

郑捷庆,何宏舟. 基于 PIV 的水煤浆气力式静电雾化流场特性[J]. 煤炭学报, 2014, 39(11): 2321-2327. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1696
Zheng Jieqing, He Hongzhou. PIV study on spray field of coal-water slurry air-blast electrostatic atomization[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11): 2321-2327. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1696

基于 PIV 的水煤浆气力式静电雾化流场特性

郑捷庆^{1,2}, 何宏舟^{1,2}

(1. 厦门大学 物理与机电工程学院 福建 厦门 361005; 2. 福建省能源清洁利用与开发重点实验室(集美大学) 福建 厦门 361021)

摘要:为探索高压静电场中水煤浆荷电颗粒相的动力学特性,基于新型三级 Y 型水煤浆气力式雾化喷嘴-环电极的静电雾化实验系统,利用粒子图像速度仪(PIV)对雾炬内水煤浆荷电雾滴的运动规律进行了深入的实验研究。研究表明:在射流边缘区域内的水煤浆荷电细小雾滴群在静电场力的作用下,沿程将偏离常规雾化的运动轨迹,靠近电极处的流线发生明显的弯曲变形并随电压的不断增强呈现出 3 种典型形式;荷电雾滴的轴向速度随电场力增强而减小,并在射流核心区内的沿程截面上分布趋于均匀,径向速度随电场力的增强而增加,并在射流核心区内的沿程截面上呈线性分布;流场中雷诺应力及涡量均集中分布在射流轴线两侧,随电场增强,雷诺应力峰值显著增加并在横截面上逐渐外移,随射流远离喷嘴,其截面雷诺应力分布趋于平缓。

关键词:水煤浆;雾化;静电场;流场

中图分类号:TD849;TQ536.1 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2014)11-2321-07

PIV study on spray field of coal-water slurry air-blast electrostatic atomization

ZHENG Jie-qing^{1,2}, HE Hong-zhou^{1,2}

(1. School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Fujian Province Key Laboratory of Energy Cleaning Utilization and Development (Jimei University), Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to explore dynamic characteristics of coal water slurry charged particle in the high voltage electrostatic field, using particle image velocimeter (PIV), an electrostatic atomization experiment system consisting of a novel three-level Y-type spraying-pneumatic atomizing nozzles and a ring electrode was applied to perform an in-depth study on the dynamic characteristics of charged coal-water slurry (CWS) droplets in a high voltage electrostatic field. Experimental results indicate that: the trajectory of fine coal-water slurry droplets clusters at the edge area of the spray field deviated from conventional atomization under the action of static electric force. The streamlines near the electrode obviously bend and deform, which would present three typical forms with the increasing voltage. The axial velocity of charged droplets of coal-water slurry would decrease and distribute more evenly while the radial velocity would increase and distribute linearly along the spraying developing sections of radial direction with the increasing electrostatic force. Reynolds stress and vortices in the flow field would be concentrated in the spray axis on both sides, the peak value of Reynolds stress would increase significantly and gradually move out on the cross with the electric field enhanced. Reynolds stress would distribute more smoothly as the spray developing away from the nozzle.

Key words: coal-water slurry; atomization; electrostatic field; flow field

收稿日期:2013-11-15 责任编辑:张晓宁

基金项目:福建省科技计划重点资助项目(2012H0031);福建省科技厅高校专项资助项目(JK2011028)

作者简介:郑捷庆(1973—),男,福建永春人,副教授,博士。Tel:0592-6183523, E-mail:zhjieqing@126.com

水煤浆是由煤、水和化学添加剂以一定的比例经物理加工配制成的低碳、环保、节能的煤基代油燃料,可用于电站锅炉、工业锅炉、油田采暖炉等热能与动力设备的燃烧^[1-3]。由于水煤浆具有黏度高、雾化阻力大、流变特性复杂等完全不同于燃油的一些特性,故在其实际工程应用中必须结合气力式雾化技术方具有实用价值^[4-7]。然而,由于其高黏度特性导致浆液雾化分散性较差,极易引起浆体在喷嘴处大块滴落和雾化粒径过粗,造成流化不均,相应延长燃烬和水分蒸发时间,从而影响其稳定着火和燃烧,破坏气流床的工作稳定性,造成炉膛温度剧烈波动甚至熄火^[8-9];其次,气力式雾化介质的多少直接影响喷嘴运行成本,为满足气力式喷嘴运行的经济性,应尽可能降低气耗率,但过低的气耗率难以达到良好的雾化质量^[10-11]。水煤浆微细煤粉颗粒呈不规则尖锐形状,若为获得较好的雾化性能而保持较高的气耗率,当水煤浆在喷嘴内与高速气流进行动量交换并被加速时,尖锐的煤粉固体颗粒不可避免地将与喷嘴孔内壁高速摩擦,加剧喷嘴的磨损,造成气力式喷嘴的寿命降低^[12]。以上两个问题在很大程度上制约了水煤浆技术的进一步推广使用。笔者利用静电雾化技术辅助气力式雾化,设计了水煤浆三级 Y 型静电雾化喷嘴^[4]。通过前期利用高速摄影仪对水煤浆静电雾化流场形貌的研究发现^[4,13]:所施加的电场力对于流场的影响直接导致了流场渐扩,雾滴的弥散度不断提高。理论上,该技术有望克服水煤浆雾炬核心区贫氧燃烧的难题,对于提高水煤浆的燃烧稳定性及降低污染物排放是非常有利的^[14-15]。

