

DOI: 10.16236/j.cnki.nrxj.202401002

低温起动热力学条件下柴油机喷雾着火特性

马玉坡¹, 冯 宇¹, 廖桐舟¹, 刘浩业²

(1. 中国北方车辆研究所 轮式系统技术部, 北京 100072;

2. 天津大学 先进内燃动力全国重点实验室, 天津 300350)

摘要: 针对一款 V 型八缸增压柴油机, 首先分析了其低温起动过程中缸内压缩压力和压缩温度的变化规律, 然后在定容喷雾燃烧装置中研究了低温起动热力学条件下柴油的喷雾着火特性, 分析了背景温度和背景密度的变化过程中喷雾射流滞燃期和着火位置的变化规律. 研究发现: 随着背景温度降低, 柴油自由喷雾着火滞燃期逐渐增加, 着火稳定性逐渐降低; 背景密度越高, 最低着火温度越低; 背景温度低于 430 °C 时, 柴油射流的着火成功率非常低, 很难着火. 该研究对提高起动稳定性, 降低燃油消耗率和改善排放有重要的指导意义.

关键词: 柴油机; 着火特性; 低温起动

中图分类号: TK427

文献标志码: A

文章编号: 1000-0909(2024)01-0011-07

Ignition Characteristics of Diesel Engine Under Low-Temperature Start Condition

Ma Yupo¹, Feng Yu¹, Liao Tongzhou¹, Liu Haoye²

(1. Wheeled System Technology Department, China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China;

2. State Key Laboratory of Engine, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The compression pressure and temperature during low-temperature start was analyzed on a V-type 8-cylinder turbocharged diesel engine, and then the ignition characteristics of diesel spray was studied in a constant-volume spray combustion test device with background temperature and density based on the low-temperature start condition of the engine. The relationship between ignition delay period and ignition position under different background temperature and density conditions was studied. It is found that the ignition delay of diesel free spray increases and the ignition stability decreases with the decrease of background temperature. When the background temperature is below 430 °C, the success rate of diesel jet ignition is very low, leading to misfire. The research result is of great significance for improving the stability of low-temperature start and improving fuel consumption and emissions for the diesel engine.

Keywords: diesel engine; ignition characteristics; low-temperature start

柴油机的排放和效率一直关系着全球能源消耗和温室效应等关键问题^[1-3], 而且由于柴油的雾化性能差使得柴油机的低温起动问题一直是制约其广泛应用的一个重要因素, 至今也没有得到很好的解决^[4-6]. 柴油机低温起动性能的好坏已经成为评价整机性能的一个重要方面, 不仅影响了整机的工作效率和使用寿命, 而且在一定程度上影响了排放和燃油消耗率. 日本洋马公司甚至声称, 他们把柴油机低温起动性能的

开发放在第一位^[7-8]. 另外, 如今为了改善 NO_x 的排放问题, 柴油机需要减小压缩比, 从而降低缸内燃烧温度^[9], 这在一定的程度上又增加了柴油机低温起动的难度^[10-11]. 因此, 深入研究柴油机低温起动过程的控制方法, 对车用柴油机的广泛使用具有重要的意义. 柴油喷雾燃烧过程是影响柴油低温起动性能的关键过程, 深入理解该过程可以为柴油机低温起动过程的控制方法开发提供重要理论基础.

收稿日期: 2023-05-11; 修回日期: 2023-10-02.

作者简介: 马玉坡, 博士, 副研究员, E-mail: mayupo2015@163.com.

通信作者: 刘浩业, 博士, 研究员, E-mail: liuhaoye@tju.edu.cn.

Dec^[12]提出了柴油喷雾燃烧概念模型,对柴油喷雾燃烧的基本过程进行了描述:液态燃油喷入缸内后,与热空气发生混合,并在下游温度和当量比合适的区域发生着火燃烧,形成扩散火焰。随后,以可视化定容燃烧弹为测试平台,结合高速摄影等光学诊断技术,研究人员开展了大量柴油喷雾燃烧的基础研究工作。Payri 等^[13]发现喷雾燃烧过程中密度和环境温度对滞燃期的影响较大,而氧体积分数和喷射压力的影响较小。Vogel 等^[14]研究发现影响滞燃期的关键参数是环境温度和喷射压力,因为这两个参数影响液滴的尺寸和分布情况。环境压力影响着火位置,喷油量对滞燃期影响不大。Benajes 等^[15]研究发现氧气体积分数越高、喷射压力越高,滞燃期越短;而火焰浮起长度与氧气体积分数和喷射压力呈负相关的关系。Cung 等^[16]发现两次喷射时改变喷射间隔对燃料浓度场和着火过程有非常显著的影响。何旭等^[17]研究了掺混生物柴油对柴油喷雾燃烧特性的影响,发现随掺混比例增加,喷雾锥角减小,贯穿距增加,着火滞燃期缩短。刘波^[18]研究了汽/柴油混合燃料的着火及燃烧特性,发现汽油掺混比越高,滞燃期越长,着火位置距离喷嘴越远。米永刚等^[19]发现滞燃期随环境温度升高和喷油压力的增加而缩短,火焰浮起长度随环境温度升高和喷油压力减小而缩短;掺混加氢催化生物柴油后滞燃期和火焰浮起长度都降低。可见,现有研究虽然研究了热力学参数和燃料特性等对喷雾燃烧的影响规律,但缺少针对低温冷启动工况下系统且定量的研究。

