

基于煤炭分级转化的发电技术前景

岑可法, 倪明江, 骆仲泱, 方梦祥, 王勤辉, 王智化, 岑建孟

(能源清洁利用国家重点实验室(浙江大学), 杭州 310027)

摘要: 面对我国一次能源以煤为主、能源需求日益增长以及大气环境持续恶化的现实, 构建资源、能源、环境一体化的可持续发展能源系统是我国能源的战略方向。本文介绍了基于“煤炭既是能源又是资源”的理念提出的煤炭转化利用新技术——煤炭分级转化发电技术的路线和特点。从节能减排等方面对该技术的发展前景进行了展望, 指出煤炭分级转化的发电技术可提高煤炭发电的综合效益, 改变煤炭单一用于发电的产业结构, 可形成基于煤炭资源化利用发电的新产业链并缓解我国油气等资源的紧缺状况, 对于改变和优化国家煤电产业结构、循环经济和节能减排具有重要意义。

关键词: 分级转化; 梯级利用; 节能减排; 煤炭

中图分类号: TQ536 **文献标识码:** A

The Prospect of Power Generation Technology Based on Coal Staged Conversion

Cen Kefa, Ni Mingjiang, Luo Zhongyang, Fang Mengxiang, Wang Qinhui,
Wang Zhihua, Cen Jianmeng

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization (Zhejiang University), Hangzhou 310027, China)

Abstract: In the face of the coal-dominated primary energy structure, increasing energy demand, and serious air pollution, the sustainable development of energy system integrated resources, energy and environment is the direction of China's energy strategy. This paper introduces a new technology of coal conversion and utilization based on coal staged conversion technology on the concept of "coal is not only energy but also resource". From the aspects of energy conservation and emission reduction, the development of this technology is prospected. It is pointed out that this technology can improve the comprehensive efficiency of coal power generation, changes the industrial structure and forms a new industrial chain, and ease the shortage of oil and gas in China. It is of great significance to change and optimize the structure of China coal power industry, cyclic economy and energy conservation and emission reduction.

Key words: staged conversion; staged utilization; energy conservation and emission reduction; coal

一、我国能源和煤炭利用现状和问题

受我国化石能源资源以煤为主的制约, 2013年

我国煤炭生产量占一次能源生产总量的75.6%, 占消费总量的66%^[1]。

尽管我国大力发展核电、水电以及新能源发电

收稿日期: 2015-11-09; 修回日期: 2015-11-12

作者简介: 岑可法, 能源清洁利用国家重点实验室(浙江大学), 教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为洁净煤技术、能源与环境系统工程等;

E-mail: kfcen@zju.edu.cn

基金项目: 中国工程院重大咨询项目“推动能源生产和消费革命战略研究”(2013-ZD-14)

本刊网址: www.enginsci.cn

技术,但火电机组所占比例仍然居高不下。预计到 2020 年年底,火力发电装机容量仍将占 62% 左右,虽然煤炭在一次能源中的比重有所下降,但是其绝对消费量依然保持着较大增幅,预计我国将在 2020 年使用燃煤 4.2×10^9 t,与 2013 年的 3.6×10^9 t 相比,增长 17%,这也是我国和国际主流的一次能源利用不同的显著特征^[1]。

目前,我国一半左右的煤炭资源用于发电。随着我国社会和经济的快速发展,电力需求越来越大,未来这一比例将会不断提高。煤炭火力发电产生的颗粒物、CO₂ 和 SO₂ 等有害物质,与当前我国大部分地区的雾霾、PM_{2.5} 超标和水资源枯竭有密切关系。严重的能源和环境问题决定了在未来一个时期内我国面临的节能减排压力将越来越大,能源短缺及环境污染问题已经成为制约我国社会与经济可持续发展的瓶颈。

我国的能源资源和煤炭利用现状决定了以提高煤炭利用的综合能效、控制煤转化过程中的污染排放、解决短缺能源需求为近中期能源领域的首要任务。

二、基于煤炭分级转化的发电技术路线和特点

煤炭由不同组分组成,各组分具有不同的性质和反应活性,如煤炭中所含挥发分是富氢组分,反应活性很高,而固定碳部分反应活性则相对较差。另外,煤炭组分在燃烧和气化两种反应过程中表现出的反应特性相差较大,一般情况下,燃烧反应要

