

船用锅炉燃烧器旋转喷嘴雾化性能 PIV 实验研究

张晨, 陈琳, 丁傲霜, 孙建平

(中船九江海洋装备(集团)有限公司, 江西九江 332000)

摘要: 为了提高船用锅炉燃烧器的雾化性能, 通过粒子图像测速(PIV)实验研究了燃烧器冷态工作时水滴通过喷嘴进入炉膛的雾化过程, 分析转杯转速为 3 000, 4 800 和 7 000 r/min 时的喷雾流动特性。实验研究表明: 3 种转杯转速的速度分布具有相似性, 离喷嘴轴向和径向距离最近的一小部分区域的速度最大, 离喷嘴轴向和径向越远速度越低, 直到速度接近零; 把粒径测量区域分成底部、中部、顶部 3 部分, 底部区域的索特直径大于中部, 中部大于顶部, 3 个区域的索特直径随时间的变化规律相同, 但各区域之间存在滞后性; 转杯转速为 3 000, 4 800 和 7 000 r/min 时, 3 个区域的索特平均直径分别为 0.095 7, 0.090 5 和 0.077 4 mm。

关键词: 喷嘴; 粒子图像测速; 流动特性参数; 雾化

中图分类号: TK223.23

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.06.016

[引用本文格式] 张晨, 陈琳, 丁傲霜, 等. 船用锅炉燃烧器旋转喷嘴雾化性能 PIV 实验研究[J]. 热能动力工程, 2025, 40(6): 140-148. ZHANG Chen, CHEN Lin, DING Aoshuang, et al. PIV experimental study on atomization performance of rotation nozzle of burner in marine boilers[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(6): 140-148.

PIV Experimental Study on Atomization Performance of Rotation Nozzle of Burner in Marine Boilers

ZHANG Chen, CHEN Lin, DING Aoshuang, SUN Jianping

(CSSC Jiujiang Marine Equipment (Group) Co., Ltd., Jiujiang, China, Post Code: 332000)

Abstract: In order to enhance the atomization performance of burner in marine boiler, through particle image velocimetry (PIV) experiment, the atomization process of water droplets passing through the nozzle and entering the furnace during the cold-state operation of the burner was studied. The atomization flow characteristics under the rotor speeds of 3 000, 4 800 and 7 000 r/min were analyzed. The experimental study shows that the distributions of the three rotor speeds have similarities. The smallest part of the area closest to the nozzle axial and radial direction has the highest speed, and the speed decreases until the speed approaches zero as the distance from the nozzle axial and radial direction increases. The particle size measurement area was divided into three parts, such as bottom, middle and top, the bottom area has a larger Sauter diameter than the middle, and the middle has a larger Sauter diameter than the top. The change law of the Sauter diameters in the three areas with the time is the same, but there is a lag between the areas. When the rotor speeds are 3 000, 4 800, 7 000 r/min, the average Sauter diameters in the three areas are 0.095 7, 0.090 5 and 0.077 4 mm, respectively.

Key words: nozzle, particle image velocimetry (PIV), flow characteristic parameter, atomization

引言

在船用锅炉燃烧器中,为了使液体燃料充分燃烧,需要通过喷嘴或者其他雾化装置将燃料喷射到炉膛中^[1-4]。由于空气动力干扰和湍流扰动等原因,燃料通过喷嘴时会雾化^[5-7]成更小的液体颗粒,从而增加燃料与空气的接触面积,提高燃烧效果。基于此,研究喷嘴雾化机理对提高燃料燃烧效率以及改变多相流混合程度具有重要的意义。

流场的流动特性参数^[8-9]能够表征喷嘴的雾化效果,而粒子图像测速(PIV)可以测量流动特性参数。最初的PIV^[10]只能测量二维小区域的流场,随着科学技术的发展以及学者们的实践,PIV的可测量区域不断增大,可测量维度从二维升高到三维,已广泛应用于航空航天、船舶、土木工程和机械等领域^[11-16]。叶益飞^[17]研究了不同孔径和喷雾压力的喷嘴对流场流动特性的影响。姬忠礼等人^[18]用PIV测量了激荡射流与尖劈形成的流场,发现压力扰动波与射流的相互作用是流体振荡的原因。张亚竹等人^[19]对钢厂连铸二次冷却使用的气雾喷嘴进行了PIV实验分析,结果表明随着喷射口韦伯数的增加,喷射液滴的索特平均直径减少。Liang等人^[20]进行了拱形锅炉的PIV实验,发现低压二层风的理想倾斜角度为30°。

目前,针对船用锅炉燃烧器的雾化研究较为有限。本文以船用锅炉燃烧器喷嘴为研究对象,开展了不同转杯转速下水滴的PIV雾化实验。运用时间平均法得到不同转杯转速下粒子的索特平均直径(D_{32})和喷雾的速度分布,深入分析了不同工况下流场流动特性的变化规律。