基于此,笔者利用 PIV 对该三级 Y 型水煤浆气力式静电雾化的荷电颗粒相流场特性进行深入的试验研究与分析,探索静电场对雾化流场所产生的影响,以此验证水煤浆静电雾化技术优于常规雾化技术的特点,为其工业化应用提供理论参考。

1 实验配置及方法

实验用水煤浆由山西大同煤与水及化学添加剂经充分搅拌配置而成,其物性参数及流变特性见文献[4]。图 1 为水煤浆气力式静电喷雾流场的 PIV 测量试验系统,其中水煤浆三级 Y 型常规气力式雾化喷嘴结构、静电雾化试验台架参见文献[4],环电极-喷嘴配置结构如图 2 所示。

PIV 系统采用美国 TSI 公司 2000 年的产品,根据 PIV 测量所遵循的原则及喷雾射流速度,系统的主要参数设置为:脉冲间隔 150 μs ,脉冲延迟 200 μs ,查问区域 32 pixel \times 32 pixel。本文水煤浆静电雾化形

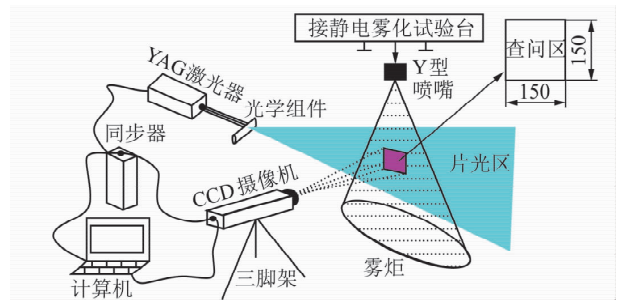


图 1 水煤浆气力式静电雾化 PIV 实验系统

Fig. 1 PIV experimental set-up for CWS electrostatic atomization

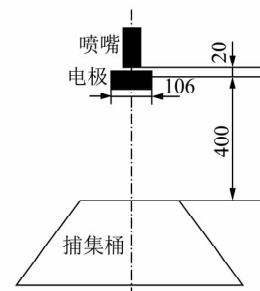


图 2 喷嘴、电极、捕集桶相对位置

Fig. 2 Layout of nozzle, electrode and trap bucket

成的最大雾滴粒径小于 200 μm ,散射性较好,满足测量需要,由于获取的图像即为水煤浆雾滴实时的运动情况,因此对粒径的要求不涉及跟随性的问题。试验中,浆压与气压由稳压阀控制保持 0.3 MPa,浆液流量保持 7.5 kg/h,气浆比保持 0.1,电压范围为 0 ~ 30 kV。待管路系统及高压电路系统正常运行,各种参数测量仪表读数稳定之后,关闭室内灯光,打开激光光源,照亮水煤浆雾炬,形成片光区。由计算机控制同步器并调好 CCD 相机焦距,拍摄雾炬片光区中的查问区,查问区顶面挨着铜环电极,查问区范围为 150 mm \times 185 mm。

试验采用的气力式喷嘴直径为 2 mm,射流核心区在 0 ~ 20 mm,由于充电电极安放在离喷嘴轴向距离 20 mm,因此 PIV 测量的是射流的过渡段及主体段的流场分布情况。

2 实验结果及分析

2.1 电场对射流流场的影响

(1) 电场对流线的影响。

不同电压下流场的局部流线变化如图 3 所示。由图可知,在雾炬测量区域内,随着充电电压的不断升高,雾化流场发生了显著变化。该变化主要集中在射流边缘区域,电压的不断加使流场中更多的雾滴达到库仑分裂极限,从而出现大量小雾滴群,小雾滴惯性力较小,其所受电场力指向充电环电极方向。因

