

二氧化硅气凝胶原位填充聚酰亚胺泡沫的结构及隔热性能研究

胡子扬 马晶晶 赵一搏 滕冲 赵建设

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

文 摘 以超轻质开孔柔性聚酰亚胺泡沫为基体,采用溶胶凝胶工艺制备了一系列二氧化硅气凝胶原位填充的聚酰亚胺复合泡沫。复合泡沫密度 $10\sim 100\text{ kg/m}^3$ 可调,厚度 $1\sim 400\text{ mm}$ 可调,最大宏观尺寸可达 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 。对其泡孔结构、隔热性能、热性能进行了系统表征,分析了二氧化硅气凝胶原位填充聚酰亚胺泡沫的隔热机理。结果表明:二氧化硅气凝胶的引入,可有效降低复合泡沫室温热导率,提高其隔热性能;随着二氧化硅气凝胶含量的增加,聚酰亚胺复合泡沫的热导率由 $38.8\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 降低至 $19.6\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$;热端温度 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 时,复合泡沫热导率仅为 $61.1\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$;填充二氧化硅气凝胶后,聚酰亚胺复合泡沫热稳定性大大提高,在 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 下热失重残留量约为 80% 。

关键词 聚酰亚胺泡沫,泡孔结构,二氧化硅气凝胶,隔热性能

中图分类号:TQ328

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.02.010

Study on the Structure and Thermal Insulation Properties of Polyimide Foams In-situ Filled With Silica Aerogels

HU Ziyang MA Jingjing ZHAO Yibo TENG Chong ZHAO Jianshe

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract A series of silica aerogel in-situ filled composite foams were prepared by sol-gel process using ultra-light open-cell flexible polyimide foam as matrix. The density of composite foam was adjustable from 10 kg/m^3 to 100 kg/m^3 , the thickness was adjustable from 1 mm to 400 mm , and the maximum macro size could reach $1\text{ m}\times 1\text{ m}$. The cell structure, thermal insulation performance and thermal performance were systematically characterized, and the thermal insulation mechanism of polyimide foam in-situ filled with silica aerogel was analyzed. The results show that the introduction of silica aerogel can effectively reduce the thermal conductivity of composite foams at room temperature and improve its thermal insulation performance. With the increase of silica aerogel content, the thermal conductivity of the composite foam decreases from $38.8\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ to $19.6\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$. When the hot end temperature is $300\text{ }^\circ\text{C}$, the thermal conductivity of the composite foam is only $61.1\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$. After filling the silica aerogel, the thermal stability of the composite foam is significantly improved, and the thermal weight loss residue is about 80% at $900\text{ }^\circ\text{C}$.

Key words Polyimide foam, Cell structure, Silica aerogel, Thermal insulation performance

0 引言

聚酰亚胺(PI)泡沫是一类具有特定化学结构、耐高低温、无有害气体释放的轻质多孔材料,具有密度低、热导率低、阻燃性好、降噪系数高、发烟量低、施工便捷等优点^[1-4],因此在飞机、航天器、武器装备、舰船和高

速列车等方面具有广阔的应用需求,已经作为绝热结构的绝热层应用于美国航天飞机、返回式运载火箭贮箱表面^[5-8]。其中软质开孔PI泡沫如SOLIMIDE®系列泡沫已在某型号低温液氧管路中取得了应用。然而,此类软质开孔泡沫开孔率较高,在温差较大的情况下

收稿日期:2023-12-09

第一作者简介:胡子扬,1999年出生,硕士研究生,主要从事功能复合材料研究工作。E-mail: 1337612003@qq.com

通信作者:马晶晶,1988年出生,高级工程师,主要从事功能高分子材料研制工作。E-mail: majingjingbh@126.com

气体对流传热增加,导致此类泡沫热导率较高。目前商业化的 SOLIMIDE®和 TEEK®系列热导率在 30~50 mW/(m·K),这将限制其在隔热技术领域应用,因此考虑将具有较低热导率的填充剂加入到泡沫塑料内部,以降低泡沫材料整体热导率。

