

煤高温空气气化实验研究

蔡九菊, 王连勇, 李明杰, 赵子忠

(东北大学国家环境保护生态工业重点实验室, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 在内径 200 mm 的固定床气化炉装置上进行了以高温空气/蒸汽作为气化剂的煤高温空气气化实验, 考察了空气预热温度、气化温度、空气/煤比和蒸汽/煤比等工艺参数对煤气化指标的影响. 结果表明, 在其他条件不变的情况下, 空气预热温度由 500 °C 提高到 800 °C 时, 煤气热值提高 32.5%. 气化温度越高对气化过程越有利, 但在固态排渣条件下, 气化温度的提高受煤灰熔点的限制. 空气/煤比和蒸汽/煤比对气化指标的影响本质上是通过改变气化温度来实现的. 对于特定的固定床气化工艺, 空气/煤比和蒸汽/煤比均存在最佳操作区域. 在本实验条件下, 其优化值分别为 1.55~1.8 Nm³/kg 和 0.25~0.35 kg/kg.

关键词: 高温空气气化; 固定床; 工艺参数

中图分类号: TQ546.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2008)05-0914-06

1 前言

我国的能源消费以煤为主, 在今后相当长的时间内不会改变^[1]. 2007 年, 我国煤炭消费量占能源消费总量的 70.4%, 比世界平均水平高出 37.5%. 我国现有燃煤设备几十万台, 其中大部分中小型燃煤工业炉窑采用直燃煤工艺, 热效率低, 同时排放灰渣、粉尘与 SO₂, 造成了能源的大量浪费和环境的严重污染. 少量的中小型燃煤工业炉采用煤气化技术, 其中固定床式气化炉约占 90%, 普遍存在煤气化强度低、制气热值低和热效率低等问题. 东北大学国家环境保护生态工业重点实验室将煤的高温空气气化^[2-4]和高温贫氧燃烧技术^[5]相结合, 开发研制了一套煤高温空气气化-高温贫氧燃烧一体化实验系统^[6], 并申请了国家发明专利^[7]. 研究表明, 将煤高温空气气化技术和高温贫氧燃烧技术相结合, 可实现煤在高温条件下的高效气化和在贫氧条件下的清洁燃烧, 以及煤的气化装置与燃烧装置之间的热衔接, 系统热效率高达 75%. 文献[8]介绍了将该系统应用于加

热炉的模拟结果, 与直燃煤加热炉相比, 煤高温空气气化-高温贫氧燃烧一体化的系统热效率提高 1 倍以上, 单位产品燃耗降低近一半.

目前, 有关煤高温空气气化的实验研究不多, 在气化装置结构参数一定的条件下, 气化工艺参数(气化温度、空气预热温度、空气煤比、蒸汽煤比等)之间的匹配与最优值的确定尚不清楚, 有待利用实验方法进行研究. 鉴于此, 本研究采用自主开发的煤高温空气气化炉对煤固定床气化工艺特性进行研究, 旨在通过对高温气化剂下气化工艺参数对煤气化指标影响的研究, 掌握高温空气气化工艺参数优化运行区间, 为气化装置的大型化设计与优化运行提供指导.

2 实验

2.1 实验原料

实验原料为山西大同煤, 粒度为 13~26 mm, 其工业分析及元素分析成分见表 1.

表1 大同煤的工业分析和元素分析结果

Table 1 Proximate and ultimate analysis of Datong coal

Proximate analysis (% , ω)				Elemental analysis (% , ω)							Low heat value (kJ/kg)
Moisture	Ash	Volatile matter	Fixed carbon	C _{ad}	H _{ad}	O _{ad}	N _{ad}	S _{ad}	A _{ad}	W _{ad}	
4.48	13.65	29.34	52.53	68.93	4.18	7.22	0.94	0.6	13.65	4.48	27215

2.2 实验装置与方法

煤高温空气气化实验系统主要由煤气化炉、空气加热系统(鼓风机、转子流量计、空气加热器)、蒸汽发生系统(储水箱、蒸汽发生器、体重秤)、煤气净化系统(旋

风除尘器、冷凝器、过滤器)、检测及燃烧系统(煤气表、取样口、烧嘴)五部分组成, 如图 1 所示.

