

钢铁副产煤气资源化利用技术及效益分析

何相君,雷 婧,彭宝祥,程义安,项裕桥*

(宁波中科远东催化工程技术有限公司,浙江 宁波 315040)

摘要:探讨了钢铁行业副产煤气的资源化利用路径,提出“钢化联产”的绿色产业链构建方案。针对年产 1 000 万 t 钢焦融合企业,通过煤气平衡测算得出可优化转炉煤气 13 亿 m³/a、焦炉煤气 16 亿 m³/a。研究设计了以副产煤气为原料生产甲醇、醋酸、双氧水和乙二醇的技术路线,并进行了成本效益分析。数据显示,焦炉煤气制甲醇较煤制甲醇成本降低 24%,转炉煤气制乙二醇成本较煤制降低 1 010 元/t,醋酸及双氧水成本分别降低 318、145 元/t,典型项目投资回收期在 1~2 a 间,展现了显著的经济优势。研究验证了钢化联产模式在资源整合、成本控制和环境效益方面的多重价值,为钢铁企业提升产品附加值提供了可行路径。

关键词:钢化联产;副产煤气;甲醇;乙二醇;成本分析

中图分类号:TQ542

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)06-0252-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.06.039

Technologies and comprehensive benefit analysis for resource utilization of steel by-product gases

HE Xiang-jun, LEI Jing, PENG Bao-xiang, CHENG Yi-an, XIANG Yu-qiao*

(Ningbo Fareasttech Catalyst Engineering Co., Ltd., Ningbo 315040, China)

Abstract: This study explores the resource utilization pathways of by-product gases in the steel industry, proposing a green industrial chain construction scheme through “steel-chemical integrated processes”. Targeting an integrated steel-coking company with an annual output of 10 million tons of steel, gas balance calculations reveal optimizable resources of 1.3 and 1.6 billion Nm³/year converter gas and coke oven gas, respectively. A technical route utilizing these gases to produce methanol, acetic acid, hydrogen peroxide, and ethylene glycol was designed, accompanied by cost analysis. Data indicate that methanol production from coke oven gas reduces costs by 24% compared to coal-based method. For ethylene glycol derived from converter gas, the cost reduction reaches 1 010 CNY/ton versus coal-based routes. Similarly, cost savings for acetic acid and hydrogen peroxide stand at 318 CNY/ton and 145 CNY/ton, respectively. Typical projects demonstrate a payback period of 1–2 years, highlighting significant economic advantages. The research validates the multidimensional value of steel-chemical co-production in resource integration, cost control, and environmental benefits, providing a viable pathway for steel enterprises to enhance product added value.

Key words: steel-chemical co-production; by-product gases; methanol; ethylene glycol; cost analysis

钢铁行业作为国民经济的基础性产业,市场规模十分庞大。中国的钢铁产量长期稳居世界首位,据世界钢铁协会数据,2023 年中国粗钢产量达 10.191 亿 t,在全球占比高达 53.86%^[1-2]。不过近年来,该行业面临着国内经济增速放缓带来的市场需求不足、环保政策趋严、原材料价格波动等多重挑战,导致行业整体经济效益出现下滑。

在企业效益整体下滑的条件下,如何挖掘企业潜力,提高钢铁企业的产品附加值、实现可持续耦合发展、推动钢铁企业副产煤气的高效资源化利用,已成为国内化工领域研究者亟待攻克的关键课题。在 2020 年 9 月政府提出“碳达峰”和“碳中和”双碳目标后,钢铁行业作为碳减排的重要领域,投入大量研发力量聚焦低碳冶炼技术创新,力图推动行业绿色转型。2021 年 10 月国务院印发的《2030 年前碳达峰

行动方案》提出了“推广先进适用技术,深挖节能降碳潜力,鼓励钢化联产”,明确了“钢化联产”是钢铁行业破解发展瓶颈、推动绿色低碳转型的关键路径,也是响应国家“双碳”战略、践行钢化联产与节能减排要求的核心课题,更是实现钢铁工业与新能源、新材料产业协同融合,迈向高质量可持续发展的必然选择^[3-4]。

