

Study on the Low Carbonization Ways of High Carbon Energy

Yuanyu Tian¹, Yingyun Qiao²

1. Chemical and environment engineering institute, Shandong university of science and technology, Qingdao, 266510, China

2. Chemical and environment engineering institute, Shandong university of science and technology, Qingdao, 266510, China

1. tianyy1008@126.com, 2. qiao_yingyun@126.com

Abstract: In this paper, the low carbonization ways are discussed of high carbon energy from the fossil energy source, the process and the terminal. The CO₂ emissions was avoided to produce through developing and appropriate choosing of raw material and technology from the source. The CO₂ emissions was reduced through energy saving and use reducing In the process of energy exploitation, production, use and end products used. The CO₂ emissions was eliminated superfluous by different appropriate capturing, using and storing of different concentrations to reduce CO₂ emissions or accelerate CO₂ circulation. On the side, the lower way of different fixation locations for CO₂ was discussed in Agriculture by the industrial and mining enterprises in biological carbon sequestration. It is the effective solution to the three problems of agriculture, rural areas and farmers. The way can meet the needs of CO₂ emissions for a long time in China.

Keywords: high energy; low carbonization; source; process; terminal; CO₂ emissions

高碳能源低碳化途径的探讨

田原宇¹, 乔英云²

1. 山东科技大学化学与环境工程学院, 山东青岛, 中国, 266510

2. 山东科技大学化学与环境工程学院, 山东青岛, 中国, 266510

1. tianyy1008@126.com, 2. qiao_yingyun@126.com

摘 要: 本文提出了从化石能源的源头、过程和终端三个方面分别探讨了高碳能源低碳化的途径。开发和选择适宜的原料和工艺, 从源头上避免产生 CO₂ 排放; 在能源开采、生产、使用和终端产品消费使用中节能降耗, 从过程降低 CO₂ 排放; 对不同浓度 CO₂ 废气采用不同的适宜捕集、利用和封存措施, 降低 CO₂ 排放或加快 CO₂ 循环, 从过程终端消除 CO₂ 过剩和累计。另外在生物固碳中提出了我国现阶段工矿企业利用农业异地固碳的低成本减排措施, 解决以工哺农和“三农”问题, 能够满足我国今后较长时间的减排任务。

关键词: 高碳能源; 低碳化; 源头; 过程; 终端; CO₂ 排放

1 引言

发展以低能耗、低污染、低排放为基础的低碳经济是社会可持续发展的必然选择。在我国一次能源消费中, 化石能源不仅占主导地位, 而且是以高碳性更强的煤炭为主。煤炭差不多占到 70%, 石油只占到 20%, 天然气更少, 只有 3.5%。在二次能源电力的消费中, 燃煤火电占到 77%, 水电占到 20%。即使在化工原料中, 煤炭也占到 50% 左右。这种消费现状是由我国的化石能源禀赋特点“多煤、少油、缺气”所决定

的。因此如何实现高碳能源的低碳化利用成为人们关注的热点, 特别是煤炭的高效清洁利用。本文从化石能源的源头避免高碳排放、过程减少碳排放和终端碳的利用与固定三个方面分别探讨了高碳能源低碳化的途径。

2 能源源头避免高碳排放

在现代工业生产中不论燃料还是化工产品的原料都有多种来源, 同时也对应着多种不同的匹配性工艺过程。由于达到同一目标, 不同的原料和工艺过程

对应不同的 CO₂ 排放, 因此针对具体的应用对象和原料开发和选择适宜的原料和工艺, 能够从源头上避免产生不必要的 CO₂ 排放。这是目前 CO₂ 减排最有效的途径, 主要通过国家政策和税收、产业结构调整 and 升级以及合理的能源定价机制和能源产品价格来实现。

以燃煤发电为例, 选择低灰精煤和合理的过剩空气系数就能有效降低烟气体量, 减少无效热量外排, 从而提高煤的利用率、减少 CO₂ 的排放。同样采用循环流化床燃烧发电、RGCC 和多联产发电、超临界发电等均能达到上述目的。

