

基于生命周期评价的煤制甲醇 生产过程分析

秦翰男^{1,2}, 薛天山², 石应杰², 冯海弋³, 朱玲^{1*}

(1.北京石油化工学院环境工程系,北京102627; 2.中国环境科学研究院,北京100012;
3.北京建筑大学环境与能源工程学院,北京102627)

摘要:以国内某煤制甲醇企业的生产过程为例,通过生命周期评价和软件计算的方法,分析整个过程中的主要污染环节和主要污染物。计算结果发现,产生1 t煤制甲醇,气态污染物排放总量约为3 937 kg,其中CO₂占总排放量的98.71%,主要来源于工厂加工过程中煤炭燃烧时释放的CO₂,占比56.48%。废水排放总量为9.97 t,工厂加工煤制甲醇过程是废水排放的主要阶段,占总排放量的82.7%。对污染物进行环境影响潜质分析,煤制甲醇过程对全球变暖的影响最大,对光化学臭氧合成和粉尘的影响次之。

关键词:煤制甲醇;生命周期评价(LCA);环境影响;能源消耗;温室气体排放;工艺优化

中图分类号:X701

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)10-0247-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.10.039

Analysis of coal-to-methanol production process based on life cycle assessment

QIN Han-nan^{1,2}, XUE Tian-shan², SHI Ying-jie², FENG Hai-yi³, ZHU Ling^{1*}

(1.Department of Environmental Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102627, China;
2.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3.School of Environment and
Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102627, China)

Abstract: Taking the production process of a coal-to-methanol company in China as an example, main pollution links and main pollutants in the whole process are analyzed through life cycle assessment (LCA) and software calculation. It is found through the calculation results that as one ton of methanol is produced from coal, about 3 937 kg of gaseous pollutants will be discharged in total, of which CO₂ accounts for 98.71%. The emission of CO₂ mainly comes from the coal combustion in the factory processing, accounting for 56.48%. Total discharge amount of wastewater is 9.97 ton per ton methanol. Coal processing to methanol is the main stage to discharge wastewater, accounting for 82.7% of the total wastewater discharge amount. The potential environmental impact of pollutants is analyzed, it is found that among the impacts brought by the coal-to-methanol process, its impact on global warming is the biggest, followed by its impacts on photochemical ozone synthesis and dust.

Key words: coal to methanol; life cycle assessment (LCA); environmental impact; energy consumption; greenhouse gas emission; process optimization

2023年中国的甲醇产能达到了10 836万t,占全球甲醇产能的近59%。中国不仅拥有庞大的甲醇产能,同时也是全球最大的甲醇消费国,2023年消费甲醇量为8 403万t^[1]。甲醇的生产方法主要包括合成法、干馏法、天然气制甲醇等。相比较上述方法,煤制甲醇由于采用的原料是煤炭,有生产效率高、单位面积产量较大、生产成本低的特点,但同时还存在消耗能源过大和污染物排放过高的问题^[2-3]。

甲醇的广泛使用会减少一定的污染,但我国煤化工企业的分布主要取决于具体煤炭资源的分布,

制甲醇的过程会对产煤地区造成一定的环境影响,这其实是一种污染物的“转移”。我国许多产煤地区的水资源相对短缺,煤制甲醇会消耗大量的能源并且产生废水,这加剧了矿区的污染^[4]。生命周期评价(life cycle assessment, LCA)通过量化产品系统在各个阶段的能源消耗、排放物产生量、资源消耗等,来评估其对环境的影响,使人们可以全面了解一个产品或服务的环境影响,推动资源有效利用和环境保护^[5]。

目前, LCA作为一种多学科、多目标的工具,国

收稿日期:2024-12-05;修回日期:2025-08-10

基金项目:国家重点研发计划(2023YFC3708602)

作者简介:秦翰男(1999-),男,硕士生;朱玲(1975-),女,博士,教授,研究方向为煤化工污染减排技术方面的研究,通讯联系人, zhuling75@bipt.edu.cn。