1 喷嘴雾化实验

1.1 喷嘴雾化实验平台

喷嘴雾化实验平台由4部分组成,分别为调风系统、水路及压力调节系统、喷嘴及测量段和PIV测量装置,实验装置示意图如图1所示。

1.1.1 调风系统

调风系统由风机、风道入口与出口以及示踪粒子发生装置组成,利用风道口阀门调节风量,风道口

设置压力传感器,通过测量风压来表征风量。因为水雾化后形成的细小液滴具有良好散射性能,所以不需要添加示踪粒子。

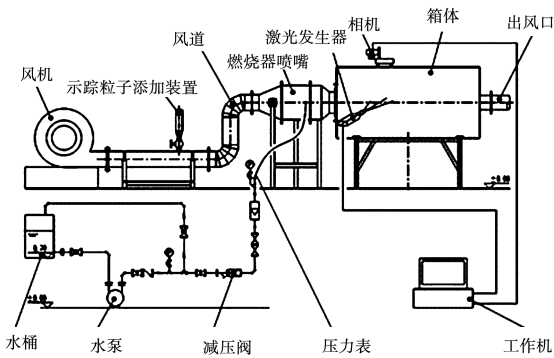


图1 喷嘴雾化实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of nozzle atomization experimental facility

1.1.2 水路及压力调节系统

该系统由水桶、水泵、减压阀和压力表等组成。水桶里的水通过水泵加压后在管道内流动,经减压阀后最终从喷嘴流出。减压阀和调节阀的作用是防止从喷嘴流出的水压力过大,由于喷嘴出口直接与外界环境相连,并且压力表安装在燃烧器的末端,与喷嘴出口距离很近,压力表测量到的压力近似为喷嘴出口处的压力,压力表型号为YC100-N。质量流量计安装在水泵出口处,用于测量流出的水流量,质量流量计型号为LZYN-015Y-1CM1S1.6I0.2。

1.1.3 喷嘴及测量段

测量段由箱体组成,箱体由铁架搭建而成,在架子顶部及四周铺设透明塑料薄膜,在透明薄膜上铺设不透明的绿布,防止实验时过度曝光,在绿布顶部激光照射位置和左侧相机成像处划出方形缺口。箱体高2.5 m,长4 m,宽2 m。燃烧器型号为AWD12-ME。

1.1.4 PIV 测量装置

选用北京立方天地科技有限公司生产的PIV测量装置,其工作原理是通过双脉冲激光器发射两束激光,经合束后照射实验测量区域的流场,激光照亮流场内的粒子发生散射形成光斑,通过高分辨率摄像机在很短时间间隔内捕捉两张或多张图片。图2为PIV工作原理示意图。

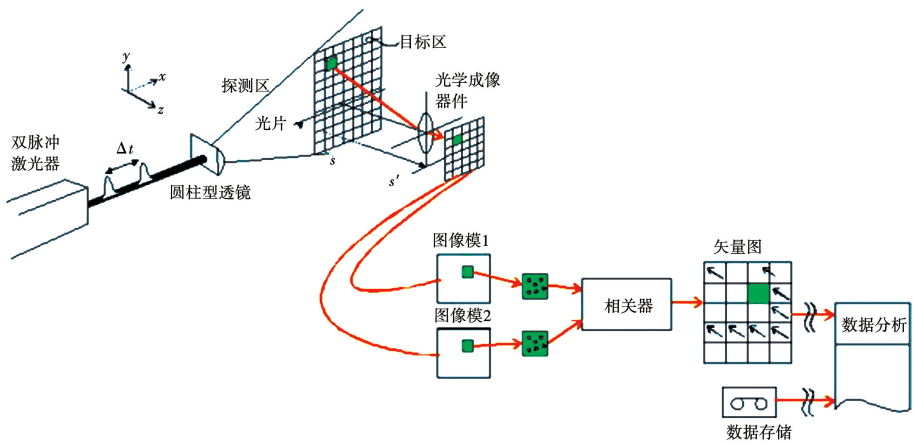


图 2 PIV 工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of PIV operating principle

在二维平面内运动的示踪粒子在两个方向上运动的位移分量为 $x(t)$ 和 $y(t)$ ，速度分量可表示为：

$$u = \frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} = \bar{u} \tag{1}$$

$$v = \frac{dy(t)}{dt} \approx \frac{y(t + \Delta t) - y(t)}{\Delta t} = \bar{v} \tag{2}$$

式中： u, v —粒子在 x 和 y 方向的速度分量； $\bar{u}, \bar{v}$ —粒子在 Δt 时间内的平均速度在 x 和 y 方向的速度分量； t —粒子运动的某时刻； Δt —时间间隔，当 Δt 足够小时， $\bar{u}$ 和 $\bar{v}$ 可以精确表征 u 和 v 。

1.2 实验过程

保持水流量 310 kg/h，风机风压 4 000 Pa 不变，将转杯转速分别设定为 3 000、4 800 和 7 000 r/min，做 3 组实验，3 种工况的实验参数如表 1 所示。

表 1 水雾化实验参数

Tab. 1 Experimental parameters of water atomization

水流量/ kg·h ⁻¹	一次风阀门开度/ (°)	转杯转速/ r·min ⁻¹
310	40	3 000
310	40	4 800
310	40	7 000

记录粒子的速度场和粒径，测速相机连续拍摄 100 张图片，测粒径相机连续拍摄 50 张图片。为了使空气中悬浮的液体颗粒沉积下来，每组实验完成后间隔一段时间再继续下一组。根据激光器和摄像机的照射区域，选取合适的流场区域，如图 3 所示。

