

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20190034

钢铁工业副产煤气资源化利用分析及案例

上官方钦¹, 干磊², 周继程¹, 郭玉华¹, 张春霞¹, 郇秀萍¹

(1. 钢铁研究总院先进钢铁流程及材料国家重点实验室, 北京 100081;
2. 江西理工大学冶金与化学工程学院, 江西 赣州 341000)

摘 要: 在钢铁产品的生产过程中,同时产生大量的副产煤气,即高炉煤气(BFG)、焦炉煤气(COG)和转炉煤气(LDG),在钢铁企业的能源平衡中占有十分重要的地位(约占全部二次能源产生总量的 70%)。目前钢铁企业副产煤气大多数是燃料化利用,而副产煤气高附加值利用的另一个方向是开发副产煤气中碳元素和氢元素(H₂、C_mH_n和 CO 等)价值,实现资源化利用。钢厂推进副产煤气资源化利用的核心是进行能量流(煤气流)的解析及其网络的优化,副产煤气资源化利用的主要途径有制取氢气、甲醇、液化天然气(LNG)、合成天然气(SNG)、压缩天然气(CNG)、合成氨、二甲醚、乙二醇、烯烃等化工产品。四川达钢焦炉煤气和转炉煤气制甲醇的案例研究表明,副产煤气资源化利用不仅能使钢铁企业的副产煤气资源得到高效利用,而且有显著的经济和环境效益。

关键词: 副产煤气; 能量流网络; 资源化利用; 功能拓展; 钢铁工业; 高附加值

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2019)07-0114-07

Analysis and case on material conversion utilization of by-product gases in steel industry

SHANGGUAN Fang-qin¹, GAN Lei², ZHOU Ji-cheng¹, GUO Yu-hua¹,
ZHANG Chun-xia¹, LI Xiu-ping¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Steel Processes and Products, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 2. School of Metallurgy and Chemical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: A large amount of by-product gases, i. e. COG, BFG and LDG, were produced during the steel manufacturing process. And the quantity of energy contained in the by-product gases accounts for about 70% of the total quantity of secondary energy in the steel plant. Thus, by-product gases play a very important role in energy balancing in the steel plant. At present, most of by-product gases are used as fuels in the steel plant. However, another high-added value utilization direction is to exploit the potential value of Carbon and Hydrogen, i. e. H₂, C_mH_n, CO, etc., and then to realize material conversion and resource utilization. However, analysis of energy flow (by-product gas flow) and optimization of its network are the core issues of material conversion utilization of by-product gases in steel plants. By this means, by-product gases can be used to produce many kinds of chemical products, such as hydrogen gas, methanol, LNG, SNG, CNG, ammonia, dimethyl ether, ethylene glycol, olefin, etc.. Based on the case study on methanol production by using COG and LDG as raw materials in Dazhou Steel, it is indicated that through material conversion utilization of by-product gases, not only by-product gases will be high efficiency utilized, but also obvious economic and environmental benefits will be brought into the steel plant.

Key words: by-product gas; material conversion; energy flow network; function extension; steel industry; high-added value utilization

钢铁工业是中国国民经济重要的基础制造业,改革开放 40 年来的高速发展对中国国民经济的发展起到了积极的支撑作用。殷瑞钰院士提出了钢铁

制造流程功能拓展的新理念,认为未来的钢铁生产应具有以下 3 个功能^[1-2]:钢铁产品制造功能;能源转换功能;废弃物处理消纳和再资源化功能。

1 节能技术在钢铁工业中的发展和使用

在钢铁制造流程功能拓展理念的引导下,许多节能技术在中国钢铁工业中得到了发展和广泛使用,比如 CDQ、TRT、CCPP、高炉煤气干法除尘、转炉煤气干法除尘、热送热装等,节能减排效果显著,2017 年与 2006 年相比,钢铁工业的吨钢综合能耗降低了约 11%,2017 年吨钢综合能耗为 571 kg(标准煤)^[3]。然而,一方面,由于粗钢产量增长过快,2017 年中国粗钢产量是 2006 年粗钢产量的 1.97 倍,2017 年粗钢产量达到 8.32 亿 t,约占当年世界粗钢产量的 49.11%,已连续 21 年居世界第一位;另一方面,由于电炉钢比低,仅为 10%左右,从而造成中国钢铁工业总能耗一直居高不下,中国钢铁工业总能耗约占全国总能耗 13%~14%^[4]。

