

非均匀速度来流条件下液体射流喷雾特性

孔祥壮, 何 悟, 郭志辉

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 实验研究了非均匀速度来流条件下液体横向射流喷雾特性。实验利用多孔板实现速度的不均匀, 应用片光照相得到喷雾中心截面照片, 使用相位多普勒粒子分析仪(PDPA)测量液滴的直径和速度。实验结果表明: 在非均匀速度来流中, 射流的弯曲和破碎机理有所不同, 导致穿透深度和雾化特性发生改变。与均匀速度来流相比, 正速度梯度来流时射流穿透深度更大, 液柱破碎高度增大, 浓度场分布更加均匀, 射流呈现平抛形态; 负速度梯度时喷雾场整体内移, 浓度场呈明显分层结构, 射流尾迹区增长, 射流为坍塌形态。初步提出适用于非均匀速度来流条件下的射流穿透深度经验公式。非均匀速度来流可以改善雾化及均匀度, 其中负速度梯度来流时液雾的索太尔平均直径(SMD)最小。

关 键 词: 非均匀; 横向流; 喷雾特性; 局部射流动量比; 破碎机理

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Spray characteristics of liquid jet in nonuniform crossflow

KONG Xiangzhuang, HE Wu, GUO Zhihui

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,

School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Spray characteristics of liquid jet in nonuniform velocity distribution crossflow were experimentally studied. The nonuniform velocity distribution was produced by perforated plates, the images of spray were captured with a light sheet and a single lens reflex camera, and a phase Doppler particle analyzer (PDPA) was used to measure droplets diameter and velocity. The experimental results indicated that, in the nonuniform crossflow, the bending state and breakup regime of each jet section were different, resulting in the difference of penetration and spray characteristics. Compared with uniform corssflow, the jets penetrated further into the crossflow when the column breakup height increased, and the concentration distribution was more uniform when the velocity distribution was in positive gradient, in addition, the jet presented a flat thrown profile. When the velocity gradient was negative, the spray field moved inward and presented a stratified structure, the jet wake region elongated, and the profile of jet was in collapse state. Correlations of a liquid jet for nonuniform crossflow are presented. Nonuniform crossflow can improve atomization and uniformity, and Sauter mean diameter (SMD) reaches a minimum value when the velocity distribution is negative gradient.

收稿日期: 2021-04-06

基金项目: 国家科技重大专项(2017-III-0008-0034)

作者简介: 孔祥壮(1996-), 男, 硕士生, 主要从事航空发动机燃烧室雾化研究。

引用格式: 孔祥壮, 何悟, 郭志辉. 非均匀速度来流条件下液体射流喷雾特性[J]. 航空动力学报, 2022, 37(3): 534-544. KONG Xiangzhuang, HE Wu, GUO Zhihui. Spray characteristics of liquid jet in nonuniform crossflow[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(3): 534-544.

Key words: nonuniform; crossflow; spray characteristics; local momentum flux ratio; breakup regime

横向射流作为一种燃油供给形式已经广泛应用于航空航天推进系统中,如冲压发动机燃烧室、航空发动机加力燃烧室和液体火箭发动机燃烧室等。加力燃烧室来流温度高,燃油存在自燃现象,导致喷射位置与稳定器之间的距离不能过大,燃油均匀分布的能力被限制,在如此紧密耦合的布局下,燃油雾化与燃油稳定器后的火焰区深度耦合,直接影响到局部油气比和燃烧稳定性,因此必须了解燃油射流雾化的具体细节^[1-2]。另针对于低污染要求发展的贫油预混预蒸发燃烧(lean premixed prevaporized, LPP),如美国GE公司的双环预混旋流(twin annular premixing swirler, TAPS)燃烧室^[3]的主燃级同样采用燃油横向喷射入空气中的破碎雾化方式。由于燃油在横向气流中的破碎、蒸发以及油气混合均匀性对污染物的生成、燃烧室性能及燃烧不稳定性均有重要的影响,因而液体横向射流越来越受到国内外学者的关注。

国内外对横向射流已经做了大量的研究,主要包括雾化机理、穿透深度和轨迹、液滴粒径及分布等,试图通过调节空气来流或射流来改善掺混和雾化特性。Wu等^[4]将横向射流的破碎机制划分为加强毛细力破碎、袋式破碎、复合模式破碎以及剪切破碎。一些学者对液柱破碎点位置进行了测量^[5],研究表明:液柱破碎点的横向高度依赖于射流和空气的动量比平方根,破碎点的轴向位置依赖于动量比。穿透深度是射流最重要的特征之一,主要受射流动量比、韦伯数等参数影响,目前的穿透深度公式从形式上主要分为三种:幂函数型、对数型、指数型。对于详细的文献综述,可以参考Broumand等^[6]、林宇震等^[7]和Elshamy等^[8]。Lakhamraju^[9]和Stenzler等^[10]对高温高压下横向射流进行了研究,表明环境工况同样对雾化有重要影响。

目前对于横向射流的研究主要集中在均匀速度来流中,对于非均匀速度来流下横向射流雾化特性的研究却相对较少。其中,Tamble等^[11-12]对剪切来流中横向射流穿透和通量分布特性等进行研究,Becker等^[13]研究了射流动量比和空气压力对双环反旋气流中的横向射流雾化特性的影响。在非均匀速度来流中,由于射流在不同位置受到

的气动力不同,决定射流穿透和雾化特性的无量纲数是变化的,所以依据均匀速度来流条件研究得出的横向射流喷雾特性不再适用于非均匀速度来流条件。在加力燃烧室实际工作条件下,由于内外涵气流交汇和涡轮旋转,射流面临的空气来流速度往往是不均匀的。基于加力燃烧室的实际工作条件,对非均匀速度来流下横向射流雾化问题进行研究是非常必要的。

本文通过多孔板实现来流速度不均匀并用相位多普勒粒子分析仪(PDPA)对非均匀速度来流下横向射流进行了研究,主要包括穿透深度、浓度分布(本文中的浓度指的是不同空间位置的液体体积)和雾化特性等,以期探究非均匀速度来流对横向射流雾化的具体影响规律并分析内在机理。

