

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.11.008

# 交联 PLA/PBAT 泡沫材料的结构与性能

张玉<sup>1</sup>,王美珍<sup>2</sup>,孟兵<sup>3</sup>,邓晶晶<sup>4</sup>(1.四川西南航空职业学院,成都 610400; 2.成都工贸职业技术学院,成都市技师学院,成都 611731;  
3.成都航空职业技术学院,成都 610100; 4.成都产品质量检验研究院有限责任公司,成都 610100)

**摘要:** 为了得到成本较低且性能优异的聚乳酸(PLA)泡沫材料,采用硬脂酸锌(ZnSt)对偶氮二甲酰胺(AC)发泡剂进行改性,改性后 AC 发泡剂的起始发泡温度从 223 °C 降到 187 °C,适应 PLA 的加工。同时采用三丙烯基异氰尿酸酯(TAIC)和过氧化二异丙苯(DCP)对 PLA 交联,得到交联 PLA (C-PLA)。通过发泡密度测试,扫描电子显微镜(SEM)观察,动态流变测试、拉伸性能测试对比研究了 C-PLA, C-PLA/聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)的发泡性能。研究表明,C-PLA/PBAT 材料的发泡密度随着改性 AC 发泡剂的增加而减小,随着 C-PLA 交联度的提高而减小,但未添加 PBAT 的 C-PLA 发泡密度变化不大。当改性 AC 发泡剂质量分数为 3% 时,添加 PBAT (PLA/PBAT=80/20)后,PLA 的发泡密度从 0.838 g/cm<sup>3</sup> 下降到了 0.746 g/cm<sup>3</sup>,下降了约 11%,低交联 PLA 与高交联 PLA 的发泡密度分别从 0.954 g/cm<sup>3</sup>, 0.884 g/cm<sup>3</sup> 降到了 0.828 g/cm<sup>3</sup>, 0.802 g/cm<sup>3</sup>,降幅分别达 13%, 9%。SEM 分析表明添加 PBAT 后,泡孔分布更均匀,泡孔尺寸更小,泡孔形态更好。随着交联密度的增加,C-PLA/PBAT 发泡材料的拉伸强度升高,断裂伸长率降低。综上所述,PBAT 可以改善 C-PLA 发泡材料的微观泡沫形态,降低发泡密度和提升拉伸性能。

**关键词:** 聚乳酸;聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯;交联;发泡

**中图分类号:** TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)11-0044-07

## Structure and Properties of Cross-linked PLA/PBAT Foam

Zhang Yu<sup>1</sup>, Wang Meizhen<sup>2</sup>, Meng Bing<sup>3</sup>, Deng Jingjing<sup>4</sup>(1. Sichuan Southwest Vocational College of Civil Aviation, Chengdu 610400, China; 2. Chengdu Industry and Trade College, Chengdu Technician College, Chengdu 611731, China; 3. Chengdu Aeronautic Polytechnic, Chengdu 610100, China;  
4. Chengdu Institute of Product Quality Inspection Co. Ltd, Chengdu 610100, China)

**Abstract :** In order to get low cost and excellent performance PLA foam, the blends foam of crosslinked poly(lactic acid)/polybutylene adipate-co-terephthalate (PLA/PBAT) with azodicarbonamide (AC) foaming agent were explored. To match the processing of PLA, azodicarbonamide, AC foaming agent, was modified by zinc stearate, and the initial foaming temperature of AC foaming agent reduced from 223 °C to 187 °C cross-linked PLA (C-PLA) was crosslinked by tripropenyl isocyanurate (TAIC) and dicumene peroxide (DCP) at the same time. The structure and properties of foaming C-PLA and C-PLA/PBAT were compared. The foam was characterized by foam density, scanning electron microscopy (SEM), dynamic rheological and tensile properties tests. It is found that the foaming density of C-PLA/PBAT materials decreases with the increase of modified AC foaming agent, and decreases with the increase of C-PLA crosslinking degree. However, the foaming density of C-PLA without PBAT does not change much. When 3wt% modified AC foaming agent and PBAT (PLA/PBAT=80/20) is added, the foam density of PLA blend decreases from 0.838 g/cm<sup>3</sup> to 0.746 g/cm<sup>3</sup>, about 11% decreases by, and the foam density of low cross-linked PLA and high cross-linked PLA decreases from 0.954 g/cm<sup>3</sup>, 0.884 g/cm<sup>3</sup> to 0.828 g/cm<sup>3</sup> and 0.802 g/cm<sup>3</sup>, respectively, with a decrease by 13% and 9%. SEM shows that after adding PBAT, the cell distribution is more uniform, the cell size turns smaller, and the cell morphology becomes better. The tensile strength of C-PLA/PBAT foam material increases with the increase of crosslinking density, but the elongation at break decreases. PBAT can improve the cell micro morphology, decrease density and enhance the tensile properties of the foam.

