

[ 国家自然科学基金资助项目 ]

# 煤炭地下气化工程

杨兰和 宋全友 李耀娟 编著

中国矿业大学出版社

# 前 言

中国是以煤炭为主要能源的国家,煤炭在一次能源消费结构中的比重约占70%左右。资源条件决定了在今后相当长的时间内,煤炭在我国能源结构中的主导地位不会改变。然而,煤炭开采和利用中还存在如下问题:① 煤炭回采率低:由于传统采煤方法受到“三下”(建筑物下、水体下和铁路下)和“一上”(奥陶系灰岩岩溶水上)安全开采的限制,实际回采率只有50%。从1953年至今我国报废矿井达400处,到2020年将超过500处,因报废矿井而弃留在井下的煤炭估计有300亿t。② 传统井工开采工作环境差,危及工人安全因素多;顶板垮塌、瓦斯爆炸、煤与瓦斯突出、冲击地压、火灾、突水、透水等重大事故至今仍未得到有效控制,百万t死亡率几十倍于采煤发达国家。③ 传统井工开采造成的地表沉陷、农田淹没、水资源流失等环境灾害严重。据统计,因井工开采所造成的土地塌陷每年平均1.33万ha,每年将有7.9万人因此失去土地。我国人均耕地只有0.84ha,不及世界人均耕地的1/4,这是一个十分严重的问题。④ 燃煤引起环境污染。1953~1989年间消耗煤量158.77亿t,用于燃烧的就121.2亿t,占总耗量的76.4%。全国80%的煤尘量和90%的二氧化硫均来自煤炭燃烧,因此可以说,我国是煤烟污染型大国。因此,提高煤炭的回采率,最大限度地、科学地提高煤炭的利用水平和减少燃煤污染,最终达到可持续发展的目的是煤炭开发和利用过程中所不可避免的问题。

煤炭地下气化是开发清洁能源的新技术,采煤的目的是提取煤中有效成分而不是采煤本身,地下气化采用有控制地燃烧处于地下的煤炭,使煤在热作用及化学作用下产生可燃气体,并将建井、采煤、气化三大工艺合而为一,变物理采煤为化学采煤,因此,煤炭地下气化又称化学采煤。这种办法抛弃庞大的、笨重的采煤设备与地面气化设备,具有以下优点:① 可充分利用和节约煤炭资源,能够最大限度地回收遗留在地下的煤炭资源,提高其利用率。煤炭地下气化能把地下的煤大部分气化(即回采率达80%以上),能把报废矿井中遗留煤的50%以及边缘不可采的煤气化,能气化薄煤层、深部煤层和“三下”压煤。② 可有针对性地从根本上改变当前煤炭开采所引起的环境问题。煤炭地下气化可以低成本且高效地脱除煤气中的硫化物、氮化物和其他污染物,可将污染环境的煤灰留于地下,比地面直接或间接脱硫和气化优越得多。③ 将煤炭地下气化与注浆充填新技术相结合,可以解决地表沉陷问题。④ 从根本上解决了村庄下煤层开采问题,从而高效地回收传统井工开采所不能开采出的村庄压煤。⑤ 另外,煤炭地下气化能提供丰富且洁净的能源和化工原料,从而实现煤的综合利用,可节约基建投资,缩短建设周期,便于实现煤炭开采及利用的自动化和机械化。

1979年,联合国“世界煤炭远景会议”明确指出,发展煤炭地下气化是世界煤炭开采的研究方向之一,也是从根本上解决传统开采方法存在的一系列技术和环境问题的重要途径。1992年国家科委制定的我国科技中长期发展纲要白皮书明确指出:“到2020年的战略目标和关键技术是完成煤炭地下气化试验研究”并“建立商业性煤炭地下气化站”。1997年2月,在日本东京召开的温室气体集中处理国际会议提出将一切矿物燃料转变为甲醇和氢能的新计划。一旦该计划得以实施,可以有效地控制温室效应。该计划与煤炭地下气化项目所致力

的工作、开发的目的是高度一致的。

作者十几年来一直从事煤炭地下气化技术的开发与研究工作。1990年完成了江苏省煤炭厅“七五”科技攻关项目——“徐州马庄煤矿地下气化试验”；1991~1993年间完成了七次实验室模型试验，积累了大量有价值的试验数据，为后续的现场煤炭地下气化试验，提供了可靠的工艺参数；1994年3月至1995年1月完成了国家“八五”重点科技攻关项目——“徐州新河二号井煤炭地下气化半工业性试验”。1994年10月，该项目通过了国家级技术专家鉴定。鉴于在倾斜、缓倾斜或水平煤层中进行气化所遇到的实际问题，杨兰和提出了煤炭地下气化温控爆破渗流燃烧方法。1993~1996年间，杨兰和在导师余力教授的指导下，完成了博士学位论文《煤炭地下气化温控爆破渗流燃烧技术的研究》。作者作为主要成员还参与了河北省“九五”重点科技攻关项目——“唐山刘庄煤矿煤炭地下气化工业性试验”，工业性试验于1996年5月18日点火成功，连续稳定产气至今。1997年11月该项目已通过河北省计委组织的国家级技术专家鉴定，各项试验指标均达到设计要求，试验结果达到国际领先水平。目前，作者负责承担着国家自然科学基金资助项目——“煤炭地下气化温控爆破渗流燃烧控制参数及变化规律研究”。这些研究成果必将为促成煤炭地下气化产业的形成与发展，提供科学依据和理论指导。

本书系统地总结了作者十几年来从事煤炭地下气化理论与实践研究的主要成果。

全书共分九章，较详细地介绍了研究煤炭地下气化技术的必要性及国内外研究现状，分析了煤炭地下气化过程的物理化学特征和主要影响因素，讨论了地下气化煤田勘探与疏干问题，研究了煤炭地下气化炉的构筑方法，重点介绍了地下气化通道的各种贯通技术。这是本书的核心内容，也是煤炭地下气化技术关键。围绕着煤层气化的工艺方法、工艺过程、气化反应过程的条件、火焰工作面和气化空间的特征，详细叙述了煤炭地下气化的基本理论。对于本书比较重要的部分——煤炭地下气化过程的管理与控制，着重介绍了地下水的探测及调节、管理气化过程的空气动力学方法、气化反应空间的管理、火焰工作面的探测及气流泄漏的量测与控制技术，对煤炭地下气化的生产技术系统作了一般性介绍。最后，介绍了煤炭地下气化的评价内容。

