

# 钢铁企业煤气高效利用的研究与展望

韩少慧<sup>1\*</sup>, 陈艺宁<sup>1</sup>, 许城<sup>2</sup>, 齐瑞哲<sup>3#</sup>

<sup>1</sup>华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山

<sup>2</sup>华北理工大学机械工程学院, 河北 唐山

<sup>3</sup>华北理工大学理学院, 河北 唐山

收稿日期: 2026年3月18日; 录用日期: 2026年5月22日; 发布日期: 2026年6月1日

## 摘要

钢厂运行过程会产生大量的副产煤气, 即焦炉煤气、高炉煤气和转炉煤气, 在“双碳”背景下, 实现对副产煤气高效利用已成为我国发展的重要任务之一。本文阐述了三种副产煤气的组成特性, 对不同煤气的利用方式和化工利用进行探讨, 对未来煤气高效利用技术进行展望。结果表明, 基于组分差异对副产煤气进行提质利用、发电及化工品合成等多元化利用, 可显著提升能源利用效率、降低碳排放与生产成本, 是我国钢铁行业实现低碳转型与高质量发展的关键技术路径。

## 关键词

焦炉煤气, 高炉煤气, 转炉煤气, 利用技术, 低碳

# Research and Outlook on the Efficient Utilization of Coal Gas in Steel Enterprises

Shaohui Han<sup>1\*</sup>, Yining Chen<sup>1</sup>, Cheng Xu<sup>2</sup>, Ruizhe Qi<sup>3#</sup>

<sup>1</sup>College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

<sup>2</sup>College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

<sup>3</sup>College of Science, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

Received: March 18, 2026; accepted: May 22, 2026; published: June 1, 2026

## Abstract

Steel mills generate large amounts of by-product gas during operation, including coke oven gas, blast furnace gas, and converter gas. Against the backdrop of the “dual carbon” goals, achieving the efficient utilization of by-product gas has become one of the key tasks for China’s development. This article

\*第一作者。

#通讯作者。

elaborates on the compositional characteristics of three types of by-product coal gas, discusses the utilization methods and chemical applications of different coal gases, and looks forward to the future of efficient coal gas utilization technologies. The results indicate that diversifying the utilization of by-product gas—including upgrading, power generation, and chemical synthesis based on compositional differences—can significantly improve energy efficiency, reduce carbon emissions and production costs, and represents a key technological pathway for China's steel industry to achieve low-carbon transformation and high-quality development.

## Keywords

Coke Oven Gas, Blast Furnace Gas, Converter Gas, Utilization Technology, Low-Carbon

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

双碳目标引领下，我国钢铁行业节能降碳政策持续收紧，全国碳市场扩容与环保法规升级，成为推动技术向低碳化、高值化转型的核心动力。《钢铁行业节能降碳专项行动计划》<sup>1</sup>《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》<sup>2</sup>等政策优先支持副产煤气高值利用路线，明确鼓励制氢、富氢冶炼、合成天然气、高效发电等技术。

在全球资源约束趋紧、环境压力持续加大的背景下，2024年中国粗钢产量达10.05亿吨，占世界总产量一半以上，钢铁行业作为国民经济的重要基础产业，面临着能源消耗与碳排放挑战[1]。随着“双碳”目标的推进和钢铁行业高质量发展的要求，钢铁冶炼过程中产生的煤气，其高效回收与综合利用对推动钢铁冶金绿色转型具有重大意义[2]。传统高炉-转炉长流程工艺包括焦化、烧结、高炉炼钢、转炉炼钢、连铸、轧钢等步骤。其中，焦炉煤气、高炉煤气以及转炉煤气等副产气体含有丰富的可燃成分，是宝贵的二次能源[3][4]。目前，我国钢铁企业副产煤气资源化利用参差不齐，主要处理方式直接排放、作为加热燃料支撑生产、供热与发电利用等方法[5]。

本文围绕焦炉煤气、高炉煤气和转炉煤气，总结了三种副产煤气的性质及主要利用方法的研究进展与应用前景，为提升三种副产煤气的资源化利用提供了重要的理论支撑与技术参考，对于钢铁行业的节能减排、降低生产成本、改善环境有重大影响。

## 2. 副产煤气的组成特性

### 2.1. 焦炉煤气

Table 1. Composition of coke oven gas [7]

表 1. 焦炉煤气气体成分组成[7]

H <sub>2</sub> /%	CH <sub>4</sub> /%	CO/%	N <sub>2</sub> /%	CO <sub>2</sub> /%
55~60	23~27	5~8	3~7	1.5~3

焦炉煤气是指用几种烟煤配制成炼焦用煤，在炼焦炉中经过高温干馏后，在产出焦炭和焦油产品的同时

<sup>1</sup>[https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202406/content\\_6956307.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202406/content_6956307.htm)

<sup>2</sup>[https://www.gov.cn/zhengce/202510/content\\_7046050.htm](https://www.gov.cn/zhengce/202510/content_7046050.htm)

所产生的一种可燃性气体。每吨干煤可生产焦炉煤气 300~350 m<sup>3</sup> (标准状态), 其热值为每标准立方米 17~19 MJ, 主要成分为 H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CO、N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>, 其高位发热量可达 16~18 MJ/m<sup>3</sup> [6], 具体成分如表 1 所示。

