横流作用下气液两相环状流射流液膜的 雾化特性实验研究^{*}

张海滨, 白博峰

(西安交通大学 化学工程与技术学院 动力工程多相流国家重点实验室,陕西西安 710049)

摘 要:为了更好地认识横向气流对气液两相环状流射流雾化过程的影响,采用高速摄像等技术, 针对气液两相环状流射流液膜在横向气流中的破碎与雾化特性开展了实验研究。研究发现,气液两相环 状流射流在横流作用下能够实现稳定的雾化,射流液膜的破碎与雾化具有周期性和不连续性特征;查清 了雾化过程中射流液膜存在三种不同的破碎模式:爆式破碎、分段式破碎和环膜破碎,并对每种破碎模 式下的液膜破碎特征进行了研究;结合实验结果统计分析,获得了射流液膜不同破碎模式的动力学条件 和变化规律;同时对环状流射流液膜不同破碎阶段的雾化液滴的粒径分布进行了统计分析,发现三种破 碎模式下,液膜的爆式破碎产生的雾化液滴粒径更小,雾化效果较好,同时提高环状流表观气速和横流 速度也能够促进射流液膜的雾化。

关键词:环状流射流;横流;破碎与雾化;破碎模式;液滴;高速摄像 中图分类号: V211.1 文献标识码:A 文章编号:1001-4055 (2021) 09-2054-08 DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200063

Experimental Study on Liquid Film Atomization of Gas-Liquid Annular Flow Jet in Crossflow

ZHANG Hai-bin, BAI Bo-feng

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to better understand the effects of the crossflow on the atomization of the gas-liquid annular flow jet, the characteristics of the breakup and atomization of the liquid film of the gas-liquid annular flow jet in the crossflow were experimentally investigated by using high speed photography technology in the present work. It is found that the gas-liquid annular flow jet can realize stable atomization in the crossflow, and the breakup and atomization of the jet liquid film have the features of periodicity and discontinuity. Three distinct breakup modes for the annular flow jet liquid film are clarified, namely the burst breakup mode, the segmental breakup mode and the annular flow jet liquid film of the conditions for different breakup modes of the jet liquid film are obtained based on experimental statistical analysis. Furthermore, the diameter distributions of the droplets that came from different breakup stages of the liquid film of the annular flow jets are statistically analyzed quantitatively and the results show that among the three breakup modes, the burst breakup of the jet liquid film will produce more small-

基金项目:国家自然科学基金(51876167;51306146)。

^{*} 收稿日期: 2020-03-23;修订日期: 2020-05-18。

通讯作者:张海滨,博士,副教授,研究领域为射流掺混理论与强化技术。

引用格式:张海滨,白博峰. 横流作用下气液两相环状流射流液膜的雾化特性实验研究[J]. 推进技术, 2021, 42(9):2054–2061. (ZHANG Hai-bin, BAI Bo-feng. Experimental Study on Liquid Film Atomization of Gas-Liquid Annular Flow Jet in Crossflow[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(9):2054–2061.)

er droplets and achieve the best atomization quality. In addition, the increase in the superficial gas velocity of the annular flow as well as the velocity of the crossflow can also improve the atomization performance of the annular flow jet liquid film.

Key words: Annular flow jet; Crossflow; Breakup and atomization; Breakup mode; Droplet; High speed photography

1 引 言

射流掺混是一种强化射流工质与外部主流体之 间流动与传热的重要方式,在能源、化工及国防领域 热动力推进技术中具有广泛应用,如水冲压及氢氧 能源鱼雷发动机中掺混增质、涡喷发动机进气道射 流预冷、重型燃气轮机加湿、液体燃料燃烧等[1-2]。气 液两相环状流射流是一种特殊形式的两相流射流, 在横向气流环境中,环状流射流液膜受到内部同向 剪切气流和外部切向气流的共同作用,两股交错气 流作用于液膜内外表面,显著增强液膜的不稳定,从 而强化液膜的破碎与雾化,实现与横向气流的高效 掺混。这一特点使其在相关过程中具有明显应用优 势,如在新型氢氧能源发动机中,通过合理调控射流 工质,将燃烧室壁面冷却和后期射流掺混过程相统 一,使冷却工质经壁面吸热相变从而在掺混室进口 变为气液两相环状流射流,可有效简化射流工质供 应系统,解决常规气液分级多路射流掺混所带来的 结构复杂和效率不高的难题[3]。此外,在湿化燃气轮 机循环系统中,可利用燃气透平出来的部分高温气 体直接与水混合产生气液两相环状流射流来对燃气 进行加湿,或替代二次冷却空气对燃烧室出来的高 温燃气进行掺混以增加做功工质,从而可以有效利 用透平排气与排气余热,降低冷气使用量和压气机 能耗[4-5]。

