

# 喷油压力对高压共轨柴油机燃烧影响的可视化研究

姚春德 胡江涛 银增辉 耿培林

(天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 选取高压共轨柴油机中高负荷下常用喷油压力,在定容燃烧弹内,利用高速摄像技术和燃烧压力采集系统分别试验研究了相同喷油脉宽和相同喷油量下喷油压力对柴油着火、燃烧和炭烟生成特性的影响。结果表明,在喷油压力变化范围内(40~160 MPa):相同喷油脉宽和相同喷油量下,试验结果具有相同的变化趋势;随喷油压力升高,火焰浮起长度增加,火焰亮度逐渐减弱;高喷油压力下,压力升高率增大,压力升高始点和最高燃烧压力出现时刻均提前,放热率更快达到峰值,且放热率峰值逐渐增大;以相同喷油量为例,当喷油压力从80 MPa升高到160 MPa时,滞燃期由1.7 ms缩短到1.4 ms,燃烧持续期由6.9 ms缩短到4.7 ms,总炭烟量大幅度减少,但滞燃期和燃烧持续期随喷油压力升高而缩短的程度以及炭烟生成量随喷油压力升高而降低的趋势均逐渐减弱。

**关键词:** 高压共轨; 喷油压力; 定容燃烧弹; 燃烧持续期; 炭烟

**中图分类号:** TK421+.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)01-0355-07

## Visualization on Combustion Characteristics of Common Rail Diesel Engine at Different Injection Pressures

Yao Chunde Hu Jiangtao Yin Zenghui Geng Peilin

(State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In a constant volume combustion chamber combined with high pressure common rail system, the ignition, combustion and soot formation characteristics of diesel were studied at different injection pressures keeping injection pulse width or fuel injection volume constant. The change range of injection pressure was 40~160 MPa, which was commonly used in high pressure common rail diesel engine under middle and high loads. The experiments were conducted by using a high-speed photography technology and a combustion pressure acquisition system. The soot formation characteristic was studied by natural flame luminosity. Results show that, keeping injection pulse width or fuel injection volume the same, the test results have the same change trend: with the increase of injection pressure, the flame luminosity becomes weaker; the ignition region becomes larger; and the flame lift-off length becomes longer. In addition, the combustion pressure rise rate would increase. Also, the moment that pressure begins to rise and the moment that the maximum combustion pressure occurs are both advanced. At the same time, the heat release rate reaches peak more quickly and the peak value increases gradually. Keeping the volume of injected fuel unchanged, with the increase of injection pressure from 80 MPa to 160 MPa, the ignition delay is shortened from 1.7 ms to 1.4 ms; the combustion duration is shortened from 6.9 ms to 4.7 ms; and the soot formation is reduced significantly. However, such trend is weakened with the increase of the injection pressure.

**Key words:** high pressure common rail system; injection pressure; constant volume combustion chamber; combustion duration; soot

引言

为满足日益严格的排放法规,同时达到节能的目的,改善缸内燃烧是除后处理技术之外最常采用的方法,其中燃油喷射系统直接影响柴油机缸内的燃烧过程,提高喷射压力是燃油喷射系统发展的趋势之一,高喷射压力可以显著改善柴油机燃烧和排放性能<sup>[1]</sup>,此外还要求燃油系统具有完全柔性的喷油正时控制和灵活可调的喷油规律<sup>[2-4]</sup>。近年来,高压共轨系统因具有高喷射压力、喷油正时和喷油压力独立可调等特点,且能实现多次喷射而得到了快速发展和广泛应用,国内外已经开展了大量关于高压共轨系统的台架试验以及整车发动机燃烧和排放的研究。Avinash 等<sup>[5]</sup>在高压共轨单缸机上,研究了喷油正时和喷油压力对发动机性能的影响;解方喜等<sup>[6-7]</sup>在高压共轨柴油机上,针对不同喷油压力和后喷策略,对柴油喷雾、燃烧以及排放特性进行了模拟计算和试验研究;Liu 等<sup>[8]</sup>研究了不同喷射压力对柴油/甲醇双燃料发动机燃烧和排放的影响。而在可视化研究方面,姚春德等<sup>[9-10]</sup>和许汉君等<sup>[11]</sup>在定容燃烧弹内分别研究了柴油在空气和甲醇、空气和乙醇氛围中的着火和燃烧特性,但试验都是采用普通直列泵供油,喷油量无法精确控制,喷油压力较低(仅 22 MPa)且不能灵活调节。可以看到将喷油压力可调的高压共轨系统用于柴油燃烧的可视化研究还相对较少。

随着高压共轨系统的发展,喷油压力不断升高,为了更加深入地了解喷油压力对柴油机缸内燃烧过程的影响,有必要在定容燃烧弹上开展相关的可视化研究。本文在定容弹中结合高压共轨系统,利用高速摄像技术分别研究相同喷油脉宽和相同喷油量下,不同喷油压力对柴油着火和燃烧特性以及炭烟生成特性的影响。