在钢铁产品的生产过程中,消耗的煤炭资源约有 60%转化为高炉煤气(BFG)、焦炉煤气(COG)、转炉煤气(LDG)等副产煤气资源。在典型长流程

钢铁企业中,3种煤气总的资源量将达到 10 GJ(340 kg(标准煤))/t(钢),约占余热余能总量的 68%,占总能耗的 50%^[5-6],在钢铁企业的能源平衡中占有十分重要的地位。典型钢铁企业 BFG:COG:LDG(以标准煤量计)3种副产煤气回收量的比例关系约为 BFG:COG:LDG=6:3:1。但由于中国钢铁企业自产焦炭量仅占全国焦炭产量的 1/3,即多数钢铁企业是需要外购焦炭的,如唐钢外购焦炭 1/3,其 3种副产煤气回收量的比例关系大致为 BFG:COG:LDG=7:2:6:1^[7]。

目前,中国钢铁工业副产煤气的回收利用量已经较高,但总体利用方式单一,即副产煤气主要用于发电和作为燃料燃烧,主要是利用煤气的热值。然而,副产煤气的化学组分中还含有很大比例的碳元素和氢元素(H₂、C_mH_n和 CO等)见表 1,而这些元素是合成各种化工产品的关键原料。因此,对副产煤气的价值进行高效率利用的另一个方向是开发副产煤气中碳元素和氢元素的价值,使副产煤气进行物质转换,实现资源化利用。

表 1 钢厂 3 种副产煤气主要成分、发热值及回收量

Table 1 Main components, calorific values and recovery of by-product gases in steel plants

副产煤气	组成体积分数/(%)							发热值/ (kJ·m ⁻³)	单位产品煤气回收量/ (m ³ ·t ⁻¹)
	H ₂	CO	CO ₂	N ₂	O ₂	CH ₄	C _m H _n		
焦炉煤气	55~60	5~8	1.5~3.0	3~7	0.3~0.8	23~27	2~4	8 778~15 884	400~430
高炉煤气	1.5~3.0	23~27	15~19	55~60	0.2~0.4	0.2~0.5	—	2 926~3 762	1 400~1 700
转炉煤气	0.5~2.0	50~70	10~25	10~20	0.3~0.8	—	0.2~0.6	6 270~8 360	80~120

2 钢厂副产煤气资源化利用的途径、优势及原则

钢厂副产煤气资源化是钢铁制造流程功能拓展的重要实践,同时也是未来钢铁制造流程伴生煤气高效利用的重要发展方向^[8]。研究者研究了钢铁企业副产煤气的资源化利用,主要包括:制取氢气^[9-10]、甲醇^[11]、乙醇^[12]、乙二醇^[8]、二甲醚^[8]、烯烃^[8]、液化天然气^[13]、压缩天然气^[13]、合成天然气^[13-14]、合成氨^[15]、尿素^[15-17]等化工原料和产品(图 1)。

以制备甲醇为例,分析钢厂副产煤气资源化利用的优势,与传统工艺(合成甲醇的原料为煤或者天然气)相比,采用焦炉煤气制甲醇有如下优势:

(1)原料成本大幅下降。目前不管在钢铁企业还是独立焦化厂,输出或外卖焦炉煤气时,焦炉煤气都是作为流程的副产品,因此其单位热值的价格往

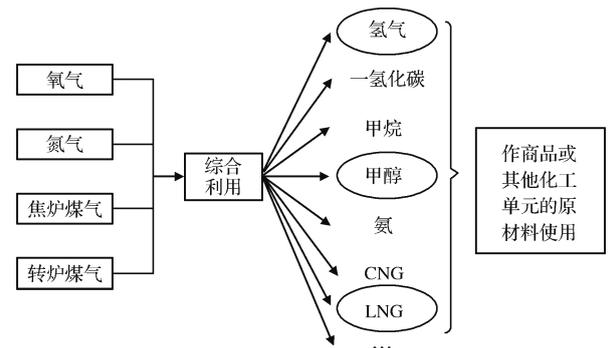


图 1 钢厂副产煤气资源化利用的途径

Fig. 1 Possibilities for resource utilization of by-product gases in steel plants

