# 基于 PIV 技术的七喷嘴气化炉流场研究

方薪 $\mathfrak{m}^{1,2}$  巩志 $\mathfrak{L}^2$  冯子洋<sup>2</sup> 刘 臻<sup>2</sup>

(1.中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083;2.北京低碳清洁能源研究所,北京 102209)

摘 要:为研究七喷嘴气化炉的流场分布,建立了顶置七喷嘴气化冷模试验装置,采用激光粒子成像 测速系统(PIV)在气化炉的上部、中部及下部视窗进行了流场测试,比较分析了颗粒流量、分散风流 量对气化炉流场的影响。结果表明,在颗粒流量 20~150 kg/h,分散风流量 740~880 m<sup>3</sup>/h 的工艺条 件下,气化炉上部流场呈现自由射流特点,射流长度为 40 cm,平均射流速度为 25 m/s,中下部流场则 以返混区为主,流速在 8 m/s 以下;颗粒流量增大会使得最大射流速度由 40 m/s 降低至 15 m/s,且气 化炉上部射流粒子束的径向脉动增强,造成射流弥散;分散风流量增大使得最大射流速度由 25 m/s 增至 35 m/s,射流长度无明显变化。颗粒流量和分散风流量对流场的影响主要体现在气化炉上部, 对中下部流场的影响逐渐减弱。

关键词:PIV; 气化炉; 七喷嘴; 流场

中图分类号:TQ54

文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2016)06-0034-06

Research on flow field of gasifier with seven nozzles based on PIV technology

FANG Xinhui<sup>12</sup> ,GONG Zhijian<sup>2</sup> ,FENG Ziyang<sup>2</sup> ,LIU Zhen<sup>2</sup>

(1. School of Chemical and Environmental Engineering China University of Mining & Technology (Beijing) Beijing 100083 , China;

2. National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy Beijing 102209 , China)

**Abstract**: A cold model unit was built to study the flow field distribution of gasifier with seven nozzles. The experimental method of PIV was used to measure the flow fields of the upper middle and lower parts of gasifier the influence of particles flow rate and dispersed-gas flow rate on flow field were analyzed. The results showed that when the particles flow rate ranged from 20 kg/h to 150 kg/h and the dispersed-gas flow rate ranged from 740 m<sup>3</sup>/h to 880 m<sup>3</sup>/h the upper flow filed of the gasifier had the characteristics of free jet significantly the length of jet flow was 40 cm the average efflux velocity was 25 m/s. Meanwhile the middle and lower flow filed was mainly formed with mixing zone and the velocity of the whole field was below 8 m/s. As particles flow rate increased the maximum jet velocity decreased from 40 m/s to 15 m/s and the pattern of jet flow was tend to disperse. As the dispersed-gas flow rate increased the maximum jet velocity decreased from 25 m/s to 35 m/s while the length of jet flow had no significant change. The influence of the two factors on the flow field mainly reflected in the top of gasifier and gradually weakened in the middle and lower flow fields.

Key words: PIV; gasifier seven nozzles; flow field

# 0 引 言

喷嘴是煤气化技术的核心设备,其射流特性将 直接影响气化炉内流场、停留时间等关键参数。喷 嘴的性能、寿命与整个装置的运行周期、稳定性紧密 相关,开展喷嘴射流特性研究,掌握气化炉内流场变 化规律,对于优化喷嘴结构和气化炉的研发设计具 有重要意义。气化炉的操作条件苛刻,难以在高温 高压条件下表征气化喷嘴的射流特性。冷模装置投 资小,操作简便,在气化技术研发过程中得到了广泛 引用<sup>[1-3]</sup>。在气化冷模装置上可较容易得到常温常 压下的气化炉内部流场、射流长度、停留时间等流体

基金项目:神华集团科技创新项目(ST930014SH0)

收稿日期:2016-03-02;责任编辑:白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2016.06.007

作者简介:方薪晖(1982—), 男 湖北蕲春人,工程师,硕士,从事煤气化技术开发工作。E-mail: fangxinhui@163.com

引用格式:方薪晖 沨志坚 冯子洋 絝.基于 PIV 技术的七喷嘴气化炉流场研究[J].洁净煤技术 2016 22(6):34-39.

FANG Xinhui ,GONG Zhijian ,FENG Ziyang *et al*. Research on flow field of gasifier with seven nozzles based on PIV technology [J]. Clean Coal Technology 2016 ,22( 6) : 34-39.

