doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.044

强涡流场中柴油喷雾扩散特性研究

魏衍举¹ 章旭东¹ 邓胜才¹ 张 洁¹ 刘圣华¹ 张美娟² (1. 西安交通大学能源与动力工程学院,西安 710049; 2. 无锡职业技术学院汽车与交通学院,无锡 214121)

摘要:通过可视化的快速压缩机模拟内燃机的燃烧室,研究了高压共轨柴油在40、60 MPa两种喷射压力下,柴油油 束在切向、斜向和直通3种涡流场中的扩散混合特性。实验结果表明,在相同喷油压力及喷油脉宽下,切向涡流场 中柴油喷雾面积与视窗面积比的峰值和谷值均为最高,直通涡流场中最低;斜向涡流场从喷油开始到喷雾完全混 合整个过程用时最短,直通涡流场用时最长;喷雾油束的扩散时间与涡流的切向速度、燃油喷射压力成反比。 关键词:可视化快速压缩机,涡流场;柴油喷雾;油气混合

中图分类号: TK42 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)08-0394-06

Diffusion Characteristics of Diesel Spray in Swirl Flows Field

WEI Yanju¹ ZHANG Xudong¹ DENG Shengcai¹ ZHANG Jie¹ LIU Shenghua¹ ZHANG Meijuan²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi' an Jiaotong University, Xi' an 710049, China

2. School of Automobile and Traffic Engineering, Wuxi Institute of Technology, Wuxi 214121, China)

Abstract: The combustion process of internal combustion engine is greatly influenced by the swirl flow in combustion chamber, especially for diesel engines, where the diesel diffusion process in the swirl flow field is vital for combustion efficiency and the formation of pollutants, including nitric oxides and particulate matter. However, the spray diffusion process has not been lucubrated due to the difficulties of direct observation and the characterization of the internal flows in engine chamber. The diffusion characteristics of diesel spray in different intensity swirl flows were studied visualized. In this experiment, the combustion chamber of the internal combustion engine was simulated by a visualized rapid compression machine, and the diffusion characteristics of the diesel spray under three kinds of flow fields, such as tangential swirl flow field, oblique swirl flow field and straight swirl flow field, were studied. An electronically controlled injector with nozzle hole diameter of 0.2 mm was used. The injection pulse width was 5 ms, and the two injection pressures were selected to be 40 MPa and 60 MPa, respectively. The experimental results showed that the peak and valley values of diesel spray area and window area ratio were the highest in the tangential swirl flow field and the lowest in the straight swirl flow field under the same injection pressure and fuel injection pulse width. The process from the start to the complete mixing of the spray was the shortest in the oblique swirl flow field and the longest in the straight swirl flow field. The diffusion time of the spray oil was inversely proportional to the tangential velocity of the swirl flow and the fuel injection pressure. The results can provide reference for the design of air movement organization in diesel combustion chamber.

Key words: visualized rapid compression machine; swirl flow field; diesel spray; fuel air mixing

0 引言

目前,汽车发动机仍然是以汽油和柴油为主的 液体燃料发动机。液体燃料从喷射到燃烧完毕,经 历了非常复杂的物理化学过程。虽然均质混合气发 动机包括火花点火发动机^[1-5]和 HCCI 发动机^[6], 名义上为均质混合气燃烧,但是从大量的核模态颗 粒物排放上可以看出,无论对于柴油机或汽油机,其

收稿日期: 2019-02-28 修回日期: 2019-03-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51576159、91741110)、江苏省高校自然科学基金项目(17KJD470004)、陕西省重点研发计划项目 (20192DLY15-10)和长安大学重点科研平台开放基金项目(300102229513)

作者简介:魏衍举(1982—),男,副教授,博士生导师,主要从事清洁替代燃料发动机燃烧与排放控制研究,E-mail: weiyanju@ xjtu. edu. cn

