

# 分级供氧气流床气化炉冷态流场的数值模拟与实验研究

娄彤 张忠孝 樊俊杰 徐明

(上海理工大学 能源与动力工程学院 燃烧与气化实验室 上海 200093)

**摘要:**采用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型,运用 SIMPLE 算法对分级供氧气流床气化炉炉内的流场进行了数值模拟,并对实验测量结果与数值模拟结果进行比较,得到两者吻合的结果。通过对模拟结果进行分析,发现炉膛内存在回流区,并不是一个简单的平推流;二次喷嘴的开启对喷嘴所在面的流场有较大影响;同时二次喷嘴的高度对炉内流场分布也有影响。

**关键词:**气流床气化炉;冷态流场;分级供氧

中图分类号:TQ541;TD849

文献标识码:A

文章编号:1006-6772(2011)06-0053-05

煤气化技术在中国工业生产中占有重要地位,是煤基化学品合成、液体燃料合成、先进的 IGCC 发电系统等工业的重要组成部分<sup>[1]</sup>。气流床气化技术以容量大、效率高的优点成为煤气化技术的主要发展方向。目前国外成熟的气流床气化技术普遍采用的是液态排渣技术。这些技术要求煤的灰熔点低于 1400 °C,否则需要添加助熔剂或提高炉内气化温度,但往炉内添加助熔剂会增加排渣量和排渣热损失,而提高气化温度则会增加耗氧量、煤气中 CO<sub>2</sub> 含量以及降低冷煤气效率和气化炉的使用寿命。高灰分、高灰熔点的双高煤种在中国煤炭产量中占有很大比重。研究表明:当气化反应温度快达到煤的灰熔点温度时,煤气组分达到一个最大值<sup>[2]</sup>。为适应国情,部分单位已经在研发干排渣气化炉气化工艺。其中由上海交通大学、西北化工研究院以及煤炭科学研究总院联合提出的通过分级供氧控制火焰温度的气流床气化工艺就是干式排渣的气化工艺。冷态流场的研究是工业设计的基础,众多学者对气流床气化炉的冷态流场进行了研究<sup>[3-9]</sup>。本文通过实验研究与数值模拟相结合的方法研究分级供氧气流床气化炉的冷态流场,为该技

术的研发提供基础研究。

## 1 实验装置

分级供氧气流床气化炉采用炉顶单喷嘴和炉侧多喷嘴同时喷射入炉的进料形式,炉顶喷嘴布置于气化炉轴线上,在炉侧不同位置对称布置 2 个直径为 50 mm 的二次喷嘴。气化炉几何结构如图 1 所示。

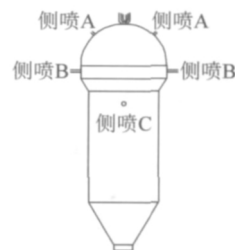


图 1 侧喷位置示意

本试验中模型与某实际 500 t/d 加压气流床气化炉的几何相似比为 1:1。气化炉炉膛总高为 5392 mm,顶部球体内径为 2081 mm,中间炉膛内径为 1692 mm,底部出口为 460 mm。在距离炉顶 273 mm 处布置一角度为 45°的倾斜侧喷 A,在距炉

