

稀燃条件下甲烷-空气预混射流的着火特性

于洋, 瞿宗举, 谢巍, 邓俊, 吴志军

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

摘要: 基于可控热氛围燃烧试验系统, 探究射流当量比、射流速率和协流速率对甲烷-空气预混射流着火特性的影响。根据试验规律对天然气发动机稀薄燃烧的控制策略提出优化建议, 以减少失火现象的发生。结果表明: 随着协流温度的升高, 甲烷-空气预混射流的稀燃极限降低而富燃极限升高, 符合大多数碳氢燃料预混合气的着火界限分布规律。不同的射流速率和协流速率下均存在临界当量比, 当低于临界当量比时, 着火温度随射流当量比的升高而显著降低, 当高于临界当量比时, 着火温度趋于稳定。在较低的射流当量比工况(0.20~0.62)下, 提高射流速率可以降低着火温度从而优化着火性能。

关键词: 动力机械工程; 天然气发动机; 稀薄燃烧; 着火温度; 失火

中图分类号: TK464

文献标志码: A

Lean-Burn Ignition Characteristics of Methane/Air Premixed Jet

YU Yang, QU Zongju, XIE Wei, DENG Jun, WU Zhijun

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The effects of jet equivalence ratio, jet velocity, and co-flow velocity on the ignition characteristics of methane/air premixed jet were investigated on a controllable thermal-atmosphere combustion experimental system. According to the experimental law, the optimization suggestions for the lean-burn control strategy of natural gas engines were proposed to reduce the occurrence of the misfire. The results show that the lean limit of methane/air premixed jet decreases and the rich limit increases as co-flow temperature rises, which is consistent with the distribution of ignition limits of most hydrocarbon fuel premixes. Besides, there are different critical equivalence

ratios at different jet velocities and co-flow velocities, below which the ignition temperature decreases sharply with the increase of jet equivalence ratio. Moreover, at a lower jet equivalence ratio (0.20~0.62), the improvement in jet velocity can reduce the ignition temperature and optimize the ignition characteristics.

Keywords: power machinery and engineering; natural gas engine; lean-burn; ignition temperature; misfire

碳达峰、碳中和的双碳目标向汽车领域提出了能源清洁高效利用的要求^[1], 推动了车用替代燃料的推广使用和超高热效率、超低排放的先进内燃机技术革新。天然气作为一种常见的车用替代燃料, 具有清洁燃烧、储量充足及抗爆性强等优点^[2-3]。研究表明, 天然气发动机可以有效降低温室气体和 NO_x 排放^[4]。

天然气发动机的热效率相对较低, 为了有效提高燃油经济性, 发动机台架试验研究中广泛应用稀薄燃烧技术^[5]。发动机台架试验发现, 在天然气发动机中应用稀薄燃烧策略能够在一定程度上提高热效率, 但同时带来了火焰传播速度慢、着火不稳定和循环波动大等问题^[2, 6-7]。为改善燃烧稳定性、降低稀燃极限, 目前很多优化策略被提出并应用: 如天然气掺氢以提高稀燃条件下火焰传播速度^[7-8]; 在发动机改质缸内喷入甲醇进行热化学改质, 拓宽稀燃极限^[9]; 提高压缩比, 改进喷射策略以缩短燃烧持续期^[10-11]; 优化点火系统, 提高点火能量, 从而对火焰早期发展起到优化作用, 以减少失火的发生^[12-14]。

现阶段对于天然气稀薄燃烧优化的研究主要借助于发动机台架试验, 而本研究基于可控热氛围燃烧器试验系统, 在高温湍流场中开展甲烷-空气

收稿日期: 2022-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(51576141)

第一作者: 于洋, 博士生, 主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制。E-mail: 1710978@tongji.edu.cn