内生命周期评价的对象范围广泛。谢晓刚等^[6]对煤基甲醇替代燃料 LCA 研究进展,重点分析了煤基甲醇在能源消耗、温室气体排放以及环境影响潜值方面的表现;朱玲等^[7]就煤制油的生产过程进行生命周期评价,重点讨论了煤制油过程中能源消耗、污染物排放以及环境影响潜值的评估;贾健波^[8]针对煤制烯烃废水排放零排放工艺进行生命周期评价,结合经济和环境的研究表明膜处理是关键环节,也可与其他工艺结合用来处理不同水质的废水。上述生命周期评价研究不仅提供了方法论和标准化指导,涵盖了实际研究和跨领域的比较,还证明了对煤制甲醇进行评价的可行性。

本文中通过对国内某甲醇企业某一自然年的数据统计进行 LCA 方法评价,可以识别出在煤制甲醇生产过程中对环境影响最大的环节,从而有针对性地采取措施和改善工艺减少对产煤地区的影响,企业可以针对性地改进工艺和对副产品以及污染物进行回收循环,实现经济效益与环境效益的双赢;也为行业提供了数据参考,有助于政府和行业组织制定更加合理的环境政策和标准,助力实现“碳达峰、碳

中和”目标^[1]。

1 目的与范围确定

1.1 研究对象

本文中以内某煤制甲醇企业为研究对象,煤制甲醇过程是通过煤气化过程产生合成气进而再合成甲醇的热化学过程,主要包括备煤→气化→冷却洗涤→水煤气变换→酸气脱除→甲醇合成→甲醇精馏等主要工艺过程^[9]。计算数据以该厂某一自然年的原材料消耗以及产品产量为依据。

1.2 系统边界以及功能单位

煤制甲醇过程中会排放一定量的废气和废水,对煤制甲醇生产过程进行生命周期评价,目的是分析煤制甲醇过程中各个环节对环境造成的影响。所以,采用“摇篮到大门”的生命周期评价方法,评价系统边界包括煤炭开采分选、煤炭运输、原料加工、能源动力过程,系统边界如图 1 所示^[10]。由于成品后续使用过程具有多样性,因此生命周期分析不涉及成品输送及使用过程中能量消耗和污染物的排放^[11]。

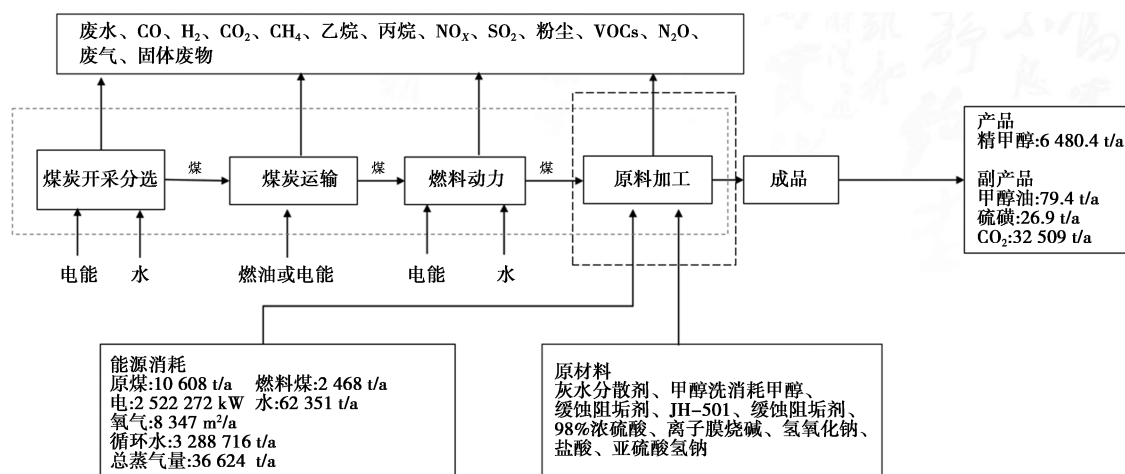


图 1 煤制甲醇系统的边界及物料数据

选择功能单位是确保生命周期评价结果的可比性和准确性,本研究的功能单位选取为 1 t 煤制甲醇。

2 输入输出清单

关于生命周期评价数据来源,主要分为 2 部分:一是排放因子参数,来自《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》^[12],GB 13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》^[13],同时辅以典型煤化工企业生产的数据、国内外文献作为参考;二是来自企业的生产、使用及运输数据,这部分数据来自生产现场采

