

横向射流破碎机理与雾化特性

李渝丽

山西能源学院机电工程系,山西 晋中 030604

摘要:为增强燃油与空气的混合均匀性,提高横向射流雾化效果,从破碎模式与表面波形成机理、雾化影响因素两方面分析横向射流研究现状,并结合目前研究不足,展望未来发展方向。结果表明:破碎模式由液气动量通量比与韦伯数共同决定;射流柱受瑞利-泰勒(Rayleigh-Taylor, RT)不稳定性及开尔文-赫姆霍兹(Kelvin-Helmholtz, KH)不稳定性共同作用发生变形形成表面波;气液剪切产生KH不稳定性波,使射流主要产生表面破碎;气液挤压产生RT不稳定性波,使射流主要产生柱状破碎;液体韦伯数、液气密度比、射流入射角、射流孔径与孔型、射流模式对液滴雾化均有不同程度的影响,但无法单一定性评价,需结合具体情况分析。未来横向射流研究应尽可能向试验工质、试验条件及环境接近发动机实际燃烧的方向改进,同时,应考虑涡旋、不同脉冲频率及射流波形对横向射流的影响。

关键词:横向射流;破碎机理;雾化特性;表面波

中图分类号:TK401

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2024)06-0013-07

引用格式:李渝丽. 横向射流破碎机理与雾化特性[J]. 内燃机与动力装置, 2024, 41(6): 13-19.

LI Yuli. The breakup mechanism and atomization characteristics of lateral jet [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024, 41(6): 13-19.

0 引言

横向射流主要研究液体射流垂直或以一定角度进入横向气流后,液体射流在气流的作用下发生变化的过程,是流体力学的一个重要研究领域。在燃气涡轮发动机、压燃冲压发动机、超燃冲压发动机等燃烧室中,燃油通常以横向射流的形式喷入,通过射流(液体)与横流(气体)的相互作用使发动机燃油雾化,在燃烧过程的初始阶段,燃油雾化效果直接影响燃油燃烧:雾化液滴越小,分布越均匀,燃烧越充分,发动机性能越稳定。研究燃油在横向气流中的破碎机理和雾化特性对提高发动机燃烧效率和燃烧稳定性有重要意义,对改进发动机设计有一定的参考价值^[1]。

液态燃油以射流的形式喷入横向气流中,在气流剪切和加速作用下,燃油射流弯曲、变形、破碎、雾化,发生从毫米级到微米级的多尺度变形,最终形成微米级粒径的液滴。在射流破碎及雾化过程中,液体射流可分为破碎区、快速雾化区、均匀混合区。射流近场表面波使破碎区内同时发生液柱破碎和表面破碎,并在气流加速、气液剪切耦合作用及连续液柱的阻碍作用下,气体流场由稳定结构变成复杂涡系流场结构,流场的非定常特征(横流的压强、速度、马赫数)与气液界面的动态变化相互耦合;液块或大液滴在快速雾化区迅速破碎雾化,形成微米级粒径的大量小液滴;在强气液剪切作用下,均匀混合区雾化后的小液滴向横流方向扩散混合,在下游(射流与横流碰撞混合处,沿射流方向的部分),液态燃油蒸发形成的燃油蒸气与气流中氧气以一定比例混合,混合效果决定发动机燃烧性能^[2-3]。

横向射流效果与较多因素相关,研究人员主要对射流破碎机理、雾化特性、流场特征进行了大量试验与数值模拟研究,目前在横向射流试验研究方面,研究人员通常采用脉冲阴影成像法、粒子图像测速法、

收稿日期:2024-10-10

作者简介:李渝丽(1994—),女,山西忻州人,工学硕士,助教,主要研究方向为新能源汽车节能与利用,E-mail:18334727961@163.com。

相位多普勒粒子分析法、高速摄影仪法等;在横向射流数值模拟方面,主要采用流体体积(volume of fluid, VOF)法、离散(discrete phase model, DPM)法、VOF-DPM法等两相流模型。VOF法基于欧拉-欧拉框架,可直接计算两相之间的界面位置,在一定的网格精度上,结合自适应网格加密(adaptive mesh refinement, AMR)技术可大幅提高计算精度;DPM法基于欧拉-拉格朗日框架,可以较好的对液滴分布、液滴尺寸等进行直接观测,在雾化液滴相关状态的表达上优于VOF法;VOF-DPM法兼顾VOF法与DPM法的优势,在一次雾化时(射流近场处)侧重VOF法,在二次雾化时(射流远场处)侧重离散法^[4]。