通信作者: 吴志军, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制。

E-mail: zjwu@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

预混射流稀薄燃烧试验,直观且高效地探究射流当量比、射流速度和协流速率对着火特性的影响规律,并对天然气发动机的稀薄燃烧控制策略提出优化建议。

1 试验系统及方法

1.1 可控热氛围燃烧器试验系统

可控热氛围燃烧器试验系统主要由燃烧器主体、供气系统、测量系统、冷却系统和控制系统组成,如图1所示。试验系统的工作原理如下:首先氢气和空气在燃烧器内预混,到达燃烧器上方时进行引燃,形成稳定的协流热氛围场,随后改变氢气流量来调节协流温度,当协流温度达到指定值时,通过控制系统喷射一定脉宽的甲烷—空气预混合气,混合气在高温下着火形成起升火焰,最后由高速摄影仪拍摄记录射流火焰的燃烧过程。

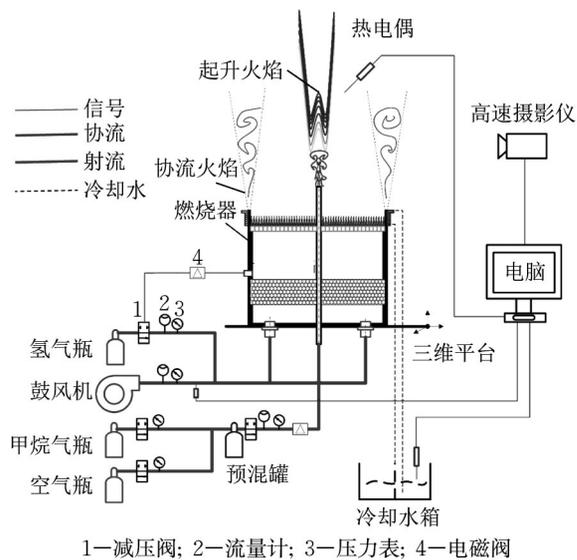


图1 试验系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

可控热氛围燃烧器是试验系统的核心,如图2

所示。燃烧器燃烧铜盘直径为200 mm,铜盘中央的射流喷管内径为4.7 mm,用于喷射射流预混合气。使用鼓风机将空气经燃烧器底部引入,在燃烧器铜盘上方形成湍流场,最后协流场中氢气和空气燃烧后的燃烧产物形成稳定的热氛围(800~1300 K)。使用OMEGA P30R-010型号的B型热电偶丝测量协流温度,测量精度为1 K。试验过程中使用高速摄影仪进行图像采集,由于稀燃条件下甲烷—空气预混射流火焰较暗,为最大程度上捕捉火焰信息,调节高速摄影仪的设置参数如表1所示。

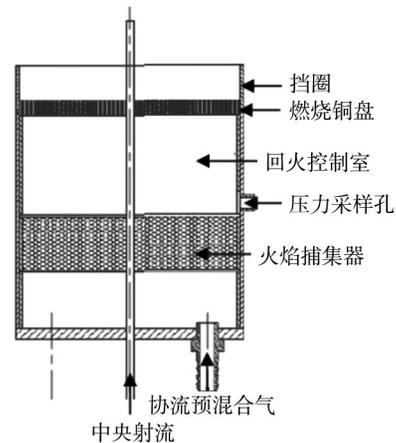


图2 可控热氛围燃烧器示意

Fig. 2 Schematic diagram of a controllable thermal-atmosphere burner

表1 高速摄影仪参数设置

Tab. 1 Parameter settings of high-speed camera

相机参数	帧率/fps	曝光时间/ μs	分辨率/pixel
试验设置	10	99 000	512×512

1.2 边界条件设置

射流当量比(ϕ_{jet})指的是射流预混罐内的甲烷—空气预混合气的燃空当量比。根据各试验工况所需的射流当量比,可以计算预混罐中的实际空燃比,而后通过气体分压定律可以计算出甲烷与空气气瓶的充气压力,如表2所示。

表2 各试验工况下充气压力与射流当量比的对应关系

Tab. 2 Corresponding relationship between adjustment pressure and jet equivalence ratio

工况	甲烷充气压力/MPa	空气充气压力/MPa	实际空燃比	射流当量比
工况1	0.20	0.140	19.82	0.87
工况2	0.15	0.120	24.63	0.70
工况3	0.15	0.145	27.64	0.62
工况4	0.10	0.120	37.85	0.45
工况5	0.05	0.140	84.71	0.20

