

文章编号 :1005-7676(2002)02-0001-04

煤部分气化技术及半焦燃烧的研究现状与展望

黄 南,刘典福,盛宏至

(中国科学院力学研究所,北京 100086)

摘 要: 煤部分气化技术作为一种新的煤气化技术已逐渐引起人们的重视,本文介绍了煤部分气化技术及其产物——半焦的研究现状和发展方向。随着半焦应用技术的不断完善,煤部分气化技术因具有低成本、高效率 and 低污染等优点,必将逐步取代传统的煤气化技术。

关键词: 部分气化;半焦

Development and Expectation on Parcel Gasification and the Combustion of the Semicoal

Abstract: As a new kind of technology on utilizing the coal, Parcel Gasification has been more attracted. In this paper, the development and expectation on Parcel Gasification and the combustion of its solid offspring are introduced. With the development of the technology on combustion of the semicoal, we can affirm that because of its high efficiency, low-costing and low-pollution, Parcel Gasification will take the place of the traditional gasification.

Key words: parcel Gasification; semicoal

0 引言

能源是人类赖以生存和发展的物质基础。从世界范围的常规能源储量分布来看,煤的储量较多,而石油、天然气的储量相对较少,即使随着地质勘探技术的发展,其比例构成亦不会有很大的变化。我国煤炭资源极其丰富,仅次于美国、俄罗斯而居于世界第3位,其中煤炭的可采储量为1 145亿t,占我国已经探明的一次性能源总量的92%,而我国的石油、天然气资源相对缺乏,自1993年起中国就成为石油净进口国,到2000年中国石油的进口量已猛增至6 974万t,石油净进口率高达30%,为此国家每年要支付的外汇高达146亿美元。因此,煤炭在我国的能源结构中占主导地位,并且在相当长的时间内,这

种格局不会发生大的变化。

煤炭在我国能源利用总量中所占比例在70%以上。目前1年总耗煤量约12亿t,年排放烟尘2 100万吨,二氧化硫的排放量已居世界第2位,预计在21世纪中期我国对煤炭的年需求量将达到40亿t左右,随着煤炭开采深度的增加,煤炭的含硫量预计会进一步增加,二氧化硫的排放量也随之大幅度增加。

我国对煤炭的利用主要是通过燃烧转化成其它形式的能量,直接燃烧的煤炭占其总产量的86%左右,因此,能源转换率低、污染严重。据有关部门统计:大气中90%的SO₂,67%的NO_x和60%的粉尘由燃煤引起。

为了提高煤炭的利用效率和保护环境,人们尝

收稿日期:2002-04-08

试改变传统的煤炭利用方式,如利用煤炭合成煤气等。煤气除了工业和民用之外,电力行业采用煤气化联合循环发电技术(以下简称 IGCC)和增压流化床联合循环技术(以下简称 PFBC),最近又提出了煤部分气化等多种煤的洁净转化技术,其中煤部分气化方法日益受到重视。

1 煤气化技术

自从煤气化方法被提出以来,一百多年来,世界上的许多科学工作者都对此进行了深入细致地研究,传统的煤气化技术一般指煤在高温高压和水蒸气等的作用下,其挥发份和固定碳全部气化,其剩余产物——灰渣已不含热值;为了降低气化成本,人们正在尝试部分煤气化技术。

1.1 煤的气化技术

1987年,世界上第1座现代中试型 IGCC 电站——Cool Water 电站在美国投入运行。目前,IGCC 已经达到了工业示范水平,全世界共有 70 多座 IGCC 电站在建或投入运行^[1]。IGCC 技术尽管有许多优点,但也存在着一些急待解决的问题,如投资成本过高等;其次,对原料更高层次的综合利用、合成气的高温净化和气化炉喷嘴的寿命等影响其系统性能的关键技术仍不过关,因此,IGCC 距离大规模经济实用尚有很大的差距。

与 IGCC 技术同样受到人们重视的是 PFBC 技术,其发展历程几乎是同步的。PFBC 技术的特点是:可以向床内加脱硫剂(石灰石等),其脱硫效率达到 90% 以上,此外,由于炉温较低(850 ~ 880 °C),可以有效地控制 NO_x 的生成,因此是一种十分清洁的燃烧技术。早在 1981 年,原国家科委就将 PFBC 作为重点研究项目,由东南大学承担的“九五”国家重点科技攻关计划项目“增压流化床联合循环(PFBC)中试电站工程实验及其关键技术”于 2001 年通过国家科技部组织的验收,为实现国产化、大型化打下了坚实的基础。但其缺点是排渣量大,烟气和用水量均比 IGCC 高,容量提高又受到诸多限制,而且成本很高。

