

液体射流在不均匀速度横流中的轨迹和 穿透研究

王 航^{1,2}, 孔祥壮^{1,2}, 郭志辉^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
2. 北京航空航天大学 航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 实验研究了横流速度分布不均匀时液体射流的轨迹和穿透。利用多孔板实现速度分布不均匀, 射流液体为水, 用激光片光照明结合相位多普勒粒子分析仪进行研究。主要关注平均射流动量比、局部韦伯数和横流速度分布不均匀度等参数。不均匀横流对射流的影响主要体现为破碎模式沿射流流向的转变。提出表征射流受横流影响范围的无量纲数 L , 并构造常温常压下适用于不均匀度为 $-2 \sim 2$ 且射流动量比为 $10 \sim 40$ 的射流轨迹经验公式。以是否存在“初级抬升段”作为判定是否进行分段拟合的准则。对于不均匀度小于 1, 结合经验公式与不均匀度和 L 的线性函数图对射流轨迹进行预测; 对于不均匀度大于 1, 以射流首次发展为复合式破碎的位置作为“抬升段”和“偏转段”的分界点对射流轨迹进行分段拟合。

关 键 词: 不均匀速度分布; 横向气流; 射流轨迹; 平均射流动量比; 局部韦伯数
中图分类号: V231.2 **文献标志码:** A

Investigation on trajectory and penetration of liquid jet in non-uniform velocity crossflow

WANG Hang^{1,2}, KONG Xiangzhuang^{1,2}, GUO Zhihui^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The trajectory and penetration of liquid jet in crossflow with non-uniform velocity distribution were studied experimentally. Using specifically designed perforated plates to realize several non-uniform velocity distributions, water was used as the jet liquid, and the research was carried out by laser sheet combined with phase doppler particle Analyzer. The main concerns involved the average jet momentum flux ratio, the local Weber number and non-uniformity of the transverse velocity distribution. The influence of the crossflow with non-uniform velocity distribution on the liquid jet was mainly reflected in the transformation of the breakup mode along the liquid flow direction. A dimensionless parameter L characterizing the influence range of liquid jet by cross flow was proposed, and an empirical formula suitable for jet trajectory with non-uniformity of $-2 \sim 2$ and jet momentum flux ratio of $10 \sim 40$ at normal temperature and pressure was constructed. The existence of “primary uplift section” was taken as the criterion to determine whether the subsection fitting was carried out. For non-uniformity less than 1, the jet trajectory was predicted by combining the empirical formula with the linear function diagram of

收稿日期: 2021-09-27

基金项目: 国家科技重大专项(2017-III-0008-0034)

作者简介: 王航(1995—), 男, 硕士生, 研究领域为燃油雾化与燃烧室设计。E-mail: 287474795@qq.com

引用格式: 王航, 孔祥壮, 郭志辉. 液体射流在不均匀速度横流中的轨迹和穿透研究[J]. 航空动力学报, 2023, 38(6): 1316-1327. WANG Hang, KONG Xiangzhuang, GUO Zhihui. Investigation on trajectory and penetration of liquid jet in non-uniform velocity crossflow[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(6): 1316-1327.

nonuniformity and L . For non-uniformity greater than 1, the location where the liquid jet first developed into composite breakup was taken as the dividing point of “uplift section” and “deflection section”, and the jet trajectory was fitted by segments.

Keywords: non-uniform velocity distribution; crossflow; jet trajectory;
average jet momentum flux ratio; local Weber number

注入横向气流的液体射流在航空航天工业中已有众多应用,包括加力和冲压燃烧室的燃油喷射^[1-3]等,燃料和空气的充分混合对于实现高效燃烧和降低排放至关重要。现代航空发动机对推质比的要求越来越高,导致燃烧室工作温度和压力的进一步提高,而氮氧化物和未燃碳氢等污染物的生成量也随之不断上升,Lefebvre等^[4]的研究表明,其形成机理在很大程度上取决于燃烧温度。贫油预混预蒸发燃烧模型(lean premixed prevaporized, LPP)提供了一种通过降低燃烧室温度而减少氮氧化物形成的可行方法。燃烧是在贫油条件下进行的,以保证较低的火焰温度。通过在预混管中充分混合燃料和空气,将得到的燃料和空气混合物注入燃烧室,由此防止出现任何接近化学当量比的局部区域。同时,预混管需要在较短时间内产生均匀的混合物以防止自燃,还应避免任何燃料撞击墙壁而结焦。燃料在横流中的射流具有快速雾化和穿透深度可控的特性,因此成为了一种重要的燃料和空气混合方式。

横流中的液体射流研究要点众多,Tambe等^[5-6]和Broumand等^[7]对射流的破碎机理、穿透深度和雾化特性等作了深入研究和详细总结,本研究主要考虑液柱破碎、射流轨迹和穿透深度。液体射流轨迹和穿透是液体射流中最重要的特征之一^[7],其直接影响燃烧室中燃料喷雾的分布,进而影响燃料蒸发和与氧化剂的混合速率,此外还能预防喷雾冲击壁面带来的不利影响,这对于燃烧室的设计非常重要。Wu等^[8]将液体射流的破碎机制分为增强毛细力破碎、袋式破碎、复合式破碎和剪切破碎。Birouk等^[9]对液柱破碎进行研究,提出影响液柱破碎高度和破碎长度的关键因素是射流动量比。Wang等^[10]和Birouk等^[11]提出许多预测射流轨迹和穿透的无量纲数,如射流动量比、雷诺数、韦伯数、黏度比和密度比等。Wu等^[8]从理论上分析了4种液体的破碎和雾化情况,将实验结果与力学分析相结合,获得了常温常压下亚声速横流的射流轨迹关于射流动量比 q 的基本方程式。Tambe等^[5]对3种液体的射流轨迹进行

分析得出类似的相关性。

此后,Ahn等^[12]、Birouk等^[13]、Ng等^[14]和Farvardin等^[15]对常温常压下不同液体射流的规律进行了细致的研究,完善了射流轨迹和穿透公式。Eslamian等^[16]、Stenzler等^[17]和Amighi等^[18]对高温高压下的液体射流进行研究,拓宽了公式的适用范围。Patil等^[19]利用光连接法进行实验研究,详细描绘了液体射流的破碎特征并完善了破碎高度公式。Jeng等^[20-21]进行了液体射流注入剪切层横流的实验,液体在不同位置处所受气动力不同,影响射流轨迹和穿透的因素都是时刻变化的。实际条件下液体射流面临的气流条件往往更加复杂,而已有的射流轨迹公式多适用于均匀横流,对复杂来流的液体射流研究也十分稀缺。因此,对不均匀横流中液体射流轨迹和穿透的研究,作为对更复杂气流条件下液体射流研究的基础,是有必要的。

本研究通过多孔板实现横流速度分布不均匀,对液体射流的喷雾照片结合相位多普勒粒子分析仪(phase doppler particle analyzer, PDPA)数据进行研究,获得射流轨迹在横流速度分布不均匀时的方程式,提出了表征速度不均匀程度的无量纲数,探寻并分析速度不均匀程度与射流轨迹和穿透的关系。

1 方 法

1.1 实验系统

图1所示为液体射流实验台系统图,其由空气供给系统、液体供给系统、PDPA测试系统、拍摄系统和实验段组成。图中PMT为光电倍增管组件,用以转换和放大信号。

空气供给系统由气流管道、截止阀、调节阀、空气压力传感器和气体涡街流量计组成。实验用压缩空气由压气站稳定供给,由调节阀控制流量。液体供给系统由液体管道、高压氮气瓶、减压阀、高压水罐、流量控制阀、液体流量计和液体压力传感器组成。工质为纯净水,通过高压氮气注入水罐挤压供水,由流量控制阀控制流量。

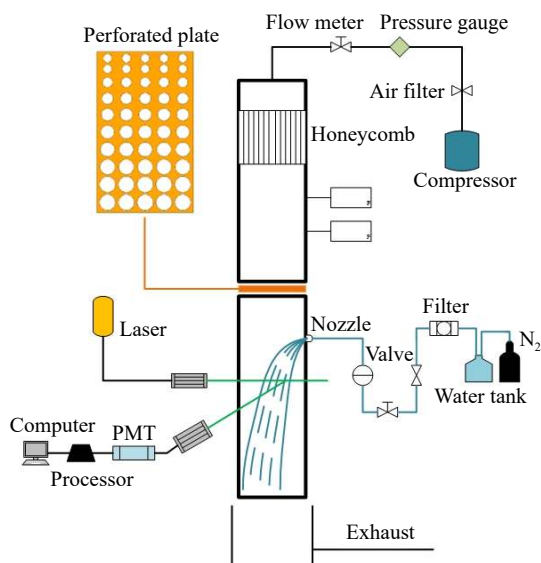


图 1 实验系统图

Fig. 1 Experimental system diagram

PDPA 测试系统由激光器、发射和接收探头、计算机、位移机构和信号处理器组成。测试参数为：液滴粒径为 $1 \sim 284 \mu\text{m}$ ，液滴速率为 $0 \sim 280 \text{ m/s}$ ，粒径和速率测量精度为 1%，体积通量测量误差为 10%，采集时间达到 10 s 后开始下一测点的采集。