笔者针对某柴油机,首先分析了低温启动过程中的压缩压力和压缩温度的变化规律;然后针对低温启动工况的压力和温度,在定容喷雾燃烧试验装置中,通过改变相应的背景条件,模拟研究了柴油机低温启动过程中的喷雾燃烧的着火规律,对提高低温启动稳定性,改善燃油消耗率和排放具有重要的指导意义。

1 试验装置与方法

1.1 柴油发动机试验台架

发动机试验台架是一台 V 型八缸增压柴油机,主要参数如表 1 所示。

发动机试验台架上安装了大量的传感器,如通过 K 型热电偶温度传感器监测冷却液和机油的进/出口温度和进/排气温度等。利用同源瞬时油耗仪进行燃油消耗率测试。利用 Kistler 压力传感器测量缸内燃烧压力、燃烧喷射压力和进/排气压力等。喷油器内置针阀传感器,结合电控单体泵燃烧喷射控制系统对喷油量和喷油提前角等喷油参数进行监测和控制。其

中喷油器针阀升程传感器由固定在顶杆内的磁铁和进行检测的霍尔元件构成,其非常紧凑地安装在喷油器体内。霍尔元件装在弹簧座的上方,弹簧座上固定着一块永久磁铁。霍尔元件通电后,弹簧座随针阀运动时,因永久磁铁运动而使通过霍尔元件的磁感应强度发生变化,造成近似与针阀升程呈正比的输出信号电压变化。通过 DEWETRON 燃烧分析仪由信号电压的变化来得知喷油始点和针阀升程曲线,并计算缸内瞬时放热率,曲轴转角分辨率为 0.1°CA ,同步采样率为 1.0×10^7 次/s,传感器精度为 0.1°CA 。所有测试设备均经过了检测和标定,误差都在 5% 以内,可以用于试验测试。

表 1 发动机技术参数

Tab.1 Engine specifications

参数	数值
缸径/mm	132
活塞行程/mm	145
排量/L	1.98
压缩比	14
燃烧室	双卷流型
发火顺序	1-8-4-5-7-3-6-2
供油系统	电控单体泵
最大功率/kW	500(2 100 r/min)
最大转矩/(N·m)	2 415(1 800 r/min)

1.2 柴油定容喷雾燃烧试验系统

该柴油定容喷雾燃烧试验系统主要包括定容试验装置、燃油供给系统、数据采集系统和控制系统,能够灵活地调整背景条件,包括背景介质的种类及其压力和温度;喷射条件包括喷射压力、喷射脉宽、喷射次数和燃油温度;碰壁条件包括壁面温度、冲击高度和冲击角度。图 1 为柴油定容喷雾燃烧试验系统示意,图 2 为该装置内部结构。

试验中,使用的高速摄像机是美国 TRI 公司的 PHANTOM v7.3 CMOS 相机,光圈为 1.2,拍摄速度为 20 000 幅/s,曝光时间为 0.02 ms。温度控制系统由加热瓦、调压器和温度传感器组成,对容弹内部进行

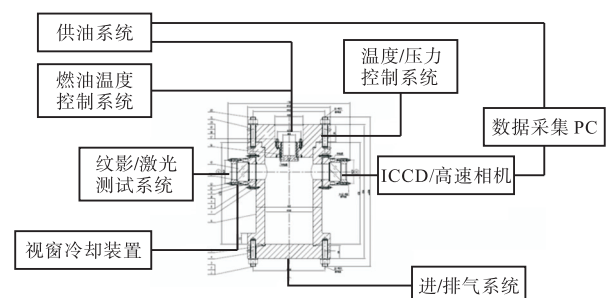


图 1 柴油定容喷雾燃烧试验系统示意
Fig.1 Schematic diagram of the diesel constant volume spray and combustion test system

温度控制,控制精度为 0.1 °C. 加热瓦为空心圆柱型结构,内部嵌入两根并联的加热丝,通过电极与调压器相连,加热丝的总电阻为 4.5 Ω,最大加热功率为 11 kW. 另外,容弹采用了内部隔热保温措施,常压下约经过 0.5 h 容弹内部温度可以达到 700 °C. 调压器可以调节加热丝两端的电压,进而调节加热功率,与传感器配合来调节和控制容弹内部的温度.

