

外开式汽油喷油器喷雾特性研究*

何邦全 叶 飞

(天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 在定容弹内,采用纹影和激光 Mie 散射技术研究了外开式压电晶体汽油喷油器使用汽油、正丁醇和乙醇时的喷雾特性。结果表明,外开式喷油器喷油形成的空心圆锥状喷雾结构由线状油束组成。喷油背压对喷雾的宏观形态影响较大。随着喷油背压的升高,喷雾中油线间隙减小并最终消失,同时喷雾贯穿度与面积均大幅减小,但喷雾锥角基本不随背压、燃料种类和时间的变化而变化。此外,随着背压的升高,喷雾横向贯穿度的减小程度大于轴向贯穿度,但是横向贯穿度始终大于轴向贯穿度。粘度较大的乙醇和正丁醇的轴向贯穿度大于汽油。横向贯穿度与喷油产生的涡流有关。涡流尺度越大,则横向贯穿度也越大。

关键词: 直喷汽油喷油器 醇 喷雾特性 纹影法 Mie 散射法

中图分类号: TK418.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)06-0275-07

Spray Characteristics of An Outward-opening Gasoline Piezoelectric Injector

He Bangquan Ye Fei

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

Abstract: The spray characteristics of gasoline, n-butanol and ethanol injected from an outward-opening gasoline piezoelectric injector were investigated with Schlieren and laser Mie scattering techniques in a constant volume vessel. Experimental results showed that the hollow conical spray was composed of numerous tiny jets. The macrostructures of spray were affected by the magnitude of back pressure. With the increase of back pressure, the gap between two adjacent jets was decreased and finally disappeared. In the meantime, the penetration and projected area of spray were sharply reduced. However, the spray cone angle was nearly unchanged with time regardless of the magnitude of back pressure and fuel types. Furthermore, the decline of spray penetration was always larger in horizontal direction than that in vertical direction. But the penetration in horizontal direction was longer than that in vertical direction. The spray penetration in vertical direction for ethanol and n-butanol with relatively higher viscosity was longer than that for gasoline, which was contributed to the vortex formed during injection. The larger the scale of the vortex, the longer the penetration in horizontal direction was.

Key words: Gasoline injector for direct injection Alcohol Spray characteristics Schlieren method Mie scattering method

引言

缸内直喷技术是提高传统进气道汽油机燃油经济性、降低其污染排放物的重要手段。喷雾过程直接影响直喷汽油机缸内燃油与空气的混合,从而影响它的燃烧与排放特性。因此,直喷汽油喷油器喷

雾特性得到了广泛的研究与应用^[1-7]。直喷汽油机缸内混合气的形成方式主要有壁面引导、气流引导和喷雾引导。其中壁面引导喷雾方式容易引起湿壁现象,导致直喷汽油机高的未燃碳氢排放,碳烟排放也加大。与壁面引导和气流引导相比,喷雾引导方式在降低直喷汽油机排放方面更有优势^[8-9]。压电

收稿日期: 2014-09-15 修回日期: 2014-10-10

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB228403)

作者简介: 何邦全,副教授,主要从事内燃机燃烧及其可视化研究,E-mail: bqhe@tju.edu.cn

式外开直喷汽油喷油器的针阀升起与落座响应快,可以在一个工作循环内实现多次喷油,它是改进直喷汽油机性能的关键器件。压电式外开型汽油喷油器喷雾的形态稳定性高、重复性好^[9]和贯穿度小。采用多次喷油,可以进一步降低喷雾的贯穿度,从而减少在压缩行程后期喷油产生的湿壁问题^[10]。调节针阀升程也可以控制喷油器的燃油质量流量^[11],改善直喷汽油机的燃烧和排放性。此外,外开式喷油器的喷雾与周围气体接触面积大,大大增加了燃油与空气的混合机率。Skogsberg等^[12]发现,外开式汽油喷油器的雾化质量比多孔式喷油器好,并能在火花塞附近稳定地形成小粒径、低涡流的可燃混合气。

寻求可再生替代燃料也是减少内燃机消耗化石燃料,降低其有害排放的一种有效途径。乙醇已在火花点火发动机上得到了较广泛的研究与应用^[13]。生物丁醇,即正丁醇,作为第2代生物燃料,具有能量密度高、亲水性和腐蚀性小以及与汽油互溶等优点,受到国内外广泛关注^[14-16]。