目前对于射流掺混过程的相关研究主要针对于 圆柱液体射流^[6-8]、空心锥形喷雾射流^[9-12]、环膜液体 射流^[13-14]、气体辅助式动雾化射流^[15-18]等。相比上述 射流形式,气液两相环状流射流液膜在横向剪切气 流中的破碎与雾化具有明显特殊性:射流液膜在离开 喷口之前即具有不规则和不稳定性,波动液膜进入外 界横流中以后,在内外两股气流的共同作用下,液膜 不稳定性急剧增强进而实现迅速破碎和雾化。已有 文献中尚缺乏针对横流中气液两相环状流射流雾化 过程的系统研究,导致对环状流射流液膜的破碎与雾 化特性仍缺乏认识,制约了其在工业中的应用。

鉴于目前对气液两相环状流射流在横流中雾化过程认识的不足,本文采用高速摄像技术,针对横向

气流中气液两相环状流射流液膜的破碎与雾化过程 开展可视化实验研究。首先,证实环状流在横流作 用下可实现较好的雾化;其次,结合机理实验数据和 相关理论,针对气液两相环状流射流液膜在不同流 动状态和横流条件下的破碎与雾化特性进行分析, 查清环状流射流液膜在不同流动条件下的破碎机制 及相应的临界动力学条件;继而结合图像处理技术, 获得不同条件下环状流射流液膜的破碎与雾化过程 中液滴粒径分布特征和规律,进而揭示横向气流中 气液两相环状流射流液膜的破碎和雾化机理和参数 影响规律。

2 实验系统

为了研究横向气流对环状流射流液膜雾化过程 的影响,本文搭建了如图1所示的实验系统。实验系 统主要包括横流系统和环状流射流系统。在横流系 统中,横流空气由鼓风机(最大流量1800m³·h⁻¹)提 供,采用变频器(Unimat UT 550,0~5.5kW)控制风机 转速进而调节空气流量。为了提高横流的稳定性并 降低气流湍动强度,空压机出来的气流首先经过整 流段和稳流段而后形成均匀气流进入实验测试段。 横流流速由安装在试验段前的皮托管测速仪测量。 环状流射流工质水由高压小流量叶片泵(扬程0~ 16bar,流量415~445L/h)提供,采用电磁流量计(量程 0.0071~0.7068m³/h,标准精度为0.35%)测量水的流 量;环状流中心气体由小型气体螺杆空压机(流量



Fig. 1 Schematic diagram of test system for atomization process of annular flow jet in crossflow

46.8m³/h)提供,采用质量流量计(量程为0.05~50Nm³/h, 精度为1%)测量空气流量;采用针阀调节水和空气的 流量。本实验中,采用内径为10mm的透明有机玻璃 管作为环状流管道。为了促进环状流的形成,在环 状流管上游设置气液混合器,混合器为同心套管结 构,外管为有机玻璃管,内管为不锈钢结构(内径同 样为10mm),壁面为蜂窝状孔隙结构,孔隙直径为 0.1mm,外管内径为50mm。实验进行时,射流工质水 进入混合段环形腔然后经过内管壁蜂窝状孔进入环 状流射流管,空压机出来的空气从有机玻璃管底部 进入,流经混合器内管时携带壁面液膜进入下游环 状流管道,进而可在较短的距离内形成环状流。环 状流射流在实验测试段中与横向气流相互作用并完 成雾化过程。

实验过程中,首先采用普通相机对环状流的宏 观雾化过程进行了拍摄(视场高180mm,宽150mm), 其次采用高速摄像技术对环状流射流出口处液膜的 破碎与雾化瞬态过程进行捕捉。在瞬态过程捕捉 时,高速摄影(视场高65mm,宽60mm)拍摄频率为1× 10⁴fps,同步准确度为1μs,每组工况拍摄时间为1.5s, 拍摄图像在i-SPEED Suite后处理软件中进行编辑。

