

动态分离器内部流场的 PIV 测量

张红霞¹, 王玉召¹, 张 海²

(1. 承德石油高等专科学校 河北 承德 067000; 2. 清华大学 热科学与动力工程教育部重点实验室 北京 100084)

摘要:基于 PIV 技术,采用角位移传感器和内窥镜头,测量了带静态导流叶栅的动态分离器内分离区域的流场。气流在静叶栅外的环形区域呈强湍流旋转流动,叶轮转速对该区域的流场几乎没有影响。气流在静叶内呈涡流流动,涡心位置随叶轮转速提高逐渐向后移动,区域位置越低,涡心离叶片背风面越近,涡越扁长。在静叶栅和叶轮之间的区域,气流随叶轮做旋转运动,叶轮转速越高气流旋转越强。在动叶内,气流沿流道呈均匀流动,气流流动方向与叶片之间的夹角随叶轮转速提高而增大。动态分离器内的气固分离分为三级分离:第 1 级是静叶栅外环形区域的离心分离,该级分离作用几乎不受叶轮转速的影响;第 2 级为静叶内的撞击分离和旋涡分离;第 3 级分离发生在叶轮入口区域,既有离心分离,又有撞击分离,叶轮转速对后两级的分离作用有较大影响。

关键词:动态分离器;流场测量;PIV;角位移传感器;内窥镜头;分离机理

中图分类号:TQ051 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2019)02-0076-07

PIV measurement of flow field in dynamic separator

ZHANG Hongxia¹, WANG Yuzhao¹, ZHANG Hai²

(1. Chengde Petroleum College, Chengde 067000, China; 2. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The flow field in the separation area of the dynamic separator with static guide cascade was measured by angular displacement sensor and endoscope head based on PIV technology. The airflow shows a strong turbulent rotational flow in the annular region outside static cascade, and the impeller speed has little effect on the flow field in this area. The airflow presents a vortex flow in the stator blade, the vortex center position moves backward gradually with the increase of impeller rotate speed. The lower the regional position is, the closer the vortex center is to the leeward of the blade, and the longer the vortex is. In the region between the static cascade and the impeller, the airflow rotates with the impeller, and the higher the impeller speed of impeller, the stronger the airflow rotates. In the rotor blade, the airflow flows evenly along the runner, and the angle between the flow direction of the airflow and the blade increases with the increase of impeller speed. The gas-solid separation in the dynamic separator is divided into three stages, the first stage is the centrifugal separation in the annular region outside the static cascade, the separation effect of this stage is hardly affected by the impeller speed, the second stage is the vortex separation and impact separation in the static blade, and the third stage separation occurs in the impeller inlet area, which includes centrifugal separation and impact separation. The impeller speed has a great influence on the separation of the latter two stages.

Key words: dynamic separator; flow field measurement; PIV; angular translation sensor; endoscopic head; separation mechanism

0 引 言

随着火力发电行业的快速发展,各国对火力发电厂环保的要求越来越高,许多机组都在使用低

NO_x 排放技术。为了降低 NO_x 排放,提高煤粉气流的着火稳定性和燃烧效率,动态分离器在磨煤机上的应用越来越广泛^[1]。实践表明:动态分离器在提高煤粉细度和煤粉均匀性方面均优于静态分离

收稿日期:2018-12-23;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18122311

基金项目:国家自然科学基金资助项目(L1522032)

作者简介:张红霞(1972—),女,黑龙江哈尔滨人,副教授,主要从事燃煤发电技术研究。E-mail:13633146175@126.com。

通讯作者:王玉召(1974—),男,河南南阳人,教授,主要从事洁净煤燃烧技术开发与研究。E-mail:13803144012@126.com

引用格式:张红霞,王玉召,张海. 动态分离器内部流场的 PIV 测量[J]. 洁净煤技术,2019,25(2):76-82.

ZHANG Hongxia, WANG Yuzhao, ZHANG Hai. PIV measurement of flow field in dynamic separator[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(2): 76-82.



