

可控热氛围中喷雾的雾化特性和粒径分布

张青, 秦秋实, 邓俊, 吴志军

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

摘要: 基于可控热氛围燃烧器提供的均匀温度场, 使用高速摄像机和激光衍射粒度仪对 300~673 K 协流温度范围内的柴油喷雾进行测量. 结果表明, 随协流温度升高, 相同时间内的喷雾贯穿距减小, 喷雾锥角先增大后减小. 在 300 K 协流下, 索特平均直径处于 10~20 μm 之间, 随轴向高度升高而略有增加, 大尺寸液滴的直径在离开喷孔 20~40 mm 过程中下降了 17%. 各粒径参数随径向距离的增大而减小. 粒径一致性随着轴向和径向距离的增加而提高. 在协流温度从 300 K 上升至 673 K 的过程中, 索特平均直径从 15 μm 上升到 24 μm , 粒径一致性提高, 蒸发使得小尺寸液滴大量消失.

关键词: 发动机; 喷雾; 热氛围; 激光衍射; 粒径分布

中图分类号: TK421

文献标志码: A

Key words: engine; spray; hot co-flow; laser diffraction; droplet size distribution

能源短缺、环境污染以及不断升级的排放法规, 使得燃油效率的提高和污染物的控制成为当前燃烧领域的重要课题. 在内燃机领域, 传统压燃式(CI)、直喷点燃式(DISI)、均质压燃发动机(HCCI)以及燃气轮机的燃烧效率提高的相关研究, 得到了广泛的关注. 相对于进气道喷射的点燃发动机, 这些发动机具有燃油经济性高, 温室气体排放少, 未燃碳氢生成少^[1-2]等优点.

喷雾的雾化和蒸发过程对燃料的燃烧和污染物的生成有着至关重要的影响. 对于直喷式发动机, 喷雾碰壁会导致颗粒物数量、氮氧化物(NO_x)、未燃碳氢(UHC)等排放的大量增加^[3-4], 必须尽量避免. 喷雾的贯穿距、锥角、液滴尺寸、蒸发速率等参数也影响着燃烧的效率以及 NO_x 等污染物的生成^[5-7], 这就要求对喷雾的雾化蒸发以及混合气的形成有更深入详细的理解.

喷雾雾化蒸发过程以及混合气形成过程的基础研究, 对燃油供给系统和汽缸结构设计以及数值模拟的可靠性验证有着重要的指导意义. 基于这个原因, 专家学者对喷雾雾化蒸发过程及混合气形成的课题进行了大量试验, 包括喷嘴内部结构对喷雾影响的研究^[8]、定容弹中的喷雾和雾化过程^[9]、光学发动机上的喷雾及其对发动机性能的影响^[10]等等.

湍流射流火焰是发动机中常见的一种湍流燃烧形式, 而湍流和化学反应动力的强相互作用是研究湍流射流燃料自燃和火焰稳定的难点. 可控热氛围燃烧器得到了湍流扩散燃烧国际学术组织 TNF (Turbulent non-premixed flames) Workshop 的肯定并列入标准燃烧器系列, 不同于其他燃烧装置, 热

Atomization and Droplet Size Distribution of Diesel Sprays Issuing into a Hot Vitiated Co-Flow

ZHANG Qing, QIN Qiushi, DENG Jun, WU Zhijun

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The information of diesel spray in a stable hot co-flow (300—673 K) is recorded with a high-speed camera and a laser diffraction instrument. The results show that as the co-flow temperature increases, the spray penetration decreases and a peak spray angle appears. When the co-flow temperature is equal to 300 K, the Sauter mean diameter of the droplets is between 10 μm and 20 μm and slightly increases along the axis. D_{v50} decreases by 17% from 20 mm to 40 mm in the axial distance. The size distribution parameters decrease along the radius. The uniformity of the droplet sizes becomes better as the axial/radial distance increases. The Sauter mean diameter increases from 15 μm to 24 μm and the uniformity increases as the co-flow temperature increases from 300 K to 673 K, owing to the fast evaporation of small droplets.

