

从低碳经济看我国煤炭地下气化的前景

黄温钢^{1,2}, 辛林^{1,2}, 吴俊一^{1,2}, 马晓光^{1,2}

(1. 中国矿业大学矿业工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221008)

摘要: 为减少温室气体 CO₂ 的排放, 防止全球温度再次上升, 世界各国都在推动发展低碳经济。我国能源结构以煤炭为主, 这在较短时间内还难以改变, 因此, 在发展低碳能源的同时, 大力推进煤炭资源的低碳化利用尤其重要。煤炭地下气化不仅可以提高矿井的采出率, 而且可以高效洁净地利用煤炭资源, 在煤炭的开采、运输及利用过程中均可实现低碳化甚至无碳化, 是一种理想的低碳能源技术。此外, 地下气化开采煤炭资源具有良好的经济效益和社会效益, 发展煤炭地下气化的意义深远。

关键词: 采矿工程; 低碳经济; 煤炭地下气化; 前景

中图分类号: TD849

The Prospect of Underground Coal Gasification in the View of Low-Carbon Economy

Huang Wengang^{1,2}, Xin Lin^{1,2}, Wu Junyi^{1,2}, Ma Xiaoguang^{1,2}

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, JiangSu XuZhou 221116;

2. State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, China University of Mining and Technology, JiangSu XuZhou 221008)

Abstract: In order to the reduce greenhouse gas emissions of CO₂ and prevent the further rise of global temperature, many countries are all promoting the low-carbon economy development. With China's coal-dominated energy structure, which is difficult to transform in a short period of time, it is particularly important to vigorously accelerate the utilization of low-carbon coal resources at the same time low carbon energy are promoted. Underground coal gasification (UCG) can not only improve the recovery rate of coalmine, but the coal resources can be utilized in an efficient and clean way. The UCG is an ideal low-carbon energy technology as low-carbon and even no carbon can be realized in the process of mining, transportation and utilization. In addition, with good economic and social benefits of UCG, it is of far-reaching significance to develop UCG in China.

Keywords: mining engineering; low-carbon economy; underground coal gasification; prospect

0 引言

由于人类工业化的过程, 大量使用化石燃料, 致使 CO₂ 等气体过度排放, 产生了严重的温室效应。为此, 在联合国主持下, 从 1992 年起, 召开了一系列 (15 次) 国际会议与相应的国际条约。2003 年, 英国政府首次在《我们未来的能源——创建低碳经济》一书中提出“低碳经济”的概念。书中指出, 低碳经济是通过更少的自然资源消耗和更少的环境污染, 获得更多的经济产出^[1]。2009 年 12 月 7 日至 18 日在丹麦哥本哈根召开《联合国气候变化框架公约》, 并形成其“哥本哈根协议”, 其目标是减少温室气体 CO₂ 的排放, 防止全球平均气温再上升 2℃。至此, 全球迎来了“低碳经济”时代。

作为能源消费大国, 我国应主动承担起降低碳排放强度的责任, 积极发展低碳能源技术,

基金项目: 中国矿业大学“211 工程”三期建设项目 (A90101 和 A90109); 教育部科学技术研究重点项目 (02019)

作者简介: 黄温钢 (1986-), 男, 中国矿业大学硕士在读, 主要研究方向: 煤炭地下气化. E-mail: wengang-huang@163.com

这不仅是展现责任大国的态度，更是我国转变发展方式、真正走科学发展之路的内在需求。我国推行“低碳经济”将面临两大挑战：

第一，我国正处于工业化、城市化、现代化加快推进的进程中，能源需求快速增长，大规模基础设施建设不可能停止。据统计，2000 后我国的能源消费年平均增长率高达 9.7%，2007 年，我国能源生产总量达到 23.7 亿 tce，能源消费达到 26.5 亿 tce，均位居世界第二^[2]。

第二，“富煤、少气、缺油”的资源条件，决定了中国能源结构以煤为主，低碳能源资源的选择有限。我国电力中，水电占比只有 20%左右，火电占比达 77%以上，“高碳”占绝对的统治地位。尽管太阳能、风能等可再生能源在大力发展中，但一时都很难充当主角。

因此，我国能源结构以煤炭为主的局面在短时间内还难以改变。而传统的煤炭开采、运输、使用方式均会排放大量的温室气体，并引发一系列的环境问题。如何让煤的开采和使用变得干净、少污染，将煤炭资源低碳化利用成为当务之急。而发展煤炭地下气化是我国解决上述问题的最佳途径，本文将从节能减排、清洁利用的角度介绍煤炭地下气化技术。