比气化反应容易得多,反应条件也要低得多。

传统的燃煤方式忽视了煤的资源属性,将煤炭完全作为燃料燃烧,导致煤炭综合利用水平和效益不高。煤分级转化技术是基于煤炭各组分具有的不同性质和转化特性,突破传统的利用方式,将煤炭同时作为原料和燃料的热解、气化、燃烧等过程有机结合,将煤炭中容易热解、气化的部分转化为煤气和焦油。所产生的煤气作为后续合成工艺的原料生产具有高附加值的化工产品,所产生的焦油可分馏出各种芳香烃、烷烃、酚类等,也可经加氢制得汽油、柴油等产品;难热解气化的富碳半焦去燃烧提供热电,灰渣进行综合利用,从而在同一系统中获得低成本的煤气、焦油和蒸汽,如图 1 所示。

根据煤种特性、转化途径和目标产物不同,煤炭分级转化技术可以组合不同的热解气化燃烧等煤转化方式。不仅可以通过热解实现煤炭中挥发分提取,而且结合各种生产技术路线的优越性,使生产过程耦合在一起,结合热解气化燃烧过程调节目标产物油、气、电的比例,彼此取长补短,提高煤炭转化效率和利用效率,降低污染排放,实现系统整体效益最优化,从而真正实现煤炭的分级综合利用^[2,3]。该技术适用于我国十多亿吨不同品质的煤炭资源,可用于新建工厂和大量旧电厂的改造,从而使煤炭分级转化发电技术有更广阔的应用前景。

三、基于煤炭热解分级转化技术开发

采用温和的热解方法从煤炭中提取液体燃料和

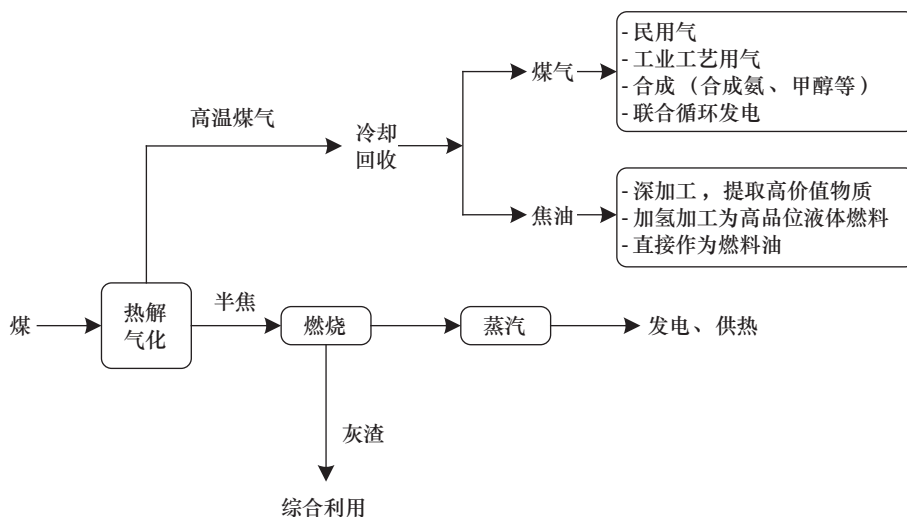


图 1 煤的热解、气化、燃烧分级转化技术

化学品的重要性和必要性已逐渐被认识和接受。日本通产省在《21世纪煤炭技术战略》报告中，特别提到了提高燃料利用率的高增值技术，其中把低温快速热解制取燃气、燃油及高价值化学品作为重要的研究项目。美国能源部也把从煤中提取部分高品位液体燃料和化学品列入《21世纪能源展望》计划中成为一项重要内容。

国内外各研究机构在该领域已开展了较多的研究开发工作，开发了各种不同类型的煤炭热解气化燃烧工艺。国外主要的煤加工技术有德国的鲁奇三段炉(L-S)低温提质工艺、Lurgi-Ruhrgas(L-R)提质技术,苏联的褐煤固体热载体提质(ETCH-175)工艺,美国的温和气化(Encoal)技术、Toscoal工艺、西方提质(Garrett)法、焦-油-能量开发法(COED)、澳大利亚的流化床快速热解工艺(CSIRO)和日本的煤炭快速提质技术。国内的热解工艺目前主要可以分为以获得半焦和焦油为目的和热解半焦燃烧相结合的煤气、焦油和蒸汽联产为目的两大类。其中以以获得半焦和焦油为目的的典型技术有大连理工大学开发的褐煤固体热载体干馏多联产(DG)工艺、煤炭科学研究总院北京煤化工研究分院开发的多段回转炉(MRF)提质工艺等,而将煤的热解、气化、燃烧相结合的典型的分级转化技术则有浙江大学的煤炭循环流化床分级转化工艺、国家电力公司北京动力经济研究所、中国科学院工程热物理研究所以及中国科学院山西煤炭化学研究所提出的以移动床热解为基础的固体热载体热电气三联产技术,中国科学院过程工程研究所的基于下行床的多联产工艺和清华大学的基于流化床的多联产工艺。