1 钢化联产工艺路线分析

为实现钢铁行业升级转型,提出“钢化联产”技术创新模式,核心思路为:针对钢铁企业副产煤气资源利用率低、产品附加值不足的痛点,通过重构生产流程实现能源梯级利用。钢化联产即钢铁与化工耦合发展,在钢铁生产中,会产生大量副产煤气:高炉煤气、焦炉煤气和转炉煤气,这些煤气资源在钢铁企

收稿日期:2025-07-25;修回日期:2026-04-01

作者简介:何相君(1985-),男,硕士,高级工程师,研究方向为煤气及天然气净化,合成气制合成氨、甲醇、乙二醇等, hxj@nbzkyd.com;项裕桥(1970-),男,本科,高级工程师,研究方向为合成氨、甲醇、乙二醇、醋酸、丁辛醇等大宗化工产品,通讯联系人, xyq@nbzkyd.com。

业二次能源总量中占比约 40%,是重要的能源介质^[3]。目前,钢铁企业的副产煤气主要用于燃烧加热和发电,热效率不高仅为 30%~40%,根据表 1 副产煤气组成可知其含有大量碳氢元素,这些元素是合成化工产品的重要原料^[5-6]。

表 1 钢铁行业副产煤气组成表(体积分数) %

副产煤气	H ₂	CO	CO ₂	N ₂	O ₂	CH ₄	C _m H _n
焦炉煤气	55~	5~	1.5~	3~	0.3~	23~	2~
	60	8	3.0	7	0.8	27	4
高炉煤气	1.5~	23~	15~	55~	0.2~	0.2~	—
	3.0	27	19	60	0.4	0.5	—
转炉煤气	0.5~	50~	10~	10~	0.3~	—	0.2~
	2.0	70	25	20	0.8	—	0.6

钢铁行业副产煤气通过分离提取得到氢气、CO、CO₂、氮气等低成本高价值原材料,继而可生产甲醇、乙二醇、LNG、乙醇、氨、双氧水、醋酸、DMO、尿素等化工品(图 1)。但在很长一段时间,钢铁行业副产煤气分离提取成为难题。首先,由于杂质干扰严重,气体中含有硫(H₂S、COS)、粉尘、焦油、萘、氨等杂质,这些物质会腐蚀设备、堵塞管道,或使催化剂中毒,需复杂的预处理工艺。其次,低浓度碳氢的分离成本较高,高炉煤气中碳氢化合物浓度低,传统吸附、膜分离技术的能耗和成本较高,经济性差。而转炉煤气中碳氢元素含量极少,提取价值低,更倾向于利用其 CO 能量而非碳氢。因此,针对钢化联产这一技术密集型产业链,需要在分离提纯净化工序上做好相关工作。

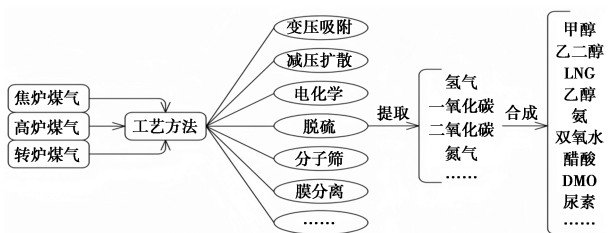


图 1 钢化联产产品工艺路线

经过多年的发展及相关科研人员的研究,目前,国内钢厂副产煤气的分离提纯技术已取得一定的突破。华菱衡钢高炉煤气提浓 CO 项目:2012 年设计建成 PSA 高炉煤气提浓 CO 装置,利用 Cu 系吸附剂从高炉煤气中分离提纯 CO。装置设计收得率 92%,CO 产品气浓度在 60%~70%可调^[7];鞍钢焦炉煤气制 LNG 联产氢气项目:通过分离提纯焦炉煤气制取高纯度氢气和 LNG,每年可生产 2 400 万 m³

氢气和 12.5 万 t LNG,实现了焦炉煤气的高附加值利用;石横特钢转炉煤气制甲酸项目:采用变压吸附分离一氧化碳技术,将副产的 45 000 m³/h 转炉煤气经除尘、压缩、脱硫等工序后,得到 18 200 m³/h 纯度为 98.5%的 CO 产品气,用于生产甲酸、草酸等化工产品^[8]。