煤气化炉采用自行设计的固定床气化炉, 其内径为 200 mm, 炉膛净高为 2000 mm, 炉体内层为高铝耐火

收稿日期: 2008-06-13, 修回日期: 2008-08-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 90210028)

作者简介: 蔡九菊(1948-), 男, 辽宁省锦州市人, 博士, 教授, 热能工程专业, E-mail: rcjj@mail.neu.edu.cn; 王连勇, 通讯联系人, Tel: 13066650565, E-mail: wlyneu@126.com.

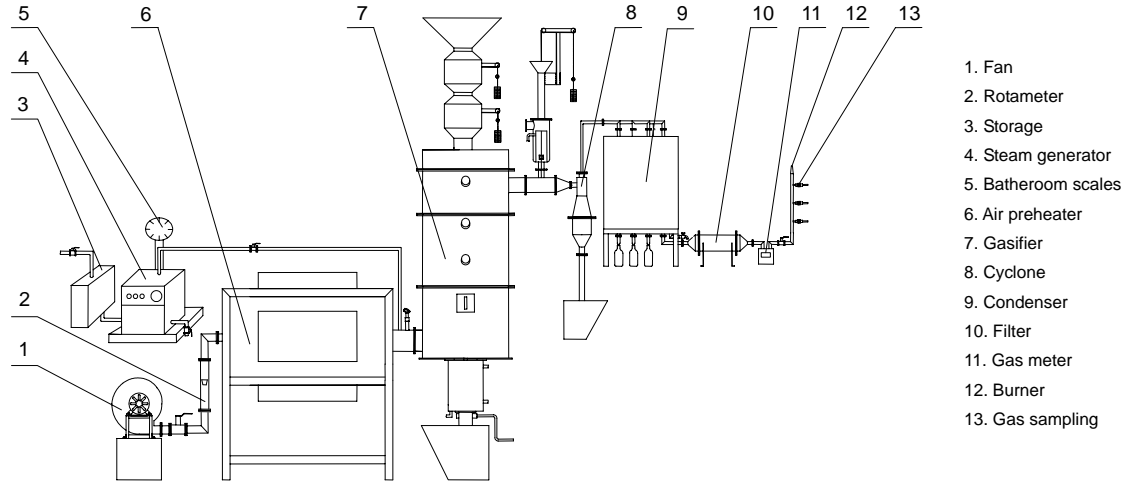


图 1 煤高温空气气化实验系统

Fig.1 Experimental system of high temperature air coal gasification

浇注料, 中层为轻质保温浇注料, 外层为硅钙板, 炉壳为 6 mm 厚钢板. 全炉设有气化剂进口、灰渣区、氧化区、还原区、干馏区、干燥区、空区及煤气出口 8 个测温点, 通过热电偶测量各点温度. 在距气化剂进口 700~1300 mm 间设 3 个窥视孔, 用于观察床层高度, 并兼作取样孔.

空气预热温度是影响气化指标的一重要因素, 空气预热温度的提高可明显改善煤气品质. 为获得稳定的实验工况并使空气预热温度调节灵活, 本实验采用自制的空气加热器预热空气. 而工程上采用此种外加热源或燃烧部分煤气的常规方法预热空气则是不经济的^[9-13]. 本工作所述高温空气气化工艺在工程上通过将煤高温空气气化与高温贫氧燃烧技术有机结合, 极限回收烟气余热来预热空气, 从而提高了整个系统的热效率^[14]. 实验中, 空气由杭州日通风机有限公司生产的 DG4A 型鼓风机提供, 其流量通过安装在风机进出口的调节蝶阀进行调节, 调节范围为 10~100 Nm³. 空气经转子流量计计量后, 进入空气加热器中进行加热, 加热后的高温空气与来自蒸汽发生系统的蒸汽作为气化剂进入气化炉. 空气加热器采用硅炭棒加热, 共有 3 个加热段, 其功率在 0~36 kW 范围内可调, 进而实现对空气预热温度的调节.

