

混合方式和空燃比对燃气催化燃烧均匀性和效率的影响

徐润达¹ 蒋群辉² 马海乐¹

(1. 江苏大学, 江苏 镇江 212013; 2. 镇江美博红外科技有限公司, 江苏 镇江 212013)

摘要: [目的]改进催化式红外发射器的加热温度分布不均、燃烧效率低于预期等问题。[方法]提出了改进空气和燃气的混合方式和优化混合比例(空燃比)的研究方案。通过热电偶测量不同工作条件下发射器表面的温度,以表面平均温度、最高温度、温度标准差以及升温曲线为指标,进行优化试验。[结果]与腔内混合相比,腔外预混可以提高发射器表面平均温度约 50 °C,提高最高温度约 16 °C,降低表面温度标准差约 17%,在空燃比较小的情况下,可以略微缩短升温所需时间。以液化石油气为 1.3 SLPM、空燃比为 23.3 为例,在腔内混合的情况下平均温度为 527.3 °C、最高温度为 615.2 °C;在腔外预混的情况下平均温度为 559.1 °C、最高温度为 647.4 °C。[结论]腔内混合和腔外预混两种方式中,最佳的空气与液化石油气的混合方式为腔外预混,最佳空燃比为 23.3。

关键词: 燃气; 气体混合; 空燃比; 燃烧效率

Influence of mixing mode and air-fuel ratio on uniformity and efficiency of gas catalytic combustion

XU Runda¹ JIANG Qunhui² MA Haile¹

(1. Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. Zhenjiang Meibo Infrared Technology Co., Ltd., Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: [Objective] To solve the non-uniform heating temperature distribution and lower-than-expected combustion efficiency of catalytic infrared emitters. [Methods] This study proposes a research plan that focuses on improving the mixing mode of air and fuel gas and optimizing the mixing ratio (air-fuel ratio). After measuring the temperature of the emitter surface under different operating conditions using thermocouples, this study conducts optimization experiments with average surface temperature, maximum temperature, temperature standard deviation, and heating curves as indicators. [Results] Compared to intra-cavity mixing, extra-cavity pre-mixing can increase the average surface temperature of the emitter by about 50 °C, increase the maximum temperature by approximately 16 °C, and reduce the surface temperature standard deviation by around 17 °C. At relatively low air-fuel ratios, it can also slightly shorten the heating time. Taking the situation where the liquefied petroleum gas is at 1.3 SLPM and the air-fuel ratio is 23.3, under intra-cavity mixing, the average temperature is 527.3 °C and the maximum temperature is 615.2 °C; However, under extra-cavity pre-mixing, the average temperature is 559.1 °C and the maximum temperature is 647.4 °C. [Conclusion] Extra-cavity pre-mixing is the optimal mixing mode for air and liquefied petroleum gas, with an optimal air-fuel ratio of 23.3.

Keywords: fuel gas; gas mixing; air-fuel ratio; combustion efficiency

催化式红外加热是一种新兴的加热方式,其基本原理是催化燃烧,即可燃气体与空气中的氧气在催化剂的

基金项目:省部共建现代农业装备与技术协同创新中心项目(编号:XTCX1008)

通信作者:马海乐(1963—),男,江苏大学教授,博士。E-mail: mhl@ujs.edu.cn

收稿日期:2024-09-11 改回日期:2025-02-13

引用格式:徐润达,蒋群辉,马海乐. 混合方式和空燃比对燃气催化燃烧均匀性和效率的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(6): 96-101.

Citation: XU Runda, JIANG Qunhui, MA Haile. Influence of mixing mode and air-fuel ratio on uniformity and efficiency of gas catalytic combustion[J]. Food & Machinery, 2025, 41(6): 96-101.