往远低于天然气。

(2)焦炉煤气中含有 55%~60%的 H₂(体积分数),在甲醇的转化合成过程相比传统工艺更简单,过程的能耗和 CO₂排放也显著降低。

(3)在钢铁联合企业中,除有大量副产煤气资源外,还拥有充足的氧气、氮气等气体资源,更便于副产煤气物质转换的进行。

(4)从热力学效率上来讲,焦炉煤气合成甲醇的化学反应焓效率远高于普通燃烧过程的热效率,焦炉煤气的化学能得到充分利用。

钢铁联合企业的 3 种副产煤气中,焦炉煤气的资源化价值相对最高。以往焦炉煤气作为燃料使用,主要是因为其发热值较高,燃烧后烟气能够达到较高的温度。随着蓄热式技术、燃用低发热值煤气发电等节能技术的发展,弥补了低发热值煤气燃烧温度低的不足,焦炉煤气用量可以大幅度降低,从而可以节省出大量富余焦炉煤气。目前,钢铁企业一般的做法是将富余的焦炉煤气送往自备电厂发电,但焦炉煤气发电成本较高,根据一些焦化厂利用焦炉煤气发电的成本核算表明,1 m³焦炉煤气仅能产生 1~1.5 kW·h,发电利润很小。因此,合理利用焦炉煤气成为新的议题。

钢厂推进副产煤气资源化利用的核心是进行能量流(煤气流)的解析及其网络的优化,即优先利用

资源化价值相对较低的高炉煤气和转炉煤气,从而置换出焦炉煤气进行资源化利用,构建合理的能量流(煤气流)网络,进而提升副产煤气的使用价值。

3 钢厂副产煤气资源化利用案例

近年来,中国钢铁行业面临着产能过剩以及日趋严峻的市场压力和环保压力,开始寻求新的突破口,钢厂副产煤气资源化利用成为了一个热门话题。然而,事实上,钢厂副产煤气资源化利用并不是一个新话题,在 2006—2012 年期间,四川达州钢铁集团公司(简称达钢)就已经开始实践,并取得显著的经济效益和社会效益。笔者在 2012 年有幸参与中国炼焦行业协会的专家团队,应邀对其主要实践经验进行了总结,在此作简要描述,相信能对当前钢厂副产煤气资源化利用(钢化联产)的讨论有所参考。

达钢在进行煤气资源化改造前(2006 年),生铁产量为 132 万 t/a,粗钢产量为 146 万 t/a,焦炭产量为 87 万 t/a。焦炭产量在满足达钢生产需求后仍有富余,焦炉煤气产量也随之有较大的富余量。改造前达钢煤气流网络如图 2 所示。

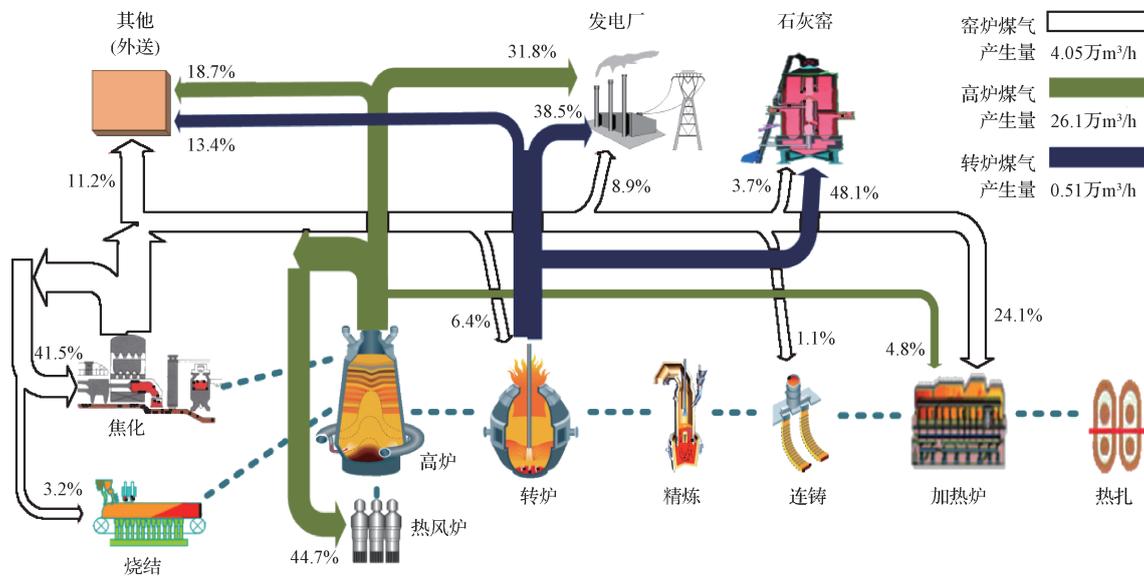


图 2 改造前达钢煤气流网络示意图(2006 年)

