

# 蒸馏水含量对三明治结构硬质聚氨酯泡沫性能的影响

韩 景<sup>1</sup>, 任海涛<sup>1,2\*</sup>, 李婷婷<sup>1,2</sup>, 刘博博<sup>1</sup>, 楼静文<sup>1,3</sup>

(1. 天津工业大学智慧纺织与节能制品创新平台, 天津 300387 2. 教育部与天津市共建先进复合材料重点实验室, 天津 300387 3. 亚洲大学生物信息与医学工程学系, 台中 41354, 中国台湾)

**摘 要:** 采用异氰酸酯、聚酯多元醇、发泡剂(水)等原料通过一体发泡成型技术制备出一种新型的三明治泡沫夹心复合材料。利用热重分析、扫描电子显微镜等对不同水含量(质量分数分别为 0、0.5 % 和 1.0 %)的硬质聚氨酯泡沫材料的泡孔直径、密度、热导率、压缩性能、三点弯曲和热力学性能等做了研究, 进而确定提高硬质聚氨酯性能的最佳工艺。结果表明, 随着水含量的增加, 硬质聚氨酯泡沫材料泡孔直径增大, 密度变小, 热导率降低, 保温性能提高, 而压缩性能和三点弯曲却呈下降趋势; 综合考虑硬质聚氨酯泡沫材料泡孔结构和良好的保温隔热及弯曲等力学性能, 其最佳含水量为 0.5 %。

**关 键 词:** 硬质聚氨酯; 发泡; 非织造; 保温隔热

中图分类号: TQ328.3

文献标识码: B

文章编号: 1001-9278(2018)12-0020-06

DOI: 10.19491/j.issn.1001-9278.2018.12.004

## Influence of Water Content on Properties of Sandwich Polyurethane Foam

HAN Jing<sup>1</sup>, REN Haitao<sup>1,2\*</sup>, LI Tingting<sup>1,2</sup>, LIU Bobo<sup>1</sup>, LOU Chingwen<sup>1,3</sup>

(1. Innovation Platform of Intelligent and Energy Saving Textiles, School of Textiles, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 2. Tianjin and Education Ministry Key Laboratory of Advanced Textile Composite Materials, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 3. Department of Bioinformatics and Medical Engineering, Asia University, Taichung 41354, Taiwan, China)

**Abstract:** A new type of sandwich foam composite was prepared by an integrated foaming-molding method using isocyanate and polyester polyol as raw materials and distilled water as a foaming agent. The pore diameter, density, thermal conductivity, thermal properties, and compression and three point bending performance were investigated for the rigid polyurethane foam with water contents of 0, 0.5 wt % and 1.0 wt % by means of thermogravimetric analysis and scanning electron microscopy. The optimum parameters were then achieved. The results indicated that the pore diameter and thermal insulation performance of rigid polyurethane foams increased with an increase of water content, but their foam density and thermal conductivity decreased. However, the compression and three-point bending performance of the foams exhibited a decline trend. Therefore, to achieve the reasonable cell structure and good mechanical properties for the foams, the optimum moisture content should be determined as 0.5 wt %.

**Key words:** rigid polyurethane; foaming; non-woven; thermal insulation

## 0 前言

硬质聚氨酯泡沫材料是以异氰酸酯和聚酯多元醇

为主要原料, 在发泡剂、催化剂、阻燃剂等多种助剂的作用下, 通过专用设备混合, 经高压喷涂现场发泡而成的高分子聚合物<sup>[1-2]</sup>。由于硬质聚氨酯泡沫材料具有较低的密度, 良好的尺寸稳定性, 优越的机械性能, 优异的绝热以及耐老化性能, 它们正成为极具应用前景的高性能材料<sup>[3-5]</sup>。尤其是在节能应用方面, 对可降解聚氨酯泡沫材料的需求很大, 例如热绝缘、缓冲和包装等领域<sup>[6]</sup>。而传统的发泡剂会引发环境问题, 为此开

收稿日期: 2018-05-25

天津市自然科学基金资助项目(17JCQNJC08000); 国家自然科学基金(21806121, 51503145, 11702187)