在横向气流场中,影响环状流射流液膜破碎与 雾化的主要因素主要有:环状流表观气速 ug,环状流 表观液速 u1和横流速度 ugeo 根据 Mishima 和 Ishii^[19] 竖直管内两相流流型图,本文选取了环雾状流区内 实验工况参数,具体实验工况见表1。

Table 1 Test condition	Test condit	conditio	Test	1	able
------------------------	-------------	----------	------	---	------

Parameter	Value range
$u_{\rm gc}/({\rm m/s})$	4/7/10/14.5
$u_{\rm g}/({\rm m/s})$	20~70
$u_{\rm l}/({\rm m/s})$	0.05~0.3

采用管内环状流充分发展长度计算公式^[20]进行 计算,本文实验工况条件下环状流的充分发展所需 长度为0.27~1.77m,实验中环状流发展段的长度为 2m,所以本文所有工况均可认为环状流在出口之前 均已充分发展。

3 实验结果与分析

3.1 横流作用下环状流射流的宏观雾化特性

气液两相环状流射流在横向气流中的典型宏观 雾化形态如图2,3所示。从实验结果可以看出,横向 气流作用下环状流射流可以实现稳定的雾化。对比 分析发现,当环状流的表观气速一定时,随着表观液 速的增大,环状流射流液膜的动量增大,其在横流 中的贯穿深度增加,使得射流雾羽铺展面积增大, 雾化效果变好,这在较高的横流速度下更为明显(如 u_{se}=14.5m/s)。当保持环状流的表观液速不变,较低 表观气速会引起较多大粒径雾化液滴的出现,随着 表观气速的增大,射流贯穿深度增加,使得射流雾羽 铺展面积增大,雾化液滴群呈浓密细雾状分布,雾化 效果显著变好。



(a) $u_{g} = 20 \text{m/s}$



(b) $u_{g} = 40 \text{m/s}$



(c) $u_{a} = 60 \text{m/s}$

Fig. 2 Atomization pattern of annular flow jet in crossflow with u_{oc} =14.5m/s



(b) $u_{a} = 40 \text{m/s}$

Fig. 3 Atomization pattern of annular flow jet in crossflow with $u_{ec}=10$ m/s

对比图 2 和图 3 可以看出,相同环状流状态下, 当横向气流速度较低时,射流弯曲程度较小,贯穿深 度较大,同时射流液膜的雾化产生的液滴粒径较大; 随着横流速度的增大,横流对射流的影响增强,液膜 破碎距离缩短,射流弯曲程度增大,雾化效果变好。

3.2 环状流射流液膜的瞬态破碎特性

通过高速摄像技术对横流中环状流射流液膜的 破碎与雾化过程进行了捕捉,实验结果见图4。实验 中发现,环状流液膜周期性界面波的发展使得环状 流射流液膜的破碎与雾化过程具有明显的周期性和 不连续性特征(即相邻两个周期之间存在时间间隔, 在此期间喷口不出现连续液膜,对于单个的液膜破 碎雾化周期,定义喷口处液膜喷出时刻为初始ta时 刻)。主要原因在于:由于环状流界面波的存在,环 状流液膜厚度、中心气流压力等沿流动方向分布不 均匀。随着界面波的运动,液膜流出喷口以后,由于 液膜内外两侧压力不平衡以及表面张力的作用下, 液膜局部会发生收缩现象,中心气流流通面积减小, 使得收缩位置下方气压增大,促使液膜发生膨胀,当 压力增大到一定程度时液膜发生破碎雾化。喷口附 近的这种瞬时压力波动变化破坏了环状流的稳定 性,压力增大时也阻碍了环状流的向上流动,造成了 环状流孔口出流状态的不连续性,等管口附近压力 降低后,管口上下游压力平衡再一次建立,液膜再次 向上流动。环状流孔口附近的这种非稳态压力波动 过程导致了射流液膜的破碎雾化过程呈现出不连续 性和周期性的特征。此外,通过对比不同工况下的 实验结果可以发现,在不同的条件下,横流中的环状 流射流液膜的破碎存在三种模式,分别是(1)爆式破 碎模式;(2)分段式破碎模式;(3)环膜破碎模式。