1 实验系统

1.1 实验台

图1是横向射流实验台简图和多孔板实物图,实验台包括空气供给系统、液体供给系统、PDPA系统和实验段。

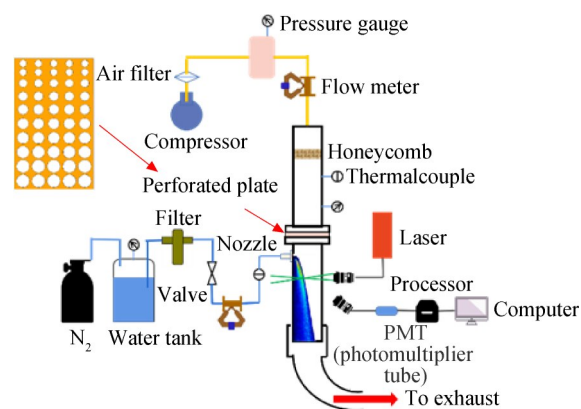


图1 实验系统图

Fig.1 Schematic of the experimental system

液体供给系统由高压氮气瓶、高压水罐、减压阀、液体流量计、液体压力传感器和流量控制阀组成,工质为纯净水,利用高压氮气通过减压阀调节水罐压力挤压供水。

空气供给系统包括截止阀、调节阀、气体涡街流量计、空气压力传感器。空气由远端压气站供给,通过调节阀控制流量。

PDPA系统包括激光器、计算机、激光发射

和接收镜头、位移机构以及信号处理器。液滴粒径测量范围为 $0.5 \sim 180 \mu\text{m}$, 速度测量范围为 $-150 \sim 150 \text{ m/s}$, 测量精度为 1% , 当在一点采集 10 000 个液滴或采集时间到 10 s 时进行下一个点采集。

实验段由整流段和测量段组成, 通道尺寸为 $36 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$, 整流段长为 770 mm, 内置蜂窝整流装置, 测量段长为 300 mm, 三面开窗, 装有石英玻璃用以 PDPA 激光和片光进入, 底面装有直射喷嘴。实验所用喷嘴直径为 0.6 mm, 长径比为 6, 收口形式为锐边类型, 流量系数为 0.68, 喷嘴喷射工质为纯液体, 位于多孔板下游 100 mm 处。在整流段和测量段法兰之间装有多孔板用以调节来流速度分布, 实现来流速度的不均匀。定义射流方向为 Z 向, 空气来流方向即轴向为 X 向, 具体的坐标轴方向如图 2 所示。

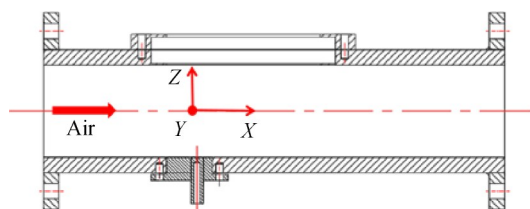


图 2 坐标示意图

Fig.2 Schematic of coordinate system

1.2 实验方法

本文的研究前提是进口为非均匀速度场, 在实验中通过在整流段和测量段间加装多孔板实现非均匀速度。当一个均匀速度来流垂直流过多孔板时, 大孔径的孔通过的流量大, 该孔后的速度也相应大一些; 小孔径的孔后速度相应小一些, 在实验中通过调整多孔板上孔的大小和分布实现不同的来流速度分布。通过改变来流速度 (u) 的分布梯度研究速度非均匀对横向射流雾化特性的影响。不均匀度定义如下:

$$\epsilon = \frac{u_{\max} - u_{\text{ave}}}{u_{\text{ave}}} \quad (1)$$

其中 $u_{\max}$ 和 u_{ave} 分别为通道中心截面速度最大值和平均值。本研究利用 FLUENT 软件计算多孔板后流场分布, 发现在多孔板后 60 mm 处后流场即趋于稳定, 结合计算结果, 最终设计的多孔板小孔面积为通道面积的 41%, 多孔板厚为 2 mm, 多孔板上小孔面积从一侧到另一侧逐渐增大, 实现了 $\epsilon=80\%$ 的速度分布, 多孔板后方来流速度云图如图 3 所示。通过改变多孔板的安装方向实现

两种非均匀速度分布。定义射流在射流方向上经历的来流速度逐渐增大为来流正速度梯度, 经历的速度逐渐减小为来流负速度梯度。图 3 中蓝线处即为实验中喷嘴所在位置, 该处具体来流速度分布形式如图 4 所示, 由数值计算得到, 液体射流方向为 Z 向。

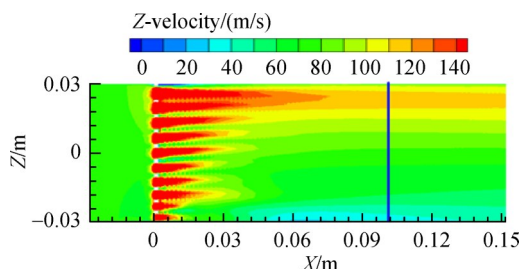


图 3 多孔板后流场速度云图

Fig.3 Velocity contour after perforated plates

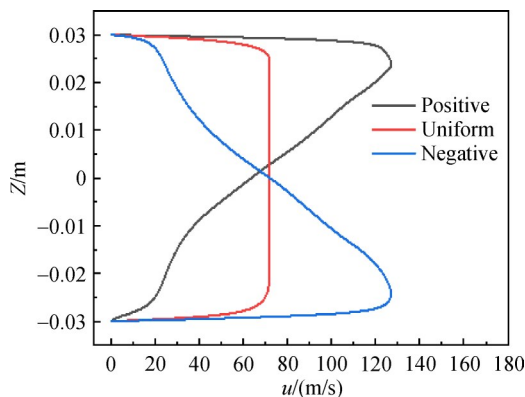


图 4 来流速度分布

Fig.4 Crossflow velocity distribution

1.3 实验工况

实验在常温常压 (0.101 MPa, 300 K) 下进行, 保持来流平均马赫数为 0.2, 通过换装多孔板和调节液体压降实现不同射流动量比和来流速度分布, 在三种来流分布下都对表 1 中的工况进行实验。定义由来流平均速度计算得到的射流动量比为平均射流动量比 $\bar{q}$, 由针对每个射流微元段空气速度计算得到的射流动量比为局部射流动量比 q_{loc} 。表 1 中 $\bar{q}$ 为平均射流动量比, v_g 为空气平均速度, We_g 为空气韦伯数, v_l 是液体射流速度, T 为空气温度。平均射流动量比和韦伯数定义是分别如下:

$$\bar{q} = \rho_l v_l^2 / \rho_g v_g^2 \quad (2)$$

$$We_g = \rho_g v_g^2 d_j / \sigma \quad (3)$$

其中 ρ_l 、 ρ_g 、 d_j 、 σ 分别为液体密度、空气密度、射流直径和液体表面张力。

表 1 实验工况					
Table 1 Experimental operation conditions					
工况	T/K	$v_g/(m/s)$	$v_l/(m/s)$	We_g	$\bar{q}$
1	300	70	7.55	50.5	10
2	300	70	10.67	50.5	20
3	300	70	13.08	50.5	30
4	300	70	15.10	50.5	40