本书由杨兰和副教授、宋全友副教授和李耀娟教授共同编写完成。在本书的写作和先期研究中，得到许多前辈、教授、专家及同事的指导和帮助。在此，作者谨向以下单位和个人表示衷心的感谢：中国矿业大学煤炭工业地下气化工程研究中心余力教授、梁杰副教授、张维廉教授、陈宽德副教授、岳丰田副教授、郭楚文副教授和王家廉高级工程师；徐州矿务局顾则仁总工程师、王继光高级工程师；唐山汇源煤炭地下气化公司贺广祥总经理、张玉洪经理及杨中开工程师；山东省龙口矿务局北皂煤矿常颖矿长、尹雪峰工程师；长春市煤炭工业局羊草沟煤矿；郑州矿务局王庄煤矿。

由于水平有限，书中难免有缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

作者

2001年8月于徐州

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	(1)
<b>第一节 煤炭地下气化研究的重要意义</b> .....	(1)
一、煤炭地下气化.....	(1)
二、我国发展煤炭地下气化技术的必要性.....	(1)
三、研究煤炭地下气化的意义.....	(3)
<b>第二节 国外煤炭地下气化发展概况</b> .....	(6)
一、苏联.....	(6)
二、美国.....	(7)
三、英国.....	(8)
四、法国、德国和比利时.....	(9)
五、波兰.....	(9)
六、捷克.....	(10)
七、日本.....	(10)
<b>第三节 我国煤炭地下气化研究现状</b> .....	(11)
<b>第二章 煤炭地下气化基本原理</b> .....	(14)
<b>第一节 概论</b> .....	(14)
<b>第二节 煤炭地下气化物理化学特征</b> .....	(15)
一、氧化带—半焦燃烧的化学变化.....	(15)
二、还原带的物理化学变化.....	(16)
三、干馏干燥带及气流下游的变化.....	(17)
<b>第三节 煤炭地下气化的影响因素</b> .....	(18)
一、温度.....	(18)
二、水涌入速率.....	(19)
三、鼓风的量与质.....	(19)
四、煤层厚度.....	(20)
五、操作压力.....	(21)
六、气化通道的长度和断面.....	(22)
七、结论.....	(23)
<b>第三章 地下气化煤田的勘探与疏干</b> .....	(25)
<b>第一节 地下气化勘探</b> .....	(25)

一、勘探区的选择 .....	(25)
二、勘探网密度 .....	(25)
三、物探和测井 .....	(28)
四、气化生产过程中地质构造变动的观察 .....	(29)
五、气化生产时煤储量动态的统计 .....	(30)
第二节 地下气化矿床疏干 .....	(31)
一、气化区域水文地质勘察 .....	(32)
二、气化区域内水文地质的研究 .....	(32)
三、疏干措施及其影响因素 .....	(34)
<b>第四章 地下煤气发生炉的建立 .....</b>	<b>(39)</b>
第一节 有井式气化准备煤层的方法 .....	(39)
第二节 无井式气化方法 .....	(41)
一、生产盘区的划分 .....	(42)
二、钻孔网距 .....	(43)
三、钻孔的直径 .....	(44)
四、钻孔技术 .....	(45)
<b>第五章 气化通道的开拓方法 .....</b>	<b>(62)</b>
第一节 概论 .....	(62)
第二节 煤的渗透性及其测定方法 .....	(63)
一、渗透性的一般概念及其测定方法 .....	(63)
二、煤的渗透性及其影响因素 .....	(65)
三、结语 .....	(68)
第三节 无井式煤气发生炉的点火 .....	(69)
第四节 空气火力渗透法 .....	(71)
一、低压空气火力渗透法 .....	(71)
二、高压空气火力渗透法 .....	(75)
三、贯通速度 .....	(77)
四、火力渗透的影响因素 .....	(79)
第五节 电力贯通法 .....	(82)
一、概述 .....	(82)
二、煤的电物理特性 .....	(84)
三、通道形成的物理概念 .....	(90)
四、通道形成的实验室研究 .....	(93)
五、电力贯通法的工艺方式 .....	(105)
六、电力贯通法的实施 .....	(110)
七、电流作用于煤层中的现象分析及其规律 .....	(115)
八、现场试验结果 .....	(116)

九、电力贯通法的套管—套管方式和套管—燃烧工作面—套管方式 .....	(128)
十、结论 .....	(120)
第六节 水力压裂法 .....	(120)
一、概论 .....	(120)
二、水力压裂法的基本概念 .....	(121)
三、水力压裂工艺 .....	(125)
四、工作面压力放大器的运用 .....	(131)
五、自然条件下现场试验结果 .....	(132)
六、水力压裂法的新工艺 .....	(135)
第七节 定向钻进法 .....	(137)
第八节 新的贯通方法与爆破技术 .....	(140)
一、原子能爆破法 .....	(140)
二、化学液爆破煤层法 .....	(141)
第九节 贯通方法的评论 .....	(142)
<b>第六章 煤炭地下气化析气过程及工艺方法 .....</b>	<b>(144)</b>
第一节 煤的气化性质 .....	(144)
一、比热 .....	(146)
二、导热系数 .....	(146)
三、导温系数 .....	(148)
第二节 气化反应带和析气过程 .....	(149)
第三节 两种类型的气化反应通道 .....	(154)
第四节 气化反应过程的条件分析 .....	(157)
一、概述 .....	(157)
二、煤的物理化学性质 .....	(160)
三、煤层中的水分含量 .....	(160)
四、煤层中灰分含量与结渣 .....	(163)
五、热条件 .....	(167)
六、空气动力学条件 .....	(169)
七、鼓风强度 .....	(171)
第五节 煤层气化的工艺方法 .....	(173)
一、煤层渗透气化法 .....	(173)
二、人工破碎煤层的气化方法 .....	(174)
三、钻孔内气化法 .....	(174)
四、通道气化法 .....	(177)
第六节 改进地下气化工艺过程的方法 .....	(178)
一、定向鼓风 .....	(178)
二、煤层和鼓风预热 .....	(179)
三、二次燃烧(返流控制) .....	(182)