移动阅读

器^[2],这使动态分离器得到高度重视。

对动态分离器的研究主要集中在 2 个方面:一是性能优化,主要采用试验方法^[3-5]、工业测试^[6-7]和数学模型^[8-10]的方法研究结构改进或参数优化对其性能的影响;另一方面是分离机理的研究,主要通过数值模拟^[11-18]和流场测试^[19-20]的方法,得到动态分离器内部的流场信息,进而揭示其分离机理。

由于动态分离器内部气固流场复杂,应用数值模拟的方法研究其流场时,需做许多假设和简化,得到的流场信息虽对解释某些现象和进行结构优化有一定的帮助,但模拟结果的准确性和计算模型中参数的选取尚需通过流场测试进一步验证。目前对动态分离器内部流场测试主要采用粒子动态分析(PDA)技术和激光多普勒测速(LDV)技术^[19-20]。二者均是非接触的流场测试技术,可实现对流场的无干涉测量。但是,二者均为单点测试技术,对于复杂的流场,无法获得瞬时的全流场信息。随着光机电、数字图形处理和计算机技术的发展,离子成像测速(PIV)技术逐渐成熟并得到广泛应用。与 PDA 和 LDV 技术相比,PIV 技术是一种瞬时的全流场测试技术,其测量效率更高,获得的流场信息更大。

本文基于 PIV 技术,采用角位移传感器和内窥镜镜头,实现了对动态分离器内分离区的流场全面测量。在对流场测试结果分析的基础上,对动态分离器的分离机理进行探讨。流场测量结果可为动态分离器的优化设计提供借鉴。

1 试验装置及测量方法

1.1 动态分离器

本文测试的动态分离器是依据商业运行的磨煤机粗粉分离器,通过模块化设计搭建而成(图 1),主要由筒体、静叶栅和叶轮组成,筒体和静叶栅均由有机玻璃加工而成。静叶栅由 32 个直叶片组成,叶片沿径向均匀布置,其下部与回料锥相连。叶轮由叶轮轴和 16 个安装在底板上的直叶片组成,用变频电机驱动,转速可在 0 ~ 200 r/min 变化,叶片安装角为 45°。在筒体底部设有环形进风格栅,格栅中心线与垂直方向夹角为 75°,与水平方向夹角为 45°,在筒体顶部叶轮轴四周设有环形的出风口。工作时,气流由进风格栅进入分离器,经格栅导向后形成螺旋向上气流,流经静叶栅、叶轮后,从顶部叶轮轴四周的环形出风口离开分离器。

1.2 PIV 测量原理与系统

本文流场测量系统采用 Dantec 公司生产的 PIV 系统,由 CCD 相机、激光器、同步器和安装了 Dantec

公司开发的 FlowManager 软件的计算机组成。测量时,同步器发出触发信号,同时触发激光器和 CCD 相机,使激光器发出的厚度约 1 mm 的平面激光将测量区域的示踪粒子照亮,CCD 相机拍摄出粒子的图像,经采集卡输入计算机,由 FlowManager 软件对图像进行后处理,得到测量区域的流场信息。

流场测量的准确性取决于图像的质量。得到高质量的图像,一是要保证激光面与 CCD 相机垂直,并且使相机聚焦在激光面上;二是示踪粒子要有很好的跟随性和反光性,且测量区域示踪粒子要有合适的播撒浓度。本文采用油雾作为示踪粒子,为了保证油雾质量,油和油雾发生器均使用 Dantec 公司的配套产品。油雾发生器产生的油滴直径为 1 ~ 3 μm,为了使测量区域示踪粒子具有合适的播撒浓度,经过反复测试,发生器产生的油雾从测量区域上游 5 ~ 10 cm 喷入为最佳。

1.3 测量区域

根据流场的对称性,在分离区选定 3 个高度位置(H、M、L),每个高度测量 2 个水平区域(OHV-1、OHV-2)和 1 个垂直区域(SV),共 9 个区域,如图 1 所示。其中,OHV-1 为筒体到叶轮之间的水平区域,OHV-2 为两相邻动叶之间的水平区域,SV 为筒体与静叶之间的垂直区域。