Fig. 2 Diagram of by-product gases flow network of Dagang before reconstruction in 2006

改造前,从煤气利用情况来看,达钢主要回收了焦炉煤气和高炉煤气,转炉煤气回收利用量很少:

(1)焦炉煤气除了供自身焦炉加热使用外(焦炉全用焦炉煤气加热),主要用于轧钢和自发电等工序,有少量的放散;(2)高炉煤气除了供热风炉使用外,主要用于自发电等工序;(3)转炉煤气主要用于石灰窑

工序,剩余的用于自发电。

为了充分提升和优化钢铁企业碳素能量流的价值,达钢打破副产煤气传统利用方式,对其能源系统,特别是煤气系统进行优化升级:大大降低工艺过程煤气消耗量、提高转炉煤气回收量,同时按照煤气“能质对口、耦合匹配”的原则,重新制定了煤气梯级

使用制度,尽可能使用低品质的高炉煤气,置换出焦炉煤气进行资源化利用,构建起更为合理的能量流(煤气流)网络,以达到增值目的(图 3)。

在煤气利用方面的具体改变有:焦炉煤气原来优先用于轧钢加热炉和焦炉自身,改造后主要用于制甲醇,还有少量用于棒材加热炉、石灰窑、烧结点火炉等特殊用户的保安。热值最低的高炉煤气作为冶金炉窑的燃料优先使用,即主要用于热风炉、轧钢加热炉等;热值高的焦炉煤气和转炉煤气优先用作生产甲醇的原料。为此,达钢对加热系统和设备进行了改造,见表 2。改造后,共置换出焦炉煤气约 28 500 m³/h,约占老区焦炉煤气总产生量(40 200 m³/h)的 70%。经过优化升级后,达钢在满足生产

需求的前提下,有 59.7%的焦炉煤气和 9.2%的转炉煤气用于生产甲醇。改造后达钢副产煤气流网络如图 4 所示。在此基础上开发了焦炉煤气配转炉煤气制甲醇的工艺技术如图 5 所示。

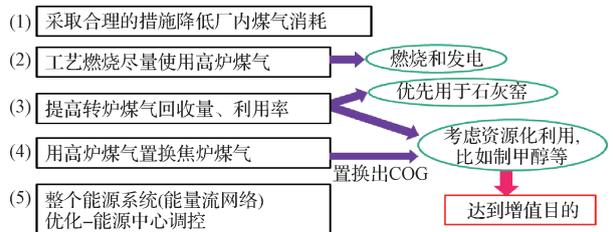


图 3 煤气资源化利用前提下不同煤气的优化利用原则

Fig. 3 Principle for optimizing energy structure for resourcing utilization of by-product gases

表 2 加热系统及设备主要改造内容

Table 2 Main reconstruction contents of heating system and equipment

序号	用气点	改造前	改造措施	备注
1	棒材加热炉	焦炉煤气强化加热	改烧高炉煤气,采用双蓄热式加热炉	少量焦炉煤气保安
2	焦炉	单热式加热,只能使用焦炉煤气	改为复热式焦炉,新增高炉煤气燃烧系统,主要烧高炉煤气,并新增烟道气余热回收装置解决烟囱高度问题	少量焦炉煤气用于富化高炉煤气
3	石灰回转窑	主要烧焦炉煤气、转炉煤气	使用转炉煤气和高炉煤气,新增高炉煤气预热炉、转炉煤气预热炉	少量焦炉煤气保安
4	烧结点火炉	主要烧焦炉煤气	改烧高炉煤气,采用高炉煤气和空气预热炉	少量焦炉煤气保安
5	罐烘烤器	焦炉煤气强化加热	改烧高炉煤气,采用蓄热式烘烤器	—