力学参数 进而通过相似理论为气化炉的放大设计 提供理论指导<sup>[4]</sup>。当前主流气化炉主要分为顶置 单喷嘴和对置式多喷嘴气化炉 ,如以顶置单喷嘴为 代表的德士古、GSP 气化炉<sup>[5-6]</sup> ,以对置式多喷嘴为 代表的壳牌气化炉<sup>[7]</sup>。激光粒子成像测速系统 (PIV) 技术在气固两相流的流场研究中得到广泛应 用<sup>[8-10]</sup>, PIV 通过非接触式流场测量方式,在同一时 刻记录整个测量平面的流场信息。罗智等[11]运用 PIV 对矩形喷射器内部射流流场进行了测量,分析 了整个喷射器内部流场的流动特性 发现受限射流 发展经历了先扩张后收缩 2 个阶段 ,射流主流边缘 的气体流动受到阻碍,产生回流和涡旋。 王振南 等<sup>[12]</sup>采用 PIV 测量平流射流煤粉燃烧器中心射流 区域的流场特性。通过对不同示踪粒子特性的分 析 选定 SiC 粉末表征气相流场 煤粉表征颗粒射流 流场。结果表明,煤粉具有较好的散射特性,采用 PIV 可获得合理的煤粉颗粒流场。Lindstedt 等<sup>[13]</sup> 采用 PIV 研究两喷嘴对置湍流撞击流的速度应力 特征 发现了撞击面和轴线的几何中心不重合。为 研究顶置多喷嘴气化炉内的射流特性 ,笔者在自主 研发的七喷嘴基础上,建立了顶置七喷嘴气化炉冷 态试验装置。试验过程中,在离喷嘴口25、90、 155 cm 处 对气化炉内轴向剖面流场进行测试,得 到顶置七喷嘴气化炉内的流场分布图。同时,为研 究顶置七喷嘴的射流特性,通过调整颗粒流量和分 散风流量 ,了解颗粒流量和分散风流量对气化炉内 射流长度、射流速度的影响。

### 1 试验系统

气化冷模试验装置为稀相气力输送系统,输送 压力 60 kPa(表压,下同),输送介质为玻璃微珠,平 均粒径为 58 μm,堆积密度为 1 330 kg/m<sup>3</sup>。空气经 由罗茨风机压缩后分成 2 股,一股作为输送风,另一 股作为分散风。输送风夹带玻璃微珠输送至气化喷 嘴,分散风进入喷嘴环隙将粒子束进行雾化。气化 冷模试验系统如图 1 所示。

气化炉上方布置 7 个双通道喷嘴,相邻的 3 个 喷嘴中心连线构成等边三角形,每个喷嘴外环供给 分散风,喷嘴内环介质为分散风夹带煤粉。喷嘴平 面分布及喷嘴结构如图 2 所示。

PIV 测试技术作为一种瞬时全场测速技术,突破了空间单点测量技术的局限性,对流场不产生干扰,可在同一时刻记录整个测量平面的流场信息,适





用于研究涡流等复杂流动。试验系统中,PIV 激光 面为气化炉轴向剖面,光电转换式 CCD 相机拍摄面 与 PIV 激光面垂直。CCD 相机拍摄区域为 60 cm× 60 cm 图像为 2 048×2 048 像素。CCD 相机拍摄点 分别位于气化炉上部、中部和下部 3 个视窗 拍摄点 距离喷嘴口分别为 25、90、155 cm ,CCD 相机所拍图 像经过 Insight 3g 软件处理后即可得到相应区域的 流场信息,PIV 测试示意如图 3 所示。

## 2 结果与讨论

## 2.1 顶置七喷嘴气化炉流场分布

在颗粒流量 50 kg/h,输送风流量 200 m<sup>3</sup>/h,分 散风流量 820 m<sup>3</sup>/h 的条件下,通过 CCD 相机在上 部、中部、下部视窗对 PIV 激光面进行拍摄,得到的 七喷嘴气化炉在距离喷嘴口 25、90、155 cm 处的流 场如图 4 所示。

由图 4a 可知 在气化炉上部流场中存在 3 股射 流向下发展,呈现自由射流特征,射流长度约 40 cm,平均射流速度约 25 m/s。因 3 股射流的横向 脉动,会碰撞靠近射流边界的空气,并带动其一起向 前运动。随着射流向下发展,射流边界与周围空气 之间产生动量交换,周围空气不断被卷入,导致在 3



