

文章编号:1671-6833(2024)05-0045-07

稀燃工况下天然气发动机燃烧不稳定性分析

丁顺良¹, 耿海棠¹, 高建设¹, 陶征¹, 宋恩哲²

(1. 郑州大学 机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了研究稀燃工况下天然气发动机燃烧不稳定性的变化规律,在25%负荷、转速为1 000 r/min工况下针对6组不同过量空气系数 λ 进行试验,采用统计分析方法研究了最大爆压、最大爆压对应的曲轴转角、指示平均有效压力($IMEP$)的频率分布规律,并分析了各燃烧特征参数之间的关联性。结果表明:随着 λ 增大,天然气发动机燃烧不稳定性增强;最大爆压、最大爆压对应曲轴转角的频率分布范围逐渐增大, $IMEP$ 频率分布范围先减小后增大,循环间差异性均增加;各燃烧特征参数的关系图中,点的分布范围均增大,且存在线性关系,当混合气浓度过稀时线性关系减弱。稀燃工况下天然气发动机产生燃烧不稳定分析,为天然气发动机稀燃稳定性优化和控制提供了理论依据。

关键词: 天然气发动机; 燃烧不稳定性; 过量空气系数; 统计分析

中图分类号:TK464

文献标志码:A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2024.05.014

目前,能源问题日趋严重,发动机排放法规日趋严格,燃油价格也不断提高,发展替代燃料发动机变得越来越重要^[1]。天然气因燃烧清洁、单位热值高、安全可靠、价格低廉、储量丰富、绿色环保等优点,成为燃油发动机替代燃料的首选之一^[2]。相对于新能源动力,天然气发动机技术成熟度较高^[3];相对于燃油发动机,天然气发动机污染物和碳排放均有较大程度降低。因此,高效清洁的天然气发动机技术已成为发动机技术主要发展方向之一^[4]。虽然稀燃工况下的天然气发动机热效率可以进一步提高^[5],但是在稀燃工况下,尤其是低负荷运行期间,天然气发动机会产生较严重的循环变动,导致发动机燃烧不稳定,输出功率下降,污染物排放增多^[6]。研究天然气发动机燃烧特征参数变化规律可以进一步揭示其在稀燃工况下燃烧不稳定性的演化机理,实现燃烧稳定性优化控制,从而提高天然气发动机燃油经济性、动力性和燃烧稳定性。

国内外学者利用统计分析等方法对发动机燃烧不稳定性进行了研究。Gupta等^[7]对可变压缩比燃用甲烷和汽油燃料的火花点火式发动机燃烧不稳定

性进行了研究,利用统计分析方法研究了指示平均有效压力($IMEP$)、最大爆压 p_{max} 及最大爆压对应曲轴转角 $\theta_{p_{max}}$ 的频率分布。研究发现,与汽油相比,以甲烷作为燃料时,发动机在8.5:1、10:1和12:1的压缩比运行时制动比能耗和排放量均有所降低。Duan等^[8]研究了不同喷射策略对涡轮增压发动机燃烧不稳定性的影响,通过对缸内压力、 p_{max} 、 $\theta_{p_{max}}$ 、最大压力升高率 dp_{max} 、最大压力升高率对应的曲轴转角 $\theta_{dp_{max}}$ 和燃烧持续期等参数进行统计分析,发现采用双滞止喷射策略可以缓解缸内压力波动并实现集中整体放热。Huang等^[9]通过分析 $IMEP$ 的频率分布、 p_{max} 与 $\theta_{p_{max}}$ 的关联性、 dp_{max} 与 $\theta_{dp_{max}}$ 的关联性,研究了火花点火式掺氢发动机在不同废气再循环率和掺氢比工况下燃烧特征参数的变化规律。研究表明,当燃料量与种类不变时,随着废弃循环率的增加,缸内 p_{max} 和 dp_{max} 均下降,燃烧不稳定性增强。Yu等^[10]研究了氢气直喷式火花点火汽油机的燃烧不稳定性,分析了不同节气门开度下,10%的氢含量对稀燃工况燃烧不稳定性的影响。结果表明,加氢后 $IMEP$ 和 dp_{max} 均增大,其相应的循环变动减小,

收稿日期:2024-04-10;修订日期:2024-05-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51906225);船舶动力工程技术交通运输行业重点实验室(武汉理工大学)开放基金项目(KLMPET2021-05);教育部“春晖计划”合作科研项目(HZKY20220281)

作者简介:丁顺良(1988—),男,河北石家庄人,郑州大学副教授,博士,主要从事气体燃料发动机控制与测试,E-mail: dingshunliang@126.com。

通信作者:陶征(1970—),男,河南驻马店人,郑州大学讲师,博士,主要从事机电一体化研究,E-mail: taozheng@zzu.edu.cn。

引用本文:丁顺良,耿海棠,高建设,等.稀燃工况下天然气发动机燃烧不稳定性分析[J].郑州大学学报(工学版),2024,45(5):45-51.(DING S L, GENG H T, GAO J S, et al. Analysis of combustion instability for a natural gas engine with lean-burn conditions [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(5): 45-51.)