为了研究外开式直喷汽油喷油器喷雾与燃料特性之间的依存关系,本文在定容弹内利用纹影法与Mie散射法,研究汽油、乙醇和正丁醇的喷雾特性。

1 试验装置与方法

纹影法喷雾测试系统如图1所示。纹影测试系统主要由500 W卤灯光源、2个球面反射镜、2个平面反射镜、定容弹、喷油器、2个不同的凸透镜、刀口以及Photron Fastcam SA5型高速相机组成。Mie散射测试系统是将纹影测试系统中的高速相机换成了Sony ICX085 CCD型相机,把连续光源换成了由Solo120双谐振式Nd:YAG双脉冲激光器和激光整形器产生的片光源,相机与激光的时序由可编程时序单元控制。CCD相机的拍摄平面垂直于532 nm激光片光源平面。

为了兼顾图像分辨率与拍摄频率之间的关系,在用纹影法拍摄喷雾图像时,相机的拍摄频率选为20 000帧/s。这样,相邻两幅图像之间的时间间隔为0.05 ms,每幅图像的像素点为704像素×520像素。在用Mie散射法拍摄喷雾时,每幅图像的像素点为1 280像素×1 024像素。由于单次喷油过程中喷雾的发展具有随机性,在每一个试验点拍摄了10组图片,然后利用自编的Matlab程序对相同试验条件下相同时刻的图像进行平均,最后计算出喷油过程中不同时刻的喷雾锥角和贯穿度。

为了获得喷雾场内气流的流动和液态油束的结

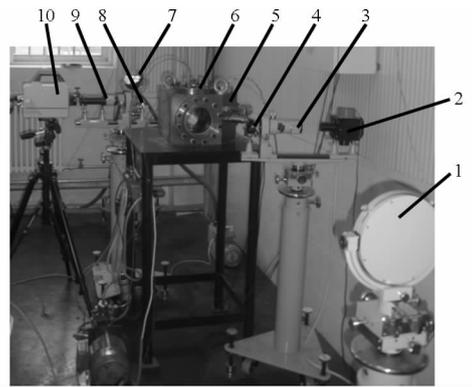


图1 喷雾测试系统装置图

Fig. 1 Experimental setup

1. 球面反射镜 2. 卤灯 3. 狭缝 4. 平面反射镜 5. 定容弹
6. 喷油器 7. 球面反射镜 8. 平面反射镜 9. 刀口与凸透镜
10. 高速相机

构,以喷雾过程中产生的细小油粒作为示踪粒子,根据不同的试验条件,将每一次拍摄得到2幅图像之间的时间间隔设置为15~20 μs,以计算流场。为了获得喷油后不同时刻的流场,在不同的一次喷油过程中,以0.1 ms的时间步长推迟拍摄时刻,得到一组供PIV计算用的喷雾图。

试验所用的直喷汽油机喷油器为压电式外开型喷油器。试验时,喷油脉宽为1 ms,压电晶体喷油器的驱动电压为150 V。通过调整喷油压力和定容弹内的背压,即可研究不同喷油条件下的喷雾特性。

试验用燃料为汽油(G100)、乙醇(E100)和正丁醇(Bu100),其物理特性如表1所示^[17]。可以看到,正丁醇的密度和表面张力最大,汽油最小,但汽油的粘度和挥发性最大。

表1 燃料的物理性质

Tab. 1 Properties of tested fuels

参数	汽油	乙醇	正丁醇
分子式	C ₅ ~C ₁₂	C ₂ H ₅ OH	CH ₃ (CH ₂) ₃ OH
密度(20℃)/(kg·L ⁻¹)	0.747	0.792	0.81
动力粘度(20℃)/(MPa·s)	0.34	1.19	2.81
Reid蒸气压(37.8℃)/kPa	55~103	15.8	2.12
表面张力(20℃)/(mN·m ⁻¹)	21.6	22.81	24.6
汽化潜热/(kJ·kg ⁻¹)	297	854	550

2 试验结果与分析

2.1 喷雾图比较

由于喷油器的喷油过程有时间延迟,所以高速相机在喷油触发信号发出后拍摄到的第3幅图像中出现了喷雾。为了便于比较不同条件下喷雾的发展过程,定义第1幅出现喷雾图像的时刻为0.05 ms

