

文章编号:2095-6134(2017)02-0160-06

横向气流中环状流射流液膜的破碎与雾化*

盛刚浩¹, 张海滨^{1†}, 赵中闯², 刘心仕³

(1 西安交通大学化学工程与技术学院, 西安 710049; 2 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049;
3 西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049)
(2016 年 4 月 22 日收稿; 2016 年 5 月 28 日收修改稿)

Sheng G H, Zhang H B, Zhao Z C, et al. Breakup and atomization of annular flow jet in crossflow[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2017, 34(2): 160-165.

摘 要 针对环状流射流液膜在横流中破碎与雾化过程开展实验研究。研究发现,从宏观雾化形态看,环状流射流在横流中可以实现稳定的雾化;实验给出横流作用下环状流射流轨迹无量纲关联式。采用高速摄影技术对横流中环状流射流液膜破碎与雾化瞬态过程进行捕捉,发现环状流射流液膜雾化过程具有周期性和不连续性;不同环状流状态下液膜在横流中雾化机制有较大差异;增大射流表观气速能有效提升雾化效果。

关键词 环状流射流; 横流; 破碎与雾化; 液膜

中图分类号:O359+.1 文献标志码:A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2017.02.006

Breakup and atomization of annular flow jet in crossflow

SHENG Ganghao¹, ZHANG Haibin¹, ZHAO Zhongchuang², LIU Xinshi³

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

Abstract Experimental investigation was carried out on the atomization of the gas-liquid annular flow jet in crossflow. Results show that the liquid film of the annular flow jet realizes steady atomization in crossflow macroscopically. The dimensionless trajectory correlation of the annular flow jet in crossflow is presented based on the captured atomization images. The transient breakup and atomization of the annular flow jet in crossflow was investigated by using high-speed photography techniques. It is found that the transient breakup and atomization processes of annular flow jet are periodic and discontinuous. The mechanisms of the film breakup and atomization were discussed and the influences of different parameters on them were obtained. Results also indicate that the atomization pattern may vary with conditions. Increase in superficial gas velocity improves the atomization effects.

Keywords annular flow jet; crossflow; breakup and atomization; liquid film

* 国家自然科学基金(51306146)和中国博士后基金(2013M532045)资助
† 通信作者, E-mail: hb-zhang@mail.xjtu.edu.cn

在横向气流环境中,气液两相环状流出口液膜在中心气核与外部横流的共同作用下可以实现较好的破碎与雾化。探索气液两相环状流射流在横流中的雾化机制与规律,在国防及工业领域具有重要的应用前景,如氢氧能源发动机中冷却工质与高温燃气间的掺混^[1],采用气液两相环状流射流(液体冷却工质吸热形成两相流)进水方式将比采用蒸汽射流和液体射流两路进水更能强化工质与燃气间的传热传质,同时也使流体供应系统由气、液两套简化为一套。从而可以减小发动机重量和体积。在湿化燃气轮机循环系统中^[2-3],目前多采用直接注水,直接注蒸汽或采用湿化器等加湿方式,并在系统中设置回热器。若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环状流射流对燃气进行加湿,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工质,不仅有效利用了透平排气和排气余热,大幅度减少冷空气使用量,同时也将透平排气纳入系统循环之中,将显著降低压气机能耗、提高燃气轮机效率。

横向剪切气流中,气液两相环状流射流液膜的破碎与雾化不同于其他液体射流形式。其特殊性在于:在气液两相环状流射流中,射流出口前液膜即受到内侧气流的剪切作用而发生变形和不稳定波动,不稳定的液膜进入横向气流中,在内外两侧气流的共同作用下,液膜不稳定性急剧增强而实现迅速破碎。在射流领域的相关研究中,常见的射流形式有平面液膜射流^[4]、圆柱形液体射流^[5]、圆环液体射流^[6]、鼓风式^[7]以及鼓泡式^[8-9]等气助式射流。目前尚未有对气液两相环状流射流在横流中的雾化过程的研究。