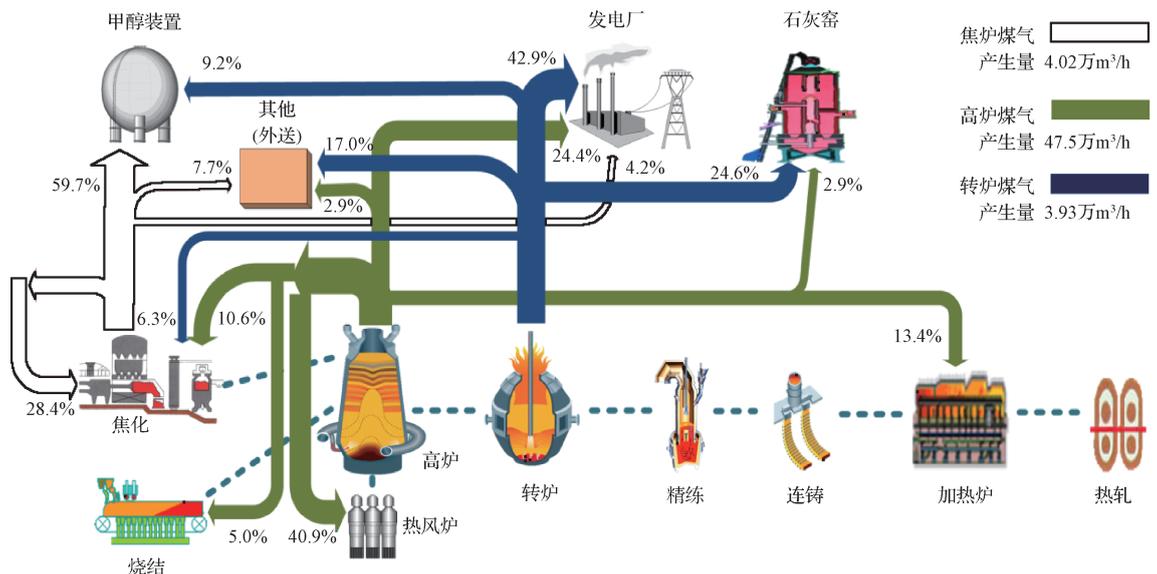


图 4 改造后达钢副产煤气流网络(2012 上半年)

Fig. 4 Diagram of by-product gases flow network of Dazhou Steel after reconstruction in first half of 2012

