

# 低沸点多元发泡技术在电热水器上的应用

李 彬, 张春晨, 周海平

芜湖美的厨卫电器制造有限公司, 安徽 芜湖

收稿日期: 2024年12月9日; 录用日期: 2025年1月8日; 发布日期: 2025年1月16日

## 摘 要

环戊烷 + LBA + R600多元发泡体系能较好的满足电热发泡技术要求, 泡料的流动性好, 产品的泡沫密度分布差更小, 泡沫泡孔的孔径分布均匀, 具有更低的泡沫导热系数, 产品能效余量较纯环戊烷和环戊烷 + 245fa二元发泡体系分别有3.3%和1.4%的提升, 长期保温性能较稳定, 可节省泡料10%~15%, 降低发泡原料成本。

## 关键词

聚氨酯泡沫, 低沸点, 导热系数

# Application of Low Boiling Point Multiple Foaming Technology in Electric Water Heater

Bin Li, Chunchen Zhang, Haiping Zhou

Wuhu Midea Kitchen and Bathroom Electrical Appliance Manufacturing Co. Ltd., Wuhu Anhui

Received: Dec. 9<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jan. 8<sup>th</sup>, 2025; published: Jan. 16<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

The cyclopentane + LBA + R600 multi-component foaming system can better meet the technical requirements of electrothermal foaming. The foam has good fluidity, the product's foam density distribution difference is smaller, the pore size distribution of foam cells is uniform, and the thermal conductivity of foam is lower. The energy efficiency margin of the product is 3.3% and 1.4% higher than that of the pure cyclopentane and cyclopentane + 245fa binary foaming systems, respectively. The long-term thermal insulation performance is relatively stable, which can save 10%~15% of foam materials and reduce the cost of foaming raw materials.

Keywords

Polyurethane Foam, Low Boiling Point, Thermal Conductivity

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

聚氨酯泡沫是以异氰酸酯和聚醚为主要原料，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，发泡而成的高分子聚合物。由于聚氨酯泡沫具有良好的绝热性能，因此可用于不同的保温、保冷领域[1]-[5]。

现在用作电热水器保温层的聚氨酯泡沫，多采用环戊烷 + HFC-245fa 二元发泡技术或纯环戊烷发泡技术，采用这种方法制备的聚氨酯泡沫，其泡沫芯密度达 35~40 kg/m<sup>3</sup>，密度较高，为获取相同体积的聚氨酯泡沫，整体投料量较多，具有一定的成本痛点。保温、保冷领域的能效(节能效果)，与保温、保冷材料的隔热效果密切相关，而泡沫芯密度与隔热效果也具有一定的相关性。随着节能标准的要求越来越高，现在常用的发泡技术(发泡剂)制备得到的聚氨酯泡沫较难满足日益提高的能效要求，过多的泡料填充还会影响发泡生产效率并带来巨大的成本压力。

此外，由于 HFC-245fa 的 GWP 值(Global Warming Potential，温室效应潜能值)高达 1030，而标准要求，发泡所采用发泡剂的 GWP 值小于 150，因此，自 2019 年起开始 HFC-245fa 等氢氟碳化物产量增长被限制，并要求逐年消减产量至 2030 年全面禁止[6]-[8]。但由于暂时没有良好的替代物质，HFC-245fa 的需求量随着产业发展仍是持续增长的，这必将导致其采购困难，价格在现有高价的基础上继续提升，也就是说，在成本升高的同时还面临不环保的问题。

因此，研发设计一种新的发泡剂组合物，以降低热水器用聚氨酯泡沫的密度，提升保温、保冷领域的能效要求(即隔热效果)，并尽可能降低成本、提升环保性，非常重要，常用的发泡剂的物理属性见下表 1。

Table 1. Physical properties of common foaming agents  
表 1. 常用发泡剂的物理性能

发泡剂	环戊烷	LBA	HFC-245fa	R600	HFC-152a	HFC-134a
分子式	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	(E)CF <sub>3</sub> CH=CHCl	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>
分子量	70	130.5	134	58	66	102
沸点/℃	49	19	15.3	-0.5	-25.7	-26.5
饱和蒸气压/kPa	34	106	124	258	599	572
GWP	5	5	1030	5	124	1300

低沸点多元发泡技术在冰箱行业上已有成熟的应用经验，但热水器用聚氨酯泡沫和冰箱用聚氨酯泡沫具有本质区别，在配方设计要求(如阻燃性)、注泡方式(是否模具发泡)、应用场景(高温或低温)等不同，两者间不具备可比性。

