高炉喷吹焦炉煤气进展[*1]

王瑞军

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 焦炉煤气是一种高氢含量能源气,高炉喷吹焦炉煤气具有为高炉提供优质还原剂,提高煤气能量利用率和价值,以及减少高炉炼铁 CO_2 排放等特点。文章就国内外高炉喷吹焦炉煤气的的研究成果和发展进行了总结,为高炉喷吹焦炉煤气提供依据。

关键词: 高炉; 焦炉煤气; 富氢还原

中图分类号: TF53 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009 - 5438(2019)01 - 0032 - 05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.01.009

Progress of Coke Oven Gas for Injection of Blast Furnace

Wang Rui - jun

(*Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The coke oven gas is a kind of energy gas with the high hydrogen content. The coke oven gas for injection of blast furnace is with such characteristics as providing the high quality reductant for blast furnace, improving the use ratio and value of gas energy and reducing the emission of CO_2 in blast furnace iron making. In the paper, its research achievements and progress at home and abroad are summarized, which could provide the basis of it.

Key words: blast furnace; coke oven gas; hydrogen - enriching reduction

钢铁工业是国民经济发展的基础性产业,同时也是技术、资金、资源及能源密集型产业。随着现代化进程的加快,我国钢铁工业得到了突飞猛进的发展,粗钢产量自 1996 年连续位居世界首位,为国民经济的持续高速发展做出了巨大贡献。然而,钢铁产量的高速增长必然会造成资源和能源的大量消耗,并对环境造成严重的污染,其中又以 CO_2 排放问题最为突出。钢铁工业是 CO_2 排放的主要行业之一,占工业部门 CO_2 排放量的 15%,占全球 CO_2 排放量的 8%,钢铁企业要实现可持续发展,必须减少 CO_2 的排放量。

钢铁生产的流程主要为高炉—转炉和废钢/DRI—电炉两种流程,高炉—转炉流程产钢量约占世界产钢量的 70%。而在中国,高炉—转炉流程产钢量占中国产钢量的 90%。作为以碳冶金为本质的钢铁行业,高炉炼铁的 CO_2 排放量约占整个钢铁生产 CO_2 排放量的 70%。因此高炉炼铁是钢铁工业 CO_2 减排的核心,高炉炼铁的 CO_2 减排是炼铁行业发展的主要方向。

随着高炉冶炼技术的不断发展,诸如采用精料处理、高温热风、富氧喷煤、高顶压操作、合理布料等新技术,传统高炉炼铁操作的研发已发展到相当的高度,工艺已趋于成熟,碳消耗与碳排放已接近常规高炉炼铁操作的极限,仅仅依靠现有技术进一步降

* 收稿日期: 2018 - 12 - 17

作者简介: 王瑞军(1972 -),男,内蒙古丰镇市人,正高级工程师,现从事期刊编辑工作。

低能耗、减少 CO_2 排放的效果极其有限。因此，相关国家和组织制定了钢铁工业应对 CO_2 减排的研究计划，通过突破性的炼铁技术实现高炉的低碳操作和生产的超高效率化，即“低碳高炉炼铁技术”。如欧盟启动了“超低 CO_2 制钢”(ULCOS)计划，日本拟定了低碳排放工业技术路线图及“冷地球 50”(COURSE50)[1]。

中国工程院前院长徐匡迪院士在 2009 年第七届中国钢铁年会上指出“中国钢铁业急需及早制定 CO_2 减排路线图，并进行相关的低碳炼铁技术研究；在钢铁工业设备达到役期时(2020—2030 年)，首先考虑高炉炉顶煤气循环及高炉喷吹焦炉煤气，从而减低碳排放。”。《钢铁产业调整和振兴规划》也提出“力争在关键工艺技术、节能减排技术等方面取得新突破”。特别是中国政府在 2010 年 3 月正式批准了《哥本哈根协议》，中国承诺“争取到 2020 年中国单位 GDP 的 CO_2 排放比 2005 年下降 40%～45%，非化石能源占一次性能源消费比重达到 15%左右”。作为十大支柱之一的钢铁产业，碳排放已达到全国总排放的 15%左右。因此，中国钢铁工业面临着节能减排的空前压力[2]。

