

# 4190 型柴油机掺烧丁醇低温燃烧特性

胡 登<sup>1</sup>, 邓 涛<sup>1</sup>, 黄加亮<sup>1,2</sup>, 叶子泉<sup>1</sup>, 王尚鹏<sup>1</sup>, 范金宇<sup>1,2</sup>

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了研究丁醇掺混比和 EGR 率(exhaust gas recirculation)对柴油机燃烧性能的影响, 利用 AVL\_FIRE 仿真软件, 基于 4190ZLC-2 型船用中速柴油机, 建立燃烧室高压循环模型, 并验证模型的准确性。采用仿真的方法, 研究在低温条件下柴油机掺烧丁醇对其燃烧特性和性能的影响。在确保柴油机正常燃烧的基础上得到最终优化结果: 丁醇掺混比 B20; EGR 率 12.5%; 喷油提前角 20°; 进气压力 0.213 MPa。分析表明: 引入废气再循环(EGR)可以较好的实现低温燃烧, 但 EGR 过大, 混合气体氧浓度含量降低, 容易造成燃烧不充分现象; 柴油中掺混丁醇可以明显改善低温燃烧环境, 但掺混比过大容易造成滞燃期过长, 出现失火现象; 适当提高喷油提前角能使滞燃期延长, 避免粗暴燃烧, 有效提高放热率和柴油机的动力性和经济性; 进气压力提高, 增加混合气体氧含量和扰动性, 有效提高柴油机的动力性。

[关键词] 4190 型柴油机; 丁醇; 低温燃烧; 燃烧特性

[中图分类号] U 677.2

## Low Temperature Combustion Characteristics of 4190 Diesel Engine Blended with Butanol

HU Deng<sup>1</sup>, DENG Tao<sup>1</sup>, HUANG Jialiang<sup>1,2</sup>, YE Zixiao<sup>1</sup>, WANG Shangpeng<sup>1</sup>, FAN Jinyu<sup>1,2</sup>

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to study the effect of butanol blending ratio and EGR rate(exhaust gas recirculation) on diesel combustion performance, the AVL\_FIRE simulation software was used to establish a high-pressure circulation model of the combustion chamber based on the 4190ZLC-2 marine medium-speed diesel engine, and the accuracy of the model was verified. The simulation method was carried out to study the effect of diesel engine blended with butanol on the characteristic of combustion and performance under low temperature conditions. The optimal results were obtained on the basis of ensuring the normal combustion of the diesel engine where the butanol blending ratio, the EGR rate, the fuel injection advance angle, and the inlet pressure are respectively about B20, 12.5%, 20 °C A and 0.213 MPa. The results from analysis also show that the introduction of exhaust gas recirculation(EGR) can bring about a better performance in low-temperature combustion, However, a too large value of the EGR and alow concentration of the mixed gas may cause an insufficient combustion; the blending of butanol in diesel can significantly improve the low-temperature combustion environment, but if the blending ratio is too large, the flame retardation period will be too long, which will accordingly prolong the fire retardation period. A proper fuel injection advance angle will prolong the retardation period, a-

[收稿日期] 2019-03-05

[基金项目] 福建省自然科学基金资助项目(2017J01486; 2018J01499)

[作者简介] 胡登(1993—), 男, 硕士生, 从事双燃料发动机性能优化与排气测试分析研究。通信作者: 黄加亮(1963—), 男, 教授, 博士, 硕导, 从事现代轮机管理工程研究。

void rough combustion, effectively increase the heat release rate and improve the power and economy of the diesel engine. The oxygen content and the disturbance of the mixed gas effectively improve the dynamic performance of the put power in the diesel engine.