p_{\max} 与 $\theta_{p_{\max}}$ 具有较强的相关性,加氢可以扩展发动机稀燃极限。Chen 等^[11]研究了火花点火发动机燃烧特性和燃烧不稳定性,统计分析了 $IMEP$ 、 p_{\max} 和峰值放热率等燃烧特征参数的循环变化规律。结果表明,与乙醇和正丁醇相比,发动机使用甲醇燃料具有更高的燃烧速率、更高的燃烧稳定性及更好的稀燃能力。郑建军等^[12]研究了天然气直喷发动机在不同压缩比工况下, $IMEP$ 与燃烧持续期、主燃烧期及火焰发展期间的关联性。研究表明, $IMEP$ 更明显地反映出发动机燃烧不稳定性,较低的压缩比会使发动机产生燃烧不稳定的现象,增大压缩比会在一定程度上增强燃烧稳定性。张鹏^[13]分析了不同燃油对发动机燃烧不稳定性的影响。结果表明,发动机燃用煤制油时燃烧不稳定性较弱,燃烧特征参数之间具有较强的相关性,通过缩短滞燃期可以改善燃烧过程,进而减弱柴油机的燃烧不稳定性。

国内外学者深入研究了发动机燃烧不稳定性,但目前的研究多是基于循环变动系数或统计方法,通过分析缸内压力等相关参数来研究燃烧不稳定性

的整体变化规律,而缺乏对参数时间序列波动规律的研究,发动机燃烧循环间差异性及燃烧特征参数关联性的研究相对也还不够系统。除此之外,虽然有部分研究针对发动机稀燃工况的燃烧不稳定性,但是涉及稀燃极限工况的研究较少。基于此,为了改善天然气发动机稀燃稳定性,拓宽发动机稀燃稳定运行范围,本文以过量空气系数 λ 为关键影响因素,利用多个燃烧特征参数如 $IMEP$ 、 p_{\max} 、 $\theta_{p_{\max}}$ 、 dp_{\max} 、 $\theta_{dp_{\max}}$ 、 $CA50$ (燃烧放热量达到总放热量 50% 时对应的曲轴转角)以及燃烧持续期等,分析燃烧循环间差异性及燃烧特征参数关联性,并借助循环变动系数和统计分析方法进行验证,从而对发动机燃烧不稳定性的变化规律进行定性、定量研究。

1 试验设备及方案

本文以一台电控多点顺序喷射天然气发动机为研究对象,天然气发动机试验台示意图如图 1 所示,进气方式为自然吸气,燃料供给形式为多点顺序喷射。表 1 给出了天然气发动机主要参数。

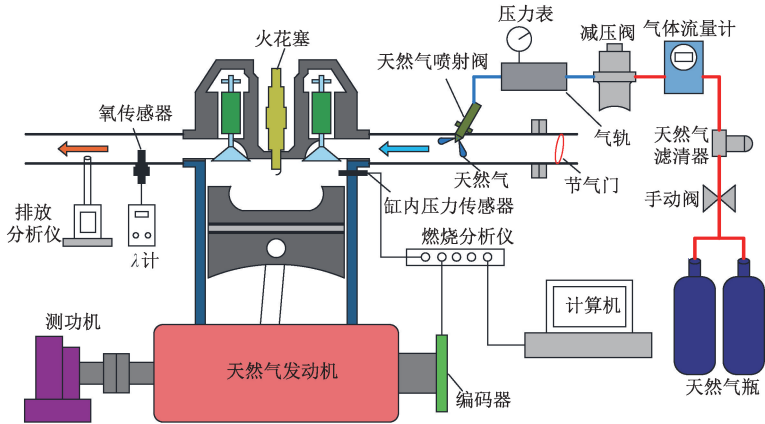


图 1 试验台示意图

Figure 1 Schematic diagram of the experimental bench

表 1 天然气发动机主要参数	
Table 1 Main parameters of the natural gas engine	
参数	数值
气缸数	2
缸径/mm	135
行程/mm	140
压缩比	11
标定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
怠速转速/(r·min ⁻¹)	500
标定功率/kW	29.4
最大扭矩/(N·m)	200
单缸排量/L	2

试验过程中控制发动机扭矩不变以保持进入气缸内的燃料量恒定,天然气发动机节气门开度由电子节气门驱动控制模块调节,通过控制进入气缸的空气

量来改变 λ ,通过氧传感器与 λ 计实时监测 λ 的数值。发动机运行过程中,缸内燃烧压力由缸压采集系统进行测量,最终在计算机内呈现缸内压力时间序列,缸压采集系统由燃烧分析仪、缸压传感器、编码器和计算机等构成,该系统的最高采集分辨率为 0.03 °CA。