\* 联系人, renhaitaomail@163.com

发出新型的环境友好型发泡剂成为主流趋势,水由于其便宜、易得等优点成为理想的发泡剂<sup>[7-10]</sup>。水的加入会提高发泡的效果。发泡过程中随着水含量的增加产生  $\text{CO}_2$  量增加,泡孔孔径也越来越大,进而密度也会降低<sup>[11]</sup>。同时,硬质聚氨酯泡沫的硬度以及力学性能也会受到影响。因此,在材料硬度满足要求的前提下,尽量选择能够获得泡孔孔径小且均匀致密的硬质聚氨酯泡沫的蒸馏水用量。前人研究了不同的发泡剂对硬质聚氨酯发泡性能、力学性能以及在保温隔热材料中热导率的影响<sup>[12-14]</sup>。然而,目前尚未见有关不同水含量对硬质聚氨酯发泡材料保温隔热及热力学性能影响的研究报道。本研究拟使用聚多元醇和二苯甲烷二异氰酸酯为原料,以聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)为上下面板,在模具中进行一体发泡形成多孔复合材料。以水作为发泡剂,改变硬质聚氨酯泡沫材料密度,进而制备出一系列硬质聚氨酯泡沫材料复合板材。通过检测样本的外观形貌、密度、保温隔热性能、力学性能、压缩性能以及热力学性能测试来评估样本的综合性能。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

聚醚多元醇(A剂),羟值 20,相对分子质量 6 000,橙黄色,深圳科晟达有限公司;

二苯甲烷二异氰酸酯(B剂),密度 1.25,黑褐色,深圳科晟达有限公司;

PET 非织布,规格为  $200 \text{ g/m}^2$ ,中国台湾信实实业股份有限公司。

### 1.2 主要设备及仪器

扫描电子显微镜(SEM),TM-1000,日本日立公司;

计算机伺服控制材料试验机,HT-2402,上海弘达仪器有限公司;

导热系数测试仪(水流量平板法),DRX-I-SPB,湘潭华丰仪器制造有限公司;

智能型低温恒温槽,HX-1005,郑州紫拓仪器设备有限公司;

热重分析仪(TG),TG209F3,NETZSCH,德国耐驰仪器制造有限公司。

### 1.3 样品制备

取一定量聚醚多元醇,分别加入质量分数为 0.5% 和 1.0% 的蒸馏水,使用电动搅拌器以  $1\,000 \text{ r/min}$  的速度搅拌 2 min;随后加入相同质量的异氰酸酯,以  $1\,000 \text{ r/min}$  的速度搅拌 25 s,再快速将混合物注入上、下层铺有 PET 非织布的模具(尺寸为  $350 \text{ mm} \times 330$

$\text{mm} \times 20 \text{ mm}$ )中进行一体发泡成型;待 1 h 固化后脱模,将样品室温下放置 24 h 后测试其性能,制备过程如图 1 所示。



图 1 硬质聚氨酯发泡板材示意图

Fig. 1 Rigid polyurethane foaming board sketch

### 1.4 性能测试与结构表征

SEM 分析:所有材料用刀片切成小片进行 SEM 观察,加速电压为 5 kV,使用 Image-Pro Plus 6.0 分析表面形貌图像并获得泡孔直径;

参照 GB/T 6343—1995,使用电子天平、游标卡尺对发泡材料进行密度测试,在发泡板材上随机取 3 点,试样尺寸为  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ,试样个数为 3 个;

参照 GB/T 8813—2008,使用计算机伺服控制材料试验机及其压缩测试头对发泡复合材料进行压缩性能测试,测试速率  $5 \text{ mm/min}$ ,试样尺寸为  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ,试样个数为 3 个;

参照 GB/T 8812.2—2007,使用计算机伺服控制材料试验机对发泡复合材料进行弯曲性能测试,跨距为 100 mm,测试速率为  $10 \text{ mm/min}$ ,试样尺寸为  $120 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ,试样个数为 3 个;