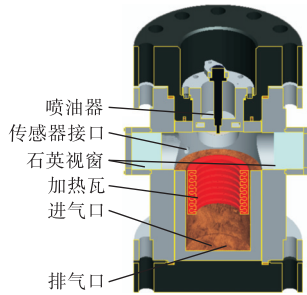


图2 柴油定容喷雾燃烧试验装置内部结构

Fig.2 Internal structure of the diesel constant volume spray and combustion test system

图3为燃油温度控制系统,为了更好地研究柴油机低温起动过程,燃油温度冷却系统使用冷水机和环绕铜管同时对油箱、高压油轨和喷油器进行冷却,达到降低燃油温度的目的. 柴油温度设定为-20 °C,以贴近柴油机低温起动的工况.

通过纹影法对气相雾柱进行采集和分析,光路原理如图4所示.

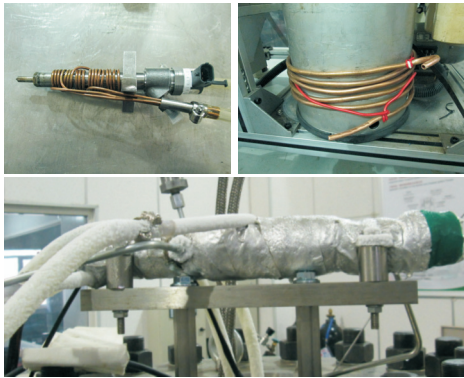


图3 燃油温度控制系统

Fig.3 Control system of fuel temperature

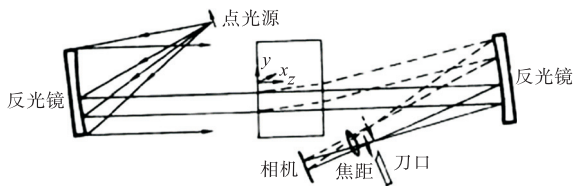


图4 纹影光路原理

Fig.4 Schematic of schlieren method

1.3 柴油机低温起动工况热力学条件分析

在柴油机的起动过程中,缸内的压缩温度与发动

机的转速密切相关,这是因为在起动过程中,发动机的转速和壁面温度较低,活塞压缩过程中的活塞环漏气和壁面传热作用不能忽略,而当压缩比等其他参数一定时,发动机转速越低,压缩过程所需的时间越长,漏气量和热损失量越大,因而缸内的压缩温度越低. 假设缸内的压力和温度分布均匀,根据理想气体的绝热压缩方程可知:

$$T_{dc} = T_a \epsilon^{k-1} \quad (1)$$

实际的压缩过程中,有

$$T_{rc} = (1-f)T_{dc} \quad (2)$$

$$f = 1 - (T_{rc}/T_{dc}) \quad (3)$$

式中: T 为温度;下标 dc、rc 和 a 分别表示绝热压缩过程、实际压缩过程和环; ϵ 为压缩比; k 为多变指数,取值为 1.38; f 为压缩过程中的能量损失率,主要包括漏气损失和传热损失两部分.

又因为在理想气体的绝热压缩过程中,有

$$p_{dc} = p_a \epsilon^k \quad (4)$$

$$\frac{T_{rc}}{T_{dc}} = \left(\frac{p_{rc}}{p_{dc}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (5)$$

$$f = 1 - \left(\frac{p_{rc}}{p_{dc}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (6)$$

对于实际发动机,可以测量起动过程中的压缩压力 p_{rc} ,求出能量损失率 f ,进而求出缸内的最高压缩温度. 当环境温度为 10 °C 时,其不同转速下压缩过程缸内压力随曲轴转角的变化关系如图5所示. 柴油机低温起动时,发动机转速对缸内压缩压力影响比较明显. 转速越低,最高压缩压力随之降低,说明相对能量损失越大.

