

顶置七喷嘴气化炉冷态速度场研究

彭宝仔,刘臻,管清亮,方薪晖,李文华
(北京低碳清洁能源研究所,北京 102211)

摘要:为研究顶置七喷嘴气化炉流场情况,基于相似准则设计并模拟工业规模干粉气化炉条件,采用激光多普勒动态分析仪(PDA)在高4 000 mm、直径800 mm的模型炉中测定了顶置七喷嘴的速度场分布,并与单喷嘴速度场进行对比。结果表明:单喷嘴偏向于中心射流,而顶置七喷嘴轴向速度沿径向分布速度剪切小,更倾向于平推流,且顶置七喷嘴中心轴向速度衰减快,颗粒不易“短路”。此外,相比单喷嘴而言,顶置七喷嘴回流区域更小且中心气固混合效果更好。而通过计算出的回流比结果表明,顶置七喷嘴在喷嘴出口附近的回流比较高,能有效促进气化剂与燃料的混合,提高气化碳转化率。

关键词: 气化;冷态;顶置七喷嘴;速度分布;回流比

中图分类号:TQ545 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)06-0051-05

Velocity field of cold model gasifier with top-setting seven-nozzle

PENG Baozai, LIU Zhen, GUAN Qingliang, FANG Xinhui, LI Wenhua

(National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China)

Abstract: In order to investigate the flow field of the top-setting seven-nozzle gasifier, a model gasifier was designed based on the similarity principle with the height of 4 000 mm and the diameter 800 mm based on industrial dry-coal fed gasifiers. The velocity fields were measured using PDA for the top-setting seven-nozzle scheme and top-setting single-nozzle scheme, respectively. The results indicate that the top-setting single-nozzle scheme has a center-jet flow field, but the top-setting seven-nozzle scheme is of a plug-flow like field with much less axial velocity degradation along the radial direction. In addition, the center velocity of the top seven-nozzle scheme reduces more dramatically than that of the top-setting single-nozzle scheme resulting in fewer short-way particles. The top-setting seven-nozzle scheme has much smaller reflux zone and better gas-solid mixing effects than the top-setting single-nozzle scheme. The calculated reflux ratio of particles near the nozzle exit positions of the top-setting seven-nozzle scheme is higher than that of the top-setting single-nozzle scheme, which indicates that the top-setting seven-nozzle scheme can effectively enhance the gas-solid mixing and improve the carbon conversion efficiency.

Key words: gasification; cold model; top-setting seven-nozzle; velocity field; reflux ratio

0 引 言

煤气化是煤在高温和一定压力下与气化剂反应生成气体产物和少量残渣的过程^[1],气化效果与气化炉内的流场有关。煤气化过程中,流场结构决定了炉内的混合过程,从而影响炉内的浓度分布、温度分布和停留时间分布,并直接影响有效气成分、有效

气产率、碳转化率、喷嘴寿命、激冷环寿命和结渣等^[2]。目前大多采用冷模试验技术进行气化炉流场的研究,可在冷态条件下近似模拟气化炉内部流场,得到与实际工况近似的流体力学信息,且投资小,操作易实现^[3-7]。

喷嘴作为气流床气化炉的关键部件,其性能及不同的组合方式是强化炉内混合的主要技术手

收稿日期:2017-04-25;责任编辑:李柏熹 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.06.010

基金项目:神华集团科技创新资助项目(SHJT-14-53)

作者简介:彭宝仔(1978—),男,江西吉安人,高级工程师,博士,从事煤热解和煤气化相关方面研究工作。E-mail:pengbaozai@nicenergy.com

引用格式:彭宝仔,刘臻,管清亮,等.顶置七喷嘴气化炉冷态速度场研究[J].洁净煤技术,2017,23(6):51-55.

PENG Baozai, LIU Zhen, GUAN Qingliang, et al. Velocity field of cold model gasifier with top-setting seven-nozzle[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(6): 51-55.