拍摄系统由激光片光仪和单反相机组成。激光片光仪产生波长为 532 nm 的片光，片光厚度为 0.5 mm ，沿横流方向对液体射流中心截面照明，单反相机在横流的垂直方向拍摄，曝光时间为 $1/160 \text{ s}$ 。

实验段由整流段和测试段组成。通道横截面尺寸 $36 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ ，整流段长 770 mm ，内置整流网筛；测试段长为 300 mm ，相邻两个侧面开窗并安装石英玻璃用以拍摄测量。多孔板安装在整流段和测试段之间，用以调节横流速度分布。实验喷嘴直径 $D_j = 0.6 \text{ mm}$ ，收口锐边，长径比为 6，流量系数为 0.68，喷嘴安装在多孔板下游 100 mm 处。喷嘴安装位置和坐标轴设置如图 2 所示，横流方向为 X 方向，液体射流初始方向为 Z 方向，喷嘴出口位置为坐标原点。

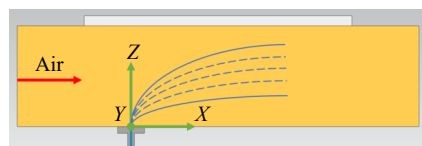


图 2 坐标轴设置

Fig. 2 Coordinate axis setting

1.2 实验方法

多孔板安装在整流段和实验段之间，流经多孔板上较大直径圆孔的空气流量较大，下游的空

气速度也较大，流经较小圆孔的空气流量和速度则较小，致使下游横流速度成斜线型分布，此外通过改变多孔板上圆孔直径和排布，获得不同斜率的斜线型速度分布。液体射流注入该斜线型速度分布横流，射流轨迹和穿透表现出截然不同的特点。本研究建立的射流轨迹公式主要参照 Wu 等^[8]和 Tambe 等^[5]提出的公式

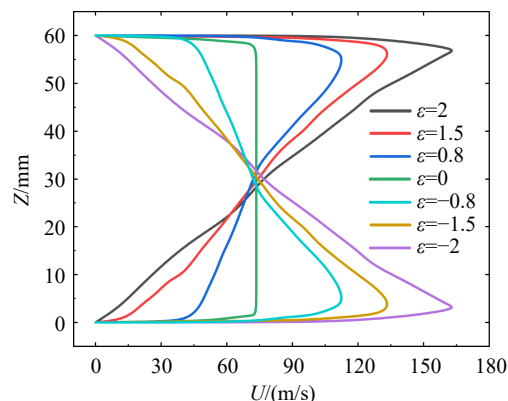
$$\left(\frac{Z}{D}\right) = Cq^a \left(\frac{X}{D}\right)^b \quad (1)$$

$$\left(\frac{Z}{D}\right) = Cq^a \cdot \ln\left(b + d\frac{X}{D}\right) \quad (2)$$

其中 D 为喷嘴直径， q 为射流动量比， Z 和 X 为坐标轴位置， a 、 b 、 C 、 d 为常数且数值在不同文献中略有不同。Jeng 等^[20-21]提出剪切层速度比的定义，其等于上层与下层气流速度的比值，但这种定义不能很好的描述本研究中的斜线型速度分布，因此在其基础上提出新的速度分布的不均匀度

$$\varepsilon = \frac{U_{Z,\max} - U_{Z,\min}}{\bar{U}_g} \quad (3)$$

由于边界层对于本研究结果影响较小因此不予考虑。在式(3)中， $\bar{U}_g$ 为空气平均速度， $U_{Z,\min}$ 是坐标轴上 Z 为最小值时空气沿 X 方向的速度， $U_{Z,\max}$ 是 Z 为最大值时的空气速度。通过更换多孔板和改变其安装方向获得 7 种速度分布，其在 $X=0 \text{ mm}$ 直线上的速度分布由实验方法测得，如图 3 所示，其中 Z 为坐标轴位置， U 为气流速度。图中不均匀度 $\varepsilon=2$ 、 $\varepsilon=1.5$ 、 $\varepsilon=0.8$ 定义为正梯度速度分布，即液体射流沿 Z 方向流经的空气速度逐渐增大， ε 越大表征横流的不均匀程度越深；而不均匀度 $\varepsilon=-0.8$ 、 $\varepsilon=-1.5$ 、 $\varepsilon=-2$ 定义为负梯度速度分布，即液体射流沿 Z 方向流经的空气速度逐渐减小；不均匀度 $\varepsilon=0$ 即为均匀速度分布。

图 3 $X=0 \text{ mm}$ 时 X 方向的空气速度分布Fig. 3 Velocity distribution of air in X direction at $X=0 \text{ mm}$

1.3 实验工况

本研究在常温常压(300 K、101 kPa)下进行, 保证横流马赫数为0.2。通过调节阀获得不同的平均射流动量比, 在7种速度分布下分别对表1中的工况进行多次重复实验。定义平均射流动量比 $\bar{q}$ 为通过实验段内横流沿 X 方向的速度平均值计算获得的射流动量比。由于本研究横流速度分布不均匀, 文献[7,10-11,20-21]提出的影响射流轨迹和穿透的各种无量纲数, 应考虑为针对任一射流微元段的局部无量纲数, 包括局部韦伯数 We_g 等。本研究主要使用的公式为

$$\bar{q} = \frac{\rho_l \cdot U_j^2}{\rho_g \cdot \bar{U}_g^2} \quad (4)$$

$$We_g = \frac{\rho_g \cdot U^2 \cdot d_j}{\sigma} \quad (5)$$

其中 ρ_l 、 ρ_g 、 d_j 、 σ 、 U_j 、 U 分别是液体密度、空气密度、射流柱直径、液体表面张力系数、射流初始速度、局部空气速度。

表1 实验工况

Table 1 Experimental operating conditions

工况代号	$\bar{U}_g/(m/s)$	$U_j/(m/s)$	$\bar{q}$
q10	70	9.01	10.1
q20	70	12.75	20
q30	70	15.61	30.1
q40	70	18.03	40.1

2 结果与讨论

2.1 射流轨迹和穿透

图4是工况q20(其他工况类似)时横流中液体射流沿流向的中心截面灰度图, 从右至左依次是速度分布为 $\varepsilon=-2$ (其他速度分布类似)至 $\varepsilon=2$ 时的图像, 图像尺寸为60 mm×100 mm。正梯度

($\varepsilon=0.8\sim 2$)时, 射流初始位置空气速度较小, 小范围内的平均射流动量比较大, 射流在此小范围内受到的横向气动力较小, 局部韦伯数小于11, 射流处于增强毛细力破碎模式[8], 剥离脱落的液滴十分稀少, 能继续保持较强的穿透能力, 几乎垂直于横流; 射流继续向 Z 方向移动, 受到的横向气动力逐渐增大, 引起局部韦伯数的增大, 从增强毛细力破碎发展为袋式破碎最终转变为复合式破碎, 液体受到强烈气动力影响大量脱离射流, 射流穿透横流的能力大幅降低, 迅速偏转至近乎平行于横流并伴随气流向下游发展[5]; 射流整体呈现为一种“平抛运动”轨迹, 并以破碎模式首次发展为复合式破碎(局部韦伯数达到30)为界, 前半段穿透能力较强, 射流沿 Z 方向的位移即穿透深度较大, 沿 X 方向的位移较小, 体现为喷雾场沿 Z 方向整体外移一段距离, 后半段为近似的复合式破碎射流[20]。在均匀($\varepsilon=0$)时, 横流空气速度基本保持一定, 射流动量比不变, 任一射流微元段内局部韦伯数相等为48, 射流接触横流立即发生小幅偏转, 液体受均匀横向气动力影响从初始位置开始发生剥离脱落, 表现为典型的复合式破碎模式[10-11], 射流呈现为一种“斜抛运动”轨迹, 因没有空气速度和局部韦伯数均较小的前半段, 穿透深度相对正梯度而言较小。在负梯度($\varepsilon=-2\sim -0.8$)时, 射流初始位置空气速度较大, 小范围内的平均射流动量比较小, 射流在流经负梯度横流时受挤压程度增大, 沿展向的迎风面积增大, 受到的横向气动力较大, 局部韦伯数大于90, 处于剪切破碎, 接触横流瞬间受强烈横向气动力影响液体发生大规模的剥离脱落, 穿透能力迅速削减, 射流快速解体, 在短距离内偏转至近乎平行于横流, 整体呈现出一种“崩坍”态势[21], 因此穿透深度较均匀而言更小。横流速度分布不均匀对液体射流的影响主要集中在时刻变化的局部韦伯数和局部气动力上, 体现为射流破碎模式沿液体流向的转变, 破碎主要发生在复合式破碎段(正梯度)和

