

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.01.006

# R1216对易燃制冷剂R600a的抑燃试验研究

史永杰, 刘向农, 翟瑞

(合肥工业大学汽车与交通工程学院, 安徽合肥 230009)

**摘要:** R600a是一种具有低全球变暖潜值(global warming potential, GWP)的天然制冷剂,可替代部分氢氟烃(hydrofluorocarbons, HFCs)工质。但由于其易燃性,通常只用于充注量较小的制冷设备中。为改善R600a的安全性并拓宽其应用范围,文章将其与阻燃剂R1216混合,利用定容燃烧弹试验平台,研究R1216/R600a混合物在温度为30℃、初始压力为101.3 kPa情况下的燃烧特性,包括可燃极限、无拉伸火焰速度、马克斯坦长度和层流燃烧速度等参数。结果表明,R1216对R600a的燃烧性有明显的抑制作用,且随着R1216与R600a体积比的增加,抑制效果更为显著。该研究结果为R1216/R600a混合物在制冷领域的安全应用提供参考。

**关键词:** 天然制冷剂R600a; 易燃性; 阻燃剂R1216; 燃烧特性; 抑制作用

**中图分类号:** TB612

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1003-5060(2026)01-0043-06

## Experimental investigation into inhibitory effect of R1216 on the flammability of refrigerant R600a

SHI Yongjie, LIU Xiangnong, ZHAI Rui

(School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** R600a is a natural refrigerant with a low global warming potential (GWP) that can substitute some hydrofluorocarbons (HFCs). However, due to its flammability, it is typically employed in refrigeration equipment with a smaller refrigerant charge. To improve the safety of R600a and broaden its application range, this study blends it with flame retardant R1216. The combustion characteristics of R1216/R600a mixture under conditions of 30 °C and 101.3 kPa initial pressure were investigated using a constant volume combustion bomb. Parameters such as flammability limits, unstretched flame speed, Markstein length, and laminar burning velocity were investigated. The experimental results show that R1216 has a significant inhibitory effect on the combustion of R600a, and the inhibitory effect becomes more significant as the volume ratio of R1216 to R600a increases. The study results provide references for the safe application of R1216/R600a mixture in the refrigeration industry.

**Key words:** natural refrigerant R600a; flammability; flame retardant R1216; combustion characteristics; inhibitory effect

在过去的数十年里,随着制冷与空调行业的迅速发展,氢氟烃(hydrofluorocarbons, HFCs)的消费量与排放量持续攀升<sup>[1]</sup>。HFCs是替代消耗臭氧层物质的人工合成气体,但其具有较高全球变暖潜值(global warming potential, GWP)。为

缓解全球气候变暖的影响,目前已有155个国家或地区成为《〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉基加利修正案》的缔约方。该修正案通过逐步削减方案实现对18种HFCs的管控,包括常用的R32、R23和R134a等。R600a是对环境友好

**收稿日期:** 2023-12-22; **修回日期:** 2024-04-19

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52106005); 中国博士后科学基金资助项目(2022M721059)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2023HGTD0254)

**作者简介:** 史永杰(1999—),男,江苏昆山人,合肥工业大学硕士生;

翟瑞(1991—),女,安徽六安人,博士,合肥工业大学讲师,硕士生导师,通信作者, E-mail: ruizhai@hfut.edu.cn.

的天然碳氢化合物,被认为是 HFCs 的替代制冷剂之一<sup>[2-3]</sup>。但因其较低的可燃下限和较高的燃烧放热量,R600a 被归为易燃类工质,对应的安全等级为 A3。R600a 的易燃性使其应用场景受到一定的限制,目前 R600a 多用于充注量较小的制冷设备中,如家用与小型商用冰箱。

为改善 R600a 的安全性并拓宽其应用范围,寻找与 R600a 匹配的阻燃剂并与其组成混合制冷剂是切实可行的方法之一。文献[4]研究 R134a/R600a 混合体系的可燃极限,当 R134a 的体积分数高于 80%~90%时,该体系从中度可燃降至弱可燃;文献[5]研究不饱和烯烃 R1234ze(E)和 R1233zd(E)对 R600a 的燃烧抑制作用,表明卤族元素的添加在抑制燃烧过程中起到关键作用。

