

基于无焰氧化的煤粉气化炉模型设计与试验研究

唐志国, 马培勇, 李永玲, 唐超君, 邢献军, 林其钊

(中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽省 合肥市 230026)

Design and Experiment Research of a Novel Pulverized Coal Gasifier Based on Flameless Oxidation Technology

TANG Zhi-guo, MA Pei-yong, LI Yong-Ling, TANG Chao-jun, XING Xian-jun, LIN Qi-zhao

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui Province, China)

ABSTRACT: Based on the analysis of realization conditions, formation mechanism and implementation approaches of flameless oxidation technology, a novel dry pulverized coal gasifier which is applicable to double-high coal was put forward. A test system for the pressurized coal gasifier was described, and the study processes and results of the test were given. The feasibility of flameless gasification inside the gasifier was validated from the gasification reaction images, which accord with the characteristic of flameless oxidation. The key gasification parameters were obtained from the measured temperature, the relations of viscosity and components of slag. Moreover, components of syngas and technical indexes were gained on the condition of the key gasification parameters in the gasifier. These results show that high efficiency gasification can be achieved on the gasifier, the desired objectives have been attained, and the experience has been accumulated for the subsequent pilot test.

KEY WORDS: flameless oxidation; double high coal; gasifier; dry coal feed; slag tapping

摘要: 在分析无焰氧化技术的实现条件、形成机制及其实现途径的基础上, 提出一种适合双高煤种气化的新型干煤粉气流床气化炉。介绍该气化炉的试验研究系统, 以及双高煤干法进料气化试验研究过程与结果。炉内反应图像说明了该气化炉的炉内气化反应具有无焰氧化技术特征, 验证了本气化炉的设计方案的可行性; 通过炉温的测量、灰渣黏度与灰渣成分的关系分析确定了该双高煤合适的气化工艺参数, 并给出了气化工艺参数条件下该气化炉常压下产生的合成气的组

分和技术指标。试验数据表明该气化炉可以实现双高煤种的高效气化, 达到了预期目的, 为后续的中试研究积累了经验。

关键词: 无焰氧化; 双高煤; 气化炉; 干法进料; 液态排渣

0 引言

我国煤炭的特点之一是气化难度较高的双高煤种(高灰熔点, 灰熔点 $t_{FT} > 1450\text{ }^\circ\text{C}$; 高灰分, 平均含灰分 23%)煤种储量多, 其中高灰熔点煤约占我国煤炭储量的 50%; 但目前从国外引进的先进气流床气化技术对高灰熔点煤的使用都有限制, 一般水煤浆气化要求入炉煤 $t_{FT} < 1350\text{ }^\circ\text{C}$, 干粉进料 $t_{FT} < 1450\text{ }^\circ\text{C}$ ^[1]。因此, 我国发展煤炭气化技术的方向应基于我国的煤炭特点, 研发适合双高煤的先进干燥煤粉气流床气化技术, 为新型煤化工和能源转化提供技术安全保障^[2]。

由于煤粉气化过程是在高温、高压的气化炉中进行的, 气化反应速率完全受传递速率控制, 即气化炉的进料方式、炉内流场结构、组分浓度场、不同区域的气化反应组织情况等将直接影响不同气化炉气化的最终结果^[3-7]; 所以, 作为气化反应进行的核心设备, 气化炉的结构和进料方式等是影响气化性能的关键所在。

鉴于此, 本文将无焰氧化技术实现思想应用于双高煤气化炉概念模型设计中, 通过对无焰氧化技术特点及实现途径的分析, 设计了一种新型干燥煤粉气流床气化炉, 并在该试验炉上对双高煤进行了常压试验研究, 以验证该气化炉设计思路的可行性。

1 无焰氧化技术及其实现途径分析

无焰氧化技术(flameless oxidation, FLOX)^[8-11],

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2006AA05Z210); 安徽省科技攻关项目(07010202080)。

The National High Technology Research and Development of China(863 Program) (2006AA05Z210); The Key Science and Technology of Anhui Province(07010202080).