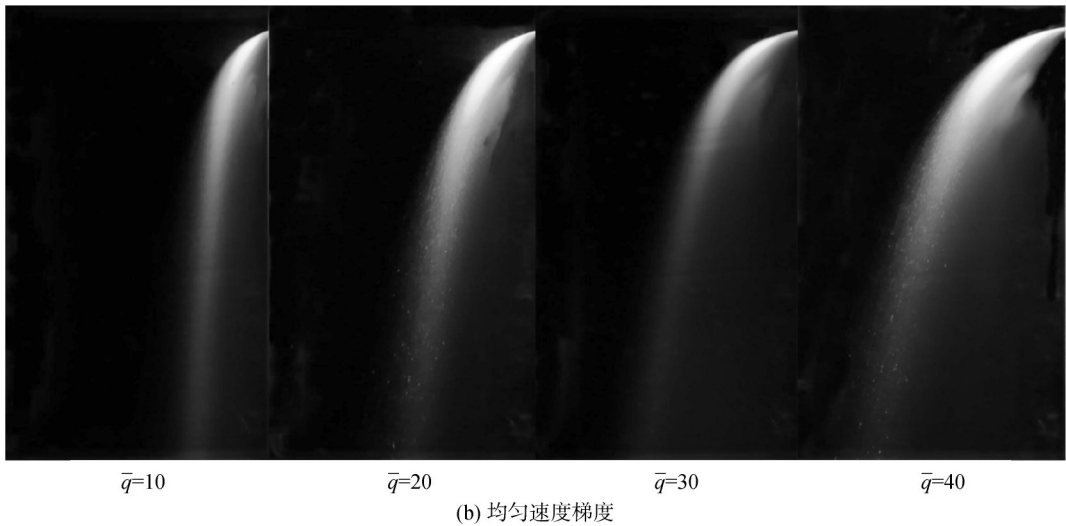
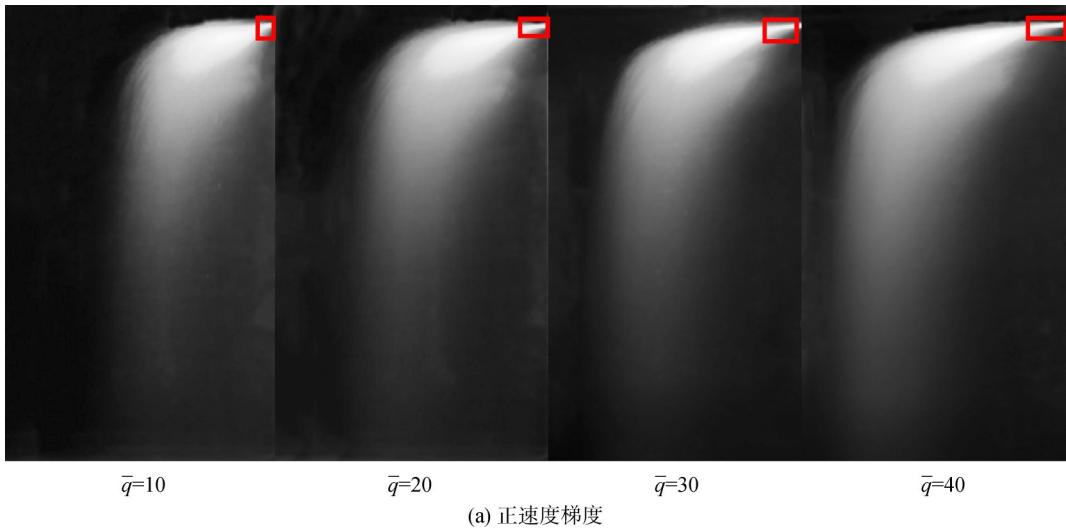
2 实验结果与分析

2.1 来流速度分布对穿透深度的影响

液体在横向气流中的穿透深度是横向射流最重要的特征之一,研究穿透深度对于防止燃料撞击壁面和燃烧室设计具有重要的指导意义。

图 5 是三种来流速度分布下的横向射流中心

截面图像,图像尺寸为 60 mm×100 mm,图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)分别代表来流速度分布形式为正梯度、均匀和负梯度。对比发现三种来流速度分布下射流形态发生了很大改变。正速度梯度时由于射流初始位置液柱受到的气动力小,射流以几乎垂直于来流的角度穿透到气流深处,然后迅速转折至平行于空气,射流穿透轨迹类似于一种“平抛运动”,即射流存在一段未弯曲的根部,如图中标出位置,将整个喷雾场托起,导致喷雾场整体外移,穿透深度增大。均匀速度来流时射流受到的气动力是均匀的,所以射流微元段在每个位置的偏转角度基本相同,因此类似于“斜抛运动”,射流离开喷嘴后即发生偏转,由于没有正速度梯度时未偏转的射流根部,穿透深度有所减小。负速度梯度来流时穿透深度最小,射流呈现一种“崩坍”状态。根据 Tamble 等^[12]的研究表明,射流在



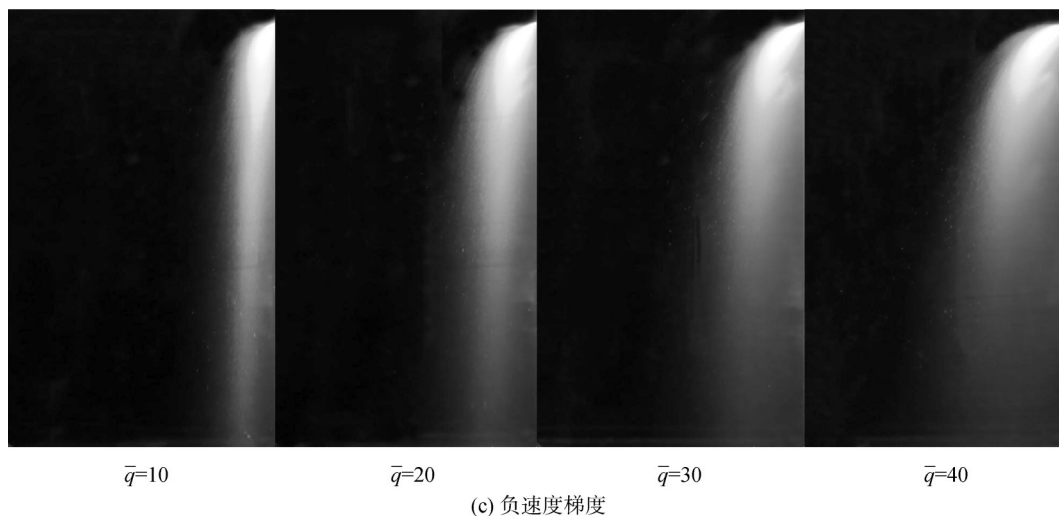


图 5 不同来流速度分布下射流图像

Fig.5 Images of jet for different crossflow velocity distributions

经过由大到小的速度梯度时,液柱被压扁程度加大,液柱横截面增大,迎风面积增加,因此受到的气动力增大,且由于液柱处于气流高速区,液柱离开喷嘴后即在气流中迅速剥离使得液柱迅速解体,因此射流在距离喷嘴很近的位置就与来流平行,故负速度梯度来流时穿透深度最小。