气凝胶是一种多孔纳米材料,是目前已知质量最轻、隔热性能最好的固体材料^[9]。其中,二氧化硅(SiO₂)气凝胶具有高比表面积(400~1 500 m²/g)、高孔隙率(80%~99.8%)、低密度(0.003~0.6 g/cm³)和低热导率[13~38 mW/(m·k)]^[10-13]等特点,使其在耐高温隔热^[14-15]、降噪隔音^[16]、环境治理^[17]、催化及药物载体^[18]等领域有非常重要的应用。SiO₂气凝胶具有高孔隙率的三维网络骨架结构,纳米级的孔径与空气分子自由程相近^[19],能够有效降低气体热传导和对流热传导,这使其具有良好的隔热性能。但是,这样的结构易被外力破坏,力学性能差,材料内部出现缺陷后会导致裂纹、断裂或剥落,使材料失去隔热能力。为了弥补SiO₂气凝胶力学性能差的缺点,可以采用纤维复合的方法使材料增强,将SiO₂气凝胶与玻璃纤维毡、石英纤维毡、碳纤维毡以及硅酸铝纤维毡等^[19-23]复合,能够较大程度上增强其力学性能。中国专利CN109535714A^[24]报道了将气凝胶材料与PI前驱体发泡基体混合,制备气凝胶复合PI泡沫的方法,以改善泡沫耐温及隔热性能,

然而在与聚合物混合过程中,容易发生气凝胶空洞堵塞、隔热性能失效的现象,同时泡沫发泡过程受影响,泡孔均匀性降低且容易开裂。因此考虑将SiO₂气凝胶原位填充到PI泡沫中,以改善泡沫热导率;在保证开孔材料吸声性能的同时,有效降低复合材料的热导率,从而得到一种新型复合泡沫材料。

目前,关于SiO₂气凝胶原位填充PI泡沫结构与性能的系统研究尚未出现,本文提供一种制备超低热导率PI泡沫的新方法,以预先制备好的低密度开孔PI泡沫为基体,以正硅酸乙酯、乙醇等为主要原材料,采用原位填充法制备SiO₂气凝胶填充PI泡沫。通过控制前驱体溶液浓度,制备一系列不同SiO₂气凝胶含量的PI复合泡沫。深入探究不同SiO₂气凝胶含量复合PI泡沫的结构和性能,阐明PI复合泡沫泡孔结构;分析SiO₂气凝胶含量对泡沫隔热性能的影响规律,阐明隔热机理,研究了热性能。

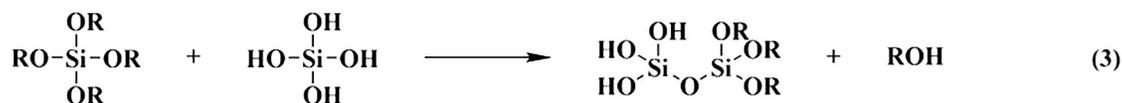
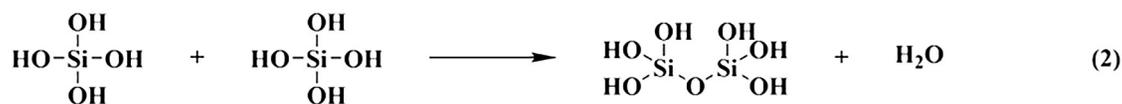
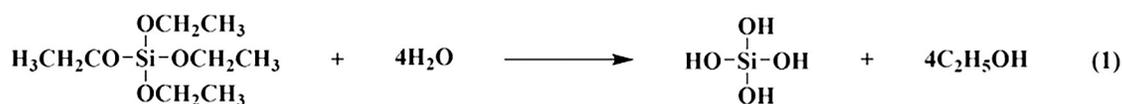
1 实验

1.1 原材料

软质开孔PI泡沫(密度8 kg/m³),本单位生产;正硅酸乙酯(TEOS)、三甲基氯硅烷、无水乙醇、正己烷、氨水、盐酸均为北京市化工厂生产,分析纯。

1.2 SiO₂气凝胶原位填充PI泡沫的制备

反应方程式及制备流程如图1和图2所示。



注:(1)水解反应;(2)脱水缩合;(3)脱醇缩合。

图1 SiO₂气凝胶反应方程式

Fig. 1 Reaction equation of silica aerogels

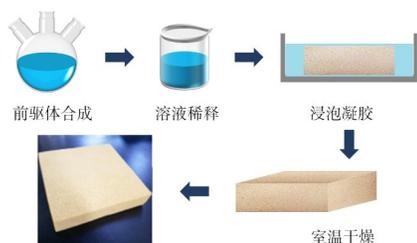


图2 SiO₂气凝胶原位填充PI泡沫制备流程

Fig. 2 Preparation of in-situ filling PI foam with silica aerogels

首先以TEOS为硅源,与乙醇和稀盐酸按一定比例制成前驱体,前驱体中SiO₂的理论浓度为125 g/L;

然后用乙醇将前驱体稀释至不同浓度,以此来调控样品密度;之后,加入适量氨水使前驱体凝胶,凝胶前将PI泡沫浸入前驱体溶液中,使泡沫吸收前驱体并在内部凝胶;凝胶后,用正己烷进行溶剂置换,并加入一定浓度的三甲基氯硅烷进行疏水处理;最后在室温下常压干燥,得到SiO₂气凝胶填充的PI泡沫。