在低负荷工况下,天然气发动机燃烧不稳定性更为明显,为了研究发动机在稀燃工况燃烧不稳定性的变化规律,扩展天然气发动机稳定运行界限,选取了天然气发动机可在较大 λ 范围内进行试验的转速。因此,在 25% 负荷、转速为 1 000 r/min 时, $\lambda=1.0$ 、1.2、1.4、1.6、1.8、1.9 工况下分别进行试验并采集数据,采样间隔为 1 °CA。

图 2 给出了天然气发动机在 $\lambda=1.0$ 、1.6、1.9 工况下 50 个连续燃烧循环的缸内压力时间序列。

从图 2 中可以看出,峰值压力波动随着 λ 增大而波动明显,表明缸内燃烧循环间差异性逐渐增大。

图 3 给出了天然气发动机在 $\lambda = 1.0$ 、 1.6 、 1.9

工况下 1 800 个连续循环的 $IMEP$ 时间序列。从图 3 可以看出,随着 λ 增大, $IMEP$ 波动范围增大,燃烧稳定性减弱。

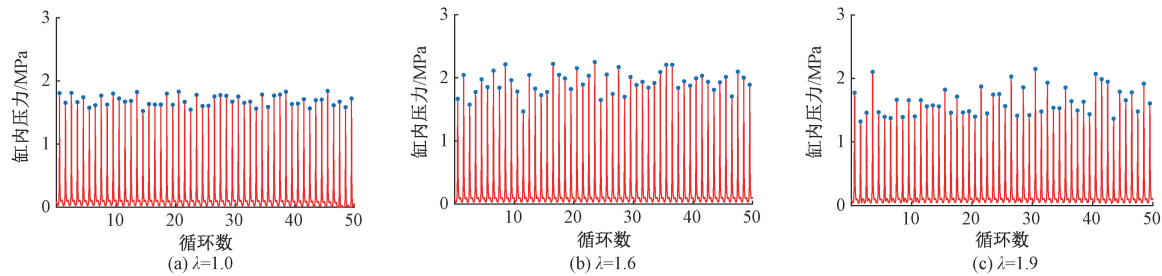


图 2 缸内压力时间序列

Figure 2 In-cylinder pressure time series

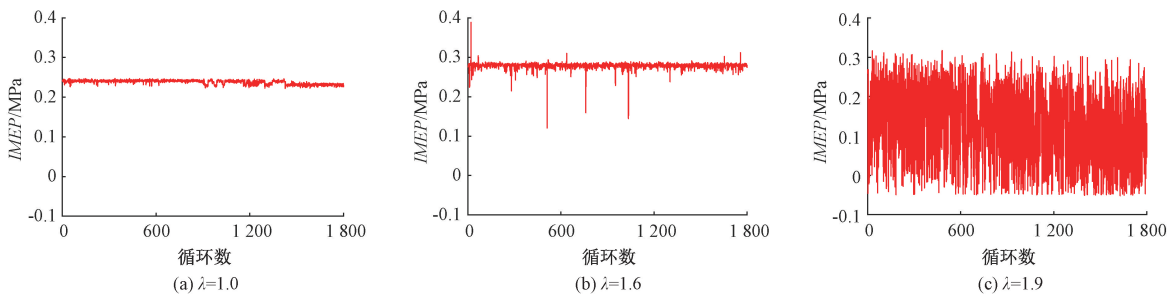


图 3 IMEP 时间序列

Figure 3 IMEP time series

2 燃烧特征参数的频率分布

2.1 最大爆压的频率分布

图 4 给出了不同 λ 工况下 1 800 个连续燃烧循环 p_{\max} 频率分布图。

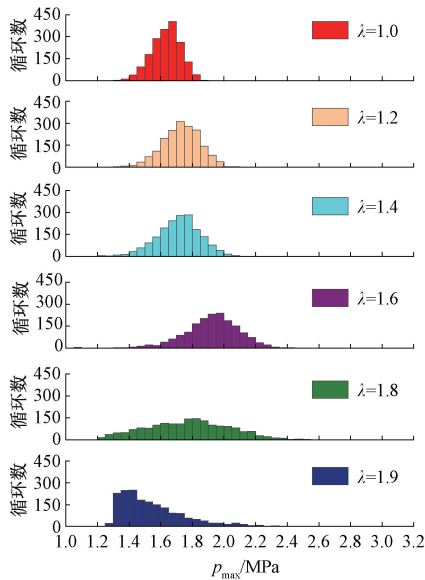


图 4 p_{\max} 的频率分布

Figure 4 Frequency distribution of p_{\max}

由图 4 可以看出, $\lambda = 1.0$ 时, p_{\max} 平均值为 1.634 MPa, p_{\max} 频率分布集中在 1.2~1.9 MPa, 分布图覆盖范围小, 表明此时循环间差异性小, 发动机燃烧不稳定性较弱; λ 从 1.0 增加到 1.6 时, p_{\max} 频