段^[8]。顶置多喷嘴是气流床气化炉强化燃料与气化剂混合的有效方式之一。曹奎奎^[9]提出了一种集束两通道气流式喷嘴(由多个两通道喷嘴以一定方式排列组合而成),将其与德士古三通道喷嘴比较,发现集束喷嘴雾化液滴平均粒径和轴向速度均比德士古三通道喷嘴小,且集束喷嘴轴向速度衰减更快,喷嘴附近有更大的回流量和更短的回流区长度。美国洛克达因公司(PWR)开发了一种紧凑型气化炉,借助火箭发动机的概念,将煤粉与气化剂分成多个通道进入气化炉,强化了气固混合速度和效果^[10-11]。Lee等^[12]结合PWR的喷嘴设计概念,在气化炉顶部布置了多个旋流喷嘴并进行3 t/d气化热态试验,发现多个旋流喷嘴改善了气固混合效果并能缩短气化反应停留时间,气化碳转化率大于98%,冷煤气效率大于72%。冯子洋等^[13]设计了针对工业规模气化炉的平焰型七喷嘴结构,采用Fluent对气化炉内流场进行了三维冷态数值模拟计算,结果表明平焰型七喷嘴产生的炉内流场分布优于单喷嘴气化炉。综上,多通道喷嘴气化炉可在一定程度上强化炉内气固或气液混合效率,改善炉内流场分布。

结合冷模试验装置条件及喷嘴布置的均匀性,采用激光多普勒动态分析仪(phase doppler anemometry, PDA)测定顶置七喷嘴气化炉冷态速度场分布,考察颗粒轴向速度分布、炉内中心轴向速度衰减、湍流强度分布及回流比等变化规律,研究顶置七喷嘴气化炉内流场情况。

1 试验

1.1 试验装置及流程

试验流程如图1所示,主要设备为模型气化炉(有机玻璃筒体)和雾化喷嘴,根据相似模化理论设计模型气化炉。2台空气压缩机分别作为喷嘴雾化气体和输送载气的气源,且均通过缓冲罐输出,输送气体均采用涡街流量计进行计量。试验采用10~100 μm的玻璃微珠作为固体输送介质,玻璃微珠先存储在含布袋除尘的料仓中,试验时将固体物料输送至失重喂料器,再经发料罐送至喷嘴中心管,固体物料输送量由失重喂料器计量。输送载气由两路组成:输送气体和补充气体。经喷嘴喷入炉内的固体物料被重新输送至含布袋除尘的料仓回收,气体经引风机排出。采用激光多普勒动态分析仪测量空间设定点的速度和粒径,每个设定点测量结果由计算

机自动处理生成均值数据(该点的表征速度)。

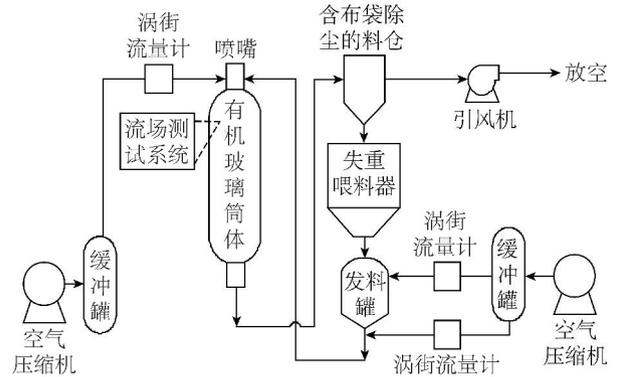


图1 试验装置及流程

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

为了使冷态模化试验结果能够对真实工业气化炉的喷嘴设计提供指导,模型气化炉的炉体和喷嘴结构根据相似性准则设计,满足的相似准则包括:几何相似,运动学相似(喷嘴各通道气流动量比)以及动力学相似(雷诺数 Re)。由于通常工业气化炉在热态工况下的 Re 值较大,模型试验中不易实现,所以冷态试验的动力学相似不必要求模型 Re 值与原型实际值相等,可以利用黏性流体的“自模化性”,只要保证模化试验的 Re 处于第二自模区,即可满足动力学相似条件。模型炉与原型炉(GSP 2 000 t/d干粉气化炉)的参数比较见表1。