**Keywords :** poly(lactic acid); poly (butylene adipate-co-terephthalate); crosslinking; foaming

通信作者: 孟兵, 博士, 教授, 主要研究方向为绿色降解材料的加工及应用

收稿日期: 2023-10-06

引用格式: 张玉, 王美珍, 孟兵, 等. 交联 PLA/PBAT 泡沫材料的结构与性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(11):44-50.

Zhang Yu, Wang Meizhen, Meng Bing, et al. Structure and properties of cross-linked PLA/PBAT foam[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11):44-50.

聚乳酸(PLA)可由玉米、甘蔗、小麦、水稻和土豆等制成,来源丰富且可再生,其制品能生物降解<sup>[1-3]</sup>。随着人们环保意识的增强,PLA的应用范围已扩展到食品包装、生物医学工程、农业、汽车等诸多领域。尽管PLA有潜力取代石化聚合物,但其较高的成本限制了其应用。因此,研究人员致力于降低其成本,如发泡、与更低成本的材料共混等<sup>[4-5]</sup>。

发泡技术是降低材料消耗从而降低最终产品成本的最佳方法之一,可采用物理发泡剂,如超临界CO<sub>2</sub>、乙醇、水、N<sub>2</sub>等采用降压或升温方法在短时间内使气泡成核、生长,最终达到稳定状态<sup>[6]</sup>;也可采用化学发泡剂,如偶氮二甲酰胺等<sup>[6]</sup>生成气泡。但PLA加工温度低、结晶缓慢、熔体强度低,需要克服这些缺点才能实现其泡沫制品商业化<sup>[7]</sup>。PLA的低熔体强度对泡孔生长不利,容易导致泡孔破裂、合并<sup>[8]</sup>。为了克服上述缺点,研究人员对PLA进行改性,包括加入纳米颗粒(如纳米CaCO<sub>3</sub><sup>[9]</sup>、ZnO<sup>[10]</sup>)、交联、共聚、扩链和生产PLA/聚合物共混物<sup>[11-16]</sup>,在一定程度上改善了PLA发泡材料的性能,拓宽了应用范围。

PLA黏度低,发泡难度大,笔者对偶氮二甲酰胺(AC)发泡剂进行改性,以适应PLA的加工温度,通过化学交联的方法提高PLA的熔体强度,并对交联PLA/PBAT共混物进行发泡,以期获得具有良好力学性能且低成本的PLA发泡材料。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

PLA:4032D,美国Nature Works公司;

三丙烯基异氰尿酸酯(TAIC):工业级,大连天源基化学有限公司;

过氧化二异丙苯(DCP):分析纯,成都科隆化工试剂有限公司;

聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT):工业级,杭州鑫富新材料有限公司;

AC发泡剂:分析纯,成都科隆化学试剂有限公司;

硬脂酸锌(ZnSt):分析纯,成都科隆化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器及设备

转矩流变仪:XSS-300型,上海轻机模具厂;

平板硫化机:YJ66型,成都航发液压有限公司;

电热真空干燥箱:ZK-82 A型,上海市实验仪器

总厂;

电子天平:CP224S型,德国Sartorius集团;

电子万能材料试验机:AGS-J型,日本岛津有限公司;

热重(TG)分析仪,WRT-2P型,美国TA仪器有限公司;

动态流变仪:MARS 600型,德国赛默飞世尔科技公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet-560型,美国尼高力仪器公司。

### 1.3 试样制备

#### (1)原料准备。

发泡剂的配制:将发泡剂AC、改性剂ZnSt的质量分数分别为15%,30%,研磨均匀并干燥待用;

发泡树脂基体的制备:通过添加不同含量的TAIC和DCP分别获得低交联度(凝胶质量分数为37%)PLA(C-PLA-L)和高交联度(凝胶质量分数为59%)PLA(C-PLA-H)树脂。

#### (2)混炼。

按PLA/PBAT质量比为80/20称取物料,加入转矩流变仪混炼头中混炼熔融,然后分别与不同含量的发泡剂(质量分数分别为1.5%,3%,5%)共混。混炼条件:温度150~180℃,转速50 r/min,时间5 min。

