

文章编号:1674-2974(2016)02-0064-06

LNG 发动机低速工况下瞬态燃烧过程试验研究^{*}

付建勤^{1,2}, 刘敬平^{1,2†}, 阳辉勇^{1,2}, 徐伟^{1,2}, 廖诚^{1,2}

(1. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南长沙 410082;

2. 湖南大学先进动力总成技术研究中心, 湖南长沙 410082)

摘要:对一台增压、液化天然气(LNG)发动机低速工况下的瞬态过程进行连续检测, 将实测的瞬态缸压曲线进行二次处理, 得出表征缸内燃烧过程的特征参数, 在此基础上剖析了诸多瞬态燃烧特征参数的内在联系以及对 LNG 发动机性能的影响. 结果表明, 50% 燃烧点位置随循环数变动范围约为 5 °CA, 其波动主要是由燃烧始点的变化引起的, 50% 燃烧点和燃烧始点的峰值(或谷值)相互对应; 50% 燃烧点的峰值对应着最高压力升高率和最高爆发压力的谷值, 反之则相反. 10%~90% 燃烧持续期的变化范围为 30~45 °CA, 它随循环数上升是导致 LNG 发动机 IMEP 和 NMEP 下降的主要原因之一. 燃烧特征参数的波动, 主要归咎于燃烧始点的不稳定. 实现对燃烧始点的精准控制, 是保证 LNG 发动机在低速高增压瞬态过程具有较好工作稳定性的前提.

关键词:天然气; 发动机; 瞬态工况; 燃烧; 台架试验

中图分类号:TK411

文献标识码:A

Experimental Study on the Transient Combustion Process of LNG Engine under Low-speed Conditions

FU Jian-qin^{1,2}, LIU Jing-ping^{1,2†}, YANG Hui-yong^{1,2}, XU Wei^{1,2}, LIAO Cheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China;

2. Research Center for Advanced Powertrain Technologies, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: A test was conducted on a liquefied natural gas (LNG) turbocharged engine in the transient process of low-speed working condition. By secondary treating the measured transient cylinder pressure curve, various combustion state parameters were obtained. On this basis, the internal relation among these transient combustion characteristic parameters and the effect of these parameters on LNG engine performances were analyzed. The results have shown that the variation range of 50% of the burnt point with the cycle number is about 5 °CA, and its fluctuation is mainly caused by the change of the combustion starting point. The peak values of 50% of the burnt point correspond to those of the combustion starting point, and so do the valley values. The peak values of 50% of the burnt point correspond to the valley values of maximum pressure rise rate and maximum cylinder pressure, whereas the opposite is true. The variation range of 10%~90% of the combustion duration is 30~45 °CA, and the rise of combustion duration be-

^{*} 收稿日期: 2015-01-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51376057), National Natural Science Foundation of China(51376057); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2011CB707201); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA111801)

作者简介:付建勤(1983-), 男, 湖南株洲人, 湖南大学助理教授, 博士

† 通讯联系人, E-mail: liujp0426@163.com

comes one of the main reasons for the decline of LNG engine IMEP (indicated mean effective pressure) and NMEP (net mean effective pressure). The fluctuations of combustion characteristic parameters are mainly caused by the instability of the combustion start point. To precisely control the combustion start point becomes an effective way to ensure that LNG engine has good transient performances at low speed and high intake pressure working condition.

Key words: natural gas; internal combustion engine; transient condition; combustion; bench test

随着经济社会和汽车工业的蓬勃发展,我国面临的能源和环境问题愈来愈严重,我国原油对外依存度高,能源供应面临严峻挑战。同时,由于汽车保有量的持续剧增,我国当前已成为 CO₂ 排放第一大国,这将导致我国承担 CO₂ 减排义务的压力不断增大。此外,内燃机产生的有害气体排放量,占全球有害气体排放总量的 50% 以上,不仅对人体健康造成直接危害,还会对自然环境产生破坏作用^[1]。

发展清洁、高效的汽车发动机代用燃料是缓解我国当前能源危机与环境污染问题的一条直接、有效的途径^[2]。天然气因其资源丰富、价格低廉、污染低、辛烷值高等特点,一直被认为是具有很好发展前景的汽车代用燃料。许多大中城市都把发展天然气公交车作为治理大气污染的重要举措之一^[3]。