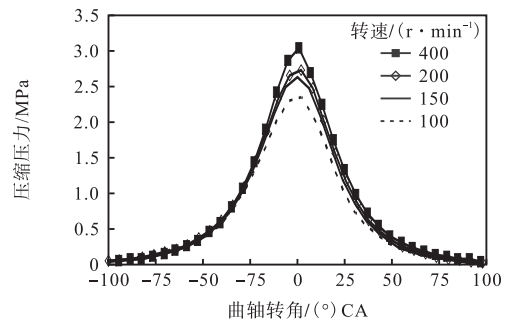


图5 不同发动机转速下的压缩压力

Fig.5 Compression pressure at different engine speeds

为了进一步研究实际压缩压力变化规律,增加试验的统计数量,再通过拟合获得该发动机起动过程中实际压缩压力与理论绝热压缩压力的比值和发动机转速 n 的关系为

$$p_{rc}/p_{dc} = 1 - 3.68n^{-0.5} \quad (7)$$

该发动机的实际压缩压力随转速、压缩比和环境压力的关系为

$$p_{rc} = (1 - 3.68n^{-0.5})p_a \epsilon^k \quad (8)$$

式中： p_a 为环境压力，起动时不考虑增压器的作用，认为其是进气压力。

图 6 给出了缸内压缩压力计算值与试验结果的比较，发现误差均在 5% 之内，可以满足工程所需的计算精度。另外随着转速的进一步提高，缸内的最高压缩压力增加的程度逐渐降低，当发动机转速超过 1 000 r/min 时，最高压缩压力基本不再增加。

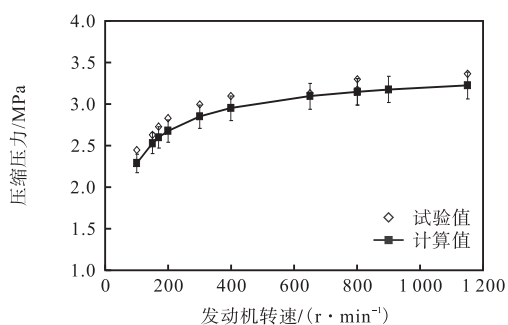


图 6 柴油机压缩压力计算值与试验值的对比

Fig.6 Comparison between the calculated value of compression pressure and the test result

该发动机缸内压缩温度的变化关系为

$$T_{rc} = T_a \epsilon^{k-1} (1 - 3.68n^{-0.5})^{\frac{k-1}{k}} \quad (9)$$

通过缸内压缩温度式(9)可以得到 200 r/min 条件下不同压缩比和不同进气温度的变化曲线，如图 7 所示。缸内压缩温度随发动机压缩比和进气温度降低而减小，在柴油机常用的压缩比为 15 ~ 17 内，缸内的最低压缩温度为 400 °C。

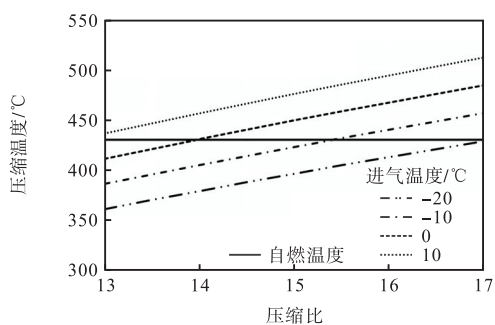


图 7 压缩温度与进气温度/压缩比的变化关系

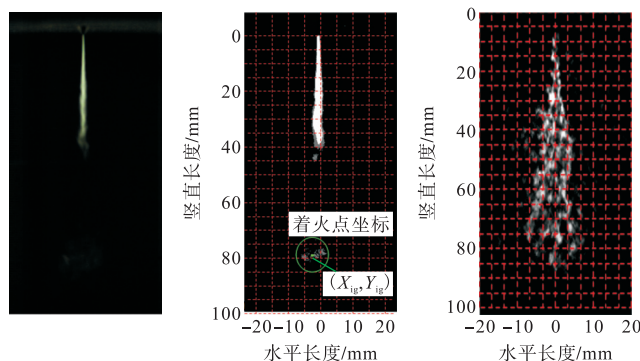
Fig.7 Relationship between compression temperature and intake temperature/compression ratio

通过以上分析，得出了柴油机低温起动过程中缸内温度和压力等参数的变化范围，为柴油定容喷雾着火特性研究的背景条件提供了设置依据。

2 柴油自由喷雾着火特性变化规律

2.1 自由射流着火特性参数分析方法

图 8 为自由射流着火特性示意。在试验中，滞燃期定义为在喷射过程由高速相机直拍图像上从发现液相雾柱到燃油发生着火所经过的时间。在拍摄燃油喷射和着火过程时，液相雾柱可以获得清晰的图像，从而方便记录喷射开始的时刻，但最初发生着火时，火焰呈现淡蓝色，亮度较低，不易被清晰地捕捉到。因此，需要采用 Matlab 对着火过程图像进行数字处理，首先对试验图像通过图片相减的方法去除背景干扰，然后通过设置像素点的灰度阈值对着火进行判断，通过反复的比对和分析，发现将灰度阈值设置为 5 时，可以较好地确定着火时刻，并反映试验过程中的喷雾着火特性。另外，对于着火位置的分析，以喷嘴为原点，借助网格参考线建立二维平面坐标系，用坐标形式来表示着火的空间位置 (X_{ig} , Y_{ig})；并且通过纹影法获得气相雾柱的图像，为着火特性的分析提供支撑和依据。