为了更直观地对比来流速度分布对穿透深度的影响,选取图像灰度值 10% 作为阈值得到穿透深度轨迹,该阈值可以在不显著影响射流轨迹的情况下降低噪声^[10],利用 MATLAB 软件处理得到射流动量比为 10~40 时三种来流速度分布下射流穿透深度如图 6 所示。对比发现在均匀速度来流下随射流动量比增大穿透深度增大的结论对于非均匀速度来流仍然适用。但由于射流形态发生了变化,不同来流速度分布下穿透深度有较大

不同,其中正速度梯度来流时穿透深度最大,负速度梯度时最小。平均射流动量比为 40 时,负速度梯度来流时射流在喷嘴下游 90 mm 处穿透深度接近 50 mm,而均匀速度来流时穿透深度仅为 25 mm,两者差别接近 100%。

射流的穿透深度可以用射流动量比和无量纲化轴向函数两个参数的函数关系进行表示,已有的穿透深度经验公式主要有幂函数型、指数型和对数型^[6]。由于在非均匀速度来流中,射流受到的气动力是变化的,即局部射流动量比是不统一的,由均匀的平均射流动量比控制的穿透深度转变为由分布式的局部射流动量比控制,导致非均匀速度来流下射流穿透深度相较均匀速度来流时发生改变,如图 6 所示。针对均匀速度来流提出的穿透深度经验公式不再适用于非均匀速度来流

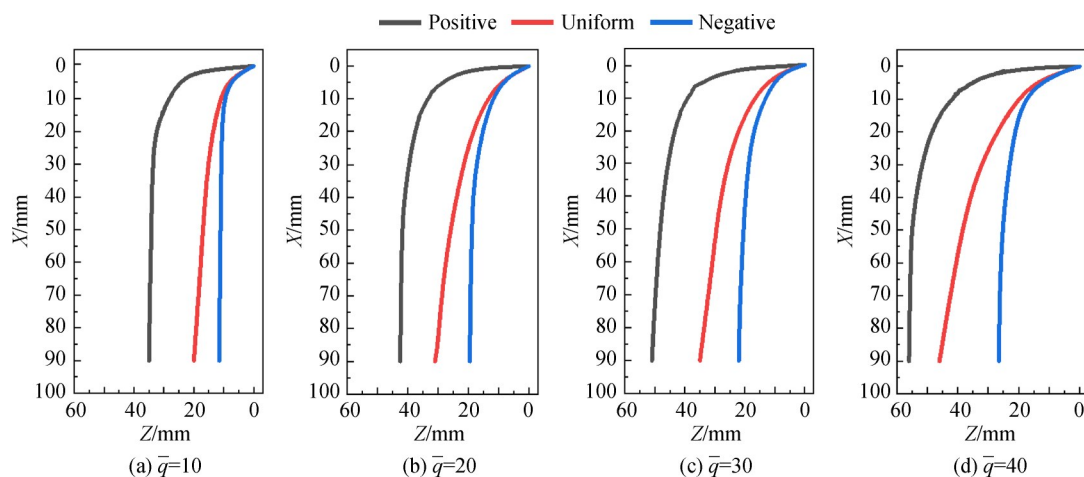


图 6 不同来流速度分布下射流穿透深度

Fig.6 Jet penetration for different crossflow velocity distributions

状态,因此提出适用于非均匀速度来流下射流穿透深度的经验公式非常必要。

根据Lin等^[14]的结论,射流穿透深度主要与射流动量比相关,并提出均匀速度来流下射流穿透深度经验公式,如式(4)所示:

$$Z/d_j = 2.42q_{loc}^{0.66} (X/d_j)^{0.24} \quad (4)$$

在均匀速度来流中的射流动量比实际上是射流初始状态的动量比,在非均匀速度气流中,尽管平均射流动量比相同,但实际上射流在出口阶段的动量比并不相同,这也决定了射流在初始阶段的穿透深度。在负速度梯度时,射流离开喷嘴即在高速气流中迅速剥离,受喷嘴附近气流影响更大,因此通过选取喷嘴附近的气流平均速度计算射流初始位置的局部射流动量比对负速度梯度来

流下射流穿透深度进行公式拟合。

通过选取边界层外不同距离内的气流平均速度进行拟合后,发现选取边界层外15 mm内的气流平均速度计算局部射流动量比后用式(4)拟合效果最佳,如图7所示。从图中可以发现,依据平均射流动量比拟合的穿透深度与实验得到穿透深度的偏差较大,这也说明了均匀速度来流下横向射流穿透深度公式对非均匀速度来流情况不再适用。使用近壁处局部射流动量比修正后经验公式拟合出的穿透深度与实验得到的吻合度较高,最大误差不超过10%,因此对于负速度梯度来流下呈坍塌形态的射流穿透深度,使用边界层外15 mm内气流平均速度进行拟合是可取的。

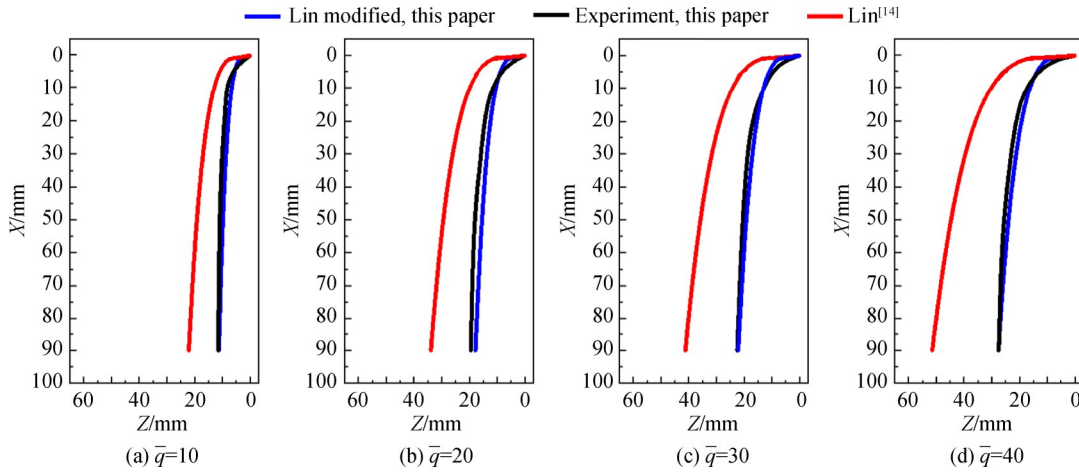


图7 负速度梯度来流分布下射流穿透深度拟合

Fig.7 Formula fitting of jet penetration for negative gradient crossflow velocity distribution