表1 模型炉与原型炉的参数比较

Table 1 Parameters of the model and prototype gasifier

参数	模型炉	原型炉
气化炉内径/m	0.76	2.08
气化炉直段高度/m	2.0	4.3
喷嘴燃料和氧化剂通道动量比	0.14	0.13
炉内平均雷诺数/ 10^4	2.5	10.0

针对以上条件设计试验模型气化炉(长度2 m,内径0.76 m),为减少气体出口对内部流场的干扰,模型气化炉的下部做了2 m延长段。模型气化炉上部自上而下开有3个观察视窗,用于PDA等光学测量仪器的流场测量表征,如图2所示。

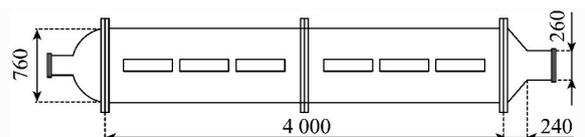


图2 模型气化炉结构

Fig. 2 Structure of the model gasifier

试验所用单喷嘴及七喷嘴的布置和结构尺寸如图3所示,单喷嘴和多喷嘴结构均是中心为颗粒,环隙为气体。单喷嘴放置于炉体穹顶的顶部中间位置,穹顶高度为300 mm;七喷嘴均匀布置在与炉体法兰连接的面板上。炉体侧面设有多个平面光学窗口,测定时在某一平面光学窗口沿炉体直径方向每25 mm设定一个测定点(共13个)。

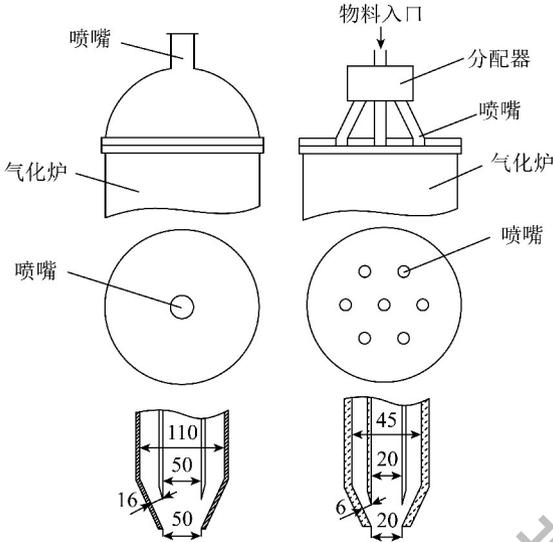


图3 单喷嘴和顶置七喷嘴的喷嘴布置及结构
Fig.3 Nozzle structure and layout of top single-nozzle and top-setting seven-nozzle

1.2 试验条件

试验过程的颗粒分散气、颗粒输送载气由涡街流量计进行计量,固体颗粒输送量由失重喂料器计量。根据试验测得的分散气体、输送载气流量及颗粒输送量,结合喷嘴的结构尺寸,获得的单喷嘴和顶置七喷嘴的试验条件见表2。模拟物料采用玻璃微珠,其真密度为2 525 kg/m³,平均粒径为70 μm。

表2 单喷嘴和顶置七喷嘴试验条件

Table 2 Experimental conditions of top-setting single-nozzle and top-setting seven-nozzle

试验条件	单喷嘴	七喷嘴
中心管流量/(m ³ ·h ⁻¹)	154.6	159.2
环隙流量/(m ³ ·h ⁻¹)	608.8	682.1
中心管流速/(m·s ⁻¹)	21.9	20.1
环隙流速/(m·s ⁻¹)	47.3	51.2