1 试验装置与方法

试验台架包括:高压共轨系统、定容燃烧弹、温度控制系统、压力测量系统、高速摄像机系统、同步数据采集系统等,试验台架结构如图 1 所示。

高压共轨采用 Bosch CP2.2 型系统,最高可达到 160 MPa 的喷射压力,该共轨系统广泛应用于潍柴 WP12 系列欧Ⅲ柴油机和玉柴 6L 和 6M 等重型系列博世共轨发动机上。试验中利用变频器和电动机驱动高压油泵建立轨压,结合自己开发的电子控制单元(ECU),该共轨系统最多可实现 3 次喷射。所用喷油器是无锥角的孔径为 0.18 mm 单孔喷油器,试验工况中相同喷油脉宽控制在 2 ms,相同喷油

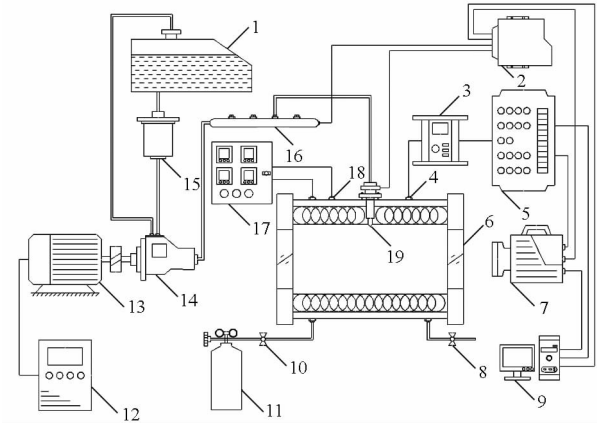


图 1 试验台架结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment

1. 油箱 2. ECU 3. 电荷放大器 4. 压力传感器 5. DAQ 6. 定容燃烧弹 7. 高速摄像机 8. 排气阀 9. 计算机 10. 进气阀 11. 高压气瓶 12. 变频器 13. 电动机 14. 高压油泵 15. 滤清器 16. 高压共轨 17. 智能温控箱 18. 温度传感器 19. 喷油器

量控制在 16 μL, 2 ms 喷油脉宽不同喷油压力下喷油量和 16 μL 喷油量不同喷油压力下喷油脉宽的测试结果分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 2 ms 喷油脉宽不同喷油压力下喷油量测试结果

Tab. 1 Test results of fuel injection volume under different injection pressures with injection pulse width of 2 ms

|          |    |    |     |      |
|----------|----|----|-----|------|
| 喷油压力/MPa | 40 | 80 | 120 | 160  |
| 单次喷油量/μL | 11 | 16 | 20  | 22.5 |

表 2 16 μL 喷油量不同喷油压力下喷油脉宽测试结果

Tab. 2 Test results of fuel injection pulse width under different injection pressures with injection volume of 16 μL

|          |     |    |      |     |
|----------|-----|----|------|-----|
| 喷油压力/MPa | 40  | 80 | 120  | 160 |
| 喷油脉宽/ms  | 3.3 | 2  | 1.33 | 1.1 |

定容燃烧弹配备有温度控制系统,可实现在 3 MPa 背压下最高 1 000 K 的加热条件,并且可以实时监测和控制容弹内的加热温度。压力采集系统采用 Kistler 6125C 型压力传感器,与 Kistler 5018A1000 型电荷放大器配套使用,最高可实现 0 ~ 30 MPa 量程、超过 70 kHz 的采集频率,本次试验中压力传感器选用 0 ~ 10 MPa 量程、采集频率为 10 kHz。定容燃烧弹的基本参数和试验设置条件如表 3 所示。

高速摄像机采用 Photron 公司 FASTCAM SA1.1 型相机,镜头采用 Tokina 公司 MACRO 100 F2.8D 型产品,试验中为获得最佳的拍摄效果以便于比较分析,高速摄像机参数设置如表 4 所示。

表 3 容弹基本参数与试验条件

Tab.3 Constant volume combustion chamber specifications and test condition

| 参数        | 数值            |
|-----------|---------------|
| 长/mm      | 224           |
| 内径/mm     | 80            |
| 视窗有效直径/mm | 80            |
| 环境压力 /MPa | 3             |
| 环境温度/K    | 800           |
| 喷油压力/MPa  | 40、80、120、160 |
| 燃油标号      | 京 V           |

表 4 高速摄像机参数设置

Tab.4 High-speed camera specifications

| 参数                         | 数值        |
|----------------------------|-----------|
| 拍摄速度/( 帧·s <sup>-1</sup> ) | 10 000    |
| 单帧像素数                      | 768 × 768 |
| 曝光时间/s                     | 1/415 000 |
| 光圈                         | F11       |