图 4 顶置七喷嘴气化炉流场

Fig. 4 Flow field of gasifier with seven nozzles

股射流区旁边形成卷吸现象。

由图 4b 可知, 七喷嘴的射流没有发展到中部窗

口 在离喷嘴 70~110 cm 处,气化炉内粒子整体从 左壁面到右壁面由下向上运动,流速降至 8 m/s 以 下,在靠近右壁面处形成涡流区。

由图 4c 可知,下部流场与中部流场类似,在离 喷嘴 140~170 cm 处,流场内存在大量粒子返混,整体流速降至 3 m/s 以下,右壁面存在涡流区与图 4b 中的涡流能够很好地衔接。

由以上分析可知 通过 PIV 测试可得到气化炉 内轴向剖面的流速及流动迹线等信息,受颗粒流量 及分散风流量的影响 射流发展到一定长度将停止, 七喷嘴射流主要集中在气化炉上部窗口,中、下部流 场则主要以返混为主。根据这些流场特性,可将气 化炉内的物理空间划分为不同分区(图5)。其中 I 区因顶部七喷嘴的高速气流产生,可近似为自由射 流L区的流动特性与平推流反应器类似。在靠近 壁面的 II 区是因流体卷吸作用引起的涡流区,在射 流区下方的Ⅲ区是较明显的涡流区 ,Ⅱ区和Ⅲ区可 近似为全混流区。根据平推流和全混流的特点,该 气化炉可形成由平推流和全混流反应器构成的组合 模型 在气化炉热模模拟中 此组合模型结合气化反 应动力学参数和反应器结构参数 比通用的吉布斯 能最小化模型更全面反映出气化炉内的反应特 性[14-15]



图 5 七喷嘴气化炉流场分布



2.2 颗粒流量对流场的影响

固定输送风流量和分散风流量,通过调节下料 量将玻璃微珠流量从 20 kg/h 逐步增大到150 kg/h, 观察流场的变化,测试工况见表 1。

在以上4种工况下,七喷嘴气化炉的上部流场 如图6所示。

#### 表1 不同颗粒流量下的测试工况

 
 Table 1
 Measurement conditions for different particles flow rate

项目	工况 1	工况 2	工况 3	工况4
玻璃微珠流量/( kg • h <sup>−1</sup> )	20	50	100	150
输送风流量/( m <sup>3</sup> • h <sup>-1</sup> )	200	200	200	200
<b>分散风流量</b> /( m <sup>3</sup> • h <sup>-1</sup> )	820	820	820	820

图 6a、6b 中射流中心的红色区域为高速区 ,图 6a 中的最大射流速度达到 40 m/s ,随着颗粒流量 的增大 ,高速区面积明显减小 ,颗粒流量进一步增 大。在图 6c、6d 中已无法观测到射流中心的高速 区,最大射流速度降低到 15 m/s。在颗粒流量较 小的条件下(工况 1 和工况 2),3 股射流速度分布 均匀,射流长度约 40 cm;在颗粒流量较高的条件 下(工况 3 和工况 4),射流速度分布逐渐变得弥 散。图 6c、6d 中 3 股射流均已变得弥散,其原因可 能为气化炉内的颗粒浓度增大导致粒子束湍流运 动产生的径向脉动增强,颗粒有向其他方向发展 的趋势,增加了气化炉内流场的无序性,造成射流 弥散。因此,颗粒流量是气化炉上部流场的流速 及流动方向的影响因素。





#### 2.3 颗粒流量对等高轴向速度的影响

颗粒流量对七喷嘴气化炉的上部流场有较大 影响,对气化炉中下部流场的影响则可通过对等 高轴向速度进行对比。试验测试点分别为距喷嘴 口90、155 cm 处,颗粒流量 50~150 kg/h 逐渐增 大,分散风为 820 m<sup>3</sup>/h,输送风为 200 m<sup>3</sup>/h。气化 炉内距喷嘴口90、155 cm 处的等高轴向速度如图 7 所示。

由图 7a 可知,随着颗粒流量从 50 kg/h 增至 150 kg/h ,距喷嘴口 90 cm 处的轴向速度逐渐减小, 速度波动最大为 4 m/s; 而距喷嘴口 155 cm 处的轴 向速度几乎没有波动。因此,颗粒流量对气化炉中 部流场的影响要强于对下部流场的影响。由图 6 也 可知,七喷嘴的3股射流仅发展到距离喷嘴口 40 cm 处,射流束带来的卷吸作用对上部流场的影 响较为明显,因此,气化炉由上向下,颗粒流量的增 加对流场的影响逐渐减弱。

