

特色专题

中国钢铁行业副产煤气利用现状和发展趋势

高天¹, 隋鹏², 邓行健¹, 王静松^{1*}, 王广¹, 余雪峰¹, 左海滨¹, 薛庆国¹

摘要 作为世界上第一大钢铁生产国,中国钢铁行业副产煤气年生产量总和超过 14000 亿 Nm³,其蕴含的能量相当于 2.66 亿 t 标准煤。然而,目前中国钢铁行业副产煤气以作为燃料燃烧使用为主,仍处于碳排放较高、综合利用率较低的阶段。为促进中国钢铁行业副产煤气利用效率的提升,阐述了高炉煤气、焦炉煤气、转炉煤气 3 类核心副产煤气的成分、热值等特征及可用性,分析了以燃料燃烧为主的利用现状与局限,探讨了钢化联产、氢冶金路径下的高值化利用途径,含变压吸附法(PSA)、化学吸收法提纯 CO/CO₂,及转炉煤气生物发酵、焦炉煤气重整制甲醇/乙醇与氢能;重点论述了焦炉煤气在 Midrex、Energiron-ZR 直接还原炼铁中的应用优势及实践。研究表明,副产煤气经技术升级可从单一燃料转向化工原料,如焦炉煤气高炉喷吹减排 10%~20%,中国宝武钢铁集团 HyCROFTM 富氢碳循环高炉技术验证了其可行性。据此总结出,钢化联产协同、氢冶金耦合、CCUS 技术融合是其高效低碳利用核心方向,可推动行业从“碳冶金”转向“氢冶金”,为钢铁行业绿色低碳转型提供技术支撑。

关键词 高炉煤气;焦炉煤气;转炉煤气;钢化联产;氢冶金

现代工业发展与人口增长背景下,全球资源短缺、环境质量下降问题日益凸显,资源环保高效利用成为可持续发展核心议题。中国作为全球第一钢铁生产与消费大国,2023 年粗钢产量 10.19 亿 t、生铁产量 8.71 亿 t,占世界总产量 50% 以上,在行业中具有重要影响力^[1]。钢铁产能扩张伴随大量污染颗粒与温室气体排放,作为《巴黎协议》成员国,中国提出 2030 年碳达峰、2060 年碳中和的“双碳”目标^[2-3],是践行可持续发展的重要举措。

当前中国钢铁长流程生产占主导,炼焦、高炉炼铁、转炉炼钢等流程能耗巨大。2023 年中国钢铁协

会会员企业吨钢综合能耗 558.3 kgce/t,全行业总能耗超 6.5 亿 t 标准煤,占全国能耗 12%;全国年碳排放量超 120 亿 t,钢铁行业占比约 16%,其 CO₂ 排放多与副产煤气逸散、燃烧利用相关^[4]。为此,中国^[5-6]、欧洲各国^[7-11]、日本^[12-13]、美国^[14]及印度^[15]等均在大力研发钢铁冶金低碳新技术。

中国粗钢生产能耗约 23~25 GJ/t,其中 14~16 GJ 满足生产热化学能需求,7~10 GJ 转化为副产煤气化学能(占总能耗 30%),加之生产过程中产生的废热,传统炼焦—高炉—转炉流程约 70% 总能源转化为副产煤气和余热等低品位二次能源。相较于欧美日韩企业,中国钢铁企业对这类二次能源的利用效率普遍偏低。

本研究聚焦焦炉煤气、转炉煤气、高炉煤气 3 类核心副产煤气,分析其性质与利用现状。目前多数钢

1. 北京科技大学绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室,北京 100083

2. 中钢设备有限公司,北京 100080

收稿日期: 2024-03-06; 修回日期: 2024-09-27

基金项目: 中国宝武低碳冶金创新基金项目(BWLCF202104)

作者简介: 高天,硕士研究生,研究方向为煤气加热新技术,电子信箱: q1291289633@163.com; 王静松(通信作者),研究员,研究方向为低碳冶金,电子信箱: wangjingsong@ustb.edu.cn

引用格式: 高天, 隋鹏, 邓行健, 等. 中国钢铁行业副产煤气利用现状和发展趋势[J]. 科技导报, 2025, 43(21): 69-80; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.03.01088

铁企业将副产煤气用作加热燃料辅助生产,如每年约1/3高炉煤气(3000亿m³以上)用于高炉热风炉加热,剩余部分主要用于加热与发电;中国独立焦化厂及大型钢铁联合企业年产冶金焦超4亿t,对应焦炉煤气约1600亿m³,其高氢特性可作为直接还原炼铁的优良还原剂。但煤气单纯作为燃料的利用方式综合效率低,在副产煤气基数巨大的背景下,研发高效利用技术对钢铁行业低碳转型具有重要意义。

1 钢铁行业副产煤气及应用现状

1.1 高炉煤气

1.1.1 高炉煤气特征

高炉煤气为钢铁长流程工艺的典型副产物,据中国钢铁工业协会数据,2023年产量超14000亿m³,吨铁产气量约1400~1500m³,应用潜能显著。该气体无色无味、CO含量高且毒性强,主要成分为CO、CO₂、N₂、H₂、CH₄,热值3~3.8MJ/m³,属低热值煤气,具体成分特征如表1所示,典型产生流程见图1。

表 1 高炉煤气气体成分特征

CO/%	H ₂ /%	CH ₄ /%	N ₂ /%	CO ₂ /%	O ₂ /%	密度/(kg/m ³)	热值/(MJ/m ³)
25.0~30.0	1.5~3.0	0.2~0.5	55.0~60.0	15.0~19.0	0.2~0.4	1.29~1.30	3~3.8

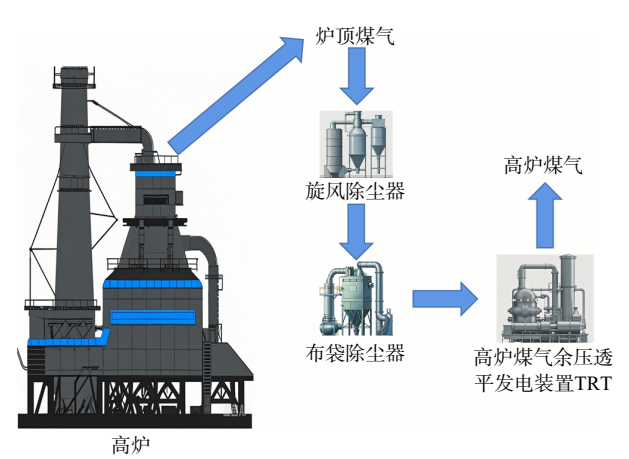


图 1 高炉煤气产生流程简图

高炉煤气从炉顶逸出时压力约0.15MPa,夹带60~80g/m³的粉尘及挥发分,直接排放或循环利用均存在较大危害,需经除尘处理后方可满足后续使用需求^[16-17]。当前高炉煤气除尘以湿法除尘与干式除尘为主,其中干式除尘所得煤气具有含水量低、余热损失小、余压透平发电装置(TRT)发电量大等优势^[18-19]。

1.1.2 高炉煤气利用

据统计,2024年中国钢铁协会会员企业高炉煤气利用率达98%以上,但该数据未涵盖小型钢铁企业,这类企业因技术能力不足,8%~12%的高炉煤气直接排空或放散燃烧。高炉煤气主要用作气体燃料,应用于高炉热风炉、炼焦炉、铁矿石球团焙烧等场景^[20],其中热风炉加热为核心应用,消耗占年产量33%

