

文章编号:0253-4339(2025)04-0013-09

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.04.013

# 可燃低碳制冷剂匹配阻燃剂的研究及应用现状

翟瑞<sup>1</sup> 黎芷均<sup>1</sup> 杨昭<sup>2</sup> 庄远<sup>1</sup> 叶斌<sup>1</sup> 唐景春<sup>1</sup> 赵红玲<sup>1</sup>

(1 合肥工业大学汽车与交通工程学院 合肥 230009; 2 天津大学机械工程学院 天津 300072)

**摘要** 当前由温室效应和“双碳”目标掀起的新一轮制冷剂替代浪潮,要求新型制冷剂需在环保性、安全性和热物性等方面达到综合平衡。然而目前尚不存在一种完美替代制冷剂,如备受关注的低ODP、GWP制冷剂R290、R32、R1234yf等大多均存在安全隐患。为这些环保可燃制冷剂寻找性能优良的匹配阻燃剂,已成为现阶段制冷剂替代研究的重要方向之一。总结了近年来可燃制冷剂匹配阻燃剂的研究进展,主要针对不同类型的阻燃剂,概述了其对于不同的可燃工质的阻燃效果评价,从阻燃性能、阻燃效果、阻燃机理和环保性能等角度进行详细阐述,并分析了其应用前景和发展趋势,给出可燃工质匹配阻燃剂的选择建议。

**关键词** 可燃制冷剂;阻燃剂;安全性;阻燃特性;研究现状

中图分类号:TB61<sup>+</sup>2

文献标识码:A

## Research and Application Status of Flame Retardants Compatible with Flammable Low-GWP Refrigerants

Zhai Rui<sup>1</sup> Li Zhijun<sup>1</sup> Yang Zhao<sup>2</sup> Zhuang Yuan<sup>1</sup> Ye Bin<sup>1</sup> Tang Jingchun<sup>1</sup> Zhao Hongling<sup>1</sup>

(1. School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009, China; 2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

**Abstract** The current greenhouse effect and the "dual-carbon" goal have set off a new wave of refrigerant substitution, requiring new refrigerants to achieve a comprehensive balance between environmental protection, safety and thermal properties. However, there are currently no ideal substitutes for these refrigerants. Most environmentally friendly refrigerants, such as R290, R32, and R1234yf, which have low ozone depletion potential (ODP) and Global Warming Potential (GWP), are flammable and pose safety risks. Identifying suitable flame retardants for environmentally friendly flammable refrigerants has emerged as a crucial focus of current research on refrigerant alternatives. This article provides a recent overview of research progress on the compatibility of flame retardants with flammable refrigerants. The main focus was categorizing the various flame retardants and assessing their efficacy across different flammable substances. It also discusses their performance, effects, mechanisms, and environmental impacts. Furthermore, the article analyzes their potential applications and development trends and recommends flame retardants compatible with flammable substances.

**Keywords** flammable refrigerants; flame retardants; safety; flame retarding properties; research status

2016年联合国通过《基加利修正案》,将高温室效应潜能值的HFCs纳入《蒙特利尔议定书》的管控范围,逐步消减包括R32、R125、R134a、R143a、R152a、R227ea、R245fa和R23等18种氢氟烃(HFCs)。2020年9月我国确定提出了在2030年达到碳达峰、2060年实现碳中和的目标。由此也掀起制冷行业新一轮的高温室效应工质的替代浪潮。新一代

制冷剂要求零ODP(臭氧损耗潜值, ozone depletion potential)和低GWP(全球变暖潜值, Global Warming Potential),同时在环保性、安全性、系统适用性、能效等方面达到一个综合优良平衡的效果。新一代候选制冷剂主要有:HCs<sup>[1]</sup>、低GWP的HFCs<sup>[2]</sup>、包括HCFOs和HFOs<sup>[3]</sup>等不饱和烯烃类工质、无机化合物及上述物质的混合物等。然而大多数HCs如R290、

基金项目:国家自然科学基金(52106005,52076065),中国博士后科学基金(2022M721059),中央高校基本科研业务费专项资金(JZ2023HGTB0254)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52106005 & No. 52076065), China Postdoctoral Science Foundation (No. 2022M721059) and Special Fund for Basic Scientific Research Business Expenses of Central Universities (No. JZ2023HGTB0254).)

收稿日期:2024-03-12;修回日期:2024-04-16;录用日期:2024-07-18

R600a 等极易燃, HFCs 如 R161、R32, HFOs 如 R1234yf、R1234ze (E) 等也皆为可燃或弱可燃制冷剂, 运用在制冷系统中存在一定安全隐患和风险。为解决这些环保工质的可燃性问题, 引入匹配阻燃剂形成合适的混合制冷剂已成为主要的解决方案<sup>[4]</sup>。

目前常用阻燃剂如表 1 所示, 主要有天然阻燃剂 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>, 不可燃卤素化合物 HFCs (R134a、R125、R227ea、R245fa 等)、HFOs (HFO-1336mzz (Z)、R1216 等) 和 HCFOs (R1233zd (E) 等), 以及一些潜在的阻燃物质。天然阻燃剂以物理阻燃作用为主, 环保性能优越, 但阻燃效果一般。HFCs 阻燃剂的阻燃效果优良, 但其 GWP 普遍偏高, 使其二元混合制冷剂的 GWP 升高, 故用量应严格控制。HFOs、HCFOs 阻燃剂为目前研究的热点, GWP 偏低, 且 R1336 mzz 系列、R1216 等阻燃效果优良, 作为环保制冷剂极具应用前景。潜在阻燃剂 R1234yf、R1234ze (E) 等虽为弱可燃物质, 但也有一定阻燃潜力。总之, 根据不同的应用场合, 不同的制冷剂匹配合适的阻燃剂, 达到热物特性、环保性和系统循环特性等综合性能最优, 是目前研究阻燃剂各类性质的最终目的。

表 1 常用和潜在阻燃剂的基础热物性参数

Tab.1 Basic thermophysical parameters of commonly used and potential flame retardants

物质	GWP <sub>100</sub>	安全等级	NBP/K	T <sub>c</sub> /K	p <sub>c</sub> /MPa
CO <sub>2</sub>	1	A1	194.8	304.1	7.4
N <sub>2</sub>	—	A1	77.4	126.2	3.4
R134a	1 300	A1	246.7	374.3	4.1
R125	3 170	A1	225.1	339.2	3.6
R227ea	3 350	A1	256.8	374.9	2.9
R245fa	858	B1	288.3	427.2	3.7
R1336mzz	9	A1	306.6	444.5	2.9
R1216	<1	A1	242.8	358.9	3.1
R1234yf	<1	A2L	243.7	367.9	3.4
R1234ze (E)	<1	A2L	254.2	382.5	3.6
R1233zd (E)	1	A1	282.9	439.6	3.6