2.4 分散风流量对流场的影响

七喷嘴的射流长度约 40 cm ,射流对流场的影响主要集中在气化炉上部 ,在工艺条件相近的条件下 ,分散风对流场的影响也应集中在气化炉上部 ,因此 ,试验拍摄点选择为气化炉上部视窗 ,测试工况见表 2。

4种工况下的流场分布如图 8 所示。

由图 8 可知 在当前工艺条件下 分散风流量的 增大不会使得射流弥散。分散风流量从 740 m<sup>3</sup>/h





表 2 不同分散风下的测试工况

 Table 2
 Mesurement conditions for different

dispersed-gas flow rate

项目	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
玻璃微珠流量 /( kg • h <sup>-1</sup> )	20	20	20	20
输送风流量/( m <sup>3</sup> • h <sup>-1</sup> )	200	200	200	200
分散风流量/( m <sup>3</sup> ・h <sup>-1</sup> )	740	780	820	880

增加到 880 m<sup>3</sup>/h,在分散风流量较小的工况下(工 况1和工况2) 射流速度约 25 m/s,在3 股射流的 中心处几乎无法观测到高速区,随着分散风流量的 增大,可明显观测到射流束中出现高速区,高速区最 大速度为 35 m/s。由此可知,射流速度会随着分散 风流量的增大而增大。同时,与图 8a、8b 相比,图 8c、8d 中的3 股射流长度均在 30~40 cm,无明显变 化 这充分说明随着分散风流量增大,射流长度无明 显变化。





# 3 结 论

 1) 七喷嘴气化炉上部流场呈现出自由射流的 特点,平均射流速度为 25 m/s,射流长度为 40 cm。
 在 3 股射流束的旁边出现流体卷吸现象;而在气化 炉中、下部,流场主要以返混区为主。

2) 随着颗粒流量的增大,射流速度逐渐减小,

当颗粒流量增大到一定程度 射流将逐渐弥散 ,沿气 化炉从上向下 ,颗粒流量的增加对流场的影响逐渐 减弱。

3) 分散风流量的增大不会造成射流弥散。随 着分散风流量的增大 射流速度增大 最大射流速度 由 25 m/s 增至 35 m/s; 射流长度均在 30~40 cm ,无 明显变化。

#### 参考文献(References):

 [1] 王辅臣,于广锁,龚 欣,等.射流携带床气化炉内宏观混合过 程研究(I) 冷态浓度分布[J].化工学报,1997,48(2):193-199.

Wang Fuchen , Yu Guangsuo , Gong Xin , *et al.* Investigation of macro-mixing process for jet-entrained gasifier (I) cold model concentration distribution [J].Journal of Chemical Industry and Engineering ,1997 *A*8(2): 193-199.

 [2] 单贤根 索 娅 任相坤.气流床煤气化冷模实验研究进展[J]. 神华科技 2010 8(6):61-65.

Shan Xiangen, Suo Ya, Ren Xiangkun. The research progress of cold form experiment of entrained-bed gasification technology [J].Shenhua Science and Technology 2010 & (6):61-65.

- [3] 万翠萍 代正华 龚 欣.多喷嘴对置气化炉气体停留时间[J]. 化学反应工程与工艺 2008 24(3):285-288.
   Wan Cuiping Dai Zhenghua ,Gong Xin.Residence time distribution of nozzle-opposed gasifier[J].Chemical Reaction Engineering and Technology 2008 24(3):285-288.
- [4] 晋日亚,贺增第,朱志伟.关于化工设备放大方法的讨论[J].化学工程师,1999(6):25-27.

Jin Riya ,He Zengdi ,Zhu Zhiwei. Discussing the chemical method of magnification [J]. Chemical Engineer ,1999( 6) : 25-27.

[5] 郑明峰,冯亮杰,尹晓晖.大型煤化工项目气化技术的综合对比 [J].大氮肥 2011 34(4):217-220.

Zheng Mingfeng ,Feng Liangjie ,Yi Xiaohui. Comprehensive comparison of gasification technologies in large-scaled coal-chemical projects [J]. Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry ,2011 ,34 (4): 217-220.

[6] 杨 英 魏 璐 ,罗春桃.GSP 气化技术工业化应用及发展方向[J].洁净煤技术 2013 ,19(1):72-74.

Yang Ying ,Wei Lu ,Luo Chuntao Industrial application and development direction of GSP gasification technology [J]. Clean Coal Technology 2013 ,19(1) : 72-74.

[7] 郑振安. Shell 煤气化技术(SCGP)的特点[J]. 煤化工,2003
 (2):7-11.