催化作用下发生氧化反应,同时以红外线形式释放出大量热^[1]。由于该反应以无焰方式进行,因此也被称为无焰燃烧。该加热方式具有能耗小^[2]、效率高、污染低等特点^[3],目前已被应用于食品加工^[3-7]、涂料固化^[8-9]等领域。

宋晓倩^[5]研究发现,与传统的热水漂烫相比,带式催化红外烫漂能更好地保持红薯片的细胞结构,减少红薯片的电解质泄漏、维生素C和总酚含量的损失,并根据研究结果建立了一种带式催化红外“烫漂+干燥”技术方法;凡威^[6]发现,与传统热风干燥相比,滚筒催化红外-热风联合干燥缩短了核桃的干燥时间、节约了能耗,是一种具有明显技术优势的新型、高效的干燥方式;李婷^[7]对黑曲霉含量超标的返潮干香菇进行热处理杀菌试验,证实滚筒式催化红外联合保温热处理是一种适用于返潮干香菇杀菌的高效保质杀菌技术,应用前景广阔。尽管催化式红外加热相较于传统加热方式有很大优势,但是中国对以产生红外线为目的的燃气催化燃烧的研究较少,现有的催化式红外发射器存在加热温度分布不均、热转化率低等问题^[6],严重限制了催化式红外加热技术的性能提升和推广。

除了催化式红外加热的应用方面的研究,还有许多关于催化燃烧本身的研究,其中主要分为催化剂^[10]和燃烧器结构、工作参数^[11]两个方向。王亮等^[12]发现,天然气预混催化燃烧效果受到空气与燃气的混合比例(空燃比)的影响较大,空燃比为8.3~19.0时可以实现稳定的催化燃烧,为11~19时催化燃烧效果较好,尾气中废气含量较低。顾永万等^[13]发现,反应时的空燃比氛围对CH₄和CO的选择氧化性能影响较大,3种催化剂中CH₄催化燃烧的最佳空燃比均在理论空燃比附近,说明空燃比对催化燃烧的效果影响较大。此外,王亮等^[12]通过预混室保证了燃气与空气的完全混合,然而现有的催化式红外发射器采用了将燃气和空气分别通入发射器,使其在腔室内混合的方式,且缺少对两种混合方式的对比研究。

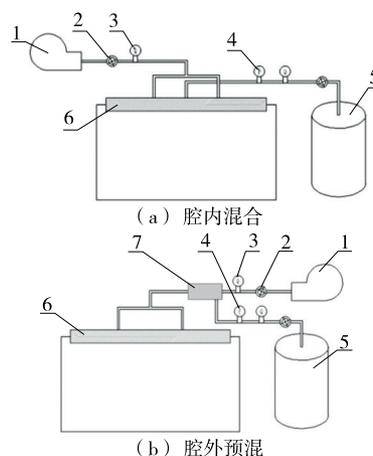
研究拟以液化石油气为材料,以提高催化式红外发射器的表面温度的均匀性和热转化率为目的,通过比较不同空燃比以及混合方式下发射器表面的最高温度、平均温度和标准差,进行试验研究,以期催化式红外发射器的结构优化研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

研究所用的试验平台如图1所示,包括腔内混合和腔外预混两个试验平台。腔内混合是指将液化石油气和空气通过不同的管路通入催化燃烧腔内进行混合,腔外预混是指将液化石油气和空气在进入催化燃烧腔室之前在一个预混室进行混合。

试验平台主要由供气系统、催化反应系统和检测系



1. 气泵 2. 手阀 3. 流量计 4. 压力表 5. 液化石油气气罐
6. 催化式红外发射器 7. 预混室

图1 试验平台

Figure 1 Experiment platform

统三部分构成。供气系统由液化石油气气罐、气泵、预混室和手阀组成;催化反应系统由催化式红外发射器及其箱体构成;检测系统由流量计、压力表和手持式热电偶组成。对于腔内混合催化式红外试验,液化石油气由液化石油气气罐提供,通过减压阀流经压力表和流量计进入催化式红外发射器;空气由气泵提供,流经流量计进入催化式红外发射器。对于腔外预混催化式红外试验,液化石油气和空气被送入预混室预混后进入催化式红外发射器。液化石油气与空气的流量通过手阀控制,催化式红外发射器表面的温度通过手持式热电偶进行测量。

通过气相色谱分析发现,液化石油气主要成分为丙烷(C₃H₈),质量占比为98.274 6%,其余各成分质量占比均<0.75%。气泵流量范围为0~58 L/min。测量液化石油气和空气的流量计量程分别为:0~20,0~100 L/min,测量精度为±(2.0+0.5FS)%。催化式红外发射器以及箱体预热功率500 W,工作压力0~1 kPa。手持式热电偶测温范围为-200~1 372 ℃,误差为±1 ℃。

