

低碳经济:理念·实践·创新

金涌,王焱,胡山鹰,朱兵

(清华大学化学工程系,北京 100084)

[摘要] 根据我国的能源消耗及 CO₂ 排放现状,提出应从产业结构调整、能源结构调整、科技创新、消费过程优化及政策法规支持 5 个方面开展工作,阐述了各方面所能采取的举措,重点分析了一些具有实践价值的科技创新方向。

[关键词] 低碳经济;能源消耗;产业结构;能源结构

[中图分类号] F4 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)09-0004-10

1 前言

“低碳经济”(low carbon economy or economy of low carbon exhaustion and low carbon dioxide emission)一词最早正式出现于 2003 年的英国能源白皮书《我们能源的未来:创建低碳经济》,是指以低能耗、低污染为基础的绿色生态经济。全球性化石能源短缺和气候变化促使低碳经济成为重要的焦点,发达国家在低碳经济领域已经推出重大举措。在人类的生产、生活中,为了获取能源而大量消耗化石资源,致使地层中沉积碳库的碳以较快的速度流向大气碳库(见图 1),从而引发了温室效应等灾难性的问题。全球 CO₂ 年产生量巨大,仅我国每年产生 50×10^8 t 以上 CO₂。我国 CO₂ 排放量以电力产业为最大,热力电站大约消耗我国年原煤产量的 50% 以上;其次是钢铁、水泥等产业;能源化工产品的制造过程所消耗的能源量占第三位。来自国家统计局的数据显示,2007 年我国石油和天然气开采业消耗能源 $2\,880.6 \times 10^4$ t 标煤,石油加工、炼焦及核燃料加工消耗能源 $14\,619.8 \times 10^4$ t 标煤,化学原料及化学制品制造业消耗能源 $24\,208.6 \times 10^4$ t 标煤,橡胶制品业消耗能源 778.5×10^8 t 标煤,以上 4 项合计消

耗能源为 $42\,487.46 \times 10^4$ t 标煤,占全国规模以上行业耗能总量近 20%,如果再加上钢铁、水泥等行业,所占总能耗比重可能在 40% 左右。化工行业污染“三废”排放量居全国工业之首^[1]。

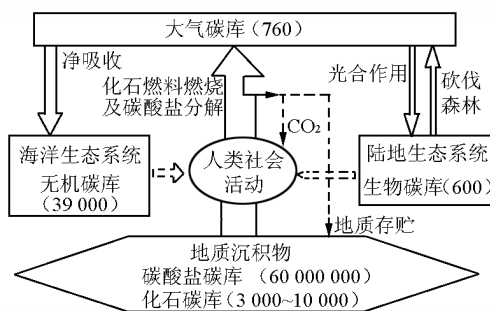


图 1 碳库及碳循环示意图(单位:Gt)^[2]

Fig. 1 The sketch map of carbon stores and carbon cycling

近年来,随着我国经济的快速发展,虽然万元 GDP 能耗有了大幅度的降低,但是全国总能耗和总 CO₂ 排放仍逐年攀升(见图 2),已经成为制约我国经济高速发展的主要障碍。自 1995 年开始,我国万元 GDP 能耗的下降趋势已明显变缓(见图 2)。目前我国万元 GDP 能耗与世界先进水平相比仍然较

[收稿日期] 2008-07-12

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划 973 项目(2004CB719706),国家自然科学基金重点项目(20436040)和“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC02A17)资助

[作者简介] 金涌(1935-),男,北京市人,清华大学教授,中国工程院院士,博士生导师,主要从事化学工程及生态化工研究;王焱(1968-),女,北京市人,清华大学副教授,博士,主要从事化学工程研究

高,主要工业过程和产品能耗比国际领先水平平均约高 30 % (见表 1)。由此可见,为保证我国经济持续、高速、稳定地发展,有必要大力推行低碳经济^[3]。

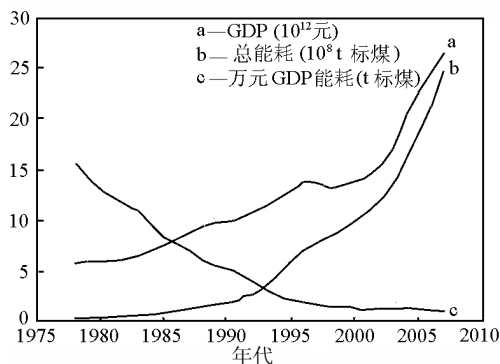


图 2 历年我国 GDP、总能耗和万元 GDP 能耗
Fig. 2 The GDP, total energy consumption and energy consumption per ten thousands yuan GDP in China

表 1 我国工业能耗与国际领先水平比较(2005 年)
Table 1 The comparison of the industrial energy consumption of China with the leading lever in the world (2005)

项目	我国平均水平 (标煤)	国际领先水平 (标煤)
火电煤耗/ $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	379	312
大中型钢铁吨钢可比能耗/ $(\text{标煤}) \text{kg}$	705	610
水泥综合能耗/ $(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$	157	127.3
原油加工/ $(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$	98	76
乙烯加工/ $(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$	969	785
大型合成氨/ $(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$	1 200	970

从全球碳库及碳循环角度思考(见图 1),低碳经济就是要努力减少化石燃烧和碳酸盐(岩石)分解导致的大气碳库藏量的增加,同时通过气体交换及光合作用增加海洋碳库和陆地碳库的藏量,通过人工 CO_2 矿化过程(地质存贮)及 CO_2 再利用过程减少大气碳库的藏量,鼓励使用海洋生态系统及陆地生态系统中的可再生碳替代化石资源消耗。图 1 中虚线显示了发展低碳经济时应该着重推进和强化的方向。基于这一理念,低碳经济的主要内容应包括:合理调整产业与能源结构,围绕能源及化学品的生产、运输、分配、使用和废弃全过程,开发有利于节能和降低 CO_2 排放的技术与产品,关注 CO_2 捕集、

