

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.04.005

燃气发动机驱动热泵烟气排放影响因素的 试验研究

Experimental study on factors influencing flue gas emissions of gas engine-driven
heat pumps

莫继杭^{1,2}, 苗艳姝^{1,2}, 陈昌瑞³, 张晓萌^{1,2}, 倪龙^{1,2*}

MO Jihang^{1,2}, MIAO Yanshu^{1,2}, CHEN Changrui³, ZHANG Xiaomeng^{1,2}, NI Long^{1,2*}

(1. 哈尔滨工业大学 建筑学院, 哈尔滨 150006; 2. 寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室
(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150006; 3. 南京天加环境科技有限公司, 南京 210046)

(1.School of Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China; 2.Key Laboratory of Cold Region
Urban and Rural Human Settlement Environment Science and Technology (Harbin Institute of Technology),
Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150006, China; 3.Nanjing
TICA Climate Solutions Company Limited, Nanjing 210046, China)

摘要: 随着燃气热泵的大力推广, 有关燃气热泵排放的标准愈发严格。通过燃气热泵烟气排放试验, 研究在燃气热泵稳定运行工况下, 燃气消耗量、过量空气系数、发动机转速对燃气热泵烟气排放的影响。结果表明: $w(\text{NO}_x)$ 和烟气温度整体随燃气消耗量的增加呈上升趋势, 提升过量空气系数可以降低 $w(\text{NO}_x)$, 并使 $w(\text{CO})$ 维持在较低水平。从降低污染物排放的角度来说, 过量空气系数宜维持在 1.40 左右。随着发动机转速的增加, $w(\text{NO}_x)$ 和 $w(\text{CO})$ 都呈先降后升的趋势, 最小值均出现在转速为 1 250 r/min 左右时, 而且烟气温度与发动机转速呈线性正相关。

关键词: 燃气热泵; 烟气排放; 燃气消耗量; 过量空气系数; 发动机转速; 减排

中图分类号: TK 01 : X 511 文献标志码: A 文章编号: 2097-0706(2023)04-0035-06

Abstract: With the popularization of gas engine-driven heat pumps, their emission standards are becoming more and more strict. Thus, the influences of gas consumption, excess air coefficient and engine speed on the flue gas emissions from gas engine-driven heat pumps under steady operation condition are studied in a flue gas emission experiment. The results show that the $w(\text{NO}_x)$ and flue gas temperature show upward trends with the increase of natural gas consumption, while increasing excess air coefficient can reduce the $w(\text{NO}_x)$ and keep the $w(\text{CO})$ at a low level. From the point of view of reducing pollutant emissions, the excess air coefficient should be kept at around 1.40. With the increase of engine speed, both $w(\text{NO}_x)$ and $w(\text{CO})$ decrease at first and then increase with their minimum values occurring at a speed of 1 250 r/min or so, and the flue gas temperature shows a positive linear relationship with the engine speed.

Keywords: gas engine-driven heat pump; flue gas emission; gas consumption; excess air coefficient; engine speed; emission reduction

0 引言

为改善能源消耗带来的环境污染问题, 各国推出相关政策, 鼓励使用天然气、水电、风能和太阳能等清洁能源^[1-2]。其中, 燃气发动机驱动热泵(以下简称燃气热泵)因能有效提高一次能源利用率^[3]及无 SO_x 排放等特点受到市场关注。然而, 燃气热泵的烟气排放标准严格, 本文对燃气热泵烟气排放的

影响因素展开研究。

燃气热泵所排放的烟气是由天然气在发动机中不完全燃烧产生的, 主要成分包括 CO_x 和 NO_x 等。诸多研究表明, 天然气掺氢^[4-7]、增大燃气热泵压缩机压比^[8]可减少 CO_x 的排放, 但会增加 NO_x 的排放。为控制 NO_x 的排放, 以往研究分析了影响 NO_x 排放的参数, 过量空气系数。窦慧莉等^[9]发现当过量空气系数大于 1.1 时, 过量空气系数越大, NO_x 排放量越低; Attard 等^[10]发现当射流点火发动机的过量空气系数达到 2.20, 排放的 NO_x 质量分数降为 0.001%;