虽然分离提纯技术及后续生产化工品各项技术本身已经成熟,化工产品种类及规模可根据各产品市场行情及工厂实际情况进行调整,在将煤气中 CO 和 H₂ 充分利用的基础上,以最大效益提高煤气附加值为目标,即可实现安全、稳定长周期运行^[9]。但真正实施还有一定的难度,核心难点在于成分复杂波动、杂质处理、低浓度分离经济性以及与原有系统的适配性。本文中根据掌握了解的行业动态及技术特点,结合以前所做项目的相关数据资料,整理出了一套钢化联产路径,并论述其优势,为传统工业转型提供一种参考。

2 钢化联产实例方案

以年产 1 000 万 t 的钢焦融合企业为实证对象,首先建立煤气平衡模型测算出可开发资源量,继而设计“煤气净化-催化转化-多联产加工”技术链,构建甲醇、醋酸、双氧水、乙二醇 4 类化工代表性产品的耦合生产体系(图 2)。采用对比分析法,系统论证煤气制化工品相较于传统煤化工的成本优势:通过建立全流程成本模型,揭示焦炉煤气制甲醇、转炉煤气制乙二醇成本下降的机理,并量化投资回收期等关键指标。最终形成“流程耦合-资源循环-多能互补”的产业协同范式,验证了政策导向下钢铁企业培育新质生产力的可行路径。

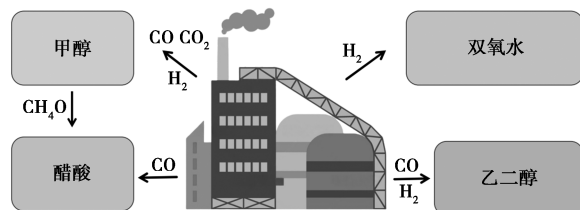


图 2 钢化联产副产煤气构建甲醇、醋酸、双氧水、乙二醇耦合生产体系

经煤气平衡测算,可优化出转炉煤气 13 亿 m³/a (162 500 m³/h)、焦炉煤气 16.38 亿 m³/a (204 750 m³/h)^[10]。采用以上优化出的转炉煤气和焦炉煤气,经净化、压缩、变压吸附、合成等工艺,生成高价值化工品:甲醇、醋酸、双氧水、乙二醇。工艺流程示意图如图 3 所示。