注: 表中物质 ODP 均为 0; NBP 为标准沸点 (normal boiling point); T<sub>c</sub> 为临界温度; p<sub>c</sub> 为临界压力。

## 1 常见阻燃剂

### 1.1 天然阻燃剂 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>

常见的制冷剂天然阻燃物质主要有 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>, 如图 1 所示。CO<sub>2</sub> 为天然物质, ODP = 0、GWP = 1、环境性能优越、无毒不可燃, 且分子量小, 单位制冷量

大, 故 CO<sub>2</sub> 可作为阻燃成分用于制冷系统。N<sub>2</sub> 在常温常压下是无色无味的气体, 化学性质极其稳定, 很难与其他物质发生化学反应。CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 气体可通过隔离、稀释可燃气体, 使燃烧区的含氧量减少, 并吸收一部分燃烧热, 从而抑制燃烧。

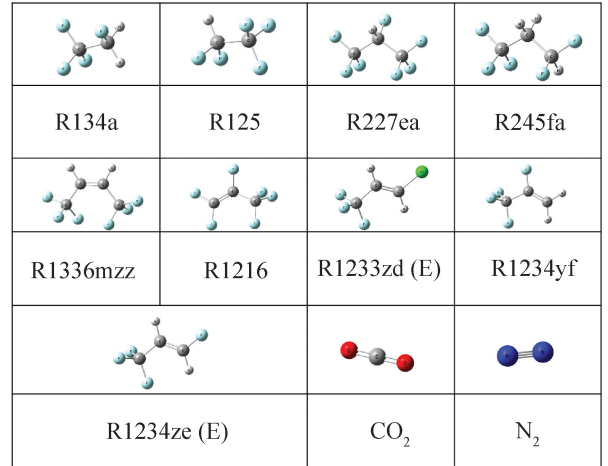


图 1 不同阻燃剂分子结构

Fig.1 Molecular structure of different flame retardants

目前 CO<sub>2</sub> 作为阻燃剂对可燃制冷剂 HFOs、HCs、HFCs 的可燃极限、燃烧速度等燃爆特性参数的研究表明, CO<sub>2</sub> 具有一定的阻燃潜力。在对 HFOs 的阻燃方面, Tian Yue 等<sup>[5]</sup> 在 20~50 °C 范围内测量了不同浓度 (本文浓度均指体积分数) 下 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 对 R1234yf 的可燃极限, 结果表明 CO<sub>2</sub> 可有效降低 R1234yf 的可燃范围, 且对可燃上限 (upper flammability limits, UFLs) 的影响大于可燃下限 (lower flammability limits, LFLs)。Zhao Zhen 等<sup>[6]</sup> 在 23 °C/50%RH 条件下, 对比了 CO<sub>2</sub>、R1336 mzz (E) 和 R1233zd (E) 这 3 种阻燃剂对 R1234yf 可燃极限的影响, 结果表明, CO<sub>2</sub> 的阻燃效果与 R1233zd (E) 相当, R1336 mzz (E) 的阻燃效果最佳。此外, 在复叠式制冷循环中, CO<sub>2</sub> 可与 HCs 组成二元混合制冷剂获得低温和超低温, 这是 CO<sub>2</sub> 另一个重要应用领域。纪佳欣等<sup>[7]</sup> 对比测试了 CO<sub>2</sub> 和 CF<sub>3</sub>I 对 R290 可燃极限的影响, 结果表明, CF<sub>3</sub>I、CO<sub>2</sub> 的添加可有效降低 R290 发生爆炸的临界压力峰值和爆炸指数, 且当 R290/CO<sub>2</sub> 组成的混合工质中 R290 占比小于 0.12 时, 该混合工质的安全等级可被定义为 A1 类。Luo Zhenmin 等<sup>[8]</sup> 测量了 CF<sub>3</sub>I、CO<sub>2</sub> 对 R50 最大爆炸压力、爆炸压力上升速率和火焰传播速度的影响, 得到 CF<sub>3</sub>I 的阻燃效果优于 CO<sub>2</sub>, 4%CF<sub>3</sub>I 对最大爆炸压力的抑制作用约为等量 CO<sub>2</sub> 的 4.6 倍, 对爆炸压力上升率和火焰传播速度的抑制作用约为 CO<sub>2</sub> 的 2.7 倍。为了进一步降低 HCs

工质的可燃性,可引入多种阻燃剂强化抑制效果。如多元混合制冷剂  $\text{CO}_2/\text{R1270}/\text{R131I}$ 、 $\text{CO}_2/\text{R1270}/\text{R134a}$ 、 $\text{CO}_2/\text{R290}/\text{R131I}$  等<sup>[9]</sup>,均以自然工质为主体或全部为自然工质,具有零 ODP 和低 GWP,循环性能优异。在对可燃 HFCs 阻燃方面,M. S. Sadaghiani 等<sup>[10]</sup>测量了 R134a、R125 和  $\text{CO}_2$  对可燃工质 R32 和 R1234yf 及二者混合物的最小点火能量和层流燃烧速度影响,结果发现  $\text{CO}_2$  在降低可燃性的同时提高了最小点火能。

$\text{N}_2$  气体大都作为物理阻燃的对照组,类比其它阻燃剂的抑制效果。Feng Biao 等<sup>[11]</sup>对比了  $\text{CF}_3\text{I}$  和  $\text{N}_2$  对 R1234yf 的可燃性极限作用,结果表明,虽然  $\text{N}_2$  的抑燃效果稍逊于传统卤素阻燃剂(R131I、R134a 和 R227ea),但其物理阻燃作用不容忽视。此外,对比  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2$  对同一可燃气体可燃极限的影响发现, $\text{CO}_2$  的物理阻燃效果更佳。这是由于除去物理阻燃效应, $\text{CO}_2$  可阻断可燃自由基的反应,故其阻燃效果优于  $\text{N}_2$ 。S. Kondo 等<sup>[12]</sup>测定了不同浓度下 R600a 与  $\text{N}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CHCl}_4$  和 R125 等混合后的可燃极限。利用扩展的勒夏特列公式,分析了含  $\text{N}_2$  和  $\text{CO}_2$  混合物的可燃极限变化规律,为  $\text{N}_2$ /可燃制冷剂二元混合物可燃极限预测提供了定量计算方法。