基于这一现状,本文针对环状流射流在横向气流中的破碎与雾化过程开展实验研究,通过对不同工况条件下环状流射流在横流中破碎和雾化过程的分析,查清了横流作用下环状流射流雾化过程的宏观特性与液膜瞬态破碎机制,并给出横向气流中环状流射流轨迹的无量纲关联式,研究结果可为构建气液两相环状流射流与横向气流掺混过程基础理论提供基础数据和基本规律。

1 实验系统

环状流射流雾化实验系统示意图如图 1 所示。主要包括横流系统和环状流射流系统。其中横流空气由鼓风机提供,最大流量 1 800 m³/h,流

量控制采用变频器(ABB-ACS510, 0 ~ 5 kW)控制风机转速。环状流射流测试试验段为矩形腔,横截面尺寸为 180 mm × 180 mm。环状流射流液体由高压小流量泵(意大利福力德 Fluid-O-Tech 叶片泵,扬程 0 ~ 16 bar,流量 415 ~ 445 L/h)提供;气体由小型气体空压机(流量 0.78 m³/min)提供。环状流管道采用透明有机玻璃管,内径为 10 mm。采用气液混合器使气液在环状流管道入口处混合,混合器为同心套管结构:内管为不锈钢结构,壁面为蜂窝状孔隙结构,内径为 10 mm,与环状流管道一致;外管为内径 50 mm,厚 5 mm 的有机玻璃管。实验进行时,水首先进入外管然后经内管壁渗入内管,空压机出来的空气首先进入混合器内管,与壁面液膜相遇后一起进入环状流管道。采用这种结构可以促使管道中尽快实现稳定发展的环状流。在管道出口环状流射流与横流相遇并相互作用,完成雾化过程。

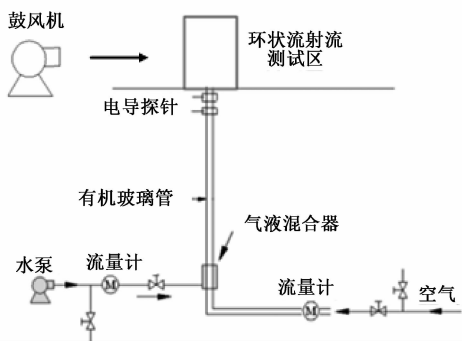


图 1 环状流射流雾化过程测试系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of test system for atomization process of annular flow jet

采用电导探针测量管内环状液膜动态厚度;采用马尔文粒度仪测量射流雾化粒径;采用高速摄影技术对环状流射流雾化过程进行捕捉,获得环状流射流液膜的瞬态破碎与雾化过程。实验中高速摄影垂直于横流方向布置,设置高速摄影拍摄频率为每秒 1 万张,每组工况拍摄时间为 1.5 s。为了获得不同因素对环状流射流雾化过程的影响规律,实验对横流速度、环状流表观气速及表观液速这 3 个主要参数开展研究,环状流出口压力约为 1.2 bar,具体实验工况见表 1 所示。

实验工况点在 Mishima 和 Ishii^[10]流型图上主要分布在环雾状流区,少量点分布在无夹带的环状流区。通过 Kataoka 和 Ishii^[11]提出的管内环状流充分发展长度计算公式,计算得到本实验工况条件下管内环状流充分发展所需长度为 0.27 ~

1.77 m, 本文实验中环状流发展段长度为 2 m, 所以本文所有工况均可认为环状流在出口之前已充分发展。

表 1 横流中环状流射流实验工况表

Table 1 Test conditions of annular flow jet in crossflow

横流速度 $u_g/(m/s)$	表观气速 $u_{gl}/(m/s)$	表观液速 $u_{jl}/(m/s)$
14.5	20 ~ 70	0.05 ~ 0.3
10	20 ~ 50	0.1 ~ 0.3
7	20 ~ 40	0.1 ~ 0.3
4	20 ~ 40	0.1 ~ 0.3