该区域很好地表征雾化后大部分液滴的运动情况及流场的流动特性。

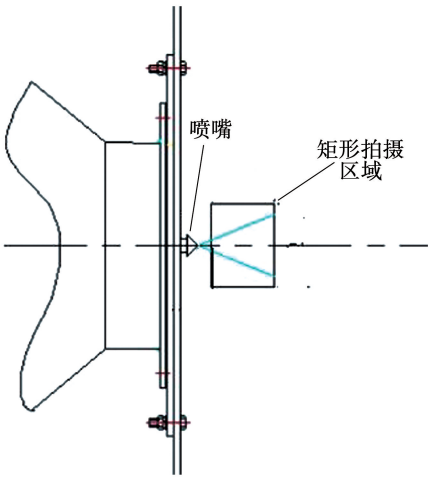


图 3 流场区域示意图

Fig. 3 Schematic diagram of flow field region

2 实验结果及分析

2.1 喷雾的速度场

实验得到了转杯转速分别为 3 000、4 800 和 7 000 r/min 的喷雾速度场，对这 3 种工况的速度场进行分析。由于计算单张粒子图像得到的速度场会出现速度畸变等问题，为了降低偶然因素的影响，运用时间平均法，取 100 张粒子图像，计算该 100 张粒子图像的喷雾速度场的平均值，对速度场进行处理，得到的喷雾平均速度及流线分布如图 4 ~ 图 6 所示。

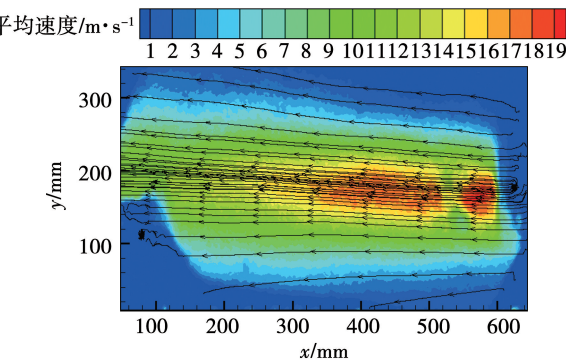


图 4 转杯转速为 3 000 r/min 时喷雾平均速度及流线分布
Fig. 4 Distribution of atomization average velocity and streamline at rotor speed of 3 000 r/min

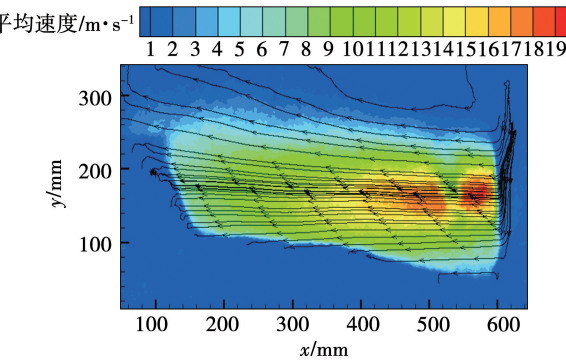


图 5 转杯转速为 4 800 r/min 时喷雾平均速度及流线分布
Fig. 5 Distribution of atomization average velocity and streamline at rotor speed of 4 800 r/min

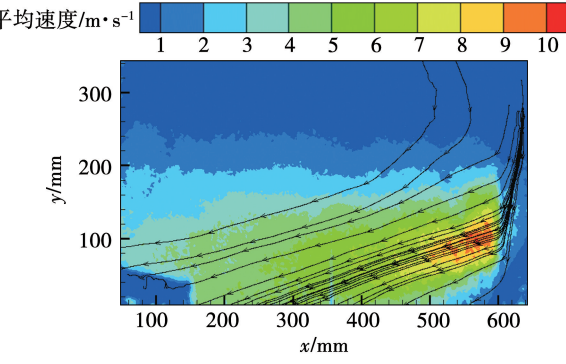


图 6 转杯转速为 7 000 r/min 时喷雾平均速度及流线分布
Fig. 6 Distribution of atomization average velocity and streamline at rotor speed of 7 000 r/min

由图 4 可知,喷嘴中心所在的轴线附近液滴的速度高,离轴线越远速度越低,离喷嘴中心径向越近速度高,离喷嘴径向越远速度越低,最大速度分布在轴线附近靠近喷嘴的一小部分区域内。

观察 3 种转杯转速下喷雾速度的流线分布,当

转杯转速较小时,流线呈现出从右向左水平流动且以喷嘴轴向为中线向上下区域偏移的形态,形成锥形的喷雾区域。但当转杯转速达到 7 000 r/min 时,流线明显向下偏移。这是由于在高转速下,液滴所受的离心力在其他力(如空气阻力、惯性力表面张力等)中处于主导地位,导致液滴处于失稳状态,发生剧烈的偏转运动。