2 结果分析与讨论

喷嘴能否与气化炉产生适宜的流场需要通过考

察气化炉内速度分布、浓度分布、回流区及回流量、停留时间分布等判断^[14]。适宜的气化炉内速度分布主要体现在对炉壁没有冲刷、可以有效抑制“短路”现象、滞止区较小、速度变化比较平稳,具有较高的炉内充满度;颗粒浓度分布不均匀会影响气化反应的正常进行;回流区及回流量的大小会影响火焰的稳定;停留时间分布在一定程度上决定了气化反应进行的程度。此外,颗粒湍流强度在一定程度上反映了颗粒随时间和空间的变化程度,其数值可作为考察气固混合效果的一个特征指标。本文通过测得的颗粒轴向速度分布、湍流强度分布及计算固体回流比等信息,研究顶置七喷嘴气化炉炉内的流场情况。

2.1 中心速度衰减及颗粒速度分布

试验测定了模型炉内颗粒中心速度沿轴向距离的分布,并与冯子洋等^[13]的模拟结果比较,结果如图4所示。对比试验和模拟结果可知,虽然模拟的是中心喷嘴出口气体速度,但与试验测定的颗粒中心速度仍然吻合较好,说明在顶置七喷嘴条件下颗粒随气体运动具有良好的跟随性。此外,顶置七喷嘴气化炉的颗粒中心速度衰减较快,在炉内轴向距离约800 mm处速度基本达到恒定状态,而单喷嘴气化炉的颗粒距离喷嘴出口轴向距离2 000 mm处速度仍未达到恒定状态,说明顶置七喷嘴射流长度相对单喷嘴短,能更快进入管流区。由于单喷嘴气化炉颗粒中心速度衰减慢,可能会有颗粒“短路”飞出气化炉,导致碳转化率降低;而顶置七喷嘴颗粒中心轴向速度衰减快,颗粒不易“短路”,碳转化率可能更高。

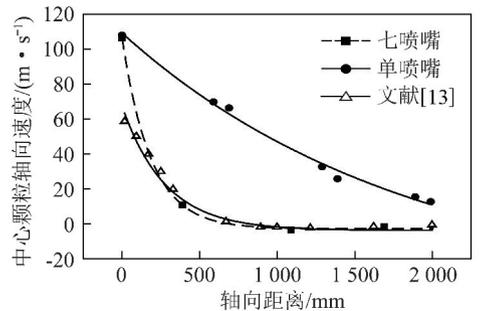


图4 炉内颗粒中心速度衰减

Fig.4 Centervelocity of particles decay in the model gasifier

对于颗粒速度分布的研究,试验选取测量位置距离顶置七喷嘴的喷嘴出口390 mm处,研究单喷嘴和顶置七喷嘴气化炉轴向速度沿径向分布情况,结果如图5所示。

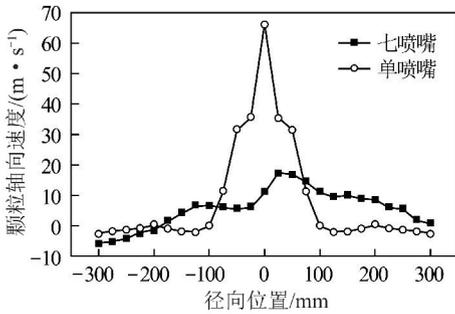


图5 颗粒轴向速度沿径向分布

Fig. 5 Axial velocity distribution with radial at same axial cross-section

由图5可知,单喷嘴气化炉的颗粒轴向速度由中心向径向剪切较大,且沿轴截面直径有近2/3区域轴向速度为负值;而顶置七喷嘴气化炉的颗粒轴向速度沿径向分布剪切较小,且大部分颗粒速度为正值。说明单喷嘴气化炉流场表现为典型的中心射流,而顶置七喷嘴气化炉流场表现为平推流。

