

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.04.002

# 聚酰亚胺改性三聚氰胺泡沫的制备及性能

何利华, 李慧霞, 刘志凌, 蒋凡顺, 张建勋

(河南省中原大化集团有限责任公司, 河南濮阳 457004)

**摘要:** 为提高三聚氰胺泡沫的热稳定性及力学强度, 介绍了三聚氰胺树脂与水溶性聚酰亚胺(PI)共混改性方法, 研究了PI增韧三聚氰胺树脂预聚体的合成配方和发泡工艺, 同时也探讨了PI的添加方式及添加量对三聚氰胺泡沫性能的影响。采用万能电子试验机、极限氧指数仪、扫描电子显微镜、导热系数仪等对改性前后三聚氰胺泡沫的力学性能、阻燃性、微观形貌、耐热性进行了测试和分析。结果表明, 通过添加水溶性PI, 在泡沫内部引入含两个与氮键合的酰基基团, 并形成网络互穿结构, 其热稳定性、表观密度、极限氧指数、烟密度、隔热性能均有显著提高。为了改善PI改性三聚氰胺泡沫的总体性能, 进一步研究发现, PI添加量为三聚氰胺树脂预聚体总质量的5%时, 泡沫失重速率最高温度峰值由369.69 °C提高到383.66 °C、拉伸强度提高了11.17%、撕裂强度提高了21.82%、断裂伸长率提高了12.51%, 改性泡沫的各项性能最佳。

**关键词:** 聚酰亚胺; 三聚氰胺树脂预聚体; 聚酰亚胺改性三聚氰胺泡沫; 微波发泡工艺; 共混改性

**中图分类号:** TB3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-3539(2025)04-0008-07

## Preparation and properties of polyimide modified melamine foam

HE Lihua, LI Huixia, LIU Zhiling, JIANG Fanshun, ZHANG Jianxun

(Henan Zhongyuan Dahua Group Co., Ltd., Puyang 457004, China)

**Abstract :** To improve the thermal stability and mechanical strength of melamine foam, a blending modification method of melamine resin with water-soluble polyimide (PI) was introduced, exploring the synthesis formulation and foaming process of polyimide toughened melamine resin prepolymer, while also discussing the effects of the addition method and amount of polyimide on the performance of melamine foam. The mechanical properties, flame retardancy, micro-morphology, and heat resistance of the melamine foam before and after modification were tested and analyzed using a universal electronic testing machine, oxygen index instrument, scanning electron microscope, and thermal conductivity meter. The results show that by adding water-soluble PI, acyl groups bonded with two nitrogen atoms are introduced into the foam, forming an interpenetrating network structure, significantly improving its thermal stability, apparent density, limiting oxygen index, smoke density, and thermal insulation performance. To enhance the overall performance of polyimide modified melamine foam, further research find that when the addition amount of polyimide is 5% of the total amount of melamine resin prepolymer, the peak temperature of the foam's weight loss rate increases from 369.69 °C to 383.66 °C, tensile strength increases by 11.17%, tear strength increases by 21.82%, and elongation at break increases by 12.51%, achieving optimal performance for the foam.

**Keywords :** polyimide ; melamine resin prepolymer ; polyimide modified melamine foam ; microwave foaming process ; blending modification

目前广泛应用于石油化工、节能建筑、轨道交通、新能源、电子信息等行业设施的隔热保温材料存在许多不足, 如无机类保温材料(如珍珠岩、矿棉、岩棉、玻璃棉、泡沫玻璃等)容重较大、致密性和可加

工性较差、保温隔热性能相对较弱; 有机类保温材料(如聚苯乙烯泡沫、硬质聚氨酯泡沫、酚醛泡沫、聚乙烯泡沫等)<sup>[1]</sup>存在易燃、燃烧毒性高等安全隐患。因此, 开发探索新型高性能隔热防火保温材料成为

**通信作者:** 何利华, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事三聚氰胺泡沫的研发及生产

**收稿日期:** 2025-01-23

**引用格式:** 何利华, 李慧霞, 刘志凌, 等. 聚酰亚胺改性三聚氰胺泡沫的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(4): 8-14.

HE Lihua, LI Huixia, LIU Zhiling, et al. Preparation and properties of polyimide modified melamine foam[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(4): 8-14.