1 煤炭地下气化技术

1.1 煤炭地下气化的基本概念

煤炭地下气化（Underground Coal Gasification）就是向地下煤层中通入气化剂，将煤炭进行有控制的燃烧，通过对煤的热作用及化学作用而产生可燃气体，然后将产品煤气导出地面再加以利用的一种能源采集方式。它将建井、采煤、气化三大工艺合而为一，将物理采煤转变为化学采煤，即把高分子固体煤转变为低分子结构的可燃气体，抛弃了全部庞大而笨重的采煤设备与地面气化设备，并大幅度减小了建井规模，具有安全好、污染少、投资小、成本低、效率高、见效快等优点^[3]。

1.2 煤炭地下气化的基本原理

煤炭地下气化的基本原理，与一般煤炭气化一样，是把煤炭的固体有机物通过热力和化学作用变为可燃气体，其区别在于地下气化过程主要是在地下气化炉的气化通道中实现的，如图 1 所示。该过程可在气化通道中形成以下三个区域^[4]：

1. 由进气孔鼓入气化剂（有效成分是 O_2 和水蒸气），并在进气侧点燃煤层，气化剂中的 O_2 遇煤燃烧产生 CO_2 ，并释放大量的反应热，使还原区煤层处于炽热状态，当气流中 O_2 浓度接近于零时，氧化区结束。

2. 在还原区 CO_2 与炽热的 C 还原成 CO， $H_2O(g)$ 与炽热的 C 还原成 CO、 H_2 等，由于还原反应是吸热反应，使煤层和气流温度逐渐降低，当温度降低到不能再进行还原反应时，还原区结束。

3. 经过还原区的气流温度还相当高，对下流煤层进行加热使其热分解，而析出于馏煤气，此区域则称为干馏干燥区。

经过这三个反应区以后，生成了含可燃组分（主要是 H_2 、CO、 CH_4 ）的煤气，气化反应区逐渐向出气口移动，因而保持了气化反应过程的不断进行。由此可见，可燃气体的产生主要来源于三个方面即水蒸气的分解， CO_2 的还原和煤的热解，这三个方面作用的程度，正比于反应区温度和反应比表面积，同时也决定了出口煤气的组分和热值^[4]。

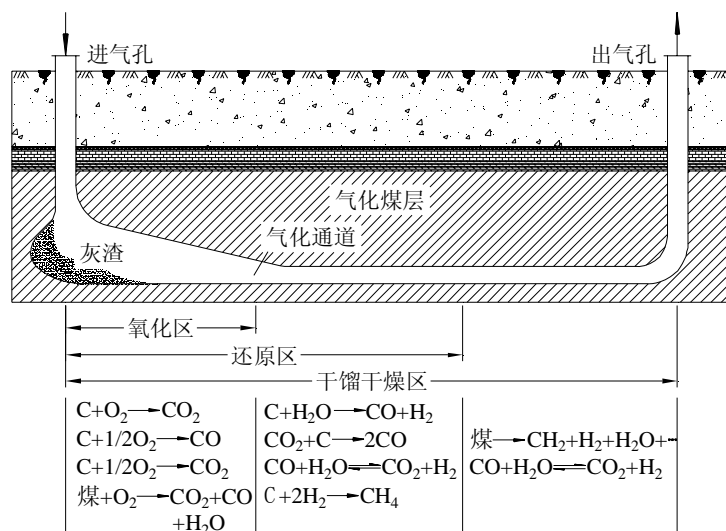


图1 煤炭地下气化原理示意图
Fig. 1 Schematic diagram of underground coal gasification

1.3 地下气化炉

地下气化的物质基础是地下气化炉，组成地下气化炉的四个要素是进气孔（通道）、排气孔（通道）、气化通道和气流通道^[4]。地下气化炉按施工方法可分为以下三种形式^[5]：

1. 有井式：有井式是地下气化系统全部采用井工作业来进行构筑，鼓风系统、初步冷却、降尘系统也安置于井下峒室，进、排气孔是井筒，气化通道是人工掘进的煤巷。

2. 无井式：无井式就是地下气化炉的准备工程量全部采用在地面钻孔作业，供风、排气和净化系统也全部安置于地面气化站中，生产运行也全部在地面操作。其气化通道贯通方法有火力渗透法、电力贯通法、水压贯通法、气力贯通法、定向贯通法、原子能爆破法、化学液爆破法等。

