

DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.202401003

极寒条件下含氧燃料对柴油机冷启动特性的影响

王晓宇¹, 王正江¹, 贾丹丹², 万明定¹, 申立中¹

(1. 昆明理工大学 云南省内燃机重点实验室, 云南 昆明 650500;

2. 山东京博新能源控股发展有限公司, 山东 滨州 256500)

摘要: 针对柴油机存在低温冷启动困难甚至无法启动的问题, 基于启动/发电机集成一体化技术柴油机, 在高原低温发动机冷启动试验舱, 研究-50号柴油 A0(氧质量分数为 0%)、A1(氧质量分数为 2.05%)和 A2(氧质量分数为 4.40%)燃料在-43℃下对柴油机冷启动过程的影响和燃烧特性分析。结果表明: 相比 A0 纯柴油, 燃用 A1、A2 含氧燃料启动时间分别缩短了 36.64%和 42.71%; 启动累计油量分别降低 47.8%和 60.6%; 怠速运行前 60 s 内转速波动率分别降低 25.3%和 43.8%。燃用燃料氧质量分数越高, 启动燃烧首循环的缸内压力、燃烧放热率、缸内燃烧温度和缸内压力升高率峰值越高, 且燃烧重心前移, 燃烧持续期越短; 启动转速上升过程循环数越少, 平均最大缸内压力越大, 启动过程燃烧稳定性越好。

关键词: 柴油机; 含氧燃料; 冷启动过程; 燃烧

中图分类号: TK421.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0909(2024)01-0018-08

Effects of Oxygenated Fuels on Cold Start Characteristics of Diesel Engines Under Extreme Cold Conditions

Wang Xiaoyu¹, Wang Zhengjiang¹, Jia Dandan², Wan Mingding¹, Shen Lizhong¹

(1. Yunnan Key Laboratory of Internal Combustion Engine, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Shandong Chambroad New Energy Development Company Limited, Binzhou 256500, China)

Abstract: In order to solve the problem of cold start struggling and failing of engine, comparative experiments were conducted on a diesel engine with integrated starting/generator technology fueled with -50# diesel A0 (fuel oxygen content 0%), A1 (fuel oxygen content 2.05%) and A2 (fuel oxygen content 4.40%). Experimental data were collected on an engine cold start test cell of high plateau conditions at -43℃. Effects of different fuel oxygen contents on the processes and combustion of the diesel engine under cold start conditions were examined. The results show that comparing with A0, starting times of the diesel engine fueled with A1 and A2 are shortened by 36.64% and 42.71% respectively. The amount of fuel consumption during cold start periods is reduced by 47.8% and 60.6% respectively and the speed fluctuation rate is reduced by 25.3% and 43.8% respectively in the first 60 s of idle operation. With the increases of fuel oxygen content, the in-cylinder combustion temperature and in-cylinder pressure of the first diesel cycle, the heat release rate and the peak pressure rise rate all are increased. The CA 50 is advanced and the combustion duration is shortened. And the lower the number of cycles is during the starting speed rise, the higher the average maximum cylinder pressure, and the better the combustion stability during the starting process.

Keywords: diesel engine; oxygenated fuels; cold start process; combustion

柴油机因其动力性和经济性优势, 是一种应用广泛的道路运输、非道路移动机械和国防装备的动力装

置^[1]. 中国大部分地区具有高原高寒特征, 如中国西北地区在最冷月份气温在-25℃到-41℃, 最低甚至

收稿日期: 2023-05-07; 修回日期: 2023-11-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52066008); 云南省科技计划资助项目(202103AA080002).

作者简介: 王晓宇, 硕士研究生, E-mail: 1371434385@qq.com.

通信作者: 申立中, 硕士, 教授, 博士生导师, E-mail: lzshen@foxmail.com.

可达到 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2],该环境对柴油动力冷起动造成了极大困难.因此,研究柴油动力在极寒条件下的冷起动过程,探索改善柴油动力冷起动性能的技术措施,增强柴油动力极端条件下的适应性,对国民经济发展和国防战略具有重要意义.

发动机的低温冷起动过程,整机温度和环境温度低、缸内混合气均匀性不好以及润滑条件差起动阻力矩增加等因素的综合影响,燃烧不稳定、排放恶化、转速稳定性下降、起动时间增加及长时间起动困难甚至无法起动都是发动机冷起动过程的常见问题.随着海拔的升高和温度的降低,缸内空气温度和密度降低,燃油喷雾特性恶化加剧^[3],首循环着火困难,混合气滞燃期变长^[4],发动机起动性能急剧下降,甚至造成发动机极端条件下无法运转.因此,发动机极端条件下的起动性能是其适应性的重要评价指标.如何改善发动机的起动性能,解决低温下发动机冷起动成功性问题,是提高其极端环境下适应性的关键.