是 20 世纪 90 年代以来在国际燃烧领域得到迅速发展并推广应用的一种节能环保的先进燃烧技术。其特征是：燃烧“柔和”，反应发生在一个很宽的弥散区域，有时整个燃烧室都在进行燃烧反应，无可见的火舌或火焰前沿，整个燃烧室无局部高温或低温区，温度分布均匀。与传统燃烧技术相比，无焰氧化技术的显著优点在于反应区域温度分布均匀，平均温度水平升高，炉内温度峰值降低，温度梯度下降；氧化反应强度增大，燃烧完全，扩展了燃料的燃烧范围，节约燃料，抑制 NO_x 的生成，减少CO排放，降低燃烧噪音，降低燃烧装备尺寸等优点。

Wüning等^[10]总结了无焰氧化的实现条件，如图 1 所示。根据氧浓度和稀释空气温度的高低不同将反应区域划分为常规火焰区A、高温火焰区B、无焰火焰区C和非反应区D，其中落在区域C的数据点表示分别送入空气温度为常温、600 和 1000 °C时的反应工况。可以看出，要实现无焰氧化反应，燃料和氧化剂在接触反应之前必须满足 2 个条件：1) 反应物温度或炉膛温度足够高，通常大于 800 °C；2) 氧化剂中氧浓度较低，通常低于 15%。

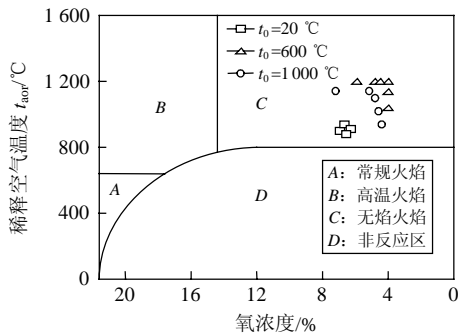


图 1 无焰氧化技术的实现条件

Fig. 1 Realization conditions of flameless oxidation

从形成机制上分析，传统燃烧技术是在空气、富氧(含氧体积浓度大于 21%)甚至纯氧的条件下燃烧，因燃料分子在烧嘴附近的较小空间内便与足够多的氧分子相遇，足以在此区域内全部氧化，因此火焰体积小，存在局部高温区， NO_x 排放浓度大。而对于无焰氧化技术，由于燃烧器附近的氧分子数量明显少于传统燃烧时的氧分子数量，只有小量的燃料分子在烧嘴附近与氧分子相遇发生燃烧，大量的燃料分子由高温高速空气射流带动扩散到炉膛大空间中与氧分子相遇发生燃烧，使燃烧火焰特性发生了根本性变化，表现出无焰反应的火焰特征。

只有当 1)、2) 2 个条件同时满足时，才能形成无焰氧化反应，反应区域才会落在图 1 中的无焰区域C。为了实现这 2 个条件，已有无焰氧化技术^[8-13]

的实现途径可以归纳为：

1) 通过燃料和氧化剂在进入炉膛之前极限回收烟气余热以提高其温度，或者在 2 者进入炉膛后通过高速射流卷吸、回流或炉内的高温辐射换热等方式迅速提高反应物温度。

2) 通过高速射流、烟气循环或特定的反应器结构促进燃料、氧化剂与足够多的惰性反应产物充分混合，迅速降低氧浓度，在氧化反应区域形成局部低氧气氛。

2 基于无焰氧化气化炉的概念模型设计

根据以上所总结的无焰氧化技术实现途径，本文在综合国内外先进气流床煤粉气化炉的结构特点^[14]的基础上，提出一种新型煤粉气化炉的结构设计，如图 2 所示。

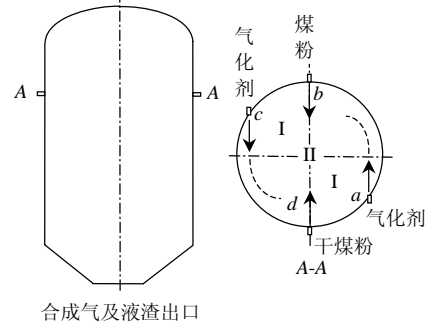


图 2 新型气化炉的结构示意图

Fig. 2 Schematic figure of the novel gasifier

该气化炉采用立式结构，煤粉和气化剂由炉体中上部侧壁的水平喷嘴进入炉内，产生的合成气和液渣向下由炉底出口并流排出；改变了传统气化炉的将煤粉和气化剂通过同一喷嘴喷入炉内的进料方式，将煤粉和气化剂分别由位于炉体上部同一高度水平面 A-A 上的不同喷嘴以不同入炉方式喷入炉内，煤粉在载气的输送下由 2 个对置布置的径向喷嘴 b、d 对撞喷入炉内，气化剂由 2 个平行于煤粉喷嘴并等距离偏置的相向喷嘴 a、c 高速切向喷入炉内，喷入的两股气化剂在炉内形成旋转气流。