## 1.2 卤素阻燃剂

### 1.2.1 不可燃氢氟烃

HFCs 制冷剂通常被用于冰箱、汽车空调、小型空调、住房空调等设备,是 CFCs 和 HCFCs 的非消耗臭氧替代品。然而其温室效应较高,因此限制其广泛生产及使用成为必然。根据《蒙特利尔议定书-基加利修正案》要求,包括中国在内的发展中国家,在 2024 年要冻结 HFCs 生产和消费,并从 2029 年起产量开始削减。但部分 HFCs 制冷剂具有优异的阻燃效果,如 R134a、R125、R227ea 和 R245fa 等。它们作为少量阻燃添加剂与其它制冷剂形成多元化合物是 HFCs 物质今后应用的重点方向之一。

R134a 无毒,安全类别为 A1,ODP 为 0,GWP 为 1 300,单位容积制冷量较大,常用于汽车空调、工业制冷系统等。但由于其 GWP 相对较高将被逐步削减,故目前 R134a 更偏向于作为阻燃成分,与环保型制冷剂形成混合替代物。天然烃类制冷剂易燃,与 R134a 混合,既能降低烃类可燃性,也能降低 R134a 的 GWP。Cai Dehua 等<sup>[13]</sup>测定了烷烃类制冷剂 R290 和 R600a 与 R134a 在不同混合组分下的可燃极限,结果发现 R134a 对 R290 的可燃范围抑制作用优于 R600a。Zhang Zhihao 等<sup>[14]</sup>测试了 R134a 对 R170、R1270 及这 2 种烃类混合物可燃性极限的影响,得到

当 R134a 的体积比大于 0.75 时,R134a 对 R1270 和 R170 的抑制作用显著增强。但 R134a 的比例增加也会使混合物的 GWP 增大,因此实际应用中应综合考虑环保性和可燃性。R134a 除了与天然烃类混合用于低温系统,也可与 HFCs、HFOs 类混合,用于热泵系统。陈琪等<sup>[15]</sup>测试了不同体积比时二元混合工质 R1234yf/R134a 的可燃极限,结果表明,随着 R134a 的比例增大,R1234yf/R134a 的 LFL 有较大提高,说明在 R1234yf 中加入适量 R134a,可使制冷剂安全性提高。谢品赞等<sup>[16]</sup>对比了 R22、R134a 和 R125 对 R161 的可燃极限、燃烧速度的抑制作用,结果表明,R22、R134a 和 R125 均能缩小 R161 的可燃范围,降低 R161 的燃烧速度,但阻燃效果为  $\text{R125} > \text{R22} > \text{R134a}$ 。

R125 无色无毒不燃,安全类别为 A1,ODP 为 0,GWP 为 3 170,常温下化学性质稳定,高温下可发生分解。R125 是混合制冷剂 R404A、R407C、R410A、R417A、R507 的重要组成部分,其与 R32 混合成的 R410A 目前已被广泛应用于家用空调。此外,由阻燃成分 R125 与可燃工质 R32、R161 组成的三元混合工质<sup>[17]</sup>,相较于 R407C,具有更低的压比和功耗,更高的制冷量、性能系数和安全性。Zhong Li 等<sup>[18]</sup>测试了 R125 对 R290 的层流燃烧速度、可燃下限和燃烧热的抑制作用,结果表明,在潮湿环境下,R125 对 R290 的 LFL 抑制效果减弱。除了与常见的 HFCs、HCs 混合,二甲醚与 R125 的热力学性质较为接近,也是一种潜在的环保型替代制冷剂,故也可与 R125 组成混合工质。张可等<sup>[19]</sup>测试了二甲醚/R125 混合气体的可燃极限,结果表明,加入 R125 后二甲醚的可燃性范围减小,但 R125 含量较低时对二甲醚的阻燃作用不显著。关于 R125 与可燃制冷剂混合后燃烧极限的计算方面,S. Kondo 等<sup>[20]</sup>分析了甲烷、丙烷、丙烯、甲酸甲酯和 R152a 与 R125 混合的可燃极限。结果表明,R125 对纯工质可燃极限的影响可用扩展的勒夏特列公式计算。这 5 种 R125 和可燃制冷剂的混合气体的可燃性极限计算方法与惰性气体  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$  和可燃制冷剂混合气体的可燃性极限计算方法是不同的,在公式中的参数值需改变。

R227ea 无毒不燃,安全类别为 A1,ODP 为 0,GWP 为 3 350,具有良好的热稳定性和化学稳定性。R227ea 常被用作灭火剂,同时也是一种良好的制冷剂阻燃剂。研究表明混合工质 R227ea/R161<sup>[21]</sup>具有替代 R407C、R22 的潜在可行性。韩晓红等<sup>[22]</sup>测试了不同体积分数下 R227ea/R161 的燃烧极限,结果表明 R227ea 与 R161 的体积分数之比大于 1 时阻燃

效果最佳。R227ea 也常作为评估阻燃性能的对照组, Zhang Yong 等<sup>[23]</sup>对比了 R125 和 R227ea 在 20 °C 干燥空气中对 NH<sub>3</sub> 可燃极限的抑制作用。实验发现 R125 在燃烧下限点附近的抑制作用更强, 而 R227ea 在燃烧上限点附近的抑制作用更强。从阻燃效果和环保性能综合评价, R227ea 对 NH<sub>3</sub> 可燃性的抑制作用强于 R125。Yang Zhao 等<sup>[24]</sup>分别测试了 R227ea、R125、R131I 对 R32 可燃极限的影响, 结果表明阻燃效果为 R131I > R227ea > R125。Wu Xi 等<sup>[25]</sup>测试了 CO<sub>2</sub>、R227ea、R125 和 R134a 对 R1243zf 的可燃性抑制, 结果表明在这 4 种常见阻燃剂中, R227ea 对 R1243zf 阻燃效果最好。Yang Zhao 等<sup>[26]</sup>测试了 R134a、R227ea 与 R290、R600a、R32、R152a 等可燃制冷剂混合的可燃范围, 提出了含有不可燃成分如 R227ea 等混合物的可燃极限计算模型, 用于估算混合制冷剂的可燃极限。由图 1 可知, R227ea 氟氢比大, 且含有 2 个阻燃基团—CF<sub>3</sub>, 热分解过程可产生大量含氟阻燃自由基参与反应, 使其阻燃效果优于 R134a 和 R125。