此在不断增强的电场力作用下,沿程不断偏离常规雾化的运动轨迹。环电极所形成的感应电场越强,雾滴荷电量越大,小雾滴群向环电极方向运动的趋势越强烈,致使射流边缘区域靠近电极处的流线发生明显弯曲变形,即卷吸现象。它随电压的不断增强呈现 3 种形式: ① 轻微偏离形式,即在电压达到 5 kV 左右时,流场中仅有少量小雾滴改变速度方向,因为此时电场力还不是很大(图 3(b)); ② 弧状卷吸形式,即电压达到 10 kV 以上时,流场中大量小雾滴在电场力的牵引下先产生流线弯曲,而后逆向朝电极方向运动,电压越高,发生弯曲的流线数量越多,弯曲的角度也越大,卷吸作用越明显(图 3(c)~(e)); ③ 涡状卷吸形式,即电压达到 25 kV 之后,电场力对流线的影响已渗透到流场内部,雾炬张开的角度使以上两种弯曲卷吸流线不在测量区域之内,取而代之的是流场内部区域的涡状卷吸(图 3(f))。该电场力导致的流场强烈卷吸扰动将使水煤浆雾滴与空气充分混合,有效延长颗粒在燃烧室停留时间,促进完全燃烧。

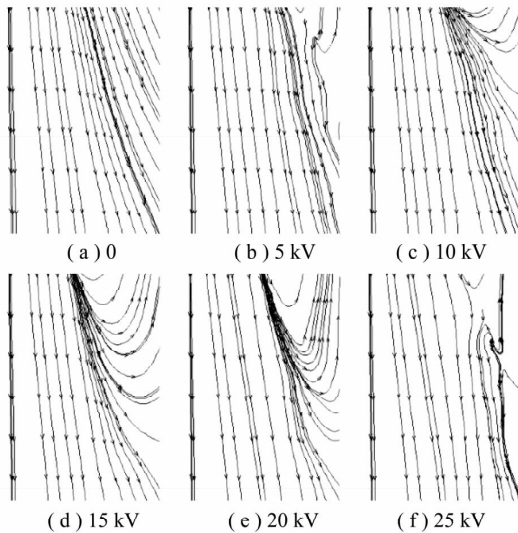


图 3 不同电压的流场局部流线
Fig. 3 Partial streamlined diagrams of flow field under different charged voltages

(2) 沿程中心轴向速度分布。

以喷嘴直径 d 作为特征长度,射流离开电极轴向距离 y 除以 d 为无量纲长度,射流通过电极平面中心的速度 v_0 为特征速度,射流中心轴向速度 v 除以 v_0 为无量纲速度,所得射流中心轴向无量纲速度分布情况如图 4 所示。由图 4 可知,在相同的轴向位置,雾滴未荷电的无量纲流速显著大于荷电之后的无量纲流速。对于荷电之后的无量纲流速,在 $y/d=55$ 处可将其左右大致分为两个区域: $y/d \leq 55$,充电电压对无量纲流速的影响呈脉动规律,另外无量纲流速沿程缓慢减少,在这个区域内 $v/v_0 \geq 0.9$,可将此区域归为射

流过渡区; $y/d \geq 55$,电场对雾滴运动速度的影响被放大,此时无量纲流速沿程加速递减,同时电压越大则相同位置的中心轴向流速越小,可将此区域归为主体区。

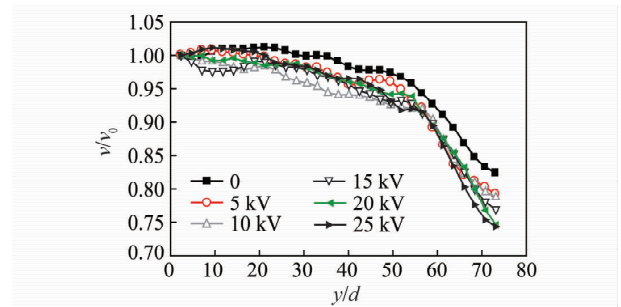


图 4 不同电压的射流中心轴向速度分布
Fig. 4 Axial velocity distribution of spray central line under different charged voltages

由此可知,在电场力拽曳下(此力与雾滴轴向运动方向相反),雾滴沿程速度(主流速度)衰减加速。但在射流过渡区与主体区内,电场力对雾滴的影响规律不同,这与两个区域内雾滴颗粒大小以及荷电量分布有很大关系。过渡区内由于雾滴库伦分裂现象的出现导致大颗粒与小颗粒并存,颗粒质量及荷电量大小分布的高度随机性导致电场力对雾滴流速的影响复杂,因此电压与无量纲速度之间并不存在必然联系。而在主体区内,惯性力较小的小颗粒经过一段时间的运动已经离开轴线中心区而飘向射流外围,中心区内仅剩大量的大颗粒雾滴,此时电场力对其影响的机理单纯,电场力越大,雾滴向前运动的阻力就越大,因此速度衰减就越快。

(3) 沿程横截面轴向速度分布。

以射流离开电极中心横向距离 x 除以 d 作为无量纲长度,射流通过距离电极 y 的平面轴向最大速度 $v_{y,max}$ 为特征速度($x/d=0$), (x,y) 处的轴向速度 v 除以 $v_{y,max}$ 为无量纲速度,所得不同的 y/d 对应不同电压下的轴向速度无量纲速度分布情况如图 5 所示。