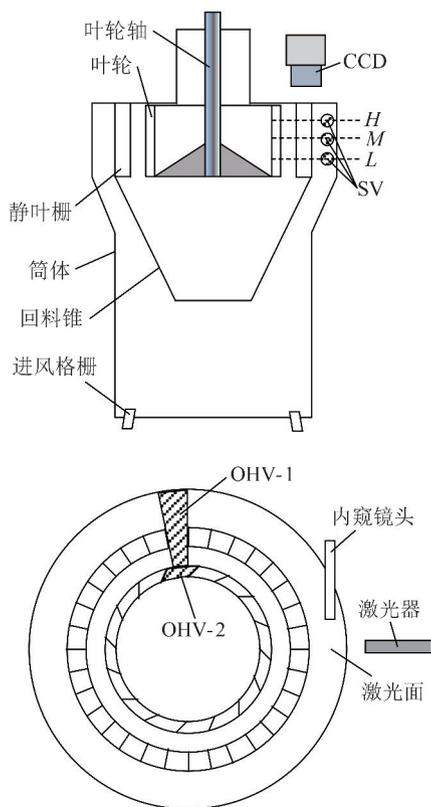


图 1 流场测量装置及测量区域

Fig. 1 Flow field measurement device and measurement region

1.4 动叶之间的流场测量方法

分离器工作时,动叶随叶轮旋转,其位置不断改变,而拍摄位置是固定不变的;且 PIV 系统同步器触发的周期与叶轮转动的周期不一致,因此,无法保证连续拍摄的区域始终处于两相邻动叶之间。为此,本文在原有 PIV 系统中增加一个自主研发的 16 位精度角位移测量装置,如图 2 所示。该装置包含 2 个直径相同的同步齿轮,一个套装在叶轮轴上,随叶轮转动,称为主动轮;另一个套装在与叶轮轴轴线平行的轴承上,称为从动轮,并通过齿形皮带与主动轮相连,实现两轮的同时转动。从动轮下部安装一个与其同轴的角位移传感器,实时测量叶轮的转动角度。测量时,将 PIV 系统的触发信号设定为外部触发,并通过参数设定,使叶轮每旋转一周,角位移传感器发出触发信号,该信号同时触发激光器和 CCD 相机,拍摄一帧图像,从而保证 PIV 测量系统的触发周期与叶轮转动周期一致,实现对动叶内流场的测量。

1.5 垂直面流场的测量方法

水平面流场测量时,CCD 相机垂直安装于分离器顶盖上方,透过水平的透明玻璃对焦到拍摄面上。

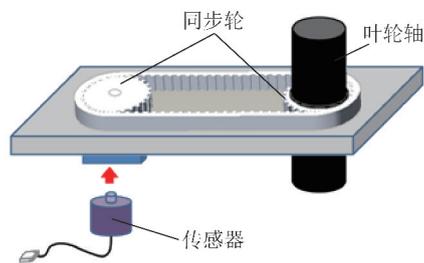


图 2 角位移测量装置

Fig. 2 Angular displacement measurement device

垂直面流场测量时,CCD 相机需从筒体侧面安装。由于筒体侧面是圆弧面,光经过折射后,相机焦距不在一个平面上,无法拍摄出清晰的示踪粒子图像。因此,本文将 CCD 相机镜头更换为尼康公司生产的直径为 10 mm 的内窥镜头,并在筒壁上打一小孔,将内窥镜头伸入分离器内部,避免了弧面透光玻璃折射的影响,从而实现垂直面流场的测量。内窥镜头的布置如图 1 所示。