R245fa 性质稳定且不可燃, 安全类别为 B1, ODP 为 0, GWP 为 858, 标准沸点为 15.3 °C, 具有挥发性, 多应用于发泡剂、阻燃剂、有机朗肯循环 (organic Rankine cycle, ORC) 余热发电、高温热泵以及换热工质等领域<sup>[27]</sup>。王辉等<sup>[28]</sup>提出了一种新型混合工质 R1270/DME/R245fa 作为汽车空调 R134a 替代制冷剂, 其中 10% 的 R245fa 作为阻燃添加剂。Xu Wenlin 等<sup>[29]</sup>提出了天然烷烃 R600a/R245fa 混合制冷剂, 应用于低温有机朗肯循环, 提高 ORC 效率。除了与天然烷烃、烯烃混合, R245fa 也可与 HFCs、HFOs 等混合, R245fa/R141b 混合制冷剂不仅广泛应用于朗肯循环, 还有望作为冷却循环工质, 解决线性菲涅耳聚光光伏的散热问题<sup>[30]</sup>。在 R245fa 阻燃效果方面, Wu Xi 等<sup>[31]</sup>对比了 R245fa、R134a、R227ea 对 R142b 的可燃极限的影响, 结果表明阻燃效果为 R227ea > R134a > R245fa。Yang Zhao 等<sup>[32]</sup>测试了 R245fa 对 R290、R600a、R152a 的可燃极限影响, 发现 R245fa 对 HFCs 类工质 R152a 的阻燃效果相对较好, 对 HCs 类工质 R290 的阻燃效果较差, 但阻燃效果均逊于 R134a、R125、R227ea。由图 1 可知, 一个 R245fa 分子只含有一个—CF<sub>3</sub>、两个—F, 阻燃基团偏少, 且—H 偏多, —H 加剧混合制冷剂分子热解, 故 R245fa 阻燃效果不佳。虽然 R245fa 阻燃效果不如 R134a、R125 和 R227ea, 但 R245fa 的 GWP 为四者之中最低。而温室效应也是阻燃剂选择的重要参考标准之一, 因此 R245fa 在环保性上具有一定的优势。

### 1.2.2 不可燃不饱和烯烃

HFOs、HCFOs 类工质的 ODP 为 0, 且具有独特的双键结构, 释放到大气环境中后快速分解, 大气寿命期仅为几周, 因此 GWP 也极低, 是 HCFCs、HFCs 制冷剂的理想替代品, 目前具有良好的发展契机。HFOs 类 R1336 mzz(Z)、R1216 和 HCFOs 类 R1233zd 等可燃性等级为 A1, 且分子结构含有—CF<sub>3</sub>、—F 等阻燃基团, 成为目前备受关注的环保阻燃剂。

HFO-1336 mzz 系列无毒不可燃, 安全类别为 A1, ODP 为 0, GWP 为 9, 具有较高的临界温度, 且蒸气压力相对较低, 具有较好的应用前景<sup>[33]</sup>。R1336 mzz 系列可替代 R245fa 和 R123, 应用于 ORC 系统和高温热泵装置中。由图 1 可知, R1336 mzz(Z) 分子中含有 2 个—CF<sub>3</sub> 阻燃基团, 故其也是一种极具潜力的阻燃物质。霍二光等<sup>[34]</sup>从微观角度分析了 R1336 mzz(Z) 的氧化分解机理, 发现在有氧气存在的情况下, R1336 mzz(Z) 更容易发生热分解, 并产生—CF<sub>3</sub> 和—F 等阻燃基团。Wang Xingyu 等<sup>[35]</sup>采用杯形燃烧器分析了 HFO-1336 mzz(Z) 对 R290 的灭火效果, 发现 R1336 mzz(Z) 的灭火效果优于大多数 HFCs 灭火剂。同时从微观机理角度分析得到, R1336 mzz(Z) 分解产物以氟烯烃为主, 与氟烷烃相比, 更容易与—H、—OH、—O 等活性自由基发生加成反应, 从而减缓链式反应, 抑制火焰传播; 另一方面, R1336 mzz(Z) 热分解产生的大量阻燃基团, 进一步消耗可燃活性自由基。Zhao Zhen 等<sup>[6]</sup>测试了 CO<sub>2</sub>、R1336 mzz(E) 和 R1233zd(E) 作为阻燃剂对 R1234yf 可燃极限的影响, 结果表明抑燃效果为 R1336 mzz(E) > CO<sub>2</sub> > R1233zd(E)。现有研究表明 R1336 mzz 系列制冷剂的阻燃性能极佳, 未来作为新型环保阻燃剂大有可为。

R1216 具有一定毒性, 安全类别 A1<sup>[36]</sup>, ODP 为 0, GWP 为 0.86, 在 23 °C 的干空气和相对湿度为 50% 的湿空气中均不可燃, 是一种环保、颇具潜力的阻燃剂。Lü Zijian 等<sup>[37]</sup>对比了 R1216、R131I、R134a、R1233zd(E) 对 R32 的可燃性抑制情况, 发现阻燃效果为 R1216 > R131I > R134a > R1233zd(E), R1216 阻燃效果最佳, 少量的 R1216 即可使可燃浓度范围 (指可燃物质与空气在一定浓度范围内均匀混合, 形成预混气, 遇着火源会发生爆炸的特定浓度区间) 大幅降低。Fei Teng 等<sup>[38]</sup>测试了 R1216、R131I 对 R152a 燃烧速度的影响, 发现当 R131I 浓度为 15.403% 和 R1216 浓度为 11.508% 时, R152a 的最大燃烧速度由 21.163 cm/s 分别降至 7.805 cm/s 和 7.675 cm/s。且 R1216 添加量较少, 燃烧速度也能大

幅降低。这是由于 R1216 属于全卤代烃,氟氢比是 HFOs 类工质中最高的,含有一CF、—CF<sub>2</sub> 和—CF<sub>3</sub> 阻燃基团,故阻燃效果最佳。