3. 综合式：综合式就是地下气化炉的准备工程采用井工作业完成，地下气化的生产运行采用地面操作。

2 地下气化是我国煤炭资源低碳化利用的捷径

低碳经济是以低能耗、低污染、低排放为基础的经济模式，作为煤炭生产和消费大国，低碳能源技术是我国实现这一经济模式的主要手段，也是低碳经济的基础。煤炭地下气化不仅可以提高矿井的采出率，而且可以高效洁净地利用煤炭资源，在煤炭的开采、运输及利用过程中均可实现低碳化或无碳化，是一种理想的低碳能源技术。

2.1 低碳化开采煤炭资源提高矿井采出率

2.1.1 二次开采提高煤炭资源回收率

我国是煤炭生产大国，煤炭产量占全世界煤炭总产量的 37%左右，如此巨大的产量是数万煤矿夜以继日开采的结果。而矿井和矿区从新建投产、稳产、高产到衰减和报废，是煤炭生产的行业特点。长期以来，由于煤矿井工开采强度增大，加速了衰老报废的速度。自 1997 年以来，我国政府开始实施减产和关闭非法或达不到安全标准煤矿的计划，目前大约关闭了 6 万个小煤矿。截止 1999 年，原 94 户国有重点煤矿企业的近 600 个矿井中，有 1/3 的煤矿是衰老矿。据统计^[6]，1953~1998 年国有重点煤矿报废矿井 459 处，报废矿井和生产

矿井老空区遗留的煤炭储量有 300 亿 t 以上。预计到 2020 年, 中国报废矿井将达到 541 处。同时, 受井工采煤技术水平的限制, 约 50% 的煤炭资源被遗弃在井下。矿井废弃后, 采空区自燃现象加剧, 会向大气排放大量的温室气体和有害气体, 造成大气污染。

回收利用这些宝贵资源, 并避免报废矿井自燃对环境造成污染, 其最有效、最有意义的办法就是在废弃矿井中实施地下气化。煤炭地下气化技术不仅可以回收矿井遗弃煤炭资源, 而且还可以用于开采井工难以开采或开采经济性、安全性较差的薄煤层、深部煤层、“三下”压煤和高硫、高灰、高瓦斯煤层。因此, 作为二次采煤法煤炭地下气化对回收遗弃资源提高矿井采出率具有重要的现实意义。

2.1.2 降低产煤能耗实现低碳化开采

煤炭的生产(煤炭采掘、运输、照明、井筒防冻、煤矿工业广场地面建筑等)和煤炭的洗选加工都会消耗大量的能源, 这些能源种类包括煤、电、柴油、汽油等, 一般以煤、电为主。在计算能耗总量时, 通常统一折合成吨煤煤耗或者吨煤耗电量。对国内几个大型矿业集团统计资料表明^[7], 吨煤生产综合耗电量约为 40 kWh (最高达 80 kWh), 选煤耗电量约为 8 kWh/t, 中小型矿业集团受资源条件和生产设备的限制, 能耗更高。煤矿区的能源消耗会导致直接(煤、油燃烧、坑口电站发电)和间接(外购电)排放二氧化碳。资料表明^[7], 产生 1 kWh 电排放 0.872 kg CO₂ (煤耗 350 g/kWh)。按上述大型矿业集团的能耗数据计算, 保守估计 2007 年、2008 年我国因煤炭生产耗能间接导致二氧化碳排放量分别为 9 592 万 t 和 10 603.52 万 t, 具体情况见表 1^[7]。

表 1 2007、2008 年我国煤炭生产耗能间接排放的 CO₂
Tab. 1 China's indirect CO₂ emissions from consumption of coal production in 2007 and 2008

年份	项目	产量/亿 t	CO ₂ 排放量/万 t	CO ₂ 排放量合计/万 t
2007	原煤	25.3	8 824.64	9 592
	入洗	11	767.36	
2008	原煤	27.9	9 731.52	10 603.52
	入洗	12.5	872	