2 流场测量结果

测量时,保持进风量为 $750 \text{ Nm}^3/\text{h}$,叶轮转速 S 为 0、90 和 150 r/min,测量结果如图 3~7 所示。

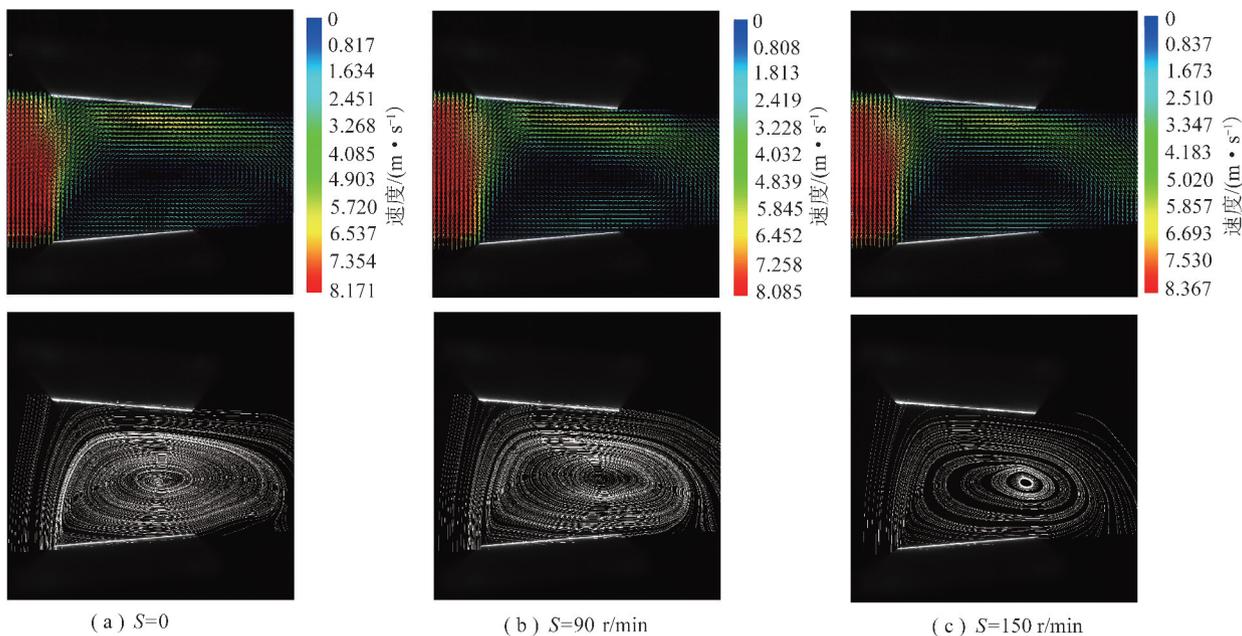