这样，喷入炉内的煤粉和气化剂将进料A-A水平面分成中心对称的 3 个区域：I 气化反应区域；II 旋转卷吸区域；III 对撞区域。气化剂从 a 点高速切向喷入炉内，迅速卷吸气化反应区 I 产生的高温反应气体，经过旋转卷吸区 II 后气化剂中的氧浓度降低，在到达 b 点时形成了局部低氧气氛，同时由于其混合了高温的反应气体和高温炉壁的热辐射作用，其温度急剧上升到煤粉着火点以上；在 b 点，煤粉径向喷入高速旋转的气化剂气流中，在气化剂

射流的驱动下呈散射状向下游迅速扩散,并与高温低氧的气化剂物流充分接触,迅速升温。温度升高导致在煤粉颗粒表面溢出大量的挥发分,该挥发分一旦与旋转气流中的高温氧气分子接触,立即发生气化反应,生成 CO 、 CO_2 和焦炭等,并放出大量反应热,从而在其下游形成气化反应区I;从c点和d点喷入的气化剂和煤粉又重复以上过程;2股中心对置的煤粉气流采用撞击式喷入,在进料平面的中心形成撞击区域,这种方式旨在加强混合,强化热质传递。

通过以上炉型结构与进料方式的设计,使煤粉和气化剂在炉内的反应过程满足了无焰氧化的2个实现条件,煤粉和高温低氧气化剂的气化反应发生在整个旋转气流中,而不是在某一个峰面上,使煤粉和气化剂的反应空间成倍增大,在炉内形成了煤粉和气化剂的空间气化反应,反应放热弥散到整个气化炉反应空间内,避免了传统的气化炉内局部反应温度过高,降低了局部温度峰值,保护了炉体内部材料;并提高了炉膛出口的排烟温度水平,实现高灰熔点煤粉的顺利排渣;并强化炉内的传质传热,提高炉内的气化强度,最终提高气化效率。

同时,对于双高煤,因其含灰量较高,气化过程中形成的灰分对来不及完全反应的碳颗粒有很大的包裹夹带作用,从而使得碳的转化率和气化效率较低。吴学成^[15]通过对气流床煤气化模型的研究指出,通过延长气化物料在炉内的停留时间可以提高煤气的有效组分和气化效率。本新型气化炉通过旋转气流大大延长了气化物料的停留时间,必将使得双高煤的气化效率和碳的转化率得以提高。

另外,炉内产生的合成气(H_2+CO)旋转向下和排渣一同从炉底出口并流排出,利用高温合成气对熔渣的良好携带和冲刷作用使得液渣顺利排出,这对双高煤种气化的液态排渣有良好的促进作用。

3 新型煤粉气化炉的气化试验研究

3.1 干煤粉气化炉试验系统

干煤粉气化炉试验系统示意图如图3所示。

试验气化炉炉内气化空间的内径为0.32 m,净高0.60 m,高径比为1.875。采用燃气点火方式来预热和启动煤粉的燃烧。干煤粉的输送采用立式微量螺旋给粉器,气化剂使用纯氧和水蒸气(图3中略去了另外1对气化剂喷嘴)。在炉体的下端引入自来水对炉底下部生成的高温合成气和灰渣进行激冷。煤气经除尘、分离后由取样器收集以备分析