3.2.1 爆式破碎模式

实验中发现,当环状流表观液速较小而表观气 速很大时,中心气流对于液膜有相对较强的挤压与 剪切拖曳作用,液膜厚度较薄。射流液膜喷出以后, 壁面约束消失,中心气流在压力驱动下向外"膨胀", 同时引起环形液膜呈现爆破式撕裂破碎现象。环状 液膜沿圆周多处同时发生破裂并形成较多细液丝, 液丝在周围气流的作用下再次破碎成小液滴。爆式 破碎模式的形成主要受中心气流的影响,横向气流 的存在会加强迎风侧液膜/液丝的破碎。当射流液膜 发生爆式撕裂破碎后,迎风侧的液丝/液块在横流与 中心气流的共同作用下快速发生二次破碎,而背风侧由于中心气流对横流的阻碍,该区域内液丝/液块 受横流的影响较小,而是在中心气流的拖曳作用下 向下游运动相对较长的距离才发生再次破碎。整体 而言,爆式破碎的特点是射流液膜持续距离短,液膜 破碎剧烈且空间分布较均匀,雾化液滴粒径较小,没 有明显的大片液膜及其收缩成大液块现象;射流液 膜爆式破碎对应的周期较短。

3.2.2 分段式破碎模式

相对于爆式破碎模式,当环状流的表观液速提高 或者表观气速降低时,射流液膜在喷出以后持续距离 增大,由于液膜的不稳定从而发生腰部收缩现象,收 缩处阻碍了中心气流的流通,使得下方液膜发生膨胀 变形,横流的作用促使迎风侧膨胀液膜首先发生破 碎,进而引起其它部位液膜的破碎,下方膨胀液膜发 生破碎后形成长液丝进而很快破碎成液滴;液膜收缩 导致中心气流对上方液膜的影响减弱,使得上方液 膜易在表面张力的作用下形成大液块。整体上看,射 流液膜的破碎以收缩处为界呈现分段式的特征, 见图5。



t=2.2ms t=8.9ms t=14.4ms t=18.1ms t=20.9ms t=29.4ms Fig. 5 Segmental breakup mode for liquid film of annular flow jet in crossflow with u_{gc} =14.5m/s (u_i =0.3m/s, u_g =30m/s)

3.2.3 环膜破碎模式

环膜破碎模式的主要特征是射流液膜在孔口喷 出后能够以环形膜的形态向上发展较长一段距离, 液膜没有明显的葫芦状收缩以及液膜膨胀致断现 象,而是在中心气流和外部横流的作用下液膜整体 多处同时发生破碎。环膜破碎模式主要发生在环状 流表观气速和外部横流速度均较低、而环状流表观 液速较大的情况。环膜破碎模式下,横流的作用引 起射流液膜整体发生弯曲变形,并促使迎风面液膜 首先发生破碎,进而横流的作用使得背风侧液膜易 发生膨胀(近似呈口袋式)而破碎。射流液膜破碎后 形成较多的液块/大液滴,横流的存在促进了大液块 的袋式破碎(见图6)。由于中心气流的作用较弱,迎 风面液膜破碎后的片状液膜易发生收缩而形成较大 液滴/块。靠近喷口附近出现狭长液丝,其形成液滴 粒径较小。整体而言,环膜破碎模式下射流液膜雾 化产生的液滴粒径较大,雾化效果较差。



Fig. 6 Annular film breakup mode for annular flow jet in crossflow u_{sc} =14.5m/s (u_1 =0.3m/s, u_s =15m/s)

对不同工况下环状流射流液膜的破碎过程进一步分析发现,环状流中心气流与横流动量通量比Q_e和 环状流液膜与横流动量通量比Q_i是影响射流液膜破 碎过程的两个主要因素,上述两个参数的定义如下

$$Q_{g} = \frac{\rho_{g} u_{gr}^{2}}{\rho_{g} u_{ge}^{2}} \tag{1}$$

$$Q_{1} = \frac{\rho_{1}u_{1r}^{2}}{\rho_{g}u_{gc}^{2}}$$
(2)