为解决发动机低温冷起动成功性问题,近年来许多学者做了大量研究,采取各种措施,如采用进气道预热^[5]、预热塞缸内预热^[6]、冷却液辅助加温^[7]、进气涡旋管^[8]、喷油参数优化匹配^[9]、多次喷射^[10]、提高压缩比^[11]、废气再循环(EGR)^[12]、气缸强制注油^[13]和喷油压力控制^[14]等,以提高发动机低温冷起动性能.为解决发动机冷起动排放问题,王正江等^[15]提出基于柴油机瞬时转速的起动油量斜坡控制策略,实现了起动到怠速的柔性控制,有效降低常温起动过程HC排放.韩晓梅等^[16]采用基于目标转速变化特性的油量控制策略,提高起动过程瞬态燃烧效率,有效降低 CO_2 、HC、CO和 NO_x 排放.Ambrozik等^[17]采用菜籽脂肪酸甲酯与柴油混合,降低了起动过程的 NO_x 和HC排放.刘光义等^[18]采用二次喷射降低了 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的直喷汽油机起动过程的HC和CO排放.纪常伟等^[19]研究了过量空气系数对氢内燃机冷起动排放的影响,发现随着过量空气系数的减小, NO_x 排放呈现先增后减,HC和CO排放逐渐增加.胡志远等^[20]研究了高原对柴油机冷起动排放的影响,发现随海拔升高HC和CO排放增加, NO_x 排放降低.以上研究主要是针对柴油动力从辅助措施、优化匹配和策略控制等方面入手,研究其对冷起动过程的转速稳定性、燃烧特性和排放特性的影响规律及优化措施.在能源危机和双碳背景下大量新型燃料也被用于发动机冷起动研究,如生物质燃料^[21]、F-T/PODE掺混燃料^[22]对发动机冷起动性能、低温适用性和排放影响的研究.

上述发动机的冷起动试验都在环境温度高于 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行,更低温度的研究鲜见报道.有研究表明,氧含量和压力的下降会严重影响柴油的燃烧,滞燃期和燃烧持续期均增大,使柴油的燃烧延后导致发动机起动困难^[23],而含氧燃料由于自带含氧基,可改善柴油燃烧与排放状况^[24].因此,基于起动/发电机集成一体化技术柴油机,笔者通过多次高原低温冷起动台架试验,研究环境温度为 $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,不同含氧量柴油对柴油机起动性能和起动过程燃烧性能的影响.以探究不同含氧燃料对极端环境下柴油机起动性能和燃烧性能的改善情况,为提高柴油机极端环境下的适应性提供研究依据.

1 试验设备及试验方案

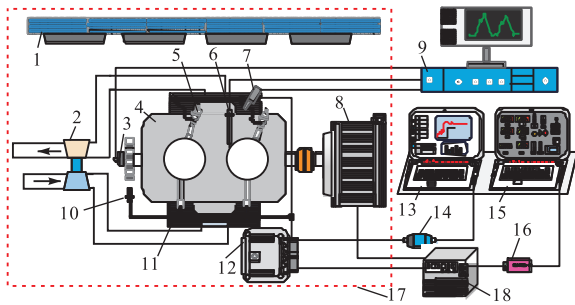
1.1 试验设备

试验所用柴油机主要技术参数如表1所示.

表1 柴油机技术参数

Tab.1 Engine specifications	
参数	数值
柴油机型式	高压共轨缸内直喷、增压水冷
气缸数目	2
缸径/mm	81
活塞行程/mm	97
排量/L	0.99
压缩比	17.5
标定功率/kW	42.5(3 200 r/min)
最大扭矩/(N·m)	152(2 000 ~ 2 400 r/min)

图1为台架布置示意,包括高原低温试验环境舱、变频驱动电机监控系统、试验数据采集及标定系统、燃烧数据采集分析系统和燃油供给系统等组成.试验环境舱温度通过复叠式制冷循环系统进行调节控制,其调控范围为 $-60\sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}$,调控偏差为 $\pm 1\%$,环境温度传感器为PT100(精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$).试验数据采集系统主要由信号采集传感器、自主开发的可标定发动机ECU和标定计算机等组成,试验过程中通过CAN通讯模块I与标定软件INCA建立数据连接,并通过INCA软件进行起动控制参数的标定和试验数据的采集记录.试验燃烧数据通过AVL622燃烧分析仪进行采集记录,同时通过电流测试探头对喷油器工作状态进行检测,以便于更精确地对缸内燃烧数据进行分析.而传感器主要有AVL365C角标仪(精度为 0.01°CA)、AVLGH13P缸压传感器(精度为 0.01 MPa).变频电机监控系统通过基于LabVIEW开发的柴油发电机监控系统软件和CAN通讯模块II与发动机ECU、变频器建立数据连接,实现变频电机工作状态的监控和发动机起、停命令的发送.



1—复叠式制冷循环系统；2—增压器；3—AVL365C 角标仪；4—发动机；5—喷油器；6—缸压传感器；7—电流测试探头；8—变频器；9—AVL622 燃烧分析仪；10—转速传感器；11—预热塞；12—发动机 ECU；13—INCA 试验数据采集系统；14—CAN 通讯模块 I；15—LabVIEW 电机监控系统；16—CAN 通讯模块 II；17—高原低温试验环境舱；18—变频控制器。

图 1 柴油机高原低温冷起动试验台架示意

Fig.1 Schematic diagram of the diesel engine plateau low-temperature cold start test rig

1.2 发动机起动过程及评价指标

根据发动机起动过程转速变化如图 2 所示, 将起动过程划分为初始阶段、自加速阶段和调节阶段. 初始阶段为电机拖动发动机运转至电机拖动结束标志转速, 自加速阶段为发动机拖动电机运转至起动结束标志转速, 起动结束标志转速至发动机转速稳定到目标怠速 $\pm 2\%$ 范围内为调节过程.

