

煤炭洁净燃烧

块煤热解提质工艺及反应器开发进展

刘书贤, 门卓武, 郭屹, 陈爱国, 王向辉, 陈微, 翁力

(北京低碳清洁能源研究所, 北京 102211)

摘要:为推动我国块煤资源的洁净、高效转化,以反应器设计原理、结构特征为核心内容,总结了国内外具有代表性的块煤热解工艺技术及其反应器特征。重点探讨了直立干馏炉和回转型热解反应设备在块煤热解提质领域的应用情况,分析对比了各反应器的适用范围及工艺优缺点,并对块煤热解技术的发展进行展望。结果表明,固体热载体块煤热解工艺具有反应速度快、热解煤气热值高、粉尘夹带量少等优点,配合优化设计的回转型反应设备易于实现工业大型化生产。针对热解提质工艺普遍存在的热解气高温除尘问题,提出了开发高温静电除尘器、旋风分离器与移动颗粒床过滤器串联、旋风分离器与陶瓷过滤器串联等复合型除尘体系的解决方案。

关键词:块煤;反应器;热解;提质;除尘

中图分类号:TQ532

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2015)04-0067-07

Status and development of lump coal pyrolysis and reactor design technologies

LIU Shuxian, MEN Zhuowu, GUO Yi, CHEN Aiguo, WANG Xianghui, CHEN Wei, WENG Li

(National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China)

Abstract:To promote clean and efficient conversion of lump coal in China, typical coal pyrolysis technologies and reactor characteristics at home and abroad were summarized from the aspects of reactor design mechanism, structure characteristics, application scope. The application of vertical pyrolysis furnaces and rotary pyrolyzers on lump coal pyrolysis was discussed. The results showed that the lump coal pyrolysis processes with solid heat carrier had the advantages of high reaction rate and pyro-gas calorific value, little dust entrainment. Supported by optimized rotary reaction equipment, the processes were easy to realize industrial large-scale production. Carrying on the general problem of dust removal from high temperature pyro-gas, some solutions were proposed, such as to develop high temperature electrostatic precipitators, compound separation system like cyclone-granular moving bed filter and cyclone-ceramic filter.

Key words: lump coal; reactor; pyrolysis; upgrading; dust removal

0 引言

煤的热解也称为煤的干馏或热分解,是将煤在惰性气氛下加热并发生一系列的物理变化和化学变化的过程,普遍用于制取半焦、焦油及煤气。国内外研究并开发了各具特色的煤热解工艺方法,其关键设备热解器也类型各异。总体来说,热解产物的产率和组成取决于原料煤质、炉结构和加工条件(主

要是温度和时间),理想的热解反应器应保证过程效率高,操作方便可靠,主要表现在原料煤类别多样或原料易获得,热解物料受热均匀,工艺过程可控性强,热解气带出粉尘少,热解产物易于分离等。原料为块煤或简单破碎煤料的热解工艺,可以在源头防止大量粉尘带入系统,避免粉煤热解工艺面临的输送管道、分离设备大量积灰的困扰,利于液体产品收集并减少烟尘排放,符合煤炭清洁利用技术的发展

收稿日期:2015-01-22;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2015.04.018

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA05A202)

作者简介:刘书贤(1982—),女,河北石家庄人,工程师,博士,研究方向为煤热解与多相分离技术。E-mail:liushuxian@nicenergy.com

引用格式:刘书贤,门卓武,郭屹,等.块煤热解提质工艺及反应器开发进展[J].洁净煤技术,2015,21(4):67-73.

LIU Shuxian, MEN Zhuowu, GUO Yi, et al. Status and development of lump coal pyrolysis and reactor design technologies[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(4): 67-73.

要求。笔者以热解器设计原理及结构特征为重点内容,介绍国内外具有代表性的块煤热解工艺及其反应器类型,通过分析对比,对现有块煤热解反应器提出可能的优化方向。

1 国内外块煤热解工艺发展历程

20世纪20年代我国从英国引进外热式直立炭化炉——伍德(W-D)炉,用于生产城市煤气。德国也开发了考伯斯直立炉,该炉型相较伍德炉改善了炉体内温度均布,热效率更高。二战期间德国开发的鲁奇三段炉,是当时煤低温热解工业中效能最大、优点最多的先进炉型,后因操作复杂、单台炉子处理能力有限而逐渐退出历史舞台。20世纪40年代,随着固体热载体热解技术开始广泛应用于油页岩的干馏,前苏联开发的Galoter颗粒页岩干馏炉于80年代建成了工业装置并不断改造,运转至今。20世纪70年代以来,受石油危机和能源需求加剧的影响,美国、加拿大等褐煤生产大国相继开发了采用回转式热解器的TOSCOAL、ATP(Alberta Taciuk Process)及LFC(Liquids From Coal)等褐煤提质工艺。国内块煤热解典型工艺有:神华煤制油于2009年提出的模块化褐煤提质新工艺以及神雾集团无热载体蓄热式旋转床低温干馏技术。