2.2 湍流强度分布

湍流强度是涨落标准差和平均速度的比值。试验的湍流强度 T_u 计算公式为

$$T_u = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)}}{\sqrt{\bar{u}_x^2 + \bar{u}_y^2 + \bar{u}_z^2}} \quad (4)$$

其中, σ_x^2 、 σ_y^2 、 σ_z^2 分别为粒子在 x 轴、 y 轴、 z 轴方向的方差; \bar{u}_x^2 、 \bar{u}_y^2 、 \bar{u}_z^2 分别为粒子在 x 轴、 y 轴、 z 轴方向的均值速度。试验测得的七喷嘴和单喷嘴湍流强度如图6所示。

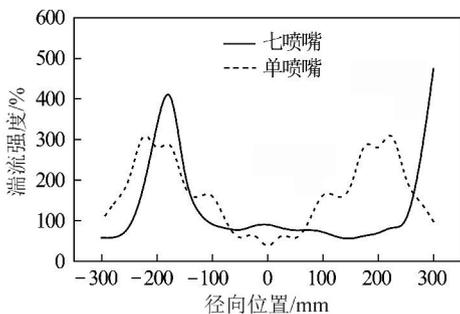


图6 单喷嘴和七喷嘴相同轴截面湍流强度沿径向分布

Fig. 6 Turbulence intensity distribution with radial at same axial cross-section

从图6可知,由于单喷嘴气化炉存在较大回流现象,其湍流强度由中心向两边逐渐增加,到近炉壁位置逐渐减小,与其轴向速度分布基本吻合;而顶置七喷嘴气化炉湍流强度在径向-100~250 mm 区域

基本保持恒定,且在-50~50 mm 区域,顶置七喷嘴气化炉湍流强度明显高于单喷嘴气化炉,说明顶置七喷嘴回流区域小,喷嘴中心气固混合效果比单喷嘴气化炉好。但顶置七喷嘴气化炉在-200 mm 附近也出现湍流强度先增后减的趋势,且近炉壁两边湍流强度也存在较大反差,主要原因可能是颗粒在该区域存在不规则回流现象。

2.3 回流比计算

根据回流速度计径向、轴向坐标,并定义该截面回流量与总流量之比为无因次回流比^[15],本试验条件下回流比计算结果如图7所示。

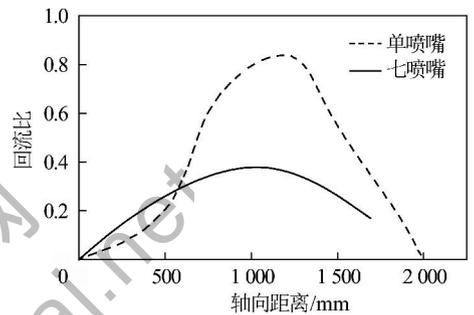


图7 回流比与轴向距离的关系

Fig. 7 Reflux ratio at different axial cross-section

距喷嘴出口较近截面,顶置七喷嘴气化炉回流比明显高于单喷嘴气化炉,但距喷嘴约600 mm 截面后,单喷嘴气化炉回流比远高于顶置七喷嘴气化炉。顶置七喷嘴气化炉喷嘴出口附近回流比较高,可促进气化剂与燃料的混合;而单喷嘴气化炉在炉体中下段还原反应区回流量大,该区域气化反应速率比燃烧反应慢,可能部分燃料颗粒在炉内没有燃尽即被排出气化炉,导致碳转化率偏低。

3 结 论

1) 基于相似准则设计,模拟工业规模干粉气化炉条件,采用激光多普勒动态分析仪测定了顶置七喷嘴气化炉内的速度场分布,结果表明顶置七喷嘴速度场沿径向剪切较小,更倾向平推流。

2) 对比炉内中心轴向速度沿轴向衰减结果,发现顶置七喷嘴气化炉射流较短,颗粒能更快进入管流区;而湍流强度分布结果表明顶置七喷嘴气化炉回流区域小,且其中心气固混合效果比单喷嘴气化炉好。