率分布逐渐分散, 分布区间由 1.2~1.9 MPa 变化为 1.0~3.0 MPa, 分布覆盖范围增大, p_{\max} 频率分布图两侧散落的小频带逐渐增多, p_{\max} 平均值由 1.634 MPa 增大至 1.922 MPa, 表现为 p_{\max} 的频率分布逐渐右移, 最大频带对应的 p_{\max} 值逐渐增大, 缸内燃烧质量得到提高, 但最大频数由 404 减小至 293, 表明此时循环与循环之间存在较大的差异; λ 从 1.8 增加到 1.9, p_{\max} 频率分布更加分散, 覆盖范围继续增大, 频率分布图中最大频带对应的 p_{\max} 值减小, p_{\max} 平均值由 1.773 MPa 减小至 1.542 MPa, p_{\max} 的频率分布逐渐左移, 缸内火焰平均速度降低, 燃烧恶化, 尤其当 $\lambda = 1.9$ 时, p_{\max} 分布趋势由类似正态分布变为高耸-低平的分布, 此时循环间差异性增大, 燃烧不稳定性更加明显。

λ 从 1.0 增加到 1.6 时, 由于燃料量不变, 而进入缸内的空气质量增加, 使燃料与空气的混合气总质量增加, 同时一定程度的稀燃促进燃烧质量提高, 使得 p_{\max} 逐渐增大, 但同时稀燃降低了燃烧速度。 λ 继续从 1.8 增加到 1.9, 此时缸内混合气浓度过稀, 缸内火焰传播速度减慢, 滞燃期增加, 不完全燃烧及失火概率增大, 导致 p_{\max} 逐渐减小。由此可见, λ 增加会使发动机的燃烧更加不稳定。

2.2 最大爆压对应曲轴转角的频率分布

$\theta_{p_{\max}}$ 是火焰速度快慢的标志, 其平均值和标准

差分别反映了平均火焰速度和火焰速度的变化^[7]。通过分析 $\theta_{p_{\max}}$ 可以观测缸内火焰速度的波动,以此来研究循环间的变动。在往复式发动机中,为了获得最佳扭矩和热效率, $\theta_{p_{\max}}$ 通常应达到 10~15 °CA ATDC(上止点后)^[14],若提前或延迟过多,发动机输出功率都会降低,因此,研究燃烧特征参数 $\theta_{p_{\max}}$ 的波动 also 具有重要意义^[15]。图 5 给出了不同 λ 工况下 1 800 个连续燃烧循环 $\theta_{p_{\max}}$ 的频率分布图。 λ 从 1.0 增加到 1.4 时, $\theta_{p_{\max}}$ 的频率分布区间由 11~23 °CA ATDC 变化为 11~27 °CA ATDC,其频率分布覆盖范围变大,最大频数由 418 减小至 371,左右两侧小频带增多,此时大部分 $\theta_{p_{\max}}$ 滞后于 15 °CA ATDC,缸内燃烧未达到最佳状态。 $\lambda = 1.6$ 时, $\theta_{p_{\max}}$ 大部分位于 10~15 °CA ATDC,此时虽然燃烧不稳定性略有增强,但由于空气量增多,一定程度上改善了燃烧状况,使得输出扭矩和热效率也增加。 λ 从 1.6 增加到 1.8 时, $\theta_{p_{\max}}$ 频率分布在 0~24 °CA ATDC,分布图中小频带明显增多,表明此时循环间差异性逐渐增大。 $\lambda = 1.9$ 时,频率分布图覆盖范围左移且增大,分布图最大频数减小至 161,此时循环间存在较大差异性,燃烧不稳定性较强。

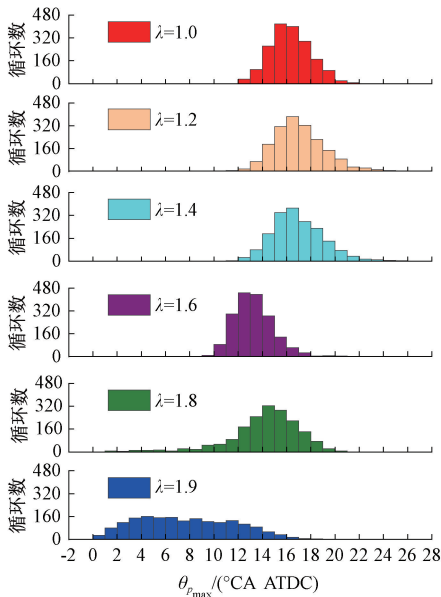


图 5 $\theta_{p_{\max}}$ 的频率分布

Figure 5 Frequency distribution of $\theta_{p_{\max}}$

2.3 IMEP 的频率分布

图 6 给出了不同 λ 工况下 1 800 个连续燃烧循环 IMEP 的频率分布图。 λ 从 1.0 增加到 1.6 时, IMEP 频率分布逐渐分散,频率分布区间由 0.22~0.25 MPa 增大至 0.12~0.39 MPa,最大频带对应的 IMEP 逐渐增大,IMEP 的频率分布逐渐右移,表明发

