

高炉喷吹煤气的煤造气富氢试验

崔坤坤¹，李福民¹，吕庆¹，卢建光^{2,3}

(1. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063009; 2. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110004; 3. 河北钢铁集团邯郸公司, 河北 邯郸 056015)

摘要: 为克服高炉喷煤系统带来的一系列负面影响, 使高炉生产更加顺行和降低能耗, 提出了高炉喷煤新工艺, 即以富氢煤气代替煤粉从风口喷入高炉, 从而更高效节能的炼铁生产。主要研究不同气化剂对产出煤气成分的影响, 为造气炉实际生产提供参考依据。试验采用高温炉对煤样进行分阶段试验, 改变气化剂的配比, 收集气体并用红外线气体分析仪检测煤气成分。结果表明: 当气化剂为空气时, 煤气中的 CO 和 H₂ 浓度都较低; 气化剂中加 5% 的 H₂O 和 CO₂ 后, 煤气中还原性气体 (CO+H₂) 的浓度几乎达到最高, 煤气中 H₂ 浓度达到最大, 继续提高气化剂中 CO₂ 浓度, 煤气中 CO 浓度会继续升高, 煤气中 H₂ 浓度会逐渐降低; 提高气化剂中 H₂O 的含量后, 煤气中的 CO 和 H₂ 浓度都有所提高; 提高气化剂中的 O₂ 含量到 90%, 且 N₂ 含量降到 0%, 煤气中 CO 浓度会持续升高, CO₂ 浓度也有所提高, 但是煤气中 H₂ 浓度会逐渐下降。

关键词: 高炉喷吹; 煤造气; 气化剂; 煤气成分; 还原性气体

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2019.06.029

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2019) 06-0136-04

高炉喷煤是现代炼铁中的一项降低冶炼成本、增强竞争力的有效技术措施, 但在获取经济效益的同时也给高炉冶炼过程带来了许多负面问题^[1-3]。而且, 随着近几年高炉喷吹技术的进步, 我国无烟煤的含量越来越少, 从而满足高炉喷吹要求的煤种也就逐渐减少, 所以工艺改革刻不容缓。

煤炭是我国主要的能源资源之一, 预计在较长的时间内, 我国以煤为主的能源结构不会改变, 随着环境的日趋恶化, 煤炭的开发和加工利用是我国环境需要面对的主要问题之一。实现煤的清洁利用也是非常有必要, 煤的清洁利用有效途径即可用到煤气化^[4], 氢作为一种新型二次能源, 燃烧后生成水, 不产生环境污染物, 不排温室气体, 不会破坏球的物质循环, 被公认为 21 世纪的一种非常重要的洁净能源^[5], 氢气在制油、合成氨、氢燃气轮机发电、燃料电池、制甲醇、作为冶金煤气等工业生产中发挥着重要作用^[6]。目前, 工业上用氢的来源主要分为两大类, 一类为水分解制氢, 其中又细分为水电化学分解和水热化学分

解两种工艺; 一类是化石燃料转化制氢, 其中主要有天然气水蒸气重整制氢和煤气化两种工艺。煤气化制氢与水分解制氢相比在经济上有明显优势, 因为我国为煤炭大国, 所以与其他化石能源转化制氢相比在资源上有明显优势, 所以煤气化制氢在我国具有十分广阔的发展和应用前景^[7]。煤气化制氢实质是将煤中的 C 和 H 转化为合成气 (CO+H₂) 的过程, 然后再分离提纯制得氢气, 主要化学反应方程式为: $C + H_2O = H_2 + CO$, 煤气化制氢的核心工艺在于煤气化反应, 而煤气化工艺有多种, 按气化炉内煤料与气化剂的接触方式, 可分为固定床气化技术、流化床气化技术和气流床气化技术, 不同气化工艺具有各自的特点^[8]。

炼铁中高炉喷煤新工艺提出了运用煤气化原理, 在造气炉内将煤燃烧气化产生富氢煤气, 然后把煤气从高炉风口通入, 把煤的反应从高炉内部转移到外部, 解决了高炉由于喷煤所带来的许多问题, 使得高炉更好的顺行, 提高了生产效率, 造气炉所采用的煤气化技术可以为高炉提供 CO、