左右。该方式成本低、适用性强,但存在综合燃烧效率低、烟气排放量大等问题^[21-23],企业多采用富氧燃烧技术改善其燃烧效率与温度偏低的问题^[24-26]。实际生产证实,当助燃气体氧气含量>20.9%时,可降低高炉煤气燃点、提升燃烧温度与效率。

高炉煤气发电主要包括余压发电与燃烧发电两类。余压发电借助煤气自身压力推动透平膨胀机带动发电机发电,属二次能源回收工艺^[27]。结合干式除尘技术(煤气含水量低、余热余压损失小),与余压发电机组配合可实现能源优化利用,理想状态下,TRT机组发电量可达50kWh/t生铁以上,能源利用率显著提升^[28-29]。燃烧发电分为蒸汽轮机发电与燃气蒸汽联合循环发电(CCPP):蒸汽轮机发电技术成熟、成本低廉,自1903年GE公司(美国通用电气公司)建成5000kW蒸汽涡轮发电站后持续发展,但能量转化效率偏低,即便发展至超临界煤气发电阶段,最高效率也仅40%左右^[30-31];20世纪50年代发展的CCPP技术,通过高温燃气膨胀与蒸汽推动协同做功,发电效率高于蒸汽轮机,已逐步成为高炉煤气发电的首选技术^[32-33]。

1.2 转炉煤气

1.2.1 转炉煤气特征

转炉煤气产自转炉吹氧炼钢流程,喷吹氧气与铁水中的碳剧烈反应生成CO、CO₂等气体,经收集处理后获得^[34-35]。其气体组成及含量如表2所示,N₂含量

低, CO 等可燃成分占比远高于高炉煤气, 热值 6800~10 MJ/m³, 属中等热值气体, 利用价值更高。转炉煤气回收量约 90~110 m³/t 钢, 最高超 140 m³/t 钢^[36], 2023 年中国年产量达 900 亿 m³ 以上。

表 2 转炉煤气成分及特征

CO/%	H ₂ /%	CH ₄ /%	N ₂ /%	CO ₂ /%	O ₂ /%	密度/(kg/m ³)	热值/(MJ/m ³)
60.0~70.0	0.0~3.0	0.0~1.0	10.0~20.0	15.0~20.0	0.0~2.0	1.69~1.76	6.8~10

1.2.2 转炉煤气利用

目前, 中国转炉煤气主要直接用作炼钢流程燃料, 如钢包烘烤、合金烘烤、混铁炉保温、连铸中间包烘烤等^[37-38], 部分用于轧钢加热炉、石灰窑燃烧, 或与高炉煤气混合用于 CCGP 发电。将其用于 CO/CO₂ 高值转化(如 CO 富集提纯、合成甲醇乙醇), 是当下的研究重点。

转炉煤气出炉温度高达 1450~1500℃, 夹带大量氧化铁粉尘, 需经降温、除尘后方可使用, 其除尘原理与高炉煤气一致, 现代企业多采用干式除尘以最大化回收显热。高温显热利用除加热水蒸气发电、原料烘干等传统方式外, 热化学储能(显热转化学能)为新研究方向。Ren 等^[39-41]采用转炉煤气与焦炉煤气混合重整技术, 利用转炉煤气高温余热将 CO₂ 和 CH₄ 转化为 CO 和 H₂, 重整过程中 35%~40% 余热转化为化学能, 总热量回收率达 60%~65%, 远高于传统回收效率(25%~37%), 能量转换及效率对比如图 2 所示。

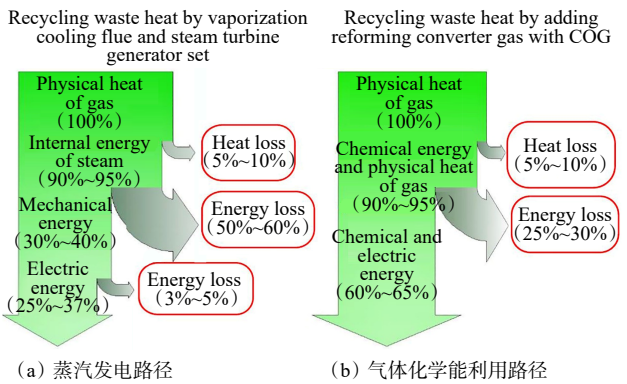


图 2 转炉煤气传统与新型利用技术回收过程的能量转换和能量效率的比较

1.3 焦炉煤气

1.3.1 焦炉煤气特征

焦炉煤气源于焦炭生产过程, 是 3 类副产煤气中含氢量最高的品种。由于短时间内高炉炼铁工艺仍占主导地位, 焦炉煤气产量将持续维持高位。2023 年中国焦炭产量达 4.92 亿 t, 对应焦炉煤气总量约 1970 亿 m³。其主要成分为 CH₄、H₂、CO、CO₂(表 3), 其中 H₂ 占比 55%~60%、CH₄ 占比 22%~28%, 属高热值煤气, 热值约 17~18 MJ/m³^[42]。

表 3 焦炉煤气成分及特征

H ₂ /%	CH ₄ /%	CO/%	N ₂ /%	CO ₂ /%	O ₂ /%	C _m H _n /%	密度/(kg/m ³)	热值/(kJ/m ³)
55.0~60.0	22.0~28.0	6.5~10.0	3.0~5.0	1.0~3.0	0.3~0.8	2.0~3.0	0.45~0.48	17580~18420

1.3.2 焦炉煤气利用

目前, 焦炉煤气主要用作钢铁企业内部燃料^[43], 凭借高热值常掺混其他煤气以弥补低热值煤气的燃烧温度不足, 如用于球团带式焙烧机及 CCGP 发电等。但该利用方式未能充分发挥其高氢、高 CH₄ 特性, 因此发展纯氢、甲醇、氨、天然气等高值产品生产, 是当下研究重点与资源高效利用的必然要求。

对比焦炉煤气发电, 将焦炉煤气用于高炉喷吹, 性价比更高。由于焦炉煤气氢含量高, 具有以下 4 方

面优势^[44-46]: (1) 焦炉煤气中的氢为优质还原剂, 可替代焦炭中的碳以达到节约焦炭目的; (2) 焦炉煤气中氢气还原产物为 H₂O, 与其他还原剂相比, CO₂ 排放量低, 其综合减排效果为 10%~20%; (3) 与用于发电相比, 焦炉煤气能量利用率提高约 80%, 总能量利用效率得到提高; (4) 焦炉煤气高炉喷吹技术已成熟, 生产设备投资较小。

自 20 世纪 60 年代起, 鞍钢集团有限公司、承德钢铁集团有限公司、济钢集团有限公司等企业已开展

实践并积累经验,后因经济、工艺等因素未深入推广。近年在“双碳”与可持续发展背景下,该工艺重新受重视,焦炉煤气也成为富氢高炉的低碳能源。

2 副产煤气在钢化联产中的应用

副产煤气高值利用打破钢铁与化工行业独立发展格局,是钢化联产的核心发展方向,目前已有国内外大量研究基础^[47-48]。郭占成等^[49-51]对钢铁-化-电-建材多联产、烟气净化联产等进行理论分析与模拟,张琦、郭玉华等^[52-54]开展相关研究并评估联产系统减排效果。

研究表明,通过耦合钢-化-电过程,充分利用副产煤气热能(发电、原料加热),净化后经提纯或化学合成制得氢气、甲醇等化工产品,可显著提高能量与资源利用率,为钢铁企业多元化转型提供支撑。