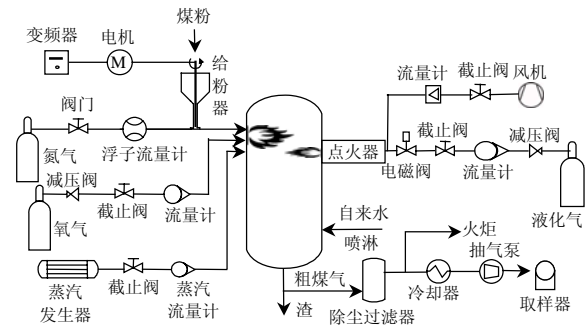


图3 煤粉气化试验系统示意图

Fig. 3 Schematic of coal gasification test system

成分所需。

3.2 气化试验参数与方法

3.2.1 试验煤种特性

根据气化炉的设计容积、煤粉颗粒停留时间的限定,气化炉给煤量取7.2 kg/h。

气化用煤采用淮南煤,其特性分析如表1。

表1 气化用煤的特性分析
Tab. 1 Characteristic analysis of coal

| 工业分析/% | | | | | $Q_{\text{net,ar}}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$ |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|------------------|--|
| M_{ar} | A_{ar} | V_{ar} | FC_{ar} | | |
| 1.16 | 23.10 | 27.03 | 48.71 | | 24435 |
| 元素分析/% | | | | | |
| C_{ar} | H_{ar} | O_{ar} | N_{ar} | S_{tar} | |
| 63.51 | 4.19 | 6.39 | 1.02 | 0.63 | |
| 煤灰的化学成分/% | | | | | |
| SiO_2 | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | CaO | MgO | |
| 53.09 | 31.37 | 3.73 | 1.46 | — | |
| 灰熔点 $t/^\circ\text{C}$ | | | | | |
| DT | ST | FT | | | |
| >1 470 | >1 470 | >1 470 | | | |

为保证煤粉输送顺利,需将煤粉的湿度和粒度控制在一定的范围内。本试验中要求煤粉含水质量百分数小于2%,要求粒度<200目的占80%以上。

3.2.2 试验过程

首先启动点火器对炉膛升温,当炉内温度达到1000 $^\circ\text{C}$ 时,即完成了炉膛的预热过程。然后通过给粉器将煤粉径向送入炉内,并切向送入氧气。这时炉内发生煤粉氧燃反应,炉温迅速上升,当温度升高到1400 $^\circ\text{C}$ 以上后向炉内通入水蒸气。待炉膛达到预定温度后,通过改变试验工况进行煤粉干法气化试验。

3.2.3 数据采集方法

采用铂铑30-铂铑6热电偶(代号WRR,温度测量范围0~1800 $^\circ\text{C}$)测量炉内温度,并将该温度信号经Agilent34970A数据采集仪后导入计算机中显示处理。

当每个试验工况稳定时，将干煤粉气化产生的粗合成气经除尘过滤、冷却、干燥后，由微型抽气泵抽出并灌入气体收集袋。再送至气相色谱仪 (GC-1102 型) 分析不同试验工况下合成气成分。由于采用的工业纯氧气化，合成气中的主要检测成分为 CO 、 H_2 、 CO_2 、 CH_4 、 N_2 和 O_2 等未作分析。

对于气化产生的灰渣，在每个工况试验结束时收集炉底的少许灰渣，测量其中的含水量和含碳量，从而求得炉底渣样中的含碳量，即碳损失，再根据碳平衡求取碳转化率。

3.3 干煤粉气化炉试验结果及分析

3.3.1 炉内气化火焰图像

在该气化炉的炉顶中心设置了一个观火孔，通过双层耐高温石英玻璃观测炉内的气化火焰。为了说明在本气化炉上实现具有无焰氧化特征的气化反应的可行性，在试验正式开始之前，对 2 种工况的炉内火焰进行了摄像比较，结果如图 4 所示，其中，工况 A 表示使用单一煤粉喷嘴 b 和气化剂喷嘴 c 喷入物料；工况 B 表示使用煤粉喷嘴 a 、 c 和 气化剂喷嘴 b 、 d 均喷入相应的物料，即本气化炉的的实施方式，喷嘴 a 、 b 、 c 和 d 的布置如图 2 所示。2 种工况的氧碳原子比均取 1.0，水蒸气煤比均取 0.1 kg/kg。



(a) 工况 A (b) 工况 B

图 4 炉内气化火焰图

Fig. 4 Flame images of gasification

从图 4 中的小圆火焰部分可以看出，工况 A 发生了明显的偏烧现象，煤粉和 气化剂的剧烈高温反应集中在 气化剂气流的下游，在该区域可以看到明亮的白色火舌，炉内温度场不均匀；而在工况 B 中，炉内看不到明显的火舌或者火焰前沿，火焰亮度降低，炉内呈透明状态，局部高温区趋于消失，峰值温度降低，炉内温度场均匀。