ASOI(After start of injection)。

为了便于喷雾图像的量化分析,对拍摄到的原始喷雾图像进行了处理,流程如图2所示。首先对原始图像进行平均,然后去除背景,最后提取喷雾的外廓线。

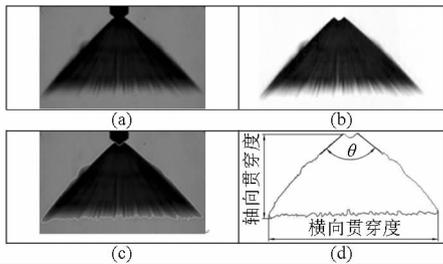


图2 图像处理流程图

Fig.2 Image processing flowchart

(a) 平均后图像 (b) 去背景后灰度图

(c) 叠加边界线的原始图 (d) 提取喷雾外廓线

为了定量地评价喷雾特征参数,利用自编的Matlab程序对提取出来的喷雾边缘进行计算,得到了喷雾锥角、贯穿度和喷雾所占面积。各参数的定义示意图如图2d所示。为了兼顾高、低背压条件下的喷雾,在喷嘴出口下方1 mm与喷嘴出口下方4 mm之间的喷雾两侧轮廓线上等距离选取20个点,利用最小二乘法拟合了两条边界直线,再计算这两条边界线之间的夹角得到喷雾锥角。贯穿度分为轴向贯穿度与横向贯穿度。其中轴向贯穿度为喷雾前端沿轴向离喷孔出口的最大距离,横向贯穿度为喷雾在水平方向上所能达到的最大宽度。喷雾所占的面积是喷雾边缘廓线内的面积,由喷雾图像像素点的个数与像素点实际面积的乘积计算得到。

表2给出了G100在不同背压下,喷油压力为18 MPa时的喷雾图像。可以看出,喷油后的某一时刻,在圆锥形喷雾的周围产生了一个相对稳定的平台,这是因为喷油产生的圆锥形油束,一方面使得喷雾锥内的压力有所下降,另一方面,已喷出的燃油在与周围气体作用的过程中,动能逐步下降,这样在卷吸力的作用下,在喷雾外侧产生向上翻卷的涡流,并稳定下来。但是,随着背压的增加,喷雾大小急剧缩小,特别是当背压从0.1 MPa增加到0.5 MPa时,喷雾的发展速度迅速减慢。继续增加背压,喷雾形状随着时间减小的趋势逐步减弱。还可以看出,在0.1 MPa和0.5 MPa条件下,喷雾前端可以清晰地看到线状结构,但是当背压大于等于1.0 MPa时,喷雾前端与高密度的周围气体相互作用,喷雾前端线状结构迅速减小,甚至消失。

此外,在背压大于等于1 MPa的条件下,在2 ms ASOI时刻可以明显地看到在喷油器附近出现了向上运动的油滴群,而且背压越高,喷油器附近的油滴

越多。这是因为,背压的升高改变了圆锥油束内外的压力场,圆锥形喷雾内射流引导的低压区逐渐

表2 不同背压下,喷油压力为18 MPa时G100的喷雾发展图

Tab.2 Spray images of gasoline at injection pressure of 18 MPa with different back pressures

背压/MPa	0.3 ms ASOI	1.4 ms ASOI	2 ms ASOI
0.1			
0.5			
1.0			
1.5			
2.0			
2.5			

恢复,而喷油器关闭后,燃油靠惯性继续运动,其动能逐步减弱,在锥形内逐步升高的压力作用下碰撞回弹,形成这一现象。

为了研究燃料物理特性对喷雾过程的影响,表3对比了在相同喷油条件下不同燃料的喷雾图。可以看出,在0.05 ms ASOI时,Bu100喷雾最小,而汽油的最大,这是因为Bu100粘度最高(表1),在相同的喷油压力条件下,燃油的流动阻力大,燃料流量系数和流动速度下降,使得喷油过程减慢,这样,Bu100的第1幅喷雾图比汽油和乙醇的小。在4 ms ASOI时刻,G100的喷雾轴向贯穿距离最小,而Bu100的最大。正丁醇的表面张力大和粘度高,均不利于其破碎。这样,液态燃油区加长,直径相对较大油滴将会贯穿更大的距离。