2.1 高炉煤气的利用

2.1.1 高炉煤气 CO 提纯

高炉煤气含 20% 左右 CO_2 与 55%~60% N_2 , 燃烧时未参与反应的 2 类气体将以烟气形式带走大量热量,造成无效能量损失。因此,CO 提纯与 CO_2 脱除对高炉煤气增值利用具有重要意义,提纯后的 CO 、 CO_2 小分子含碳气体,可作为化工原料生产甲醇、乙醇、醋酸等高值产品。高炉煤气 CO 提纯已成为中国钢铁企业的重要发展方向之一,相关流程简图如图 3 所示。

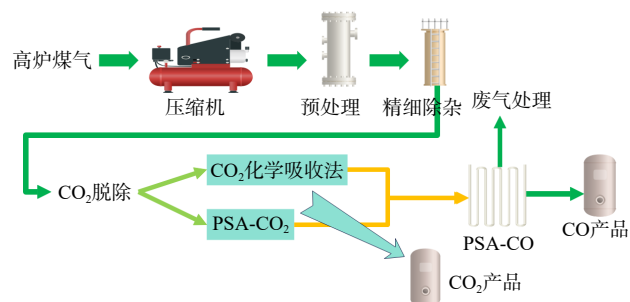


图 3 高炉煤气提纯 CO 生产工艺

近年高炉煤气 CO 提纯以吸附法为主流,常用类型包括变压吸附法(PSA)、变温吸附法(TSA)及真空吸附法(VSA)。该工艺通过 CO 选择性吸附剂分离气体,且吸附可逆便于后续 CO 收集,兼具操作简单、无腐蚀、易调控等优点。其中 TSA 法因温度调控缓

慢导致能耗较高,PSA 法应用更为广泛。

PSA 提纯 CO 的核心挑战是研发高性能、可逆再生、低成本的吸附材料。北京北大先锋科技股份有限公司(简称北大先锋)研发的 Cu 系吸附材料 PU-1, CO 实验纯度达 90% 以上;2013 年 6 月,其设计的首个高炉煤气 CO 变压吸附工程在湖南衡阳钢管有限公司(简称衡钢)投产,煤气处理量 $67000 \text{ Nm}^3/\text{h}$, CO 产品浓度超 70%,年回收量折合标准煤约 $38000 \text{ t}^{[55]}$ 。该技术经济可行性良好,提纯后 CO 热值高于原煤气且可用于化工生产^[56],但目前衡钢等企业出于经济性考虑,仍将其用作加热燃料以减少外购天然气消耗。

分离高炉煤气中 CO_2 可提升其热值与利用效率、拓展应用场景,当前主流方法为化学吸收法,企业重点关注设备投资与运行成本。此外,脱除 CO_2 后的高炉煤气可循环入炉,减少焦炭消耗与燃料比;宝武集团开发的富氢碳循环高炉炼铁技术(HyCROFTM),采用氧气鼓风,炉顶煤气脱除 CO_2 后加热喷吹入炉循环利用,是当前高炉煤气最高效的利用方式之一。

2.1.2 高炉煤气 CO_2 脱除

高炉煤气 CO_2 脱除以化学吸收法应用较广,主要包括胺法吸收与热钾碱法。

胺法吸收在部分钢铁企业得到应用,通过胺类溶剂与 CO_2 的可逆化学反应实现吸收,加热后可解吸 CO_2 并再生溶剂。该方法吸收效率高、技术成熟,适用于大规模煤气处理,但胺类溶剂存在腐蚀性,需强化设备选型与维护,且再生过程消耗能量,增加企业能源成本。

热钾碱法采用碳酸钾溶液吸收 CO_2 , 辅以催化剂提升吸收速率,适用于高浓度 CO_2 脱除,成本较低可降低环保投入。但该方法再生温度高,对设备耐高温、耐腐蚀性能要求严格,需配套专用设备保障脱除过程稳定运行。

2.2 转炉煤气用于化工生产

2.2.1 转炉煤气富集 CO

转炉煤气 CO 含量达 60%~70%, 富集提纯高品位 CO 后,可用于合成醋酸、醋酐、乙二醇等化工产品,或经光气合成制备 TDI(甲苯二异氰酸酯)、MDI(二苯基甲烷二异氰酸酯)等。该技术突破传统煤化工制气前置限制,是转炉煤气燃烧发电之外的重要应用方向,其富集原理与高炉煤气成分富集基本一

致,工业上以深冷分离法和 PSA-CO 法为主,典型 PSA-CO 富集生产流程如图 4 所示。

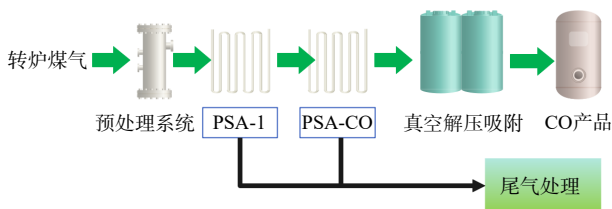


图 4 典型 PSA-CO 生产流程

转炉煤气 PSA-CO 提纯 CO 技术工业化始于日本,1989 年日本神户制钢(KOBELCO)在加古川厂建成工业系统,1990 年于神户复建同类系统^[57]。其 CO 生产速率达 150~200 m³/h,纯度超 99%,实现了资源高值利用。随着 PSA 高性能吸附材料的发展,气体富集纯度普遍达 90% 以上,目前日本、韩国及欧美发达国家已将技术重点转向工艺模型优化。

中国因转炉煤气内部消耗量大、PSA-CO 系统投资较高,该技术工业应用起步较晚,仅宝山钢铁股份有限公司、首钢集团有限公司、河钢股份有限公司等少数大型钢铁企业应用,其他企业受经济性制约,仍将转炉煤气直接用作燃料。

2.2.2 转炉煤气制甲醇、乙醇

转炉煤气 CO 及 CO₂ 含量高,是制备甲醇、乙醇的优质原料,替代煤原料可降低能耗并补充产品产量缺口,同时可作为焦炉煤气制甲醇的补碳剂,调节其偏高的氢碳比^[58]。

转炉煤气制乙醇是近年重要利用方向,其中新西兰 Lanza tech 公司(LanzaTech New Zealand Limited)的合成气发酵法应用较广。相较于粮食(一代)、纤维素(二代)原料,该方法可减少生物质消耗、降低转炉煤气放散率,其简易工艺流程如图 5 所示。

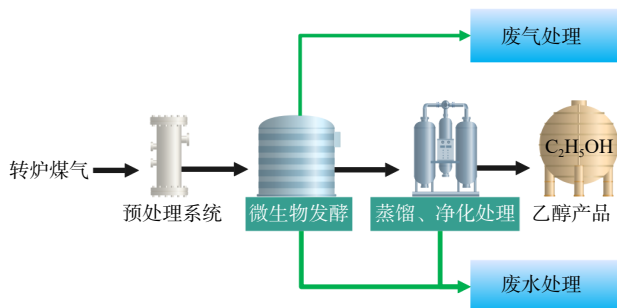
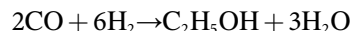
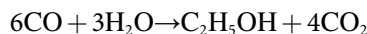


图 5 转炉煤气发酵法生产乙醇流程

转炉煤气发酵法生产乙醇,借助新西兰 Lanza

tech 公司提供的特定微生物菌种以生物代谢方式消耗 CO、H₂ 等气体原料,进而可生产出乙醇、乙酸盐和其他产物。在此过程中 CO、CO₂ 等无机碳化物转变为有机碳化物,完成碳的生物固定和增值过程。图 6 为 CO 通过生物+Wood-Ljungdahl 途径生成乙醇过程^[59]。借助生物学理论表征,微生物生产代谢过程为



