

# 石化化工行业低碳技术研究报告

能源化工处 副处长 **朱彬彬**  
低碳技术发展中心 主任

2022.9



**石油和化学工业规划院**  
China National Petroleum & Chemical Planning Institute

- 2020年9月22日，国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表讲话，承诺中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。习近平总书记的多次讲话、中央层面多次会议均高度重视碳达峰碳中和工作
- 《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》（中发〔2021〕36号）、《国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知》（国发〔2021〕23号）等文件为我国的碳达峰碳中和工作构建了基本宏观框架
- 实现碳达峰、碳中和，是以习近平同志为核心的党中央统筹国内国际两个大局作出的重大战略决策，是着力解决资源环境约束突出问题、实现中华民族永续发展的必然选择，是构建人类命运共同体的庄严承诺。这一目标必须实现也必将实现。未来我国能源化工系统及其变革路径必须以碳中和为基本刚性约束之一进行设计
- 一些局部地方和领域出现了运动式减碳的苗头。以碳中和为导向的创新技术大量涌现，鱼龙混杂。纠正运动式减碳最关键的办法是科学谋划减碳路径，而科学谋划减碳路径的前提是对减碳相关的技术进行科学评价。对各类减碳技术进行真伪甄别、优劣排序，才能在科学谋划减碳路径时做到心中有数