参照 GB/T 3399,使用智能型低温恒温槽对发泡复合材料进行弯曲性能测试,电炉温度设定为  $50^\circ\text{C}$ ,选择三层试样一栏,输入厚度 20 mm,温度  $50^\circ\text{C}$ ,水循环系统调整进出水量为  $40 \text{ mm}^3/\text{h}$ ,试样尺寸为  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ,试样个数为 3 个;

TG 分析:称取适量样品,在氮气气氛下,以流速为  $60 \text{ mL/min}$ 、加热速率为  $10^\circ\text{C/min}$  从  $50^\circ\text{C}$  升温至  $800^\circ\text{C}$ ,考察其热失重情况。

## 2 实验部分

### 2.1 形貌特征分析

结合图 2、3 和表 1 可知,硬质聚氨酯泡沫材料的泡孔直径随着水含量的增加而增加。泡孔直径主要分布在  $0.296 \sim 0.519 \text{ mm}$  之间。当未添加蒸馏水时,平均泡孔直径最小,其值为  $0.296 \text{ mm}$ ;当水含量为 1.0% 时,泡孔直径最大,平均直径为  $0.519 \text{ mm}$ 。这归因于少量的水和异氰酸酯反应生成了少量  $\text{CO}_2$  气

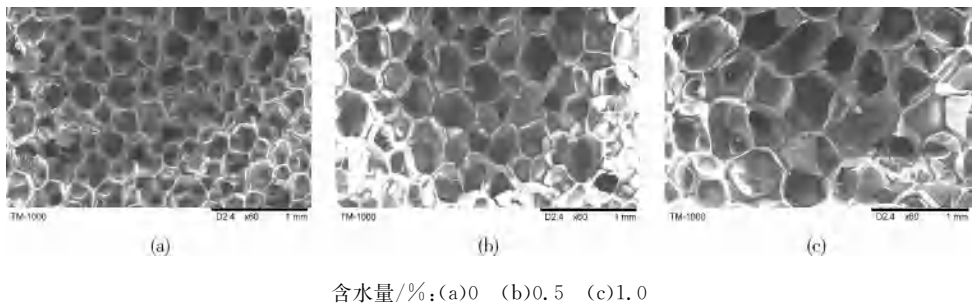


图 2 不同水含量所得硬质聚氨酯泡沫材料的 SEM 照片

Fig. 2 SEM micrographs of rigid polyurethane foaming materials with different water content

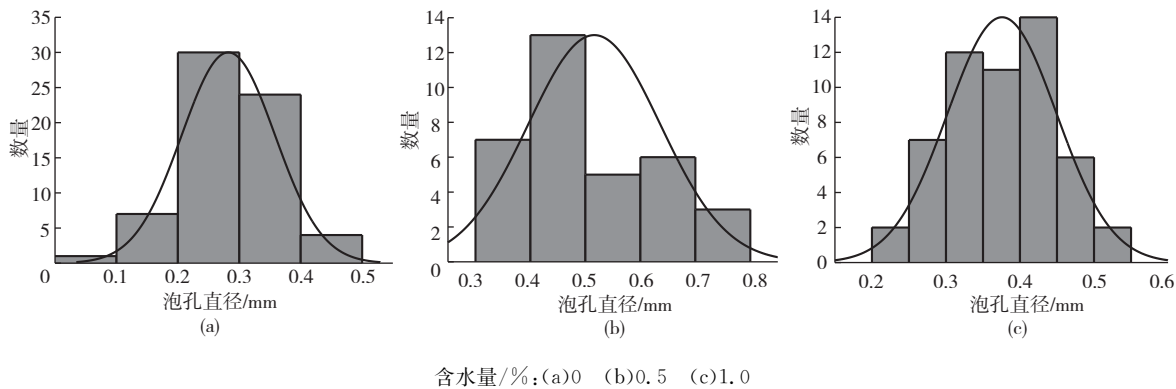


图 3 不同水含量所得硬质聚氨酯泡沫材料的孔径分布

Fig. 3 Cell size distribution of rigid polyurethane foaming materials with different water content

