



金涌, 化学工程专家, 北京市人, 中国工程院院士。现任清华大学化工科学与技术研究院院长, 清华大学化工系教授; 中国化工学会常务理事、中国颗粒学会常务理事、中国生态经济学会副主席, 北京市政府专业顾问。多年来, 通过气固湍流场时空结构研究, 提出了气固流态化流型转变的机理模型和定量判据, 发明了湍动流化床新型复合内构件, 改善了流化质量, 解决了工程放大的难题, 成功地用于指导六种工艺, 三十余台大型工业流化床反应器的改造或设计。所研究的气固循环流化床、气固超短接触催化反应器, 移动床重整反应器、大型节能干燥装置等已成功应用于工业过程, 在生态化工工程与工艺、产品工程、亚微米与纳米粉体技术研究与应用方面也取得重要突破, 获得显著经济效益。获 1987 年国家发明二等奖, 1995 年国家科技进步二等奖, 获技术专利三十余项。

## 卷首语 Foreword

科技导报 2012, 30 (24)

# 高碳能源

## ——煤的低二氧化碳排放和高附加值利用

据统计 2010 年世界探明化石能源储量天然气占 21.1%, 煤炭占 54.78%, 石油占 24.12%, 而同年的化石能源消费结构为天然气占 27.37%, 煤炭占 34.05%, 石油占 35.58% (2011 年世界能源统计报告)。可见煤炭的储采比远大于石油, 将成为未来化石能源的主力。而我国化石能源探明储量比例约为煤 96.14%, 石油 1.78%, 天然气 2.08%, 而从消费角度看, 近年来虽然石油对外依存度已超过一半, 而煤炭仍能占国内一次能源的 70% 左右。煤炭作为中国的主导化石能源是难以改变的。

我国煤炭探明可采储量约为 1886 亿吨 (国土资源部), 人均储量 144.23 吨, 储采比约为 73 年, 而世界 8 个主要储煤国的储采比都高于 100 年 (其中巴西、俄罗斯、乌克兰、哈萨克斯坦四国为 300 年)。可见用好我国仅有的自然资源十分重要。

另一方面, 在所有化石能源中煤炭的碳原子含量最高 (煤炭中氢碳比约为 0.8:1, 石油约为 2:1, 天然气为 4:1)。在我国确立以煤为主的多元能源结构中, 在考虑我国能源可持续发展时必须同时注意煤炭资源的高效利用, 低 CO<sub>2</sub> 排放和高附加值利用的问题, 即在低碳发展理念指导下, 健康有序地创造出世界领先的煤基化学工业体系, 设想在数十年后世界石油资源萎缩显现时, 我国若已形成最成熟的煤化工高端产业, 将占尽技术上的优势, 可以预期煤化工将成为堪比石油化工的第二次辉煌。

上述数据显示出一个十分庞大的煤化工产业发展的优越之处, 但必须合理有序地进行, 首先需要从煤炭和水资源配置角度考虑统一规划, 在选择工艺和产品时也必须仔细斟酌。

### 1 煤炭资源分质利用原则

首先煤炭是一个复杂的有机和无机质的复合资源, 从煤的结构式可以看到它含有大量稠环化合物。倘若将其直接用作燃料, 实际上大量氢元素也被烧掉了, 十分可惜。焦炭生产就是一个传统分质拆解过程, 我国是世界上最大的焦炭生产国, 2010 年焦炭产量为 3.88 亿吨, 副产焦炉气 1500 亿 m<sup>3</sup>, 焦炉气中含氢约占 50%。如果把焦炉气用来与富 CO 含量煤制合成气相匹配, 调配成氢碳比为 2:1 的甲醇合成原料气, 可显著减少 CO 变换时的 CO<sub>2</sub> 的排放。

