

# 干煤粉加压气流床气化试验研究

任永强<sup>1</sup>, 许世森<sup>2</sup>, 夏军仓<sup>2</sup>, 李小宇<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710032)

**摘 要:**介绍了 36 t/d 加压气流床气化中试装置主要设备、工艺流程及工艺条件的选择, 并给出试验研究中多个煤种在气化压力 3.0 MPa、投干粉煤量 1 t/h 条件下取得的主要试验数据。从试验数据看出, 干法气化指标明显优于水煤浆气化, 主要是 CO<sub>2</sub> 含量低, 有效成分(CO+H<sub>2</sub>) 含量高(均大于 89%), 证明了干煤粉气化的优越性。试验结果基本达到预期目的, 积累了干粉煤气流床气化数据。

**关 键 词:** 煤气化; 气流床; 干法进料

中图分类号: TQ544 文献标识码: A

## 引 言

煤气化是洁净、高效利用煤炭的主要途径之一。气化炉分为固定床、流化床和气流床 3 种。而其中干法进料的加压氧吹气流床气化炉具有单炉处理能力强、煤种适应性广、碳转化率高和负荷调节性好等优点, 代表了今后煤气化技术的发展方向<sup>[1,5]</sup>。属于干法进料气流床气化的有: 荷兰 Shell 煤气化技术、德国 PRENFLO 煤气化技术及德国 GSP 气化技术。目前国内市场已经被 Shell 和 GSP 占据。

为打破垄断, 开发自主知识产权的干法进料气流床煤气化技术, 在科技部“十五”863 项目的支持下, 西安热工研究院建成了我国第一套水冷壁的日处理煤量为 36 t/d(10 MW)的加压气化中试装置<sup>[4]</sup>, 并在此装置上进行了不同煤种的加压气化试验, 取得了丰富的煤种气化数据。现该项目已顺利通过科技部的验收。目前西安热工院正在开发应用于华能集团绿色煤电工程的 2 000 t/d 级的干煤粉加压气流床气化装置。

## 1 干煤粉加压气化试验设备及系统流程

### 1.1 气化炉结构

现有已商业化的干煤粉加压气化技术几乎均采

用一级气化。为使气化炉出口热煤气中的熔融态灰渣凝聚, 多采用急冷的方式以实现凝渣的目的。

该过程存在如下缺点:

- (1) 冷煤气效率较低;
- (2) 需要增设循环冷煤气泵, 从而增加了消耗功;

(3) 由于煤气流量较大, 造成煤气冷却器的几何尺寸过大。

为了解决这些问题, 西安热工研究院提出了一种新型的两段式干煤粉加压气流床气化炉, 其结构如图 1 所示。

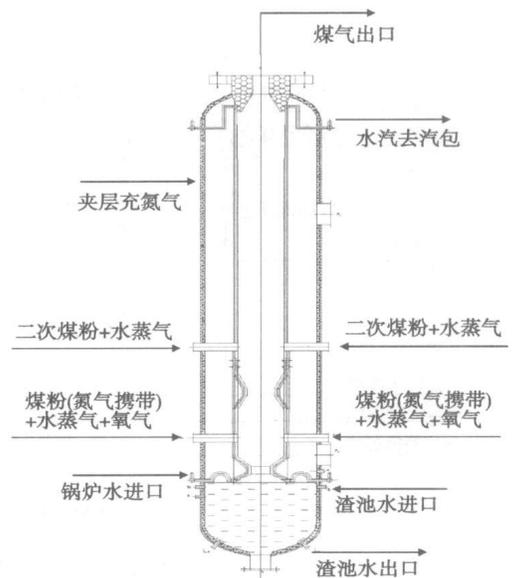


图 1 两段式气化炉的结构示意图

该气化炉的外壳为直立圆筒, 炉膛分为上炉膛和下炉膛两段, 下炉膛是第一反应区, 为一个两端窄中间宽的腔体, 2 个或 4 个对称的用于输入粉煤、水和氧气的喷嘴(根据气化炉的处理煤量确定)设在下炉膛的两侧壁上, 渣口设在下炉膛底部高温段, 采用

收稿日期: 2006-10-18; 修订日期: 2006-12-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)基金资助项目(2003AA522030)