体,促进了泡孔的形成。当含水量增大时,产生的二氧化碳显著增加,发泡膨胀速度加快,形成大的气泡,导致泡孔形态变大,均匀性变差<sup>[15]</sup>。

表 1 不同含水量所得发泡材料的孔径分布

Tab. 1 Pore diameter distribution of foamed materials with different water content

| 水含量/<br>% | 平均泡孔<br>直径/mm | 标准差   | 孔密度/<br>$\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$ | 样品下表<br>面温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 热导率/<br>$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ |
|-----------|---------------|-------|-----------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 0         | 0.296         | 0.068 | 0.074 3                                 | 26.5                            | 0.026 2                                                 |
| 0.5       | 0.376         | 0.074 | 0.073 3                                 | 28.5                            | 0.015 8                                                 |
| 1.0       | 0.519         | 0.120 | 0.068 7                                 | 29.3                            | 0.012 9                                                 |

## 2.2 材料密度与导热性能

由图 4 可知,硬质聚氨酯泡沫材料的密度随着水含量的增加呈现出略微降低的趋势。当水含量为零时密度最大,其值为  $0.074 3 \text{ g/mm}^3$ ;当水含量为  $1.0 \%$  时密度最小,为  $0.068 7 \text{ g/mm}^3$ 。硬质发泡的生长过程是一个复杂的动态过程,一般认为包括以下几个阶段:(1)聚合物/气体溶液体系的形成:通过调节气体的溶解速度和扩散速度,使适量气体均匀溶于溶液中,并达

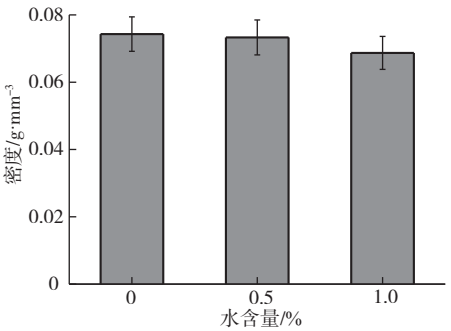


图 4 不同水含量对硬质聚氨酯泡沫材料密度的影响

Fig. 4 The effect of different water content on the density of rigid polyurethane foam material

到热力学平衡;(2)泡孔生长:当反应物料中气体浓度不断上升并达到平衡后,逐渐开始形成微小气泡,此泡孔呈球状,泡孔数量决定泡孔密度、制品密度和发泡倍率,此时体系为气液两相且不稳定;(3)泡孔成型及制品固化:核化逐渐进行,不再形成微泡,气体不断从液相中扩散到已生成的气泡中,气泡体积不断增大,形成稳定的几何结构<sup>[16]</sup>。在发泡过程中异氰酸酯与水反应,先形成不稳定的氨基甲酸,然后分解成二氧化碳和胺。随着发泡体系中水含量的增加,反应产生的二氧化碳气体增多,气泡膨胀速度加快,泡孔相互接触合并

形成大的泡孔,而包裹气体的基体材料体积为定值,因此密度逐渐降低。

如图 5(a)所示,水含量为 0、0.5 % 和 1.0 % 时样品下表面最高温度分别为 26.5、28.5 °C 和 29.3 °C。由此可知,加入蒸馏水后发泡板材的试验最高温度明显增加,且水含量越多温度越高。蒸馏水的加入会促进发泡过程,降低发泡板材的密度,进而提升其保温隔热性能。硬质聚氨酯泡沫体的热导率是指单位温度梯度(在 1 m 长度内温度降低 1 K)在单位时间内经单位导热面所传递的热量。聚氨酯泡沫体的热量传递分为 3 种形式:

热传导、热对流和热辐射。大量研究表明聚氨酯泡沫体的热量传递主要取决于泡沫体泡孔的数量、尺寸、形状以及泡沫密度。由图 5(b)可知,聚氨酯硬质发泡材料的热导率随着水含量的增加而降低。当水含量为 1.0 % 时热导率最小,其值为 0.012 95 W/(m·K);当水含量为零时热导率最大,其值为 0.026 2 W/(m·K)。这主要是由于随着水含量的增加,反应所产生的 CO<sub>2</sub> 气体增多,而气体的热导率比固体小得多,因此热导率下降<sup>[17-18]</sup>,表现出明显的保温隔热效果,一般的硬质聚氨酯泡沫材料的热导率为 0.022 W/(m·K)。