收稿日期:2011-08-24 责任编辑:孙淑君

基金项目:上海市科委课题

作者简介:娄彤(1987—),男,河南漯河人,在读硕士,从事煤的高效气化研究。

顶 1128 mm 处设置平行侧喷 B,距炉顶 1941 mm 处设置平行侧喷 C,其中 A 与 B 处于同一截面上,并与 C 所在截面正交。

顶部喷嘴设计采用传统的三通道喷嘴(其中外环管中心管输送 O<sub>2</sub>,中环管输送水煤浆),气化剂和水煤浆均以廉价的空气替代。

沿气化炉从上到下共布置 8 排测孔,每排 4 个,两两对称,如图 2 所示,为方便测量,测孔所在的 2 个轴截面与喷嘴所在的 2 个轴截面各相隔 8°。

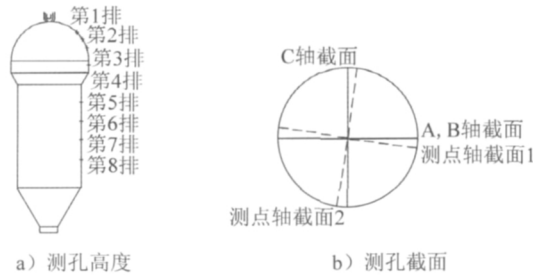


图 2 测孔高度和测孔截面示意

实验工况为中心管气流量约为 450 m<sup>3</sup>/h,外环管气流量约为 1900 m<sup>3</sup>/h。单独开启一组侧喷时侧喷气流量约为 2 × 300 m<sup>3</sup>/h。混合开启侧喷时,侧喷 A 与侧喷 B 气流量为 2 × 300 m<sup>3</sup>/h,侧喷 C 气流量约为 2 × 225 m<sup>3</sup>/h。共 6 组实验工况,第 1 组工况为不开侧喷,第 2、3、4 组工况分别为单独开启侧喷 A、B、C。第 5、6 组工况分别为混合开启侧喷 A、C 和侧喷 B、C。

## 2 数值模拟

实验与模拟工况为冷态条件,介质为空气,因此只需要考虑以下 2 个控制方程:

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \overline{u_i'' u_j''}) \quad (2)$$

模拟计算中采用 k - ε 粘性湍流流动模型,其以张量表示的支配方程一般形式为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中 ρ——密度;

G<sub>k</sub>——由层流速度梯度而产生的湍流动能;

G<sub>b</sub>——由浮力产生的湍流动能;

σ<sub>k</sub> σ<sub>ε</sub>——与湍动能 k 和耗散量 ε 对应的 Prandtl 数。

模型常量 C<sub>1ε</sub> = 1.44, C<sub>2ε</sub> = 1.92, C<sub>μ</sub> = 0.09, σ<sub>k</sub> = 1.0, σ<sub>ε</sub> = 1.3, 这些常数是从实验中得来的,对于大多数情况,包括空气、水的基本湍流,这些常量都是适用的。

## 3 网格划分及数值计算方法

网格划分采用四面体结构化网格,考虑到水煤浆气化炉喷嘴尺寸较小,且喷嘴气速较高,故对喷嘴附近网格进行了加密。离散格式采用 QUICK 格式,迭代算法采用 SIMPLE 算法。

## 4 计算结果与分析

(1) 传统气流床气化炉炉内冷态流场分布

图 3 为工况 1 条件下,炉内冷态实验速度分布与模拟计算对比,从图中可以看出,模拟结果和实验结果匹配较好。

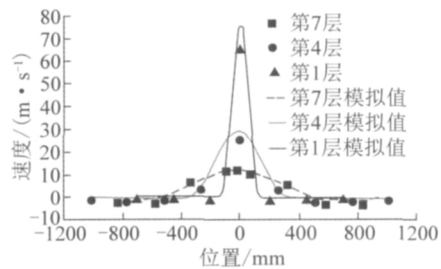


图 3 传统气流床气化炉冷态实验速度分布与模拟对比

图 4 为工况 1 条件下传统气流床气化炉炉内冷态空气流场分布。由于炉内速度梯度太大,为了方便观察气化炉炉内各位置速度变化,图中最大显示速度设为 20 m/s;主气流离开喷嘴后达到最大速度(约为 124 m/s);随着高度位置远离喷嘴,由于主气流扩散的原因,轴向速度急剧衰减;炉膛内部的速度分布并非简单的管流(平推流);由于主气流的高速喷出,引起的射流流场在主气流两边形成大回流区;炉膛内正反向速度并存,反向速度的流体构

成回流;因处于炉体周边,虽然速度不大,但面积则不小,回流量不可忽视。回流区的产生,一方面可以加大炉内流场的扰动效果;另一方面,未燃烧碳颗粒将随炉内气体回流至炉膛的顶部,延长了炉内反应停留时间,有利于提高碳的转化率。此外,炉膛中心处,部分主喷流仍保持高速飞出气化炉,停留时间相对较短。

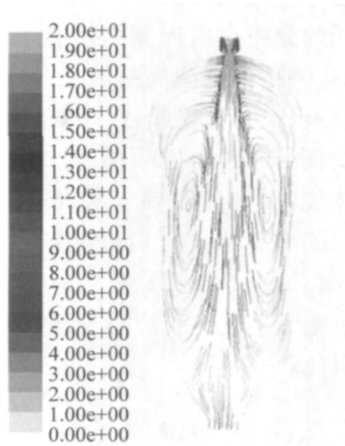


图4 传统气流床气化炉炉内冷态流场分布

(2) 分级供氧气流床气化炉炉内冷态流场分布——单组侧喷

为了有效地提供分级供氧气流床气化炉的设计方案及理论依据,首先考查了在气化炉的不同位置安装单组二次供氧侧喷嘴时炉内空气流场分布情况,如分别单独开启侧喷A、B和C,对应的实验工况为工况2、3、4。