为了制备不同密度的PI复合泡沫,设计前驱体溶液中SiO₂的理论浓度分别为20、30、40、60 g/L,将其分别命名为Si-PI-20、Si-PI-30、Si-PI-40、Si-PI-60;为了进行对比性研究,将不含有气凝胶泡沫样件

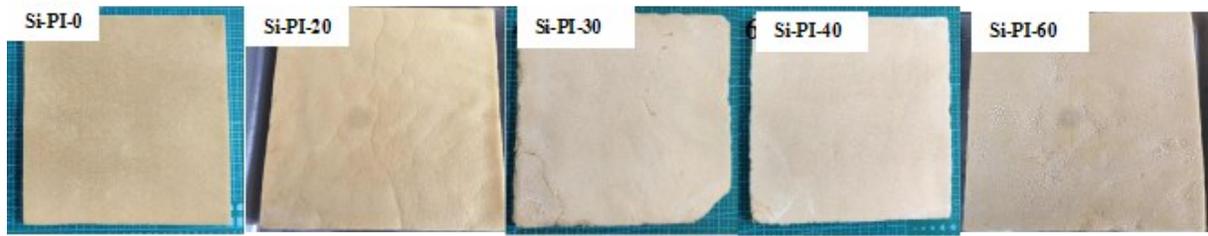


图3 SiO₂气凝胶原位填充PI泡沫样件照片

Fig. 3 Photograph of PI foam sample with insitu filled with silica aerogels

命名为Si-PI-0。样件外观照片如图3所示。

1.3 结构与性能表征

(1)化学结构表征:采用Shimadzu IRprestige-21红外光谱仪,通过KBr压片制样法测定PI复合泡沫的红外光谱,分析PI和SiO₂气凝胶的红外特征峰。

(2)泡孔结构表征:采用JSM-6010型场发射电子显微镜(FESEM)表征,分析PI复合泡沫的泡孔结构和SiO₂气凝胶的生长情况,加速电压为15 kV。制样方法:用刀片将泡沫塑料切割成10 mm×10 mm×2 mm的小立方体,粘贴在贴有导电胶的样品台上,置于真空烘箱中,60 °C干燥2 h,喷铂400 s。

(3)隔热性能表征:按GB/T10295—2008测试泡沫试样室温热导率,试样大小为300 mm×300 mm×25 mm,每组测试试样3个。

(4)热失重(TGA)表征:采用热重分析(TGA)仪测试泡沫试样热失重性能,升温速率为10 °C/min,氮气氛围,温度范围为室温~800 °C。

2 结果与讨论

2.1 化学结构

图4为不同气凝胶前驱体浓度PI复合泡沫的红外光谱。

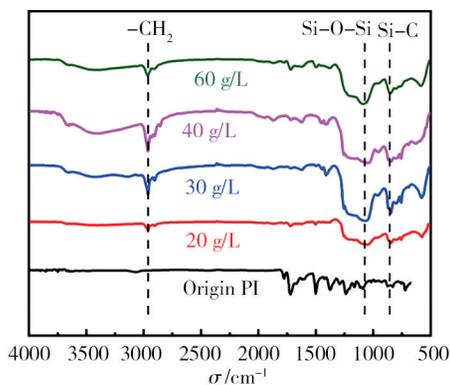


图4 不同SiO₂气凝胶含量PI复合泡沫的红外光谱图

Fig. 4 Infrared spectra of composite foams with different silica aerogel contents

由图4可知,每组试样在1 780、1 720、1 370和730 cm⁻¹左右均出现了PI的特征吸收峰,这些峰分别归属于C=O不对称伸缩、C=O对称伸缩、C—N伸缩和C—O弯曲振动^[25],说明PI泡沫基体大分子

链中存在酰亚胺环。填充气凝胶的试样中在1 100 cm⁻¹处出现了Si—O—Si不对称收缩振动特征峰^[26]、在850 cm⁻¹附近则出现了源自疏水基团的Si—CH₃不对称弯曲特征峰^[27],这表明PI泡沫中成功生成了SiO₂气凝胶。