为更好地理解横向射流破碎机理与雾化特性,增强气液间的混合效果,提高发动机燃烧性能,本文中通过分析横向射流破碎模式、表面波与不稳定性、雾化影响因素,对当前横向射流破碎机理及雾化特性进行归纳与总结,对未来横向射流的发展提出展望。

1 研究基础

1.1 破碎模式

横向射流过程中,射流会产生不同的破碎模式,主要有柱状破碎、袋式破碎、多模式破碎、表面破碎。王雄辉等^[5]以水为试验工质,采用高速摄影仪记录了圆柱射流在速度为25.2~37.2 m/s横流中的袋式破碎过程,研究发现:袋(射流的一种结构)的触发长度与 $\ln(q/Re)$ (q 为液气动量通量比, Re 为雷诺数)呈线性关系;袋的触发时间为常数,液柱破碎长度与韦伯数 We 线性相关;破碎位置的纵坐标与 $\ln q$ 呈线性关系,破碎位置横坐标随液气动量通量比增大轻微降低,可认为横坐标恒定。

Sallam等^[6]使用脉冲阴影照相技术和全息照相技术,研究了圆形非湍流液体射流在速度为11~142 m/s横流中的一次破碎,发现圆形非湍流液体射流在气体横流中的初始破碎与 We 关系密切: $We=0$,无破碎; $We=3$,柱状破碎; $We=8$,袋式破碎; $We=30$,多模式破碎; $We=220$,表面破碎。

Wu等^[7]借助脉冲阴影成像技术,在不同喷注液体、射流孔径、来流马赫数等参数下,对液体射流在空气横流中的破碎过程进行试验研究,结果表明:横流作用于液滴和液柱上的气动力效果类似,液柱柱状破裂前已出现表面破碎,液柱总是在同一流向上的位置破裂,射流入射速度与射流穿透深度呈正相关。

兰天等^[8]以水为试验工质,采用高速摄像机记录液体射流在速度为5~45 m/s横流中的破碎过程,分析不同无量纲参数(雷诺数、韦伯数等)对一次破碎与穿透轨迹的影响规律,结果表明:低速横流时,液体射流破碎模式主要有柱状破碎和袋式破碎,液气动量通量比和液体韦伯数影响射流破碎模式:液体韦伯数较高、液气动量通量比较低时,主要为袋式破碎;液体韦伯数较低、液气动量通量比较高时,主要为柱状破碎。

张彬等^[9]以水为试验工质,采用背景光成像技术及VOF-DPM法对液体横向射流在气膜作用下的破碎过程进行试验和仿真研究,结果表明:在气膜作用下,液柱主要有柱状破碎、表面破碎两种破碎模式;瑞利-泰勒(Rayleigh-Taylor, RT)不稳定性主要发生在射流迎风面,是产生柱状破碎的主要原因;开尔文-赫姆霍兹(Kelvin-Helmholtz, KH)不稳定性主要发生在剪切面两侧,是产生表面破碎的主要原因;随着局部液气动量通量比增大,液柱破碎主要由RT不稳定性波转变为KH不稳定性波,液体射流的破碎长度及穿透深度均增大。

综上所述,横向射流的破碎模式主要有柱状破碎与袋式破碎,破碎模式由液气动量通量比与韦伯数共同决定,当破碎模式为袋式破碎时,袋的触发长度由液气动量通量比与雷诺数决定;破碎位置纵坐标与液气动量通量比关系密切,横坐标可认为常数。液柱破碎模式与液气动量通量比相关,液气动量通量比增大,液柱破碎模式由柱状破碎转变为表面破碎。

1.2 表面波与不稳定性

Ng等^[10]采用脉冲摄影、脉冲阴影照相和高速成像技术,研究了圆形非湍流液体射流在速度为10~20 m/s的横流中的液柱、表面波及袋的形成和分解,结果表明,RT不稳定性是液体射流产生表面波的主要原因。

刘日超等^[11]利用大涡模拟(large eddy simulation, LES)结合VOF法研究了液体射流柱在横流中的变形、弯曲以及破碎过程,发现射流柱受RT不稳定性和KH不稳定性的共同作用发生变形,形成表面波;随着细小液滴的脱落,射流柱后方的气流成涡状结构,射流柱同时存在RT表面波和KH表面波;横流作用下,射流柱迎风面挤压并剪切背风面,导致射流柱背风面上形成大量细小液滴。