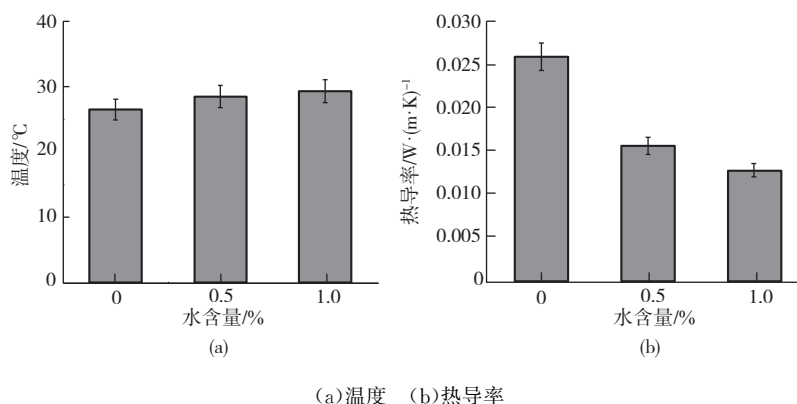


图 5 水含量对硬质聚氨酯泡沫材料保温、隔热性能的影响

Fig. 5 The effect of water content on the thermal insulation and thermal insulation of rigid polyurethane foam materials

### 2.3 力学性能

从图 6 可知,硬质聚氨酯泡沫材料的压缩性能随着水含量的增加而逐渐降低。当水含量为零时压缩应力最大;当水含量为 1.0 % 时,压缩应力最小。密度作为非常重要的物理性质,对硬质聚氨酯泡沫的力学性能具有显著影响<sup>[19]</sup>。一般而言,压缩强度随密度增加而增加。随着水含量的增加其发生形变的应力降低,

且加入的水越多越容易产生应变。水会使板材中泡孔增大增多,故而会使其压缩性能降低。随着水加入量增加,泡沫压缩强度减小<sup>[20]</sup>。另外,水的添加会使泡孔增大,泡孔壁变薄,对发泡材料支撑作用降低。随着水含量的增加,硬质发泡材料对水的吸收率增加,泡孔较大的基体可吸收更多的水,形成脆性的缩二脲化合物,缩二脲化合物是一种刚性基团,它能使泡沫整体结构变脆,导致泡沫体的压缩强度等力学性能下降。

由图 7 可知,随着含水量的增加,三点弯曲性能呈下降的趋势。含水量为零时应力为 75 N,含水量为 0.5 % 时应力为 52 N,相比下降了 23 N;含水量为 1.0 % 时应力为 34 N,与含水量 0.5 % 时相比下降了 18 N。硬质聚氨酯泡沫材料中含水量越多弯曲性能越差。因此,水对硬质聚氨酯泡沫材料的弯曲性能有显著影响。蒸馏水作为一种发泡剂会促进材料中的气泡的形成,根据 SEM 照片显示,随着含水量的增加,泡孔直径变大。泡孔壁变薄而且缩二脲化合物是一种刚性基团,它能使泡沫整体结构变脆,故使得泡沫材料的弯曲等力学性能下降。