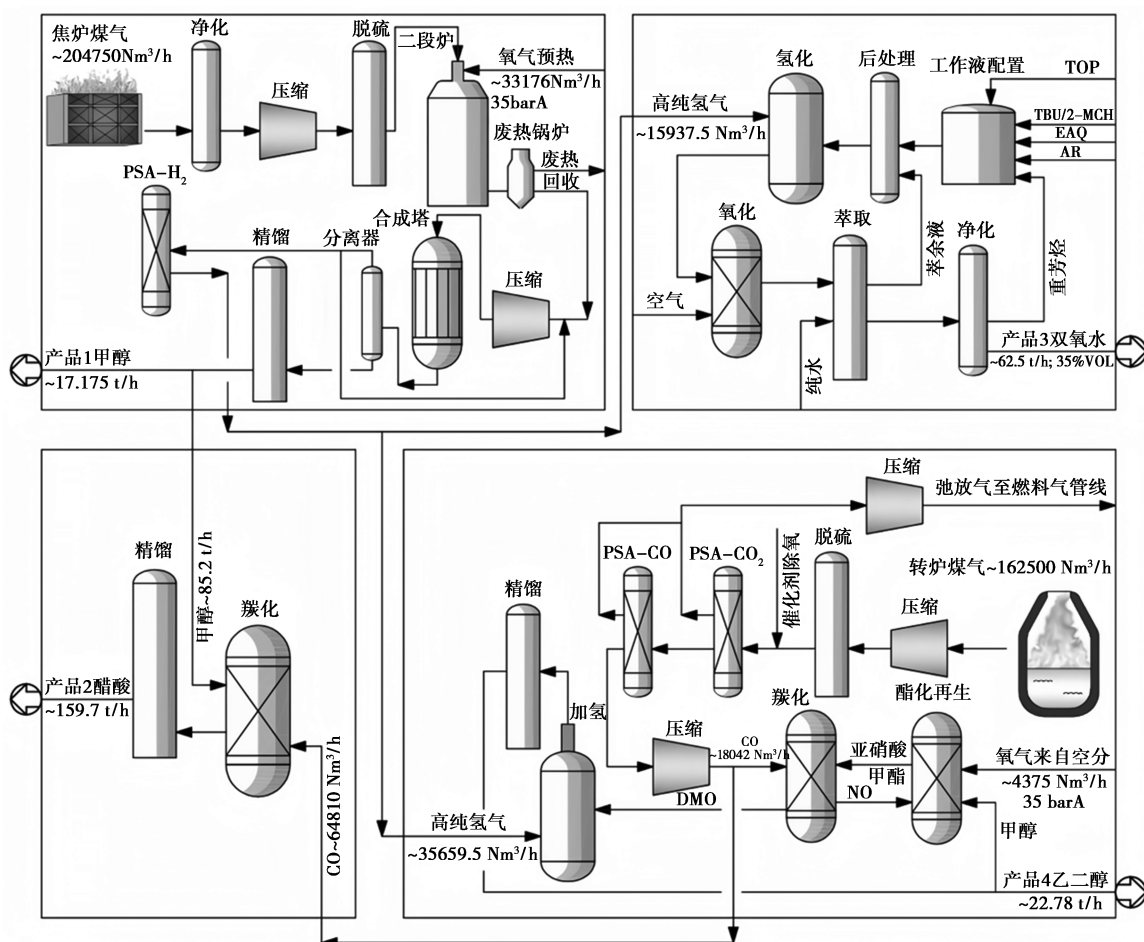


图 3 焦炉煤气、转炉煤气制甲醇、醋酸、双氧水、乙二醇工艺流程简图

204 750 m^3/h 焦炉煤气经净化压缩后,进入精脱硫装置进行深度脱硫、水碳比调节后送至纯氧二段炉进行转化反应,将焦炉煤气中的 CH_4 尽可能地转化为 CO 、 CO_2 和 H_2 ,之后废热回收至 40°C 去除合成气中的水分,送至压缩机升压后进入甲醇合成回路,经过分离、精馏得到甲醇,其中 85.2 t/h 甲醇送入醋酸装置的羰化单元与转炉煤气单元提取的 $64\ 810 \text{ m}^3/\text{h}$ CO 经羰化、精馏反应得到醋酸产品 2, 剩余 17.175 t/h 为甲醇产品 1。甲醇合成回路排放的弛放气进入 PSA-H_2 单元,分离出的 $15\ 937.5 \text{ m}^3/\text{h}$ H_2 送入双氧水装置氢化工序,与界外 2-乙基蒽醌(EAQ)、磷酸三辛酯(TOP)、重芳烃(AR)、四丁基脒(TBU)、2-甲基环己醇(2-MCH)工作液经氢化、氧化、萃取、净化得到双氧水产品 3,另一部分 $35\ 659.5 \text{ m}^3/\text{h}$ H_2 送入乙二醇装置草酸二甲酯加氢单元,同时 PSA-H_2 单元的解析气去燃料气管网。

$162\ 500 \text{ m}^3/\text{h}$ 转炉煤气经净化预处理后进入压缩机提压,提压后经过脱硫脱碳处理,然后进入 PSA 装置提取 CO ,分离出的 $64\ 810 \text{ m}^3/\text{h}$ CO 送醋酸装置

羰化单元后生产醋酸产品 4,另一部分 $18\ 042 \text{ m}^3/\text{h}$ CO 送入乙二醇装置羰化单元,来自界外的氧气、精馏返回的甲醇和羰化反应生成的氮氧化物反应生成亚硝酸甲酯(MN),含亚硝酸甲酯(MN)的气相经过甲醇洗涤后进入羰化反应,与转炉煤气制备来的一氧化碳气相合成粗草酸二甲酯(DMO),通过精馏分离得到精草酸二甲酯(DMO)后送加氢反应,与甲醇弛放气 PSA-H_2 提取来的 $35\ 659.5 \text{ m}^3/\text{h}$ H_2 气相加氢合成粗乙二醇(EG),通过精馏得到聚酯级乙二醇(EG)产品 4。