**Keywords:** 4190 diesel engine; butanol; low temperature combustion; combustion characteristics

0 引言

目前, 燃油费用占船舶总成本的比例逐步提高, 选择合适的替代燃料成为降低海上运输成本和解决能源紧张局势的一项重要措施<sup>[1]</sup>。张全长等<sup>[2]</sup>初步研究正丁醇对柴油机低温燃烧和排放的影响。郑尊清等<sup>[3]</sup>进行了喷射参数对柴油掺混燃料低温燃烧影响的试验研究。S. Szwaja 等<sup>[4]</sup>在汽油机的压缩比分别为 8 和 10, 丁醇-汽油混合燃料掺烧比例分别为 0%、20% 和 60% 时的研究结果显示, 丁醇可以高比例掺混或者完全替代汽油作为汽油机的燃料。Dogan O 等<sup>[5]</sup>在高速柴油机上掺混不同比例丁醇(0%、5%、10%、15%、20%), 燃烧性能结果表明, 制动油耗率随着丁醇比例的增加而增加, 排气温度降低, 氮氧化物变化不明显, 一氧化碳排放降低, 碳烟排放降低明显。

本文在电控柴油机最优运行参数基础上, 通过 AMESim<sup>[6]</sup> 和 AVL-FIRE<sup>[7]</sup> 软件, 在给定运行参数条件下, 研究改变丁醇掺混比例, 喷油提前角, 进气压力和 EGR 率时, 柴油机低温燃烧 LTC (low temperature compression)<sup>[8-9]</sup> 的燃烧性能。

1 研究对象及条件

电控化改造后的 4190 型柴油机基本参数如表 1 所示。

表 1 柴油机基本性能指标  
Tab. 1 Basic performance indexes of diesel engine

缸数 Number of cylinders	涡前排温 Vortex front discharge temperature /℃	燃烧室型式 Combustion chamber type	总排量 Total displacement /L	标定功率 Calibration power/kW	标定转速 Calibration speed /(r·min <sup>-1</sup> )	壁温 Wall temperature /℃	缸盖温度 Cylinder head temperature /℃	湍流长度 Turbulence length scale /m	喷油持续期 Fuel injection duration /(°)
4	≤600	半开式 ω 型 Semi-open type ω	23.82	220	1 000	403.15	542.25	0.006 24	29.4
缸径× 行程 Bore diameter× strokemmm /mm	标定扭矩 Calibration torque /(N·m <sup>-1</sup> )	压缩比 Compression ratio	平均有效压力 Average effective pressure /MPa	气道形式 Airway form	发火顺序 Fire order	活塞温度 Piston temperature /℃	湍动能 Turbulent energy /(m·s <sup>-2</sup> )	1/8 喷油量 One eighth of fuel injection/g	进气阀 关闭角 Intake valve closing angle /(°)
190×210	2 100	14:1	1.147	双气道 Double airway	1-3-4-2	631.25	18.375	0.049 35	593.5

在额定工况下, 设置缸内的丁醇(C4H10O)的质量分数为 0, 对比通过模型仿真的缸压曲线与原机台架实测的缸压曲线, 不断调整相关参数, 直至两条曲线误差在 5% 以内方可用于仿真计算。

2 丁醇掺混比和 EGR 率对柴油机燃烧和性能的影响

2.1 对燃烧的影响

混合燃料中丁醇的质量占比分别为 0% (B00)、10% (B10)、20% (B20)、30% (B30)。仿真过程中 EGR 率为进、排气中 CO<sub>2</sub> 浓度的比值。