蒋绍坚等人^[3]对煤的高温空气气化技术——HTAG(High Temperature Air Gasification)进行了研究。HTAG 是固体燃料在空气温度高于 1 000 °C,过量空气系数为 0.3 ~ 0.5 条件下的高温空气气化新技术。固体燃料在卵石床气化器中,在超过 1 000 °C 的高温预热空气和较低过量空气系数条件下发生不完全

燃烧反应,可以获得热值较高的煤气。该系统简单、紧凑、操作灵活机动,其优点是气化效率较高,灰渣中基本不含残碳,产生煤气的热值高,燃料利用范围广,过量空气系数小和污染较低等。

另一种煤气化技术——内热式低温煤热解炉技术已通过小试、中试、工业性试验,1993 年,在山西省忻州市建成了规模为年转化 30 000 t 的煤制气实验厂,将内热式中、低温热解炉及其制气技术应用于工业生产^[4]。目前,第二代炉已经建成投产并取得了一定的经济效益。煤热解技术可以简述为以下三步:

(1) 空气与原料发生燃烧反应,产生的热能蓄积于料层内;

(2) 料层中的热能将煤干燥并加热到 700 °C 左右,煤被热解、干馏,然后,释放出煤气;

(3) 剩余半焦与炉内下部的冷却喷淋水进一步反应生成水煤气和半水煤气。

在系统运行正常以后,第一步所需要的热量由产生的煤气提供。这种技术的优点是可以利用褐煤、长焰煤、弱粘性或不粘性烟煤,合理利用煤炭资源并适当降低制气成本。内热式中、低温煤热解炉启动、停炉方便,比较适合中、小型城市煤气供应。

杨兰和等^[5]研究了煤炭地下气化反应的动力学特性。他们认为煤炭在地下气化过程中,高温的碳与二氧化碳、水蒸汽发生非均相反应决定了出口煤气的组成与热值。研究者在煤炭、CO₂ 和水蒸汽反应活性实验的基础上,分析了唐山刘庄煤焦与 CO₂、水蒸汽反应的动力学特性,确定了其化学反应速度表达式。研究发现:还原温度在 1 000 ~ 1 100 °C 时,CO₂ 具有很强的还原率;当温度达到 1 100 °C 时,水蒸汽分解可视为不可逆反应,生成 CO 的反应速率明显大于生成 CO₂ 的反应速率,出口煤气中 CO 浓度可以达到 CO₂ 浓度的 7 倍。

岑可法等^[6]在流化床煤气化实验台上,以水蒸汽作为流化介质研究了煤气化反应特性,发现煤种、床温对气化反应的影响较大,煤的粒径和流化介质的流速对气化反应影响则较小。

2001 年,中科院山西煤化所研究开发的灰熔聚流化床粉煤气化技术工业实验装置在陕西城化股份有限公司试运行成功,产出的合成气已并入生产系统中。它标志着我国在煤气化研究开发方面实现跨

越发展^[7]。

煤炭通过气化转变成可燃的煤气,煤气具有燃烧容易控制、效率高、低污染和易于运输等特点。但是,煤气化技术也存在着很多问题。煤炭主要由挥发份、固定碳、灰分、水分和一些被吸附的气体组成,这些组分彼此之间的物理、化学性质差别很大,尤其是化学反应活性更是差异显著,如果将煤炭作为“单一”物质对待而加以气化,就必须采用高温、高压、长停留时间,以及通入水蒸汽等手段进行“强制”转化,因此,该工艺系统复杂、成本高。

1.2 煤的部分气化

煤的挥发份比较容易气化,待挥发份挥发完毕,剩余物质的气化难度较大,若继续气化,将导致系统复杂、成本高,可以说得不偿失。正是由于煤的完全气化存在诸多问题,人们尝试煤部分气化技术。即换一种思路,依照煤的各组成有不同反应特性的特点,对煤炭进行分级利用,将气化的剩余产物——半焦用于燃烧处理,不再用于产生煤气。相对于完全气化,部分气化的气化过程非常容易实现。完全气化的主要工作量集中在气化的后半阶段,而部分气化技术则是把煤中容易气化的部分提取煤气加以利用,对难于气化的半焦则设法通过燃烧加以利用。