液滴刚从喷嘴喷出时轴向速度和径向速度都很大,由于空气阻力等原因,液滴在径向上的速度逐渐降低直到为零,导致外围只存在少量悬浮液滴,速度接近零,形成深色区域,喷嘴出口处小部分深色区域的形成则是因为水滴刚从喷嘴喷出时液滴尺寸大且密集,导致散射光强度过高,摄像机过曝。出口处液滴尺寸和密集程度高于主流区域,且这种现象与喷嘴出口流量大小无关,而调光时是以主流区域为基准,故改变水流量依然会过曝。

图 7 ~ 图 9 为不同转杯转速下喷雾在 x 方向的速度分量 u 云图。

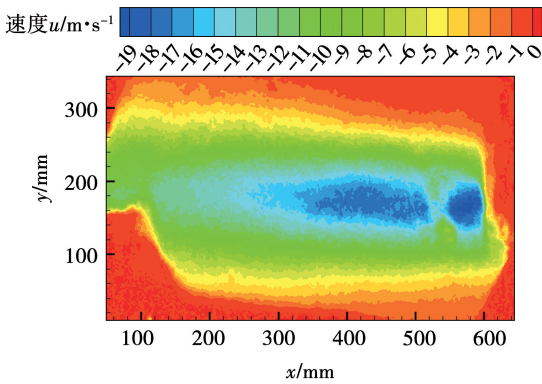


图 7 转杯转速为 3 000 r/min 时速度分量 u 云图
Fig. 7 Nephogram of velocity component u at rotor speed of 3 000 r/min

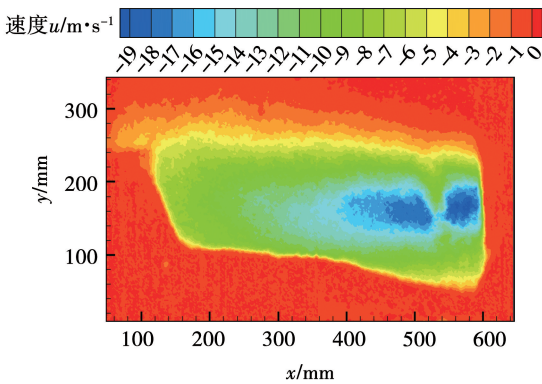


图 8 转杯转速为 4 800 r/min 时速度分量 u 云图
Fig. 8 Nephogram of velocity component u at rotor speed of 4 800 r/min

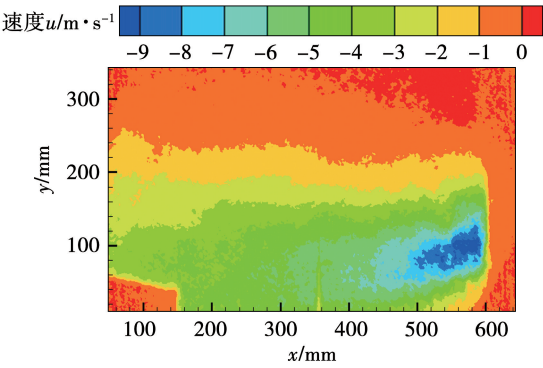


图 9 转杯转速为 7 000 r/min 时速度分量 u 云图
Fig. 9 Nephogram of velocity component u at rotor speed of 7 000 r/min

与平均速度云图进行对比,发现转杯转速为 3 000 和 4 800 r/min 时的平均速度云图与速度分量 u 云图基本一致,这是由于粒子在 y 方向的速度分量 v 很小,基本为零,导致速度分量 u 与平均速度基本一致。但当转杯转速为 7 000 r/min 时,平均速度云图与速度分量 u 云图在速度分布上基本一致,但是两者的速度大小不一致,这是由于高转杯转速下粒子发生向下偏移,获得较大的 y 方向的速度,这再一次证明了转杯转速为 7 000 r/min 时流线发生偏转的现象。

图 10 为转杯转速为 7 000 r/min 时喷雾在 y 方向的速度分量 v 云图,可以清晰的看出,在与平均速度云图同位置的深色区域内,速度 v 最大达到 3.5 m/s。

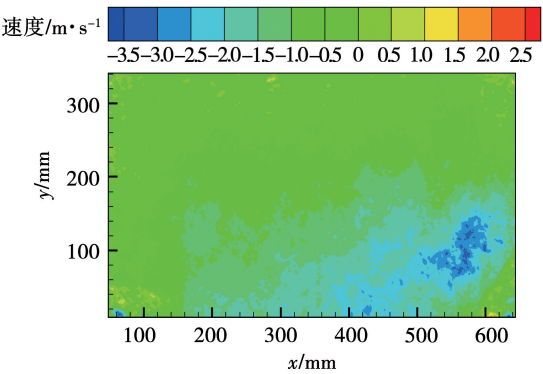


图 10 转杯转速为 7 000 r/min 时速度分量 v 云图
Fig. 10 Nephogram of velocity component v at rotor speed of 7 000 r/min

采用 MicroVecSpray 软件对喷雾的雾化角进行测量,得到 3 000, 4 800 和 7 000 r/min 3 种转速下的雾化角,分别为 29.08°、13.53°和 44.21°,雾化角