以合成甲烷工艺为例, 选择褐煤和长焰煤采用燃气型的鲁奇炉气化和循环流化床分级热解气化要比合成型的德士古气流床气化、壳牌气流床气化、四喷嘴对置气流床气化和航天炉生产的合成气甲烷含量高(约 10%左右)、氧耗低; 合成甲烷时产生较难利用的低温热源减少 10%以上。从整个合成甲烷工艺核算, 前者煤的利用率高、能耗和氧耗低, 同样规模的合成甲烷, 自然就减少了 CO₂ 的排放。对于循环流化床分级热解气化和液态排渣的鲁奇炉气化来说, 固态排渣相对换热容易, 水封用水量较低, 加之循环流化床分级热解气化相对鲁奇炉气化合成气不含煤焦油, 不会产生含酚废水, 因此循环流化床分级热解气化合成甲烷的工艺过程能耗更低, 更有利于避免高碳排放。

对于焦炭这一高耗能、高污染行业, 其产品 95% 以上用于炼铁。如果采用移动床原位气化炼铁工艺, 无烟煤粉和铁矿粉凝固造球, 移动床连续加料上部出煤气、下部直接还原熔融炼铁出铁水。这样炼铁无需焦炭, 省去了炼焦和炼铁团球化过程, 同时由于铁矿粉和无烟煤粉微细接触, 还原过程大大加快, 设备处理能力大约提高 50%以上, 能耗降低 40 以上, 解决了炼焦和团球化过程严重的环境污染, 避免了其能耗产生。

对于烯烃, 主要的生产工艺有轻质油高温炉裂解、重油催化裂解(CPP、HCC、HS-FCC等)、重油高温裂解、重油高温裂解气化、FCC 干气回收乙烯、甲醇制烯烃(MTO、MTP、FMTP等)以及天然气催化氧化制烯烃等。从原料角度来看, 天然气氢碳摩尔比接近 4.0、轻质油 1.8 左右、重油 1.6 左右、煤尚不足 1.0, 而烯烃氢碳摩尔比 2.0, 从元素利用率来看, 利用煤生产甲醇再制烯烃, 原料消耗和能耗最高, 吨产品排出 CO₂ 最多; 利用 FCC 干气回收乙烯和轻质油生产烯烃最为经济和节能。按照合理的能源定价机制和能源产品价格, 大规模生产烯烃工艺首选重油裂解

(催化或无催化) 工艺。现在急需解决的是乙烯低能耗分离(如络合分离工艺)、甲烷和乙烷制乙炔工艺和工艺过程中裂解焦的合理利用(如重油高温裂解气化)技术的开发和工业示范。

另外煤化工发展含氧化合物燃料和多联产工艺、民用燃料采用天然气、大力发展核能、水电、风能和生物能、化工行业大力实施循环经济、发展纯电动汽车等均能实现从源头避免高碳排放。

3 能源过程减少碳排放

能源在开采、生产、使用和终端产品消费全过程中, 各个阶段都需要能耗, 其产品都有一个使用效率, 尤其我国目前万元 GDP 能耗水平与发达国家有较大差距, 物理能耗水平约比国际先进水平高 20%至 30%左右。如 2002 年, 我国每千瓦时供电耗煤比国际先进水平高 67 克标煤, 每吨钢能耗水平比国际先进水平高 69 千克标煤, 每吨水泥综合能耗水平比国际先进水平高 44.3 千克标煤, 分别高出 21%、11%和 35%。另外生产的产品利用率偏低, 又变相地增加了能耗。通过优化设计, 使用高效节能的工艺设备、高效适宜的催化剂和合理使用优质产品均能实现节约能耗, 减少终端产品的使用量。减少终端产品的使用量就是相应减少了产品生产量, 避免生产这部分产品产生的能耗。节能降耗自然就减少了 CO₂ 的排放, 这是目前 CO₂ 减排最容易实现、成本最低并且具有较大收益的途径。各行各业节能降耗技术和产品枚不胜数, 均能通过自身调整和改造实现这一目标。

煤炭在开采中采用先进采掘机械和工艺以及高效的选煤工艺和设备均能提高效率, 降低能耗, 同时又降低了后续运输和使用的能耗。石油在开采过程中需要间歇式从地下抽送, 采用可间歇式操作的直线电机驱动往复抽油机要比现有油梁式抽油机更能根据地下原油渗透聚集的情况有效调节抽次, 提高采收率, 实现节能 40%以上。原油集输过程使用高效旋流式油水分离器、管道减阻剂、原油降凝剂、高效管道加热炉等均能降低输送成本和能耗。

