

气化炉内撞击区气体浓度与火焰形状分析

郭庆华, 梁钦锋, 于遵宏, 于广锁

(华东理工大学 煤气化教育部重点实验室, 上海 200237)

摘 要: 采用水冷取样管与气体净化分析系统, 对气化炉内喷嘴平面的气体浓度分布进行了热态试验研究。通过图像处理将火焰图像沿气体取样管方向分为火焰撞击区、过渡区和无火焰区三部分。试验结果表明, 气化炉内火焰撞击面气体组分与火焰形状密切相关, 气体浓度在过渡区变化最大; CO₂ 和 O₂ 浓度的最高点出现在炉膛中心位置, 在无火焰区, 所测气体浓度基本保持不变; CO 与 CO₂ 收率的比值可作为火焰形状判断的依据; 或当 O₂ 浓度降到小于 0.03% 时也可以认为火焰结束。

关 键 词: 撞击火焰; 气体浓度; 火焰形状; 气化

中图分类号: TQ038.1 文献标识码: A

引 言

火焰是许多化学反应的主要特征, 通常将其分为两大类: 扩散火焰和预混火焰^[1]。扩散火焰在工业上应用最为广泛, 其燃烧过程主要取决于燃料和氧化剂的相互扩散速率。撞击火焰是工业上常见的燃烧形式, 例如四角切圆锅炉、Shell 气化炉、多喷嘴对置式气化炉等。撞击流的概念于 20 世纪 60 年代初由 Elperin 首先提出并进行试验。其基本意义是使两股气体——颗粒或滴粒两相流沿同轴相向流动, 在两流体的中点处相互撞击以达到强化热、质传递的效果^[2]。多喷嘴对置式气化炉就是在此基础上研究开发的一种新型水煤浆气化技术, 撞击火焰是该气化反应的核心过程^[3]。研究气化火焰撞击过程以及撞击后火焰形状等特征, 可以为气化炉内衬结构的设计与优化提供理论依据。

传统意义上的火焰长度(高度)是通过肉眼观察或相机拍摄等方法定义的。为了克服观测火焰长度时产生的视觉误差, Hawthorne 等人提出了化学火焰

高度的概念^[4], 定义沿射流轴线方向燃料 99% 完全燃烧的位置为化学火焰高度。Hottel 等人定义的化学火焰高度为沿轴线方向 CO 与 CO₂ 的比值为 0.15 的位置^[5]。Wade 和 Gore 定义当燃料的摩尔分数减小到 0.000 5 时的燃烧位置为化学火焰高度^[6]。Newman 和 Wiczońek 经过进一步的研究^[7], 用 CO 和 CO₂ 收率的比值来判定化学火焰高度。上述研究结果都是相对于燃烧反应而言, 充分说明了气体成分的变化与火焰形状的变化存在对应关系。气化是一种不完全燃烧反应, 气化火焰在工程上应用极其广泛, 尤其在化工行业制备合成气的过程中得以体现。本研究通过测量小型气化炉内撞击区气体组成的变化来判断撞击火焰形状的改变。

1 试验装置

1.1 气体采集分析系统

试验在小型多喷嘴对置式气化炉热模平台上进行^[8], 以氧气和柴油作为反应物料, 在表 1 的操作条件下进行气化燃烧试验的研究。火焰撞击区域的气体通过气体取样管直接从气化炉内取样。气体取样管采用带有水冷套管的不锈钢结构, 安装在喷嘴平面, 与其中两个相邻喷嘴成 45° 的位置水平放置。取样范围由高温炉膛中心至炉壁。气体净化装置对样气进行预处理, 使其达到质谱仪的进样要求。其流程如图 1 所示, 气体样品由取样管取出后, 首先进行过滤, 滤去大部分碳黑, 接着进行干燥、再过滤进入取样泵, 然后进入冷凝器, 冷凝水经三通、针型阀, 由排水口排出; 冷凝后的气体再经干燥器干燥, 流量计计量后进入由英国 HIDEN 公司生产的 HPR20QIC 型气体分析质谱仪进行在线、实时和定量分析。