科研人员及企业研究的热点。

三聚氰胺泡沫又称密胺泡沫,由三聚氰胺和多聚甲醛缩聚得到三聚氰胺树脂后采取梯度微波发泡制得。其内部为开孔率高达99%的三维网格体系,能够有效阻滞空气的对流传热并迅速使声波进入泡沫体的深层并转换为网格震动被消耗掉,使得三聚氰胺泡沫成为一种出色的吸音隔热保温材料,被广泛应用于航空航天、轨道交通、石油化工、节能建筑、电子信息等领域。但是传统的三聚氰胺泡沫耐温性中等、韧性不足<sup>[2]</sup>,是制约其市场拓展的瓶颈问题。为了提高三聚氰胺泡沫的耐温性及韧性,前期很多科研工作者对三聚氰胺泡沫的制备与增韧改性进行了大量研究。如Yasuo等<sup>[3]</sup>使用硅偶联剂对三聚氰胺树脂进行增韧改性,并且在发泡阶段加入少量异氰酸酯,使泡沫韧性得到提高,同时没有损失其阻燃性和热绝缘性,但该泡沫的韧性仍不太理想。雷昆等<sup>[4]</sup>用三-(2-羟乙基)异氰酸脲酯对三聚氰胺树脂进行增韧改性,添加质量分数为15%时,泡沫的表观密度、力学性能及压缩强度提高,但热绝缘性能变差。王宁等<sup>[5]</sup>用柔性碳链取代三聚氰胺上的氢原子改善了泡沫的脆性,但成本太高。王玉忠等<sup>[6]</sup>加入纤维材料来改善泡沫的力学性能,原理是纤维材料将树脂基材串联在一起,起到“桥”作用,虽然起到一定增韧性,但由于纤维的添加导致乳化困难,泡沫气孔均匀性较差。

新型的聚酰亚胺(PI)泡沫具有无毒、低烟、较强的韧性和较高的热稳定性,被广泛地应用于航空航天以及船舶等领域,但高成本限制了PI泡沫的民用市场。笔者采用三聚氰胺树脂与PI共混改性方法,探索PI增韧三聚氰胺树脂预聚体合成配方和发泡工艺,得到一种新型高性能吸声隔热轻量化材料。通过引入PI结构对三聚氰胺泡沫进行改性,一方面,三聚氰胺泡沫材料在保持原有轻质、阻燃特性的基础上,提高了耐热温度,增强了材料的热稳定性和力学强度<sup>[7]</sup>;另一方面,PI的引入还改善了泡沫的耐化学腐蚀性,拓宽了其应用场景。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

三聚氰胺:纯度 $\geq 99.5\%$ ,河南省中原大化集团有限责任公司;

96级多聚甲醛:分析纯,南通江天化学股份有限公司;

焦亚硫酸钠:分析纯,河南省中原大化集团有限责任公司;

正戊烷:分析纯,天津市大茂化学试剂厂;

阴离子表面活性剂:化学纯,广东省洁氏化学有限公司;

甲酸:纯度 $\geq 98.5\%$ ,天津市光复精细化工研究院;

3,3',4,4'-二苯甲酮四羧酸二酐(BTDA):纯度99%,上海麦克林生化科技有限公司;

4,4'-二氨基二苯醚(ODA):纯度98%,上海麦克林生化科技有限公司;

4,4'-氧双邻苯二甲酸酐(ODPA):纯度99.5%,福斯曼科技(北京)有限公司;

N-甲基-2-吡咯烷酮(NMP):分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;

无水甲醇:分析纯,河南省中原大化集团有限责任公司。

### 1.2 主要仪器及设备

电子天平:FB203-N,上海梅特勒-托利多公司;

微波化学反应器:MCR-3,郑州宇祥仪器设备有限公司;

恒速搅拌加热器:DW-2,巩义市予华仪器有限责任公司;

热重(TG)分析仪:STA8000,美国PerkinElmer公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:FT-IR200,美国Nicolet公司;

氧指数测定仪:FTT0077,英国FTT公司;

烘箱:KSW-6-12,上海树立仪器仪表有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):MC-D500U(C),江西凤凰光学科技有限公司;

烟密度仪:ZY6166A-PC,济南中诺仪器有限公司;

万能电子试验机:HDW-2KN,吉林省华洋仪器设备有限公司。

### 1.3 试样制备

#### 1.3.1 PI粉的制备

取一定量的BTDA和正戊烷加入三口烧瓶内,回流温度下反应至体系变澄清后,再继续恒温反应30 min,制得3,3',4,4'-二苯甲酮四甲酸二甲酯;正戊烷回流温度下,交替加入一定量的三聚氰胺、3,3',4,4'-二苯甲酮四甲酸二甲酯和ODA,恒温反应