高炉富氢介质喷吹工艺是将干净焦炉煤气、天然气等氢含量较高的介质利用类似于喷煤的喷吹设施，以一定的温度通过各个支管喷入高炉，参与炉内的还原反应。富氢介质用于高炉喷吹具有如下特点：(1)温度低于 810 ℃时，H_2 的还原能力弱于 CO，相同温度下还原出铁需要的 H_2 浓度比 CO 高，温度高于 810 ℃时，H_2 的还原能力强于 CO，相同温度下还原出铁需要的 H_2 浓度比 CO 低，富氢还原更具优势；(2) H_2 的还原产物 H_2O 比 CO 的还原产物 CO_2 稳定，而且 H_2O 是清洁资源，可有效减少高炉 CO_2 的排放；(3) H_2 的导热系数远大于 CO 的导热系数，采取富氢还原传热速度更快，加速气固间对流换热，使还原反应进行得更快；(4) H_2 和 H_2O 的分子尺寸远小于 CO 和 CO_2 分子尺寸，反应物和反应产物更容易在铁矿石孔隙内扩散至反应界面或离开反应界面，H_2 还原铁氧化物比 CO 还原更具有动力学优势[3]。

焦炉煤气是炼焦的最主要副产品。生产 1 t 焦炭可产生约 420 m^3 焦炉煤气。焦炉煤气是高氢优质资源，主要成分是氢气，占比达 60%，其次是甲烷，高达 27%，同时含有 CO、CO_2、N_2 以及少量烷烃类气体。焦炉煤气也是高热值气体。在工业生产中，焦炉煤气广泛应用于发电、加热、制氢、制取甲醇、直接还原铁、高炉喷吹等领域。相关研究表明，焦炉煤气利用的最佳途径是用于高炉喷吹，然后是用于生产直接还原铁，其它依次为生产甲醇、PSA 制氢、发电、加热燃烧。

高炉喷吹焦炉煤气工艺的主要特点[4]。(1)提供给高炉更好的还原剂。焦炉煤气中的 H_2 和反应生成的 H_2，与碳和 CO 比较，H_2 被认为是优质还原剂，具有还原速度快、消耗热量少等优点，有利于提高高炉生产效率和改进高炉顺行。(2)还原产物环保。焦炉煤气中的 H_2 的还原产物是 H_2O，实现了入炉碳含量的减少和最终高炉 CO_2 排放量的降低。(3)焦炉煤气的价值提高，能量利用率改善。(4)喷吹工艺简便，技术成熟。

1　世界高炉喷吹焦炉煤气技术的研究进展

炼铁工作者早已认识到将焦炉煤气用于高炉的价值。高炉喷吹焦炉煤气已在不同的国家，不同的时期，开展了有不同程度的应用实践，并均取得良好结果[5]。

1.1　前苏联

据文献报道，早在 20 世纪 80 年代初，前苏联已在多座高炉上完成了喷吹焦炉煤气的试验研究，掌握了 1.8～2.2 m^3 焦炉煤气替代 1 m^3 天然气的冶炼技术。

1980—1981 年前苏联马凯耶沃钢铁公司 4#和 5#高炉进行了长期喷吹焦炉煤气试验，喷吹量分别达到 187 m^3/t 和 227 m^3/t。焦炉煤气替换天然气的比例是 1.9∶1.0。喷吹焦炉煤气后，高炉直接还原度降低，炉顶煤气温度也降低了。高炉实际产量增长 7%，焦比降低 11 kg/t。考虑到变化因素的影响，实际节焦 8 kg/t，产量增加 3%。