2 实验结果分析

2.1 横向气流中环状流射流雾化形态

图 2 给出不同横流速度作用, 不同气液流量条件下环状流出口液膜的雾化形态。从图中可以看出, 环状流出口液膜可以实现稳定的雾化过程; 并且在表观气速较大的情况下呈现较分散的雾羽形态, 雾化效果较好。环状流射流在不同环状流状态下的雾化有较大差异。

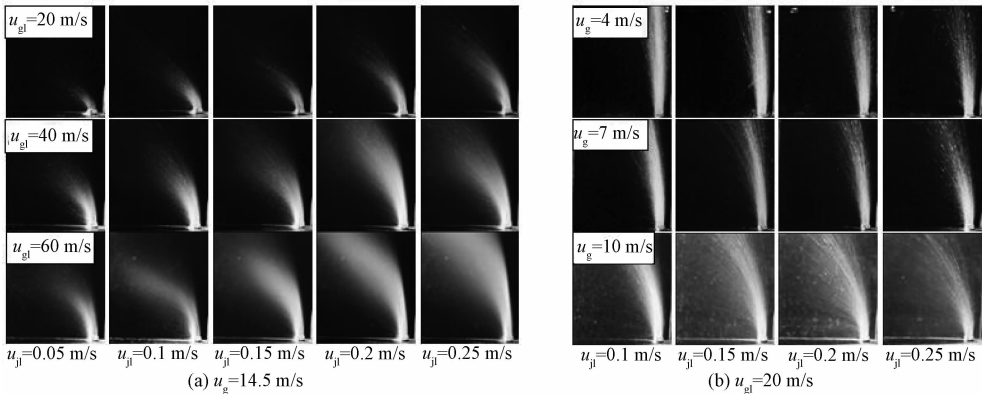


图 2 环状流射流在横向气流中的雾化形态
Fig. 2 Atomization patterns of annular flow jet in crossflow

为了定量对比不同因素对喷嘴雾化效果的影响, 本文采用索太尔平均直径来表征横流中环状流射流雾化效果。图 3 给出环状流表观液速为 0.2 m/s 时, 不同横流速度、不同环状流气体流量下环状流射流雾化液滴索太尔直径 D_{32} 。可以看出, 环状射流场中雾化粒径随环状流表观气速的增大而减小; 相同环状流条件下, 横向气流速度越大, 雾化粒径越小。

2.2 横向气流中环状流射流轨迹关联式

在横向气流与射流掺混过程中, 射流轨迹是描述横向气流中射流雾化形态的重要特征, 也是指导雾化与掺混过程组织的重要参数之一。过大

从图 2(a) 中可以看出, 当环状流表观气速一定时, 随着表观液速增大, 环状流射流贯穿深度增加, 雾羽铺展面积增大, 与横向气流作用距离增加, 雾化效果变好。此外, 保持环状流表观液速不变时, 较低表观气速 ($u_{gl} = 20$ m/s) 时, 雾化粒径较大, 随着表观气速增大, 射流贯穿深度逐渐增加, 雾羽铺展面积增大, 雾化液滴群呈浓密细雾状分布, 雾化效果明显变好。因此可以看出, 表观气速和表观液速的增大均能增大射流贯穿深度, 表观气速的增大能有效提高射流雾化效果。

从图 2(b) 中可以看出, 相同环状流状态下横流速度的降低导致液膜破碎雾化液滴明显增大, 射流结构弯曲程度减小, 贯穿深度增大, 雾化效果变差; 随着横流速度的继续降低, 环状流液膜雾化效果明显变差。这是因为横流气体动量降低对环状流射流影响减弱, 环状流射流较大的初始动量使得其在横流中的贯穿深度增大, 破碎距离增大, 同时雾羽结构较小, 雾化粒径较大。

和过小的射流贯穿深度都不利于射流与横流的充分混合。

为了更好地获得射流轨迹线, 对原始图像进行后处理, 通过增强对比度得到更加清晰的雾化结构轮廓。为了便于公式拟合, 将射流图片进行对称处理, 即横流方向为 X 轴正方向, 在此基础上进一步处理得到射流迎风面轨迹线即认为是环状流射流的轨迹线(如图 4 所示)。