示意如图 11 ~ 图 13 所示。

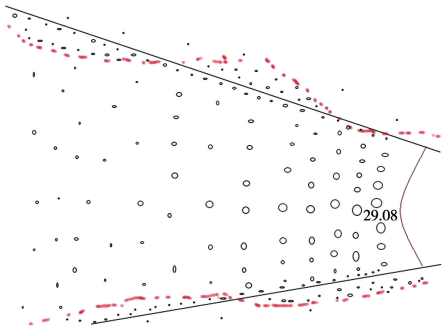


图 11 转杯转速为 3 000 r/min 的雾化角
Fig. 11 Atomization angle at rotor speed of 3 000 r/min

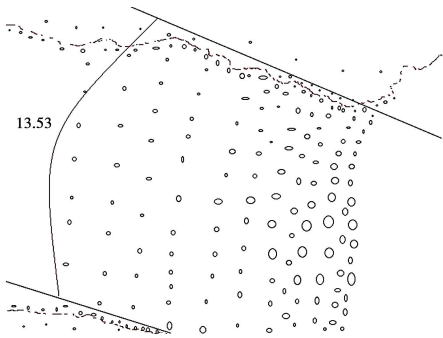


图 12 转杯转速为 4 800 r/min 的雾化角
Fig. 12 Atomization angle at rotor speed of 4 800 r/min

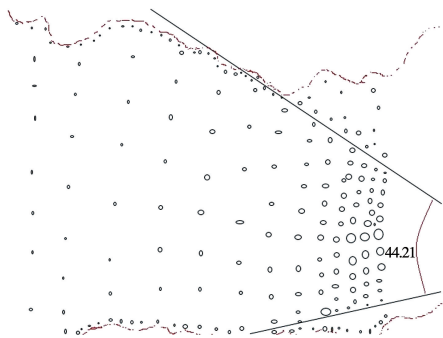


图 13 转杯转速为 7 000 r/min 的雾化角
Fig. 13 Atomization angle at rotor speed of 7 000 r/min

2.2 喷雾的粒径

测粒径相机与测速度相机不同,测粒径相机的拍摄区域更小,清晰度更高。喷嘴中心位于拍摄区域的底部,在 3 种转杯转速下分别拍摄 50 张照片,进行粒径分析。为了分析喷雾不同位置的粒径特

征,将拍摄区域按竖直方向分成等面积的顶部、中部和底部,如图 14 所示。

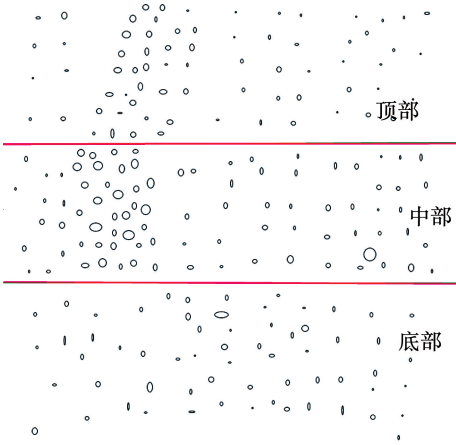


图 14 雾化区域三等分图

Fig. 14 Trisection diagram of atomization area

图 15 ~ 图 17 为转杯转速为 3 000 r/min 时 3 个区域的雾化液滴半径分布,3 个区域的雾化液滴半径集中在 0.015 ~ 0.04 mm 的小部分区域内,最大液滴半径大约为 0.1 mm,雾化液滴从底部区域运动到中部再到顶部,大液滴数目随着自身的分裂越来越少,液滴半径分布越来越集中。

为了验证粒子是否符合罗辛 - 拉姆勒 (R - R) 分布,研究转杯转速为 3 000 r/min 时总体区域的粒子直径, $R - R^{[21-22]}$ 分布的一般表达式为:

$$R = f(d) = e^{-\left(\frac{d}{d_0}\right)^n}$$

(3)

式中: f — $R - R$ 分布函数; d —粒子直径; d_0 —粒子的特征直径; n —离散系数; R —粒子直径大于等于 d 的颗粒占总质量百分比。

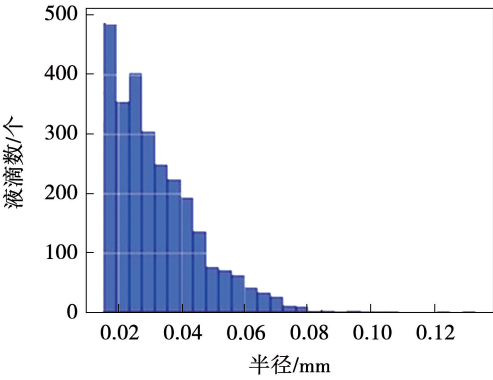


图 15 转杯转速为 3 000 r/min 时顶部区域液滴半径分布

Fig. 15 Distribution of droplet radius in top area at rotor speed of 3 000 r/min

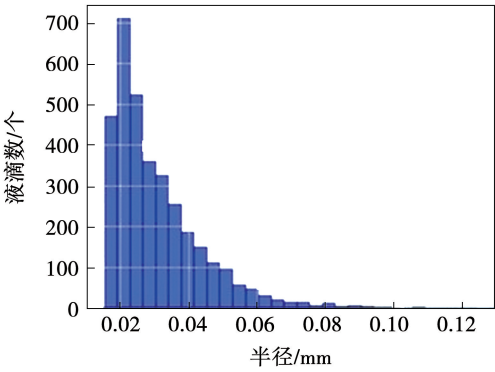


图 16 转杯转速为 3 000 r/min 时中部区域液滴半径分布

Fig. 16 Distribution of droplet radius in middle area at rotor speed of 3 000 r/min