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFE0116100)
National Key R&D Program of China(2021YFE0116100)

高强等^[11]发现当过量空气系数为 2.17 时, NO_x 的排放量降为当量燃烧时的 1%。另外, 发动机采用主动式预燃室技术控制过量空气系数来稳定燃烧^[12], 采用进气道燃料喷射技术^[13]以及延迟点火时刻^[14]等方式减少 NO_x 的排放。

近几十年来, 国内外学者对天然气发动机的排放特性进行了深入、多角度的研究, 但大部分是针对独立天然气发动机进行试验或模拟研究的; 在保证燃气热泵正常运转下, 对其排放特性的研究较少。本文将通过燃气热泵烟气排放试验, 分析燃气消耗量、过量空气系数以及发动机转速 3 个因素对烟气排放的影响, 为燃气热泵的烟气排放寻找合适

的工况点并提供优化支撑。

1 试验方案

1.1 燃气热泵系统

本次试验的燃气热泵系统结构如图 1 所示。其中, 燃气热泵型号为 CNCP850J, 名义工况下的制热能量为 95 kW、燃气消耗量为 8 m³/h。该热泵主要由制冷剂循环和燃气发动机冷却液循环组成, 使用 R410A 作为制冷剂, 燃气热泵系统中的发动机用于驱动压缩机。