式中ρ_g和ρ₁分别是气相密度和液相密度;u_{ge}为横 流速度;u_{gr}和u_{lr}分别是环状流中心气流和液膜的真 实速度,根据环状流气液两相流量及液膜的厚度确 定。其中,液膜的厚度采用Hori等^[21]提出的关于竖 直上升管内环状流液膜厚度计算式来计算,即

$$\frac{\delta}{D} = 0.905 F r_{g}^{0.93} R e_{sl}^{0.90} F r_{l}^{-0.68} R e_{sg}^{-1.45}$$
(3)

式中D为环状流圆管内径,δ为环状流液膜厚度, Fr_g和Fr₁分别是气流和液膜弗劳德数,Re_{sg}和Re_{sl}分别 是气流和液膜表观雷诺数。其中,弗劳德数和雷诺 数均基于环状流气液两相的表观速度计算。

研究发现,在横向气流环境中,随Q_g的增大,环 状流射流液膜受到气流剪切作用增强,液膜表面不 稳定性增强,液膜破碎形态逐渐由环膜袋式破碎向 爆式破碎转变,液膜破碎更充分,雾化效果变好。当 环状流中心气流速度一定时,随着Q_i的增大,射流液 膜初始动量增大,液膜受到气流作用相对减小,液膜 在横流中贯穿深度增加,其破碎机制逐渐由爆式破 碎向分段式破碎和环膜袋式破碎过渡,射流雾化效 果变差。通过对比实验结果,基于横流与环状流射 流初始状态条件,得出环状流射流液膜三种破碎机 制对应的参数范围如下,相应区间图见图7。

(I)环膜袋式破碎: $Q_g < 0.34Q_1 - 4.22$

(Ⅱ)分段式破碎:0.34Q₁-4.22<Q_g<1.53Q₁+1.28

(Ⅲ)爆式破碎:Q_g>1.53Q₁+1.28



Fig. 7 Breakup pattern distribution of liquid film for annular flow jet in crossflow

3.3 环状流射流雾化粒径分析

由于环状流射流液膜破碎过程具有周期性,且 在空间内雾化液滴分布不均匀。采用马尔文粒度仪 测量方式不能很好地分析空间内粒径分布信息,因 此本文研究基于高速相机捕捉瞬态图像并采用自编 程的方法对一个周期内环状流射流液膜破碎后期的 液滴分布进行后处理分析。

图8左侧图为高速摄影获得的环状流射流液膜雾 化液滴场原始图像,将原图进行提高分辨率、降低信 噪比、提高亮度和对比度等处理,可以得到液滴与背 景对比明显的后处理图像。将处理后的图片导入Image Pro Plus 专业软件,读取液滴面积,采用等效粒径 对雾化流场中读取的液滴表面积进行表征,进而得到 雾化液滴等量球体直径。为了降低误差,对同一种工 况下多个周期内的射流雾化结果进行处理并统计分 析。需要说明的是,图像处理中单像素点大小约为 30µm²,对于小于单像素尺寸大小的液滴在图像中均 以单个像素点显示,因而本文对这类小雾滴不再细分 粒径大小,主要对大于单像素尺度的液滴粒径进行定 量分组统计分析。另外,由于光的衍射效应仅对亚微 米量级液滴粒径的分析有较大影响,而本文主要针对 十微米以上量级的液滴进行统计对比分析,因而衍射 效应对于本文处理结果的影响可以忽略。



Fig. 8 Image process of atomized droplet of annular flow jet in crossflow (left: original image; right: processed image)

环状流射流液膜的破碎可分为三个阶段。首 先,在横向气流与中心气核的作用下环状流射流液 膜首先发生破裂,形成多个不连续液膜、大液块及液 丝,如图9(a)。然后,在横流及中心气核作用下,射 流液膜被完全撕裂,并和大液块/液丝一起在表面张 力作用下收缩形成离散大液滴群,如图9(b)。之后 在横流的作用下,大液滴发生进一步破碎形成粒径 更小的雾化液滴,如图9(c)和9(d)所示。根据环状 流射流液膜破碎过程,定义喷口液膜断裂时,自出口 至初始液膜运动最高点范围内液滴群和液丝/块存在 的区域为环状流射流一次破碎区域;定义液膜破碎 末期流场中基本不存在大液块/丝及液膜时出口的下 游区域为二次破碎液滴区域。





