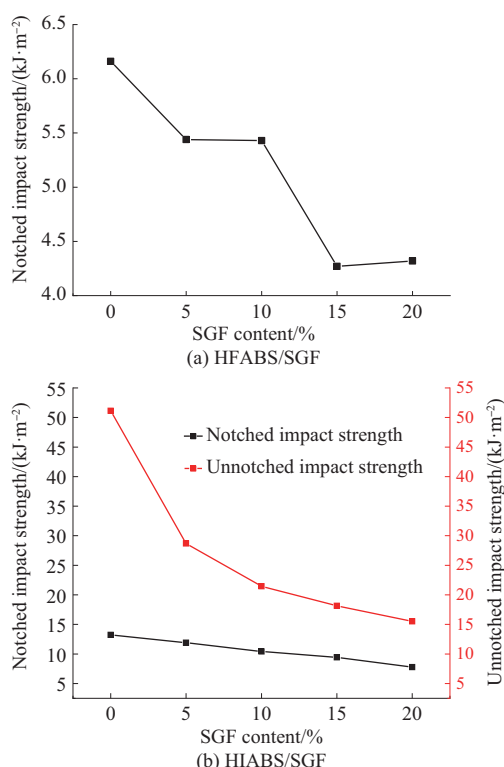


图7 不同SGF含量时发泡ABS/SGF复合材料的冲击强度

Fig. 7 Impact strength of foamed ABS/SGF composite with different SGF contents

- [3] 张磊. ABS改性及其在电子电器产品外观设计中的应用[J]. 合成树脂及塑料, 2024, 41(5):83-86.
ZHANG Lei. ABS modification and its application in appearance design of electronic and electrical products[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2024, 41(5):83-86.
- [4] 杨建成. ABS树脂市场分析及预测[J]. 广州化工, 2024, 52(1):33-35.
YANG Jiancheng. ABS market analysis and forecast[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2024, 52(1):33-35.
- [5] 吴志强, 刘青霞, 张欢唱, 等. 轻量化背景下改性塑料在汽车上的应用[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(3):152-156.
WU Zhiqiang, LIU Qingxia, ZHANG Huanchang, et al. Application of modified plastics in automobile under light weight background[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(3):152-156.
- [6] SHEN C, JIANG T H, ZENG X B, et al. Cost-effective and fully biodegradable PBAT composites: Integrating natural fillers and chemical foaming techniques[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2026, 143(6). DOI:10.1002/app.58196.
- [7] 康元春, 刘俊峰, 孟紫薇. 碳纤维复合材料电池箱轻量化研究[J]. 复合材料科学与工程, 2022(5):66-70.
KANG Yuanchun, LIU Junfeng, MENG Ziwei. Study on light-weight of carbon fiber composite battery box[J]. Composites Science and Engineering, 2022(5):66-70.
- [8] YU F, XING J F, DING D, et al. Microcellular polyphenylene oxide/polyamide 6 (PPO/PA6) prepared by chemical foaming injection molding exhibits low-temperature toughness and excellent comprehensive properties[J]. Polymer, 2025, 340. DOI: 10.1016/j.polymer.2025.129227.
- [9] 刘云杰, 金碧辉, 马昊宇, 等. 乙烯-乙醇共聚物/碳纳米管复合发泡材料的电磁屏蔽性能研究[J]. 高分子学报, 2023, 54(1):106-120.
LIU Yunjie, JIN Bihui, MA Haoyu, et al. Electromagnetic shielding properties of ethylene-vinyl alcohol copolymer/carbon nanotube nanocomposite foams[J]. Acta Polymerica Sinica, 2023, 54(1):106-120.
- [10] 张伟程, 胡祥, 罗鸿兴, 等. 中空玻璃微珠填充聚氨酯发泡材料的吸声性能与动态力学性能研究[J]. 中国塑料, 2023, 37(1):38-45.
ZHANG Weicheng, HU Xiang, LUO Hongxing, et al. Study on sound absorption and dynamic mechanical properties of polyurethane foaming materials filled with hollow glass beads[J]. China Plastics, 2023, 37(1):38-45.
- [11] 解浩轩, 何欣, 磨仕玲, 等. ABS熔体流动速率及CNTs含量对CNTs/ABS泡沫电磁屏蔽性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(6):1-9.
XIE Haoxuan, HE Xin, MO Shiling, et al. Effects of ABS melt flow rate and CNTs content on electromagnetic shielding properties of CNTs/ABS foams[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(6):1-9.
- [12] 虞吉钧, 杨永兵, 岳邦毅, 等. ABS微孔发泡材料的制备与性能研究[J]. 工程塑料应用, 2012, 40(1):12-15.
YU Jijun, YANG Yongbing, YUE Bangyi, et al. Study of preparation and properties of microcellular ABS foam[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(1):12-15.
- [13] WILLE T, PENSEL H G, BARZ A, et al. Investigations into the foaming behavior of ABS by means of granule extrusion using expandable microspheres[J]. Discover Polymers, 2024, 1(1). DOI: 10.1007/s44347-024-00011-3.
- [14] YOON T J, KONG W, KWON D E, et al. Preparation of solid-state micro- and nanocellular acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) foams using sub- and supercritical CO₂ as blowing agents[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2017, 124:30-37.
- [15] GÓMEZ-MONTERDE J, SÁNCHEZ-SOTO M, MASPOCH M L. Influence of injection molding parameters on the morphology, mechanical and surface properties of ABS foams[J]. Advances in Polymer Technology, 2018, 37(8):2 707-2 720.
- [16] 郭昌志. 微孔发泡ABS/碳纤维复合材料的泡孔结构和电导率[D]. 广州:华南理工大学, 2020.
GUO Changzhi. Cellular structure and electrical conductivities of microcellular ABS/carbon fiber composites[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2020.
- [17] KAMRAN K B, AMIR H B, TAHER A. An experimental study on mechanical and microstructural properties of microcellular foams of ABS composites[J]. Iranian Polymer Journal, 2006, 15(7):555-567.
- [18] 黄斌, 张翔, 蒋团辉, 等. 发泡母粒对ABS发泡材料泡孔结构及力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(6):36-40.
HUANG Bin, ZHANG Xiang, JIANG Tuanhui, et al. Effect of foaming masterbatch on cell structural and mechanical property of ABS foaming material[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(6):36-40.
- [19] 王黎明, 张翔, 王杜鹃, 等. 高胶粉改性ABS材料的发泡行为与力学性能研究[J]. 塑料工业, 2018, 46(9):53-57.
WANG Liming, ZHANG Xiang, WANG Dujuan, et al. Effect of ABSHR on mechanical properties and foaming behavior of foamed ABS composites[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(9):53-57.
- [20] 蒋团辉, 刘运锦, 张纯, 等. 注射温度对ABS复合材料发泡行为及力学性能的影响[J]. 塑料科技, 2015, 43(9):23-28.
JIANG Tuanhui, LIU Yunjin, ZHANG Chun, et al. Influence of injection temperature on the foaming behavior and mechanical properties of ABS composites[J]. Plastics Science and Technology, 2015, 43(9):23-28.
- [21] MATUANA L M, PARK C B, BALATINECZ J J. Cell morphology and property relationships of microcellular foamed PVC/wood-fiber composites[J]. Polymer Engineering & Science, 1998, 38(11):1 862-1 872.
- [22] 沈超, 朱能贵, 蒋团辉, 等. 增强剂尺寸效应对聚酰胺6发泡复合