集和企业的公开数据报告。

3 清单分析

3.1 煤炭开采加工过程中的污染物排放

统计年度全厂合成甲醇耗原料煤 10 608 t,燃料用煤 2 468 t,总耗煤为 13 076 t,共生产甲醇类产品约 6 559.8 t,则 1 t 甲醇类耗煤约为 2.02 t。根据相关手册,企业废水排放计算按规模超过 30 万 t/a,采矿技术选用井工开采的方法,废水末端治理技术采用化学混凝沉淀法,企业所在地为 I 类地区,则根据耗煤量计算生产 1 t 甲醇的废水量为 1.313 t^[14]。

根据煤炭在开采、洗选(包括坑口附近的短距离运输)阶段的排放清单,可以分别计算煤炭在2个阶段的排放量。

煤炭开采部分的排放量:

$$F_{\text{煤矿开采}} = Q_{\text{总}} \times \eta_2 = G \times \eta_1 \times \eta_2 \quad (1)$$

煤炭洗选部分的排放量:

$$F_{\text{煤矿洗选}} = Q_{\text{总}} \times \eta_3 = G \times \eta_1 \times \eta_3 \quad (2)$$

式中, $Q_{\text{总}}$ 为生产1 t煤放出的总热量,MJ; G 表示制1 t甲醇所用煤炭的重量,为2 020 kg; η_1 为每1 kg的煤炭燃烧转化成的热量,kJ/kg; η_2 为开采部分煤炭燃烧每产生1 MJ的热量所带来的排放因子,g/MJ; η_3 为洗选部分煤炭燃烧每产生1 MJ的热量所带来的排放因子,g/MJ。

$$F_{\text{排放总量}} = (F_{\text{煤矿开采}} + F_{\text{煤矿洗选}}) / (1 - \eta_4) \quad (3)$$

根据煤炭开采加工过程能耗和我国中国火力发电燃料燃烧污染物排放强度,结合我国燃煤工业锅炉平均排放因子, η_4 表示我国目前煤炭洗选和开采过程中平均损失率,为25%。

根据《锅炉大气污染物排放标准》GB 13271—2014,企业工业废气量为10 000 m³/t,根据SO₂、NO_x和PM10排放限值,计算气态污染物SO₂、NO_x和

表1 煤制甲醇过程原材料加工过程污染物的排放煤制甲醇

项目	灰水分散剂	甲醇洗消化甲醇	缓蚀阻垢剂 JH-500	离子膜烧碱	氢氧化钠	98%浓硫酸	盐酸	合计
工业废水量/t	5.658×10 ⁻³	5.830×10 ⁻⁴	5.865×10 ⁻¹	6.480	1.620×10 ⁻¹	7.650×10 ⁻²	4.080×10 ⁻¹	7.719
化学需氧量/t	1.725×10 ⁻⁷	5.720×10 ⁻⁸	8.328×10 ⁻⁴	6.239×10 ⁻⁷	4.069×10 ⁻⁷	3.034×10 ⁻⁵	1.990×10 ⁻³	2.853×10 ⁻³
氨氮/t	—	1.760×10 ⁻⁸	4.623×10 ⁻⁶	—	—	—	—	4.641×10 ⁻⁶
石油类/t	—	1.397×10 ⁻⁹	—	—	—	—	—	1.397×10 ⁻⁹
总磷/t	—	—	5.491×10 ⁻⁴	—	—	—	—	5.491×10 ⁻⁴
工业废气量/m ³	—	3.080×10 ⁻¹	—	2.484×10 ⁻²	6.210×10 ⁻⁴	1.445	7.520×10 ⁻³	1.786
二氧化硫/t	—	1.518×10 ⁻⁷	—	—	—	—	—	1.518×10 ⁻⁷
生化需氧量/t	1.139×10 ⁻⁷	—	—	—	—	—	—	1.139×10 ⁻⁷
颗粒物/kg	—	—	—	—	—	10.090	2.780×10 ⁻²	10.118