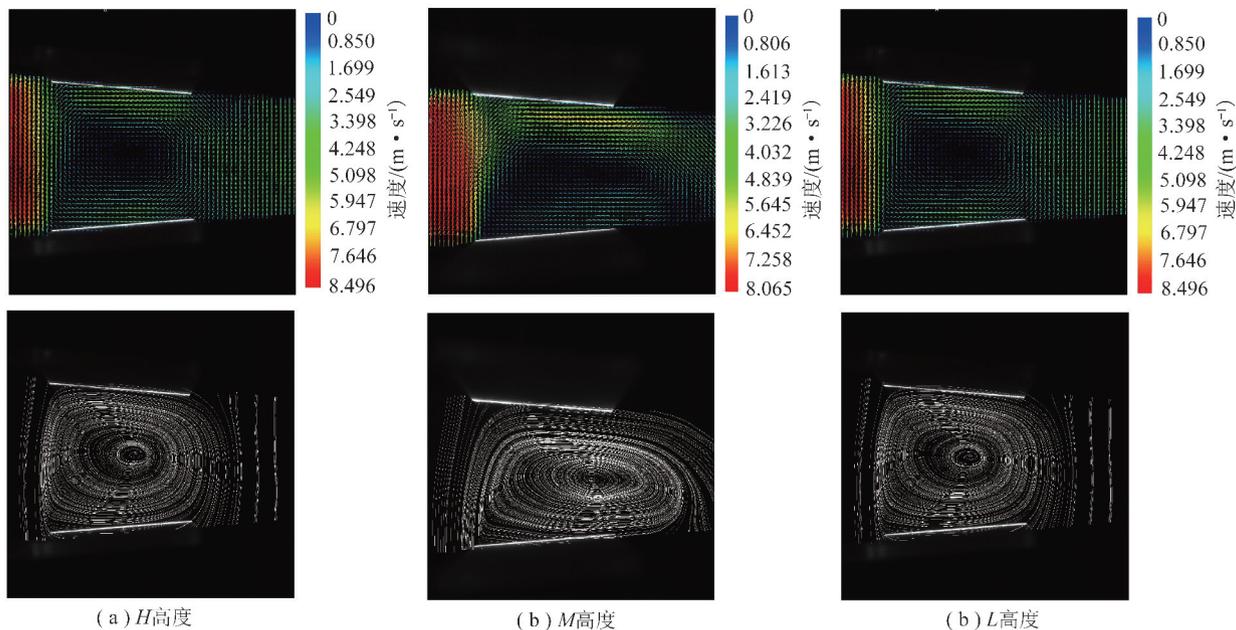
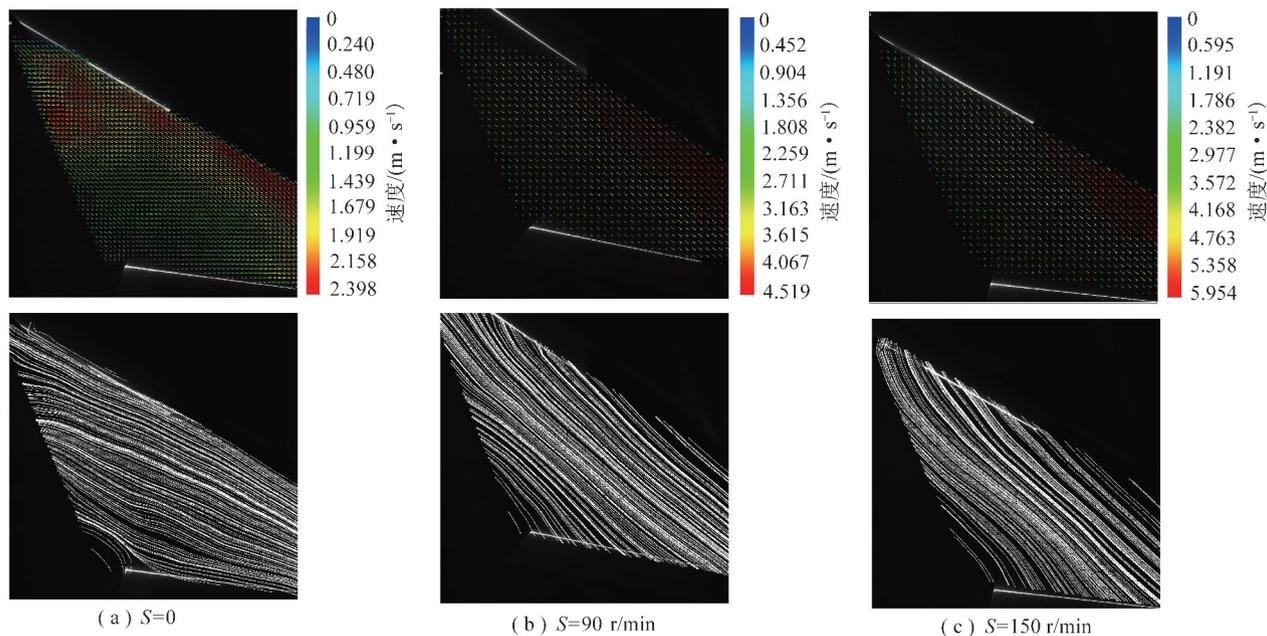
图 3 M 高度的 OHV-1 区域的速度矢量图和流线图