3 钢化联产系统评价指标

钢化联产模式在资源整合、成本控制和环境效益方面展现出多重价值。本研究从甲醇、醋酸、双氧水、乙二醇 4 大化工品经济价值以及资源整合、环境效益方面探讨钢化联产的优势。

3.1 甲醇产品优势分析

目前,国内甲醇化工品产能稳步增长,产量也大幅提升。2024 年,我国甲醇产能达 $109\ 77.6 \text{ 万 t/a}$,

同比增长 3.4%;产量为 9 182.2 万 t,净增 865 万 t,同比增长 10.4%,创下近 7 年来的最高纪录。从生产工艺来看,煤制甲醇产能占比 78.3%、产量占比 83.9%;而焦炉煤气制甲醇产能占比仅 14.4%,产量占比 11.3%,还具有较大的提升空间。

副产焦炉煤气中的 CO、CO₂ 组分通过催化加氢技术转化为甲醇等低碳醇类,是提升焦炉煤气附加值的关键路径之一。该工艺不仅契合资源高效利用的原则,还被视作一种缓解全球变暖、推动经济可持续发展的潜力方案^[11-12]。焦炉煤气本身富含氢气这一特性,使其催化合成甲醇具有显著的先天优势。作为基础化工原料,甲醇可进一步深加工,转化为烯烃、芳烃乃至汽油等高价化学产品,展现出广阔的市场应用前景,并有效提升了钢铁生产全流程的资源综合利用率。

按钢铁企业焦炉煤气自产成本价 0.313 元/m³,表 2 对比了焦炉煤气制甲醇与煤制甲醇的生产成本。由表 2 可见,焦炉煤气制甲醇路线成本更低、总投资更省(无需建设煤气化装置)。主要优势体现在折旧和维护成本上,这源于煤制甲醇投资规模较大。按图 3 流程所示,以焦炉煤气为原料的 80 万 t/a 甲醇项目,总投资约 8 亿元(不含土地费用)。当前甲醇市场价格为 2 300~2 500 元/t,若仅生产甲醇而不延伸下游产品,基本可在 1 a 内收回全部成本(表 3)。

表 2 焦炉煤气制甲醇与煤制甲醇生产成本对比

名称	焦炉煤气制甲醇成本			煤制甲醇成本		
	吨耗	单价/元	费用/元	吨耗	单价/元	费用/元
焦炉煤气/煤	2000 m ³	0.313	626	1.5 t	200	300
O ₂	324 m ³	0.5	162			
原水				10 t	5.2	52
电耗	960 kWh	0.54	518	778 kWh	0.54	420
H ₂	-504 m ³	0.83	-418	-183 m ³	1.4	-256
其他化学品及催化剂					50	50
人工			26			88
折旧			20			350
维护			23			155
合计			957			1159

注:表中数据为根据相关项目设计数据测算得来。

3.2 乙二醇产品优势分析

乙二醇作为基础化工原料,其下游产业链十分丰富,聚酯纤维、聚酯瓶片等产品的市场需求持续增长,带动着乙二醇的市场需求不断上扬。近年乙二

表 3 副产焦炉煤气制甲醇投入产出分析

投入	分类		价格/万元
	一次性投资		
年消耗			76560
产出	年产出	192000(按照 2400 元/t 价格计入)	
第一年收益			35440
第二年收益			150880

醇化工品生产呈现出蓬勃发展的态势,产能与产量稳步攀升,行业影响力不断增强。截至 2024 年,我国乙二醇产能已达 2 822.5 万 t/a,较以往实现明显增长;产量则达到 1 950 万 t,净增约 273 万 t,同比增幅 16.2%,产量及增长幅度均处于近年较高水平。在生产工艺上,煤制乙二醇与石油乙烯制乙二醇是 2 大主流路径。随着“钢化联产”、“固碳减排”等理念的持续推进,国内不少企业纷纷跟进布局。2020 年 7 月 1 日,山西沃能化工科技有限公司综合尾气制乙二醇联产 LNG 项目建成投产,是目前国内较大的焦炉煤气、转炉煤气等综合尾气制乙二醇项目,产能 30 万 t/a,符合 CCUS 技术路径要求,每年可减少碳排放 136 万 t,于是煤气制乙二醇成为国内化工行业的热点。