在电压为 0 的常规雾化流场,沿程各个横截面的无量纲轴向速度均大于 0。而在高压静电场中,由于电场力的拖曳作用,图 5 的实验数据显示荷电射流在各个横截面上的不同位置开始出现部分初始动量较小的雾滴在主流方向上滞止并开始逆向流动,随着无量纲轴向长度增加(雾滴荷电量有所衰减,电场强度减小,电场力影响效果下降),则逆向流动的轴向无量纲速度有所下降。另外相同横截面上如果感应电场越强,则无量纲速度越大,参与逆向流动的雾滴数量增多,这说明强电场使得射流主体之外边缘区域内小雾滴的卷吸效果增强。

对于流场中相同的横截面,电场强度大小对速度

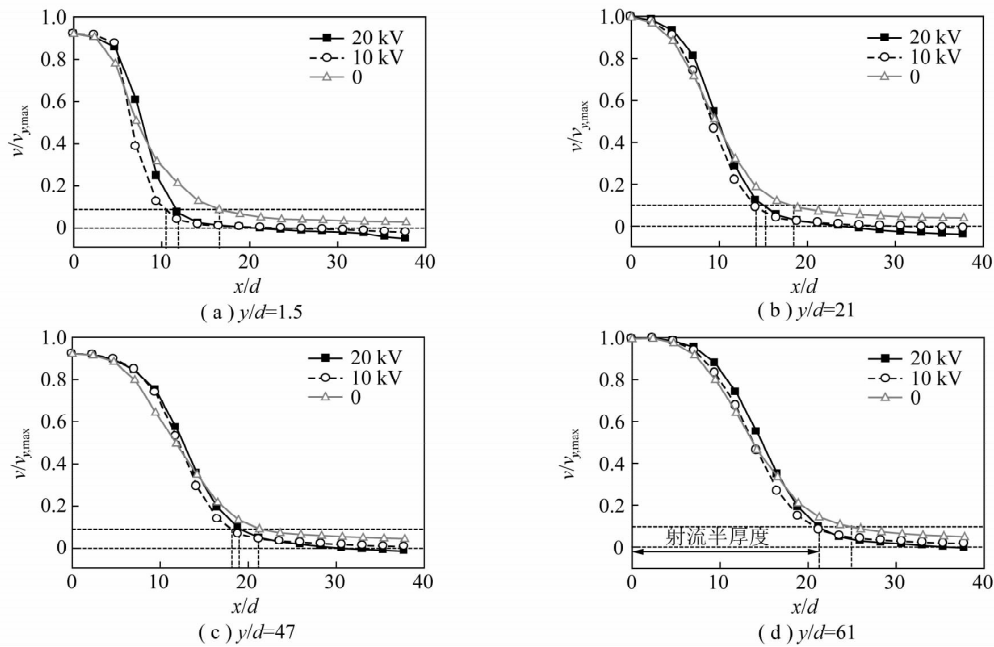


图5 电压对射流沿程横截面轴向速度的影响

Fig. 5 Effect of charged voltage on axial velocity along spray cross-sections

梯度大小有一定的影响,从图5可以看出,二者呈正比关系。假定雾滴粒径在横截面上均匀分布(实际情况不是如此,但在射流核心区较小范围内,可以这么认为),那么同一位置,电场力大小就可以反映该位置雾滴荷电量的大小。由于速度梯度可以在一定程度上反映横截面上雾滴所受电场力大小的变化,那么速度梯度从某种意义上讲可以表征横截面上各位置雾滴荷电量的分布规律。因此图5的速度梯度变化情况表明,在相同截面上雾滴荷电量沿横向增加,且强电场比弱电场增加的速度快一些。

如果将射流沿程横截面上无量纲速度 $v/v_{y,max} \approx 0.1$ 处的 x/d 作为射流半厚度的特征值来表征射流主体沿程厚度变化情况的话,则由图5可知,射流主体在发展初期沿程轴向迅速开始扩大,直至 $y/d=61$ 这种趋势才开始减缓。相比于未荷电射流,荷电射流主体厚度特征值均比未荷电射流小得多。这反映了在电场力作用下,射流主体流场中荷电雾滴不断被拉开直至脱离核心区,从而使得荷电雾滴在流场中弥散程度高于非荷电雾滴。这种效应促使射流主体区域燃烧时更易形成富氧条件。

在相同电压(10 kV)下,射流发展过程中,轴向速度在横截面上的分布逐渐趋于平缓(图6)。这表明在远离喷嘴的位置,电场力的作用效果并不明显,流场开始趋于各向同性。