Nambu等^[12]对燃气轮机发动机燃烧室液体射流在气流中的一次破碎进行数值模拟,结果表明:RT不稳定性主要发生在液柱边缘;当液气密度比或韦伯数较低时,RT不稳定性不显著;通常射流上游雾化液滴直径偏大,下游雾化液滴直径偏小,当RT不稳定性显著时,韧带(液体破碎时的结构)尺寸减小,雾化液滴尺寸分布发生明显变化。

Behzad等^[13]采用直接数值模拟(direct numerical simulation, DNS)研究等温条件下,非湍流液体射流横向进入高压气体后横流表面破裂的物理机制。结果表明,射流外围存在的剪切失稳是主要失稳机制,由于该失稳机制是一种无黏性机制,导致形成界面波,使射流表面最终被剪切成片状结构。

Chang等^[14]以水为试验工质,在结合耦合液位集和流体体积(coupled level set and volume of fluid, CLSVOF)界面跟踪法、AMR技术的基础上,采用LES研究液体横向射流的一次雾化。结果表明:气液剪切作用产生KH不稳定波,KH不稳定表面波是造成射流柱表面破碎的主要原因;气液挤压产生RT不稳定波,RT不稳定表面波是造成射流柱柱状破碎的主要原因,直至射流柱产生圆柱形断裂;沿射流方向RT不稳定表面波波长增加。

Mukundan等^[15]采用DNS和LES研究液体射流进入气体横流的初级雾化特性,DNS计算结果表明液体射流柱的迎风侧形成的不稳定性产生的表面波沿射流方向增长,形成袋状结构后破裂,产生不同直径的液滴,称为柱-袋破碎;LES计算结果表明韧带从液体柱的两侧剥离,直至表面破裂成液滴,称为韧带-表面破裂;DNS和LES雾化特性同步。

Xiao等^[16]以水为试验工质,采用水平集方法(level set method, LSM)和VOF耦合,模拟常压下轴对称液体射流进入空气横流的一次破裂过程,结果表明:预测射流波长随气体韦伯数的增加而减小,即RT不稳定性产生表面波;随着RT不稳定性增加,波谷中的气体涡旋增多,增强液核破碎;湍流液体决定了液体射流初始不稳定性及界面特性,下游湍流液体射流比非湍流射流破碎更混乱。

朱英等^[17]以水为试验工质,采用高速摄像机记录圆柱射流在速度为25.6~35.1 m/s横流中表面波的变化,结果表明:气动作用下,射流表面波由初始蛇形波动转变为螺旋状,达到一定程度后断开;随着横流速度增大,射流表面的主要作用力由表面张力变为气动力,表面波幅值与射流轨迹脉动幅值均增大。

综上所述,对于横向射流表面波与不稳定性的研究,主要结论有:射流柱受RT不稳定性和KH不稳定性共同作用发生变形形成表面波,气液剪切产生KH不稳定波,主导表面破碎;气液挤压产生RT不稳定波,主导射流柱状破碎;随着局部液气动量通量比增大,射流柱由RT不稳定性主导转变为KH不稳定性主导;气体韦伯数与液体射流表面波波长呈负相关。

2 雾化影响因素

近年来研究人员对韦伯数、射流入射角、射流孔径及孔型、脉冲射流、湍流射流等因素进行横向射流雾化试验与数值模拟研究,提高雾化效果,对改进发动机燃烧室提供理论参考。

2.1 特征参数

研究人员研究发现液体韦伯数与液气密度比对液滴尺寸、液滴表面波、涡旋的发展与形态等产生影响。王雄辉等^[18]以水为试验工质,采用高速摄像机记录圆柱射流在速度为18.3~37.2 m/s的横流中柱状破碎过程,发现气体韦伯数的对数与液滴直径呈正相关,与液体射流表面波波长呈负相关;液滴初始纵向速度为射流速度的94%,初始纵向速度为射流速度的8.5%。

Wen等^[19]采用欧拉-拉格朗日方法模拟燃油射流在喷嘴附近的雾化-蒸发过程,发现气体韦伯数明显影响射流初级破碎和液柱涡旋发展、形态,随着气体韦伯数增加,表面破碎代替袋式破碎占主导地位,