对于正速度梯度来流,射流穿透深度的增加主要是因为射流存在一段未弯曲的根部,即多了一段“抬举高度”,因此可以将射流穿透深度进行分段处理,即“抬举高度段”和“转折段”,通过将两段叠加进行穿透深度的拟合。“抬举高度段”使用柱破碎高度进行计算,通过与实验得到的抬举高度进行对比后,发现将Wang等^[15]提出的柱破碎高度经验公式修正为式(5)后拟合效果与实验结果最符合。其中 q_{loc} 的取值与负速度梯度来流时一致,选取边界层外15 mm内空气平均速度进行计算, z_b 为柱破碎高度。

$$z_b/d_j = 2.7q_{loc}^{0.5} \quad (5)$$

“转折段”高度由式(4)计算得到,将两段叠加后正速度梯度来流下射流穿透深度如式(6)所示。

$$Z/d_j = 2.7q_1^{0.5} + 2.42q_2^{0.66} (x/d_j)^{0.24} \quad (6)$$

其中 q_1 使用边界层外15 mm内空气平均速度计

算得到, q_2 使用柱破碎高度 z_b 外侧气流平均速度进行计算。

图8是实验得到的穿透深度和式(6)拟合穿透深度曲线的对比,图中emp.及exp.分别代表经验公式和实验得到的穿透深度。从图8中发现加入一段抬举高度后,经验公式和实验得到的穿透深度较为吻合,最大误差不超过17%,可见将正速度梯度来流下射流穿透深度分段的方法是可行的。

2.2 来流速度分布对浓度分布的影响

射流浓度分布与穿透深度有直接关系,由于非均匀速度来流对穿透深度影响较大,因此非均匀速度来流中的射流浓度分布也会有很大区别。Wu等^[4]的研究表明,柱破碎高度与射流初始状态的局部射流动量比正相关,来流速度为正速度梯度时,射流初始位置局部射流动量比大,液柱破碎

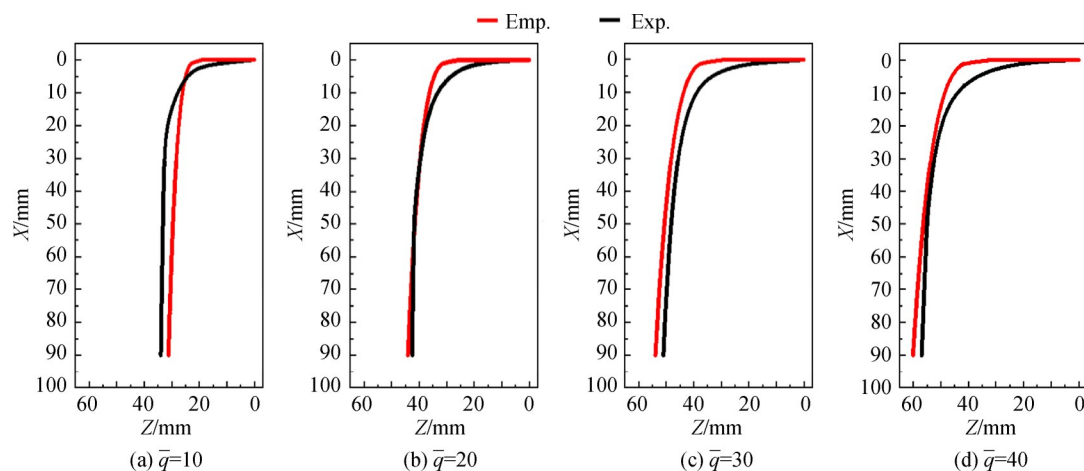


图8 正速度梯度来流分布下射流穿透深度拟合

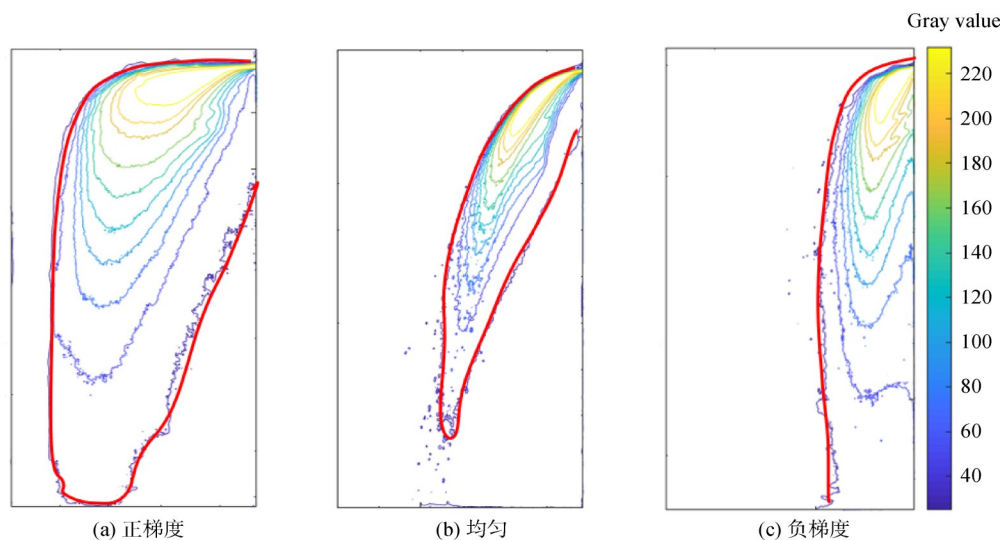
Fig.8 Formula fitting of jet penetration for positive gradient crossflow velocity distributions

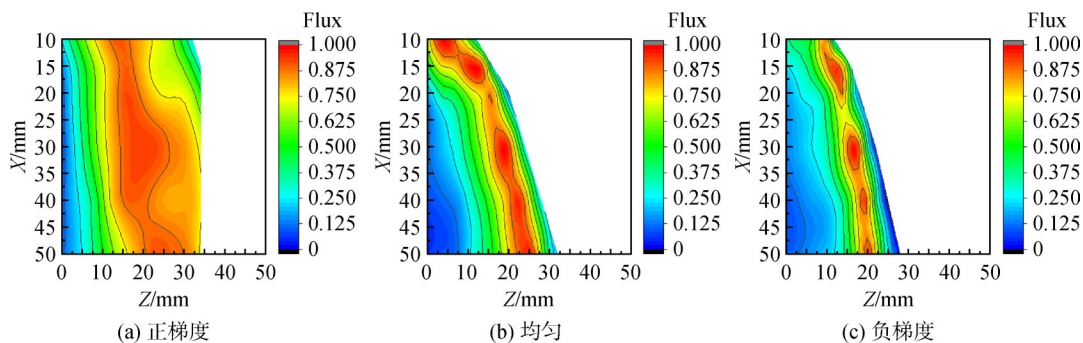
高度大;反之负速度梯度时柱破碎高度小,意味着液柱更早解体。由于射流液柱解体位置不同,浓度分布也有所区别。

在片光照相拍摄的图像中光强与液滴尺寸和液滴数量密度成正比,可以定性地表表示喷雾场质量浓度^[16]。通过按照灰度值大小对不同速度分布下 $\bar{q}=30$ 的射流喷雾图片处理,可以得到近似浓度分布云图用以进行唯像描述,图9(a)~图9(c)分别是正速度梯度、均匀速度和负速度梯度来流的灰度值云图,图片尺寸为60 mm×100 mm,本文以灰度值40,即最外侧等值线作为喷雾场内外两侧的拓展宽度研究浓度分布,如图中红线所示。从图中发现正速度梯度时,在靠近喷嘴一侧由于来流速度低,从液柱剥离下的液滴偏少^[17],液滴主要分布在喷雾场外半侧,浓度分布呈“旗子”状,拓