丁醇掺混比和 EGR 率对柴油机燃烧性能的影响如图 1 所示。

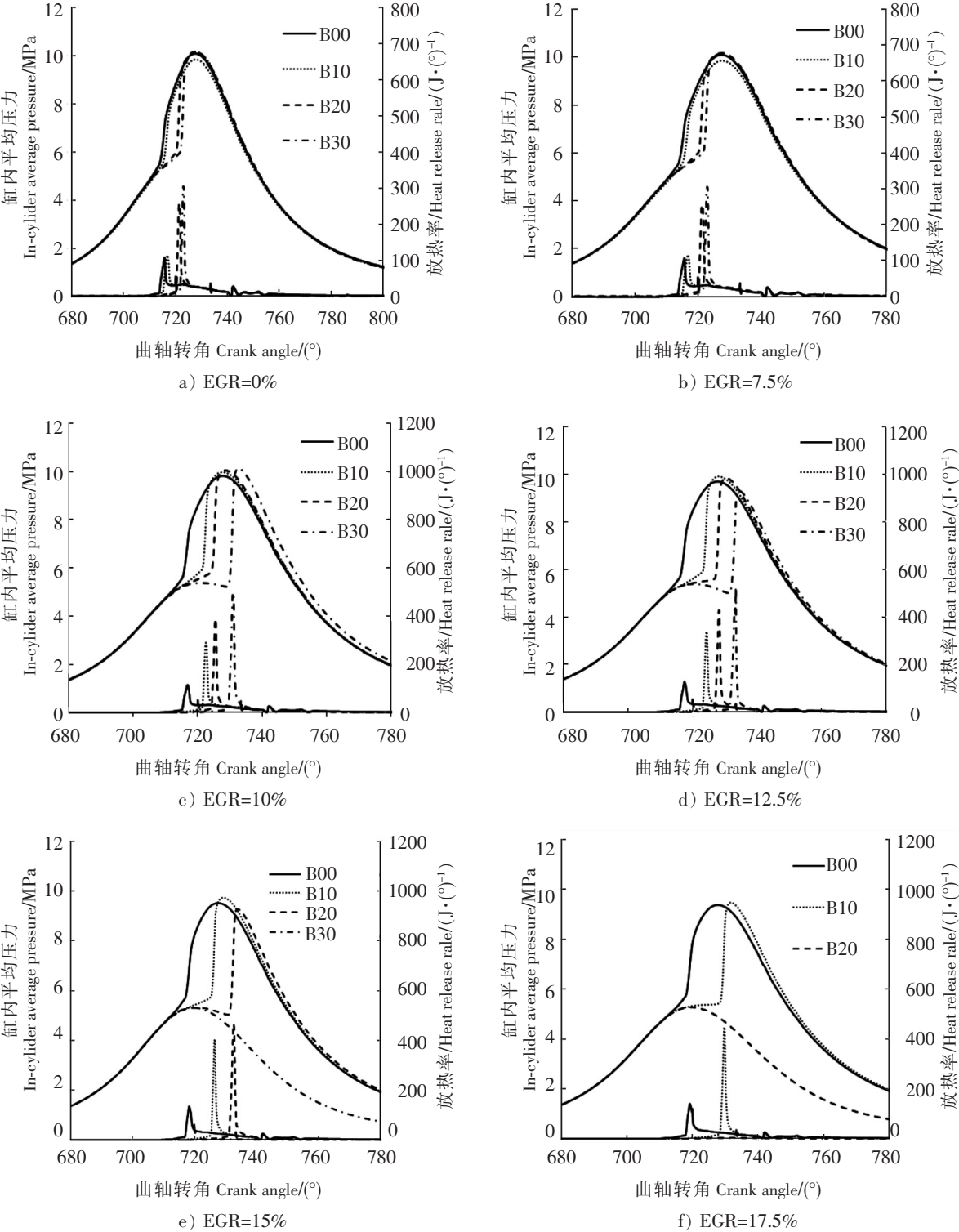


图 1 丁醇掺混比例和 EGR 率对柴油机燃烧性能的影响

Fig.1 Effect of n-butanol blending ratio and EGR rate on diesel combustion

从图 1 中可以看出,在同一 EGR 率下,随着丁醇掺混比的增加,缸内最高爆发压力降低,燃烧着火时刻随着掺混比的增大向后延迟。主要有以下原因:随着丁醇掺混比的增大,蒸发潜热较大,雾化需要更多的热量,加上丁醇热值偏低,使得缸内爆发压力降低,相较于柴油,丁醇十六烷值较低,

滞燃期延长，燃烧着火时刻向后推移。

从不同 EGR 率对应的缸压曲线来看，随着 EGR 率的增加，缸压曲线峰值明显降低，峰值延后。在 EGR 率为 10% ，丁醇掺混比 30% 时，缸内压力最大。主要原因有：EGR 率的增大，使得进入燃烧室的混合气体比热容增大，氧气浓度降低，燃料无法充分燃烧，缸内最高压力降低，滞燃期延长，B30 对应的燃料氧含量最高。

从放热曲线可以看出，在同一 EGR 率下，随着丁醇掺混比的增加，初始放热时刻滞后，放热率峰值升高，且峰值时刻滞后。主要原因为：丁醇的加入使得蒸发需要吸收更多的热量，滞燃期延长，燃料与空气能够较为充分的混合，有助于燃料在急燃期快速放热，放热率增加，随着 EGR 率的增加，惰性气体增加，氧气被稀释，延长了滞燃期，有助于急燃期放热。对于不同 EGR 率，相同掺混比的混合燃料放热峰值升高，放热滞后。