导致下游液滴尺寸减小。

Li 等^[20]采用 CLSVOF 和 AMR 技术,研究空气密度增大时,液气密度比对液滴雾化的影响,结果表明:液气密度比影响液滴穿透深度和轨迹;随着液气密度比减小,形成表面波的主要原因由 RT 不稳定性转变为 KH 不稳定性;下游出现反向涡对(counter-rotating vortices pair, CVP)使雾化效果降低,液滴索特平均直径(Sauter mean diameter, SMD)增大。

Jadidi 等^[21]采用 LES、VOF 与 AMR 结合的方法,研究液气密度比对气体横流中非湍流液体射流轨迹的影响,结果表明:随着液气密度比的增大,液滴穿透高度增大,且远场液滴变化明显。

Herrmann 等^[22]采用改进的水平集网格与小尺度液滴转化为拉格朗日点粒子的方法,在液气动量通量比、液体韦伯数、气体韦伯数、雷诺数等其他特征参数不变的情况下,研究液气密度比对湍流射流在横流穿透和雾化过程的影响,结果表明:液气密度比增大使射流穿透明显增加,同时使射流粒径分布发生变化,一次雾化使射流速度在横向(横流 x 方向)和纵向(射流 y 方向)发生变化,展向(翼展 z 方向)几乎没有变化。

2.2 射流入射角

为了探究横流和喷雾的雾化机理,孙慧娟等^[23]采用粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)技术对比分析了射流在速度为 25.6~35.1 m/s 的横流中不同入射角、液气动量通量比下,旋流喷嘴射流在矩形空间内产生的掺混流场,结果表明:在撞击、剪切和壁面约束作用下产生的前缘涡与 CVP 是液气掺混的主要原因;顺流入射角与液气动量通量比减小均有利于两相掺混及液滴的分布均匀性。

Almeida 等^[24]以水为试验工质,采用阴影照相技术与激光多普勒测速仪分析不同射流入射角对雾化的影响,研究发现:液柱破碎受射流入射角的影响明显,受液气动量通量比的影响较小;逆流入射角增大, SMD 明显减小,利于液滴均匀分布;液滴与喷嘴的距离增大,液滴直径和速度分布产生明显变化。

2.3 液滴孔径与孔型

Jadidi 等^[25]利用阴影技术对气体横流中圆形和椭圆形液体射流的破碎进行了试验研究,结果发现椭圆形射流孔长宽比(椭圆形长度与宽度的比)可以明显改变液体穿透高度,且椭圆射流比圆形射流出现柱状破裂位置的时间早;射流轨迹、袋的起始长度和液柱断裂位置取决于射流孔长宽比、气体韦伯数和液气动量通量比。

周毅等^[26]采用 PIV 技术及 MATLAB 图像处理方法,对横向燃油射流在速度为 4 m/s 的气流中的喷雾轨迹进行试验研究,结果表明:射流压力、温度、孔径及入射压力对燃油穿透深度均有不同程度的影响,其中射流孔径、喷注压力与穿透深度呈正相关,射流压力、温度与穿透深度呈负相关。

Olyaei 等^[27]对不同喷嘴结构液体射流在横流中的一次破碎特性进行试验研究,根据气体韦伯数确定不同的裂解方式,结果表明:与圆形射流相比,非圆形射流(矩形射流)表现出更强的不稳定性及更快的破碎机制变化;在横流中,同向布置的射流比正交布置的射流更容易穿透;轴切换(同向布置或正交布置)决定了模式转换的区域、射流高度、长度以及袋的不同形态。

叶泽^[28]采用仿真模拟与试验相结合的方法,分析超音速横流中的燃油射流,发现射流孔径增大,射流夹角、激波夹角、穿透深度及射流对流场的阻塞作用均增大;液滴速度减小,液滴直径增大。

Yu 等^[29]采用脉冲激光背景成像法和高速喷雾粒径分析仪,研究圆孔射流和椭圆孔射流在超声速横流中的破碎模式和液滴直径分布,结果表明:随着入射压力增加,椭圆孔射流与圆孔射流穿透深度的差异减小,椭圆孔产生射流表面波的数量大于圆孔射流,椭圆孔射流表面波长度小于圆孔射流。

Zhou 等^[30]采用 CLSVOF 方法研究不同椭圆形射流孔长宽比的液体射流过程,结果表明:长宽比增大,射流穿透深度减小;长宽比减小,椭圆射流破裂长度减小;模拟结果明显出现两对 CVP。