目前处于产业化过程中的褐煤提质工艺、热解工艺、LFC (Liquids from coal) 工艺, 则可以在得到高热值半焦燃料的同时获液相产品。美国在怀俄明州建立了处理量为 1500 吨/日的褐煤热解厂, 并已成功运行; 国内大唐华银公司煤处理能力为 30 万吨/年的热解技术也已开发成功, 这是较温和的煤拆解分质利用的过程。

### 2 煤炭资源高效利用原则

以煤为原料生产不同化工产品的资源消耗量是不同的, 在选择近似使用功能的产品时必须注意到它们的资源消耗量和 CO<sub>2</sub> 排放量。统计资料显示不同煤化工产品的煤耗 (吨煤/吨产品) 约为焦炭 1.3, 氨 1.1, 甲醇 1.8, 二甲醚 2.5, 各类液态燃油 4.5—5.5, 烯烃 4.3, 芳烃 5.3 等, 也可根据其市场售价估算其万元产值的能源消耗和 CO<sub>2</sub> 排放, 指导优先发展方向。

煤炭的高效利用, 不仅表现在产品的能量转化效率, 而且最终表现于各种产品的使用效率。可用于交通运输的各种二次能源在使用时的效率, 电能利用效率 (电能—机械功转换效率 75%—80%) 远远大于以煤炭转化为液体燃料开内燃机时的利用效率 (化学能—机械功转换效率 25%—30%), 所以纯电动车有很大节能潜力。

### 3 煤炭资源综合利用原则

已经广泛利用的煤的电—化—热—燃气的四联供, 比单一生产具有更高的利用效率, 是一种满足城市居民多种需求的最高效和洁净的生产过程。

近年来原油的开采普遍出现重质化和劣质化的倾向, 重质原油中碳氢比过高, 有两种工艺可以获得碳氢比适中的车用汽油和柴油: 其中之一是通过延迟焦化, 使其轻质化, 但会产生大量价值较低的石焦油; 而较为先进的工艺是通过重油加氢催化, 可提高 15% 以上的高品质燃料油收率, 所以煤 (天然气) 制氢技术与重油加氢耦合是一个较好的选择。

### 4 煤炭资源因地制宜利用原则

从煤化工整体战略布局出发, 我国煤炭资源大量蕴藏于西北、东北边缘省份, 建议发展煤制天然气, 通过管道输送到东南沿海地区。

在较难有充足水资源供应的西北地区, 可以考虑发展煤制乙炔路线的煤化工产业, 乙炔本身化学活性高, 制备工艺路线短, 而采用电石干法制乙炔生成过程时, 工艺用水量也可大幅度减少。而有可能部分替代电石法乙炔的氢等离子一步法制乙炔工艺已完成千吨级/年规模的中试过程, 氢等离子法乙炔没有石灰石参与反应可使能耗显著下降。

### 5 煤炭资源高附加值利用原则

煤炭资源是诸化石能源中含碳成分最多的品种, 因而其在化学转化过程中 CO<sub>2</sub> 的排放量较高, 所以发展煤化工一定要考虑其产品的附加值。在同样多的 CO<sub>2</sub> 排放条件下, 产品的附加值增加数倍, 就意味着万元 GDP 产值的 CO<sub>2</sub> 排放量下降了数倍, 所以这是减少碳排放强度的一个很重要的思路。所以在比较甲醇制燃料油 (MTG)、甲醇制乙烯、丙烯 (MTO)、甲醇制丙烯 (MTP) 和甲醇制芳烃 (MTA) 等多种工艺时, 产品附加值是重要的考量标准之一。

### 6 结论

适度有序发展煤化工产业是现有能源结构大环境下的必然选择, 是推进多种能源渠道解决我国能源短缺, 特别是缓解我国石油战略资源不足危机的重要替代方法之一。在发展煤化工时需明确若干战略原则, 减少盲目性, 进行科学决策。本文中提出的分质利用原则、高效利用原则、综合利用原则、因地制宜利用原则和高附加值利用原则, 期望能为上述决策提供一些既坚持低碳理念指导, 又适度有序地发展煤化工产业的科学思路。

(清华大学化学工程系, 北京 100084)