图5为增加单组侧喷条件下,炉内冷态实验速度分布与模拟计算对比。从图5可以看出,模拟结果和实验结果匹配较好。

图6为单组侧喷开启条件下的炉内冷态流场。从图6(a)、6(b)和6(c)可以明显看出,二次气流的增加对主气流具有一定的冲击作用,炉内流场的扰动得到了一定的强化,尤其在二次喷嘴附近。从图6(a)中可以看出,当侧喷A开启时,由于侧喷距离主喷嘴太近,冲撞后对主气流基本没有太大影响。这主要是由于二次喷嘴气流喷出动量相比主喷嘴相差太大。但该位置侧喷嘴的添加加强了气化炉顶部半球内流场扰动效果,对于热态运行的气化炉来说,有利于主喷嘴射流的着火燃烧,增加了气化炉着

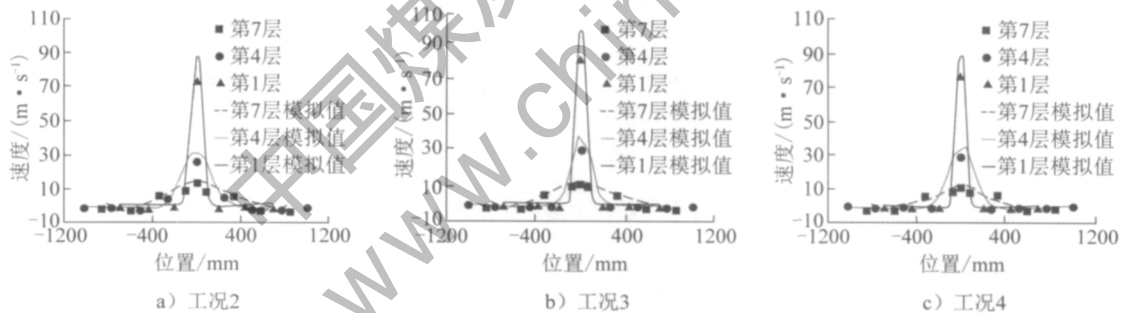


图5 分级供氧气流床气化炉冷态实验速度分布与模拟对比——单组侧喷嘴

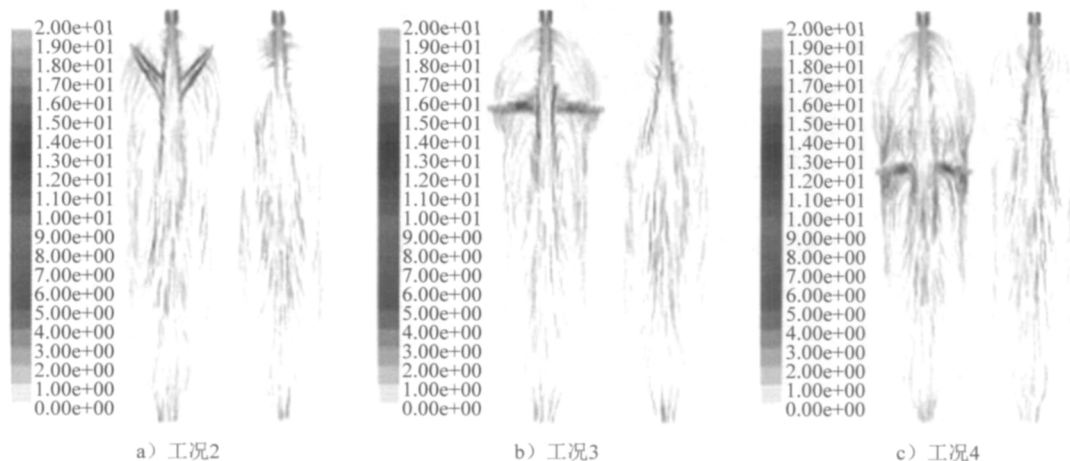


图6 单组侧喷条件下的炉内冷态流场分布

火和运行的稳定性。随着二次侧喷位置的下移,由于主气流速度的衰减,轴向动量大幅度降低,二次气流对主气流的冲击作用逐渐加大。当侧喷 C 单独开启时,由于二次喷嘴距离中心距离的缩短及主喷嘴速度的衰减,主气流在二次气流的冲击作用下,轴截面 2 的气流宽度明显减小,轴截面 1 的气流宽度明显增加。随着位置的下降,喷嘴位置外部气流密集化程度加强,主气流对于回流气流的分配比例不断加大。比较图 6a)~6c) 可以看出,随着位置的下降,在二次气流上部逐渐形成一个新的回流区,并随着位置的下降,回流区面积不断增大。这在一定程度上延长了气化反应停留时间,有利于气化效率的提高。