1.2 试验方法

催化式红外发射器以红外辐射为主要加热方式,根据式(1)可知,辐射传热率与发射器表面发射率、斯托克斯常数、发射器表面积以及温度有关^[14]。试验以发射器表面的平均温度、最高温度和标准差为指标,确定最优的气体混合方式和混合比例。

$$P = \epsilon \sigma A T^4, \quad (1)$$

式中:

P ——辐射传热率, W;

ϵ ——发射器表面发射率, $0 \leq \epsilon \leq 1$;

σ ——斯托克斯常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

A ——发射器表面积, m^2 ;

T ——温度, K。

当液化石油气进气量 $< 0.5 \text{ L/min}$ 时, 发射器无法工作; 催化式红外设备工作压力为 1 kPa , 对应液化石油气的进气量为 1.3 L/min 。因此, 将液化石油气流量取值为 $0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3 \text{ L/min}$ 。根据顾永万等^[13]的结论和 C_3H_8 在液化石油气的体积占比 (98.28%)、氧气在空气中的体积占比 (21%) 和化学反应方程式 (2), 液化石油气和空气的充分反应消耗量的体积比比值约为 $1:23.3$, 即理论空燃比为 23.3 , 因此, 试验中的空燃比的取值为 $16, 21, 23.3, 25, 30$ 。



为了较为准确地比较表面发射器温度分布的均匀性。还需要计算通过热电偶测得的温度值的标准差, 通过标准差来比较发射器表面的温度分布均匀性。按式 (3) 计算标准差。

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (3)$$

式中:

Δ ——标准差;

N ——测温点个数;

x_i ——第 i 个测温点的温度, $^\circ\text{C}$;

μ ——测温点得到的温度的均值, $^\circ\text{C}$ 。

试验开始前, 将两个热电偶共计 8 根测温线固定到初始测温点位, 接通电加热管的电源对催化层预热 10 min , 预热完成后断开电源, 关闭箱门, 然后打开液化石油气气罐的减压阀, 接通气泵电源通入液化石油气和空气, 通过手阀和流量计调整液化石油气和空气的流量至试验设定的混合比, 每隔 1 min 读取热电偶上显示的温度, 共记录 10 次, 随后待热电偶读数稳定再测量其他点位的温度, 所有测温点的分布情况如图 2 所示, 共有 33 个测温点。试验完成后关闭减压阀、断开气泵电源, 待催化式红外发射

器冷却至室温, 调整燃气和空气流量, 再进行下一次试验。试验中液化石油气流量为 $0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3 \text{ L/min}$, 空燃比为 $16, 21, 23.3, 25, 30$, 每种参数组合进行 3 次试验。

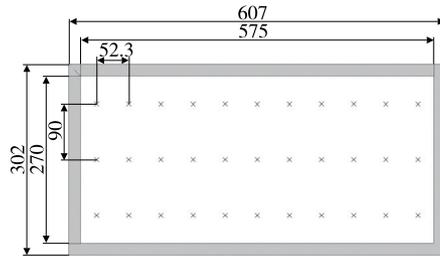


图 2 红外发射板测温点位分布图

Figure 2 Distribution of point for measuring temperature on infrared emitter

2 结果与分析

2.1 腔内混合发射器

2.1.1 腔内混合发射器的表面温度 由图 3 可知, 发射器表面的平均温度与最高温度的变化趋势相同, 均随着液化石油气进气量的提高而快速上升, 随着空燃比的提高先上升后下降, 最高点在最佳空燃比附近, 这与顾永万等^[13]的结论相符, 原因是空燃比低于理论空燃比时, 丙烷无法完全反应, 导致液化石油气的利用率较低, 当空燃比大于理论空燃比时, 过量的空气会带走更多的热量, 降低发射器表面的温度。此外, 当空燃比小于理论空燃比时, 平均温度与最高温度受到空燃比的影响相较于在空燃比大于理论空燃比的情况下时的更大, 这是因为丙烷不完全反应所损失的热量大于过量空气所带走的热量。因此, 空燃比为 23.3 、液化石油气进气量为 1.3 L/min 时, 平均温度和最高温度均达到最大, 分别为 $527.3, 615.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