R1233zd(E) 无毒不可燃,安全类别为 A1,ODP 为 0,GWP 为 1,具有较高的标准沸点和临界温度,环保性能突出。热物性与 R245fa 接近,在 ORC 系统中是 R245fa 的理想替代品<sup>[39]</sup>,同时也可用于双变频离心冷水机组、低温热回收系统、高温热泵系统和热泵热水器。R1233zd(E) 分子中含有由 Cl、F 元素构成的阻燃基团,也可作为阻燃剂使用。研究表明在高浓度下 R1233zd(E) 的阻燃效果和 CO<sub>2</sub> 相差较小<sup>[6]</sup>,但少量的 R1233zd(E) 能同时提升 LFL,降低 UFL,缩小可燃浓度范围。故 R1233zd(E) 作为微量阻燃添加剂时对可燃工质的燃烧抑制效果更好。辛立勇等<sup>[40]</sup>从微观角度分析了 R1233zd(E) 的热稳定性及热解机理,进而寻找其阻燃机理。结果发现在 R1233zd(E) 的自身热解反应中,—CF<sub>3</sub> 和—Cl 为产生频率最高的基团,此为主要的阻燃基团,但由于 R1233zd(E) 含有 2 个 H 原子,同时也会提供一定的一H 活性自由基,削弱了阻燃效果,这也是 R1233zd(E) 和 CO<sub>2</sub> 阻燃效果相差较小的原因之一。

上述大多数研究表明,混合物制冷剂的氟氢比是影响阻燃效率的重要因素,但并非唯一因素。如图 2 所示,对同一种制冷剂、不同阻燃剂,随着混合物制冷剂的氟氢比增大,临界抑制比减小。但对同一阻燃剂、不同制冷剂,如图 2 中 R134a/R32 和 R134a/R1243zf,虽然前者氟氢比偏大,但其临界抑制比较大。可见临界抑制比还与混合物分子式的 C—H 键含量、分子键断裂难易程度有关。R1243zf 分子含有 3 个 C—H 键,而 R32 仅含有 2 个 C—H 键,故而 R1243zf 需要更多的阻燃基团,阻止链式反应。同时温度也是影响因素之一,不同温度下,混合物的临界抑制比也存在较大差异。

## 2 潜在阻燃剂

### 2.1 R1234yf

R1234yf 的 GWP 小于 1,安全等级为 A2L,热物性特性与 R134a 相似,因此被作为当前汽车空调的主要替代方案。但 R1234yf 的热力学性质和输运性质并不理想,导致纯 R1234yf 很难广泛应用于制冷与空调系统中。R1234yf 的可燃浓度范围(体积分数)是 6.8%~12%<sup>[41]</sup>,燃爆风险较低,且热解可产生阻燃基团—CF<sub>3</sub>,故 R1234yf 可作为潜在阻燃剂。研究表明 R1234yf 在与 R32 和 R152a 混合时,均表现出一定的阻燃潜质。石玉琦等<sup>[42]</sup>通过测试不同比例

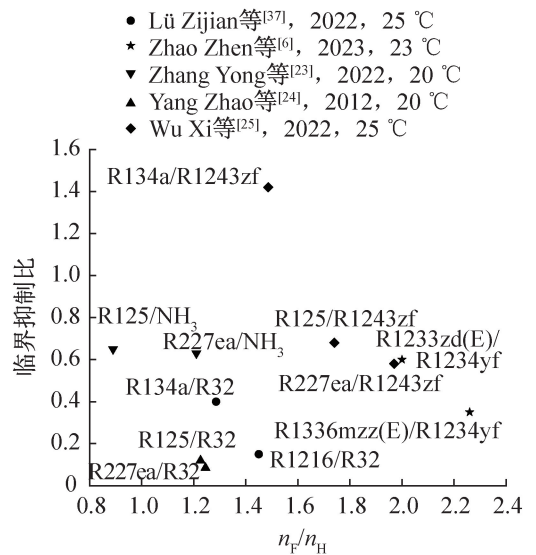


图 2 不同混合制冷剂临界抑制比和氟氢比关系  
Fig.2 Relationship between critical inhibition and  $n_F/n_H$  ratios for different refrigerant blends

R1234yf 和 R32 混合后的可燃极限,发现在 R32 中添加摩尔分数为 10% 的 R1234yf 时,混合物燃烧平衡温度可下降 87.5 °C。此外他们还对比了 R1234yf、CO<sub>2</sub> 对 R32 的燃烧速度影响,结果表明 R1234yf 对 R32 燃烧速度的抑制作用比等量的惰性气体 CO<sub>2</sub> 更明显<sup>[43]</sup>。Lü Zijian 等<sup>[44]</sup>测试了 R1234yf 对 R32、R152a 的可燃性极限和燃烧速度的影响,结果表明,随着 R1234yf 的比例增大,2 种混合物的可燃浓度范围和最大层流燃烧速度均减小。上述 R1234yf 对可燃工质可燃极限和燃烧速度影响的研究均表明 R1234yf 在特定场合下可作为阻燃剂使用。综合考虑其优异的环保特性和良好的系统循环特性,可考虑弱可燃制冷剂 R1234yf 在阻燃剂领域的进一步探索与推广。

### 2.2 R1234ze(E)

R1234ze(E) 的 GWP 小于 1,安全等级为 A2L。其物理性能也接近 R134a,但 R1234ze(E) 的汽化潜热和容积制冷量不理想,限制了其作为纯制冷剂的推广与应用。虽然 R1234ze(E) 的可燃性等级为弱可燃,但常温下不可燃。研究表明仅当实验温度超过 60 °C 时 R1234ze(E) 才具有可燃性<sup>[45]</sup>,且 R1234ze(E) 具有含氟基团,故 R1234ze(E) 作为阻燃添加剂与可燃制冷剂混合形成性能更佳的不可燃制冷剂,是其发展应用的重要方向之一。研究表明 R1234ze(E) 的二元混合物 R1234ze(E)/R32、R1234ze(E)/R152a、R1234ze(E)/R290、R1234ze(E)/R161 可用作替代制冷剂,用于空调系统。在提高汽化潜热和比热容的同时,使得混合制冷剂的可燃性减弱,安全性得到显著提升<sup>[46]</sup>。同时有研究提出将 R1234ze(E)

和 R152a 以 40%/60% 混合<sup>[47]</sup>、R1234ze (E)、R134a 和 R32 以 17%/33%/50% 混合<sup>[48]</sup> 组成新的低 GWP 制冷剂,也可用于空调、水源热泵系统。在 R1234ze (E) 阻燃效果方面, Yang Zhao 等<sup>[45]</sup> 测试了 R1234ze (E) 对 R152a、R161 可燃极限的影响,结果表明 R1234ze (E) 对 R161 和 R152a 的火焰传播均有抑制作用,但在实验浓度范围内 (R1234ze (E) (0~90%)/R161 (100%~10%)、R1234ze (E) (0~89%)/R152a (100%~11%)) 不能使其完全不燃烧。综上, R1234ze (E) 的阻燃效果虽然不如传统阻燃剂,但其环保性能优异、价格偏低,也是极具发展潜力的阻燃剂之一。