在 1983 年，马凯耶沃公司根据煤气供应量和设备状况，所有高炉(除 2#炉外)进行喷吹焦炉煤气。1#高炉在用 245 m^3/t 焦炉煤气代替 100 m^3/t 天然气时，实际焦比降低 22 kg/t。5#高炉在用 243 m^3/t 焦炉煤气代替 100 m^3/t 天然气时，实际焦比降低 12 kg/t。高炉产量分别增加 2.8%和 9.9%。焦比降低决定于煤气化学能和热能利用的改善；在 2 座高炉上直接还原度和炉顶温度显著降低，分别降低 2.3%～7.1%和 29～44 ℃。

1988 年，该公司 2 座高炉固定喷吹焦炉煤气，

喷吹量为95 m^3/t铁，并计划1995年全部高炉喷吹焦炉煤气(250～300 m^3/t铁)。

1.2 美国钢铁公司

美国钢铁公司MON VALLEY厂的2座高炉(工作容积1 598 m^3和1 381m^3)自1994年起一直喷吹焦炉煤气。2005年的喷吹总量为14.16万t，吨铁喷吹量约65 kg(约150 Nm^3)。该厂曾报道喷吹焦炉煤气后，降低了天然气喷吹量，消除了焦炉煤气的放散燃烧，减少了能源成本，年节省开支超过610万美元。

1.3 法国索尔梅厂

法国索尔梅厂2#高炉曾于20世纪80年代中期开始喷吹自产焦炉煤气，把经过脱焦油和脱萘处理的焦炉煤气通过一套压气装置送达高炉风口进行喷吹。所喷焦炉煤气的H_2质量分数为60%～62%，CH_4质量分数为24%～26%，CO质量分数为5.8%～6.2%。焦炉煤气管网压力为49 000 Pa，送至铁厂后再加压，使之大于热风压力。焦炉煤气经压缩机后温度为42 ℃。法国索尔梅厂2#高炉喷吹焦炉煤气喷吹量达21 000 m^3/h。喷吹的焦炉煤气与焦炭的置换比为0.9 kg/kg。

1.4 奥钢联LINZ厂

奥钢联林茨厂从2002年第二季度开始，在5#和6#高炉(炉缸直径8 m)成功喷吹焦炉煤气。每个风口设双枪喷吹焦炉煤气，喷吹量达50 kg/t(12 500 m^3/h)，在喷吹焦炉煤气的同时，喷吹重油20 kg/t。表1为奥钢联LINZ厂高炉喷吹焦炉煤气4个阶段生产指标。

表1 奥钢联高炉操作数据

序号	热风 /($m^3 \cdot h^{-1}$)	氧量 /($m^3 \cdot h^{-1}$)	焦比 /($kg \cdot t^{-1}$)	油比 ($kg \cdot t^{-1}$)	焦炉煤气量 /($m^3 \cdot h^{-1}$)	炉腹煤气量 /($m^3 \cdot h^{-1}$)	理论燃烧温度/℃	炉顶煤气热值 /($Wh \cdot m^{-3}$)	[S] /%	日产量 /t	η_{CO_2} /%
1	91 000	7 000	425	70		135 000	2 400	1 075	0.08	2 300	44
2	91 000	7 000	435		12 500	143 000	2 200	1125	0.05	2 300	44
3	86 000	7 000	450	40	6 000	130 000	2 350	1 125	0.07	2 200	42
4	86 000	6 800	425	15	12 500	133 000	2 250	1 100	0.06	2 400	45

2 我国高炉喷吹焦炉煤气的研究

早在20世纪60年代本钢就进行了高炉喷吹焦炉煤气试验。在当时的喷吹条件下，高炉产量提高了10.8%，焦比降了3%～10%，炉温稳定，崩悬料大幅降低，炉况顺行程度好转。1964年12月，鞍钢炼铁厂结合本钢高炉喷吹焦炉煤气的经验，在9#高炉进行了焦炉煤气喷吹试验，每喷吹1 m^3焦炉煤气，可节约焦炭0.6～0.7 kg，高炉冶炼过程得到了改善，促进了炉况顺行[6]。