2.4 脉冲射流与湍流射流

Elshamy 等^[31]采用锁相 PIV 技术测量空气横流下脉冲射流喷嘴口附近的瞬时液滴速度,结果表明:最佳斯特劳哈尔数 St 约为 0.0047,脉冲激励可能使射流穿透深度增大 40% 以上,射流尺寸为入射孔直径十倍的下游处扩散分布增加 100%;结合液气动量通量比、韦伯数、环境压力、动量通量比变化率、激发

频率等参数可预测喷雾内外边界;横流脉冲射流可以实现更大的穿透力和良好的液气混合雾化。

Lee 等^[32]采用高速电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)摄像机,结合相位多普勒粒子测速仪(phase doppler particle anemometry, PDPA)进行脉冲空气辅助液体射流的液柱雾化试验研究,结果表明,脉动空气频率对射流穿透深度、横向速度和液滴尺寸有影响;随着脉冲频率的增加,射流雾化效果更好;空气辅助射流对雾化过程并没有太大改善;脉冲射流频率超过 10 Hz 时产生连续液柱,频率低于 10 Hz 时液柱进行振荡运动。

Lee 等^[33]利用液体射流机械调制装置,对调制液体射流(入射速度变化)进入速度为 5~143 m/s 的横流进行试验研究,并结合 PDPA 测量不同喷雾截面上的液滴直径和液滴速度,结果表明:液滴入射频率为 35.7 Hz 时,入射器底部压力产生周期性正弦波式振荡,压力依次为 94.9、86.5 kPa,正弦波式振荡可提高液气混合效果;喷射周期为 28 ms 时,射流轨迹产生周期振荡。

Johari 等^[34]采用平面激光诱导荧光(planar laser-induced fluorescence, PLIF)技术研究调制的、不可压缩的湍流射流在横流中的变化规律。PLIF 技术可用于可视化入射的对称面,确定脉冲入射的穿透深度、稀释率和结构特征。结果表明:占空比在很大程度上决定了液气流动结构、渗透混合特性;在一定入射时间内,改变脉冲间隔和占空比是控制入射轨迹和液气混合的有效策略,可在最佳脉冲条件下,产生强大、分离良好的涡环,实现射流最大穿透深度。

Chang 等^[35]采用 $k-\varepsilon$ 模型仿真对比 $Re=100$ 时,二维经典射流和脉动射流在横流中的变化规律,并分析了不同 Sr 下脉动射流间的差异和联系,研究表明: Sr 恒定时,液气速度比增大可使射流迅速进入湍流模式;对比经典横向射流,脉动射流的穿透力更高,近场的流线轨迹表现出非常强的不稳定性,且随着 Sr 增大,不稳定性增大。

Prakash 等^[36]采用高速成像和阴影照相技术研究不同射流喷嘴结构下,射流在横流中的变化规律。通过调整喷嘴长径比(长度与直径的比)得到射流层流、过渡流和湍流模式,结果表明:对比层流射流,湍流射流轨迹较低、雾化效果更好、产生更小的液滴;层流射流和湍流射流下均有多种破裂模式。

综上所述,射流特征参数、入射角、液滴孔径孔型、湍流、脉冲射流与湍流射流影响液滴破碎位置、液滴尺寸、穿透深度,最终影响液滴雾化效果;相较于圆孔射流,椭圆孔射流更容易解体,液滴破碎更早;气流韦伯数的对数与液滴直径呈正相关;顺流入射角减小、逆流入射角增大均有利于液滴的均匀分布与两相掺混效果;相对于层流射流,湍流射流可以产生更小的液滴,雾化效果也更好;射流速度、入射压力、入射孔长宽比、脉冲射流斯特劳哈尔数、液气动量通量比及液气密度比均影响穿透深度,需结合具体情况进行分析。

3 结束语

目前,研究人员关于横向射流破碎机理、表面波不稳定性、雾化影响因素做了大量研究,但还存在一些不足,可从以下方面改进。

1) 研究多采用水作为工质进行横向射流研究,实际燃烧室中液体射流为燃油,燃油与水的密度、表面张力、黏性力等性质不同,导致韦伯数、雷诺数、液气动量通量比等参数不同,影响射流雾化研究结果。在后续的研究中,应采用实际使用液体为工质,使研究结果严谨、准确。