收稿日期: 2007-09-17; 修订日期: 2007-11-21

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)基金资助项目(2004CB217703); 教育部新世纪人才支持计划(NCET-06-0416);

上海市曙光计划(06SG34)

作者简介: 郭庆华(1981-)男, 河北邢台人, 华东理工大学博士研究生。

表 1 气化试验操作条件

条件	氧气流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	氧气速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	柴油流量/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	流量比/ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
1	2.38	57.6		1.20
2	2.76	66.8	1.98	1.39
3	2.92	70.7		1.47

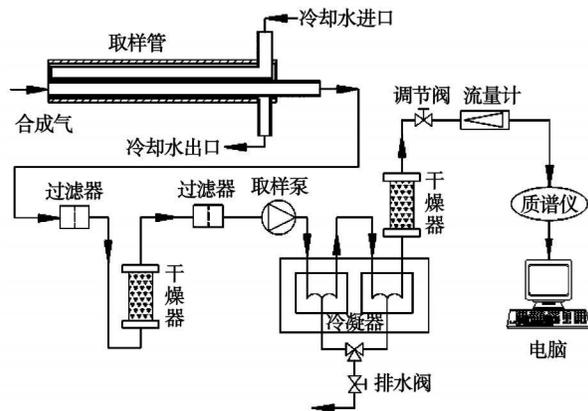


图 1 气体采集系统

1.2 火焰监测系统

除分析气体组成外, 在气化炉顶部还安装有内窥式工业电视系统, 同时配套 Panasonic WV-CP470 系列彩色 CCD 摄像机, 主要对气化燃烧过程进行图像和视频的拍摄, 达到实时监控的目的。同时, 采用水冷夹套及吹扫系统以冷却和保护相机。吹扫系统采用惰性气体 Ar 作为保护气, 直接经摄像机镜头出口吹入气化炉内, 以防止炭黑颗粒污染镜头。其结构简图如图 2 所示。