试验采用型号为 4GPH88 的立式水冷天然气发动机, 其主要参数见表 1。

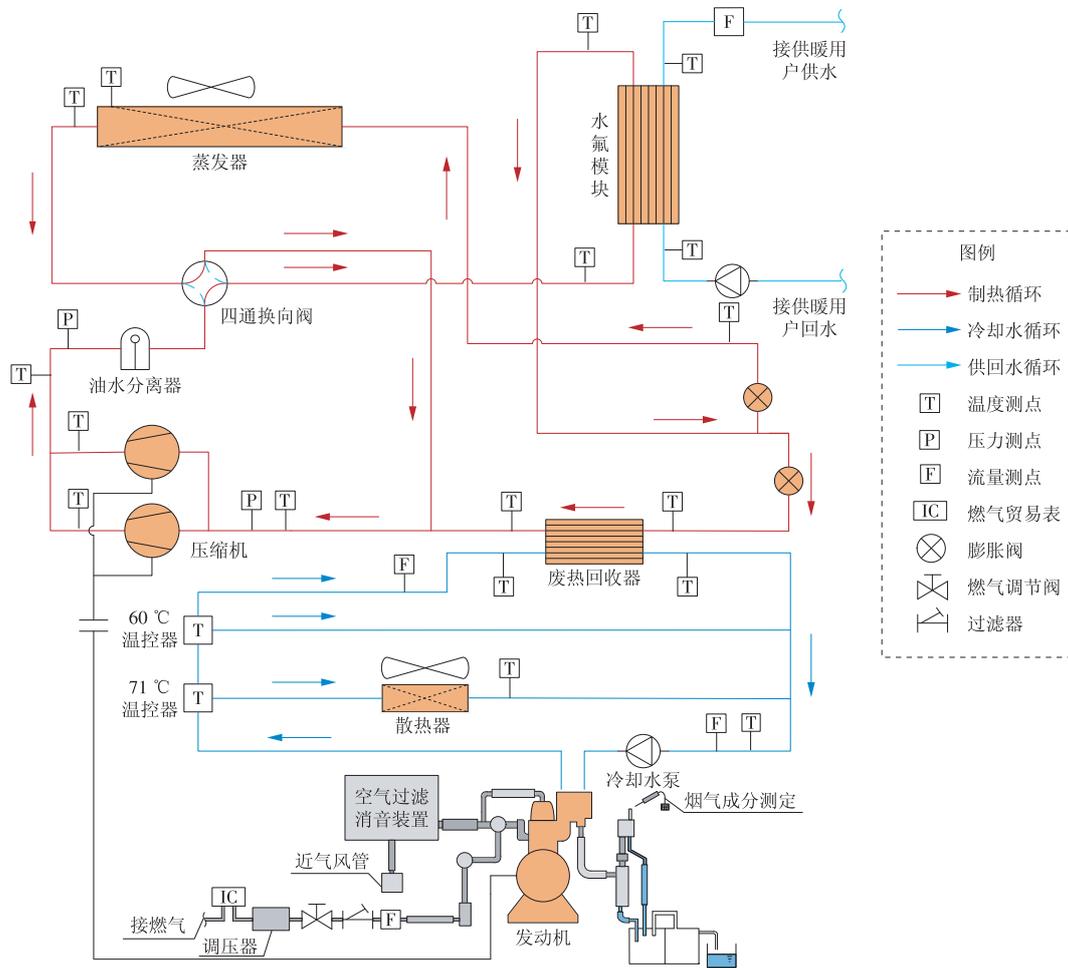


图 1 燃气热泵系统

Fig. 1 Structure of the GHP

制冷剂循环包括燃气发动机驱动的压缩机、四通换向阀、油分离器、水氟模块(冷凝器)、膨胀阀、废热回收器及蒸发器。制冷剂以低温低压蒸汽的形式被压缩机压缩变成过热蒸汽, 过热蒸汽依次流过油分离器、四通阀和水氟模块。在水氟模块中, 过热蒸汽与水进行换热, 将热量用于供热。随后蒸汽分两支路节流, 分别流经蒸发器和废热回收器进行吸热, 最终, 两路于压缩机汇合后进行下一次循环。

燃气发动机冷却液循环包括 3 种模式: 当冷却液温度低于 60 °C 时, 发动机以自循环模式运行, 不进行任何热交换; 当冷却液温度在 60~70 °C 时, 冷却液流经废热回收器进行热回收; 当冷却液温度高于 70 °C 时, 冷却液通过散热器散热至室外空气。

本次试验中燃气热泵使用的天然气低位热值为 33.6 MJ/m³, 高位热值为 37.3 MJ/m³, 密度为 0.704 8 kg/m³, 其组成成分见表 2。

表 1 发动机主要参数

Table 1 Main parameters of the engine

参数	数值
气缸数	4
缸径/mm	88
行程/mm	90
排气量/L	2.189
启动方式	电启动
额定制热转速/(r·min ⁻¹)	1 850

1.2 试验仪器

本试验在燃气入口设置燃气流量计,用于测量天然气消耗量。采用烟气分析仪来测量 CO,NO_x,O₂

表 2 天然气组成成分

Table 2 Components of natural gas

组分	数值/%	组分	数值/%
φ(CH ₄)	95.20	φ(C ₃ H ₁₂)	0.03
φ(C ₂ H ₆)	2.24	φ(N ₂)	1.16
φ(C ₃ H ₈)	0.24	φ(CO ₂)	0.86
φ(C ₄ H ₁₀)	0.10	φ(O ₂)	0.09

的排放体积分数以及烟气温度的使用自记软件记录发动机转速,电磁流量计测量水热模块水侧流量,铠装热电偶 pt100 温度传感器记录供回水温度。试验所用的测量仪器参数见表 3。

表 3 测量仪器参数

Table 3 Specifications of the measuring instruments

测量仪器	型号	测量参数	量程	精度
燃气流量计	TYLZ-G6	燃气流量/(m ³ ·h ⁻¹)	0.250~10.000	±0.150(1.5级)
电磁流量计	LDG-SUP	水侧流量/(m ³ ·h ⁻¹)	1.400~14.000	±0.063(0.5级)
铠装热电偶	SIN-WZPK	水侧温度/°C	0~200.0	±0.3
烟气分析仪	testo 350	φ(O ₂)/%	0~25.0	±0.2
		w(CO)/%	0~1.00	读数±5%
		φ(CO ₂)/%	0~50	±0.3+读数1%
		w(NO ₂)/%	0~0.05	±0.000 5
		w(NO)/%	0~0.40	读数±5%
		烟气温度/°C	-200.0~1 370.0	±0.4

2 数据处理及误差分析

计算不完全燃烧下的过量空气系数^[15]