煤部分气化技术的核心思想是针对煤中不同组分实现分级利用;煤炭中的挥发份将作为煤气用作燃料或者化学工业原料,剩下的固定碳部分通过燃烧加以利用,而不再采取通入水蒸汽等手段对固定碳进行强制转化。该技术除了具备传统的煤气化技术的优点之外,还具有如下优点:

(1) 技术简单,而且成本较低;

(2) 气化过程中,原煤中含有的磷、氯、碱金属等污染物大多随同挥发份进入煤气。由于部分气化的气化温度较低,恰好煤气低温净化技术则相对比较成熟,煤气中含有的污染物易于脱除,有利于环保;

(3) 半焦是煤气化后的产物,其挥发份含量极低,因此,半焦难于燃烧,有利于贮存和运输。同时,半焦中残余的磷、氯、碱金属等污染物相对于原煤大大降低,燃烧起来相对清洁;

(4) 随着煤部分气化的固体剩余物——半焦利用技术的发展,煤的利用率有望进一步提高。

部分气化技术已列为国家“973计划”,目前,各子课题以及相应的工作任务已经落实,正在有条不紊地进行着。

人们对部分气化工程中产生的液体产物——煤焦油的处理已经做了大量的研究,但对如何合理利用固体剩余物——半焦所做的研究还不是很多。其实,半焦的燃烧动力学特性就是一个重要的研究方向。

2 半焦的燃烧动力学特性

煤部分气化技术相对容易实现,但在气化过程中产生的固体残余物——半焦的处理方法尚不成熟,如果将半焦弃置不用,不仅造成能源浪费,而且占用宝贵的耕地,造成环境污染。而相对煤炭而言,半焦具有高灰分、低挥发份、高含碳量、难以燃烧和发热量低的特点,这也给半焦的利用带来了较大的困难,有关半焦的研究并不充分。

煤气化或部分气化后的固体产物称为煤焦(半焦),这种物质同煤炭一样,也是由多种组分组成的混合物。

对煤焦的燃烧机理的研究一般集中于对煤焦的燃烧动力学参数的求解问题。通常做法是以阿累尼乌斯(Arrhenius)定律为基础,将测得的燃烧速率实验数据整理成为 $\ln k_s$ 和 $1/T_p$ 的线性关系式,根据该直线的斜率与截距确定燃烧动力学参数 E (活化能)和 k_0 (频率因子)。

B. C. Yong 等人^[8]使用热重分析法对褐煤焦的燃烧速率进行了研究,认为在不同的反应温度下煤焦的燃烧方式不同,因此活化能也不尽相同。他们认为在温度高于 700 K 的情况下燃烧受氧扩散控制,而在低于 700 K 时燃烧受化学动力学控制,活化能大大增加。

J. E. Hustard 等人^[9]利用甲烷燃烧加热倒吹管式炉对煤焦的燃烧速率进行了测量。他们使用粒径为 90 ~ 360 μm 的焦炭粒子进行实验,发现其实际燃烧速率远远小于扩散控制的燃烧速率,焦炭粒径越小,两者差别越明显。他们同时对焦炭密度和粒径与燃烬度的关系进行了研究,发现在燃烧过程中,焦炭密度与粒径均不同程度地减小。

A. B. Ayling 等人^[10]利用电加热倒吹管式炉研究了粉状焦炭的动力学参数。发现在燃烧过程中随焦炭粒径增大,其颗粒温度与载流气体温度差距越来越大。对于大粒径焦炭,其温度可以比气体温度高出几百度。

傅维标等人^[11,12]认为,煤焦的表面反应活化能

E 与煤种无关,而只取决于温度;但其反应频率因子 k_0 与煤种有密切关系。在此基础上,他们给出了一种确定煤焦燃烧反应动力学参数的新方法。依据他们给出的计算方法,只要知道煤的工业分析基参数,即可算出 k_0 值。此外,他们还认为, k_0 不仅与煤种有关,而还与煤焦的燃烧状态有关,并给出了它们之间的定量关系。另外,傅维标等研究了煤焦的还原气化问题。他们认为,煤焦的比表面积越大,其气化反应速率越大。

沈胜强等人^[13]对单颗半焦粒子着火与燃烧过程进行了研究,测定了几种尺寸的半焦粒子在不同环境温度下的着火温度、着火滞燃期、燃烬时间和燃烧过程中的粒子温度等参数的变化,并给出了描述半焦粒子的燃烧模型。他们在实验中发现随着半焦粒子直径的增大,其着火温度有所降低,而滞燃期明显延长,半焦粒子的燃烬时间与粒子直径呈近似线性增长的关系。当外界温度较高时,半焦粒子的燃烬时间相应缩短。另外,半焦粒子温度的变化取决于粒子燃烧产生的热量和粒子与周围环境交换的热量之差。在整个燃烧过程中,半焦粒子的温度大致呈上升 大致稳定 下降的趋势。