协流速率($V_{\text{co-flow}}$)指协流预混合气从铜盘小孔流出后的速率。试验中通过调节涡街流量计来改变协流流量,并根据铜盘尺寸计算对应的协流速率。射流速率(V_{jet})指射流预混合气从喷管喷入热氛围场中的速率,试验中通过改变预混罐的喷射压力来控制喷管中射流预混合气的体积流量,采用OMEGA FMA 5544质量流量控制器对射流流量与喷射压力之间的对应关系进行标定,并根据喷管内

径计算出对应的射流速率。试验工况的具体设置如表3所示,结合式(1)和式(2)对试验工况下协流场的雷诺数、湍流强度分别进行计算。协流速率由 $2.65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 升高到 $3.75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,协流场雷诺数由36 283升高到51 344,湍流强度在4%附近变化。

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (1)$$

式中: Re 为雷诺数; ρ 、 μ 分别为流体的密度和黏度; v 、 L 分别为流场的特征速率和特征长度。

表3 试验工况设置

Tab. 3 Experimental condition settings

射流当量比	射流速率/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	协流速率/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	喷射时间/ms
0.20, 0.45, 0.62, 0.70, 0.87	40, 58, 74, 89, 106, 121	2.65, 3.01, 3.32, 3.75	500

$$I = 0.16 Re^{-0.125} \quad (2)$$

式中: I 为湍流强度。

1.3 试验流程

可控热氛围燃烧器的试验流程如下:首先检查试验设备,确定设备能够正常运行后打开冷却水路;而后根据试验工况的射流当量比用预混罐配置甲烷—空气预混合气,并调节预混罐的喷射压力到指定值;随后启动鼓风机,调整空气流量达到目标值,待流场稳定后引燃小火焰;缓慢打开氢气浮子流量计,用引燃小火焰点燃整个协流场后关闭引燃火焰并调节协流温度至目标值;待协流温度稳定后,喷射射流预混合气,此时喷射信号会同步触发高速相机进行图像采集;拍摄完成后,缓慢关闭氢气浮子流量计,使燃烧器逐渐冷却至室温。

1.4 着火温度的判定过程

由于实验中低射流当量比时相机捕捉的火焰较淡,因此使用MATLAB软件对火焰图像进行亮度增强处理,增强255倍后,观察图像,判定是否发生着火,如图3所示。其中图3a为未着火工况,图3b为发生着火工况,左侧为高速摄影仪拍摄的原始图像,右侧为进行亮度增强后的图像,图像下方白色的区域是高温下发光的热电偶。图3b在图像处理后,在燃烧器上空可以明显观测到射流火焰,因而判定在当前协流温度下射流混合气发生着火。

为了确定当前控制边界下甲烷—空气预混射流的着火温度,需降低协流温度再次试验,当协流温度降低后射流气体不能着火时则升高协流温度继续试验,这样逐渐确定着火温度所在的温度区间。在此区间内进行重复试验,每个温度点重复试验5次,最终确定预混射流的着火温度。图4是协流速率为 $3.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、射流速率为 $74 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、射流当