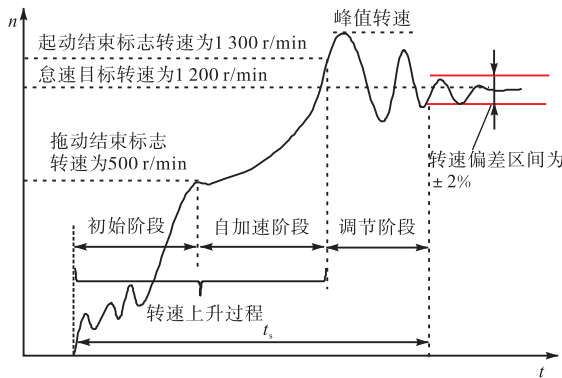


图 2 柴油机低温冷起动过程示意

Fig.2 Schematic diagram of diesel engine cold starting process

为了评价柴油机冷起动性能的优劣, 将起动过程的转速、起动时间、起动累计油量和燃烧稳定性作为评价指标. 把初始阶段和自加速阶段称为转速上升过程. 把初始阶段、自加速阶段和调节阶段所经历的时间作为起动时间 t_s , 对应的累计循环喷油量作为起动累计油量 q_s , 同时循环喷油量由 INCA 软件从 ECU 内部进行读取采集. 把起动过程的峰值转速与起动结束标志转速之差称为转速超调量. 其中, 电机拖动结束标志转速是用于表示电机拖动发动机结束的可标定的电机转速阈值, 当电机转速达到目标转速

之后, 电机停止拖动. 起动结束标志转速是用于发动机起动成功状态判断的可标定的发动机瞬时转速阈值, 当发动机转速达到该目标值后, 认为发动机起动成功, 喷油量由怠速 PID 根据怠速目标转速进行闭环调节.

1.3 试验方案

不同含氧燃料的低温冷起动试验在进气压力为当地大气压 80 kPa, 环境温度、冷却液温度、进气温度、燃油和润滑油温度均为 $-43\text{ }^\circ\text{C}$ 下进行. 试验所采用的起动策略、喷油策略(两次预喷 + 主喷)、怠速 PID 和起动喷油参数均相同, 其中主喷的喷油量为 29.5 mg/cyc , 喷油时刻为上止点前 5°CA ; 预喷 1 的喷油量为 2.5 mg/cyc , 喷油时刻为上止点前 11.5°CA ; 预喷 2 的喷油量为 3 mg/cyc , 喷油时刻为上止点前 21°CA . 怠速目标转速为 1200 r/min , 起动结束标志转速为 1300 r/min , 当转速 $n \geq 500\text{ r/min}$ 或拖动时间 $t \geq 20\text{ s}$ 时, 电机停止拖动. 采用预热塞进行进气缸内预热, 预热策略为起动前预热 20 s 加起起动过程持续预热.

在 $-43\text{ }^\circ\text{C}$ 下的冷起动试验选用的冷却液和润滑油, 其理化指标如表 2 和表 3 所示.

表 2 试验用冷却液理化指标

Tab.2 Physical and chemical indexes of coolant for testing

参数	数值
冰点/ $^\circ\text{C}$	< -60
沸点/ $^\circ\text{C}$	124.0
泡沫体积/mL	110
泡沫消失时间/s	3.2
密度 ($20\text{ }^\circ\text{C}$)/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.1
pH	8.1

表 3 试验用润滑油理化指标

Tab.3 Physical and chemical indexes of lubricants for testing

参数	数值
$100\text{ }^\circ\text{C}$ 运动黏度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	8.38
$40\text{ }^\circ\text{C}$ 运动黏度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	42.22
黏度指数	179
$-35\text{ }^\circ\text{C}$ 低温动力黏度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	2.739
$-40\text{ }^\circ\text{C}$ 低温泵送黏度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	9.005
倾点/ $^\circ\text{C}$	-72

试验用柴油的理化性质如表 4 所示, 不同燃料冷起动试验前需要在常温下对燃油供给系统进行清洗, 再更换上相应的油品后起动发动机正常运行 5 min , 避免试验过程中燃烧室内存在不同油品混合燃烧对冷起动试验结果造成影响. 冷起动试验前需要将燃油和发动机置于低温环境舱, 进行降温预处理至 $-43\text{ }^\circ\text{C}$ 并保温 12 h .

表 4 试验用燃油理化指标

参数	燃料		
	A0	A1	A2
十六烷值	49.4	50.5	51.4
低热值/(MJ·kg ⁻¹)	46.26	45.36	44.54
密度(20℃)/(kg·m ⁻³)	804.0	800.5	807.2
冷滤点/℃	-51	-51	-51
氧质量分数/%	0	2.1	4.5

2 起动性能分析

2.1 不同含氧燃料对起动过程转速、起动时间和起动油量的影响

图 3 为不同含氧燃料在-43℃下发动机冷起动过程的瞬时转速随时间的变化。燃用燃料含氧量越高,起动过程转速上升越快,达到怠速运行的时间越短。电机拖动结束后发动机瞬时转速曲线出现下凹现象,燃用燃料含氧量越低,瞬时转速下凹幅度越明显,自加速阶段越长。相比 A0 燃料,燃用 A1、A2 含氧燃料转速达峰值转速后转速下冲较少,其原因是含氧燃料起动过程的燃烧稳定性和充分性好,缸内做功能力更好。燃用 A2 燃料相比 A1 燃料达峰值转速后转速下掉较多,原因是上升过程时间短,做功次数少,润滑油黏度大,阻力矩大。