数据来源: 中国统计年鉴; 《中国煤炭加工利用辉煌 60 年》。

统计表明^[7], 在原煤生产能耗中: 主通风机、主排水、主提升、压风(四大件)占原煤生产能耗的 80% 左右, 煤炭企业主要耗能设备(四大件)运行状况对企业能耗产生着举足轻重的影响。煤炭地下气化技术, 尤其是无井式气化, 由于无需进行井下通风和排水, 也不存在煤炭、材料和人员的运输问题。因此, 地下气化开采过程中能耗要大大低于传统的采煤方法。而粗煤气的净化过程只需在净化加装一部引风机, 作为动力使粗煤气依次经过水封洗气塔、焦炭过滤塔、洗涤塔、捕滴塔等设备即可实现, 其单位耗能低于选煤的单位耗能。因此, 地下气化可实现煤炭资源的低碳化开采。

2.1.3 温室气体循环利用降低碳排放

近年来, 煤炭行业加大了煤矿瓦斯治理力度, 瓦斯抽采量逐年增加。据统计^[7], 2004~2008 年全国煤矿瓦斯抽采量增加了 40 亿 m³, 2008 年全国煤矿瓦斯排放总量超过 150 亿 m³, 但我国煤矿瓦斯抽采利用绝大部分只是针对中高浓度瓦斯, 而占煤矿瓦斯排放总量 90% 的低浓度瓦斯利用较少, 尤其是浓度低于 1% 的矿井乏风瓦斯基本没有利用, 2008 年煤矿瓦斯利用量仅为 18 亿 m³ 左右, 其余瓦斯则被直接排入大气中。瓦斯的主要成分甲烷对臭氧层的破坏能力相当于二氧化碳的 7 倍, 产生的温室效应相当于二氧化碳的 21 倍, 甲烷的大量排

放势必会对气候产生重大影响。地下气化开采是将煤炭在地下直接进行有控制的燃烧，化传统的物理采煤方法为化学采煤方法，由于气化工作面无人、无设备，工作面无需通风，尤其是高瓦斯煤层，可对其进行整体气化，无需采前抽放煤层瓦斯。2005年，中国矿业大学在重庆中梁山北矿进行的煤炭地下气化试验首次实现了在高瓦斯矿井进行地下多煤层联合气化，这一试验的成功对今后煤炭开采过程的碳排放量控制具有重要意义。

此外，煤炭地下气化可在开采过程中集中处理 CO_2 或直接将其进行循环利用以达到减排目的。气化工程中， CO_2 作为气化过程的中间体和产物，参与了一系列的氧化还原反应，由于气化的最终目标产物是 CO 和 H_2 ， CO_2 作为煤气中的不可燃组分，其含量限制了煤气的热值，也是潜在的 CO_2 排放源^[8]。因此，可采用气液吸收的方法将 CO_2 分离，即选用对酸性气体有吸收能力的溶液，在适宜的条件下，洗涤含 CO_2 气体的原料气，从而使 CO_2 与其它气体分离，洗涤后的吸收溶液，再经过提高温度、降低压力或采取其它措施，使被吸收的 CO_2 气体释放出来，作为气化剂再回填到进气通道中，同时吸收溶液得到再生，具体工艺可见图 2^[9]。研究表明^[9]，将生成的煤气中的 CO_2 分离并进行回填利用，不仅有利于提高最后生产的煤气的热值，而且实现了 CO_2 的循环利用，在很大的程度上减少了 CO_2 的排放，具有较好的环境效益。

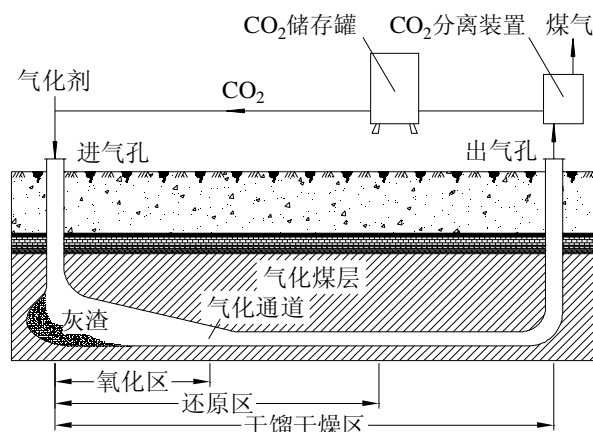


图2 CO_2 分离回填工艺图

Fig. 2 Process graph of CO_2 separation and backfill

2.2 综合利用煤炭资源降低碳排放强度

2.2.1 综合利用提高煤炭资源利用率

长期以来，我国以煤炭为主的能源体系发展模式较粗放（高耗、污染、欠安全），煤炭利用方式单一、陈旧是造成这一局面的主要原因。2008年，全国煤炭消费总量为27.4亿t，其中发电用煤量达14亿t^[7]，其比例占消费总量的51.1%。我国火力发电厂的发电效率普遍低下，据统计，中压电厂发电效率只有24.5%，高压电厂为30.5%，超高压火力电厂为37%。如何提高火力发电的效率，对减少电煤用量（或燃煤量），降低碳排放强度具有重要意义。