对于现代煤化工的龙头—大型煤气化来说, 空分是投资和能耗均占气化工工艺 50%左右的必不可少的过程, 其产品主要是液氧, 副产的液氮只需使用部分产量, 其余的均比低效利用或排放。如果采用深冷分离为主的梯级分离工艺, 大部分氮气组成在低压端就作为产品气外送, 无需经过空气压缩机高能耗加压, 最终产品主要是液氧和部分液氮, 工艺所需的高压氧气

通过泵液体低能耗加压即可满足，这样大大降低了空气压缩机的处理量和能耗，从而达到降低气化工艺投资和能耗的目的。

以煤炭生产甲醇为例，相对于壳牌气流床、GSP气流床和航天炉德士古气流床干法气化，德士古和四喷嘴对置气流床等湿法气化可以等压合成，减少了合成气的加压能耗，更有利节能。与现有的激冷流程和部分流量变换控制相比，德士古和四喷嘴对置气流床等湿法气化采用废锅流程换热，低水汽比可控全流量变换除了节能，更有利于后续净化工艺。在甲醇生产中，如果采用高效催化剂和级间脱除的均温合成工艺或低温液相合成技术将CO单程转化率提高到90%以上单程合成甲醇，比现有仅有10%左右CO单程转化率的循环合成将大大提高设备的处理能力，大幅度降低甲醇合成能耗。

利用化石能源花费巨大的能耗和成本生产的氮肥，由于我国化肥产品落后、使用工艺不当和不合理施肥，利用率仅有30%左右，不到发达国家的一半，不仅造成了浪费，而且造成了严重的面源污染。如将现有的化肥改造为缓控增效肥料，并采用相应的耕作模式，就可提高作物产量和品质以及化肥使用效率，从而减少了肥料的消费量和生产这部分肥料的所产生CO₂排放。

化工行业合理选择高效催化剂以及分离、反应、换热和泵送高效节能设备，采用调频技术等可以大幅度降低能耗。蒸馏是化学加工工业中首选的均相体系分离技术，也是目前总能耗最大的化工分离过程。据估计，化工过程中40%~70%的能耗用于分离，而蒸馏能耗又占其中的95%，蒸馏的强化和节能显得尤为重要。如将梯形垂直长条帽罩与规整填料有机结合的NS倾斜长条立体复合并流塔板用于改造F1浮阀塔板，阀孔动能因子高达34，开孔率高达40%以上（国内外目前塔板最大开孔率仅为20%左右），提高处理能力2倍以上（目前国内外最高提高70%）、降液管通过能力3倍以上，降低板压降30%以上，同时提高板效率30%以上，操作弹性为4倍，解决了塔器大型化塔内件结构和安装难题。工业应用表明用于现有装置改造只需更换塔内件，就可实现处理量翻番扩能改造，节能50%以上，节省投资80%以上；用于新建装置降低投资40%以上。提高处理能力2倍以上的同时提高板效率30%以上的塔板，这在国内外尚属首例。

将工字钢双层错流复合穿流筛板与规整填料有机结合，充分利用塔内空间，增大气液接触相界面，开

发的适合于塔器大型化的“全混级”、高点效率、低压降、大通量的NS高效穿流式立体复合塔板，正常操作空塔动能因子高达2.41，压降不大于1Kpa，点效率高达95%以上，处理能力提高1倍以上，效率提高50%以上，解决了高效塔器大型化的难题，经结构力学计算无需复杂的支撑可满足16米以上超大型高效蒸馏塔结构需求；并在该塔板基础上建立了基于点效率的非平衡级模型，解决了现有精馏计算模型准确性差的难题，为将蒸馏学科从传统的凭经验、半经验过渡到依靠半理论以至理论提供了依据。

在建筑领域合理设计，可以大量节约钢材、水泥、石灰等高耗能高排放产品，节约化石能源的使用量；推广使用纯电动汽车，可以节约石油资源和使用成本，提高能源利用率，最有效的治理城市污染；开发和示范人造天然气家庭分散式能源系统，相对大一统的发电、输电和终端峰谷式的使用，可以大大提高煤炭的利用效率，从而实现减少CO₂的排放。各行各业节能降耗技术和产品枚不胜数，这是目前CO₂减排最容易实现、成本最低的途径。