## 2.2. 高炉煤气

高炉煤气是高炉炼铁生产过程中副产的可燃气体[8], 高炉煤气的主要成分为 CO、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>, 由于含有大量的 N<sub>2</sub> 与 CO<sub>2</sub>, 热值较低, 仅为 3500 KJ/m<sup>3</sup> 左右。高炉煤气生产流程图见图 1, 气体组成如表 2。

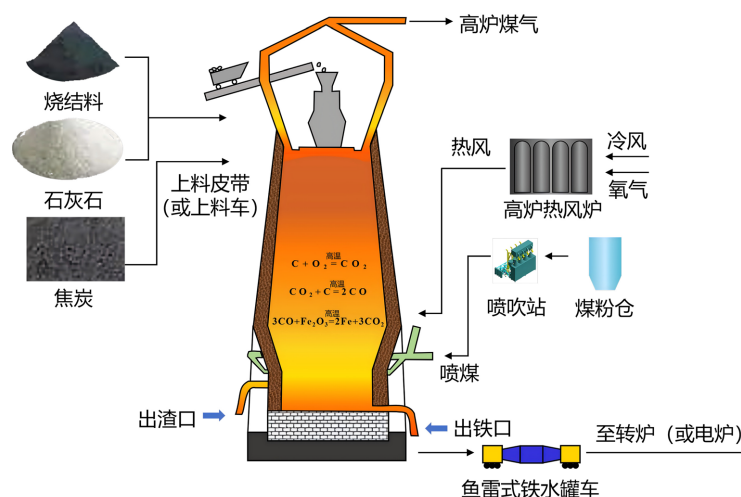


Figure 1. Flowchart of blast furnace gas production  
图 1. 高炉煤气生产流程图

Table 2. Composition of blast furnace gas [8]

表 2. 高炉煤气气体成分组成[8]

CO/%	CO <sub>2</sub> /%	N <sub>2</sub> /%	H <sub>2</sub> /%	CH <sub>4</sub> /%
25~30	15~19	55~60	1.5~3	0.2~0.5

## 2.3. 转炉煤气

转炉煤气是指在转炉炼钢过程中, 由于铁水中的碳与吹入的氧反应生成的一种气体混合物[9]。转炉煤气的主要成分为 CO、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>, 其含有大量一氧化碳, 毒性很大, 吨钢产转炉煤气 121.8~140 m<sup>3</sup>, 主要组成如表 3。

Table 3. Composition of converter gas [9]

表 3. 转炉煤气气体成分组成[9]

CO/%	CO <sub>2</sub> /%	N <sub>2</sub> /%	H <sub>2</sub> /%	O <sub>2</sub> /%
50~60	15~20	20~30	1~3	0.4~1.5

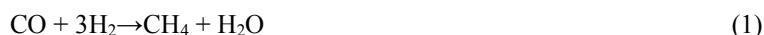
## 3. 焦炉煤气利用研究现状

### 3.1. 焦炉煤气制取天然气

在最近 30 年, 国家钢铁行业、有色冶金、建材工业等产业的快速发展下, 焦化行业高速增长[10]-[12]。

我国是最大的焦炭生产地，年焦炉煤气产量约 2100 亿  $\text{m}^3$ ，如果将其 30% 进行综合利用，每年可减少二氧化碳排放约 4500 万吨，促进传统钢铁行业创新发展。而焦炉煤气制取天然气，不仅可以减少工业废气的排放以及对环境的污染，而且也能帮助企业提升经济效益，对于弥补当前我国天然气供需需求也有很大的帮助。

我国天然气紧缺，焦炉煤气制天然气是一种补充气源，每天产能 1480 万  $\text{m}^3$ ，具有良好的社会效益[13]。目前，焦炉煤气制取天然气分为物理分离法和甲烷化工艺两种[14]。物理分离法通过对焦炉煤气进行预处理净化，脱除焦油、硫、二氧化碳等杂质，利用低温分离  $\text{CH}_4$  实现富集焦炉煤气中的  $\text{CH}_4$ ，直接获取 LNG，处理 1000  $\text{m}^3$  焦炉煤气可产生 220~260  $\text{m}^3$  天然气[15]方法工艺流程较短、投资较低，但  $\text{CH}_4$  回收率偏低， $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$  等可燃物质未得到高效利用。甲烷化工艺是当前工业化应用的主流工艺[16]，先将净化后的焦炉煤气进行深度脱硫，在催化剂 Ni 作用下，煤气中的  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  与  $\text{H}_2$  发生反应生成  $\text{CH}_4$  [17]，随后再通过深冷分离与液化，得到高纯度 LNG，处理 1000  $\text{m}^3$  焦炉煤气可产生大概 460  $\text{m}^3$  天然气 [15] 烷化工艺利用甲烷化反应生成甲烷，反应方程式如下：