- 材料性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(8):75–88.
- SHEN Chao, ZHU Nenggui, JIANG Tuanhui, et al. Dimension effect of reinforcement on properties of polyamide 6 foam composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(8):75–88.
- [23] 朱能贵, 沈超, 蒋团辉, 等. 改性剂对聚丙烯流变性能和发泡行为的影响[J]. 合成树脂及塑料, 2021, 38(1):14–17.
- ZHU Nenggui, SHEN Chao, JIANG Tuanhui, et al. Effect of modifier on rheological properties and foaming behavior of polypropylene[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2021, 38(1):14–17.
- [24] MU Z Q, XING J F, WEI Z P, et al. Effect of resin viscosity on cell nucleation and growth[J]. Journal of Polymer Science, 2025, 63(10):2 209–2 221.
- [25] KUMAR M H R, GUNDAPPA M M B, KUMAR P G S, et al. Influence of short glass fibre reinforcement on mechanical properties of 3D printed ABS-based polymer composites[J]. Polymers, 2022, 14(6). DOI:10.3390/polym14061182.
- [26] 张九夫, 罗开强, 徐军, 等. 长玻璃纤维增强PA66复合材料的综合性能及其影响因素研究[J]. 中国塑料, 2022, 36(3):1–8.
- ZHANG Jiufu, LUO Kaiqiang, XU Jun, et al. Study on comprehensive properties and influencing factors of long glass fiber reinforced PA66 composites[J]. China Plastics, 2022, 36(3):1–8.
- [27] 沈超, 朱能贵, 蒋团辉, 等. 工艺参数对玻璃纤维增强PA6微孔发泡复合材料结构与性能的影响[J]. 合成树脂及塑料, 2022, 39(5):50–56.
- SHEN Chao, ZHU Nenggui, JIANG Tuanhui, et al. Effect of process parameters on morphology and properties of PA 6 micro-cellular foams reinforced by glass fiber[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2022, 39(5):50–56.
- [28] ZHAO Y H, WANG L Y, CHONG Y S, et al. Preparation and properties of glass fiber reinforced nylon56 composites[J]. Polymer Composites, 2022, 43(9):6 660–6 666.
- [29] 李东红. 短玻璃纤维增强ABS复合材料性能的研制[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2005, 19(1):74–78.
- LI Donghong. Properties of short glass fiber reinforced ABS composite[J]. Journal of Shanxi Teacher's University (Natural Science Edition), 2005, 19(1):74–78.
- [30] OZKOC G, BAYRAM G, BAYRAMLI E. Short glass fiber reinforced ABS and ABS/PA6 composites: Processing and characterization[J]. Polymer Composites, 2005, 26(6):745–755.
- [31] AMELI A, JAHANI D, NOFAR M, et al. Development of high void fraction polylactide composite foams using injection molding: Mechanical and thermal insulation properties[J]. Composites Science and Technology, 2014, 90:88–95.
- [32] LEE H, CHO D. Effects of A, B, and S components on fiber length distribution, mechanical, and impact properties of carbon fiber/ABS composites produced by different processing methods [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138(28). DOI: 10.1002/app.50674.
- [33] WONG S, LEE J W S, NAGUIB H E, et al. Effect of processing parameters on the mechanical properties of injection molded thermoplastic polyolefin (TPO) cellular foams[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2008, 293(7):605–613.