2) 射流雾化影响因素试验研究方面,目前试验研究中未充分考虑发动机燃烧室工作条件造成的影响,在后续研究中,试验条件(如反压、总温等)应更接近发动机燃烧室真实状态,试验环境(如凹腔、发动机扩张段、激波发射器等)应参考发动机真实三维构型。

3) 采用 VOF-DPM 方法对横向射流的研究较少,后期研究中可采用这种方法为主。

4) 横向射流中涡旋的形成、卷吸、掺混等过程对气液混合影响较大,对横向射流尤为重要,但目前对涡旋的研究较少,可在后续研究中加强对涡旋的产生、发展和演变等流动特性研究,从而对超燃冲压发动机的液态燃油燃烧、射流控制等工程应用有着非常重要的参考意义。

5) 研究大多采用多个频率对比确定最优频率的方法研究脉冲射流, 但关于脉冲射流频率与射流流场间的内在联系研究较少; 同时, 研究人员大多采用正弦波形作为脉冲射流输入, 可在后续研究中对比较研究不同波形下, 脉冲射流对雾化的影响。

参考文献:

- [1] 李春. 超声速横向气流中液体射流表面波及射流破碎机理研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020.
- [2] 吴里银. 超声速气流中液体横向射流破碎与雾化机理研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [3] 周涛涛, 唐志全, 王辰, 等. 基于VOF-DPM的横向射流雾化过程数值模拟[J]. 内燃机与动力装置, 2024, 41(4): 1-10.
- [4] 李佩波. 超声速气流中横向喷雾的混合及燃烧过程数值模拟[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
- [5] 王雄辉, 黄勇, 王方, 等. 横向气流中液体射流袋式破碎机理[J]. 推进技术, 2012, 33(2): 198-204.
- [6] SALLAM K A, AALBURG C, FAETH G M. Breakup of round nonturbulent liquid jets in gaseous crossflow[J]. AIAA Journal, 2004, 42(12): 2529-2540.
- [7] 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.
- [8] 兰天, 孔令真, 陈家庆, 等. 低速横流作用下液体射流初次破碎实验[J]. 化工进展, 2020, 39(4): 1282-1291.
- [9] 张彬, 成鹏, 李清廉, 等. 液体横向射流在气膜作用下的破碎过程[J]. 物理学报, 2021, 70(5): 230-241.
- [10] NG C L, SANKARAKRISHNAN R, SALLAM K A. Bag breakup of nonturbulent liquid jets in crossflow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2008, 34(3): 241-259.
- [11] 刘日超, 乐嘉陵, 杨顺华, 等. 亚声速横向气流中液体射流破碎过程的直接模拟[J]. 推进技术, 2016, 37(11): 2135-2141.
- [12] NAMBU T, MIZOBUCHI Y. Detailed numerical simulation of primary atomization by crossflow under gas turbine engine combustor conditions[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(2): 3213-3221.
- [13] BEHZAD M, ASHGRIZ N, KARNEY B W. Surface breakup of a non-turbulent liquid jet injected into a high pressure gaseous crossflow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2016, 80: 100-117.
- [14] CHANG J L, CHEN L H, HE L J, et al. Numerical simulation of primary atomization process of liquid jet in subsonic crossflow[J]. Energy Reports, 2022, 8(S4): 1-15.
- [15] MUKUNDAN A A, TRETOLA G, MÉNARD T, et al. DNS and LES of primary atomization of turbulent liquid jet injection into a gaseous crossflow environment[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(2): 3233-3241.
- [16] XIAO F, DIANAT M, MCGUIRK J J. Large eddy simulation of liquid-jet primary breakup in air crossflow[J]. AIAA Journal, 2013, 51(12): 2878-2893.
- [17] 朱英, 黄勇, 王方, 等. 横向气流中的液体圆形射流破碎实验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(10): 2261-2266.
- [18] 王雄辉, 黄勇, 王方, 等. 横向气流中液体圆柱射流的破碎特性和表面波现象[J]. 航空动力学报, 2012, 27(9): 1979-1987.
- [19] WEN J, HU Y, NAKANISHI A, et al. Atomization and evaporation process of liquid fuel jets in crossflows: a numerical study using Eulerian/Lagrangian method[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 129: 103331.
- [20] LI X Y, SOTERIOU M C. Detailed numerical simulation of liquid jet atomization in crossflow of increasing density[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2018, 104: 214-232.
- [21] JADIDI M, DOLATABADI A. On the trajectory of nonturbulent liquid jets in subsonic crossflows at different density ratios[J]. Theoretical & Applied Mechanics Letters, 2018, 8(4): 277-283.
- [22] HERRMANN M. The influence of density ratio on the primary atomization of a turbulent liquid jet in crossflow[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2010, 33(2): 2079-2088.
- [23] 孙慧娟, 刘利, 张海滨, 等. 横流中喷雾掺混流场结构研究[J]. 推进技术, 2012, 33(2): 221-226.
- [24] ALMEIDA H, SOUSA J M M, COSTA M. Effect of the liquid injection angle on the atomization of liquid jets in subsonic crossflows[J]. Atomization and Sprays, 2014, 24(1): 81-96.
- [25] JADIDI M, SREEKUMAR V, DOLATABADI A. Breakup of elliptical liquid jets in gaseous crossflows at low Weber numbers[J]. Journal of Visualization, 2019, 22(2): 259-271.