天然气作为发动机燃料带来的主要问题是功率下降。通常,点燃式发动机改用天然气后,功率会下降 20%~25%,而压燃式发动机会下降 10%~15%,这将引起发动机动力性能的恶化^[4],进而使其热功转换效率有所降低。因此,恢复天然气发动机的动力性能、改善其热效率,是实现天然气发动机推广和应用的重要途径。虽然目前已有许多学者开展了天然气发动机的性能研究^[5],例如采用增压、提高压缩比来恢复其动力性能,但对于低速工况,受限于涡轮增压系统的工作特性,增压压力无法达到理想值,因此导致低速下天然气发动机的扭矩不能达到满意值。此外,对于天然气发动机的瞬态工作过程,尤其是燃烧特征参数的变化规律研究甚少。为此,本文以提升重型 LNG 发动机低速扭矩为目的,采用额外补气来提升低速时的进气压力,并且研究由于进气压力波动引起的燃烧特征参数的变化规律,为研究天然气发动机的瞬态性能提供基础数据。

1 LNG 发动机瞬态过程试验

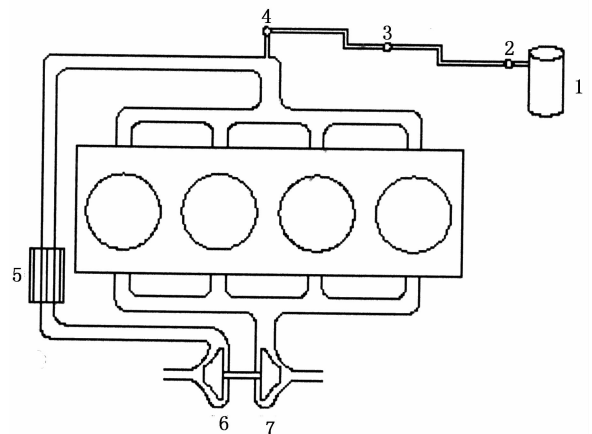
汽车在道路工况行驶时,60%~80%的时间处于过渡工况,在过渡工况时前后进气压力的波动引

起循环进气量有非常大的变化。进气压力波动,瞬时空燃比,尤其是点火提前角控制不准等因素,会影响发动机瞬态过程的工作性能。因此,研究瞬态燃烧过程参数的内在联系及其相互影响,对于改善发动机的实际性能具有重要意义^[6-7]。

本文的研究对象为一台由重型柴油机改装的气道喷射 LNG 发动机,额定功率转速为 2 200 r/min,其主要参数见表 1。由于该发动机在低速时增压压力相对较低而导致爬坡工况时扭矩不够。为了解决这一问题,在爬坡工况时由备用的压缩空气瓶向进气系统(中冷器后)额外“补气”,相当于额外增压的效果,等效于提升了进气系统的增压压力(由于天然气的辛烷值较高,可以采用更高的增压压力),从而使低速扭矩得到提升。方案示意图如图 1 所示。

表 1 LNG 发动机基本参数
Tab. 1 The basic parameters of LNG engine

发动机型式	缸径/mm	行程/mm	排量/L	压缩比
直列 6 缸,气道喷射	126	130	9.762	11:1
点火顺序	[额定功率 /kW]	[大扭矩 /(Nm)]	冷却 方式	吸气 方式
	[转速 /(r·min ⁻¹)]	[转速 /(r·min ⁻¹)]		
1-5-3-6-2-4	291/2 200	1 450/1 200~1 600	水冷	增压



1—压缩空气;2—调压阀;3—电控补气阀;4—安全阀;
5—中冷器;6—压气机;7—涡轮

图 1 LNG 发动机低速工况补气方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of supplementary air on LNG engine at low-speed and climbing working condition

选定目标转速为 1 200 r/min, 目标增压压力(补气后) 0.2 MPa 为研究工况点. 补气后, 由于改变了压气机的实际工作点, 使压气机工作时有轻微的“喘振”, 从而导致进气系统的压力不稳定(产生波动). 虽然发动机目标转速为定值, 实际上由于进气压力等参数的波动, 导致发动机的运行参数具有明显的循环差异性(随着循环产生波动), 这样就使 LNG 发动机的实际工作循环为瞬变状态. 为了研究实际过程(瞬态过程) LNG 发动机缸内燃烧过程参数的变化情况, 基于 AVL 试验台架以及瞬态缸压传感器、氧传感器、进气压力传感器等, 对该发动机的瞬态工作过程进行连续测试. 其中, 测试时各种传感器布置方式如图 2 所示. 发动机的氧传感器位于涡轮出口, Lambda 仪位于涡轮出口下游.