表 4 对比了焦炉煤气、转炉煤气制乙二醇与煤制乙二醇的生产成本。数据显示,煤气制乙二醇成本更低、总投资更省(相比煤制乙二醇无需建设煤气化装置)。按原煤市场价估算,煤制乙二醇的主要原料 H₂ 价格约 1.4 元/m³,CO 约 0.5 元/m³;而

表 4 焦炉煤气、转炉煤气制乙二醇与煤制乙二醇成本对比(以合成气为工艺源头计算)

名称	焦炉煤气、转炉煤气制乙二醇生产成本			煤制乙二醇生产成本		
	吨耗	单价/元	费用	吨耗	单价/元	费用
CO	792 m ³	0.37	293	792 m ³	0.5	396
H ₂	1565 m ³	0.83	1299	1565 m ³	1.4	2191
O ₂	192 m ³	0.5	96	192 m ³	0.5	96
甲醇	0.03 t	1500	45	0.03 t	2000	60
硝酸	0.0023 t	700	1.6	0.0023 t	700	1.6
蒸汽	4 t	150	600	4 t	150	600
循环水	400 t	0.4	160	400 t	0.4	160
电	500 kWh	0.54	270	500 kWh	0.54	270
人工			36			36
折旧			105			105
维护			256			256
催化剂			150			150
其他			448			448
合计			3760			4770

注:表中数据为根据相关项目设计数据测算得来。

按钢铁企业自产焦炉煤气(0.313 元/m³)、转炉煤气(约 0.088 元/m³)成本估算,煤气制乙二醇的 H₂ 价格约 0.83 元/m³,CO 约 0.37 元/m³。由此核算,焦炉煤气、转炉煤气制乙二醇每吨成本比煤制低 1 010 元,按 20 万 t/a 规模计算,年增收约 2.02 亿元。

再看石油制乙二醇路线:原油价 40 美元/桶时,吨成本与煤制乙二醇接近;原油价 60 美元/桶且标煤价 750 元/t 以下时,煤制乙二醇成本优势明显,但综合对比,钢铁联合企业副产煤气制乙二醇的价格优势仍更突出。

3.3 醋酸、双氧水产品优势分析

醋酸、双氧水作为重要的化工品,备受行业关注,其中醋酸的下游应用极为广泛,涵盖 PTA、醋酸乙烯、醋酸酯等多个领域。而双氧水主要应用于己内酰胺、造纸、环氧丙烷、磷酸铁等行业,这些主要下游行业的产能不断扩张,持续拉动着醋酸、双氧水的的市场需求。

在生产工艺方面,甲醇羰基化法制备醋酸,蒽醌法制备双氧水作为 2 种化工品主流工艺,分别占据市场产能 80%、85%,占据市场产量 90%、92%。钢化联产焦炉煤气制甲醇可提供 85.2 t/h 甲醇与转炉煤气产乙二醇提取 64 810 m³/h 的 CO 采用羰基化法制备 159.7 t/h 的醋酸,原料甲醇及 CO 价格分别为 1 500 元/t、0.37 元/m³,如按照煤制醋酸,原料甲醇及 CO 价格分别为 2 000 元/t、0.5 元/m³(以上价格为生产成本),按表 5 所示,选取原料甲醇、CO 产吨醋酸作对比分析,钢化联产煤气产吨醋酸可节约成本 318 元。

表 5 焦炉煤气、转炉煤气制醋酸与煤制醋酸成本对比

原料	焦炉煤气、转炉煤气制醋酸成本			煤制醋酸生产成本		
	吨耗	单价/元	费用	吨耗	单价/元	费用
甲醇	0.53 t	1500	795	0.53 t	2000	1060
CO	405.8 Nm ³	0.37	150	405.8 Nm ³	0.5	203
			945			1263
每吨醋酸可节约 318 元成本						