由此印证了本气化炉的结构和进料方式可以实现煤粉的无焰气化反应，使得煤粉 气化过程空间化，炉内温度场均匀，验证了 气化炉设计思路的正确性。

3.3.2 双高煤气化工艺参数的确定

对于双高煤气化，关键是如何通过调节 气化工艺参数来实现炉内灰渣的顺利排出。目前已有学者^[1,16]提出对高灰熔点煤实行 固态排渣的气流床气化技术，以降低一定的碳转化率和 气化效率来获得气化灰渣的顺利排出。但从 气化动力学的角度来说，气化温度越高，生成的有效气体含量也就越大。所以，本文探讨液态排渣的双高煤气化工艺参数。

由于在一定的给煤量条件下，氧煤比和 蒸汽煤比的大小直接决定了气化炉炉内的温度场，所以，寻求合适的气化工艺参数，从而确定 气化炉的排渣温度，是实现双高煤气化的 液态排渣技术的前提。由于现行的气流床 气化炉均采用“以渣抗渣”技术的水冷壁 结构，这就要求气化炉温度必须维持在 一定的温度范围内。如果炉内温度过高， 灰渣的熔化流动速度加快，使得水冷壁 失去了保护层，还会使熔渣在气化炉下 部的激冷池聚结成大块灰渣，造成排渣 困难^[17]。而且，炉内温度升高的前提是 提高炉内供氧量，使得合成气中 CO 含 量降低，比氧耗增加；如果温度过低， 灰渣黏度将迅速增大^[18]，灰渣会因流 动不畅而造成排渣困难。

实践证明，由于灰渣熔融性只能用来 定性地说 明灰渣熔化的温度范围，不能正确地判 定实际 气化炉内复杂气氛下的灰渣流动特性， 仅凭灰 熔点确定 气化炉的操作温度是不可行的，较为可 靠的指 标是一 定温度 下的煤 灰黏度。 国内外对 液态排 渣炉的 研究指 出，灰 渣的黏 度在 25~40 Pa·s 方可保 证液态 锅炉的 顺利排 渣。根 据 Watt-Fereday 等人对 灰渣成 分与灰 渣黏度 和操作 温度拟 合的回 归等式^[17]，结合表 1 中煤 灰成分 数据进 行了回 归，可 以得出 该双高 煤的合 适操作 温度为 1 570~1 630 $^{\circ}\text{C}$ 。

图 5 为在氧碳原子比取 1.0 的情况下， 炉内下 部排渣 口区域 温度随 水蒸气 煤比的 变化关 系。显 然，

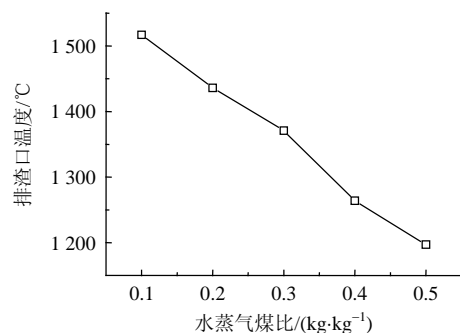


图 5 水蒸气煤比对炉内温度的影响

Fig. 5 Effect of steam/coal ration on gasification temperature

随着水蒸气喷入量的增加,水蒸气参与的C-H₂O反应、CH₄-H₂O重整反应和水煤气变换反应等吸热反应的份额增大,炉内温度水平降低。当氧碳原子比取1.0时,水蒸气煤比只有不大于0.1 kg/kg,炉膛排渣口温度才落在煤灰的流动温度 t_{FT} 的范围之内。

图6给出了在水蒸气煤比0.1 kg/kg的情况下,炉内下部排渣口区域温度随氧碳原子比的变化关系。可以看出,供氧量较少时,炉内表现出强烈的还原气氛,氧化气氛不足,温度低;随着喷入氧气量的增加,使得氧化放热反应份额增大,炉内温度升高;当供氧量过多时,则进入煤粉氧化燃烧工况,生成气体中CO的量减少,CO₂的量增多。根据上述计算得到的双高煤操作温度,当水蒸气煤比取0.1 kg/kg时,为了使双高煤种实现顺利的液态排渣,氧碳原子比取值范围在1.05~1.15之间,这一取值范围要比常规煤种的略高^[19-20]。