达钢煤气资源化利用改造项目创建了钢铁、煤焦化工协调发展的新模式,实现了钢铁企业氢、碳素流的价值优化。项目投产后,约 1 845 m³焦炉煤气

和 287 m³转炉煤气生产 1 t 甲醇,达钢实现年产甲醇 10.6 t/a,同时在吨钢综合能耗、自发电量、经济社会效益都取得了一定的成绩,具体如下。

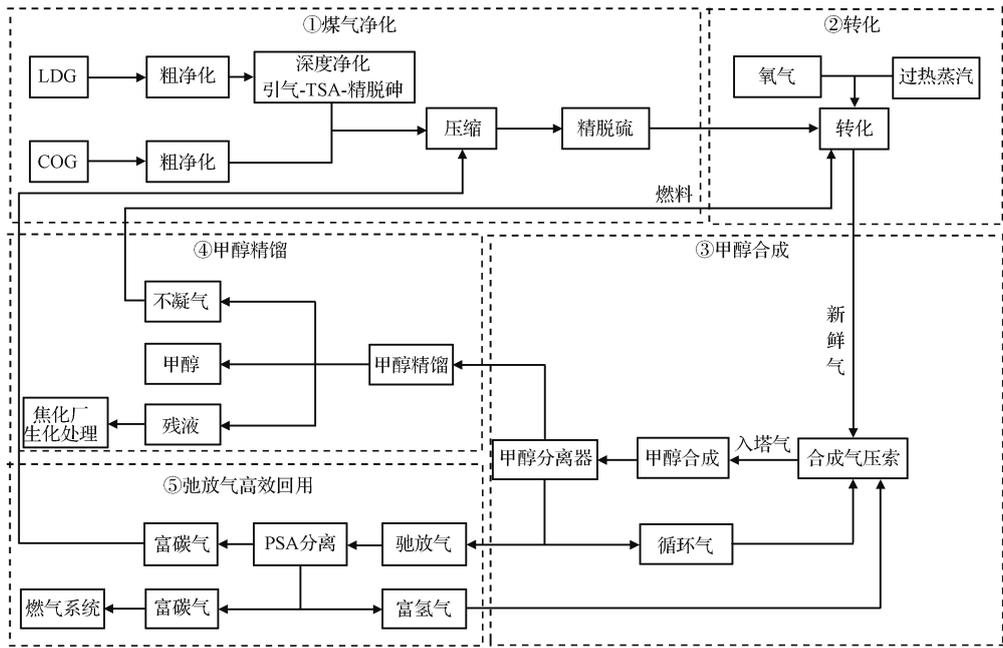


图 5 达钢焦炉煤气、转炉煤气混合生产甲醇的工艺流程图

Fig. 5 Flow diagram of methanol production by using COG and LDG as raw material in Dazhou Steel

(1) 吨钢综合能耗。达钢吨钢综合能耗从 2006 年的 686 kg(标准煤)/t(钢)降低到 2012 年上半年的 590 kg(标准煤)/t(钢),降幅达到了 14%(图 6)。吨钢综合能耗降低的因素除了生产和操作工艺进步外,最重要的因素就是煤气回收利用率的提高,根据计算,煤气回收利用率的提高对降低吨钢综合能耗的贡献率达到了 63.5%。

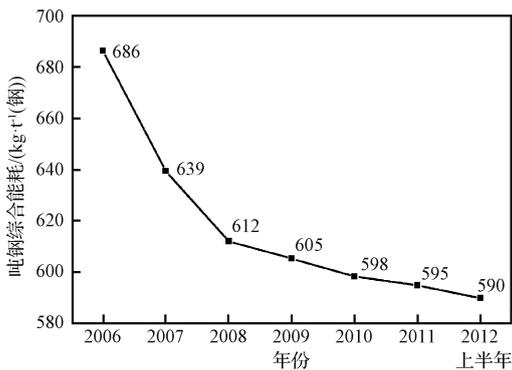


图 6 2006—2012 上半年达钢吨钢综合能耗变化情况

Fig. 6 Change of specific energy consumption per ton steel in Dazhou Steel from 2006 to first half of 2012

(2) 自发电量。改造后达钢用于发电的煤气量有所提高,利用副产煤气的自发电机组容量从 2006 年的 27 MW 也增加到 2012 年的 47 MW,同时随着煤气流网络的优化和煤气利用率的提高,自发电量也有提高,达钢自发电量从 2006 年的 1.71

亿 kW·h/a 增加到了 2011 年的 3.11 亿 kW·h/a,增长比例达到 82%。

(3) 经济社会效益。1) 改造前后钢铁制造流程能量流(煤气流)网络优化后取得的效益,假设 2012 年上半年将煤气流网络优化后的富余煤气全部用于自发电(简称自发电模式),则这部分效益为改造前后钢铁制造流程能量流网络优化后取得的效益,见表 3。由表 3 可知:吨钢能源成本下降,若按 2012 年达钢的电力能源成本为 0.625 元/(kW·h)估算,仅由自发电量的增加所引起的吨钢能源成本的下降将达到 118.19 元/t(钢);碳减排效益明显,按电力的 CO₂ 排放因子 0.95 kg(CO₂)/(kW·h)估算,吨钢自发电量的增加可带来的碳排放权抵扣将达到 179.65 kg(CO₂)/t(钢)。2) 富余副产煤气用于生产甲醇(简称甲醇模式)后取得的增值效益。将甲醇模式与自发电模式对比,这部分效益即为甲醇模式(实际生产模式)取得的增值效益,见表 4。由表 4 可知:吨钢能源成本进一步下降,由自发电量的减少所引起的吨钢能源成本的增加有 85.41 元/t(钢);但由于原用于发电的部分焦炉煤气和转炉煤气去生产甲醇,折合吨钢可生产 39.97 kg(甲醇)/t(钢),当时甲醇的市场价为 2 600 元/t,那么,由甲醇生产带来吨钢利润有 103.92 元/t(钢)。从而甲醇模式要比自发电模式的吨钢能源成本下降 18.51 元/t(钢);碳减排效益进一步增加:按电力的