注:表中数据为根据相关项目设计数据测算得来。

钢化联产焦炉煤气副产 15 937.5 m³/h 高纯氢气,作为原料与界外 2-乙基蒽醌(EAQ)、磷酸三辛酯(TOP)、重芳烃(AR)、四丁基脒(TBU)、2-甲基环己醇(2-MCH)通过氢化、氧化、萃取净化得到 62.5 t/h(体积分数 35%)双氧水,其中 H₂ 原料价格为 0.83 元/m³,而采用其他路线法制双氧水,H₂ 原料价格约为 1.4 元/m³(以上价格为生产成本),由于其他生产原料价格相同,不详述分析,因此如表 6

所示,合计钢化联产煤气产吨双氧水可节约成本 145 元。

表 6 焦炉煤气制双氧水与其他路线制双氧水成本对比

原料	焦炉煤气制双氧水成本			其他路线制双氧水生产成本		
	吨耗	单价/元	费用/元	吨耗	单价/元	费用/元
H ₂	255 m ³	0.83	212	255 m ³	1.4	357
每吨双氧水可节约 145 元成本						

注:表中数据为根据相关项目设计数据测算得来。

3.4 资源整合、环境效益优势

钢化联产是整合资源利用、降低一次能源消耗、减少污染排放的高质量发展新模式。将钢铁厂与焦化厂近距离布局,副产煤气通过配套化工装置加工为高附加值产品,延伸产业链,提升了资源综合利用价值。同时可减少焦炭、煤气等物料的运输距离和费用,降低物流成本,还可共享公用设施,如供水、供电、污水处理系统,避免重复建设,节约固定资产投资和运营成本。且上下游生产计划协同,如根据钢铁产能调整焦炭产量,减少库存积压,提高资源周转效率。

环境方面,钢化联产可减少温室气体排放,能源梯级利用和高效循环(煤气替代煤炭)可降低单位产品的能耗,间接减少二氧化碳排放。部分联产项目可配套碳捕集利用设施,对焦化和钢铁生产中产生的高浓度二氧化碳进行回收,如用于化工合成、驱油等,助力“双碳”目标。

4 结论

综上所述,钢化联产构建甲醇、醋酸、双氧水、乙二醇生产体系,符合国家绿色发展规划及产业政策,该模式在经济效益与环保效益上具有双重竞争优势。从经济效益看,焦炉煤气制甲醇较传统煤制工艺成本降低约 24%;转炉煤气制乙二醇成本每吨降低 1 010 元;醋酸和双氧水因原料成本下降,每吨分别节约 318、145 元;典型项目投资回收期缩短至 1~2 a,显著优于传统煤化工项目。从环境效益看,该模式可实现显著碳减排,是碳中和的可选路径之一,其碳减排收益需结合未来钢铁行业碳市场价格估算^[13]。通过构建“钢铁厂+化工厂+发电厂”三联产体系,不仅提升了煤气资源利用率,更形成能源梯级利用的闭环系统。建议企业根据市场需求动态调整产品结构,建立煤气资源价格联动机制,同时配套建设碳捕集设施以进一步提升环境效益。这种产业协同创新模式,为传统重工业绿色转型提供了可复制的解决方案。

(下转第 261 页)

区以及大规模的氢气用户,通常对氢气的需求较大且需要保持不间断,为此可以建立输送管网充分利用管道的规模优势,但对于氢气需求不连续且最终用户分散的地区,可以考虑车辆运输的灵活性。

4 结论

基于 IAEA 开发的 HEEP 软件,对核能制氢不同储存和运输方案的经济性进行了研究,通过计算分析得到如下结论。

(1) 与 APWR 堆型相比,HTGR 堆型由于效率更高更具成本优势。特别的,当氢气的生产速率和储运方案一定时,与 HTGR 堆型耦合的高温蒸气电解制氢的平准化成本最低。

(2) 对于常规的电解,氢气的总平准化成本随制氢规模的增大而降低,即提升产能有利于提升经济性。同时相比于车辆运输,管道输送更具有规模优势,更适合大规模制氢。

(3) 氢气采用金属氢化物储存的成本远高于压缩气体或液体储存,且金属氢化物储存对氢气的总平准化成本贡献较大。对于氢气的运输,管道输送明显比车辆运输更具成本优势,且车辆运输存在间歇性和运输能力受限等问题。