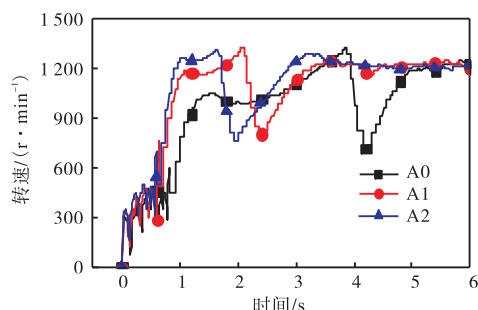


图 3 不同含氧燃料冷起动过程转速变化

Fig.3 Variation of speed during cold start of different oxygenated fuels

图 4 为-43℃下不同含氧燃料发动机冷起动过程的起动时间 t_s 、转速超调量 v_{up} 和起动累计油量 q_s 的对比。-43℃下发动机冷起动工况瞬态过程的起动时间、转速超调量和起动累计油量均与燃用燃料含氧量呈反比关系。燃用燃料含氧量越高起动过程时间越短,发动机转速上升越快,转速超调量越小,起动累计油量越低。相比 A0 燃料,燃用 A1、A2 含氧燃料起动时间分别缩短了 36.64% 和 42.71%;起动累计油量分别降低 47.8% 和 60.6%;起动过程转速超调量分别降低了 17.86% 和 35.70%。

究其原因原因是燃用 A1、A2 含氧燃料,使可燃混合

气中的氧质量分数增加,加快了燃烧过程的化学反应速率,缸内燃烧放热速率变快,燃烧时间缩短。同时燃用含氧燃料 A1、A2 相比 A0 燃料具有较高的十六烷值,低温下的着火性能好,燃烧滞燃期短,预混合燃烧时间缩短,使起动时间缩短。相比 A0 燃料,含氧燃料 A1、A2 的含氧特性对混合气燃烧有积极作用,促进了混合气的燃烧^[25],燃烧放热更多,缸内压力变大,缸内平均指示压力提高,工质向活塞传递的有用功增加,做功能力增强,使起动过程累计油量降低。燃料含氧量越高燃烧越稳定,因而转速超调量越小。但随着燃料含氧量的增加,对-43℃下发动机冷起动性能的改善效果减弱,其原因是燃料的热值会随着燃料含氧量的增加而减小,相同质量燃料燃烧所释放的热量减少,导致工质做功能力减弱,对柴油机冷起动性能的改善效果减弱。

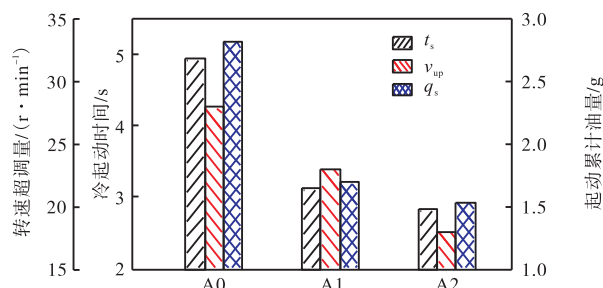


图 4 不同含氧燃料冷起动时间、转速超调量与起动累计油量

Fig.4 Cold start time, speed overshoot and accumulated oil volume for starting with different oxygenated fuels

2.2 不同含氧燃料对怠速转速稳定性的影响

为研究不同含氧燃料对发动机起动后怠速转速运行稳定性的影响,选取起动调节阶段结束后 60 s 内的怠速转速波动率 φ_{cov} 作为发动机起动后的怠速循环变动的量化评价指标。怠速转速波动率 φ_{cov} 为

$$\varphi_{cov} = [S_D(v)/\bar{v}] \times 100\% \quad (1)$$

$$S_D(v) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [v(i) - \bar{v}]^2}{N-1}} \quad (2)$$

式中: \bar{v} 为发动机转速平均值; $S_D(v)$ 为发动机转速样本的标准偏差; N 为采样数据个数; $v(i)$ 为第 i 时刻发动机瞬时转速。

图 5 为不同含氧燃料在-43℃冷起动调节阶段结束后 120 s 内的怠速转速和怠速循环喷油量。燃用 3 种燃料刚进入怠速的短时间内,发动机转速接近目标怠速转速稳定运行,随着怠速循环喷油量的逐渐减少(图 5b),燃料燃烧释放的能量不足以克服发动机的运转阻力,怠速转速波动幅度逐渐增加。相比燃料

A0, 燃用 A1、A2 含氧燃料在怠速运转过程中转速波动小, 均呈现逐渐减小的趋势, 且燃用 A2 燃料转速稳定性最优. 而燃用 A0 燃料在起动运行大概 15 s 后出现转速大幅度下降, 且较长时间转速严重不稳, 有时甚至会造成起动失败. 其原因是在进入怠速初期, 发动机润滑油黏度仍然较高, 运转阻力较大, 机体温度较低, 壁面传热损失较大, 燃油蒸发雾化差, 随着喷油量逐渐减少, 参与燃烧的燃料释放的能量不足以克服运转阻力, 使得发动机转速降低. 燃用 A0 燃料怠速转速大幅下跌后, 怠速 PID 调节循环喷油量突增, 造成混合气过浓, 燃烧急剧恶化, 做功能力减弱, 怠速 PID 将持续增加喷油, 使循环喷油量长时间为最大值. 而含氧燃料因能够改善缸内混合气的燃烧, 燃烧稳定性好, 做功能力强, 所以循环喷油量波动小, 且波动幅度与燃料含氧量呈负相关.