本文开发出的低沸点多元发泡技术(环戊烷 + LBA + R600 多元发泡体系), 泡料流动性明显优于环戊烷 + HFC-245fa 二元发泡技术和纯环戊烷发泡体系, 由其发泡制备的聚氨酯泡沫具有更低的泡沫芯密度, 保持较好的泡沫强度和隔热效果。

2. 实验部分

2.1. 主要原料和设备

环戊烷, 茂名石化; 正丁烷(R600), 澳宏; LBA (HFO-1233zd(E)), 霍尼韦尔; HFC-245fa, 霍尼韦尔; 异氰酸酯(黑料), 巴斯夫; 组合聚醚(白料), 万华。

XMGM300 硬泡模具, 上海宝科仪器设备有限公司; EN630 搅拌器, 上海现代环境工程技术股份有限公司; EKO HC-074 热导率仪器, 北京五洲东方科技发展有限公司; TM3030 扫描电镜, 上海科学仪器有限公司; 高压发泡机, 蓬莱强兴聚氨酯机业有限公司。

2.2. 聚氨酯泡沫制备

将配置好的白料经抽料泵加入高压发泡机料罐中, 设定发泡参数料比黑料/白料 = 1.15、黑白料压力 130/130 bar、黑白料温 18℃~20℃, 流量在 400 g/s, 注入硬泡模具中, 熟化 5 min, 脱模取出泡沫在常温下放置熟化 24 h, 切成相应的标准泡沫样块, 测试泡沫导热系数等物理性能。

2.3. 试验样机制作

将章节 2.2 中的方法, 在不同试验条件下注入提前装配好的空壳电热水器中, 发泡熟化 1 天后, 装配好电器等零部件, 经测试评价实验室测试样机 24 h 固有能效系数或温降试验。

3. 结果与讨论

3.1. 不同发泡体系的泡沫物理性能比较

按章节 2.2 中的方法, 同时制备纯环戊烷体系、环戊烷 + 245fa 二元发泡体系及环戊烷 + LBA + R600 多元发泡体系泡沫样品, 测试泡沫的物理性能比较见下表 2。

Table 2. Comparison of foam physical properties of different foaming systems  
表 2. 不同发泡体系泡沫物理性能的比较

物理性能/发泡体系	纯环戊烷发泡体系	环戊烷 + 245fa 二元发泡体系	环戊烷 + LBA + R600 多元发泡体系
压力泡密度 kg/m <sup>3</sup>	38.2	35.7	32.1
密度分布差 kg/m <sup>3</sup>	4.52	3.26	1.57
压缩强度(垂直方向) kPa	155	152	151
导热系数(22.5℃) mW/m·K	20.1	19.8	19.6
尺寸稳定性(-40℃)%	-0.65	-0.51	-0.45
尺寸稳定性(100℃)%	0.36	0.38	0.39
阻燃性	HF-1	HF-1	HF-1

由以上表 2 可知, 环戊烷 + LBA + R600 多元发泡体系泡沫压力泡密度降低 10.3%~16.6%, 节省发泡料 10%~15%, 其泡沫压缩强度基本保持相当水平, 而泡沫的密度分布差明显减少一半以上, 说明泡料

的流动性好，泡料分布更加均匀。环戊烷 + LBA + R600 多元发泡体系的导热系数也有所降低，尤其相比纯环戊烷发泡体系，说明保温性能更优，因为 LBA 发泡剂具备更低的气相导热系数，整体的密度降低及泡沫泡孔的均匀分布，更有利于降低泡沫的固相导热系数，从而实现泡沫整体导热系数的降低，保温性能更好。环戊烷 + LBA + R600 多元发泡体系泡沫具有更小的低温尺寸稳定性，低沸点多元发泡体系在冬季低温条件下，流动性更好，具备更好的产品可靠性，产品收缩风险降低，尤其是顶端的胆口端盖处的缩泡风险大幅降低。

图 1 为环戊烷 + LBA + R600 多元发泡体系泡沫扫描电镜图，可以看出低沸点多元发泡泡沫泡孔的孔径分布是比较均匀的，更有利于降低泡沫的固相导热系数和辐射导热系数，达到更好的保温效果。