(a) 着火原始图像 (b) 着火图像处理结果 (c) 着火时刻气相雾柱

图 8 自由射流着火特性示意

Fig.8 Schematic diagram of free spray ignition characteristics

2.2 背景温度对自由射流着火特性的影响规律

为了贴近发动机低温起动过程的发动机条件，喷油压力和背景密度保持不变，分别为 60 MPa 和 13.5 kg/m³；背景温度从最高 554 °C 降低至 434 °C，间隔约为 20 °C，共计 8 个不同的背景温度。

图 9 为不同背景温度条件下着火图像的对比情况。首先参照着火时刻的喷雾图像可以看出，初期的火焰一般出现在气相雾柱的内部靠前的位置，这说明雾柱蒸发产生的气相成分与背景空气由于卷吸作用进行物质和能量的交换，在喷雾的前锋处形成了浓度和温度均适宜着火的混合气，因而发生了最初的着火。另外，自由射流火焰一般最先出现在喷雾的轴向附近，这也说明喷雾柱头部的混合气更早地完成了着

火所需要的物理和化学准备过程. 随着背景温度的降低, 卷吸作用形成的混合气的温度降低, 降低了低温多阶段着火过程的反应速率, 使活性基的积累速率下降, 滞燃期 τ 延长, 同时较长的滞燃期使可燃混合气运动到在距离喷孔更远的位置, 因而着火位置距离喷孔也越远. 当背景温度降温至 472 °C 时着火发生在喷射过程结束之后, 而当背景温度降温至 434 °C 时, 在试验设备的视窗中无法观察到燃烧过程. 因此, 认为该条件下出现“视窗内未观察到火焰”的现象, 一方面这可能是因为背景温度过低, 混合气无法获得着火所必须的能量而不能进行燃烧; 另一方面也可能是因为在距离喷油器更远的位置产生了较弱的火焰, 但是火焰超出了视窗的观察范围而不能被观察到.

图 10 为背景温度对自由射流着火滞燃期的影响规律的量化曲线. 随着背景温度的降低, 柴油着火滞燃期逐渐增加, 当背景温度为 434 °C 时出现了“视窗内未观察到火焰”的现象, 此时的滞燃期认为是无限大. 另外, 着火滞燃期随背景温度变化的敏感性在不同温度区间有着明显的区别, 当背景温度低于 500 °C 时, 增加背景温度, 滞燃期下降明显, 但是当背景温度高于 500 °C 后, 继续增加背景温度, 滞燃期的下降

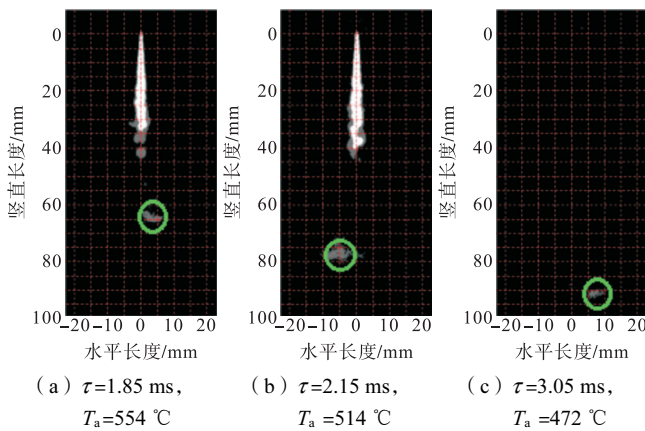


图 9 不同背景温度条件下的着火图像对比

Fig.9 Comparison of ignition images at different background temperatures

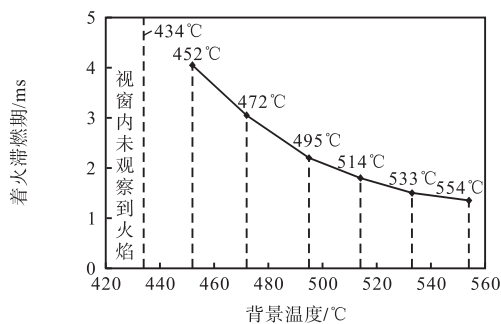


图 10 背景温度对自由射流着火滞燃期的影响规律

Fig.10 Effects of background temperature on the free spray ignition delay

趋势明显放缓.