重复利用和埋藏,制定配套的政策,以实现节约能源、保护自然生态和经济可持续发展的总目标。总体来看,推行低碳经济需要从以下五个方面着手开展工作。

2 以产业结构调整推进低碳经济

淘汰落后技术,以大规模生产替代小规模生产是产业结构调整的一项重要举措。国内外单位 GDP 能耗差距较大的主要原因之一是企业的生产规模和技术水平相差比较大。2005 年,我国先进企业宝钢的排放为 $2.1 \text{ t CO}_2/\text{t}$ 钢,重点钢铁企业为 $2.34 \text{ t CO}_2/\text{t}$ 钢,一般企业为 $2.67 \text{ t CO}_2/\text{t}$ 钢,而一些小钢厂排放指标更高。同样的情况也表现于小火电、小水泥、小炼油等行业。十一届全国人民代表大会政府工作报告指出^[4],由于在 2006—2007 年两年间依法淘汰了一大批落后的生产力,关停了小火电 2 157 $\times 10^4 \text{ kW}$ 、小煤矿 1.12 万处,淘汰落后炼铁产能 $4 659 \times 10^4 \text{ t/a}$ 、小炼钢产能 $3 747 \times 10^4 \text{ t/a}$ 、小水泥产能 $8 700 \times 10^4 \text{ t/a}$,使得节能减排取得积极进展。2007 年单位 GDP 能耗比 2006 年下降了 3.27 %,随之单位 GDP 废水 COD 排放下降了 3.14 %, SO_2 排放也下降了 4.66 %,可见这一举措见效很快。另外工业节电有很大潜力,如低效电机的淘汰,调频技术、调峰技术的应用也会有显著。

发展资源回收利用的“静脉”产业,是大幅度减少资源、能源消耗的另一项有力措施。例如,提高废钢回炼率,使回收的废钢直接短流程电炉炼钢,可以显著节能。铜、铝等回收利用的节能效果更为显著。再如,汽车轮胎(特别是大型载重轮胎)的翻新,可以节约 70 % 左右的橡胶资源。此外,我国每年产生 $10 \times 10^8 \text{ t}$ 左右的工业废渣,其中钢渣、粉煤灰、电石渣、煤矸石、磷渣等都可以用作建筑材料,可以节约出生产建材的部分能耗;脱硫粉煤灰等含有较多的 CaSO_4 ,可以作为很好的盐碱地土壤改良剂使用。

需要指出,后工业化社会不会自发进入低碳经济状态,因此产业结构中第三产业比重的增加并不一定对应单位 GDP 能耗的减少。发达国家第三产业比重一般在 70 % 左右,但人均 CO_2 排放为 11.09 t/a ,而发展中国家人均 CO_2 排放仅为 1.95 t/a 。2004 年发达国家人均排放温室气体达到 16.1 t CO_2 当量,是中国的 3 至 4 倍。这说明后工业

* 数据来源:国家统计局网站 [http://www. stats. govcn/tjsj/ndsj/2007/indexch. htm](http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2007/indexch.htm)

化社会可以预期有低物质化进程,但不会自然导向低能耗化进程,即进入后工业化社会以后,虽然万元GDP的物质资源(原生矿物等)消耗可望减少,但能源需求将会持续增长。因此,不能依靠第三产业比重的增加达到降低CO₂排放的目的。

3 以能源结构调整推进低碳经济

能源开发深度和能源利用效率问题一直是人类文明发展水平的标志,也是长远困扰和制约社会经济发展的重要因素。我国的能源结构以煤为主。由表2可见,燃烧不同燃料获得的单位热量需排出的CO₂量以煤为最高,天然气为最低。因此,从CO₂排放角度考虑,今后进口化石能源应以选择天然气为最佳。

生物质能源属于可再生能源。由于植物进行光合作用时吸收的CO₂量可以抵消燃烧时产生的CO₂,因此生物质能源从原理上看没有净CO₂排放^[5]。但是生物质原料相对比较分散,其收集、运输等环节会由于消耗燃油而产生CO₂排放。而且,生物质燃料的能量密度相对较低,如秸秆(干基)燃烧时,产生单位热值所排放的CO₂量仅次于煤炭。因此生物质秸秆鼓励用作合成材料(如人造纤维等)似乎更为合适。2008年3月国家发改委公布了《可再生能源发展“十一五”规划》,提出2010年增加非粮原料燃料乙醇 200×10^4 t/a,全国生物柴油生产规模达到 20×10^4 t,使2010年可再生能源在能源消费中的比重,从2005年的7.5%,提高到10%,全国可再生能源年利用量达到 3×10^8 t标准煤,这是一个发展低碳经济的重大举措。由于世界粮食的短缺,发展生物质能源应坚持不与粮食和食用油料争夺资源的原则,因此对燃料乙醇、生物柴油的发展潜力尚有待观察。

可再生能源除了生物质能以外,还有水能、风能、地热能、潮汐能等,这些都是低碳能源,应重点开发。可再生能源开发需要对开发过程的全生命周期能耗进行分析。例如,太阳能光伏电池,要计算硅材料生产中所排放的CO₂量和光伏电池的使用寿命期间的发电总量,以得出正确的评价标准。核能在扣除核材料生产和废物处理过程中所消耗能量后可视为无碳排放能源,欧洲(如法国等)的核发电比例较大,对推进低碳经济起了很大作用。我国也正逐步加大核电站的建设。

表2 单位燃料发热量的CO₂排放量
Table 2 The exhausted CO₂ values of common fuels

能源品种	单位质量的 发热量	单位发热量的 CO ₂ 排放量
原煤	25.9 MJ/kg	0.117 kg CO ₂ /MJ
生物质(干基平均)	18.86 MJ/kg	0.0925 kg CO ₂ /MJ
柴油	36.78 MJ/kg	0.085 kg CO ₂ /MJ
天然气	55.74 MJ/kg	0.049 kg CO ₂ /MJ