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{\varphi'(O_2) - 0.5\varphi'(CO) - 0.5\varphi'(H_2) - 2\varphi'(CH_4)}{\varphi'(N_2) - \frac{\varphi(N_2)(\varphi'(RO_2) + \varphi'(CO) + \varphi'(CH_4))}{\varphi(CO_2) + \varphi(CO) + \sum m\varphi(C_m H_n) + \varphi(H_2S)}}}, \quad (1)$$

式中:φ(N₂),φ(CO₂),φ(CO),φ(C_mH_n),φ(H₂S)分别为燃气中各类成分的体积分数;φ'(N₂),φ'(O₂),φ'(H₂),φ'(RO₂),φ'(CO),φ'(CH₄)分别为烟气中各类成分的体积分数;m为C_mH_n中C原子数。

根据试验中燃气和烟气的成分,对式(1)进行修正

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{\varphi'(O_2) - 0.5\varphi'(CO) - 0.5\varphi'(NO)}{\varphi'(N_2) - \frac{\varphi(N_2)(\varphi'(CO_2) + \varphi'(CO))}{\varphi(CO_2) + \sum m\varphi(C_m H_n)}}}, \quad (2)$$

基准氧含量下的大气污染物排放质量分数^[16]

$$\gamma = \gamma' \times \frac{21 - \varphi(O_2)}{21 - \varphi'(O_2)}, \quad (3)$$

式中:γ'为实测的大气污染物排放质量分数;φ(O₂)为基准氧含量。

当φ(O₂)=0时,

$$\gamma = \gamma' \times \frac{21}{21 - \varphi'(O_2)}. \quad (4)$$

根据表 3 中仪器精度,通过误差传播理论计算得到 φ(O₂)=0 时,w(CO)的相对误差为 ±6.36%,w(NO_x)的相对误差为 ±6.86%。

3 试验结果及分析

3.1 燃气消耗量对烟气排放的影响

燃气热泵排放的烟气温度随燃气消耗量的变化如图 2 所示。当燃气消耗量在 2.400~8.000 m³/h 时,烟气温度随燃气消耗量的增加呈上升趋势,两者基本呈线性关系,随着燃气消耗量升高,燃烧温度不断升高,烟气温度也随之升高。拟合后的 Pearson 相关系数为 R,R²=0.893 4,可靠性较高。

图 3 为燃气消耗量对烟气排放的影响。如图 3a 所示,随着燃气消耗量的增加,w(NO_x)呈上升趋势。

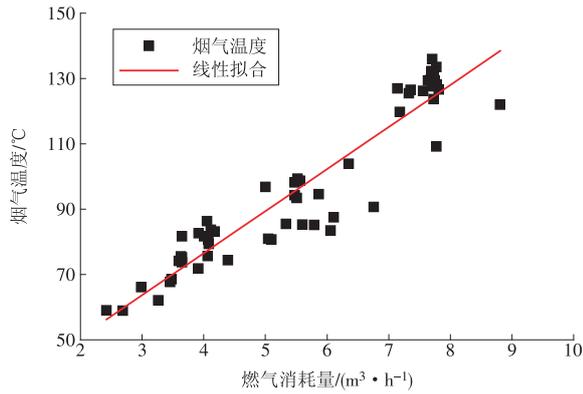


图2 烟气温度随燃气消耗量的变化曲线

Fig. 2 Variation curve of flue gas temperature with gas consumption

根据 NO_x 的生成机理, 高温会促进 NO_x 的生成, 因此燃气消耗的增加导致燃烧温度不断升高, $w(\text{NO}_x)$ 也不断增加。此外, 如图 3b 所示, 随着燃气消耗量的增加, $w(\text{CO})$ 的变化不大。这是由于虽然燃气消耗量增加了, 但空气进气量也会增加, 过量空气系数基本保持不变, 因此 $w(\text{CO})$ 基本不变。