反应方程式中,CO₂ 为中间产物,随后与反应中的甲基结合,在生物酶作用下与 CO 结合为乙酰辅酶 A,具体代谢过程机理及工艺过程见参考文献[59-65]。

生物法固定回收 CO 兼具绿色环保特性,2010 年起,中国部分大型钢铁企业已逐步应用生物发酵制乙醇技术。乙醇掺混汽车燃料的发展推动市场需求增长,成为钢铁企业利用副产煤气转型生产乙醇的重要动因。此外,中国与 Lanza tech 合资成立新能源科技公司,依托国内副产煤气资源优势,进一步推动该发酵技术的研发与应用。

2.3 焦炉煤气用于化工生产

2.3.1 焦炉煤气制氢气

氢能作为 21 世纪极具潜力的二次能源,具备绿色清洁、转化效率高、无温室气体排放等优势。中国当前煤制氢占比超 60%,行业能耗偏高,而焦炉煤气(COG)含 55%~60% H₂ 与 22%~28% CH₄,氢含量丰富,制氢潜力显著。工业上以 PSA 为主要制氢技术,工艺流程如图 7^[66]所示。

21 世纪初,新日本钢铁公司(简称新日铁)已开展焦炉煤气制氢技术研发,先后开发深冷分离法与 PSA 法,同期美国钢铁及炼焦企业也发展同类技术,所产氢气主要供燃料电池使用。中国宝钢、武钢、鞍钢、邯钢、首钢京唐等企业均已建成焦炉煤气 PSA 制氢装置,成本较电解水制氢降低 2/3 以上^[67-69]。需要注意的是,未处理焦炉煤气含硫化物、油、萘等有害杂质,PSA 制氢前须经净化处理,避免损耗吸附剂性能与寿命。

膜分离技术富集焦炉煤气中 H₂ 是当前研究热点,理论上具有能耗更低、环保性更佳的优势,借助无机或有机微孔材料的分子筛机制可获得富 H₂ 气流。目前国外膜分离技术已趋于成熟,已开发 PRISM、

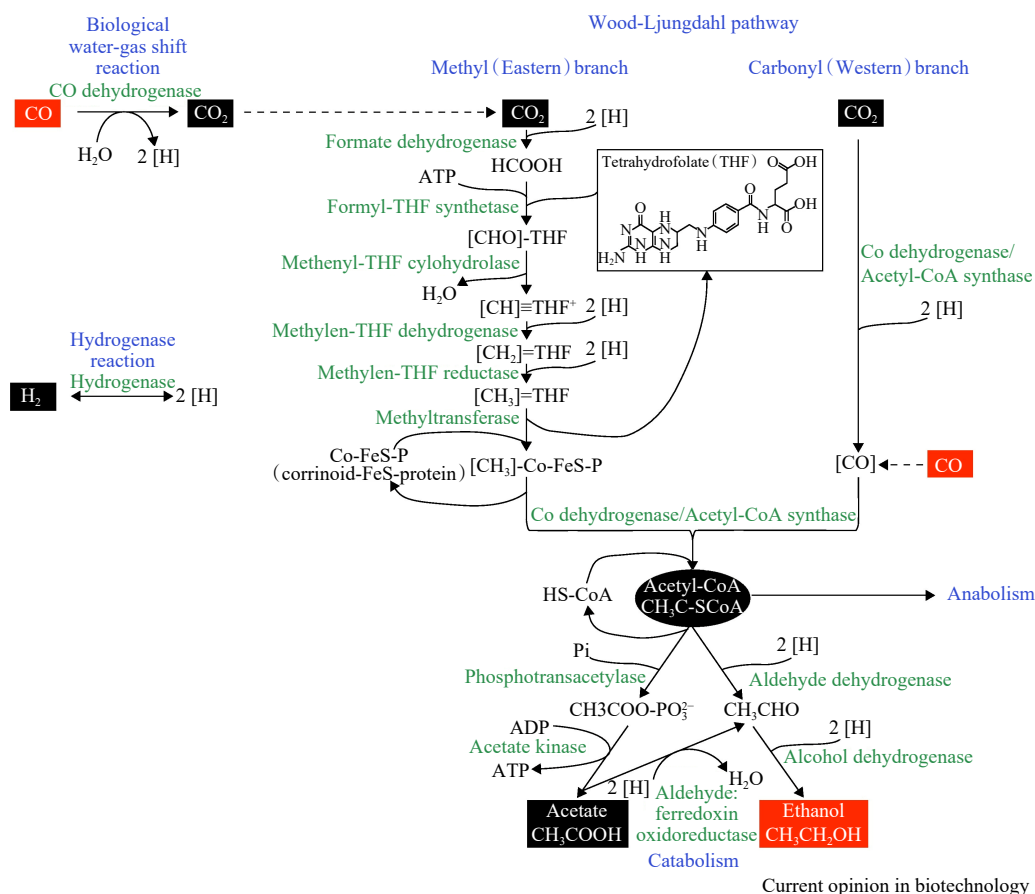
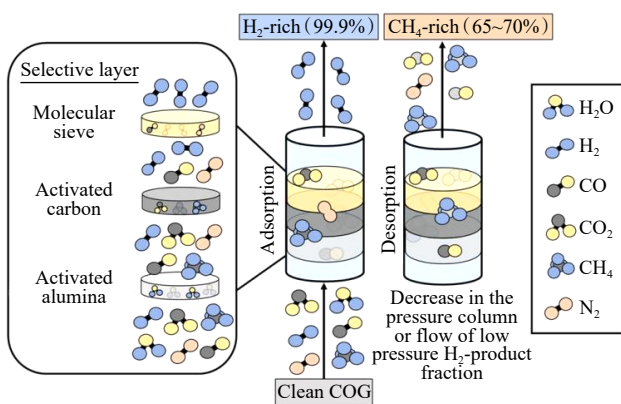
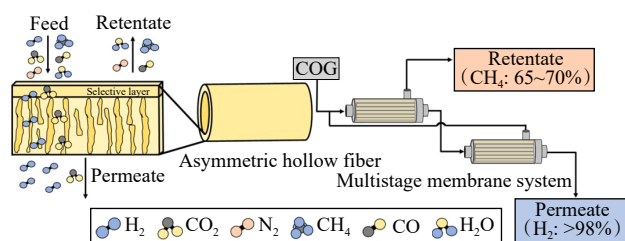


图6 CO通过Wood-Ljungdahl途径生成乙醇

图7 用PSA技术从COG中提纯H₂

ALaS、GENERON、Polysep等商业富氢膜，其提纯H₂流程如图8^[66]所示。

为充分挖掘焦炉煤气氢资源潜力，研究人员提出重整富氢再分离方法^[70-71]。该方法通过催化重整反应（如水煤气反应）将焦炉煤气中CH₄、焦油等转化为富氢气体，提升氢资源回收率，其中利用外部CO₂与焦炉煤气进行CH₄干重整（DRM）制氢是当前研究热点。尽管该技术理论可行，但受催化剂、成本、能耗

图8 使用膜分离技术从COG中提纯H₂

等因素制约。综合来看，中国钢铁企业应基于现有技术，推动焦炉煤气制氢与氢冶金或氢能商业应用相结合，构建现阶段低碳发展模式。

2.3.2 焦炉煤气制天然气

焦炉煤气含22%~28% CH₄与7%~13% CO_x，净化后可用于生产天然气（主要成分为CH₄），制取方法分为直接分离法（物理法）与甲烷化分离法（化学法）。原料气净化要求严格，尤其甲烷化工艺需脱硫至10⁻⁷级别，避免催化剂中毒失活。