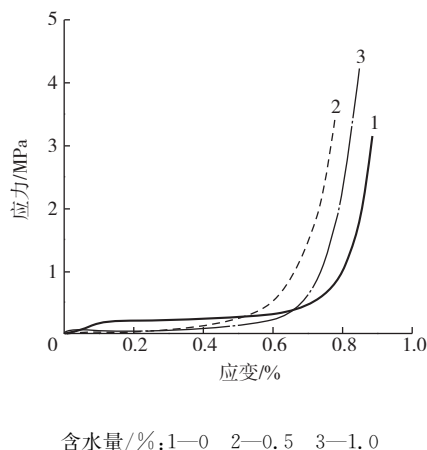
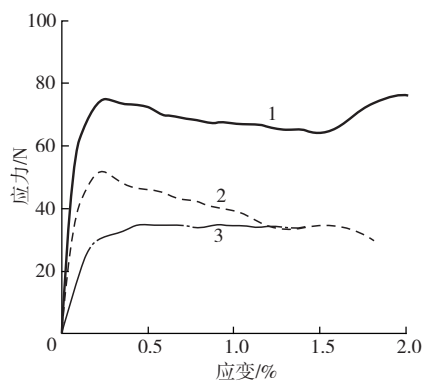


图 6 含水量对硬质聚氨酯泡沫材料压缩性能的影响

Fig. 6 The effect of water content on the compression properties of rigid polyurethane foam materials

### 2.4 热稳定性

在氮气环境下,含水量为 0、0.5 % 和 1.0 % 的硬

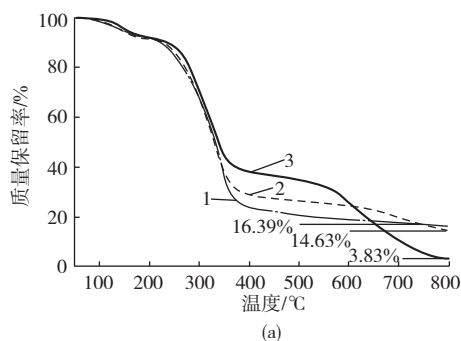


含水量/%: 1—0 2—0.5 3—1.0

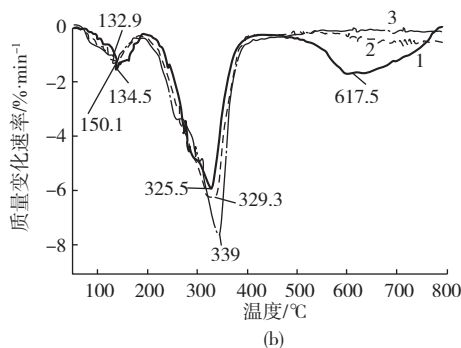
图7 含水量对硬质聚氨酯泡沫材料三点弯曲性能的影响

Fig. 7 The effect of water content on three point bending properties of rigid polyurethane foam materials

质聚氨酯泡沫材料的 TG 和 DTG 曲线如图 8 所示。水含量为零的硬质聚氨酯泡沫的失重峰出现在 100~200、200~400 °C 和 500~800 °C 范围内。第一阶段为氨基甲酸酯失去水变为尿素;第二阶段是硬质聚氨酯泡沫中最弱的 C—N 键形成的硬链段的降解,从而形成氰



(a)



(b)

含水量/%: 1—0 2—0.5 3—1.0

(a) TG 曲线 (b) DTG 曲线

图8 不同水含量硬质聚氨酯泡沫材料的 TG 和 DTG 曲线

Fig. 8 TG and DTG curves of rigid polyurethane foam materials with different water content

### 3 结论

(1)随着发泡剂水含量的增加,硬质聚氨酯泡沫材料的泡孔直径增大,密度降低,热导率降低,保温性能显著增强,其中水含量为 1.0 % 时热导率最小为 0.012 95 W/(m·K);水含量为零时热导率最大为 0.026 2 W/(m·K);

(2)随着水含量的增加,硬质聚氨酯泡沫材料的压缩性能和三点弯曲性能均呈现下降趋势;