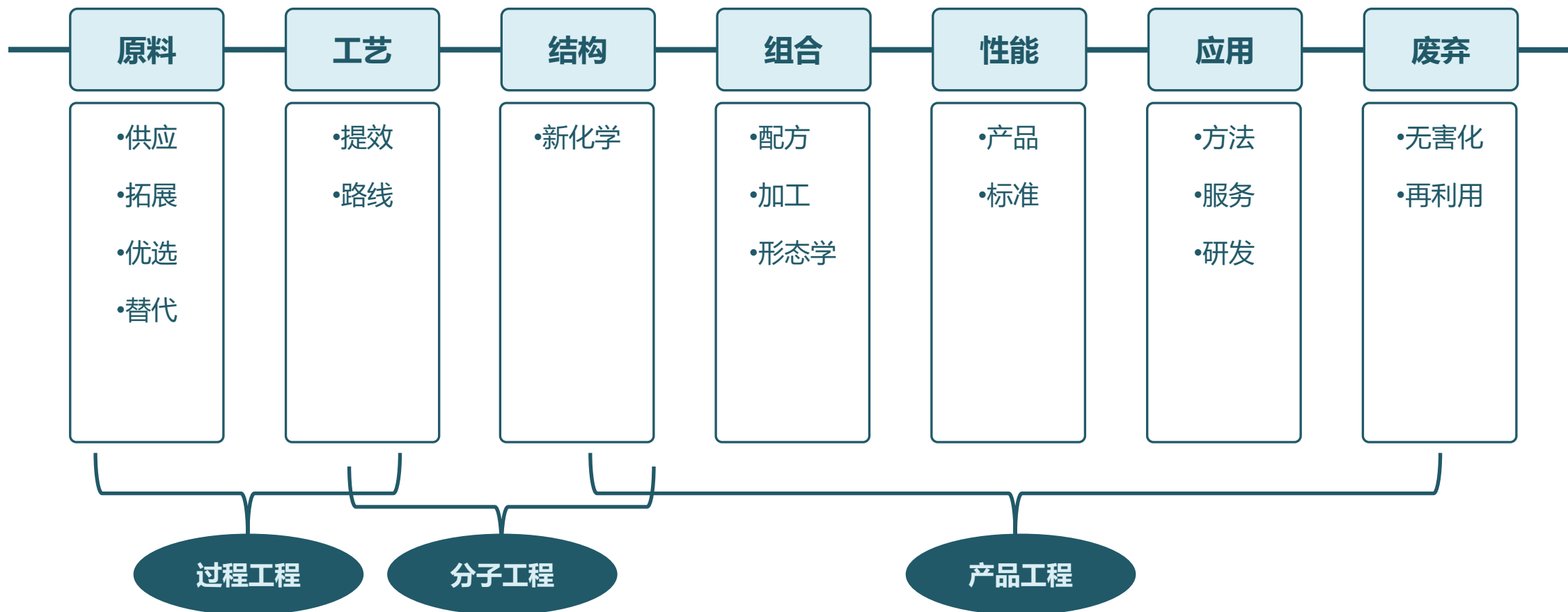
# 石化化工行业碳排放特征



## • 行业分布

序号	行业	产量	直接	间接	合计
1	炼油	70355	17659	5206	22865
2	乙烯	3817	3365	2528	5893
3	对二甲苯 (PX)	2193	0	3060	3060
4	甲醇	7766	19635	1510	21144
5	氮肥	5909	16976	2792	19767
6	磷铵	1581	0	1039	1039
7	电石	2810	3653	7306	10959
8	烧碱	3891	0	3200	3200
9	纯碱	2918	0	1910	1910
10	煤制乙二醇	360	792	1200	1992
11	煤制油	680	4454	109	4563
12	煤制天然气	44.53	2115	0	2115
13	轮胎	6.68	0	2304	2304
	主要行业合计		68649	30253	98902
	广义煤化工合计		47401	13155	60557