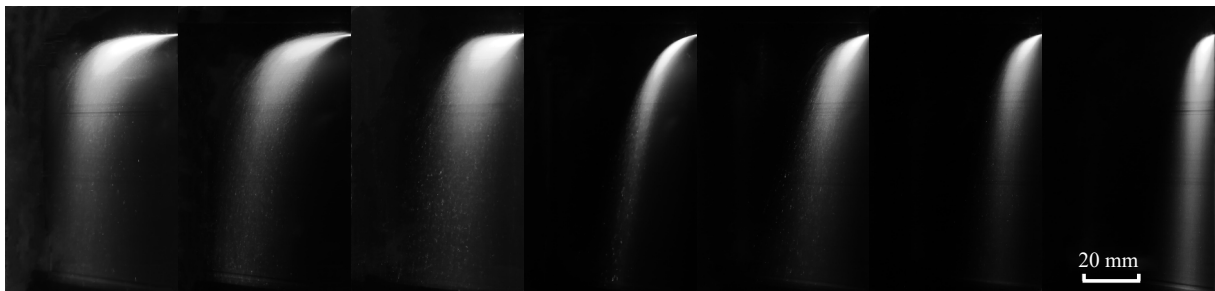


图4 $\varepsilon=-2$ 至 $\varepsilon=2$ (从右至左)的喷雾图像(q20)

Fig. 4 $\varepsilon=-2$ to $\varepsilon=2$ (from right to left) spray image (q20)

剪切破碎段(负梯度),而在其他破碎模式下液体射流倾向于保持原有运动轨迹继续运动,这是由于局部韦伯数和局部气动力越大则破碎程度越深、射流偏转角度越大,因此射流轨迹和穿透体现出与均匀时不同的特点。

此外,图 4 中从 $\varepsilon=-2$ 至 $\varepsilon=2$ 的不均匀度不断增大,穿透深度也不断增大,表明不均匀度和穿透深度成正相关。图 5 所示为 $\varepsilon=1.5$ 、 $\varepsilon=0$ 、 $\varepsilon=-1.5$ 时 4 种工况的射流沿流向的中心截面灰度图。已知射流穿透深度与射流动量比成正相关^[8,12-15],观察图 5 可知横流速度分布不均匀不会对该结论产生影响。射流动量比表征液体与气体惯性力的比率^[7],当横流条件一致时平均射流动量比大的射流具有较大的惯性力,其较强的穿透能力会使射流向更深

的位置移动。结果表明,不均匀度的增减不会改变平均射流动量比和穿透深度的正相关关系。

Eslamian 等^[16]提出液滴反射光强可定性代表其质量浓度,因此捕获图像像素点每一行中光强最高的点连接起来作为最高质量浓度线,即喷雾中心线。为了更直观地研究射流轨迹和穿透在横流速度分布不均匀时的特点,采取 Eslamian 等^[16]的方法用 Matlab 软件编程处理所有射流喷雾灰度图获得初步的射流轨迹曲线,结合 PDPA 所获相对通量图(图 6(a)~图 6(c),其中黑色实线为最大通量线)对初步的射流轨迹曲线进行修正,获得可信度较高的射流轨迹,为了方便描述,将图像顺时针旋转 90° 后左右翻折得到最终图像,图 6(d)~图 6(f)为 $\varepsilon=1.5$ 、 $\varepsilon=0$ 、 $\varepsilon=-1.5$ 时 4 种工况的