#### (3)压制发泡。

将经过混炼的团料,在压机上用10 mm×8 mm×4 mm的模框进行压制发泡。条件:温度190℃,预热时间3~5 min,压力12.5 MPa,压制时间3 min,冷却时间3 min。

#### (4)制样:在压制发泡板上锯切测试用样条。

### 1.4 测试与表征

凝胶含量测试:以三氯甲烷为溶剂,将一定量的交联PLA试样用滤纸和铜网包裹好称量后,在装有回流装置的索式抽提器中抽提48 h,取出烘干再次称重,并按以下公式计算凝胶含量( $n$ ):

$$n=(W_g/W_0) \times 100\%$$

式中: $W_g$ ——凝胶干重,g;

$W_0$ ——试样初始质量,g。

FTIR分析:将交联PLA经抽提烘干后的干凝胶研磨成粉,取适量与KBr粉末再次研磨均匀,并压制成FTIR测试用标准薄片后,进行FTIR分析。

动态流变分析:采用流变仪测试纯PLA,交联C-PLA-H,以及C-PLA-H/PBAT熔体在恒定低扫描

频率下,其黏弹性随时间的变化。测试温度 190 °C,扫描频率 0.01 rad/s,时间 10 min。

密度测试:将发泡试样制成规则的长方体,并用电子秤称出质量  $W$ ,再根据以下公式计算其密度  $\rho$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ):

$$\rho = \frac{W}{a \times b \times h}$$

式中: $W$ ——试样质量,g;

$a$ ——试样长度,cm;

$b$ ——试样宽度,cm;

$h$ ——试样厚度,cm。

SEM分析:将冲击测试样条的断面,经真空镀金后在SEM下观察断面形貌,激发电压为 20 kV。

拉伸性能:按照 GB 13022-1991 制备试样并测试,测试速度 20 mm/min。

TG分析:取已配制好的发泡剂试样质量 4~5 mg,在氮气气氛下(气体流量为 100 mL/min)从室温开始升温到 300 °C,升温速率为 5 °C/min。观测不同配比发泡剂的热分解起始温度,终止温度,以及分解最大速率温度等特征参数值的变化。

## 2 结果与讨论

### 2.1 发泡剂的配制与效果分析

AC是目前最为常用的化学发泡剂之一,因其无臭、无毒、不易燃,且发气量大,气泡均匀,对制品无污染,对模具无腐蚀等优点而被广泛应用。纯AC发泡剂的分解温度在 200~220 °C左右,但因该实验采用PLA发泡基体,而PLA在高温下易发生降解,因此需要进行活化处理纯AC发泡剂,降低其分解温度。

ZnSt是AC常用的活化剂,图1为纯AC以及活化后的AC的TG曲线。从图1可以看到,纯AC发泡剂为三阶失重,第一阶是主分解,其起始分解温度大约为 205 °C,第二阶和第三阶分解为次级分解反应,起始分解温度分别在 223 °C和 238 °C左右。当添加了质量分数 15%的ZnSt后,发泡剂变为两阶失重,起始分解反应温度下降到了 187 °C附近,次级分解反应温度下降到 205 °C附近;当ZnSt的质量分数为 30%时,主分解反应温度仅小幅度降低到 178 °C,次级分解反应温到 196 °C。图2为AC/活化AC的DTG曲线,从图2可以看到,AC的主分解的最快分解温度是 218 °C,次分解最快温度为 235 °C;而添加质量分数为 15%的ZnSt后的主分解最快分解温度为 196 °C,添加质量分数为 30%的ZnSt后变

为 191 °C。综上所述,用质量分数为 15%的ZnSt活化后的AC发泡剂适用于PLA的发泡。

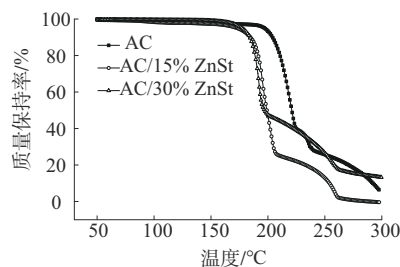


图1 AC/活化AC的TG曲线

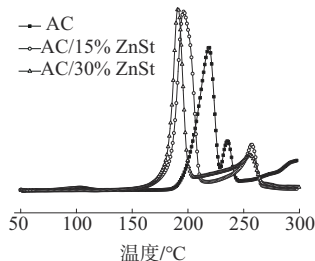


图2 AC/活化AC的DTG曲线

### 2.2 交联PLA分析

#### (1) FTIR分析。

TAIC是PLA的有效交联剂。TAIC的分子结构中双键容易在自由基等的引发下断键生成自由基,随后再与大分子自由基反应形成交联网络结构。TAIC与PLA的化学反应机理<sup>[17-18]</sup>如图3所示。当DCP等引入PLA/TAIC体系中时,DCP受热分解产生自由基RO·,然后自由基RO·夺取了PLA分子链上的叔氢,从而在PLA分子链上引入自由基。与此同时,TAIC分子中的双键也被打开,有两种自由基可能会被激发产生,随后这两种自由基将与PLA大分子自由基反应生成交联网络结构。