蒸汽发生系统中, 水由储水箱进入蒸汽发生器, 经电加热后产生饱和蒸汽, 蒸汽与高温空气混合进入气化炉. 蒸汽发生器型号为 KQ-C14 型, 由上海蒸源机电设备有限公司生产, 其产生的蒸汽温度和流量可调, 温度为 140 °C 时, 最大流量 25 kg/h. 蒸汽的流量通过体重秤称量蒸汽发生器的失重获得.

燃气净化系统主要除去煤气中的粉尘和焦油. 净

化后的煤气经煤气表计量后, 在取样口处由集气袋取样, 最后在系统尾部的烧嘴处燃烧. 其成分采用美国安捷伦公司的 Agilent 6890N 型气相色谱仪进行分析.

煤高温空气气化是一个复杂的物理化学过程, 除受气化炉本身结构参数和气化煤种的物理化学特性影响外, 还受各种工艺参数的影响, 其中包括空气量、空气温度、蒸汽量和给煤量, 通过改变空气、蒸汽和煤之间的比例及空气预热温度, 可以调节气化温度, 改变气化反应进程, 进而影响煤气成分、煤气热值、气化效率、碳转化率等气化指标. 实验研究了空气预热温度、气化温度、空气/煤比、蒸汽/煤比等主要工艺参数对固定床的影响规律. 实验中研究某一特定参数对气化指标的影响时, 其他不受其影响的工艺参数均保持不变. 实验条件为: 料层高度 1850 mm, 煤样粒度 13~26 mm, 给煤量 8 kg/h, 空气预热温度 500~800 °C, 气化温度 900~1200 °C, 空气/煤比 1.36~1.91 Nm³/kg, 蒸汽/煤比 0.10~0.40 kg/kg.

3 实验结果与分析

3.1 空气预热温度的影响

空气预热温度对空气/煤比和气化指标的影响如图 2 所示. 由图 2(a)可见, 随着空气预热温度的提高, 空气/煤比下降, 由 500 °C 时的 1.91 Nm³/kg 下降到 800 °C 时的 1.46 Nm³/kg. 由图 2(b)可见, 空气预热温度从 500 °C 增加到 800 °C 时, 煤气中 CO 和 H₂ 浓度分别从 24.52% 和 7.35% 增大到 29.18% 和 12.87%, CH₄ 浓度基本保持不变, N₂ 和 CO₂ 浓度分别从 60.95% 和 6.15% 减小到 53.42% 和 3.12%. 煤气热值则从 4438.4 kJ/Nm³ 增至

5882.1 kJ/Nm³, 提高 32.5%[图 2(c)]. 气化效率和碳转化率分别从 57.24%和 86.2%增至 70.7%和 91.7%[图 2(d)].

空气预热温度提高后空气/煤比下降、煤气质量提高的原因应是, 在保持气化温度不变的条件下, 随着空气预热温度的提高, 气化剂带入炉内的物理热增加, 从而减少了空气消耗量, 使空气/煤比下降, 但蒸汽分解率增加, 因而煤气中 H₂ 含量增加; 同时, 高温气化剂带入的物理热部分代替了煤的燃烧放热, 减少了煤燃烧部分在气化过程中的份额, 从而减少了煤气中不可燃成分 N₂ 和 CO₂ 的含量, 增加了可燃成分 CO 的含量. 因为气

化温度不变, 所以煤气中 CH₄ 浓度基本保持不变. 空气预热温度越高煤气热值越高. 随着空气预热温度的升高, 气化效率和碳转化率均增加. 因此, 随着空气预热温度的提高, 煤气化过程得到改善, 空气/煤比下降, 煤气质量提高, 气化效率增加. 与本实验系统的煤常温空气气化(煤气热值 4379 kJ/Nm³, 空气/煤比 2.4 Nm³/kg, 气化效率 54.2%)相比, 煤高温空气气化(气化剂温度为 800 °C 时)的煤气热值提高 34.3%, 空气/煤比降低 39.2%, 气化效率提高 19.5%. 由此可见, 高温空气气化是煤气化工艺的一个新突破.