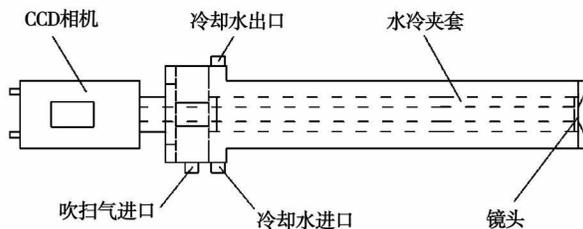


图 2 火焰监测系统

2 试验结果与讨论

2.1 图像处理

拍摄的 4 个喷嘴撞击火焰图像与取样管位置如图 3 所示。在众多有关图像处理的方法之中, 如何去除背景是图像处理的关键步骤。试验过程中采用

短时间停止燃料供应的方法拍摄炉膛的背景图像, 如图 4 所示, 从而使得火焰主体的提取变得相对简单。

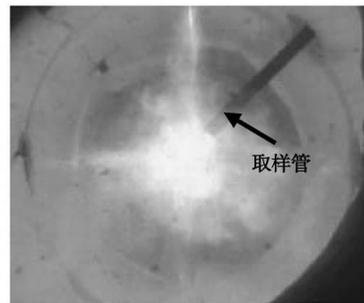


图 3 火焰图像与取样管

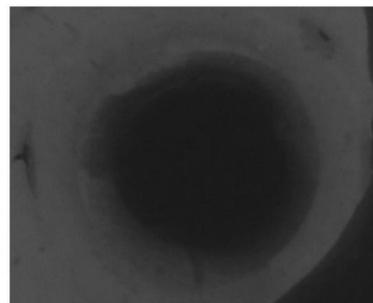


图 4 背景图像

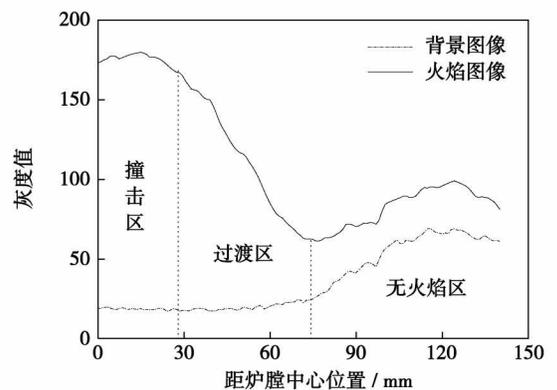
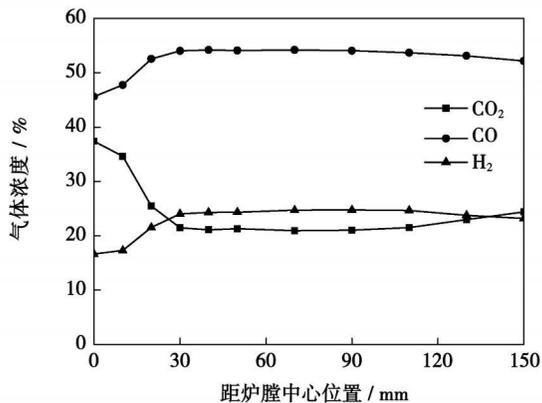


图 5 沿取样管方向灰度变化曲线

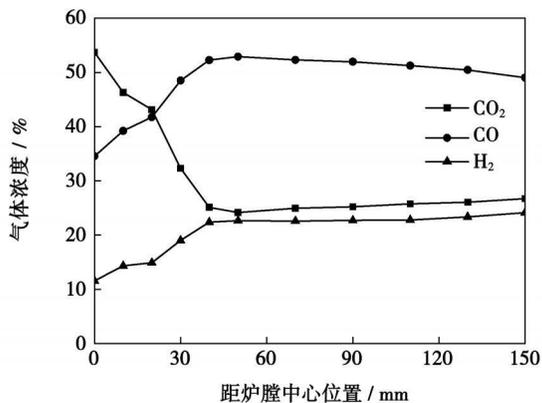
以炉膛中心作为坐标原点, 沿取样管位置测得的灰度曲线, 如图 5 所示。可以看出, 在火焰撞击中心附近, 两幅图像的灰度值相差较大, 随着偏离炉膛中心的距离越大, 两者的差值趋于一个定值。这种现象的出现是由于火焰的存在使炉膛变得较亮, 因而火焰图像的整体亮度提高, 但这并不影响灰度值沿取样位置的变化趋势。利用图像灰度值的变化将气化炉内火焰图像分割为火焰撞击区、过渡区和无火焰区。

由于4个喷嘴火焰在炉膛中心撞击并产生振荡,因此该区域火焰最亮,其灰度值最高接近饱和,这也是火焰撞击的中心区域。过渡区是指火焰在中心撞击后向四周扩散时所能达到的最远区域,即火焰存在的区域。

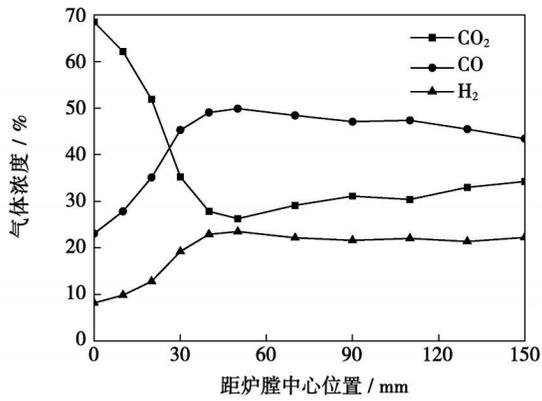
2.2 主要气体产物浓度分布



(a) 条件1



(b) 条件2



(c) 条件3

图6 条件1~3主要气体的浓度分布

试验研究了不同氧油比条件下主要气化产物CO、CO₂和H₂气体的浓度分布。如图6所示为操作条件1~3中主要气体的浓度分布。由图可以看出,在接近炉膛中心5cm左右,所测气体的浓度开始发