1 h得到聚酯铵盐溶液<sup>[8-9]</sup>;采用旋转蒸发仪 50 °C水浴旋蒸,除去多余溶剂,得到固含量 75%左右的浓缩聚酯铵盐溶液;200 °C烘箱内烘干,研磨过筛,即可得水溶性PI粉<sup>[10]</sup>。

### 1.3.2 三聚氰胺树脂预聚体的制备

将三聚氰胺、多聚甲醛、焦亚硫酸钠、脱盐水按照一定物质的量比加入三口烧瓶中,搅拌转速控制 100 r/min,油浴控温,升温至 90 °C反应液逐渐透明,用浓度为 20%的NaOH溶液调节pH值在 8.0~9.0,继续升温至 95 °C,反应时间约 30 min后,取一滴反应液滴入到 25 °C蒸馏水中,如果反应液在水中呈白色雾状缓慢扩散,需要继续反应一段时间;直到反应液滴入水中呈大量白雾搅拌后成牛奶状,则为反应终点,此时停止反应,迅速降至 35~40 °C,待发泡备用<sup>[11]</sup>。

### 1.3.3 PI改性三聚氰胺泡沫发泡工艺

取三聚氰胺树脂预聚体 30份,依次加入发泡剂(正戊烷 0.5~1.5份)、乳化剂(阴离子表面活性剂 0.3~0.8份)、固化剂(甲酸 0.01~0.1份),PI粉(0~3份)机械快速搅拌均匀,倒入模具内,设定微波发泡(功率 800~1 000 W)<sup>[12]</sup>,发泡 3~5 min进行发泡定型;将泡沫在烘箱中高温固化 2 h左右,即可得到性能稳定的PI改性三聚氰胺泡沫。

## 1.4 性能测试与表征

(1)泡沫表观密度根据 GB/T 6343-2009,测定单位体积泡沫质量,测量精确度为 0.1%,试样总体积至少 100 cm<sup>3</sup>,至少测试 5个试样。

(2)力学性能采用万能电子试验机测定,根据 GB/T 6344-2008测定泡沫的拉伸强度和断裂伸长率,拉伸速率为 450 mm/min;根据 GB/T 10808-2006测定泡沫的撕裂强度,撕裂速率为 100 mm/min。

(3)根据 GB/T 2406.2-2009测定泡沫的极限氧指数(LOI),泡沫尺寸为长 80~150 mm,宽(10±0.5) mm,厚(10±0.5) mm,准备样品 12~15个,点燃方法为顶面点燃法,测定条件为室温(23±2) °C,湿度为 50%±5%。

(4)烟密度根据 GB/T 8627-2007测定,泡沫尺寸为 25.4 mm×25.4 mm×6.2 mm,准备平行样品 2个,以丙烷作为燃气,燃气压力为 276 kPa。

(5)泡孔结构分析。分别将改性前后三聚氰胺泡沫切成薄片,利用SEM对泡沫样品的微观结构进

行分析观察,测定泡沫内部骨架、泡孔开闭孔情况和改性后PI在泡沫内部的分布情况等。

(6) FTIR分析。分别将改性前后的三聚氰胺泡沫研磨成粉末,采用KBr作为稀释剂,与样品充分研磨混合进行压片,采用FTIR仪进行红外光谱分析,波数的测量范围为 4 000~500 cm<sup>-1</sup>。

(7) TG分析。分别将改性前后的三聚氰胺泡沫研磨呈粉末状,采用TG分析仪进行TG分析,测试条件为空气气氛,气体流量 20 mL/min,温度测试范围 50~750 °C,升温速率为 10 °C/min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PI改性三聚氰胺泡沫的工艺研究

#### 2.1.1 PI合成溶剂的选择

PI合成过程通常使用高沸点极性非质子溶剂,主要包括二甲基甲酰胺、二甲基乙酰胺、NMP等,因这些溶剂在高温下仍能保持较好的稳定性,能够较好地促进合成顺利进行。但是由于这种高沸点溶剂难以挥发干净,导致PI产物烘干时间长、容易结大块和残留溶剂,从而导致乳化阶段分散性差且发泡速度慢<sup>[13]</sup>。为解决这一问题,选取低沸点的正戊烷作为溶剂,由于正戊烷与少量添加的NMP能够互溶,旋转蒸发过程能较为有效地除去难挥发的NMP<sup>[14]</sup>,又因三聚氰胺树脂预聚体发泡过程选取的发泡剂为正戊烷,因此PI粉末干燥后残留微量正戊烷,不影响后期发泡效果。