四、进脉动鼓风 .....	(182)
第七节 气化通道内的火焰工作面 .....	(183)
一、火焰工作面的移动 .....	(183)
二、火焰工作面的平均截面积 .....	(187)
第八节 煤气发生炉的气化空间 .....	(189)
<b>第七章 煤炭地下气化过程的管理与控制</b> .....	(193)
第一节 概述 .....	(193)
第二节 地下水的探测及其调节 .....	(195)
第三节 管理地下气化过程的空气动力方法 .....	(196)
第四节 地下气化反应空间的管理 .....	(203)
第五节 燃烧工作面的探测 .....	(206)
一、测氮法 .....	(206)
二、电法 .....	(213)
三、地震法 .....	(213)
四、声学法 .....	(214)
第六节 气流漏泄的量测与控制 .....	(214)
第七节 地下气化过程的物料平衡与热平衡 .....	(217)
一、物料平衡 .....	(217)
二、热平衡 .....	(222)
三、化学效率 .....	(227)
<b>第八章 地下气化生产技术系统</b> .....	(230)
第一节 适合用地下气化方法开采的煤层 .....	(230)
一、煤的种类 .....	(230)
二、灰含量 .....	(230)
三、煤层厚度 .....	(230)
四、煤层产状 .....	(230)
五、断层区域 .....	(231)
六、地表状态 .....	(231)
七、邻近岩层的性质 .....	(231)
八、分枝和复合的矿床 .....	(231)
九、存在的沼气——甲烷 .....	(231)
第二节 气化区域的开发和气化方式的选择 .....	(231)
一、沿煤层走向方向开发煤层 .....	(231)
二、沿煤层倾斜方向开发煤层 .....	(232)
第三节 煤炭地下气化站 .....	(234)
第四节 地下煤气发生炉的结构 .....	(235)
第五节 地下气化站的规模和设备 .....	(238)

一、年生产能力 .....	(238)
二、地下气化站的主要设施 .....	(239)
第六节 仪表监测和计算控制 .....	(241)
一、仪表监测 .....	(241)
二、计算控制 .....	(242)
第七节 鼓风量的自动调节 .....	(244)
第八节 煤气及其净制 .....	(245)
一、煤气产品的组分 .....	(245)
二、煤气的净化和干燥 .....	(248)
第九节 钻孔排气温度及钻孔的冷却 .....	(249)
<b>第九章 煤炭地下气化的评价 .....</b>	<b>(251)</b>
第一节 煤炭综合利用的合理结构形式 .....	(251)
第二节 地下气化煤气的利用 .....	(252)
第三节 煤炭地下气化的主要成就与存在的问题 .....	(256)
一、主要成就 .....	(256)
二、存在的问题 .....	(257)
第四节 地下气化的技术指标 .....	(258)
第五节 地下气化煤气的经济指标 .....	(261)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(266)</b>



# 第一章 绪 论

## 第一节 煤炭地下气化研究的重要意义

### 一、煤炭地下气化

煤炭地下气化(Underground Coal Gasification, UCG)就是将处于地下的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的过程,这也是多学科开发清洁能源与化工原料的新技术,其实质是只提取煤中的含能组分,将灰渣等污染物留在地下。

煤炭地下气化是将煤炭在地下直接变为可燃气体的技术,由地下气化炉和地面设备组成。地面设备由供气化剂设备(鼓风机、蒸汽锅炉或制氧设备)、煤气净化设备(降温、除尘、除焦油)、脱硫设备、贮气及输气管路组成。地下气化炉由进、出气孔和气化通道构成。进、出气孔用于输送气化剂通道和排放煤气到地面。气化通道在煤层中,是生产煤气的空间。进、出气孔往往由地面向煤层打钻孔与气化通道的首尾端连通。气化通道可在地面用定向钻孔贯通,也可用火、力、水贯通。若建炉工程均在地面进行,这种地下气化方法称无井式地下气化。倘若气化通道用人工或机械在井下巷道内来完成。则称为有井式地下气化,因地下水已疏干、地质情况清楚、井上下设施可利用,其建炉成本低于无井式地下气化。有井式地下气化只有在 20 世纪 30 年代地下气化研究初期,英国、苏联和波兰曾经使用过。之后,苏联、美国、德国等全为无井式地下气化<sup>[1]</sup>,因贯通距离短,炉型小,满足不了气化工艺要求,打钻工程量大,煤气热值低、成本高、产气稳定性和可控性差,很难实现商业化。

从地面向进气孔鼓气化剂(空气、氧、富氧、水蒸气等)并在气化通道首端点燃煤层,通过煤的热化学反应和干馏作用( $\text{CO}_2$  还原为  $\text{CO}$ , 水蒸气分解为  $\text{H}_2$  和  $\text{CO}$ , 煤中挥发分被干馏出  $\text{CH}_4$  等)形成热气流,其主要成分有可燃气体  $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_m\text{H}_n$  和非可燃成分  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 。当气化剂为空气时,生成空气煤气,热值一般在  $4.2 \text{ MJ/m}^3$  左右,含  $\text{N}_2$  50%左右。当鼓纯氧加水蒸气时,生产混合煤气,热值在  $10.5 \text{ MJ/m}^3$  左右。徐州半工业性试验和唐山刘庄煤矿工业性试验所采用的两阶段地下气化是将产气过程分为两个阶段进行:第一阶段鼓空气,生产空气煤气,其热值为  $4.18 \text{ MJ/m}^3$ ,煤层蓄热;第二阶段停止鼓空气改鼓水蒸气,生产水煤气,其热值在  $12.56 \text{ MJ/m}^3$  左右<sup>[2]</sup>。当然也可以鼓纯氧加水蒸气作为第一阶段,而将鼓水蒸气作为第二阶段。这项技术需在今后的试验中实现。

煤炭地下气化稳定产气的关键,是在气化过程中最大限度地形成渗流燃烧状态,即在水化通道内,氧化区和还原区形成可移动的渗流气化床,增大反应比表面积,又不使气化通道堵死,才能保证稳定产气。根据模型实验和现场试验的研究结果,在急倾斜煤层中,气化床随火焰工作面移动而移动,随燃烧过程有规律地自然冒落碎煤而形成。