图 6 为不同含氧燃料在-43℃冷起动调节阶段结束后 60 s 内的怠速转速平均值和怠速转速波动率对比. 燃用 3 种燃料怠速转速波动率均超过目标怠速的 ±2%, 其原因是-43℃下的发动机冷起动过程所需的暖机时间长于常温冷起动, 发动机的冷却液温度、缸体温度和润滑油温度将长时间处于较低温度, 缸内燃油蒸发雾化差, 燃烧条件恶劣, 做功能力差, 导致循环波动较大. 相比 A0 燃料, 燃用 A1、A2 含氧燃料冷起动平均怠速转速较高且接近怠速目标转速,

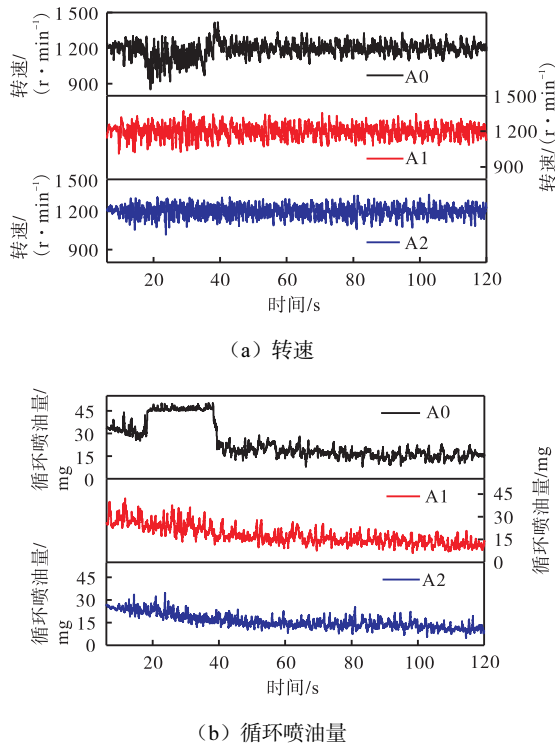


图 5 不同含氧燃料冷起动怠速转速和循环喷油量
Fig.5 Cold start idle speed and cycle speed injection of different oxygenated fuels

含氧量越高怠速波动率越小, 怠速转速波动率分别降低 25.23% 和 43.8%. 原因是-43℃下发动机运行阻力矩较大, 造成较大怠速波动, 使怠速 PID 油量调控循环波动变大, 缸内存在大量浓混合气燃烧循环. 含氧燃料改善了浓混合气循环的燃烧过程, 燃烧放热更彻底, 工质做功能力加强, 因而怠速稳定性更好.

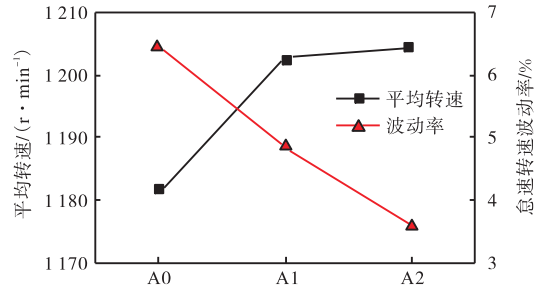


图 6 不同含氧燃料冷起动怠速平均转速与怠速转速波动率
Fig.6 Average idle speed and idle speed fluctuation rate of cold start with different oxygenated fuels

3 不同含氧燃料对起动过程燃烧性能的影响

3.1 不同含氧燃料对燃烧首循环的影响

图 7 为不同含氧燃料在-43℃冷起工况下的燃烧首循环的缸内压力与放热率. 相比 A0 纯柴油, 燃烧首循环缸内压力峰值与燃料含氧量呈正比, 缸内压力峰值相位提前. 燃料含氧量越高燃烧放热率峰值越高, 放热速率越快, 放热结束越提前. 原因在于

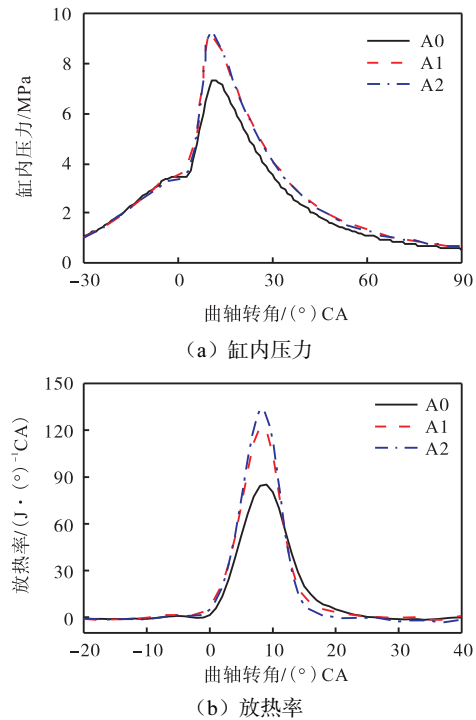
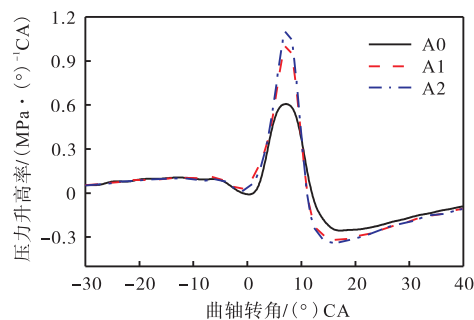


图 7 冷起动燃烧首循环缸内压力与放热率
Fig.7 Cold start combustion first cycle cylinder pressure and heat release rate

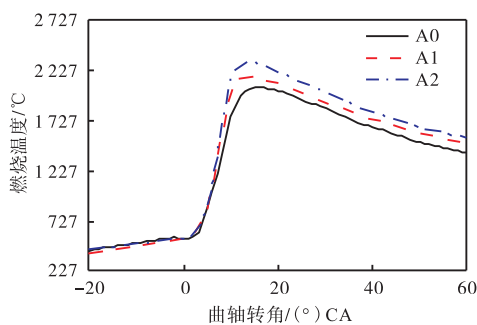
A1 与 A2 燃料的十六烷值高, 低温下的着火性能好, 滞燃期短, 同时含氧量高, 燃烧化学反应速率快, 燃烧放热提前, 燃烧相位提前. 燃用 A0 燃料, 缸内压力峰值和放热率较低, 主要原因是可燃混合气中含氧量相比 A1、A2 低, 燃烧速度较慢, 氧化反应不彻底, 放热较少, 导致缸内压力峰值和燃烧放热率较低.