Fig. 3 Velocity vector and streamlines of OHV-1 region at M level

2.1 静叶与筒体之间的流动

从图 3、4 看出,在筒体与静叶之间的环形区域,气流在水平方向做旋转流动,位置越向上,切向速度越大, L 、 M 、 H 三个截面的平均切向速度分别为 7.5、8.4 和 9.3 m/s。从图 7 可看出,垂直方向的流动是以“源点”为中心的发散流,图 7 为测量区域的平均

流场,但从测得的瞬时流场看,“源点”位置是随机的,说明垂直方向有较强的湍流脉动,且位置越向上,湍流脉动速度越大, L 、 M 、 H 三个高度的平均最大轴向速度分别为 2.5、2.8 和 3.5 m/s。从水平方向和垂直方向的流场测量结果可知,静叶与筒体之间的流动属于强湍流旋转流动。对比不同叶轮转速

图 4 $S=90$ r/min 时 OHV-1 区域的速度矢量图和流线图Fig. 4 Velocity vector and streamlines of OHV-1 region when $S=90$ r/min图 5 M 高度的 OHV-2 区域的速度矢量图和流线图Fig. 5 Velocity vector and streamlines of OHV-2 region at M level

的测量结果,该区域的流场几乎不受叶轮转速的影响,这是由于静叶栅的吸纳作用所致。

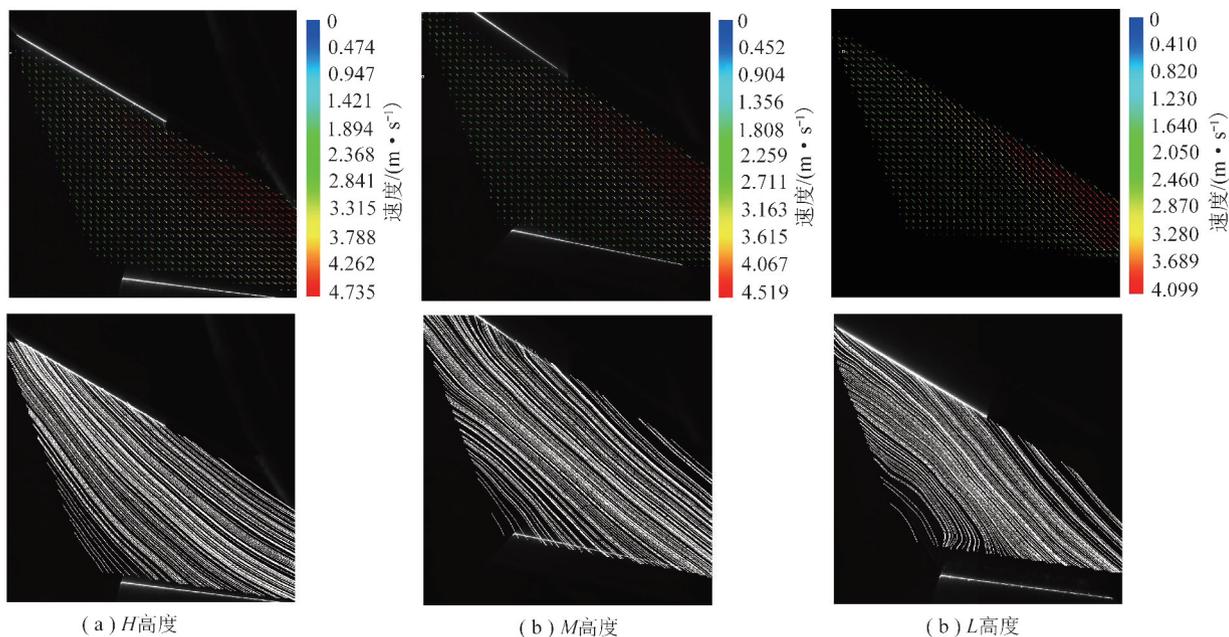
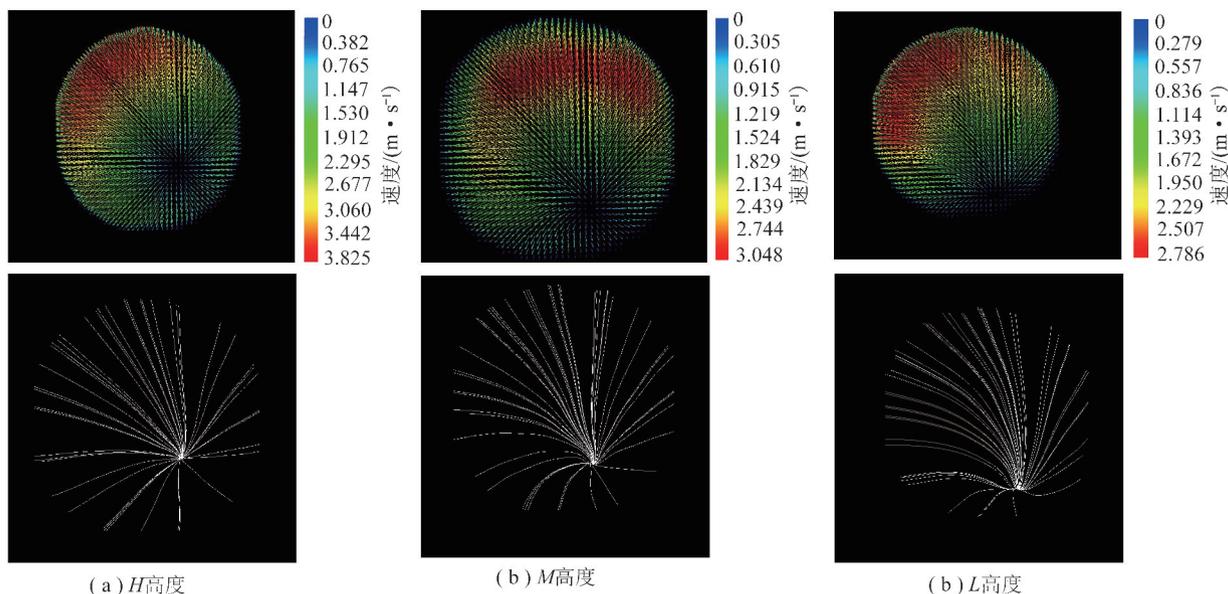
2.2 静叶内的流动

从图 3、4 可以看出,在静叶入口处,气流几乎以垂直的方向流向静叶片,受静叶片的阻挡,在静叶片的迎风面附近气流转弯进入静叶通道,之后几乎平行静叶片流出。在静叶片背风面附近,由于气流的卷吸作用形成低压区,一部分离开静叶通道的气流在压差的作用下产生回流,回流气流在通道入口又被新进入的气流卷吸进入静叶通道,最终在两相邻

静叶之间形成涡流,该涡流一直持续到静叶栅与叶轮之间的区域。位置越低,涡心离叶片背风面越近,涡越扁长。受叶轮鼓风作用的影响,涡心位置随叶轮转速的提高逐渐向后移动,涡流强度逐渐增大, M 高度的叶轮转速 $S=0$ 、 90 和 150 r/min 时,迎风面附近平均切向速度分别为 4.9 、 5.2 和 5.4 m/s,背风面附近平均回流速度分为 1.2 、 1.4 和 1.6 m/s。