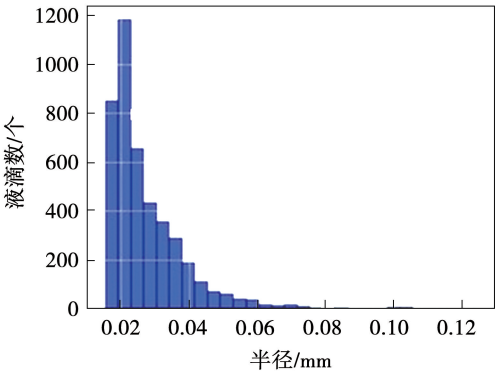


图 17 转杯转速为 3 000 r/min 时底部区域液滴半径分布

Fig. 17 Distribution of droplet radius in bottom area at rotor speed of 3 000 r/min

通过两边取两次对数可以转化成线性形式如下:

$$\ln(-\ln R) = n \ln d - n \ln d_0$$

(4)

得到不同粒子直径的质量百分比,如表 2 所示。

表 2 不同粒子直径质量百分比

Tab. 2 Mass percentage under different particle diameters

粒子直径 d/mm	质量分数百分比 $R/\%$	R 取两次对数的 负值 $\text{Ln}(-\ln R)$	对粒径取对数 $\ln d/\text{mm}$
>0.06	86.70	-1.95	-2.81
>0.08	70.13	-1.03	-2.53
>0.10	52.18	-0.43	-2.30
>0.12	37.62	-0.02	-2.12
>0.14	26.52	0.28	-1.97
>0.16	17.72	0.55	-1.83
>0.18	12.38	0.74	-1.71
>0.20	8.44	0.91	-1.61
>0.22	4.27	1.15	-1.51
>0.24	1.91	1.38	-1.43
>0.28	0	-	-

注:“-”表示无数据。

采用线性插值法得到 n 为 2.13, d_0 为 0.12 mm (63.2% 的粒子直径小于 d_0), 图 18 为液滴粒径 R-R 分布拟合曲线与实验数据对比, 喷雾的粒径分布基本上与 R-R 分布一致。

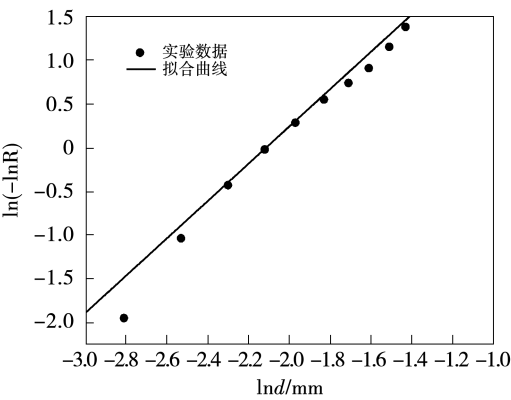


图 18 实验数据与拟合曲线对比图

Fig. 18 Comparison chart of experimental data and fitted curves

图 19 为转杯转速为 3 000 r/min 时不同区域的索特(D_{32})直径随时间的变化, 由图可知, 底部的 D_{32} 直径始终大于中部, 中部始终大于顶部。这是由于底部处于喷嘴中心, 水从喷嘴喷出雾化成液滴最先进入底部, 此时的液滴尺寸普遍较大, 甚至还存在一些液膜与液柱, 由于液滴径向速度的存在使得液滴向径向扩散, 在扩散的过程中由于空气阻力、惯性力、液体表面张力等原因液滴会逐渐分裂成更为细小的液滴, 造成了越远离喷嘴中心液滴 D_{32} 直径越小。

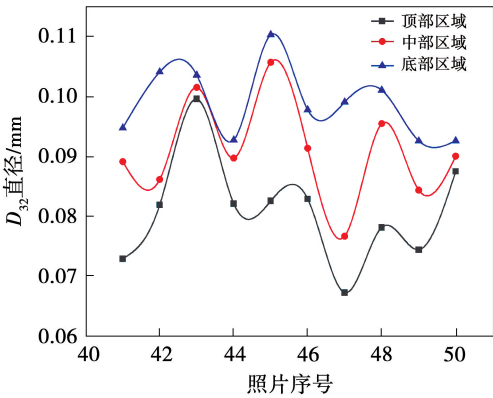


图 19 转杯转速为 3 000 r/min 时不同区域 D_{32} 直径随时间的变化

Fig. 19 Variation of D_{32} diameter in different areas with time at rotor speed of 3 000 r/min