2.2 泡孔结构

图5和图6分别表示纯PI泡沫和不同SiO₂气凝胶含量PI复合泡沫泡孔结构的SEM照片。

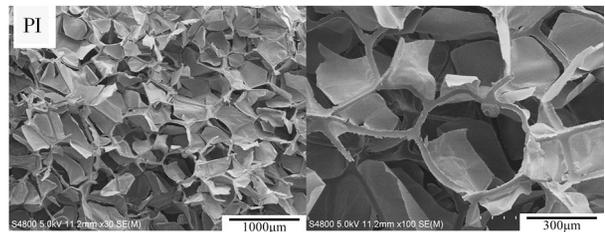


图5 纯PI泡沫泡孔结构的SEM照片

Fig. 5 SEM photos of pure PI foam cell structure

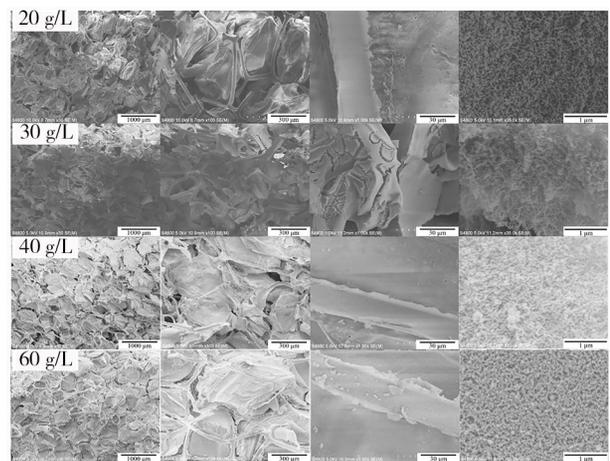


图6 不同SiO₂气凝胶含量PI复合泡沫泡孔结构的SEM照片

Fig. 6 SEM photos of the cell structure of composite foams with different silica aerogel contents

由图5可知,纯PI泡沫内部是一个个规则的正六边形的泡孔,平均孔径约486 μm;进一步放大倍率观测后,发现泡孔由泡壁和泡膜组成且结构完整,泡壁尺寸约为14.54 μm,泡沫厚度约为280 nm,呈开孔结构。进一步地,随着气凝胶的引入,PI泡沫的孔隙均被SiO₂气凝胶填充,气凝胶先是沿着泡壁分布然后逐渐填满整个孔隙(图6),占据的泡孔空间随着SiO₂气凝胶前驱

体浓度的增加而增加。泡壁放大后,发现了规则的SiO₂气凝胶结构,即相互连接的纳米颗粒和纳米尺寸的孔,孔径约100 nm。上述结构表明, SiO₂气凝胶填充到泡沫孔隙中,占据了泡孔内空气的体积,PI复合泡沫结构基本模型如图7所示。

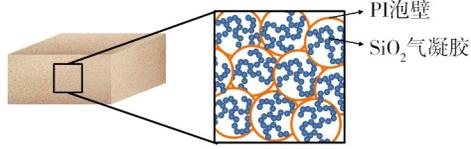


图7 SiO₂气凝胶填充PI泡沫复合材料的基本结构模型
Fig. 7 Basic structure model of polyimide foam composites filled with silica aerogels

2.3 隔热性能

表1为不同SiO₂气凝胶含量PI复合泡沫的密度及室温热导率数据。由表1可知,随着前驱体溶液中理论SiO₂浓度的增加,PI复合泡沫表观密度由8 kg/m³增加至90 kg/m³,这是由于随着前驱体溶液浓度的增加, SiO₂气凝胶在泡沫基体中填充量增加,PI复合泡沫表观密度增加。

表1 不同SiO₂气凝胶含量PI复合泡沫的表观密度及室温热导率

Tab. 1 Apparent density and room temperature thermal conductivity data of composite foams with different silica aerogel contents

Sample	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\lambda/\text{mW}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}(25\text{ }^\circ\text{C})$
Si-PI-0	8	38.8
Si-PI-20	35	26.2
Si-PI-30	45	24.6
Si-PI-40	66	23.1
Si-PI-60	90	19.6

另一方面,随着气凝胶的引入,PI复合泡沫的热导率有效降低。随着前驱体溶液浓度(气凝胶含量)的增大,PI复合泡沫热导率由38.8 mW/(m·K)降低至19.6 mW/(m·K),降低了50%以上。

多孔材料的热传导由热对流、气体热传导、固体热传导和热辐射四部分组成,因此SiO₂气凝胶复合PI泡沫的整体热导率可以表示为:

$$\lambda_{\text{tot}} = \lambda_{\text{conv}} + \lambda_{\text{gas}} + \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{rad}} \quad (1)$$

式中, λ_{conv} 为热对流贡献的热导率,由孔结构中气体温度梯度导致,当泡孔直径小于1 mm时,热对流对热导率的贡献可以忽略不计^[28-29]。由上节对PI复合泡沫的SEM图像的分析可知,本研究中使用的PI泡沫平均孔径小于1 mm(486 μm),因此可以忽略热对流对PI复合泡沫热传导的贡献。