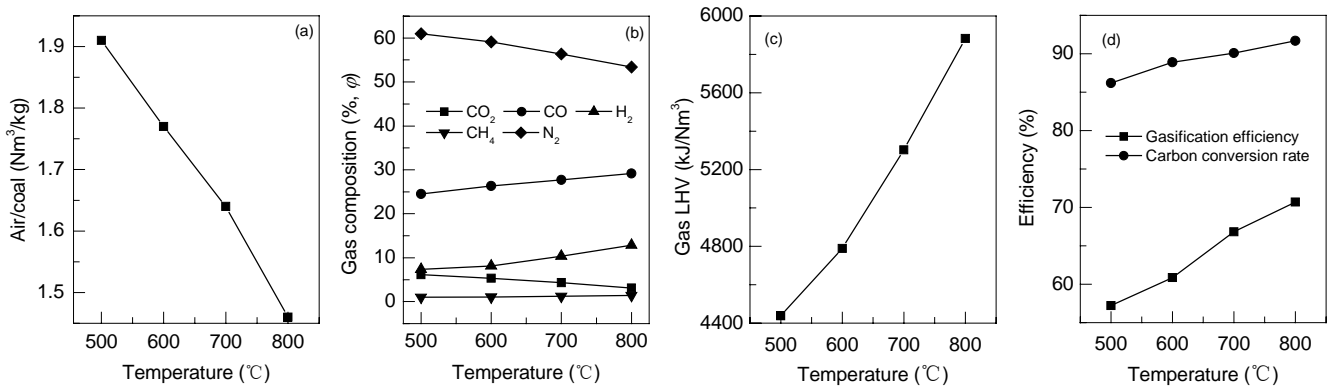


图 2 空气预热温度对空气/煤比、煤气成分、煤气热值及气化效率和碳转化率的影响

Fig.2 Effect of temperature of gasifying agent on air/coal ratio, gas composition, gas low heat value (LHV), gasification efficiency and carbon conversion rate (gasification temperature 1100 °C, and steam/coal 0.3 kg/kg)

3.2 气化温度的影响

气化温度对气化指标的影响如图 3 所示. 由于空气/煤比直接影响炉内燃烧程度, 进而改变气化温度, 因此, 实验中保持给煤量不变, 通过改变鼓风机进出口的调节蝶阀开度改变空气量, 实现对其调节. 空气/煤比在 1.48~1.85 Nm³/kg 范围内变化, 考察了气化温度对气化指标的影响. 从图 3(a)可见, 随着气化温度的升高, 煤气中 CH₄ 浓度略有下降, 由 900 °C 时的 2.29% 下降到 1200 °C 时的 1.35%; CO 浓度增加明显, 由 900 °C 时的 16.94% 增加到 1200 °C 时的 28.23%; H₂ 浓度先增加后减小, 由 900 °C 时的 10.76% 增加到 1100 °C 时的 14.72%, 之后又下降到 1200 °C 时的 11.42%; CO₂ 浓度先减小后增加, 变化不明显; N₂ 浓度增加, 由 900 °C 时的 53.51% 增加到 1200 °C 时的 64.53%. 这是因为常压固定床煤气化中 CH₄ 主要由煤中挥发分生成, 温度较高时 CH₄ 浓度下降主要是由于生成的 CH₄ 在高温下分解所致.