2.3 静叶栅与叶轮之间的流动

从图 3、4 可以看出,在静叶栅与叶轮之间的区域,由于受到静叶内涡流的影响,一部分气流回流进

图6 $S=90$ r/min 时 OHV-2 区域的速度矢量图和流线图Fig. 6 Velocity vector and streamlines of OHV-2 region when $S=90$ r/min图7 $S=90$ r/min 时 SV 区域的速度矢量图和流线图Fig. 7 Velocity vector and streamlines of SV region when $S=90$ r/min

入静叶通道内,另一部分气流在环形通道内随叶轮做旋转流动,叶轮转速越高,旋转越强,切向速度越大,叶轮转速 $S=0$ 、 90 和 150 r/min 时,平均切向速度分别为 1.6 、 2.4 和 2.9 m/s。

2.4 动叶内的流动

从图 5、6 可以看出,气流在动叶之间的流动较为均匀。叶轮静止时,气流几乎顺着动叶之间的通道流动;叶轮旋转时,由于动叶具有了圆周速度,气流流动方向与动叶迎风面之间出现夹角,叶轮转速越高,夹角越大, M 高度的叶轮转速 $S=0$ 、 90 和 150 r/min 时,气流与动叶迎风面之间的夹角分别约为

0° 、 30° 和 45° 。不同高度位置,气流与动叶片的夹角不同,位置越靠上,夹角越大。

3 动态分离器的分离机理

根据流场测量的结果,动态分离器内主分离区的气固分离可分为三级分离。

1) 第 1 级分离发生在筒体与静叶栅之间的环形区域。该区域的气流呈强湍流旋转流动,气流夹带的煤粉颗粒受离心力的作用,当离心力大于颗粒受到的气流曳力时,颗粒即被分离,分离下来的颗粒是沿筒壁下滑至磨盘外侧。该级分离导致分离器与

磨煤区之间出现较高的物料内循环量,并对磨料层的形成产生不利影响。气流旋转越强,第 1 级分离量越大,而气流的旋转强度取决于进风格栅的水平安装角度和磨煤机的通风量。由于叶轮转速对该区域的流场几乎无影响,因此,第 1 级的分离效果基本不受叶轮转速的影响。

2) 第 2 级分离发生在静叶栅内。该分离有 2 种作用:一是静叶入口处气力转弯产生的惯性分离;二是静叶内涡流流场产生的离心分离。在惯性力和离心力的作用下,较大的颗粒撞向叶片,失去动力后沿叶片下滑,经回料锥下落至磨盘内侧重新研磨。随着叶轮转速的升高,涡心位置向后移动,使更多的煤粉颗粒带出静叶通道,对涡流分离不利。

3) 第 3 级分离发生在静叶栅与叶轮之间的环形区域。该区域的气流一方面随叶轮呈旋转流动,另一方面在进入动叶通道时受到动叶的撞击作用,因此存在离心分离和撞击分离。本级分离的颗粒同第 2 级分离的颗粒一同经回料锥下落至磨盘内侧,重新形成磨料层。叶轮转速越高,气流旋转越强,气流与叶片之间的夹角越大,离心分离和撞击分离的作用越强。

综上,在动态分离器的主分离区存在三级分离。从流场测试结果看,第 1 级分离基本不受叶轮转速的影响,第 2 级分离和第 3 级分离受叶轮转速的影响较大,随叶轮转速的提高,第 2 级分离作用减弱,第 3 级分离作用增强,说明叶轮转速仅在一定范围内对动态分离器分离性能的提高起促进作用,这与文献[3]的测试结果一致。此外,第 1 级分离的颗粒落回磨盘的外侧,对磨料层的形成不利,设计时可考虑通过优化进风格栅的倾斜角度来削弱第 1 级的分离效果,以降低其不利影响。

4 结 论

1) 基于 PIV 测量技术,采用角位移传感器和内窥镜头,实现了对带有导流静叶栅的动态分离器内部不同区域的流场测量。动叶内水平面流场和静叶栅外垂直面流场的测量方法,拓宽了 PIV 测量技术的应用。

2) 与传统的静态分离器相比,动态分离器增加了一级分离作用,提高了煤粉分离器的效率,使磨煤机磨制出更细的煤粉,同时,通过改变叶轮转速调节分离器的分离效率,从而改变煤粉的细度,以适应不同煤种对煤粉细度的要求,有利于煤的高效清洁燃烧。

3) 动态分离器内存在复杂的气固两相流动,对

其分离机理的研究、流场与分离效率的关系和结构的进一步优化,尚需开展更加深入的工作。

参考文献 (References):