收稿日期: 2018-08-01; 改回日期: 2018-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (面上项目, 重点项目, 重大项目)

作者简介: 崔坤坤 (1993-), 男, 硕士, 研究方向为炼铁新工艺研究。

H₂等还原气体，从而降低了焦炭的用量，使煤的利用更加充分与合理。同时，煤气化技术也减少了煤在高炉的直接燃烧，减轻了高炉的除尘系统的负担，使得高炉所产生的CO₂和含硫化合物以及灰尘降低，减少了环境污染，符合我国的可持续发展政策，同时对于高效、高质量的煤气化技术是世界煤气化技术发展的主流思想。

从高炉的风口向内喷吹还原气体的新工艺，不仅可以简化操作，改善炉况，而且这样还可以调节煤气成分，实现“富氢”喷吹冶炼^[9]。煤气的调节有很多因素的限制，气化剂的配比是其中的一个重要因素，煤造气富氢技术需要加入混合气化剂，这是个十分复杂的体系，需要一定的理论分析和试验的结合，来找出气化剂对煤气成分的影响规律。目前许多学者对混合气化剂煤气化已经做了大量的研究^[10-21]，研究了煤气化时气化剂之间的相互影响，但煤种或造气炉等条件不同的情况下，气化剂对煤气成分的影响规律也略有不同，所以有必要对半固定床造气炉进行研究，研究气化剂对煤气质量影响的规律，为实际生产提供理论参考依据。

1 试验条件与方法

1.1 试验原料及设备

试验使用烟煤和无烟煤煤块作为配煤的原料，原料煤的工业分析和元素分析见表1，试验所用的烟煤和无烟煤配比分别为92.5%和7.5%，试样煤经过破碎之后，筛分成8~10 mm的均匀煤块；试验装置为电脑控制加热的高温炉，炉内反应器为Φ70 mm×5 mm×600 mm的封闭耐热钢管，上面设有加料装置、出气装置和加水蒸气装置，反应器底部铺垫直径为8 mm的刚玉球，铺垫高度200 mm，试验原料由上部加料口加入，每组试验料层厚度为200 mm，试验所用水蒸气由上部加水蒸气装置直接通入刚玉管，试验所用气体由转子流量计按照预定比例经过混气罐后从反应器底部通入；煤气从上部出气管排出，由集气袋收集煤气，然后把集气袋连接红外光谱气体分析仪检测其气体成分，记录每组参数所对应的数据。

表1 原料工业分析及元素分析

Table 1 Element analysis of biomass materials

名称	FCad	Aad	Vad	Std	发热量/(MJ·Kg ⁻¹)
烟煤	57.59	4.94	34.46	0.30	23.48
无烟煤	81.50	10.30	7.26	0.39	27.25

1.2 研究方案

高温炉按照计算机程序以10℃/min升温，升温期间持续通入氮气，达到预定温度，开始通入气化剂，反应时间，气化剂流量，气化剂配比见表2，反应稳定后，用集气袋收集气体，然后用红外光谱气体分析仪检测每组气体成分。

表2 气化剂配比与煤气各成分的关系

Table 2 The relationship between the ratio of gasification agent and the components in the gas

序号	气化剂/%				反应温度/℃	反应时间/min	气化剂流量/(L·min ⁻¹)
	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O			
1 [#]	21	74	0	0	1000	5	12
2 [#]	21	69	5	5	1000	5	12
3 [#]	21	64	10	5	1000	5	12
4 [#]	21	59	15	5	1000	5	12
5 [#]	21	71	5	3	1000	5	12
6 [#]	21	69	5	5	1000	5	12
7 [#]	21	67	5	7	1000	5	12
8 [#]	21	65	5	9	1000	5	12
9 [#]	21	69	5	5	1000	5	12
10 [#]	31	59	5	5	1000	5	12
11 [#]	41	49	5	5	1000	5	12
12 [#]	51	39	5	5	1000	5	12
13 [#]	61	29	5	5	1000	5	12
14 [#]	71	19	5	5	1000	5	12
15 [#]	81	9	5	5	1000	5	12
16 [#]	90	0	5	5	1000	5	12