图4为纯PLA和C-PLA的FTIR谱图。由图4

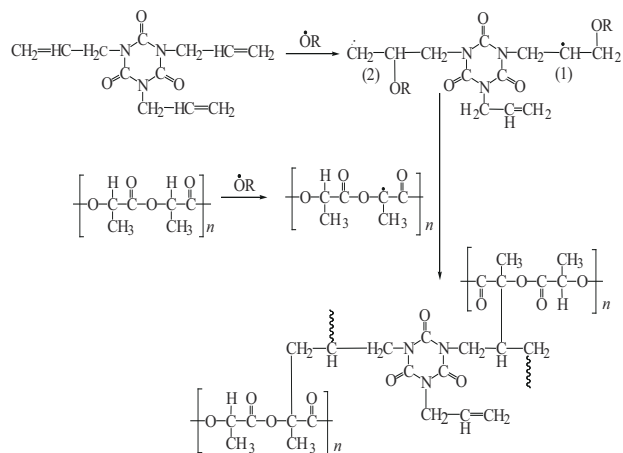


图3 TAIC和PLA的交联反应示意图

可知,PLA分子链中C=O及C—O—C的伸缩振动峰分别出现在波数为1756 cm<sup>-1</sup>和1180 cm<sup>-1</sup>处。但当PLA与TAIC及DCP熔融共混后,C-PLA-L和C-PLA-H的FTIR曲线中均出现了两处新峰,波数分别为1691 cm<sup>-1</sup>和1627 cm<sup>-1</sup>,它们分别对应TAIC分子链中C=O和C=C的伸缩振动峰。从图4还可以看到,C=O和C=C的吸收峰的强度都随着TAIC含量的增加而增强,这也表明了TAIC与PLA间发生了交联反应。

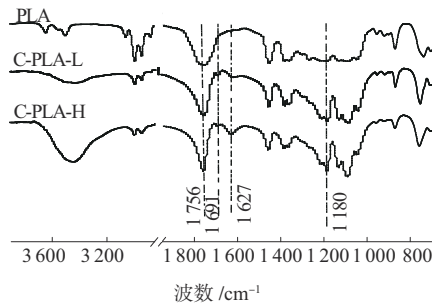


图4 PLA及C-PLA的FTIR图

(2)黏度。

在发泡成型过程中,材料的发泡性能很大程度上受到基体黏弹性的变化的影响。图5为纯PLA,C-PLA熔体黏度随时间的变化。由图5可知,纯PLA熔体的黏度很小,熔体强度很低;而交联网络结构的引入,使得分子链的活动能力受到很大限制,C-PLA的熔体黏度急剧增加,表现出很高的熔体强度,随着时间的延长,其黏度略有变化,但仍保持了高的熔体强度。熔体黏度随着C-PLA的交联密度的增加而增加。

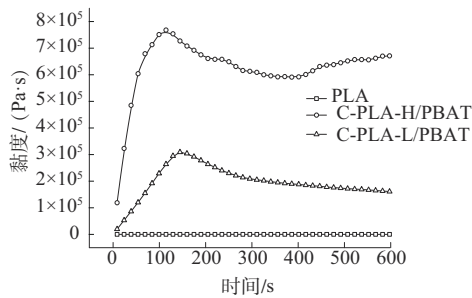


图5 纯PLA,C-PLA-L,C-PLA-H熔体黏度随时间的变化

2.3 发泡材料性能分析

(1)密度分析。

图6为发泡剂含量对PLA,C-PLA材料密度的影响。从图6可以看到,随着发泡剂含量的增加,纯PLA及C-PLA材料的密度均逐渐降低。相比之下,纯PLA基体添加发泡剂后,其密度随着发泡剂含量

的增加降低较缓慢,在发泡温度下,纯PLA熔体强度不能够有效地包覆发泡剂分解产生的气体,导致部分气体逃逸,影响发泡材料的密度;对于C-PLA-L和C-PLA-H,由于基体含有交联结构,相同温度下熔体强度相对较高,能包覆住发泡剂分解产生的气体,因而其密度比纯PLA的小,同时交联度相对较高的C-PLA-H也就比C-PLA-L具有更好的气体包覆效果,因而其密度会低于C-PLA-L的密度。当发泡剂的质量分数为5%时,C-PLA-H/PBAT的密度达到了0.58 g/cm<sup>3</sup>,远低于纯PLA密度1.24 g/cm<sup>3</sup>。