煤炭地下气化综合利用煤炭资源，可大大提高其利用率：粗煤气降温处理得到的高温蒸汽可用于发电，或向产业群和就近的城市和农村集中供热，尤其是利用余热发展就近农村的温室绿色农作物产业，改善产销调节；而净化后的燃气可以就近进行燃气发电。

煤炭地下气化煤气可用于IGCC发电——整体煤气化联合循环（Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC）发电，该技术被普遍认为是具有发展前景的洁净煤发电技术之一，

既能达到较高的发电效率，又有极好的环保性能。在目前技术水平下，IGCC 的发电效率已达到 45%~48%（百万 kW 超超临界机组的发电效率一般为 44% 左右），今后有望达到更高。美国 1998 年 4 月推出的“综合国家能源战略”要求，2012 年 IGCC 的发电效率要提高到 60% 以上；华能绿色煤电天津 IGCC 示范电站建成后，发电效率就可达到 48%^[10]。如果全国电厂均采用 IGCC 技术发电，以 2008 年为例，每年光电煤用量至少可节省 4.5 亿 t，并可避免因燃烧这部分煤炭而造成的 9.9×10^8 t CO₂ 排入大气中。

此外，地下气化煤气用于燃气-蒸汽联合循环发电也是合理使用地下气化煤气热能的有效途径。早在 2002 年时，我国科研人员柴兆喜等就认为发展“气采—燃气轮机无水发电（UGTG）”具有广阔前景。对现有电厂进行扩建和技术改造，实施改造 20 万 kW 以下发电机组的目标，现有电厂改装机容量 70% 左右的蒸汽轮机为燃气轮机，与所余机组构成气采—联合循环发电（UGCC）。预测 2020 年全国燃煤发电装机总量将达到 5 亿 kW 左右，约年耗水 100 亿 t、燃煤 15 亿 t。若采用上述扩建 UGCC 改造方案，需“气采”能力 10 亿 t 煤/年，约年节水 70 亿 t，并可消除燃煤 15 亿 t/年的“煤污染全程”^[11]。

2.2.2 煤转化技术实现煤炭清洁利用

2008 年，我国锅炉燃烧用煤达 20 亿 t，原煤直接燃烧所占比例超过总消费量的 60%^[7]。煤炭直接燃烧利用不仅效率低下，而且会排放出大量的温室气体和有毒有害物质，污染大气环境。煤与石油、天然气等燃料相比，单位热量燃煤引起的 CO₂ 排放比使用石油、天然气分别高出约 36% 和 61%。由于我国的煤炭消费比重比较大，因此造成能源消费中 CO₂、SO₂ 和烟尘的排放强度也相对较高。据统计，我国每年因燃煤供能而形成的 CO₂ 达 44×10^8 t^[12]，85% 的 CO₂、90% 的 SO₂ 的和 73% 的烟尘都是由燃煤排放的，大气污染造成的经济损失已占 GDP 的 2.2%^[2]。

地下气化煤气可以集中净化，将粗煤气中的 CO₂ 以及焦油、硫和粉尘等其它有害物质分离出来加以利用，可避免直接排放对环境造成的影响。此外，在煤炭地下气化过程中，H₂O（气态）的分解、热解作用及 CO 的变换反应可以制取纯度较高的 H₂。实验室模型试验、煤炭地下气化半工业性试验和工业性试验结果表明^[13]，采用“长通道、大断面、双火源、两阶段煤炭地下气化”制氢工艺，地下水煤气中 H₂ 含量基本均在 50% 以上，最高可达 72.36%。H₂ 可储、可输性好，不仅是高能燃料，而且使用灵活、方便、清洁，是当今人类最理想的清洁能源，符合人类可持续发展的需要。煤炭地下气化的过程将固体高碳能源转化为气体低碳能源（CO 和 CH₄）甚至无碳能源（H₂），实现了煤炭低碳利用。