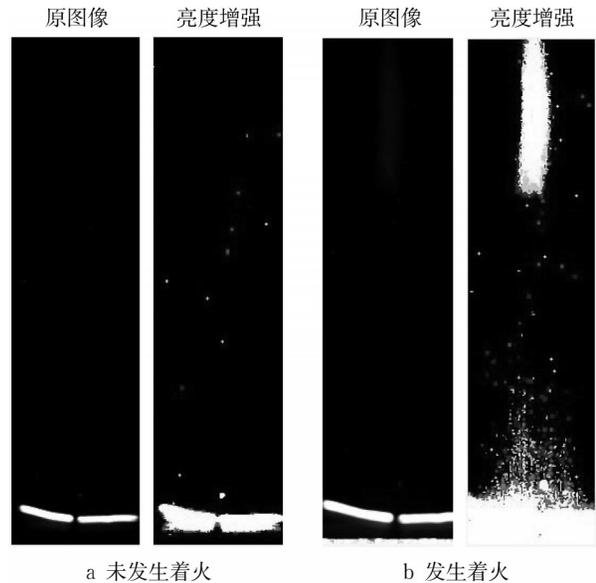


图3 射流着火判断

Fig. 3 Judgment of jet ignition

量比为0.87时预混射流着火温度的确定过程。图4a中,1表示该协流温度下发生着火现象,0表示未发生着火现象。图4b为每个温度点进行5次重复试验后预混射流着火比例的统计结果。当协流温度为880 K、881 K和882 K时,5次重复试验后预混射流均未发生着火,而协流温度为883 K、884 K和885 K时,分别发生2次、4次和3次着火现象,因此认为该工况下甲烷—空气预混射流的着火温度为883 K。

