

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.09.022

无氯氟化学发泡剂复配环戊烷在硬质聚氨酯泡沫中的应用

贾信¹,张录斌²,毕戈华¹,毕玉遂¹,黄骏峰²

(1. 山东理工大学化学化工学院, 山东淄博 255049; 2. 补天新材料技术有限公司, 山东淄博 255000)

摘要: 将无氯氟化学发泡剂 CFA9001L 与环戊烷 (CP) 复配作为复配发泡剂用于制备硬质聚氨酯泡沫, 应用在冷柜保温夹层中, 考察了 4 种复配发泡剂配比对硬质聚氨酯泡沫的表观密度、热导率、尺寸稳定性、压缩强度、闭孔率和流动指数的影响。结果表明, 制备的 4 种硬质聚氨酯泡沫的表观密度相近, 与仅加入 CP 的硬质聚氨酯泡沫相比, CFA9001L 与 CP 复配制备的硬质聚氨酯泡沫的尺寸稳定性更好、闭孔率更高、压缩强度更大、热导率更低, 但是流动性变差。当 CFA9001L 与 CP 的质量比为 3 : 5 时, 制备的硬质聚氨酯泡沫的热导率最低, 为 19.93 mW/(m·K), 较仅加入 CP 制备的硬质聚氨酯泡沫的热导率降低 6.2%, 并且催化剂用量可节约 26.7%。

关键词: 化学发泡剂; 环戊烷; 硬质聚氨酯泡沫; 热导率; 压缩强度

中图分类号: TQ328.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)09-0126-06

Application of Non-chlorine and Non-fluorine Chemical Foaming Agent Compound Cyclopentane in Rigid Polyurethane Foam

Jia Xin¹, Zhang Lubin², Bi Gehua¹, Bi Yusui¹, Huang Junfeng²

(1. Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 2. Butian New Materials Technology Co., Ltd., Zibo 255000, China)

Abstract : The non-chlorine and non-fluorine chemical foaming agent CFA9001L and cyclopentane (CP) were compounded as a combination foaming agent to prepare rigid polyurethane foam, which was applied in the insulation interlayer of refrigerators. The effects of four compound foaming agent ratios on the apparent density, thermal conductivity, dimensional stability, compression strength, closed porosity and flow index of the rigid polyurethane foam were investigated. The results show that the apparent density of the prepared four kinds of rigid polyurethane foams are similar, compared with the rigid polyurethane foam prepared only with CP, the rigid polyurethane foam produced by the compounding system of CFA9001L and CP have better dimensional stability, higher closed porosity, higher compression strength and lower thermal conductivity, but the flowability is getting worse. The lowest thermal conductivity is 19.93 mW/(m·K) when CFA9001L is compounded with CP at the mass ratio of 3 : 5, which is 6.2% lower than that of the rigid polyurethane foam prepared only with CP, and the amount of catalyst can be saved by 26.7%.

Keywords : chemical foaming agent ; cyclopentane ; rigid polyurethane foam ; thermal conductivity ; compressive strength

随着奶茶、冷饮行业的兴起, 各类商超对冷柜的需求也越来越多, 硬质聚氨酯泡沫凭借质轻、热导率低、尺寸稳定性好等优势在保温绝热材料中发挥着重要的作用, 而起发泡作用的发泡剂直接影响硬质聚氨酯泡沫的性能。由于对臭氧层的破坏作用, 第一代发泡剂氟利昂已被淘汰; 根据《蒙特利尔协议》要求, 第二代发泡剂一氟二氯乙烷 (HCFC-141b) 在 2030 年完全淘汰^[1-3]。西方国家开发了第三代发泡剂五氟丙烷 (HFC-245fa) 和五氟丁烷 (HFC-