# 石化化工全生命周期低碳技术体系



## 01

### 技术路线调整

生产某种化学品时，采用不同的化学合成路径时其过程碳排放不同，通过技术路线由高碳路线调整为低碳路线可以实现低碳化发展。技术路线调整通常伴随原料路线调整

## 02

### 工艺过程优化

生产某种化学品时，在不改变化学合成路径的前提下对工艺过程进行优化，可产生低碳化效果。如新型催化剂、新型反应器、改变供热、取热方式

## 03

### 单元设备节能

针对某种具有共性的化工操作单元、化工用能设备进行的节能降碳优化，这一类技术不仅适用于某种化学品生产而具有一定的普遍适用性

## 04

### 系统优化技术

对全厂系统进行优化的节能降碳技术，这类技术具有普遍适用性，但其效果相对难以定量，不同企业潜力差别较大

## 05

### 波动适应技术

适应于可再生能源波动性特点、通过应用可以促进增量可再生能源消纳的化工技术。这类技术要求化工装置在局部进行频繁负荷调节，区别于传统化工装置设计理念。

## 06

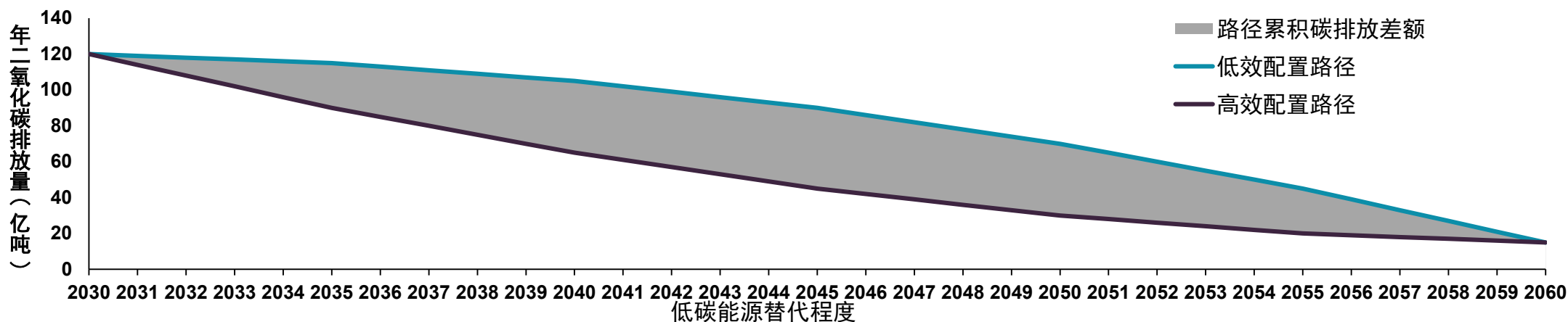
### CCUS技术

将CO<sub>2</sub>从能源、工业、生物质等碳利用过程或从大气中分离出来，直接加以利用或注入地层实现碳减排的工业过程。CCUS需要大量化工技术集成

# 技术路线调整的关键：低碳资源利用效率



- 某项技术，用低碳能源替代高碳能源的效率，用每减排1吨CO<sub>2</sub>所需的低碳能源来表示
- 分析：该指标是评价减碳技术的核心指标之一
  - ✓ 能源化工系统减碳过程规划的实质，是如何做好“两个替代”，即低碳能源替代高碳能源、可再生能源替代化石能源。其中，低碳能源主要指天然气，可再生能源主要指绿电。由于在我国的整个减碳过程中，天然气和绿电都是相对稀缺资源，降碳路径优化选择问题，本质上是天然气和绿电的边际增量如何高效配置的问题
  - ✓ 优先将天然气和绿电边际增量配置在减碳效率高的路径上，才可实现最速降碳路径，并降低碳中和全过程的累积碳排放





# 低碳资源利用效率



序号	减碳路径	用于替代的能源			被替代的能源			减少碳排放	
		能源种类	单位	数量	能源种类	单位	数量	单位	数量
1	以绿电替代煤电	绿电	kWh	1	煤炭	kg	0.382	kg	0.832
2	以绿电替代工业燃煤锅炉加热	绿电	kWh	1	煤炭	kg	0.174	kg	0.379
3	以绿电（热泵）替代工业燃煤锅炉加热	绿电	kWh	1	煤炭	kg	0.434	kg	0.946
4	以绿电替代工业燃煤锅炉蒸汽驱动	绿电	kWh	1	煤炭	kg	0.434	kg	0.946
5	以绿电制氢替代煤气化原料煤	绿电	kWh	1	煤炭	kg	0.135	kg	0.294
6	以绿电经甲醇制烯烃替代石油烯烃	绿电	kWh	1	石油	kg	0.045	kg	0.108
7	以绿电替代汽油车辆	绿电	kWh	1	汽油	L	0.400	kg	0.880
8	以绿电替代柴油车辆	绿电	kWh	1	柴油	L	0.285	kg	0.628
9	以绿电替代天然气原料气	绿电	kWh	1	天然气	m3	0.080	kg	0.167

# 过程低碳技术



- 炼油行业
- 乙烯行业
- PX行业
- 甲醇行业
- 氮肥行业
- 磷肥行业
- 电石行业
- 氯碱行业
- 纯碱行业
- 煤制油气行业
- 轮胎行业



## • 现状

- 2021年，国内原油一次加工能力8.86亿吨/年，原油加工量达到7.04亿吨，炼油开工率提高至79%。预计“十四五”末，我国炼油能力将达到9.5亿吨/年，原油加工量约8.0亿吨
- 2021年我国炼油过程碳排放系数平均为0.325tCO<sub>2</sub>/t原油，二氧化碳排放量合计约22865万tCO<sub>2</sub>e。其中，生产过程（催化裂化催化剂烧焦、连续重整催化剂烧焦、制氢等工艺过程）排放约占50%；燃料和火炬燃烧排放约占27%；净购入的电力和热力隐含排放量约占23%

## • 主要节能技术

- 应用渣油浆态床加氢等劣质重油原料加工、组分炼油及分子炼油、原油直接裂解、低能耗柴油液相加氢精制技术、低生焦催化裂化技术、采用冷再生剂循环催化裂化等节能技术
- 推动采用高效烟机，高效回收催化裂化装置再生烟气的热能和压力能
- 推广加氢装置原料泵液力透平应用，回收介质压力能
- 推进精馏系统优化及改造，采用智能优化控制系统、先进隔板精馏塔、热泵精馏、自回热精馏等技术，优化塔进料温度、塔间热集成等，提高精馏系统能源利用效率