收稿日期: 2017-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(91441125, 51576141)

第一作者: 张青(1990—), 男, 博士生, 主要研究方向为基础喷雾与燃烧. E-mail: 11zhangqing@tongji.edu.cn

通讯作者: 吴志军(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为湍流燃烧和内燃机. E-mail: zjwu@tongji.edu.cn

氛围中的喷雾有以下特点:①处于雷诺数 4 000~11 000 的湍流协流环境中;②不存在实际发动机中的复杂回流机制,喷雾火焰的稳定性与热产物回流无关,简化了现有燃烧模型的边界条件^[11];③环境温度调节范围广,包括室温、400~1 500 K 之间连续调节。

本试验基于可控活化热氛围燃烧器提供的稳定均匀的温度场及其特有的对复杂回流过程的解耦,对柴油喷雾在不同协流温度氛围中的喷雾宏观参数、粒径轴向和径向分布进行了基础研究,为研究喷雾雾化蒸发过程以及混合气的形成提供了数据支撑,为液体燃料湍流起升火焰中物理混合过程提供信息,同时也是研究液体燃料自燃和湍流起升火焰稳定性的基础^[12-14],能够指导实际车用发动机和燃气轮机的研发。

1 试验部分

图 1 为试验系统的示意图以及装置的空间布局。整个系统主要包括燃料喷射和控制系统、可控热氛围燃烧器、高速摄像机以及激光衍射粒度仪等装置。喷嘴由接有高压氮气的蓄能器提供压力,使用电磁阀进行控制,喷入燃烧器中央。协流温度场由可控热氛围燃烧器产生,喷雾的宏观参数主要通过高速摄像机进行记录,喷雾的粒径分布通过激光衍射粒度仪进行分析。

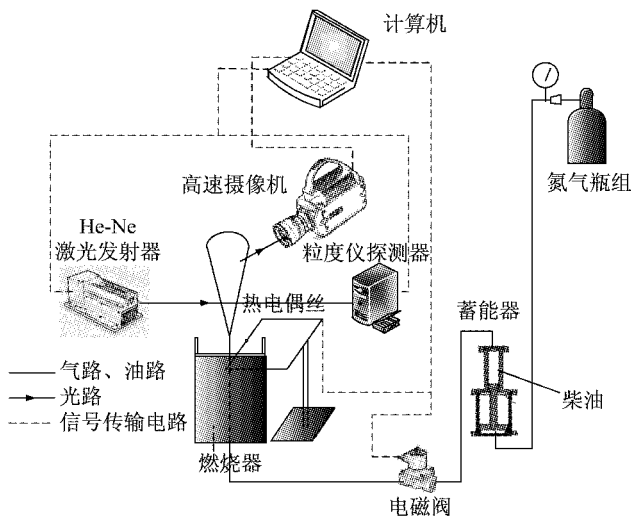


图 1 试验系统的全局示意图

Fig. 1 Globe schematic diagram of experimental setup

试验所用燃料为国 V 标准 0# 柴油。表 1 为试验工况的基本参数,其中协流空气流量保持不变,协流温度与协流速度按顺序一一对应。

表 1 试验工况的基本参数

Tab. 1 Experimental conditions	
参数	数值
燃料	国 V 标准 0# 柴油
喷射压力/MPa	16
喷嘴孔径/mm	0.3
喷嘴长径比	2
喷嘴扩张系数	0
喷油持续时间/s	0.3
喷雾初始速度/(m·s ⁻¹)	195
协流区域直径/m	0.2
协流温度/K	300,523,573,623,673
协流速度/(m·s ⁻¹)	0.88,1.57,1.73,1.88,2.04
协流空气流量/(m ³ ·h ⁻¹)	99
环境压力/MPa	0.1
环境温度/K	300

1.1 可控热氛围燃烧器

图 2 为可控热氛围燃烧器的结构示意图。通过调节协流预混合气中氢气及空气流量,该系统可以提供室温、400~1 500 K 范围内的均匀稳定温度场,可以方便地研究燃料在此温度范围内的雾化蒸发特性、自燃过程和火焰的稳定性^[15-16]。协流中空气流量通过涡街流量计进行测量,协流中的氢气流量通过玻璃转子流量计进行测量和控制,协流温度通过热电偶进行测量。由上述测量设备获得的数据精度分别为:空气流量±1%,氢气流量±1.5%,协流温度±2.5 K。协流成分和热电偶的热辐射修正方法可见文献^[12,16]。