刘鑫等人^[14]建立了半焦的球对称粒子团燃烧的准稳态模型,对粒子团的燃烧速率和粒子温度进行了半分析—半数求解。他们定义了组燃烧数 $G = 4 \pi n a R_c^2$ (n —粒子浓度, a —粒子半径, R_c —粒子团半径),认为随着组燃烧数 G 的增大,粒子温度降低,并且火焰位置将逐渐远离粒子团表面,如果不同粒径的 G 值相同,那么小粒径粒子团的温度将高于大粒径粒子团的温度。同时,粒子团的燃烧速率、粒子温度与燃烧处于冻结流或平衡流状态无关。

赵宗彬等^[15]选用 950 ℃ 下热解制得的半焦,在适应固定床反应器上在常压、400 ~ 950 ℃ 温度范围内考察了其还原 NO 的反应性,研究了煤中矿物质对 NO—半焦还原反应的机理和反应动力学特性。他们发现:煤中的矿物质一般对 NO—半焦反应有催化作用,作用大小与含量、组成有关,含惰性组分高的矿物质对 NO—半焦反应有抑制作用;半焦还原 NO 反应存在着明显的双温区现象,低温、高温反应机理不同,反应的活化能值有较大的差异。

通过上述研究成果可以发现,半焦是一种和煤炭、焦炭等传统燃烧性质相差很大的固体物质,它含有一定的热量,因此必须合理地利用。但是,由于其

高灰分、高燃点等不利于燃烧的特性又给半焦的利用和研究带来了许多困难,特别是在不同气化条件下得到的半焦,其物理、化学性质又有较大差别,更增加了对其研究和利用的难度。

3 结论

我国能源资源的现状决定了我国在将来很长一段时间内仍将以煤炭为主。煤炭直接燃烧不仅能量转换率低,而且污染较为严重。为了克服以上弊端,早在一百年前就开始研究煤气化技术,IGCC 和 PF-BC 技术已经达到了工业示范水平,但由此又带来系统复杂、可靠率低和气化成本高等问题,这也是煤气化技术发展缓慢的原因之一。

煤部分气化技术是一项新兴技术,其气化部分相对简单,但气化效率低,气化过程中产生的固体残余物—半焦还含有较多的热量,必须加以利用。

半焦的物理化学特性与气化方式密切相关,虽然也有一些学者对这一问题进行了研究,但总体来看研究过于分散,缺乏系统性,所以半焦的处理方法尚不成熟,半焦的综合利用是煤部分气化的关键技术,这需要更多的科研工作者研究这一问题。

参考文献

- [1] 李现勇,肖云汉,蔡睿贤. 整体煤气化联合循环(IGCC)技术的发展和利用[J]. 热能动力工程,2001,(16):575~578.
- [2] 吴东垠,赵军旗,牛国平. 整体煤气化联合循环(IGCC)发电系统. 电站系统工程,1997,(13):1~4.
- [3] 蒋绍坚,彭好义,艾元方. 固体燃料高温空气气化系统及关键技术[J]. 煤气与热力,2000,(20):247~251.
- [4] 崔乐平. 内热式中低温煤热解炉的开发和利用[J]. 煤气与热力,2001,(21):225~228.
- [5] 杨兰和,梁杰. 煤炭地下气化反应动力学特性研究[J]. 燃料化学学报,2001,(29):223~228.
- [6] 岑可法,倪明江,方梦详等. 纯蒸汽鼓风下煤在流化床中气化试验研究[A]. 中国工程热物理学多相流学术会议,1991,43~49.
- [7] 科学时报 2001 年 6 月 24 日,第 2 版.
- [8] Young,B. C.,etc.,Temperature measurements of Beulah lignite char in a novel laminarflow reactor,Fuel,1988,(67):40.
- [9] Hustard J. E.,etc.,Burning rates of coke particles in the freeboard above a fluidized bed reactor,Combustion and Flame,1991,(85):223~240.
- [10] Alying,A. B.,etc.,Measured temperatures of burning pulverized-fuel particles and the nature of the primary reaction product,Combustion and Flame,1972,(18):173~184.