动机做功能力逐渐增强,但同时 IMEP 的频率分布图两侧散落的小频带逐渐增多,分布图中最大频数由 733 减小至 601,表明循环与循环间存在较大差异。 λ 增加到 1.8 和 1.9 时, IMEP 频率分布图更加分散,频率分布区间增大至 -0.050~0.317 MPa,分布图两侧散落的小频带增多,且频率分布图中 IMEP 含有负值,表明此时缸内存在部分燃烧及失火现象,缸内燃烧更加不稳定。这与 p_{\max} 和 $\theta_{p_{\max}}$ 分析得到的结论是一致的。

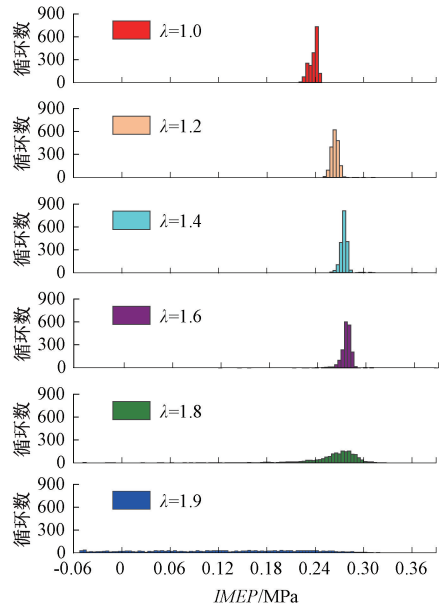


图 6 IMEP 的频率分布

Figure 6 Frequency distribution of IMEP

3 燃烧特征参数关联性分析

2.2 节分析提到,为了获得最佳扭矩和热效率,须使 $\theta_{p_{\max}}$ 接近上止点,因此,分析 p_{\max} 和 $\theta_{p_{\max}}$ 的关系在评估燃烧不稳定性时较为重要^[15]。Granet 等^[16]在分析这一关系时定义了 3 个区域,即 Linear 区域、Return 区域和 Hook-back 区域。在 Linear 区域中, p_{\max} 与 $\theta_{p_{\max}}$ 的关系呈线性分布;在 Return 区域, p_{\max} 较小, $\theta_{p_{\max}}$ 靠近上止点,此时缸内燃烧速率小于缸内容积变化速率;在 Hook-back 区域, p_{\max} 变化显著, $\theta_{p_{\max}}$ 变化较小。Duan 等^[17]的研究也发现了这 3 个区域的存在。本文在图 7 给出的 p_{\max} 和 $\theta_{p_{\max}}$ 的关系图中进一步验证了这一规律,当 λ 从 1.0 增大到 1.4 时, p_{\max} 和 $\theta_{p_{\max}}$ 的关系呈线性分布,此时关系图中大多数点分布在 Linear 区域, p_{\max} 和 $\theta_{p_{\max}}$ 分布集中, p_{\max} 越大, $\theta_{p_{\max}}$ 越靠近上止点。随着 λ 增加,燃烧质量得到一定程度的提高,相同曲轴转角位置对应的 p_{\max} 升高,但从 p_{\max} 和 $\theta_{p_{\max}}$ 关系图中可以看到部分点逐渐分散,表明此时燃烧不稳定性增强。当 λ 增加到 1.6 时, p_{\max} 和 $\theta_{p_{\max}}$ 关系图中的点分布在

Hook-back 区域, p_{\max} 变动范围增大, 而 $\theta_{p_{\max}}$ 分布集中。当 λ 增加至 1.8 和 1.9 时, p_{\max} 和 $\theta_{p_{\max}}$ 关系图中点的分布更加分散并出现拐点, 关系图中大部分点分布在 Return 区域和 Hook-back 区域, 少部分点位于 Linear 区域, 此时很大一部分 p_{\max} 值较小且 $\theta_{p_{\max}}$ 靠近上止点, 此时燃烧错过最佳相位, 缸内燃烧速率小于缸内容积变化速率, 缸内燃烧不稳定性较强。

