

船用大功率柴油机瞬态工况油气响应 及燃烧特性研究*

杨凯¹, 霍柏琦², 姚晔¹, 石磊¹, 邓康耀¹

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 201100;
2. 中国人民解放军92537部队, 北京 100000)

摘要: 针对船用大功率柴油机瞬态性能提升的需求, 开展了增压中冷船用大功率柴油机瞬态工况动态响应及燃烧特性实验研究。研究表明, 涡轮增压器惯性导致的进气滞后是柴油机瞬态工况下性能恶化的主要原因; 突加载工况下, 进气量响应滞后供油量响应4~5个工作循环, 且进气量响应速度随初始负荷增加而增加, 指示平均有效压力 (Indicated Mean Effective Pressure, IMEP) 等燃烧特征参数加载过程中响应速度较快, 波动较小; 缸内燃烧过程恶化, 燃烧重心和燃烧终点较同负荷下稳态工况值均推迟。

关键词: 船用柴油机; 燃烧分析; 瞬态工况; 动态响应; 进气滞后

中图分类号: TK427 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 08-200387-06

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.200387

Experimental Study on Dynamic Response and Combustion Characteristics of Marine High-Power Diesel Engine under Transient Conditions

YANG Kai¹, HUO Bai-qi², YAO Ye¹, SHI Lei¹, DENG Kang-yao¹

(1. College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 201100, China;
2. People's Liberation Army of China 92537 Force, Beijing 100000, China)

Abstract: The dynamic response and combustion characteristics of a supercharged intercooled marine high-power diesel engine under transient conditions are studied experimentally for the transient operating performance of the diesel engine. The study shows that the inertia of the turbocharger leads to the inlet hysteresis, which is the main reason for the deterioration of the performance under transient conditions. Under the sudden loading condition, the inlet response lags behind the fuel supply response for 4~5 working cycles, and the inlet response speed increases with the increase of the initial load. The combustion parameters such as indicated mean effective pressure (IMEP) respond faster and fluctuate less in the process of sudden loading. The combustion process in the cylinder deteriorates, and the center of gravity of combustion and the end of combustion are delayed compared with the steady-state condition value under the same load.

Key words: Diesel engine; Combustion analysis; Transient conditions; Dynamic response; Inlet hysteresis

* 收稿日期: 2020-05-30; 修订日期: 2020-10-27。

基金项目: 国家自然科学基金 (51576129)。

作者简介: 杨凯, 硕士生, 研究领域为柴油机燃烧分析。

通讯作者: 石磊, 博士, 研究员, 研究领域为柴油机增压与性能。

引用格式: 杨凯, 霍柏琦, 姚晔, 等. 船用大功率柴油机瞬态工况油气响应及燃烧特性研究[J]. 推进技术, 2022, 43(8):200387. (YANG Kai, HUO Bai-qi, YAO Ye, et al. Experimental Study on Dynamic Response and Combustion Characteristics of Marine High-Power Diesel Engine under Transient Conditions[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(8):200387)

1 引 言

船用柴油机作船舶推进系统时,需满足船舶突然转向或加速等瞬态需求,同时用作发电机组原动机时,常遇到电网负荷突变或备用动力机组快速启动和加载等情况。这些工况的存在都要求船用柴油机有较好的瞬态性能^[1-2]。在瞬态过程中,由于进气、供油及缸内热氛围等因素的影响,柴油机的燃烧和排放性能与稳态过程相比存在较大差异^[3-5]。

目前,国内外针对车用柴油机瞬态性能进行了大量的仿真和试验研究。为评估柴油机的瞬态性能,优化瞬态过程控制策略,Rakopoulos等^[6]采用双区燃烧模型,讨论了涡轮增压器的滞后效应,研究了不同瞬态过程对柴油机排放的影响;Liu等^[7]提出了一种评价涡轮增压柴油机瞬态响应性能的通用方法,建立了结构参数、增压器尺寸、工况参数与瞬态响应性能间的关系;Wu等^[8]提出了深度确定性策略梯度算法,用于瞬态过程中增压系统控制。试验研究方面,许允等^[9]研究了不同加载率、加载起始点以及加载持续时间对恒转速增转矩加载过程的影响,揭示了不同加载参数对瞬态加载工况的影响规律;Glewen等^[10]在一台小型柴油机上开展了加载工况和稳态工况试验,确定了两种工况下柴油机的性能偏差,分析了不同进气参数对柴油机瞬态性能的影响。Yum等^[11]开展了循环瞬态载荷试验,研究了循环载荷对涡轮增压柴油机在燃料效率和排放方面的影响。