3.3.1 射流液膜一次破碎液滴粒径分布

图 10给出了典型的环状流射流三种不同破碎模 式下液膜一次破碎后雾化液滴粒径分布比例直方图。 从图中可以发现,对于图中工况对应的三种破碎模 式,爆式破碎模式下形成的雾化液滴粒径较小,绝大 多数液滴粒径分布在400μm以下,且基本没有>1mm 的液滴;在分段式破碎模式下,粒径在400μm以下的 液滴占比明显减小,且出现了较多>1mm的大液滴;而 对于环膜式破碎模式,液膜破碎后形成的400μm粒径 以下小液滴占比进一步减小,同时液膜在破碎后形成 了较多的大液滴甚至大液块(≥2mm)。根据图中结果 可以看出,三种破碎模式下,液膜发生爆式破碎时雾 化效果最好,分段式破碎模式次之,而环膜式破碎模 式下射流液膜的雾化效果最差。



of liquid film for different breakup modes of annular flow jet in crossflow

图 11 给出了不同 Q_a和 Q₁条件下环状流射流雾化 粒径概率分布图。从图中可以看出,当 Q₁相近时,随 着 Q_a的增大,中心气核对液膜的剪切作用增强,液膜 破碎更加充分,整个流场中小粒径液滴所占的比例 显著增大,整体雾化液滴粒径较小,雾化效果变好。 当 Q_a相近而随着 Q₁逐渐增大,中心气核与横向气流 对液膜的剪切作用减弱,液膜初始动量增大,流场中 液膜流量增大,环状液膜贯穿深度和持续高度增加, 流场中大液滴比例逐渐增加,整体雾化效果变差。 3.3.2 射流液膜二次破碎液滴粒径分布

为了定性分析不同参数条件对环状流射流液膜 破碎雾化效果的影响,本文采用索太尔平均直径 (Sauter mean diameter, D₃₂)对射流液膜的二次雾化液 滴粒径进行了统计分析。D₃₂计算式如下

$$D_{32} = \frac{\sum d^3}{\sum d^2}$$
(4)

式中 d 为单个液滴等效球体直径,本文中采用 Image Pro Plus软件获取雾化场中单个颗粒(液滴)表 面积作为等效球体的表面积,从而求出单个液滴所 对应的等效球体直径。

图 12 给出了不同环状流状态和不同横流速度下 环状流射流雾化液滴粒径 D₃₂分布。从图 12(a)中可 以看出,当横流速度一定时,随着环状流表观气速的 增大,中心气核对液膜的气动剪切作用增强,液膜破



Fig. 11 Cumulative probability distribution of atomized droplet size of annular flow jet in crossflow



(a) Influences of annular flow jet conditions



Fig. 12 SMD (D_{32}) of atomized droplet of annular flow jet in crossflow under different conditions

碎更加充分,环状流射流雾化液滴D₃₂逐渐减小;而随 着环状流表观液速的增大,射流雾化液滴D₃₂逐渐增 大。对比图12(b)中不同横流速度下环状流射流雾 化液滴的D₃₂分布,可以看出在相同环状流射流状态 下,横流速度的增大加剧了其对液膜表面的剪切作 用,使得射流雾化液滴粒径减小,射流雾化效果增 强,同样也可以看出,环状流表观气速的提高有利于 促进射流液膜的雾化,而表观液速的提高会导致雾 化液滴粒径增加。

4 结 论

本文采用可视化测量技术针对横流作用下气液 两相环状流射流液膜的破碎与雾化特性开展了实验 研究,主要结论如下:

(1)气液两相环状流射流在横向气流中可以实 现稳定的雾化,提高环状流表观气速和表观液速可 以增大射流雾羽面积,这在较大的横流速度时更为 明显。横流速度的增大可以改善雾化效果但同时降 低射流的贯穿深度。

(2)横流作用下环状流射流液膜存在三种不同 破碎模式:环膜袋式破碎、分段式破碎和爆式破碎。 保持环状流液膜与横流动量比不变,逐步提升环状 流中心气流与横流的动量比,射流液膜的破碎机制 将由环膜袋式破碎向爆式破碎转变,雾化效果逐渐 变好。