在 EGR 率为 15%，丁醇掺混比为 B30；EGR 率为 17.5%，丁醇掺混比分别为 B20、B30 时出现失火现象。主要原因有：较高的 EGR 率极大地降低了混合气体中的氧气含量，而丁醇自身蒸发和着火所需温度较高，使得活塞压缩过程所达到的最高温度无法达到混合燃料的着火点，最终出现失火现象。

综上所述，丁醇掺混比为 B10、B20，EGR 率为 7.5% ~ 15% 时，混合燃料能够较为充分燃烧。

2.2 对性能的影响

丁醇替代率是双燃料柴油机的重要参数，直接影响到排放性和经济性。从图 3a 中可以看出，在相同的 EGR 率下，平均指示压力随着丁醇掺混比的增加而降低。随着 EGR 率的增大，每个丁醇掺混比对应的平均指示压力曲线呈降低趋势，其中 B20、B30 对应的曲线分别在 EGR 率 15% 和 12.5% 时突然下降。上述变化趋势的主要原因：丁醇热值较低，滞燃期向后延长，预混合燃烧阶段偏离上止点附近向后延迟，使缸内压力下降；EGR 率的升高使得滞燃期更长，从而发生失火现象。

从图 2b 看出，指示功率曲线与平均指示压力曲线基本一致，其主要原因为：在丁醇和 EGR 率作用下燃烧滞后，燃烧效率下降，平均指示压力降低，相同喷油量做功更少，指示功率下降。

从图 2c 看出，在同一掺混比下，指示燃油消耗率随着 EGR 率增加而增大，增长幅度随着掺混比的增大而更加明显；在同一 EGR 率下随着掺混比的增加，指示燃油消耗率升高。原因如上所述：丁醇掺混比和 EGR 率的增大使燃料热值降低，十六烷值减少，燃烧滞后，燃烧效率降低，在高丁醇掺混比和 EGR 率下燃烧恶化，油耗率增幅较大。

综上所述，当运行参数组合为 B10 EGR 7.5%、B20 EGR12.5% 时，混合燃料燃烧具有较好的燃烧性能。在此基础上进行喷油提前角和进气压力对双燃料柴油机性能优化研究。

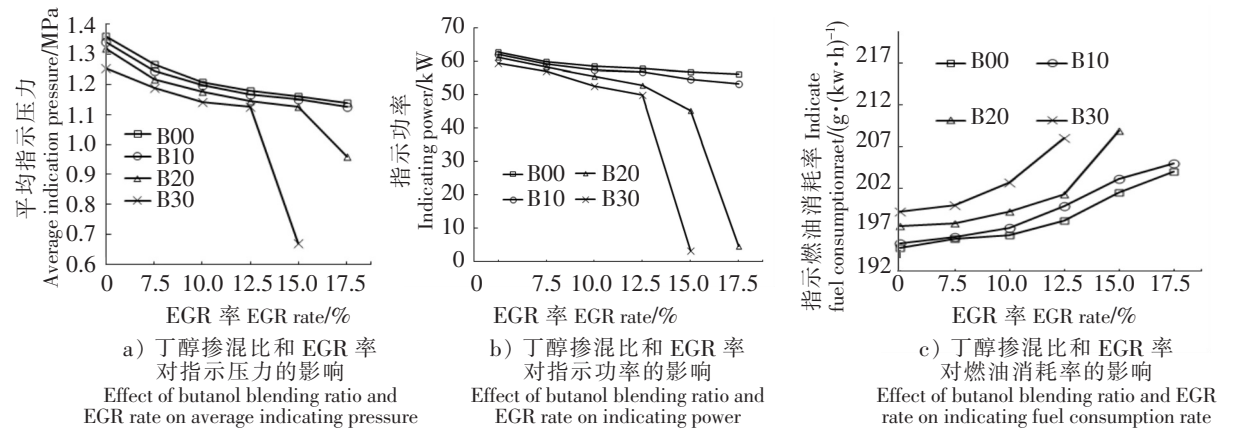


图 2 丁醇掺混比例和 EGR 率对平均指示压力、指示功率和指示燃油消耗率的影响

Fig.2 Effect of butanol blending ratio and EGR rate on average indicating pressure, indicating power and indicating fuel consumption rate