3.4 煤制甲醇过程能源动力等污染物的排放

根据《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》^[17],6 000 kW及以上电厂供电标准煤耗为305.5 g/kWh。1 t煤制甲醇耗燃料煤量为0.920 3 t,耗电389.22 kW。

发电过程废水按利用+直排的方式处理,废水排放量为:

$$F = Q \times \eta_9 \times \eta_{10} \quad (6)$$

式中, Q 为耗电量,kW; η_9 为电厂标准煤耗,t; η_{10} 为发电过程废水排污系数,t。

SO₂的处理方法为石灰石膏法脱硫技术:

PM₁₀排放量。

$$F_{\text{煤炭开采综合耗能}} = (G \times \eta_6 \times \eta_7 \times \eta_8) / (1 - \eta_4) \quad (4)$$

式中, η_5 为我国燃煤工业锅炉平均的排放因子; η_6 为工业废气量,m³/t; η_7 为排放限值,mg/m³。

3.2 采煤过程中运输相关的污染物排放

根据企业数据,煤炭运输阶段全程运输距离为100 km,对于中国的燃煤电厂来说,煤炭的调运方式包括铁路运输和公路运输,比例大约为7:3^[15]。运输阶段的污染物排放主要来自于燃料燃烧(汽油和柴油)的排放。不同的运输方式,燃料种类、能源强度及燃料燃烧排放系数均不同^[16]。

$$F_{\text{煤炭运输}} = F_{\text{铁路运输}} + F_{\text{公路运输}} = G \times (L_{\text{铁路}} \times \eta_{\text{铁路}} + L_{\text{公路}} \times \eta_{\text{公路}}) \quad (5)$$

式中, G 表示制1 t甲醇所用煤炭的重量,为2.02 t; L 为运输的距离, $L_{\text{铁路}}$ 取70 km, $L_{\text{公路}}$ 取30 km; $\eta_{\text{公路}}$ 为公路运输过程中污染物的排放因子,mg/(t·km); $\eta_{\text{铁路}}$ 为铁路运输过程中污染物的排放因子,mg/(t·km)。

3.3 煤制甲醇过程原材料加工过程污染物的排放

根据按产排污系数进行计算,原材料加工过程污染物的排放量=产排污系数×单耗,结果如表1。

$$F_{\text{SO}_2} = (-0.227Sar^2 + 1.789Sar + 0.002) \times t \quad (7)$$

排污系数为17 Sar,Sar表示煤中全硫分含量,根据动力煤国家标准和全国煤种平均含硫量,Sar通常取1.2%, t 为生产1 t甲醇煤炭的耗煤量。

烟尘为安装静电除尘法,排放量为:

$$F_{\text{PM}} = (0.00026Aar^2 + 0.022Aar + 0.01) \times 1.0 \times t \quad (8)$$

排污系数为8.93 Aar,Aar表示煤中灰分含量,根据动力煤国家标准和全国煤种平均含硫量,Aar通常取13.13%。

NO_x按低氮燃烧+烟气脱硝组合技术进行处理,

燃煤过程 CO₂ 排放量是根据发电能耗和煤燃烧的 CO₂ 进行计算。蒸气生产以煤和水为原料,产生的蒸气可以被回收并用于加热反应器、预热原料或作为其他工艺的热源,因此不再进行单独的计算。