### 二、我国发展煤炭地下气化技术的必要性

随着我国社会经济的发展,能源的短缺及其引发的环境污染正在成为我国经济增长和

可持续发展的重要限制因素,随着人民生活水平的提高,对绿色环境的要求更加迫切,因此,洁净能源的解决是国民经济建设中的难点、重点和热点。

中国能源发展及其影响突出表现为三大结构性矛盾。一是能源供需品种结构问题,未来20~30年,随着工业化中期的到来和人均收入的提高,能源消费在数量面临倍增的同时,对优质洁净能源的需求增长迅速,与之相对应的是优质能源供应不足和以煤为主的一次能源生产结构。以煤为主的能源结构是我国能源战略的核心问题,又是不得不与世界潮流相悖的能源选择。二是能源的地区性结构问题,主要表现在东南沿海地区的能源短缺和农村商业能源供给不足,无论是煤炭运输还是电力输送,皆因路途遥远而极不经济,计划选择建立核电站,但却极有可能导致战略性失误,背上沉重的社会经济负担,并留下安全与环境隐患,因此能源供需矛盾日趋尖锐。三是结构性污染占整个大气污染的70%左右<sup>[3]</sup>,以二氧化硫和烟尘为主的燃煤污染问题,即由燃料结构引起的煤烟型污染日益严重,进一步导致酸雨范围不断扩大,以及因二氧化碳排放的日益增长所产生的国际压力。如果能源结构没有战略性转变,上述结构性矛盾不会有很大改观。这就意味着我国必须用最小的成本进行正确的产业结构性改革,刻不容缓地改变传统的煤炭生产和消费方式,发展清洁、无害和有利于生态环境的生产技术体系。因此,我们提出使用化石燃料同时避免生态环境污染的设想是:将全部化石燃料转变成电能和氢能,这与1997年2月在日本京都议定书召开的世界减少温室排放会议精神完全吻合,同时说明煤炭地下气化是今后我国能源发展的主要选择之一。

中国是以煤炭为主要能源的国家,是目前世界上最大的煤炭生产国和消费国。可以说,煤炭在我国的国民经济建设中起着非常重要的作用。然而,随着越来越严格的环境保护的要求,以及受现有开采方式和技术水平的限制,使本来就不景气的煤炭工业形势遇到了日趋严峻的挑战。

#### (1) 煤炭开采成本高、效益差

近年来,随着改革的不断深入和市场经济的日益发展,相当一部分矿井的煤炭开采成本高于出售价,出现“越采越亏”的现象,煤矿企业终日为此焦虑。这固然与煤炭市场价格扭曲有关,但同时也应承认,在经营上还存在着煤矿劳务、物资投入过大,而采煤工艺落后等深层次问题,使很多煤矿企业进退维谷。

#### (2) 由于开采工艺落后及“人海战术”等,安全状况不容乐观

#### (3) 矿井服务年限短,大量矿井衰老、报废

据统计,全国统配煤矿从1953~1989年间报废矿井297处,平均年报废能力为148万吨。而且,由于煤矿开采强度增大,今后的报废速度将越来越快。据有关专家预测,1990~2020年间将有239处矿井报废,平均年报废能力比1989年前的平均值增加了1倍多,而华东地区的情况最为严重,将占报废矿井总数的21%,占总报废生产能力的24%。

矿井的大量衰老报废,不仅给煤矿企业本身带来了严重负担,而且,由于新矿井的建设难度大、周期长,我国石油和天然气资源又很有限,这样就势必造成我国能源供应的短缺。煤炭是我国的主要能源(始终占能源消费的70%以上,且长期不会有较大的变化),若煤炭供应短缺,则必然会影影响、阻碍我国经济建设的步伐。如果不解决上述问题,正处在经济腾飞的我国将面临着煤炭能源的严重危机,这不能不引起人们的极大关切。因此,在我国研究和开发新的采煤技术、提高煤炭资源的利用率是势在必行的。

#### (4) 回收率低,煤炭资源严重浪费

由于开采方式和技术水平的限制,目前,我国煤炭的井工开采回收率比较低,国有重点煤矿平均只有 50% 左右,地方和乡镇煤矿平均只有 20% 左右。据初步估计,我国的国有重点煤矿和非国有重点煤矿的永久性压煤(包括永久性煤柱、报废水平、三下压煤等)约有 300 多亿 t。这是按目前的开采方式和技术水平难以开采的。

#### (5) 耕地破坏增加

长期以来,煤炭生产都是采用井工开采和露天开采的方式,造成大量的地面塌陷、山体滑坡、泥石流、地表沙化、大气尘土污染等一系列问题。据统计,截止到 1990 年,因煤炭开采全国约 30 万  $\text{hm}^2$  土地塌陷,且每年新增塌陷地 1.33 万~2.0 万  $\text{hm}^2$ ;矸石积存达 30 亿 t,占地 1.2 万  $\text{hm}^2$ ,且仍以年 1.3 亿 t 外排<sup>[4]</sup>。

#### (6) 环境污染日趋严重

我国在能源消费结构中一直以煤为主,目前一次能源消费结构煤炭占 75% 左右。全国每年用于直接燃烧的动力煤约占煤炭总消费量的 80%。据国家环保局统计,1994 年我国烟尘排放量达 1414 万 t, $\text{SO}_2$  排放量达 1825 万 t。而到了 1997 年,我国的烟尘排放量达 1565 万 t, $\text{SO}_2$  排放量达 2346 万 t,这其中,粉尘的 71%, $\text{SO}_2$  的 87% 来自煤燃烧。致使我国超过美国及欧洲国家,成为世界  $\text{SO}_2$  排放的第一大国。可以说,中国的大气环境是典型的煤烟型污染。由于燃煤排放的  $\text{SO}_2$  所造成的酸雨问题在我国已变得越来越严重。目前已危及 24 个省市、自治区,据统计,仅西南、华南酸雨区而造成的林木死亡、农业减产、金属腐蚀等的经济损失每年达 140 亿元,全国的酸雨损失每年则高达 900 亿元。中国大气污染的程度已相当于世界发达国家五六十年代污染最严重的时期。

为保护生态环境,造福子孙后代,世界各国都已注意到大气污染对人类生存的危害,都投入巨额资金对其进行整治。我国也制定了《中国跨世纪绿色工程计划》,对大气污染进行综合治理,同时把发展洁净煤技术也写入《中国 21 世纪议程》。保护生态环境,发展洁净煤技术,已成为我们刻不容缓的工作。