2 试验结果及分析

不同工况下甲烷—空气预混射流着火温度的变化规律如图5所示,符合大多数碳氢燃料预混合气

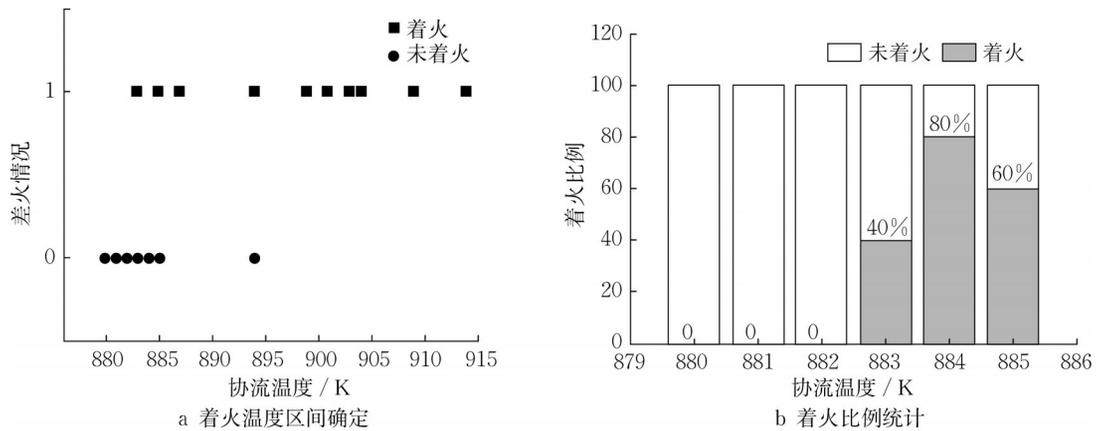


图4 着火温度确定过程

Fig. 4 Determination of ignition temperature

着火界限的分布规律,即随着温度的升高,稀燃极限降低而富燃极限升高。

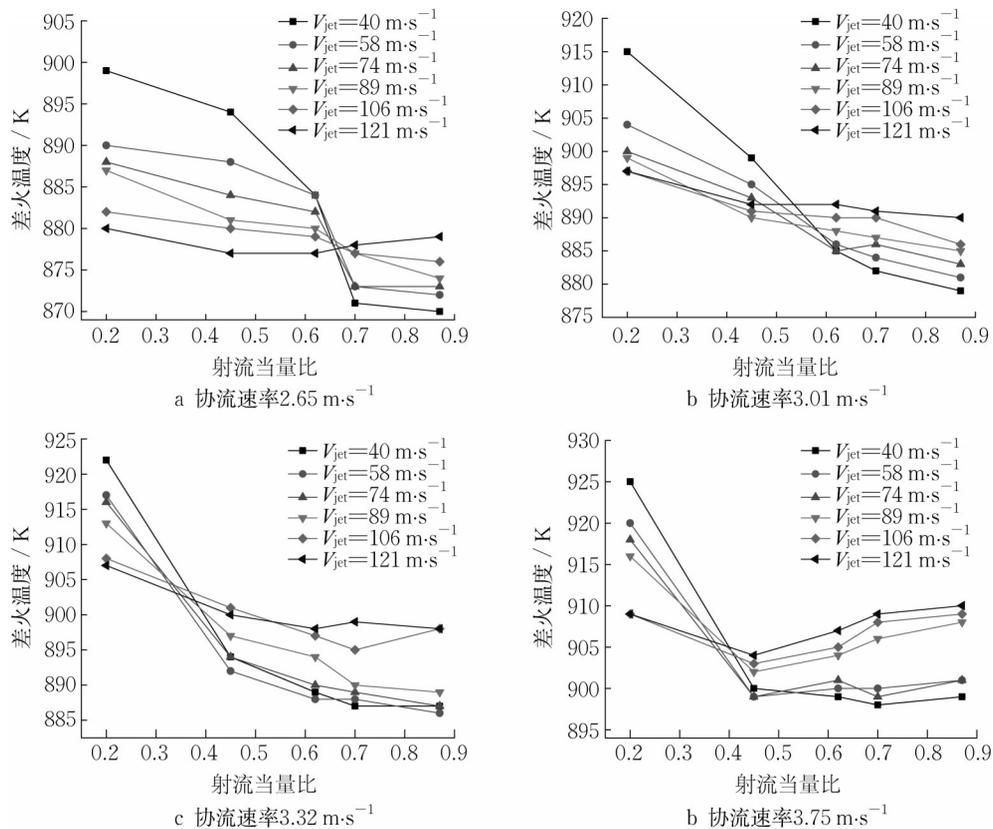


图5 不同工况下着火温度的变化规律

Fig. 5 Variation of ignition temperature under different operating conditions

2.1 射流当量比对着火温度的影响

图6是射流速率为 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时不同协流速率下着火温度随射流当量比变化规律。整体来看,随着射流当量比的升高,着火温度不断降低。当射流当量比为0.2时,此时预混合气最为稀薄,对应的着火温度也是最高的。当射流当量比在0.45~0.62时,

着火温度显著降低。而当射流当量比高于0.62时,着火温度虽仍有下降但变化趋势较为稳定。可以认为图6所示的工况中,在0.45到0.62这个范围内存在一个临界当量比,射流当量比高于临界当量比时着火性能较优。

图7是射流速率为 $74\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时不同协流速率下着

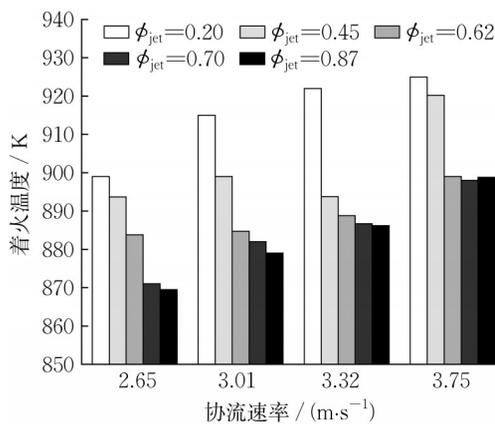


图6 射流速率 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时着火温度随射流当量比的变化
Fig. 6 Variation of ignition temperature with jet equivalence ratio at a jet velocity of $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

火温度随射流当量比的变化规律。虽然射流速率发生改变,但同样存在一个临界当量比,临界当量比前后着火温度有着相似的变化规律,因此,在实际天然气发动机稀薄燃烧工况下,建议控制混合气当量比高于临界当量比以提高燃烧稳定性,优化着火性能。

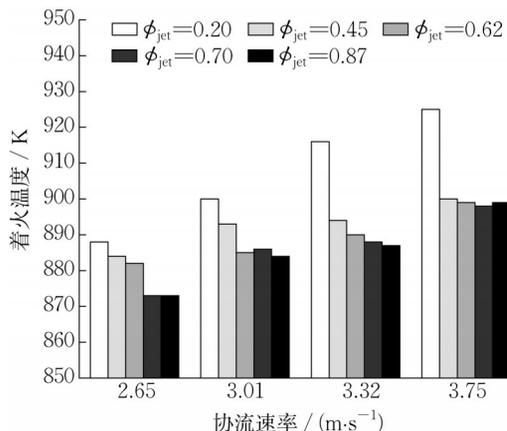


图7 射流速率 $74\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时着火温度随射流当量比的变化
Fig. 7 Variation of ignition temperature with jet equivalence ratio at a jet velocity of $74\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