365mfc), 但仍然存在较高的全球变暖潜能值的问题, 只能作为过渡性方案。2021 年 9 月 15 日, 《基加利修正案》正式对我国生效, 意味着氢氟烃 (HFC) 类物质在国内的淘汰正式被提上日程^[4-7]。第四代发泡剂一氯三氟丙烯 (HFO-1233zd) 和六氟丁烯 (HFO-1336mzz) 产品的生产技术一直被西方国家垄断, 高昂的价格及市场供应不足限制了该类发泡剂的推广使用^[8-10]。

我国冰箱冷柜行业在早期淘汰氯氟烃 (CFC)

通信作者: 毕戈华, 副教授, 主要从事无氯氟聚氨酯化学发泡剂的合成与应用

收稿日期: 2022-06-20

引用格式: 贾信, 张录斌, 毕戈华, 等. 无氯氟化学发泡剂复配环戊烷在硬质聚氨酯泡沫中的应用 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(9): 126-131.

Jia Xin, Zhang Lubin, Bi Gehua, et al. Application of non-chlorine and non-fluorine chemical foaming agent compound cyclopentane in rigid polyurethane foam[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(9): 126-131.

时选择了戊烷方案,后期随着家电能耗标准的提高,国内大多厂商改用环戊烷(CP)与HFC-245fa混合体系作为冰箱用硬质聚氨酯泡沫的发泡剂,但HFC-245fa高昂的价格以及繁琐的组合料加工及运输要求,给白料企业和下游制造商增加了成本。目前市场上的冷柜、冷柜展示柜等大多使用CP和水作为发泡剂,CP是弱极性化合物,与多元醇和异氰酸酯的相容性很差,发出的泡沫的泡孔尺寸不均匀,难以达到优异的保温效果,并且CP属于易燃易爆的挥发性有机物质,存在安全隐患。

毕戈华等^[11]、毕玉遂等^[12]和李新超等^[13]研发了CFA系列新型无氯氟化学发泡剂,其分子中含有羰基和多个羟基的碳酸醇胺盐类化合物,可以与异氰酸酯反应释放CO₂进行发泡,CFA9001L是其中的一种,由于其具有增溶基团,该无氯氟化学发泡剂能够充分溶于聚醚多元醇或聚酯多元醇中,与发泡原料具有很好的互溶性^[14]。笔者将CFA9001L与物理发泡剂CP复配作为复配发泡剂用于制备硬质聚氨酯泡沫,应用于冷柜保温夹层中,并对所得硬质聚氨酯泡沫的表观密度、热导率、尺寸稳定性、压缩强度、闭孔率和流动指数进行了研究。

1 实验部分

1.1 主要原料

聚醚多元醇:YD-8239G,工业级,羟值为(395±15) mgKOH/g,河北亚东化工集团有限公司;

聚醚多元醇:Sa-380,工业级,羟值为(375±20) mgKOH/g,山东蓝星东大化工有限公司;

聚醚多元醇:Sa-460,工业级,羟值为(460±15) mgKOH/g,山东蓝星东大化工有限公司;

聚酯多元醇:PS-3152,工业级,羟值为(315±15) mgKOH/g,斯泰潘化学(南京)有限公司;

泡沫稳定剂:B8545,工业级,赢创特种化学(上海)有限公司;

催化剂:PC-5,PC-8,赢创特种化学(上海)有限公司;

CP:工业级,齐鲁石油化工公司;

无氯氟化学发泡剂:CFA9001L,羟值为1600~1900 mgKOH/g,补天新材料技术有限公司;

多亚甲基多苯基多异氰酸酯(PAPI):工业级,万华化学集团股份有限公司。

1.2 主要仪器与设备

高速分散机:U400/80-220型,上海微特电机有

限公司;

注塑机:RSC 16/16型,德国Krauss Maffei集团;

电子天平:AUW220D型,日本岛津公司;

开闭孔率分析仪:Ultra Foa-2-18paiG型,康塔克默仪器贸易(上海)有限公司;

热导率测试仪:EKO HC-074-200型,板温范围为-20~75℃,日本英弘精机株式会社;