#### 2.1.2 PI微粉添加工艺

PI粉与三聚氰胺树脂两者之间混合存在的最主要的问题是固态PI粉在液态三聚氰胺树脂中的分散性问题。为此,在制备预发泡原液时直接采用物理搅拌的方式<sup>[15]</sup>,将固态粉与液体三聚氰胺混合均匀,随后对加料混合搅拌的先后顺序进行探讨,分为以下几种情况:(1)将三聚氰胺树脂、PI粉和发泡助剂一同加入,搅拌混匀;(2)先将三聚氰胺树脂与PI粉搅拌混匀后,再加入发泡助剂混合;(3)将三聚氰胺树脂与乳化剂先混匀,再加入PI粉混匀,最后加入剩余发泡助剂混合;(4)将三聚氰胺树脂、PI粉和乳化剂混匀后,再加入剩余发泡助剂混合。以 3份PI粉引入量为例,对以上 4种方式所得泡沫的情况进行分析,见表 1。

根据处理工艺的复杂程度,第 4种方式比前 3种工艺更为便捷,处理成本较低。因此,制备预发泡原液的投料混合方式采用第 4种方式,即直接将

表1 不同混合方式下所得泡沫情况

Hybrid mode	Condition of prefoaming stook solution	Foaming condition
1	Foaming liquid is sent out, directly out, no liquidity	Yellow dry scar inside foam
2	Foaming liquid solid-liquid distribution is not uniform, viscous, poor liquidity	Foam has a large number of yellow dry scars, foam is small and hard.
3	Foaming liquid is uniform, viscous yoghurt, and has good fluidity	Foam is fine and even with good elaaticty and strong toughness
4	Foaming liquid is uniform, viscous yoghurt, and has good fluidity	Foam is fine and even with good elaaticty and strong toughness

三聚氰胺树脂、PI粉和乳化剂混匀后,再加入剩余发泡助剂混合均匀,得到预发泡原液。

### 2.1.3 PI改性三聚氰胺泡沫发泡工艺的确定

PI改性三聚氰胺泡沫的发泡工艺对泡沫质量起着重要作用,发泡温度、发泡时间、微波功率、固化剂添加量等条件对泡沫力学指标、微观形貌等性能产生影响。如微波功率和发泡环境温度的升高有利于发泡,但功率和温度过高导致发泡速度大于固化速度,在发泡过程产生虚泡、穿孔现象;固化剂用量的增加有利于缩短泡沫发泡时间,但过量固化剂则会导致树脂过早固化从而导致泡体硬、小且无弹性。通过对比发泡功率、发泡温度、固化剂用量等工艺条件,确定了如下工艺:三聚氰胺树脂30份、PI粉1.5份、阴离子表面活性剂0.5份、固化剂0.2份、发泡剂0.9份,发泡温度60℃,微波功率1.2kW,发泡时间5min。该条件下的生产工艺得到的产品泡孔均匀、外观及力学性能较好。

## 2.2 PI改性三聚氰胺泡沫性能指标对比

### 2.2.1 表观密度

图1为PI改性三聚氰胺泡沫的表观密度变化曲线,由图1可以看出,随着PI含量不断增加,泡沫的

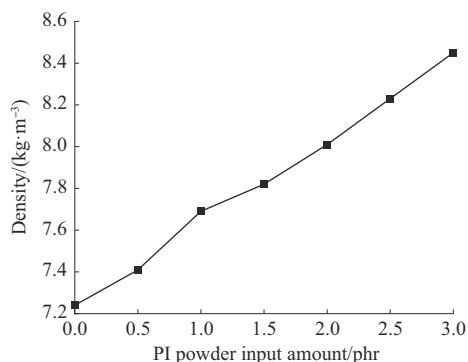


图1 PI改性三聚氰胺泡沫的表观密度变化曲线

Fig. 1 Apparent density change curve of PI modified melamine foam

表观密度也在逐渐增大,主要原因为发泡过程中,三聚氰胺与PI发生分子间相互作用增强,黏度进一步增加,影响发泡速率,从而使泡孔结构更加致密,泡沫体积密度增加。

图2为添加不同用量PI粉后(1为未添加、2为添加0.5份、3为添加1.5份、4为添加2份、5为添加3份)泡沫外观图。从图2可以看出,在一定量的树脂预聚体内添加不同用量PI粉后,在相同发泡环境下,PI粉添加1.5份时泡体成型及密度更均匀,平均密度为7.82 kg/m<sup>3</sup>;PI粉添加3份时,泡体明显变小,手感粗糙。