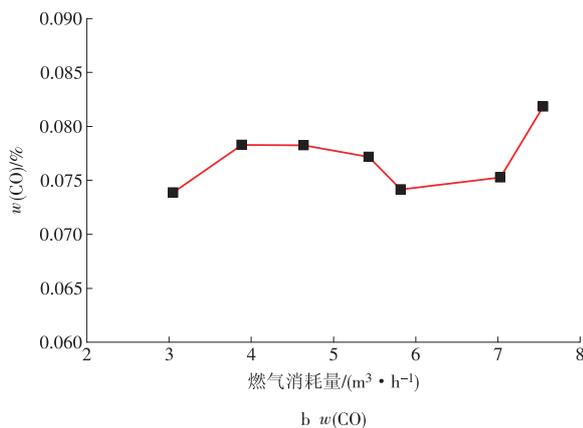
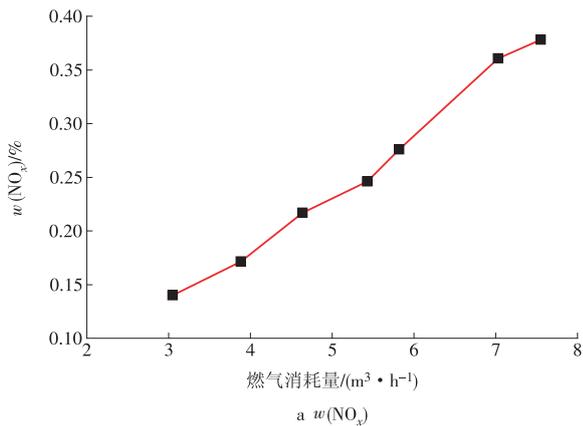


图3 燃气消耗量对烟气排放的影响

Fig. 3 Influence of gas consumption on flue gas emission

3.2 过量空气系数对烟气排放的影响

图 4 为保证燃气热泵正常稳定运转下, 过量空气系数对烟气排放的影响。由图 4a 可见, $w(\text{NO}_x)$ 随过量空气系数增加呈下降趋势。当过量空气系数在 1.28~1.34, $w(\text{NO}_x)$ 迅速减少, 当过量空气系数 >

1.35 时, $w(\text{NO}_x)$ 减少的速率趋于平缓。这是由于过量空气系数的增加使缸内燃烧温度降低, 阻碍 NO_x 生成, 因此过量空气系数增加会降低 $w(\text{NO}_x)$ 。

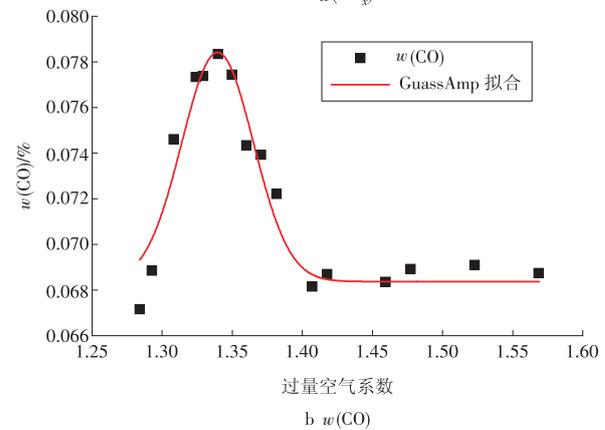
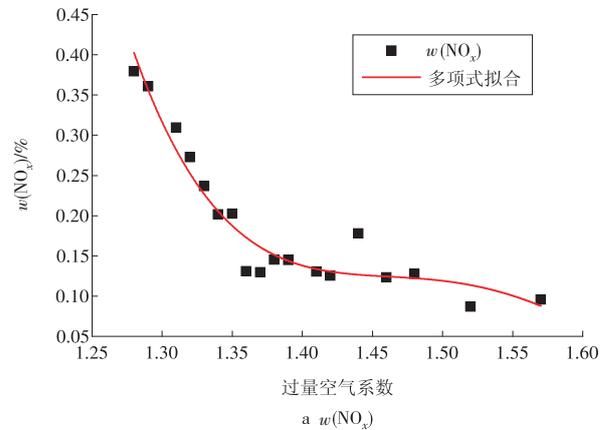