### 2.3 其他潜在阻燃剂

多种阻燃剂按一定比例混合使用,提升二元混合阻燃剂性能,也是阻燃的新思路之一。吴曦等<sup>[49]</sup> 通过测试 3 种二元阻燃剂 (R134a、R227ea、R125 两两组合) 对可燃工质 R1243zf 的临界抑燃浓度和可燃浓度极限作用规律,发现二元混合阻燃剂 R227ea/R125 的阻燃效果最优。由于 R227ea 和 R134a 阻燃机理相似,故二者混合后阻燃效果提升较小。结果表明,二元混合物的氟氢比增量越大,阻燃效果提升越明显。使用二元混合阻燃剂,不仅能提高阻燃效果不佳的阻燃剂性能,还能降低一些阻燃效果优良但 GWP 偏高阻燃剂的温室效应参数,通过调整混合物比例,能兼顾提高混合物的环保性能和阻燃效果。

此外,除了阻燃剂与可燃制冷剂混合的直接阻燃方式,也可考虑一些间接的阻燃方法。例如在蒸气压缩式制冷系统中,向润滑油中添加阻燃物质,当系统内部泄漏时,高压作用下可燃制冷剂与部分润滑油同时泄漏并混合,来降低可燃工质的燃爆风险。有学者也开始对这类间接阻燃方法展开研究。Zhang Yong 等<sup>[50]</sup> 测试了在矿物油中添加氯化石蜡 (CP-52) 作为阻燃剂对 R290 的可燃性影响,结果表明矿物油与 CP-52 配合使用的润滑油能抑制 R290 的燃烧火焰。CP-52 捕获—H 自由基的能力与常规阻燃剂相似,同时其反应产物 HCl 能进一步促进活性自由基—H 和—OH 的消耗,故 CP-52 也是一种极具潜力的间接阻燃剂。Lü Zijian 等<sup>[51]</sup> 测试了含阻燃添加剂 2-BTP 的润滑油对 R152a 和 R1234yf 燃烧的阻燃性能,发现当 POE 油中的 2-BTP 质量分数为 20% 时, R152a 的 LFLs 由 4.8% 增至 5.0%, R1234yf 的 LFLs 由 7.2% 增至 10.3%, UFLs 由 13.0% 降至 10.3%。显然在润滑油中添加 2-BTP 后, R152a、R1234yf 的可燃性均减弱,特别是对 R1234yf 的燃烧抑制效果更明显。此类间接阻燃剂,虽然阻燃效果稍逊于传统阻燃剂,但不

会影响制冷剂工质的 GWP、热力学性能、制冷性能等,使用起来更为便捷。采用间接阻燃剂,与可燃制冷剂 and 匹配润滑油配合使用,既不影响制冷剂热物性,也不影响循环系统性能,是一种便捷高效的阻燃方法。

### 3 总结

本文针对不同类别的阻燃剂:传统阻燃剂 (HFCs 类、天然阻燃剂 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>)、HCFOs 阻燃剂以及其他对可燃性有影响的因素 (R1234 系列、混合阻燃剂、润滑油中添加阻燃物质等),从阻燃性能、阻燃效果、阻燃机理和环保性能等角度分析了其研究现状。目前传统阻燃剂 HFCs 类 R134a、R125、R227ea、R245fa 仍是主力,但其 GWP 偏高,故添加量受限,未来仅适合微量使用。无机阻燃化合物 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 等阻燃效果一般,但经济环保,可作为备选阻燃剂。HCFOs 类 R1336 系列、R1216 等环保制冷剂阻燃效果明显,是目前阻燃剂的主要研究方向。HFOs 类 R1234 系列制冷剂虽然具有弱可燃性,但环保性能突出,同时具有一定阻燃效果,是未来阻燃剂的重要研究方向之一。此外,二元混合阻燃剂和间接阻燃剂也具有发展潜力,可作为未来阻燃剂的研究方向之一。总体而言,随着当前可燃低碳制冷剂的推广,其匹配阻燃剂的方案仍未有定论,需综合考量环保性、兼容性、经济性和阻燃效率等因素。

#### 参考文献

- [1] CALM J M. The next generation of refrigerants—historical review, considerations, and outlook [J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(7): 1123–1133.
- [2] EL-SAYED A R, EL MORSI M, MAHMOUD N A. A review of the potential replacements of HCFC/HFCs using environment-friendly refrigerants [J]. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 2018, 26(3): 1830002.
- [3] NAIR V. HFO refrigerants: a review of present status and future prospects [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 122: 156–170.
- [4] YANG Zhao, FENG Biao, MA Haiyun, et al. Analysis of lower GWP and flammable alternative refrigerants [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 126: 12–22.
- [5] TIAN Yue, BAI Mingqi, LI Yuxiao, et al. Effects of N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> on the flammability of 2,3,3,3-tetrafluoropropene at elevated temperatures [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023, 83: 105024.
- [6] ZHAO Zhen, LUO Jieli, YANG Kaiyin, et al. Experimental study on the influence of flame retardants on