## • 现状

- 2021年我国乙烯产能达到4191万吨/年，当年产量3817万吨，下游衍生物折乙烯当量净进口2291万吨，当量消费量6296万吨，当量自给率达到60.6%。预计到2025年产能超过6300万吨/年，当量需求增至8000万吨，当量自给率75%；到2030年产能将超过7000万吨，当量需求达到8500万吨，当量自给率超过80%
- 2021年蒸汽裂解制乙烯碳排放总量约4060万吨CO<sub>2</sub>

## • 技术措施

- 产业结构优化调整。原料优化调整，采用乙烷、液化气等轻烃裂解制乙烯
- 装置规模大型化，淘汰30万吨以下小规模装置
- 前沿技术开发应用。燃烧后碳捕集、氢燃料裂解炉技术（燃烧前碳捕集）。电热乙烯裂解炉。电力驱动乙烯三机。采用低温乙烷、丙烷、液化天然气（LNG）冷能利用技术，降低装置能耗
- 提高裂解炉热效率（成熟技术推广应用）。采用扭曲片管等裂解炉管和新型强制通风型烧嘴，降低过剩空气率，提高裂解炉热效率。采用裂解炉在线烧焦技术，减少燃料和蒸汽消耗
- 能量系统优化（成熟技术推广应用）。采用热泵流程，将烯烃精馏塔和制冷压缩相结合，提高精馏过程热效率。推广先进减粘塔减粘技术，提高超高压蒸汽产量，减少汽提蒸汽用量。增设空气预热器，利用乙烯等装置余热预热助燃空气，减少燃料消耗，合理回收烟道气、急冷水、蒸汽凝液等热源热量

- 现状

- 截止2021年底，国内PX总产能为2881.5万吨，当年产量2193万吨，进口依存度降至38.4%。预计2025年总产能达4500万吨/年左右，产量3825万吨，供应缺口在500万吨以内。2021年，PX生产二氧化碳排放量为3060万吨

- 技术措施

- 加强国产模拟移动床吸附分离成套（SorPX）技术，以及吸附塔格栅、模拟移动床控制系统、大型化二甲苯塔及二甲苯重沸炉等技术装置的开发应用，提高运行效率，降低装置能耗和排放
- 加强重整、歧化、异构化、对二甲苯分离等先进工艺技术的开发应用，优化提升吸附分离工艺并加强新型高效吸附剂研发，加快二甲苯液相异构化技术开发应用。加大两段重浆化结晶工艺技术和络合结晶分离技术研发应用
- 推动重整“四合一”、二甲苯再沸等加热炉及歧化、异构化反应炉优化改造，降低烟气和炉表温度。重整、歧化、异构化进出料换热器采用缠绕管换热器，重沸器和蒸汽发生器采用高通量管换热管等。采用新型高效塔板提高精馏塔分离效率，加大分（间）壁塔技术推广应用，合理选用高效空冷设备

## • 现状

- 2021年我国甲醇产能9743万吨/年，产量约7765万吨，表观消费量8846万吨。预计我国甲醇产能将继续保持增长趋势，将于2035年左右达到峰值。

序号	工艺技术		产能 万t/a	产量 万t	排放系数平均值 tCO <sub>2</sub> e/t	年排碳合计 万tCO <sub>2</sub> e
1	天然气	一段转化/两段转化	811	511	0.54*	276
2	烟煤	气流床	6448	5681	3.08	17520
3	无烟煤	固定床气化	1293	970	3.11	3018
4	焦炉气	纯氧非催转化	1192	604	0.57	345
合计			9743	7765		21159

## • 技术措施

- 应用半/全废锅流程气化、高效甲醇合成余压回收、节能型甲醇精馏等。采用热泵、热夹点、热联合等技术，优化全厂热能供需匹配，实现能量梯级利用。根据工艺余热品位的不同，在满足工艺装置要求的前提下，分别用于副产蒸汽、加热锅炉给水或预热脱盐水和补充水、有机朗肯循环发电，使能量供需和品位相匹配。根据适用场合选用各种新型、高效、低压降换热器，提高换热效率。选用高效机泵和高效节能电机，提高设备效率