2.2 电场对雷诺应力的影响

以雾滴的瞬时脉动速度 u' 及 v' 来表征其径向(横向)与轴向湍流脉动强度,以射流离开电极轴向

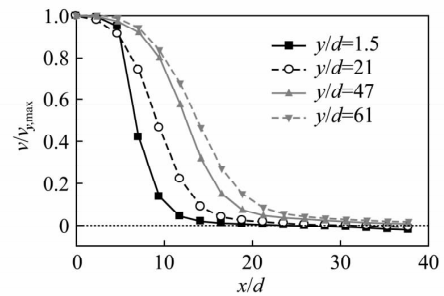


图6 射流沿程轴向无量纲速度的横向平面分布

Fig. 6 Horizontal distribution of nondimensional axial velocity along spray

距离 x 除以 d 作为无量纲长度,所得不同 y/d 对应的不同电压下的雷诺应力分布情况如图7所示。根据雷诺应力的大小可将射流沿程横截面分为3个区域来分析电场对流场中雾滴速度脉动的影响。

(1) 沿程轴线中心区域。

随着雾滴通过电极平面之后,轴线中心区域的雷诺应力在沿程各个横截面存在一个先减少后增加的过程,这是本文实验所采用的气力式喷嘴雾化的共性,不受电场强度影响。在同一截面处,雷诺应力均随着电场增强而有不同程度增加,沿程距离越大,电场对雷诺应力的影响越强烈。

(2) 峰值区域。

沿程不同横截面均存在一个显著的雷诺应力峰值区域,这与该区域相对应的射流剪切速度最强有关。由图7可以看出:① 随沿程距离不断增大,射流剪切速度最强区域逐渐外移(图6),此时雷诺应力峰

值亦逐渐向流场两侧外移; ② 随沿程距离不断增大, 同一平面上射流剪切速度梯度降低(图 6), 此时流场中雷诺应力分布集中度显著下降。以上两点充分说明雷诺应力分布与射流剪切速度强弱呈正比关系。

另外, 电场强度大小还影响着雷诺应力峰值大小: 电压在 10 kV 以内时, 电压越大则雷诺应力峰值越大, 大于 10 kV 后, 图 7 中的实验数据显示电压增加使沿程不同截面的雷诺应力峰值出现波动。

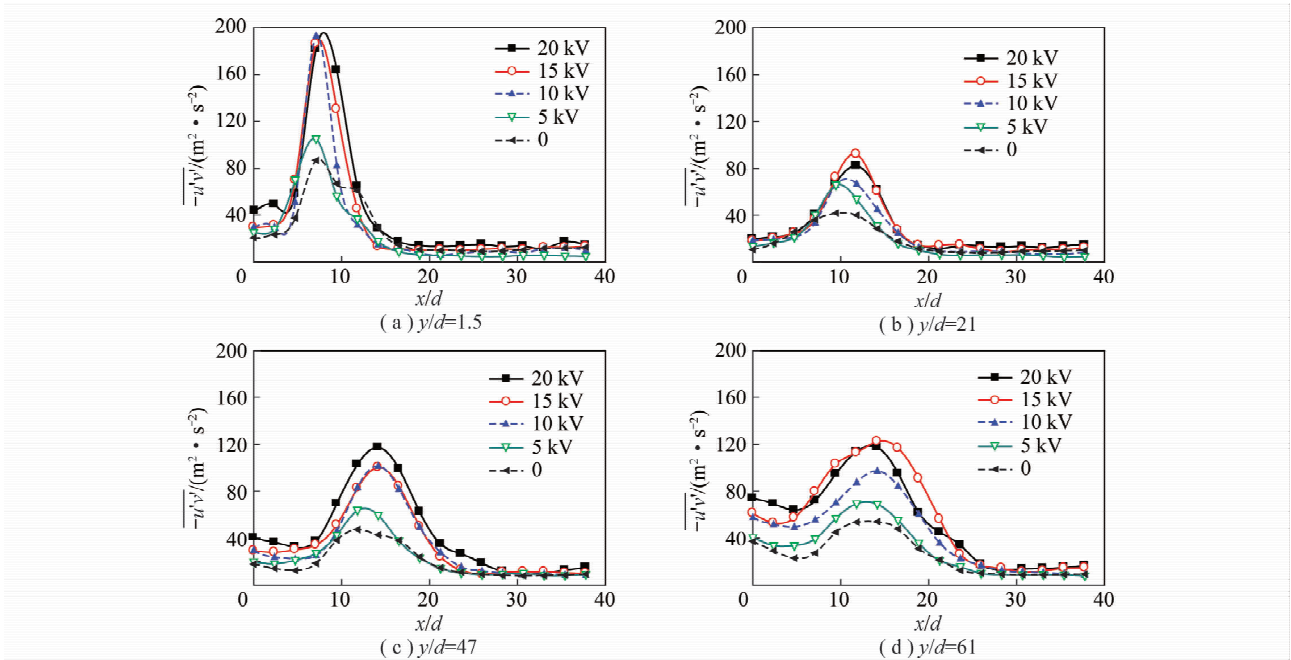


图 7 电压对射流沿程横截面雷诺应力分布的影响

Fig. 7 Effect of charged voltage on cross-sectional Reynolds stress distribution along spray