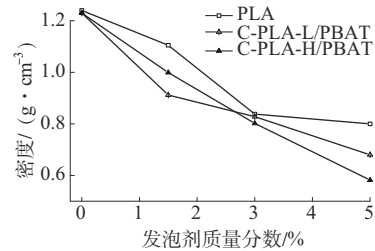


图6 发泡剂含量对PLA,C-PLA/PBAT密度的影响

主要研究AC发泡剂质量分数为3%时发泡材料的结构与性能。图7为PLA中添加PBAT后对PLA密度的影响。可以看到PLA中添加PBAT后,纯PLA和C-PLA-H的发泡密度都有不同程度的下降。未交联PLA的添加PBAT后,发泡密度从0.838 g/cm<sup>3</sup>下降到了0.746 g/cm<sup>3</sup>,下降了约11%,低交联PLA与高交联PLA的发泡密度分别从0.954 g/cm<sup>3</sup>,0.884 g/cm<sup>3</sup>降到了0.828 g/cm<sup>3</sup>,0.802 g/cm<sup>3</sup>,降幅分别达13%,9%。PBAT的加入可以改善PLA的发泡性能。

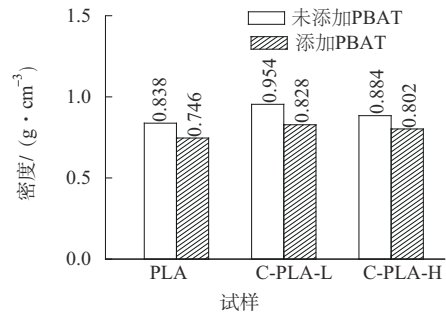


图7 PBAT对PLA,C-PLA密度的影响(发泡剂质量分数为3%)

(2)泡孔形态分析。

图8为添加质量分数为3%的发泡剂,未添加与添加PBAT发泡PLA与C-PLA的SEM照片。由图8可知,添加PLA质量分数为3%的发泡剂,随着交联度的提高,发泡后PLA泡孔尺寸和分布很不均匀,泡孔的合并及塌陷较严重,泡孔的形状也很不规则。

则,泡孔内壁和边缘都很不光滑,泡孔形态很差。纯PLA的熔体强度较低而且发泡性能很差,交联虽然可以提高PLA的熔体强度,但是并不能明显改善基体的发泡性能。

在纯PLA添加PBAT后,泡孔的尺寸和形状仍不均匀,泡孔的直径由纯PLA的 $100\ \mu\text{m}$ 增长到了 $350\ \mu\text{m}$ ,但泡孔内壁和边缘变得光滑。可能是因为添加PBAT后,PLA的熔体强度急剧下降,对发泡气体的保持性能下降,发泡气体在低熔体强度的基体中不断胀大,同时发生泡孔合并,使泡孔的直径增大。在低交联度C-PLA-L中添加PBAT后,泡孔的尺寸和分布变得很均匀,泡孔的形态也很好,泡孔的内壁和边缘都变得光滑。在高交联度C-PLA-H加入PBAT后,泡孔尺寸进一步改善。在交联PLA中添加PBAT后,PLA分子链的运动能力得到改善,发泡剂能够与基体均匀共混,并且泡孔的生长受到的阻力也减小,同时由于交联结构的作用,基体仍具有较好的熔体强度,使得泡孔的形态得到较好的保持,因此PLA的发泡性能得到明显改善,泡孔密度得到了明显提高,泡孔尺寸变得均匀,形状也变得规则。

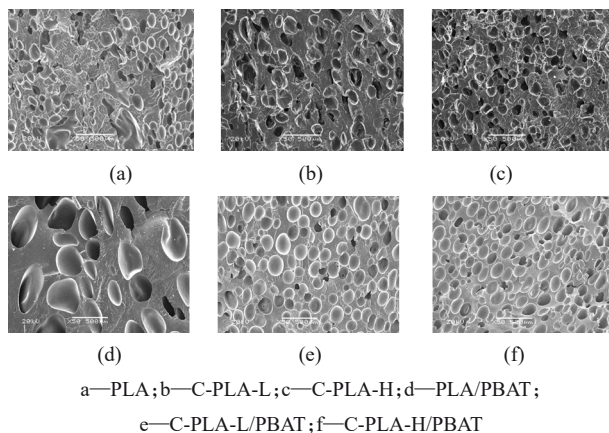


图8 添加PBAT发泡PLA,C-PLA的SEM照片  
(发泡剂质量分数为3%)