高建军等通过建立数学模型的方式研究了高炉富氧喷吹焦炉煤气对CO_2减排规律和理论燃烧温度的影响。结果表明，高炉富氧喷吹焦炉煤气，焦炉煤气喷吹量每增加50 m^3，可减少炼铁工序CO_2排放量约5%，同时风口理论燃烧温度降低约35 ℃[7]。

饶昌润等基于高温区的物料平衡和热量平衡理论对武钢7#高炉喷吹焦炉煤气的降焦效果、极限喷吹量以及对焦炭的置换比进行了数值计算。结果表明，高炉喷吹焦炉煤气能够显著降低焦比；当焦炉煤气的喷吹温度为25 ℃时，焦炉煤气的极限喷吹量为506.42 m^3/t，对焦炭的置换比为0.32 kg/m^3；当焦炉煤气的喷吹温度为950 ℃时，焦炉煤气的极限喷吹量为585.40 m^3/t，对焦炭的置换比为0.42 kg/m^3[8]。

李昊堃等对高炉喷吹焦炉煤气的热平衡规律进行了模拟计算，计算过程中同时考虑了焦炉煤气替代燃料的种类和焦炉煤气的置换比两个方面。结果表明，当焦炉煤气替换焦炭时，每喷吹1 m^3焦炉煤气，理论燃烧温度下降2.4～2.6 ℃，炉腹煤气量增加0.46～0.97 m^3，炉腹煤气中还原气含量增加0.045%；当焦炉煤气替换煤粉时，每喷吹1 m^3焦炉煤气，理论燃烧温度下降1.3～1.5 ℃，炉腹煤气量增加0.41～0.87 m^3，炉腹煤气中还原气含量增加0.034%[9]。

陈永星等对高炉富氧喷吹焦炉煤气后炉料的还原情况以及碳排放规律进行了研究。结果表明，喷吹焦炉煤气改善了高炉内部铁氧化物的还原环境，促进了间接还原，直接还原度和焦比均降低，炉顶煤

气热值升高，CO_2 净排放量减少[10]。

唐钰、储满生等基于梅钢 2# 高炉生产操作参数和原燃料条件，通过数值模拟研究了不同焦炉煤气喷吹量对理论燃烧温度、炉腹煤气量、炉腹煤气组成、回旋区形状、回旋区焦流量的影响。结果表明，在保持梅钢 2# 高炉现有操作不变的情况下，从风口喷吹焦炉煤气，回旋区温度降低，炉腹煤气流量增加。为了保持良好的炉缸热状态和维持稳定的风口回旋区条件，需增大富氧对回旋区进行热补偿；热补偿后，当焦炉煤气喷吹量为 50 m^3/t 时，富氧率为 9.98%，炉腹煤气中总还原气量为 55.29%，回旋区体积为 0.78 m^3，焦炭流量为 17.547 kg/s。每增加 1 m^3/t的焦炉煤气喷吹量，富氧率增加 0.11%，总还原气量增加 0.16%，回旋区体积增大 0.002 2 m^3，焦炭流量增大 0.036 6 kg/s，理论燃烧温度降低 4.17 ℃，炉腹煤气量增大 5.64 m^3/min[11]。