(4) 运输距离的增加对管道输送的成本影响较小,但对车辆运输的成本影响较大。对于短距离、小规模的输送,可以考虑管道或车辆输送,但对于远距离和大规模的氢气输送,管道输送更能体现规模效应和经济性优势。

参考文献

[1] 张平,于波,徐景明.核能制氢技术的发展[J].核化学与放射化

(上接第 256 页)

参考文献

- [1] 石春艳,张国帅,李益,等.碳中和背景下的钢化联产发展趋势[J].过程工程学报,2022,22(10):1317-1324.
- [2] 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.
- [3] 张琦,向婷,田硕硕.钢铁-化工联产系统构建及未来发展趋势[J].钢铁研究学报,2023,35(4):375-384.
- [4] 袁伟霞.构建钢焦融合钢化联产模式 推动绿色低碳发展[N].中国冶金报,2022-03-24(001).
- [5] 郭玉华,周继程.中国钢化联产发展现状及前景展望[J].中国冶金,2020,30(7):5-10.
- [6] 龙素安,吴楠燕.钢铁联合企业副产煤气资源化利用现状[J].燃料与化工,2023,54(2):42-45,49.
- [7] 顾光临.变压吸附法在高炉煤气提纯 CO 中的工业应用[N].中

学,2011,33(4):193-203.

- [2] 李永恒,陈洁,刘城市,等.氢气制备技术的研究进展[J].电镀与精饰,2019,41(10):22-27.
- [3] 王涵,李世安,杨发财,等.氢气制取技术应用现状及发展趋势分析[J].现代化工,2021,41(2):23-27.
- [4] 裴一,倪红军,吕帅帅,等.制氢技术的研究现状及发展前景[J].现代化工,2013,(5):31-35.
- [5] Şahin S, Şahin H M. Generation-IV reactors and nuclear hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(57):28936-28948.
- [6] 张平,徐景明,石磊,等.中国高温气冷堆制氢发展战略研究[J].中国工程科学,2019,21(1):20-28.
- [7] 曹军文,张文强,李一帆,等.中国制氢技术的发展现状[J].化学进展,2021,33(12):2215-2244.
- [8] Nikolaidis P, Poullikkas A. A comparative overview of hydrogen production processes[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67:597-611.
- [9] El-Emam R S, Khamis I. Advances in nuclear hydrogen production: Results from an IAEA international collaborative research project[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(35):19080-19088.
- [10] Khamis I. An overview of the IAEA HEEP software and international programmes on hydrogen production using nuclear energy[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(6):4125-4129.
- [11] El-Emam R S, Ozcan H, Dincer I. Comparative cost evaluation of nuclear hydrogen production methods with the Hydrogen Economy Evaluation Program (HEEP)[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(34):11168-11177.
- [12] Dewita E, Prassanti R, Widana K S, et al. Cost analysis of nuclear hydrogen production using IAEA-HEEP 4 software[C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021, 2048(1):012005.
- [13] Sorgulu F, Dincer I. Cost evaluation of two potential nuclear power plants for hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(23):10522-10529.
- [14] Abdalla A M, Hossain S, Nisfindy O B, et al. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 165:602-627. ■
- 国钢铁新闻,2019-12-12(05).
- [8] Guo Y, Lu J Y, Zhang Q, et al. Co-production of steel and chemicals to mitigate hard-to-abate carbon emissions[J]. Nature Chemical Engineering, 2024, 1:365-375.
- [9] 师少杰.钢铁与化工耦合发展技术研究及实践[J].煤化工,2024,52(3):40-42,51.
- [10] 袁伟霞.为什么说钢焦融合、钢化联产才是现实有效的减排新模式?[N].中国冶金报,2022-06-06(02).
- [11] Muhammad T, Rana J N M, Amani A, et al. The novel contribution of non-noble metal catalysts for intensified carbon dioxide hydrogenation: Recent challenges and opportunities[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 279:116755.
- [12] 闫小凤,周晗超,闫占辉,等.焦炉煤气催化制甲烷和低碳醇研究进展[J].洁净煤技术,2024,30(4):72-89.
- [13] 冯士超,秦子然,丁瑞锋.碳中和背景下“钢化联产”现状与前景[J].冶金经济与管理,2022,(3):48-50. ■