目前柴油机瞬态工况试验研究多针对恒转速增转矩或循环载荷工况下性能和排放变化^[12-15],较少对瞬态过程中柴油机油气参数响应及燃烧特性开展试验研究,且对于柴油机用作发电机组原动机时常遇到的突加载工况研究较少。同时,国内船用大功率柴油机一般直接由成熟机型引进生产,未针对性开展过瞬态工况及燃烧特性试验。

为了探明船用大功率柴油机的瞬态工况下的动态响应规律,本文以一台 20 缸大功率柴油机为研究机型,开展稳态工况负荷特性和瞬态突加载工况的燃烧试验,分析不同负荷下柴油机的燃烧特征参数和瞬态突加载过程燃烧参数的动态响应和变化特性。

2 基于 LabVIEW 的燃烧测试分析系统开发

本文以船用大功率柴油机为研究机型,柴油机参数如表 1 所示,在第一缸布置了 Kistler 6043A 水冷

缸压传感器,通过 Kistler 2852A 电荷放大器将传感器电荷信号转换为电压信号,由 NI PXIe-1071 数据采集卡进行采集,同步相位信号由安装在曲轴自由端的长春一光 A-LEC-D8-72BM-G05E 720 线编码器获得,并基于 LabVIEW 软件搭建了数据采集与燃烧分析系统,图 1 为搭建的燃烧测试分析系统硬件与软件结构。测试中上止点位置通过倒拖法确定,并采用热力损失角进行修正,柴油机热力损失角为 -0.45°CA 。本文采用所开发的燃烧分析系统,对该 20 缸船用大功率柴油机进行了稳态和瞬态工况试验。

Table 1 Engine specifications

Model	Specification
Brake mean effective pressure/MPa	1.674
Speed/(r/min)	1500
Bore/mm	230
Stroke/mm	230
Compression ratio	12

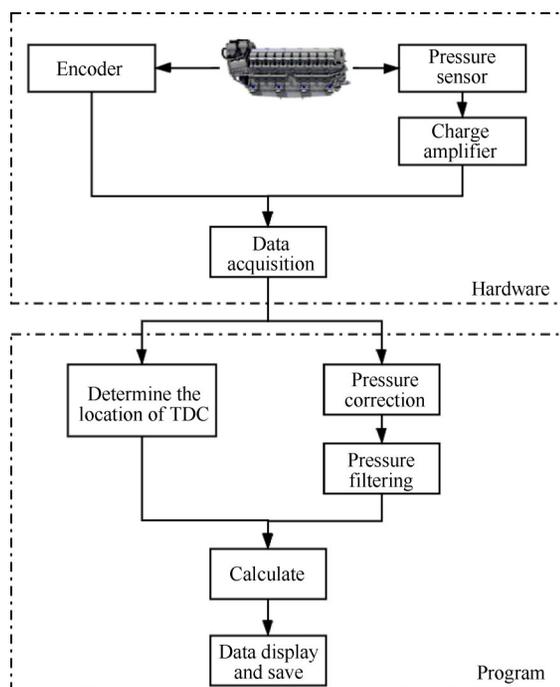


Fig. 1 Framework diagram of the combustion analysis system

3 试验结果与分析

3.1 瞬态工况柴油机动态响应

依据 GB/T 3475-2008《船用柴油机调速系统技术要求和试验方法》开展了恒转速突加载的瞬态工况燃烧特性试验^[16],固定柴油机转速为 1500r/min,初始稳定工作在 0% 负荷,三次加载至 40%, 70%, 100%