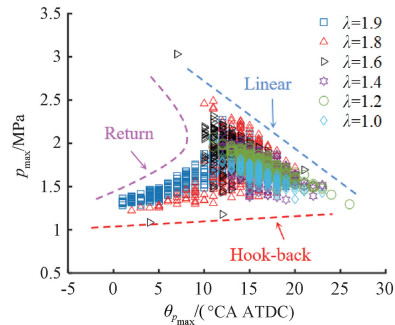


图 7 p_{\max} 和 $\theta_{p_{\max}}$ 的关联性

Figure 7 Correlation between p_{\max} and $\theta_{p_{\max}}$

图 8 给出了 p_{\max} 与 $IMEP$ 之间的关系。 λ 从 1.0 增加到 1.6 时, p_{\max} 与 $IMEP$ 呈现线性关系, 在图 8 中, p_{\max} 与 $IMEP$ 分布逐渐向右偏移, 分布范围逐渐增大且逐渐出现散落的点, 原因是随着 λ 增加, 空气质量增加, 缸内燃烧质量提高, 做功能力进一步增强, 但稀燃也导致缸内燃烧稳定性逐渐减弱。当 λ 继续增加时, p_{\max} 与 $IMEP$ 关系图中出现了拐点, 线性关系减弱, 此时进入缸内的空气过多, 火焰传播速度降低, 缸内出现不完全燃烧及失火现象。 $\lambda = 1.9$ 时, p_{\max} 与 $IMEP$ 关系图中左侧的分布更加明显, 原因是过稀的混合气导致缸内燃烧质量差, 燃烧错过了最佳相位, 缸内燃烧状况较差, 发动机做功能力严重下降。

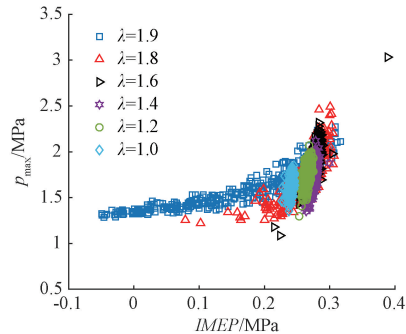


图 8 p_{\max} 和 $IMEP$ 的关联性

Figure 8 Correlation between p_{\max} and $IMEP$

图 9 给出了 p_{\max} 与燃烧中点 CA50 之间的关系图。研究 p_{\max} 与 CA50 的关系可以进一步深入分析缸内燃烧不稳定性的变化规律。 λ 从 1.0 增大到 1.6 时, CA50 分布在 5~30 °CA ATDC 之内, 且 p_{\max} 与 CA50 呈现明显的线性关系, λ 越小, 分布范围越

集中, CA50 越靠近上止点; $\lambda = 1.8$ 和 1.9 时, p_{\max} 与 CA50 关系图分布范围增大, 且线性关系减弱, 上止点前出现了少数点, 部分 p_{\max} 对应的 CA50 明显滞后于 30 °CA ATDC, 表明此时出现了后燃和失火现象, 导致缸内燃烧不稳定性急剧增强。

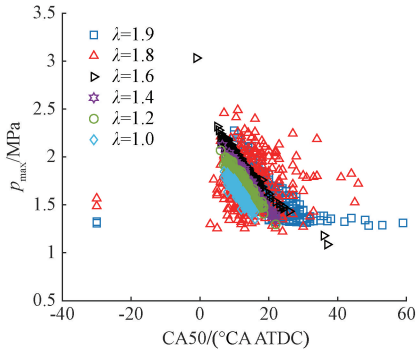


图 9 p_{\max} 和 CA50 的关联性

Figure 9 Correlation between p_{\max} and CA50

图 10 给出了 $IMEP$ 与燃烧持续期之间的关系图。 λ 从 1.0 增大到 1.6 时, 燃烧持续期稳定分布在 30~60 °CA ATDC, $IMEP$ 稳定分布在 0.2~0.3 MPa。随着 λ 增大, $IMEP$ 与燃烧持续期关系图向左偏移, 说明 λ 增大对减少燃烧持续期具有促进作用, 能提供缸内燃烧质量。 λ 增大到 1.8 和 1.9 时, 分布图左侧的点远离上止点, $IMEP$ 与燃烧持续期关系图中点的分布较分散, 表明混合气浓度过稀导致燃烧持续期延长, 此时异常燃烧现象频发, 燃烧状况恶化, 燃烧稳定性减弱, 发动机做功能力急剧下降。

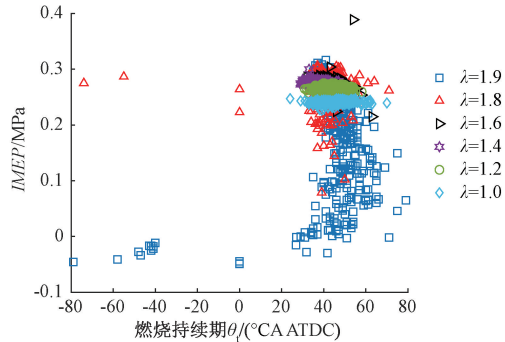


图 10 $IMEP$ 和燃烧持续期的关联性

Figure 10 Correlation between $IMEP$ and combustion duration

图 11 给出了不同 λ 工况下 dp_{\max} 与 $\theta_{dp_{\max}}$ 之间的关系图。通过 dp_{\max} 和 $\theta_{dp_{\max}}$ 可以进一步揭示放热率的变动。从图 11 可以看出, dp_{\max} 和 $\theta_{dp_{\max}}$ 关系图中, 点的分布范围较大, 当 λ 为 1.0、1.2 和 1.4 时, $\theta_{dp_{\max}}$ 集中在 0~20 °CA ATDC 之内。 λ 继续增大到 1.8 时, 混合气浓度更加稀薄, dp_{\max} 和 $\theta_{dp_{\max}}$ 分布图变得更加分散, $\theta_{dp_{\max}}$ 远离上止点, 这种现象在 $\lambda = 1.9$ 时更加明显。图 11 中出现负值燃烧持续期, 这