3 大力发展煤炭地下气化的意义深远

煤炭地下气化技术不仅可以回收矿井遗弃煤炭资源，而且还可以用于开采井工难以开采或开采经济性、安全性较差的薄煤层、深部煤层、“三下”压煤和高硫、高灰、高瓦斯煤层；地下气化燃烧后的灰渣留在地下，减少了地表下沉，无固体物质排放，煤气可以集中净化，大大减少了煤炭开采和使用过程对环境的破坏；地下气化煤气不仅可作为燃气直接民用和发电，而且还可用于提取纯氢或作为合成油、二甲醚、氨、甲醇的原料气；地下气化可实现工作面无人化甚至井下无人化，相比传统采煤方法安全性较好。煤炭地下气化技术具有较好的经济效益、环境效益和社会效益，应成为我国洁净煤技术的重要研究和发展方向。

3.1 地下气化开采可减少对矿区环境的破坏

传统的采煤方法开采煤炭，会对矿区环境造成了一系列影响。煤炭从地下开采后，会形

成大量悬空的采空区,采空区塌陷致使地表下沉,并导致地面建筑物破坏。据统计,我国井工矿每采万吨煤,地表平均下沉面积为 2 000 m²。2009 年,我国煤炭产量为 29.6 亿 t,按照上述地表沉陷比例计算,2009 年我国因采煤引起的地表下沉面积为 550.6 km² (露天煤矿产量按占我国煤炭总产量的 7% 计算)。此外,井下矸石排放地面堆积形成矸石山占用大量农田,矸石自燃还会散发出大量烟尘及有害气体。据统计^[14],我国煤矿现有矸石山 1 500 多座,总堆积量达 30 亿 t,占地 58 km²,并且每年新增排放量 1.5~2.0 亿 t,占地约 3~4 km²。

煤炭地下气化后灰渣仍留在地下,可大大减少地面下沉量,必要时辅之以充填措施,保证地面建筑物不受影响。地下气化技术尤其是无井式气化在开采过程中不产生矸石,可避免传统采煤和地面气化过程中造成的废气、废水、废渣等污染。

3.2 煤炭地下气化产品竞争力强

地下气化技术能有效地利用资源和能源,可根据市场需求调节生产工艺,产品多样,市场适应性强。降温处理粗煤气,可利用高温蒸汽发电,或向产业群和就近的城市和农村集中供热,尤其是利用余热发展就近农村的温室绿色农作物产业,改善产销调节。粗煤气净化过程中可获得焦油和硫产品、酸产品和苯产品,净化后的燃气可以就近进行燃气发电或作为民用燃气。此外,净化后的煤气可用于提取纯氢或作为制取合成氨、二甲醚和合成石油的原料。

我国实践表明^[11],在地面以上引进“先进”技术所作生产的合成氨,二甲醚、合成油等化工产品成本很高以至于没有竞争力。而煤炭地下气化产品的成本低廉,具备很强的市场竞争实力。采用煤炭地下气化技术,煤炭不需要开采、运输,不需要地面洗选、加工、转化设备,减少了占地,从而节约了大量建井、采煤工程投资,使煤气成本大幅度降低。与地面气化相比,地下气化站设施的投资仅为地面气化的 1/2,煤气成本按热值折算也仅为地面气化的 1/2,如表 2 所示^[6]。

表 2 地下气化煤气与地面气化煤气的比较

Table 2 The comparison of underground gasification gas and coal ground gasification gas

气化形式	基建投资/万元	成本/元·Nm ⁻³	生产工艺	环境影响
地面气化	350~450	0.4~0.6	备煤,地面气化	有渣排放
地下气化	120~150	0.15~0.25	地下气化	无渣排放

据统计^[11],煤炭地下气化制氢成本为 0.5 元/m³,而利用一般方法制取氢气则为 1.5~2.0 元/m³;与地面气化相比,煤地下气化生产合成气成本可下降 43%,生产天然气代用品成本可下降 10%~18%,发电成本可下降 27%。采用“长通道、大断面”新工艺可大大节省建炉的初期投资和运行费用,煤气成本就更低。

对于热值较低的煤气,或者是气化炉数量较少,产气量较低,用于生产合成氨和甲醇达不到经济规模时,地下气化所产煤气用于发电也具有显著的经济效益。以孙村煤矿地下气化煤气发电机组经济效益分析为例^[15]:煤气热值为 9.44 MJ/m³,属低热值煤气。安装一台发电机组,消耗的煤气量为 385 m³/h,以每天工作 16 h 计算,机组在峰期和平期运行,电价平均 0.55 元/(kW·h),机组年发电量 144 万 kW·h,电费收入 79.2 万元。扣除机组运行费用 55 万元,一台机组每年可创经济效益 24.2 万元。因此,利用地下气化煤气发电,是实现煤炭生产高附加值产品的良好途径,具有广阔的市场前景。