负荷。

图2为三次加载过程中柴油机转速的变化,瞬态加载工况下,当负载扭矩突加时,增压器响应滞后,导致柴油机转速下降。为提供稳定频率负载输出,调速系统开始工作,保证加载过程中转速稳定。定义柴油机突加额定负载后的最低转速与负载变化前稳定转速的差对额定转速的百分比为瞬态调速率,按式(1)进行计算。

$$\sigma = \frac{n'_{\min} - n_i}{n_r} \times 100\% \quad (1)$$

式中 n'_{\min} 为加载过程中的最低转速, n_i 为负载变化前的稳定转速, n_r 为额定转速。三次加载过程的调速率分别为 1.7%, 1.9% 和 2.6%。

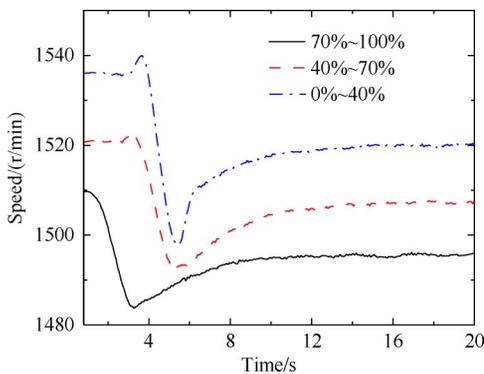


Fig. 2 Variation of speed with transient operation

为分析瞬态工况柴油机供油供气等参数的动态响应,对三次突加载过程放热量与进气压力分别进行归一化处理,分析放热量相对值和进气压力相对值逐循环变化情况,如图3所示。放热量变化主要受供油量和缸内燃烧过程影响,依靠喷油系统可以实现循环级的响应速度,因此三次突加载过程中,放热量响应速度较快,在约4~5个工作循环后均能达到稳定值。进气压力的变化则是在柴油机喷油、燃烧及做功循环完成后由增压器响应决定,由于增压器的机械惯性及气体的可压缩性,响应滞后较为明显,在约10~12个工作循环后达到稳定值。

为进一步分析供油供气响应在不同加载过程中的变化情况,定义响应速度 v_x 来表征突加载过程中不同参数的变化规律,即

$$v_x = \frac{\Delta x}{t_x} \quad (2)$$

式中 Δx 为瞬态过程参数 x 的变化值; t_x 为瞬态过程参数 x 达到稳定值所需循环数。

如图4所示,三次加载过程中,放热量响应速度与进气压力响应速度均随初始负荷增加而增加,其

中放热量响应速度受初始负荷影响较小,而进气压力响应速度受初始负荷影响较大。这是由于不同负荷下喷油系统响应均较快,对放热量响应速度影响较小。而对于涡轮增压器来说,高负荷时,排气能量较高,有利于涡轮增压器克服自身机械惯性,因而进气压力响应速度受负荷变化影响较为明显。