4 以科技创新推进低碳经济

据悉全球已有50多家金融机构投资13亿美元进行低碳技术开发,以期在低碳经济上占领技术制高点,这些低碳技术广泛涉及石油、化工、电力、交通、建筑、冶金等多个领域,包括煤的清洁高效利用、油气资源和煤层气的高附加值转化、可再生能源和新能源开发、传统技术的节能改造、CO₂捕集和封存等。

4.1 通过强化节能实现CO₂减排

CO₂排放主要由能源消耗所致。通过提高能源利用效率,可望在总能源需求不减的前提下实现CO₂低排放。

4.1.1 传统过程节能挖潜

传统过程节能挖潜以强化传热为基础。通过冷热物流之间的逆流换热,运用夹点分析技术优化换热网络,可以使能量得到充分利用。我国2006年水泥产量已达 12.4×10^8 t,约占全球产量的50%,消耗全国煤炭总量的15%,节能潜力巨大。通过分析实测水泥熟料生产能流图(见图3)可知,尾气带走热量占22%,熟料冷却风带走热量占11%,冷却尾气每下降50℃或熟料温度每下降100℃,可节约5 kg标煤/t熟料。近年来,通过水泥煅烧过程的窑外分解技术(通过组织多种逆流接触,把转窑高温排放尾气中的热量用来加热水泥原料,所排出的高温水泥熟料用来加热助燃空气),使所有热损失降到最少(见图4),节能成效显著。

4.1.2 传统工程节能方法与新工艺需求相匹配

开发中的非焦炭法熔池炼铁技术(COREX),除强化工程换热进行热能回收以外,另一重大改进为:利用CO的强还原能力将矿石中的氧化铁还原为生铁,副产的CO含有较多的热能,可作为煤化工合成原料(见图5)。该工艺每生产1 t生铁,可得到的400~500 kg CO,用于甲醇、二甲醚、制氢等能源行业,这样冶金产品与能源化工产品联合生产,预期可以得到很大的节能减排效果。

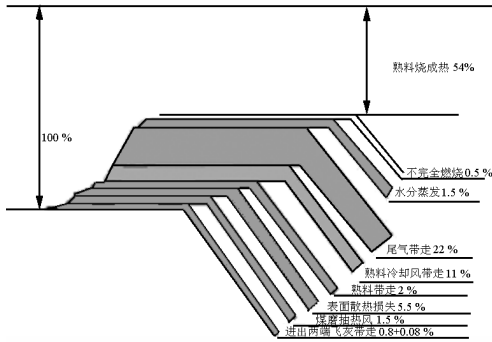


图3 水泥熟料生产能流分析

Fig. 3 Analysis of the energy flow of a cement production

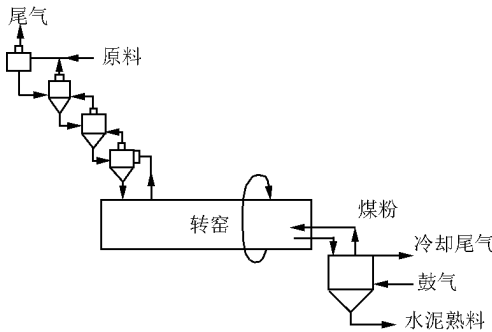


图4 水泥窑外分解工艺

Fig. 4 Out-kiln decomposing process of a cement production

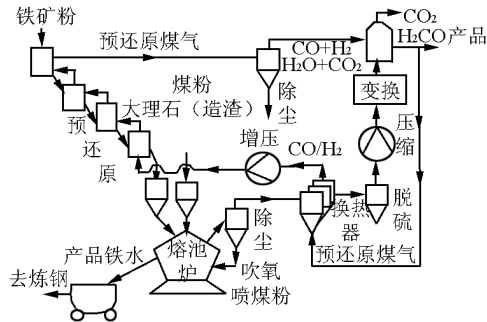


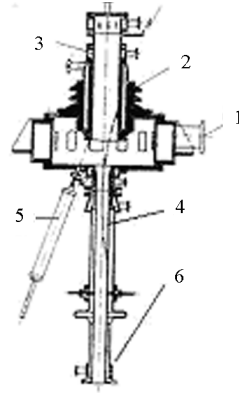
图5 非焦炭熔池法炼铁流程

Fig. 5 The flow chart of the COREX process

4.1.3 采用新型工程技术

电石法生产乙炔是重大能耗过程,加工 1 t 电石的电耗为 3 200 ~ 3 320 kW·h 左右。20 世纪 60 年代,英国 Sheffield 大学率先开展等离子体裂解煤制乙炔的研究。在高温、高熔、高反应活性的电弧热氢等离子体射流中,煤的挥发份甚至固定碳可直接转化为乙炔(见图 6)。此后,大量的相关研究集中在英国、美国、印度、德国、前苏联以及法国和波兰。我国油气资源相对匮乏,而煤资源丰富,因此等离子

体裂解煤制乙炔这种清洁且流程短的煤转化过程在我国具有重要的潜在工业应用前景。我国学者及工程技术人员从 90 年代开始在这一领域进行了大量的基础研究和工程研究。采用氢等离子法直接用煤粉发生乙炔比传统电石法生产乙炔节能 30 % ~ 35 %。由于电石生产成本中电耗占 60 % ~ 65 % ,所以该新工艺可以大幅度降低乙炔成本。



	重量百分比
CH≡CH	25.0
CH ₄	3.1
CH ₂ =CH ₂	2.2
CH ₃ -CH ₃	0.6
C ₆ H ₆	0.4
CO	19.9
CO ₂	0.8
H ₂	33.6
其他	14.4

1—H₂与煤入口;2—绝缘体;3—阴极;
4—等离子体反应器;5—触发极;6—冷却

图6 氢等离子法生产乙炔^[6]