浙江大学是国内较早开发煤炭分级转化工艺^[4-6]的研究单位之一，早在1981年就提出了循环流化床煤热解热电气联产综合利用方案，并建立了一套1MW热态试验装置，在上面对不同煤种和不同运行参数进行了大量的试验^[7,8]，证实了技术和工艺上的可行性。试验结果表明该方案具有燃料利用率高，污染低，煤气热值高，结构简单，投资省等特点，并获得国家发明专利授权(专利号92100505.2)。利用该技术开发了12MW^[9,10]和25MW^[11]循环流化床煤炭分级转化装置。

浙江大学所提出的循环流化床煤炭分级转化工艺是将循环流化床锅炉和热解炉紧密结合，在一套系统中实现热、电、煤气和焦油的联合生产。图2为浙江大学开发的煤炭循环流化床分级转化工艺流程：循环流化床锅炉运行温度在850~900℃，大量的高温物料被携带出炉膛，经分离机构分离后部分作为热载体进入以再循环煤气为流化介质的流化床热解炉。煤经给料机进入热解炉和作为固体热载体的高温物料混合并加热(运行温度在550~800℃)，煤在热解炉中经热解产生的粗煤气和细灰颗粒进入热解炉分离机构，经分离后的粗煤气进入煤气净化系统进行净化。除作为热解炉流化介质的部分煤气再循环外，其余煤气则经脱硫等净化工艺后作为净煤气供民用或经变换、合成反应生产相关化工产品。收集下来的焦油可提取高附加值产品或改性变成高品位合成油。煤在热解炉热解产生的半焦、循环物料及煤气分离器所分离下的细灰(灰和半焦)一起被送入循环流化床锅炉燃烧利用，用于加热固体热载体，同时生产的水蒸汽用于发电、

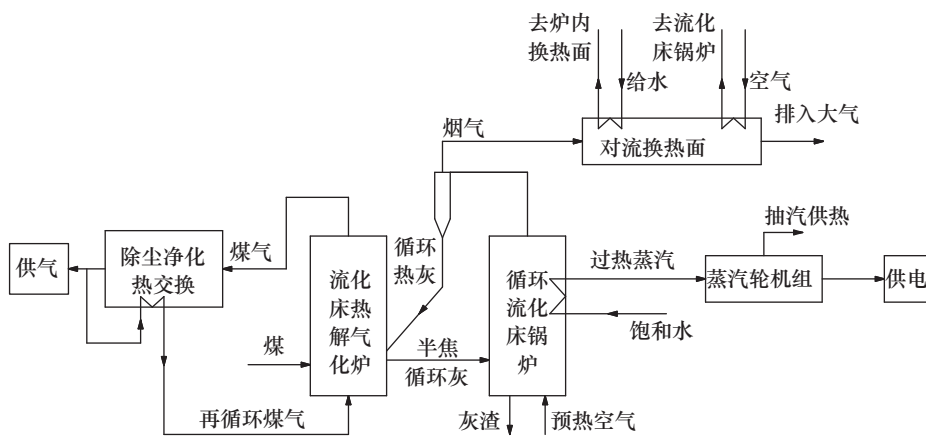


图2 浙江大学开发的煤炭循环流化床分级转化技术^[12]

供热及制冷等。

浙江大学所研发的煤炭分级转化工艺具有如下优势。

(1) 工艺简单先进：将循环流化床锅炉和热解气化炉紧密结合，通过简单而先进的工艺在一套系统中实现热、电、煤气和焦油的联合生产。所产煤气品质高，是生产合成氨、甲醇、合成天然气等多种化工产品的优质原料，也可以作为燃气蒸汽联合循环发电的燃料气，所生产的焦油可以在提取高价值化学品的同时加氢制取液体燃料，从而有效地利用了煤中的各种组分，实现了以煤为原料的分级转化梯级利用。