图4 过量空气系数对烟气排放的影响

Fig. 4 Influence of excess air coefficient on flue gas emissions

由图 4b 可知, 在过量空气系数为 1.28~1.57 时, $w(\text{CO})$ 随过量空气系数增加呈现先上升后下降的趋势, 当过量空气系数为 1.34 时, $w(\text{CO})$ 达到最大值。 $w(\text{CO})$ 随过量空气系数的变化主要受到燃烧温度和缸内氧气浓度的影响。在过量空气系数为 1.28 时, 随着过量空气系数增加, 燃烧温度降低, 导致燃烧效率下降, 造成 $w(\text{CO})$ 小幅上升; 随着过量空气系数继续增加, 缸内氧气浓度升高, 使 $w(\text{CO})$ 逐渐减少, 最终 $w(\text{CO})$ 保持在 0.069% 左右。通过图 4b 中数据可以发现 $w(\text{CO})$ 整体处于较低水平。

综合分析 $w(\text{NO}_x)$ 及 $w(\text{CO})$ 的变化规律, 过量空气系数维持在 1.40 左右可以实现两者均处于较低的排放水平, 继续增加过量空气系数并不能降低排放, 反而导致燃烧效率下降, 造成热损失增大。

3.3 发动机转速对烟气排放的影响

图 5 为烟气温度随发动机转速的变化。当发动机转速在 1400~2800 r/min 时, 烟气温度随发动机转速的增加呈上升趋势, 两者基本呈线性关系, 拟合后 $R^2=0.9446$ 。受燃烧温度的影响, 随着发动机转速升高, 燃烧温度升高, 烟气温度也随之升高。

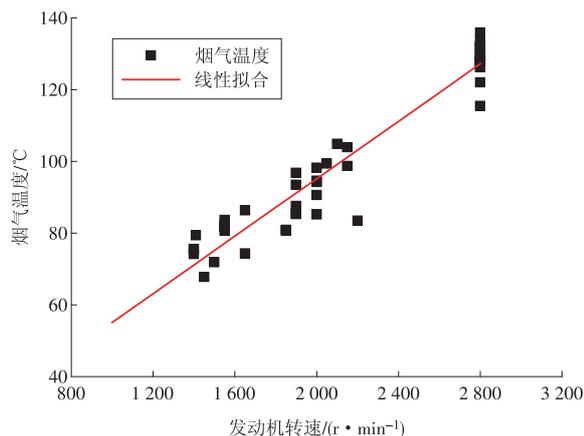


图5 烟气温度随发动机转速的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of flue gas temperature with engine rotation speed

图6为发动机转速对烟气排放的影响。由图6a可以看出,随着发动机转速的增加, $w(\text{NO}_x)$ 呈现先下降后上升的趋势。发动机转速在1250 r/min左右时, $w(\text{NO}_x)$ 达到最低水平。