1—Not added; 2—Add 0.5 phr; 3—Add 1.5 phr; 4—Add 2 phr; 5—Add 3 phr

图2 添加不同份数PI粉的泡沫外观

Fig. 2 Appearance of foam with different proportions of PI powder

### 2.2.2 力学性能

图3为PI改性三聚氰胺泡沫的力学性能,由图3可以看出,随着PI含量的不断增加,泡沫的拉伸强度、撕裂强度、断裂伸长率均出现先升高后降低的趋势。在PI添加1.5份时,泡沫样品的力学指标均达到最大值,这主要是因为PI与三聚氰胺树脂存在分子间相互作用,引入两个与氮(N)键合的酰基(C=O)基团,有利于增韧相结构,从而使泡沫的力学性能指标升高,较未改性前拉伸强度提高11.17%、撕裂强度提高21.82%、断裂伸长率提高12.51%。但当PI添加量大于1.5份后,过量的PI不利于三聚氰胺基体形成良好的相间结合,继续增加了发泡液黏度,降低了乳化能力,进而削弱了分子间的相结合能力,力学性能各项指标也随之降低。

### 2.2.3 LOI分析

图4为PI改性三聚氰胺泡沫的LOI变化曲线,由图4可以看出,随着PI粉添加量的增加,改性后泡沫的LOI也在逐渐增加,阻燃性能也越好,添加0.5份PI时改性泡沫力学性能最优,LOI较未添加PI粉的泡沫提高了5.64%。这是由于随着酰亚胺环的引

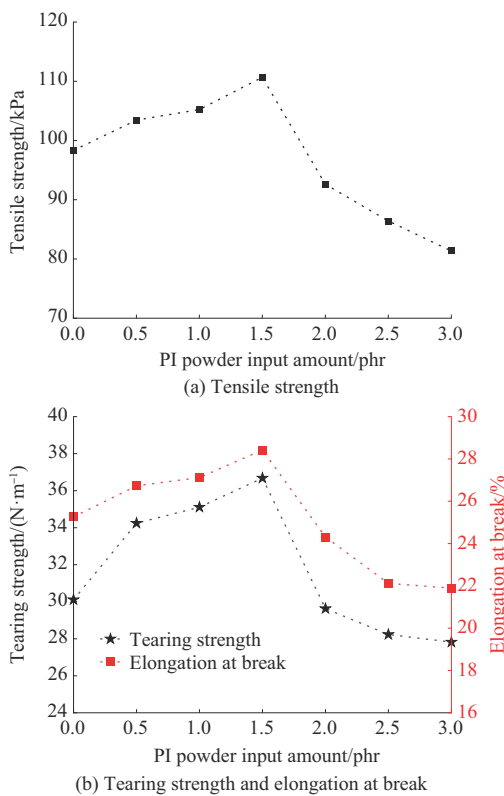


图3 PI改性三聚氰胺泡沫的力学性能

Fig. 3 Mechanical properties of PI modified melamine foam

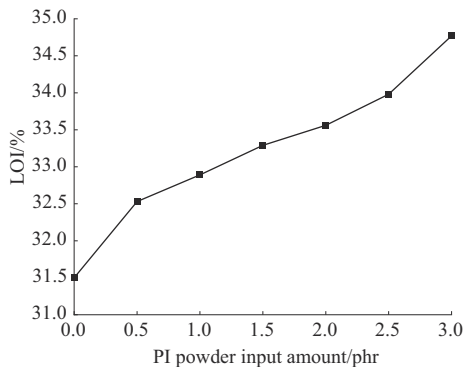


图4 PI改性三聚氰胺泡沫的LOI变化曲线

Fig. 4 LOI curve of PI modified melamine foam

入,三聚氰胺骨架与氧气的直接接触减少,高碳的PI阻燃性能优良,有效提升了改性泡沫的LOI值<sup>[16]</sup>。

#### 2.2.4 烟密度分析

图5为PI改性三聚氰胺泡沫的最大烟密度(MSD)和烟密度等级(SDR)变化曲线。由图5可以看出,随着PI含量的不断增加,改性三聚氰胺泡沫的MSD和SDR随之增加。这是因为PI微球体的加入不仅占据了一部分三聚氰胺树脂的比重,还由于自身的阻燃特性,使其所制备的改性泡沫的阻燃性逐渐提升,所以改性泡沫在燃烧时的燃点升高,燃烧后的烟量增加,其最大烟密度和烟密度等级也逐