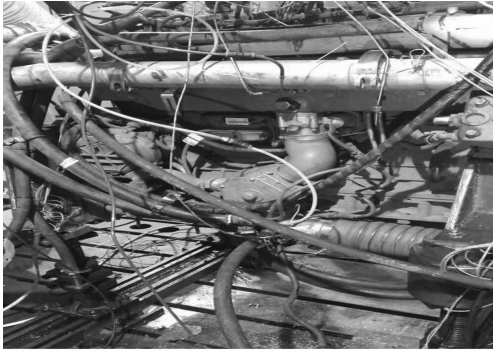


图 2 测试时各种传感器布置

Fig. 2 The arrangement of various transducers

将测得的每循环瞬态缸压曲线与瞬时气缸容积变化率进行积分(瞬时气缸容积由测得的曲轴转角位置和已知的发动机设计参数如缸径、行程、连杆长度等计算得到), 得到活塞的瞬时做功量; 对换气过程和整个循环过程积分可分别得到泵气功与循环指示功^[8]. 对实测缸压曲线进行二次处理, 通过联立求解缸内的质量守恒、能量守恒以及气体状态方程可以计算出缸内的瞬时放热率和各种表征缸内燃烧状态的参数, 如燃烧始点位置、50%燃烧点位置、10%~90%燃烧持续期、最高爆发压力、最大压力升高率等^[9].

2 发动机性能评价参数

在一个完整的工作循环(720°CA)中, 发动机的净指示功可以用净平均指示压力 NMEP 来表示:

$$\text{NMEP} = \frac{\int_{-180}^{540} p dV}{V_h} \quad (1)$$

式中: p 为缸内瞬时压力; dV 为工作容积的变化;

V_h 为气缸有效工作容积.

为了便于对循环过程进行分析, 将一个完整的工作循环分为换气循环和燃烧做功循环(或高压循环). 其中, 高压循环指示功可以表示为:

$$\text{IMEP}_{\text{HP}} = \frac{\int_{-180}^{180} p dV}{V_h} \quad (2)$$

式中: IMEP_{HP} 为发动机高压循环指示平均压力.

相应地, 发动机的泵气损失可以用泵气平均有效压力 PMEP 来表示:

$$\text{PMEP} = \frac{\int_{180}^{540} p dV}{V_h} \quad (3)$$

3 瞬态过程试验结果及分析

3.1 动力性能参数随循环数的变化

图 3 所示为 LNG 发动机在低速工况(目标转速为 1 200 r/min)“补气后”转速随循环数的变化. 可以看到, 转速在目标值 1 200 r/min 附近有轻微的波动, 这是由于进气压力等参数的波动引起的. 图 4 给出了 LNG 发动机高压循环 IMEP 随循环的变化. 由图可见, 相比于转速, 高压循环 IMEP 的波动幅度更为明显, 并且从大约第 90 个循环后, 高压循环 IMEP 开始下降, 然后趋于一个稳定值. 从稳态研究结果可知, 高压循环 IMEP 主要受充气效率、过量空气系数以及燃烧过程参数(如点火提前角、燃烧持续期、50%燃烧点位置等)影响. 为了分析高压循环 IMEP 的变化原因, 图 5 给出了 LNG 发动机的进气平均压力随循环数的变化关系. 可以看到, 在 1 200 r/min 转速下, 采用“补气”后进气压力变化范围为 0.193~0.201 MPa, 在第 30 个循环附近有一个较大幅度的波动, 之后波动幅度很小, 总体趋势是进气压力随循环稍稍下降. 进气压力下降导致每循环进入缸内的燃气-空气混合气减少, 这是引起高压循环 IMEP 下降的一个重要因素. 图 6 给出了过量空气系数随循环数的变化关系. 由于在第 30 个循环进气压力突然下降, 相应地过量空气系数也出现轻微下降, 这表明前后循环之间天然气(LNG)的喷射量基本上不变. 之后, 过量空气系数随循环数变化基本保持平稳. 综合图 4, 图 5 和图 6 可知, 进气压力和过量空气系数的变化幅度极其微小, 但是高压循环 IMEP 随循环却变化较大. 由此可见, 高压循环 IMEP 的下降还受缸内燃烧过程(具体体现在燃烧特征参数的变化)的影响.