## • 现状

- 2021年，我国合成氨和尿素产能分别为6488万吨/年和6540万吨/年，产量分别为5909万吨（实物量）、5563万吨（实物量）。合成氨消费呈现刚性支撑特点，2030年前规模将保持稳定
- 天然气蒸汽转化合成氨企业温室气体排放系数平均值为2.04tCO<sub>2</sub>e/t左右；非无烟煤为原料、采用水煤浆或干粉煤气化技术的合成氨企业温室气体排放系数平均值为4.27tCO<sub>2</sub>e/t左右；以无烟煤为原料、固定层气化技术的合成氨企业，温室气体排放系数平均值为4.22CO<sub>2</sub>e/t左右。总体测算，合成氨行业二氧化碳排放量约为2.20亿吨，如扣除尿素产品固定的二氧化碳，合成氨尿素整体二氧化碳排放量约为1.98亿吨。

## • 技术措施

- 氮肥行业可采取的重点节能降碳措施包括，应用一段炉烟气余热回收技术、燃气轮机技术、气流床加压气化、富氧气化技术、等温变换节能技术、氨合成回路分子筛节能技术、钨系催化剂氨合成技术、节能型尿素技术等节能降碳技术。实施鼓风机节电改造，应用新型氨合成塔内件，进行全循环尿素冷却蒸发式改造
- 根据适用场合选用各种新型、高效、低压降换热器，提高换热效率。选用高效机泵和高效节能电机，提高设备效率。采用性能好的隔热、保冷材料加强设备和管道保温

## • 现状

- 截至2021年，我国磷肥生产和消费已进入平台期，产能约2150万吨/年（折纯），产量约1581万吨（折纯），净出口554万吨（折纯）。产量和消费量均难有增长，磷肥表观消费量已下降至1000万吨/年左右。预计未来表观消费量将稳中有降。随着对高能耗产品出口管理趋严，预计磷肥产量也将有所下降
- 单位磷酸二铵产品碳排放平均值为0.166tCO<sub>2</sub>/t（不计磷酸碳排放，折100%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>），0.908tCO<sub>2</sub>/t（计磷酸碳排放，折100%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>）；单位磷酸一铵碳排放平均值为0.336tCO<sub>2</sub>/t（不计磷酸碳排放，折100%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>），0.539 tCO<sub>2</sub>/t（计磷酸碳排放，折100% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>）。全行业二氧化碳排放约为1040万吨

## • 技术措施

- 加强磷铵先进工艺技术的开发和应用。采用半水-二水法/半水法湿法磷酸工艺改造现有二水法湿法磷酸生产装置，推进单（双）管式反应器生产工艺改造。开发新型综合选矿技术、选矿工艺及技术装备，研制使用选择性高、专属性强、环境友好的高效浮选药剂。开发新型磷矿酸解工艺，提高磷得率提升磷酸选矿、萃取、过滤工艺水平，
- 强化过程控制，优化工艺流程和设备配置，降低磷铵单位产品能耗。采用磷铵料浆三效蒸发浓缩工艺改造现有两效蒸发浓缩工艺，提高磷酸浓缩、磷铵料浆浓缩效率，降低蒸汽消耗
- 加强余热余压利用和公辅设施节能改造



## • 现状

- 2021年，国内电石生产能力约3850万吨/年（不含约300万吨/年停产装置），产量约2810万吨，生产装置的平均开工率为73.0%（以有效产能计）。预计2025年以前全部淘汰内燃式电石炉，通过产能等量和减量置换，国内电石总产能控制在4000万吨/年以内
- 2021年，我国电石产量约2810万吨，二氧化碳排放量约10959万吨，其中工艺碳排放约为3653万吨，电等公用工程间接碳排放约为7306万吨