郭同来、柳政根、储满生基于质量平衡和热量平衡理论，通过建立高炉喷吹焦炉煤气风口回旋区数学模型，系统研究了焦炉煤气喷吹量对回旋区焦炭质量流量、理论燃烧温度、炉腹煤气量、炉腹煤气组成和回旋区形状的影响。研究表明：在维持高炉现有的基准操作不变的条件下，随着焦炉煤气喷吹量的增加，理论燃烧温度呈降低的趋势，而炉腹煤气量呈增加的趋势；为了维持理论燃烧温度和炉腹煤气量与基准操作一致，可通过降低风量和提高富氧率进行热补偿。热补偿后，随着焦炉煤气喷吹量的增加，焦炭质量流量呈上升趋势，炉腹煤气中还原气体积呈增加趋势，回旋区体积呈缩小趋势。每增加 1 m^3/s的焦炉煤气喷吹量，理论燃烧温度约降低 33.42 ℃，炉腹煤气量增加 77.32 m^3/min，焦炭质量流量上升 1.74%，炉腹煤气中还原气体积增加 2.04%，回旋区体积缩小 1.98%[12]。

承钢 2010 年在 6# 高炉进行了喷吹焦炉煤气试验。利用炼钢连铸 2 台备用煤气压缩机加压后通过管路送至高炉喷吹。送风吹管采用双枪吹管，一支用于喷吹煤粉，一支用于喷吹焦炉煤气。喷吹焦炉煤气工作阶段性的进行了三次工业试验，效果并不是很理想，高炉燃料比呈现出不降反升的现象，虽影响高炉燃料比的因素较多，但是最明显的是铁损大幅升高，导致高炉燃料比大幅升高，喷吹焦炉煤气高炉指标见表 2[13]。

表 2　承钢 6# 高炉喷吹焦炉煤气试验指标

项目	煤比 /(kg·t^{-1})	焦比 /(kg·t^{-1})	焦丁比 /(kg·t^{-1})	固体燃料比 /(kg·t^{-1})	η_{CO_2} /%	入炉品位 /%	铁损 /%	风温 /℃	焦炉煤气量 /(m^3·h^{-1})
基准期	172	367	81	620	42.78	55.01	5.05	1 156	
试验 1 期	180	379	77	636	43.05	55.18	9.46	1 158	2 000
试验 2 期	180	396	70	646	41.80	55.12	9.34	1 159	4 000
试验 3 期	179	422	44	645	40.71	55.71	7.92	1 159	2 500

鞍钢鲅鱼圈厂区在 1 450 mm 冷轧、球团、中厚板等项目未投产前，5 500 mm 宽厚板产量为原设计能力的一半，这样造成气体燃料严重过剩。焦炉煤气放散严重，造成极大浪费，夏季焦炉煤气放散约 20 000 m^3/h，冬季放散约为 13 000 m^3/h，为节能减排，鞍钢决定对高炉喷吹焦炉煤气。焦炉煤气流量按 20 000 m^3/h 设计，对两座高炉(4 038 m^3) 进行喷吹，由焦炉煤气在压缩机站加压和高炉区域喷吹焦炉煤气组成。

鞍钢鲅鱼圈高炉喷吹焦炉煤气工艺简单、施工方便、技术安全可靠，能够充分发挥焦炉煤气中的 H_2 的价值，有很高的经济效益及节能减排功效。预计年经济效益约为 1 亿元，年减少 CO_2 排放量约为 65 万 t[14]。

3　结束语

焦炉煤气是一种高氢含量能源气，高炉喷吹焦炉煤气具有为高炉提供优质还原剂，提高煤气能量利用率和价值，以及减少高炉炼铁 CO_2 排放等特点。高炉喷吹焦炉煤气在国内外已有长期的工业研究和生产实践，工艺路线成熟可靠，技术上可行，吨铁喷吹量已达 100 ~ 200 m^3，与焦炭的置换比约为 0.4 ~ 0.7 kg/m^3。

参 考 文 献

[1] 李培静. 钢铁企业能耗分析评价与预测[D]. 沈阳: 东北大学,2012.

[2] 郭同来. 高炉喷吹焦炉煤气低碳炼铁新工艺基础研究[D]. 沈阳: 东北大学,2015.

[3] 方觉. 非高炉炼铁工艺与理论[M]. 北京: 冶金工业出版社,2002.

[4] 沙永志. 高炉喷吹焦炉煤气[A]. 第七届(2009)中国钢铁年会论文集[C]. 北京: 中国金属学会,2009.