同步数据采集系统采用 NI 公司 DAQ6251 型产品,主要是采集容弹内的压力信号,在试验中其工作过程是:当计算机给 ECU 喷油信号后,喷油器按照设定参数开始喷油,ECU 同步发出 TTL 信号触发高速摄像机和数据采集装置,高速摄像机开始拍摄图像,同步数据采集装置开始记录压力信号,即从 ECU 给出喷油信号开始到燃烧结束,整个喷油和燃烧过程的图像和对应的压力变化被记录下来并存储在计算机中。

每次试验的流程如下:试验开始之前检查容弹气密性,检查完毕后对容弹进行预加热,并对共轨系统进行试喷射,待试验台架稳定后开始正式试验。首先用高压气瓶中的压缩空气对容弹进行一次扫气,并用真空泵抽真空。扫气完毕后向容弹充入 1.5 MPa 的空气,开启温度控制系统设置加热温度为 850 K,开始对容弹进行加热,当温度达到 800 K 时再向容弹充入空气使其压力达到 3 MPa。启动高压共轨系统准备建立轨压,当容弹内温度再次达到 800 K 开始试验,ECU 向喷油器发出喷油信号的同时,高速摄像机和压力采集系统也开始工作。每次试验完毕,对容弹进行 2 或 3 次扫气和抽真空操作,避免上次燃烧后的废气对下次试验造成干扰。由于试验开始前有预加热过程,高压油泵的回油会导致油温上升,正式试验时油箱内的温度在 45℃ 左右,随着试验的进行燃油温度会持续上升,为避免燃油温度大幅度变化对试验结果造成影响,试验过程中保持燃油温度在 45℃ 左右。

2 试验结果与分析

2.1 喷油压力对火焰发展的影响

为方便比较不同喷油压力下的火焰发展规律,

取拍摄到的 2.0 ms 到 5.2 ms 之间火焰均比较清晰明亮的图像进行对比分析,相同脉宽和相同喷油量不同喷油压力下的火焰发展过程如图 2 所示。从上到下依次为:2.0、2.4、2.8、3.2、3.6、4.0、4.4、4.8、5.2 ms。

从图 2 可以看到无论在相同脉宽下,还是在相同喷油量下,相同喷油压力时燃烧前期火焰亮度比中期弱,这是由于前期主要是柴油的预混燃烧,且油束刚喷入到定容弹内,湍流强度较大,易于油气混合,生成炭烟颗粒少,火焰亮度弱。随喷油压力升高,火焰的亮度大幅度减弱,着火面积逐渐增大,这主要是由于随喷油压力升高,燃油雾化质量更好,蒸发速度更快,更多位置满足着火条件,从而多点同时着火。根据火焰的发展规律可知随喷油压力升高,着火位置逐渐靠下,即火焰的浮起长度逐渐增加,油束对空气的卷吸作用增强,有利于油气混合,从而促进燃油充分燃烧,减少炭烟的生成。还可以看到随喷油压力的升高,燃烧结束时刻提前,燃烧速率加快,燃烧持续期缩短。

2.2 喷油压力对滞燃期和燃烧持续期的影响

燃烧的始点和终点对燃烧过程是很重要的参数,它们的确定直接影响着滞燃期和燃烧持续期的计算误差,通常在发动机中确定燃烧始点的方法有:纯压缩线法、压力升高率曲线突升法、P-V 对数坐标图法、累积放热量达 5% 或 10% 定义法、高速摄像法等;确定燃烧终点的方法有:放热率曲线最低点法、P-V 对数坐标图法、累积放热量达 90% 或 95% 定义法、高速摄像法等<sup>[12]</sup>。本文采用高速摄像法来确定燃烧始点和终点,即高速摄像机拍摄到第一张有明显火焰的图像对应的时刻为燃烧始点,拍摄到最后一张有明显火焰的图像对应的时刻为燃烧终点,从而确定滞燃期和燃烧持续期。相同脉宽和相同喷油量不同喷油压力下滞燃期和燃烧持续期的变化如图 3 所示。

从图 3 可以看到在相同脉宽和相同喷油量下随喷油压力升高,滞燃期均逐渐缩短。滞燃期主要受混合气形成速度和燃料十六烷值的影响,在本试验中所喷射燃料均为柴油,所以滞燃期缩短主要受混合气形成速度影响,随喷油压力升高,燃油运动速度加快,燃油与空气之间的扰动作用加强,促进了油滴的雾化和蒸发,柴油预混量增加,着火时刻提前。当喷油压力从 80 MPa 升高到 120 MPa 时,相同脉宽下滞燃期由 1.7 ms 缩短到 1.4 ms,降幅达 17.6%,相同喷油量下滞燃期由 1.7 ms 缩短到 1.5 ms,降幅达 11.8%,当喷油压力从 120 MPa 升高到 160 MPa 时,相同脉宽下滞燃期由 1.4 ms 缩短到 1.3 ms,降幅仅