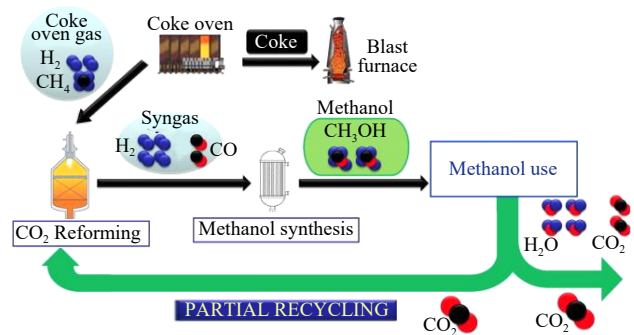
直接分离法无CH₄化学转化过程，预处理后可采用深冷分离、膜分离、PSA等方法提纯；甲烷化分离法可利用CO_x成分，通过催化剂实现CO_x+H₂→CH₄转

化,提升甲烷回收率,分为补碳法(借助外部 CO_x 碳源如高炉煤气)与不补碳法(利用自身 CO_x 成分,简化流程并减少排放)。

2.3.3 焦炉煤气合成醇

焦炉煤气氢碳比偏高,直接用于甲醇合成难以充分利用,需借助高炉煤气或转炉煤气作为补碳剂调节氢碳比^[72]。

焦炉煤气制甲醇工艺流程包括预处理、压缩、精脱硫、转化、合成气压缩、低压合成、精馏存储及尾气处理等工序。甲醇合成的最佳氢碳比为 2, 因实际反应存在不完全转化, 且为强化固碳效果, 生产中氢碳比通常控制在 2.05~2.15。净化后的焦炉煤气含较多 CH_4 , 而 CH_4 无法直接合成甲醇, 需经重整转化为 CO 、 CO_2 、 H_2 等物质。当前甲烷干重整技术备受关注, 通过消耗 CO_2 生成目标产物, 可直接获得氢碳比约 2 的合成气, 减少氢碳比调节环节, 且干重整消耗的 CO_2 可视为甲醇使用过程中 CO_2 的循环捕捉利用 (图 9^[73])。目前国内钢铁企业中, 采用高炉煤气或转炉煤气调节氢碳比仍是最可行的方案。

图 9 COG 生产甲醇中的 CO_2 循环过程

2022年3月《Nature》的 News Feature 专题讨论各类减碳举措^[74],并报道中国河南省铜冶镇将建成全球最大焦炉煤气与 CO₂ 回收制甲醇设施,其 CO₂ 回收量约 16 万 t/a,成为中国清洁生产领域的重要里程碑。该案例虽独立于钢铁企业,但可为行业内焦炉煤气应用提供参考,尤其未来高炉煤气、转炉煤气另有他用时,钢铁企业可考虑引入外部 CO₂ 源开展同类工艺。该工艺能将 CO₂ 以燃料形式短期封存,降低大气中 CO₂ 含量,即便合成燃料使用后仍会释放 CO₂,仍对中国“双碳”目标达成及全球气候变化减缓具有积极意义。

2.3.4 焦炉煤气用于直接还原炼铁生产

“双碳”背景下,传统“碳冶金”体系正向“氢冶金”转型,这是冶金行业大规模减碳的关键突破点。焦炉煤气氢含量超 70%,是优质氢源,其在冶金企业内部利用可减少天然气外购、降低生产成本,具备显著经济性。

焦炉煤气用于直接还原铁(DRI)生产是近几十年的重要发展方向,伴随直接还原炼铁技术同步拓展。截至 2021 年,全球 DRI 产量超 1.1 亿 t,主流技术为 Midrex 和 Energiron,其中 Midrex 工艺产量占比超 60%^[75]。

Midrex 工艺由美国表面燃烧公司开发, 1984 年被日本神户制钢收购, 1967 年建成试点工厂, 目前已在印度、伊朗、俄罗斯等多国应用^[76-77]。该工艺适配煤化工合成气、焦炉煤气等多元还原性气体, 神户制钢与普莱克斯有限公司合作开发焦炉煤气重整技术, 将 CH₄、焦油转化为还原性气体, 形成无烟示范流程并在中国、印度等地商业推广。

Energiron-ZR 工艺为竖炉原位重整工艺,还原性气体在竖炉内完成加热、重整、反应等过程。焦炉煤气虽与天然气成分差异较大,但用于该工艺的冶金反应效果一致,且经济效益优于单纯发电。该工艺中 CO_2 与 CH_4 重整生成 $\text{CO}+\text{H}_2$ 还原性气体参与铁矿石还原,配合尾气处理装置,在能耗、环保及经济效益上均优于高炉炼铁^[78-80],其通用示意如图 10^[81]所示。

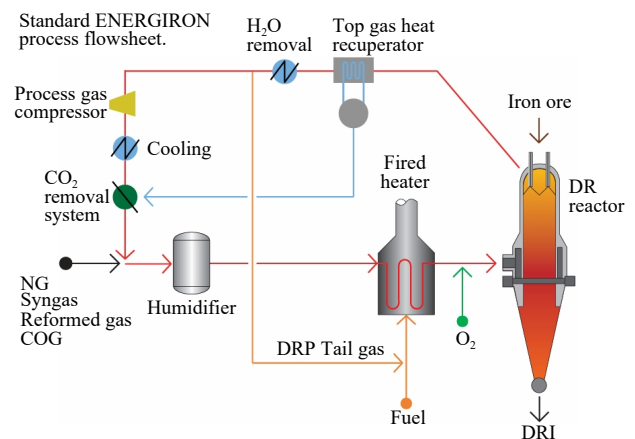


图 10 Energiron-ZR 工艺简图

中国中晋太行矿业有限公司已建成 30 万 t 直接还原竖炉装置,以焦炉煤气为还原气,但开工后未有后续报道。河钢集团 55 万 t Energiron-ZR 装置已

投产,宝钢湛江钢铁有限公司 100 万 t Energiron-ZR 装置将于 2023 年底投产^[82-83],2 套装置均采用焦炉煤气作为还原气以减少 CO₂ 排放。该类直接还原炼铁工艺的 CO₂ 减排成效,成为中国钢铁行业低碳发展的里程碑。

3 钢铁行业 CO₂ 的综合利用

CO₂ 利用主要包括捕获与封存(CCS)和捕获与利用(CCU)2 大方向^[84]。CCS 技术通过将捕集的 CO₂ 永久储存于地下或海洋以减排,中国分为陆地(咸水层、驱油封存)与海上(水柱、沉积物封存)2 类技术^[85-88],海上封存因地质条件优势具较大潜力;CCU 技术则通过物理、化学或生物作用将 CO₂ 转化为甲烷、甲醇等产品或实现资源增采,兼具减排与经济效益^[89-91]。当前中国钢铁企业已开展多元实践。

中国宝武钢铁集团有限公司通过钢渣捕碳技术低成本捕集烟气 CO₂ 并转化为低碳水泥胶凝材料,同时以 CO₂ 替代氩气炼钢,实现内部循环利用^[92-93];鞍山钢铁集团有限公司首发 690 MPa 级 CO₂ 运输船液货舱用低温钢,填补液化 CO₂ 存储材料国际空白^[94];首钢集团有限公司以尾气生物发酵法实现燃料乙醇商业化生产,配套 CO₂-O₂ 混合喷吹及“水电共生”技术拓展利用路径^[95];河北钢铁集团有限公司建成千吨级 CCUS 示范项目,贯通 CO₂ 制菌体蛋白路线,其 120 万 t 氢冶金示范工程实现源头减排^[96];泰山钢铁集团联合研发顶底复吹 CO₂ 冶炼不锈钢技术并完成工业试验^[97];包钢集团拟建 200 万 t CO₂ 捕集与封存利用基地^[98];宝钢股份参与华东千万吨级 CCUS 项目,同步推进富氢碳循环氧气高炉示范,目标年减排 CO₂ 近 60 万 t^[99]。这些技术涵盖材料研发、工艺改进及跨行业合作,彰显了中国钢铁企业低碳转型的积极探索。