展宽度最大,喷雾场覆盖范围最广。均匀速度来流时喷雾场两侧的拓展宽度最小,为正速度梯度来流下的0.3~0.4倍,浓度分布最为集中,射流喷雾场呈条带状,浓度场比较集中而不分散。负速度梯度时射流是一种“坍塌”状态,喷雾场内边界贴壁,因此在穿透深度内都有大量液滴存在。与均匀速度来流相比,非均匀速度来流时喷雾场更加分散。

为更精确地对比非均匀速度对浓度分布的影响,将PDPA得到的液滴轴向通量进行归一化处理得到通量分布,可以使用通量分布近似替代浓度分布。图10是 $\bar{q}=30$ 时不同来流速度分布下的通量分布,从图中发现均匀速度和负速度梯度来流分布时射流浓度场分布结构相同,呈明显的分层分布,从喷雾场内侧向外浓度先增大后减小,存

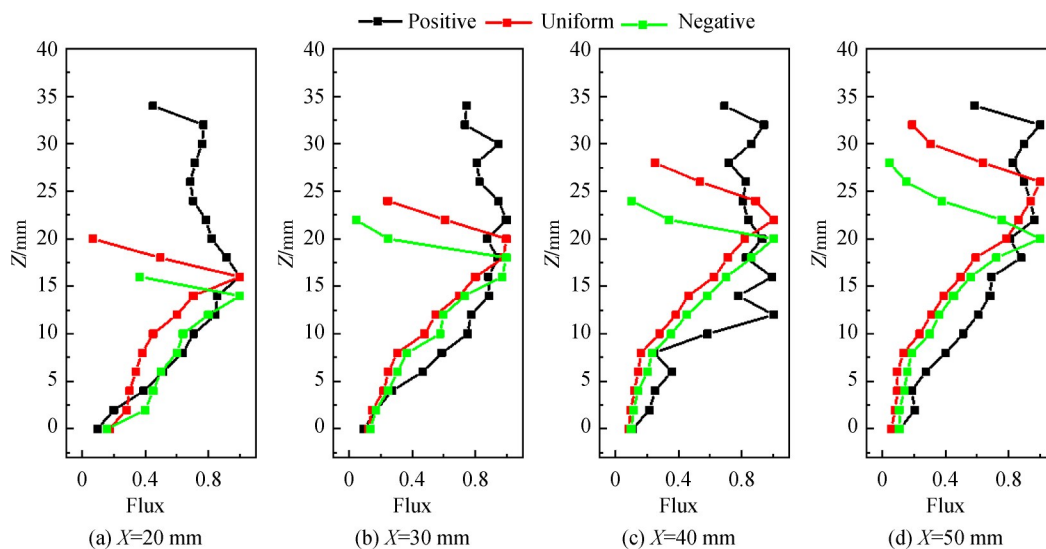
图9 不同来流速度分布下液滴浓度分布云图($\bar{q}=30$)Fig.9 Contour of concentration distribution for different crossflow velocity distributions ($\bar{q}=30$)

图10 不同来流速度下中心截面液雾通量分布($\bar{q}=30$)Fig.10 Spray flux distribution on central section for different crossflow velocity distributions ($\bar{q}=30$)

在一个浓度最大的“喷雾核”,且浓度核基本处于喷雾场外缘,均匀速度来流下喷雾核宽度为10 mm,负速度梯度时缩小为5 mm。正速度梯度时浓度分布散乱,分层现象不明显,整个喷雾上半部分浓度较大,在 $Z>15$ mm外液滴通量均大于0.7,浓度分布更加均匀,且这种均匀性主要体现在喷雾场外半侧。并没有一个明显的“喷雾核”位

置,这与Tambe等^[11]的结论是相同的。

图11是 $\bar{q}=30$ 时不同轴向位置的相对通量分布,发现与均匀速度来流相比,负速度梯度时“浓度核”位置向喷雾场内边缘移动约5~10 mm,且在靠近喷嘴壁面的喷雾场内侧负速度梯度时的浓度比均匀速度梯度时大,喷雾场整体靠内,这与图9的唯像分析一致。

图11 不同轴向位置通量分布($\bar{q}=30$)Fig.11 Flux distribution in different axial situations ($\bar{q}=30$)

2.3 来流速度分布对雾化特性的影响

横向射流雾化主要包括两个过程:初始雾化和二次雾化。初始雾化发生在近场区,主要是液柱破碎成丝条状液体和大液滴;二次雾化主要发生在远场区,即大液体破碎成小液滴的过程,其中初始雾化生成的大液滴对二次雾化起重要作用。在正速度梯度来流中,射流近场区即初始雾化区域主要处于低速空气中,而远场区则位于高速来流中;负速度梯度时射流的近场区和远场区都位于高速区。由于在非均匀速度来流中射流近场区

和远场区面临着不同的气动力,因此雾化有所区别。

雾化的区别主要由气动力的不同引起,空气经过射流后会在液柱后方形成一个尾迹区,液柱后方的气流尾迹区大小可以表征气液动量交换剧烈程度,即空气来流对液柱的气动力大小^[18],由于液滴在尾迹区会存在速度亏损,因此可以通过液滴轴向速度(U)分布体现液柱受到的气动力。图12是 $\bar{q}=30$ 时的三种来流速度分布下液滴轴向速度(U)分布。由于在羽流中空气不断

将动量传递给液滴,沿轴向距离的增大,液滴速度逐渐增大。均匀速度来流时在同一轴向位置沿射流方向液滴轴向速度整体趋势是不断减小。但在距离喷嘴较近的喷雾场上游,液滴轴向速度在射流方向上并不是一直减小,而是先迅速减小后略有增大然后再减小,这个小速度位置即“尾迹区”,可以发现均匀速度来流时在距离喷嘴下游 30 mm 处,尾迹区消失。正速度梯度时轴向速度沿射流方向逐渐增大,这与空气速度分布一

致,且未发现尾迹区,说明正速度梯度时尾迹区长度缩短,小于 10 mm。负速度梯度时尾迹区相对于均匀速度来流明显变长,在 $X=50$ mm 时尾迹区依然存在,如图中圈出位置,这表示负速度梯度时气液动量交换最剧烈,液柱受到的气动力最大。由于不同来流时液柱与空气的动量交换剧烈程度不同,导致非均匀速度来流下雾化索太尔平均直径(SMD,记为 D_{32})不同于均匀速度来流。