CO₂排放因子0.95 kg(CO₂)/(kW·h)估算,吨钢自发电量的减少将减少碳排放权抵扣129.82 kg(CO₂)/t(钢)。而中国甲醇的生产工艺主要以煤制气方法为主,通常煤制气法生产1 t甲醇会带来

约3.49t的CO₂排放,则达钢的甲醇模式折合吨钢能带来碳排放权抵扣139.50 kg(CO₂)/t(钢)。对比自发电模式吨钢碳排放权抵扣将增加9.68 kg(CO₂)/t(钢)。

表3 达钢改造前后的能源指标对比(假设富余副产煤气全部用于发电)

Table 3 Energy index comparison between before and after transformation in Dazhou Steel (assuming that all surplus by-product gases were used for power generation)

项目	改造前(2006年)	改造后(2012年上半年)	改造后-改造前
吨钢自发电量/(kW·h)	117.17	306.28	189.11
自发电比例/%	32.74	65.66	32.92
吨钢综合能耗/(kg(标准煤)·t ⁻¹ (钢))	686.20	618.52	-67.68

表4 甲醇模式与自发电模式下达钢的能源指标对比

Table 4 Energy index comparison between methanol production mode and self-power generation mode in Dazhou Steel

项目	煤气全部用于自发电模式	甲醇模式	甲醇模式-煤气全部用于自发电模式
吨钢自发电量/(kW·h·t ⁻¹ (钢))	306.28	169.63	-136.65
自发电比率/%	65.66	36.36	-29.30
吨钢综合能耗/(kg(标准煤)·t ⁻¹ (钢))	618.52	589.82	-28.70
甲醇产量/万t	—	5.61(2012年上半年)	5.61

综合以上分析,达钢改造后吨钢能源成本下降136.70元/t(钢)、碳排放权抵扣189.33 kg(CO₂)/t(钢)。

由吨钢自发电量的增加和甲醇生产所带来的吨钢能源成本下降136.70元/t(钢)、碳排放权抵扣增加189.33 kg(CO₂)/t(钢)。

3 结论

(1)钢厂副产煤气资源化是钢铁制造流程功能拓展的重要实践,同时也是未来钢铁制造流程伴生煤气高效利用的重要发展方向。

(2)企业要从钢铁制造流程功能拓展的视角出发,高度重视能源转换功能,才能认识到钢厂推进副产煤气资源化利用的核心是进行能量流(煤气流)的解析及其网络的优化,同时要充分发挥碳素能量流的资源(组分)利用效率及其增值价值。

(3)企业在推进钢厂副产煤气资源化利用时,首先要保证副产煤气满足本企业合理的生产需求,进而根据市场情况、国家政策导向,对副产煤气资源化利用产品的价值和市场前景进行科学合理的评估,因地制宜地选择生产氢气、甲醇、乙醇、乙二醇、二甲醚、烯烃、LNG、CNG、SNG、合成氨、尿素等化工产品,实现钢厂副产煤气从燃料化向适度资源化利用的转变,避免一哄而起、盲目投资。

(4)达钢的案例表明,在对企业的能量流(煤气流)及其网络进行解析和优化后,吨钢综合能耗从2006年的686 kg(标准煤)/t(钢)降低到2012年上半年的590 kg(标准煤)/t(钢),降幅达到了14%;

参考文献:

- [1] YIN Ruiyu. Metallurgical Process Engineering[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [2] 殷瑞钰,张春霞. 钢铁企业功能拓展是实现循环经济的有效途径[J]. 钢铁, 2005, 40(7): 1. (YIN Rui-yu, ZHANG Chun-xia. Developing functions of steel enterprises is an effective way for realizing circular economy[J]. Iron and Steel, 2005, 40(7):1.)
- [3] 《中国钢铁工业年鉴》编辑委员会. 中国钢铁工业年鉴[M]. 北京:《中国钢铁工业年鉴》编辑部, 2018. (Editorial Board of China Iron and Steel Statistics Yearbook. China Iron and Steel Statistics Yearbook[M]. Beijing: Editorial Office of China Iron and Steel Statistics Yearbook, 2018.)
- [4] 张春霞,上官方钦,胡长庆,等. 钢铁流程结构及对CO₂排放的影响[J]. 钢铁, 2010, 45(5): 1. (ZHANG Chun-xia, SHANGGUAN Fang-qin, HU Chang-qing, et al. Steel process structure and its impact on CO₂ emission[J]. Iron and Steel, 2010, 45(5): 1.)
- [5] 陈丽云,张春霞,胡长庆. 钢铁厂焦炉煤气利用的潜力分析[J]. 世界钢铁, 2005, 5(5): 37. (CHEN Li-yun, ZHANG Chun-xia, HU Chang-qing, et al. Potential analysis on the utilization of coke oven gas of steel plant[J]. World Iron and Steel, 2005, 5(5): 37.)