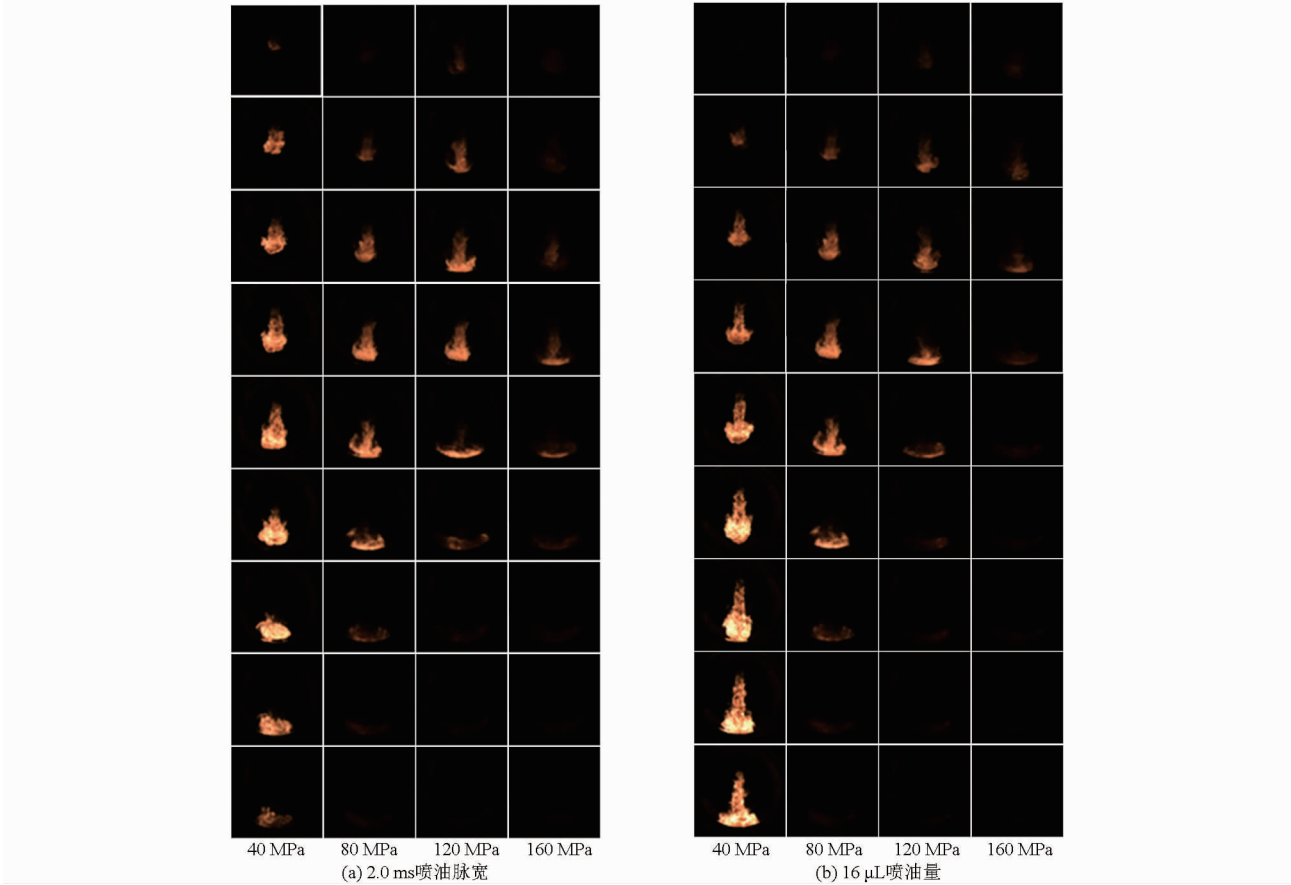


图 2 不同喷油压力的火焰发展过程

Fig. 2 Flame propagation at different injection pressures

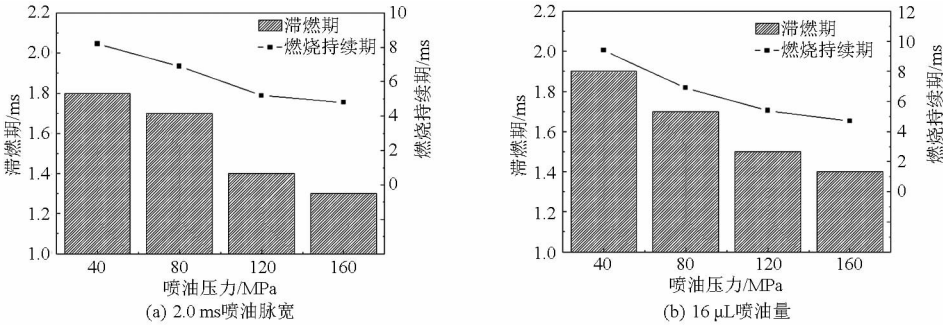


图 3 喷油压力对滞燃期和燃烧持续期的影响

Fig. 3 Effect of injection pressure on ignition delay and combustion duration

7.1%,相同喷油量下滞燃期由 1.5 ms 缩短到 1.4 ms,降幅仅 6.7%,可以看到随着喷油压力升高,滞燃期缩短的趋势逐渐减弱,即喷油压力升高到一定程度后对滞燃期的影响作用减弱。