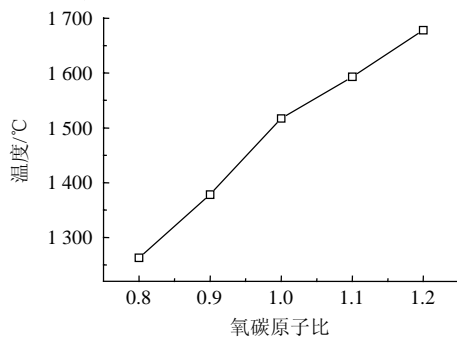


图6 氧碳原子比对炉内温度的影响

Fig. 6 Effect of oxygen/carbon atom ratio on gasification temperature

3.3.3 主要试验技术指标

当气化工艺参数水蒸气煤比取0.1 kg/kg、氧碳原子比取1.1时,在常压下该气化炉产生的典型合成气的组分和技术指标如表2所示。

表2 试验合成气组分及技术指标

Tab. 2 small-scale coal gasification results

| 组分 | 体积比/% | 指标 | 数值 |
|-------------------|-------|--|------|
| CO | 50.07 | 碳转化率/% | 97.2 |
| H ₂ | 23.20 | 合成气高位热值/(kJ·m ⁻³) | 9371 |
| CO ₂ | 20.10 | 冷煤气效率/% | 68.0 |
| CO+H ₂ | 73.90 | 煤气产率/(m ³ ·kg ⁻¹) | 1.63 |

从试验数据看,合成气中有效成分偏低,CO₂的量较高,这由于主要是在常压下试验的结果,且气化用煤是反应性较低的双高煤;另外,较高的氧碳原子比也使得CO₂含量升高。在后续的气化试验研究中,将通过加压提高合成气的有效成分,降低CO₂的生成量;同时,加强炉体外侧保温,减少试验气化炉的散热损失,从而在维持相同的温度水平下适

当降低供氧量,从而降低合成气中CO₂的含量。但总的来看,在该气化炉中使用双高煤常压下的气化结果已经达到了较好的目标,进一步验证了基于无焰氧化技术的气化炉设计方案的可行性,为后续的中试研究积累了经验。

4 结论

1) 将无焰氧化技术的实现思想应用于煤粉的高效气化研究中,在对无焰氧化技术的技术特性、实现条件、形成机理及其实现途径的充分分析的基础上,针对我国含量丰富且难以气化的双高煤种,综合国内外先进气流床煤粉气化炉的结构特点,提出了一种新型干煤粉气流床气化炉。

2) 在搭建的煤气化试验系统平台上开展了双高煤干法进料气化试验研究,获得了具有无焰氧化技术特征的空间气化反应,验证了该新型气化炉设计思路的可行性。

3) 根据一定温度下的煤灰黏度指标,通过操作温度与灰渣黏度、双高煤灰渣成分的关系计算得到了合适的双高煤的排渣操作温度,并结合一定气化工艺参数条件下的炉内下部排渣口区域温度的试验测量值,确定了在该试验气化炉中使用双高煤常压干法进料的合适气化工艺参数,即水蒸气煤比取值不大于0.1 kg/kg,氧碳原子比的取值范围在1.05~1.15之间。

4) 新型气化炉在氧碳原子比和水蒸气煤比分别取1.1和0.1 kg/kg、常压下的合成气组分和技术指标数据表明,该气化炉设计方案具有一定的技术优越性,可以实现双高煤种的高效气化,达到了预期目的,为后续的中试研究积累了经验。

参考文献

- [1] 乌晓江,张忠孝,朴桂林,等.高灰熔点煤高温下煤焦CO₂/水蒸气气化反应特性的实验研究[J].中国电机工程学报,2007,27(32):24-28.
Wu Xiaojiang, Zhang Zhongxiao, Piao Guilin, et al. Experimental study on gasification reaction characteristics of Chinese high ash fusion temperature coal with CO₂ and steam at elevated temperature [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(32): 24-28 (in Chinese).
- [2] 黄戒介,房倚天,王洋.现代煤气化技术的开发与进展[J].燃料化学学报,2002,30(5):385-391.
Huan Jiejie, Fang Yitian, Wang Yang. Development and progress of modern coal gasification technology [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2002, 30(5): 385-391 (in Chinese).
- [3] Chen C X, Masayuki H, Toshinori K. Use of numerical modeling in the design and scale-up of entrained flow coal gasifiers [J]. Fuel, 2001, 80(10): 1513-1523.