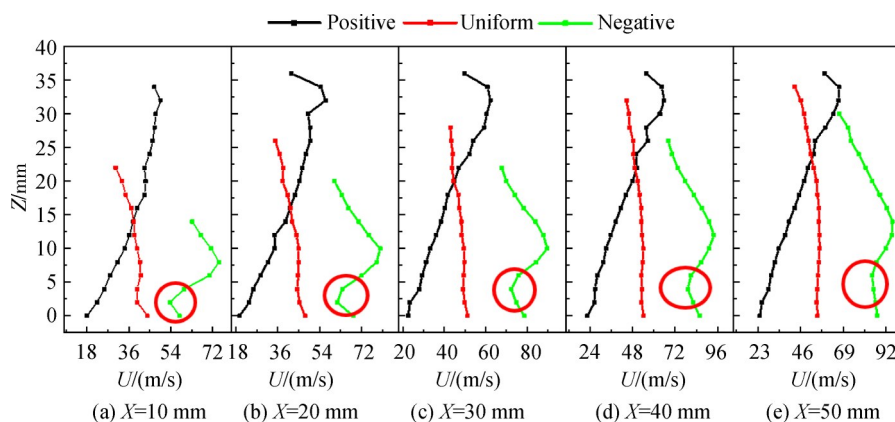


图 12 来流速度分布对液滴轴向速度的影响($\bar{q}=30$)

Fig.12 Effect of crossflow velocity distribution on droplet axial velocity ($\bar{q}=30$)

根据 Wu 等^[4]的发现,射流破碎模式可以分为表面破碎和柱破碎,当 $\bar{q}=30$ 时,两种破碎模式的分界韦伯数为 100,即韦伯数超过 100 为表面破碎,射流破碎模式主要是由射流初始状态的射流动量比决定的。图 13 是根据喷嘴所在位置的来流速度得到的韦伯数分布,根据图中射流初始位置的局部韦伯数可知均匀速度和正速度梯度来流属于柱破碎模式,负速度梯度属于表面破碎模式,其中表面破碎产生的液滴粒径更小。

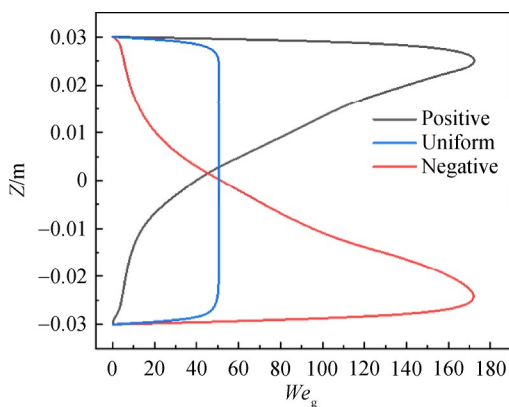


图 13 空气韦伯数分布($\bar{q}=30$)

Fig.13 Inflow Weber number distribution ($\bar{q}=30$)

为了解不均匀速度来流对横向射流雾化 SMD 的影响,将三种不同来流速度分布下 $\bar{q}=30$ 时的 SMD 进行对比,如图 14 所示。从图中可以发现在不同来流速度分布下 SMD 沿射流方向均逐渐增大,其中均匀速度来流时 SMD 覆盖范围最大,雾化最不均匀,这意味着非均匀速度来流可以改善雾化均匀度。在整个喷雾场范围都是负速度梯度时 SMD 最小,对比均匀速度来流和正速度梯度来流发现在喷雾场内侧时均匀速度来流的 SMD 比正速度梯度时小,这是由于在内侧两种工况都是柱破碎且正速度梯度在该处的空气速度更小,对雾化不利,在喷雾场外侧由于正速度梯度时空气速度增大导致外侧正速度梯度雾化效果比均匀速度来流更好。非均匀速度来流对雾化改善的主要体现在喷雾场外侧, SMD 减小 20~30 μm 。

为研究非均匀速度来流对横向射流整体雾化 SMD 的影响,将三种不同来流速度分布的不同截面的 SMD 沿射流方向以采集率加权进行线平均,可以用线平均 SMD 代表雾化水平,处理方法如下:

$$\bar{D}_{32} = \frac{\sum R_i D_{30}^3}{\sum R_i D_{20}^2} \quad (7)$$

式中 R_i 为不同截面各位置的采集率, D_{30} 和 D_{20} 分别为体积平均直径和面积平均直径。

图 15 是将三种来流速度分布线平均之后的 SMD, 对比发现均匀速度来流时雾化最差, 比非均匀速度来流时 SMD 大 10~20 μm , 因此非均匀速度来流可以改善雾化, 其中负速度梯度来流比正速度梯度时改善效果更好。非均匀速度来流对

雾化的改善主要与射流雾化所处区域有关, 负梯度速度来流时射流穿透深度小, 雾化处于高速区, 正速度梯度时射流多了一段抬举高度使得雾化也主要发生在外侧的来流高速区, 由于在高速区韦伯数大, 因此雾化更好, 即非均匀速度来流使得空气能量集中作用在射流主要雾化区, 导致雾化改善。另由于负速度梯度来流时射流的破碎模式为表面破碎, 因此雾化最佳, SMD 最小。

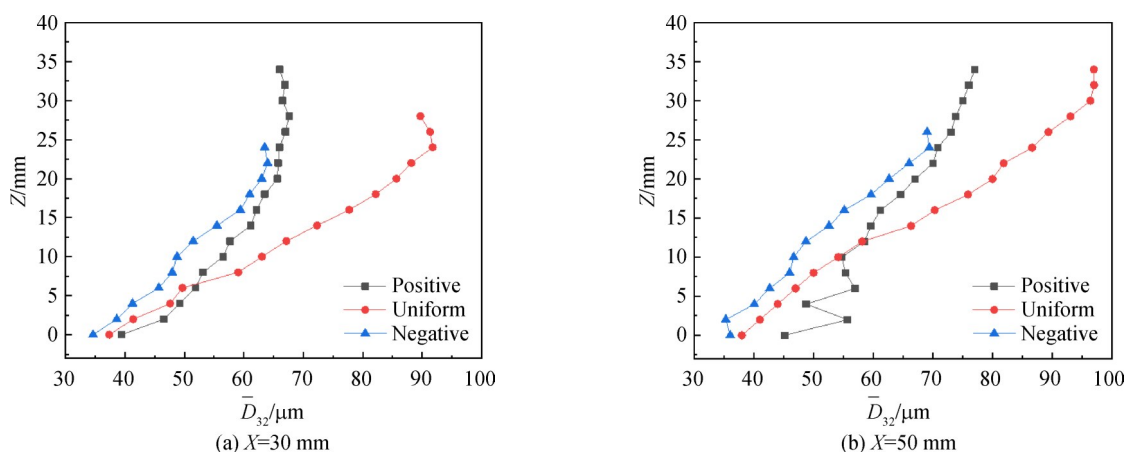


图 14 不同来流速度分布下 SMD 分布 ($\bar{q}=30$)

Fig.14 SMD distribution for different crossflow velocity distributions ($\bar{q}=30$)