作者简介: 任永强(1974-)男, 山西汾阳人, 西安交通大学在职博士研究生, 现任西安热工研究院总工兼气化所所长

液态排渣, 在下炉膛内壁面上设有用于回收部分热量的水冷壁; 上炉膛为第二反应区, 高度较长, 在上炉膛的侧壁上开有两个对称的二次粉煤和水进口, 同时在上炉膛内壁面上也设有用于回收热量的水冷壁。工作时, 由气化炉下段喷入干煤粉、氧气(纯氧或富氧)以及蒸汽, 所喷入的煤粉量占总煤量的 80%~85%, 在上炉膛喷入过热蒸汽夹带的粉煤, 所喷入量占总煤量的 15%~20%。该装置中上段炉的作用主要有: (1) 代替循环合成气使温度高达 1 400 °C 的煤气急冷至约 900 °C; (2) 利用下段炉煤气显热进行热裂解和部分气化, 提高总的冷煤气效率和热效率<sup>[2-3]</sup>。

### 1.2 干煤粉加压气化中试工艺流程

干煤粉加压气化试验装置的工艺流程如图 2 所

示。

含水量低于 1%、细度 85% < 200 目的粉煤储于常压煤粉仓, 经过计量仓靠重力落入变压煤仓, 变压仓用 N<sub>2</sub> 充压, 充到与加压仓压力平衡时, 粉煤落入加压仓, 然后分别被 N<sub>2</sub> 吹送至气化炉一段和二段喷嘴。一段反应用氧气经预热后与过热蒸汽混合后进入一段喷嘴。粉煤、氧气、水蒸气在一段喷嘴出口处着火并进行气流式火焰反应, 生成以 CO 和 H<sub>2</sub> 为主的高温粗合成气。二段喷入的煤和蒸汽遇到高温粗合成气发生煤的热解、挥发分的燃烧和裂解、碳的燃烧和气化等多种反应, 并将高温粗合成气冷却至 900 °C 以下。合成气进入废锅冷却后进入旋风分离器除尘, 然后将洗涤塔洗涤后在煤气闪蒸罐中闪蒸, 最后经火炬放空。

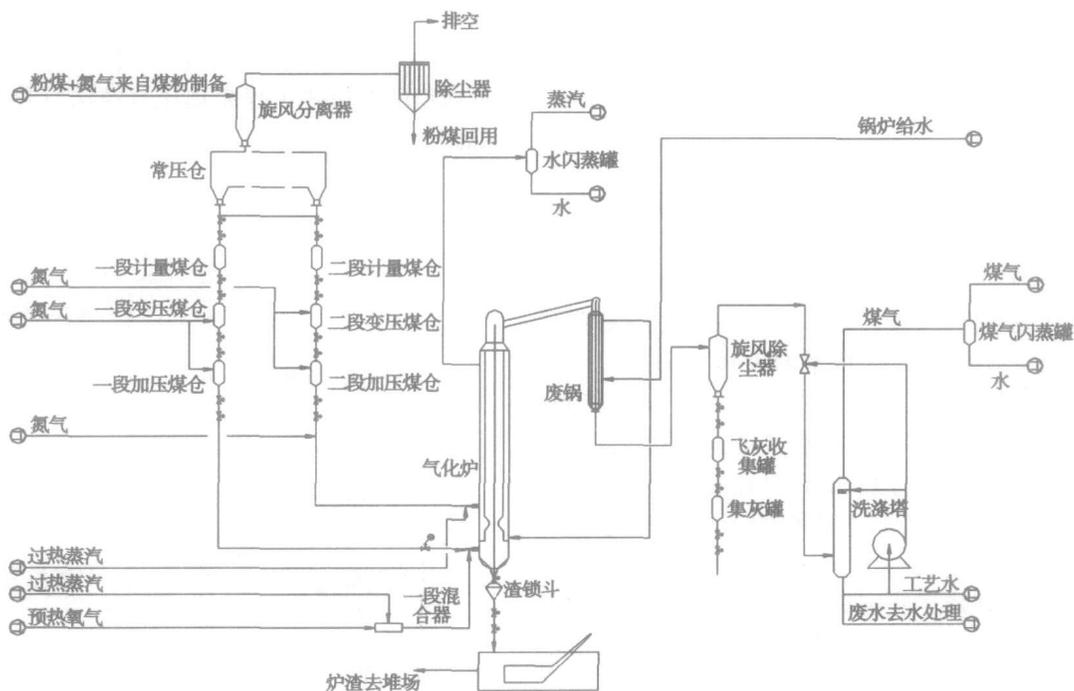


图 2 干煤粉加压气化试验装置的工艺流程

水冷壁管的压力为 4 MPa, 水首先在废热锅炉中预热, 再进入气化炉水冷壁, 然后在水闪蒸罐中闪蒸后排空。在水冷壁管靠近炉中心侧有密集的抓钉, 用来固定碳化硅耐火层。