这两个反应均是强放热反应，这不仅使催化剂由于多碳烃裂解而结碳，还可能容易使不耐高温的甲烷化催化剂烧结而失活，对催化剂和操作控制要求更为严格。该方法可将焦炉煤气中的有效组分充分转化，能源利用效率更高，但工艺流程相对复杂，投资与运行成本更高。该工艺存在组分利用率低、产物结构单一、碳排放偏高的问题。甲烷干重整技术作为核心突破方向，打破传统仅利用煤气中氢组分的局限性。该技术将焦炉煤气中的甲烷和外部  $\text{CO}_2$  进行干重整反应[18]，在提升天然气产量的同时实现  $\text{CO}_2$  资源化利用，推动行业向低碳化、全量化转型。目前该技术已完成中试验证，正加快推进工业示范应用，与传统甲烷化工艺相比，碳转化效率提升 20% 以上，减少  $\text{CO}_2$  排放 30% 左右[19]。甲烷化工艺制取天然气的流程示意图如图 2 所示。

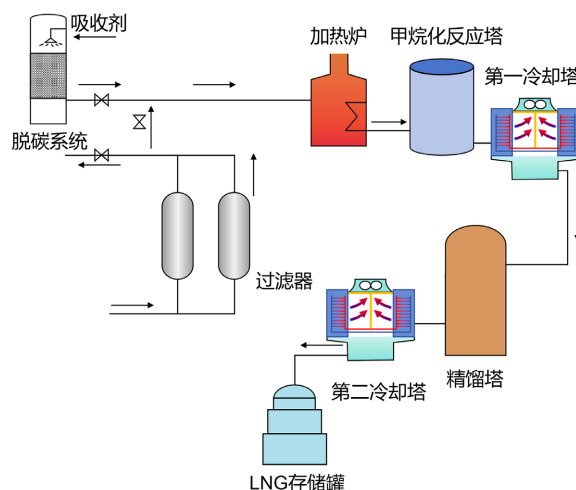


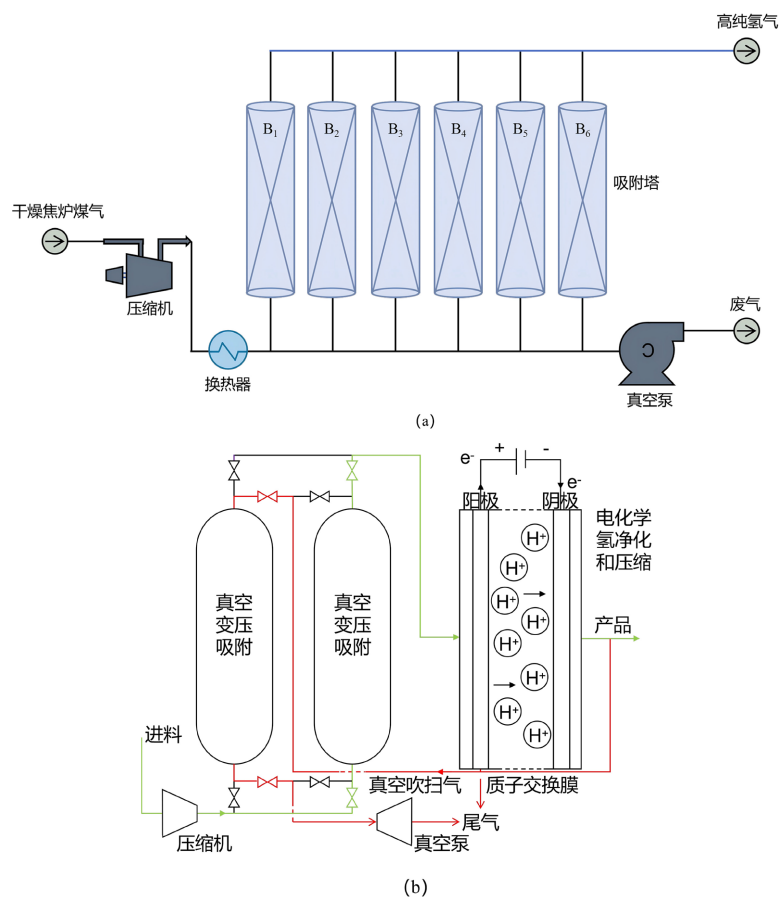
Figure 2. Schematic diagram of natural gas production from coke oven gas via the chemical process  
图 2. 焦炉煤气化学法制取天然气示意图

### 3.2. 焦炉煤气制取氢气

在国家“双碳”战略及能源转型的背景下，传统能源在生成与消费过程中产生的高碳排放问题愈发明显，而氢气作为零碳排放能源，发展氢能产业、减少对传统化石能源的依赖迫在眉睫[20]。焦炉煤气制