- [26] 周毅,何小民,章宇轩. 高速高温空气横向射流条件下直射式喷嘴燃油轨迹研究[J]. 航空发动机,2020,46(1):44-48.
- [27] OLYAEI G, KEBRIAE A. Experimental study of liquid jets injected in crossflow[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*,2020,115:110049.
- [28] 叶泽. 超燃冲压发动机射流破碎雾化特性研究[D]. 镇江:江苏大学,2020.
- [29] YU S H, YIN B F, BI Q S, et al. The influence of elliptical and circular orifices on the transverse jet characteristics at supersonic crossflow[J]. *Acta Astronaut*,2021,185:124-131.
- [30] ZHOU Y Z, XIAO F, LI Q L, et al. Simulation of elliptical liquid jet primary breakup in supersonic crossflow[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*,2020(10):6783038. 1-6783038. 12.
- [31] ELSHAMY O M, TAMBE S B, CAI J, et al. Excited liquid jets in subsonic crossflow[C]//*Proceedings of 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. Reno, USA: AIAA, 2007.
- [32] LEE I C, KANG Y S, KOO J. Mixing characteristics of pulsed air-assist liquid jet into an internal subsonic cross-flow[J]. *Journal of Thermal Science*,2010,19(2):136-140.
- [33] LEE I C, KANG Y S, MOON H J, et al. Spray jet penetration and distribution of modulated liquid jets in subsonic crossflows[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*,2010,24(7):1425-1431.
- [34] JOHARI H, PACHECO-TOUGAS M, HERMANSON J C. Penetration and mixing of fully modulated turbulent jets in crossflow[J]. *AIAA Journal*,1999,37(7):842-850.
- [35] CHANG J L, SHAO X D, LI J M. Flow characteristics of two dimensional classical and pulsating jet in crossflow at low Reynolds number[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*,2018,12:655-665.
- [36] PRAKASH S R, SINHA A, TOMAR G, et al. Liquid jet in crossflow: effect of liquid entry conditions[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*,2018,93:45-56.

The breakup mechanism and atomization characteristics of lateral jet

LI Yuli

Mechatronics Engineering, Shanxi Institute of Energy, Jinzhong 030604, China

Abstract: In order to enhance the uniform of fuel and air mixing and improve the atomization effect of lateral jet, the current research status of lateral jet is analyzed, The discussion is carried out from two aspects: the breakup mode and the mechanism of surface formation, and the influencing factors of atomization. Moreover, the future research directions are prospected in view of the current research shortcomings. The results show that the breakup is determined by the ratio of liquid to gas momentum flux and the Weber number. The jet column is deformed by the combined action of Rayleigh-Taylor (RT) and Kelvin-Helmholtz (KH) instability form surface waves. The gas-liquid shear generates KH instability waves, causing the jet to mainly break up on the surface. The gas-liquid squeeze generates RT waves, causing the jet to mainly break up in a columnar manner. The liquid Weber number, the ratio of liquid to gas density, the injection angle of jet, the diameter and shape of the jet orifice, and the jet mode all have different effects on the atomization of droplets. However, it is to make a single qualitative evaluation, and specific situations need to be analyzed in combination. Future research on lateral jets should be improved as much as possible towards the combustion conditions of engines, while considering the impact of vortices, different pulse frequencies, and jet wave forms on lateral jets.

Keywords: lateral jet; breakup mechanism; atomization characteristics; surface wave

(责任编辑:胡晓燕)