煤气化时生成的炉渣为熔融炉渣, 在气化炉水冷壁的内壁上附着, 并形成一层渣保护层。随着渣层的增厚, 上层熔渣在重力作用下, 向下流动进入气化炉底部的水浴内, 被水激冷后, 定期从气化炉底部经渣锁斗排出至渣池。

## 2 气化试验研究

### 2.1 试验方法

待建立起废热锅炉和气化炉水系统后, 气化炉先用轻柴油和仪表空气通过点火喷嘴点火并升温, 待温度升至 600 °C 后投料, 将煤粉和氧气切换至气化炉。在温度上升至 1 400 °C 以后投入水蒸气。然后对气化炉升压, 一般 2 h 后气化炉可升压至

3.0 MPa。稳定操作中采集数据(气相)、黑水。停炉后称重渣料,测定含碳量。

## 2.2 气化试验原始参数

### 2.2.1 气化压力的选定

气化压力为3.0 MPa。压力测点设在气化炉炉膛内部,对引压管进行冷却然后接压力变送器,能够真实反应气化反应区的压力。

### 2.2.2 煤质分析

“干煤粉加压力气化”中试试验选择了两种典型烟

煤(神木煤和华亭煤)、一种褐煤、一种无烟煤及一种高灰分、高灰熔点煤进行了试验。

甘肃华亭煤和神华神木煤具有灰熔点低、灰粘度高、灰含量低、挥发分高、易气化等优点。这两种煤种是气流床气化的理想煤种。

另外,本试验又选择了有代表性的一种褐煤(神华褐煤)、一种无烟煤(晋城无烟煤)及一种高灰分、高灰熔点( $FT > 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ )煤(黄陵煤)进行了试验研究。

各煤种数据如表1所示。

表1 各煤种数据

	神木煤	华亭煤	神华褐煤	黄陵煤	晋城无烟煤	伊犁煤
全水分 $M_t/\%$	4.9	12.5	26.5	8.2	6.8	17.6
空气干燥基水分 $M_{ad}/\%$	4.86	7.52	6.08	1.21	1.34	8.42
收到基灰分 $A_{ar}/\%$	10.68	17.24	9.92	22.15	13.76	10.13
干燥无灰基挥发分 $V_{daf}/\%$	36.09	38.10	44.95	35.17	8.88	31.61
干燥无灰基固定碳 $FC_{daf}/\%$	63.91	61.90	55.05	58.03	91.12	68.39
收到基碳 $C_{ar}/\%$	66.71	55.16	47.43	58.03	72.39	58.23
收到基氢 $H_{ar}/\%$	4.09	3.57	3.13	3.58	2.63	3.00
收到基氮 $N_{ar}/\%$	0.78	0.57	0.55	0.83	1.00	0.58
收到基氧 $O_{ar}/\%$	11.97	10.42	12.25	6.66	3.08	10.06
全硫 $S_{t,d}/\%$	0.87	0.54	0.22	0.55	0.34	0.40
收到基低位发热量 $Q_{net,ar}/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	26.57	21.80	18.80	23.46	27.73	22.13
收到基高位发热量 $Q_{gr,ar}/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	25.61	20.78	17.55	22.53	27.03	21.11
变形温度 $DT/\text{ }^{\circ}\text{C}$	1150	1300	1140	1400	1390	1250
软化温度 $ST/\text{ }^{\circ}\text{C}$	1190	1370	1160	1470	> 1500	1280
流动温度 $FT/\text{ }^{\circ}\text{C}$	1250	1410	1190	> 1500	> 1500	1290

## 2.3 气化工艺条件选择

### 2.3.1 煤粉物性要求

为保证煤粉输送顺利,必须保证煤粉的湿度和粒度在一定的范围内。本试验中要求煤粉含水量在2%以下,粒度要求  $100\% < 100\text{ }\mu\text{m}$  且  $85\% < 75\text{ }\mu\text{m}$ 。

### 2.3.2 气化温度

气化炉温度控制是气化过程的关键,在正常运行时,它是煤粉燃烧情况的直接反映。当温度合适时(例如高于灰渣流动温度  $50\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  时),碳转化率高,熔渣流动性好,运行比较正常;当温度过高时(例如高于灰渣流动温度  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上时),碳转化率高,熔渣流动性好,但  $\text{CO}_2$  含量较高,会降低气化指标,并影响气化炉水冷壁的寿命;当温度较低时,碳转化率低,渣中含碳量高,易堵塞渣口。