3 喷油提前角对柴油机燃烧和性能的影响

3.1 对燃烧的影响

喷油提前角对双燃料柴油机的燃烧过程和综合性能影响较大, 喷油提前角直接影响着滞燃期的长短。滞燃期影响着缸内的湍流流动、温度场、传热等物理化学过程, 控制燃烧过程, 对燃烧和排放性能起着关键作用。设定循环喷油量为 0.050 12 g, 进气压力为 0.192 MPa, 当丁醇掺混比为 B10, EGR 为 15% 时, 喷油提前角对缸内压力和放热率的影响如图 3a 所示; 当丁醇掺混比为 B20, EGR 为 12.5% 时, 喷油提前角缸内压力和放热率的影响率如图 3b 所示。

从图 3 可以看出在相同的 EGR 和丁醇掺混比下缸内压力随着喷油提前角的增大而升高, 最高爆发压力时刻逐步提前; 随着喷油提前角的增大放热率明显升高, 峰值提前与压力变化有类似的趋势。主要原因为: 随着喷油提前角的增大, 滞燃期延长, 燃料获得充分燃烧, 急燃期燃烧速率加快, 缸内最高爆发压力和放热率峰值增大。

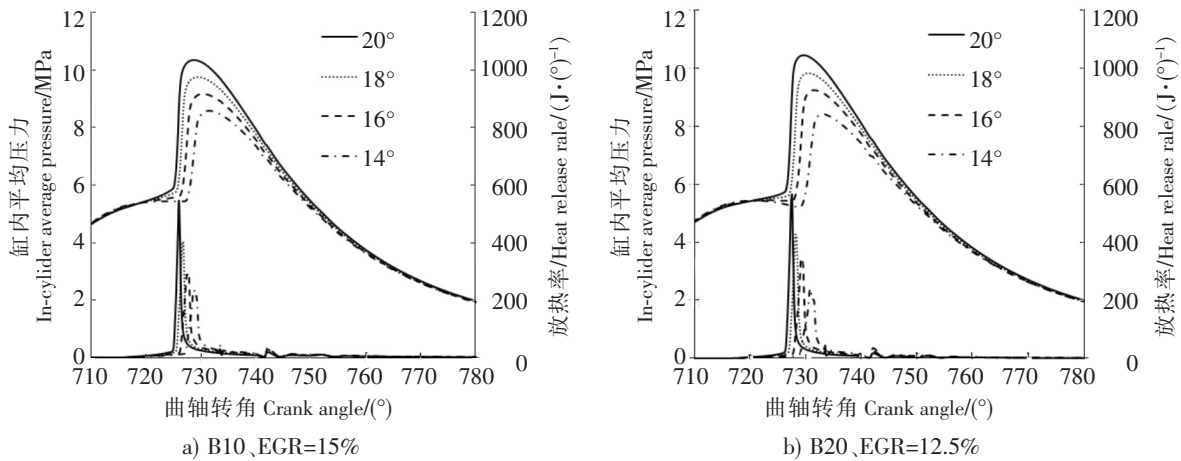


图 3 不同的喷油提前角对缸内压力和放热率的影响曲线图

Fig.3 Effect of different injection advance angles on cylinder pressure and heat release rate