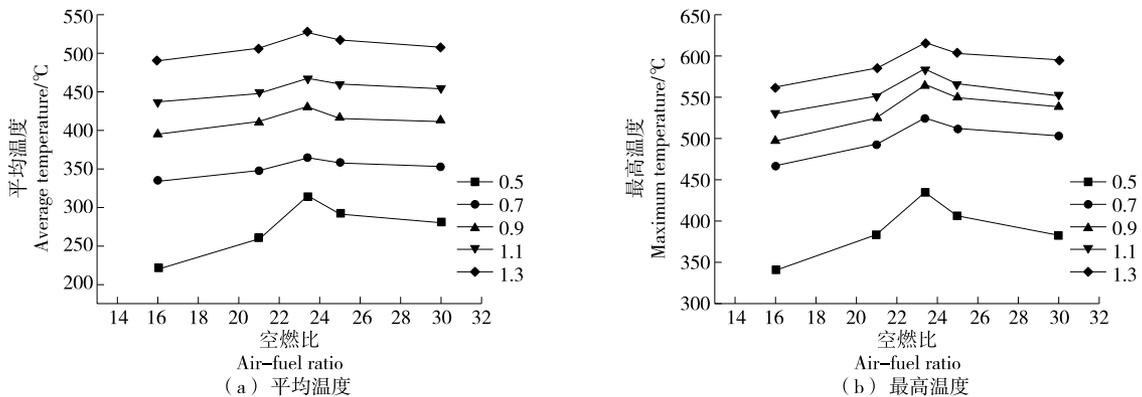


图 3 不同液化石油气进气量下空燃比对腔内混合催化式红外发射器表面平均温度和最高温度的影响

Figure 3 Effect of air-fuel ratio on the average and maximum surface temperature of catalytic infrared emitter with gas mixed inside the cavity under different LPG input volumes

2.1.2 腔内混合发射器的温度分布 由图4可知,发射器表面的温度标准差随着空燃比的增大而增大,随着液化石油气进气量的增加而减小。当空燃比从25增加至30时,标准差的变化幅度最小,从16增加至21时,标准差变化幅度较大,从21增加至25时,标准差的变化幅度最大,原因是实际空燃比小于理论空燃比时,进气口流速较小,燃气与空气在催化层上的分布较为均匀,且丙烷无法完全反应,发射器表面的整体温度较低,标准差也较低,当空燃比大于理论空燃比时,进气口流速较大,燃气与空气在催化层上的分布不均匀,但是过量的空气会带走更多的热量,降低发射器表面的温度,使标准差趋于稳定。当表面温度达到最大,即空燃比为23.3、液化石油气进气量为1.3 L/min时,温度标准差为53。

2.1.3 腔内混合发射器的升温曲线 由图5可知,2 min左右时,催化式红外发射器表面基本完成了升温过程,这一现象充分展现了催化式红外升温速度快的优点。在1.3 L/min的液化石油进气量下,空燃比为23.3、25、30的情况下发射器表面温度比较接近,且明显大于空燃比为21、16的情况,进一步说明23.3是一个最优的空燃比。此时液化石油进气量越大,发射器表面温度越高,1.3 L/min的液化石油进气量下发射器表面温度最高。当空燃比小

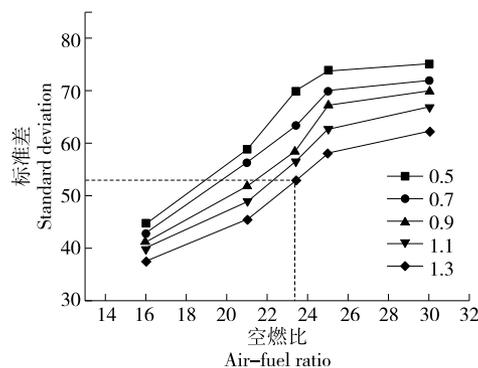
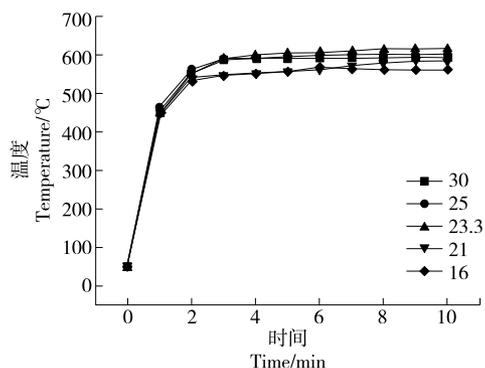