燃烧本质都是气液两相燃烧,只是汽油液滴的尺度 比柴油小一些。而非均相燃烧是颗粒物产生的充分 条件。

目前,发动机主要依靠高压喷射、稀燃等缸内净 化和机外 DPF 捕集技术减少颗粒物的产生。缸内 空气运动的组织对空气燃料的分布产生至关重要的 影响,对于燃油与空气混合过程的研究也引起广泛 关注。燃料-空气分配过程由多种因素决定,如燃料 性质、喷射压力、气流条件等。通过计算模拟^[7-12] 和实验^[13-18]对柴油的喷雾特性已进行了广泛的研 究。KIM 等^[19]在单缸可视化柴油发动机上研究了 涡流的特征以及涡流对燃烧和火焰特性的影响,研 究发现,涡流有助于燃料在燃烧室中分布更均匀,从 而减少点火延迟并提高燃烧效率,但没有对燃料的 混合过程进行深入研究。本文在不同强度涡流场中 对柴油喷射油束的扩散特性进行研究,以期为柴油 机燃烧室内空气运动组织设计提供参考。

1 实验设置

1.1 RCM 系统

RCM 系统包括:供气子系统、可视化燃烧室模块、压缩段、锁定组件、直线运动系统、驱动组件、燃油供应系统、高速摄像机数据采集系统和可视化燃烧室控制系统。图1为RCM 系统的3D模型。可视化燃烧室直径50mm,厚度20mm,压缩由钢块碰撞到活塞模块驱动。快速压缩机工作时,直线导轨上的钢块负载首先通过直线运动系统在1.5m的距离内从静态加速到10m/s,然后钢块撞击并推动活塞模块向前移动以压缩缸(直径50mm,长600mm)内气体,平均压缩速度为7.55m/s,压缩比为14,压缩终了缸内压力为1.5MPa。



图 1 RCM 系统 3D 模型 Fig. 1 3D model of rapid compression machine (RCM) system

1.2 燃烧室与涡流块

该快速压缩机燃烧室与气缸为分离式结构。燃 烧室为直径 50 mm、厚度 20 mm 的扁圆柱形,其轴线 与气缸轴线垂直,其两端面为石英玻璃观察窗。采 用 Phantom Miro eX4 型高速摄像机利用背光法拍摄 缸内柴油油束的混合过程,拍摄速率为4000 f/s,图 像分辨率为800 像素×600 像素。

燃烧室与气缸间有导气孔连接,导气孔直径为 6 mm。根据导气孔开口方向不同,形成切向、斜向 及直通气流,如图 2 所示,从而形成切向涡流场(出 口流向与气缸夹角为 45°)、斜向涡流场(出口流向 与气缸轴线夹角为 25°)和直通涡流场。柴油由喷 油器孔内的高压共轨喷油系统喷入燃烧室。





oblique and straight flow

 1. 压力传感器 2. 喷油器孔 3. 燃烧室 4. 进气/排气口 5. 涡 流块 6. 气缸盖 7. 气缸

1.3 工况设定

采用单喷孔、直径为0.2 mm 的 Bosch 高压共轨 喷油器,针对不同涡流场,搭配40、60 MPa2种喷油 压力。活塞到达上止点时被锁定,同时喷油阀打开, 喷油器开始喷油,所有工况喷油器喷油脉宽均为 5.0 ms。

2 结果与分析

2.1 等效涡流比

燃烧室涡流比是影响柴油机混合与燃烧过程的 重要参数。在本研究中,通过比较示踪粒子相对于燃 烧室圆心的移动角计算涡流瞬时转速 n_{swid} (r/min)。 其中示踪粒子为直径 0.5 mm、密度 0.01 g/m³的聚 苯乙烯颗粒,在可视的前提下能够保证气流与粒子 之间的同步性。如图 3 所示,通过计算相邻两帧图 像示踪粒子旋转角来计算涡流的瞬时转速。