表3 背压为1.0 MPa和喷油压力为18 MPa下,不同燃料的喷雾图

Tab.3 Spray images of different fuels at injection pressure of 18 MPa and back pressure of 1.0 MPa

ASOI/ms	G100	E100	Bu100
0.05			
1.00			
1.60			
4.00			

2.2 背压与燃料对喷雾特性的影响

为了全面了解喷雾发展初期的宏观特征,利用自编程序把喷油后不同时刻的喷雾外廓叠加在一起,以便比较。

图3给出了喷油压力为18 MPa,不同背压下G100的喷雾廓线发展叠加图。图中相邻2个廓线的时间差为0.05 ms。可看到,在背压为0.1 MPa时,喷油早期,喷雾前端基本上保持在一条水平线上,但随着喷雾的进行,较早喷出燃油的喷雾廓线前端逐步出现不规则的波浪形结构,并随时间的变化而加大。但在背压为2.0 MPa时,喷油早期喷雾前端比较平整,此后喷雾前端的稳定性迅速下降,并出现大的波动,这是因为,背压增加使得喷油压力差减小,燃油喷出的速度降低,喷出的燃油更加集中在喷油器出口附近,相邻细小油束间的间距减小,不稳定的细小油束间的相互作用机率增大,由此改变各细小油束的运动方向,导致喷雾前端形状的改变。这种细小油束形成与喷孔内产生的空化现象有关^[18]。而细小油束间的间距受到轴针表面粗糙度的影响^[19]。这表明,喷雾形态受到喷孔内的流动状态影响。此外,高背压条件下的喷雾发展速度明显低于低背压,燃油更加集中在喷油器喷孔出口附近。

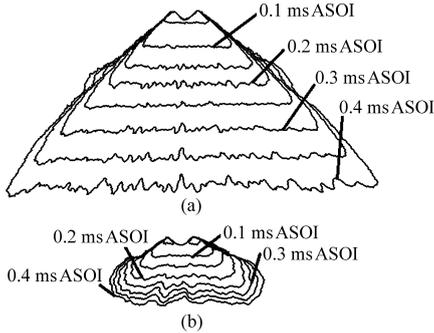
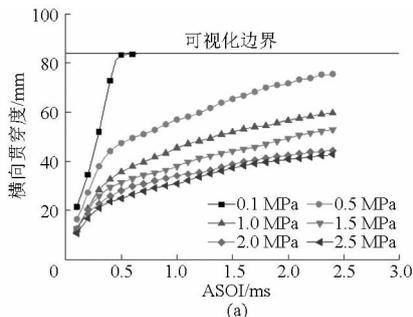


图3 G100在喷油压力为18 MPa下的喷雾轮廓线

Fig. 3 Development of gasoline spray contours at injection pressure of 18 MPa with different back pressures

(a) 0.1 MPa 背压 (b) 2.0 MPa 背压

图4a给出了G100燃料在不同喷油背压下的喷雾锥角随时间的变化关系。可以看出,喷雾锥角随



着时间略有波动,但变化幅度不大,在不同背压条件下,喷雾锥角变化幅度小于 5° 。为了研究不同背压条件下喷雾锥角在喷油期间的稳定性,对每种喷油背压条件下0.1 ms ASOI到1 ms ASOI时间内的锥角进行平均,得到其平均值以及标准差,如图4b所示。这不同于孔式直喷汽油喷油器近场锥角在喷雾初期的骤减^[20]。尽管在不同背压条件下锥角变化也非常小,但随着背压的增加,喷雾锥角变动的标准差有增加的趋势。

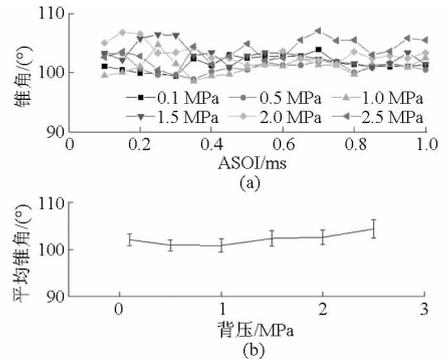


图4 喷油压力为18 MPa不同背压下G100喷雾锥角随时间的变化趋势

Fig. 4 Spray cone angle of gasoline at injection pressure of 18 MPa with different back pressures