3.2 对性能的影响

喷油提前角对柴油机性能的影响如图 4 所示。

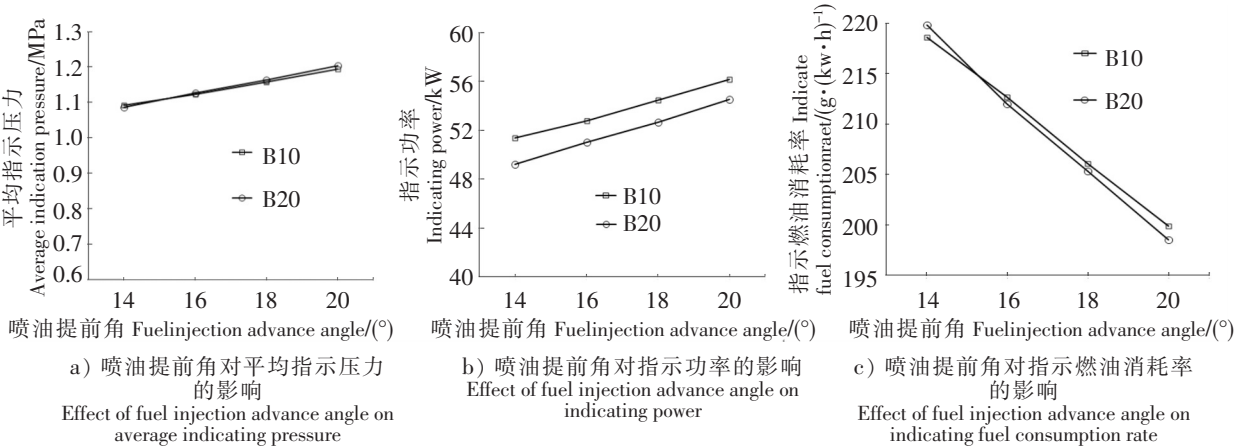


图 4 喷油提前角对平均指示压力、指示功率和指示燃油消耗率的影响

Fig.4 Effect of fuel injection advance angle on average indicating pressure, indicating power and indicating fuel consumption rate

从图 4 中可以看出, 在相同丁醇掺混比下, 平均指示压力和指示功率曲线随着喷油提前角的增大呈上升趋势, 燃油消耗率与之相反。由图 4a 可知, 不同丁醇掺混比对指示压力影响不大; 由图 4b 可



以看出，指示功率随着丁醇掺混比的增加而降低；图 4c 可以看出随着喷油提前角的增加，掺混比越大，燃油消耗率曲线下下降斜率越大。主要原因有：喷油时刻提前，燃烧更充分，做功能力增强，效率得到提高，油耗率更低。

综上所述，适当增大喷油提前角能有效改善柴油机的动力性和经济性，在 B20，喷油提前角 20° 组合下具有较好的经济性。

## 4 进气压力对柴油机燃烧和排放性能的影响

### 4.1 进气压力对柴油机燃烧的影响

进气压力对进入缸内氧浓度有着重要影响，从而影响低温燃烧的质量。试验参数设定：循环喷油量为 0.050 12 g；B10、EGR = 15%；B20，EGR = 12.5%。对应的进气压力对缸内压力和放热率的影响如图 5 所示。

从图 5 可以看出：缸内压力随着进气压力的降低而呈下降趋势，缸内最高压力向后延迟；放热率曲线随着进气压力的降低而升高，最高点向后推移，整体趋势与缸内压力趋势相反。主要原因为：随着进气压力的降低，缸内混合气体中的氧气含量减少，同时气体流动性降低，不利于混合燃料与氧气的充分混合，滞燃期延长，所以缸内最高压力向后延迟，缸内压力整体下降；滞燃期的延长增加了急燃期的放热速率，使得放热率增加，峰值后移。由于进气压力为 0.233 MPa 时，缸内最高压力超过了 11 MPa，超出了柴油机的正常机械负荷，所以进气压力 0.233 MPa 舍去。