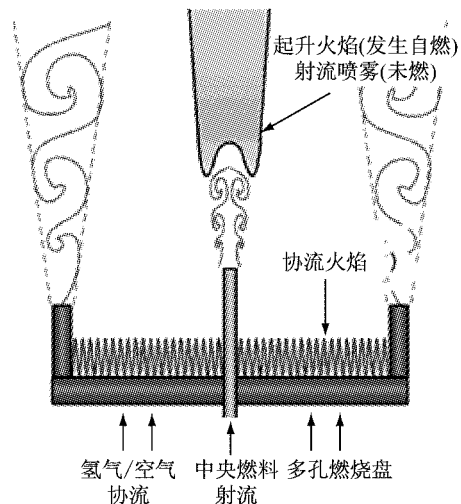


图 2 可控热氛围燃烧器结构示意图

Fig. 2 Schematic of vitiated co-flow burner

1.2 高速摄像机及图像处理

试验中采用美国 VRI 公司的 Phantom V7.3 系列高速摄像机对喷雾瞬间影像进行记录。选取的拍摄速率为 2 000 帧·s⁻¹,曝光时间为 495 μs,图片像素为 256×600 像素,每个工况下记录 2 组试验数

据. 喷雾的贯穿距离、发展速度、锥角、半径等宏观参数信息, 通过 MATLAB 编制的程序进行处理. 该程序将图片的三原色信息转化成灰度值, 并使用灰度阈值 5 (最大值为 255) 来界定喷雾区域并转化成二值图像, 使用 `bwareaopen` 函数删除二值图像中面积小于 10 的对象来过滤干扰.

1.3 激光衍射粒度仪

试验中采用 Malvern Spraytec 型号的激光衍射粒度仪对喷雾的粒径分布进行测量. 该设备进行粒度测量的基本原理是夫朗和费衍射理论 (Fraunhofer theory). 图 3 为激光衍射粒度仪的光路示意图. He-Ne 激光发射器发射波长为 632.8 nm, 最大功率为 4 nW. 傅立叶透镜焦距有 300 mm 和 700 mm 两种, 本试验选用 300 mm 焦距. 接收器包括 36 个对数分布的接收元件. 基于这套系统的结构布置, 散射探测器能够测量不同散射角的光强. 粒子尺寸分布通过下式得到:

$$S(\theta_i) = \sum_j C_{i,j} V(d_j)$$

系统通过散射信号 $S(\theta_i)$ 和传递函数 $C_{i,j}$ 计算离散粒子尺寸分布 $V(d_j)$. 传递函数由粒子和系统的光学性质决定. 本试验中, 设备对 NIST (美国国家标准与技术研究院) 可追踪乳胶标准粒子的精度和可重复性协方差在 $\pm 1\%$ 以内, 选用的数据捕捉频率为 100 Hz, 触发器阈值为 95% 激光穿透率, 每个试验点重复测量 2 次.

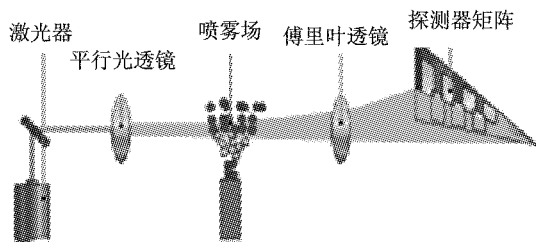


图 3 激光衍射测量系统示意图

Fig. 3 Schematic of laser diffraction measuring device

2 结果与讨论

2.1 喷雾贯穿距

图 4 为协流温度为 300、573 和 673 K 下柴油喷雾形态随时间的发展. 本文以 40 ms 后喷雾作为稳定状态. 整体上, 可以明显发现随着协流温度的升高, 喷射后的相同时间内喷雾宽度变小.