3) 通过回流比计算结果发现,顶置七喷嘴气化炉在喷嘴出口附近回流较高,可促进气化剂与燃料的充分混合。

参考文献(References):

- [1] 于遵宏,王辅臣. 煤炭气化技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2010:6-7.
- [2] 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 (China), 1997, 48(2):193-199.
- [3] 单贤根,索娅,任相坤,等. 气流床煤气化冷模试验研究进展[J]. 神华科技,2010,8(6):61-65.
SHAN Xiangen, SUO Ya, REN Xiangkun, et al. The research progress of cold form experiment of entrained-bed gasification technology[J]. Shenhua Science and Technology, 2010, 8(6):61-65.
- [4] 于海龙,董向元,刘建忠,等. 喷嘴入口位置对气化炉流场影响的试验研究[J]. 煤炭转化,2009,32(1):28-33.
YU Hailong, DONG Xiangyuan, LIU Jianzhong, et al. Experimentation study on new type CWS gasifier at cold state[J]. Coal Conversion, 2009, 32(1):28-33.
- [5] 王辅臣,刘海峰,龚欣,等. 旋流对射流携带床气化炉内宏观混合过程的影响-I. 冷态浓度分布[J]. 华东理工大学学报(自然科学版),2000,26(4):376-380.
WANG Fuchen, LIU Haifeng, GONG Xin, et al. Swirling flow effect on Macro-mixing process of jet-entrained gasifier[J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2000, 26(4):376-380.
- [6] 李伟锋,孙志刚,刘海峰,等. 两喷嘴对置撞击流驻点偏移规律[J]. 化工学报,2008,59(1):46-52.
LI Weifeng, SUN Zhigang, LIU Haifeng, et al. Stagnation point offset of two opposed jets[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2008, 59(1):46-52.
- [7] 曹显奎,许建良,李伟锋,等. 同轴双通道气流式雾化喷嘴初次雾化过程[J]. 化工学报,2006,57(11):2592-2596.
CAO Xiankui, XU Jianliang, LI Weifeng, et al. Primary atomization of coaxial two-channel air-blast atomizer[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2006, 57(11):2592-2596.
- [8] 王辅臣. 气流床煤气化炉内流动、混合与反应过程的研究进展[J]. 燃料化学学报,2013,41(7):769-786.
WANG Fuchen. Review for research of flow, mixing and reaction process in entrained flow coal gasifier[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2013, 41(7):769-786.
- [9] 曹显奎. 气流式喷嘴雾化机理与雾化性能的试验研究[D]. 上海:华东理工大学,2008:80-96.
- [10] BELL D A, TOWLER B F, FAN M. Coal gasification and its applications[M]. Oxford:Elsevier. 2011:93-96.
- [11] SONWANE C, SPROUSE K M. Injector mixer for a compact gasification reactor system; US 2014/0294695A1[P].
- [12] LEE J W, YUN Y, CHUNG S W, et al. Application of multiple swirl burners in pilot-scale entrained bed gasifier for short residence time[J]. Fuel, 2014, 117:1052-1060.
- [13] 冯子洋,卢洪. 平焰型七喷嘴气化炉的冷模 CFD 模拟研究[J]. 中国煤炭,2014,40(S1):449-458.
FENG Ziyang, LU Hong. CFD simulation study on cold model gasifier of flat flame seven injectors[J]. China Coal, 2014, 40(S1):449-458.
- [14] 胡莹超. 水煤浆气化喷嘴冷态模化试验研究与新型喷嘴开发研究[D]. 杭州:浙江大学,2011:15.
- [15] 于遵宏,于建国,沈才大,等. 德士古气化炉气化过程剖析(II)—冷态速度分布测试[J]. 大氮肥,1994(1):46-49.
YU Zunhong, YU Jianguo, SHEN Caida, et al. Gasification process analysis of the Texaco gasifier (II) - test and measurement of cold model gasifier velocity profile[J]. Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry, 1994(1):46-49.