R1216 是氢氟烯烃(hydrofluoroolefins, HFOs)中的一种,不可燃且具有较低的 GWP,同样是新一代制冷剂的候选物。其标准沸点和临界压力分别为-30.34 °C和 3.15 MPa,与 R600a 标准沸点-11.75 °C和临界压力 3.63 MPa 接近。因此,R1216 有望与 R600a 成为下一代环保混合制冷剂,研究该混合物的燃烧性可为其安全应用

提供参考。

## 1 试 验

### 1.1 定容燃烧弹试验平台

定容燃烧弹试验平台如图 1 所示,该平台主要由定容弹主体、温控系统、配气系统、点火系统和纹影图像采集系统等组成。定容弹主体内部是一个内径为 150 mm、长为 280 mm 的圆柱腔室,在其两侧配备可视化的 K9 玻璃视窗,有效视窗直径为 80 mm。温控系统主要由温控器、加热带和精度为±1 K 的 K 型热电偶等组成。配气系统包括制冷剂和压缩空气气瓶、减压阀、进气管路、手动阀和压力变送器等,根据道尔顿分压定律,配气系统通过控制进气分压来实现试验所需的浓度要求。点火系统由火花塞、钨质电极和点火变压器等改造得到。纹影图像采集系统采用 Z 型纹影光路,由卤素灯光源、平面反射镜、球面反射镜、刀口及高速摄像机等组成,球面反射镜有效口径为 100 mm、焦距为 1 000 mm,高速摄像机为 nac Image Technology 公司生产的 MEMRECAM ACS-3 M16,在本文中设置的分辨率为 512×512,拍摄速度为 10 000 帧/s。

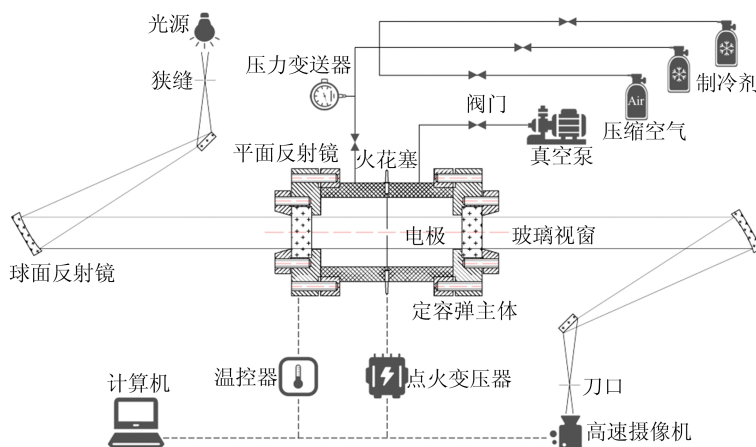
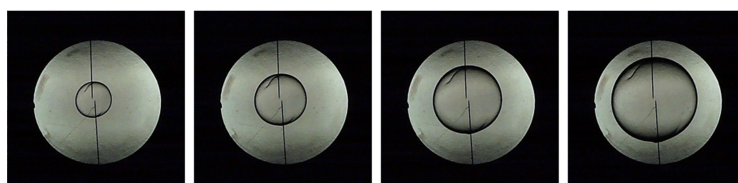