图 11 为背景温度对自由射流着火位置的影响规律. 着火位置的横坐标或正或负, 但绝对值均很小, 这说明着火位置均处于喷雾轴线附近 (小于 5 mm). 着火位置的纵坐标有较明显的变化规律, 随着背景温度的降低, 初期火焰纵坐标逐渐增加, 即与喷孔之间的距离逐渐增加. 直到产生“视窗内未观察到火焰”现象, 即在视窗的范围内看不到明显的火焰. 这主要因为随着背景温度的降低, 着火滞燃期逐渐增加, 浓度和温度均满足着火条件的混合气在喷射速度的推动下更加远离喷孔. 对 7 个发生着火工况下的着火位置进行统计, 可以发现, 背景温度从 554 °C 降低到 452 °C 的过程中, 着火位置的纵坐标相应地从 68 mm 增加至 98 mm, 平均背景温度每降低 10 °C, 着火位置在轴向上大约会远离喷孔 3 mm.

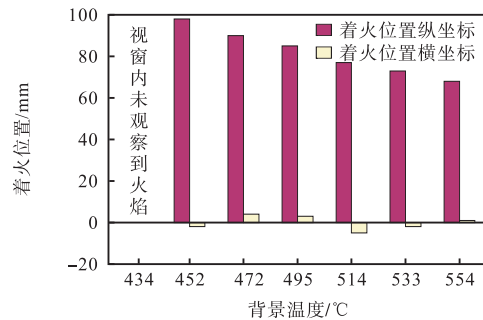


图 11 背景温度对自由射流着火位置的影响规律

Fig.11 Effects of background temperature on the free spray ignition location

2.3 背景密度对自由射流着火特性的影响规律

讨论背景密度对自由射流着火特性的影响规律, 其中喷油压力和背景温度保持不变, 分别为 60 MPa 和 520 °C. 对 4 个不同的背景密度为 22.6、17.8、13.4 和 9.1 kg/m³ 进行了测试.

图 12 为不同背景密度条件下的着火图像对比. 随着背景密度的降低, 着火滞燃期逐渐增加, 着火位置也逐渐远离喷孔, 而当背景密度为 9.1 kg/m³ 时再次出现了“视窗内未观察到火焰”现象, 同样是没有发生着火或者火焰位置超出了视窗的贯穿范围. 这主要是因为背景密度对雾柱的扩散和传热过程也有着直接的影响作用, 背景密度越高, 雾柱可以更快地进行雾化, 同时也可以加速液相燃油的吸热过程, 更快地进行蒸发形成混合气. 较高的背景温度还可以增加燃料与氧气直接的化学反应速率, 缩短混合气的着火准备过程, 从而缩短滞燃期. 背景密度越低, 着火位置也越远离喷油器, 一方面是因为前面分析的滞燃期增加造成的可燃混合气的向前运动; 另一方面背景密度降低本身也会促进喷雾射流的向前发展.

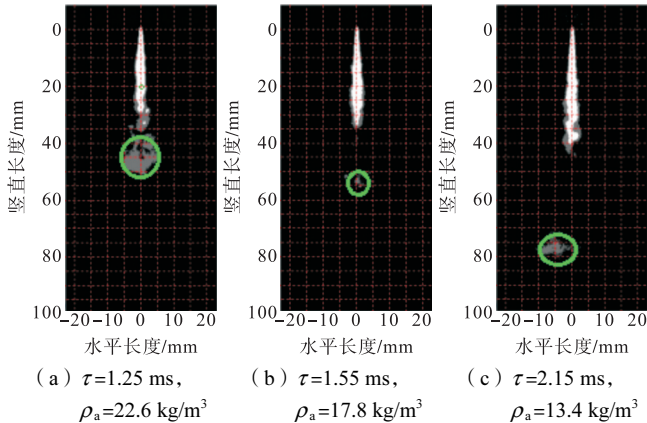


图 12 不同背景密度条件下的着火图像对比

Fig.12 Comparison of ignition images at different background densities

图 13 和 14 分别通过折线和柱形的形式给出了背景密度对着火滞燃期和着火位置的影响规律。可以看出,在研究中的几个着火工况条件下,背景密度每增加 1 kg/m³,着火滞燃期和着火位置纵坐标约分别减小 0.1 ms 和 3.5 mm。