(2) 燃料适应性广：收到基挥发分在 20% 以上的各种褐煤、烟煤都适用于这种工艺。同时煤的颗粒度要求与现有循环流化床锅炉一致，避免了现有煤气化和干馏工艺对煤种和煤粒度有较严格的限制的缺点。

(3) 工艺参数要求低，设备投资低：煤在常压低温无氧条件下热解气化，对反应器及相关设备的材质要求低（常规气化炉操作温度为 1 300 ~ 1 700 °C，压力 2~4 MPa），设备制造成本低，同时热解气化过程不耗氧气和蒸汽，避免了常规气化炉所需的氧制备装置和蒸汽锅炉，大幅度降低气化系统的设备建设成本。

(4) 运行成本低：煤热解单元不需要氧气、蒸汽作为气化剂，系统能量损耗低，与常规气化技术相比，过程热效率大幅度提高，因此运行成本也得到大幅度降低。

(5) 高温半焦直接燃烧利用：原煤热解气化后的半焦直接送锅炉燃烧发电，避免了散热损失，使能源得到充分利用；而锅炉燃用不含水分的半焦，锅炉烟气量大幅度减少，从而降低了引风机的电耗，装置能耗降低，锅炉系统效率也有所提高。避免了以半焦为产品的工艺过程存在的需要半焦冷却的过程，同时所产生的细半焦颗粒存在运输和利用困难的问题。

(6) 易实现大型化：所采用的流化床热解炉具有热灰和入煤混合剧烈，传热传质过程好，温度场均匀的特点，有利于给煤在炉内的热解气化，同时流化床热解炉易于大型化，而且布置上易与循环流化床锅炉匹配，实现与循环流化床锅炉有机集成，从而避免固定床或移动床热解反应器的不易放大和布置的问题。

(7) 煤气产率高，品质好，实现煤气的高值利

用：循环流化床分级转化工艺的热解过程以循环灰为热载体，热解所产出的煤气有效组分高，而且所产出的煤气全部用于后续利用，从而保证后续煤气合成工艺的煤气量，避免燃烧热解煤气提供热解热源使得外供煤气量小的问题。

(8) 具有很好的污染物排放控制特性：煤中所含硫大部分在热解气化炉内的热解过程中以 H_2S 形式析出，并与所产生的煤气进入煤气净化系统进行脱硫，仅有少量的硫进入循环流化床燃烧炉以 SO_2 形式释放。同时，与煤直接燃烧后烟气脱硫相比，从煤气中脱除 H_2S 具有较大的优势：①所处理的气体大大减少，因此脱硫设备的体积、投资及运行成本较小；②目前煤气脱硫的副产品一般是硫磺，其利用价值较大。煤中所含的氮大部分(80% 以上)在热解过程中主要以氮气和氨的形式析出，同时由于循环流化床燃烧过程是中温燃烧，几乎不产生热力 NO_x ，因此分级转化工艺可进一步降低循环流化床燃烧炉所产生的烟气中 NO_x 的排放浓度。同样从体积流量较小的煤气中脱出少量的氨是相对比较容易且成本较低的。

2007 年 6 月，浙江大学和淮南矿业（集团）有限责任公司合作完成了 12 MW 循环流化床热电气焦油分级转化工业装置安装，2007 年 8 月完成 72 h 试运行，2008 年上半年完成性能优化试验，2008 年 10 月系统投入试生产运行。12 MW 循环流化床热电气焦油分级转化装置的热态调试运行表明，系统运行稳定，调节方便，运行安全可靠，焦油和煤气的生产稳定，实现了以煤为资源在一个有机集成的系统中生产多种高价值的产品。

2009 年中国国电集团公司小龙潭发电厂、小龙潭矿务局和浙江大学合作以云南小龙潭褐煤为原料，结合中国国电集团公司小龙潭发电厂现有 300 MWe 褐煤循环流化床锅炉的结构和现状，把 300 MWe 褐煤循环流化床锅炉改造为以干燥后褐煤为原料的 300 MWe 循环流化床分级转化装置，目前一期工程已完成试运行及性能参数测试，运行结果表明，系统运行稳定，操作方便，以未干燥褐煤为原料，热解气化炉给煤量达到设计的 $40 t \cdot h^{-1}$ ，煤气产率及组分、焦油产率达到设计要求。