图 8a 为不同含氧燃料在 $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷启动工况下的燃烧首循环压力升高率对比. 不同含氧燃料压力升高率随曲轴转角的变化均呈单峰, 压力升高率峰值与燃料含氧量呈正相关, 压力升高率随含氧量的增加而变快. 相比含氧燃料 A1、A2, 燃用 A0 燃料压力升高率较低, 主要是由于 A0 燃料十六烷值低, 着火性能差, 缸内可燃混合气含氧量低, 燃烧速度慢, 燃烧充分性差导致放热率低, 造成压力升高率低. 燃用 A2 燃油相比于 A0、A1 燃料十六烷值和含氧量较高, 低温下的着火性能较好, 燃烧速度快且燃烧充分性好, 进而提高了压力升高率.

图 8b 为不同含氧燃料在 $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷启动工况下燃烧首循环的缸内燃烧温度的对比. 相比 A0 纯柴油, 燃用含氧燃料 A1、A2 燃烧首循环缸内温度升高速率变快, 缸内燃烧温度峰值变高, 峰值前移. 原因是含氧燃料提高了燃烧化学反应速率, 使预混合燃烧速度加快, 燃烧释放热量增多, 缸内温度升高变快, 加快



(a) 压力升高率



(b) 燃烧温度

图 8 冷启动燃烧首循环压力升高率和燃烧温度

Fig.8 Cold start combustion first cycle pressure rise rate and combustion temperature

了扩散燃烧期的燃油蒸发速率, 雾化效果变好, 燃料燃烧数量增加, 燃烧放热增加, 致使燃烧温度变大.

图 9 为不同含氧燃料在 $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷启动工况下燃烧首循环的燃烧特征参数对比. 分别定义燃烧始点 CA 5、燃烧重心 CA 50 和燃烧终点 CA 90 为燃料燃烧累计放热量分别为 5%、50% 和 90% 时所对应的曲轴转角, 燃烧持续期 CA 10-90 定义为燃烧累计放热量为 10% ~ 90% 所经历的曲轴转角. 相比 A0 燃料, 燃用含氧燃料时发动机燃烧首循环燃烧始点、燃烧重心及燃烧终点前移, 燃烧持续期缩短. 其原因是燃用 A0 燃料十六烷值低、滞燃期长, 且相比 A1、A2 燃料不含氧, 使预混合燃烧和扩散燃烧速度都变慢, 导致燃烧重心和燃烧终点后移, 燃烧持续期延长. 相比 A1 燃料, 燃用 A2 燃料具有更高的十六烷值和含氧量, 缸内燃烧速度加快, 缩短了预混合燃烧和扩散燃烧时间, 导致燃烧重心和燃烧终点前移, 缩短了燃烧持续期, 燃烧定容性好.

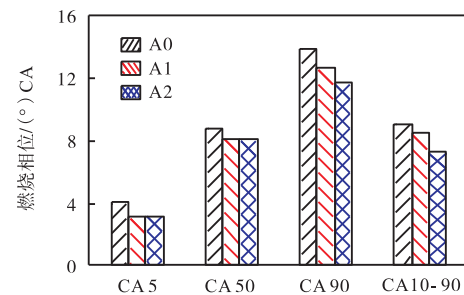


图 9 冷启动燃烧首循环燃烧相位特征参数

Fig.9 Cold start combustion first cycle combustion phase characteristic parameters

3.2 不同含氧燃料对启动过程燃烧的影响

图 10 为不同含氧燃料在 $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷启动过程前 40 个循环缸内压力对比. 燃用 3 种燃料启动过程的缸内压力曲线均呈现为子孕峰, 缸内压力峰值最低点的单峰均由启动成功后, 进入怠速 PID 闭环油量控制初期喷油较少造成. 相比 A2 燃料, 燃用 A0、A1 燃料在启动过程中缸内压力波动幅度较大. 启动过程发动机转速达启动结束标志转速后, 进入怠速 PID 闭环油量控制, 喷油量由小增大, 缸内压力升高过程出现峰值缸内压力曲线. 其原因是在怠速闭环调节前几个工作循环喷油量较少, 缸内混合气稀薄, 无法完全燃烧, 剩余未燃燃料累积到后几个工作循环集中燃烧放热, 缸内压力升高率突增, 导致启动过程缸内压力峰值出现最大值. 随后缸内压力峰值先减小再增大后出现不同程度的波动.