2 典型块煤热解工艺及其反应器

2.1 连续式直立干馏炉

连续式直立干馏炉按加热方式不同分为外热式、内热式及混热式3种,原料主要包括气煤、强黏结性烟煤。

2.1.1 外热式连续直立炭化炉

外热式连续直立炭化炉是20世纪50年代英国、德国广泛使用的炭化炉,用于生产城市煤气和半焦,炉型主要包括伍德炭化炉和考伯斯炉。我国鞍山焦耐院结合这2种炭化炉的优点开发了JLH-D型直立炉。外热式连续直立炭化炉的主要特点是:回炉煤气燃烧后产生的热量经炉壁传给炭化室中的煤料以促进煤的干馏,煤料不直接接触加热气体。

1)伍德(W-D)炭化炉。伍德炭化炉的工作原理是:煤斗将煤料加入炭化室上部,煤料在结构狭长的炭化室内缓慢、连续下移。煤在下行过程中,吸收迂回式热火道传来的热量并逐渐炭化,炭化过程中煤释放的煤气等副产品上升到炭化室顶部被导出。

焦炭离开干馏段后,喷入蒸汽和水进行熄焦操作^[1]。早在20世纪20年代,伍德炉已由大连煤气公司引进我国,后来又相继进驻上海、长春、天津、武汉等地。伍德炉常与机械发生炉配套生产,在20世纪很长时期成为我国部分大、中城市的独立气源。

2)考伯斯(Koppers)炭化炉。20世纪60年代后,考伯斯炭化炉的应用热潮逐渐消退。因我国城市对气体燃料的需求不断增长,大连煤气公司引进该技术并于1988年投产。考伯斯炉属于间歇蓄热式炭化炉,其工作原理是:上、下蓄热室内蓄热格子砖传来的热量将贫煤气和空气预热,预热后气体在燃烧室的火道里燃烧并上下流动,所产生的热量通过炭化室墙传给煤料,燃烧后的高温废气进入蓄热室,经格子砖传热给待预热的煤气和空气,炭化炉组加热、蓄热操作间隔为30 min。焦炭经炭化室底部进入排焦箱,喷水降温后经绞龙排出^[1]。

与伍德炉相比,考伯斯炉具有以下优越性:①加热煤气和空气在燃烧室的立火道里交替地上下流动加热,炭化室高向温度均匀。而伍德炉采用向上加热方式,炭化室上部温度偏低,影响结焦。②考伯斯炉不仅横墙加热均匀,还采用了蓄热室回收废气余热的方法,使炉体本身交替加热,耗热量降低。③可用贫煤气或富煤气作为加热气源,生产调节灵活。④产气量高,焦油产率高。

3)JLH-D带蓄热室双排炭化室连续直立炉。JLH-D直立炉结合了伍德炉和考伯斯炉的优势,炭化室的结构与伍德炉相同,同时设置了上、下蓄热室^[2-3]。该炉型于1988年在大同市煤气公司建成投产,开创了用弱黏煤生产铁合金焦的先河。

综上所述,外热式连续直立式炭化炉具有产品品质稳定、煤种适应性强、无含酚蒸汽和焦尘排放、占地小、运行动力消耗小等优点。然而,外热式干馏炉干馏室和燃烧室不相通,热量由炉墙外部传入,煤料受热不均,导致产品产量和质量不稳定。此外,采用外热式的加热方式,单台干馏炉的规模相对较小,生产能力较低。

2.1.2 内热式连续直立炭化炉

内热式炭化炉借助热载体把热量传给原煤,热载体可以是烟气等气体,也可以是固体,如瓷球、热灰、热半焦或其他物料^[4]。代表炉型有德国鲁奇-斯皮尔盖斯(Lurgi-Spuelgas,简称L-S)干馏炉^[5-6]、国产SH系列干馏炉^[7-8]等。

1) L-S低温干馏炉

L-S 低温干馏炉是德国 Lurqi GmbH 公司在二战期间开发的热解装置。我国于 1956 年引入该干馏炉,其处理量为每炉 300 ~ 450 t/d。该干馏炉属于气体热载体内热式干馏设备,炉体由上至下分为 3 部分:干燥段,干馏段和半焦冷却段,故名鲁奇三段炉。