通过对不同工况下环状流射流的贯穿轨迹进行分析及对比, 借鉴直喷式射流轨迹方程式形式^[12] 给出本实验条件下环状流射流在横流中的贯穿轨迹无量纲表达式如下

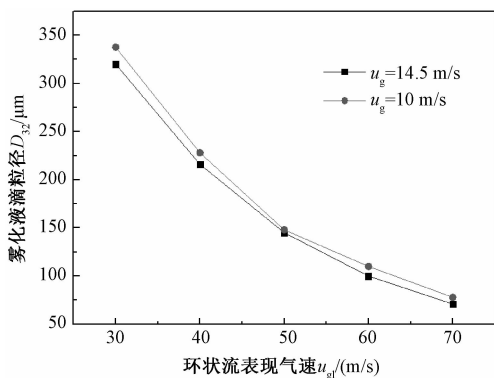
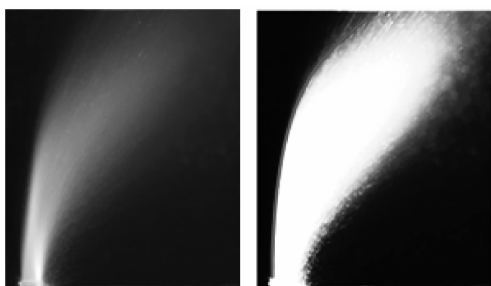


图3 不同环状流表现气速下环状流射流雾化液滴粒径大小 ($u_{jl} = 0.2$ m/s)

Fig. 3 Droplet diameter of annular flow jet at different superficial gas velocities ($u_{jl} = 0.2$ m/s)



(a) 原始图 (b) 增强对比度处理图

图4 环状流射流轨迹线

Fig. 4 Trajectories of annular flow jet in crossflow

$$\frac{y}{D} = 6.124q_l^{0.163}q_g^{0.187}\left(\frac{x}{D}\right)^{0.405},$$

其中: $q_l = \frac{\rho_l u_{jl}^2}{\rho_g u_g^2}$ 为环状流液膜/横流动量比; $q_g =$

$\frac{\rho_g u_{gl}^2}{\rho_g u_g^2}$ 为环状流中心气流/横流动量比。 u_{jl} 为环状流表现流速, u_{gl} 为环状流表现气速, u_g 为横流速度; D 为环状流射流喷口直径, x 为沿横流方向距离。

从表达式可以看出: 环状流液膜/横流动量比和环状流中心气流/横流动量比是影响环状流射流在横流中贯穿轨迹的主要因素, 随着环状流液膜/横流动量比和环状流中心气流/横流动量比的增大, 射流在横流中的贯穿深度也增大。

横流中环状流射流轨迹线表达式的提出有利于更好地分析环状流射流参数与横流参数对环状流射流雾化的影响, 从而更好地指导实际的掺混过程。但由于本实验中管径 D 为定值, 所以目前还无法获得管径对横流中环状流射流轨迹的影响。关于不同管径下横流中环状流射流的雾化形态和破碎机理还在进一步的研究中。

2.3 环状流射流在横流中的微观雾化过程

环状流是由位于壁面的液膜、中心高速气核以及气核中的夹带液滴构成。气核的剪切作用使液膜表面出现界面波, 界面波的运动引起液膜厚度变化, 使得液膜在环状流出口具有变化的速度与动量, 因此射流液膜的破碎过程非常复杂。为了获得环状流射流在横流作用下的破碎和雾化机理, 采用高速摄像技术对环状流射流液膜的瞬态破碎过程进行捕捉。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瞬态破碎过程具有周期性和不连续性。图5 给出横流速度为14.5 m/s, 液膜表现流速为0.1 m/s, 表现气速为15 m/s 时一个典型的周期内液膜瞬态破碎过程。在本文分析中, 定义环状流射流破碎周期起点为液膜刚离开喷嘴进入流场时刻, 即 $t = 0$ 时刻。