四、基于煤炭分级转化的发电技术前景分析

煤炭是我国今后相当长时期内的主要能源。

如何清洁高效地利用发电用煤是我国面临的重大挑战。现有火电厂只将煤炭作为燃料直接燃烧,造成系统效率偏低,污染物控制成本高,且浪费了煤中具有高附加值的油、气和化学品及硫、铝等资源。

以发电为主的煤热解气化燃烧分级转化近零排放污染物灰渣资源化回收技术具有巨大潜力。2013年年底超过 8.6×10^8 kW 火电装机, 1.8×10^9 t 耗煤, 90% 以上为烟煤和褐煤, 其所含挥发分可转化为 2.7×10^{11} m³ 合成天然气, 相当于我国天然气消费量 1.6 倍多(我国 2013 年天然气消费量为 1.676×10^{11} m³), 或 2.2×10^8 t 燃油, 接近我国石油消费量的一半, 与石油进口量相当。由此可见, 利用我国电煤所含挥发分采用分级转化为合成天然气, 量大且稳定可靠, 可作为天然气的重要补充来源, 因而提取电煤挥发分替代油气资源前景十分广阔。另外, 煤炭的灰分是潜在的建材和矿产资源。以灰分为 25% 计算, 我国燃煤发电排放灰渣作为掺合材料可制取 1.1×10^9 t 水泥, 或提取 9×10^7 t Al₂O₃ (约为 2013 年我国 Al₂O₃ 产量的 2 倍)。煤炭灰分中含有的锆、镓、铟、钽、钒、钛、铀等贵金属达到工业品位时, 就可提取利用。污染物也是潜在的资源, 全国电煤中硫资源若回收利用每年约可生产 4×10^7 t 硫酸等产品(相当于 2013 年全国硫酸产量的近一半)。

由此可见, 推广应用煤炭分级转化技术适合我国的国情和特色, 充分体现煤炭既是能源又是资源的理念, 既可对现有近 8×10^8 kW 燃煤电厂进行分级利用改造, 又可适用于新建电厂, 可应用于高效清洁发电、替代工业锅炉燃煤、运输燃料替代和煤化工等领域。

五、结语

根据煤炭既是能源又是资源的理念, 在燃煤发电过程中先通过热解提取煤的轻质组分(挥发分)用于生产油、气, 提取后的半焦(以碳元素为主)再用于燃烧发电, 实现煤炭的分级转化。该技术对于我国清洁高效煤炭发电、油气等资源替代、大幅度节能减排、循环经济等具有重要的战略意义。因此, 建议建立煤分级转化技术创新体系, 通过出台产业政策促进其推广应用, 打造适合我国国情的煤炭利用新模式, 从而推动形成煤分级转化战略性新兴产业, 来解决我国煤炭的高效、洁净利用问题。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [2] 梁晓晔. 煤基多联产系统的全生命周期评价及关键问题研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2013.
- [3] 郭志航. 褐煤热解分级转化多联产工艺的关键问题研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2015.
- [4] 岑可法, 骆仲泐, 方梦祥, 等. 新颖的热、电、燃气三联产装置[J]. 能源工程, 1995(1): 17-19.
- [5] 方梦祥, 骆仲泐, 王勤辉, 等. 循环流化床热、电、气三联产装置的开发和应用前景分析[J]. 动力工程, 1997, 17(4): 21-27.
- [6] 骆仲泐, 方梦祥, 王勤辉, 等. 循环流化床热电气焦油多联产装置及其方法: 200610154581X[P]. 2007.06.13.
- [7] 吕小兰. 煤部分气化燃烧集成系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2002.
- [8] 刘耀鑫. 循环流化床热电气多联产试验及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2005.
- [9] 王勤辉, 骆仲泐, 方梦祥, 等. 12兆瓦热电气多联产装置的开发[J]. 燃料化学学报, 2002, 30(2): 141-146.
- [10] 方梦祥, 岑建孟, 石振晶, 等. 75 t/h 循环流化床多联产装置试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(29): 9-15.
- [11] 方梦祥, 岑建孟, 王勤辉, 等. 25 MW 循环流化床热、电、煤气多联产装置[J]. 动力工程, 2007, 27(4): 635-639.
- [12] 岑可法, 骆仲泐, 王勤辉, 等. 煤的热电气多联产技术及工程实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.