图9为不同发泡剂含量的PLA,C-PLA发泡材料的脆断面的SEM照片。由图9可知,当发泡剂质量分数为1.5%时,纯PLA的泡孔分布均匀并且孔径较小,约为 $100\ \mu\text{m}$ ,基本都为球形泡孔;随着发泡剂含量的增加,泡孔尺寸变大,形态及结构逐渐变差,当发泡剂质量分数为5%时泡孔形态变得不规则,出现了明显的穿孔、并孔现象。在C-PLA-L/PBAT中随着发泡剂含量的增加泡孔形态改善,但泡孔尺寸变大,当发泡剂质量分数为5%时,泡孔分

布变得不均匀,泡孔尺寸变得更大。而随着发泡剂含量的增加,C-PLA-H/PBAT泡孔分布变得更均匀,但尺寸依旧变大。这说明随着PLA交联度的增加,PLA/PBAT泡沫的泡孔会变得更均匀,密度更低,这与前面的分析一致;但交联度不够,当发泡剂过多时PLA泡孔形态、大小和分布会变差。

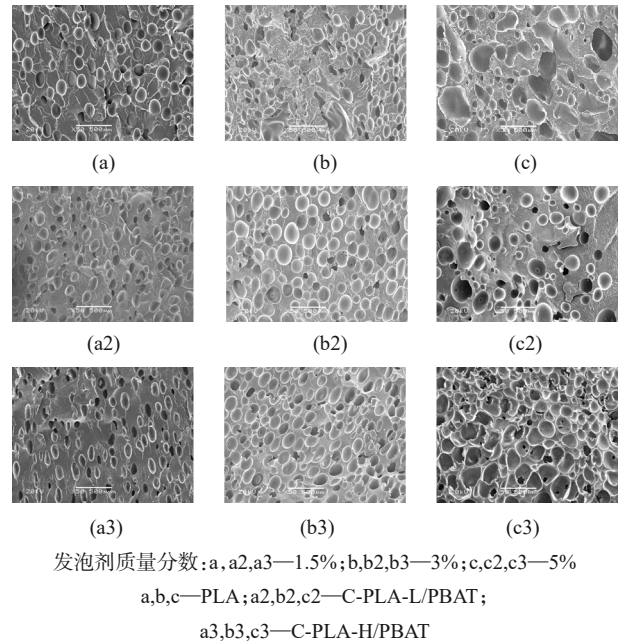


图9 不同发泡剂含量的PLA,C-PLA发泡材料的脆断面的SEM照片  
(3)拉伸性能。

图10为发泡剂含量对PLA,C-PLA/PBAT拉伸性能的影响。由图10可知,随着发泡剂含量的增加,纯PLA发泡的拉伸强度和断裂伸长率均随之降

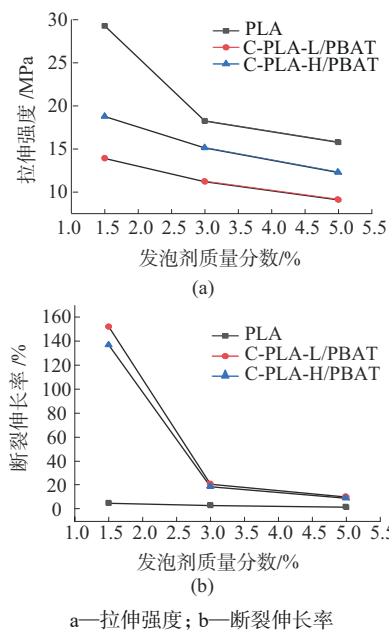


图10 发泡剂含量对PLA,PLA/PBAT力学性能的影响

低,仅加入质量分数1.5%的发泡剂,其拉伸强度从纯PLA的58.7 MPa下降到28 MPa,当发泡剂质量分数达到3%时,其拉伸强度下降到17 MPa左右。纯PLA发泡后,泡孔结构及形态很差,随着发泡剂含量的增加,基体中出现大量的缺陷,并成为应力集中点而降低了材料的拉伸性能。