[5] 胡俊鸽,周文涛,郭艳玲,等. 世界高炉喷吹焦炉煤气技术的研究进展[N]. 中国冶金报,2011-11-15(C02).

[6] 佚名. 鞍钢九高炉喷吹焦炉煤气[J]. 钢铁,1966,(3):64-65.

[7] 高建军,郭培民. 高炉富氧喷吹焦炉煤气对CO_2减排规律研究[J]. 钢铁钒钛,2010,31(3):1-5.

[8] 饶昌润,毕学工,田志兵,等. 高炉喷吹焦炉煤气降焦效果的数值分析[J]. 炼铁,2011,30(4):52-55.

[9] 李昊堃,刘克明,沙永志. 高炉喷吹焦炉煤气热平衡规律研究[J]. 钢铁钒钛,2011,32(1):1-5.

[10] 陈永星,王广伟,张建良,等. 高炉富氧喷吹焦炉煤气理论研究明[J]. 钢铁,2012,47(2):12-16.

[11] 唐钰,储满生,毕传光,等. 梅钢2#高炉喷吹焦炉煤气风口回旋区的数值模拟[A]. 第十一届中国钢铁年会论文集[C]. 北京: 中国金属学会,2017.

[12] 郭同来,柳政根,储满生. 高炉喷吹焦炉煤气风口回旋区的数学模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版),2012,33(7):987-991.

[13] 李永超,白国成,高欣波,等. 承钢6#高炉喷吹焦炉煤气试验浅析[A]. 2012年全国炼铁生产技术会议暨炼铁学术年会文集(下)[C]. 无锡: 中国金属学会,2012.

[14] 王月秋,赵冬云,刘颖. 鞍钢鲅鱼圈高炉喷吹焦炉煤气技术[A]. 第九届中国钢铁年会论文集[C]. 北京: 中国金属学会,2013.

(上接第27页)

少炉前和水渣设备故障对高炉出渣排铁工作的影响。

5 严格执行标准化作业

根据每日炉况的变化,制定当天合理的操作方针,设定具体的工艺操作参数的控制范围,统一四班高炉工长的操作思想,保证炉温、料批、碱度、气流的稳定。同时可指导高炉工长,细化操作,提高高炉工长的操作水平和特殊炉况的处理能力。避免了高炉工长误操作对高炉冶炼的影响,延长了高炉的稳定周期,保证高炉长期的稳定顺行。

6 结论

(1) 通过调整装料制度,适当抑制边缘,保持煤气流稳定并开放中心气流,同时配合上批重,解决了未燃煤粉多,料柱透气性恶化及风温低,实际鼓风速度降低,回旋区缩小,中心不易吹透,造成冶炼进程改变对高炉冶炼的影响,达到活跃炉缸的目的,为低风温高煤比提供条件,同时也能改善煤气利用降低燃料比,控制炉顶温度。

(2) 控制合适的炉温,相对较低的炉渣碱度,可改善渣铁流动性,保证炉缸活跃,增强高炉抗波动能力。

(3) 控制稳定合适的煤比、提高富氧量可有效的提高理论燃烧温度,可提高煤粉的置换比和燃烧效率,减少未燃煤粉数量。

(4) 提高炉顶压力,可降低炉内煤气流速,利于间接还原,提高煤气利用率,降低燃料消耗,同时稳定气流,降低高炉下部压差,利于高炉的长期稳定顺行。

(5) 通过加强原燃料质量管理,可改善高炉上部透气性,降低上部压差,减少未燃煤粉对炉况的影响。针对原燃料变化,可以提前做出应对方案,以有效的应对原燃料质量波动带来的影响,保证高炉长期稳定顺行。

参 考 文 献

[1] 周传典. 高炉炼铁生产技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社,2002.

[2] 王筱留. 高炉生产知识问答[M]. 北京: 冶金工业出版社,2011.