(3)随着水含量的增加,硬质聚氨酯泡沫材料的初始分解温度均提前,第二阶段的降解出现延迟,却表现出更高的质量损失率;此外,随着水含量的增加硬质聚

酸酯、醇、伯胺、仲胺和烯烃以及二氧化碳<sup>[21]</sup>。第三阶段水含量为 0.5 % 和 1.0 % 时较 0 时更稳定,质量不再损失。含水量为 0.5 % 和 1.0 % 的硬质聚氨酯泡沫材料的失重峰仅出现 2 个阶段:100~200 °C 和 200~400 °C。由图 7 可知添加蒸馏水使得硬质聚氨酯泡沫的初始降解温度和  $T_{max}$  均提前。这是由于水的添加消耗异氰酸酯生成脲,从而使与氨基甲酸酯反应生成脲基,异氰酸酯的量减少,平均相对分子质量降低,而且这种降低相对于水量增加引起的交联度升高要显著,致使材料起始热分解温度降低<sup>[22]</sup>。随着蒸馏水含量的增加,尽管第二阶段的降解出现延迟,却表现出更高的质量损失率。且随着水含量的增加硬质聚氨酯泡沫材料的最大耐热温度呈上升的趋势,其中水含量为零时为 325.5 °C、水含量为 0.5 % 时为 329.3 °C、水含量为 1.0 % 时为 339 °C。此外,随着水含量的增加,硬质聚氨酯泡沫材料在 800 °C 时的残炭量也呈上升的趋势,其中水含量为零时为 3.83 %、水含量为 0.5 % 时为 14.63 %、水含量为 1.0 % 时为 16.39 %。这是由于随着水含量的增加,硬质聚氨酯泡沫材料的热稳定性得到了提高。

氨酯泡沫材料的最大耐热温度呈上升的趋势;

(4)当水含量为 0.5 % 时制得的聚氨酯硬质泡沫材料具有较小且均匀致密的泡孔,泡孔直径为 0.376 mm,密度为 0.073 3 g/mm<sup>3</sup>,热导率为 0.015 8 W/(m·K),最大耐热温度为 329.3 °C。

### 参考文献:

- [1] 彭 智, 郑 震, 王新灵. 全水发泡阻燃聚氨酯硬质泡沫塑料的制备与性能[J]. 聚氨酯工业, 2009, 24(1): 14-17.  
PENG Z, ZHENG Z, WANG X L. Preparation and Performance of Full-water Foamed Flame Retardant Polyurethane Rigid Foam Plastics[J]. Polyurethane Industry, 2009, 24