3.3 煤炭地下气化可提高煤矿生产人员的安全性

中国煤炭产量占全世界煤炭总产量的 37% 左右,但事故死亡人数却占全世界煤矿死亡

总人数的 70%左右。虽然近年来煤矿事故起数和死亡人数持续下降,但事故的总量依然偏大。据统计,中国煤矿事故死亡人数已从 2005 年的 5 938 人下降到 2009 年的仅 2 700 人左右,尤其 2009 年比 2008 年死亡人数下降了 18%。而 2009 年美国矿业的死亡人数只有 34 人,其中煤矿全年死亡人数 18 人,金属/非金属矿全年死亡人数 16 人,总数相比于 2008 年的 52 人死亡有了下降。2008 年,我国煤矿每百万吨死亡率约为 3.96,而美国煤矿每百万吨死亡率仅为 0.039,印度是 0.42,俄罗斯是 0.34,南非是 0.13,中等发达国家平均每百万吨死亡率一般为 0.4 左右。上述局面不仅仅是因为我国煤矿机械化水平不高、从业人员素质低下造成的,也是因为我国煤炭资源赋存条件普遍比较复杂,高瓦斯矿井数量多,使得生产过程中易发生事故。煤炭地下气化工作面可实现无人化操作,而无井式地下气化可实现井下无人化,这大大增强了煤矿生产人员的安全性,对提升煤炭行业形象具有重要意义。

3.4 煤炭地下气化可降低对进口油、气的依赖程度

我国是一个贫油、少气、煤炭资源相对丰富的国家。据统计,2007 年,我国原油产量 1.87 亿 t,石油消费量约 3.4 亿 t,石油净进口量达 1.776 亿 t^[2],而 2010~2020 年我国石油供需缺口估计将达 2~4 亿 t 之间。专家预计,2010 年和 2015 年,我国天然气消费量将分别达到 1 200 亿 m³和 2 000 亿 m³左右;2010 年我国天然气供需缺口为 200~300 亿 m³,进口占比约 20%;2015 年缺口为 300~700 亿 m³,进口占比有望进一步扩大至 30%~40%。如果没有煤基燃料和煤化工产品替代,石油和天然气的供需缺口将更大。地下气化煤气甲烷化可以替代天然气,气化煤气还可作为合成油(采用煤的间接液化技术)的原料。煤气甲烷化和间接液化的技术现已成熟,煤炭地下气化可为其提供稳定、廉价的原料气,适合规模化生产,大力发展煤炭地下气化及其煤气转化(液化、甲烷化)技术可降低国内市场对进口石油和天然气的依赖程度。

4 结语

煤炭地下气化作为新一代采煤方法,不仅可以回收矿井遗弃煤炭资源,而且还可以用于开采井工难以开采或开采经济性、安全性较差的薄煤层、深部煤层、“三下”压煤和高硫、高灰、高瓦斯煤层;地下气化燃烧后的灰渣留在地下,减少了地表下沉,无固体物质排放,煤气可以集中净化,大大减少了煤炭开采和使用过程对环境的破坏;地下气化粗煤气净化可得到焦油、硫产品、酸产品和苯产品,净化后的煤气不仅可作为燃气直接民用和发电,而且还用于提取纯氢或作为合成油、二甲醚、氨、甲醇的原料气;煤炭地下气化产品多样,且相较于传统工艺或地面气化的产品成本更为低廉,市场竞争力强。煤炭地下气化对煤炭资源的综合利用(如图 3 所示),可以取得良好的环境效益、经济效益和社会效益,对推动我国低碳经济的发展具有重要意义。