生剧烈的变化。具体表现为,随着靠近炉膛中心,CO₂的浓度逐渐增大,CO、H₂的浓度逐渐减小,发生变化的区域就是上面提到的火焰过渡区域。随着取样位置靠近炉壁,各气体浓度基本保持恒定而不发生明显变化。

在燃烧过程中,化学火焰高度是以CO与CO₂收率比值为某一定值时火焰所到达的位置来定义的。对于不同燃料介质该比值有所不同,例如丙烷化学火焰高度定义 $y_{CO, yield} / y_{CO_2, yield} = 0.002$,乙炔化学火焰高度定义 $y_{CO, yield} / y_{CO_2, yield} = 0.016$ 。其中,

$$y_{i, yield} = \frac{X_i \dot{m}_T M_{w, i}}{\dot{m}_O M_{w, mix}} \quad (1)$$

式中: X_i —物质*i*的摩尔分数; \dot{m}_T —全部质量流率; M_i —物质*i*的分子量。

按照有关化学火焰高度的定义,在表1的操作条件1~3下计算的CO与CO₂收率比值变化如图7所示。可以看出,随着氧油比的增加,撞击中心CO₂浓度越来越高,CO、H₂的浓度相应减小。CO与CO₂收率比值由炉膛中心至火焰边缘逐渐增大,相应出现拐点的位置随氧油比的增大而偏离撞击中心越远。氧油比的增加是在柴油流量不变的情况下增加氧气流量,即增加氧气速度,因此,喷嘴速度越高火焰撞击区面积越大,这与拍摄图像的结果是相一致的。

在燃烧过程中,CO₂是主要反应产物,氧气相对过量,因此 $y_{CO, yield} / y_{CO_2, yield}$ 比值都很小,这与气化反应相比(CO作为主要产物之一,氧气量相对不足)是截然不同的。

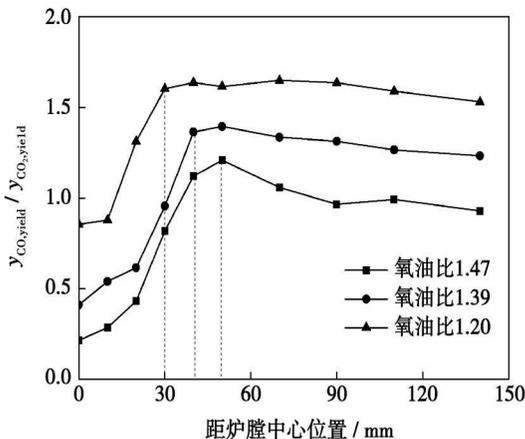


图7 CO与CO₂收率比值变化

2.3 氧气浓度分布

鉴于气化反应氧气量相对不足的特点,考虑用

氧气的消耗量作为判断火焰结束的标准。图 8 给出的是不同操作条件下氧气浓度由撞击中心至炉膛内壁的变化趋势。可以看出, 氧气在撞击火焰中心浓度最高, 在过渡区内越是靠近火焰中心氧气浓度越高, 当火焰结束后氧气浓度基本保持最小值不变; 在气化火焰存在的区域内, 随着氧油比的增加, 氧气浓度相应增大。不同氧油比的条件下, 氧气浓度都会在某个位置发生突变, 该突变位置与撞击火焰边缘相一致, 此时氧气量基本上在 0.03% 附近, 近似于零。也就是说对于这种气化燃烧火焰来说, 氧气的结束也就意味着火焰的结束。