## • 技术措施

- 促进热解球团生产电石新工艺推广应用。加强电石显热回收利用技术、电石渣制活性氧化钙（石灰）技术、电石炉气热管余热回收技术、电石炉高效隔热蓄能技术研发应用。加快氧热法、电磁法等电石生产新工艺开发，适时建设中试及工业化装置。推进电石炉采用高效保温材料，有效减少电石炉体热损失，降低电炉电耗



## • 现状

- 2021年，我国烧碱生产能力约4507万吨/年，产量约3891万吨，装置开工率为86.3%。预计2025年和2030年国内烧碱产能将分别达到5000万吨/年和5300万吨/年左右，产量将分别达到4400万吨和4800万吨左右
- 2021年，我国烧碱产量3643.2万吨。行业耗电约914亿千瓦时。行业综合能耗1260万吨标煤，二氧化碳间接排放量约3200万吨

## • 技术措施

- 加强储氢燃料电池发电集成装置研发和应用，探索氯碱—氢能—绿电自用新模式。开展膜极距技术改造升级。推动以高浓度烧碱和固片碱为主要产品的烧碱企业实施多效蒸发节能改造升级。促进可再生能源与氯碱用能相结合，推动副产氢气高值利用技术改造
- 提高氯化氢合成余热利用水平。开展工艺优化和精细管理，提升水、电、汽管控水平，提高资源利用效率
- 开展针对蒸汽系统、循环水系统、制冷制暖系统、空压系统、电机系统、输配电系统等公用工程系统能效提升改造，提升用能效率

## • 现状

- 2021年底，我国纯碱装置有效生产能力约为3410万吨/年，其中氨碱法1625万吨/年，联碱法1605万吨/年，天然碱法180万吨。2021年我国纯碱产量2918万吨，开工率85.6%。2030年前我国纯碱生产能力仍有一定的增长
- 2021年，纯碱行业总能耗约730万吨标煤，二氧化碳排放量约为1910万吨

## • 技术措施

- 加大热法联碱工艺、湿分解小苏打工艺、井下循环制碱工艺、氯化铵干燥气循环技术、重碱二次分离技术等推广应用。采用带式过滤器替代转鼓过滤器，推广粉体流凉碱设备、大型碳化塔、水平带式过滤器、大型冷盐析结晶器、大型煅烧炉、高效尾气吸收塔等设备，推动老旧装置开展节能降碳改造升级
- 采用煅烧炉气余热、蒸汽冷凝水余热利用等节能技术进行改造。推动具备条件的联碱企业采用副产蒸汽的大型水煤浆气化炉进行改造，副产蒸汽用于纯碱生产
- 开展原料优化改造升级，加大天然碱矿藏开发利用，提高天然碱产能占比，降低产品能耗

## • 现状

- 2021年，我国煤制乙二醇产能716万吨/年，其中煤炭原料产能655万吨/年，焦炉气原料产能56万吨/年，电石炉气原料产能5万吨/年。产量约360万吨，生产装置平均开工率为50.3%。预计2025年和2030年国内煤制乙二醇（含焦炉气和电石炉气）产能将分别达到1000万吨/年和1200万吨/年左右，产量将分别达到500万吨和700万吨
- 二氧化碳排放量1992万吨，其中工艺碳排放约为792万吨，电、蒸汽等公用工程碳排放约为1200万吨

## • 技术措施

- 推广应用低位热能综合利用技术、煤制乙二醇废气废液联合焚烧技术、高效草酸酯合成及乙二醇加氢技术
- 采用高效压缩机、变压器等高效节能设备进行设备更新改造。采用热泵、热夹点、热联合等技术，优化全厂热能供需匹配，实现能量梯级利用。根据适用场合选用各种新型、高效、低压降换热器，提高换热效率。选用高效机泵和高效节能电机，提高设备效率

## • 现状

- 2021年煤制油产能823万吨/年，产量679.5万吨；煤制天然气产能61.25亿立方米/年，产量44.53亿立方米
- 2021年，煤制油二氧化碳排放量约为4563万吨，煤制天然气二氧化碳排放量约为2115万吨。煤制油气行业二氧化碳排放量合计为6678万吨