图 11 为不同含氧燃料在 $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷启动工况下前 40 个循环最高燃烧压力. 相比 A0 燃料, 采用 A1 和

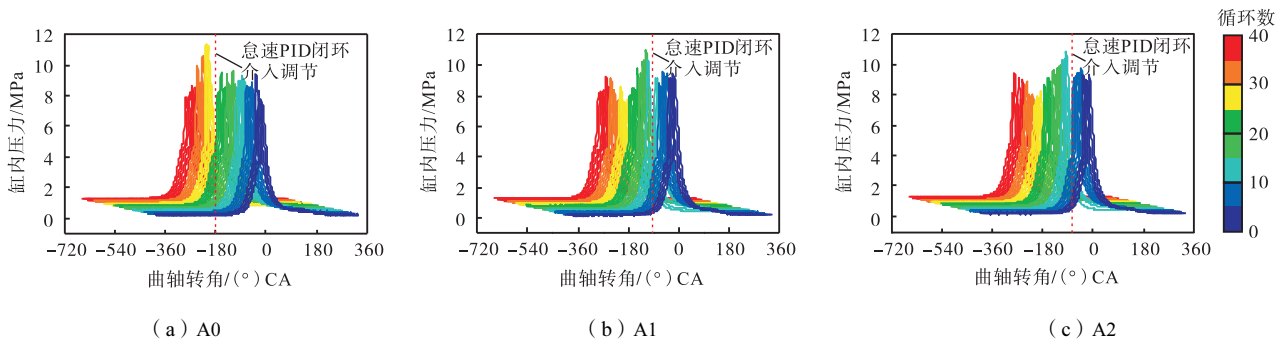


图 10 不同含氧燃料冷起动过程缸内压力

Fig.10 Cylinder pressure during cold start of different oxygenated fuels

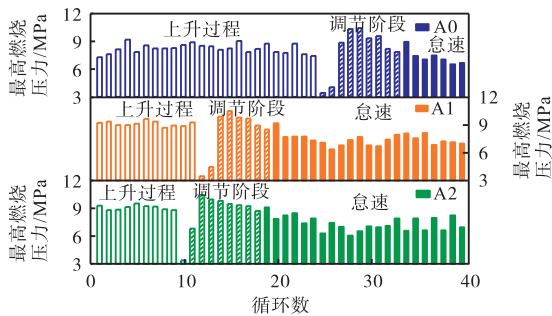


图 11 不同含氧燃料冷起动过程最高燃烧压力

Fig.11 Maximum combustion pressure during cold start of different oxygenated fuels

A2 含氧燃料时, 发动机起动上升过程最高燃烧压力变大, 波动变小, 上升过程所需循环数分别减少 13 个和 15 个. 其原因是燃用 A1、A2 含氧燃料在上升过程的浓混合气中氧含量变高, 燃烧氧化反应增强, 燃烧速率加快, 放热增加, 使最高燃烧压力变大, 做功能力加强从而缩短了转速上升过程. 调节阶段 3 种燃料最高燃烧压力均呈先增后减趋势, 经历的循环数相差不大, 且燃烧的稳定性与燃料含氧量呈正比.

图 12 为燃用 3 种燃料在 $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下发动机冷起动工况转速上升阶段的平均最高燃烧压力及其循环变动率 C_{pcp} , 其定义为

$$C_{\text{pcp}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_{\text{max},i} - \bar{p}_{\text{max}})^2}{n}} / \bar{p}_{\text{max}} \quad (3)$$

式中: $p_{\text{max},i}$ 为第 i 循环的最高燃烧压力; \bar{p}_{max} 为 n 个循环的最高燃烧压力平均值.

相比 A0 燃料, 燃用 A1、A2 含氧燃料起动的上升阶段的平均最高燃烧压力变大, 分别增加 10.70% 和 10.06%. 原因是燃用含氧燃料 A1、A2 的含氧特性在燃烧化学反应中起到积极作用, 燃烧放热更彻底, 缸内压力较大, 而 A0 燃料因不含氧且十六烷值较低, 着火性能差, 燃烧速率受到了抑制^[26], 释放热量较少, 缸内压力偏低. 而 A2 含氧燃料在起动的上升阶段

的平均最高燃烧压力比 A1 含氧燃料较低, 是因为 A2 燃料热值较低. 含氧量越高, 起动转速上升过程最高燃烧压力波动率越小. 相比 A0 燃料, 燃用 A1、A2 含氧燃料起动转速上升过程最高燃烧压力波动率分别降低 52.64% 和 58.37%. 其原因是燃料含氧量越高燃烧速度越快, 燃烧持续期缩短, 燃烧稳定性越好, 做功能力增强.

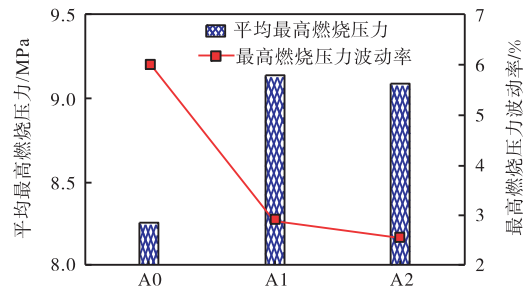


图 12 不同含氧燃料冷起动转速上升阶段的平均最高燃烧压力与最高燃烧压力波动率

Fig.12 Average maximum combustion pressure and maximum combustion pressure fluctuation rate during the cold start speed rise phase for different oxygenated fuels

4 结 论

(1) 相比纯柴油, 含氧燃料能够改善极寒条件下的柴油机冷起动低温性能; 燃用 A1、A2 含氧燃料, 起动时间分别减少 36.4% 和 42.7%, 转速超调量分别降低 17.86% 和 35.70%, 怠速运行前 60s 的转速波动率分别降低 25.23% 和 43.8%, 冷起动过程的起动累计油量分别降低 47.8% 和 60.6%.