工艺流程为:筛选后的原料煤(25 ~ 80 mm 块煤)经运输带,由钢车分配至炉顶装料分配器,经过贮煤层落入干燥层并与燃烧室送来的混合烟道气(温度 230 ~ 300 °C)进行热交换。煤被预热到 130 ~ 200 °C,混合烟道气被冷却到 120 ~ 150 °C,一部分经烟囱放空,一部分作冷循环气使用。干馏段的气体热载体(温度 600 ~ 800 °C)由两处供给:冷却段来的热瓦斯和由燃烧室送来的热废气。在干馏段,热气流把煤加热到 500 ~ 850 °C,生成的焦油蒸汽和煤气上升至炉顶,经气体收集管道,引至冷凝回收系统。

2) 国内改进型内热炉

为提高神府地区炭化炉的产能,推动半焦产业规模化发展,陕西省冶金设计研究院开发了 SH2007 型内热式干馏炉并于 2008 年投产,产量为 10 万 t/a。其工艺过程为:合格入炉煤(20 ~ 150 mm 块煤)进入炭化炉内,在下移过程中与高温气体逆流接触。炭化室的上部为预热段,块煤在此被预热到 360 ~ 400 °C,继而进入炭化室中部的干馏段,块煤被加热到 680 ~ 720 °C 并被干馏为半焦,半焦通过炭化室下部的冷却段时,经水蒸气换热冷却至 160 ~ 200 °C,最后落入刮焦槽内与水(污水处理后中水)直接接触冷却至 50 °C 左右,再由刮焦机刮出。湿法出焦有利于在直立炭化炉炉底形成很好的密封,然而因出焦含水率高达 30%,烘干装置的投资费用较高,陕西冶金设计院尝试将熄焦方式改为干法熄焦后,节省了耗水量,生产的半焦可直接燃烧利用。

3) 固体热载体热解工艺直立炉型

20 世纪 80 ~ 90 年代,国外涌现出一批应用固体热载体热解煤、油页岩及其他有机材料的热解反应器及工艺专利技术^[9-10],反应器属于内热式移动床形式,普遍思路是使用混合内构件使待热解物料与热载体快速混合。

国内典型的固体热载体直立热解炉由神华煤制油化工有限公司于 2009 年研发。所涉块煤热解提质工艺流程如下:将褐煤破碎至 0 ~ 30 mm,送入回转干燥器中,使其与烟道气并流接触、直接换热;同

时原料煤在回转干燥器中与来自热解器的热半焦间接换热实现煤的干燥^[11]。干燥煤与来自加热回转窑的高温半焦混合后进入热解器,煤发生热解,最终热解温度为 500 ~ 700 °C。所生成的热半焦一部分送至加热回转窑进行升温处理,其余的热半焦送至回转干燥器用于与原料煤间接换热。本技术优势在于:操作灵活,煤料粒度范围宽,产生的半焦和焦油的质量好,用热半焦作热解气和粉尘混合物的过滤材料,妥善解决了焦油粉尘堵塞和焦油含尘量大等技术问题,能量梯级利用,系统热效率高。2012 年,在该工艺基础上建设的 6000 t/a 褐煤热解中试装置试运行成功。主反应器结构示意图如图 1 所示。干燥煤和高温固体热载体进入反应器顶部,经三级圆锥-锥台交替布置的混合内构件,快速达到较高的混合均匀度,随后下落至反应器移动段。热解气错流穿过以工艺自产半焦(经筛分处理)为过滤介质的移动床过滤器,脱尘后进入后续油气处理单位。圆锥-锥台配合圆筒的组合形式可将块煤和固体热载体快速均匀混合^[12],为换热提供良好的基础。

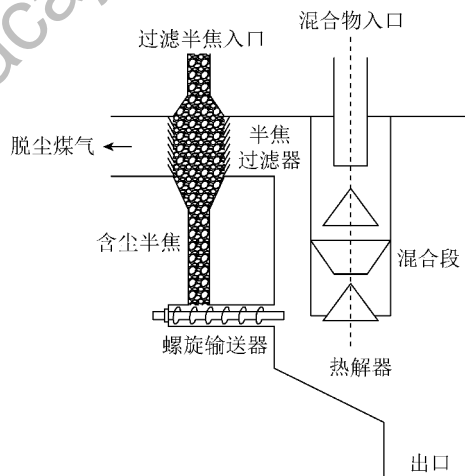


图 1 神华模块化固体热载体热解工艺反应器示意

2.1.3 混热式连续直立炭化炉

根据所在地及周边煤田的煤质特点,神木县三江煤化工有限责任公司结合鲁奇三段炉和现有内热式干馏方炉的技术优势,开发了 SJ 低温干馏方炉^[13]。

与鲁奇三段炉不同,SJ 低温干馏方炉炉体为一个空腔结构,按各部分作用可分为干燥段、干馏段和冷却段,干燥段和干馏段之间没有明确的中间层隔开。其主要特点有:块煤经煤仓布料器、炉腔顶部集气阵伞^[14]的分散作用,均匀落入干燥段;煤气和空气在支管混合器内混合,均匀喷入花墙并经花墙上