3.5 煤制甲醇过程相关的污染物排放

由于我国煤制甲醇项目较少,暂时缺乏污染物排放的统计数据,没有煤制甲醇相关的污染物的排放系数。煤炭在煤制甲醇过程中的碳排放,可以通过煤炭中潜在碳排放量减去烯烃中的潜在碳排放量计算得出。

$$F_{\text{单位煤炭燃烧}} = (44/12) \times CC_{\text{FC}} \times FOR_{\text{FC}} - (44/12) \times CC_{\text{FC}} \times \eta_e \quad (9)$$

式中, CC_{FC} 为煤炭的含碳量,取 24.74 g/MJ; FOR_{FC} 为煤制油工业过程中的碳氧化率,取 90%; CC_{FN} 为煤制汽油的含碳量, g/MJ; η_e 为煤制甲醇(间接氧化)的能量转化效率,按能量转化计算,取 54%。甲醇的含碳量是柴油的 44%。对于 CC_{FN} 来说,柴油单位体积含碳量 C 与柴油密度 d 之间存在线性关系,

柴油的密度计算时取为 0.84 kg/L,在数值上二者关系可表述为 $C = 0.870\ 553\ 8d - 0.009\ 476\ 8$,工厂加工排放的 CO₂ 计算公式与煤炭燃烧过程的公式一致,柴油的燃烧热值为 42.9 MJ/kg,计算得出柴油的 CC_{FN} 为 20.027 g/MJ,甲醇的 CC_{FN} 为 8.731 77 g/MJ。通过计算得出工厂加工过程中总排放的 CO₂ 为 2.216×10^3 kg。

废气处理方法与计算煤制甲醇过程能源动力污染物排放废气处理相同,CH₄、NO_x、CO 和 VOCs 的排放则通过我国燃煤工业锅炉平均排放因子进行估算^[18]。

3.6 数据分析

由表 2 可见,气态污染物排放总量约为 3 937 kg,其中 CO₂ 占总排放量的 98.17%。煤制甲醇过程 CO₂ 排放总量约为 3.86 t/t。每个工艺过程所排放 CO₂ 量都不一样,主要来源于工厂加工过程,即煤炭转化为甲醇的过程。其中温室气体 CO₂、CH₄、N₂O 的总排放量占气态污染物排放量的 99.61%。

表 2 煤制甲醇项目各阶段的排放

kg/t

项目	CO ₂	CH ₄	NO _x	SO ₂	粉尘	CO	VOCs	N ₂ O	合计
煤炭开采加工	788.670	52.387	0.412	0.277	0.055	0.096	7.700×10^{-3}	0.024	841.929
煤炭运输	45.838	—	0.020	0.049	0.044	0.167	—	—	46.118
原料加工	—	—	—	1.581×10^{-7}	10.120	—	—	—	10.120
工厂加工	2216.000	0.182	3.493	1.326	0.564	1.876	0.137	0.046	2223.624
能源动力过程	813.900	—	0.406	0.194	0.277	0.052	5.774×10^{-3}	—	814.835
合计	3864.408	52.569	4.331	1.846	11.060	2.191	0.150	0.070	3936.625

每个工艺过程所排放污染物的量都不一样,其中 56.48% 来源于工厂加工过程,能源动力过程和煤炭开采加工相差不大。对于原料加工过程所排放的 CO₂ 总量可忽略不计。每个工艺过程所排放的主要气态污染物都不一样。温室气体中的 CO₂ 和 N₂O 主要来源于工厂加工过程,CH₄ 主要来自于煤炭开采加工过程。常规大气污染物 VOCs、CO、SO₂ 和 NO_x 等,主要来自于工厂加工过程中煤炭的转化。粉尘主要来自于原料的加工和处理环节,可以在此环节设置除尘器。

煤制甲醇作为高耗能产业在生产过程中会消耗大量的煤炭资源和水资源。工厂加工,即煤制甲醇过程是废水排放的主要阶段,主要用的水能源有工业新鲜水、脱盐水和循环水,占总排放量的 82.7%,煤炭开采洗选过程排放废水占 14.1%,废水中可能含有煤化工过程中使用的化学品和粉尘、煤尘等悬浮物,部分水经过处理后可以回用于生产过程,减少