本试验气化温度选择略高于灰渣流动温度  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,对于高灰熔点煤,一般选择  $1750\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,以保证排渣顺利。

### 2.3.3 蒸汽煤比

气化典型的烟煤,在试验中控制汽煤比为  $0.1\text{ kg/kg}$  (重量比)左右,本试验的蒸汽供应量为  $80\sim 100\text{ kg/h}$ 。

### 2.3.4 入炉煤量

综合供氧能力、气化炉容积等因素,气化炉设计投煤量为  $1\text{ t/h}$ ,试验基本上选用这种投煤量。

浓相输送试验表明在现有试验条件下,固气比可达到  $10\sim 12\text{ kg/kg}$ 。

### 2.3.5 氧煤比

在煤种给定的情况下(神木烟煤),维持汽煤比不变,根据炉温调节氧量。当粉煤入炉(点火)阶段,氧煤比控制在  $0.9\text{ m}^3/\text{kg}$ ,当炉温达到气化温度值时,降低氧煤比以控制炉温。

## 2.4 主要试验数据

试验数据如表2所示。

表 2 试验数据

	神木煤	华亭煤	神华褐煤	黄陵煤	晋城无烟煤	伊犁煤	
煤 气 成 分 / %	CO	62.38	62.79	61.9	62.36	69.93	64.96
	H <sub>2</sub>	29.36	28.46	27.84	28.98	21.78	26.61
	CH <sub>4</sub>	0.26	0.17	0.05	0.14	0	0.01
	CO <sub>2</sub>	2.76	3.41	3.59	4.29	4.52	4.14
	H <sub>2</sub> S+CO <sub>S</sub>	0.37	0.25	0.11	0.24	0.14	0.19
	N <sub>2</sub>	4.87	4.92	6.51	3.99	3.61	4.09
	有效气成分(CO+H <sub>2</sub> )	91.74	91.25	89.74	91.34	91.71	91.57
	碳转化率/%	98.9	98.6	98.8	98.1	98.2	98.8
	比氧耗(O <sub>2</sub> /(CO+H <sub>2</sub> ))/ m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> (×1000)	298.6	343.5	328.6	335.2	342.1	321.7
	冷煤气效率	83.2	82.5	79.2	81.7	80.3	82.2
比煤耗(CO+H <sub>2</sub> )/kg·m <sup>-3</sup> (×1000)	518.2	528.6	545.9	557.3	532.2	548.7	

### 3 结果与讨论

分析试验结果, 可以得出如下结论:

(1) 从试验数据来看, 干法气化指标明显优于水煤浆气化, 主要是 CO<sub>2</sub> 含量低, 有效成分(CO+H<sub>2</sub>)含量高(均大于 89%), 证明了干煤粉气化的优越性。

(2) 在试验条件下, 固气比较高, 煤气中含 N<sub>2</sub> 较少。

(3) 中试装置的成功运行, 在以下方面为未来大型化装置的设计提供参考依据:

- ° 粉煤加料装置的流程设计, 包括常压料斗、变压料斗、加料料斗、输料装置等, 为阀门、料位计的选择提供了参考依据;

- ° 粉煤喷嘴结构设计参数;

- ° 煤气成分及主要消耗定额;

- ° 煤气化操作特性(温度、压力、汽煤比、氧煤比等);

- ° 气化炉点火方法和其它安全操作规程;

- ° 温度测量技术。

#### 参考文献:

[1] 许世森, 张东亮, 任永强. 大规模煤气化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

[2] 张东亮, 许世森, 任永强. 两段式加压粉煤气化技术[J]. 煤化工, 2005, 33(6): 23-25.

[3] 许世森, 任永强. 两段式干煤粉气化炉[P]. 中国专利: ZL 011317809, 2005.

[4] 任永强, 许世森. 粉煤加压气化小型试验研究[J]. 热能动力工程, 2004, 19(6): 579-581.

[5] 任永强, 许世森, 邵时旺. 干法进料煤气化技术在中国的进展与发展趋势[J]. 中国电力, 2004, 37(6): 49-52.