λ_{gas} 为气体热传导贡献的热导率,由孔结构中气体

分子碰撞导致,这部分热导率可由以下公式计算^[30]:

$$\lambda_{\text{gas}} = \frac{\lambda_{g_0}}{1 + 2\beta K_n} \quad (2)$$

$$K_n = \frac{l_{\text{mean}}}{\varphi} \quad (3)$$

$$l_{\text{mean}} = \frac{K_B T}{\sqrt{2} \sigma P_g} \quad (4)$$

式中, λ_{g_0} 为自由气体的热导率, β 为气体分子与孔壁之间能量交换的系数,一般为1.5~2.0, K_n 为克努森数, l_{mean} 为气体分子平均自由程, φ 为多孔材料的孔径, K_B 为玻尔兹曼常数,数值为 1.38×10^{-23} J/K, T 为温度, σ 为气体分子截面积,对于空气(以氧气和氮气为主)而言,其数值为 0.4 nm^2 , P_g 为气压。从式(2)~(4)可以看出,气体热传导主要取决于多孔结构中的孔径大小和气体分子平均自由程。对于本文中的PI复合泡沫, SiO₂气凝胶的平均孔径远小于PI泡沫孔径,因此当SiO₂气凝胶占据了PI泡孔中的体积后,进一步限制了气体分子在泡孔中的碰撞,从而使热导率降低。随着前驱体浓度的增加, SiO₂气凝胶在PI泡孔中填充的体积也增加,对气体分子传热的限制作用也进一步增强,因此PI复合泡沫的热导率随前驱体溶液浓度增大而降低。

λ_{solid} 为固体热传导贡献的热导率,由多孔结构骨架中的晶格振动导致,这部分热导率的计算公式如下:

$$\lambda_{\text{solid}} = \frac{1}{3} \rho c_v v_\alpha \Lambda_{\text{ph}} \quad (5)$$

式中, ρ 为固体密度, c_v 为德拜模型下的晶体比热容, v_α 为声子平均速度, Λ_{ph} 为声子平均自由程。SiO₂气凝胶初级粒子直径约为2~5 nm^[32],声子平均自由程约为0.58 nm^[33],二者处于同一量级,因此在SiO₂骨架上的固体传热会因微尺度效应而显著降低。除此之外, SiO₂气凝胶骨架为三维多孔结构,引入到PI泡孔后会复合泡沫的固体传热路径进一步复杂化,从而显著减少固体热传导。

λ_{rad} 为辐射热传导贡献的热导率,这部分热导率的计算公式如下^[34]:

$$\lambda_{\text{rad}} = \frac{16n^2 \sigma_B T^3}{3\rho K_{e,m}} \quad (6)$$

式中, n 为折射率, σ_B 为斯特藩-玻尔兹曼常数,数值为 5.67×10^{-8} W/(m²·K⁴), ρ 为材料密度, $K_{e,m}$ 为平均消光系数, T 为温度。从式(6)可知,辐射热传导与温度、材料密度和消光系数有关。表2为不同温度下Si-PI-60复合泡沫的热导率。由表2可知,随着环境温度的增加,PI复合泡沫的热导率由19.6 W/(m·K)增大至61.1 W/(m·K),符合式(6)中辐射热导率与温度的关系。除此之外,高孔隙率的SiO₂气凝胶填充到PI泡沫的泡孔

中后,对泡壁的热辐射起到较强的散射作用,从而有效降低泡壁间的辐射传热。

表2 不同温度下Si-PI-60复合泡沫的热导率

Tab. 2 Thermal conductivity of Si-PI-60 composite foams at different temperatures

$t/^\circ\text{C}$	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\lambda/\text{mW}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
25	90	19.6
100	90	24.8
150	90	30.3
200	90	37.3
250	90	48.0
300	90	61.1

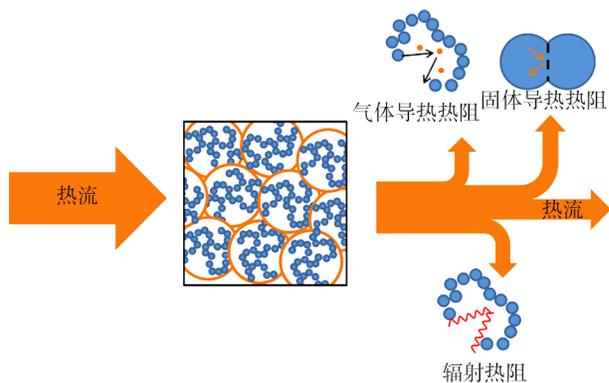


图8 SiO₂气凝胶填充PI泡沫隔热机理示意图

Fig. 8 Schematic diagram of thermal insulation mechanism of polyimide foam filled with silica aerogel