因高温有利于水煤气反应的进行, 所以随着气化温度的升高煤气中 CO 浓度增加. 同时, 温度升高, 蒸汽分解率增加, H₂ 浓度也有所增加, 但气化温度的增加是以增大空气/煤比、增加炉内燃烧反应程度实现的, 继续

提高床温后, 部分生成的 H₂ 与增加的空气中的 O₂ 发生燃烧反应而消耗. N₂ 浓度的增加则是在增加空气/煤比、提高气化温度的同时, 进入炉内的 N₂ 增多的缘故. CO₂ 浓度先减小后增加则是因为在气化温度较低时, 随着温度的升高焦炭与 CO₂ 反应增强, 消耗了部分 CO₂, 温度继续升高, 则入炉空气量加大, 增加了煤的燃烧反应程度, 从而使 CO₂ 浓度又略有增加.

气化温度对煤气热值的影响如图 3(b)所示. 显然, 对于煤气热值, 气化温度有一个最佳区域, 煤气热值最高点在 1100 °C 附近. 此后尽管气化温度增加, 煤气中 CO 浓度继续增加, 但 CH₄ 和 H₂ 的浓度却在下降, 同时 N₂ 浓度增加, 造成了煤气热值降低. 图 3(c)显示气化温度对气化效率和碳转化率的影响. 总体来看, 气化温度对煤气化反应十分重要, 提高气化温度对碳转化率有好处, 但对于煤气热值和气化效率有一最佳区间. 最适宜的气化温度应根据煤的性质, 如活性和灰熔点决定. 一般来说, 为确保炉内不结焦, 固态排渣气化炉的气化温度应低于灰熔点, 活性好的煤可适当降低气化温度, 这样对 CH₄ 的生成有利, 煤气热值较高.

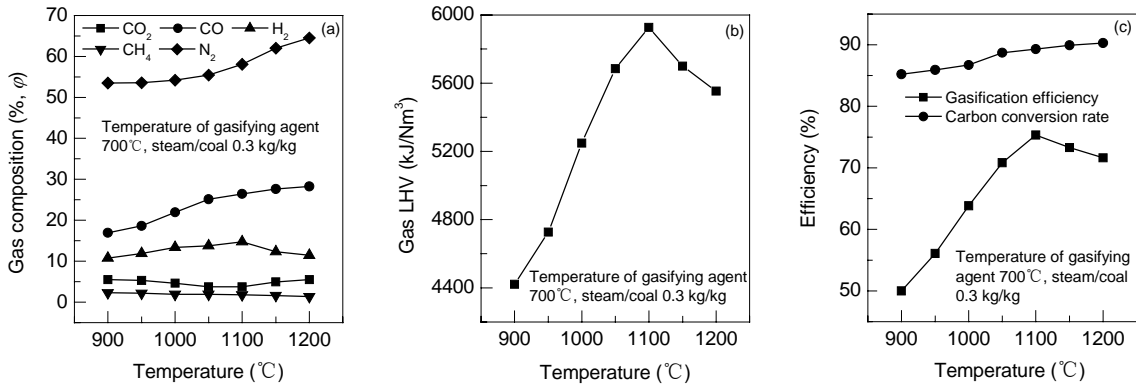


图 3 气化温度对煤气成分、煤气热值及气化效率和碳转化率的影响

Fig.3 Effect of gasification temperature on gas composition, gas low heat value, gasification efficiency and carbon conversion rate