图 1 定容燃烧弹试验平台

### 1.2 数据处理

纹影图像处理过程如图 2 所示。原始纹影图像如图 2a 所示,在经过背景消除、灰度化和二值

化等处理后,转变为图 2b。进一步地,通过降噪、边缘提取等图像处理,得到精细化的球形火焰轮廓,如图 2c 所示。



(a) 原始纹影图像

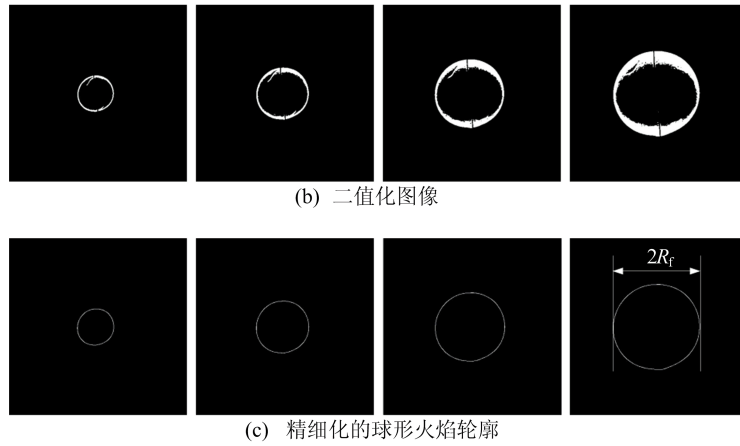


图 2 纹影图像处理

球形火焰的水平半径定义为  $R_f$ , 由此得到了火焰半径随时间的变化规律  $R_f(t)$ , 结果如图 3 所示。图 3 中  $\Phi$  为当量比。考虑到点火对火焰传播初期的影响以及可视化视窗尺寸的限制, 本文中选取计算的火焰半径范围为 7.5~30.0 mm。

对于球形火焰而言, 拉伸火焰速度  $S_b$  定义为  $R_f(t)$  的微分, 公式为:

$$S_b = \frac{dR_f}{dt} \quad (1)$$

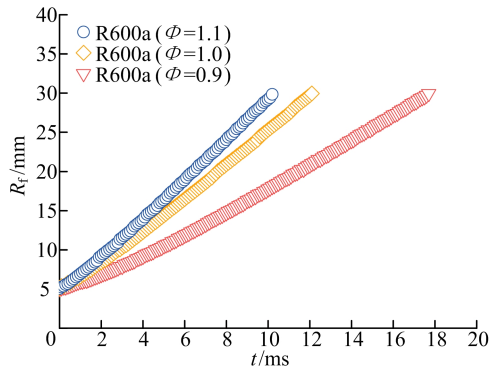


图 3 火焰半径随时间的变化

拉伸率  $K$  用来表征火焰前锋面的拉伸程度, 定义为火焰前锋面面积  $A$  的自然对数对时间的导数。通过球面积公式, 拉伸率  $K$  可以进一步简化为与火焰半径  $R_f$  和拉伸火焰速度  $S_b$  的关系, 公式为:

$$K = \frac{d(\ln A)}{dt} = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{1}{4\pi R_f^2} \frac{d(4\pi R_f^2)}{dt} = \frac{2}{R_f} S_b \quad (2)$$

为获得无拉伸火焰速度, 需消除火焰拉伸的影响, 通常将拉伸火焰速度外推至拉伸率为 0。利用目前常用的 LS、NQ 和 LC 外推模型, 模拟拉伸火焰速度随拉伸率的变化, 如图 4 所示。图 4

中: LS 为线性模型; NQ 和 LC 为非线性模型。

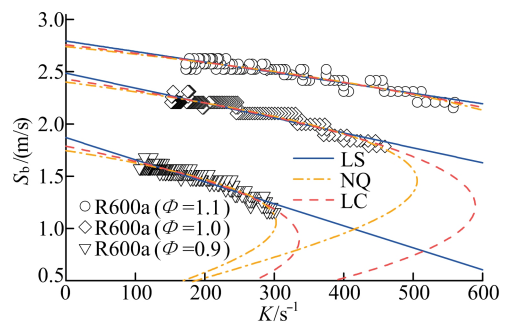


图 4 拉伸火焰速度随拉伸率的变化

LS 模型由文献[6]基于 Lewis 数接近于 1 的假设提出, 公式为:

$$S_b = S_b^0 - L_b K \quad (3)$$

其中:  $S_b^0$  为无拉伸火焰速度;  $L_b$  为马克斯坦长度。马克斯坦长度表征了火焰对拉伸的敏感程度, 是反映火焰稳定性的一个重要参数。

NQ 模型由文献[7]基于准稳态火焰传播的假设提出, 适用于任意的 Lewis 数, 其相关公式为:

$$\left(\frac{S_b}{S_b^0}\right)^2 \ln\left(\frac{S_b}{S_b^0}\right) = -\frac{2L_b K}{S_b^0} \quad (4)$$