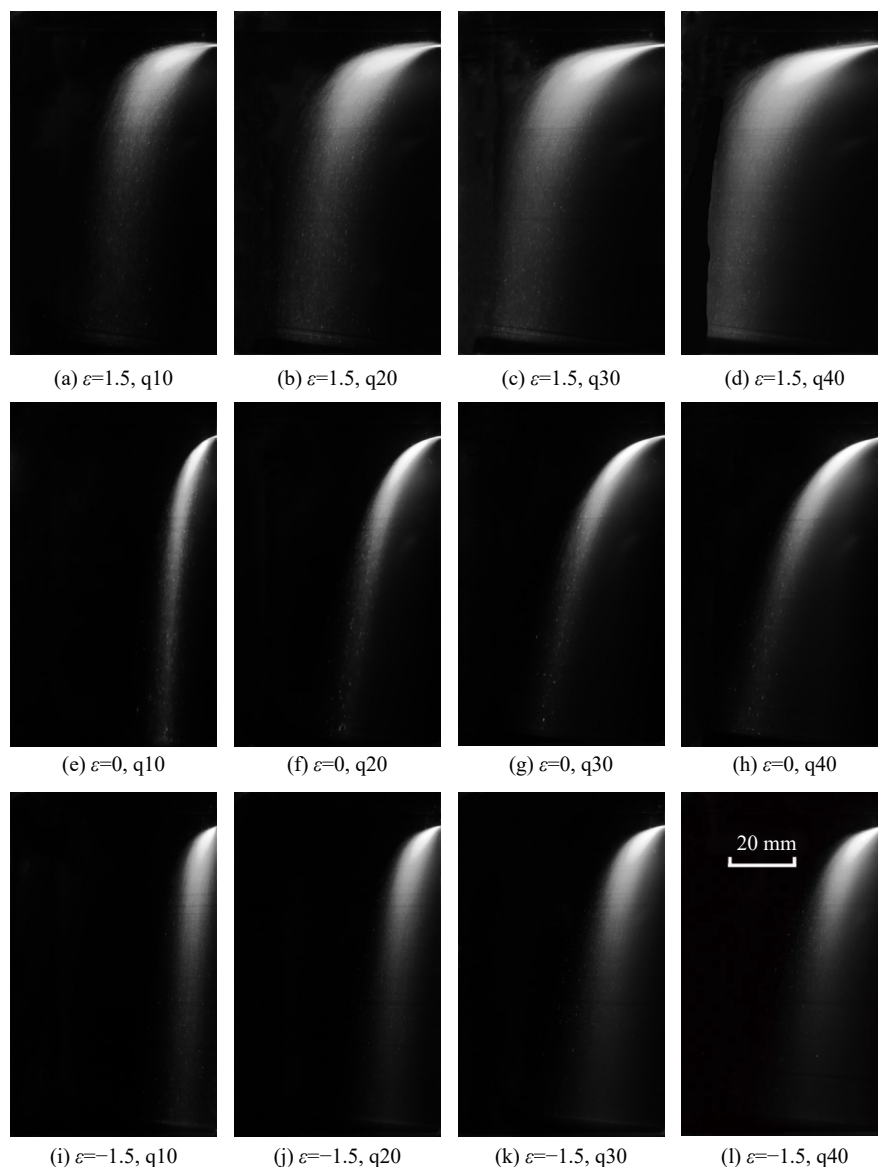


图 5 3 种不同速度分布的喷雾图像

Fig. 5 Spray images of three different velocity distributions

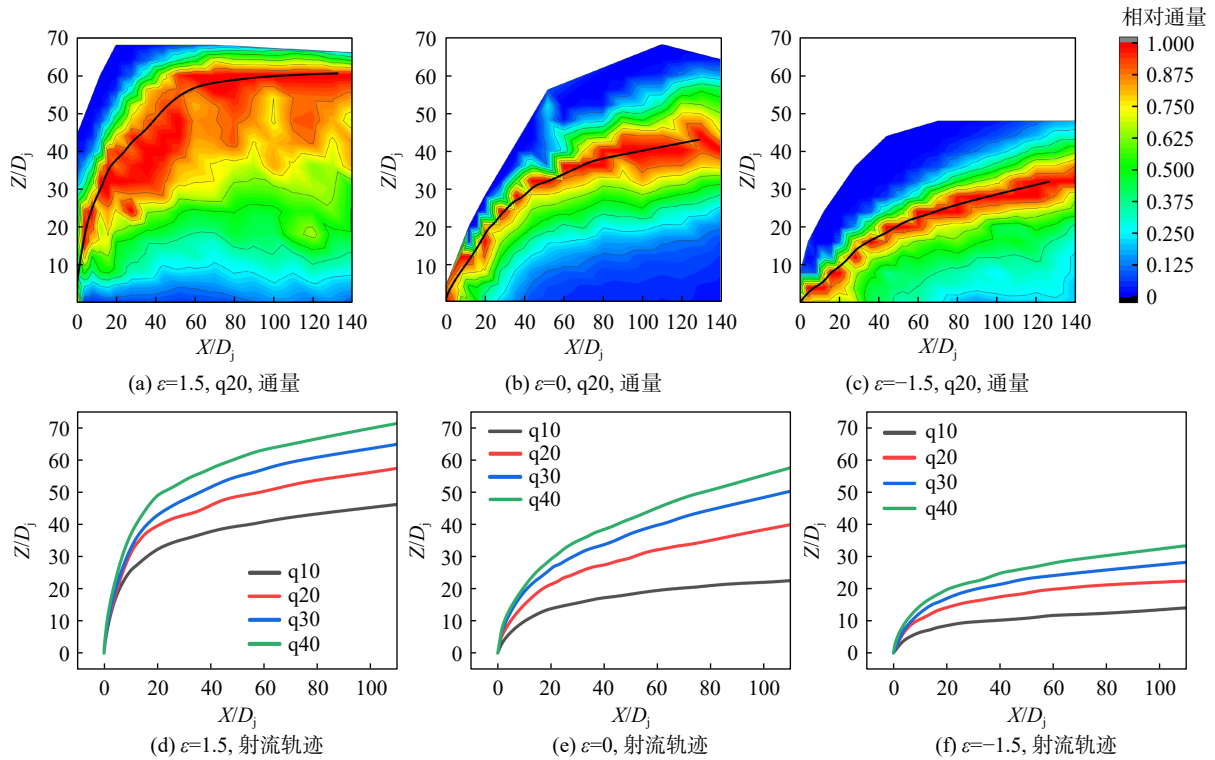


图6 3种不同速度分布的喷雾通量和射流轨迹

Fig. 6 Spray fluxes and jet trajectory of three different velocity distributions

射流轨迹。在 q_{10} 时无量纲化轴向位置 $X/D_j=110$ 处, 正梯度、均匀、负梯度的穿透分别为 47、22、14, 该值在 q_{40} 时为 72、57、33, 表明相同平均射流动量比时正梯度穿透较大, 负梯度穿透较小。在该处, 以 q_{10} 均匀时穿透为基准值, 正梯度和负梯度的穿透增量分别为 25 和 -8, 该值在 q_{40} 时为 15 和 -24, 表明平均射流动量比的增减不会改变不均匀度和穿透深度的正相关关系, 但会改变不均匀度对穿透深度的影响程度; 此外, 均匀时 $q_{10} \sim q_{40}$ 的穿透增量为 35, 该值在正梯度和负梯度时分别为 25 和 19, 表明不均匀度的增减不会改变平均射流动量比和穿透深度的正相关关系, 但会改变平均射流动量比对穿透深度的影响程度, 这与图 5 所得结论一致。

2.2 均匀速度分布射流轨迹

由于本研究横流速度分布不均匀, 局部韦伯数和局部射流动量比在不同位置不相同, 导致常规的射流轨迹和穿透公式不再适用, 因此, 需要提出新的针对横流速度分布不均匀的射流轨迹和穿透的预测方法。此外, 射流轨迹和穿透与不均匀度和平均射流动量比之间有着复杂的相关性, 按不均匀度类型进行分类研究是有必要的。

在均匀时, 常用的射流轨迹公式有对数型、指数型和幂函数型^[5-8], 分别用这 3 种公式的典型形

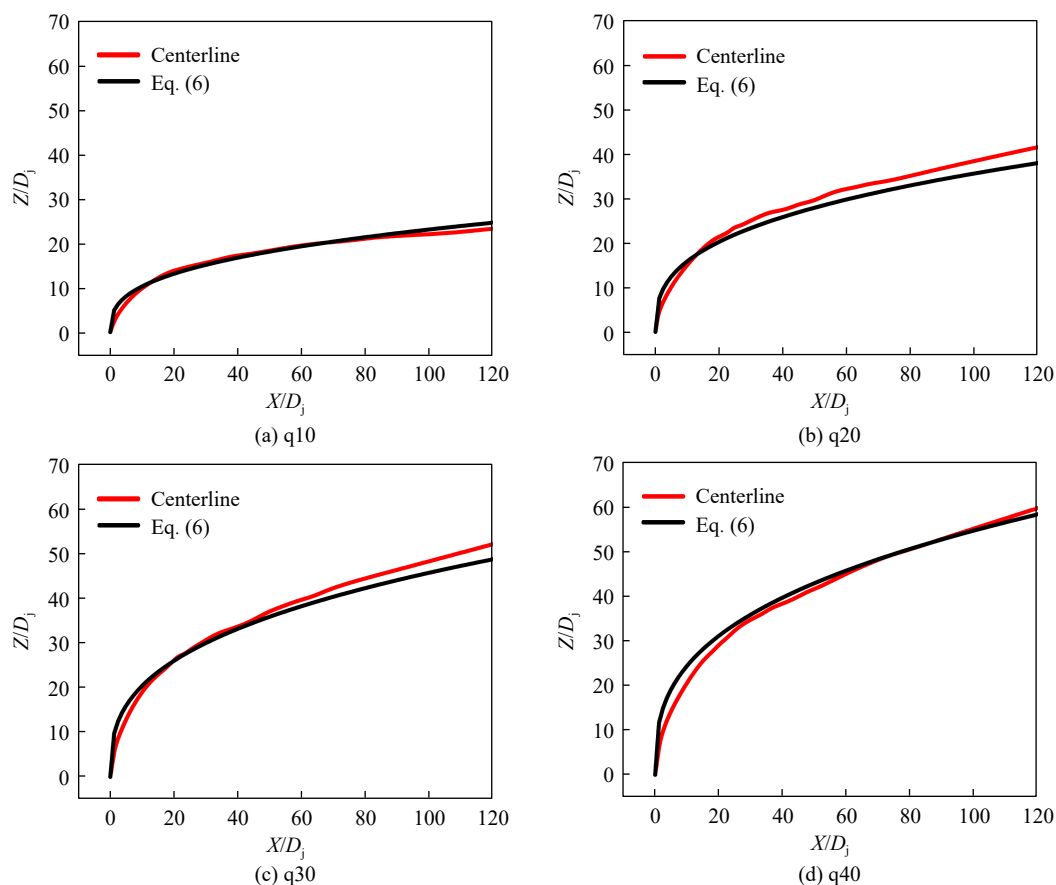
式对 4 种工况的射流轨迹进行拟合, 用线性回归方法对 3 种公式的拟合函数进行数学分析, 获取各拟合函数的拟合优度 R^2 , R^2 大于 0.8 即认为拟合函数能够很好地描述实际曲线^[22]。通过以上方法获得对数型公式的 $R^2=0.947$, 指数型 $R^2=0.972$, 幂函数型 $R^2=0.994$, 因此采用幂函数型公式对本研究中的射流轨迹进行拟合。结合式(1)和文献[5-15]中对参数 a 、 b 、 C 取值范围的研究, 用 Origin 软件对 $\varepsilon=0$ 的 4 种工况的射流轨迹进行拟合, 构造适用于本研究的射流轨迹经验公式

$$\left(\frac{Z}{D_j}\right) = 1.09q^{0.625}\left(\frac{X}{D_j}\right)^{0.35} \quad (6)$$

式(6)曲线和 $\varepsilon=0$ 的 4 种工况射流轨迹的对比如图 7 所示, 经计算其 R^2 大于 0.88 满足拟合优度的基本要求。此外, 由于横流速度分布均匀, 任意范围内的平均射流动量比相等, 可将式中射流动量比 q 替换为平均射流动量比 $\bar{q}_L$, 其定义为: 通过 Z/D_j 接近 0 到 $Z/D_j=L$ 范围内的横流沿 X 方向的速度平均值计算获得的射流动量比。均匀时 $L \cdot D_j$ 可以是区间 (0,60) 内任意值, 对其进行无量纲化是为了式中各参数的一致性。