Zheng Zhen´an.Features of Shell coal gasification technology [J]. Coal Chemical Industry 2003(2):7-11.

- [8] 石惠娴,王勤辉,路仲泱,等.PIV应用于气固多相流动的研究 现状[J].动力工程 2002 22(1):1589-1593.
  Shi Huixian,Wang Qinhui Luo Zhongyang *et al*.The application of PIV in gas-solid multiphase flow[J].Power Engineering 2002 22 (1):1589-1593.
- [9] 孙鹤泉,康海贵,李广伟.PIV 的原理与应用[J].水道港口, 2002 23(1):42-45.
   Sun Hequan, Kang Haigui, Li Guangwei. Theory and application of PIV[J].Waterway and Harbor 2002 23(1):42-45.
- [10] 王勤辉,赵晓东,石惠娴,等.循环流化床内颗粒运动的 PIV 测试[J].热能动力工程 2003,18(4):378-381.
   Wang Qinhui Zhao Xiaodong Shi Huixian *et al*.PIV measurements of particle movement in a circulating fluidized bed[J].Engineering

for Thermal Energy and Power 2003 ,18(4): 378-381.

- [11] 罗 智 徐大伟.应用 PIV 技术对气固喷射器流场的试验研究
   [J].电站系统工程 2004 20(2): 29-30.
   Luo Zhi, Xu Dawei. An experimental study on jet flow field of gas-solid injector with PIV technology [J]. Power System Engineering 2004 20(2): 29-30.
- [12] 王振南 涨 扬,吴玉新,等.PIV 对射流煤粉火焰流场特性的 分析[J].工程热物理学报 2015 36(6):1356-1359.
  Wang Zhennan ,Zhang Yang ,Wu Yuxin ,et al. Analysis on flow field of coal jet flame using PIV[J].Journal of Engineering Thermophysics 2015 36(6):1356-1359.
- [13] Lindstedt R P ,Luff D S ,Whitelaw J H. Velocity and strain rate characteristics of opposed isothermal flows [J].Flow Turbu– lence and Combustion 2005 ,74(2):169–194.
- [14] Kong Xiangdong Zhong Weimin ,Du Wenli. Compartment modeling of coal gasification in an entrained flow gasifier: a study on the influence of operating conditions [J]. Energy Conversion and Management 2014 82: 202-211.
- [15] 杨志伟 王 哲 李 政 等.水煤浆水冷壁气化炉的反应器网 络模型[J].清华大学学报(自然科学版),2013,53(4):514-519.

Yang Zhiwei ,Wang Zhe ,Li Zheng ,*et al*. Reactor network model for a slurry-feed membrane entrained flow gasifier [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology) ,2013 ,53 (4) : 514-519.

#### 上接第 105 页)

[11] 黄 斌,刘练波,许世森.二氧化碳的捕获和封存技术进展[J].中国电力 2007 40(3):14-16.

Huang Bin Liu Lianbo Xu Shisen. Evolution of  $CO_2$  capture and sequestration technology [J]. Electric Power 2007 A0(3): 14–16.

- [12] 周响球.燃煤电厂烟气二氧化碳捕获系统的仿真研究[D].重 庆: 重庆大学 2008: 7-8.
- [13] 马欢欢.燃烧电厂脱碳系统与发电系统的模拟与优化[D].武
   汉:武汉理工大学 2014: 10-12.
- [14] 黄 斌,刘练波,许世森,等.燃煤电站 CO<sub>2</sub>捕集与处理技术的 现状与发展[J].电力设备 2008 9(5): 3-6.
  Huang Bin Liu Lianbo Xu Shisen *et al.* The current situation and development of CO<sub>2</sub> trapping and treatment technique in coal-fired power station[J].Electrical Equipment 2008 9(5): 3-6.
- [15] 徐文佳,王万福,王文思.二氧化碳捕集研究进展及对策建议
  [J].绿色科技 2013(1):60-63.
  Xu Wenjia, Wang Wanfu, Wang Wensi. Research progress and some countermeasures of carbon dioxide capture [J]. Journal of Green Science and Technology 2013(1):60-63.
- [16] 仲 平 彭斯震,贾 莉,等.中国碳捕集、利用与封存技术研 发与示范[J].中国人口・资源与环境 2011 21(12):41-45. Zhong Ping Peng Sizhen Jia Li *et al.*Development of carbon capture utilization and storage(CCUS) technology in China[J].China Population Resources and Environment 2011 21(12):41-45.