从图 3 可以看到燃烧持续期的变化规律与滞燃期类似,在相同脉宽和相同喷油量下随喷油压力升高,燃烧持续期均逐渐缩短。由表 1 看到在 2 ms 脉宽下,当喷油压力从 40 MPa 升高到 160 MPa 时,喷油量从 11  $\mu\text{L}$  增加到 22.5  $\mu\text{L}$ ,但是燃烧持续期却缩短了,说明喷油压力升高后,燃油雾化和蒸发更好,燃烧速率大大加快。当喷油压力从 80 MPa 升高到 120 MPa 时,相同脉宽下燃烧持续期由 6.9 ms 缩短

到 5.2 ms,降幅达 24.6%,相同喷油量下燃烧持续期由 6.9 ms 缩短到 5.4 ms,降幅达 21.7%,当喷油压力从 120 MPa 升高到 160 MPa 时,相同脉宽下燃烧持续期由 5.2 ms 缩短到 4.8 ms,降幅仅 7.7%,相同喷油量下燃烧持续期由 5.4 ms 缩短到 4.7 ms,降幅仅 13%,可以看到随着喷油压力升高,燃烧持续期缩短趋势也逐渐减弱。

### 2.3 喷油压力对燃烧压力和放热率的影响

燃烧压力通过压力采集系统直接测量得到,放热率利用采集的压力信号通过热力学第一定律计算得到。相同脉宽和相同喷油量不同喷油压力下燃烧压力和放热率的变化如图 4 所示。

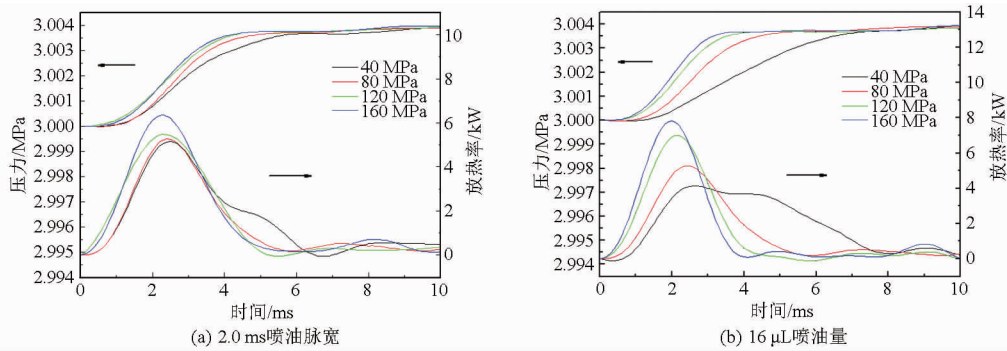


图 4 喷油压力对燃烧压力和放热率的影响

Fig. 4 Effect of injection pressure on combustion pressure and heat release rate

从图 4 可以看到在相同脉宽下和相同喷油量下随喷油压力升高,压力升高率增大,最高燃烧压力出现时刻提前,这种变化趋势在喷油压力从 40 MPa 升高到 120 MPa 时很显著,当喷油压力从 120 MPa 再往上升高时相对不太明显。从压力曲线上也可以看到,喷油压力越高,燃烧压力上升的始点越早,即着火时刻提前,滞燃期缩短,而相对于燃烧压力升高始点,其终点即最高燃烧压力出现时刻也逐渐提前,且提前量更大,即随喷油压力升高,燃烧速率加快,燃烧结束时刻提前,燃烧持续期缩短,这与上文得到的随喷油压力升高,燃烧持续期逐渐缩短的结论一致。对比图 4a、4b,燃烧压力曲线随喷油压力变化存在差异主要是喷油脉宽不一样,图 4a 中脉宽都是 2 ms,而图 4b 中喷油压力从 40 MPa 升高到 160 MPa,喷油脉宽从 3.3 ms 缩减到 1.1 ms,而且低喷油压力下油滴雾化蒸发的速度慢,燃烧速率小,最高燃烧压力出现时刻差别较大。

从图 4 可以看到在相同脉宽和相同喷油量下随喷油压力升高,放热的始点逐渐提前,燃烧和放热速率加快,放热率更快达到峰值,且放热率峰值逐渐增大,放热终点也逐渐提前,而且提前幅度更大,这是由于随喷油压力升高,滞燃期缩短,燃烧前期放热速率加快,容弹内的温度和压力升高,这在一定程度上促进了油滴的雾化和蒸发,加快了中期和后期的燃烧速率,放热速率也加快。这也解释了随喷油压力升高,燃烧压力升高得更快,燃烧持续期缩短。同样,这种变化规律在喷油压力较低时很明显,当喷油压力升高到一定程度后这种变化趋势减弱。对比图 4a、4b,放热率曲线随喷油压力变化的差异主要也是由于喷油脉宽不一样,这里不再赘述。