图 5 为柴油喷雾在不同协流温度下的贯穿距随时间变化的曲线. 可以看到, 喷雾呈现出两阶段的变

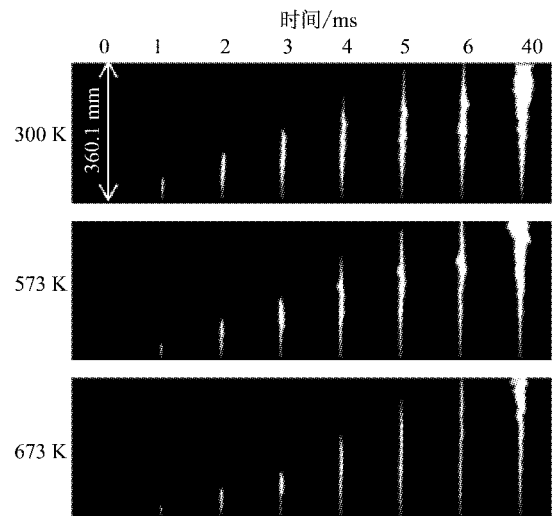


图 4 柴油喷雾形态随喷射时间的发展

Fig. 4 Development of spray after injection

化, 在 2.5 ms 附近有明显的转折点. 在该时间点前后, 不同协流温度工况下的喷雾贯穿速度分别受蒸发和气相介质密度决定. 在喷雾的第一阶段 (大约 $t < 2.5$ ms), 协流温度越高, 相同时间内喷雾的贯穿距越小, 即喷雾速度较慢. 在这个阶段, 喷嘴针阀处于开启过程中, 喷嘴流量较小, 因此, 受到高协流温度带来的蒸发影响较大, 喷雾锋尖上的液滴被蒸发消失后, 表现为前后两帧图片喷雾前锋面差距的缩小, 即贯穿距离减小. 2.5 ms 时, 协流温度为 673 K 时的喷雾贯穿距离仅有 300 K 情况下的一半. 在喷雾的第二阶段 ($t \geq 2.5$ ms), 不同协流温度对应的喷雾贯穿距离的差距减小, 协流温度为 523 K 的曲线甚至超过了协流温度 300 K 的情况, 即协流温度越高的喷雾贯穿速度越大. 在这个阶段, 针阀全开, 喷嘴流量较大, 喷雾前锋面一方面受蒸发的影响减小, 另一方面, 高协流温度使得喷雾穿越的气体介质的密度减小, 气相阻力减小, 喷雾速度较大. 协流温度为 623 K 和 673 K 的喷雾曲线由于初始阶段落后太多, 最终还是落后于室温下的喷雾曲线.

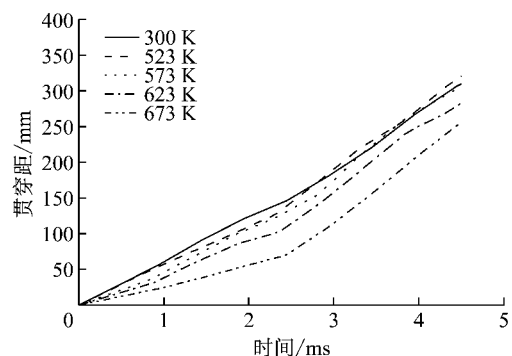


图 5 喷雾贯穿距随时间的变化

Fig. 5 Spray penetration versus time after injection

2.2 喷雾锥角

图 6 为不同协流温度下喷雾锥角的对比. 锥角取喷雾稳定后的 40 张图片的平均值. 在喷雾轴向高度较低时,喷雾宽度过细,以此来计算喷雾锥角容易引起误差,因此只使用喷雾高度大于 40 mm 的喷雾区域来计算喷雾锥角. 柴油喷雾的锥角随协流温度的变化,表现出两阶段的变化规律. 在协流温度为室温 300 K 时,柴油喷雾为 11.03°,随着协流温度提高,喷雾锥角明显增大,当协流温度 523 K 时,达到最大的 12.15°. 此后,随着协流温度的提高,喷雾锥角减小,直至 673 K 时的 8.76°. 相对于室温的情况,协流温度为 523 K 时柴油的黏度降低,促进了喷雾破碎、雾化过程,因此协流燃烧情况下的喷雾锥角明显高于室温下的情况. 随着协流温度的进一步提高,雾化改善带来的喷雾外围的小液滴在高温下迅速蒸发,造成了锥角的减小. 表 2 为本试验使用的柴油燃料的馏程表^[17]. 随着协流温度提高至 573 K,已超过 50%馏出温度,高温使得喷雾场外围的小尺寸液滴迅速蒸发^[18],因此随协流温度的进一步提高,喷雾锥角逐渐减小. 关于这个推论,可以从下面的粒径分布测量中得到验证.