图5给出了喷油压力为18 MPa时不同背压条件下的喷雾贯穿度发展历程。图中给出了可视化边界线,超出可视窗口的贯穿度未显示。可以看出,随着喷油的进行,轴向与横向贯穿度均增加,但在背压为0.1 MPa,在0.5 ms ASOI时刻,喷雾已超出可视化范围。随着喷油背压的增加,喷油后相同时刻的轴向与横向的贯穿度均急剧减小,其主要原因是背压增加导致喷油喷出时的横向与纵向速度均降低。此外,轴向贯穿度的发展明显小于喷油后相同时刻的横向贯穿度,这是因为喷雾锥角大于 100° 造成的(图4)。此外,在喷雾涡流发展阶段,特别是在高背压条件下产生的涡流卷吸也是减小喷雾轴向发展的原因。还可以看出,随着时间的推移,贯穿度增长率逐步下降,这是高背压下油束最前端速度下降的结果。

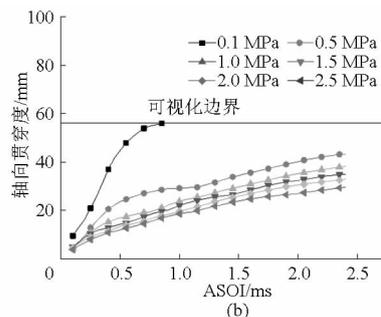


图5 G100在18 MPa喷油压力不同背压条件下贯穿度随时间的变化

Fig. 5 Development of gasoline penetration at injection pressure of 18 MPa with different back pressures

为了对比横向贯穿度与轴向贯穿度的发展关系,将横向贯穿度和轴向贯穿度分别做纵、横坐标,得到变化曲线如图 6 所示。可见,在喷油背压为 0.1 MPa 下,两者近似成线性增长,但是随着背压的升高,油束轴向速度下降,横向贯穿度下降。背压越高,横向贯穿度随轴向贯穿度的增长越早脱离直线关系,且相同轴向贯穿度时横向贯穿度也越小。这表明,高背压条件下喷雾横向发展速度减慢,并最终稳定不变。

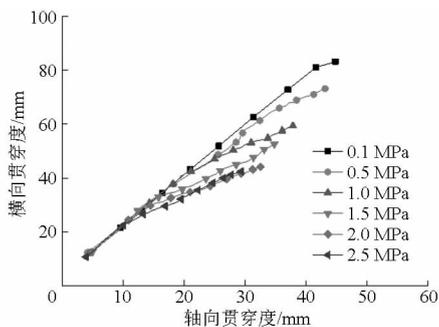


图 6 喷油压力为 18 MPa,不同背压下 G100 横向和轴向贯穿度之间的关系

Fig. 6 Relationship between axial and lateral penetrations of gasoline at injection pressure of 18 MPa with different back pressures

图 7 给出了喷油压力为 18 MPa 时 G100 在不同背压条件下喷雾所占阴影总面积随时间变化的趋势。可以看出,背压的升高阻碍了油束的发展,所以喷雾所占的面积减少明显。0.1 MPa 条件下由于油束在 0.5 ms ASOI 以后横向运动就超出窗口可视化范围(图 5a),所以没有显示。但在大于 0.1 MPa 的背压下,同一背压下喷雾所占面积随着时间呈线性增加,而且它随时间的增长率下降,这说明高背压对喷雾的发展起着更大的阻碍作用。

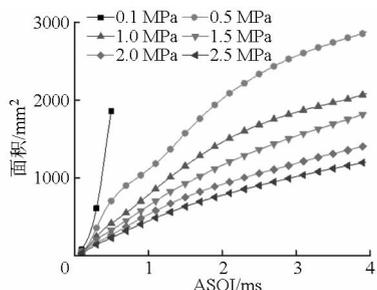


图 7 G100 在喷油压力为 18 MPa 不同背压条件下喷雾面积随时间的变化

Fig. 7 Development of gasoline spray area at injection pressure of 18 MPa with different back pressures

图 8 同时给出了轴向和横向贯穿度随时间的变化规律。可以看出,油束的横向贯穿度始终大于轴向贯穿度,而且不同燃料之间的横向贯穿度的差距逐渐加大,这与油束涡流运动有关,因为向上卷起的