为了便于将本研究中的涡流与柴油机燃烧室内 涡流进行对比,通过等效涡流比来评估 RCM 燃烧室 中涡流强度。将 RCM 视为柴油机运转时,其等效转 速为

$$n_{\text{RCM}} = 30 v_c / S$$
式中 v_c ——活塞平均运动速度

S——活塞行程

则 RCM 燃烧室内涡流的等效涡流比为 $\Omega = n_{swirl}/n_{RCM \circ}$

图4给出了切向、斜向和直通3种涡流场中瞬



图 3 利用相邻两帧图像进行瞬时涡流旋转速度 计算示意图

Fig. 3 Instant swirl ratio calculation sketch of two neighbor images



图 4 3 种涡流场中瞬时等效涡流比随时间的变化曲线 Fig. 4 Developing trend of instant equivalent swirl ratio versus time of tangential, oblique and straight flow

时等效涡流比的变化曲线。3种涡流场中,切向涡 流场具有最大的涡流比,压缩结束时峰值为5.8,与 柴油机相当。涡流在初始的5~10 ms内由于与燃 烧室壁面的摩擦而迅速衰减,然后再在150 ms内近 似线性衰减。斜向和直通涡流场的涡流比与切向涡 流场的有相似的趋势。当柴油机以1000~3000 r/min 转速运行,冲程时间从10~30 ms不等,则 RCM 产 生的3种典型涡流场可以代表柴油机的强、中、弱涡 流状态。

2.2 切向涡流场的柴油喷雾扩散特性

在切向流场中,气缸内的压缩气体经导气孔沿 燃烧室壁面进入燃烧室,气流的直线运动在燃烧室 圆柱形侧壁面的导流作用下转换为旋转运动,越靠 近壁面气流速度越高,从而形成刚体涡流。

图 5 为喷射压力 60 MPa 下的柴油喷雾在切向 涡流场中的扩散过程。0~5 ms 为柴油的喷射过 程。在此过程中,喷射油束在气流的作用下发生偏 转,油束随气流在沿圆周方向运动的同时还向壁面 扩散。由于此时壁面处气流运动速度最快,压力最 低,喷射结束后,油雾在压力梯度的作用下快速向壁 面扩散,在燃烧室大部分区域形成贫油区(7.37 ms)。



图 5 60 MPa 下切向涡流场内柴油喷雾扩散历程

Fig. 5 History of diesel spray diffusion process in tangential swirl flow field under injection pressure of 60 MPa

随着涡流的旋转,壁面处气流在摩擦力作用下 速度逐渐降低,边界层厚度增加,最高速度带沿径向 向内移动至约1/2半径处,从而形成一个从壁面到 最高压力带的压力梯度。上一阶段趋壁的柴油在这 种压力梯度下向内扩散,形成一个台风云状结构。 此时,柴油喷雾面积急剧增大。接近100%时,由于 气流运动动量传递给油雾,其运动速度整体下降,压 力梯度减小,扩散减缓,直至"台风眼"衰减消失后 油束在涡流场中完全混合(25.3 ms)。

40 MPa 喷油压力下的喷雾面积占比随时间的 变化规律与 60 MPa 相似,如图 6 所示,但混合时间 大幅延长,扩散至 100% 占比耗时 36.8 ms。



图 6 40 MPa 下切向涡流场内柴油喷雾扩散历程



柴油喷雾的燃料-空气混合过程实际上经历了 4个阶段:①燃料喷射阶段,燃料短期内被喷入燃烧 室腔内。②趋壁阶段,燃油雾在约2ms时间内被快 速吹向室壁,均匀地涂覆在侧壁上。③快速扩散阶 段,侧壁上的燃油快速向低压环带区扩散,形成台风 云状结构。④最终扩散阶段,油雾逐渐布满整个视 窗。

图7为柴油喷雾扩散面积占比(柴油喷雾面

积/燃烧室总面积)随时间的变化曲线。从图中可 以看出,喷雾扩散过程的4个阶段:燃料喷射阶段 (OA 段)、趋壁阶段(AB 段)、快速扩散阶段(BC 段)、最终扩散阶段(CD 段)。此外,60 MPa喷油压 力工况相较于40 MPa,柴油喷雾面积占比的峰值和 谷值更高,而且喷雾在流场中完全混合更快,所用时 间比40 MPa工况短11.5 ms。这主要是由于在相同 涡流场,相同喷油脉宽的情况下,喷油压力越高,喷 油量越多,且燃油雾化效果越好,混合相对更快。