## • 技术措施

- 以能源安全需求为依据，严控煤制油气产业发展规模
- 建成装置实现安稳常满优高质量运行，采用对工艺装置进行节能改造，开发和应用性能更好的催化剂
- 新建装置采用最先进工艺提高能效水平，减少碳排放
- 在可再生能源丰富的地区，适当引入绿电、绿氢等，降低项目碳排放
- 根据工艺及加工方案特点，新建煤制油项目更多地生产化工品，减少下游应用环节碳排放

## • 现状

- 2021年我国的轮胎年产量6.6亿条，其中子午线轮胎产量约6.5亿条，子午化率96%，轮胎出口占产量40%；预计到2025年，国内轮胎产销量将达到7亿条；到2030年，国内轮胎产销量将达到7.5亿条
- 主要的二氧化碳排放来自于净购入电力、热力的排放，单位产品二氧化碳排放量基本水平为1.526吨，2021年，我国轮胎产量约6.68亿条，折重约1510万吨，轮胎加工行业二氧化碳排放量约2304万吨

## • 技术措施

- 推广湿法炼胶工艺。该技术简化了混炼工序与设备，吨焦可减少165kWh的电能，折算降低碳排放0.09吨。目前该技术在行业中应用比例约1%，到2030年，可能提升到10%
- 推广氮气硫化工艺。该技术采用蒸汽和氮气为加热介质，吨胶可减少0.6吨的蒸汽，折算降低碳排放0.18吨。目前半钢胎和全钢胎生产中该技术占比分别约45%和20%。预计到2030年，半钢胎和全钢胎生产中该技术占比分别将达到60%和80%

# 与波动性可再生能源相适应的化工技术



- 与波动性可再生能源相适应的化工技术是指适应于可再生能源波动性特点、通过应用可以促进增量可再生能源消纳的化工技术。
- 举例
  - 离网式（撬装式）绿醇、绿氨生产
  - 绿氢在大规模化工厂中的波动消纳
  - 化学品储能技术
  - 变负荷电解槽
  - .....
- 这类技术目前尚无成熟应用，亦无成熟评价方法。要探索建立评价其资产闲置、装置频繁变换操作状态等综合成本的方法。对化工装置消纳可再生能源波动性的综合成本与储能技术、调峰技术对比，得出是否经济的定性结论

# 碳捕集利用封存 (CCUS)



- 碳捕集利用封存 (CCUS)，是指将CO<sub>2</sub>从能源、工业、生物质等碳利用过程或从大气中分离出来，直接加以利用或注入地层以实现CO<sub>2</sub>减排的工业过程。CCUS技术要用到大量的化工集成技术。
- 举例
  - 液体吸收法
  - 固体吸附法
  - 膜分离法
  - 深冷法
  - CO<sub>2</sub>重整甲烷
  - CO<sub>2</sub>加氢制甲醇
  - CO<sub>2</sub>制可降解塑料
  - .....
- 该类技术评价要注意从全生命周期（含应用和废弃环节）评价减碳效益，并评价综合成本



- 技术路线调整
  - 技术成熟，减碳潜力大，需结合我国能源资源禀赋及外部能源供给长期趋势进行前瞻性布局
  - 替代路线按照替代效率由高到低的路线依次替代
- 工艺过程优化、单元设备节能、系统优化技术
  - 核心是节能，技术成熟，近期行业工作重点
  - 减碳潜力相对较小，约为过程排放的5-10%
- 波动适应技术
  - 技术不成熟，需进行开发、试验、优化，与以可再生能源为主体的电力系统相适应，发挥储能功能
- CCUS技术
  - 技术经济不成熟，需进行开发、试验、优化，自身行业&利用过程工程优势发挥化工作用服务其他行业

欢迎探讨交流，谢谢！

朱彬彬

能源化工处 副处长

低碳技术发展中心主任

010-64283252

13811931515

[zbb@npcpi.com](mailto:zbb@npcpi.com)



石油和化学工业规划院

China National Petroleum & Chemical Planning Institute