(3)在三种环状流射流破碎模式中,爆式破碎形成的液滴粒径最小,分段式破碎次之,环膜袋式破碎 产生的平均液滴粒径最大。提高环状流表观气速和 横流速度均能促进射流液膜的破碎与雾化,提升射 流雾化效果。

致 谢:感谢国家自然科学基金的资助。

参考文献

- [1] Krishnan Mahesh. The Interaction of Jets with Crossflow
 [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2013, 45: 379–407.
- Wang Y, Yu Y, Li G, et al. Experimental Investigation on the Characteristics of Supersonic Fuel Spray and Configurations of Induced Shock Waves [J]. Scientific Reports, 2017(7): 1-8.
- [3] 赵 军,单晓亮.氢氧能源在鱼雷动力系统的应用途 径与前景展望[J].鱼雷技术,2011,19(4):290-294,298.
- [4] 李 汛,刘婷婷.湿化燃气轮机循环的性能分析[J].
 燃气轮机技术,2006,19(3):1-4.

- [5] 王 静.部分空气湿化燃气轮机循环技术[D].北京: 中国科学院工程热物理研究所,2009.
- [6] Behzad M, Ashgriz N, Mashayek A. Azimuthal Shear Instability of a Liquid Jet Injected into a Gaseous Crossflow
 [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 767: 146-172.
- [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: 1-29.
- [8] Kerstein A R, Movaghar A, Oevermann M. Parameter Dependences of the Onset of Turbulent Liquid-Jet Breakup[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2017, 811, R5: 1-20.
- [9] Lynch A, Batchelor R G, Kiel B, et al. Spray Characteristics of a Pressure-Swirl Fuel Injector Subjected to a Crossflow and a Coflow [J]. Atomization and Sprays, 2011, 21(8): 625-643.
- [10] Lee S, Kim W, Yoon W. Spray Formation by a Swirl Spray Jet in Low Speed Cross-Flow [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(2): 559-568.
- [11] Zhang Hai-bin, Bai Bo-feng, Wang Ye-chun. Quantitative Description of Droplet Dispersion of Hollow Cone Spray in Gaseous Crossflow [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 93: 398-408.
- Prakash R S, Gadgil H, Raghuandan B N. Breakup Processes of Pressure Swirl Spray in Gaseous Cross-Flow
 [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2014, 66: 79-91.
- [13] Duke D, Honnery D, Soria J. A Cross-Correlation Velocimetry Technique for Breakup of an Annular Liquid

Sheet [J]. Experiments in Fluids, 2010, 49(2): 435-445.

- [14] Li X, Shen J. Experimental Study of Sprays from Annular Liquid Jet Breakup [J]. Journal of Propulsion and Power, 1999, 15(1): 103-110.
- [15] Tan Z P, Bibik O, Shcherbik D, et al. The Regimes of Twin-Fluid Jet-in-Crossflow at Atmospheric and Jet-Engine Operating Conditions [J]. Physics of Fluids, 2018, 30: 1-17.
- [16] Anubhav S, Surya P R, Madan M A, et al. Airblast Spray in Crossflow-Structure, Trajectory and Droplet Sizing[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 72: 97-111.
- [17] Peltier S J, Lin K C, Carter C D, et al. Characterization of the External and Internal Flow Structure of an Aerated– Liquid Injector Using X-Ray Radiography and Fluorescence[J]. Experiments in Fluids, 2017, 58(111): 1-16.
- [18] Kourmatzis A, Masri A R. Air-Assisted Atomization of Liquid Jets in Varying Levels of Turbulence [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2014, 700: 95-132.
- [19] Mishima K, Ishii M. Flow Regime Transition Criteria for Upward Two-Phase Flow in Vertical Tubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1984, 27(5): 723-737.
- [20] Kataoka I, Ishii M. Mechanism and Correlation of Droplet Entrainment and Deposition in Annular Two-Phase Flow[R]. NUREG/CR-2885, 1982, ANL-82-44.
- Hori K, Nakasatomi M, Nishikawa K, et al. On Ripple of Annular Two-Phase Flow: Effect of Liquid Viscosity on Characteristics of Wave and Interfacial Friction Factor
 [J]. Bulletin of JSME, 1979, 22(169): 952-959.