文献[8]考虑强拉伸效应与广义 Lewis 数的影响, 提出 LC 模型, 其公式为:

$$\frac{S_b}{S_b^0} = 1 - 2 \frac{L_b}{R_f} \quad (5)$$

采用不同的外推模型是造成无拉伸火焰速度存在不确定性的原因之一。鉴于 NQ 模型适用于任意混合物, 并且在近年来得到了广泛应用, 故在本文中 choice NQ 模型。

基于质量守恒, 层流燃烧速度与无拉伸火焰速度的关系式为:

$$S_1 = \frac{\rho_b S_b^0}{\rho_a} \quad (6)$$

其中,  $\rho_b$  和  $\rho_a$  分别为已燃和未燃混合物的密度, 可通过计算化学反应平衡得到。

## 2 结果与讨论

对 R1216/R600a 混合物在温度为 30 °C、初始压力为 101.3 kPa 的情况下进行燃烧试验, 测得混合物的可燃极限、无拉伸火焰速度、马克斯坦长度和层流燃烧速度的变化趋势。

R1216/R600a 混合物的可燃极限如图 5 所示, 图 5 中实线是基于试验数据的多项式拟合曲线, 其关系式为:

$$L = A + B_1 \left(\frac{\beta}{\alpha}\right) + B_2 \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2 + B_3 \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^3 \quad (7)$$

其中:  $L$  为可燃上限或下限;  $\alpha$  为 R600a 的体积分数;  $\beta$  为 R1216 的体积分数;  $A$ 、 $B_1$ 、 $B_2$  和  $B_3$  为拟合参数。该拟合曲线具有良好的预测能力, 各拟合参数见表 1 所列。

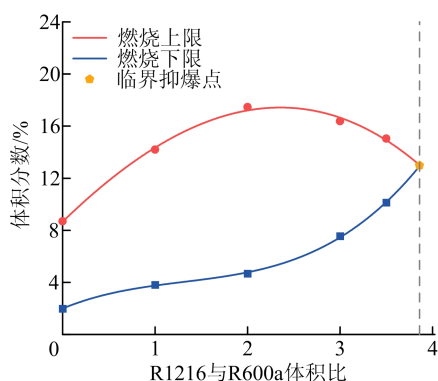
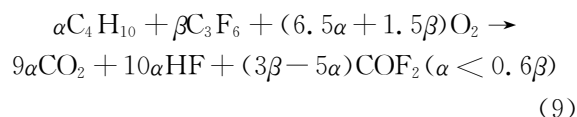
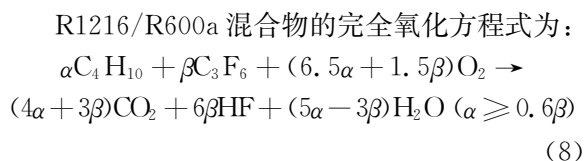


图 5 R1216/R600a 混合物的可燃极限

表 1 R1216/R600a 可燃极限的拟合参数

参数	A	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$R^2$
上限	8.652 60	6.923 46	-1.133 33	-0.095 37	0.985
下限	1.993 02	2.935 02	-1.574 51	0.401 07	0.997