### 三、研究煤炭地下气化的意义

历史的经验告诉我们:挽救衰老报废矿井,提高煤炭回采率的根本途径,一靠改革,二靠科技。煤炭地下气化新技术、新工艺能够为我们煤矿打开一条走向振兴的通道。

#### (1) 保障工人人身安全,简化生产工艺流程

煤炭地下气化是将原地煤炭直接转变为可燃性气体的方法,由于不需要地下作业,形成无人工作面,安全性好,消除了对矿工人身安全的危害,并且可以抛弃全部庞大的、笨重的采煤设备与地面气化设备,将建井模型大幅度减小,减少了投资,见效快。与井工法相比,其生产工艺过程简单而且连续,为实现全部生产过程的机械化和自动化创造了条件。

#### (2) 提高煤的回采率,充分回收和利用报废煤炭资源

一个成功的地下气化工艺,虽然不能在煤层中回收煤中的全部能量,但回收率可达到 90%。苏联、美国和英国的生产和试验结果证实,地下气化回收率高于井工开采的回收率。例如,在美国回收率已达到 60% 以上,苏联也达到 65%,而井工开采的回采率不超过 60%。我国是产煤大国,也是用煤大国,煤炭占能源消费结构的 70% 以上。但是,长期以来,由于我们一直沿用传统的井工采煤方法,因此,带来了众所周知的各种严重弊端。目前,就煤炭资源利用率来说,平均回采率只有 50% 左右(仅指前统配煤矿),亦即“采一半丢一半”。据初步估算,到目前为止,我国境内被遗弃在地下的煤炭资源,若以亿 t 为单位计,早已超过 3 位数,

预计今后还将大幅度增加。对已经报废或即将报废的矿井,地下气化可充分利用现有的地面和井下条件,使建设和生产成本大大减少,并可以大量回收被遗弃的煤炭资源,使报废矿井再回生机。

### (3) 减少地表环境破坏

物理法开采不利于环境保护和生态平衡。井工开采会造成地表塌陷。露天开采会产生大滑坡、泥石流,造成地表沙化、大气尘土污染。而煤炭地下气化燃烧的灰渣存在井下,燃烧后形成焦化圈可以自承空间地压,地表塌陷量将大大减小,有利于环境保护与生态平衡。

### (4) 实现洁净燃烧,避免大气污染

煤燃烧污染大气环境,由于我国煤炭储藏量比石油多得多,造成了我国长期以煤为主的能源结构,据统计 1953~1989 年总消耗煤量 158.77 亿 t,其中用于燃烧的就有 121.2 亿 t,占总耗量的 76.4%,因此,我国为煤炭污染型国家。全国 80% 的煤尘量、90% 的  $\text{SO}_2$  均来自煤炭燃烧,可见煤炭燃烧对我国大气污染有着明显的总体效应。而地下气化属清洁煤燃烧技术,可从根本上解决大气污染问题。

### (5) 地下气化煤气价格低廉,有市场竞争力

经费概算表明,地下气化生产的每立方米煤气的成本仅为普通厂矿企业使用热值相当的煤气价格的 1/4。例如,徐州煤矿生产 1 t 发热量为 2094 kJ 左右的原煤,售价与成本的比率约为 2:1。地下气化生产煤气,按徐州市民用煤气目前热值和售价折算,其售价与成本的比率高达 6:1(上海、南京、辽宁和阜新等地价格更高)。由此可见,煤炭地下气化所产生的经济价值是惊人的。

### (6) 为发展煤化工提供原料

煤炭地下气化的产品不仅可以直接作为工业和民用燃料,而且还可以作为各种化工原料。如果地下煤气中  $(\text{H}_2 - \text{CO}_2)/(\text{CO} + \text{CO}_2) > 2.1$ ,可作为生产甲醇的原料。甲醇是一种重要的基本有机原料,也是一碳化学的起始含氧化合物。由甲醇出发,可以衍生出甲醛、醋酸、醋酐及丙烯酸甲酯等许多化工产品。1991 年,我国甲醇年总生产能力为 93 万 t,产量为 76 万 t。据预测,2010 年,国内甲醇需求量将达 282 万 t。但现在影响我国甲醇生产的最大障碍是原料供应短缺,导致综合能耗和生产成本提高。目前国内生产 1 t 甲醇的能耗为  $50 \times 10^6 \sim 60 \times 10^6$  kJ,比国外吨甲醇能耗  $29.31 \times 10^6$  kJ,几乎高 1 倍。随着能源价格的上涨,近五年来,国内甲醇的生产成本几乎增加了 1 倍,多数厂的生产成本已突破每吨 1000 元,个别厂甚至高达每吨 1200 元,很难同进口甲醇竞争。若以地下气化产品气作为生产甲醇原料,将一改能耗和生产成本高的局面,可以设计大型甲醇生产装置,即气化—甲醇生产联合装置,使之投资省,气价适宜,成本低,流程合理,能耗可低于  $29.31 \times 10^6$  kJ/t,成本每吨低于 350 元,有很强的市场竞争力。同时,又对我国一碳化学工业与以氢气为高新能源的应用起到促进作用。当地下气化的产品气中,  $(\text{CO} + \text{H}_2)/\text{N}_2 > 3.1$ ,可以作为合成氨的原料。地下气化煤气净化可得到相当数量的煤焦油,从煤焦油中可提取 200 多种产品。另外,地下煤气还可以用作冶金工业还原气。

### (7) 可实现制气、发电、供热及化工产品于一体的“多联供”工程

煤炭地下气化的潜力还表现在可以实现高效率的燃气——蒸汽联合循环发电,也可用煤气机直接发电,不仅节能,而且还可减少排入大气的杂物和排出的热废水,对环境影响较小。这样,可使煤矿企业改造成生产煤、电、化工原料等多种产品的联合企业,以提高煤矿企