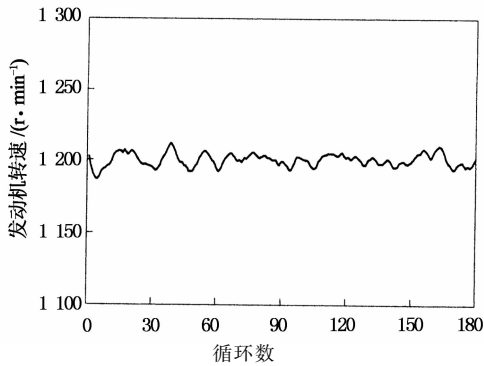


图 3 发动机转速随循环数的变化

Fig. 3 The relationship between engine speed and cycle number

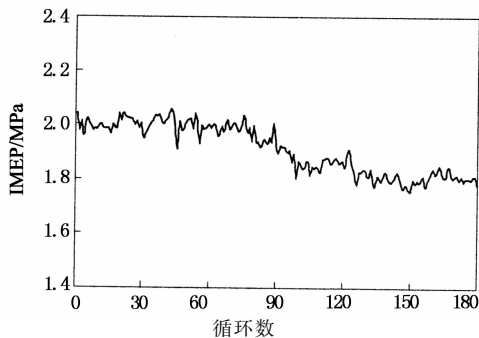


图 4 发动机高压循环 IMEP 随循环数的变化

Fig. 4 The relationship between engine IMEP and cycle number

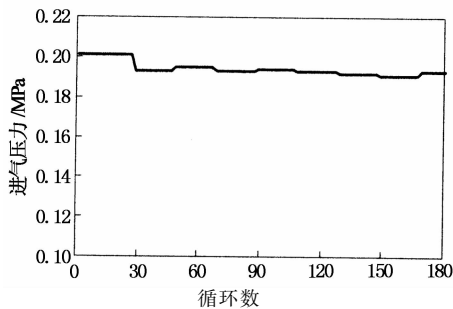


图 5 发动机进气压力随循环数的变化

Fig. 5 The relationship between intake pressure and cycle number

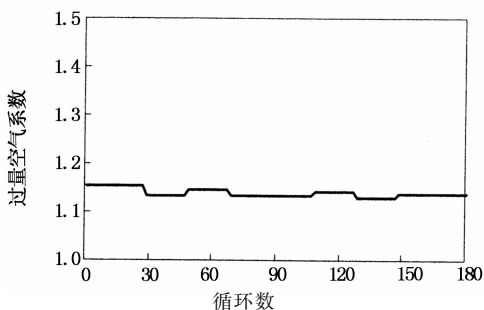


图 6 过量空气系数随循环数的变化

Fig. 6 The relationship between excess air coefficient and cycle number

图 7 给出了转速 1 200 r/min、进气压力 0.193 ~ 0.201 MPa 时 LNG 发动机的 PMEP 随循环数的变化关系。从图中可以看到,在第 45 个循环附近, PMEP 开始下降,之后虽然 PMEP 波动幅度较大,但基本上在一个恒定值附近波动(没有明显的上升或下降趋势)。由图 5 可知,虽然进气平均压力随循环数有轻微的下落,但是 PMEP 没有上升反而下降。这是因为在瞬变状态下 PMEP 的主要影响因素是进气压力波动而不是进气平均压力,此外 RGF 的影响也不容忽视。高压循环 IMEP 和 PMEP 随循环数的变化规律,直接决定了 NMEP 随循环数的变化趋势(如图 8 所示)。由于 PMEP 有一个明显的下降趋势,因此在一定程度上减缓了 NMEP 随循环数的下降程度。