综上所述,气体热传导、固体热传导和辐射热传导是PI复合泡沫传热的主要因素,SiO₂气凝胶的填充能

够显著削弱这三种传热因素的贡献(图8),削弱程度与填充量有关。为了进一步证明在PI泡沫中原位填充SiO₂气凝胶对泡沫热导率的降低作用,测试了密度为90 kg/m³的纯PI泡沫室温下的热导率,结果为37.5 mW/(m·K),高于密度相同的Si-PI-60复合泡沫的室温热导率[19.6 W/(m·K)]。

上述结果表明,SiO₂气凝胶的原位填充能够显著降低PI泡沫的热导率,从而得到同时具有轻质、低热导率特性的复合材料,有望作为一种优良的绝热材料应用于低温及中高温环境中。

2.4 耐热性能

图9表示复合PI泡沫TG/DTG曲线,图中分别标注了不同含量气凝胶填充PI泡沫的热5%失重温度。由图9可知,纯PI泡沫在空气中5%失重温度达519.0℃,这已经远高于其他类高分子泡沫材料;622℃时分解速率最大,此时热失重残留量仍有78%;当温度达到900℃时,热失重残留量仍有39.16%;上述数据表明PI泡沫具有突出的耐热性,这可以归因于PI分子链中刚性的酰亚胺环结构。引入SiO₂气凝胶之后,PI复合泡沫在200℃附近有一失重峰,这主要是SiO₂骨架内水分子脱附引起^[35],400~500℃时SiO₂表面的羟基、甲基等基团氧化分解造成失重^[36],700℃之后材料的质量损失趋于一定,900℃时,热失重残留量约为80%,远大于纯PI泡沫。形成复合PI泡沫后,SiO₂气凝胶主要分布在泡壁上,对复合泡沫900℃时的残留质量起主要贡献,极大地提高了复合泡沫的热稳定性。

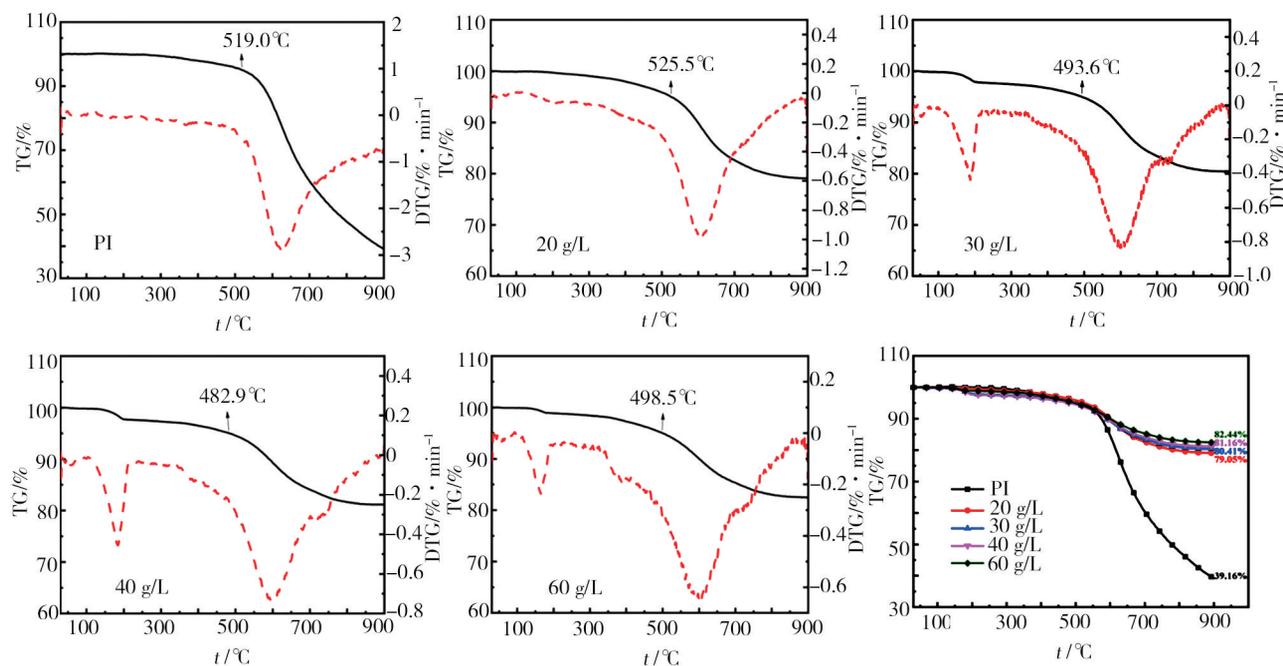


图9 不同SiO₂气凝胶含量PI复合泡沫的TG/DTG曲线

Fig. 9 TG/DTG curves of composite foams with different silica aerogel contents

3 结论

(1) SiO₂气凝胶前驱体溶液随着PI泡沫的开孔结构进入孔隙内,凝胶沿着泡壁分布并填满泡孔,占据了PI泡沫泡孔的空间,抑制了PI泡孔中的气体传热、固体传热和辐射传热,抑制程度与SiO₂气凝胶在PI泡沫中的填充量有关;