业的经济效益,改变煤矿企业长期亏损的局面。同时,还可适当缓解我国地区性能源紧张的局势。煤炭地下气化产品气综合利用参见图 1-1。

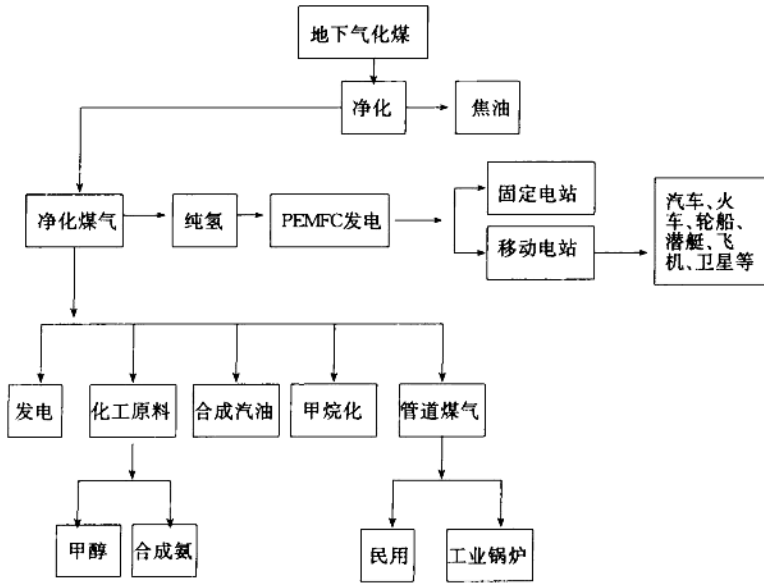


图1-1 煤炭地下气化产品系列与产品链

以煤炭地下气化为基础,集制气、发电、供热及化工产品于一体的“多联供”工程将是一项有效利用煤炭资源的系统工程。这种有机结合,将大大提高煤炭资源的利用率,充分发挥系统的经济效益、社会效益和环境效益,并将走出一条具有我国特色的以煤炭地下气化为发展战略的振兴和发展国民经济的道路来。

#### (8) 为理想新能源——氢能的开发和利用,开辟了良好的发展前景

由于氢能是最理想的绿色清洁能源,所以,研究和开发氢能是当今人类能源利用的主要趋势。目前氢气主要是作为一种中间产品而生产的,是进一步化工合成加氢的重要原料。它主要是由化石能源天然气( $\text{CH}_4$ )、原油(烃)和煤作为原料和水蒸气在高温下重整、气化或烃类部分氧化转化生成。氢也可由电解水(盐水)生产,但这是一种较昂贵的方法,一般是在特殊的生产目的下的副产品,例如氯碱工业,或是为了获得特殊需要的氢(如火箭燃料)。电解法制氢只有在利用水电或太阳能电解水时,才可以说是合理的。

在我国,氢的用途包括:一是合成氨,世界上约 60% 的氢是用在合成氨上<sup>[5]</sup>,中国的比例更高;二是合成甲醇,以及除甲醇以外的其他醇、醋酸、醋酐、二甲醚、甲酸、甲酸、甲酯等。甲醇既是重要的化工原料,本身也是一种很好的发动机燃料,开辟甲醇的应用范围和其下游产品,将对优化利用化石能源起到重要作用;三是作为新能源燃料电池的燃料,燃料电池技术新的发展,展现了极广泛的和潜在的市场。另外,液氢也是中国火箭推进的主要燃料。

可见,氢在我国的国民经济建设和国防建设中有着非常重要的作用。然而,当前在我国相对于其他国家来说,氢是较贵的,也是较缺的。煤炭地下气化技术为我国的氢工业提供了良好的发展前景,实验室模型实验、煤炭地下气化半工业性及工业性试验结果表明,采用长

通道、大断面、双火源、两阶段煤炭地下气化新工艺,可实现所生产的地下水煤气中  $H_2$  含量基本均在 50% 以上,最高可达 72.36%。根据专家预算,煤炭地下气化制氢成本远低于其他方法,并有很大的市场潜力。由此看来,采用煤炭地下气化技术制取  $H_2$ ,不仅技术上可行,而且经济上合理。如果应用煤炭地下气化新工艺,大规模生产  $H_2$ ,必将带来巨大的经济和环境效益。

#### (9) 符合可持续发展战略

如前所述,煤炭生产都是采用井工开采和露天开采的方式,造成大量的地面塌陷、山体滑坡、泥石流、地表沙化、大气尘土污染等一系列问题。而煤炭地下气化燃烧的灰渣存在井下,大大减小地表塌陷量,无固体物质排放,因此煤炭地下气化减少了对地表环境的破坏。地下气化出口煤气可以集中净化,脱除其中焦油、硫和粉尘等有害物质,甚至可将  $CO$  经地面变换后,采用分离或吸收技术将  $CO_2$  分离出来,贮存或回填到气化空间里,从而得到洁净煤气。因此煤炭地下气化技术提高了煤炭资源的利用率和利用水平,将环境保护的重点放在源头,而非末端治理,将脏的煤炭能源变为洁净能源,是一项符合可持续发展战略的环境友好的绿色技术。

江泽民总书记曾题词:“中国矿业大学煤炭地下气化试验,从煤炭资源的充分利用以及经济效益来讲值得进一步研究”。煤炭地下气化技术立足于我国煤炭资源丰富的优势,将有效地解决我国能源短缺,电力供应紧张,环境污染等问题,对国民经济的可持续发展具有十分重要的意义。

## 第二节 国外煤炭地下气化发展概况

煤炭地下气化是一种融多学科为一体的综合性能源开发新技术,它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、洁净、高效等优点,因而已引起人们的普遍关注。几十年来,世界上主要的产煤工业国对地下气化技术不断地进行研究开发,取得了很大的进展,并开始工业应用。尤其是那些煤炭采深超千米的国家,为了合理开发深部煤层,对这项技术更为重视。然而,因各国政治、经济、资源和科技水平的差异,使煤炭地下气化技术的发展状况有所不同。现将国外情况分别作如下介绍。

### 一、苏联

早在 1888 年著名化学家门捷列夫就曾预言:“随着时间的推移,这样的时代可能要实现,即煤不必从地下开采出来,而是在地下转化为可燃气体,再用管道输送至遥远的地方”<sup>[6]</sup>。随后又提出在地面用钻孔工艺建立地下气化发生炉,并极力主张将地下气化站与电厂相结合,使电力输送到更遥远的用户。他的这些光辉论点,成为日后发展煤炭地下气化技术的指路明灯。