废水排放^[19]。煤制甲醇各阶段排放的废水统计及分布见表 3。

表 3 煤制甲醇项目各阶段废水排放量统计

项目	煤炭开采加工	原料加工	工厂加工	能源动力过程	合计
废水排放量/t	1.313	0.2405	7.719	0.0583	9.7918
比重/%	14.1	2.6	82.7	0.6	100

4 环境影响分析

4.1 环境影响潜值

由于各种气体污染物带来不同环境影响的贡献度也不同,因此用环境影响潜值来评估项目对环境可能造成的影响进行预测和分析,采取措施来减轻和管理项目可能带来的负面影响。通过加权计算出其总环境影响负荷,结果见表 4。

表 4 项目加权后的总影响潜值

影响类型	污染物	效应当量因子	排放量/kg	影响潜值/kg	标准化基准/(人·a ⁻¹)	权重因子	加权后影响潜值/PE
全球变暖(GW)	CO ₂	1	3864.408	3864.408	8700 kg(CO ₂)	0.83	0.494
	CO	2	2.191	4.382			
	CH ₄	25	52.569	1314.225			
	小计(折合为 CO ₂)			5183.015			
酸化(AC)	SO ₂	1	1.846	1.846	36 kg(SO ₂)	0.73	0.099
	NO _x	0.7	4.331	3.032			
	小计(折合为 SO ₂)			4.878			
富营养化(EP)	NO _x	1.35	4.331	5.847	61 kg(PO ₄)	0.73	0.070
光化学臭氧(POCP)	CO	0.03	2.191	0.066	0.65 kg(C ₂ H ₄)	0.51	0.411
	VOC	0.6	0.150	0.090			
	CH ₄	0.007	52.569	0.368			
	小计(折合为 C ₂ H ₄)			0.524			
粉尘(PM ₁₀)	PM ₁₀	1	11.060	11.060	18 kg(PM ₁₀)	0.61	0.375
废水污染	COD	0.23	2.853×10 ⁻³	0.00066	61 kg(NO _x)	0.73	0.070
	NO _x	1.35	4.331	5.8469			
	小计(折合为 NO _x)			5.847			
合计							1.519

由表 4 可知,煤制甲醇项目对全球变暖的影响最大,对光化学臭氧合成和粉尘的影响次之。全球变暖的气候变化主要和 CO₂ 和 CH₄ 等温室气体排放有关,光化学臭氧合成主要和 NO_x、CO 及 VOCs 等气体排放有关,减少相关污染物的排放可以有效减缓煤制甲醇过程对环境的影响。

4.2 基于软件对煤制甲醇生产过程进行分析

基于 LCA 的理论,运用软件模型对煤制甲醇的

生产过程进行生命周期评价,计算生产 1 t 煤制甲醇所产生的污染物。选用 IPCC 的评价方法及理论模型进行分析,结果见图 2。

通过对比发现,采用 LCA 方法和软件模型 IPCC 的评价方法计算生产过程 CO₂ 排放量数据分别为 3 864、3 970 kg,2 种方法计算的数值基本接近。其他气态排放物质也有一定的差异,可能是煤源不同所以煤的灰分和硫分不同造成的。