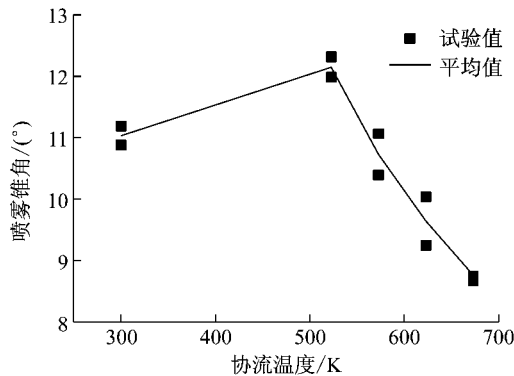


图 6 喷雾锥角随协流温度的变化

Fig. 6 Spray cone angle versus co-flow temperature

表 2 试验用 0# 柴油的馏程表

Tab. 2 Distillation properties of 0# diesel

馏程	温度值/K
初馏点	398
10%馏出温度	444
50%馏出温度	548
90%馏出温度	617
终馏点	645

2.3 粒径分布

图 7 是协流温度为 300 K 时,中轴线上 $z=100$ mm 位置处 D_{v50} 、 D_{v90} 、 D_{43} 和 D_{32} 参数在触发器触发后随时间的变化. 其中 D_{v50} 和 D_{v90} 代表累积体积分数为 50%和 90%时对应的液滴直径, D_{43} 和 D_{32} 分别

表示德布鲁克平均直径 (De Brouckere mean diameter) 和索特平均直径 (Sauter mean diameter, SMD). 可以发现,触发器刚触发时,喷雾处于发展阶段,各粒径参数都随时间的变化而减小. 当 $t \geq 0.05$ s 时,各粒径参数随时间的变化很小,可以认为已形成稳态喷雾. 表 3 显示了 0.10~0.19 s 内粒径的标准差, D_{v90} 的变化幅度相对于其他 3 个参数要更大一些,但标准差也仅有 1.22 μm . 表中数据表明,使用该设备对稳态喷雾过程中的粒径分布进行测量时有很好的的一致性和稳定性.

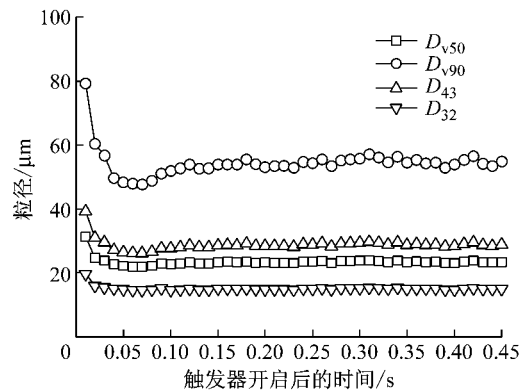


图 7 粒径参数随时间的变化

Fig. 7 Droplet diameters after injection

表 3 0.10~0.19 s 内各粒径参数的标准差

Tab. 3 Standard deviations of diameters

粒径参数	D_{v50}	D_{v90}	D_{43}	D_{32}
标准差/ μm	0.296	1.220	0.466	0.202

试验中,在喷雾中轴线上,从喷嘴口起,记录高度为 20、40、60、80、100、120 mm 处的粒径分布. 在轴向高度为 120 mm 时,记录径向距离 0、2、4、6、8、10、12、14、16 mm 处的粒径分布.