3 个区域的 D_{32} 直径不同, 但是随时间的变化规律类似, 仅波峰与波谷的出现时间不一致。从总体上看, 底部的波峰与波谷的出现时间先于中部, 中部先于顶部。这是因为在喷雾场中存在着影响液滴分裂的湍流与涡流, 湍流与涡流随时间不断变化, 导致 3 个区域液滴的 D_{32} 直径随时间的变化不断增减。湍流与涡流最早在喷嘴中心轴线所在的底部区域出现, 导致底部的 D_{32} 直径最先受到影响。随着液滴的径向运动, 湍流与涡流向中部和顶部不断移动, 造成中部和顶部区域 D_{32} 直径曲线波峰与波谷出现时间滞后。

为了消除随机性因素的影响, 取不同区域第 41 ~ 50 张照片 D_{32} 直径的平均值, 如表 3 所示。相对于底部, 中部的 D_{32} 平均直径减少了 8%, 顶部的 D_{32} 平均直径减少了 18%。再将 3 个区域合并进行总体分析, 得到不同转杯转速下总体区域第 41 ~ 50 张照片的 D_{32} 直径以及 10 张照片 D_{32} 直径的平均值, 如表 4 所示。

表 3 不同区域第 41 ~ 50 张照片 D_{32} 直径平均值

Tab. 3 Average values of D_{32} diameters of No. 41 – 50 photos in different areas

粒子所在区域	D_{32} 直径平均值/mm	相对底部百分比/%
底部	0.098 9	100
中部	0.091 0	92
顶部	0.081 0	82

表 4 不同转杯转速下的 D_{32} 直径

Tab. 4 D_{32} diameters at different rotor speeds

照片序号	D_{32} /mm		
	3 000 r/min	4 800 r/min	7 000 r/min
41	0.090 5	0.088 6	0.082 1
42	0.099 5	0.090 6	0.077 4
43	0.106 2	0.091 9	0.072 1
44	0.091 9	0.092 0	0.074 9
45	0.108 0	0.087 4	0.077 8
46	0.095 7	0.107 8	0.072 8
47	0.089 0	0.089 9	0.056 6
48	0.097 3	0.090 9	0.068 3
49	0.085 6	0.079 8	0.080 6
50	0.093 1	0.086 3	0.111 0

随着转杯转速的变化, D_{32} 直径各不相同。转杯转速为3 000,4 800和7 000 r/min时, D_{32} 平均直径分别为0.095 7,0.090 5和0.077 4 mm。由表4可知,转速为7 000 r/min时随时间变化 D_{32} 直径较其他工况变化明显,变化最大时比 D_{32} 直径平均值增加43.5%。相较于转杯转速3 000和4 800 r/min的粒子图20和图21,转杯转速7 000 r/min粒子图22中的粒子数量大幅度减少,这是由于转速太高,液滴大部分分裂成很小的粒子,而粒子图像分析中没有选取直径太小的粒子,导致不同时间跨度的 D_{32} 直径受随机性影响较大。

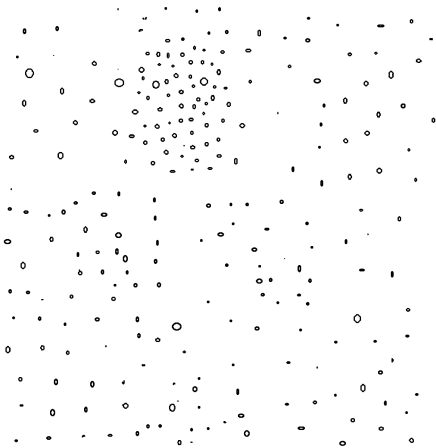


图20 转杯转速3 000 r/min下粒子图
Fig. 20 Particle diagram at rotor speed
of 3 000 r/min



图21 转杯转速4 800 r/min粒子图
Fig. 21 Particle diagram at rotor speed
of 4 800 r/min

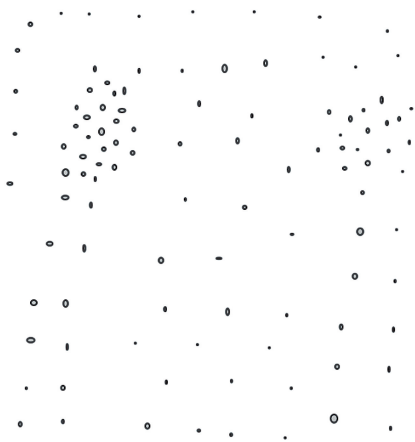


图22 转杯转速7 000 r/min粒子图
Fig. 22 Particle diagram at rotor speed
of 7 000 r/min

3 结 论

(1) 在低转速下,喷雾流线沿喷嘴中心轴线呈水平分布,并向上下区域逐渐缓慢偏转,但当转杯转速过快时,受离心力的主导作用,液滴失稳,流线发生剧烈偏转。

(2) 当转杯转速为3 000,4 800和7 000 r/min时, D_{32} 平均直径分别为0.095 7,0.090 5和0.077 4 mm。喷雾在不同区域的 D_{32} 直径随时间呈现相似的变化规律,受湍流与涡流的影响导致出现多个波峰与波谷。由于不同区域距喷嘴中心距离不同,中部区域波峰与波谷出现时间滞后于底部区域,顶部区域滞后于中部区域,喷雾粒径分布满足R-R分布函数。

参考文献:

[1] 陈 昊. 富氢燃料微混燃烧组织方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2023.
CHEN Hao. Research on micro-hybrid combustion method of hydrogen-rich fuel[D]. Beijing:North China Electric Power University,2023.