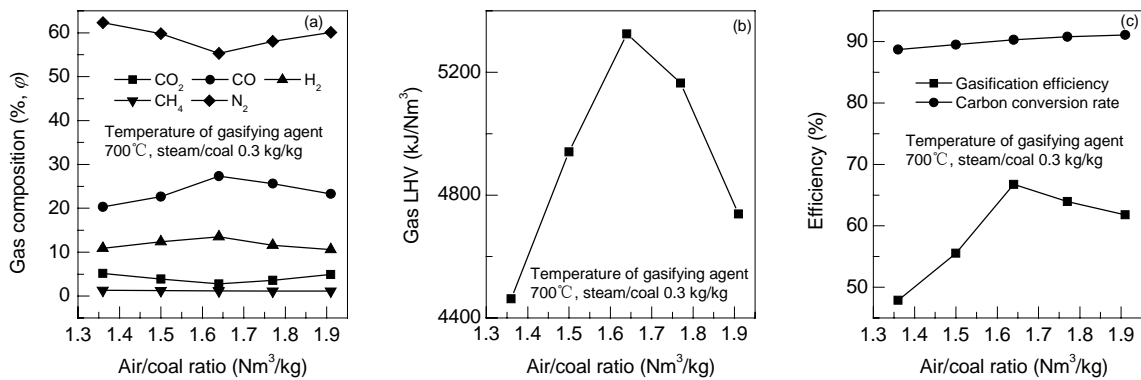


图 4 空气/煤比对煤气成分、煤气热值及气化效率和碳转化率的影响

Fig.4 Effect of air/coal ratio on gas composition, gas low heat value, gasification efficiency and carbon conversion rate

3.3 空气/煤比的影响

空气/煤比对气化指标的影响如图 4 所示. 改变空气/煤比会影响气化温度, 空气/煤比增加将导致气化温度上升. 图 4(a)表示空气/煤比对煤气成分的影响. 当空气/煤比较低时, 气化反应进行得不彻底, 煤气中 CO 和 H₂ 浓度较低, 而主要由煤中挥发分生成的 CH₄ 浓度较高. 空气/煤比在 1.36~1.64 范围内增加时, 炉内燃烧反应程度增强, 气化温度升高, 加快了 CO₂ 的还原反应和水蒸汽的分解反应, 因此煤气中 CO 和 H₂ 浓度增加, 分别由 19.18%和 10.21%增加到 27.31%和 13.48%; 继续增加空气/煤比至 1.91, 过量的空气与煤气中的可燃成分 CO, H₂ 及 CH₄ 发生燃烧反应, 导致 CO, H₂ 及 CH₄ 浓度都降低, 而 CO₂ 浓度增加, 由空气/煤比为 1.64 时的 2.73%增至 4.89%. CH₄ 浓度随空气/煤比增加持续降低的另一个原因是 CH₄ 在高温下自身分解所致.

图 4(b)和 4(c)分别表示空气/煤比对煤气热值、气化效率和碳转化率的影响. 由图可见, 随着空气/煤比的增加, 碳转化率增加, 但煤气热值和气化效率存在最佳区间, 在本实验的煤种和工况下, 优化的空气/煤比为

1.55~1.8 Nm³/kg.

3.4 蒸汽/煤比的影响

蒸汽/煤比对气化指标的影响如图 5 所示. 图 5(a)表明, 在一定范围内, 提高入炉蒸汽量可使煤气中 H₂ 浓度由 7.52%上升至 10.97%. 因为蒸汽量增加, 有利于气化反应中生成 H₂ 的水煤气反应的进行. 但加入的蒸汽过量, 会造成未分解的蒸汽带出气化炉的显热增加, 气化温度下降, 水蒸汽分解率降低, 当气化温度下降到一定程度后, 会影响气化反应, 导致煤气中 H₂ 浓度反而下降. 因在其他条件不变的情况下, 蒸汽量增加后气化温度下降, 因此 CO 浓度降低, 由 21.25%下降到 17.02%. CH₄ 浓度随着蒸汽/煤比的增加而略有增加则是因为气化温度的下降造成由挥发分生成的 CH₄ 自身分解减少, 同时, 炉内 H₂ 浓度的增加对 CH₄ 化反应有利. CO₂ 浓度先降低后升高是由于 CO 和 H₂ 浓度变化引起其浓度的相对变化.

图 5(b)和 5(c)分别表示蒸汽/煤比对煤气热值、气化效率和碳转化率的影响. 由图可见, 随着蒸汽/煤比的增加, 碳转化率减小, 这主要是因为随着入炉蒸汽量增加,

由未分解蒸汽带走的显热增加,使气化炉温度下降,直接影响到气化反应,使碳转化率降低.但煤气热值和气

化效率存在最佳区间,在本实验煤种和工况下,优化的蒸汽/煤比为 0.25~0.35 kg/kg.