氢成本一般来说只有传统煤制氢和天然气制氢的 30%~50%，凭借制氢的低成本优势，成为我国制氢的重要原料[21]。

目前，我国先进的焦炉煤气制氢工艺主要围绕高效实现  $H_2$  分离、环保节能和推动行业发展进行展开，常用方法包括物理法和化学法。物理法主要包括变压吸附提氢、膜分离提氢、深冷法提氢。变压吸附提氢是通过不同压力下吸附剂对不同气体吸附力的改变，以此达到纯度为 99.999% 的  $H_2$  的制取[22]，但这种方法存在回收率低和能耗较高问题[23]；膜分离提氢利用氢气易于通过薄膜实现氢气的富集，操作简单、成本低[21]。鞍集新能源科技有限公司将尾气通过使用新型分子筛，部分杂质气体被其吸附，氢气则可以从微孔中通过，制取氢气纯度由 99.999% 提升到 99.9999%。深冷法提氢利用不同气体冷凝点的不同，从而达到气体分离的工艺技术，得到含有 83%~88% 的氢气的气体，同时可回收其他副产品，但成本高、操作困难[24]。变压吸附提氢和膜分离提氢工序见图 3。化学法即重整制氢，通过将其中的甲烷、一氧化碳等烃类与碳氧化物转化为氢气的技术，该方法理论可行，但对反应温度条件、催化条件、操作水平要求较为苛刻。这些方法各有所长，通常需要统筹兼顾以实现更高的节能效果和运行稳定性。



**Figure 3.** Schematic diagrams of pressure swing adsorption (a) and membrane separation (b) for hydrogen production [21] [25]

**图 3.** 变压吸附提氢(a)和膜分离提氢(b)示意图[21] [25]

利用焦炉煤气制取天然气、氢气均有应用，企业在环保、安全前提下需要结合自身情况与产业环境来选择适宜路径以实现效益最大化。表 4 对比焦炉煤气的这两个方向的工艺、用途、利用率等方面，两个方向都需要焦炉煤气深度净化；焦炉煤气制氢仅需要实现物理分离，工艺最简单；氢气用途最广泛，

其次为天然气；同时，焦炉煤气制氢比制天然气投资回收期优势更显著。综合来看，焦炉煤气制氢具备明显优势。

**Table 4.** Comparison of natural gas and hydrogen production from coke oven gas [17]

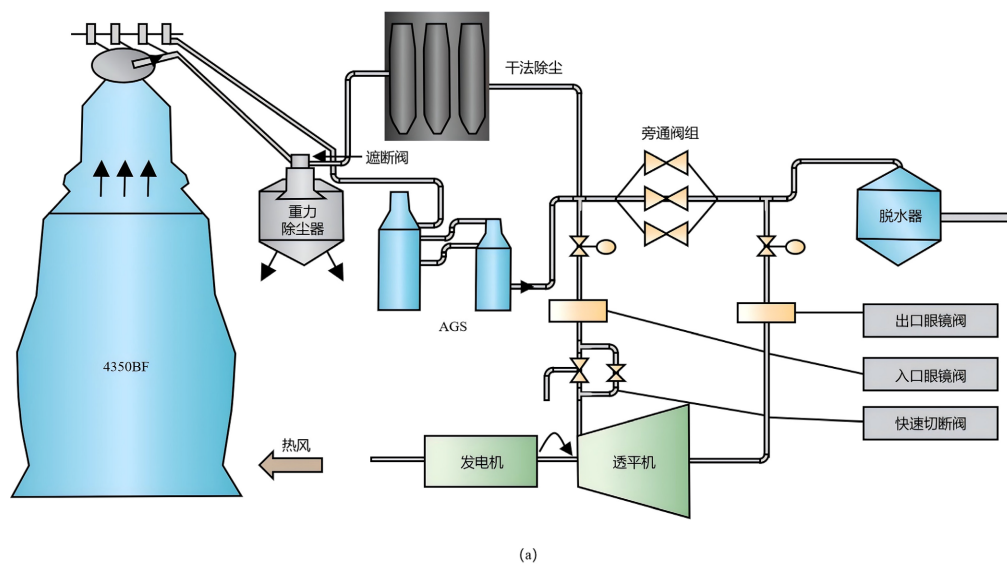
**表 4.** 焦炉煤气制天然气、氢气对比[17]

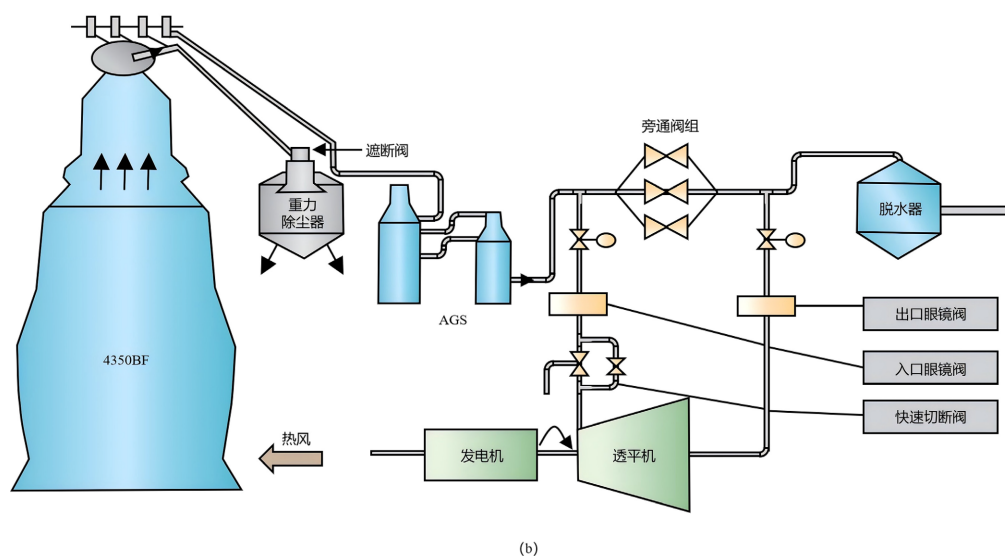
利用方向	焦炉煤气制天然气	焦炉煤气制氢气
工艺	净化	要求高
	反应	无需空分装置、反应压力较低
	分离	甲烷化工艺
	复杂性	较复杂
用途	燃料	化工原料、保护气、还原气、冷却气、燃料等
能量利用率	86.57%	/
投资回收期	3.48 年	2.05 年