Fig. 6 The hydrogen plasma method to produce acetylene

在冶金行业中采用和推广高炉炉顶余压发电技术(TRT),可以回收高炉送风机耗能的 40 % ~ 50 %,约需 2.5 年可以收回投资。采用干法熄焦技术,通过密闭引入 CO₂ 或 N₂ 冷却赤热焦炭,不但可以回收赤热焦炭的热能用于产生蒸汽,而且减少了传统水熄焦时的气体和水污染,对提高焦炭质量也有较好的效果,但是投资较高。国外采用废塑料、废橡胶粉末喷入高炉炼铁,一方面减少了焦炭的用量,另外高炉渣可以吸收废弃物分解产生的二恶英等有毒气体。可见,冶金企业也可以成为消纳废弃物的企业。

4.2 通过优化工艺路线推进低碳经济

4.2.1 工艺路线优化

通过优化工艺路线,节能减排功效巨大。以炼油工艺为例,由于重质原油中碳/氢比高,为了得到轻质燃料油,可采用两种工艺路线(见图 7):一种是延迟焦化,生成一部分焦炭,从而得到轻油;另一种是加氢裂解,调整碳氢比,得到更多的汽油、柴油等轻油。在相同重油处理量下,后者显然可以获得更多的轻质燃料。但是由于延迟焦化投资少、工艺简单,致使我国焦化装置大量建设,每年约用重油生

产 $2\,000 \times 10^4$ t 以上的石油焦。迄今为止,这种不合理的工艺装置还在继续增加。2000 年,我国拥有焦化装置 29 套,重油加工能力 $2\,114 \times 10^4$ t; 2006 年,焦化装置增加到 43 套,重油加工能力增至 $4\,510 \times 10^4$ t。从表 3 数据可以看出,我国延迟焦化的相对比例已高于世界平均值。由于种种制约,我国近年在大量投资建设由重油生产石油焦装置的同时,大规模投资建设由煤生产燃料油装置,这显然是极不合理的,造成大量能源消耗和 CO_2 排放。

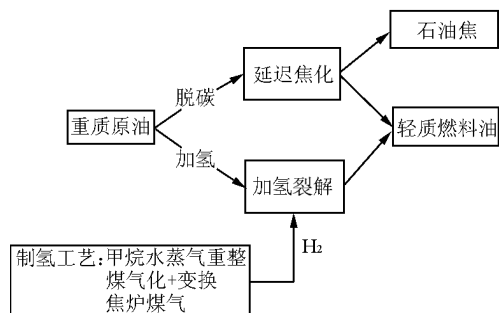


图 7 重质燃油炼制

Fig. 7 The refining route of heavy petroleum

表 3 炼油系统装置能力构成^[7]

Table 3 The capacities of petroleum oil refinery

	世界	我国
催化裂化	$74\,715 \times 10^4$ t, 占 17.54 %	$10\,570 \times 10^4$ t, 占 32.54 %
延迟焦化	$24\,140 \times 10^4$ t, 占 5.66 %	$4\,510 \times 10^4$ t, 占 13.88 %
加氢精制	$229\,408 \times 10^4$ t, 占 17.54 %	$9\,233 \times 10^4$ t, 占 28.42 %

注:表中百分数指占减压精馏能力的比例。

4.2.2 产业链耦合优化

随着石油危机的出现,煤化工发展倍受重视。经由合成气制甲醇是煤化工的一个重要环节。用于生产甲醇及其衍生物的合成气要求为 $V(\text{H}_2):V(\text{CO})=2:1$,而一般煤气化技术得到的是富碳合成气($V(\text{H}_2):V(\text{CO})=1:1$ 左右),如进行水煤气变换($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$),可以提高 H_2 含量,但成本较高。通过产业链设计,获取廉价氢源是颇具潜力的解决方案。我国每年约有 3×10^8 t 以上的煤用于炼焦,每生产 1 t 焦炭会副产 $250 \sim 300 \text{ m}^3$ 焦炉气,其中一部分作为焦炉的加热燃料用掉,尚有 200 m^3 焦炉气/1 t 焦炭可用于化学合成反应。焦炉气中含氢成分高大致 $V(\text{H}_2):V(\text{CO})=10:1$,把焦炉气作为燃料使用是不合理的,应鼓励尽量将焦炉气用于甲醇或二甲醚合成。这样 100×10^4 t/a 炼焦装置,副产焦炉气可生产 10×10^4 t 甲醇。如果采用

恩德炉或灰熔聚炉等低压、不需富 O_2 为原料的煤气化炉,生产成本比较低,低热值煤气用作炼焦炉燃料气,把焦炉气全部顶替出来,再与德士古、Shell 炉生产的富碳合成气匹配,调节氢碳比,进入甲醇合成塔将会有更多的甲醇产量和明显的节能效果。典型气化气及焦炉气的组成参见表 4。

4.2.3 产业链延伸优化

煤化工可采用不同路径,通常分为煤制油路线和煤制甲醇/二甲醚路线。制得的柴油及甲醇/二甲醚(清洁柴油替代燃料)既可用于液体燃料,也可经进一步加工获得基础化工原料烯烃或芳烃。

表 4 双气头合成甲醇

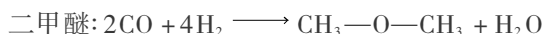
Table 4 The synthesis of methanol with two gas sources

组成	CO	H_2	CO_2	CH_4
气流床煤气	~ 63 %	~ 16 %	~ 10 %	~ 1 %
焦炉气	~ 6 %	~ 59 %	~ 2 %	~ 27 %
甲醇合成气	$V(\text{H}_2):V(\text{CO})=2:1$			

对煤制柴油和煤制二甲醚过程进行比较:



粗柴油: 水 = 282:360 = 0.78:1



二甲醚: 水 = 46:18 = 2.5:1

在间接法煤制油过程中,每建立一个 C—C 键,需要生成一个水分子。每生产 0.78 t 粗柴油则副产 1 t 水,所用氢有近 50 % 转化为水;在煤制二甲醚过程中,由于二甲醚只有 C—H 和 C—O 键,而没有 C—C 键,每生产 2.5 t 二甲醚仅副产 1 t 水,所用氢只有 25 % 转化成水,且反应温度与煤制油过程相当。由于每千克柴油与每千克二甲醚开车里程数基本相同,可见两条获得液体燃料的工艺路线能耗相差较大。