- [4] Choi Y C, Li X Y, Park T J, et al. Numerical study on the coal gasification characteristics in an entrained flow coal gasifier[J]. Fuel, 2001, 80(15): 2193-2201.
- [5] Watanabe H, Otaka M. Numerical simulation of coal gasification in entrained flow coal gasifier[J]. Fuel, 2006, 85(12/13): 1935-1943.
- [6] 梁钦锋, 郭庆华, 于广锁, 等. 两喷嘴撞击气化火焰结构特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(23): 28-31.
Liang Qinfeng, Guo Qinghua, Yu Guangsuo, et al. Study on structure properties of two-burners impinging gasification flame [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(23): 28-31(in Chinese).
- [7] 徐越, 吴一宁, 危师让. 二段式干煤粉气流床气化技术的模拟研究与分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 186-190.
Xu Yue, Wu Yining, Wei Shirang. Simulation and analysis on gasification technology of a two-stage dry feed entrained flow bed [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 186-190(in Chinese).
- [8] Awosope I O, Lockwood F C. Prediction of combustion and NO_x emission characteristics of flameless oxidation combustion[J]. IFRF Combustion Journal, 2005, 6(1): 1-28.
- [9] Awosope I O. Flameless oxidation modeling: on application to gas turbine combustors[J]. Journal of the Energy Institute, 2006, 79(2): 75-83.
- [10] Wünnig J A, Wünnig J G. Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1997, 23(1): 81-94.
- [11] Xing X J, Lin Q Z. Structure of reaction zone of normal temperature air flameless combustion[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2007, 221(4): 473-480.
- [12] Paul P J, Mukunda H S, Kumar S. Investigations of the scaling criteria for a mild combustion burner[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2613-2621.
- [13] Webera R, Smart J P, Kamp W V. On the (MILD) combustion of gaseous, liquid, and solid fuels in high temperature preheated air [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2623-2629.
- [14] 唐志国, 唐超君, 马培勇, 等. 干煤粉加压机气流床气化炉的炉型分析[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(8): 124-128.
Tang Zhiguo, Tang Chaojun, Ma Peiyong, et al. Structural analysis of dry feed pressurized entrained flow bed gasifier[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(8): 124-128(in Chinese).
- [15] 吴学成, 王勤辉, 骆仲浚, 等. 气化参数影响气流床气化的模型研究(II)—模型预测及分析[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2004, 38(11): 1483-1489.
Wu Xuecheng, Wang Qinghui, Luo Zhongyang, et al. Modelling on effects of operation parameters on entrained flow coal gasification (II): model prediction and analysis[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2004, 38(11): 1483-1489(in Chinese).
- [16] 乌晓江, 张忠孝, 朴桂林, 等. 煤粉加压机气流床气化特性实验研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(8): 1431-1434.
Wu Xiaojiang, Zhang Zhongxiao, Piao Guilin, et al. Experimental study on gasification characteristics of coal in lab-scale down flow gasifier[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(8): 1431-1434(in Chinese).
- [17] 汤中文. 干法粉煤气化技术进展及工艺影响因素[J]. 大氮肥, 2003, 26(3): 149-152.
Tang Zhongwen. Advances of dry powder coal gasification technology and the factors influencing the process[J]. Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry, 2003, 26(3): 149-152(in Chinese).
- [18] Oshikavva K Y. Innovative coal gasification system with high temperature air[J]. Fuel and Energy Abstracts, 1998, 39(1): 68-68.
- [19] 周俊虎, 匡建平, 周志军, 等. 粉煤气化炉冷态和热态流场分布特性的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(20): 30-35.
Zhou Junhu, Kuang Jianping, Zhou Zhijun, et al. Numerical simulation for pulverized coal gasifier's fluid flow characteristic on cold and hot condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(20): 30-35(in Chinese).
- [20] 吴玉新, 张建胜, 王明敏, 等. 用简化 PDF 模型对气化炉运行特性的分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(32): 57-62.
Wu Yuxin, Zhang Jiansheng, Wang Mingmin, et al. Analysis of gasification performance of a texaco gasifier based on presumed PDF model[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(32): 57-62(in Chinese).



唐志国

收稿日期: 2009-07-17。

作者简介:

唐志国(1978—), 男, 博士研究生, 合肥工业大学讲师, 主要从事清洁能源、节能环保技术研究, tzhiguo@mail.ustc.edu.cn。

(责任编辑 王庆霞)