分析可知,随着发泡剂含量的增加PLA,C-PLA/PBAT材料的拉伸强度及断裂伸长率都随之降低,当发泡剂质量分数为1.5%时,PLA,C-PLA/PBAT材料的拉伸性能表现良好,当发泡剂的质量分数为3%时,PLA,C-PLA/PBAT材料的拉伸强度及断裂伸长率都急剧下降。相比之下,具有高交联度的C-PLA-H/PBAT复合材料的拉伸强度相对较高,但是低交联度的C-PLA-L/PBAT的韧性相对较好。

图11为PBAT对PLA,C-PLA拉伸性能的影响。由图11可知,未添加PBAT直接发泡的PLA材料的断裂伸长率都很差,基本都为脆性断裂;加入PBAT改性后发泡,PLA,C-PLA材料的韧性都得到了较明显的改善。特别是纯PLA基体,经PBAT改性后发泡,其断裂伸长率显著提高;低交联度的C-PLA-L基体的韧性也得到了较明显的改善,但PBAT对C-PLA-H基体的影响不大。C-PLA-L及C-PLA-H由于具有交联结构,因而PBAT对其增韧改性的效果

差于纯PLA;C-PLA-H交联度高,对分子链活动性的限制更大,所以PBAT对其改性效果相对更差。但是添加PBAT后,PLA,C-PLA材料的拉伸强度均有不同程度的降低,这是因为PBAT自身的拉伸强度比PLA低等原因造成的;高交联度C-PLA-H拉伸强度比低交联度C-PLA-L高。

### 3 结论

PLA由于熔体强度低,直接发泡后,泡孔尺寸及分布极不均匀,出现了严重的泡孔合并和塌陷现象。化学交联后,PLA的熔体强度得到有效提高,包覆住发泡气体,减少穿孔合并和泡孔塌陷现象,但发泡效果不够理想。在交联PLA中添加PBAT,改善基体的韧性,再发泡,通过密度分析、SEM微观分析等手段分析表明,PBAT的加入极大地改善了基体的发泡性能,泡孔的尺寸、形态以及分布得到均匀化,发泡材料的密度也显著降低。PBAT在一定程度上起到了表面活性剂的作用,发泡成型后,材料中的泡孔尺寸仍然较大,并未达到微米级,不能实现微孔塑料的增强增韧效果,材料的拉伸性能都随着发泡剂含量的增加而下降。在后续研究中,可采用更多不同种类及不同用量的发泡剂、发泡促进剂、交联剂及共混物优化PLA发泡材料的结构,提升其使用性能,拓宽其应用范围。

### 参考文献

- [1] Tian Shuheng, Jiao Yuchen, Gao Zirui, et al. Catalytic amination of poly(lactic acid) to alanine[J]. Journal of the American Chemical Society, 2021, 143(40):16 358–16 363.
- [2] Azin P, Rasoul M S, Sara E, et al. Functionalized graphene nanoplatelets/poly(lactic acid)/chitosan nanocomposites: Mechanical, biodegradability, and electrical conductivity properties Polymer Composites[J]. Polymer Composites, 2022, 43(1):411–421.
- [3] 李鹏珍,李凤红,师岩,等.聚乙炔醇发泡材料研究进展[J].工程塑料应用, 2021, 49(2):172–176.  
Li Pengzhen, Li Fenghong, Shi Yan, et al. Research progress of poly(vinyl alcohol) foam materials[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(2):172–176.
- [4] Mokhtari A R, Mousavi S R, Estaji S, et al. Evaluating the mechanical, thermal, and antibacterial properties of poly(lactic acid)/silicone rubber blends reinforced with (3-aminopropyl) triethoxysilane-functionalized titanium dioxide nanoparticles[J]. Polymer Composites, 2022, 43(7):4 165–4 178.
- [5] 刘倩倩,唐川,杜哲,等.超临界CO<sub>2</sub>发泡法制备PLGA多孔组织工程支架[J].高分子学报, 2013(2):174–182.  
Liu Qianqian, Tang Chuan, Du Zhe, et al. Fabrication of porous poly(lactic acid-co-glycolic acid) scaffolds using supercritical carbon dioxide[J]. Acta Polymer Sinica, 2013(2):174–182.