对从柴油或二甲醚进一步生产低碳烯烃的工艺进行比较。二甲醚制低碳烯烃为脱水放热反应,而粗柴油裂解为低碳烯烃则为吸热反应,因此二甲醚路线制烯烃能耗更低。图 8 显示了煤制油及煤制二甲醚路线的能耗比较。与煤制二甲醚过程相比较而言,煤制油不是低碳经济过程。

4.3 通过优化替代产品推进低碳经济

人们最终需要的是产品功能,而不是产品本身。相同功能的不同产品在生产环节及全生命周期的 CO_2 单位排放量不同。表 5 列出了几种典型化工产品的 CO_2 单位排放量。通过选择满足功能要求的

合适产品,也可以实现低碳经济功效。例如:与汽油车相比,柴油车更为省能,因此从燃料油的全生命周期角度考虑,炼厂采用多生产柴油方案,适量减少汽油产量比率可以实现总体节能。又如:柴油车的燃料可以用合成柴油,也可以用二甲醚,在两者开车里程数相同的条件下,使用二甲醚燃料的CO₂总过程排放量明显小于合成柴油,而且使用二甲醚燃料的汽车尾气直接排放可以达到欧洲-3标准,噪声低,所以二甲醚被国际公认为良好的低碳排放燃料。

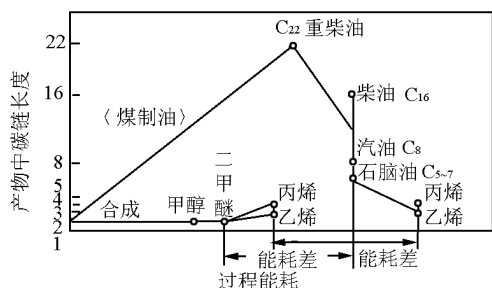


图8 煤化工路线能耗分析

Fig. 8 Analysis of the energy consumption of coal chemical engineering

对于合成树脂而言,聚氯乙烯的机械强度高于聚乙烯。由于聚氯乙烯含氯元素,因此与聚乙烯相比,合成单位重量氯乙烯时CO₂排放更低,所以在可能的条件下应尽量使用聚氯乙烯替代聚乙烯。当氯气作为烧碱副产物时,如能采用氯化聚氯乙烯、氯化聚乙烯和氯化聚丙烯等,则更符合低碳经济理念。

表5 几种目标产物的CO₂单位排放量(t CO₂/t 产品)

Table 5 The exhausted CO₂ ratios of several chemical products (t CO₂/t product)

产品	单位 CO ₂ 排放 / + CO ₂ / + 产品	产品	单位 CO ₂ 排放 / + CO ₂ / + 产品
煤制油	≈ 9.2	煤→乙炔→氯乙烯	≈ 5.6
煤制甲醇	3.8 ~ 4.3	合成氨	≈ 5.9
煤制二甲醚	≈ 5.3	烧碱	≈ 3.5
煤→甲醇→乙烯、丙烯	≈ 11.4	纯碱	≈ 1.2
煤→电石→乙炔	11.6 ~ 12.5	黄磷	≈ 19.2

4.4 开发 CO₂ 的捕集技术以进行利用和埋藏

CO₂ 的捕集是其利用和埋藏的先决条件,而 CO₂ 大量低成本捕集有相当难度,目前有以下思路可供研究。

4.4.1 化学循环燃烧发电

燃烧发电引起的 CO₂ 排放量很大。因所用燃料不同,直接燃烧发电时电站锅炉烟道气中的 CO₂

含量一般在 20 % 左右,采用吸收法可以进行 CO₂ 富集,但是成本较高。国外正在研究一种化学循环燃烧技术,可以使尾气中的 N₂ 和 CO₂ 气分开,从而使 CO₂ 得到富集。该技术的工艺流程如图 9 所示。燃料(天然气等)燃烧在两个流化床组合锅炉内完成,颗粒氧载体(Cu, Fe, Ni, Mn 等氧化物),在两个流化床之间循环。在燃烧反应段中,烃类燃料(CH₄等)与金属氧化物中晶格氧反应生成 CO₂ 与 H₂O,金属氧化物被还原成低价金属氧化物或者金属单质,尾气中没有氮气,可以得到 CO₂ 富气。被还原的金属低价氧化物或单质金属循环引入空气氧化段中,并与空气中的氧气发生强放热反应,产生用作发电的蒸汽,而金属重新被氧化至高价态,尾气中只有氮气和过剩氧气排出。通过金属及金属氧化物在两个反应区之间的循环完成氧传输和热传输过程,得到 CO₂ 富集气。

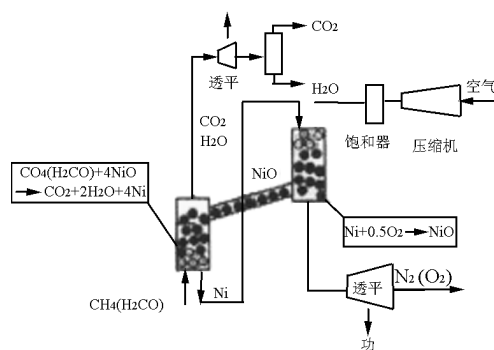


图9 化学循环燃烧发电

Fig. 9 Chemical looping combustion for generating electricity

为了解决燃煤发电过程中的 CO₂ 捕集问题,国外学者还探索用钙元素的化学循环方法,使 CO₂ 与 N₂ 得到分别排放,工艺流程参见图 10。

4.4.2 在水泥生产中捕集 CO₂

水泥煅烧时,需要燃烧大量煤炭供热,同时水泥中 CaCO₃ 原料在煅烧时分解释放出 CO₂,所以水泥窑尾气中会有大量高浓度的 CO₂。如果水泥窑燃烧时,以氧气或富氧替代空气,则尾气中的成分会以 CO₂ 为主,便于收集利用或贮存,而且以富氧煅烧水泥减少了高温氮气带走的热量,使煅烧更为节能。由于我国水泥产量已连续 22 年居世界第一位,2006 年产量达到 12.4 × 10⁸ t/a,约占世界总产量的一半,所以富氧煅烧在我国是一项有巨大节能前景的技术。