4 能源终端的利用与储存

目前，大气中CO₂含量高达27500亿吨，每年在碳循环中的CO₂约6600亿吨，但每年因人类活动和森林退化额外产生257亿吨CO₂，这些未平衡的CO₂约占碳循环的3.9%，导致大气中CO₂的浓度从工业化前的270ppm到目前的380ppm，并作为主要温室气体引发了日益变化无常的气候问题，导致在过去的100年中全球平均地面温度上升0.3~0.6℃。从能源使用的终端—工业废气中进行CO₂捕集、利用和封存，降低CO₂排放或加快CO₂循环，这是迫不得已和最终解决CO₂减排的方法，也是国内外目前研究和开发的重点和热点。

工业排放的CO₂浓度高低不同，不能希望某种技术解决一切问题，应采用不同的利用与储存技术。

如煤化工和石灰等行业排放的高浓度CO₂（90%以上）采用捕集技术回收，通过制造干冰、用作合成尿素、水杨酸、环碳酸酯和聚碳酸酯等的原料以及CO₂驱采油、农业大棚CO₂气肥等，成本和能耗较低，具有减排和经济效益。

如发电和中小锅炉等排放的低浓度CO₂（13%左右），采用现有的物理和化学捕集工艺，进行地质封存、海洋深层储存和陆地蓄水层（或废油、气井）等，都存在成本高、难操作和可能引发其他环境灾难的问题；

矿石碳化封存尽管引起其他环境灾难可能性小，但自然发生过程非常缓慢，目前不具有工业应用前景。

生物 CO₂ 固定法就是将排放到空气或烟气中的 CO₂ 通过生物利用光合作用转化固定，释放氧气。这是地球上最主要和最有效的固碳方式，在碳循环中起决定作用，利用此法来进行 CO₂ 减排，符合自然界循环和节省能源的理想方式。香山科学会议第 279 次学术讨论会与专家专家认为，生物固碳是最安全有效、经济的固碳工程。能利用该法进行固碳的主要是植物、光合细菌以及藻类。

微藻具有光合速率高、繁殖快、环境适应性强、处理效率高、可控以及易与其他工程技术集成等优点，目前可获得高效、立体、高密度的培养技术，同时固碳后产生大量的藻体具有很好的利用价值，具有高度的工业化潜力，因此微藻 CO₂ 固定有望成为一种具有相当可行性和经济价值的 CO₂ 固定方法。

塔式立体养殖反应器微藻法生物固碳，并且利用副产微藻连续湿式制生物原油的技术，就是为了解决了立体化养殖的难题，向空间要地，满足像电厂这样的大规模工业集中排放源的实际情况而开发的一项捕集和利用 CO₂，通过制造生物能源，实现 CO₂ 资源化的技术。该技术利用电厂烟道气作为 CO₂ 供给来源，在塔式立体养殖反应器中将含有 CO₂ 的烟气从塔底分段进气、逐级溶碳脱氧、分段外排；含有藻种的养殖液体从塔顶逐级流到塔底，通过光合作用完成微藻的一个生长周期；塔底微藻与养殖液分离，大部分藻液外排分离微藻和养殖液，小部分藻液作为藻种，回收的养殖液在补充营养后，用养殖液泵再送回塔顶进行再次循环，通过微藻连续养殖和 CO₂ 减排偶联，最终实现 CO₂ 的固定和资源化利用。再将成熟微藻通过连续湿式高压液化装置无需干燥低能耗制取生物原油，从而加快了 CO₂ 循环。但这一过程需要外加人工光源，消耗电能。

从我国目前的土地分布、土壤组成、农业现状和生物能源地发展以及工农业发展不平衡和剪刀差等具体情况，对于低浓度 CO₂ 烟气，无需采用集中固碳处理，可利用碳交易进行异地化固碳。工矿企业将用于集中固碳处理的投资和操作费用反哺农业，出资改造中低产田、发展碳汇林和草原、在非耕地、盐碱滩涂和沙漠利用现代农业技术种植适宜的速生能源植物，充分利用太阳能，大幅度提高生物质产量，副产氧气，实现了低成本生物固碳，也有效地解决了以工哺农和“三农”问题，从而实现工业、农业、政府和社会的