- the flammability of R1234yf [ J ]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2023, 81: 104945.
- [ 7 ] 纪佳欣,汪皖宁,梁栋. 制冷剂 R290 及其混合物燃爆特性与安全性研究 [ J ]. *消防科学与技术*, 2021, 40 ( 12 ): 1804-1808. ( JI Jiaxin, WANG Wanning, LIANG Dong. Study on the explosion characteristics and safety of refrigerant R290 and its mixture [ J ]. *Fire Science and Technology*, 2021, 40(12): 1804-1808. )
- [ 8 ] LUO Zhenmin, NAN Fan, CHENG Fangming, et al. Experimental study on CO<sub>2</sub>/CF<sub>3</sub>I suppression of methane-air explosion and flame propagation [ J ]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2023, 83: 105002.
- [ 9 ] 王怀信,李海龙,马利敏. 碳氢化合物/阻燃剂混合工质替代 HCFC22 的研究 [ J ]. *工程热物理学报*, 2003, 24(1): 13-15. ( WANG Huaixin, LI Hailong, MA Limin. Substitute HCFC22 with mixtures of hydrocarbons and fire suppressants [ J ]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2003, 24(1): 13-15. )
- [ 10 ] SADAGHIANI M S, ARAMI-NIYA A, ZHANG Dongke, et al. Minimum ignition energies and laminar burning velocities of ammonia, HFO-1234yf, HFC-32 and their mixtures with carbon dioxide, HFC-125 and HFC-134a [ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 407: 124781.
- [ 11 ] FENG Biao, YANG Zhao, LIU Hua. Research on inhibition of flame retardants on flammability of R1234yf [ J ]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 118: 302-310.
- [ 12 ] KONDO S, TAKIZAWA K, TAKAHASHI A, et al. Flammability limits of isobutane and its mixtures with various gases [ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 148(3): 640-647.
- [ 13 ] CAI Dehua, HAO Zian, XU Hao, et al. Research on flammability of R290/R134a, R600a/R134a and R600a/R290 refrigerant mixtures [ J ]. *International Journal of Refrigeration*, 2022, 137: 53-61.
- [ 14 ] ZHANG Zhihao, HE Guogeng, NING Qian, et al. Evaluation of flammability characteristics of mixed refrigerants R134a/R1270, R134a/R170, and R170/R1270 [ J ]. *International Journal of Refrigeration*, 2023, 156: 1-11.
- [ 15 ] 陈琪,闫继位,陈光明,等. 新型制冷剂 R1234yf/R134a 可燃性实验研究 [ J ]. *太阳能学报*, 2016, 37 ( 1 ): 152-156. ( CHEN Qi, YAN Jiwei, CHEN Guangming, et al. Experimental study on the flammability of a new type of refrigerant R1234yf/R134a [ J ]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2016, 37(1): 152-156. )
- [ 16 ] 谢品赞,郭智恺. 制冷剂 R161 燃烧抑制试验研究 [ J ]. *制冷与空调 ( 北京 )*, 2013, 13 ( 3 ): 51-56. ( XIE Pinzan, GUO Zhikai. Experimental research on combustion inhibition of R161 [ J ]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2013, 13(3): 51-56. )
- [ 17 ] HAN X H, WANG Q, ZHU Z W, et al. Cycle performance study on R32/R125/R161 as an alternative refrigerant to R407C [ J ]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(14/15): 2559-2565.
- [ 18 ] ZHONG Li, ZHANG Wang, LI Xing, et al. Effects of trifluoroiodomethane and pentafluoroethane on combustion characteristics of flammable refrigerant propane [ J ]. *International Journal of Refrigeration*, 2023, 148: 25-34.
- [ 19 ] 张可,吴江涛,高辉,等. 爆炸极限实验系统研制及二甲醚/HFC125 的可燃性研究 [ J ]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(7): 28-32. ( ZHANG Ke, WU Jiangtao, GAO Hui, et al. Flammability limits measurement system and flammability of dimethyl ether/HFC125 [ J ]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(7): 28-32. )
- [ 20 ] KONDO S, TAKIZAWA K, TAKAHASHI A, et al. Flammability limits of five selected compounds each mixed with HFC-125 [ J ]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(2): 192-197.
- [ 21 ] 朱志伟,韩晓红,孙洁,等. 新型混合制冷剂 R161+R227ea 的理论与实验研究 [ J ]. *浙江大学学报 ( 工学版 )*, 2008 ( 10 ): 1789-1794. ( ZHU Zhiwei, HAN Xiaohong, SUN Jie, et al. Theoretical and experimental research on novel mixed refrigerant R161+R227ea [ J ]. *Journal of Zhejiang University ( Engineering Science )*, 2008 ( 10 ): 1789-1794. )
- [ 22 ] 韩晓红,余楠,方凯,等. 新型制冷剂 R227ea/R161 爆炸性实验研究 [ J ]. *工程热物理学报*, 2009, 30(7): 1089-1092. ( HAN Xiaohong, YU Nan, FANG Kai, et al. Experimental study of the explosion limits of the new refrigerant R227ea/R161 [ J ]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, 30(7): 1089-1092. )
- [ 23 ] ZHANG Yong, YANG Zhao, LYU Zijian, et al. Research on the effect of flame retardants on the mildly flammable refrigerant ammonia [ J ]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2022, 77: 104787.
- [ 24 ] YANG Zhao, LIU Huanwei, WU Xi. Theoretical and experimental study of the inhibition and inert effect of HFC125, HFC227ea and HFC131I on the flammability of HFC32 [ J ]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2012, 90(4): 311-316.
- [ 25 ] WU Xi, ZHANG Xinjie, TANG Fengyi, et al. Flammability inhibition effects of R227ea, R125, R134a, and R744 on 3,3,3-trifluoropropene ( R1243zf ) [ J ]. *International Journal of Refrigeration*, 2022, 134: 55-63.
- [ 26 ] YANG Zhao, LIU Bin, ZHAO Haibo. Experimental study of the inert effect of R134a and R227ea on explosion limits of the flammable refrigerants [ J ]. *Experimental Thermal*