## 4. 高炉煤气利用研究现状

### 4.1. 高炉煤气余压发电

高炉煤气是高炉炼铁中的副产物，是重要的二次能源[26]。高炉煤气余压发电是依托高炉冶炼过程中产生的高压煤气，通过余压透平发电装置(TRT)，将煤气自身的压力能和热能转化为电能的节能技术[27][28]。殷健新等[29]对 TRT 转子振动过高及机组运行效率低等问题，通过有限元分析与试验验证，发现支承刚度与支承位置均对转子的第 1、2 阶临界转速有明显影响；陈琛等[30]深入研究了高炉煤气 TRT 在干式与湿式煤气除尘的技术特性与适用场景，明确了干式 TRT 技术凭借高效的除尘效果和能源回收率，适用于水资源匮乏地区，湿式 TRT 技术适用于高粉尘浓度煤气处理的场景，但需重点关注能耗和废水处理问题，图 4 为干法运行系统工艺流程图(a)和湿法运行系统工艺流程图(b)；褚锦文[31]分析了高炉煤气余压回收发电装置的应用结构与调节特性，在钢铁企业中回收能源、降低能耗、提升经济效益和环保效益的重要作用。





**Figure 4.** Process flow diagram for the dry-process system (a) and process flow diagram for the wet-process system (b)  
**图 4.** 干法运行系统工艺流程图(a)和湿法运行系统工艺流程图(b)

国家发展改革委等部门关于印发《钢铁行业节能降碳专项行动计划》的通知明确提出要加强钢铁行业余热能高效利用技术改造。从碳市场角度看，高炉煤气余压发电可实现零碳化能源回收，一座 5000 立方米的高炉每天可减少二氧化碳排放约 560 多吨，助力企业积累碳资产、节约购碳成本，富余配额还可交易获利。同时，区域能源结构也影响技术选择，在电价较高、能源对外依赖度高的区域，企业可应用 TRT 技术提升自身用电自给率，降低运营成本，而在电力资源丰富、电价低廉的中西部地区，部分企业可适当降低对 TRT 技术的优化投入，优先保障核心生产工序。

## 4.2. 高炉煤气 CO 制取

随着环保要求的日益严格，对煤气燃烧后的排放标准要求越来越高，高炉煤气中 CO 含量大，具有很高的利用价值[32]，高炉煤气中 CO 进行提取和利用方法日益增多。崔永康[33]针对高炉煤气中 CO 分离规律不清晰的问题，明确了 CO 吸附位点与分离选择性的关联，开发出对 CO 有强抵抗能力的 LiX 分子筛吸附剂；北大先锋与北京大学化学学院[34]合作开发了以铜系 CO 吸附剂 PU-1 为核心的变压吸附分离 CO 技术，建成全球首套高炉煤气变压吸附提纯 CO 工业装置；Gao 等[35]通过热力学分析，从碳固定率、CO 产率、CO<sub>2</sub> 原位利用率、CH<sub>4</sub> 转化率及能耗等方面对该工艺进行了研究，提出了一种利用高炉煤气通过化学链技术实现碳原位捕集与协同利用以制备 CO 的新工艺；Tao 等[36]提出了一套利用固定床从高炉煤气中分离富集 CO 的数学模型，给出了优化的操作参数：为获得纯度 > 55%且能耗更低的效果，推荐吸附压力 < 300 kPa、脱附压力 5~20 kPa、脱附温度 343~363 K；Flores-Granobles 等[37]开发并优化了一种变压逆水煤气变换化学链工艺(PS-RWGS)，实现从高炉煤气中制备富 CO 气流，确定系统压力在 1.05 bar 与 18.7 bar 之间切换，可从高炉煤气中回收 58%的 CO(每摩尔高炉煤气回收 0.13 摩尔 CO)；Oh 等[38]建立了四床层六步 CO-VPSA 的数学模型，模拟结果表明，在 60℃和 2.5~6.4 bar 的条件下，可实现 79.9~87.4 mol%的 CO 回收率(CO 纯度 > 90 mol%)，以及 71.8%~81.8%的 CO 回收率(CO 纯度 > 99 mol%)。