(3) 射流边缘区域。

射流边缘区域由于截面剪切速度梯度极小(图 6), 所以该区域雷诺应力最小。图 7 中的实验数据显示, 射流尾部的雷诺应力受电场影响较为明显, 电压越大, 雷诺应力越大。

2.3 电场对湍动能的影响

以雾滴的瞬时脉动速度 u' 及 v' 来表征其径向(横向)与轴向湍流脉动强度。图 8 及图 9 分别给出了无量纲轴向长度为 1.5、21、47 及 61 处流场半截面的径向与轴向瞬时脉动情况。

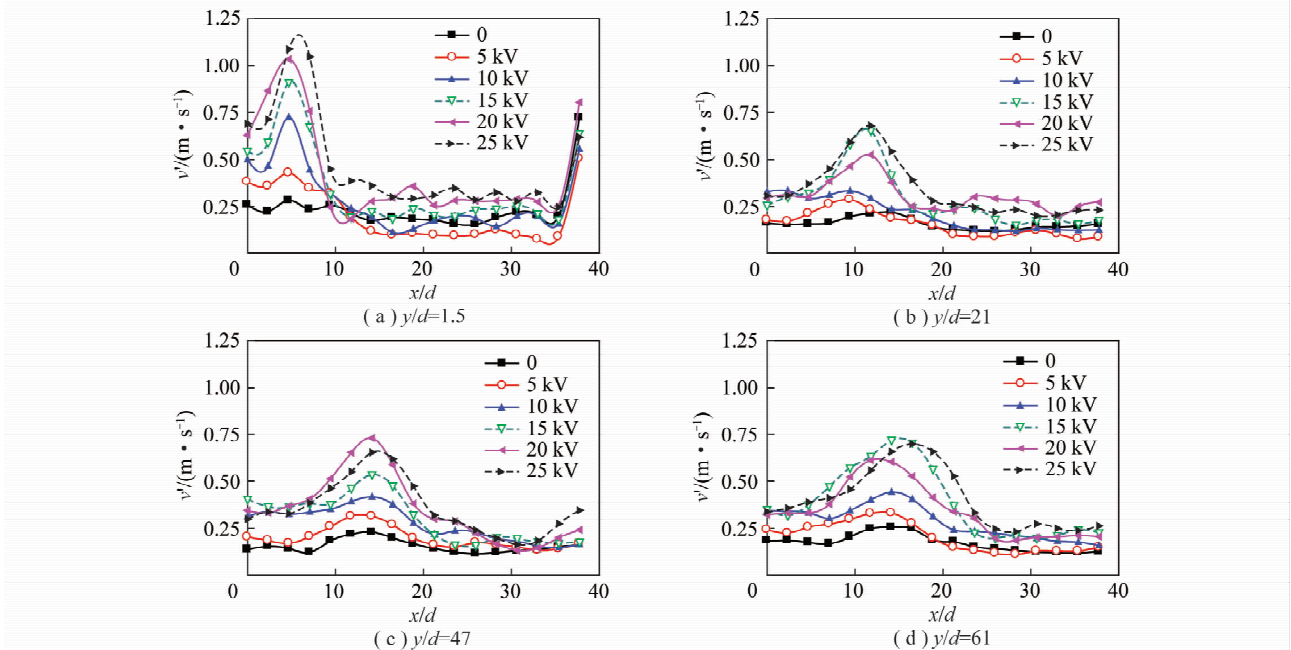


图 8 径向瞬时脉动速度

Fig. 8 Radial transient fluctuation velocity

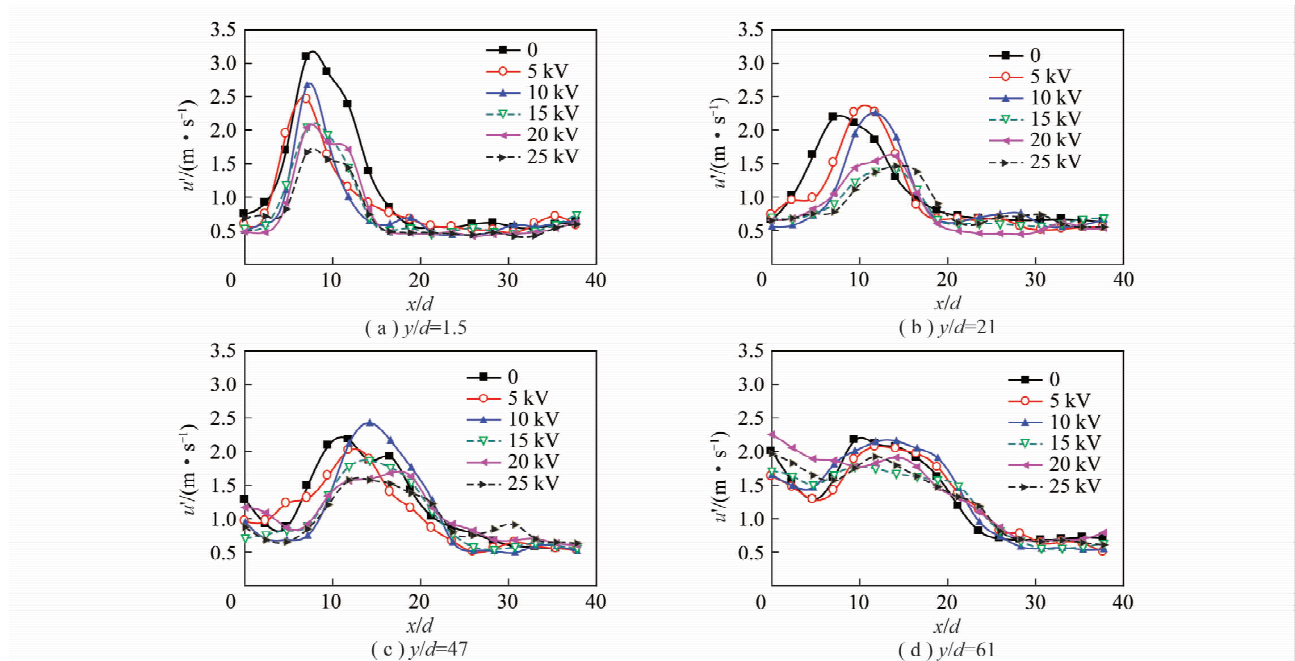


图9 轴向瞬时脉动速度

Fig. 9 Axial transient fluctuation velocity

(1) 径向湍流脉动强度。

由图8可见,常规雾化时,轴向各个断面的径向湍流强度波动不明显,基本保持一稳定值。施加电场之后,总体上雾滴径向湍流脉动强度随静电力增强而增强。在 $y/d=1.5$ 处横断面上,流场轴线处(即 $x/d=0$)湍流脉动强度高于整个横断面的均值,而后在 $x/d \approx 5$ 处迅速达到一个峰值,在 $x/d \approx 10$ 处迅速下降,直至 $x/d \approx 35$ 保持在一较小的稳定值附近波动,最后在射流流场边缘之处由于两相强烈掺混作用又迅速提升至一较大值。随着雾滴远离电极向前运动,轴线处雾滴径向湍流脉动强度减小,横截面上的湍流强度峰值亦随之减少,且随着含能涡团逐渐向外围输运,径向湍流脉动强度峰值亦逐渐向流场外围扩展。