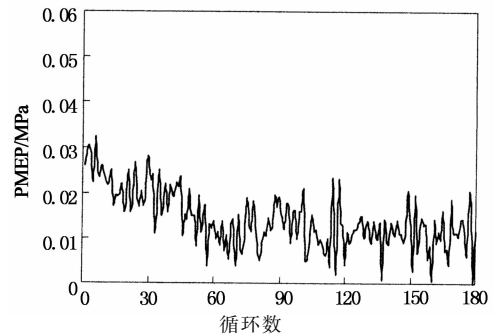


图 7 发动机 PMEP 随循环数的变化

Fig. 7 The relationship between engine PMEP and cycle number

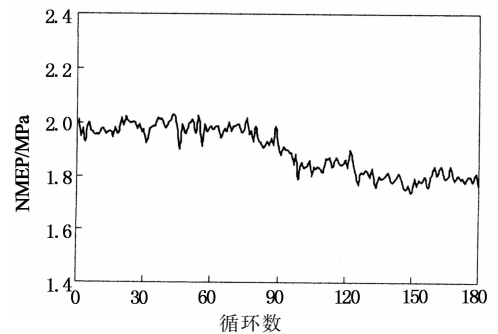


图 8 发动机 NMEP 随循环数的变化

Fig. 8 The relationship between engine NMEP and cycle number

3.2 燃烧特征参数随循环数的变化

图 9 所示为转速 1 200 r/min、进气压力 0.193 ~ 0.201 MPa 时 LNG 发动机的 10%~90% 燃烧持续期随循环数的变化关系。可以看到,10%~90% 燃烧持续期随循环数产生明显波动。特别是从第 115 个循环开始,10%~90% 燃烧持续期急剧上升,大约从 30°CA 上升到 45°CA。10%~90% 燃烧持续期的上升,是高压循环 IMEP 出现下降的又一个重要

原因。

Heywood^[10]指出,缸内残余废气对层流火焰速度的影响远甚于空气过量的稀释.文献[8]指出,仅约0.18 mol 份额的残余废气就能使层流火焰速度减半.据此可知,该 LNG 发动机燃烧持续期的增加很大可能是归咎于缸内残余废气系数(RGF)的上升.从前期研究可知,缸内残余废气的存在可以在一定程度上降低 PMEP,这也可以解释图 7 中 PMEP 随循环数出现下降趋势的原因.由于很难对瞬态缸内 RGF 进行实时检测,故难以获得随循环数变化的缸内 RGF,该问题还有待进一步深入研究.

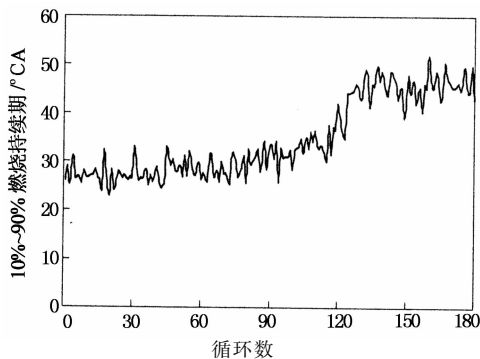


图 9 10%~90% 燃烧持续期随循环数的变化

Fig. 9 The relationship between 10%~90% combustion duration and cycle number

图 10 所示为转速 1 200 r/min、进气压力 0.193 ~ 0.201 MPa 时 50% 燃烧点位置随循环数的变化.由图可见,50% 燃烧点位置随循环数没有明显的上升或下降趋势,但是波动幅度比较大,变化范围约为 5 °CA.与此同时,图 11 给出了最高爆发压力随循环数的变化规律.可以看到,该 LNG 发动机在低转速下最高爆发压力随循环数出现较大波动,变化范围接近 2.0 MPa(相对变化达到 ±10%).对比图 10 和图 11 可以发现,最高爆发压力与 50% 燃烧点位置有很好的对应关系,即:50% 燃烧点位置的峰值对应着最高爆发压力的谷值(例如第 46,56,99 个循环),反之则相反(例如第 90,122,144 个循环).从稳态燃烧过程研究结果可知,50% 燃烧点位置是衡量燃烧放热率曲线相位的一个重要参数,50% 燃烧点位置越小,表明燃烧越靠近上止点,从而导致最高爆发压力越大^[11].反之,50% 燃烧点位置越远离上止点,最高爆发压力越小.从这点来看,瞬态过程遵循的规律与稳态过程是一致的.最高爆发压力的剧烈波动,主要是由 LNG 发动机工作循环过程中 50% 燃烧点的不稳定引起的.与此同时,给出了最高压力升高率的瞬态变化历程曲线,如图 12 所示.与最高

爆发压力一样,最高压力升高率也随循环数剧烈波动,其变化范围大约为 0.15 MPa/deg.对照图 11 和图 12 可以发现,最高爆发压力和最高压力升高率的变化规律是一致的,即二者的峰值(例如第 120,132,144 个循环)和谷值(例如第 46,56,99 个循环)同时出现.