是由于缸内燃烧过程出现失火现象,消耗缸内能量,表明此时部分燃烧及失火循环增多,这是因为此时在活塞远离上止点阶段,火焰传播速度低于缸内容积变化速率,缸内温度降低,导致放热变缓,放热量和做功能力均明显降低。

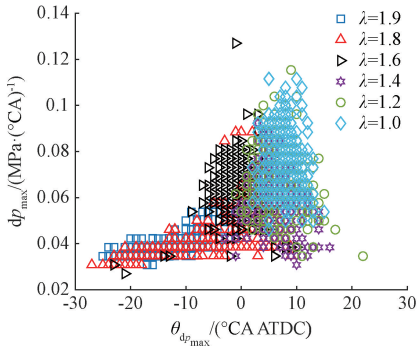


图 11 dp_{max} 和 $\theta_{dp_{max}}$ 的关联性

Figure 11 Correlation between dp_{max} and $\theta_{dp_{max}}$

4 循环变动系数分析

天然气发动机燃烧不稳定性会导致燃烧特征参数的循环变动,循环变动系数 CCV 是反映发动机燃烧不稳定性的重要指标之一^[18],也是常用指标之一,通常用于验证相关分析方法。 CCV 计算公式如下:

$$CCV_x = \frac{STD_x}{|\bar{x}|} \cdot 100\%; \tag{1}$$

$$STD_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x(i) - \bar{x})^2} \tag{2}$$

式中: \bar{x} 表示参数 x 的平均值; STD_x 表示参数 x 的标准差; N 表示时间序列样本数。

图 12 给出了各燃烧特征参数的 CCV 值,可以直观地看到,随着 λ 增大,各燃烧特征参数的 CCV 值均增大,表明缸内燃烧不稳定性逐渐增强,在 $\lambda = 1.8$ 和 1.9 时, CCV 值迅速升高,呈现陡增趋势,表明此时缸内燃烧不稳定性剧烈,燃烧质量和做功能力降低,这与前文分析得到的规律是一致的。

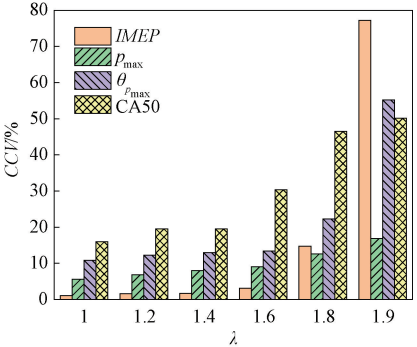


图 12 燃烧特征参数的 CCV 分析

Figure 12 CCV analysis of the combustion characteristic parameters

5 结论

(1)随着混合气浓度变稀, p_{max} 、 $\theta_{p_{max}}$ 、 $IMEP$ 的频率分布范围逐渐增大,循环间差异性均增加,燃烧不稳定性增强。

(2)随着混合气浓度变稀, p_{max} 与 $\theta_{p_{max}}$ 、 p_{max} 与 $IMEP$ 、 p_{max} 与 $CA50$ 、 $IMEP$ 与燃烧持续期、 dp_{max} 与 $\theta_{dp_{max}}$ 关系图分布范围均增大。除 dp_{max} 与 $\theta_{dp_{max}}$ 外,其他燃烧特征参数间存在线性关系,当混合气浓度过稀时线性关系减弱。

(3)随着混合气浓度变稀,燃烧特征参数 $IMEP$ 、 p_{max} 、 $\theta_{p_{max}}$ 、 $CA50$ 的循环变动系数增大,在 $\lambda = 1.8$ 和 1.9 时,循环变动系数急剧增大,此时缸内不完全燃烧及失火现象频发,燃烧稳定性严重恶化。因此,综合考虑天然气发动机燃烧稳定性和做功能力,发动机 λ 应该控制在 $1.4 \sim 1.6$ 。

参考文献:

[1] MAURYA R K, AGARWAL A K. Experimental investigation on the effect of intake air temperature and air-fuel ratio on cycle-to-cycle variations of HCCI combustion and performance parameters[J]. Applied Energy, 2011, 88(4): 1153-1163.

[2] LI W, MA J F, LIU H Z, et al. Investigations on combustion system optimization of a heavy-duty natural gas engine[J]. Fuel, 2023, 331: 125621.

[3] 李剑, 余源琦, 高阳, 等. 中国天然气产业发展形势与前景[J]. 天然气工业, 2020, 40(4): 133-142.

LI J, SHE Y Q, GAO Y, et al. Natural gas industry in China: development situation and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(4): 133-142.