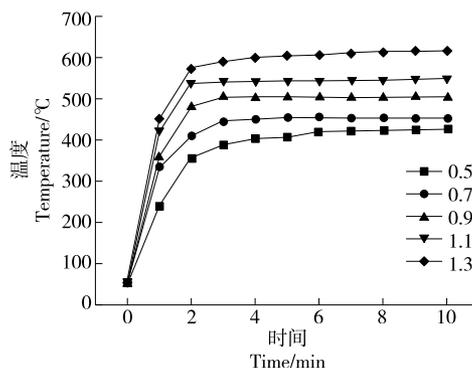
图4 不同液化石油气进气量下空燃比对腔内混合催化式红外发射器表面温度标准差的影响

Figure 4 Effect of air-fuel ratio on the surface temperature standard deviation of catalytic infrared emitter with gas premixed inside the cavity under different LPG input volumes

于理论空燃比时,发射器表面温度先升高后略微降低,最后稳定在一个温度值附近,原因是升温过程中,烘箱箱体内部的空气也会参与反应,随着反应的进行,烘箱内空气被消耗完全,此时空气供给量小于丙烷反应的消耗量,反应产生的热量减少,温度略微降低。



(a) 空燃比(液化石油气进气量1.3 L/min)



(b) 液化石油气进气量(空燃比为23.3)

图5 不同空燃比和液化石油气进气量下腔内混合催化式红外发射器表面的升温曲线

Figure 5 Temperature rise curve of catalytic infrared emitter surface with gas mixed inside the cavity under different air-fuel ratios and LPG input volumes

2.2 腔外预混发射器

2.2.1 腔外预混发射器的表面温度 由图6可知,腔外预混情况下,发射器表面平均温度和最高温度的变化趋势与腔内混合相同,均在空燃比为23.3和液化石油气进气量为1.3 L/min时达到最大,分别为559.1、627.4℃。经计算发现,腔外预混情况下,发射器表面的平均温度相较腔内混合平均提高了约50℃,最高温度平均提高了16℃,提升效果明显。此外,在腔内混合的情况下,空燃比为21时,表面平均温度和最高温度相较空燃比为23.3的情况

分别降低了约22.2、37.2℃;在腔外预混情况下,空燃比为21时发射器表面的平均温度和最高温度相较空燃比为23.3的情况分别降低了约15.4、33.4℃,表明腔外预混情况下,发射器表面的温度随空燃比的变化更加平稳。这是因为腔内混合时,液化石油气与空气混合不完全,对丙烷的利用率较低,且进气空燃比的变化会影响催化层上各处的空燃比,受到空燃比的影响较大;腔外预混时,液化石油气与空气完全混合,丙烷的利用率较高,受到空燃比的影响较小。

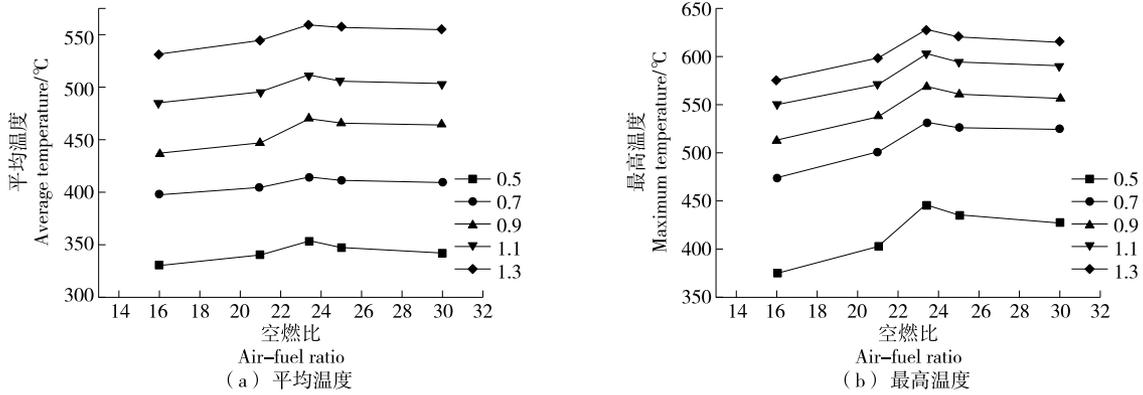


图 6 不同液化石油气进气量下空燃比对腔外预混催化式红外发射器表面平均温度和最高温度的影响

Figure 6 Effect of air-fuel ratio on the average and maximum surface temperature of catalytic infrared emitter with gas premixed outside the cavity under different LPG input volume