2.3 负梯度速度分布射流轨迹

在本研究中负梯度存在 3 种不均匀度, 优先

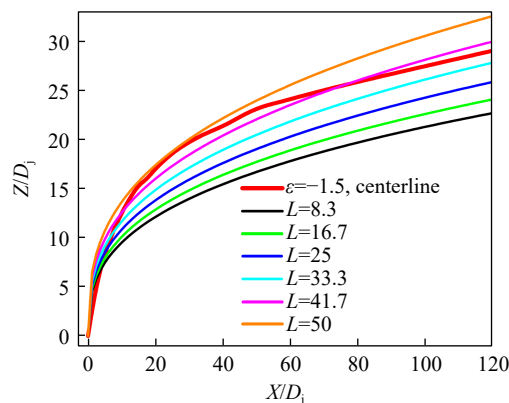
图7 4种工况的 $\varepsilon=0$ 射流轨迹和经验公式曲线Fig. 7 Jet trajectory at $\varepsilon=0$ and empirical formula curve under four operating conditions

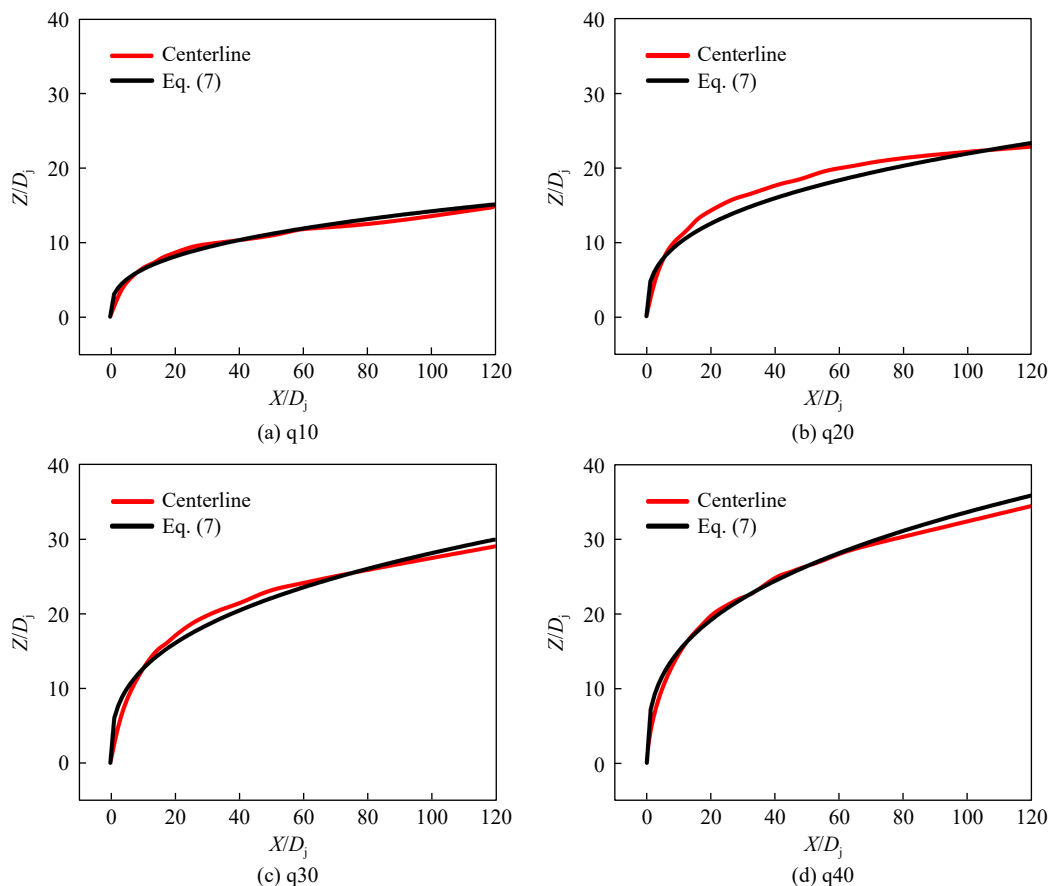
对其中间值 $\varepsilon=-1.5$ 进行研究,这有利于获得适用于全部3种负梯度的通用规律和排除特殊情况。由图6可知均匀和负梯度射流轨迹有明显差异,因此需要对式(6)进行修正。假定穿透深度为 Z_p ,射流仅在 Z 轴区间 $(0, Z_p)$ 内受横流影响,区间以外横流不与射流接触而不产生影响,因此仅需将该 Z 轴区间内的平均射流动量比代入公式进行拟合,构造公式

$$\left(\frac{Z}{D_j}\right) = 1.09 \bar{q}_L^{0.625} \left(\frac{X}{D_j}\right)^{0.35} \quad (7)$$

以 q_{30} 为例,式(7)中 L 取不同值时曲线和 $\varepsilon=-1.5$, q_{30} 射流轨迹的对比如图8所示, L 表征液体射流受横流影响的范围。当 $L=41.7$ 即 $L \cdot D_j=25$ mm时两者拟合优度最高为0.83,由此说明,将喷嘴出口25 mm以内横流平均射流动量比代入式(7)中,所得曲线与射流轨迹最为接近。为了检验该方法在 $\varepsilon=-1.5$ 时是否具有普适性,将 $L=41.7$ 时4种工况的平均射流动量比代入式(7)绘制出4条曲线并与射流轨迹对比如图9所示,拟合优度均大于0.8,证明该方法适用于横流速度分布为 $\varepsilon=-1.5$ 时

射流轨迹预测。综合来看,当横流速度分布为 $\varepsilon=-1.5$ 时,从 Z 接近0 mm到 $Z=25$ mm范围内的横流对液体射流的影响极大,在此范围以外的横流影响可以忽略不计。究其原因,该范围内局部韦伯数和局部气动力较大,处于剪切破碎模式,射流柱受压扁程度和液体剥离脱落程度较深,因此偏转角较大,离开此范围后破碎模式发生转变,局部气动力逐渐减小因此偏转角逐渐减小,这与

图8 $\varepsilon=-1.5$ 射流轨迹和不同 L 对应的经验公式曲线(q_{30})Fig. 8 Jet trajectory at $\varepsilon=-1.5$ and empirical formula curve corresponding to different L (q_{30})

图9 4种工况的 $\varepsilon=-1.5$ 射流轨迹和 $L=41.7$ 时的经验公式曲线Fig. 9 Jet trajectory at $\varepsilon=-1.5$ and empirical formula curve with $L=41.7$ under four operating conditions