20 多年后,英国化学家威廉·拉姆赛在都贺姆煤田进行地下气化获得成功,并用该煤气发了电。后来,列宁获悉这一消息后,在《真理报》上以“一个技术上的伟大胜利”为题,撰文赞扬了该技术对社会进步将产生的深远影响(见《列宁全集》19 卷 41 页)。

在列宁的倡议下,1930 年苏共中央和苏联人民委员会作出了对煤炭地下气化进行试验的决议,1932 年终于在顿巴斯矿区建立了世界上第一座有井式地下气化站(图 1-2)。

1934年,顿尼茨煤化工学院马特维夫教授提出了气流式地下气化方案,并取得试验成功。1938年对气流式U形地下气化炉进行的工业性试验也获得成功。在此基础上,1942年苏联在莫斯科近郊煤田又试验成功无井式地下气化炉,同时还发展了各种贯通技术,大大提高了煤炭地下气化技术的水平,从而在苏联和世界各国得到推广。

1946~1965年是苏联煤炭地下气化高度发展时期,设立了地下气化管理总局,附属有研究院与设计院,出版了专业杂志。在总局领导下,全苏几个大矿区相继建成若干大型地下气化站,使煤气产量逐年大幅度上升,截止1965年已达25亿 $m^3$ 。

可是在20世纪60年代,由于苏联大量开发石油与天然气,使煤炭地下气化站的发展停滞不前,遭到冷落。在此低潮期间,苏联地下气化专家总结国内外经验,围绕提高煤气热值,降低成本进行了大量研究,找到有效措施。加之,苏联许多矿井的采深都已接近千米,生产条件恶劣,生产成本上涨幅度较大,苏联能源管理部门又将希望寄托在地下气化技术上,宣布到2005年或2010年,使每年煤炭地下气化产量按热值折算为商品煤,等于全苏矿井法采煤总量的27%。计划用地下煤气每年发电2000亿千瓦时,生产化工原料2500万t。

1982年莫斯科矿业学院的教授们总结以往地下气化经验,提出用煤炭地下燃烧工艺,回收被以往采煤工艺所遗弃的资源——煤柱。80年代末期,苏联曾在顿巴斯、莫斯科近郊和

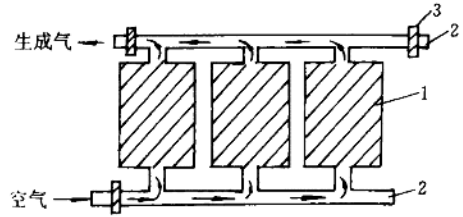


图 1-2 室式气化炉

1——室内煤层被炸碎;2——平巷;3——隔墙

库兹巴斯等煤田进行工业性试验,欲将煤的热值转化为热能(热水与蒸汽),以供民用或工业使用,使煤炭资源利用率提高到90%,同时还可获得化学能( $H_2$ 、 $CO$ 、 $CH_4$ )。所采用的煤炭地下燃烧工艺示于图1-3。该工艺主要是采用抽风机造成负压,将燃烧产生的高温气体( $300\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ )通过热交换器变为蒸汽。

为了更充分利用地下煤炭资源,苏联曾计划今后的煤炭开发方向是将预抽瓦斯、采煤、气化三大工艺结合起来进行设计与生产。

## 二、美国

美国地下气化试验始于1946年。首先在亚拉巴马州高加斯城附近的浅部煤层中进行试验,利用有井式施工,采用空气、水蒸气、富氧空气等不同气化剂作了试验,煤气热值为 $0.9\sim 5.4\text{ MJ}/m^3$ ,但因煤气漏失严重而告终。1953年试验成

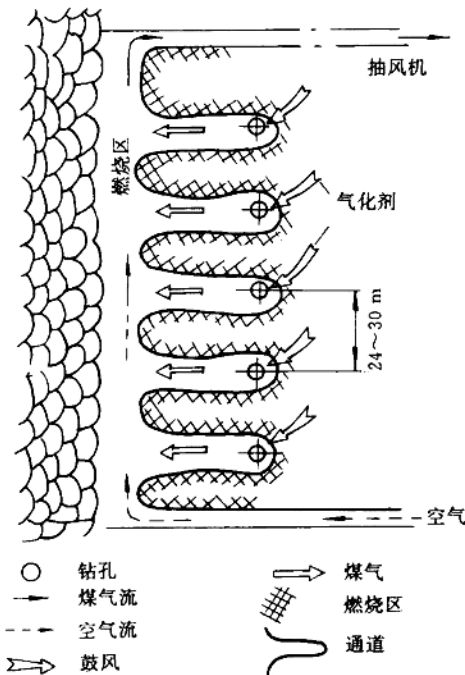


图 1-3 煤炭地下燃烧工艺

功电力贯通无井式地下气化工艺。1968年海湾研究与开发公司在美国东部与西部各选一处,作了地下气化经济技术对比性试验,最后结论建议首先开发西部煤田。所以在70年代石油禁运危机期间,美国能源部组织若干大学与科研机构,在美国西部怀俄明州进行了大规模有计划的科学试验,开发出不同类型的地下气化炉(图1-4)。与此同时,各私人企业也在该领域进行了开发,如得克萨斯公共事业公司于1974年向苏联购买专利,雇用苏联专家,并吸收得克萨斯州工业大学和另外八家公司共同进行了煤炭地下气化的开发。

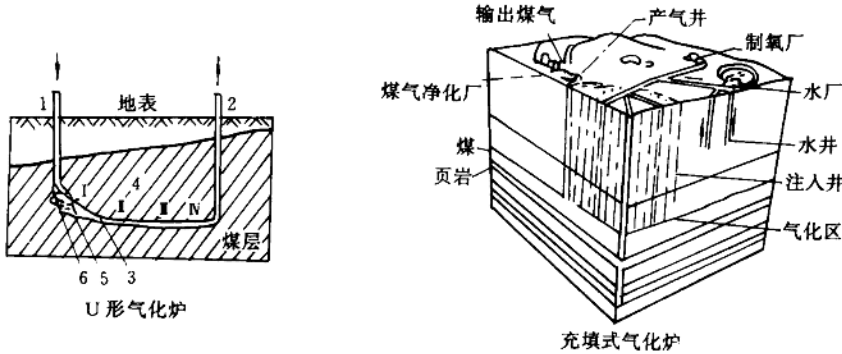


图1-4 美国不同类型地下气化炉

美国在取得上述成功试验基础上,为了用气化法开采其1000余亿t急倾斜煤层资源,于1981年曾投资2亿余美元进行了以富氧水蒸气为气化剂的试验,获得了管道煤气和天然气,并用于发电和制氧。