- and Fluid Science, 2004, 28(6): 557-563.
- [27] 刘圣春, 霍宇杰, 代宝民. 新型环保工质 R245fa 研究现状及展望[J]. 制冷技术, 2017, 37(4): 47-55. (LIU Shengchun, HUO Yujie, DAI Baomin. Research status and prospect of new environmental-friendly refrigerant of R245fa[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2017, 37(4): 47-55.)
- [28] 王辉, 黄虎, 张忠斌, 等. 一种新型天然混合工质在汽车空调系统中替代 R134a 的试验研究[J]. 流体机械, 2011, 39(5): 66-69. (WANG Hui, HUANG Hu, ZHANG Zhongbin, et al. An experimental study of replacing R134a in the automotive air-condition by use of the new natural mixed refrigerant[J]. Fluid Machinery, 2011, 39(5): 66-69.)
- [29] XU Wenlin, QI Yingxia, YANG Yushui, et al. PVTx properties of the R600a/R245fa for low temperature organic Rankine cycle [J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2023, 176: 106904.
- [30] WANG Yacheng, XIA Guodong, LI Ran, et al. Experimental investigation on photovoltaic cooling cycle with R141b/R245fa mixture under the electric field[J]. Energy, 2023, 269: 126716.
- [31] WU Xi, YANG Zhao, TIAN Tian, et al. Experimental research on the flammability characteristics of several binary blends consisting of 1-Chloro-1, 1-difluoroethane and extinguishing agents [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2014, 92(6): 680-686.
- [32] YANG Zhao, WU Xi, PENG Jijun. Theoretical and experimental investigation on the flame-retarding characteristic of R245fa [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 44: 613-619.
- [33] 杨梦, 张华, 孟照峰, 等. 新型环保高温工质 HFO-1336mzz(Z) 的研究进展[J]. 制冷学报, 2019, 40(6): 46-52. (YANG Meng, ZHANG Hua, MENG Zhaofeng, et al. Research progress of the new environmentally friendly high temperature refrigerant HFO-1336mzz(Z) [J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(6): 46-52.)
- [34] 霍二光, 刘朝, 徐肖肖, 等. HFO-1336mzz(Z) 氧化分解机理的 DFT 研究[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(2): 252-257. (HUO Erguang, LIU Chao, XU Xiaoxiao, et al. Mechanism of oxidation decomposition of HFO-1336mzz(Z) by DFT study [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(2): 252-257.)
- [35] WANG Xingyu, WU Rui, CHENG Lu, et al. Suppression of propane cup-burner flame with HFO-1336mzz(Z) and its thermal stability study[J]. Thermochimica Acta, 2020, 683: 178463.
- [36] ZHANG Zhihao, HE Guogeng, HOU Qinying, et al. Experimental and mechanism study on the flammability of the mixtures of propylene and ethane [J]. Fuel, 2024, 360: 130590.
- [37] LYU Zijian, YANG Zhao, ZHANG Yong, et al. A comparative investigation on the flame inhibition characteristics and mechanism of 1,1,2,3,3,3-hexafluoro-1-propene (R1216) [J]. Fuel, 2022, 324: 124652.
- [38] FEI Teng, YANG Zhao, ZHANG Yong, et al. A comparative investigation on the inhibition effects of CF3I/C3F6 on combustion of 1, 1-Difluoroethane mixtures [J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 152: 74-82.
- [39] 郑晓生, 罗俊伟, 卢沛, 等. 采用 R1234ze(E)/R245fa 的非共沸混合工质有机朗肯循环系统实验研究[J]. 广东工业大学学报, 2020, 37(3): 114-120. (ZHENG Xiaosheng, LUO Junwei, LU Pei, et al. An experimental study of zeotropic-mixture organic Rankine cycle system utilizing R1234ze(E)/R245fa [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2020, 37(3): 114-120.)
- [40] 辛立勇, 余伟, 刘朝, 等. R1233zd(E) 热稳定性及热解机理的实验和理论研究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(5): 1169-1176. (XIN Liyong, YU Wei, LIU Chao, et al. Experimental and theoretical studies on thermal stability and pyrolysis mechanism of R1233zd(E) [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(5): 1169-1176.)
- [41] TAKIZAWA K, TOKUHASHI K, KONDO S. Flammability assessment of  $\text{CH}_2\text{CFCF}_3$ : comparison with fluoroalkenes and fluoroalkanes [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 172(2/3): 1329-1338.
- [42] 石玉琦, 杨昭, 吕子建, 等. R32 与 R1234yf 可燃性对比及燃烧抑制研究[J]. 制冷学报, 2021, 42(4): 12-19. (SHI Yuqi, YANG Zhao, LYU Zijian, et al. Flammability comparison and flame retardancy research on R32 and R1234yf [J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(4): 12-19.)
- [43] SHI Yuqi, YANG Zhao, LYU Zijian. Flammability inhibition effect assessment with mildly flammable refrigerant and inert gases on difluoromethane [J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 144: 26-33.
- [44] LYU Zijian, YANG Zhao, CHEN Yubo, et al. Experimental studies on the flammability limit and burning velocity of the mixtures of 2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene [J]. Fuel, 2021, 298: 120698.
- [45] YANG Zhao, WU Xi, TIAN Tian. Flammability of Trans-1,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene and its binary blends [J]. Energy, 2015, 91: 386-392.
- [46] DAI Yuande, LI Jinye, LIAO Yu, et al. Research on the thermodynamic properties of binary mixtures containing R1234ze(E) based on Helmholtz model [J]. Fluid Phase Equilibria, 2023, 573: 113874.

- [47] 霍二光,戴源德,耿平,等. R1234ze 与 R152a 混合制冷剂替代 R22 的可行性[J]. 化工学报, 2015, 66(12): 4725-4729. (HUO Erguang, DAI Yuande, GENG Ping, et al. Feasibility of using R1234ze and R152a mixture as alternative for R22[J]. *CIESC Journal*, 2015, 66(12): 4725-4729.)
- [48] 赵玉清,吕冰. 新型低全球变暖潜能值混合制冷剂替代 R22 的试验研究[J]. 化工进展, 2017, 36(8): 2866-2873. (ZHAO Yuqing, LYU Bing. Experimental research on a mixed refrigerant replacing R22 [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(8): 2866-2873.)
- [49] 吴曦,区祖迪,胡光航,等. 二元阻燃剂对 HFO-1243zf 可燃性抑制效果研究[J]. 制冷学报, 2023, 44(3): 41-48. (WU Xi, OU Zudi, HU Guanghang, et al. Flame suppression effects of binary extinguishants on the flammability of HFO-1243zf[J]. *Journal of Refrigeration*, 2023, 44(3): 41-48.)
- [50] ZHANG Yong, YANG Zhao, FENG Biao, et al. Study on the inhibition of lubricating oil in conjunction with a flame retardant on the flammability of propane[J]. *Combustion*

and Flame, 2023, 255: 112867.

- [51] LYU Zijian, YANG Zhao, CHEN Yubo, et al. Inhibition performance study of lubricating oil with 2-BTP on the combustion of R152a (1, 1-difluoroethane) and R1234yf (2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene) [J]. *Fire Safety Journal*, 2022, 131: 103620.

#### 通信作者简介

庄远,男,副教授,合肥工业大学汽车与交通工程学院,13920110876,E-mail: zhuangyuan@hfut.edu.cn。研究方向:先进复合燃烧技术与反应动力学、高效环保动力技术、新能源科学与先进动力系统、移动源污染物控制与预测。

#### About the corresponding author

Zhuang Yuan, male, associate professor, School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, 86-13920110876, E-mail: zhuangyuan@hfut.edu.cn. Research fields: advanced composite combustion technology and reaction dynamics, high efficiency and environmentally friendly power technology, new energy science and advanced power system, mobile source pollutant control and prediction.