拉力试验机:Gotech TCS-2000型,高铁科技股份有限公司;

数显游标卡尺:Mitutoyo CD-20AX型,三丰精密量具(上海)有限公司。

1.3 样品制备

硬质聚氨酯泡沫的配方见表1。

表1 硬质聚氨酯泡沫配方		g			
组分	原料	配方编号			
		1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
白料	组合多元醇	100	100	100	100
	泡沫稳定剂	2	2	2	2
	复合催化剂	3	2.5	2.2	1.9
	水	1	1	1	1
	CP	16	12	10	8
	CFA9001L		4	6	8
黑料	PAPI	110	110	110	110

注:组合多元醇由50 g YD-8239G聚醚多元醇、30 g Sa-380聚醚多元醇、10 g Sa-460聚醚多元醇、10 g PS-3152聚酯多元醇组成,复合催化剂由PC-5与PC-8按质量比2:5复配而成。

根据表1配方,各制备20 kg组合白料,搅拌均匀,室温下静置12 h消泡,将黑料PAPI与组合白料分别装进黑、白料储料罐,控制料温20℃,混合头压力12 MPa。在环境温度25℃下,使用注塑机浇注在模具中,模具温度设置为45℃,充分反应15 min后,从模具中取出硬质聚氨酯泡沫,常温下熟化48 h后制备样品,测试其性能。

1.4 性能测试

SEM分析:对硬质聚氨酯泡沫断面进行喷金处理,采用SEM观察断面形貌,加速电压20.00 kV,并用标尺测量泡沫泡孔尺寸。

表观密度按照GB/T 6343-2009测试,样品尺寸为50 mm×50 mm×50 mm。

热导率按照GB/T 10295-2008测试,样品尺寸为20 cm×20 cm×2.5 cm,测试环境温度为10℃。

尺寸稳定性按照GB/T 8811-2008测试,样品尺寸为10 cm×10 cm×2.5 cm。

压缩强度按照GB/T 8813-2008测试,样品尺寸为50 mm×50 mm×50 mm。

闭孔率按照GB/T 10799-2008测试,样品尺寸

为 25 mm × 25 mm × 25 mm。

流动指数:发泡前称量裁定好的聚乙烯塑料软管的质量 (m_1),将搅拌均匀的黑、白混合料倒入竖直放置的聚乙烯塑料软管进行发泡,将发泡反应形成的泡沫固化放置 10 min 后,用天平和卷尺测试样品的质量 (m_2) 和高度 (L),按公式 (1) 计算硬质聚氨酯泡沫的流动指数 (F):

$$F=L/(m_2-m_1) \quad (1)$$

以上所有测试结果均取 3 次测试结果的平均值。

2 结果与讨论

2.1 硬质聚氨酯泡沫的物理性能

4 种硬质聚氨酯泡沫的物理性能数据见表 2。

表 2 4 种硬质聚氨酯泡沫的物理性能

项目	配方编号			
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
表观密度/(kg·m ⁻³)	34.63	34.78	35.15	35.06
闭孔率/%	89.47	90.98	91.69	91.31
流动指数/(cm·g ⁻¹)	0.71	0.68	0.66	0.63

从表 2 可以看出,制备的 4 种硬质聚氨酯泡沫的表观密度相近,加入无氯氟化学发泡剂 CFA9001L 与 CP 复配发泡剂制备的硬质聚氨酯泡沫的闭孔率较仅加入 CP 制备的硬质聚氨酯泡沫的闭孔率有一定程度的提高。这是因为 CFA9001L 与白料的相容性较 CP 好,并且在反应过程中 CFA9001L 的羟基会与 PAPI 反应,生成的硬质聚氨酯泡沫的泡孔更加均匀、细腻,因此闭孔率更高。随着 CFA9001L 加入量的增加,硬质聚氨酯泡沫的流动指数下降。分析原因可能是:随着 CP 加入量的逐渐减少, CFA9001L 加入量的逐渐增多,导致白料的黏度增大,另外 CFA9001L 的加入量越多,在分解释放 CO₂ 过程中产生的小分子醇胺会越多,提高了反应活性,交联速度加快,从而导致硬质聚氨酯泡沫的流动性变差。