(编辑 渠 源)

## 船舶燃气轮机

### LM2500+ 通过冲击试验

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2006 年 6 月号报道, GE 公司最近得到美国海军对于 LM2500+ 航改型船用燃气轮机推进系统抗冲击性能批准。

作为用于美国海军 LHD8 和后续的大甲板多用途两栖作战攻击舰的燃气轮机资格鉴定的一部分, 已完成了一系列试验。

通过冲击试验, 成功地证明了在经受模拟舰艇被击中或在舰艇附近发生爆炸的爆炸性打击后 LM2500+ 能继续运行。

类似于几乎驱动美国海军整个水面战舰队队的 GE LM2500 燃气轮机, 这些试验证明了 LM2500+ 用于海军使命坚固的运行特性和优异的性能。

对燃气轮机及其底座和箱装体进行的一系列冲击试验是由美国海军在把 LM2500+ 推进系统用于 LHD8 的订单中所要求的第二个资格鉴定试验。

(吉桂明 供稿)

Thermal Science, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 427 ~ 430

Authors' research has shown that charged particles tend to deposit at the tip of particle chains. On this basis, by adding the deposition properties of charged particles to an already established model of a neutralized compressible particle layer, a model for a compressible particle layer of charged particles was set up. Studied thereupon is the mechanism of the filtration stage of the particle layer during the filtration process of filtering materials. It has been found through the model that in case of incompressibility, the height of the particle layer formed by charged particles is similar to that of the neutralized particle layer. The distribution of voids, however, is uniform. Owing to the glide angle being relatively small, it is not easy for the above-mentioned layer to be compressed. When the pressure drop is increased to a certain value, the said layer assumes a periodic compression. Therefore, its pressure drop at a relatively high filtering air speed is notably lower than that at the neutralized working conditions. The results obtained from the model can successfully explain the experimental phenomena. **Key words:** charged particle, particle layer, compression, pressure drop, void ratio

干煤粉加压气流床气化试验研究 = An Experimental Study of Dry Pulverized-coal Gasification in a Pressurized Airflow Bed [刊, 汉] / REN Yong-qiang (College of Energy Source and Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049), XU Shi-sen, XIA Jun-cang, LI Xiao-yu (Xi'an Thermodynamics Academy Co. Ltd., Xi'an, China, Post Code: 710032) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 431 ~ 434

Described are the main equipment, process flow path and the selection of technological conditions for the gasification pilot plant of a 36 t/d pressurized airflow bed. Also given are the main test data obtained for a multitude of coal ranks undergone experimental research under the condition of the gasification pressure being 3.0 MPa and dry pulverized coal fed being 1 t/h. As can be seen from the test data, the indexes of dry-method gasification are obviously better than those of coal-slurry gasification, mainly due to a low CO<sub>2</sub> content and a high content of effective constituents CO + H<sub>2</sub> (both greater than 89%). The foregoing demonstrates the superiority of the dry pulverized coal gasification. The tests have basically achieved the anticipated aim and accumulated relevant data for dry pulverized coal gasification in an airflow bed. **Key words:** coal gasification, airflow bed, dry-feed of raw materials

非均匀受热管管壁温度场的数值计算 = Numerical Calculation of Temperature Fields on a Non-uniformly Heated Tube Wall [刊, 汉] / WANG Wei-shu, XU Wei-hui (College of Electric Power under the North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou, China, Post Code: 450008), CHEN Ting-kuan, LUO Yu-shan (National Key Laboratory on Multiphase Flow in Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 435 ~ 439

In the light of the non-uniform distribution of thermodynamic parameters, such as circumferential wall temperature of the non-uniformly heated tube wall and heat load etc., a two-dimensional mathematical model was established for simulating and calculating the temperature field of a non-uniformly heated tube with the outer wall temperature and heat-dispersion thermal load serving as boundary conditions. Based on the idea of radial node advancement, the authors have adopted a finite volume method to set up a discrete equation. A numerical calculation program was prepared to solve the reverse problem of heat conduction in the two-dimensional temperature field on the non-uniformly heated tubes determined by the coupling of the fluid heat exchange and tube wall heat conduction. By making use of the program, calculated was the heat transfer characteristics of semi-circle heated vertical riser (bare tube  $\phi 32 \times 3$  mm and  $\phi 24 \times 4$  mm) with respect to supercritical water. The calculation results can exceedingly well reflect the wall temperature distribution regularity of non-uniformly heated tubes and exhibit a good computation convergence. The results of calculation also indicate that at a supercritical pressure, the semi-circle heated vertical bare-riser wall temperature and wall surface heat load assume a non-uniform circumferential distribution. The side with a high heat load has a high temperature and the side with a low heat load a low temperature. In the pseudocritical zone, a heat transfer intensification occurs and an increase of in-tube heat transfer coefficient will weaken the flow-equalizing role of heat along the circumferential direction of tube walls. **Key words:** temperature field, reverse problem of heat conduction, heat load, non-uniformly heated tube