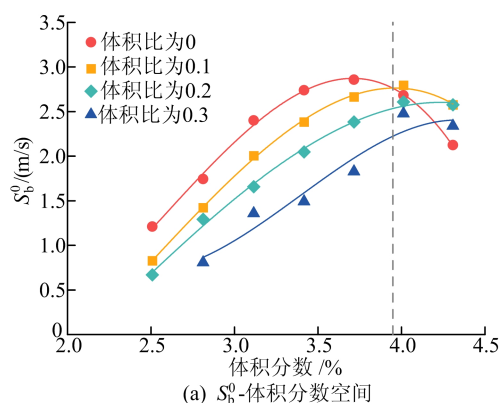
当未添加 R1216 时, R600a 纯工质的可燃上下限分别为 8.69% 和 1.98%。随着 R1216 与 R600a 体积比的增加, 可燃下限呈逐渐上升的趋势, 而可燃上限呈先增加后减小的趋势。当体积比为 2.36 时, 可燃上限达到峰值为 17.43%。当体积比为 3.86 时, 可燃上限和可燃下限终止于同一点。在此点右侧, 无论 R1216/R600a 混合物在空气中的体积分数如何, 该混合物均呈现不可燃特性, 故此点称为临界抑爆点, 对应的体积比即为临界抑爆比。



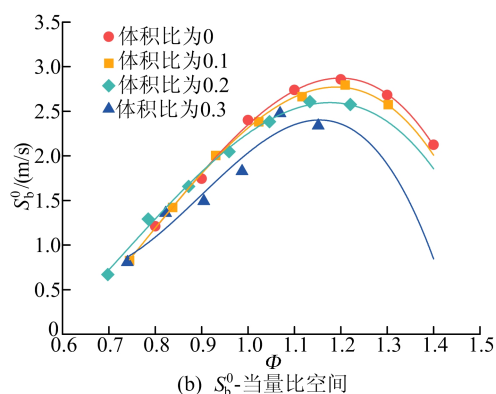
当反应物中氢元素多于氟元素(即  $\alpha \geq 0.6\beta$ ) 时, 部分氢与氟结合生成 HF, 多余的氢则与氧生成成为  $H_2O$ ; 而当反应物中氢元素少于氟元素(即  $\alpha < 0.6\beta$ ) 时, 部分氟与氢生成氟化氢 HF, 多余的氟则氧化为  $COF_2$ 。此为含氟制冷剂氧化的通用规律, 由文献[9]研究得到。氧气的化学计量数均为  $6.5\alpha + 1.5\beta$ , 故当量比  $\Phi$  定义为:

$$\Phi = \frac{100(6.5\alpha + 1.5\beta)}{20.9} \times \frac{1}{1 - \alpha - \beta} \quad (10)$$

R1216 与 R600a 体积比分别为 0、0.1、0.2、0.3 时的无拉伸火焰速度变化情况如图 6 所示。图 6a 以体积分数为自变量, 图 6b 以当量比为自变量。



(a)  $S_b^0$ -体积分数空间



(b)  $S_b^0$ -当量比空间

图 6 R1216/R600a 混合物的无拉伸火焰速度

从图 6 可以看出, 在  $S_b^0$ -体积分数空间里, 随着 R1216 与 R600a 体积比的增加, 混合物体系的无拉伸火焰速度在虚线左侧呈逐渐减小趋势。在

虚线右侧,在 0.1、0.2、0.3 体积比下的无拉伸火焰速度高于纯 R600a。

当存在点火源时,制冷剂泄漏达到其可燃下限即可能发生燃爆,因而制冷剂在低体积分数下的燃烧性更为关键。在实际场景中,当 R1216 与 R600a 制冷剂的泄露量在同一低体积分数时,含 R1216 更多的混合物的燃烧速度更低,意味着其燃烧性受到的抑制作用越强。

将  $S_b^0$ -体积分数空间转化为  $S_b^0$ -当量比空间,可以发现,当 R1216 和 R600a 的体积分数相同时,R1216 与 R600a 体积比越大,混合物体系对应的当量比越小。解释了在  $S_b^0$ -体积分数空间里,随着体积比的增加,无拉伸火焰速度对应的曲线右移现象。