图 8 为协流温度为 300 K 时中轴线上的 D_{32} 、 D_{v50} 、 D_{v90} 及相对跨度系数 ϵ 轴向分布图. ϵ 表征粒径

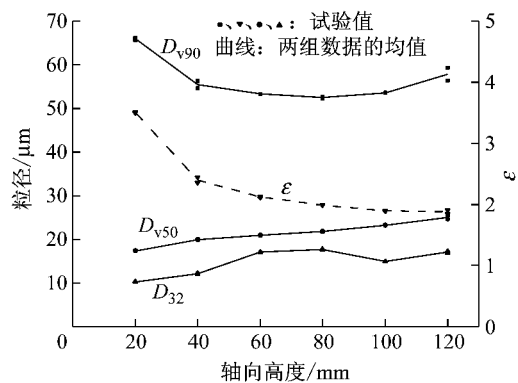


图 8 轴向喷雾粒径分布及相对跨度系数

Fig. 8 Axial distribution of droplet size and relative span factor

的一致程度,由下式得到: $\varepsilon = (D_{v90} - D_{v10})/D_{v50}$. 所有数据均为触发器开启后 0.10~0.19 s 内的粒径平均值.

从整体上看,不同轴向高度上的各粒径评价参数呈现各自的变化特点. D_{v50} 随轴向高度的增加,略有上升. D_{32} 仅在 20~60 mm 段有明显上升,此后变化不大,都在 15~18 μm 之间. 在室温下,柴油的饱和蒸汽压很小,蒸发过程进行的很慢,在本文研究的时间尺度下,蒸发对该温度下粒径变化影响应当可以忽略. 当轴向高度较低(靠近喷嘴出口处)时,液滴粒径不一致度很大,大小液滴同时存在,当轴向高度增加时,小颗粒的初始动量较小,受到气相阻力作用,趋向于向径向偏移,大颗粒则留在中轴线上. 这就导致在轴向高度较高时, D_{v50} 会变大. 相对跨度系数 ε 的变化规律也验证了这个结论, ε 随着轴向高度的增加而迅速减小,表明近喷嘴口处液滴尺寸不均匀,而远离喷嘴口位置的液滴群粒径分布更为一致. D_{v90} 通常表征大尺寸液滴的情况,而大尺寸燃油液滴对内燃机中碳烟和未燃碳氢等污染物的排放影响很大. 图中显示, D_{v90} 在 50~70 μm 之间,从轴向高度 20 mm 升高到 40 mm 的过程中, D_{v90} 就下降了 17%. 这表明近喷嘴口的局部燃烧较为不充分,是碳烟和未燃碳氢等污染物的主要生成区域. 图 8 中相同工况点的 2 次喷雾粒径数据,差距极小,可知本试验喷雾过程和测量装置性能的稳定性.

图 9 为协流温度 300 K、轴向高度 $h = 120$ mm 处,各粒径参数和相对跨度系数的径向分布图. D_{32} 、 D_{v50} 、 D_{v90} 都随着径向距离的增大而减小,其中 D_{v90} 的变化幅度最大. 可以认为,径向距离较大处的液滴的粒径整体相对更小. ε 也随着径向距离的增大而减小,这表明液滴粒径分布在径向距离较大时更为一致. 对于 $h = 120$ mm 的液滴,从喷嘴口到图中各径向坐标的距离 s 几乎相同($r = 0, s = 120$ mm; $r = 16$ mm, $s = 121.1$ mm),因此相同粒径和初始动量的液滴,到达不同径向位置后的结果几乎相同. 而在实际喷雾中,尺寸较大的液滴,通常有更高的初始动量,不容易由于气阻等原因发生偏移. 这事实上就表明了,不同径向位置的粒径差异,是气流阻力对液滴大小“筛选”的结果. 前期的起升火焰研究^[13,19]显示,液体燃料起升火焰的稳定驻点并不在中轴线上,偏离中轴线的空间位置更容易发生自燃. 图 9 显示的小尺寸液滴分布在偏离中轴线的规律,能够有力地解释该现象.