- (1): 14-17.
- [2] 何金迎. 硬质聚氨酯泡沫塑料的结构、形态与改性研究[D]. 北京化工大学, 2013.
- [3] 杨春柏. 硬质聚氨酯泡沫塑料研究进展[J]. 中国塑料, 2009, 23(2): 12-15.  
YANG C B. Research Progress of Rigid Polyurethane Foam Plastics[J]. China Plastics, 2009, 23(2): 12-15.
- [4] 李宇宸, 罗振扬. 聚氨酯硬质泡沫用发泡剂的发展现状与 HCFC-141b 替代面临的挑战[J]. 聚氨酯工业, 2014, 29(5): 1-4.  
LI Y C, LUO Z Y. The Development Status of Foaming Agent for Polyurethane Foam and the Challenge of Hcfc-141b Substitute[J]. Polyurethane industry, 2014, 29(05): 1-4.
- [5] 马丽红. 硬质聚氨酯泡沫塑料研究进展[J]. 石化技术, 2016, 23(6): 24-25.  
MA L H. Research Progress of Rigid Polyurethane Foam Plastics[J]. Petrochemical Technology, 2016, 23(6): 24-25.
- [6] FRERICH S C. Biopolymer Foaming with Supercritical CO<sub>2</sub>-Thermodynamics, Foaming Behaviour and Mechanical Characteristics[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2015(96): 349-358.
- [7] 陈汉全. 全水发泡聚氨酯泡沫的制备及纳米改性的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [8] GROLIER J P E, RANDZIO S L. Simple Gases to Replace Non-environmentally Friendly Polymer Foaming Agents. A Thermodynamic Investigation[J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2012, 46: 42-56.
- [9] 王 燕, 朱宇宏, 曹丽芬, 等. 顶空-气相色谱法测定硬质聚氨酯泡沫中氢氟氯烃类发泡剂的残留量[J]. 理化检验-化学分册, 2017, 53(1): 89-92.  
WANG Y, ZHU Y H, CAO L F, et al. Determination of Hydrofluorochlorinated Hydrocarbon Foaming Agent in Rigid Polyurethane Foam by Headspace-Gas Chromatography[J]. Physicochemical Test-chemical Classification, 2017, 53(1): 89-92.
- [10] 詹茂盛, 许小强, 潘玲英. 水发泡剂对聚酰亚胺泡沫结构与性能的影响[J]. 航空材料学报, 2010, 30(3): 55-60.  
ZHAN M S, XU X Q, PAN L Y. The Influence of Water Foaming Agent on the Structure and Properties of Polyimide Foam[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(3): 55-60.
- [11] 梁继才, 林 琳, 李 义, 等. 水加入量对全水聚氨酯泡沫塑料性质的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(6): 40-43.  
LIANG J C, LIN L, LI Y, et al. Effects of Water Addition on the Properties of Whole Water Polyurethane Foam Plastics[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2010, 26(6): 40-43.
- [12] 刘凤娇, 丁雪佳, 苏 昱, 等. 反应型阻燃剂及全水发泡剂对硬质聚氨酯泡沫塑料阻燃性能的影响研究[J]. 塑料工业, 2013 (4): 91-95.  
LIU F J, DING X J, SU Y, et al. Effect of Reactive Flame Retardant and All-water Foaming Agent on the Flame Retardant Properties of Rigid Polyurethane Foam[J]. Plastics Industry, 2013 (4): 91-95.
- [13] 安 曼, 陈兴刚, 侯桂香, 等. 水对硬质聚氨酯-酰亚胺泡沫孔结构与性能的影响[J]. 材料工程, 2013 (4): 39-44.  
AN M, CHEN X G, HOU G X, et al. Effects of Water on the Structure and Properties of Rigid Polyurethane-imide Foam Porous Structures[J]. Materials Engineering, 2013 (4): 39-44.
- [14] 田军县. 有机保温材料在建筑节能工程中的作用[J]. 绿色建筑, 2011(2): 74-77.  
TIAN J X. The Role of Organic Thermal Insulation Materials in Building Energy Conservation Projects[J]. Green Building, 2011(2): 74-77.
- [15] TSIVINTZELIS I, SANXARIDOU G, PAVLIDOU E, et al. Foaming of Polymers with Supercritical Fluids: A Thermodynamic Investigation[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2016, 110: 240-250.
- [16] 何继敏. 新型聚合物发泡材料及技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 7-17.
- [17] 韩海军, 丁雪佳, 张丽娟, 等. 水对硬质聚氨酯泡沫塑料性能的影响研究[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(1): 18-20.  
HAN H J, DING X J, ZHANG L J, et al. Effects of Water on the Properties of Rigid Polyurethane Foam Plastics[J]. Engineering Plastics Applications, 2011, 39(1): 18-20.
- [18] ALEKSANDER P, JAN P, TOMASZ S. Thermal Diffusivity of Rigid Polyurethane Foams Blown with Different Hydrocarbons[J]. Polymer Testing, 2000, 19(6): 705-712.
- [19] THIRUMAL M, KHASTGIR D, SINGHA N. K, et al. Effect of Foam Density on the Properties of Water Blown Rigid Polyurethane Foam[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 108(3): 1 810-1 817.
- [20] 夏 凡, 吴晓青. 增强聚氨酯硬质泡沫塑料压缩性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(3): 53-55.  
XIA F, WU X Q. The Study on the Compression Properties of Reinforced Polyurethane Rigid Foam Plastics[J]. FRP/Composite Materials, 2009(3): 53-55.
- [21] JIAO L, XIAO H, WANG Q, et al. Thermal Degradation Characteristics of Rigid Polyurethane Foam and the Volatile Products Analysis with TG-FTIR-MS[J]. Polymer Degradation and Stability, 2013, 98(12): 2 687-2 696.
- [22] TIAN H, YAO Y, ZHANG S, et al. Enhanced Thermal Stability and Flame Resistance of Rigid Polyurethane-imide Foams by Varying Copolymer Composition[J]. Polymer Testing, 2018(67): 68-74.