多赢，能够满足我国今后较长时间的减排任务，提高我国国际地位。

如采用现代农业技术种植甜菜，亩产量高达 6500 千克，生物质干产量不低于 5 吨，较现有普通种植法产量增加一倍，按照光合作用反应式亩固碳至少 10 吨以上，副产氧气 13 吨以上，农产品销售还有较为丰厚的收入。100 万吨甲醇的煤化工企业只需出资不到集中固碳处理投资的十分之一扶持 28 万亩高效甜菜种植就可实现零排放，300 万吨煤制油的煤化工企业只需出资不到集中固碳处理投资的八分之一扶持 264 万亩高效甜菜种植就可实现零排放，另外化工企业每年还节省了固碳处理的巨大的操作费用和能耗。另外像芒草、柳枝稷、水葫芦、沙柳、沙打旺、芦竹和荻、菊芋、甘蔗、甜高粱、麻疯树、油桐、油棕、银合欢、橡胶树等能源植物适应我国不同气候、土壤和沙漠种植，亩产干物质均在 1 吨以上，减排幅度大于 2 吨 CO₂/亩。

我国中低产田面积达十多亿亩，按现有耕地的粮食生产潜力划分，亩产量大于 900 千克/年的耕地面积不足 5%，亩产量在 500 千克/年~900 千克/年的耕地面积占 1% 左右，亩产量在 200 千克/年~500 千克/年的耕地面积占 30% 左右，亩产量 100 千克/年~200 千克/年的耕地面积占 11% 左右，其他都是每年亩产量 100 千克以下的耕地。由能源使用企业出资改造中低产田，进行碳交易，这也是一个巨大的低成本高收益碳惠项目。另外海洋、河流和湖泊的水生高产植物，如藻类、速生芦苇和水葫芦等，也是巨大效益的碳惠项目。

将生物质转化为能源燃料时，无需考虑生物质作为食品时所需顾及的转基因和有毒有害微量物质问题，转基因物种在产量提高、种植地域和污染土壤修复中均能产生巨大的经济、环保和社会效益。生物质快速热解液化技术是下世纪有发展潜力的技术，是国内外生物质液化研究和开发的重点和热点。该技术能将分布分散、形态各异和能量密度低的生物质部分或全部转化为能量密度大、易于存贮和运输的液体燃料，直接或加以精制就可作为车用燃料以及化工原料，不存在产品规模和消费地域限制，是环境友好性、最有希望的石油替代品，从而加快了碳循环。

另外利用生物质不到 7 天的快速腐化生产腐植酸，作为有机肥提高土壤的腐殖质，有利于提高土壤肥力和保肥保水性，进而提高农作物产量。将我国绝大多数土壤腐殖质含量不足 2% 提到东北土壤现有的 5% 左右，这也将是一个千亿吨级的土壤安全储碳。

5. 结论

(1) 针对具体的应用对象和原料提出了开发和选择适宜的原料和工艺, 从源头上避免产生 CO₂ 排放的措施, 是目前 CO₂ 减排最有效的途径。

(2) 提出在能源开采、生产、使用和终端产品消费全过程中节能降耗, 从过程减少 CO₂ 排放的措施, 是目前 CO₂ 减排最容易实现、成本最低并且具有较大收益的途径。

(3) 提出了对不同浓度 CO₂ 废气采用不同的适宜捕集、利用和封存措施, 降低 CO₂ 排放或加快 CO₂ 循环, 从过程终端消除 CO₂ 过剩和累计, 是迫不得已和最终解决 CO₂ 减排的方法, 也是国内外目前研究和开发的重点和热点。在生物固碳中提出了我国现阶段工矿企业异地固碳的低成本减排措施, 解决以工哺农

和“三农”问题, 实现工业、农业、政府和社会的多赢, 能够满足我国今后较长时间的减排任务, 从而提高我国国际地位。

References (参考文献)

- [1] Xie, Kechang, High-Carbon Energy to Low-Carbon Energy[J], The People's Congress of China, 2009(18).
谢克昌, 重视高碳能源低碳化[J], 中国人大, 2009(18).
- [2] Qiao Yingyun, Tian Yuanyu, Xie Kechang, Application on NS Stereo Composite Trays of Tilt Strip in Industry [J], *Petro-Chemical Equipment*, 2009, 38(3): P78-80.
乔英云, 田原宇, 谢克昌, NS 倾斜长条立体复合塔板在工业中的应用[J], 石油化工设备, 2009, 38(3): P78-80.
- [3] Zhang Yuzhuo, From High-Carbon Energy to Low-Carbon Energy—Prospects of Clean Coal Conversion [J], *Energy of China*, 2008, 30(4), P19-21.
张玉卓, 从高碳能源到低碳能源——煤炭清洁转化的前景, 中国能源, 2008, 30(4), P19-21.