2.2 射流速率对着火温度的影响

图8是协流速率为 $2.65\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时不同射流当量比下甲烷—空气预混射流的着火温度随射流速率的变化规律。可以发现,在不同的射流当量比工况下,射流速率对着火温度的影响存在差异。较低射流当量比工况下($0.20\sim 0.62$),射流速率的升高降低了着火温度,促进着火。而较高的射流当量比工况下($0.70\sim 0.87$),射流速率的提升使得着火温度升高,抑制了预混射流着火。

射流速率主要影响射流预混和气的换热升温 and

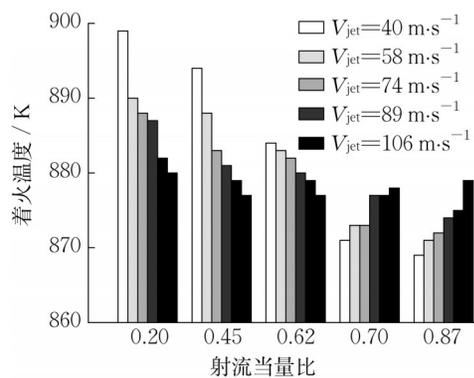


图8 协流速率 $2.65\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时着火温度随射流速率的变化
Fig. 8 Variation of ignition temperature with jet velocity at a co-flow velocity of $2.65\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

燃料供给速度,二者是影响着火的关键因素。一方面射流速率的提高会缩短射流混合气在热氛围场的换热时间,弱化换热效果,不利于热量的积聚;另一方面,提高射流速率是通过提高喷射压力来实现的,而射流动量也随之增加,即相同喷射时间内燃料供给量更多。

在较低射流当量比工况下,射流混合气中燃料占比低,此时射流速率的提高可以有效补充燃料,增加燃烧放热量,促进多点燃烧。而在较高射流当量比下,混合气中燃料较为充足,射流气体与高温热氛围间的换热效果是射流着火的关键因素,此时射流速率的提高导致换热时间大幅降低,不利于热量的积聚,因此着火性能变差。

Song等^[11]将天然气喷射压力从 0.5 MPa 升高到 1.1 MPa ,降低了平均有效压力的循环波动系数,提高了燃烧稳定性。本文研究射流当量比较低的工况,通过提高喷射压力来增加射流速率,能够显著降低着火温度,优化着火性能。因此对于天然气发动机,在燃空当量比较低的稀燃工况下,建议适当提高喷射压力以优化着火性能,提高燃烧稳定性。

2.3 协流速率对着火温度的影响

图9和图10分别是较低射流速率($40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和较高射流速率($121\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)下甲烷—空气预混射流的着火温度随协流速率的变化规律。在不同射流当量比下,预混合气的着火温度整体上均随协流速率的增加而升高,协流速率的变化会带来着火温度的波动。说明热氛围中湍流度的升高会增加甲烷—空气预混合气燃烧的不稳定性,不利于射流着火。提高热氛围场中的湍流强度对着火特性并未产生优化作用,实际天然气发动机中需要合理组织燃烧室内的湍流以优化着火。

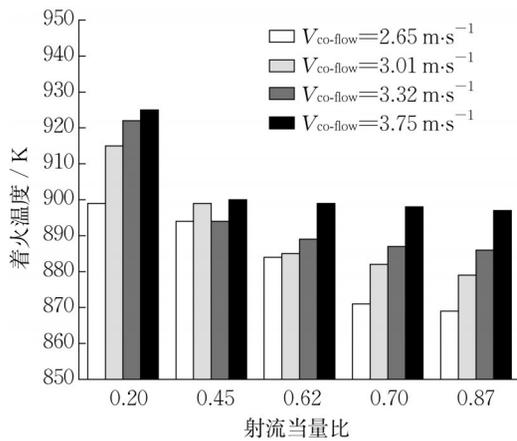


图9 射流速率 $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时着火温度随协流速率的变化

Fig. 9 Variation of ignition temperature with co-flow velocity at a jet velocity of $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