[2] 贾燕子. 乙烯裂解炉及燃烧器喷嘴的CFD模拟研究[D]. 天津:天津大学,2008.
JIA Yanzi. CFD simulations of ethylene cracking furnaces's burner [D]. Tianjin:Tianjin University,2008.

[3] 冯 斌,吴永胜,刘斯发. 船用锅炉双燃料燃烧器的低氮燃烧特性的数值模拟研究[J]. 山西电力,2019(1):39-43.
FENG Bin,WU Yongsheng,LIU Sifa. Numerical simulation study

- on low nitrogen combustion characteristics of dual fuel burner of marine boiler[D]. Shanxi Electric Power,2019(1):39-43.
- [4] O'CONNOR J, LIEUWEN T. Disturbance field characteristics of a transversely excited burner[J]. Combustion Science and Technology,2011,183(5):427-443.
- [5] KIUCHI M, FUJISAWA N, TOMIMATSU S. Performance of a PIV system for a combustng flow and its application to a spray combustor model[J]. Journal of Visualization,2005,8(3):269-276.
- [6] TOMIMATSU S, FUJISAWA N, HOSOKAWA A. PIV measurement of velocity field in a spray combustor[J]. Journal of Visualization, 2003,6(3):273-281.
- [7] GAO C, XIAO Z, ZOU H, et al. Characterization of spherical Al-Si10Mg powder produced by double-nozzle gas atomization using different parameters[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2019,29(2):374-384.
- [8] 彭 璐. 高压共轨喷油器耦合喷嘴内流的喷雾特性研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.
- PENG Lu. Study on spray characteristics coupled with internal nozzle flow in high pressure common rail injector[D]. Beijing Jiaotong University,2018.
- [9] 张润泽. 幂律流体射流破碎机理的实验研究[D]. 天津:天津大学,2012.
- ZHANG Runze. An experimental study on the breakup of power law liquid jets[D]. Tianjin:Tianjin University,2012.
- [10] SHARP K V, ADRIAN R J. PIV study of small-scale flow structure around a Rushton turbine[J]. AIChE Journal,2001,47(4):766-778.
- [11] 乔卿贝. 航空发动机组式喷嘴高温高压雾化特性研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所),2021.
- QIAO Qingbei. Investigation of spary characteristics for combined air-atomizer of aircraft engine in high temperature and high pressure[D]. Beijing: University of Chinese Academic of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences),2021.
- [12] ANUFRIEV I S, SHADRIN E Y, KOPYEV E P, et al. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet[J]. Applied Thermal Engineering,2019,163:114400.
- [13] SHINOMORI K, KATOU K, SHIMOKURI D, et al. NO_x emission characteristics and aerodynamic structure of a self-recirculation type burner for small boilers[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2011,33(2):2735-2742.
- [14] MCRAE M, JULIEN P, SALVO S, et al. Stabilized, flat iron flames on a hot counterflow burner[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2019,37(3):3185-3191.
- [15] PAN L, JI H, CHENG S, et al. An experimental investigation for cold-state flow field of regenerative heating annular furnace[J]. Applied Thermal Engineering,2009,29(16):3426-3430.
- [16] WESTERWEEI J, ELSINGA G E, ADRIAN R J. Particle image velocimetry for complex and turbulent flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics,2013,45(1):409-436.
- [17] 叶益飞. 喷嘴雾化速度场的 PIV 实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
- YE Yifei. Experimental study on velocity field of nozzle atomization using PIV [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [18] 姬忠礼,席葆树,董守平. PIV 技术测量振荡射流流场[J]. 流体力学实验与测量,1998,12(3):88-92.
- JI Zhongli, XI Baoshu, DONG Shouping. Measurement of oscillating jet using particle image velocimetry [J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics,1998,12(3):88-92.
- [19] 张亚竹,赵增武,刘江涛,等. 连铸二冷气雾喷嘴射流 PIV 实验研究[J]. 连铸,2014,39(5):17-20.
- ZHANG Yazhu, ZHAO Zengwu, LIU Jiangtao, et al. PIV study on characteristics of air-mist jets of secondary cooling of continuous casting[J]. Continuons Casting,2014,39(5):17-20.
- [20] LIANG L, HUI S, ZHAO S, et al. Cold modeling investigation of aerodynamic characteristics of an arch-fired boiler on particle image velocimetry (PIV): Influence of momentum flux ratio of arch air to secondary air and secondary air angle [J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2012,42:240-247.
- [21] MIAO Yusong, ZHANG Yiping, WU Di, et al. Rock fragmentation size distribution prediction and blasting parameter optimization based on the muck-pile model[J]. Mining, Metallurgy & Exploration,2021,38(2):1071-1080.
- [22] WU Yingchun, WANG Lei, LIN Wenhui, et al. Picosecond pulsed digital off-axis holography for near-nozzle droplet size and 3D distribution measurement of a swirl kerosene spray[J]. Fuel,2021,283:119124.

(王治红 编辑)