注：1[#]空气作气化剂；2[#]~4[#]改变CO₂含量；5[#]~8[#]改变H₂O含量；9[#]~16[#]改变O₂含量。

2 试验结果分析

2.1 气化剂中CO₂含量与煤气各成分含量的关系

气化剂配比与煤气中各气体成分的关系见图1，当空气做气化剂，煤气中的CO和H₂含量均处在一个较低的水平，分别为28.85%和2.28%，增加了5%的CO₂和H₂O，煤气中的CO和H₂含量有了一个明显的提高，随着CO₂含量继续增加，煤气中的CO含量逐渐增多，即随着气化剂中CO₂含量增加，增加了气体中的O原子含量，有利于CO的生成，但是煤气中H₂被生成的CO稀释，煤气中H₂含量随气化剂中CO₂含量的增加而逐渐下降，当气化剂中CO₂和H₂O含量均在5%时，

煤气中 H_2 含量达到最大 17.01%，煤气中 $(CO+H_2O)$ 含量为 57.77%。

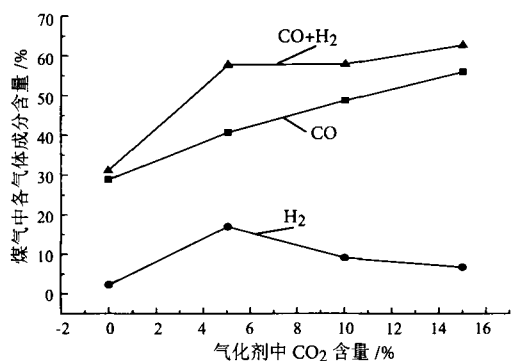


图 1 气化剂中 CO_2 含量与煤气各成分含量的关系

Fig. 1 The relationship between CO_2 content in the gasification agent and the components in the gas

2.2 气化剂中 H_2O 含量与煤气各成分含量的关系

煤气成分的变化与气化剂中水蒸气含量的关系见图 2，随着气化剂中 H_2O 含量的增加，煤气中 CO 和 H_2 浓度也在不断增加，分别由 5# 的 40.52% 和 13.82% 增加到 8# 的 49.07% 和 25.0%，煤气中的 $(CO+H_2)$ 含量由 54.34% 增加到了 74.07%。 CO_2 浓度由 5# 的 4.56% 下降到了 8# 的 0.34%。因此提高气化剂中 H_2O 的含量有利于煤气中还原气体组分浓度增加， CO 和 H_2 均呈上升趋势，但是在实际造气炉生产中加入过量的 H_2O 会带走大量的热量，所以不能作为大量提高含氢量的手段，所以加入多少的 H_2O 还得通过后续的试验进行研究。

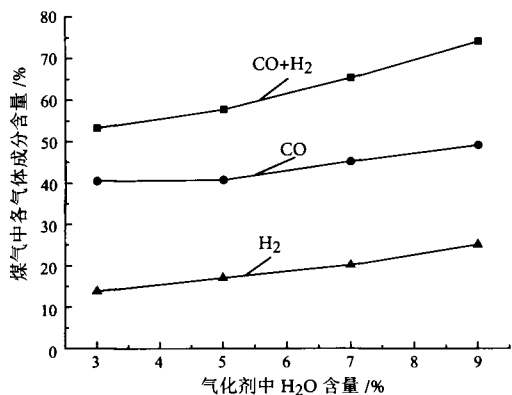


图 2 气化剂中 H_2O 含量与煤气各成分的关系

Fig. 2 The relationship between H_2O content in the gasification agent and the components in the gas