2.2 尺寸稳定性

硬质聚氨酯泡沫的尺寸稳定性是指泡沫尺寸变化的程度,也就是泡沫在长度、宽度、高度三个方向上的伸长或收缩程度^[15],是评价硬质聚氨酯泡沫性能的重要指标。4 种硬质聚氨酯泡沫在不同温度下存放 48 h 后,在长度、宽度、高度三个方向上的尺寸变化率见表 3。

由表 3 可以看出,加入 CFA9001L 后,硬质聚氨酯泡沫的尺寸稳定性明显优于未加 CFA9001L 的硬质聚氨酯泡沫,且都符合国家使用标准。这主要是

表 3 不同温度下 4 种硬质聚氨酯泡沫在长度、宽度、高度三个方向上的尺寸变化率 %

配方编号	方向	80℃	-30℃
1 [#]	长度	0.52	0.68
	宽度	0.54	0.58
	高度	0.26	0.39
2 [#]	长度	-0.12	-0.09
	宽度	0.24	0.13
	高度	0.09	0.11
3 [#]	长度	0.31	-0.15
	宽度	0.12	0.33
	高度	0.06	0.07
4 [#]	长度	0.11	-0.22
	宽度	-0.15	0.18
	高度	0.16	0.09

注:存放时间为 48 h。

因为 CFA9001L 的醇胺的官能度较高,可以提高硬质聚氨酯泡沫的交联程度,使泡沫更好地形成立体网状结构,尺寸稳定性更好。

2.3 热导率

硬质聚氨酯泡沫热导率的高低直接影响冷柜的能耗,热导率越小,能耗越低。4 种硬质聚氨酯泡沫的热导率如图 1 所示。

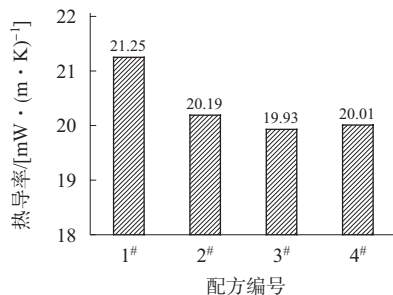


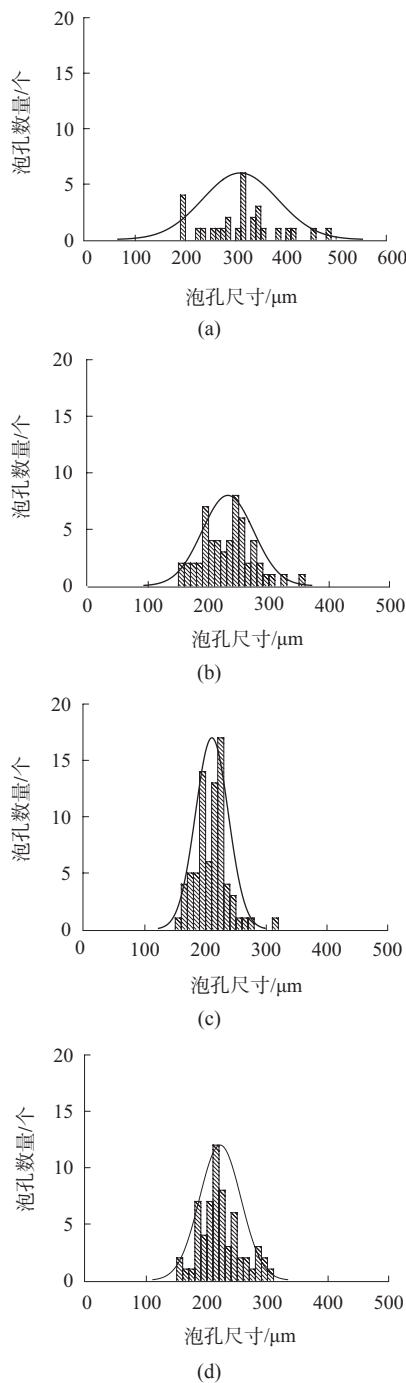
图 1 4 种硬质聚氨酯泡沫的热导率