文中第2.1节中的分析一致。

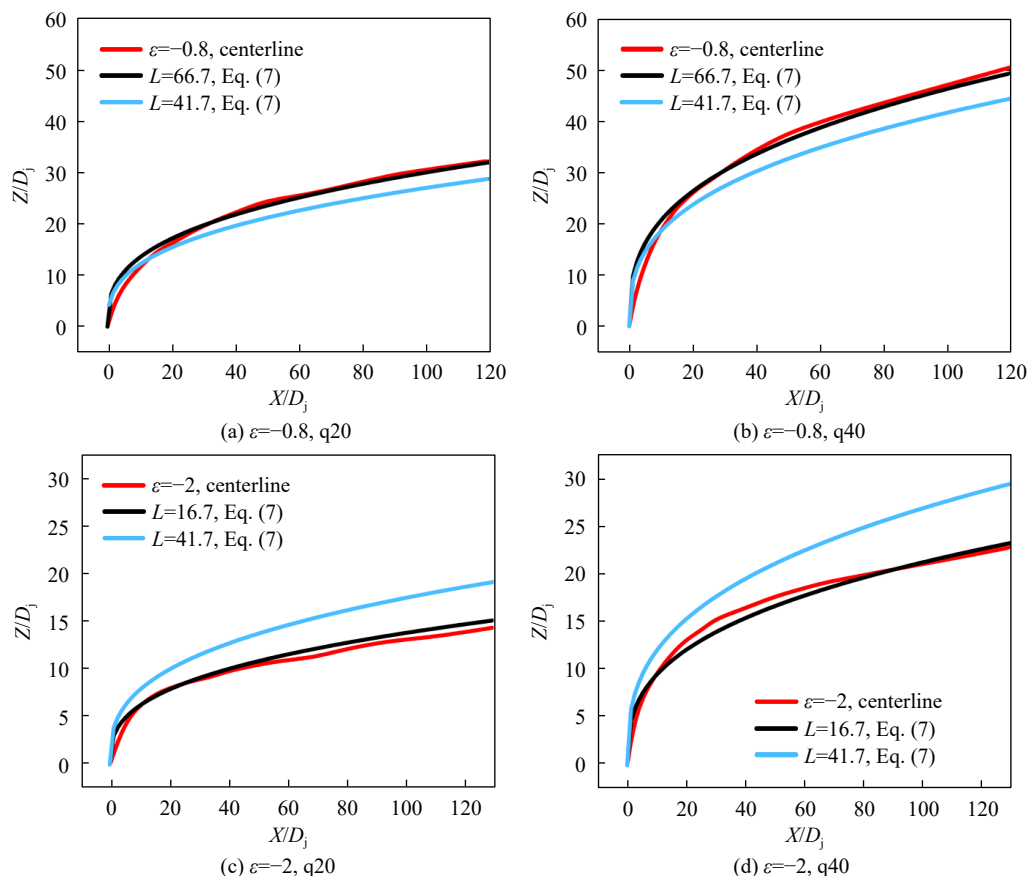
为了检验该方法在负梯度时是否具有普适性,将 $L=41.7$ 时 $\varepsilon=-0.8$ 和 $\varepsilon=-2$ 的平均射流动量比代入式(7)绘制出曲线,与射流轨迹对比后发现两者重合度均较低。 $\varepsilon=-0.8$ 时射流轨迹在公式曲线外侧,而 $\varepsilon=-2$ 时为内侧,且发展趋势有所差异。由于 $\varepsilon=-0.8$ 和 $\varepsilon=-1.5$ 的液体射流条件一致,只能从横流的差异性上分析对 $\varepsilon=-1.5$ 适用的 L 不适用于 $\varepsilon=-0.8$ 的原因:观察图3中 $\varepsilon=-0.8$ 和 $\varepsilon=-1.5$ 两条曲线,通过数学不等关系推导出在任意 Z 轴区间 $(0,n)$ 内前者的平均空气速度小于后者(其中 n 可取 $0\sim60$ 内任意值),而射流之所以会发生偏转,从微观上分析是射流微元段受横向气动力作用产生沿 X 方向的微位移,这些微位移的累积表现在宏观上即射流的偏转,因此前者由于较小的平均空气速度导致较小的微位移累积量,所引起的射流偏转角较小,并产生较大的穿透深度,其受横流影响的范围也较大, L 取值也应偏大。所以, $\varepsilon=-0.8$ 的 L 应大于 $\varepsilon=-1.5$ 。上述分析同样适用 $\varepsilon=-1.5$ 和 $\varepsilon=-2$ 的 L 取值不同的情况。

图10为 $\varepsilon=-0.8$ 和 $\varepsilon=-2$ 时q20和q40射流轨

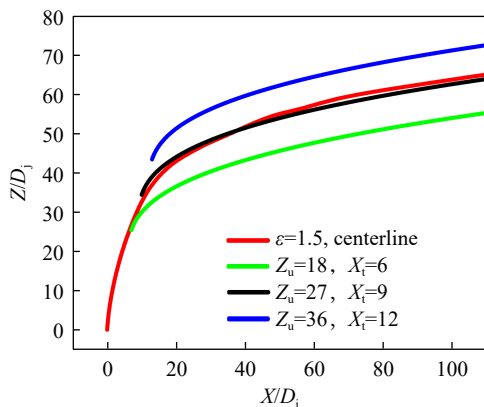
迹和式(7)中 L 取不同值时曲线的对比图。对于 $\varepsilon=-0.8$ 而言,当 L 增大至 $L=66.7$ 即 $L\cdot D_j=40$ mm时两者拟合优度最高,而对于 $\varepsilon=-2$ 而言,当 L 减小至 $L=16.7$ 即 $L\cdot D_j=10$ mm时拟合优度最高,证明了上述分析的正确性。由此说明,在 $\varepsilon=-0.8$ 时仅需考虑从 Z 接近0 mm到 $Z=40$ mm范围内横流对射流的影响,在 $\varepsilon=-1.5$ 时仅需考虑到 $Z=25$ mm范围,在 $\varepsilon=-2$ 时仅需考虑到 $Z=10$ mm范围。综合来看,当不均匀度为负数并不断减小时,对射流起主导作用的横流影响范围也随之减小,且该影响范围与平均射流动量比无关。这是由于负梯度各不均匀度的局部韦伯数和局部气动力的变化趋势不同,导致液体射流破碎模式的转变速率和转变时间不同,但转变方向一致,因此射流轨迹存在些许差异但总体趋势相同。

2.4 正梯度速度分布射流轨迹

与负梯度相同,优先对正梯度中间值 $\varepsilon=1.5$ 进行研究。然而无论式(7)中 L 取何值,曲线与射流轨迹的拟合优度均小于0.8。但在研究过程中发现,将某 L 对应的曲线分别向 Z 方向“抬升”和向 X 方向“平移”一段距离后,与射流轨迹的 R^2 达

图 10 $\varepsilon=-0.8$ 和 $\varepsilon=-2$ 射流轨迹和不同 L 对应的经验公式曲线(q_{20} 、 q_{40})Fig. 10 Jet trajectory at $\varepsilon=-0.8$ and $\varepsilon=-2$ and the empirical formula curves corresponding to different L (q_{20} , q_{40})

到 0.91 如图 11 所示, 图中 Z_u 为式(7)曲线向 Z 方向“抬升”的无量纲距离, X_t 为该曲线向 X 方向“平移”的无量纲距离。说明射流轨迹在某位置后可以用式(7)进行描述, 在该位置前需用新公式进行拟合, 结合文中第 2.1 节的分析, 将 $\varepsilon=1.5$ 的射流轨迹划分为“抬升段”和“偏转段”两部分进行分段

图 11 $\varepsilon=1.5$ 射流轨迹和不同“抬升和平移”对应的经验公式曲线(q_{30})Fig. 11 Jet trajectory at $\varepsilon=1.5$ and empirical formula curve corresponding to different values of “uplift and translation”(q_{30})

拟合。

对于 $\varepsilon=1.5$ 而言, 局部韦伯数沿 Z 方向增大, 射流破碎模式从增强毛细力破碎到袋式破碎最终发展为复合式破碎。Broumand 等^[7]提出, 射流在增强毛细力破碎和袋式破碎过程中主要为表面破碎, 仅少量液滴从表面剥离脱落, 射流仍具有较强的穿透横流的能力, 偏转角较小, 沿 Z 方向的位移较大; 而在复合式破碎过程中主要为柱破碎, 大量液体脱离核心并断裂形成液丝, 射流穿透能力明显减弱, 偏转角较大。因此, 以射流首次发展为复合式破碎(局部韦伯数达到 30)的位置作为“抬升段”和“偏转段”的分界点。依据式(5)推算出分界点空气速度为 55.3 m/s, 结合图 3 可知分界点所在位置为 $Z=19$ mm。用文中第 2.2 节中相同方法构造适用“抬升段”的公式:

$$\left(\frac{Z}{D_j}\right) = 4.01 \bar{q}_{L'}^{0.17} \left(\frac{X}{D_j}\right)^{0.58} \quad (8)$$

将 $Z=L' \cdot D_j=19$ mm 即 $L'=31.7$ 的平均射流动量比代入式(8)所得曲线和 $\varepsilon=1.5$ 的 4 种工况“抬升段”射流轨迹对比, 其 $R^2=0.91$ 。此外, 根据 Broumand

等^[7]提出的柱破碎高度公式算出 $\varepsilon=1.5$ 的柱破碎高度作为“抬升段”曲线边界。由此说明, 对于“抬升段”射流轨迹的预测, 需要考虑整个“抬升段”内全部横流的影响。由图 11 可知“偏转段”射流轨迹可用式(7)进行拟合, 当 $L \cdot D_j = 15 \text{ mm}$ 即 $L=25$ 时式(7)曲线和 $\varepsilon=1.5$ 的 4 种工况“偏转段”射流轨迹的拟合优度最高为 0.89。由此说明, $\varepsilon=1.5$ “偏转段”的射流主要受从分界点到距其 15 mm 范围内的横流影响, 此范围以外横流对射流的影响可忽略不计, 结果如图 12 所示。

为了检验该方法在正梯度时是否具有普适性, 对 $\varepsilon=2$ 的射流轨迹用该方法进行拟合, 结果如图 13 所示。首先算出分界点所在位置为 $Z=22 \text{ mm}$, 将 $Z=L' \cdot D_j=22 \text{ mm}$ 即 $L'=36.7$ 的平均射流动量比代入式(8)获得“抬升段”曲线, 然后用相同柱破碎高度公式算出柱破碎高度作为“抬升段”曲线边界, 其次将 $L \cdot D_j=20 \text{ mm}$ 即 $L=33.3$ 的平均射流动量比代入式(7)获得“偏转段”曲线, 最后将两条曲线组合和 $\varepsilon=2$ 时 q20 和 q30 的射流轨迹对比, 总体拟合优度大于 0.8, 证实该方法对 $\varepsilon=2$ 具有相同的适用性。对于 $\varepsilon=2$ 而言, “抬升段”射流受全部横流