- [1] SHAPIRO M, GALPERIN V. Air classification of solid particles: a review[J]. Chem. Eng. Process, 2005, 44: 279-285.
- [2] 娄新生, 周怀春, 张明春, 等. MPS 磨煤机旋转分离器的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(6): 411-416.
LOU Xinsheng, ZHOU Huaichun, ZHANG Mingchun, et al. Experimental Study on rotary classifier used in MPS type pulverised mill [J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(6): 411-416.
- [3] 王玉召, 张海, 吕俊复. 旋风叶轮式分离器性能试验研究[J]. 电站系统工程, 2013, 29(3): 12-14.
WANG Yuzhao, ZHANG Hai, LYU Junfu. Experimental research on the performance of a cyclone impeller type separator [J]. Power System Engineering, 2013, 29(3): 12-14.
- [4] 孔文俊, 栾庆富, 程尚模, 等. 叶轮式旋转煤粉分离器的试验研究[J]. 动力工程, 1995, 15(2): 57-62.
KONG Wenjun, LUAN Qingfu, CHENG Shangmo, et al. An experimental investigation on the flow performance of a rotary type pulverized coal classifier [J]. Power Engineering, 1995, 15(2): 57-62.
- [5] GAO L, YU Y, LIU J. Study on the cut size of a turbo air classifier [J]. Powder Technology, 2013, 237: 520-528.
- [6] GALK J, PEUKERT W, KRAHNEN J. Industrial classification in a new impeller wheel classifier [J]. Powder Technology, 1999, 105(1/2/3): 186-189.
- [7] JOHANSEN S T, DE SILVA S R. Some considerations regarding optimum flow fields for centrifugal air classification [J]. Int. J. Miner. Process, 1996, 44/45: 703-721.
- [8] WANG X, GE X, ZHAO X, et al. A model for performance of the centrifugal countercurrent air classifier [J]. Powder Technology, 1998, 98: 171-176.
- [9] ALTUN O, BENZER H. Selection and mathematical modelling of high efficiency air classifiers [J]. Powder Technol., 2014, 264: 1-8.
- [10] KUERTEN J G M, VAN ESCH B P M, VAN KEMENADE H P, et al. The effect of turbulence on the efficiency of the rotational phase separator [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2007, 28: 630-637.
- [11] HUANG Q, LIU J, YU Y. Turbo air classifier guide vane improvement and inner flow field numerical simulation [J]. Powder Technology, 2012, 226: 10-15.
- [12] 闫顺林, 杨玉环. 新型高性能弯扭动叶旋转煤粉分离器特性研究[J]. 动力工程学报, 2012, 32(2): 140-146.
YAN Shunlin, YANG Yuhuan. Characteristic study on high-performance rotary type pulverized coal classifier with bowed twisted moving blades [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(2): 140-146.
- [13] 焦世超, 姚生龙. 旋转煤粉分离器特性的数值研究 [J]. 能源工程, 2014(1): 75-78.
JIAO Shichao, YAO Shenglong. Numerical research on characteristics of rotating pulverized-coal classifier [J]. Energy Project,

- 2014(1):75-78.
- [14] VUTHALURU H B, PAREEK V K, VUTHALURU R. Multiphase flow simulation of a simplified coal pulveriser[J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86:1195-1205.
- [15] 孔文俊, 栾庆富, 张明春, 等. MPS磨新型静动叶结合组合式旋转煤粉分离器研究[J]. 热能动力工程, 1996, 11(2):75-80.
- KONG Wenjun, LUAN Qingfu, ZHANG Mingchun, et al. A study on a new type of pulverized coal classifier with static flaps and rotating blades for a MPS mill[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1996, 11(2):75-80.
- [16] AFOLABI L, AROUSSI A, ISA N M. Numerical modelling of the carrier gas phase in a laboratory-scale coal classifier model [J]. Fuel Processing Technology, 2011, 92:556-562.
- [17] GUIZANI R, MOKNI I, MHIRI H, et al. CFD modeling and analysis of the fish-hook effect on the rotor separator's efficiency[J]. Powder Technology, 2014, 264:149-157.
- [18] BATALOVIC V. Centrifugal separator, the new technical solution, application in mineral processing [J]. International Journal of Mineral Processing, 2011, 100:86-95.
- [19] GUO L, LIU J, LIU S, et al. Velocity measurements and flow field characteristic analyses in a turbo air classifier[J]. Powder Technol., 2007, 178:10-16.
- [20] 张明春, 栾庆富, 韩才元. 旋转分离器空气动力场研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 1995, 23(4):110-113.
- ZHANG Mingchun, LUAN Qingfu, HAN Caiyuan. On the aerodynamic flow field in a rotary classifier [J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 1995, 23(4):110-113.