涡流将粒径较大的油滴抛离中心轴线。已有研究表明,液滴越大,动量越大,向外扩展的距离也就越大^[1]。乙醇与正丁醇的横向贯穿度大于汽油,但正丁醇的粘度远远大于乙醇,影响了流量系数与出口速度,虽然油滴直径较大,但是速度较低,所以横向贯穿度小于乙醇。

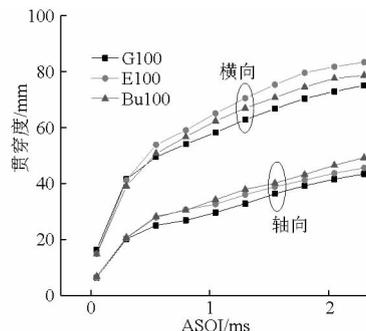


图 8 喷油压力为 18 MPa,不同燃料在背压为 0.5 MPa 下喷雾轴向和横向贯穿度随时间的变化趋势

Fig. 8 Development of spray penetrations of different fuels at injection pressure of 18 MPa and back pressure of 0.5 MPa

2.3 油束运动特性研究

表 4 给出了在喷油压力为 18 MPa,背压分别为 0.1 MPa 和 1.0 MPa 条件下 G100 喷雾的 Mie 散射图像。

表 4 在喷油压力为 18 MPa 不同喷油背压下汽油喷雾的 Mie 散射图像

Tab. 4 Mie scattering images of gasoline at injection pressure of 18 MPa with different back pressures

ASOI/ms	背压/MPa	
	0.1	1.0
0.4		
1.0		
1.6		
2.0		
3.0		
4.0		

可以看出,当背压从 0.1 MPa 升高到 1.0 MPa 后,喷雾被压缩在一个很小的空间里,贯穿度大大减少,这是由于燃油与周围气体发生了很大的动量交换。也可以看到,在 1.0 MPa 背压条件下,在喷雾的

外侧形成了明显向外翻卷的涡流。由于激光片光源是从空心圆锥形喷雾的底部射入,所以左右两侧的片光源强度相当。Mie 散射图像中油滴较多的地方,散放光的亮度更高,表明油滴粒子相对聚集,粒子数多。还可以看出,高喷油背压下,喷油产生的翻卷涡团更加明显。这一方面说明高背压下喷雾前端燃油与周围气体交换动量大,流速衰减快,另一方面,在喷孔出口附近燃油的流速衰减减小,由此在喷雾锥内形成更大的压降,使得在喷油即将结束时锥外的高压气体向内压缩锥形喷雾,甚至形成反弹的油雾。

同时,在高背压条件下,涡流形成位置更靠近喷油器,这与油气相互作用有关,也与高速粒子与前期喷射的速度降低的粒子的相互作用有关^[1]。在高背压条件下,小于 1 ms ASOI (即在喷油持续期内)时,燃油集中在喷油器出口处,而在 1.6 ms ASOI 时刻,由于涡流的强烈卷吸作用,使得燃油与气体相互作用,油束中最高亮度降低,而且油束比较集中的地方出现在整个油束的最前端,表明液态油滴减少了。随着油束继续发展,整个涡流区由于离心力的作用使得较大粒子逃离涡流中心,涡流中心粒子较少,其他位置油滴分布相对均匀。

由于喷油期间或者背压过大时,油滴相对聚集,粒子浓度高导致散射光过强,互相关运算中粒子识别困难,导致流速计算误差比较大。因此,选取了喷油结束后,油滴浓度较低时的 Mie 散射图像计算流速。图 9 给出了汽油在喷油压力为 18 MPa,背压为 0.1 MPa 时 2 ms ASOI 时刻的速度矢量计算结果。

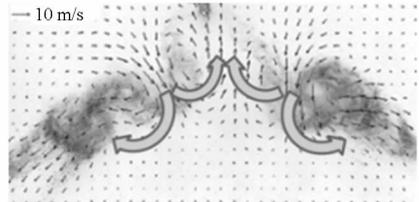


图 9 2 ms ASOI 时刻的 PIV 矢量图

Fig. 9 Velocity vector image in gasoline spray at 2 ms ASOI

可以看出,喷出的燃油产生了 2 个方向不同的涡流对,空心圆锥内部的流动是 2 个向内翻转涡流作用的结果,卷吸的油束运动方向直接对着喷油嘴出口,向外翻转的涡流使油束发生扭曲。而向上的气体运动是由于在喷油结束后锥形喷雾上部首先断开,在惯性力和喷雾锥内压力低于外侧的共同作用下形成向内的涡流。2 个方向相反的涡流相互撞击后,又形成了向上运动的涡流。