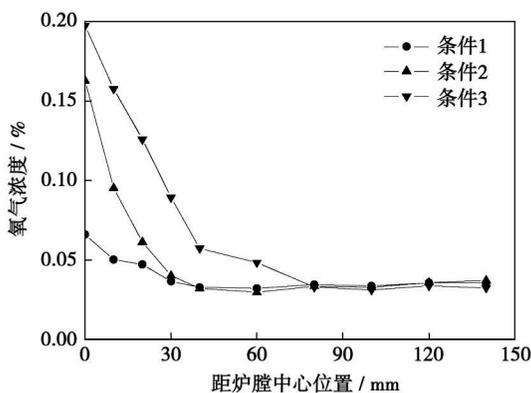


图 8 喷嘴平面不同操作条件与取样位置氧气浓度

3 结 论

利用图像灰度值的变化将气化炉内火焰图像分割为无火焰区、过渡区和主体区。通过对气化炉内喷嘴平面的气体浓度分布的研究表明, 相同操作条

件下, 无火焰区内各物质浓度基本保持不变。气体组成发生明显变化的区域产生在过渡区。CO₂、O₂ 浓度的最高点出现在炉膛中心位置, 即气化火焰撞击中心; 随着撞击后火焰的衰减, CO₂、O₂ 浓度逐渐降低, CO、H₂ 的浓度逐渐增加。当火焰结束后气体组成基本保持不变。

气体浓度的变化与火焰形状有密切关系, CO 与 CO₂ 收率的比值仍可以作为火焰结束的标志; 同时撞击区域内氧气量的消耗也可以作为判断气化火焰结束的依据, 当氧气浓度降到小于 0.03% 时认为火焰已经结束。

参考文献:

- [1] AG 盖顿, HG 伍福德. 火焰学[M]. 王 方译. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.
- [2] TAMIR A. 撞击流反应器的原理与应用[M]. 伍 沅译. 北京: 化学工业出版社, 1996.
- [3] 龚 欣, 刘海峰. 新型水煤气气化炉[J]. 节能与环保, 2001(6): 15-17.
- [4] HAWTHORNE W R, WEDDELL D S, HOTTEL H C. Mixing and combustion in turbulent gas jets // Third Symposium on Combustion and Flame[C]. Williams & Wilkins, 1949.
- [5] HOTTEL H C. Fire modeling. International symposium on the use of fire models[C]. 1961, 32-47.
- [6] WADE R, GORE J P. Visible and chemical flame lengths of acetylene/air jet diffusion flame[C]. NISTR 5904; 1996; 41-52.
- [7] NEWMAN S J, WIECZOREK C J. Chemical flame heights[J]. J. Fire Safety, 2004, 39: 375-382.
- [8] 梁钦锋, 牛苗任. 撞击气化火焰边缘的分形特性[J]. 热动力工程, 2007, 22(1): 57-60.

(编辑 陈 滨)

(上接第 484 页)

和轴向分布, 对火焰筒起到很好的保护作用。从算例可看出, 前者可使火焰筒壁温平均降低 350 °C, 后者可使火焰筒壁温平均降低 160 °C。

(4) 隔热涂层厚度对火焰筒壁温影响很小, 厚度选取需综合考虑火焰筒结构、工艺等因素, 通常以 0.15~0.3 mm 为宜。

参考文献:

- [1] 侯晓春, 季鹤鸣. 高性能航空燃气轮机燃烧技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [2] 韩介勤. 燃气轮机传热和冷却技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005.
- [3] 曹玉璋. 航空发动机传热学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版

社, 2005.

- [4] 焦树建. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [5] 航空发动机设计手册总编委会. 航空发动机设计手册: 第 9 册—主燃烧室[Z]. 北京: 中国航空工业出版社, 2000.
- [6] 李永康, 胡正义. 有隔热涂层的火焰筒壁温计算方法[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1997, 10(2): 27-31.
- [7] 胡正义, 陈志杰. 对气流膜冷却火焰筒壁温计算方法[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1993, 10(3): 21-25.
- [8] 李 彬, 程 波. 高温升火焰筒壁面及头部复合冷却设计分析[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2007, 20(3): 8-10.
- [9] 董志锐, 刘高文. 双层壁火焰筒二维壁温计算[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1999, 12(4): 25-29.
- [10] LEFEBVRE A H. Influence of fuel properties on gas turbine combustion performance[R]. AFWAL-TR-84-2104, 1985.