[4] 罗亚萍, 邱兆文. 氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳流体对氢发动机散热影响研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(4): 25-29.

LUO Y P, QIU Z W. Study on the influence of graphene oxide-water and glycol nanofluids on heat transfer of hydrogen engine[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2018, 39(4): 25-29.

[5] XIN G, JI C W, WANG S F, et al. Effect of ammonia addition on combustion and emission characteristics of hydrogen-fueled engine under lean-burn condition[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(16): 9762-9774.

[6] TAVAKOLI S, SCHRAMM J, PEDERSEN E. Effects of propeller load fluctuations on performance and emission of a lean-burn natural gas engine at part-load conditions[J]. Propulsion and Power Research, 2022, 11(2): 196-208.

[7] GUPTA S K, MITTAL M. Effect of compression ratio on

- the performance and emission characteristics, and cycle-to-cycle combustion variations of a spark-ignition engine fueled with bio-methane surrogate[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 148: 1440–1453.
- [8] DUAN X B, LIU J P, YUAN Z P, et al. Experimental investigation of the effects of injection strategies on cycle-to-cycle variations of a DISI engine fueled with ethanol and gasoline blend[J]. *Energy*, 2018, 165: 455–470.
- [9] HUANG B, HU E J, HUANG Z H, et al. Cycle-by-cycle variations in a spark ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends combined with EGR[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(19): 8405–8414.
- [10] YU X M, HU Z P, GUO Z Z, et al. Research on combustion and emission characteristics of a hydrous ethanol/hydrogen combined injection spark ignition engine under lean-burn conditions[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(63): 27223–27236.
- [11] CHEN Z M, WANG L, ZENG K. Comparative study of combustion process and cycle-by-cycle variations of spark-ignition engine fueled with pure methanol, ethanol, and n-butanol at various air-fuel ratios[J]. *Fuel*, 2019, 254: 115683.
- [12] 郑建军, 黄佐华, 王金华, 等. 直喷式天然气发动机不同压缩比下燃烧循环变动规律[J]. *内燃机学报*, 2011, 29(2): 97–104.
- ZHENG J J, HUANG Z H, WANG J H, et al. Effect of compression ratio on cycle-by-cycle variations in a direct injection natural gas engine[J]. *Transactions of CSICE*, 2011, 29(2): 97–104.
- [13] 张鹏. 柴油机循环变动与燃烧参数的相关性分析[J]. *车用发动机*, 2020(5): 15–20.
- ZHANG P. Correlation between cycle-to-cycle variation and combustion parameters of diesel engine[J]. *Vehicle Engine*, 2020(5): 15–20.
- [14] SANLI A, YILMAZ I T. Cycle-to-cycle combustion analysis in hydrogen fumigated common-rail diesel engine[J]. *Fuel*, 2022, 320: 123887.
- [15] WANG Y, XIAO F, ZHAO Y W, et al. Study on cycle-by-cycle variations in a diesel engine with dimethyl ether as port premixing fuel[J]. *Applied Energy*, 2015, 143: 58–70.
- [16] GRANET V, VERMOREL O, LACOUR C, et al. Large-eddy simulation and experimental study of cycle-to-cycle variations of stable and unstable operating points in a spark ignition engine[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(4): 1562–1575.
- [17] DUAN X B, DENG B L, LIU Y Q, et al. An experimental study the impact of the hydrogen enrichment on cycle-to-cycle variations of the large bore and lean burn natural gas spark-ignition engine[J]. *Fuel*, 2020, 282: 118868.
- [18] LIU J J, DING S F, DING S L, et al. Effects of gas injection timing on combustion instability for a spark ignition natural gas engine under low load conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 206: 118144.

Analysis of Combustion Instability for a Natural Gas Engine with Lean-burn Conditions

DING Shunliang¹, GENG Haitang¹, GAO Jianshe¹, TAO Zheng¹, SONG Enzhe²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To study the variation law of combustion instability of natural gas engine with lean-burn condition, experiments were carried out on a natural gas engine with six different excess air coefficients with the condition of 25% load and 1 000 r/min. The frequency distributions of p_{\max} , $\theta_{p_{\max}}$ and $IMEP$ were studied by statistical analysis method, and the correlation between each combustion characteristic parameter was also analyzed. Results showed that with the increase of λ , the combustion instability of natural gas engine enhanced and the frequency distribution ranges of p_{\max} and $\theta_{p_{\max}}$ increased gradually, while the frequency distribution range of $IMEP$ initially decreased and then increased, and the difference between combustion cycles increased. In each correlation diagram of combustion characteristic parameters, the distribution range of points became wider, where existed a linear relationship. When the mixture concentration became thinner, the linear relationship weakened. The reasons for the combustion instability of natural gas engine with lean-burn conditions were analyzed, providing a theoretical basis for the optimization and control of lean-burn combustion stability of natural gas engine.

Keywords: natural gas engine; combustion instability; excess air coefficient; statistical analysis