4 总结与展望

1) 高炉煤气产量大、应用潜能显著,国内主要用作气体燃料,部分小型企业因能力不足直接排空或放散燃烧,存在燃烧效率低、烟气排放量大等问题,少量用于余压发电及燃烧发电。高炉煤气利用需聚焦燃

烧效率提升与 CO₂ 减排,CCPP 技术发电效率优于蒸汽轮机,应作为发电首选;CO₂ 脱除技术可拓展其利用空间,宝武集团富氢碳循环高炉炼铁技术(HyCROFTM)采用全氧鼓风、炉顶煤气脱碳后循环喷吹,是当前高效利用方式之一。

2) 转炉煤气 CO 含量高、热能资源丰富,其 CO 与热能的高效回收利用至关重要。国内因内部消耗量大、化工利用技术起步晚,多数企业仅将其直接用作炼钢流程燃料,而日本、韩国及欧美、新西兰等国已广泛应用于化工生产。国内钢铁企业需优化转炉煤气回收利用流程,实现热能—化学能逐级高效利用;采用热化学重整储能方式对转炉煤气与焦炉煤气进行混合重整,是提升热能回收效率、减少 CO₂ 排放的关键途径。

3) 焦炉煤气富含 H₂ 与 CH₄,是钢铁及化工行业重要原料气,国内主要用于企业内部燃料消耗,未能充分发挥其成分优势。国内多家企业已开展高炉喷吹焦炉煤气实践并积累经验,“双碳”与可持续发展背景下,其已成为富氢高炉低碳能源。因此,发展焦炉煤气用于直接还原炼铁生产,以及生产纯氢、甲醇、氨、天然气等高值产品,既是当下研究重点,也是资源高效利用的必然要求。

参考文献(References)

- [1] 世界钢铁协会. 2024 年全球粗钢产量[EB/OL]. (2025-01-21) [2025-11-02]. <https://worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-data-viewer/>.
- [2] 人民日报评论员: 确保如期实现碳达峰碳中和[EB/OL]. (2021-10-25) [2023-10-09]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-10/25/content_5644701.htm.
- [3] Ren M, Lu P, Liu X R, et al. Decarbonizing China's iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality[J]. Applied Energy, 2021, 298: 117209.
- [4] International Energy Agency. Iron and steel technology roadmap: Towards more sustainable steel production[R/OL]. Paris: IEA, 2024.
- [5] 张建良, 宗燕兵, 李克江, 等. 全球低碳炼铁新技术进展及展望[J]. 钢铁, 2024, 59(9): 45-55.
- [6] 柴立元, 王海鹰, 闵小波, 等. 面向 2040 年冶金工程科技前沿与创新研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(5): 24-36.
- [7] Babich A, Senk D. Chapter 24. Low carbon ironmaking technologies: An European approach[M]//Iron Ore: Mineralogy, processing and environmental sustainability. 2nd ed. Lu L M.

- Aachen: Woodhead Publishing, 2022: 777–816.
- [8] Zhang H, Wang G, Wang J, et al. Recent development of energy-saving technologies in ironmaking industry[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Bristol: IOP Publishing, 2019, 233: 052016.
- [9] Zhang X, Jiao K, Zhang J, et al. A review on low carbon emissions projects of steel industry in the World[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 306: 127259.
- [10] Meijer K, Denys M, Lasar J, et al. ULCOS: Ultra-low CO₂ steelmaking[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2009, 36(4): 249–251.
- [11] Zhao J, Zuo H B, Wang Y J, et al. Review of green and low-carbon ironmaking technology[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2020, 47(3): 296–306.
- [12] Watakabe S, Miyagawa K, Matsuzaki S, et al. Operation trial of hydrogenous gas injection of COURSE50 project at an experimental blast furnace[J]. ISIJ International, 2013, 53(12): 2065–2071.
- [13] GREINS. Tackling CO₂ reduction in the steel industry [EB/OL]. (2024-07-21) [2025-11-02]. <https://www.carbon-neutral-steel.com/en/vision/>.
- [14] Sohn H Y. Energy consumption and CO₂ emissions in iron-making and development of a novel flash technology[J]. Metals, 2019, 9(1): 54.
- [15] Morrow W R, Hasanbeigi A, Sathaye J, et al. Assessment of energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in India's cement and iron & steel industries[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 65: 131–141.
- [16] Klugsberger A, Ainetter A, Neuhold R. Wet vs. dry top gas cleaning technology for blast furnaces[J]. Berg-und Hüttenmännische Monatshefte, 2013, 158(11): 459–460.
- [17] Lanzerstorfer C, Xu Q. Neue entwicklungen zur gichtgasreinigung von hochöfen: Ein Überblick[J]. Berg-und Hüttenmännische Monatshefte, 2014, 159(3): 91–98.
- [18] 赵彬. 高炉煤气布袋除尘技术的应用研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2019.
- [19] Priya S S, Patil R G. BF gas utilization and power generation in steel plant using TRT[J]. International Journal of Mechanical and Production Engineering, 2014, 2(4): 79–82.
- [20] Li X, Wang X Q, Li P F, et al. Progress on characteristic components analysis of blast furnace gas and its influence on desulfurization process[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(12): 6629–6639.
- [21] Cuervo-pinera V, Cifrian-riesgo D, Nguyen P D, et al. Blast furnace gas based combustion systems in steel reheating furnaces[J]. Energy Procedia, 2017, 120: 357–364.
- [22] Rosado D J M, Chávez S B R, Gutierrez J A, et al. Energetic analysis of reheating furnaces in the combustion of coke oven gas, Linz-Donawitz gas and blast furnace gas in the steel industry[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 169: 114905.
- [23] Hou S S, Chen C H, Chang C Y, et al. Firing blast furnace gas without support fuel in steel mill boilers[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(7): 2758–2767.
- [24] Ma X, Zhang S, Yu H, et al. Numerical simulation of combustion and emission of blast furnace gas boiler[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing, 2020, 721: 012042.
- [25] 王汇, 温治, 罗申, 等. 富氧燃烧技术在石灰回转窑中的应用研究及经济性预测[J]. 现代化工, 2006(Suppl 2): 342–346.
- [26] Yi Z M, Zhang C, Hu X M, et al. Numerical investigation of blast furnace gas and coke oven gas combustion under different O₂/CO₂ environments[J]. Greenhouse Gases: Science and Technology, 2022, 12(3): 339–348.
- [27] Kumar N M, Kumar G H K. Power generation using green technology in iron and steel industry[C]//2015 IEEE 9th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO). Coimbatore: IEEE, 2015: 1–6.
- [28] 苏泽立. 高炉煤气回收发电项目碳减排问题探究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.
- [29] Wu P, Yang C. Identification and control of blast furnace gas top pressure recovery turbine unit[J]. ISIJ International, 2012, 52(1): 96–100.
- [30] 肖学文, 王刚, 李牧明, 等. 基于富氢/含碳煤气用于冶炼还原剂的减碳策略分析[J]. 中国冶金, 2023, 33(5): 121–127.
- [31] 罗会. 钢铁企业煤气发电生产的探讨[J]. 新疆钢铁, 2023(3): 58–60.
- [32] Zeng S, Lan Y, Huang J. Mitigation paths for Chinese iron and steel industry to tackle global climate change[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009, 3(6): 675–682.
- [33] Polyzakis A L, Koroneos C, Xydis G. Optimum gas turbine cycle for combined cycle power plant[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(4): 551–563.
- [34] 杨洁. 转炉煤气湿式电除尘器中煤气爆炸机理的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- [35] 张琦. 钢铁联合企业煤气资源合理利用及优化分配研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [36] 中国钢铁新闻网. 宁钢转炉煤气吨钢回收量达到历史最好水平[EB/OL]. (2020-10-15) [2023-10-09]. http://www.csteelnews.com/qypd/jnhb/202010/t20201015_41282.html.
- [37] 常洪涛. 转炉煤气回收和利用技术分析[J]. 科技风, 2020(5): 13.