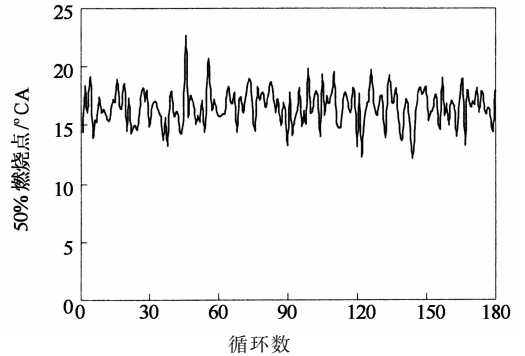


图 10 50% 燃烧点位置随循环数的变化

Fig. 10 The relationship between 50% burnt point and cycle number

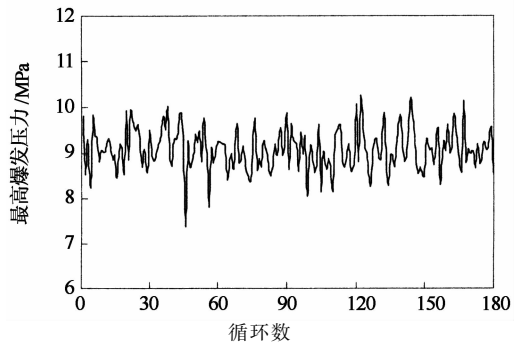


图 11 发动机最高爆发压力随循环数的变化

Fig. 11 The relationship between PCP and cycle number

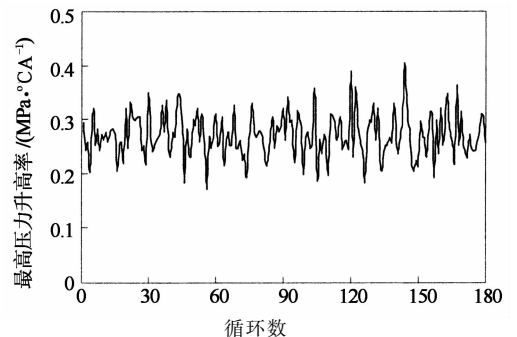


图 12 最高压力升高率随循环数的变化

Fig. 12 The relationship between maximum pressure rise rate and cycle number

从图 13 所示的燃烧始点随循环数的变化关系可知,在发动机实际工作循环过程中,燃烧始点很难固定在一个稳定值,而是随工作循环产生较大波动,变化范围在 0~6 °CA(个别最大值得 7 °CA).燃烧始

点取决于点火提前角和燃烧初始条件(过量空气系数和 RGF 等)。前者决定了缸内的点火时刻,后者反映了混合气的滞燃期。燃烧始点随循环数的波动,直接决定了 50% 燃烧点位置的变化。对比图 10 和图 13 可知,50% 燃烧点位置和燃烧始点位置随循环数的变化趋势一致,即前者的峰值对应后者的峰值(例如第 44 个循环,第 99 个循环,第 105 个循环),反之则相反(例如第 90 个循环,第 122 个循环,第 144 个循环)。由此可见,燃烧始点随 LNG 发动机工作循环出现较大波动,是引起 50% 燃烧点位置、最高爆发压力、最高压力升高率等燃烧特征参数波动的重要原因。实现对发动机燃烧始点的精准控制,是优化瞬态燃烧做功循环过程、尤其是减少循环变动的关键。

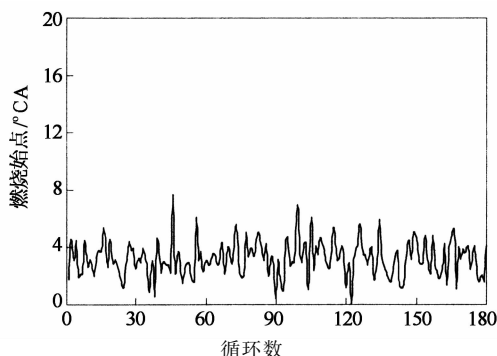


图 13 燃烧始点随循环数的变化

Fig. 13 The relationship between combustion start point and cycle number

4 结论

通过对 LNG 发动机瞬态过程进行试验研究,展示了 LNG 发动机在低速(1 200 r/min)、增压(0.193~0.201 MPa)时各种燃烧特征参数随循环数的变化规律,为下一步的深入研究提供了基础数据。