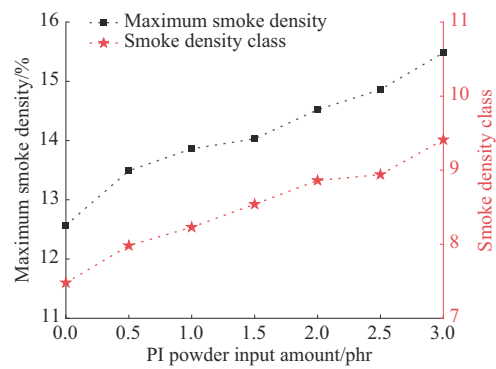


图5 PI改性三聚氰胺泡沫MSD和SDR变化曲线

Fig. 5 MSD and SDR curves of PI modified melamine foams

渐增大。

### 2.3 PI改性三聚氰胺泡沫结构表征

#### 2.3.1 PI改性三聚氰胺泡沫的泡孔结构分析

图6a为未改性三聚氰胺泡沫放大100倍的泡孔结构图,可以发现,三聚氰胺泡沫为开孔结构,泡孔均匀,多为五边形和六边形,骨架笔直且纤细。图6b为PI粉添加1.5份时改性泡沫放大100倍的泡孔结构,可以发现,改性后仍为开孔结构,泡孔结构不均匀、骨架弯曲变粗,泡孔骨架节点处变大,镶嵌黄色透明PI结构。

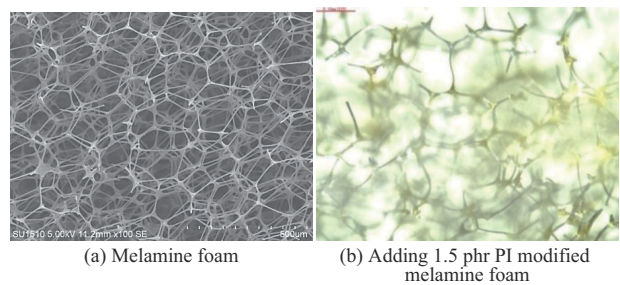


图6 改性前后三聚氰胺泡沫的泡孔结构(×100)

Fig. 6 Cell structure of melamine foam before and after modification (×100)

#### 2.3.2 FTIR分析

图7为未改性三聚氰胺泡沫和添加1.5份PI改性三聚氰胺泡沫的FTIR曲线,通过FTIR谱图对比可知,PI改性泡沫与三聚氰胺泡沫相比,在1778.66 cm<sup>-1</sup>和1718.15 cm<sup>-1</sup>处有明显的吸收峰,这两处分别为PI中酰亚胺环上的C=O不对称伸缩振动峰和C=O对称伸缩振动峰<sup>[17]</sup>,表明成功在PI改性三聚氰胺泡沫中引入PI。

#### 2.4 TG分析

图8为未改性三聚氰胺泡沫和添加1.5份PI改性三聚氰胺泡沫的TG/DTG曲线,从图8a可以看出,三聚氰胺泡沫失重速率最快温度峰值为

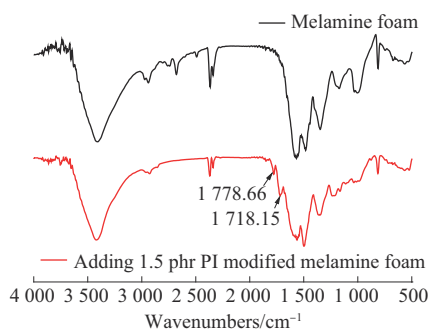
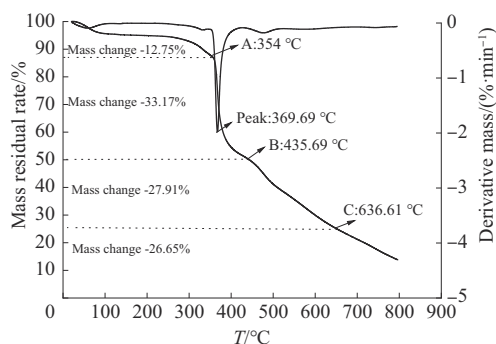
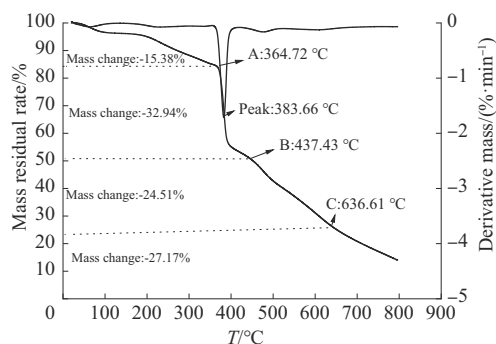