其次,对于电极电压 ≤ 10 kV的流场,在雾滴运动至 $y/d=21$ 之后,电场对各个横截面的湍流速度波动的影响已经减弱,表现为峰值不明显且各横截面径向速度脉动值差异不大。

(2) 轴向湍流脉动强度。

首先,与径向速度脉动不同,轴向(即主流方向)湍流脉动强度峰值在各个横截面上的分布位置基本固定在 $x/d=10$ 附近,随雾滴的运动距离而略向外围偏移,由此可见含能涡团的外移主要还是受横向速度脉动的影响。在远离电极处,轴线处大颗粒雾滴主流速度的衰减使得其易受气相扰动的影响,此时轴向速度湍流脉动强度在横断面上逐渐由陡峭的单峰分布转变为双峰分布。

其次,电场对轴向湍流脉动强度峰值的影响亦与

之对径向速度脉动的作用相反,即电压越大则轴向速度脉动强度越小,该现象在近电极处($y/d=1.5$)尤为明显,但在远离电极处($y/d=61$),图9(d)显示电场对轴向速度脉动的影响不大,几组电压工况下轴向速度脉动沿横截面的分布规律及强度基本一致。总的来看,电压大于15 kV后,各种工况下轴向湍流速度脉动强度的分布曲线较为扁平。这说明强电场作用下,水煤浆流场中的轴向速度脉动分布较为平均。

3 结 论

(1) 荷电射流卷吸气体的运动出现在雾炬边缘区域内,细小雾滴群在不断增强的电场力的作用下,沿程不断偏离常规雾化所运动的轨迹。感应电场越强,小雾滴群向环电极方向运动的趋势越强烈,致使射流边缘区域靠近电极处的流线发生明显的弯曲变形并随电压的不断增强呈现出了3种典型形式。这种电场力导致的流场强烈卷吸扰动将使水煤浆雾滴与空气充分混合,有效延长颗粒在燃烧室的停留时间,促进完全燃烧。