- [38] 师小文. 浅谈转炉煤气的合理利用[J]. 科技与企业, 2014(4): 146.
- [39] Ren B L, Wang G, Zuo H B, et al. Reforming of converter gas with coke oven gas for thermochemical energy storage and carbon dioxide emission reduction[J]. Fuel Processing Technology, 2021, 222: 106957.
- [40] Ren B L, Wang G, Zuo H B, et al. In-situ catalytic reforming of converter gas in converter flue based on thermochemical energy storage: Kinetics and numerical simulation[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 48: 103693.
- [41] Ren B L, Lin L, Wang J S. High-temperature online reforming of converter gas with coke oven gas[C]//Energy Technology 2019. Cham: Springer, 2019: 57–68.
- [42] 汪佩华. NiMo催化剂应用于焦炉煤气加氢脱硫性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- [43] Zhang Y L, Tian Z X, Chen X N, et al. Technology-environment-economy assessment of high-quality utilization routes for coke oven gas[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(1): 666–685.
- [44] 胡俊鸽, 周文涛, 郭艳玲. 高炉喷吹焦炉煤气技术的研究进展[J]. 世界钢铁, 2011, 11(4): 1–9.
- [45] Zhao Z G, Yu X B, Shen Y S, et al. Model study of shaft injection of reformed coke oven gas in a blast furnace[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(11): 15048–15060.
- [46] 李昊堃, 刘克明, 沙永志. 高炉喷吹焦炉煤气工艺分析[J]. 炼铁, 2011, 30(2): 59–62.
- [47] Xu Y P, Liu R H, Shen M Z, et al. Assessment of methanol and electricity co-production plants based on coke oven gas and blast furnace gas utilization[J]. Sustainable Production and Consumption, 2022, 32: 318–329.
- [48] Singh V, Buelens L C, Poelman H, et al. Carbon monoxide production using a steel mill gas in a combined chemical looping process[J]. Journal of Energy Chemistry, 2022, 68: 811–825.
- [49] 闫新平, 郭占成, 刘竹焕, 等. 冶金烧结烟气净化和联产氯化钾技术研究及示范[J]. 科技资讯, 2016, 14(11): 170–171.
- [50] 郭占成. 煤基能源流程工业节能减排技术探讨: 钢铁-化产-电力-建材多联产[J]. 中国基础科学, 2018, 20(4): 61–69.
- [51] 欧阳朝斌, 宋学平, 郭占成, 等. 天然气-煤共气化制备合成气新工艺[J]. 化工进展, 2004, 23(7): 751–754.
- [52] 向婷, 刘帅, 张薇, 等. 钢铁-化产-电力多联产系统节能减排评估分析[J]. 冶金能源, 2020, 39(5): 3–8.
- [53] 杜学强, 酆秀萍, 李煜, 等. 行业间生态链接协同减排模式与节能效果分析[J]. 中国冶金, 2021, 31(9): 85–91.
- [54] 郭玉华, 周继程. 中国钢化联产发展现状与前景展望[J]. 中国冶金, 2020, 30(7): 5–10.
- [55] 北大先锋. 华菱衡钢高炉煤气综合利用项目配套装置[EB/OL]. (2017-11-06) [2023-10-09]. <https://www.pioneer-pku.com/show-56.html>.
- [56] 国家煤化工网. 首套高炉气提纯CO装置投产[EB/OL]. (2013-10-16) [2023-10-09]. <http://www.coalchem.org.cn/news/html/800201/140211.html>.
- [57] 李海峰, 郭铖乾, 王新东, 等. 高炉低碳炼铁技术路径分析及发展建议[J/OL]. [2024-09-12]. <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20240184>.
- [58] Kasuya F, Tsuji T. High purity CO gas separation by pressure swing adsorption[J]. Gas Separation & Purification, 1991, 5(4): 242–246.
- [59] Kim S, Kim J. The optimal carbon and hydrogen balance for methanol production from coke oven gas and Linz-Donawitz gas: Process development and techno-economic analysis[J]. Fuel, 2020, 266: 117093.
- [60] Köpke M, Mihalcea C, Bromley J C, et al. Fermentative production of ethanol from carbon monoxide[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2011, 22(3): 320–325.
- [61] Mo Z P. Technology of producing fuel ethanol by gas biological fermentation in iron and steel industry and its industrial application[C]//Proceedings of the 2020 National Metallurgical Energy Environmental Protection Technology Exchange Conference. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2020: 317–321.
- [62] Ragsdale S W, Pierce E. Acetogenesis and the Wood-Ljungdahl pathway of CO₂ fixation[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Proteins and Proteomics, 2008, 1784(12): 1873–1898.
- [63] Wilkins M R, Atiyeh H K. Microbial production of ethanol from carbon monoxide[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2011, 22(3): 326–330.
- [64] Liu Z Y, Jia D C, Zhang K D, et al. Ethanol metabolism dynamics in *Clostridium ljungdahlii* grown on carbon monoxide[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2020, 86(15): e00730–20.
- [65] 汪洪涛. 钢铁工业煤气生物发酵法制燃料乙醇工艺研究与应用[J]. 冶金能源, 2017, 36(Suppl 2): 31–33.
- [66] Moral G, Ortiz-imedio R, Ortiz A, et al. Hydrogen recovery from coke oven gas. Comparative analysis of technical alternatives[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2022, 61(18): 6106–6124.
- [67] 王瑾辉. 变压吸附制氢技术在邯钢冷轧工程中的应用[J]. 冶金动力, 2006(1): 53–56.
- [68] 张敏. 焦炉煤气变压吸附制氢在宝钢的应用[J]. 冶金动力, 2006(6): 23–25.
- [69] 石照江. 焦炉煤气制氢在首钢京唐的应用[J]. 冶金能源,