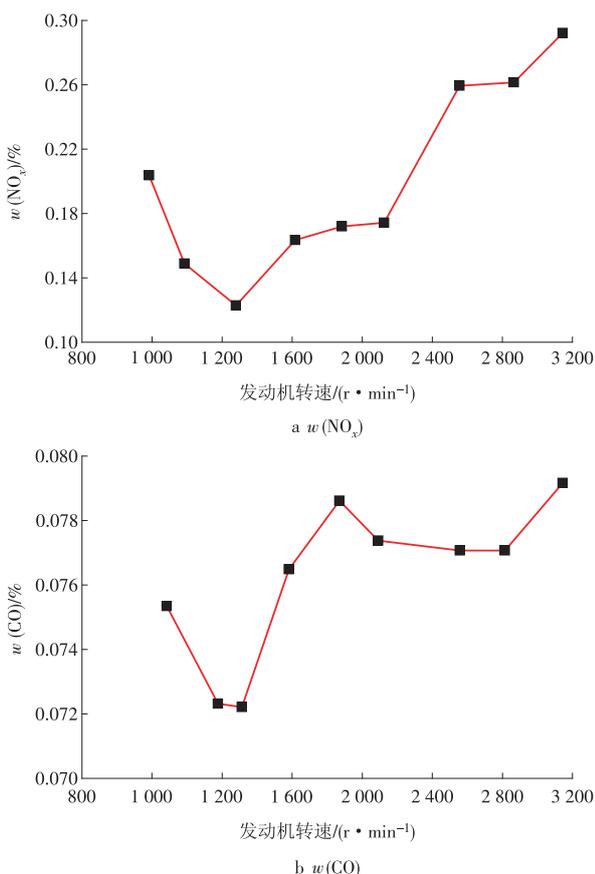


图6 发动机转速对烟气排放的影响

Fig. 6 Influence of engine rotation speed on flue gas emission

$w(\text{NO}_x)$ 主要受高温和高温停留时间的影响^[17],当发动机转速较小时,气体在高温下停留时间较长,导致 $w(\text{NO}_x)$ 较高;随着发动机转速升高,气体在高温下停留时间减少, NO_x 的生成受到抑制。随着

发动机转速继续升高,缸内温度上升,温度成为决定 NO_x 形成的核心因素,此时高温对 NO_x 生成的促进作用大于高温下停留时间对 NO_x 生成的促进作用,因此高转速下 NO_x 排放有所增加。

由图6b可知,随着发动机转速的增加, $w(\text{CO})$ 呈现先降低后上升的趋势。在发动机转速为1200~1250 r/min时, $w(\text{CO})$ 降至最低值。 $w(\text{CO})$ 随发动机转速的变化主要受混合气均匀程度和后期氧化时间的影响^[18]。在发动机转速较低时,混合气不均匀,形成局部高浓区,促使 $w(\text{CO})$ 升高。随着发动机转速的增加,混合气的均匀度得到改善,局部高浓区的减小阻碍了CO的生成;但随着发动机转速继续的增加,排放后的CO氧化时间缩短,使CO的氧化程度受到限制,因此在发动机转速高于1250 r/min后, $w(\text{CO})$ 呈上升趋势。

4 结论

(1)随着燃气消耗量增加,烟气温度呈线性变化,烟气中 $w(\text{NO}_x)$ 呈上升趋势,但 $w(\text{CO})$ 基本维持不变。

(2)随着过量空气系数增加, $w(\text{NO}_x)$ 呈下降趋势, $w(\text{CO})$ 呈现先升高后降低的变化趋势,但 $w(\text{CO})$ 整体处于较低的排放水平。综合分析 $w(\text{NO}_x)$ 及 $w(\text{CO})$ 的变化规律,过量空气系数维持在1.40左右可以实现两者都达到较低的排放水平。

(3)随着发动机转速增加, $w(\text{NO}_x)$ 和 $w(\text{CO})$ 都呈现先下降后升高的变化规律,最小值均出现在转速为1250 r/min附近。烟气温度随发动机转速增加呈现上升趋势,两者呈线性相关。

参考文献:

- [1]周志强.中国能源现状、发展趋势及对策[J].能源与环境,2008(6):9-10.
- [2]江婷,赵雅姣.基于燃气分布式的综合能源系统碳减排分析[J].综合智慧能源,2022,44(9):27-32.
JIANG Ting, ZHAO Yajiao. Carbon emission reduction analysis for gas-based distributed integrated energy systems [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(9): 27-32.
- [3]郝红,毛立功,李媛.太阳能燃气热泵供暖系统及余热回收分析[J].流体机械,2015,43(12):77-82.
HAO Hong, MAO Ligong, LI Yuan. Waste heat recovery analysis of solar energy and gas heat pump heating system [J]. Fluid Machinery, 2015, 43(12): 77-82.
- [4]SAGAR S M V, AGARWAL A K. Knocking behavior and emission characteristics of a port fuel injected hydrogen enriched compressed natural gas fueled spark ignition engine