从图 1 可以看出,相比于未加入 CFA9001L 的硬质聚氨酯泡沫,加入 CFA9001L 与 CP 复配发泡剂的硬质聚氨酯泡沫的热导率更低。因为 CFA9001L 与多元醇的相容性比 CP 要好,与白料混合更加均匀,使发泡反应更加充分,在反应的初期阶段与 PAPI 的一系列反应可以起到辅助成核以及稳定泡孔的作用。当 CFA9001L 与 CP 复配质量比为 3 : 5,即用 CFA9001L 替代质量分数 37.5% 的 CP 时,制得的硬质聚氨酯泡沫的热导率最低,为 19.93 mW/(m·K),较仅使用 CP 制备的硬质聚氨酯泡沫的热导率降低 6.2%,催化剂的用量可节约 26.7%。当 CFA9001L 加入过量时,热导率会升高。主要是由于泡孔内的气体成分变化导致。另外,化学发泡剂 CFA9001L 加入量越多,前期反应越剧烈,导致硬质聚氨酯泡沫的闭孔率降低,也会影响其热导率。

硬质聚氨酯泡沫的导热性能源自三种传热控制过程,即气相传热、聚合物基体传热和辐射传热。

气相传热又分为热传导和热对流,研究表明,泡孔尺寸对热传导和热对流均有影响,当泡孔尺寸小于 2 mm 时,泡孔内气体的对流传热可以忽略不计^[16]。4 种硬质聚氨酯泡沫的泡孔尺寸分布如图 2 所示。

从图 2 可以看出,4 种硬质聚氨酯泡沫的泡孔



a—1[#]; b—2[#]; c—3[#]; d—4[#]

图 2 4 种硬质聚氨酯泡沫的泡孔尺寸分布

尺寸在 50 ~ 600 μm 范围内,均小于 2 mm,说明气体的热传导发挥主要作用。

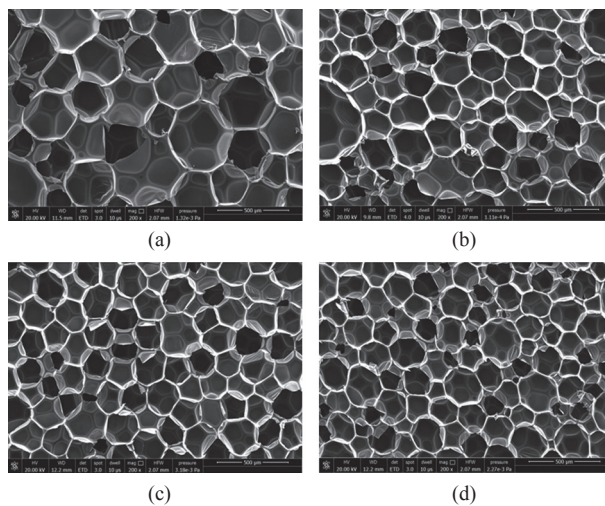
一般热塑性聚合物的基体传热主要受分子链结构、链取向和有序畴的排列堆积方式影响。硬质聚氨酯泡沫在分子结构上属于非结晶的热固性聚合物,且具有一定程度的软硬段微相分离,其传热因素更加复杂,因此在实验中使用了同一组合多元醇,以保证各配方制备的硬质聚氨酯泡沫分子结构的一致性。