(2) 相比纯柴油, 含氧燃料能够改善极寒条件下的燃烧首循环燃烧性能; 含氧量越高, 燃烧首循环的缸内压力、燃烧放热率和缸内压力升高率峰值都越高, 燃烧重心前移, 燃烧持续期越短; 但随着燃料含氧量的增加热值会降低, 对极寒条件下柴油机冷起动性能改善效果会减弱.

(3) 相比纯柴油,含氧燃料能提高极寒条件下冷启动过程燃烧稳定性;随燃料含氧量增加,燃用 A1、A2 含氧燃料冷启动转速上升过程的平均最大燃烧压力分别增加 10.70%和 10.06%;循环数分别减少 13 个和 15 个循环,最高燃烧压力波动率分别降低 52.64%和 58.37%。

参考文献:

- [1] 帅石金,王志,马骁,等.碳中和背景下内燃机低碳和零碳技术路径及关键技术[J].汽车安全与节能学报,2021,12(4):417-439.
- [2] 洪印涛.极端低温环境下柴油机的快速启动研究[D].重庆:重庆交通大学机电学院,2015.
- [3] Fang L A, Lou D A, Hu Z A, et al. Study on the first-firing-cycle combustion characteristics of high-altitude and low-temperature environments during diesel engine cold start[J]. Fuel, 2022, 322: 124-186.
- [4] 马宁,李若亭,赵文柱,等.高原环境条件下的柴油机启动过程试验研究[J].兵工学报,2017,38(2):227-232.
- [5] Deng Y, Liu H, Zhao X, et al. Effects of cold start control strategy on cold start performance of the diesel engine based on a comprehensive preheat diesel engine model[J]. Applied Energy, 2018, 210(15): 279-287.
- [6] Pastor J V, Bermúdez V, García-Oliver J M, et al. Influence of spray-glow plug configuration on cold start combustion for high-speed direct injection diesel engines[J]. Energy, 2011, 36(9): 5486-5496.
- [7] 胡志远,谢毅,阚泽超,等.辅助加热对柴油机变海拔启动性能的影响[J].同济大学学报:自然科学版,2018,46(6):828-833.
- [8] Ac A, My B, Ofy C. Improvement of diesel engine startability under low temperatures by vortex tubes[J]. Energy Reports, 2020, 6: 17-27.
- [9] 黄丫,林学东,段春丽,等.高压共轨柴油机启动控制策略与参数优化研究[J].汽车工程,2018,40(5):501-507,527.
- [10] Payri F, Broatch A, Salavert J M, et al. Investigation of diesel combustion using multiple injection strategies for idling after cold start of passenger-car engines[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2010, 34(7): 857-865.
- [11] E J, Liu G, Zhang Z, et al. Effect analysis on cold starting performance enhancement of a diesel engine fueled with biodiesel fuel based on an improved thermodynamic model[J]. Applied Energy, 2019, 243(1): 321-335.
- [12] Yi C, Peng H, Deng K, et al. The effects of unburned hydrocarbon recirculation on ignition and combustion during diesel engine cold starts[J]. Energy, 2014, 64(1): 323-329.
- [13] Malozemov A, Bondar V, Kukis V. Improvement of the forced diesel engines cold starting characteristics by oil injection into the cylinder[J]. Procedia Engineering, 2016, 150: 1149-1155.
- [14] Yang Z, Liu F, Li Y. Autoignition characteristics of diesel spray under different injection pressures and cold start strategy for compression ignition engines[J]. International Journal of Engine Research, 2021, 22(7): 2131-2149.
- [15] 王正江,申立中,万明定,等.柴油机启动过程瞬态喷油量的控制策略[J].内燃机学报,2021,39(4):320-325.
- [16] 韩晓梅,林学东,李德刚.轻型柴油机启动过程瞬态喷油量控制策略研究[J].汽车工程,2017,39(1):23-27.
- [17] Ambrozik A, Ambrozik T, Lagowski P. Fuel impact on emissions of harmful components of the exhaust gas from the CI engine during cold start-up[J]. Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability, 2015, 17(1): 95-99.
- [18] 刘光义,柳建辉,孙玉,等.直喷汽油机二次喷射改善冷启动性能的研究[J].内燃机学报,2019,37(6):481-488.
- [19] 纪常伟,白晓鑫,汪硕峰,等.过量空气系数对氢内燃机冷启动燃烧及排放的影响[J].工程热物理学报,2020,41(8):2077-2083.
- [20] 胡志远,于书祥,阚泽超,等.海拔高度对柴油机启动污染物排放的影响[J].中国环境科学,2018,38(1):91-96.
- [21] Broatch A, Tormos B, Olmeda P, et al. Impact of biodiesel fuel on cold starting of automotive direct injection diesel engines[J]. Energy, 2014, 73(14): 653-660.
- [22] 陈东东,王铁,李国兴,等.F-T/PODE 掺混燃料对混合动力柴油机启动特性的影响[J].内燃机学报,2022,40(3):233-239.
- [23] 王俊,杨鹤,张然,等.氧含量和压力对柴油自燃行为的影响[J].石油学报:石油加工,2022,38(5):1166-1172.
- [24] 王旭东,熊春华,安高军,等.高原环境柴油机燃用聚醚型含氧燃料燃烧特性[J].内燃机学报,2015,33(5):407-412.
- [25] 刘少华,申立中,毕玉华,等.燃料含氧量在不同海拔下对柴油机性能的影响[J].内燃机学报,2012,30(4):316-321.
- [26] 刘庆生,黄豪中,王雪强,等.氧体积分对低十六烷值混合燃料燃烧特性影响[J].内燃机学报,2017,35(1):9-15.