3 结论

(1) 外开式喷油器喷油形成的空心圆锥状喷雾结构由线状油束组成。随着环境压力的升高,喷油产生的油线间隙减小,贯穿度与面积都会大幅减小。在喷油持续期,喷雾锥角基本不随背压、燃料以及时间的变化而变化。

(2) 喷油背压对喷雾的宏观形态影响较大。随着背压的升高,喷雾的横向贯穿度的减小程度大于轴向贯穿度,但是横向贯穿度始终大于轴向贯穿度。

(3) 粘度较大的燃料的轴向贯穿度较大。横向贯穿度与喷油过程中产生的涡流有关。涡流尺度越大,横向贯穿度也越大。

参 考 文 献

- Zigan L, Schmitz I, Schmitz A, et al. Structure of evaporating single- and multicomponent fuel sprays for 2nd generation gasoline direct injection[J]. Fuel, 2011, 90(1): 348-363.
- Zigan L, Schmitz I, Flügel A, et al. Effect of fuel properties on spray breakup and evaporation studied for a multihole direct injection spark ignition injector[J]. Energy & Fuels, 2010, 24(8): 4341-4350.
- Zhang M, Xu M, Zhang Y, et al. Flow-field investigation of multi-hole superheated sprays using high-speed PIV. Part I. Cross-sectional direction[J]. Atomization and Sprays, 2012, 22(11): 983-995.
- Aleiferis P G, Serras-Pereira J, Augoye A, et al. Effect of fuel temperature on in-nozzle cavitation and spray formation of liquid hydrocarbons and alcohols from a real-size optical injector for direct-injection spark-ignition engines[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(21-22): 4588-4606.
- 王艳华, 杨世春, 高峰, 等. 汽油缸内多孔直喷喷雾破碎模型建立与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 12-16.
Wang Yanhua, Yang Shichun, Gao Feng, et al. Spray break-up model establishment and experiment of multi-hole injector on gasoline direct injection engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 12-16. (in Chinese)
- 王艳华, 高峰, 杨世春, 等. 缸内直喷汽油机多孔喷雾破碎模型研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 20-25.
Wang Yanhua, Gao Feng, Yang Shichun, et al. Spray break-up model of multi-hole injector on gasoline direct injection engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 20-25. (in Chinese)
- 何邦全, 张倓恺. 直喷汽油机喷油器射流显微放大特性研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 32-37.
He Bangquan, Zhang Tankai. Characterization of gasoline jets from a single-hole direct injection injector by means of microscopic magnification[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 32-37. (in Chinese)