在此期间,最引人注目的成就是1987年11月至1988年2月在怀俄明州汉纳试验基地,就深110m、厚7m的煤层进行的代号为洛基山—1号的试验,为煤炭地下气化技术走上商品化道路创造了条件,因为该项试验解决了加大炉型、提高生产能力、降低成本、提高煤气热值的问题。

总之,由于美国在过去20余年投入了巨额资金,进行了大量试验,获得了丰富的经验,使煤炭地下气化技术已日臻完善,美国能源部才得已宣称,一旦再发生能源危机,将广泛使用该技术生产高热值(已达 $11 \text{ MJ/m}^3$ )地下煤气,以解决国家之急需。

### 三、英国

1912年英国化学家威廉·拉姆赛在都贺姆煤田进行了世界上首次现场试验,并取得了成功。1914年他去世后,较长一段时期没有进行过试验。1949年又开始恢复试验。截至1956年,先后共进行过60次试验,燃烧了5000万t煤。煤层厚度一般为1m左右,深度从4m到50m。最初是在牛曼·斯平尼露天煤矿进行,后又在巴通煤田进行。曾进行了U形炉火力、电力和定向钻孔等贯通试验。对不同气化剂也进行了燃烧试验,还进行了单孔炉、盲孔炉、多角形(四角、六角)炉的试验。积累了丰富的资料。英国认为,无井式不经济,仍转向有井式地下气化试验。曾在巴通煤田沿煤层走向开凿了2个井筒,相距19m,在深25m处遇到煤层,并沿其倾斜方向在二个井底部开凿了互相平行的煤巷,并在煤巷中每隔9m开凿一个钻场,在各钻场利用钻机沿煤层走向分别钻4个水平孔,又在各水平孔两端各打1个垂直孔,共8个孔作为进排气孔与水平孔相通。最后将水平孔与煤巷相通处用混凝土密封,这就建成



了四条直线式复合炉(图 1-5),取得了较为满意的成果。在此基础上,又建了一所用盲孔炉组成的复合炉,盲孔炉在斜巷二侧布置,炉长 90 m,沿煤层走向钻盲孔,盲孔之间距为 9 m,整个地下气化炉所占面积为 61720 m<sup>2</sup>,气化煤 20 万 t,产出煤气已直接用于一个 5000 kW 电厂发电。

由于英国现有煤矿的采深大多已超千米,工作条件恶劣,已开始向煤炭地下气化转变。另外,由于北海与本国沿海附近蕴藏有极为丰富的煤炭资源,且水深仅 25 m 左右,已计划利用海上采油技术进行海下煤炭气化开发,为缓解其能源不足找到新路。

#### 四、法国、德国和比利时

自 20 世纪 70 年代石油危机开始,法国、比利时、德国、西班牙和东欧国家也开始重视煤炭地下气化技术的研究与开发。

法国于 1976 年由煤炭部、气化公司、石油研究所、地质矿山研究局共同组成煤炭地下气化研究组织,并于 1979~1980 年在法国北部的布津阿特瓦进行了首次深度为 1170 m 的气化试验。1981 年又在福尔克芒进行了 1300 m 深的地下气化试验,并在南部的勒舒也进行了试验。

德国与比利时于 1976 年 10 月,签订了关于共同开发煤炭地下气化技术协定。对德国和比利时来说,大于 1000 m 的深部都埋藏着大量煤炭。初步估计,德国煤炭埋深按 2000 m 计算(煤层厚度 1.0 m 以上),其储量可达 2870 亿 t。5000 m 深处为 5000 亿 t。这样深度的煤层,不可能沿用现行开采方法,而只能采用地下气化方式开采。因此,德国阿赫恩工业大学与比利时林堡大学,从 1979 年起在比法两国交界处的图林进行了深部煤层地下气化试验。

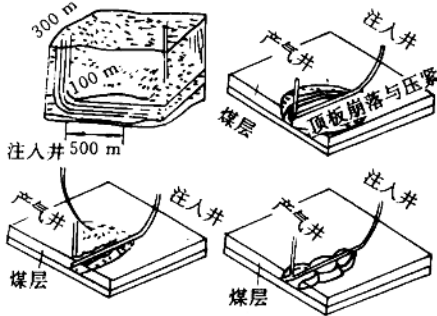


图 1-6 欧共体地下气化炉型式

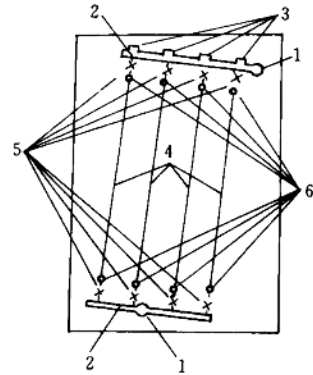


图 1-5 直线式复合炉

- 1——竖井;2——煤巷;
- 3——钻场;4——长通道;
- 5——密封墙;6——进排气孔

图林试验是成功的,探索了进行深部煤层地下气化的途径,取得不少可贵的经验与教训,但距实现工业性生产,尚有许多问题需要解决。因此,1989 年在荷兰集尔夫特市由英、法、德国、比利时、意大利、西班牙和荷兰等国组成欧洲煤炭地下气化研究协会,并制定了日后计划。所选用的地下气化炉的型式如图 1-6 所示。

这些国家其所以要联合研究开发深部煤层地下气化技术,是因为它们的浅部煤层已开发殆尽,只能转向千米以外深度的煤层,这就遇到了不少难以克服的困难,如地温高、地压大等,

而采用地下气化法开采是最适宜、最经济、最有发展前途的路径。

#### 五、波兰

波兰没有石油与天然气资源,惟一的能源资源是煤炭,虽无其他能源与其竞争,但为了更合理、更经济地开发煤炭资源,对作为第二代采煤方法的煤炭地下气化是十分重视的。