2.2.2 腔外预混发射器的温度分布 由图 7 可知,随着液化石油气进气量的增加和空燃比的下降,温度标准差逐渐减小,与腔内混合呈现出相同的规律,且腔外预混使催化层上各处的空燃比差距较小,在试验参数范围内,腔外预混表面温度标准差相较腔内混合平均降低约 10.5;当表面温度达到最大,即空燃比为 23.3 和液化石油气进气量为 1.3 L/min 时,腔外预混发射器的温度标准差为 43.8,比腔内混合的下降了 17.36%。

2.2.3 腔外预混发射器的升温曲线 由图 8 可知,腔外预混发射器表面的升温曲线变化趋势与腔内混合时的相同,2 min 内基本上完成了升温过程,达到稳定温度的 90% 以上,3 min 时达到或者接近最大值。

3 结论

研究了液化石油气和空气腔外预混和腔内混合两种情况下,进气量和空燃比对催化式红外发射器表面平均温度、最高温度、表面温度标准差和升温过程的影响。结果表明,在试验参数范围内,液化石油气为 1.3 L/min、空燃比为 23.3 时,腔外预混平均温度和最高温度分别比腔

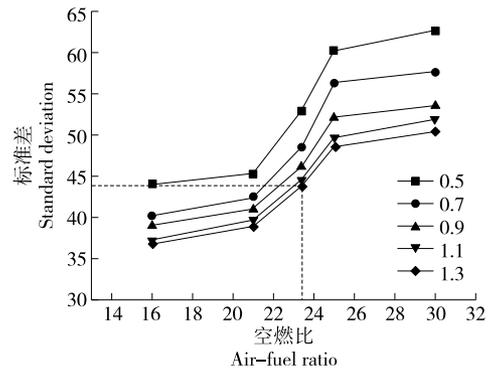


图 7 不同液化石油气进气量下空燃比对腔外预混催化式红外发射器表面温度标准差的影响

Figure 7 Effect of air-fuel ratio on the surface temperature standard deviation of catalytic infrared emitter with gas premixed outside the cavity under different LPG input volume

内混合提高了 31.8, 32.2 °C, 表面温度标准差下降了 17.36%, 说明腔外预混有助于发射器温度的提升, 可以提高催化式红外发射器表面温度分布的均匀性, 也降低了

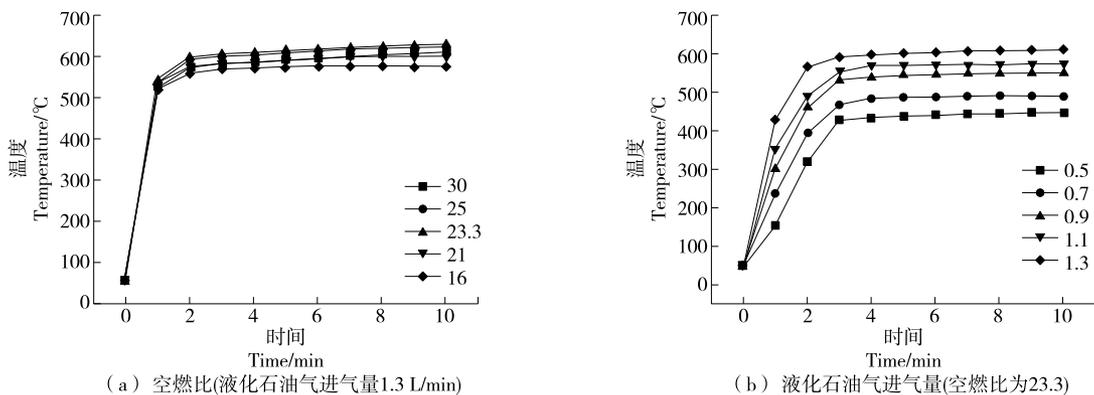


图 8 腔外预混催化式红外发射器表面升温曲线

Figure 8 Temperature rise curves of catalytic infrared emitter surface with gas premixed outside the cavity

升温过程温度值对空燃比和液化石油气进气量变化的依赖性,当液化石油气进气量较低时对空燃比变化的依赖性大幅度降低;对于腔内混合和腔外预混两种混合方式,空燃比在理论空燃比附近时发射器表面的平均温度和最高温度最大;不管是腔内混合还是腔外预混,3~4 min催化式红外发射器表面温度均可以达到稳定值的90%以上,说明催化式红外具有升温速度快的特点。由于试验设备的限制,后续可研究腔外预混与腔内混合两种工况下反应机理的差异。