- 8 Schwarz C, Schunemann E. Potentials of the spray-guided BMW DI combustion system[C]. SAE Paper 2006-01-1265, 2006.
- 9 Sauter W, Pfeil J, Velji A, et al. Application of particle image velocimetry for investigation of spray characteristics of an outward opening nozzle for gasoline direct injection[C]. SAE Paper 2006-01-3377, 2006.
- 10 Martin D, Pischke P, Kneer R. Investigation of the influence of multiple gasoline direct injections on macroscopic spray quantities at different boundary conditions by means of visualization techniques[J]. International Journal of Engine Research, 2010, 11(6): 439-454.
- 11 董全, 隆武强, 田江平, 等. 直喷汽油机压电晶体控制外开轴针式喷油器的喷雾可视化研究[J]. 内燃机学报, 2012, 30(5): 415-422.
Dong Quan, Long Wuqiang, Tian Jiangping, et al. Visualization of the spray characteristics of an outward-opening pintle-type injector actuated by piezo for DI gasoline engines[J]. Transactions of CSICE, 2012, 30(5): 415-422. (in Chinese)
- 12 Skogsberg M, Dahlander P, Denbratt I. Spray shape and atomization quality of an outward-opening piezo gasoline DI injector [C]. SAE Paper 2007-01-1409, 2007.
- 13 高祥, 宋崇林, 成存玉, 等. 乙醇/汽油混合燃料对电喷汽油机排放特性的影响[J]. 农业机械学报, 2005, 36(8): 5-8.
Gao Xiang, Song Chonglin, Cheng Cunyu, et al. Effect of ethanol anhydrous addition into gasoline on regulated emission characteristics of an EFI gasoline engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(8): 5-8. (in Chinese)
- 14 He Bangquan, Yuan Jie, Liu Maobin, et al. Combustion and emission characteristics of an-butanol HCCI engine[J]. Fuel, 2014, 115: 758-764.
- 15 何邦全, 都成君. 醇类-汽油混合燃料的喷雾特性[J]. 燃烧科学与技术, 2012, 18(4): 301-308.
He Bangquan, Du Chengjun. Spray characteristics of various alcohol-gasoline blends [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2012, 18(4): 301-308. (in Chinese)
- 16 Szwaja S, Naber J D. Combustion of n-butanol in a spark-ignition IC engine[J]. Fuel, 2010, 89(7): 1573-1582.
- 17 何学良. 内燃机燃料[M]. 北京: 中国石化出版社, 1999.
- 18 Gavaises M, Tonini S, Marchi A, et al. Modelling of internal and near-nozzle flow of a pintle-type outwards-opening gasoline piezo-injector[J]. International Journal of Engine Research, 2006, 7(5): 381-397.
- 19 Befrui B, Corbinelli G, Robart D, et al. LES simulation of the internal flow and near-field spray structure of an outward opening GDI injector and comparison with imaging data[C]. SAE Paper 2008-01-0137, 2008.
- 20 何邦全, 张俊恺. 直喷汽油喷油器喷射过程近场喷雾特性[J]. 内燃机学报, 2013, 31(5): 425-430.
He Bangquan, Zhang Tankai. Near-field characterization of direct injection gasoline sprays from a single-hole injector [J]. Transactions of CSICE, 2013, 31(5): 425-430. (in Chinese)

~~~~~  
(上接第 243 页)

- 18 高利萍, 王俊, 崔绍庆. 电子舌检测不同冷藏时间草莓鲜榨汁的品质变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(23): 250-256.  
Gao Liping, Wang Jun, Cui Shaoqing. Evaluation for fresh juice of strawberries with different storage period using electronic tongue[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(23): 250-256. (in Chinese)
- 19 沈睿谦, 王俊. 基于离子选择电极和单片机技术的电子舌设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 183-188.  
Shen Ruiqian, Wang Jun. Electronic tongue based on ion-selective electrode and MCU[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 183-188. (in Chinese)
- 20 吴从元, 王俊, 肖宏, 等. 纯牛奶品牌识别中电子舌传感器阵列优化[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 138-142.  
Wu Congyuan, Wang Jun, Xiao Hong, et al. Optimization of electronic tongue sensors array in identifying the brands of pure milk [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 138-142. (in Chinese)
- 21 Baldwin E A, Bai J, Plotto A, et al. Electronic noses and tongues: applications for the food and pharmaceutical industries[J]. Sensors, 2011, 11(5): 4744-4766.
- 22 姜莎, 陈芹芹, 胡雪芳, 等. 电子舌在红茶饮料区分辨识中的应用[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 345-349.  
Jiang Sha, Chen Qinqin, Hu Xuefang, et al. Application of electronic tongue on black tea beverage discrimination [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 345-349. (in Chinese)
- 23 Yang Y, Chen Q, Shen C, et al. Evaluation of monosodium glutamate, disodium inosinate and guanylate umami taste by an electronic tongue[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(3): 627-632.
- 24 Stone H, Side J L. 感官评定实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- 25 DuBois G E, Stephenson R A. Diterpenoid sweeteners. Synthesis and sensory evaluation of stevioside analogues with improved organoleptic properties[J]. Journal of Medicinal Chemistry, 1985, 28(1): 93-98.
- 26 胡献丽, 董文宾, 郑丹, 等. 甜菊及甜菊糖研究进展[J]. 食品研究与开发, 2005, 26(1): 36-38.  
Hu Xianli, Dong Wenbin, Zheng Dan, et al. Proceeding in use of the inulin [J]. Food Research and Development, 2005, 26(1): 36-38. (in Chinese)