(2)随着SiO₂气凝胶前驱体溶液浓度的增加,气凝胶在泡沫泡孔中的填充量增加,PI复合泡沫表观密度增加,整体热导率降低,相比于纯PI泡沫,前驱体浓度为60 g/L的试样,热导率降低了50%以上;

(3)随着环境温度的增加,PI复合泡沫的热导率增加,环境温度从室温增加至300 °C时,理论SiO₂浓度为60 g/L泡沫的热导率从19.6上升至61.1 W/(m·K);

(4)SiO₂气凝胶的引入,大大提高PI复合泡沫在高温下热失重残留量,900 °C时热失重残留量约为80%。

参考文献

[1] MOSER M, RANZENBERGER C, LEHMANN G B, et al. SEMPRIMOSCHNIG C//Proceedings of the 40th International Conference on Environmental Systems [C]. Barcelona, Spain, 2010.

[2] ZHAN M S, WANG K. Polyimide Foam Plastics [M]. Beijing: National defense industry Press, 2010.

[3] 许云汉,王磊磊,胡爱军,等. 耐高温聚酰亚胺泡沫材料[J]. 化学进展, 2018, 30(5): 684-691.

XU Y H, WANG L L, HU A J, et al. High temperature resistant polyimide foam [J]. Progress in Chemistry, 2018, 30(5): 684-691.

[4] WILLIAMS M K, HOLLAND D B, MELENDEZ O, et al. Aromatic polyimide foams: factors that lead to high fire performance [J]. Polymer Degradation and Stability, 2005, 88(1): 20-27.

[5] LIU X Y, ZHAN M S, et al. Preparation and performance of a novel polyimide foam [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2012, 23(3): 677-685.

[6] LI Y, LIU X Y, ZHAN M S, et al. Effects of 3, 4'-oxydianiline on the structures and properties of a novel aromatic polyimide foam [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 125(5): 4128-4134.

[7] LIU X Y, ZHAN M S, WANG K. Influence of foam structure and service environment on sound absorption characteristics of polyimide foams [J]. High Performance Polymers, 2012, 24(7): 646-653.

[8] WEISER E S, JOHNSON T F, ST CLAIR T L, et al. Polyimide foams for aerospace vehicles [J]. High Performance Polymers, 2000, 12(1): 1-12.

[9] 高秀霞,张伟娜,任敏,等. 硅气凝胶的研究进展[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2007(1): 86-91.

GAO X X, ZHANG W N, REN M, et al. Research progress of silica aerogels [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007(1): 86-91.

and Technology (Natural Science Edition), 2007(1): 86-91.

[10] ANDERSON A, CARROLL M. Aerogels Handbook [M]. New York: Springer, 2011: 47-77.

[11] FRICKE J. Aerogels—highly tenuous solids with fascinating properties [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1988, 100(1): 169-173.

[12] PAJONK G M. Transparent silica aerogels [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1998, 225(1): 307-314.

[13] 周颖博,孔纲,赖德林,等. 柔性SiO₂气凝胶综述[J]. 宇航材料工艺, 2021, 51(3): 8-16.

ZHOU Y B, KONG G, LAI D L, et al. Review of flexible silica aerogels [J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51(3): 8-16.

[14] ZHANG E, ZHANG W, LV T, et al. Insulating and robust ceramic nanorod aerogels with high-temperature resistance over 1 400 °C [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(17): 20548-20558.

[15] XU C C, WANG H L, SONG J N, et al. Ultralight and resilient AlO, Nanotube aerogels with low thermal conductivity [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2018, 101(4): 1677-1683.

[16] WU K D, DONG W, PAN Y K, et al. Lightweight and flexible phenolic aerogels with three-dimensional foam reinforcement for acoustic and thermal insulation [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2021, 60(3): 1241-1249.

[17] HU E, WU X, SHANG S, et al. Catalytic ozonation of simulated textile dyeing wastewater using mesoporous carbon aerogel supported copper oxide catalyst [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112(5): 4710-4718.

[18] GARCÍA-GONZÁLEZ C A, JIN M, GERTH J, et al. Polysaccharide-based aerogel microspheres for oral drug delivery [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 117: 797-806.