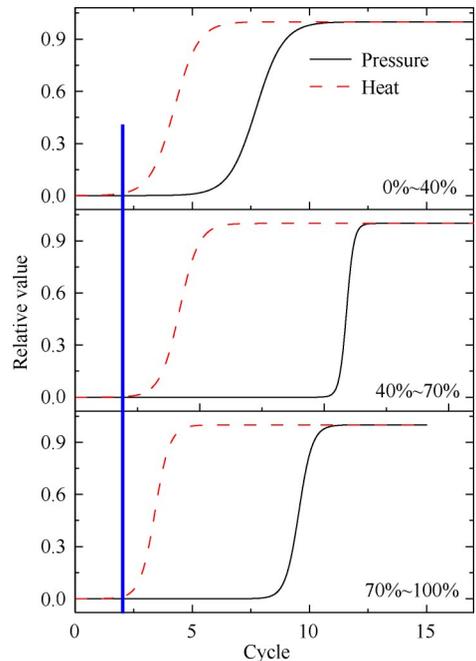


Fig. 3 Variation of pressure and heat with transient operation

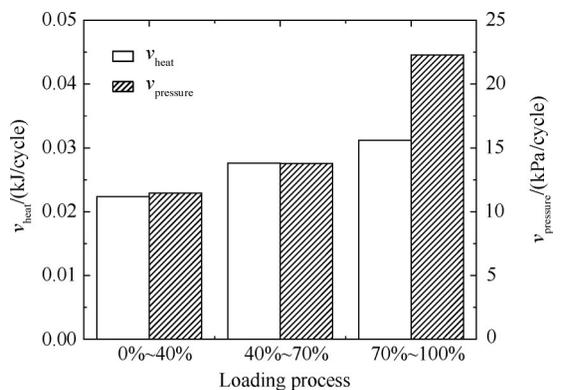


Fig. 4 Variation of response parameters with transient operation

3.2 瞬态工况柴油机燃烧特性

图5为三次突加载过程中逐循环气缸压力变化。加载过程中,缸内最高燃烧压力逐渐上升,在约8~10个循环后达到稳定值。

图6为0%~40%加载过程中逐循环CA10, CA50, CA90的变化情况。CA10, CA50, CA90定义为燃烧过程中燃烧分数达到10%, 50%, 90%时对应的曲轴转

角值,分别用来表征燃烧始点、燃烧重心和燃烧终点。如图 6 所示,由于负荷增加,缸内燃烧过程提前,CA10, CA50, CA90 均随着加载过程进行而提前,CA10 由 34°CA 提前至 0.4°CA, CA50 由 49°CA 提前至 27.6°CA, CA90 由 73.8°CA 提前至 64.8°CA,这说明在低负荷时,加载过程对燃烧始点位置影响程度较大,对燃烧终点位置影响程度较小。加载过程中,CA10, CA50, CA90 均在 3~4 个工作循环后达到稳定值,这说明 0%~40% 加载过程中缸内燃烧过程响应速度较快,且未出现明显的燃烧恶化情况。

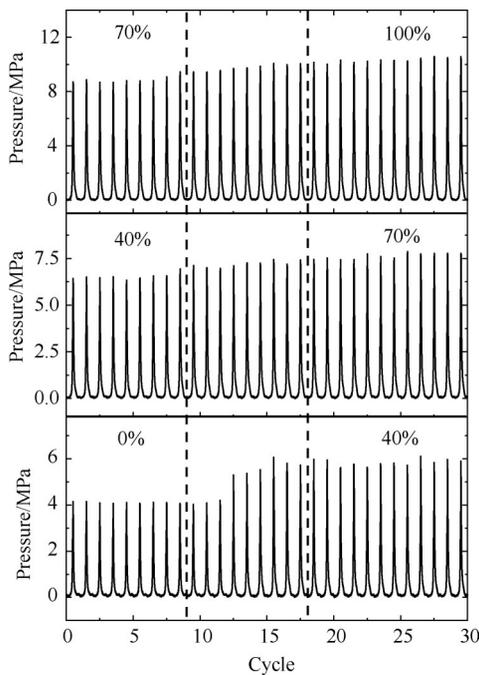


Fig. 5 Cylinder pressure during transient loading

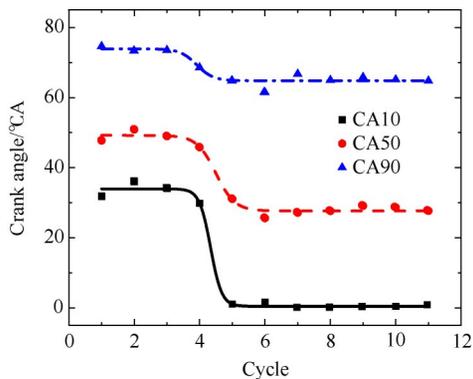


Fig. 6 CA10, CA50, CA90 cycle-by-cycle changes during 0%~40% transient loading

图 7 为三次瞬态加载过程中逐循环指示平均有效压力 IMEP 的变化情况。加载开始后,IMEP 值均开始增加,并在 6~8 个循环后达到稳定值。为比较不同加载工况下,IMEP 的响应情况,计算了三次加载过程

中 IMEP 的变化率与最大偏差。变化率定义为加载前后稳定值之差与加载所需循环数之比,最大偏差定义为变化过程中首个波峰值或波谷值与稳定值之间的误差。如图 8 所示,初始负荷较低时,加载过程中 IMEP 变化率较高,但偏差较大,需较长时间达到稳定值。随着初始负荷的增加,IMEP 变化率减小,响应时间缩短,且变化过程中最大偏差减小。这是由于高负荷时,进气压力响应速度较快,供气滞后现象影响较小,缸内燃烧过程能够较快达到目标状态,IMEP 变化也较低负荷加载时更加快速稳定。