(下转第 9 页)

的高值利用领域。

(5)粉煤灰在废水治理中的应用。利用粉煤灰比表面积大、孔隙多、吸附性能好的特点,可以处理各种工业污染。研究表明,利用粉煤灰吸附法处理造纸废水,可以有效地降低废水中 COD 含量,挥发酚的消除率达 99.5%,基本达到国家排放标准。另外,粉煤灰对印染废水、焦化废水和电镀废水的处理结果也取得了很好的效果。

(6)粉煤灰高新技术的研究。如:粉煤灰复合高温陶瓷涂层技术,粉煤灰微珠复合材料和细末分离技术等。

(7)粉煤灰利用的专用设备开发和管理体系研究。着重开展自动化程度高的专用设备,提高粉煤灰利用的技术装备水平。开展粉煤灰综合利用工程技术经济性和系统性理论研究,制订合理的粉煤灰综合利用的产品标准、技术规程、质量管理体系和评价体系。

5 结语

节约能源是我国当前面临的重要任务之一,虽然太阳能、核聚变能、地热能等可为人类提供能量,但目前这些新能源还不能大规模开发利用,因此,节约化石燃料对我国至关重要。随着我国电力事业的不断发展,粉煤灰资源极其丰富,因此,粉煤灰综合利用是我国经济发展过程中一个迫切需要解决的大课题,是国家历来都重视的问题。国务院发布的《关于当前产业政策要点的决定》及能源部、国家建材局的有关文件都多次指出,必须综合利用粉煤灰和发展新型墙体材料,并制定了相关的政策。保护环境是我国的基本国策,是利在当代,功在千秋的宏伟工

程,面对土地资源的日趋减少,能源消耗极大的现实,综合利用粉煤灰是一举多得的有效措施。

参考文献

- [1] 沈旦申. 我国粉煤灰利用科学技术的可持续发展[J]. 建筑材料学报,1998,1(2):17~19.
- [2] 吴中伟. 绿色高性能混凝土与科技创新[J]. 建筑材料学报,1998,1(1):1~7.
- [3] 钱觉时. 粉煤灰排放标准与建材资源化[J]. 粉煤灰综合利用,1998(1):48~50.
- [4] 李国栋. 粉煤灰的结构、形态与活性特征[J]. 粉煤灰综合利用,1998(3):35~37.
- [5] 孙家顺. 三峡工程粉煤灰优选[J]. 粉煤灰综合利用,1998(3):11~13.
- [6] 丁庆军. 粉煤灰烧制低钙水泥的研究[J]. 粉煤灰综合利用,1998(2):29~31.
- [7] 李连科. 加压粉煤灰硅钙板[J]. 新型建筑材料,1998(12):11~13.
- [8] 宁波. 粉煤灰隔热耐火砖的研制[J]. 粉煤灰综合利用,1998(2):4~7.
- [9] 彭苏宁. 粉煤灰纤维棉防火吊顶板的研制[J]. 粉煤灰综合利用,1998(1):19~21.
- [10] 冷田春. 粉煤灰磁化肥的应用研究[J]. 粉煤灰综合利用,1998(2):27~29.
- [11] 李巧玲. 用粉煤灰处理造纸废水[J]. 粉煤灰综合利用,1998(1):51~53.
- [12] 张昌鸣. 粉煤灰净化焦化废水及其机理研究[J]. 粉煤灰综合利用,1998(4):34~36.
- [13] 王玮. 粉煤灰资源化综合利用技术[J]. 煤炭加工与综合利用,1998.
- [14] 廉政,蔡春雷. 粉煤灰综合利用技术发展概况及研究开发方向和重点[J]. 粉煤灰动态,1998(1)

(上接第4页)

- [11] 傅维标,张百立. 煤焦燃烧反应动力学参数与煤种的通用关系[J]. 燃烧科学与技术,1997,(3):1~14.
- [12] 傅维标,王庆华. 煤焦还原气化反应动力学参数与煤种的通用关系[J]. 燃烧科学与技术,2000,(6):96~100.
- [13] 沈胜强,李素芬,石英. 半焦粒子着火与燃烧过程实验研究[J]

. 燃烧科学与技术,2000,(6):66~69.

- [14] 刘鑫,沈胜强. 半焦粒子团燃烧模型与计算分析[J]. 燃烧科学与技术,1997,(3):304~308.
- [15] 赵宗彬,李保庆. 煤中矿物质对 NO - 半焦还原反应的影响[J]. 燃料与化学学报,2001,(29):129~134.