2.3 气化剂中 O_2 含量与煤气各成分含量的关系

煤气成分的变化随气化剂中 O_2 含量的变化见图 3，随着气化剂中氧气浓度的升高，煤气中 CO 有所增加，由 40.76% 增加到 90.66%，同时，随着

气化剂中 O_2 的增加，煤气中的 H_2 含量在逐渐下降，由 17.01% 下降到 2.64%。煤气中的 $(CO+H_2O)$ 含量随着气化剂中 O_2 含量的增加逐渐增加，由最初的 57.77% 增加到 93.30%。增加气化剂中氧气的浓度，这时，惰性成分的浓度相对下降，碳的氧化反应加剧，炉温随之上升，使气化反应速度加快，生成的 CO 就会越多，相对的， H_2 的浓度被稀释，百分比含量逐渐下降。因此提高气化剂中的 O_2 成分有助于提高煤气中还原气体的浓度，但是，煤气中 H_2 的浓度会降低，要求喷吹煤气中氢含量在 $>10\%$ ，所以气化剂中加入的 O_2 不易过高。

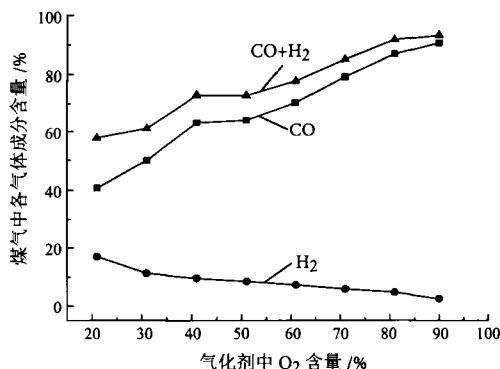


图 3 气化剂中 O_2 含量与煤气各成分含量的关系

Fig. 3 The relationship between O_2 content in the gasification agent and the components in the gas

3 结 论

(1) 空气做气化剂，煤气中的 CO 和 H_2 含量均处在一个较低的水平，分别为 28.85% 和 2.28%，在此基础上加 5% 的 H_2O 和 CO_2 时，煤气质量几乎达到较佳，煤气中还原气体组分 $(CO+H_2)$ 含量为 57.77%，煤气中 H_2 含量达到最大 17.01%；提高气化剂中 H_2O 的含量，煤气中的 CO 和 H_2 浓度均会提高。

(2) 提高气化剂中 O_2 的含量，煤气中的 CO 浓度会升高，煤气中 H_2 的浓度会逐渐降低，煤气中还原气体组分浓度在持续增加；持续提高气化剂中的 O_2 含量直至 90%， N_2 含量降为 0% 时，煤气中 CO 浓度能达到 90.66%，煤气中 H_2 的浓度会逐渐降低到 2.64%，煤气中还原气体组分 $(CO+H_2)$ 浓度增加到 93.30%。

(3) 在此试验条件下，选择 10# 气化剂配比，得到的煤气成分 CO ， H_2 分别为 49.83%，11.31%，比较适用于高炉所需的煤气配比。

参考文献:

- [1] 唐文权,于兴久,王艳民.高炉喷煤的经济效益和工艺变革[J].中国冶金,2005(1):30-33.
- [2] 徐万仁,吴铿,朱仁良,等.提高喷煤量对高炉风口焦性状的的影响[J].钢铁,2005(2):11-14.
- [3] Ishii K. Advanced Pulverized Coal Injection Technology and Blast Furnace Operation[M].Tokyo: Elsevier, Science Ltd.,2000.
- [4] 刘斌,甘涛,曹栋,等.Aspen Plus 应用于煤气化的模拟研究[J].山东化工,2017,46(5):109-111+114.]
- [5] 徐振刚,王东飞,宇黎亮.煤气化制氢技术在我国的发展[J].煤,2001(4):3-6.
- [6] 许世森,程健.煤气化制氢及氢能发电试验系统[J].中国电力,2007(3):9-13.
- [7] 徐振刚,吴春来.煤气化制氢技术[J].低温与特气,2000(6):28-31.
- [8] 杨小彦,陈刚,殷海龙,等.不同原料制氢工艺技术方案分析及探讨[J].煤化工,2017,45(6):40-43.
- [9] 吕庆,李福民,李秀兵,等.高炉喷吹煤气后固体炉料的还原与变化[J].钢铁,2008(1):17-21.
- [10] 雷鸣,黄星智,王春波.O₂/CO₂气氛下CO₂和H₂O气化反应对煤及煤焦燃烧特性的影响[J].燃料化学学报,2015,43(12):1420-1426.
- [11] 雷鸣,黄星智,王春波.O₂/CO₂气氛下CO₂和H₂O气化反应对煤及煤焦燃烧特性的影响[J].燃料化学学报,2015,43(12):1420-1426.
- [12] 姜中孝,段伦博,陈晓平.水蒸气对O₂/CO₂气氛下煤焦燃烧特性的影响[J].煤炭学报,2013,38(3):466-472.
- [13] 白永辉,朱文坚,左永飞,等.煤焦水蒸气与CO₂共气化技术研究进展及应用展望[J].煤化工,2013,41(1):13-15+18.
- [14] 雷鸣,王春波,黄星智.CO₂气化反应对O₂/CO₂气氛中煤焦燃烧特性影响[J].煤炭学报,2015,40(S2):511-516.
- [15] 范冬梅,朱治平,那永洁,等.一种褐煤煤焦水蒸气和CO₂气化活性的对比研究[J].煤炭学报,2013,38(4):681-687.
- [16] 范冬梅,朱治平,吕清刚.神木煤焦与CO₂和水蒸气反应后期动力学特性[J].煤炭学报,2013,38(7):1265-1270.
- [17] 张云.CO₂/H₂O及其混合气氛对煤焦气化特性影响的试验研究[D].武汉:华中科技大学,2016.
- [18] 王静.煤焦与H₂O/CO₂气化反应性的研究[D].武汉:华中科技大学,2012.
- [19] 陈超.CO₂和H₂O混合气氛条件下煤焦气化机理及数值模拟研究[D].华中科技大学,2013.
- [20] 杨帆,周志杰,王辅臣,等.神府煤焦与水蒸气、CO₂气化反应特性研究[J].燃料化学学报,2007(6):660-666.
- [21] 白永辉.CO₂作为气化剂对煤焦-H₂O气化反应的影响机制[D].太原:太原理工大学,2014.

Experimental Study on Hydrogen-rich Coal Gasification of Gas-injection BF Process

Cui Kunkun¹, Li Fumin¹, Lv Qing¹, Lu Jianguang^{2,3}

(1. College of Metallurgy and Engineering; North China University of Science and Engineering and Technology, Tangshan, Hebei, China; 2. College of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, Liaoning, China; 3. Hebei Iron and Steel Group Co., Handan, Hebei, China)

Abstract: In order to overcome a series of negative impacts brought by coal injection in blast furnace, and to make blast furnace production more efficient, energy-saving and environmentally friendly, we have proposed a new process for the injection of coal from blast furnaces to produce hydrogen-enriched gas from the gas generator and then injected it into the blast furnace from the tuyere, instead of blast furnace coal injection. This paper mainly studies the influence of gasification agent selection of gasification furnace on gas composition, and find out the influence rule, and provide reference for actual production. The results show that when air is used as a gasification agent, the concentrations of CO and H₂ in the gas are at a relatively low level; On this basis, when adding more 5% of H₂O and CO₂ to the gasification agent, the concentration of the reducing gas (CO+H₂) in the coal gas reaches almost the highest value. At this time, the concentration of H₂ in the gas reaches the maximum, and when the concentration of CO₂ in the gasifying agent is further increased, the concentration of CO in the gas is increased, but the concentration of H₂ in the gas will gradually decrease; After increasing the content of H₂O in the gasification agent, the concentrations of CO and H₂ in the gas will increase; Increasing the O₂ content in the gasification agent to 90%, decreasing the N₂ concentration to 0%, and then the CO and CO₂ concentration in the coal gas will increase, but the H₂ concentration in the gas will gradually decrease.

Keywords: Blast furnace injection; Coal manufacturing gas; Gasification agent; Gas composition; Reducing gas