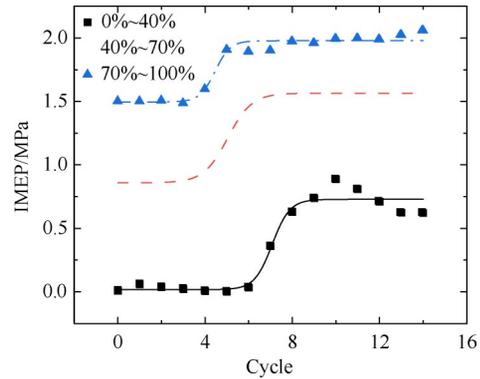


Fig. 7 IMEP changes during transient loading

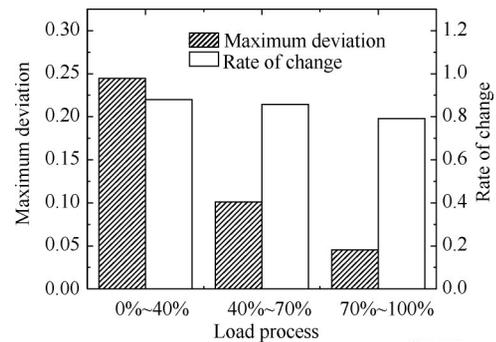


Fig. 8 Maximum deviation and change rate of IMEP during transient loading

3.3 瞬态工况与稳态工况柴油机燃烧差异

为比较柴油机瞬态加载工况下与稳态工况下的燃烧特性差异,开展了稳态工况试验,固定柴油机转速为 1500r/min,测得不同负荷下柴油机燃烧过程的试验数据,并分析燃烧特性^[17]。试验选取 0% 负荷、50% 负荷、75% 负荷、100% 负荷四个工况点。

柴油机的供油提前角是影响燃烧性能的主要因素之一,因此在开展稳态燃烧试验前,针对柴油机在 1500r/min,100% 负荷工况下,以最高燃烧压力和涡前排温为边界条件,保持循环喷油量不变,研究了不同供油提前角对柴油机性能的影响,以确定最佳的供油提前角。

图9为不同供油提前角对最高燃烧压力、涡前排温和燃油消耗率的影响。如图9所示,最高燃烧压力和涡前排温随供油提前角变化呈线性关系,供油提前角每推迟1°CA ATDC,最高燃烧压力下降约0.28MPa,涡前排温升高约2.2°C。燃油消耗率随供油提前角的推迟而升高。这是由于随着供油提前角的推迟,喷油时缸内的压力和温度相对较高,滞燃期变短,滞燃期内雾化的燃料也随之减少,进而燃烧速率放缓,最高燃烧压力下降。同时随着供油提前角推迟,燃烧相位推迟,后燃部分增加,涡前排温升高。根据涡前排温和最高燃烧压力限制,供油提前角应控制在图中阴影部分内。考虑到对动力性、经济性及使用寿命等条件的要求,优化后的供油提前角确定为-28°CA ATDC,此时的有效燃油消耗率较低,最高燃烧压力、涡前排温等参数符合设计要求。

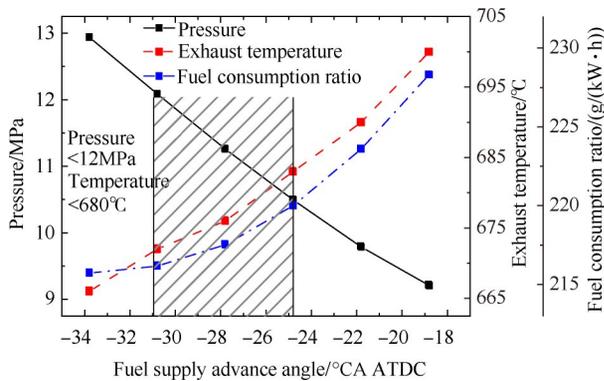
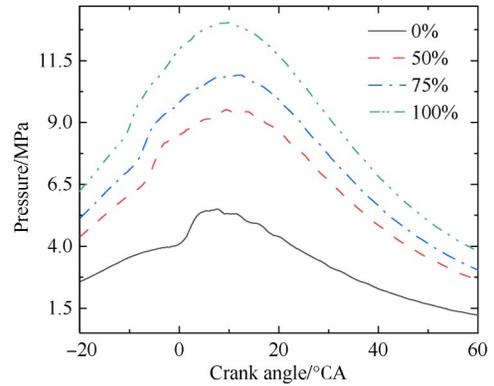