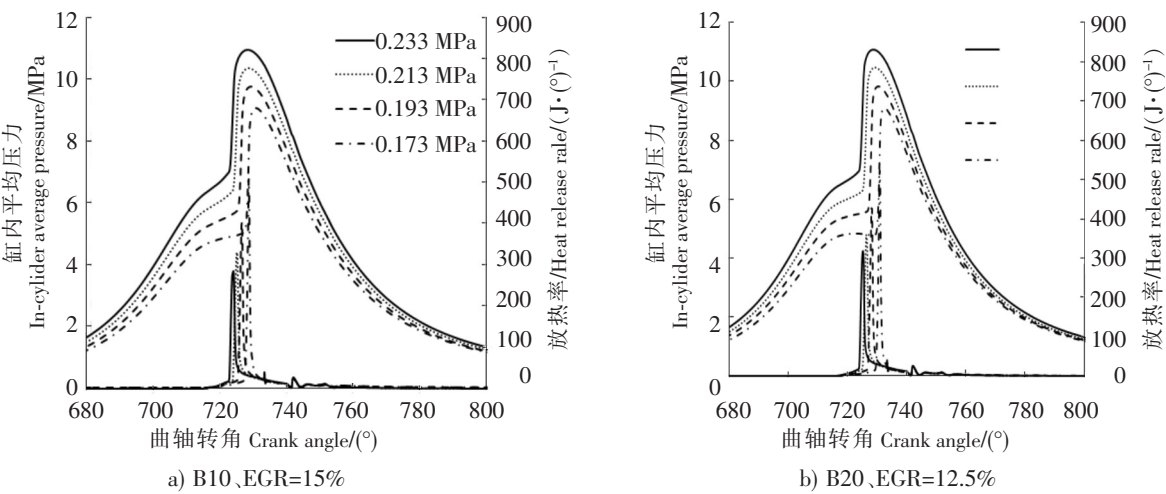


图 5 进气压力对缸内压力和放热率的影响曲线图

Fig.5 Effect of different inlet pressures on cylinder pressures and heat release rates

### 4.2 对性能的影响

从图 6 可以看出：在相同丁醇掺混比下，平均指示压力和指示功率随着进气压力的增大而升高，指示燃油消耗率呈下降趋势；在不同的丁醇掺混比下，B20 在进气压力为 0.173 MPa 时，对应的指示压力和指示功率高于 B10 对应的值，燃油消耗率则与之相反。主要原因有：进气压力增大，进入缸内空气更多，燃料混合更加充分，燃烧更加完全，相同质量的燃料放出更多的热量，油耗率降低；在较低的进气压力下，进入缸内空气量不充足，与 B10 相比较，B20 对应的燃料中含有较多的氧元素，更有利于燃料充分燃烧，即使在热量较低的情况下仍然拥有更高的做功能力。

综上所述，进气压力为 0.213 MPa，丁醇掺混比为 B20，EGR 率为 12.5% 时，柴油机具有较好燃烧性和经济性。

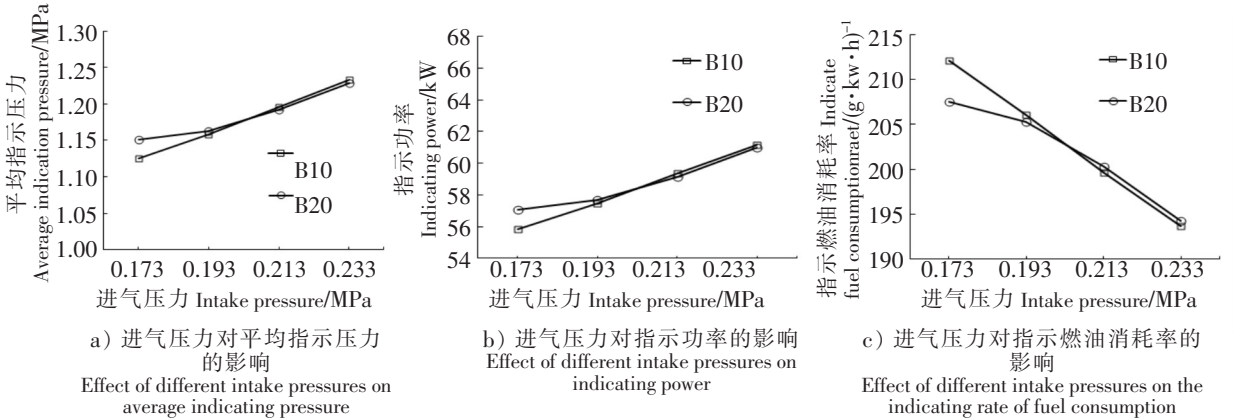


图 6 进气压力对柴油平均指示压力、指示功率和指示燃油消耗率的影响

Fig.6 Effect of different intake pressures on average indicating pressure, indicating power and the indicating rate of fuel consumption

## 5 确定最优组合

本试验在确保燃烧性能的基础上寻求动力性和经济性的最优组合。选取丁醇掺混比、EGR 率、喷油提前角、进气压力 4 个因素，以指示功率和燃油消耗率作为评价指标，分别追求最大和最小结果，如图表 2 所示。

表 2 试验设计表  
Tab.2 Test design table

序号号 Serial number	丁醇掺混比 Butanol blending ratio/%	EGR 率 EGR rate /%	喷油提前角 Fuel injection advance angle /(°)	进气压力 Intake pressure /MPa	指示功率 Indicating power /kW	燃油消耗率 Fuel consumption rate /(g·(kW·h) <sup>-1</sup> )
1	10	15.0	18	0.193	57.22	206.12
2	10	15.0	18	0.213	58.37	199.46
3	10	15.0	20	0.193	59.76	202.08
4	10	15.0	20	0.213	61.63	196.04
5	20	12.5	18	0.193	57.54	204.68
6	20	12.5	18	0.213	58.24	200.33
7	20	12.5	20	0.193	59.08	201.57
8	20	12.5	20	0.213	61.18	194.95