虽然随着二次侧喷嘴位置的下移,炉内回流强度会进一步强化,但这并不意味着不断降低二次侧喷嘴的位置将获得更好的气化效率。在实际过程中,随着二次喷嘴位置的下移,虽然炉内扰动强度

有了一定程度的强化,但距离主喷嘴位置太远,高效气化所需的高温环境不能得到保证。温度是影响气化效率的关键因素之一,环境温度的降低将大大降低气化效率。因此,综合考虑,本文研究的最低二次侧喷嘴位置为喷嘴 C 处。

(3) 分级供氧气流床气化炉炉内冷态流场分布——两组侧喷

从上述单组侧喷结果中可以发现,二次侧喷所在截面流场的分布在引入侧喷后有了很大的改善。但是,与二次侧喷正交截面的流场分布没有太大改变,可以进一步改善。因此,在第 1 组侧喷嘴的正交截面设计安装了第 2 组侧喷嘴,且为了更好地改善炉内的气体流场,防止气流碰撞抵消效应,两组侧喷嘴在不同的位置错位开启,即侧喷 A + 侧喷 C 和侧喷 B + 侧喷 C。

图 7 给出了工况 5、6 炉内冷态实验速度分布与模拟计算对比。

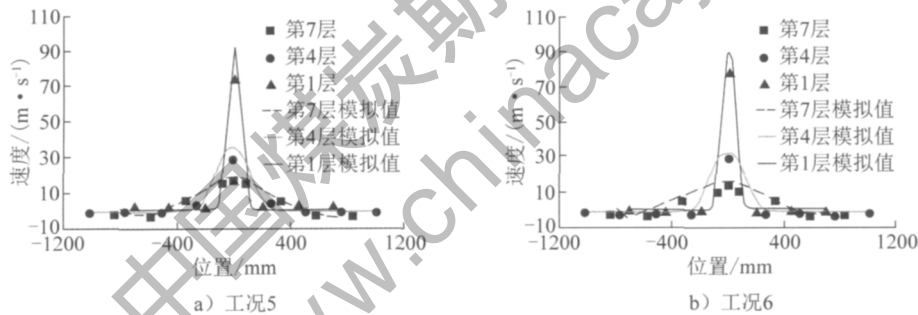


图 7 2 组侧喷条件下的炉内冷态实验速度分布与模拟计算对比

图 8 为 2 组工况条件下,炉内冷态流场。从图中可以看出,一组侧喷嘴的开启,对另外一组侧喷嘴轴截面的流场影响不大,回流强度、回流区面积均没有大的变化;但随着第 2 组侧喷嘴的引入,该轴截面的流场得到了明显的强化。当侧喷 A 和侧喷 C 同时开启时,一方面,如图 8a) 所示,侧喷 A 向着主气流方向沿 45° 向下喷射,二次气流的径向动量相对于喷嘴附近主气流向下的动量太小,对主气流的冲击影响作用很小,另一方面 2 组喷嘴相距较远,因此,第 2 组侧喷嘴轴截面流场与喷嘴 C 单独开启时相似。即侧喷 A 和侧喷 C 同时开启时,炉内两轴截面流场分布为侧喷 A 和侧喷 C 单独开启时的流场组合。但当侧喷 B 和侧喷 C 同时开启时,二次气流沿径向喷射进入炉膛,气流动量较大,因此,侧喷对主气流的冲击作用有所加强,主气流轴向速度有一定衰减,导致气化炉底部主气流对回流气流的分配