辐射传热机制与光子通过介质时被吸收和散射的程度有关。同样密度的泡沫,当泡孔结构越细腻时,消光系数就会越高。从图 2 可以清晰地看出,3[#] 配方制备的硬质聚氨酯泡沫的泡孔直径大多集中在 200 μm 附近,尺寸小且均匀,意味着可以在辐射传播方向上会有更多的不透明阻隔层,阻碍辐射传热,从而达到降低导热的目的。

硬质聚氨酯泡沫的长期热导率作为行业非常关注的一项指标,直接关系到冷冻设备在整个生命周期中的保温制冷能效,泡沫的闭孔率高低直接决定了泡孔内外气体成分的交换速率,这一过程被证明是泡沫导热老化最主要的控制因素^[17]。实验证明,CFA9001L 与 CP 复配制备的硬质聚氨酯泡沫的闭孔率较仅使用 CP 制备的硬质聚氨酯泡沫有一定程度的提高,因此,其热导率更低,老化速度更慢,相应冷冻设备的长期能效更具优势。

4 种硬质聚氨酯泡沫断面的 SEM 照片如图 3 所示。

从图 3 可以清晰地看出,加入 CFA9001L 前后硬质聚氨酯泡沫泡孔尺寸的差别,用 CFA9001L 与



a—1[#]; b—2[#]; c—3[#]; d—4[#]

图 3 4 种硬质聚氨酯泡沫断面的 SEM 照片

CP复配发泡剂制备的硬质聚氨酯泡沫的泡孔尺寸更小、开孔瑕疵更少。使用CFA9001L与CP复配发泡剂制备硬质聚氨酯泡沫时,虽然CFA9001L的发泡气体 CO_2 的气相热导率比CP的高,但是对泡孔结构的优化抵消了这一劣势,使得最终的硬质聚氨酯泡沫的热导率低于仅使用CP制备的硬质聚氨酯泡沫。

2.4 压缩强度

4种硬质聚氨酯泡沫在长度、宽度和高度方向上的压缩强度如图4所示。

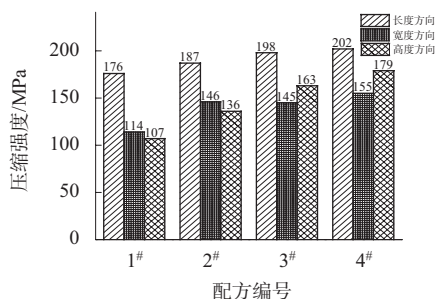


图4 4种硬质聚氨酯泡沫在长度、宽度和高度方向上的压缩强度

由图4可以看出,CFA9001L的加入使得硬质聚氨酯泡沫在长度、宽度和高度方向上的压缩强度较仅加入CP的硬质聚氨酯泡沫有明显提升,并且,从总体来看,CFA9001L的加入量越多,硬质聚氨酯泡沫的压缩强度在3个方向上的提升越明显。原因是CFA9001L在受热分解过程中产生的小分子醇胺类物质可以作为交联剂与PAPI继续反应,增加了分子骨架的交联程度,加入CFA9001L使得硬质聚氨酯泡沫具有更小且更均匀泡孔结构,因此硬质聚氨酯泡沫的压缩强度增大。

3 结论

(1) 化学发泡剂CFA9001L用于制备硬质聚氨酯泡沫,应用于冷柜保温夹层中,可以起到降低导热和能耗的作用。

(2) 当使用CFA9001L替代质量分数37.5%的CP时,制备的硬质聚氨酯泡沫可获得最低的热导率,为 $19.93 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$,较仅加入CP制备的硬质聚氨酯泡沫的热导率降低6.2%,且催化剂的用量可节约26.7%。