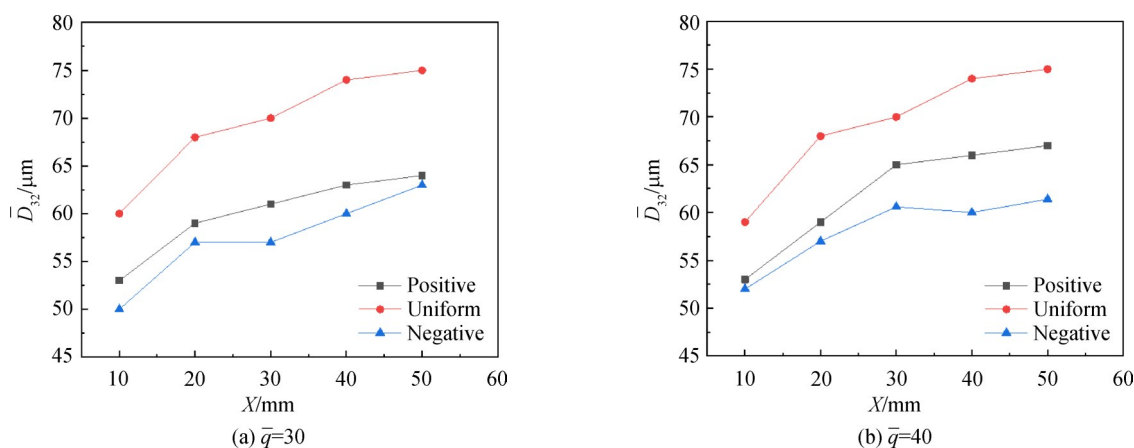


图 15 不同来流速度分布下线平均 SMD 分布

Fig.15 Linear average SMD for different crossflow velocity distributions

3 结 论

本文对非均匀速度来流下横向射流雾化和分布特性进行了实验研究。由于在非均匀速度来流中, 射流受到分布式的气动力, 局部射流动量比是变化的, 破碎机理和穿透深度发生转变, 导致雾化

及分布特性的改变, 具体结论如下:

1) 与均匀速度来流相比, 非均匀速度来流时穿透深度发生改变, 最大差别达到 100%。来流速度为正梯度时穿透大, 负速度梯度时穿透小, 正梯度、均匀速度和负速度梯度来流时的射流分别呈现“平抛”、“斜抛”和“崩坍”形态。

2) 针对均匀速度来流提出的穿透深度公式不适用于非均匀速度来流,利用射流初始状态局部的平均射流动量比和分段方法实现非均匀速度来流下射流穿透深度拟合,与实验结果吻合较好。

3) 负速度梯度来流和均匀速度来流下射流浓度场结构相似,呈明显分层结构,但浓度核宽度比均匀速度来流时缩小约5 mm。正速度梯度来流时喷雾场浓度分布更加均匀,液滴主要分布在喷雾场外侧;均匀速度来流时喷雾场液滴更加集中,非均匀速度来流时喷雾场分布相对更分散。

4) 与均匀速度来流时相比,非均匀速度来流可以改善雾化均匀度。在非均匀速度来流中由于空气能量集中,SMD相对均匀速度来流时减小10~20 μm ,其中负速度梯度来流时射流尾迹区增长,液柱与空气的动量交换最剧烈,SMD减小最多。

综合以上分析,与燃烧室的气动设计结合,调整来流速度分布可以改善燃油雾化、燃油浓度分布,进而控制燃烧性能。在后续实验中,将会对非均匀速度来流中正速度梯度和负速度梯度的非均匀度对射流雾化和分布特性的影响进行深入研究。

参考文献:

- [1] LOVETT J, BROGAN T, PHILIPPONA D, et al. Development needs for advanced afterburner designs[R]. AIAA 2004-4192, 2004.
- [2] EBRAHIMI H. Overview of gas turbine augmentor design, operation, and combustion oscillation[R]. AIAA 2006-4916, 2006.
- [3] FOUST M, THOMSEN D, STICKLES R, et al. Development of the GE aviation low emissions TAPS combustor for next generation aircraft engines[R]. AIAA 2012-0936, 2012.
- [4] WU P K, KIRKENDALL K A, FULLER R P, et al. Break-up processes of liquid jets in subsonic crossflows[J]. Journal of Propulsion and Power, 1997, 13(1): 64-73.
- [5] BIROUK M, AZZOPATDI B J, STABLER T. Primary break-up of a viscous liquid jet in a cross airflow[J]. Particle and Particle Systems Characterization, 2003, 20(4): 283-289.
- [6] BROUMAND M, BIROUK M. Liquid jet in a subsonic gaseous crossflow: recent progress and remaining challenges[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2016, 57: 1-29.
- [7] 林宇震, 李林, 张弛, 等. 液体射流喷入横向气流混合特性研究进展[J]. 航空学报, 2014, 35(1): 46-57.
LIN Yuzhen, LI Lin, ZHANG Chi, et al. Progress on the mixing of liquid jet injected into a crossflow[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(1): 46-57. (in Chinese)
- [8] ELSHAMY O, TAMBE S, CAI J, et al. Structure of liquid jets in subsonic crossflow at elevated ambient pressures[R]. AIAA-2006-1224, 2006.
- [9] LAKHAMRAJU B. Liquid jet breakup studies in subsonic airstream at elevated temperatures[D]. Cincinnati, Ohio, US: University of Cincinnati, 2005.
- [10] STENZLER J N, LEE J G, SANTAVICCA D A, et al. Penetration of liquid jets in a crossflow[R]. AIAA - 2013 - 1327, 2003.
- [11] TAMBE S B, ELSHAMY O, JENG S M. Liquid jets injected transversely into a shear layer[R]. Reno, Nevada, US: 45th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, 2013.
- [12] TAMBE S B, ELSHAMY O, JENG S M. Spray properties of liquid jets injected transversely into a shear layer[R]. Cincinnati, US: 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2013.
- [13] BECKER J, HASSA C. Liquid fuel placement and mixing of generic aeroengine premix module at different operating conditions[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125(4): 901-908.
- [14] LIN C K, KENNEDY J P, JACKSON T A. A review of penetration heights of transverse liquid jets in high-speed flows[R]. Lavergne, France: 15th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray System, 1999.
- [15] WANG Q, MONDRAGON U M, BROWN C T, et al. Characterization of trajectory, break point, and break point dynamics of a plain liquid jet in a crossflow[J]. Atomization and Sprays, 2011, 21(3): 203-219.
- [16] ESLAMIAN M, AMIGHI A, ASHGRIZ N. Atomization of liquid jet in high-pressure and high temperature subsonic crossflow[J]. AIAA Journal, 2014, 52(7): 1374-1385.
- [17] RANGER A A, NICHOLLS A J. Aerodynamic shattering of liquid drops[J]. AIAA Journal, 1969, 7(2): 285-290.
- [18] WU P K, FULLER R P, KIRKENDALL K A, et al. Spray structures of liquid jets atomized in subsonic crossflows[J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(2): 173-182.

(编辑:陈越)