## 2.4 喷油压力对炭烟生成特性的影响

柴油燃烧时火焰发光强度主要有两个来源:化学发光和炭烟颗粒热辐射发光,但炭烟颗粒热辐射的发光强度远高于化学发光,且炭烟颗粒的温度越高,数密度越大,其发光强度越高。因此可以用火焰

的发光强度表征炭烟的生成量<sup>[13-15]</sup>,定义每张图像中的火焰发光强度为空间综合自然发光度 (Spatially integrated natural luminosity, SINL)<sup>[16-17]</sup>,SINL 的计算可通过 Matlab 编程提取图像中所有像素点的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  值,然后对  $R$ 、 $G$ 、 $B$  值进行叠加计算得到,计算公式为<sup>[16]</sup>

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (1)$$

式中, $Y$  表示图像整体的亮度,即 SINL 的值, $R$ 、 $G$ 、 $B$  分别表示 RGB 颜色模型中红、绿、蓝三原色的色度分量。通过计算燃烧过程中每张图像的亮度,即可得到 SINL 曲线, SINL 曲线对时间进行积分即可得到时间积分的自然发光度 (Time integrated natural luminosity, TINL)<sup>[16-17]</sup>, SINL 曲线和 TINL 的值可以分别反映燃烧过程中瞬时炭烟生成量和总炭烟量的变化趋势。

相同脉宽和相同喷油量不同喷油压力下 SINL 和 TINL 的变化如图 5 所示。

从图 5 可以看到,在相同脉宽和相同喷油量下随喷油压力升高, SINL 均大幅度降低,这是由于随喷油压力升高,燃油破碎、雾化和蒸发质量得到改善,燃油与空气混合更均匀,使得燃油燃烧更充分,生成炭烟的量减少。SINL 随喷油压力升高而更快达到峰值,这是由于随喷油压力升高,滞燃期缩短,在燃烧的前期和中期,燃油蒸汽的分布相对集中,且高喷射压力下燃烧放热率加快,易于形成局部高温贫氧区,使得炭烟的生成速率加快。相比于燃烧持续期,炭烟生成持续期也是随着喷油压力的升高而逐渐缩短。SINL 曲线上升始点相比于燃烧压力曲线滞后,而终点相对于燃烧压力曲线提前,这是由于炭烟是以火焰亮度来表征的,当喷射到容弹内的燃油开始燃烧时和燃烧结束时,火焰的亮度很弱,这时可以认为生成炭烟的量很少或者不生成炭烟。从图 5 中还可以看到,当喷油压力为 40 MPa 时, SINL 曲线达到峰值后会有一个小凸起,这是因为喷油还未结束,火焰已经碰壁,燃油大量附着在炉膛壁面