(2) 水煤浆雾滴荷电之后,沿程轴向速度及径向速度将发生改变,总体而言,电场力越强,轴向速度一定程度上将减少并在射流核心区内的沿程截面上分布趋于均匀,而径向速度在一定程度上将增加并在射流核心区内的沿程截面上呈线性分布,随电压的增大,其斜率增大。

(3) 流场中雷诺应力及涡量均集中分布在射流轴线两侧,随电场增强,雷诺应力峰值显著增加,并在

横截面上逐渐外移 随射流远离喷嘴其截面雷诺应力分布趋于平缓。

参考文献:

- [1] 岑可法,曹欣玉,倪明江,等. 水煤浆在沸腾床内燃烧过程的初步研究[J]. 工程热物理学报,1983,4(2):177-182.
Cen Kefa, Cao Xinyu, Ni Mingjiang, et al. Experimental study on combustion of coal water slurry in fluidized beds[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1983, 4(2): 177-182.
- [2] Yu Tu, Lai M-C. Injection and atomization of coal-water slurry in a higher pressure diesel-engine environment [J]. Journal of the Institute of Energy, 1991, 7(1): 51-60.
- [3] 付晓恒,王祖讷, Giovanni Novelli, 等. 精细油水煤浆制备及其在柴油机上应用的生命周期评价[J]. 煤炭学报, 2005, 30(4): 493-496.
Fu Xiaoheng, Wang Zune, Giovanni Novelli, et al. Life cycle assessment ultra-clean micronized coal-water-oil fuel preparation and it's usage in diesel engine [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(4): 493-496.
- [4] 郑捷庆,张军,钟晓龙. 水煤浆气力式静电雾化喷嘴设计及雾化流场形貌[J]. 化学工程, 2012, 40(11): 60-63.
Zheng Jieqing, Zhang Jun, Zhong Xiaolong. Coal-water slurry electrostatic atomizer design and morphology of charged spray field [J]. Chemical Engineering(China), 2012, 40(11): 60-63.
- [5] 于海龙,张传名,刘建忠,等. 新型水煤浆喷嘴雾化性能试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 99-103.
Yu Hailong, Zhang Chuanming, Liu Jianzhong, et al. Experimental study of atomizing performance of a new type nozzle for coal water slurry [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 99-103.
- [6] 黄镇宇,张传名,李习臣,等. 6 t/h 撞击式水煤浆喷嘴雾化特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 201-204.
Huang Zhenyu, Zhang Chuanming, Li Xichen, et al. A research on atomization characteristics of 6 t/h striking-typed CWS atomizer [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 201-204.
- [7] 方立军,李斌. 压力式喷嘴雾化性能的试验研究[J]. 热能动力工程, 2010, 25(2): 202-205.
Fang Lijun, Li Bin. Experimental study of spray characteristics of pressure nozzle [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010, 25(2): 202-205.
- [8] Wu T, Gong M, Lester E, et al. Characterization of residual carbon from entrained-bed coal water slurry gasifies [J]. Fuel, 2007, 86(7-8): 972-982.
- [9] 于海龙,刘建忠,范晓伟,等. 喷嘴结构对水煤浆喷嘴雾化性能影响的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 80-85.
Yu Hailong, Liu Jianzhong, Fan Xiaowei, et al. Experimental study of atomizing performance of a new type nozzle for coal water slurry [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 80-85.
- [10] 郑捷庆,罗惕乾,张军,等. 不同雾滴要求下气力式雾化喷嘴的最佳气耗率[J]. 化学工程, 2007, 35(6): 20-23.
Zheng Jieqing, Luo Tiqian, Zhang Jun, et al. Optimal air-liquid ratio for air-blast atomizer under different droplet requirements [J]. Chemical Engineering(China), 2007, 35(6): 20-23.
- [11] Lefebvre A H. Energy Considerations in twin-fluid atomization [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1992, 114(1): 89-92.
- [12] Sridhara S N, Raghunandan B N. Studies on performance of airblast atomizer under varying flow and geometric conditions [J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(3): 750-752.
- [13] 郑捷庆,张军,罗惕乾,等. 水煤浆荷电射流不稳定性的实验研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(4): 425-428.
Zheng Jieqing, Zhang Jun, Luo Tiqian, et al. Experimental study on electro-jet instability of coal water slurry [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(4): 425-428.
- [14] Paasi J, Salmela H, Smallwood J. Electrostatic field limits and charge threshold for field-induced damage to voltage susceptible devices [J]. Journal of Electrostatics, 2006, 64(2): 128-136.
- [15] Jeong H K, Tsuyoshi N. Aerodynamic influences on droplet atomization in an electrostatic spray [J]. JSME International Journal, 2000, 42(2): 224-22.