现代柴油机喷雾一般由燃烧室中心顶部向活塞 顶部凹坑内喷射,其扩散过程与本研究相比,缺少一 个由壁面向燃烧室中心喷射的过程。由此可知,柴 油机扩散燃烧阶段喷射的柴油会有很大比例涂覆在 燃烧室壁面上,对燃烧及排放造成不利影响。

2.3 斜向涡流场的柴油喷雾扩散特性

柴油喷雾在斜向涡流场中的扩散特性与切向涡 流场中的扩散特性相似,如图 8 所示,其扩散过程也 可以分为上述 4 个阶段。在喷射过程中,喷雾也被 涡流弯曲;然而,与切向流场里的喷雾扩散相比,斜 向流场的喷雾扩散具有较短的穿透距离和较小的扩 散面积。喷雾仅扩散一半的圆周,并且在喷雾边缘 和侧壁之间留下大量的空白区域,而且斜向涡流的 "台风眼"也小得多。这是因为斜向涡流场产生的 涡流强度较小,仅为切向涡流场的 1/3 左右。

如图 9 所示,斜向流以与气缸轴线夹角为 25° 向下吹入腔室,理论上周向速度 v_T 只有约入射速度 (v_{in}) 的 sin25° = 0.423 倍,总动能仅有 17.9% 转换 为周向流,大部分速度和能量转换为湍流,这导致较 小的"台风眼"和更弱的向心燃料输送速度。

图 10 为在斜向流引起的涡流场中柴油喷雾的 扩散面积变化规律。在 2 种喷射压力下,初始扩散 面积呈线性增加,接着油雾在注射结束后 5 ms 内被 驱动到侧壁上。60、40 MPa 的趋壁阶段分别保持 6.38、7.95 ms。进入快速扩散阶段,在 60 MPa 的喷







图 9 柴油喷雾的扩散路径和空间分布 (*p*=60 MPa, *t*=13.2 ms)

Fig. 9 Diffusion path and spatial distribution of diesel spray, image taken at p = 60 MPa, t = 13.2 ms



图 10 斜向涡流场中柴油喷雾扩散面积占比 Fig. 10 Development of diesel spray diffusion area in oblique swirl flow field

射压力下燃料蒸汽通过螺旋臂以 10%/ms 左右的 速度向腔室中心扩散。由于斜向气流很大部分动能 转换为湍流动能,涡动能仅占 17.9%,该扩散过程 与切向气流相比较慢。在最终扩散阶段,与切向流 相比,由于较低的旋转速度和离心力产生的涡流中 心较小,燃料很快扩散充满涡流中心。喷射压力为 60、40 MPa 的总扩散持续时间为 22.5、29.5 ms。

2.4 直通涡流场的柴油喷雾扩散特性

切向和斜向涡流场中,柴油喷雾是通过"旋臂" 进入"台风"中心的,而在直通涡流场中,当空气从 右流到燃烧室中心点的直流涡流块时,它垂直地冲 向左侧壁,由于入射气流速度没有周向分量,入射的 气流很快衰减形成湍流,因此柴油喷雾没有被气流 弯曲,直接冲向左侧壁面上;此时虽然涡流强度较 弱,但燃料成功地从左侧壁面扩散至整个圆周,并通 过湍流向燃烧室中心扩散。柴油在湍流中扩散时不 能看到明显的扩散路径,在燃烧室的分布具有随机 性。如图 11 所示,因此在直通流场中没有看到典型 的"台风"状分布。





图 12 给出了直通涡流场中柴油喷雾扩散面积 的发展。该过程也可以分为4个阶段,然而由于低 涡旋比和强烈的湍流,趋壁和快速扩散之间的边界 更为模糊。扩散时间也比涡流内喷雾的扩散时间 长,扩散速率较低,在60、40 MPa的喷射压力下,总 扩散时间分别为54、70 ms。