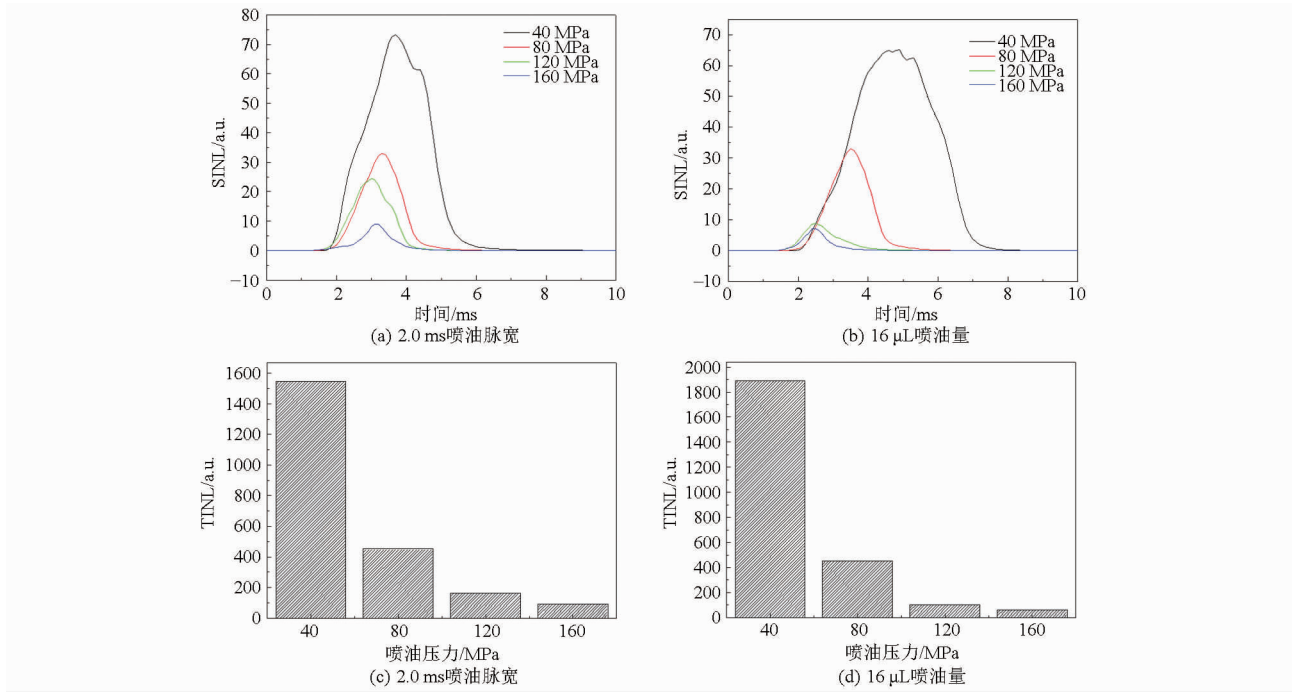


图 5 喷油压力对 SINL 和 TINL 的影响

Fig. 5 Effect of injection pressure on SINL and TINL

上,对空气的卷吸作用减弱,油气混合变差,燃烧不充分,生成大量的炭烟颗粒<sup>[18]</sup>,从图 2a、2b 中 40 MPa 图像也可以看到,碰壁后的火焰亮度增强。

从图 5c、5d 可以看到,在相同脉宽下和相同喷油量下随喷油压力升高,TINL 均大幅度减少,这是由于高喷射压力使燃油的雾化和蒸发质量提高,喷雾油滴具有更大的动量和能量,使油滴在更大的空间内与空气形成更均匀的混合气,整体高温贫氧区减少,这既有利于燃烧完全,又有利于对已生成炭烟的氧化,使总炭烟生成量减少。当喷油压力从 40 MPa 升高到 80 MPa 时,相同脉宽下 TINL 减少了 70.8%,而相同喷油量下 TINL 减少了 76.1%,当喷油压力从 120 MPa 升高到 160 MPa 时,相同脉宽下 TINL 减少了 42.5%,相同喷油量下 TINL 减少了 40.7%,可以看到当喷油压力升高到一定程度后,对减少炭烟的作用减弱<sup>[19-20]</sup>。

3 结论

(1) 相同喷油脉宽下和相同喷油量下,随喷油压力升高,柴油着火、燃烧和炭烟生成特性均具有相

同的变化趋势。

(2) 利用定容燃烧弹和高速摄像等可视化方法研究发现,随喷油压力升高,火焰的亮度逐渐减弱,着火面积逐渐增大,火焰浮起长度逐渐增加,滞燃期和燃烧持续期均逐渐缩短,以相同喷油量为例,当喷油压力从 80 MPa 升高到 160 MPa 时,滞燃期由 1.7 ms 缩短到 1.4 ms,燃烧持续期由 6.9 ms 缩短到 4.7 ms,但这种缩短的趋势逐渐减弱。

(3) 利用燃烧压力采集系统实时采集容弹内的燃烧压力,研究发现随喷油压力升高,压力升高率逐渐增大,压力升高始点和最高燃烧压力出现的时刻均提前,对应燃烧放热始点和燃烧放热终点也都提前,放热率更快达到峰值,且放热率峰值逐渐增大。

(4) 基于自然发光法研究发现,随喷油压力升高,炭烟生成量逐渐降低,以相同喷油量为例,当喷油压力从 80 MPa 升高到 160 MPa 时,TINL 减少了 79.5%,炭烟生成持续期缩短,SINL 更快达到峰值,但是当喷油压力升高到一定程度后,对降低炭烟生成的作用减弱。

参 考 文 献

1 Flynn P F, Durett R P, Hunter G L, et al. Diesel combustion: an integrated view combining laser diagnostics, chemical kinetics, and empirical validation[ C]. SAE Paper 1999-01-0509, 1999.

2 Cheolwoong P, Sanghoon K, Choongsik B. Effects of multiple injections in a HSDI diesel engine equipped with common rail injection system[ C]. SAE Paper 2004-01-0127, 2004.

3 刘斌,苏万华,王辉,等. 调制多脉冲喷油模式放热特征和能力分布及其对热效率和排放的影响[ J]. 内燃机学报, 2006, 24(5): 386-393.