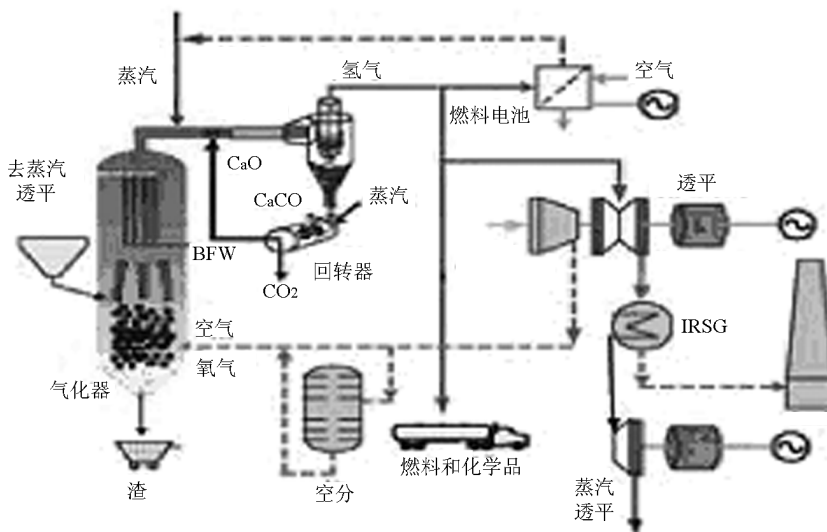


图 10 含钙循环的煤气化燃烧工艺(L. S. Fan 研究组)^[8]

Fig. 10 The process of coal gasification and combustion with calcium looping (L. S. Fan team)

4.5 通过发展 CO₂ 利用技术推进低碳经济

由苯酚和 CO₂ 作为原料,通过 Kolbe-Schmitt 反应生产水杨酸在 1890 年已实现工业化,这是最早利用 CO₂ 的工艺过程。目前许多以 CO₂ 为原料的新工艺正在开发之中,举例如下。

4.5.1 CO₂ 合成碳酸二甲酯

合成碳酸二甲酯的工艺已有万吨级示范装置,其两条工艺路线如图 11 所示。一种工艺是利用 CO₂ 和 NH₃ 合成尿素,再用尿素与甲醇反应合成碳酸二甲酯(DMC)。另一种工艺是以 CO₂、环氧丙烷及甲醇为原料,通过酯交换法合成。利用碳酸二甲酯可进一步生产异氰酸酯(MDI),这一合成工艺能够避免在合成 MDI 时使用光气作原料,因此为 MDI 绿色生产工艺。

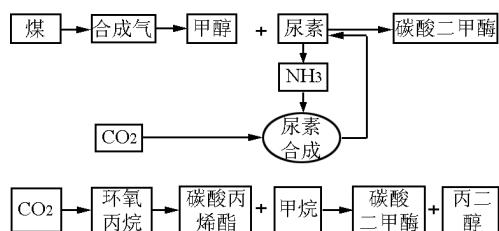


图 11 两条碳酸二甲酯合成工艺路线

Fig. 11 Two routes for methylcarbonate synthesis process

4.5.2 CO₂ 还原生产 CO

用焦炭还原 CO₂ 生产 CO 的工艺是一个可以较大规模利用 CO₂ 的途径。采用反应耦合技术,将赤

热焦粉与 CO₂ 反应生成 CO 的吸热反应与焦粉加氧燃烧生成 CO 的放热反应相结合,可以实现反应器自热平衡,用以生产 CO。焦粉兼作反应原料与热载体。相似的反应过程还可以用于电石炉尾气或煤层气脱氧等过程。

4.5.3 CO₂ 与甲烷混合气的综合利用

甲烷与 CO₂ 反应是实现大规模 CO₂ 化学利用的有效途径。这方面有两大重要需求:一是 CO₂ 和 CH₄ 是两个重要的温室气体,减少温室气体排放和固定 CO₂ 是目前国际讨论的热点难题;二是很多天然气田开采发现伴生大量 CO₂,这使得抽采的天然气 CH₄ 资源被 CO₂ 大量稀释,如果直接采用现有的天然气转换技术势必造成成本过高和过程实施的困难。因此,在尽可能低的能耗下实现 CH₄ 和 CO₂ 的反应具有重要的战略意义和实用价值。

关于在较低温度下通过 CH₄ 和 CO₂ 的直接催化转化制取高附加值产品已有文献报道,例如,在 250 °C 反应条件下生产醋酸^[9]。该过程目前的问题是受受到热力学限制,转化率有限,且副产物较多。

CH₄ 和 CO₂ 重整制备合成气是大规模转化利用 CO₂ 的重要方向。由于 CH₄ 和 CO₂ 的化学稳定性非常高,CH₄ 和 CO₂ 重整反应是一个强吸热过程,采用常规的催化方法实现其化学转化必然是一个高温、耗能的过程。通常操作在 850 °C 左右,可达到超过 90 % 的转化率和产品选择性,已接近热力学极限。尽管目前催化剂还在不断改进,但是高温和催化剂积

碳等问题仍然制约着这个过程的发展。研究人员正在尝试使用外场强化的方法(如:低温等离子体),希望在低温下实现这个过程,已取得初步成效。

4.5.4 CO₂ 驱油贮存

利用 CO₂ 作为油田驱油材料,可使油的采收率由 25%~35% 提高到 40%~50%。从长远角度讲,把 CO₂ 注入海底甲烷水合物矿层,使甲烷水合物分解,可开采天然气,同时 CO₂ 在海底形成 CO₂ 水合物,使 CO₂ 贮存于地壳内的沉积物碳库中,可谓一举两得。