[19] AEGERTER M A, LEVENTIS N, KOEBEL M M. Aerogels handbook [M]. Springer-Verlag GmbH, 2012.

[20] 罗丹,龙丽娟,秦舒浩,等. 玻璃纤维和碳纤维增强二氧化硅气凝胶复合材料的制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2022, 50(4): 161-165.

LUO D, LONG L J, QIN S H, et al. Preparation and Properties of glass fiber and carbon fiber reinforced silica aerogel composites [J]. New Chemical Materials, 2022, 50(4): 161-165.

[21] 张丽娟,王洋,李文静,等. 耐高温透波气凝胶复合材料性能[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(4): 47-50, 53.

ZHANG L J, WANG Y, LI W J, et al. Properties of high temperature resistant wave-transparent aerogel composites [J]. Aerospace Materials & Technology, 2015, 45(4): 47-50, 53.

[22] SHAFI S, ZHAO Y P. Superhydrophobic, enhanced strength and thermal insulation silica aerogel/glass fiber felt based on methyltrimethoxysilane precursor and silica gel impregnation [J]. Journal of Porous Materials, 2019, 27(2): 495-502.

- [23] 郭建业, 王冬, 苏力军, 等. 气凝胶掺杂对玻璃纤维毡隔热性能的影响[J]. 无机盐工业, 2023, 55(11): 53-57.
- GUO J Y, WANG D, SU L J, et al. Effect of aerogel doping on thermal insulation properties of glass fiber mats [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2023, 55(11): 53-57.
- [24] 王凯, 李永武, 木拉提江. 木合塔尔, 等. 一种耐高温的聚酰亚胺复合泡沫材料及其制备方法[P]. 北京市: CN109535714A, 2019-03-29.
- WANG K, LI Y W, MULATIJIANG M, et al. A high temperature resistant polyimide composite foam material and its preparation method [P]. Beijing: CN109535714A, 2019-03-29.
- [25] 马晶晶, 熊春晓, 酒永斌, 等. 基于粉末微波发泡法制备超轻质聚酰亚胺泡沫的结构与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(6): 66-72, 78.
- MA J J, XIONG C X, JIU Y B, et al. Structure and properties of ultra-light polyimide foam prepared by powder microwave foaming method [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(6): 66-72, 78.
- [26] RAO A V, KULKARNI M M, AMALNERKAR D P, et al. Surface chemical modification of silica aerogels using various alkyl-alkoxy/chloro silanes [J]. Applied Surface Science, 2003, 206(1): 262-270.
- [27] DING J, ZHONG K, LIU S, et al. Flexible and super hydrophobic polymethylsilsesquioxane based silica aerogel for organic solvent adsorption via ambient pressure drying technique [J]. Powder Technology, 2020, 373: 716-726.
- [28] GUO J F, TANG G H. A theoretical model for gas-contributed thermal conductivity in nanoporous aerogels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 137: 64-73.
- [29] OBORI M, SUH D, YAMASAKI S, et al. Parametric model to analyze the components of the thermal conductivity of a cellulose-nanofibril aerogel [J]. Physical Review Applied, 2019, 1(2): 024044.
- [30] WU Y, WANG X, YAO L, et al. Thermal Insulation Mechanism, Preparation, and Modification of Nanocellulose Aerogels: A Review [J/OL] 2023, 28(15): 5836.
- [31] TANG G H, BI C, ZHAO Y, et al. Thermal transport in nano-porous insulation of aerogel: Factors, models and outlook [J]. Energy, 2015, 90(1): 701-721.
- [32] BRIAN S G. Structure and thermal conductivity of silica aerogels from computer simulations [J]. MRS Online Proceedings Library, 2006, 885(1): 935.
- [33] WARRIER P, YUAN Y, BECK M P, et al. Heat transfer in nanoparticle suspensions: Modeling the thermal conductivity of nanofluids [J]. AIChE Journal, 2010, 56(12): 3243-3256.
- [34] WEI G, LIU Y, ZHANG X, et al. Radiative heat transfer study on silica aerogel and its composite insulation materials [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2013, 362: 231-236.
- [35] 代姣. 二氧化硅气凝胶合成过程中溶胶凝胶反应条件的实验研究[D]. 长沙理工大学, 2023.
- DAI J. Experimental study on sol-gel reaction conditions in the synthesis of silica aerogel [D]. Changsha University of Science & Technology, 2023.
- [36] 高睿, 周张健, 张宏博, 等. 二氧化硅气凝胶高温稳定性研究[J]. 无机盐工业, 2019, 51(9): 50-53.
- GAO R, ZHOU Z J, ZHANG H B, et al. Study on the high temperature stability of silica aerogel [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2019, 51(9): 50-53.