图7 改性前后三聚氰胺泡沫的FTIR曲线

Fig. 7 FTIR curves of melamine foam before and after modification



(a) TG and DTG curves of melamine foams



(b) TG and DTG curves of Adding 1.5 phr PI modified melamine foam

图8 改性前后三聚氰胺泡沫的TG和DTG曲线

Fig. 8 TG and DTG curves of melamine foam before and after modification

369.69 °C,失重曲线大致分为四部分:室温~354 °C,失重率为12.75%,该阶段主要是脱水脱甲醛等小分子蒸发<sup>[18]</sup>;354~435.69 °C,失重率为33.17%,该阶段为醚键断裂等化学结构的破坏;436.69~636.61 °C,失重率为27.91%,该阶段为三聚氰胺三嗪环、亚氨基等化学结构的破坏;636.61~800 °C,失重率为26.65%,分子内结构继续遭到破坏,碳氮有机物发生燃烧炭化<sup>[19]</sup>。从图8b可以看出,PI改性三聚氰胺泡沫失重速率最快温度峰值383.66 °C,高于三聚氰胺泡沫13.97 °C,泡沫热失重曲线也分为四个阶段,第三和第四阶段失重率较三聚氰胺泡沫减少3.67%,主要原因是泡沫分子结构引入含两个与氮

(N)键合的酰基(C=O)基团,提高了泡沫耐温性。

### 3 结论

(1)通过添加适量PI改性后的三聚氰胺泡沫,在分子内部引入含两个与氮(N)键合的酰基(C=O)基团,增强了分子间的作用力,添加1.5份PI后,泡沫的耐温性显著增加,失重速率最高温度峰值由369.69 °C提高到383.66 °C;力学性能改善明显,拉伸强度提高11.17%、撕裂强度提高21.82%、断裂伸长率提高12.51%;PI泡沫和三聚氰胺泡沫本身均具有良好的隔热、阻燃性能,PI改性后三聚氰胺泡沫的LOI、烟密度均高于未改性三聚氰胺泡沫,阻燃性能进一步提升,满足船用、室内装饰、工业保温等领域需求。

(2)经过不断探索,确定了PI改性三聚氰胺泡沫制备的最佳发泡温度、发泡时间、发泡功率、PI和固化剂使用量等发泡成型条件,并得到PI添加1.5份时,PI改性泡沫总体性能最佳,不仅有效改善了三聚氰胺泡沫脆性大、强度低、易断裂等产品缺陷,还提升了耐温性、隔热性、燃烧性、吸声环保性等技术指标,可满足航空航天、轨道交通、石油化工、节能建筑、电子信息等领域使用标准要求。

### 参考文献

- [1] 张英杰,李晓峰,安燕,等.聚酰亚胺改性酚醛泡沫[J].高分子学报,2013,44(8):1072-1079.  
ZHANG Yingjie, LI Xiaofeng, AN Yan, et al. Polyimide modified phenolic foam[J]. Acta Polymerica Sinica, 2013, 44(8): 1072-1079.
- [2] 刘军霞,杨金,姜其斌,等.我国三聚氰胺泡沫塑料发展中存在的问题及建议[J].工程塑料应用,2014,42(2):107-114.  
LIU Junxia, YANG Jin, JIANG Qibin, et al. Problems and proposals in development of melamine foam plastics in China[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(2):107-114.
- [3] YASUO I, SHUN H, TAKAHIKO M. Melamine resin foam: US, 5413853[P].1995-05-09.
- [4] 雷昆,孙云龙,徐衡,等. THIEC改性三聚氰胺甲醛树脂泡沫的制备及其性能表征[J].功能高分子学报,2016,29(3):329-334.  
LEI Kun, SUN Yunlong, XU Heng, et al. Preparation and performance characterization of tripolycyanamide formaldehyde resin foam modified by THIEC[J]. Journal of Functional Polymers, 2016, 29(3):329-334.
- [5] 王宁,李春风,刘明利.改性三聚氰胺甲醛树脂研究进展及应用[J].热固性树脂,2020,35(6):62-65.  
WANG Ning, LI Chunfeng, LIU Mingli. Research progress and application of modified melamine formaldehyde resin[J]. Thermosetting Resin, 2020, 35(6):62-65.
- [6] 王玉忠,杨君驰,曹志杰,等.用纤维材料改性的三聚氰胺甲醛泡