图 10 为轴向高度 $h = 100$ mm、 $r = 0$ 时粒径参数

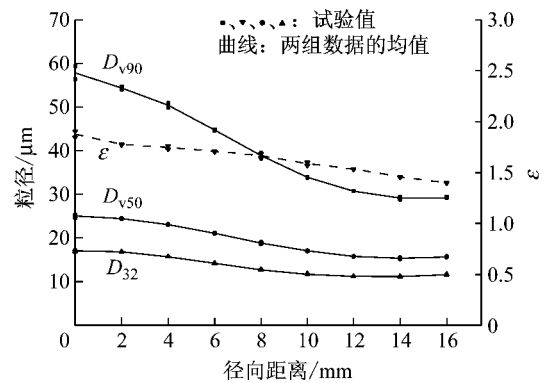


图 9 径向喷雾粒径分布及相对跨度系数

Fig. 9 Radial distribution of droplet size and relative span factor

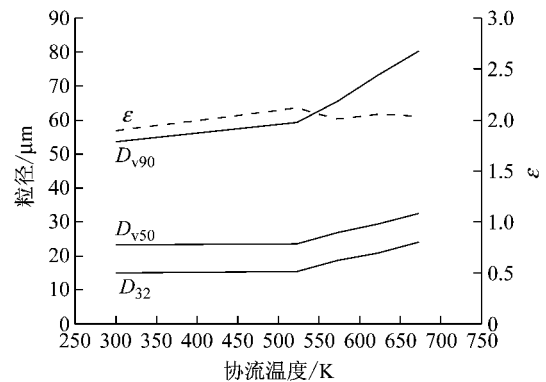


图 10 粒径参数及相对跨度系数随协流温度的变化

Fig. 10 Droplet size and relative span factor at various co-flow temperatures

和相对跨度系数随协流温度的变化. 随着协流温度的提高,喷雾液滴的 D_{32} 、 D_{v50} 、 D_{v90} 均增大,其中 D_{32} 从 300 K 对应的 15 μm 大幅度提高到 673 K 对应的 24 μm . 显然,在其他条件不变的情况下,更高的协流温度一方面使得液滴与协流的温差变大,另一方面对应更快的协流速度(见表 1),使得液滴表面的对流传热系数增大,两者共同作用导致了喷雾液滴蒸发速率的提高. 因此,每个独立的液滴直径都将会减小(或直接消失). 在高协流温度下,小尺寸的液滴会迅速蒸发,对液滴群的整体贡献反而随着协流温度的升高而降低,而大尺寸液滴的直径随协流温度的上升仅略有减小. 也就是说,协流温度的上升导致了液滴平均直径的上升和蒸发过程的加快两个结果. 此外,对比协流 300 K 和 523 K 的数据,发现各粒径参数的变化不大,即蒸发过程并没有发生明显变化. 虽然试验所用柴油的 10% 馏出温度仅为 444 K,但是当协流温度为 523 K 时,在 100 mm 的轴向高度内,柴油喷雾的整体温度还是远低于协流温度的.

3 结论

(1) 试验中不同协流温度对应的喷雾贯穿距呈现出两阶段的变化,在第一阶段,协流温度的升高使得蒸发速率加快,导致喷雾贯穿速度较小;在第二阶段,协流温度的升高使得气相介质密度减小,导致喷雾贯穿速度较大。

(2) 喷雾的锥角随着协流温度的升高,呈现出先增大后减小的规律. 主要由于柴油喷雾破碎雾化程度和液滴蒸发程度随协流温度的提高而发生改变。

(3) 喷雾中轴线上,索特平均直径处于 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 之间,随轴向高度升高而略有增加,粒径的一致性明显提高. 近喷嘴口, D_{v90} 较大,容易导致碳烟和未燃碳氢等污染物。

(4) 喷雾各粒径参数随径向距离的增大而减小,且粒度一致性提高,这是气流阻力对液滴大小“筛选”的结果。

(5) 在协流温度从 $300\ \text{K}$ 上升至 $673\ \text{K}$ 的过程中, D_{32} 从 $15\ \mu\text{m}$ 上升到 $24\ \mu\text{m}$,粒径一致性提高,蒸发使得尺寸液滴大量消失。

参考文献:

- [1] ÜBERALLA A, OTTEA R, EILTSB P, *et al.* A literature research about particle emissions from engines with direct gasoline injection and the potential to reduce these emissions [J]. *Fuel*, 2015, 147: 203.
- [2] BENDU H, MURUGAN S. Homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion; mixture preparation and control strategies in diesel engines [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 38: 732.
- [3] LAHANE S, SUBRAMANIAN K A. Impact of nozzle holes configuration on fuel spray, wall impingement and NO_x emission of a diesel engine for biodiesel-diesel blend (B20) [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 64(1/2): 307.
- [4] KITASEI T, YAMADA J, SHOJI T, *et al.* Influence of the different fuel spray wall impingement angles on smoke emission in a DI-diesel engine [C] // SAE Paper. Shanghai: SAE International, 2008; 2008-01-1791.
- [5] VAN DER WEGE B A, HAN Z, IYER C O, *et al.* Development and analysis of a spray-guided DISI combustion system concept [C] // SAE Paper. Pittsburgh: SAE International, 2003; 2003-01-3105.
- [6] 赵昌普,宋崇林,李晓娟,等. 燃油系统参数对柴油机燃烧及排放影响的研究 [J]. *内燃机学报*, 2008, 26(6): 505.
ZHAO Changpu, SONG Chonglin, LI Xiaojuan, *et al.* Influence of fuel injection system parameters on combustion and emissions of a diesel engine [J]. *Transactions of CSICE*, 2008, 26(6): 505.
- [7] KIM D, EKOTO I, COLBAN W F, *et al.* In-cylinder CO and UHC imaging in a light-duty diesel engine during PPCI low-temperature combustion [C] // SAE Paper. Shanghai: SAE International, 2008; 2008-01-1602.
- [8] 黄魏迪,吴志军,李治龙,等. 柴油机喷嘴内部几何结构的喷雾贯穿距模型 [J]. *内燃机学报*, 2012, 30(2): 124.
HUANG Weidi, WU Zhijun, LI Zhilong, *et al.* Diesel spray penetration model based on nozzle internal geometry [J]. *Transactions of CSICE*, 2012, 30(2): 124.
- [9] PARK S H, KIM H J, SUH H K, *et al.* Experimental and numerical analysis of spray-atomization characteristics of biodiesel fuel in various fuel and ambient temperatures conditions [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2009, 30: 960.
- [10] JOONHO J, JONG T L, SANG I K, *et al.* Combustion performance, flame, and soot characteristics of gasoline - diesel pre-blended fuel in an optical compression-ignition engine [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 116: 174.
- [11] CABRA R, CHEN J Y, DIBBLE R W, *et al.* Lifted methane - air jet flames in a vitiated coflow [J]. *Combustion and Flame*, 2005, 143: 491.
- [12] WU Z, ZHANG Q, LI L, *et al.* Auto-ignition and stabilization of diesel-propane lifted flames issuing into a hot vitiated co-flow [J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30 (11): 9730.
- [13] WU Z, BAO T, ZHANG Q, *et al.* Experimental study on spray combustion characteristics of gasoline-diesel blended fuel in a controllable active thermo-atmosphere [J]. *Fuel*, 2014, 135: 374.
- [14] CABRA R, HAMANO Y, CHEN J Y, *et al.* Ensemble diffraction measurements of spray combustion in a novel vitiated coflow turbulent jet flame burner [C] // Spring Meeting of the Western States Section of the Combustion Institute. Golden: NASA, 2000; 2000-210466.
- [15] CABRA R, MYHRVOLD T, CHEN J Y, *et al.* Simultaneous laser Raman-Rayleigh-LIF measurements and numerical modeling results of a lifted turbulent H_2/N_2 jet flame in a vitiated coflow [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29: 1881.
- [16] WU Z, ZHANG Q, BAO T, *et al.* Experimental and numerical study on ethanol and dimethyl ether lifted flames in a hot vitiated co-flow [J]. *Fuel*, 2016, 184: 620.
- [17] 包堂堂. 可控热氛围下柴油/汽油混合燃料燃烧特性研究 [D]. 上海: 同济大学, 2014.
BAO Tangtang. Study on combustion characteristics of diesel-gasoline blend fuel in controllable active thermo-atmosphere [D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [18] PARK S H, KIM H J, LEE C S. Comparison of experimental and predicted atomization characteristics of high-pressure diesel spray under various fuel and ambient temperature [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010, 24(7): 1491.
- [19] WU Z, BAO T, ZHANG Q, *et al.* Simulation study on spray combustion mechanism of diesel-gasoline blend fuels [J]. *Fuel*, 2015, 143: 301.