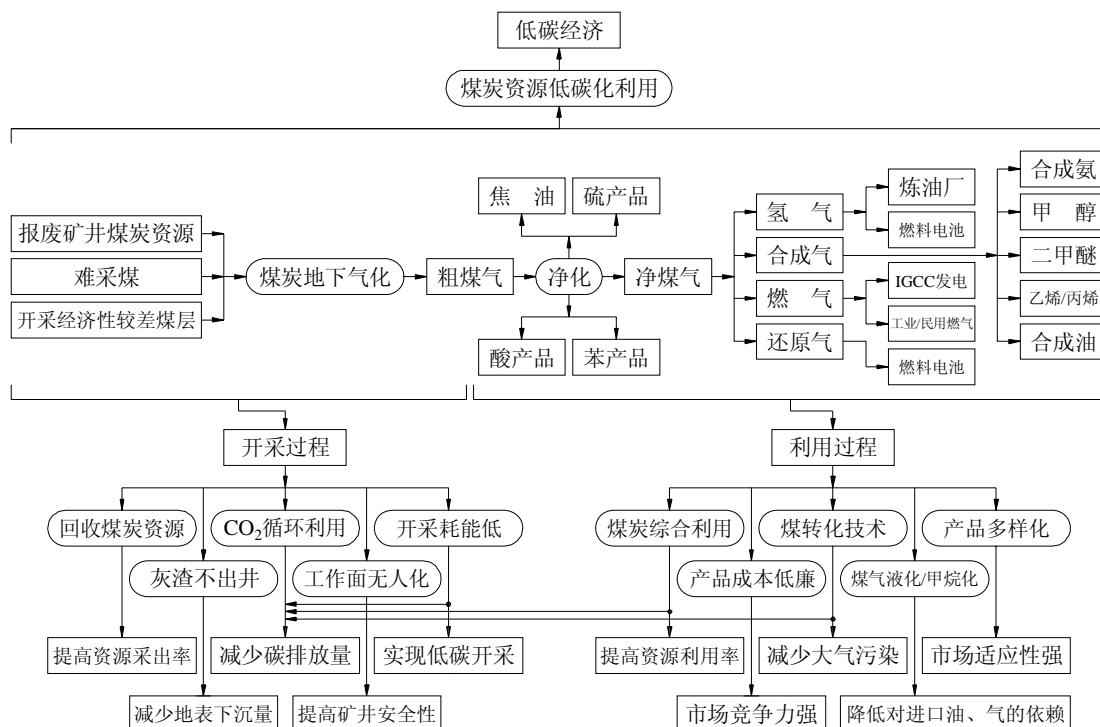


图3 煤炭资源综合利用示意图
Fig. 3 Schematic diagram of coal resources comprehensive utilization

[参考文献] (References)

[1] 付允, 马永欢, 刘怡君, 等. 低碳经济的发展模式研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18 (3): 14-19.

[2] 张玉卓. 从高碳能源到低碳能源——煤炭清洁转化的前景[J]. 中国能源, 2008, 30 (4): 20-22.

[3] 余力. 煤炭地下气化学术论文选集[C]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2003: 1-2.

[4] 沈芳, 梁新星, 毛伟志, 等. 中国煤炭地下气化的近期研究与发展[J]. 能源工程, 2008, (1): 5-10.

[5] 霍礼文. 煤岩热破裂微地震效应及其地下气化燃烧波位态探测的应用[D]. 徐州: 中国矿业大学图书馆, 2007.

[6] 初茉, 李华民, 余力, 等. 煤炭地下气化——回收报废矿井中煤炭资源的有效途径[J]. 中国煤炭, 2001, 27 (1): 22-29.

[7] 申宝宏, 杨丽. 煤矿区低碳发展途径探讨[J]. 中国能源, 2010, (2): 5-7.

[8] 刘淑琴. 煤炭地下汽化过程中 CO2 产生规律及其减排方法的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2000.

[9] 毛伟志, 梁杰, 彭丰成, 等. 煤炭地下气化过程中 CO2 回填减排工艺探讨[J]. 煤矿安全, 2008, (1): 72-74.

[10] 能动信息网. 整体煤气化联合循环 (IGCC) 助推洁净煤发电[OL]. [2009/08/05]. <http://enpinfo.com/Turbine/Doc/Base/200908/14622.html>

[11] 朱铭. 低碳经济看煤地下气化[J]. 知识就是力量, 2010, (3): 20-22.

[12] 李琼玖, 廖宗富, 周述志, 等. 燃煤发电排放 CO2 的处置利用途径[J]. 中外能源, 2009, 14 (1): 97-100.

[13] 杨兰和, 梁杰, 尹雪峰. 煤炭地下气化制氢技术理论与实践[J]. 煤炭科学技术, 2000, 28 (6): 37-39.56.

[14] 李金柱. 煤炭工业可持续发展的开发利用技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998.

[15] 张树军, 史志清, 焦玉新. 地下气化煤气的发电应用[J]. 煤气与热力, 2003, 23 (9): 571-572.