由表 2 可知，在 B10，EGR 率 15%，进气压力 0.213 MPa，喷油提前角 20°时，指示功率取得最大值为 61.63 kW；在 B20，EGR 率 12.5%，进气压力 0.213 MPa，喷油提前角 20°时，燃油消耗率最小为 194.95 g/(kW·h)。

综合以上分析，在保证燃烧性能的基础上，指示功率相差不大的条件下，选择燃油消耗率较小的组合：丁醇掺混比 B20，EGR 率 12.5%，喷油提前角 20°，进气压力 0.213 MPa 作为最优组。

## 6 结论

本文选择丁醇掺混比、EGR 率、喷油提前角和进气压力为参数，在丁醇/柴油混合燃料燃烧过程高压循环仿真模型基础上，设计试验，进行仿真计算，并对数据进行分析，在既定工况下以缸内压力、平均指示压力、指示功率和指示燃油消耗率为参数，选取最优掺混比和 EGR 率，可以得出以下结论：

1) 掺混丁醇使滞燃期延长, 燃料与空气能够较为充分的混合, 有助于燃料在急燃期快速放热, 混合燃料具有较好的燃烧性能。

2) EGR 率极大地降低了混合气体中的氧气含量, 较好的实现了低温燃烧, 但过高的 EGR 率会造成点火失败和经济性降低。

3) 喷油提前角增大, 缸内平均压力, 平均指示压力升高, 滞燃期延长, 在上止点接近等容燃烧, 燃烧质量得到提高。但喷油提前角过大会导致双燃料发动机工作粗暴, 适当增大提前角可以改善其动力性。

4) 进气压力增大, 进入缸内的空气量增多, 有助于燃料充分燃烧, 获得了更大的做功能力, 降低了油耗率, 有助于改善柴油机的动力性和经济性。

综合以上分析, 在确保柴油机正常燃烧性能基础上, 丁醇掺混比为 B20, EGR 率为 12.5%, 喷油提前角为  $20^{\circ}$ , 进气压力为 0.213 MPa 时, 混合燃料燃烧具有较好的动力性和经济性。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 孙思远, 徐虎, 黄加亮, 等. 电控柴油机燃油系统参数匹配对油耗率的影响 [J]. 中国航海, 2017, 40(3): 14-19.
- [2] 张全长, 尧命发, 郑尊清, 等. 正丁醇对柴油机低温燃烧和排放的影响 [J]. 燃烧科学与技术, 2010, 16(4): 363-368.
- [3] 郑尊清, 岳朗, 刘海峰, 等. 喷射参数对柴油掺混燃料低温燃烧影响的试验研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2015, 21(2): 108-113.
- [4] ZWAJA S S, NABER J D. Combustion of n-butanolin aspark-ignition I cengine [J]. Fuel, 2010, 89(7): 1573-1582.
- [5] DOGAN O. The influence of nbutanol/diesel fuel blend sutilization on a small diesel engine performance and emissions [J]. Fuel, 2011, 90(7): 2467-2472.
- [6] 孙建波. 船用电控增压四冲程柴油机建模与性能优化研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2007
- [7] 邓科, 张守勋, 张焕青, 等. 基于 CFD 的机房热环境的数值模拟与优化 [J]. 自动化与仪器仪表, 2018(7): 170-173.
- [8] SELIM MYE. Sensitivity of dual fuel engine combustion and knocking limits to gaseous fuel composition [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(3): 11-25.
- [9] HARDY W L, REITZR D. A Study of the effects of high EGR、high equivalence ratioand mixing time on emissions levels in a heavy-duty diesel engine for PCCI combustion [J]. SAE World Congress & Exhibition, 2006, 118(3): 563-585.
- [10] 胡启坤. 4190ZLC-2 型船用柴油机燃油系统电控化改造 [J]. 集美大学学报 (自然科学版), 2014, 19(5): 350-355.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)