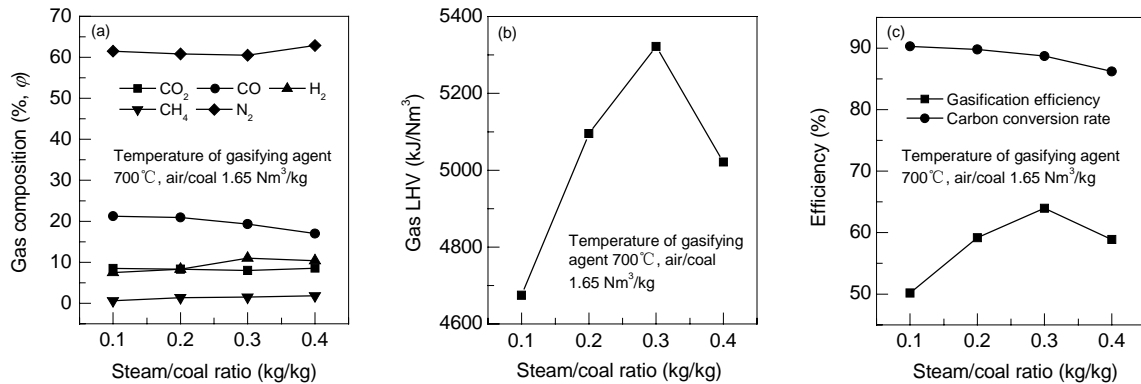


图5 蒸汽/煤比对煤气成分、煤气热值及气化效率和碳转化率的影响

Fig.5 Effect of steam/coal ratio on gas composition, gas low heat value, gasification efficiency and carbon conversion rate

4 结论

在自行设计的内径为 200 mm 的固定床气化炉上进行了煤高温空气气化工工艺实验,考察了空气预热温度、气化温度、空气/煤比和蒸汽/煤比等工艺参数对气化指标的影响,得到如下结论:

(1) 在保持气化温度不变的条件下,随着空气气化剂预热温度的提高,气化剂带入炉内的物理热增加,减少了煤燃烧部分在气化过程中的份额,降低了空气/煤比,从而减少了煤气中不可燃成分 N₂ 和 CO₂ 的含量,增加了可燃成分 CO 和 H₂ 的含量,使煤气热值、气化效率和碳转化率得以提高.因此,在工艺条件允许的范围内,空气预热温度越高对气化过程越有利.

(2) 气化温度对气化指标有较大影响.在其他条件不变时,通过改变空气/煤比、提高气化温度,煤气成分中 CO 浓度增加, H₂ 浓度先增加后减小, CH₄ 浓度减小, N₂ 浓度增加,因而煤气热值和气化效率均存在一个最佳区间.最适宜的气化温度应根据煤的性质,如活性和灰熔点决定.一般,对固态排渣气化炉,在低于灰熔点的前提下,尽可能提高气化温度.

(3) 空气/煤比和蒸汽/煤比对气化指标的影响本质上是通过改变气化温度来实现的.在一定范围内,增加空气/煤比,气化温度提高,有利于气化反应的进行,但空气/煤比过高,炉内煤的燃烧份额增加,煤气可燃组分减少,热值下降;适当增大蒸汽/煤比对提高煤气中 H₂ 和 CH₄ 的含量有利,但进一步增加蒸汽/煤比会造成床温下降, CO 浓度和碳转化率急剧下降,煤气热值反而降低.因此,空气/煤比和蒸汽/煤比均存在一个最佳操作区域.本实验条件下,优化的空气/煤比和蒸汽/煤比

分别为 1.55~1.8 Nm³/kg 和 0.25~0.35 kg/kg.