参考文献

- [1] 孟丹, 祁永智, 丁瑞星. 有机废气的催化燃烧[J]. 洛阳工学院学报, 2000, 21(3): 91-94.
MENG D, QI Y Z, DING R X. The catalytic combustion of organic exhaust gases[J]. Journal of Luoyang Institute of Technology, 2000, 21(3): 91-94.
- [2] PAN Z L, MCHUGH T H. Novel infrared dry blanching (IDB), infrared blanching, and infrared drying technologies for food processing: US20060034981[P]. 2006-02-16.
- [3] LEE E H. A review on applications of infrared heating for food processing in comparison to other industries[M]// Innovative Food Processing Technologies. Amsterdam: Elsevier, 2021: 431-455.
- [4] 于贤龙, 褚斌, 肖红伟, 等. 红外辐射食品热处理机制及应用研究进展[J]. 食品与机械, 2022, 38(4): 213-219.
YU X L, CHU B, XIAO H W, et al. Advance in research on heat treatment mechanism of infrared radiation and its application in foods[J]. Food & Machinery, 2022, 38(4): 213-219.
- [5] 宋晓倩. 基于过氧化物酶和淀粉特性的红薯片带式催化红外干法烫漂组合干燥研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021: 15-24.
SONG X Q. Study on belt catalytic infrared dry blanching combined drying of sweet potato slices based on the characteristics of peroxidase and starch[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021: 15-24.
- [6] 凡威. 核桃滚筒催化红外—热风联合干燥、品质及贮藏特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021: 1, 21-23.
FAN W. Study on drying, quality and storage properties of walnut drying with drum catalytic infrared-hot air[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021: 1, 21-23.
- [7] 李婷, 曲文娟, 吴本刚, 等. 滚筒式催化红外联合保温处理对返潮干香菇杀菌效果及品质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 120-128.
LI T, QU W J, WU B G, et al. Effect of combined drum catalytic infrared with holding treatment for disinfection and quality of rewetting-dried shiitake mushrooms[J]. Food & Machinery, 2021, 37(7): 120-128.
- [8] 孙中华, 张晟. 天然气催化燃烧红外设备在涂料固化中的应用[J]. 涂料技术与文摘, 2016, 37(7): 8-12.
SUN Z H, ZHANG S. Natural gas catalyzed IR generator and its application in curing process of coatings[J]. Coating and Protection, 2016, 37(7): 8-12.
- [9] 毛亚东, 潘嵩, 刘奕巧, 等. 燃气催化燃烧红外固化粉末涂料的固化参数研究[J]. 现代涂料与涂装, 2021, 24(4): 11-14, 26.
MAO Y D, PAN S, LIU Y Q, et al. Research on curing parameters of infrared curing powder coatings by gas catalytic combustion[J]. Modern Paint & Finishing, 2021, 24(4): 11-14, 26.
- [10] MA L, GENG Y, CHEN X Y, et al. Reaction mechanism of propane oxidation over CO_3O_4 nanorods as rivals of platinum catalysts[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 402: 125911.
- [11] 苟杰. 催化微通道内丙烷/空气预混合燃烧特性的实验和数值模拟研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022: 26-49.
GOU J. Experimental and numerical simulation of propane/air premixed combustion characteristics in catalytic microchannels [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022: 26-49.
- [12] 王亮, 何洪, 戴洪兴, 等. 天然气预混催化燃烧的特性[J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(5): 474-477.
WANG L, HE H, DAI H X, et al. Characteristics of premixed catalytic combustion of nature gas[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, 13(5): 474-477.
- [13] 顾永万, 彭金辉, 朱敬芳, 等. 储氧量及空燃比对钯催化剂选择氧化 CH_4 和 CO 的影响[J]. 贵金属, 2015, 36(4): 1-8.
GU Y W, PENG J H, ZHU J F, et al. Effect of oxygen storage capacity and air-fuel ratio on selective oxidation of CH_4 and CO for mixed oxides supported palladium catalysts[J]. Precious Metals, 2015, 36(4): 1-8.
- [14] 邬田华, 王晓墨, 许国良. 工程传热学[M]. 2版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2020: 4.
WU T H, WANG X M, XU G L. Engineering heat transfer[M]. 2nd Edition. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2020: 4.