比例有所降低。综上所述,在本实验条件下,侧喷 A 和侧喷 C 同时开启的效果较侧喷 B 和侧喷 C 同时开启的效果好。

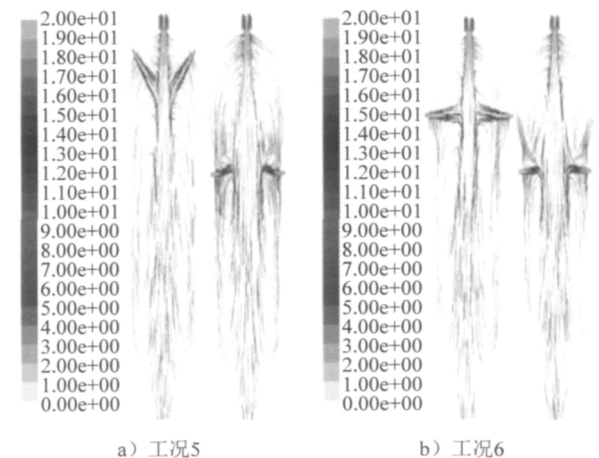


图 8 2 组侧喷条件下的炉内冷态流场分布

## 5 结 论

(1) 通过传统气流床气化炉冷态实验所得的速度分布可知,实验结果与模拟结果匹配较好,轴向速度沿炉膛方向逐渐减小。

(2) 炉内正、反向速度并存,而反向速度的流体构成回流。回流区一方面加强了炉内的扰动,另一方面增加了未燃尽碳粒在炉内的运动轨迹,从而延长其停留时间。故此回流区有助于提高碳的转化率。

(3) 增加单组侧喷后,随着二次喷嘴位置下移,在二次气流上部逐渐形成一个新的回流区,并随着位置的下降,回流区面积不断增大。这在一定程度上,延长了气化反应停留时间,有利于气化效率的提高。但并不意味着侧喷位置越往下移,气化效率越高,故得出侧喷 C 的位置为最低的侧喷位置。

(4) 在 2 组侧喷同时作用中,通过工况 5 与工况 6 的 2 组实验比较,发现由于对主气流轴向速度具有一定的衰减作用,导致气化炉底部主气流对回流气流的分配比例有所降低。同时开启侧喷 A 和侧喷 C 较同时开启侧喷 B 和侧喷 C 效果更佳。

参考文献:

[1] 王辅臣,于广锁,龚欣,等.大型煤气化技术的研究与发展[J].化工进展,2009,28(2):173-180.

[2] 陆成,张忠孝,乌晓江,等.气化参数对气流床粉煤气化影响实验研究[J].洁净煤技术,2010,17(2):49-53.

[3] 代正华,刘海峰,于广锁,等.四喷嘴对置式撞击流的数值模拟[J].华东理工大学学报(自然科学版),2004,30(1):65-68.

[4] 张建胜,吴玉新,刘青,等.二次气流对分级气化炉内三维速度分布的影响[J].燃烧科学与技术,2007,13(2):131-135.

[5] Young Chan Choi, Xiang Yang Li, Tae Jun Park. Numerical analysis of the flow field inside an entrained-flow gasifier [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2001, 18(3): 376-381.

[6] Young Chan Choi, Xiang Yang Li, Tae Jun Park. Numerical study on the coal gasification characteristics in an entrained flow coal gasifier [J]. Fuel, 2001, 80(15): 2193-2201.

[7] 于海龙,刘建忠,马履翱.喷嘴入射角对新型气化炉冷态流场影响的试验研究[J].动力工程学报,2007,27(3):397-400.

[8] 于海龙,刘建忠,张桂芳,等.喷嘴位置对新型水煤浆气化炉内流场的影响[J].动力工程学报,2006,26(1):135-140.

[9] 曹月丛,陈彩霞,高晋升,等. Texaco 气化炉冷态流场和湍流混合的数值模拟[J].化学工程,2010,38(5):30-33.

## Numerical simulation and experimental research on cold flow field in staged supplemental oxygen entrained-flow gasifier

LOU Tong, ZHANG Zhong-xiao, FAN Jun-jie, XU Ming

(Combustion and Gasification Laboratory, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Using standard  $k-\varepsilon$  turbulence model and SIMPLE algorithm, simulate the cold flow field in entrained-flow gasifier which is supplied with oxygen gradually. Compared the measurement results with the numerical simulation results, find that the two match perfectly. The numerical simulation shows that there are recirculation areas in furnace, which are not simply plug-flows. The opening of secondary nozzle has great influence on cold flow field of its plane, meanwhile the height of nozzle also affects the distribution of the cold flow field.

**Key words:** entrained-flow gasifier; cold flow field; staged oxygen supply