- 沫及其制备方法:CN103030924A[P]. 2013-04-10.  
WANG Yuzhong, YANG Junchi, CAO Zhijie, et al. Melamine formaldehyde foam modified by fiber material and its preparation method:CN103030924A[P]. 2013-04-10.
- [7] 李超,程杰,黄勇,等.聚酰亚胺泡沫材料结构与性能研究[J].化工管理,2019(14):188-189.  
LI Chao, CHENG Jie, HUANG Yong, et al. Study on structure and properties of polyimide foam[J]. Chemical Enterprise Management, 2019(14):188-189.
- [8] MA Z L, ZHANG G C, YANG Q, et al. Fabrication of microcellular polycarbonate foams with unimodal or bimodal cell-size distributions using supercritical carbon dioxide as a blowing agent[J]. Journal of Cellular Plastics, 2014, 50(1):55-79.
- [9] 秦笑梅,陈亚培.超支化聚合物的合成及应用研究进展[J].化工新型材料,2020,48(7):6-10.  
QIN Xiaomei, CHEN Yapei. Research progress on synthesis and application of hyperbranched polymer[J]. New Chemical Materials, 2020,48(7):6-10.
- [10] 李庆,吴思奇,庞龙,等.新型超支化聚酰亚胺的合成及性能研究[C]//2014年全国高分子材料科学与工程研讨会,2014.  
LI Qing, WU Siqi, PANG Long, et al. Synthesis and properties of novel hyperbranched polyimides[C]//National Conference on Polymer Materials Science and Engineering, 2014.
- [11] 陈言胜,何利华,李慧霞,等.甲醛捕捉剂对三聚氰胺泡沫塑料性能的影响[J].工程塑料应用,2018,46(4):128-132.  
CHEN Yansheng, HE Lihua, LI Huixia, et al. Effects of formaldehyde capture agents on properties of melamine foam plastics[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(4):128-132.
- [12] 牛明军,张小瑞,李银凤,等.三聚氰胺甲醛的微波发泡工艺研究[J].工程塑料应用,2015,43(8):56-59.  
NIU Mingjun, ZHANG Xiaorui, LI Yinfeng, et al. Microwave foaming process of melamine formaldehyde[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(8):56-59.
- [13] 马明明.聚酰亚胺泡沫塑料的制备与性能表征[D].青岛:青岛科技大学,2011.  
MA Mingming. Preparation and characterization of polyimide foam[D]. Qingdao:Qingdao University of Science & Technology, 2011.
- [14] 赵玺浩,张广成,张悦周,等.酯化法合成聚酰亚胺泡沫塑料的研究[J].合成树脂及塑料,2008,25(6):33-36.  
ZHAO Xihao, ZHANG Guangcheng, ZHANG Yuezhou, et al. Synthesis of polyimide foams with esterification process[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2008, 25(6):33-36.
- [15] HECKERT B, BANERJEE T, SULTHANA S, et al. Design and synthesis of new sulfur-containing hyperbranched polymer and theranostic nanomaterials for bimodal imaging and treatment of cancer[J]. ACS Macro Letters, 2017, 6(3):235-240.
- [16] 侣庆波,金范龙.聚氨酯/三聚氰胺甲醛树脂互穿网络硬质泡沫性能的研究[J].吉林化工学院学报,2020,37(7):68-71,92.  
SI Qingbo, JIN Fanlong. Study on properties of polyurethane/melamine-formaldehyde resin interpenetrating network rigid foam [J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2020, 37(7): 68-71, 92.
- [17] 夏学禹,顾雪萍,冯连芳,等.三聚氰胺甲醛泡沫增韧改性研究进展[J].高分子材料科学与工程,2019,35(4):182-190.  
XIA Xueyu, GU Xueping, FENG Lianfang, et al. Advances on toughening modification of melamine foam[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(4):182-190.
- [18] LIU X H, TIAN F, ZHAO X, et al. Recycling waste epoxy resin as hydrophobic coating of melamine foam for high-efficiency oil absorption[J]. Applied Surface Science, 2020, 529. DOI:10.1016/j.apsusc.2020.147151.
- [19] LIAO H H, LI H Y, LIU Y, et al. A flame-retardant composite foam: Foaming polyurethane in melamine formaldehyde foam skeleton[J]. Polymer International, 2019, 68(3):410-417.