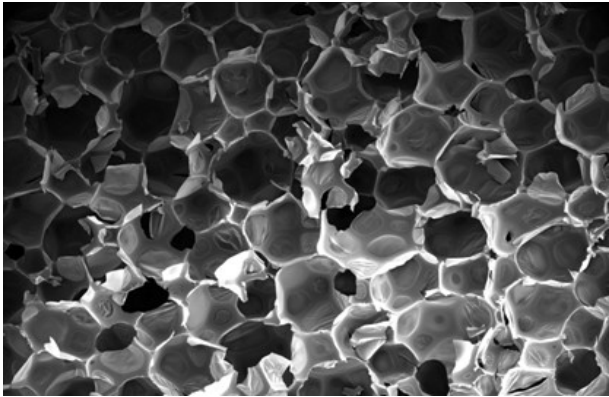


Figure 1. Scanning electron microscope of foam of cyclopentane + LBA + R600 multi-component foaming system  
图 1. 环戊烷 + LBA + R600 多元发泡体系泡沫扫描电镜图

3.2. 不同发泡体系整机能效及温降比较

选用某 60 L 二级机型电热水器，制作纯环戊烷体系、环戊烷 + 245fa 二元发泡体系及环戊烷 + LBA + R600 多元发泡体系整机，评估其 24 h 固有能效系数或温降结果见下表 3：

Table 3. Comparison of 24 h inherent energy efficiency coefficient and temperature drop of different foaming systems  
表 3. 不同发泡体系整机 24 h 固有能效系数和温降比较

整机性能		纯环戊烷体系			环戊烷 + 245fa 二元体系			环戊烷 + LBA + R600 多元发泡体系		
24 h 固有能效系数		0.672	0.671	0.677	0.668	0.662	0.661	0.651	0.655	0.647
初始		15.35	15.33	15.51	15.29	15.47	15.43	15.23	15.39	15.21
24 h 温降	30 天	15.53	15.62	15.66	15.42	15.61	15.69	15.41	15.49	15.36
	90 天	15.80	15.71	15.91	15.69	15.88	15.81	15.66	15.72	15.61

备注：温降试验：环境温度 20℃；进水压力：0.28 MPa；进水温度 15℃；加热到 75℃（保温）状态、保温后断电（不用水），记录储水平均温度 24 h 后降温温度。

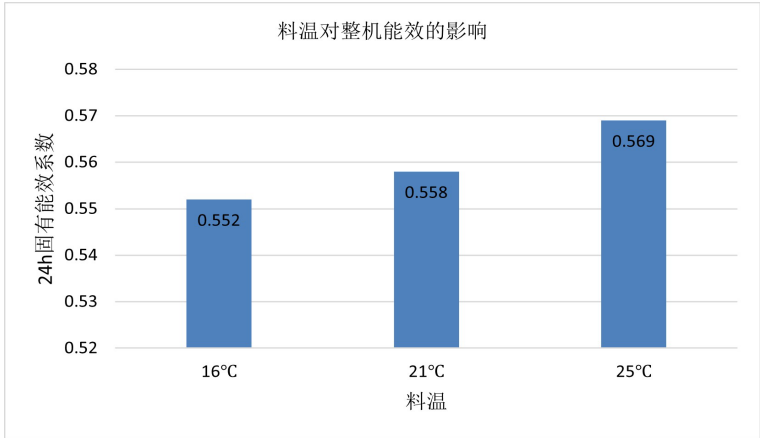
上表 3 可知，环戊烷 + LBA + R600 多元发泡体系整机 24 h 固有能效系数相比纯环戊烷和环戊烷 + 245fa 二元发泡体系分别降低 3.3%和 1.4%，低沸点多元发泡体系可以提升现有机型的能效余量。从 30 天和 90 天温降试验来看，环戊烷 + LBA + R600 多元发泡体系整机与纯环戊烷和环戊烷 + 245fa 二元发泡体系整机均具有较好的长期保温稳定性，衰减性能变化不大且基本相当。