- 2014, 33(6): 43–45.
- [70] Bermúdez J M, Fidalgo B, Arenillas A, et al. Dry reforming of coke oven gases over activated carbon to produce syngas for methanol synthesis[J]. *Fuel*, 2010, 89(9): 2897–2902.
- [71] Onozaki M, Watanabe K, Hashimoto T, et al. Hydrogen production by the partial oxidation and steam reforming of tar from hot coke oven gas[J]. *Fuel*, 2006, 85(2): 143–149.
- [72] Shin S, Lee J K, Lee I B. Development and techno-economic study of methanol production from coke-oven gas blended with Linz Donawitz gas[J]. *Energy*, 2020, 200: 117506.
- [73] Bermúdez J M, Ferrera-lorenzo N, Luque S, et al. New process for producing methanol from coke oven gas by means of CO₂ reforming. Comparison with conventional process[J]. *Fuel Processing Technology*, 2013, 115: 215–221.
- [74] Peplow M. The race to upcycle CO₂ into fuels, concrete and more[J]. *Nature*, 2022, 603(7899): 780–783.
- [75] World Steel Association. World steel in figures 2022[R/OL]. [2024–09–24]. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2022-1.pdf>.
- [76] Tanaka H. Resources trend and use of direct reduced iron in steelmaking process[J]. *Kobelco Technology Review*, 2015, 33(1): 1–7.
- [77] Mizutani N, Kishimoto T, Maeda N. Application of coke oven gas to MIDREX process[J]. R & D: Research and Development Kobe Steel Engineering Reports, 2014, 64(1): 14–17.
- [78] Duarte P E. Using the HYL Process with Coke Oven Gases or Syngas for DRI Production[C]//中国金属学会非高炉炼铁学术委员会. 2006年中国非高炉炼铁会议论文集. 北京: 中国金属学会, 2006: 18–23.
- [79] Duarte P E, Martinis A. 采用ENERGIRON工艺利用焦炉煤气或合成气生产直接还原铁(DRI)[C]//中国金属学会. 2007中国钢铁年会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 3.
- [80] Jiang X, Wang L, Shen F M. Shaft furnace direct reduction technology—midrex and energiron[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 805–806: 654–659.
- [81] Tenova HYL. ENERGIRON-Brochure[Z/OL]. [2024–09–24]. https://www.energiron.com/wp-content/uploads/2020/01/Energiron_Brochure-2020.pdf.
- [82] Tenova HYL. HYL/ENERGIRON projects reference list [Z/OL]. [2024–09–24]. <https://www.energiron.com/wp-content/uploads/2022/05/Energiron-reference-list.pdf>.
- [83] Tenova HYL. Energiron ® Largest hydrogen-based DRI facility in China for Baosteel Zhanjiang[EB/OL]. [2024–09–24]. <https://www.energiron.com/energiron-largest-hydrogen-based-dri-facility-in-china-for-baosteel-zhanjiang/>.
- [84] Jiang K, Ashworth P, Zhang S, et al. China's carbon capture, utilization and storage (CCUS) policy: A critical review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 119: 109601.
- [85] Tapia J F D, Lee J Y, Ooi R E H, et al. A review of optimization and decision-making models for the planning of CO₂ capture, utilization and storage (CCUS) systems[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2018, 13: 1–15.
- [86] Bachu S, Adams J J. Sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change: capacity of deep saline aquifers to sequester CO₂ in solution[J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, 44(20): 3151–3175.
- [87] Damen K, Faaij A, Van Bergen F, et al. Identification of early opportunities for CO₂ sequestration—worldwide screening for CO₂-EOR and CO₂-ECBM projects[J]. *Energy*, 2005, 30(10): 1931–1952.
- [88] Leung D Y C, Caramanna G, Maroto-Valer M M. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 39: 426–443.
- [89] Zhu Q. Developments on CO₂-utilization technologies[J]. *Clean Energy*, 2019, 3(2): 85–100.
- [90] Qian Q, Zhang J, Cui M, et al. Synthesis of acetic acid via methanol hydrocarboxylation with CO₂ and H₂[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11481.
- [91] Romanov V, Soong Y, Carney C, et al. Mineralization of carbon dioxide: A literature review[J]. *ChemBioEng Reviews*, 2015, 2(4): 231–256.
- [92] 国家煤化工网. 宝武集团30万吨钢渣碳捕集项目签约[EB/OL]. (2024–05–29) [2024–09–20]. <http://www.coal-chem.org.cn/investment/html/800203/191867.html>.
- [93] 中国钢铁新闻网. 中国宝武: 二氧化碳替代氩气炼钢, 太钢这项技术一举三得增效超千万[EB/OL]. (2022–03–07) [2024–09–20]. http://www.csteelnews.com/qypd/scjy/202203/t20220307_60518.html.
- [94] 世界金属导报. 鞍钢集团全球首发二氧化碳运输船液货舱用690兆帕级低温钢[EB/OL]. (2023–03–14) [2024–09–20]. <http://www.worldmetals.com.cn/viscms/xingyeyaowen/3686/260847.jhtml>.
- [95] 中国钢铁新闻网. 首钢全球首套钢铁工业尾气生物发酵制燃料乙醇项目[EB/OL]. (2019–12–09) [2024–09–24]. http://www.csteelnews.com/xw/chanj/gj/201912/t20191209_155687.html.
- [96] 中国钢铁新闻网. 河钢正式启动钢铁行业CCUS工业示范项目[EB/OL]. (2023–08–14) [2024–09–24]. http://www.csteelnews.com/qypd/scjy/202308/t20230814_60518.html.

- elnews.com/qypd/qydt/202308/t20230814_78254.html.
- [97] 山东金属学会. 泰山钢铁70 t氩氧精炼炉顶底复吹二氧化碳冶炼不锈钢工艺取得成功[EB/OL]. (2021-10-28) [2024-09-24]. http://www.sdsm.org.cn/news_detail/newsId=1503.html.
- [98] 中国能源报. 内蒙古首个钢铁行业CCUS示范项目开工[EB/OL]. (2022-07-04) [2024-09-24]. http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2022-07/04/content_25927465.htm.
- [99] 中国钢铁新闻网. 我国首个开放式千万吨级CCUS(二氧化碳捕集、利用与封存)项目启动[EB/OL]. (2022-11-08) [2024-09-24]. http://www.csteelnews.com/qypd/qydt/202211/t20221108_68662.html.

Current situation and development trend of by-product gas utilization in China's steel industry

GAO Tian¹, SUI Peng², DENG Xingjian¹, WANG Jingsong^{1*}, WANG Guang¹, SHE Xuefeng¹, ZUO Haibin¹, XUE Qingguo¹

1. National Key Laboratory of Green Mild Steel Iron Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. Sinosteel Equipment & Engineering Co., Ltd., Beijing 100080, China

Abstract As the world's largest steel producer, China's steel industry generates over 1.4 trillion cubic meters of by-product gas annually, which contains energy equivalent to 266 million tons of standard coal. However, currently, the by-product gas from China's steel industry is mainly used as fuel for combustion, remaining at a stage with high carbon emissions and low comprehensive utilization rate. In view of this, to promote the improvement of the utilization efficiency of by-product gas in China's steel industry, this paper elaborates on the composition, calorific value and other characteristics and availability of three core by-product gases: blast furnace gas, coke oven gas and converter gas. It also analyzes the current utilization status and limitations mainly based on fuel combustion, and explores the high-value utilization pathways under the steel-chemical integration and hydrogen metallurgy approaches, including pressure swing adsorption (PSA) and chemical absorption for purifying CO/CO₂, as well as biological fermentation of converter gas and reforming of coke oven gas to produce methanol/ethanol and hydrogen energy. It focuses on the application advantages and practices of coke oven gas in Midrex and Energiron-ZR direct reduction ironmaking. Research shows that by-product gas can be transformed from a single fuel to a chemical raw material through technological upgrades, such as reducing emissions by 10%~20% through high-pressure injection of coke oven gas into blast furnaces, and the feasibility of Baowu's HyCROFTM hydrogen-rich carbon cycle blast furnace technology has been verified. Based on this, it is concluded that the core directions for efficient and low-carbon utilization are steel-chemical integration and synergy, hydrogen metallurgy coupling, and the integration of CCUS technology, which can drive the industry to shift from "carbon metallurgy" to "hydrogen metallurgy" and provide technical support for the green and low-carbon transformation of the steel industry.

Keywords blast furnace gas; coke oven gas; converter gas; steel-chemical co-production; hydrogen metallurgy ●



(责任编辑 王丽娜)