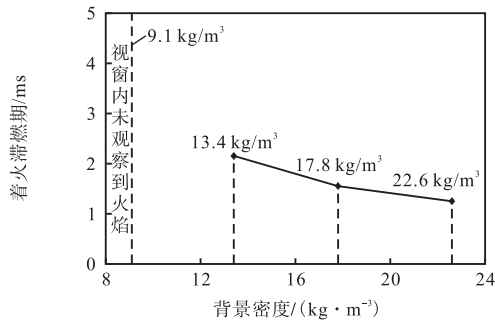


图 13 背景密度对自由射流着火滞燃期的影响规律

Fig.13 Effects of background density on the free spray ignition delay

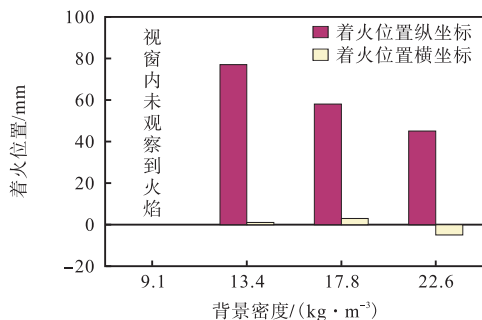


图 14 背景密度对自由射流着火位置的影响规律

Fig.14 Effects of background density on the free spray ignition location

2.4 着火稳定性及温度梯度分析

为了研究着火稳定性,以上改变背景温度和背景密度的研究均进行了 3 次试验,如图 15 所示。随着背景温度的降低,柴油自由喷雾着火滞燃期逐渐增加,同时 3 次试验的滞燃期散度逐渐增加,说明着火

稳定性逐渐降低。并且当背景温度约为 470 °C 时,3 次着火试验中出现了一次无法观察到火焰的现象,说明着火成功率开始下降。随着背景温度的进一步降低,在约为 450 °C 时,出现了两次无法观察到火焰的现象;在约为 430 °C 时,3 次试验都没有产生明亮的火焰,说明在当前的背景密度下出现了最低的着火温度。参考发动机低温起动过程中的背景条件,改变不同的背景密度,重复分析背景温度的影响规律,发现背景密度越高,最低着火越低,但会逐渐收敛,约为 430 °C,如图 16 所示。即低于这个最低着火温度时,柴油射流的着火成功率非常低,很难着火。

进一步对定容装置内部的温度梯度进行了分析,如图 17 所示。由于加热瓦布置在容弹内测试区域的

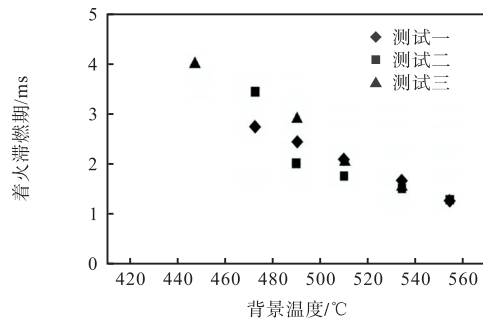


图 15 不同背景温度下自由射流着火稳定性

Fig.15 Free spray ignition stability at different background temperatures

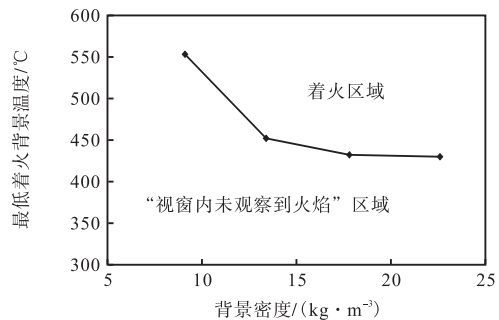


图 16 不同背景密度条件下的最低着火温度

Fig.16 Minimum ignition temperature at different background densities

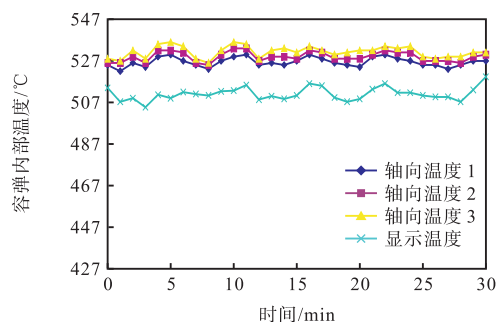


图 17 定容试验装置内部温度场

Fig.17 Temperature field in the constant-volume device

下方,热量由下向上传递.因此,在测试区域的轴向上会存在一定的温度梯度,在喷油器下方的不同高度的位置处布置了3个温度测点(温度1在喷油嘴的位置,温度2在喷嘴下方50 mm处,温度3在喷油嘴下方100 mm处),来测试轴向上的温度梯度,可以看出喷嘴下方轴向方向100 mm的范围内温度比较一致,波动在 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内.