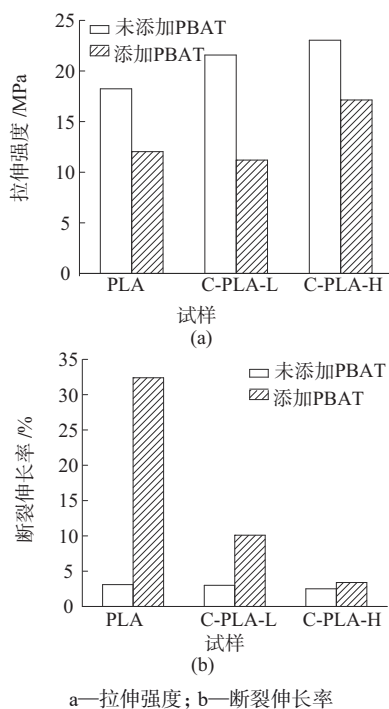


图11 PBAT对PLA,C-PLA发泡材料拉伸性能的影响(发泡剂质量分数为3%,PLA/PBAT=80/20)

- [6] 李金伟,何继敏,王苏炜,等.成核改性对聚乳酸注塑发泡成型的影响[J].塑料工业,2016,44(3):135-139.  
Li Jinwei, He Jimin, Wang Suwei, et al. Influence on foam injection molding of PLA with nucleating agent[J]. China Plastic Industry, 2016, 44(3):135-139.
- [7] Amirali S, Hanieh K, Rasoul M S, et al. Continuous extrusion foaming process of biodegradable nanocomposites based on poly(lactic acid)/carbonaceous nanoparticles with different geometric shapes: An insight into involved physical, chemical and rheological phenomena[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140(19). DOI: 10.1002/app.53822.
- [8] Venkatesan K B, Karkhanis S, Matuana L M. Microcellular foaming of poly(lactic acid) branched with food-grade chain extenders[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138(29). DOI: 10.1002/app.50686.
- [9] Mina M, Omid Y, Hamid Garmabi. A simple method for preparation of microcellular PLA/calcium carbonate nanocomposite using super critical nitrogen as a blowing agent: Control of microstructure[J]. Advances in Polymer Technology, 2018:37(8):3 017-3 026.
- [10] 文涛,石璞,赵田,等.纳米 ZnO/PBS 及其发泡体系性能[J].工程塑料应用,2017,45(1):17-22.  
Wen Tao, Shi Pu, Zhao Tian, et al. Properties of nano-ZnO modified PLA/PBS composite and foaming system[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(1):17-22.
- [11] Li Bo, Zhao Guoqun, Wang Guilong, et al. Super high-expansion poly(lactic acid) foams with excellent oil-adsorption and thermal-insulation properties fabricated by supercritical CO<sub>2</sub> foaming[J]. Advanced Sustainable Systems, 2021, 5(5). DOI: 10.1002/adsu.202000295.
- [12] 郝绍菊,马竞.聚乳酸形状记忆发泡材料制备与形状记忆性能研究[J].塑料科技,2022,5(1):22-26.  
Hao Shaoju, Ma Jing. Preparation and shape memory properties of polylactic acid shape memory foam[J]. Plastics Science and Technology, 2022, 5(1):22-26.
- [13] Staffa L H, Bettini S H P, Chinelatto M A. Mechanical properties of PLA/PCL blends compatibilized with PEG-b-PCL multiblock copolymer[J]. Macromolecular Symposia, 2022, 406(1). DOI: 10.1002/masy.202200039.
- [14] 向耀兴,张天萍,甄卫军,等.星型支化改性聚乳酸的超临界 CO<sub>2</sub> 发泡行为研究[J].塑料科技,2022,50(7):15-21.  
Xiang Yaoxing, Zhang Tianping, Zhen Weijun, et al. Study on supercritical carbon dioxide foaming behavior of star-shaped branched modified polylactic acid[J]. Plastics Science and Technology, 2022, 50 (7):15-21.
- [15] Zhao Haibin, Yan Xingru, Zhao Guoqun, et al. Microcellular injection molded polylactic acid/poly( $\epsilon$ -caprolactone) blends with supercritical CO<sub>2</sub>: Correlation between rheological properties and their foaming behavior[J]. Polymer Engineering and Science, 2016, 56(8):939-946.
- [16] Faisal A M, Li Yan, Yao Zhen, et al. TPU/PLA blend foams: Enhanced foamability, structural stability, and implications for shape memory foams[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 136(17). DOI: 10.1002/app.47416.
- [17] 金飞,林强,王迎雪,等.交联结构聚乳酸生物降解材料的研究进展[J].机械工程材料,2015,39(7):11-16.  
Jin Fei, Lin Qiang, Wang Yingxue, et al. Research progress of crosslinked poly(lactic acid) biodegradable materials[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(7):11-16.
- [18] Bin P S, Jun L Y, Hee K K, et al. Triallyl isocyanurate-assisted grafting of maleic anhydride to poly(lactic acid): Efficient compatibilizers for poly(lactic acid)/talc composites with enhanced mechanical properties[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 139(2). DOI: 10.1002/app.51488.