- Liu Bin, Su Wanhua, Wang Hui, et al. Characteristics and energy distribution modulated multi-pulse injection modes based diesel HCCI combustion and their effects on engine thermal efficiency and emissions[J]. Transactions of CSICE, 2006,24(5):386 – 393. (in Chinese)
- 4 于洋,苏万华. 多次喷射所组织的复合燃烧及其排放的影响因素[J]. 内燃机学报,2010,28(5):358 – 392.  
Yu Yang, Su Wanhua. Numerical of the effects on the emissions of compound combustion using multiple flexible injections[J]. Transactions of CSICE, 2010,28(5):358 – 392. (in Chinese)
- 5 Avinash K A, Dhananjay K S, Atul D, et al. Effect of fuel injection timing and pressure on combustion, emissions and performance characteristics of a single cylinder diesel engine[J]. Fuel, 2013,111:374 – 383.
- 6 解方喜,洪伟,段伟,等. 近后喷对高压共轨柴油机燃烧过程的影响的数值计算[J]. 吉林大学学报:工学版,2010,40(5):1193 – 1198.  
Xie Fangxi, Hong Wei, Duan Wei, et al. Numerical analysis about effect of close post-injection on combustion process of common-rail diesel engine[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2010,40(5):1193 – 1198. (in Chinese)
- 7 解方喜,于泽洋,刘思楠,等. 喷射压力对燃油喷雾和油气混合特性的影响[J]. 吉林大学学报:工学版,2013,43(6):1504 – 1509.  
Xie Fangxi, Yu Zeyang, Liu Sinan, et al. Effects of injection pressure on fuel spray and air-fuel mixing process of diesel engine [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2013,43(6):1504 – 1509. (in Chinese)
- 8 Junheng L, Anren Y, Chunde Y. Effects of diesel injection pressure on the performance and emissions of a HD common-rail diesel engine fueled with diesel/methanol dual fuel[J]. Fuel, 2015,140:192 – 200.
- 9 姚春德,代乾,许汉君,等. 一种研究柴油甲醇双燃料的定容燃烧弹试验装置[J]. 中国机械工程,2012,23(3):278 – 281.  
Yao Chunde, Dai Qian, Xu Hanjun, et al. An experimental system of constant volume combustion bomb for dual-fuel of diesel methanol[J]. China Mechanical Engineering, 2012,23(3):278 – 281. (in Chinese)
- 10 姚春德,代乾,许汉君,等. 柴油在甲醇/空气高温热氛围中的着火和燃烧特性[J]. 燃烧科学与技术,2012,18(3):193 – 198.  
Yao Chunde, Dai Qian, Xu Hanjun, et al. Ignition and combustion characteristics of diesel spray in premixed methanol/air mixture with high temperature[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2012,18(3):193 – 198. (in Chinese)
- 11 许汉君,姚春德,杨广峰,等. 柴油在乙醇高温热氛围中着火和燃烧的特性[J]. 内燃机学报,2010,28(3):207 – 213.  
Xu Hanjun, Yao Chunde, Yang Guangfeng, et al. Ignition and combustion of diesel spray in premixed ethanol mixture with high temperature[J]. Transactions of CSICE, 2010,28(3):207 – 213. (in Chinese)
- 12 魏立江. 重型柴油机实现甲醇高比例替代和高效清洁燃烧试验研究[D]. 天津:天津大学,2014.  
Wei Lijiang. Experimental research on realizing high proportion of methanol substitution and high efficiency and clean combustion on the heavy-duty diesel engine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- 13 Pickett L M, Siebers D L. Soot in diesel fuel jets: effects of ambient temperature, ambient density, and injection pressure[J]. Combustion and Flame, 2004,138(1 – 2):114 – 135.
- 14 Liu Haifeng, Lee Chiafon, Huo Ming, et al. Comparison of ethanol and butanol as additives in soybean biodiesel using a constant volume combustion chamber[J]. Energy and Fuels, 2011,25(4):1837 – 1846.
- 15 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.  
He Xu, Zheng Liang, Zhao Luming, et al. Experimental research on spray, ignition and combustion characteristics of biodiesel blend[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2012,33(5):41 – 45. (in Chinese)
- 16 王世东. 视频中火焰和烟气探测方法的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2013.  
Wang Shidong. Study of fire and smoke detection method in video[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
- 17 邓鹏. 定容弹内低温燃烧条件下乙醇柴油喷雾和燃烧特性实验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2014.  
Deng Peng. Experimental research on ethanol-diesel spray and combustion under low temperature combustion conditions in a constant volume combustion bomb[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- 18 Wu Han, Karthik N, Zhou Nan, et al. Impacts of acetone on the spray combustion of acetone-butanol-ethanol (ABE)—diesel blends under low ambient temperature[J]. Fuel, 2014,142:109 – 116.
- 19 田径,刘忠长,李勇,等. 燃油喷射参数对共轨柴油机性能的影响规律[J]. 工程热物理学报,2009,30(12):2153 – 2156.  
Tian Jing, Liu Zhongchang, Li Yong, et al. Influence law of fuel injection parameters on performance of a common rail diesel engine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009,30(12):2153 – 2156. (in Chinese)
- 20 李小平,姜北平,解方喜,等. 喷射参数对柴油机燃烧与排放特性的影响[J]. 内燃机学报,2012,30(1):22 – 28.  
Li Xiaoping, Jiang Beiping, Xie Fangxi, et al. Effects of injection parameters on combustion and emissions of diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2012,30(1):22 – 28. (in Chinese)