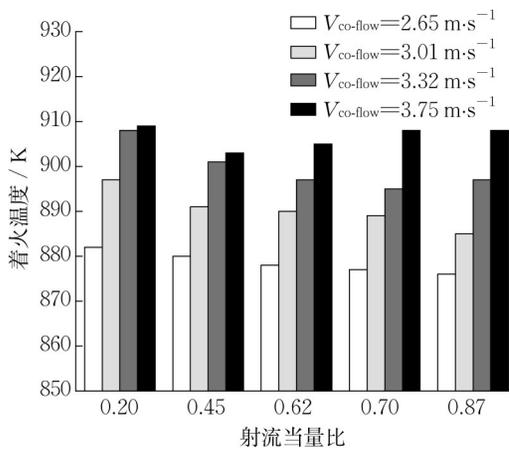


图10 射流速率 $121 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时着火温度随协流速率的变化

Fig. 10 Variation of ignition temperature with co-flow velocity at a jet velocity of $121 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

3 结论

(1)随着协流温度的升高,甲烷—空气预混射流的稀燃极限降低而富燃极限升高,符合大多数碳氢燃料着火界限的分布规律。

(2)在不同的射流速率和协流速率下,均存在临界射流当量比。在低于临界当量比时,着火温度随射流当量比的升高而迅速降低;在高于临界当量比时,着火温度变化趋势较为稳定,射流预混合气的着火性能较好。

(3)在不同的射流当量比下,射流速率对着火特性的影响存在差异。当射流当量比较低时(0.20~0.62),着火温度随射流速率的增加而降低;当射流当量比较高时(0.70~0.87),规律相反。

(4)在实际的天然气管道稀燃工况中,建议控

制实际当量比高于临界当量比以优化着火性能。对于当量比较低的工况,建议适当提高喷射压力以提高燃烧稳定性。

作者贡献声明:

于洋:现场试验,数据处理与分析,论文撰写。

瞿宗举:试验设计,现场试验,数据汇总。

谢巍:试验指导,现场试验。

邓俊:试验指导,论文校核。

吴志军:项目构思,课题指导,论文审阅与修改。

参考文献:

- [1] 陈玲华. 中国汽车企业的碳中和战略——目标、路径与举措[J]. 北京汽车, 2022(2): 9. DOI: 10.14175/j.issn.1002-4581.2022.02.003.
CHEN Linghua. The carbon neutral and strategic goals, paths and measures of Chinese automobile companies [J]. Beijing Automotive Engineering, 2022(2): 9. DOI: 10.14175/j.issn.1002-4581.2022.02.003.
- [2] 张韧. 基于光学发动机的天然气稀薄燃烧特性实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
ZHANG Ren. Experimental Study on Lean Combustion Characteristics of Natural Gas Based on Optical Engine [D]. Tianjing: Tianjing University. 2019.
- [3] 王利民, 卫海桥, 潘家营, 等. 天然气-汽油双燃料发动机燃烧特性试验研究[J]. 内燃机工程, 2018, 10(5): 39. DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2018.05.006.
WANG Limin, WEI Haiqiao, PAN Jiaying, et al. Experimental investigations into combustion characteristics of natural gas-gasoline dual-fuel engines [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2018, 10(5): 39. DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2018.05.006.
- [4] GRAHAM L A, RIDEOUT G, ROSENBLATT D, et al. Greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(19): 4665. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.01.049.
- [5] 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
JIANG Deming. Combustion and emission of internal combustion engines [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- [6] 李伟峰, 刘忠长, 王忠恕, 等. N_2 和 CO_2 稀释对天然气发动机燃烧和 NO_x 排放的影响[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2015, 45(4): 1116. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201504014.
LI Weifeng, LIU Zhongchang, WANG Zhongshu, et al. Effects of N_2 and CO_2 dilution on the combustion and NO_x emissions of natural gas engines [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(4): 1116. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201504014.
- [7] 马凡华, 王宇, 刘海全, 等. 稀燃天然气掺氢发动机的热效率