(3) CFA9001L自带醇胺类活性基团,发泡过程中能够提高体系反应活性,减少催化剂用量,在实际生产中可以降低配方成本,增加产品竞争优势。

(4) CFA9001L的加入使得硬质聚氨酯泡沫的压缩强度更高、尺寸稳定性更好,可以降低实际生产

中箱体的灌注密度,减少原料消耗,从而提升企业的经济效益。

参考文献

- [1] 邹宇田,李思成,郭晓林.中国聚氨酯泡沫行业氢氯氟烃淘汰管理计划进展及“十四五”期间行业履约新规划[J].聚氨酯工业,2021,36(3):1-3,14.
Zou Yutian, Li Sicheng, Guo Xiaolin. The progress of hydrochlorofluorocarbon (HCFC) phase-out plan in polyurethane foam industry in china and new action plan during the 14th five-year plan period[J]. Polyurethane Industry, 2021, 36(3):1-3, 14.
- [2] 冯卉,郭晓林,李丽,等.我国氢氯氟烃加速淘汰第二阶段面临的挑战及建议[J].聚氨酯工业,2016,31(6):1-4.
Feng Hui, Guo Xiaolin, Li Li, et al. Challenges and suggestions on HCFC phase-out of china at the second stage[J]. Polyurethane Industry, 2016, 31(6):1-4.
- [3] Venegas M H, Doerge H P. Improved low thermal conductivity fine cell HCFC-141b appliance foam[J]. Journal of Cellular Plastics, 1998, 34(1):65-74.
- [4] 尹良敏,李静.冰箱用聚氨酯发泡剂的发展趋势[J].广州化工,2015,43(21):43-45.
Yin Liangmin, Li Jing. The trend of blowing agent for polyurethane foam in refrigerator industry[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015, 43(21):43-45.
- [5] 毕玉遂,毕戈华.包含仲胺盐和丙醇胺盐的发泡剂及用于聚氨酯冰箱冰柜泡沫体材料的用途:CN109422903A[P]. 2019-03-05.
Bi Yusui, Bi Gehua. Foaming agent containing secondary amine salt and propanolamine salt and its use in polyurethane refrigerator freezer foam material:CN109422903A[P]. 2019-03-05.
- [6] Burkholder J B, Marshall P, Bera P P, et al. Climate metrics for C1-C4 hydrofluorocarbons (HFCs)[J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2020, 124:4 793-4 800.
- [7] 贾雪芹,赵路,李明,等.电热水器用环戊烷/HFC-245fa型聚氨酯硬泡组合聚醚的研究[J].聚氨酯工业,2016,31(4):25-28.
Jia Xueqin, Zhao Lu, Li Ming, et al. Study on cyclopentane/HFC-245fa blown rigid polyurethane foam premixed polyol for electric water-heater[J]. Polyurethane Industry, 2016, 31(4):25-28.
- [8] 周鹏,李同续,赵修文.聚氨酯硬泡用第四代含氟物理发泡剂[J].聚氨酯工业,2017,32(6):5-8.
Zhou Peng, Li Tongxu, Zhao Xiuwen. The fourth generation fluorinated blowing agent for rigid polyurethane foam[J]. Polyurethane Industry, 2017, 32(6):5-8.
- [9] 焦锋刚.新型环保发泡剂HCFO-1233zd[J].有机氟工业,2016(1):38-41.
Jiao Fenggang. A new environment-friendly foaming agent HCFO-1233zd[J]. Organic-Fluorine Industry, 2016(1):38-41.
- [10] 梁耀文,张军.365mfc/245fa/环戊烷三元混合体系发泡技术在冰箱的试验研究[J].日用电器,2015(2):46-51.