3 结 论

针对所研究的某柴油机获得了低温起动条件下压缩压力和压缩温度范围,以此为依据研究了低温起动热力学条件下柴油的喷雾着火特性,分析了背景温度和背景密度的变化过程中喷雾射流滞燃期和着火位置的变化规律.主要结论如下:

(1) 柴油机的起动过程中,随着发动机转速增加,最高压缩压力增加,但是增加的程度逐渐降低,当发动机转速超过1000 r/min时,最高压缩压力基本不再增加.

(2) 随着背景温度和背景密度的降低,柴油自由喷雾着火滞燃期逐渐增加,着火位置逐渐远离喷油器;平均背景温度每降低 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,着火位置在轴向上大约会远离喷孔3 mm.

(3) 背景密度越高,最低着火越低,但会逐渐收敛,约为 $430\text{ }^{\circ}\text{C}$.低于这个最低着火温度时,柴油射流的着火成功率非常低,很难着火.

参考文献:

- [1] 朱惠莲. 车用柴油机特点及其技术发展趋势[J]. 内燃机, 2006(6): 1-3.
- [2] Liu J, Guo Q, Guo J Y, et al. Optimization of a diesel/natural gas dual fuel engine under different diesel substitution ratios[J]. Fuel, 2021, 305: 121522.
- [3] 孙丹红, 张然治, 田永海. 高功率密度柴油机关键技术及其应用[J]. 铁路机车车辆, 2011, 31: 67-71.
- [4] Pastor J V, Garcia-Oliver J M. Experimental facility and methodology for systematic studies of cold startability in direct injection diesel engines[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(9): 95-109.
- [5] 赵丹平, 吴双群. 车用柴油机冷起动过程的特性研究[J]. 内蒙古工业大学学报, 2000, 19(1): 57-60.
- [6] Bae G, Choi S, Lee S, et al. Experimental investigation of fuel temperature effects on transient needle motion and injection velocity of solenoid type diesel injector[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 181: 121838.
- [7] 关双城. 柴油机冷起动影响因素及辅助装置使用效果的评述[J]. 小型内燃机, 1999, 6(1): 33-38.
- [8] Ravikumar J, Sekar S, Damodharan D, et al. Multi-objective optimization of performance and emission characteristics of a CRDI diesel engine fueled with sapota methyl ester/diesel blends[J]. Energy, 2022, 250: 123709.
- [9] 黎苏. 柴油机喷雾特性的研究情况综述[J]. 吉林工业大学学报, 1980, 6: 33-38.
- [10] Miron L, Chiriac R, Brabec M, et al. Ignition delay and its influence on the performance of a diesel engine operating with different diesel-biodiesel fuels[J]. Energy Reports, 2021, 7: 5483-5494.
- [11] Lan Q, Fan L, Wen L, et al. Multi-factors of fuel injection pressure peak of the pressure amplification common rail fuel system for two-stroke diesel engines[J]. Fuel, 2022, 321: 124046.
- [12] Dec J E. A conceptual model of DI diesel combustion based on laser-sheet imaging[C]// SAE Paper. Detroit, MI, USA, 1997, 970873.
- [13] Payri R, Salvador F J, Manin J, et al. Diesel ignition delay and lift-off length through different methodologies using a multi-hole injector[J]. Applied Energy, 2016, 15: 541-550.
- [14] Vogel T, Wensing M, Leipertz A, et al. Influence of the fuel quantity on the spray formation and ignition under current engine relevant conditions[C]// SAE Paper. Kyoto, Japan, 2011, 2011-01-1928.
- [15] Benajes J, Payri R, Bardi M, et al. Experimental characterization of diesel ignition and lift off length using a single hole ECN injector[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 58(1/2): 554-563.
- [16] Cung K, Moiz A, Johnson J, et al. Spray-combustion interaction mechanism of multiple-injection under diesel engine conditions[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(3): 3061-3068.
- [17] 何旭, 郑亮, 赵陆明, 等. 生物柴油喷雾、着火和燃烧特性试验研究[J]. 内燃机工程, 2012, 33(5): 41-45.
- [18] 刘波. 汽柴油混合燃料着火及燃烧特性试验研究[D]. 北京: 北京理工大学机械与车辆学院, 2016.
- [19] 米永刚, 玄铁民, 何志霞, 等. 加氢催化生物柴油-柴油的喷雾燃烧特性[J]. 内燃机学报, 2021, 39(4): 314-319.