- 与排放特性[J]. 内燃机学报, 2008, 26(1): 44. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0909.2008.01.006.
- MA Fanhua, WANG Yu, LIU Haiquan, *et al.* Thermal efficiency and emission characteristics of a lean burn HCNG engine[J]. Transactions of CSICE, 2008, 26(1): 44. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0909.2008.01.006.
- [8] IORIO S D, SEMENTA P, VAGLIECO B M. Analysis of combustion of methane and hydrogen - methane blends in small DISI (direct injection spark ignition) engine using advanced diagnostics[J]. Energy, 2016, 108(1): 99. DOI: 10.1016/j.energy.2015.09.012.
- [9] 邵宇,何卓遥,徐震,等. 改质缸当量比对缸内热化学燃烧模式稀燃天然气发动机燃烧性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(11): 2532. DOI: CNKI: SUN: GCRB. 0.2018-11-030.
- SHAO Yu, HE Zhuoyao, XU Zhen, *et al.* Effects of the reforming cylinder equivalence ratio on the combustion of in-cylinder TFR lean burn natural gas engine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(11): 2532. DOI: CNKI: SUN: GCRB. 0.2018-11-030.
- [10] FU J, SHU J, ZHOU F, *et al.* Experimental investigation on the effects of compression ratio on in-cylinder combustion process and performance improvement of liquefied methane engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113: 1208. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.11.048.
- [11] SONG J, CHOI M, KIM D, *et al.* Combustion characteristics of methane direct injection engine under various injection timings and injection pressures[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2017, 139(8), 082802: 1. DOI: 10.1115/1.4035817.
- [12] RICHARDSON S, MCMILLIAN M H, WOODRUFF S D, *et al.* Misfire, knock and NO_x mapping of a laser spark ignited single cylinder lean burn natural gas engine[J]. SAE Technical Papers, 2004, 1853: 1. DOI: 10.4271/2004-01-1853.
- [13] SRIVASTAVA D K, WINTNER E, AGARWAL A K. Effect of laser pulse energy on the laser ignition of compressed natural gas fueled engine[J]. Optical Engineering, 2014, 53(5): 056120: 1. DOI: 10.1117/1.OE.53.5.056120.
- [14] LIN C, WEI H, REN Z, *et al.* Effects of spark plug type and ignition energy on combustion performance in an optical SI engine fueled with methane[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 148: 188. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.11.052.

(上接第787页)

- relaxation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(12): 10.
- [7] 向一攀. 基于数据包络分析的常规公交站间调度效率优化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- XIANG Yibo. Research on optimization of conventional bus station dispatching based on data envelopment analysis [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.
- [8] 毛霖,李文权. 基于灰关联分析的公交智能化调度评价方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(1): 190.
- MAO Lin, LI Wenquan. Evaluation method of transit intelligent dispatching based on gray relation analysis [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(1): 190.
- [9] 刘志强,张利,吕学,等. 基于离散Hopfield神经网络的公交调度评价方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(2): 77.
- LIU Zhiqiang, ZHANG Li, LYU Xue, *et al.* Evaluation method about bus scheduling based on discrete hopfield neural network [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2011, 11(2): 77.
- [10] 张春勤,隗志才,刘志凯. 公共交通服务绩效评价研究综述[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(1): 1.
- ZHANG Chunqin, JUAN Zhicai, LIU Zhikai. Performance evaluation of public transit service: a research review [J]. Application Research of Computers, 2015, 32(1): 1.
- [11] FRIED H O, LOVELL C A K, SCHMIDT S S. Accounting for environmental effects and statistical noise in data envelopment analysis [J]. Journal of Productivity Analysis, 2002, 17(1): 157.
- [12] TONE K. A slacks-based measure of super- efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2002, 143: 32.