## 5. 转炉煤气利用研究现状

### 5.1. 转炉煤气燃烧利用

转炉煤气是转炉炼钢过程中产生的副产物，也是钢铁厂的重要二次能源[39]。转炉煤气由炉口喷出，

温度高达 1400℃~1600℃ [40], 对其进行高效余热回收, 可实现能量梯级利用, 进一步提升企业整体能源利用效率。全国碳市场将钢铁行业纳入履约范围后, 碳配额成本与 CCER 收益成为关键决策变量, 转炉煤气燃烧利用需要兼顾降碳与工序协同。高亚林[41]提出了转炉煤气预热废钢与高炉吹炼的回收利用技术, 回收效率为 85.30%, 能源节约率达到 25.20%, CO<sub>2</sub> 减排量为 0.51 kg/m<sup>3</sup>, 粉尘减排量为 1.25 g/m<sup>3</sup>, 突破传统煤气回收利用模式且效果明显; 赵忠东[42]提出新建转炉煤气柜并实施双气柜并联运行以稳定气源压力, 同时开发纯烧转炉煤气新用户、动态调控混烧配比, 构建稳定且多元的燃烧利用体系的综合解决方案, 消耗转炉煤气 14000~18000 m<sup>3</sup>/h, 提高了转炉煤气利用率; 张金鹏[43]开发了利用转炉炼钢初末期煤气预热废钢和高炉内吹炼两类利用方法: 在连续废钢预热工艺中实现废钢平均温度 570.3℃, 预热效率 38.3%, 并通过优化竖炉工艺参数提升了废钢预热温度; 在高炉内用转炉初末期煤气代替热风进行含铬钒钛矿软熔滴落试验, 配合加入废钢改善了炉渣性能, 且废钢比在 6%~8% 时含铬型钒钛磁铁矿的软熔滴落性能更佳; 石强[44]采用数值模拟与实验结合的方法研究分级燃烧对转炉放散煤气的燃烧效率, 发现空气中水蒸气浓度是影响 CO 高效燃烧动力学的主要因素; 王梓熠等[45]提出旋风分离器内部法, 强化了煤气与氧气的混合均匀度, 使前烧阶段燃烧效率从 74.64% 提升至 98.86%, 后烧阶段燃烧效率从 44.08% 提升至 95.05%, 实现了转炉低质煤气的高效燃烧。

## 5.2. 转炉煤气制甲醇

转炉煤气中 CO 体积分数可达 60% 以上, 将其作为化工工艺生产的原材料用于制取甲醇[46], 避免直接燃烧或放空造成的资源浪费与环境污染, 减少 CO<sub>2</sub> 排放, 实现资源高值化利用。刘建勋等[47]提出了用转炉气配焦炉气提氢制甲醇的工艺, 合成气氢碳比为 2.05~2.1, 与用焦炉煤气和转炉煤气生产甲醇相比, 成本低、操作简单、装置安全性较高且能耗低, 实现了资源高效利用; 熊江君等[48]针对焦炉气制甲醇工艺中原料单一的问题, 提出了配加转炉煤气的新工艺, 见图 5, 降低原料气中的 H<sub>2</sub>/CO, 有效提高了 CO 利用率, 降低了氧气消耗和原料气成本; 达钢企业[49]将收集、净化后的转炉煤气用于和焦炉煤气制取甲醇, 将制取甲醇产量提升 23%, 成本降低至 13%; 詹道平[50]利用钢铁企业生产过程中副产的焦炉煤气和转炉煤气为原料, 利用低压催化合成工艺(合成压力 5.3 MPa)生产甲醇, 经精馏提纯后得到纯度 98% 以上的甲醇。

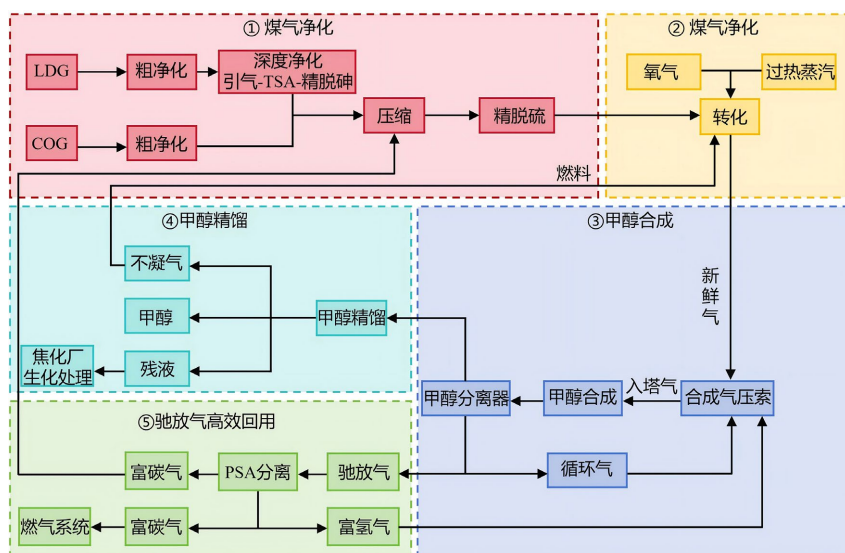


Figure 5. Flowchart of the methanol production process using a mixture of coke oven gas and converter gas [51]  
图 5. 焦炉煤气、转炉煤气混合生产甲醇工艺流程图[51]

转炉煤气的利用受环保政策、企业规模及碳市场成本的影响,区域差异化呈现显著的特征,在中西部地区,中小钢铁企业因资金实力有限,多采用直接燃烧方式,可快速回收煤气、降低短期投入,而在京津冀、长三角等大气污染防治重点区域,直接燃烧需配套高昂的脱硫脱硝设施,且碳减排效果有限、碳配额成本高,正逐步被转炉煤气制甲醇等技术替代,碳价持续提升也进一步推动该技术替代进程。