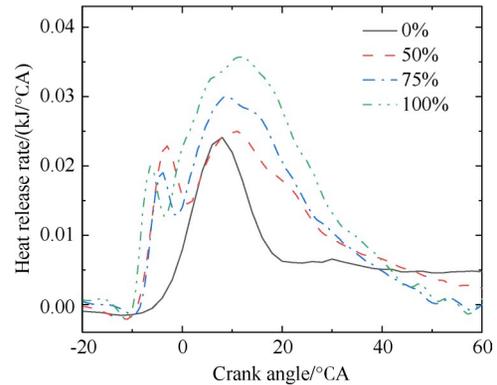
Fig. 9 Combustion parameters under different fuel supply advance angles

图10为不同负荷下缸内压力和瞬时放热率的变化。如图所示,随负荷增加,缸内最高压力逐步升高,最高燃烧压力由5.2MPa增加至13.4MPa,瞬时放热率峰值由0.024kJ/°CA增加至0.035kJ/°CA。0%负荷工况下,由于喷油量较低,喷油持续期较短,瞬时放热率曲线呈单峰。50%负荷工况下,负荷增加,预混燃烧比例减小,瞬时放热率曲线呈双峰。随着负荷的进一步增加,在75%负荷工况和100%负荷工况下,更多的燃料在扩散燃烧阶段放热,导致扩散燃烧部分峰值放热率增加,预混燃烧部分峰值放热率降低。

图11为不同负荷下燃烧特征参数的变化,随着负荷从0%增加至75%,CA10,CA50,CA90均逐步提前。这是由于随着负荷的增加,缸内温度升高,着火滞燃期缩短,燃烧过程提前。而在100%负荷工况下,由于喷油量增加,燃烧过程变长,CA50,CA90略有推迟。



(a)



(b)

Fig. 10 In-cylinder combustion laws under different load conditions

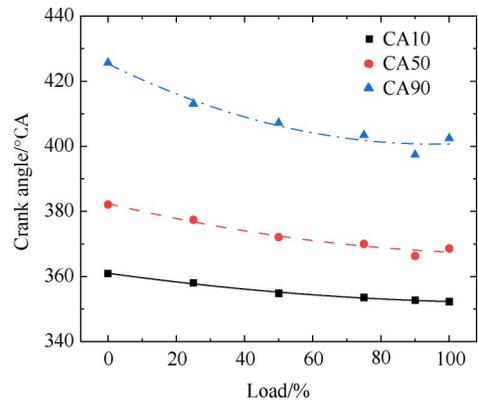


Fig. 11 Changes in combustion characteristics under different load conditions

为比较瞬态工况与稳态工况的燃烧差异,定义加载过程中循环放热量响应稳定时柴油机燃烧特征参数为瞬态值,此时柴油机供油响应稳定,但进气响应仍处于瞬态变化过程,因此该工况点能够有效表征柴油机的瞬态工况。图12为加载过程中,瞬态工况柴油机燃烧特征参数与该工况点对应的稳态工况值的差值。如图11所示,相比于同一工况下的稳态过程,瞬态过程的CA10变化较小,而CA50,CA90都有一定程度的推迟,这是因为瞬态过程中,由于进气

滞后,缸内进气量较低,影响燃油蒸发雾化过程,导致燃烧过程恶化。同时瞬态过程中缸壁和缸盖的热力状态存在滞后性,也会对缸内燃烧过程产生影响,导致燃烧过程推迟。瞬态工况下爆压显著低于稳态工况值,且差值随负荷增加而增加。