影响的原因与 $\varepsilon=1.5$ 相同, “偏转段”曲线所取 L 偏大的原因与 $\varepsilon=-0.8$ 和 $\varepsilon=-1.5$ 取不同 L 的原因类似。两者间存在异同的原因和负梯度时相同, 与破碎模式的转变速率和时间有关。

然而, $\varepsilon=0.8$ 的分段公式曲线和射流轨迹的拟合优度远小于 0.8, 但当 $L=75$ 即 $L \cdot D_j=45 \text{ mm}$ 时式(7)曲线和射流轨迹拟合优度很高, 如图 14 所示。由此说明, 将不均匀度 $\varepsilon=0$ (即均匀) 作为分段拟合界限的假设是不准确的, 部分 ε 为正数 (即正梯度) 时射流轨迹也可用式(7)进行直接预测。 $\varepsilon=1.5$ 时射流接触横流瞬间局部韦伯数仅为 2.8 尚处于增强毛细力破碎, 直到 $Z=8.6 \text{ mm}$ 处局部韦伯数才跨过 11 进入袋式破碎, 虽然增强毛细力破碎和袋式破碎均以表面破碎为主, 但相对而言射流处于增强毛细力破碎时液滴剥离脱落程度更低, 射流穿透横流的能力几乎不受削弱, 出现一段近乎垂直横流的“初级抬升段” (位于“抬升段”的前端), 迫使对射流轨迹预测时必须进行分段拟合, 而在 $\varepsilon=0.8$ 时射流接触横流瞬间局部韦伯数为 22 处于袋式破碎, 其不存在“初级抬升段”, 射流经过较短时间后局部韦伯数超过 30 进入复合式破碎, 射流

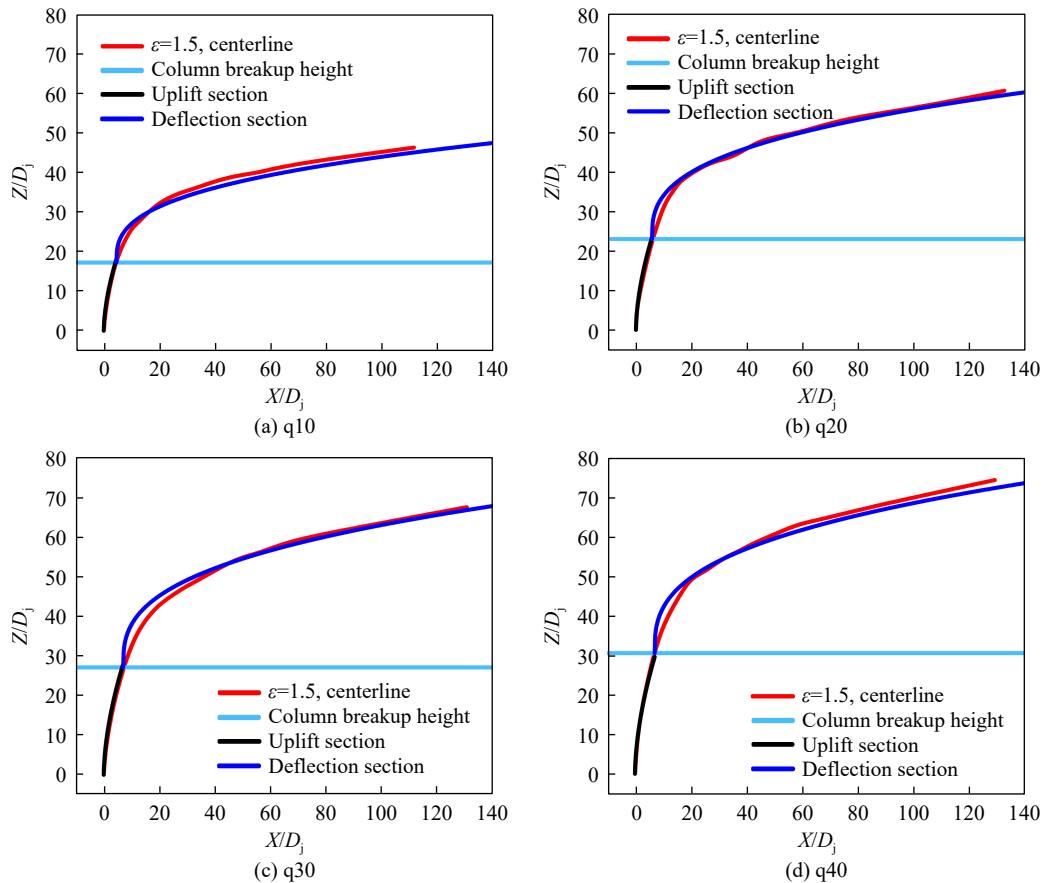
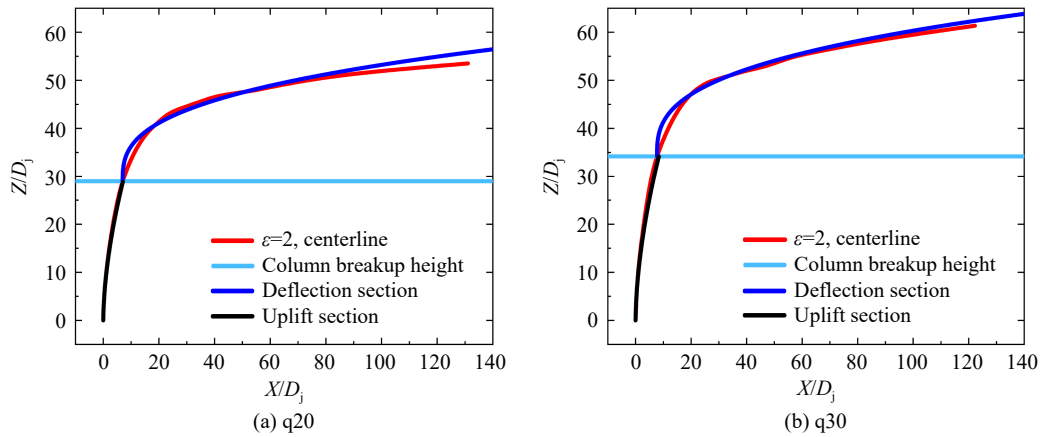
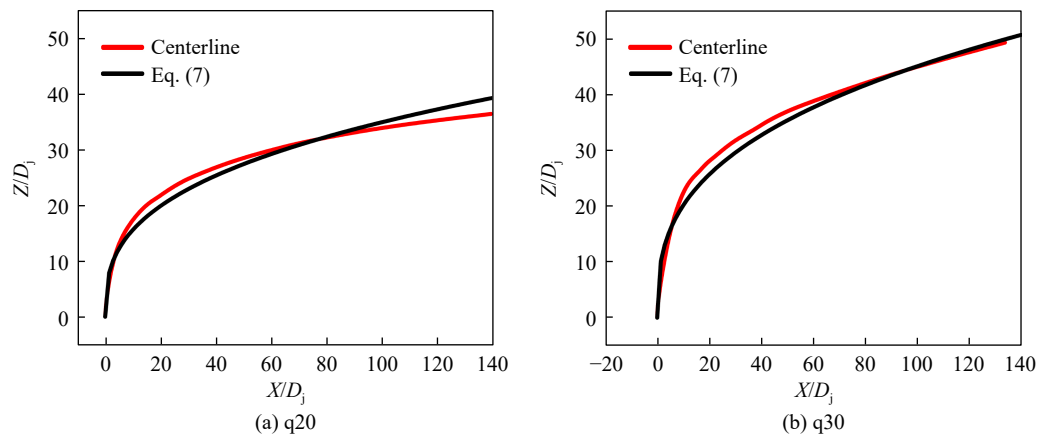


图 12 4 种工况 $\varepsilon=1.5$ 的“抬升段”和“偏转段”射流轨迹和经验公式曲线

Fig. 12 Jet trajectory at $\varepsilon=1.5$ and empirical formula curve of “uplift section” and “deflection section” under four operating conditions

图 13 $\varepsilon=2$ 射流轨迹和分段经验公式曲线(q20、q30)Fig. 13 Jet trajectory at $\varepsilon=2$ and piecewise empirical formula curve (q20, q30)图 14 $\varepsilon=0.8$ 射流轨迹和经验公式曲线(q20、q30)Fig. 14 Jet trajectory at $\varepsilon=0.8$ and empirical formula curve (q20, q30)