2.5 3种涡流场柴油喷雾扩散特性对比

虽然不同涡流场的扩散速度有很大差异,总体

上都可以分为喷射、趋壁、快速扩散和最终扩散等4 个阶段。而且,涡流强度越高、喷射压力越大,扩散 越快。如图13所示,在燃料喷射阶段,喷射终了时, 于60、40 MPa的喷射压力下在切向涡流场中的扩散 面积分别可达0.62和0.375,远高于在另外两个涡 流场中的扩散面积。在快速扩散阶段,切向涡流场 的扩散速度显著高于斜向涡流场,斜向涡流场同样 高于直通涡流场。



图 13 不同压力下 3 种涡流场中柴油喷雾扩散面积占比 Fig. 13 Comparison of spray diffusion area in three flow fields under various injection pressures

油束在切向涡流场中主要依靠涡流径向压力梯度,在直通涡流场主要依靠湍流扩散,在斜向涡流场中则二者兼而有之,而且涡流的燃油输送效果明显高于湍流。另一方面,喷射压力越大,燃油入射速度越高、雾化也越好,这有利于向气流中扩散。如取 $v^* = v_T / v_{in} \pi p^* = p_{inj} / 40$ 分别表示入射气流周向速度转化率和燃油喷射压力比,截取图13中所有曲线的快速扩散阶段,并将图中横坐标时间 t 修正为 $v^* p^* t$,则所有曲线即可重叠在一起(扩散速度相等),如图14所示。其中直通涡流场的扩散效果相当于入射角约为80°的斜向涡流,扩散速度为切向涡流的20%。表明涡流强度和燃油喷射速度是影响燃料扩散的两个最重要参数,而且扩散时间与涡



图 14 不同压力下 3 种涡流场中快速扩散阶段的 柴油喷雾扩散面积占比(横坐标已修正)

Fig. 14 Comparison of spray diffusion area in three flow fields under various injection pressures in rapid diffusion stage (the abscissa was corrected) 流切向速度、燃油喷射压力成反比。

3 结论

(1)3种涡流场中柴油喷雾混合过程均可分为4个阶段:燃料喷射、壁面趋近、快速扩散和最终扩 散阶段。

(2)在相同涡流场中,相同喷油脉宽下,不同喷油压力工况柴油喷雾面积发展趋势基本一致, 60 MPa喷油压力工况柴油喷雾面积占比的峰值和 谷值均高于40 MPa,且其完全混合时间更短。

(3)在相同喷油压力及喷油脉宽下,切向涡流

场中柴油喷雾面积与视窗面积比的峰值和谷值均最高,直通涡流场中最低。

(4)斜向涡流场从喷油开始到喷雾完全混合整 个过程用时最短,直通涡流场用时最长,在40 MPa 和60 MPa喷油压力下,两者均相差2倍多。

(5)喷雾面积占比从谷值增长到1的过程中, 3种涡流场中其增长趋势不同:切向涡流场中增长 速度先快后慢,直通涡流场中柴油喷雾面积占比一 直缓慢增长,而斜向涡流场中增长趋势先慢后快。