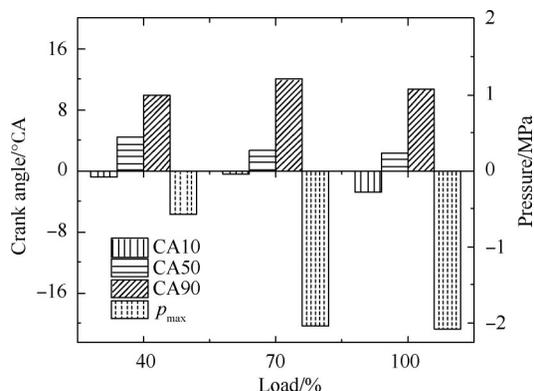


Fig. 12 Difference in combustion characteristics between transient and steady-state conditions

4 结论

通过本文研究,得到以下结论:

(1)该船用大功率柴油机突加载工况下,进气量响应滞后供油量响应4~5个工作循环,且进气量响应速度随初始负荷增加而增加。

(2)突加载工况下,由于进气滞后现象,发动机转速在加载后出现一定程度的下降,加载过程中IMEP等燃烧特征参数加载过程中响应速度较快,波动较小。

(3)船用大功率柴油机瞬态与稳态工况燃烧差异分析表明,瞬态工况下,缸内燃烧过程恶化,CA50和CA90较同工况下稳态值均推迟,爆压显著降低。

致谢:感谢国家自然科学基金的资助。

参考文献

[1] 吴哲,陈永艳,曹林. 船用柴油机应对IMO Tier III排放法规的路线选择[J]. 船舶工程, 2015, 37(8): 25-29.

[2] 景国辉,郑亮,李先南,等. 某船用柴油机调速特性瞬态仿真分析[J]. 柴油机, 2017, 39(6): 16-19.

[3] Han Y, Zhang L, Liu Z, et al. Investigation of Transient Deterioration Mechanism and Improved Method for Turbocharged Diesel Engine[J]. *Energy*, 2016, 116: 250-264.

[4] 张龙平,刘忠长,田径,等. 柴油机瞬变工况的动

态响应及燃烧劣变分析[J]. 内燃机学报, 2014, 32(2): 104-110.

- [5] 顾宏中. 涡轮增压柴油机热力过程模拟计算[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985.
- [6] Rakopoulos C D, Dimaratos A M, Giakoumis E G, et al. Evaluation of the Effect of Engine, Load and Turbocharger Parameters on Transient Emissions of Diesel Engine[J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(9): 2381-2393.
- [7] Liu S, Cui Y, Wang Y, et al. An Evaluation Method for Transient Response Performance of Turbocharged Diesel Engines[J]. *Energy*, 2019, 182: 852-863.
- [8] WU Z W, YANG J, LI L L, et al. Intelligent Control Strategy for Transient Response of a Variable Geometry Turbocharger System Based on Deep Reinforcement Learning[J]. *Processes*, 2019, 7(9).
- [9] 许允,张龙平,田径,等. 加载参数对柴油机恒转速增转矩瞬态工况的试验[J]. 内燃机学报, 2016, 34(1): 16-24.
- [10] Glewen W, Heuwerker D, Foster D E, et al. Analysis of Deviations from Steady State Performance During Transient Operation of a Light Duty Diesel Engine[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2012, 5(3): 909-922.
- [11] Yum K K, Lefebvre N, Pedersen E. An Experimental Investigation of the Effects of Cyclic Transient Loads on a Turbocharged Diesel Engine[J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 472-481.
- [12] Zare A, Bodisco T A, Nabi M N, et al. A Comparative Investigation into Cold-Start and Hot-Start Operation of Diesel Engine Performance with Oxygenated Fuels During Transient and Steady-State Operation[J]. *Fuel*, 2018, 228: 390-404.
- [13] Saad S M, Mishra R. Performance of a Heavy-Duty Turbocharged Diesel Engine under the Effect of Air Injection at Intake Manifold During Transient Operations[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, 44(6): 5863-5875.
- [14] 叶洲. 柴油机稳态和瞬态工况燃烧和排放性能量化分析系统的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- [15] 罗涛. 增压柴油机负荷阶跃工况燃油喷射策略的试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [16] GB/T 3475-2008, 船用柴油机调速系统技术要求和试验方法[S].
- [17] 梁辰,崔毅,陶一凯,等. 车用增压柴油机全工况燃烧放热规律分析[J]. 内燃机工程, 2014, 35(5): 95-99.

(编辑:朱立影)