在周期初始阶段, 环状流液膜在喷嘴出口处厚度较大, 在近喷嘴区, 喷嘴壁面约束消失, 中心气核的作用下, 气液界面迅速失稳破碎, 出现大量液丝结构进而破碎成初速较大的“爆破”液滴; 在中心气核的作用下, 液膜向外运动, 同时由于气核的剪切而拉伸变薄, 在横向气流的作用下, 射流液膜向背风侧弯曲。在 $t = 7.3$ ms 时刻, 射流迎风侧出现剪切层涡。剪切层涡是直喷式等射流雾化过程中的典型特征, 它是由于横流与射流在运动方向上的不同导致在两相交界面上产生不稳定扰动波, 从而形成剪切层涡。我们发现由于环状液膜与横流在方向上的差异, 液膜表面产生扰动, 在这种扰动作用下, 环状射流液膜迎风侧也出现剪切层涡, 剪切层涡的形成和发展促进环状液膜表面液滴剥落, 有利于环状流射流液膜的雾化。随着横流与射流进一步作用, 剪切层涡结构逐渐增大, 液膜厚度进一步变薄进而发生破碎, 此时环状液膜存在多种破碎机制, 如断裂破碎、袋式破碎、丝带式破碎等, 背风侧液膜在横流作用下表面不断有液丝和液滴脱落 (如 $t = 14.8$ ms 时刻)。与此同时, 环形液膜破碎后形成的片状液膜在表面张力作用下收缩成较大的液块和液丝, 这些液块和液丝在横流作用下进一步完成二次破碎。从图中可以看出, 雾化所形成的小液滴多分布在背风侧。相对而言, 背风侧受横流影响较弱, 迎风侧液膜在横流作用下也会向背风侧移动, 因此背风侧液膜持续时间较长, 并易形成较大结构的液块和液丝 (见 $t = 19.1$ ms 时刻)。

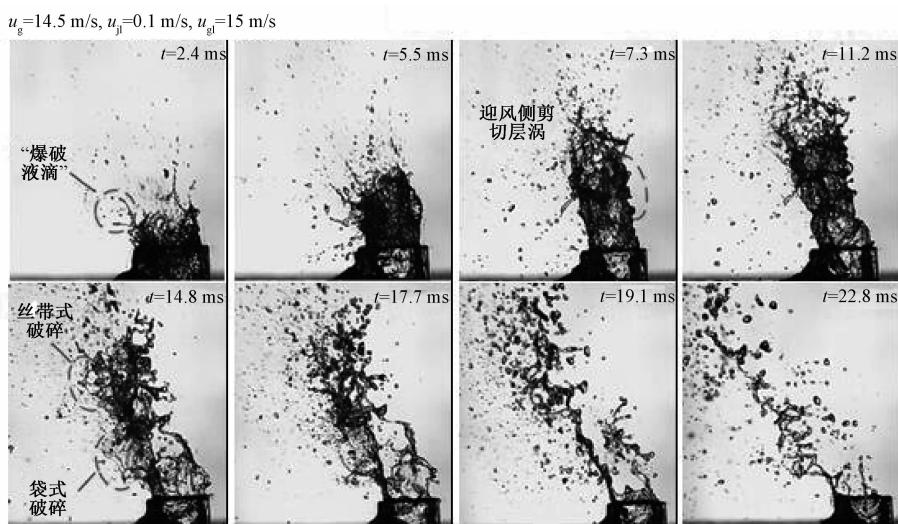


图 5 环状流射流在横流中雾化瞬态过程

Fig. 5 Transient atomization of annular flow jet in crossflow

图 6 为不同射流状态下环状流射流在横流中的破碎和雾化形态。与图 5 中工况相比,可以发现,

当表观液速增大时($u_g=14.5\text{ m/s}$, $u_{jl}=0.3\text{ m/s}$, $u_{gl}=15\text{ m/s}$),液膜体积流量增大,在液膜破碎初