4.5.5 CO₂ 生物质利用

CO₂ 的生物质利用前景广阔。我国土地及水资源均短缺,发展生物质利用必须坚持不与粮食生产争地、争水的原则。由于我国土地施肥已高于世界平均施肥量数倍,因此发展生物质利用时不应忽视化肥生产中的 CO₂ 排放量。通过植树造林,可在低肥耗、低水耗的前提下形成较大规模的陆地植物碳库,值得重视。自 1980 年至 2005 年,中国造林活动累计净吸收约 30.6×10^8 t CO₂ 以上,取得很大成绩。

全球土壤是很大的有机碳库,蓄积碳约 $1.4 \sim 2.2 \times 10^{12}$ t。我国土地含有机碳较低,通过有机肥施用和秸秆还田,可以使耕地土壤年增有机碳 0.03%~0.09%,固碳 $180 \times 10^4 \sim 540 \times 10^4$ t/a。大量碳存蓄于土壤之中,对低碳经济的贡献有可能大于生物质燃料。

4.5.6 CO₂ 逆化学合成

通过电解水获得氢和氧,与存贮的 CO₂ 反应合成各种化学品,称为“逆炼制”。逆化学合成工艺在美国、日本已有前期研究,如美国 F. J. Martin, N. L. Kubie 提出绿色自由(green freedom)理念^[10]即属于这类研究。在热核聚变反应实现工业化以后,可为逆炼制提供充足的电能供应。

5 以垃圾炼制推进低碳经济

随着我国经济规模不断扩大,可再生的垃圾资源迅速增加,据估计 2007 年我国废电视产生量约为 $2\,300 \times 10^4$ 台,废洗衣机 $1\,000 \times 10^4$ 台,废电冰箱 800×10^4 台,全国再生有色金属总产量达到 530×10^4 t,废钢铁 $3\,500 \times 10^4$ t,废塑料 $300 \times 10^4 \sim 400 \times 10^4$ t,废纸浆 $1\,200 \times 10^4$ t,年回收废旧物资总量已达到 8 400 余万 t。

再生资源(垃圾)炼制,不仅使废物资源化,而且也保护了环境,节约大量能源,减少 CO₂ 排放量。

如每利用 1 t 废铜,相当于少开采 100~200 t 矿石,少产生 100 多吨工业废渣,少产生 2 t SO₂,节约 3 t 多标准煤,也少排 10 t 以上二氧化碳。利用 1 t 再生纸,可以节约木材 4 m³,水 250 t,可节电 512 kW·h,也减少相应的 CO₂ 排放。由此可见,垃圾炼制也是推进低碳经济的重要手段。发展垃圾炼制的核心也是技术创新,实现产业是规模化、现代化、无害化。

总之,制造业可以从矿物化石炼制、垃圾炼制、生物炼制、逆炼制,全面推进低碳经济。

6 以优化消费过程推进低碳经济

在不降低社会人群生活质量的前提下,进行消费领域节能和减少 CO₂ 排放也有巨大潜力。

6.1 建筑节能

我国建筑及居民生活用能量很大,节能问题值得重视。我国城乡民用建筑面积约为 400×10^8 m²,建筑能耗已占总能耗 20.7%。2004 年数据显示,北方城镇建筑采暖、农村生活用煤 1.6×10^8 t 标煤/年,占我国煤产量的 11.4%,建筑用电和其他用能(炊事、照明、家电、生活用电等)耗电 $5\,500 \times 10^8$ kW·h,占全国电耗的 27%~29%。预计到 2020 年全国城市人口比例将达到 56%,约新增 110×10^8 m² 以上需采暖的民用建筑,2020 年比 2004 年可能需增加 2.5×10^8 t 标煤, $5\,800 \times 10^8 \sim 6\,300 \times 10^8$ kW·h 用电。建筑及生活节能的主要目标是减少化石能源消耗,可以采用建筑物采暖、太阳能利用、推广节能灯等多种手段。

我国建筑与国外建筑相比,保温能力差距较大,造成大量能量损失,需要特别关注。2001 年 2 月,德国通过一项新节能法案,规定改造原有采暖耗用量为 20 L/m² 的住房,新建筑采暖耗油不得超过 7 L/m² (10.5 kg 当量煤/m²)。BASF 化工企业积极响应,改建成功“3 升房”,能耗仅为过去的 15%。近年来,BASF 公司采用新型保温材料推出了“1 升房”。可见建筑节能潜力巨大。

在照明方面,从煤所含化学能转化为白炽灯照明,其总效率仅为 3%;如采用荧光灯效率可以提高数倍;如果采用半导体发光二极管照明,则利用效率可以提高 10 倍以上。

在建筑采暖方面,入户取暖热水(或蒸汽)分户计量收费、补贴窗户双层玻璃改造、纤维板装修内保温、太阳能蓄热、地热取暖等均为有效的方法。美国

国家航天局(NASA)开发的保温涂料技术,采用含陶瓷中空珠的乳胶涂料,具有高反射比、低导热系数和低蓄热系数。经估算,如用作民用建筑保温涂料,可以使建筑采暖节能9%~18%。此外,生物质纤维作为保暖材料节能与生物质作为燃料发电供暖相比,会有数倍的节能减排功效。

6.2 其他消费节能

由人类食品结构导致的CO₂排放增加也是我们应该注意到的。人类在生态进化形成的食物链中,并非处于最高端。猫科动物是典型的肉食类动物,而灵长类动物则属于杂食。随着近代人类盲目提升在食物链上的占位,食谱过多偏向动物食品,一方面直接导致了人普遍的身体超重和肥胖,伴随之高血压、冠心病、糖尿病等疾病发病率提升;另一方面也使渔肉产业迅速发展。2006年,世界肉类总产量已达 2.76×10^8 t,渔业产量为 1.4×10^8 t。估计生产每千克牛肉,需排放346 kg当量的CO₂温室气体。调整人们的饮食结构,适度发展渔肉产业,既有利于人的健康,也有助于CO₂减排。