在  $S_b^0$ -当量比空间里,基于现有数据利用三次多项式对无拉伸火焰速度进行了预测(图 6 中实线)。纯 R600a 的无拉伸火焰速度在  $\phi$  为 1.20 时达到峰值 2.87 m/s。当体积比分别为 0.1、0.2、0.3 时,混合物分别在  $\phi$  为 1.19、1.18、1.15 时达到峰值 2.78、2.60、2.40 m/s。由此可见,随着体积比的增加,R1216/R600a 混合物的无拉伸火焰速度峰值不断减小。

以上结果表明,R1216 对 R600a 的无拉伸火焰速度存在抑制效果。一方面,随着 R1216 与 R600a 体积比的增加,该混合物体系的无拉伸火焰速度曲线在  $S_b^0$ -体积分数空间内发生右移,使得低体积分数区的速度减小;另一方面,随着体积比的增加,R1216/R600a 体系的无拉伸火焰速度峰值在  $S_b^0$ -当量比空间内不断降低。

与无拉伸火焰速度对应的马克斯坦长度如图 7 所示。由图 7 可知,在  $L_b$ -体积分数空间内,马克斯坦长度随着 R1216 和 R600a 体积分数的增加逐渐减小,表明火焰随着体积分数升高而越不稳定。

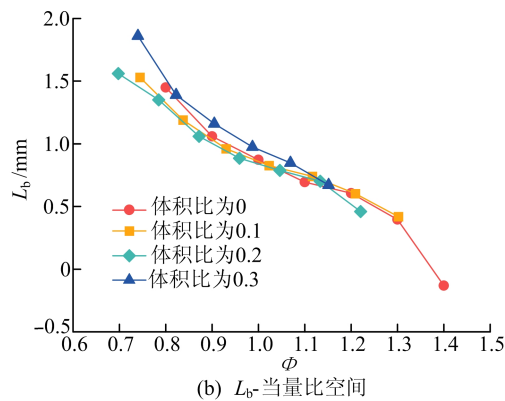


图 7 R1216/R600a 混合物的马克斯坦长度

对于同一体积分数,随着 R1216 与 R600a 体积比的增加,马克斯坦长度逐渐增大,表明火焰随着 R1216 的增加而越稳定。

R1216/R600a 混合物体系的层流燃烧速度如图 8 所示。

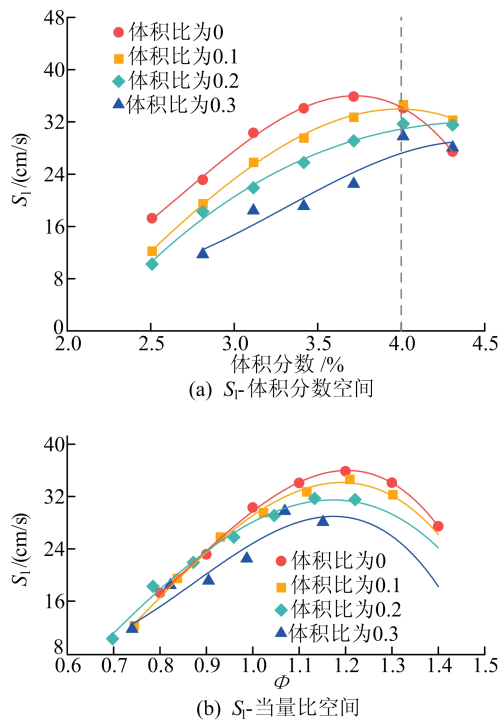


图 8 R1216/R600a 混合物的层流燃烧速度

无拉伸火焰速度和层流燃烧速度的峰值及其降幅见表 2 所列。

从表 2 可以看出,当体积比从 0.1 增加至 0.3 时,无拉伸火焰速度峰值的降幅从 3.48% 升至 16.38%,而层流燃烧速度峰值的降幅从 5.17% 升至 19.56%。对于相同的体积比,层流燃烧速度的降幅高于无拉伸火焰速度,这意味着 R1216 对该混合物体系层流燃烧速度的抑制程度更强。