- [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 141: 42–50.
- [5] TANGÖZ S, KAHRAMAN N, AKANSU S O. The effect of hydrogen on the performance and emissions of an SI engine having a high compression ratio fueled by compressed natural gas [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42 (40): 25766–25780.
- [6] RAJESH K R, SIDDHANT J, GAURAV V, et al. Laser ignition and flame kernel characterization of HCNG in a constant volume combustion chamber [J]. Fuel, 2017, 190: 318–327.
- [7] KORB B, KAWAUCHI S, WACHTMEISTER G. Influence of hydrogen addition on the operating range, emissions and efficiency in lean burn natural gas engines at high specific loads [J]. Fuel, 2016, 164: 410–418.
- [8] 郑建军, 王金华, 王彬, 等. 压缩比对直喷天然气发动机燃烧与排放特性的影响 [J]. 内燃机学报, 2010, 28 (1): 20–25.
ZHENG Jianjun, WANG Jinhua, WANG Bin, et al. Effect of compression ratio on combustion and emission characteristics of a direct injection natural gas engine [J]. Transactions of CSICE, 2010, 28 (1): 20–25.
- [9] 窦慧莉, 刘忠长, 李骏, 等. 过量空气系数对天然气发动机燃烧及排放的影响 [J]. 汽车技术, 2006 (3): 8–12.
DOU Huili, LIU Zhongchang, LI Jun, et al. Influence of excessive air coefficient on combustion and emission of NPG engines [J]. Automobile Technology, 2006 (3): 8–12.
- [10] ATTARD W P, PARSONS P. A normally aspirated spark initiated combustion system capable of high load, high efficiency and near zero NO_x emissions in a modern vehicle powertrain [J]. SAE International Journal of Engines, 2010, 3(2): 269–287.
- [11] 高强, 周磊, 华剑雄, 等. 不同过量空气系数下射流点火发动机燃烧、排放和爆震特性的试验研究 [J]. 内燃机工程, 2021, 42 (4): 8–15.
GAO Qiang, ZHOU Lei, HUA Jianxiong, et al. Experimental study on combustion, emission and knock characteristics of turbulent jet ignition engine under different excess air coefficients [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2021, 42 (4): 8–15.
- [12] ATTARD W P, BLAXILL H. A lean burn gasoline fueled prechamber jet ignition combustion system achieving high efficiency and low NO_x at part load [R]. SAE Technical Papers, 2012. DOI: 10.4271/2012-01-1146.
- [13] FAN B, ZHANG Y, PAN J, et al. The influence of hydrogen injection strategy on mixture formation and combustion process in a port injection (PI) rotary engine fueled with natural gas/hydrogen blends [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 173: 527–538.
- [14] LEE Z, LEE K, CHOI S, et al. Combustion and emission characteristics of an LNG engine for heat pumps [J]. Energies, 2015, 8(12): 13864–13878.
- [15] 同济大学, 重庆大学, 哈尔滨工业大学, 等. 燃气燃烧与应用 [M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局. 锅炉大气污染物排放标准: GB 13271—2014 [S].
- [17] 靳苏毅, 王登辉, 惠世恩, 等. 天然气低氮氧化物燃烧研究进展与展望 [J]. 节能技术, 2021, 39(4): 291–298.
JIN Suyi, WANG Denghui, HUI Shien, et al. Research progress and prospects of low-NO_x combustion of natural gas [J]. Energy Conservation Technology, 2021, 39 (4): 291–298.
- [18] 郭泽洲. 复合喷射模式下丙酮-丁醇-乙醇 (ABE)/汽油双燃料发动机燃烧及排放特性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2021.
GUO Zezhou. Research on combustion and emissions of a dual-fuel engine with acetone-butanol-ethanol (ABE)/gasoline [D]. Changchun: Jilin University, 2021.

(本文责编: 陆华)

收稿日期: 2022-10-26; 修回日期: 2022-12-26
上网日期: 2023-04-25; 附录网址: www.ienergy.cn

作者简介:

莫继杭 (1999), 男, 在读硕士研究生, 从事热泵低碳供热方面的研究, 137162441@qq.com;

苗艳妹 (1977), 女, 讲师, 博士, 从事燃气输配方面的研究, ys_miao@126.com;

陈昌瑞 (1988), 男, 工程师, 从事热泵制冷设备研发方面的研究, chenchangrui@ticachina.com;

张晓萌 (1998), 女, 在读博士研究生, 从事热泵低碳供热方面的研究;

倪龙 (1979), 男, 教授, 博士, 从事热泵低碳供热方面的研究, nilonggn@163.com。

*为通信作者。