- [6] ZHANG Chun-xia, HU Chang-qing, YIN Rui-yu. Process at steel plant of new generation and utilization modes of gases [C]//The 11th China-Japan Symposium on Iron and Steel Technology, Beijing; The Chinese Society for Metals, 2007; 11.
- [7] ZHANG Chun-xia, LI Xiu-ping, SHANGGUAN Fang-qin. Recent progress of utilization of by-product gases and environment in Chinese Steel Industry[C]// The 13th China-Japan Symposium on Science and Technology of Iron and Steel. Beijing; The Chinese Society for Metals and The Iron and Steel Institute of Japan, 2013; 203.
- [8] 上官方钦, 汤志刚, 温燕明, 等. 炼焦化学工业绿色发展工程科技战略[J]. 钢铁, 2015, 50(12): 11. (SHANGGUAN Fang-qin, TANG Zhi-gang, WEN Yan-ming, et al. Strategic study on green development engineering for coking chemical industry[J]. Iron and Steel, 2015, 50(12): 11.)
- [9] XIE H, YU Q, ZHANG Y, et al. New process for hydrogen production from raw coke oven gas via sorption-enhanced steam reforming: Thermodynamic analysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(5): 2914.
- [10] José M, Bermúdez, Ana Arenillas, et al. An overview of novel technologies to valorise coke oven gas surplus[J]. Fuel Processing Technology, 2013, 110: 150.
- [11] 熊江君, 吴映忠, 龙素安, 等. 焦炉煤气配加转炉煤气生产甲醇工艺介绍[J]. 燃料与化工, 2014(2): 49. (XIONG Jiang-jun, WU Ying-zhong, LONG Su-an, et al. Methanol production process by coke oven gas and converter gas[J]. Fuel and Chemical Processes, 2014(2): 49.)
- [12] 王洪军, 赵泽东, 王永强, 等. 钢铁企业转炉煤气资源化高效利用途径研究[J]. 冶金动力, 2018(5): 22. (WANG Hong-jun, ZHAO Ze-dong, WANG Yong-qiang, et al. Research on high-efficiency utilization of converter gas resources in steel industry[J]. Metallurgical Power, 2018(5): 22.)
- [13] 王兆文, 杜雄伟. 焦炉煤气制天然气产业的发展探讨[J]. 煤化工, 2014, 42(1): 7. (WANG Zhao-wen, DU Xiong-wei. Development and prospect of COG-to-SNG industry[J]. Coal Chemical Industry, 2014, 42(1): 7.)
- [14] MAN Y, YANG S, QIAN Y. Integrated process for synthetic natural gas production from coal and coke-oven gas with high energy efficiency and low emission[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 117: 162.
- [15] 刘月, 谢伟, 虎骁, 等. 焦炉煤气在焦化循环经济中的多联产利用[J]. 煤化工, 2015, 43(3): 42. (LIU Yue, XIE Wei, HU Xiao, et al. The utilization technologies of coke oven gas in coking circular economy[J]. Coal Chemical Industry, 2015, 43(3): 42.)
- [16] 胡建江, 谢国威. 钢铁企业煤气资源的利用途径[J]. 冶金能源, 2015(3): 3. (HU Jian-jiang, XIE Guo-wei. Analysis of reasonable utilization of gas resources in iron and steel enterprises[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2015(3): 3.)
- [17] 李立业, 黄世平. 焦炉煤气高效多联产利用技术[J]. 燃料与化工, 2018, 49(3): 49. (LI Li-ye, HUANG Shi-ping. A technology for coke oven gas efficient polyregeneration[J]. Fuel and Chemical Processes, 2018, 49(3): 49.)