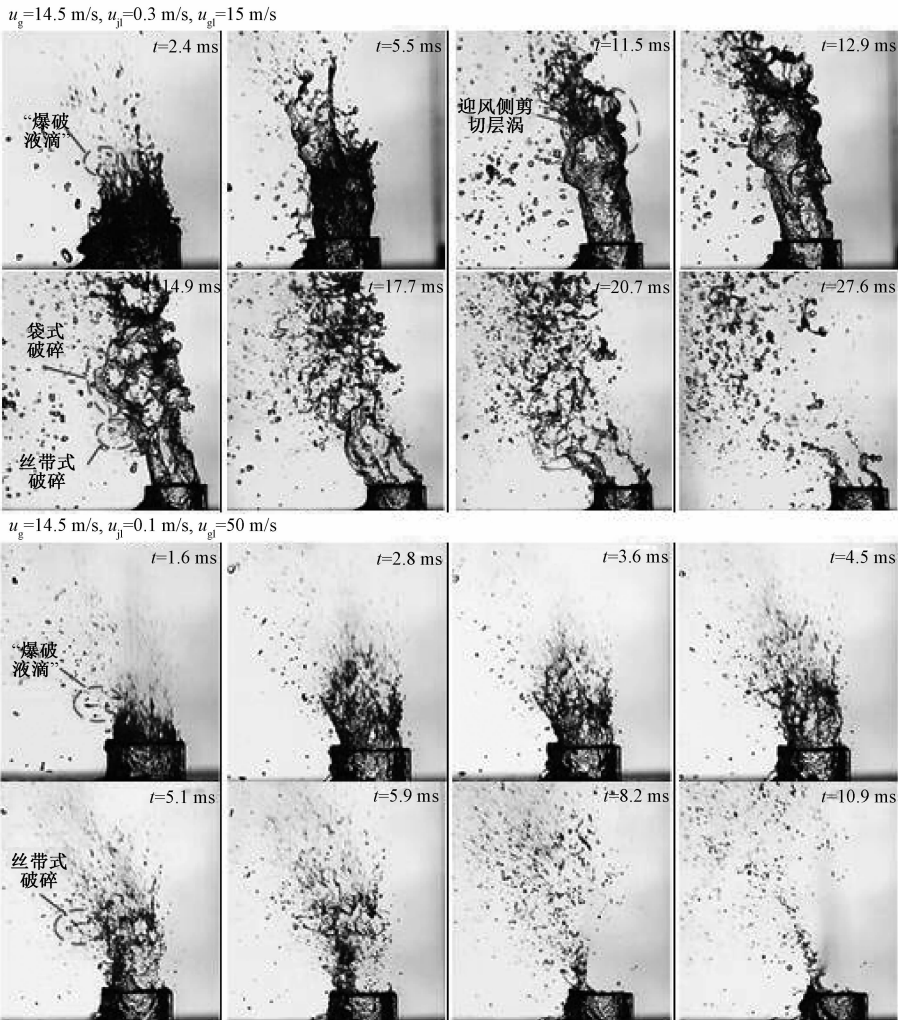


图 6 不同射流状态下环状流射流在横流中瞬态雾化形态

Fig. 6 Transient atomization of annular flow jet in crossflow under different conditions

期,液膜在中心气核作用下失稳破碎形成的液丝数量增多。同时表观液速的增加意味着液膜动量增大,使得环状流射流在横流作用下弯曲程度减小而贯穿高度增大。同样,在液膜迎风侧出现剪切层涡结构,随着剪切层涡的发展以及在横流和中心气核的共同作用下,射流液膜逐渐变薄进而发生破碎,此时环状流射流液膜同样存在袋式破碎、丝带式破碎和断裂破碎等多种破碎机制。由于射流液膜具有较大的初始动量,使得液膜在横流中存在距离增大,因而其扩展面积也更大,最终使得拉伸的液膜厚度更薄,在横流作用下液膜更容易破碎成小液滴。对比图 5 可以发现,在表观液速较大时,射流液膜最终形成的液滴数量增大,大液块(丝)则明显减少。