1) 在转速 1 200 r/min,进气压力 0.193~0.201 MPa 时,该 LNG 发动机的 10%~90% 燃烧持续期变化范围为 30~45°CA。10%~90% 燃烧持续期的上升,是导致该 LNG 发动机 IMEP(以及 NMEP)下降的重要原因之一。

2) 50% 燃烧点位置变化范围约为 5°CA,它同时影响最高压力升高率和最高爆发压力。50% 燃烧点位置越靠近上止点,最高压力升高率和最高爆发压力越大。最高爆发压力变化范围接近 2.0 MPa,最高压力升高率也随着循环数剧烈波动,其变化范围大约为 0.15 MPa/°CA。

3) 通过对该 LNG 发动机瞬态过程燃烧特征参数分析发现,引起该机循环波动的一个重要原因是进气压力的轻微波动导致燃烧始点的较大波动。实现对燃烧始点的精准控制,是减小燃烧循环变动量、保证发动机性能稳定的关键。

参考文献

- [1] MENKIEL B, DONKERBROEK A, UITZ R, *et al.* Combustion and soot processes of diesel and rapeseed methyl ester in an optical diesel engine[J]. *Fuel*, 2014, 118: 406-415.
- [2] 付建勤,刘敬平,邓帮林,等. 余热气化甲醇燃料对内燃机性能的影响[J]. *湖南大学学报:自然科学版*, 2014, 41(3): 31-36.
FU Jian-qin, LIU Jing-ping, DENG Bang-lin, *et al.* Effects of waste heat evaporating methanol fuel on internal combustion engine performances[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2014, 41(3): 31-36. (In Chinese)
- [3] 邹博文,李静波,罗福强,等. LNG 发动机功率恢复模拟研究[J]. *小型内燃机与摩托车*, 2010, 39(1): 72-74.
ZOU Bo-wen, LI Jing-bo, LUO Fu-qiang, *et al.* A simulation study on the power recovery for LNG engine[J]. *Small Internal Engine and Motorcycle*, 2010, 39(1): 72-74. (In Chinese)
- [4] 卓斌. 天然气发动机燃烧特征与功率恢复[J]. *车用发动机*, 1999(1): 11-17.
ZHUO Bin. Combustion characteristics and power recovery of natural gas engine[J]. *Vehicle Engine*, 1999(1): 11-17. (In Chinese)
- [5] 李兴虎,张有才,周大森,等. 492QC 发动机燃用天然气的实验研究[J]. *北京工业大学学报*, 2000, 26(4): 117-120.
LI Xing-hu, ZHANG You-cai, ZHOU Da-sen, *et al.* An experimental research for compression natural gas on a 492QC engine[J]. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 2000, 26(4): 117-120. (In Chinese)
- [6] LIU J P, KLEEBERG H, TOMAZIC D. A model for on-line monitoring of in-cylinder residual gas fraction (RGF) and mass flowrate in gasoline engines[R]. No. 2006-01-0656 (Transaction). Washington, DC: SAE International, 2006.
- [7] RAKOPOULOS C D, GIAKOUMIS E G. Review of thermodynamic diesel engine simulations under transient operating conditions[R]. No. 2006-01-0884. Washington, DC: SAE International, 2006.
- [8] MARSHALL S P, TAYLOR S, STONE CR, *et al.* Laminar burning velocity measurements of liquid fuels at elevated pressures and temperatures with combustion residuals[J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158: 1920-1932.
- [9] 刘敬平,赵智超,唐琦军,等. 一种内燃机瞬变过程状态与性能参数的准确检测方法[J]. *内燃机学报*, 2014, 32(1): 64-71.
LIU Jing-ping, ZHAO Zhi-chao, TANG Qi-jun, *et al.* A diagnostic and analysis method for process and performance parameters of IC engines under transient operation conditions[J]. *Transactions of CSICE*, 2014, 32(1): 64-71. (In Chinese)
- [10] HEYWOOD J B. *Internal combustion engine fundamentals* [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1988:390-410.
- [11] 刘敬平,付建勤,唐琦军,等. 自然吸气式汽油机热功转换效率影响因素的共性规律[J]. *燃烧科学与技术*, 2014, 20(3): 208-215.
LIU Jing-ping, FU Jian-qin, TANG Qi-jun, *et al.* A study on the general relationships among the influencing factors of the heat-work conversion process in naturally aspirated gasoline engines[J]. *Combustion Science and Technology*, 2014, 20(3): 208-215. (In Chinese)