随着汽车工业的发展,交通用能迅速增加,已在总能量需求中占30%的比例。汽车交通用能大量消耗液体燃料,加剧了宝贵石油资源的快速消耗。然而,汽车交通的能量利用效率并不高。汽油所含化学能在汽车汽缸中燃烧,经机械传动损失,达到车轮部分约为原含量的13%,车轮与地面摩擦能耗约占50%,余下的50%用于加速车身部分约占95%,用于加速乘客的部分大致只占4%~6%,所以汽车交通运输过程中汽油的总能量利用效率仅为0.3%~0.5%。由此可以看出,大力发展公共交通有助于提高能量利用效率。同时还应鼓励人们外出多步行或骑自行车。

联合国环保规划署执行主任施泰纳说,在CO₂减排的过程中,“普通民众拥有改变未来的力量”。联合国环境规划署2008年6月5日发表了公开报告,对个人采取低碳生活方式提出了具体的意见:a.用传统的发条式闹钟替代电子钟,这可以每天减少大约48 g的二氧化碳排放量;b.用传统牙刷替代电动牙刷可减少48 g二氧化碳排放量;c.把在电动跑步机上45 min的锻炼改为到附近公园慢跑,可以减少将近1 kg的二氧化碳排放量;d.不用洗衣机甩干衣服,而是让其自然晾干,这可以减少2.3 kg的二氧化碳排放量;e.在午餐休息时间和下班后关闭电脑及显示器,可以将这些电脑的CO₂排放量减少

1/3;f.改用节水型沐浴喷头,不仅可以节水,还可以把3 min热水沐浴所导致的CO₂排放量减少一半。

7 以政策法规推进低碳经济实施

通过政府、行业指导,制约企业行为和市场消费行为是推动低碳经济的重要手段,可以采用的具体措施包括:a.强化实施新建企业的技术水平、生产规模等准入门槛;b.对于已有企业,按生产技术水平档次(如能源利用率等)、生产规模进行累进税制,以压缩小型落后产能;c.以市场配额制,促进先进大型企业在扩大生产能力时,优先考虑兼并小企业和采用先进技术移植改造小型落后产能;d.鼓励新节约产品推广,政府首台采购,价值补贴;e.利用税收政策,限制高能耗、高水耗、高污染和高资源消耗的低附加值产品出口。高能耗产品包括电石、铝锭、铁合金、金属硅、焦炭、钢材等。2007年国家四次调整出口关税,仍未有效遏制钢材出口。2007年出口钢材(坯)折合粗钢约 $7\,200 \times 10^4$ t,净出口钢材约 $5\,200 \times 10^4$ t,相当于多消耗能源约 $5\,000 \times 10^4$ t标准煤,多消耗铁矿石(含铁64%的成品矿计算)约 $8\,000 \times 10^4$ t和大量用水,多排放CO₂近 1.3×10^8 t,以及增加运输码头、能源和环境压力,引发铁矿石价格增长等一系列不利影响。2008年焦炭的出口再次遇到欧盟反倾销制裁,规定中国焦炭到岸价格如低于每吨197欧元,征收的反倾销税为其间差额。事实证明,欧盟需要中国焦炭,2000年曾对中国焦炭每吨加征反倾销税32.6欧元,引起价格暴涨,不得不于2004年宣布取消^[2]。据估算,每年我国隐含能源出口(即指上述高耗能产品出口所附带的隐含能源出口)的热值,大致与进口石油所含热值相当。

8 结语

在过去的几百年中,矿物化石炼制极大地推动了人类社会经济的发展,但是同时也引发了严重的资源与环境问题。低碳经济是人类社会可持续发展的出路所在,其内涵不仅包括生产、生活各方面以技术创新带动的节能减排,还包括CO₂的浓集再利用。低碳经济的发展依赖于产业结构、能源结构及消费结构的调整,需要政策法规的支持与扶植,更需要科技创新的支撑。

参考文献

[1] 钱敏. 低碳经济:石化产业大势所趋[N]. 中国化工报, 2008

- [2] 国家气候变化对策协调小组办公室/中国 21 世纪议程管理中心. 全球气候变化——人类面临的挑战 [M]. 北京: 商务印书馆, 2004
- [3] 张坤民. 低碳世界中的中国: 地位、挑战与战略 [J]. 中国人口·资源与环境 2008, 18(3): 1-7
- [4] 温家宝. 第十一届全国人大政府工作报告 [R]. 北京: 人民大会堂, 2008
- [5] Friedl A, Padouvas E, Rotter H, et al. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2005, 544(1 - A 2): 191 - 198
- [6] Fauchais P, Bourdin E, Aubreton J, et al. Plasma chemistry and its applications to the synthesis of acetylene from hydrocarbons and coal [J]. *International Chemical Engineering*, 1980, 20(2): 289 - 305
- [7] 曹湘洪. 面向 2020 年我国炼油石化产业必须重视的若干问题 [R]. 北京: 中国工程院化工、冶金、材料工程学部年会, 2007
- [8] Fan L S, Iyer M. Coal cleans up its act [J]. *TCE*, 784: 36 - 38
- [9] Huang W, Xie K C, Wang J P, et al. Possibility of direct conversion of CH₄ and CO₂ to high - value products [J]. *Journal of Catalysis*, 2001, 201(1): 100 - 104
- [10] Martin F J, Kubic W L, Green Freedom. A concept for producing carbon - neutral synthetic fuels and chemicals [R]. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 2007

Low carbon economy: idea, application and innovation

Jin Yong, Wang Yao, Hu Shanying, Zhu Bing

(*Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

[**Abstract**] Some thoughts on a low carbon economy were proposed to solve the contradiction between economic development and the demands for raw materials and the resulting environment deterioration. From a consideration of China's energy consumption and carbon dioxide emission patterns, it is suggested that work on this should be started from five aspects: restructuring the manufacturing sector, restructuring energy supplies, using scientific and technological innovations, optimizing consumption processes, and support from government policies. This paper discussed possible means to implement measures from those five aspects and analyzed some potential technological innovations.

[**Key words**] low carbon economy; energy consumption; restructuring manufacturing sector; restructuring energy supplies