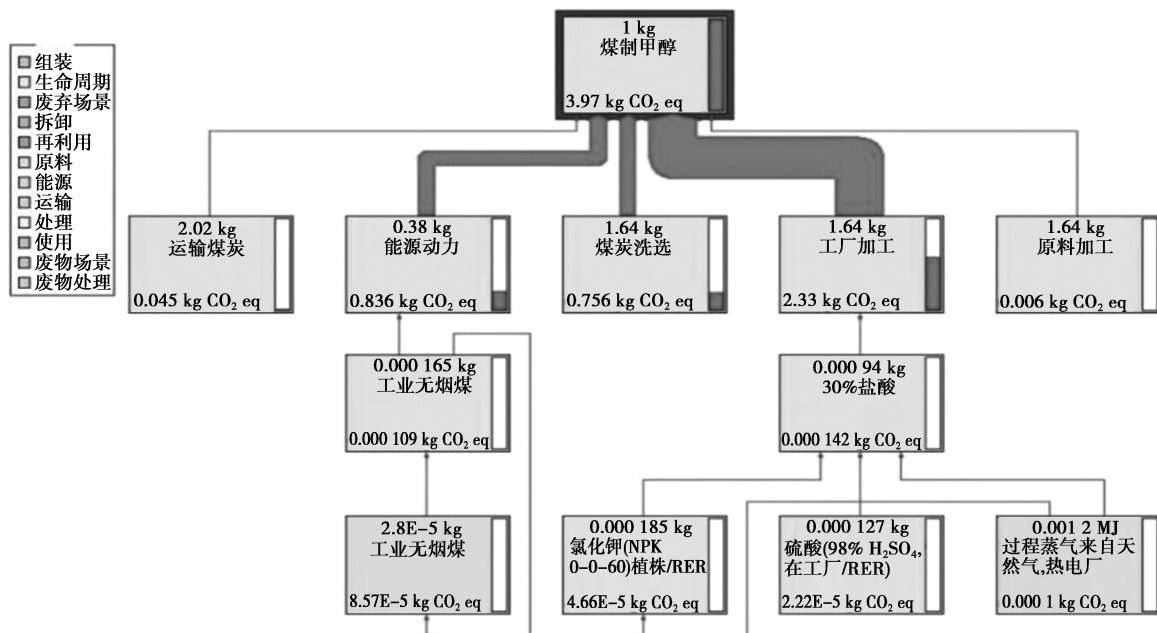


图 2 煤制甲醇过程 IPCC 方法评价二氧化碳排放量

5 工艺优化建议

根据评价结果,煤制甲醇工艺的绿色升级应重点把握原料煤监控管理、工艺过程控制和二氧化碳综合利用。减少煤制甲醇生产过程中 CO₂ 的排放是目前工艺应该解决的主要问题,可以采用和甲烷三重重整技术来实现低碳排放和高效率。甲烷三重重整技术结合了蒸气重整、干重整和甲烷的部分氧化 3 种基本重整技术,可以灵活调节合成气的 H₂/CO 比率,以适应不同化学品的生产需求。与传统工艺相比,新工艺的碳效率和烟效率分别提高了 50.94% 和 15.16%, CO₂ 被循环利用直接排放量减少了 98.06%^[20]。除了调整 H₂/CO 比率使它更高效产生反应外,还可以调整催化剂的类型。钢基催化剂相比于传统的铜基催化剂,不仅在高温条件下有更好热稳定性,而且钢基催化剂能够达到较高的甲醇选择性,能够更有效地抑制副反应的发生^[21]。

煤制甲醇的生产中需要大量的循环水对设备进行冷却处理,并且气化装置也需要大量的循环水维持生产。企业为了提升水资源的利用效率,可以通过合成蒸气提升压力,从而促进循环为系统提供动力,或者冷凝水来实现回收循环^[22]。同时对于污染物的处理应该重视回收利用环节,最大的环保就是回收利用再循环,这样不仅可以减少原材料的浪费,还可以最大限度地减少环境污染。

6 结论

(1) 通过 LCA 评价的基本方法对煤制甲醇生产的全过程进行清单分析,每个工艺过程排放的主要气态污染物的类型都不同。根据计算各阶段的排放污染物的量可知,废水和温室气体的排放主要集中在工厂加工阶段。

(2) 生产 1 t 煤制甲醇,CO₂ 排放量约为 3 864 kg,折算后温室气体排放约为 5 183 kg。IPCC 的评价方法计算生产过程 CO₂ 排放量为 3 970 kg,2 种评价方法都在工厂加工过程占较大比重。可以改进煤气化技术,如采用甲烷三重重整技术,减少煤气化过程中的能源消耗和 CO₂ 排放。