只存在一段很短的“抬升段”，所以采用分段拟合的效果不佳。因此，本研究选择以是否存在“初级抬升段”作为判定是否进行分段拟合的准则，而“初级抬升段”只存在于射流接触横流瞬间局部韦伯数小于 11 的条件下，经计算可知，不均匀度大于 1 的速度分布才会存在“初级抬升段”。

综合来看，当不均匀度大于 1 时，射流轨迹采取分段拟合，“抬升段”使用式(8)拟合，“偏转段”使用式(7)拟合，以柱破碎高度作为两段曲线边界，且 L 和 L' 均与不均匀度成正相关；当不均匀度小于 1 时，射流轨迹直接用式(7)拟合。

对于可用式(7)进行直接拟合的速度分布而言，不均匀度和 L 存在正相关关系，这表明：当横流不均匀度小于 1 时，射流主要受距喷嘴出口一定范围内的横流影响，此范围外的横流影响可忽略，且该范围的大小与不均匀度成正相关。因此，将 $\varepsilon=-2$ 至 $\varepsilon=0.8$ 的不均匀度进行处理后，绘制出其与 L 的关系如图 15 所示，蓝色实线代表不均匀度等于 1，红色实线为所有 L 和 $e^{-\varepsilon}$ 点的线性拟合，只

有在蓝色实线上方且处于红色实线上的点方能直接拟合。从图 15 可知，当 $\varepsilon < 1$ 时， ε 越小则 L 越小，即平均射流动量比越小，液体射流在更短时间内发生更为强烈的破碎，这说明局部横流高速区对射流轨迹的影响远大于其他相对低速区，液体射流柱的破碎和解体也主要发生在该高速区，

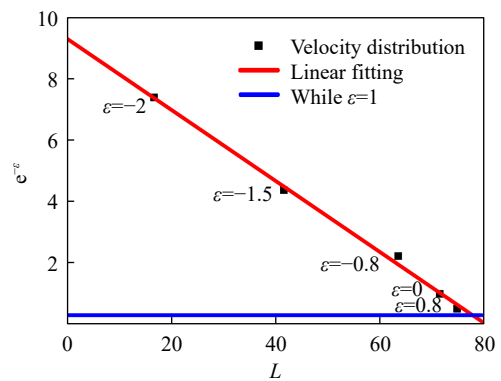


图 15 从 $\varepsilon=-2$ 到 $\varepsilon=0.8$ 的不均匀度和 L 之间的关系图
Fig. 15 Relationship between the relative gradient of $\varepsilon=-2$ to $\varepsilon=0.8$ and L

由此推测在加力燃烧室中创造局部高速区将有利于燃油雾化, 进而提高燃烧性能。

3 结 论

本研究对横流速度分布不均匀条件下的射流轨迹和穿透进行了实验研究和理论分析, 重要参数包括横向气动力、局部射流动量比(q)、局部韦伯数(We)和不均匀度(ε)。结论如下:

1) 横流速度分布为正梯度、均匀、负梯度时射流呈现“平抛”、“斜抛”、“崩坍”的形态, 不均匀度和平均射流动量比都与穿透深度成正相关, 且两者的增减都会改变对方对穿透深度的影响程度。横流速度分布不均匀对液体射流的影响主要体现在破碎模式沿射流流向的转变。

2) 提出表征液体射流受横流影响范围的无量纲参数 L , 并构造常温常压下适用于 $-2 \leq \varepsilon \leq 2$ 且 $10 \leq q \leq 40$ 的射流轨迹经验公式。提出液体射流轨迹和穿透主要受横流局部高速区的影响。

3) 以是否存在“初级抬升段”作为判定是否进行分段拟合的准则。 $\varepsilon < 1$ 时不存在“初级抬升段”, 对射流轨迹的预测主要考虑前端局部横流的影响, 结合经验公式与 L 和 ε 的线性拟合图对射流轨迹进行直接拟合, L 与 ε 成正相关, 与平均射流动量比无关。

4) $\varepsilon > 1$ 时, 射流轨迹采取分段拟合, 以射流首次发展为复合式破碎的位置作为“抬升段”和“偏转段”的分界点, 两段射流轨迹分别使用不同公式进行拟合, 并以柱破碎高度作为两段曲线边界, 对“抬升段”射流轨迹的预测需要考虑整段内全部横流的影响, 而“偏转段”射流主要受前端局部横流的影响, 且 L 和 L' 均与 ε 成正相关。

本研究在前人研究基础上构造出拟合优度较高的针对横流速度分布为斜线型的射流轨迹经验公式, 制定了划分拟合方式的标准。但是由于横流速度分布类型较少, 且实验工况不够多, 经验公式的适用范围还有待进一步拓宽。此后将在更多实验工况和速度分布类型条件下, 完善射流轨迹经验公式。

参考文献:

- [1] AALBURG C, LEER B V, FAETH G M, et al. Properties of non-turbulent round liquid jets in uniform gaseous cross flows[J]. *Atomization and Sprays*, 2005, 15(3): 271-294.
- [2] BECKER J, HASSA C. Breakup and atomization of a kerosene jet in crossflow at elevated pressure[J]. *Atomization and Sprays*,

- 2002, 12(2002): 49-68.
- [3] INAMURA T. Disintegration phenomena of metalized slurry fuel jets in high speed air stream[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. Baltimore, US: International Atomic Energy Agency, 1991: 839-846.
- [4] LEFEBVRE A H, WHITEHEAD J H. Gas turbine combustion[M]. Washington, US: Hemisphere, 1983.
- [5] TAMBE S. Liquid jets in subsonic crossflow[R]. Reno, US: the 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2005.
- [6] TAMBE S. Liquid jets in subsonic crossflow[D]. Cincinnati, US: University of Cincinnati, 2004.
- [7] 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(11): 1-29.
- [8] WU P K, KIRKENDALL K A, FULLER R P, et al. Breakup processes of liquid jets in subsonic crossflows[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1997, 13(1): 64-73.
- [9] BIROUK M, AZZOPARDI B, STBLER T. Primary break-up of a viscous liquid jet in a cross airflow[J]. *Particle and Particle Systems Characterization*, 2003, 20(4): 283-289.
- [10] WANG M, BROUMAND M, BIROUK M. Liquid jet trajectory in a subsonic gaseous cross-flow: an analysis of published correlations[J]. *Atomization and Sprays*, 2016, 26(11): 1083-1110.
- [11] BIROUK M, BROUMAND M. A model for predicting the trajectory of a liquid jet in a subsonic gaseous crossflow[J]. *Atomization and Sprays*, 2015, 25(10): 871-893.
- [12] AHN K, KIM J, YOON Y. Effects of orifice internal flow on transverse injection into subsonic crossflows: cavitation and hydraulic flip[J]. *Atomization and Sprays*, 2006, 16(1): 15-34.
- [13] BIROUK M, IYOGUN C, POPPLEWELL N. Role of viscosity on trajectory of liquid jets in a cross-airflow[J]. *Atomization and Sprays*, 2007, 17(3): 267-287.
- [14] NG C, SANKARAKRISHNAN R, SALLAM K. Bag breakup of nonturbulent liquid jets in crossflow[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2007, 34(3): 241-259.
- [15] FARVARDIN E, JOHNSON M, ALAEE H, et al. Comparative study of biodiesel and diesel jets in gaseous crossflow[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2013, 29(6): 1292-1302.
- [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] STENZLER J N, LEE J G, SANTAVICCA D A, et al. Penetration of liquid jets in a crossflow[J]. *Atomization and Sprays*, 2013, 16(8): 887-906.
- [18] AMIGHI A, ASHGRIZ N. Trajectory of a liquid jet in a high temperature and pressure gaseous cross flow[EB/OL]. [2021-06-01]. <https://asmedigitalcollection.asme.org/gasturbinespower/article-abstract/141/6/061019/368354>.
- [19] PATIL S, SAHU S. Liquid jet core characterization in a model crossflow airblast atomizer[EB/OL]. [2021-06-19]. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301932221001361>.
- [20] JENG S M, TAMBE S, ELSHAMY O M. Liquid jets injected transversely into a shear layer[R]. Reno, US: the 45th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, 2007.
- [21] JENG S M, TAMBE S, ELSHAMY O M. Spray properties of liquid jets injected transversely into a shear layer[R]. Cincinnati, US: the 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2007.
- [22] HAMILTON L. 应用STATA做统计分析[M]. 郭志刚, 译. 重庆: 重庆大学出版社, 2008.