## 6. 总结与展望

1) 焦炉煤气中含有大量的  $\text{CH}_4$  和  $\text{H}_2$ , 制氢与制天然气路线已较为成熟,但仍存在甲烷化催化剂易失活、流程成本偏高、分离与转化效率难以兼顾等问题。但两条技术路线之间具备明显的梯级协同潜力,焦炉煤气高效分级利用体系通过“先提氢后甲烷化”的耦合方式,并配备抗积碳新型催化剂的开发,可实现各组分梯级高值转化。

2) 高炉煤气是尾气二次能源中占比最大的可燃气体,其中占比约 65%。高炉煤气余压发电与低热值燃料利用技术成熟度较高,但在化学能深度回收方面面临分离能耗高、系统稳定性不足等问题。研制模块化、小型化 TRT 成套装备适配中小型高炉,实现余压能的高效稳定回收。开展低热值、低浓度条件下 CO 的高效定向转化为低碳醇、甲酸等高附加值化学品,推动高炉煤气化学能高值利用,拓宽钢铁副产煤气资源化路径。

3) 转炉煤气具有 CO 产量大、热值高的特点,但其利用方式存在明显的区域分化,中小钢厂多以低效燃烧为主,规模化化工转化则受制于氢碳比例失衡、催化成本高、工艺集成度不足等问题。与其他煤气耦合利用成为提效的关键方向,转炉煤气多气源耦合制低碳化学品技术,通过优化氢碳配比、开发低成本非贵金属催化剂,推动从燃烧供热向高附加值化工利用转型。

## 基金项目

2025 年度省级大学生创新创业训练计划项目“基于转炉煤气燃烧反应机理及简化机理研究”(S202510081139)。

## 参考文献

- [1] 马慧君. 面向低碳冶金能源综合利用技术研究[J]. 冶金与材料, 2026, 46(1): 133-135.
- [2] 张仕通. 湛江钢铁煤气资源化利用经济性分析和减碳效果[C]//中国金属学会能源与热工分会, 东北大学. 第十三届全国能源与热工学术年会论文(摘要)集. 2025: 97-98.
- [3] 张仕通, 黄卫超, 邓万里. 湛江煤气回收利用技术实践[J]. 冶金动力, 2021(6): 31-33+36.
- [4] 梁鹏. 钢铁冶金企业煤气系统回收利用与优化管理[J]. 冶金管理, 2020(23): 141-142.
- [5] 李辉, 刘洪涛, 胡小林, 等. 煤气发电技术的研究现状及展望[J]. 现代工业经济和信息化, 2025, 15(2): 288-290.
- [6] 安玉磊, 孙乾. 与焦炉煤气协同的冶金低碳化探索[J]. 鞍钢技术, 2025(6): 38-44.
- [7] 白宗庆, 白进, 李文. 焦炉煤气综合利用及  $\text{CO}_2$  减排潜力分析[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(1): 90-94+100.
- [8] 冯想红, 靳虎, 黄帆, 等. 高氯工况下高炉煤气精脱硫装置适应性提升研究[J]. 工业炉, 2026, 48(1): 46-50+63.
- [9] 左国辉, 赵玉会, 付建国. 转炉煤气显热深度利用和节能降碳改造[J]. 煤化工, 2025, 53(4): 28-30.
- [10] 许保明, 李康. 焦炉煤气制液化天然气的主要危害及控制措施[J]. 化工管理, 2020(22): 127-128.
- [11] 高芝, 刘继雁, 许贵. 焦炉煤气合成甲烷技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(S2): 61-64.
- [12] 任可. 基于环境和经济视角的我国焦炉煤气的高值化利用[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2023.
- [13] 张超, 张元华, 郑振海. 冶金企业煤气高效利用的研究与应用[J]. 冶金设备管理与维修, 2024, 42(5): 42-45.
- [14] 常赵刚. 焦炉煤气综合利用现状和发展思路[J]. 煤化工, 2024, 52(4): 33-37.
- [15] 钱东良. 焦炉煤气制合成天然气(SNG)分析[J]. 山西化工, 2023, 43(5): 85-86+104.