(6)喷雾油束扩散时间与涡流切向速度、燃油 喷射压力成反比。

参考文献

- [1] 潘锁柱, 裴毅强, 宋崇林,等. 汽油机颗粒物数量排放及粒径的分布特性[J]. 燃烧科学与技术,2012, 18(2): 181-185.
 PAN Suozhu, PEI Yiqiang, SONG Chonglin, et al. Particle number and size distributions from gasoline engine[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2012, 18(2): 181-185. (in Chinese)
- [2] 黄雅卿, 王志, 王建昕. 喷油时刻对缸内直喷汽油机颗粒物排放的影响[J]. 内燃机学报, 2014, 32(5): 420-425.
 HUANG Yaqing, WANG Zhi, WANG Jianxin. Effects of injection timing on particulate emission in gasoline direct injection engine[J]. Transactions of CSICE, 2014, 32(5): 420-425. (in Chinese)
- [3] MATTIMARICQ M, PODSIADLIK D, CHASE R. Size distributions of motor vehicle exhaust PM: a comparison between ELPI and SMPS measurements[J]. Aerosol Science & Technology, 2000, 33(3):239 260.
- [4] GORDON E, FATHIA M. The composition of spark ignition engine steady state particulate emissions [C]. SAE Technical Papers, 1999.
- [5] MARTTIMARIC Q. Gasoline engines: ultrafine particle emissions [R]. Physical & Environmental Sciences Research & Innovation Center of Ford Motor Company, 2007.
- [6] PHILIP P, RICHARD S, JACEK M, et al. Particulate emissions from a gasoline homogeneous charge compression ignition engine[C]. SAE Technical Papers, 2007.
- [7] REITZ R D. Directions in internal combustion engine research[J]. Combust Flame, 2013, 160(1): 1-8.
- [8] MUSCULUS M P, MILES P C, PICKETT L M. Conceptual models for partially premixed low-temperature diesel combustion [J]. Prog Energy Combust Sci., 2013, 39(23): 246 - 283.
- [9] DESANTES J M, MARGOT X, PASTOR J M, et al. CFD-phenomenological diesel spray analysis under evaporative conditions [J]. Energy & Fuels, 2009, 23(8): 3919 – 3929.
- [10] POGOREVC P, KEGL B, SKERGET L. Diesel and biodiesel fuel spray simulations [J]. Energy & Fuels, 2008, 22(2):1266-1274.
- [11] PARK S H, KIM H J, LEE C S. Numerical investigation of combustion and exhaust emissions characteristics based on experimental spray and atomization characteristics in a compression ignition diesel engine [J]. Energy & Fuels, 2010, 24(4): 2429-2438.
- [12] PERINI F, MILES P C, REITZ R D. A comprehensive modeling study of in-cylinder fluid flows in a high-swirl, light-duty optical diesel engine[J]. Computers & Fluids, 2014, 105:113 - 124.
- [13] 姚春德,胡江涛,银增辉,等.喷油压力对高压共轨柴油机燃烧影响的可视化研究[J/OL].农业机械学报,2016, 47(1):355-361.

YAO Chunde, HU Jiangtao, YIN Zenghui, et al. Visualization on combustion characteristics of common rail diesel engine at different inject pressures [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(1):355 - 361. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160149&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j.issn. 1000-1298.2016.01.049. (in Chinese)

- [14] LIU Z, QIAN G, SUN Y, et al. Speciation evolutions of heavy metals during the sewage sludge incineration in a laboratory scale incinerator[J]. Energy & Fuels, 2010, 24(4):2470 - 2478.
- [15] KIM M Y, BANG S H, LEE C S. Experimental investigation of spray and combustion characteristics of dimethyl ether in a common-rail diesel engine[J]. Energy & Fuels, 2007, 21(2):793-800.
- [16] GONG Yunyi, LI Xianguo, PENG Zhijun. Droplet size distributions in diesel fuel sprays [J]. Progress in Natural Science, 1995, 5(5): 632-637.
- [17] KUTI O B, ZHU J Y, NISHIDA K, et al. Characterization of spray and combustion processes of biodiesel fuel injected by diesel engine common rail system [J]. Fuel, 2012, 104: 838-846.
- [18] CATAPANO F, SEMENTA P, VAGLIECO B M. Air-fuel mixing and combustion behavior of gasoline-ethanol blends in a GDI wall-guided turbocharged multi-cylinder optical engine[J]. Renewable Energy, 2016, 96:319-332.
- [19] KIM K, CHUNG J, LEE K, et al. Investigation of the swirl effect on diffusion flame in a direct-injection (DI) diesel engine using image processing technology[J]. Energy & Fuels, 2008, 22(6):3687-3694.