而当表观气速增大时($u_g = 14.5\text{ m/s}$, $u_{j1} = 0.1\text{ m/s}$, $u_{j2} = 50\text{ m/s}$),中心气核对环形液膜剪切作用增强,在喷嘴出口处液膜剪切破碎形成的液丝和较大初始动量的“爆破”液滴数量更多。环状液膜厚度明显变薄,在出口很短距离内即完成破碎和雾化过程,射流迎风侧液膜没有出现明显的剪切层涡结构;迎风侧液膜受到横流剪切作用较强,在距离喷嘴很短距离内首先发生破碎断裂,断裂后形成的液丝和液滴向背风侧运动。此外可以看出,当射流表观气速较大时,液膜以丝带式破碎形式为主,破碎周期明显缩短,液膜破碎雾化形成的液滴粒径较小,雾化效果明显变好。

通过以上结果分析,可以得出:较小的表观气速下,环状流射流液膜迎风侧更容易产生剪切层涡结构,液膜破碎形成的液滴(块)粒径较大;表观液速的增大有利于液膜在横流中的扩展,射流贯穿深度增大,液膜破碎效果更好;当表观气速较大时,在射流液膜迎风侧不易形成明显的剪切层涡结构,射流液膜更容易破碎,液膜破碎距离较短,雾化效果更好;此外,通过对更多工况进行对比分析,发现:在较大的表观液速下,环状流射流液膜在流场中存在距离较大,破碎周期较大;当表观气速较大时,液膜厚度较小,破碎周期明显缩短,雾化液滴粒径明显减小。所以,在环状流射流与横流掺混的实际应用中,适当增加环状流射流的表观气速能够有效提升射流雾化效果。

3 结 论

1)从宏观雾化形态看,环状流射流在横向气

流中可以实现稳定的雾化。横流速度的增大能有效促进环状流射流雾化过程;而表观液速和表观气速的增大均能增大射流贯穿深度,增大雾羽铺展面积,减小雾化液滴粒径,提升射流雾化效果。

2)通过对不同工况下环状流射流雾化形态进行分析,给出横流中环状流射流轨迹无量纲关联式。其中,影响横流中环状流射流贯穿深度的主要因素是环状流液膜/横流动量比和环状流中心气流/横流动量比。

3)在横向气流中,环状流射流液膜瞬态雾化过程具有周期性和不连续性。不同射流状态下环状流射流在横流中的雾化形态具有较大的差异性。适当增大环状流射流的表观气速能够有效提升射流雾化效果。

参考文献

[1] 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): 290-298.

[2] 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.

[3] 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.

[4] Phillips J C, Pch M, Thomas N H. Air flow and droplet motions produced by the interaction of flat-fan spray and cross flows[J]. Atomization and Sprays, 2000, 10(1): 83-103.

[5] Costa M, Melo M J, Sousa J M M, et al. Spray characteristics of an angled liquid injection into subsonic crossflows[J]. AIAA Journal, 2006, 44(3): 646-653.

[6] Wahono S, Honnery D, Soria J, et al. High-speed visualisation of primary break-up of an annular liquid sheet[J]. Experiments in Fluids, 2008, 44(3): 451-459.

[7] Liu K, Sun L Y. Experimental study of atomization characteristic of air blast atomizer[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 300/301: 185-188.

[8] Sallam K A, Aalburg C, Faeth G M, et al. Primary breakup of round aerated-liquid jets in supersonic crossflows[J]. Atomization and Sprays, 2006, 16(6): 657-672.

[9] Huang X, Wang X, Liao G. Visualisation of two phase flow inside an effervescent atomize[J]. Journal of Visualization, 2008, 11(4): 299-308.

[10] 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.

[11] Kataoka I, Ishii M. Entrainment rate in annular two-phase flow[R]. Argonne National Laboratory Report. ANL-82, Argonne, Illinois, 1982.

[12] Ghenai C, Sapmaz H, Lin C X. Penetration height correlation for non-aerated and aerated transverse liquid jets in supersonic cross flow[J]. Experiments in Fluids, 2009, 46(1): 121-129.