- [16] 杜雄伟. 焦炉煤气制天然气工艺技术探讨[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2014, 39(4): 74-76+91.
- [17] 闫雪清. 焦炉煤气制甲醇、制天然气及制氢的分析比较[J]. 当代化工研究, 2023(8): 41-43.
- [18] 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.
- [19] 夏伟, 黎小辉, 白婷, 等. 甲烷重整与二氧化碳甲烷化的工艺耦合研究[J]. 工程科学学报, 2024, 46(11): 2110-2120.
- [20] 郭鹏宇, 张栢宁, 游传绪, 等. 光催化剂分解水制取氢气的研究进展[J]. 吉林大学学报(理学版), 2025, 63(1): 160-172.
- [21] 李志强, 王华, 李孔斋. 焦炉煤气制氢技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(4): 31-48.
- [22] 武丽云. 关于利用焦炉煤气发展氢能产业的思考[J]. 山西化工, 2022, 42(2): 134-136.
- [23] 那钦鹏, 高强, 石照江, 等. 焦炉煤气变压吸附制氢运行优化实践[J]. 冶金动力, 2025(5): 57-61.
- [24] 李智慧. 焦炉煤气制氢气技术研究与应用[J]. 石油和化工设备, 2026, 29(1): 80-83.
- [25] Wang, J., Chen, X., Liu, L., Du, T., Webley, P.A. and Li, G.K. (2024) Vacuum Pressure Swing Adsorption Intensification by Machine Learning: Hydrogen Production from Coke Oven Gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, **69**, 837-854. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.100>
- [26] 蒋双春. 钢铁企业高炉煤气管网运行特性及高效利用方法研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2024.
- [27] 谢福成. 高炉煤气余压透平发电装置检测维修与调试研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- [28] 吴丹, 赵双鹏, 黄金船, 等. 浅谈高炉煤气在鞍钢的发电利用[J]. 冶金与材料, 2020, 40(1): 157-158.
- [29] 殷健新, 勾昱君, 贵永亮, 等. 高炉煤气余压透平膨胀机转子动力特性[J]. 机械强度, 2023, 45(1): 9-15.
- [30] 陈琛, 贺龙龙, 杨海新, 等. 大型高炉余压发电湿改干技术增益炼铁绿色低碳转型的研究[C]//中国金属学会, 中国金属学会青年工作委员会. 第十二届中国金属学会青年学术年会暨首届“碳中和”冶金青年科学家沙龙论文集(一). 2024: 132-137.
- [31] 褚锦文. 高炉煤气余压透平发电装置回收发电[J]. 冶金管理, 2021(23): 62-63.
- [32] 郭玉华. 高炉煤气净化提质利用技术现状及未来发展趋势[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(7): 525-531.
- [33] 崔永康. 分子筛对高炉煤气 CO<sub>2</sub>/CO 分离捕集性能及机理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2025.
- [34] 杨扬, 李东周. 开辟高炉煤气利用新途径助推碳减排再添新利器全球首套高炉气提纯 CO 装置建成投产[J]. 中国石油和化工, 2013(11): 6.
- [35] Gao, Y., Xie, H., Sun, C., Qin, M., Wang, K. and Shao, Z. (2024) Thermodynamic Feasibility of Chemical Looping CO Production from Blast Furnace Gas Based on Fe-Ca-Based Carriers. *Processes*, **12**, Article 1965. <https://doi.org/10.3390/pr12091965>
- [36] Tao, L.R., You, Y.Y. and Liu, X.J. (2021) Numerical Studies of CO Separation and Enrichment from Blast Furnace Gas by Using a CuCl<sub>2</sub>/y Fixed Bed. *Ironmaking & Steelmaking*, **48**, 1187-1199. <https://doi.org/10.1080/03019233.2021.1948314>
- [37] Flores-Granobles, M. and Saeys, M. (2022) Dynamic Pressure-Swing Chemical Looping Process for the Recovery of CO from Blast Furnace Gas. *Energy Conversion and Management*, **258**, Article 115515. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115515>
- [38] Oh, H., Lee, S., Beum, H.T., Kim, J., Kim, J., Lee, S., et al. (2022) CO Recovery from Blast Furnace Gas by Vacuum Pressure Swing Adsorption Process: Experimental and Simulation Approach. *Journal of Cleaner Production*, **346**, Article 131062. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131062>
- [39] 宋伟明, 周建安, 李数, 等. 煤焦在转炉煤气中气化反应特性及动力学行为[J]. 工程热物理学报, 2026, 47(1): 342-347.
- [40] 宋翰林, 程功金, 刘建兴, 等. 转炉副产炉气的回收与综合利用现状[C]//中国金属学会. 第十三届中国钢铁年会论文集——9. 能源、环保与资源利用. 2022: 162-168.
- [41] 高亚林. 面向废钢预热与高炉内吹炼的转炉煤气回收利用方法研究[J]. 山西冶金, 2025, 48(8): 253-255.
- [42] 赵忠东. 提高转炉煤气回收及利用效率方式的探讨[J]. 现代工业经济和信息化, 2020, 10(4): 48-49.
- [43] 张金鹏. 转炉炼钢初末期煤气回收利用的新方法研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2021.
- [44] 石强. 转炉煤气高效洁净燃烧数值模拟与实验研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2020.
- [45] 王梓熠, 李森, 魏小林, 等. 炼钢转炉低质煤气在旋风分离器中的高效燃烧特性[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(11):

---

13-23.

- [46] 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.
- [47] 刘建勋, 张朋海. 用焦炉煤气和转炉煤气生产甲醇[J]. 燃料与化工, 2013, 44(1): 51-52.
- [48] 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, 45(2): 49-50.
- [49] 张东丽, 毛艳丽, 曲余玲, 等. 提高转炉煤气回收与利用的措施[J]. 冶金管理, 2011(4): 57-60.
- [50] 詹道平. 昆钢副产煤气合成甲醇/二甲醚的可行性研究[D]. [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.
- [51] 上官方钦, 干磊, 周继程, 等. 钢铁工业副产煤气资源化利用分析及案例[J]. 钢铁, 2019, 54(7): 114-120.