参考文献:

- [1] 魏一鸣, 范英, 韩智勇, 等. 中国能源报告(2006): 战略与政策研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2006. 5-15.
- [2] Kunio Y. Gasification and Power Generation from Solid Fuels Using High Temperature Air [A]. Hsiao T C, Kunio Y. Proceeding of High Temperature Air Combustion Symposium [C]. Beijing: The Federation of Engineering Societies of China Association for Science and Technology, 1999. 48-68.
- [3] Kobayashi H, Kawai K, Yoshikawa K. Gasification Power Generation System and Boiler Performance Using High Temperature Air [A]. Hsiao T C, Kunio Y. Proceeding of High Temperature Air Combustion Symposium [C]. Beijing: The Federation of Engineering Societies of China Association for Science and Technology, 1999. 90-100.
- [4] Kunio Y. R&D on Small-scale Gasification of Solid Fuels Using High Temperature Air and Stream [A]. Xu G W, Ikegami M, Honma S, et al. 3rd International Symposium on Advanced Energy Conversion System and Related Technologies [C]. Nagoya: Nagoya Institute of Technology, 2001. 15-17.
- [5] Gupta A K, Hasegawa T. High Temperature Air Combustion: Flame Characteristics, Challenges and Opportunities [A]. Hsiao T C, Kunio Y. Proceedings of Beijing Symposium on High Temperature Air Combustion [C]. Beijing: Engineering Institute of Chinese Science & Technology Association, 1999. 9-28.
- [6] 王连勇, 蔡九菊, 王爱华, 等. 煤高温空气气化和高温贫氧燃烧一体化系统开发 [J]. 中国冶金, 2007, 17(4): 51-54.
- [7] 蔡九菊, 王连勇, 王爱华. 煤高温气化高温贫氧燃烧一体化系统 [P]. 中国专利: ZL200610045665.X, 2008-05-07.
- [8] 蔡九菊, 田红, 王连勇, 等. 煤高温气化—高温贫氧燃烧一体化系统的研究与开发 [J]. 热能动力工程, 2007, 22(5): 512-516.
- [9] 汤健中. 煤的高温气化法 [P]. 中国专利: CN86105896A, 1988-03-23.
- [10] 秦世平. 高温空气-水蒸汽煤的气化 [J]. 煤气与热力, 1992, (4): 15-19.
- [11] 肖睿, 金保升, 周宏仓, 等. 气化剂预热温度对加压喷动流化床煤部分气化的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22):

- 109–113.
- [12] 蒋绍坚, 彭好义, 艾元方, 等. 固体燃料高温空气气化系统及关键技术 [J]. 煤气与热力, 2000, 20(4): 247–250.
- [13] 张灿, 杨伟锋, 岂斌, 等. 木屑高温空气气化实验研究 [J]. 能源工程, 2006, (6): 46–49.
- [14] 王连勇, 蔡九菊, 田红, 等. 煤高温空气气化高温贫氧燃烧一体化系统特性研究 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(Suppl.2): 117–120.

Experimental Investigation on High Temperature Air Coal Gasification

CAI Jiu-ju, WANG Lian-yong, LI Ming-jie, ZHAO Zi-zhong

(SEPA Key Laboratory on Eco-industry, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China)

Abstract: The high temperature air/steam as gasifying agent was applied in gasification of coal with a 200 mm internal diameter fixed bed gasifier. The effects of process parameters such as temperature of gasifying agent, gasification temperature, ratio of air to coal and ratio of steam to coal on gasification performance were studied. The experimental results indicated that the gas heat value increased 32.5% with the temperature of air from 500 °C to 800 °C. The increase in gasification temperature availed the gasification process, but its increase was limited by the melting point of ash in the condition of solid slag emission. The effects of ratio of air to coal and ratio of steam to coal on coal gasification performance were realized by changing the gasification temperature, and the two parameters had an optimum operating range for a certain fixed bed coal gasification process. In the experimental conditions, they should be controlled in the ranges from 1.55 to 1.8 Nm³/kg and from 0.25 to 0.35 kg/kg, respectively.

Key words: high temperature air gasification; fixed bed; process parameters