3.3. 不同温度条件下对整机能效的影响

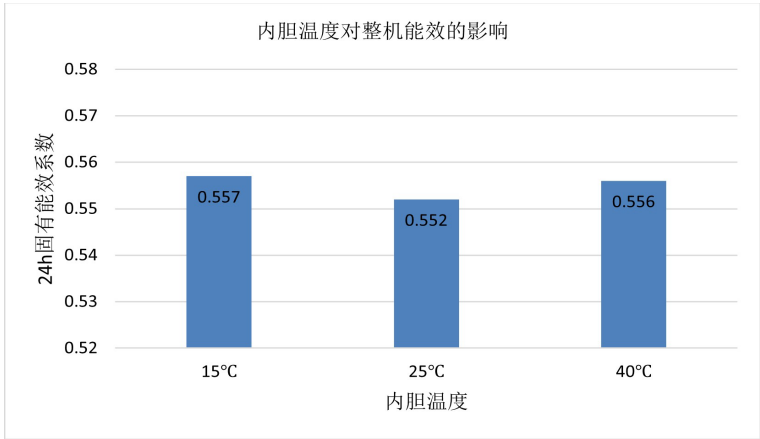
选用某 60 L 一级机型电热水器，验证了环戊烷 + LBA + R600 多元发泡体系关键工艺参数料温、内胆温度对整机能效的影响，试验结果见下表 4：

**Table 4.** Influence of different material temperature and tank temperature on the energy efficiency of the machine  
**表 4.** 不同料温、内胆温度对整机能效的影响

验证参数	条件	24 h 固有能效系数
料温	16℃	0.552
	21℃	0.558
	25℃	0.569
内胆温度	15℃	0.557
	25℃	0.552
	40℃	0.556



**Figure 2.** Influence of material temperature on energy efficiency of whole machine  
**图 2.** 料温对整机能效的影响



**Figure 3.** The influence of tank temperature on the energy efficiency of the whole machine  
**图 3.** 内胆温度对整机能效的影响

由上图 2、图 3 可知,不同料温条件下的 24 h 固有能效系数均能满足标准要求(一级机型 24 h 固有能效系数国标  $<0.600$ ),但料温升高,能效余量变小,综合考虑发泡工艺性,建议该低沸点多元发泡体系的料温控制在  $16^{\circ}\text{C}\sim 21^{\circ}\text{C}$ 。不同内胆温度条件下的 24 h 固有能效系数均满足且余量充足,内胆温度对低沸点多元发泡能效影响不大,但内胆温度低,对应的发泡料填充量增加,产品成本上升,建议内胆温度控制在  $25^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ ,以保持一致的发泡工艺性和产品品质稳定性。

#### 4. 结论

经过研究,环戊烷 + LBA + R600 多元发泡体系能较好的满足电热发泡技术要求,泡料的流动性好,产品的泡沫密度分布差更小,泡沫泡孔的孔径分布均匀,具有更低的泡沫导热系数,产品能效余量较纯环戊烷和环戊烷 + 245fa 二元发泡体系分别有 3.3%和 1.4%的提升,长期保温性能较稳定,可节省泡料 10%~15%,降低发泡原料成本。

综合考虑发泡工艺性、产品成本和品质综合性能,建议泡料温度控制在  $16^{\circ}\text{C}\sim 21^{\circ}\text{C}$ ,内胆温度控制在  $25^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。

#### 参考文献

- [1] 潘榕伟,秦桑路,林云. 新一代高效节能环保家电发泡剂技术的开发与应用[J]. 电器, 2012(z1): 83-86.
- [2] 王耀,尹良敏. 新型发泡剂 LBA 在冰箱发泡应用中的研究[J]. 广州化工, 2015, 43(23): 134-136.
- [3] 魏路,信延奎,于楠,等. 电热水器用 LBA 型硬泡组合聚醚的研究[J]. 聚氨酯工业, 2017, 32(5): 52-55.
- [4] 胡锋,曹立军,李彬,刘莉. 负压发泡在冰箱上的应用研究[J]. 材料科学, 2019, 9(3): 257-263.
- [5] 周艳艳,邹宇田,李思成,等. 戊烷发泡剂特性及其硬质聚氨酯泡沫的性能[J]. 聚氨酯工业, 2022, 37(1): 1-3, 7.
- [6] 郑冬芳,吴克安,钱跃言,等. 《蒙特利尔议定书》HFCs 修正提案浅析[J]. 浙江化工, 2016, 47(1): 1-5.
- [7] 杨加栋,张晓灵,吴文通,等. 零 ODP 值发泡剂对硬质聚氨酯泡沫的泡孔结构和导热系数的影响[J]. 聚氨酯工业, 2015, 30(1): 9-13.
- [8] 闫红英,鹿毅力,杨瑾,等. HFC-365mfc/227ea 替代 HCFC-141b 在硬质聚氨酯泡沫喷涂中的应用[J]. 科技资讯, 2024, 22(8): 116-119.