(3) 生产 1 t 煤制甲醇,酸化气体量为 4.878 kg,富营养化成分为 5.847 kg,产生的光化学臭氧为 0.524 kg,粉尘量为 11.06 kg。煤制甲醇产业过程中温室气体和光化学烟雾排放量占比较大,也拥有较大的改进空间和发展潜力。

参考文献

- [1] 张鸿宇,周丽,张希良.我国现代煤化工产业现状及政策综述[J].现代化工,2018,38(5):1-5.
- [2] 王强,徐向阳.“双碳”背景下现代煤化工发展路径研究[J].现代化工,2021,41(11):1-3,8.
- [3] Zhao Y, Liu Q, Duan Y, *et al.* A multi-dimensional feasibility analysis of coal to methanol assisted by green hydrogen from a life cycle viewpoint[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 268: 115992.
- [4] 金玲,郝成亮,吴立新,等.中国煤化工行业二氧化碳排放达峰路径研究[J].环境科学研究,2022,35(2):368-376.
- [5] 卜庆佳,张媛媛,李俊杰,等.天然气/煤制乙二醇路线碳排放与经济分析[J].现代化工,2022,42(8):209-214,219.
- [6] 谢晓刚,姜小云,王黎明,等.煤基甲醇替代燃料生命周期评价研究[J].煤化工,2019,47(1):28-31.
- [7] 朱玲,冯相昭,孔佳雯.基于生命周期评价 LCA 的煤制油生产过程分析[J].洁净煤技术,2018,24(2):119-126.
- [8] 贾健波.煤制烯烃废水零排放工艺的生命周期评价及技术经济分析[J].山东化工,2023,52(2):212-216.
- [9] Yang Q, Zhang J, Chu G, *et al.* Optimal design, thermodynamic and economic analysis of coal to ethylene glycol processes integrated with various methane reforming technologies for CO₂ reduction[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 244: 114538.
- [10] 杨舒鸿,丁艳军.煤制天然气技术路线的全生命周期分析[J].现代化工,2012,32(9):4-7.
- [11] Liu H, Guo W. Comparative study on life cycle energy consumption, carbon emissions and economic performance of various coke-oven gas utilization schemes[J]. *Fuel*, 2023, 332: 125706.
- [12] 国务院第二次全国污染源普查领导小组办公室.排放源统计调查产排污核算方法和系数手册[M].北京:中国环境科学出版社,2021.
- [13] 生态环境部.GB 13271—2014.锅炉大气污染物排放标准[S].北京:中国环境科学出版社,2014.
- [14] 王钦卓,杨永忠.我国煤化工标准现状及展望[J].洁净煤技术,2019,25(6):61-70.
- [15] Li J, Zhang S, Nie Y, *et al.* A holistic life cycle evaluation of coking production covering coke oven gas purification process based on the subdivision method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 248: 119183.
- [16] 刘阳,吴秀章,刘永健,等.基于二氧化碳返炉的煤制天然气联产甲醇和乙二醇工艺研究[J].现代化工,2021,41(7):214-218.
- [17] 生态环境部.企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施[R].北京:生态环境部办公厅,2022.
- [18] Li C, Bai H, Lu Y, *et al.* Life-cycle assessment for coal-based methanol production in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 188: 1004-1017.
- [19] Shi J, Huang W, Han H, *et al.* Pollution control of wastewater from the coal chemical industry in China: Environmental management policy and technical standards[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 143: 110883.
- [20] 贺树民.粉煤气化耦合绿氢制甲醇过程经济性和减碳研究[J].现代化工,2024,44(9):1-5.
- [21] 徐敏杰,朱明辉,陈天元,等.CO₂ 高值化利用:CO₂ 加氢制甲醇催化剂研究进展[J].化工进展,2021,40(2):565-576.
- [22] 易学睿,王强,田华,等.我国煤化工产业水资源短缺问题分析与建议[J].现代化工,2023,43(11):10-14. ■