- Liang Yaowen, Zhang Jun. Research on the application of 365mfc/245fa/cyclopentane ternary blending system foaming technology in galanz refrigerator[J]. Electrical Appliances, 2015(2):46-51.
- [11] 毕戈华,李新超,魏伟,等. 新型聚氨酯化学发泡剂研究及应用进展[J]. 山东理工大学学报:自然科学版,2017,31(5):1-5.
- Bi Gehua, Li Xinchao, Wei Wei, et al. Research on the properties of novel chemical foaming agent CFA8 in rigid PU foam field[J]. Journal of Shandong University of Technology:Natural Science Edition, 2017, 31(5):1-5.
- [12] 毕玉遂,毕戈华. 碳酸有机胺盐类化合物及其作为发泡剂的用途:CN107089910A[P]. 2017-08-25.
- Bi Yusui, Bi Gehua. Carbonic acid organic amine salt compounds and their use as foaming agents:CN107089910A[P]. 2017-08-25.
- [13] 李新超,毕戈华,魏伟,等. 化学发泡剂 CFA8125 替代 HCFC-141b 在喷涂聚氨酯硬泡中的应用研究[J]. 聚氨酯工业, 2017, 32(5):60-62.
- Li Xinchao, Bi Gehua, Wei Wei, et al. Application research of chemical blowing agent CFA8125 replace HCFC-141b in spray rigid polyurethane foams[J]. Polyurethane Industry, 2017, 32(5): 60-62.
- [14] 余美丹,王洪庆,毕戈华,等. 羟丙基化乙二胺碳酸盐聚氨酯硬泡发泡剂的研究[J]. 聚氨酯工业, 2021, 36(3):31-33.
- Yu Meidan, Wang Hongqing, Bi Gehua, et al. Study on hydroxy-propylated ethylenediammonium carbonate as co-blowing agents in rigid polyurethane foam[J]. Polyurethane Industry, 2021, 36(3):31-33.
- [15] 赵巧光. 硬质聚氨酯泡沫塑料尺寸稳定性的影响因素及控制方法[J]. 科技创新与应用, 2015(23):152.
- Zhao Qiaoguang. Influencing factors and control methods of dimensional stability of rigid polyurethane foam[J]. Technology Innovation and Application, 2015(23):152.
- [16] Wei Gaosheng, Liu Yusong, Du Xiaozhe, et al. Gaseous conductivity study on silica aerogel and its composite insulation materials[J]. Journal of Heat Transfer, 2012, 134(4). DOI:10.1115/1.4004170.
- [17] Brandreth D A, Ingersoll H G. Accelerated aging of rigid polyurethane foam[J]. Journal of Cellular Plastics, 1980, 16(4):235-238.
- =====
- (上接第 125 页)
- [13] 陈宇宏,厉蕾. 轻型防弹玻璃的结构研究[J]. 材料工程, 2002(6): 7-9, 36.
- Chen Yuhong, Li Lei. Study on the structure of light weight bullet-proof glass[J]. Journal of Materials Engineering, 2002(6):7-9, 36.
- [14] 张晓颖,李胜杰,李志强. 爆炸载荷作用下夹层玻璃动态响应的数值模拟[J]. 兵工学报, 2018, 39(7):1 379-1 388.
- Zhang Xiaoying, Li Shengjie, Li Zhiqiang. Numerical simulation of dynamic response of laminated glass subjected to blast load[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(7):1 379-1 388.
- [15] 马棋棋,熊迅,郑宇轩,等. 无机玻璃动态压缩破坏的离散元模拟[J]. 高压物理学报, 2019, 33(4):61-71.
- Ma Qiqi, Xiong Xun, Zheng Yuxuan, et al. Discrete element simulation of dynamic compression failure of inorganic glass[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(4):61-71.
- [16] 冯晓伟,刘占芳,陈刚,等. 受冲击玻璃破坏波传播过程分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(9):183-186.
- Feng Xiaowei, Liu Zhanfang, Chen Gang, et al. Simulation of failure waves in glasses under shock compression[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(9):183-186.
- [17] 郑志嘉. 冲击加载下脆性材料中失效波的形成机理研究[D]. 北京:北京理工大学, 2015.
- Zheng Zhijia. Study on the mechanism of failure wave in brittle materials under dynamic impact loading[D]. Beijing:Beijing Institute of Technology, 2015.
- [18] 韩丹. 镁铝尖晶石透明陶瓷的制备与性能研究[D]. 上海:中国科学院上海硅酸盐研究所, 2018.
- Han Dan. Preparation and properties of transparent spinel ceramics[D]. Shanghai:Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, 2018.