(编辑 韩 锋)

method, studied was the influence of the solid-phase particulate mass carrying rate in a two-phase turbulent flow of a flue gas desulfuration tower on the gas-phase flow field. When the particulate Stokes number in the tower is kept in a range from 1 to 100, the gas-solid flow coupling characteristics in the tower was analyzed by gradually increasing the particulate mass carrying rate. As a result, under different particulate mass carrying rates the in-tower gas-solid flow characteristics, the particulate concentration distribution along the axial direction, the gas-phase axial speed radial distribution and the bed layer pressure drop curves have been obtained. It has been found that when the particulate mass carrying rate is not greater than 0.031, the particulate flow exhibits a relatively good follow-up nature and assumes a pneumatic transmission flow state. In such a case, the particulate movement has an extremely small influence on the continuous phase field and can be neglected. When the particulate mass carrying rate is greater than 0.031, the gas-solid flow coupling action in the bed will be enhanced, and the discrete particulate movement will exercise a conspicuous influence on the gas-phase flow field. The gas-solid two-phase flow characteristics are dependent on each other and exhibit an obvious unstable state and non-uniformity. When the particulate mass carrying rate is relatively big, the bed layer pressure drop is closely related to the discrete particulate field distribution. **Key words:** direct simulation Monte Carlo method, gas-solid two-phase flow; coupling characteristics

气液两相流容积含气率的图像检测方法 = **Image processing-based Detection Method for the Measurement of Volumetric Gas Content in a Gas-liquid Two-phase Flow** [刊, 汉] / ZHOU Yun-long, SHANG Qiu-hua, FAN Zhen-ru, HONG Wen-peng (College of Energy Source and Mechanical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 507 ~ 511

A method for the on-line detection of volumetric gas content of a gas-liquid two-phase bubble flow has been studied and developed. The method in question is based on digital image processing technology, employs a high-speed video camera system to conduct a real time camera shooting and image collection of the bubble flow process in vertical risers and makes use of rim detection and image fill-in technology to extract gas bubbles and calculate their sizes, thereby calculating the volumetric gas content. A real time on-line detection and measurement have been made of the volumetric gas content under different operating conditions. Test results show that compared with real values, the detected values have a relative error not exceeding 15%. Having attained a relatively high measurement accuracy, the method under discussion can be used for the on-line detection of parameters in a gas-liquid two-phase flow. **Key words:** gas-liquid two-phase flow, volumetric gas content, image processing, gas bubble

气化炉内撞击区气体浓度与火焰形状分析 = **Gas Concentration and Flame Shape Analysis of the Impinging Zone in a Gasification Furnace** [刊, 汉] / GUO Qing-hua, LIANG Qin-feng, YU Zun-hong, YU Guang-suo (Education Ministry Key Laboratory on Coal Gasification, East China Institute of Technology, Shanghai, China, Post Code: 200237) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 512 ~ 515

By using a water-cooled sampling tube and gas purification analytic system, a hot-state experimental study has been conducted of the gas concentration distribution of a nozzle plane in a gasification furnace. Through an image processing, the flame image was divided into three portions along the direction of a gas sampling tube: namely, a flame impinging zone, a transition zone and a flameless zone. Test results show that the gas constituents of the flame impinging plane in the gasification furnace are closely related with the flame shape, and the gas concentration in the transition zone has the greatest changes. The maximum concentration of CO₂ and O₂ appears at the central location of the furnace. In the flameless zone, the measured gas concentration has kept basically unchanged. The ratio of CO and CO₂ recovery rate can serve as an underlying basis for judging the flame shape, or when O₂ concentration decreases to less than 0.03%, it can be regarded as an extinguishment of the flame. **Key words:** impinging flame, gas concentration, gasification, multi-nozzle contraposition

气流式喷嘴雾化特性试验研究 = **Experimental Study of Atomization Characteristics of an Airflow Type Nozzle** [刊, 汉] / REN Lan-xue, MA Sheng-yuan, WANG Yong-feng, PANG Xue-jia (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 516 ~ 518