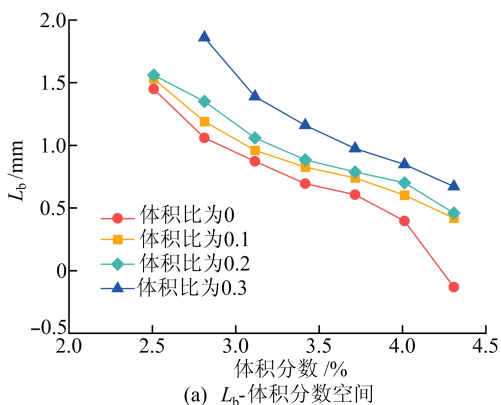


表 2 无拉伸火焰速度与层流燃烧速度峰值及降幅

体积比	无拉伸 $\Phi$	$S_{l,max}^0/(m/s)$	$S_l^0$ 降幅/%	层流 $\Phi$	$S_{l,max}/(cm/s)$	$S_l$ 降幅/%	$(S_l \text{ 降幅} - S_l^0 \text{ 降幅})/\%$
0	1.20	2.87		1.20	36.00		
0.1	1.19	2.77	3.48	1.19	34.14	5.17	1.69
0.2	1.18	2.60	9.41	1.17	31.48	12.56	3.15
0.3	1.15	2.40	16.38	1.17	28.96	19.56	3.18

### 3 结 论

本文在定容燃烧弹试验平台上对 R1216/R600a 混合物体系的燃烧性进行了研究,得到如下结论:

1) 随着 R1216 与 R600a 体积比的增加,可燃下限逐渐上升,而可燃上限先增加后减小,并在体积比为 3.86 时达到临界抑爆点。

2) 随着 R1216 与 R600a 体积比的增加,在同一低体积分数条件下,无拉伸火焰速度和层流燃烧速度都呈现逐步下降趋势,表明 R1216 的增加对 R600a 燃烧速度的抑制效果增强。

3) R1216 与 R600a 体积比相同时,马克斯坦长度随 R1216 和 R600a 体积分数的增加而减小,火焰越不稳定;R1216 和 R600a 体积分数相同时,马克斯坦长度随 R1216 与 R600a 体积比的增加而增大,火焰越稳定。

4) 当 R1216 与 R600a 体积比相同时,层流燃烧速度峰值的降幅高于无拉伸火焰速度峰值的降幅,表明层流燃烧速度受 R1216 的抑制作用更明显。

### [参 考 文 献]

- [1] WU J, DING S, FANG X, et al. Banks, emissions, and environmental impacts of China's ozone depletion substances and hydrofluorocarbon substitutes during 1980—2020[J]. Science of the Total Environment, 2023, 882: 163586.
- [2] BOLAJI B O, HUAN Z. Ozone depletion and global warming: case for the use of natural refrigerant; a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 18: 49-54.
- [3] ABAS N, KALAIR A R, KHAN N, et al. Natural and synthetic refrigerants, global warming; a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 90: 557-569.
- [4] CAI D, HAO Z, XU H, et al. Research on the flammability of R290/R134a, R600a/R134a and R600a/R290 refrigerant mixtures[J]. International Journal of Refrigerant, 2022, 137: 53-61.
- [5] FENG B, ZHANG Z, JIAN L, et al. Effect of two halogenated olefins on combustion characteristics of isobutane[J]. Fuel, 2024, 360: 130545.
- [6] WU C K, LAW C K. On the determination of laminar flame speeds from stretched flames[J]. Symposium (International) on Combustion, 1985, 20(1): 1941-1949.
- [7] KELLY A P, LAW C K. Nonlinear effects in the extraction of laminar flame speeds from expanding spherical flames[J]. Combustion and Flame, 2009, 156(9): 1844-1851.
- [8] CHEN Z. On the extraction of laminar flame speed and Markstein length from outwardly propagating spherical flames[J]. Combustion and Flame, 2011, 158(2): 291-300.
- [9] TAKIZAWA K, TAKAHASHI A, TOKUHASHI K, et al. Reaction stoichiometry for combustion of fluoroethane blends[J]. ASHRAE Transactions, 2006, 112(2): 459-468.

(责任编辑 吴 亮)