巧妙设计的开孔喷出炉内燃烧,再混合冷却煤气及水蒸汽成为气体热载体,将煤块加热;冷却后的半焦进入排焦箱,经推焦机连续、均匀地推入水封槽内,保证了固体产品下降均匀、出焦均匀;煤气由炉顶集气阵伞引出进入冷却系统。

该炉型相对鲁奇三段炉,操作简化,高度显著降低,单位容积的利用效率更高。单炉年产焦炭有3万t、5万t、10万t等炉型,可以灵活配置生产规模,在达到集约化、规模化生产。

气流内热式及混热式炉适用于块状煤料,原因是气体热载体须由下向上穿过料层,要求料层有足够的透气性。其局限包括:①不适合处理黏结性较高的煤,且装入煤料必须是块状的。②气体热载体的加入降低了热解气态产物热值,增大了后续热解气分离、冷却的操作难度。

2.2 回转型热解设备

2.2.1 外热式回转干馏炉

在当前低温干馏行业中末煤无法有效利用、产品质量不够理想、环保问题尚未根本解决的背景下,一些煤化工领域专家及企业充分研究了外热式回转炉低温干馏工艺的优势,将回转炉研发制造工艺与低温干馏技术融合,形成了技术先进、可靠的煤炭低温干馏工艺。

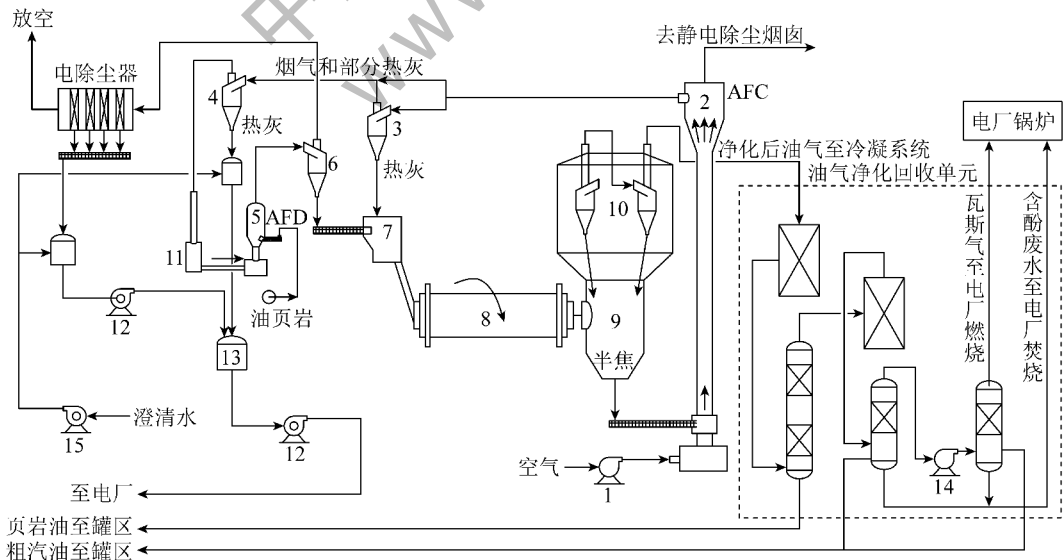
西安三瑞开发的新型卧置外热式回转炭化半焦炉^[15],筒体由干燥段和热解段组成,炉头和炉尾密封良好,加热系统采用分段内保温夹套,筒体内采用与筒体转向相反的抄板,搅动物料并控制破碎率。

该工艺适用于高含水煤提质、城市干污泥处理、油页岩干馏和垃圾处理等领域,具有以下优势:可处理30 mm以下的原煤(含<8 mm末煤);热利用率高;高温烟气循环利用、富余外排烟气回收利用;装置产能大,换热效率高;装置操作灵活、弹性大;产品质量优异。

2.2.2 固体热载体热解工艺用回转干馏炉

使用固体热载体的热解工艺技术有:前苏联Galoter干馏工艺、加拿大ATP干馏工艺及美国TO-SCOAL干馏工艺都采用了回转型热解反应器。

Galoter干馏炉^[16]工艺流程如图2所示。原料油页岩被破碎成直径小于25 mm的颗粒,经低温烟气干燥达到135℃。干燥旋风分离器分离下的页岩经螺旋输送机与页岩灰(750~800℃)混合,灰与页岩质量比约为(2.8~3.0):1。混合物进入回转式干馏炉内,反应温度为470~490℃,停留时间14~16 min。反应器内为负压,页岩油被最大限度地提炼出来。混有页岩灰的半焦进入喷流式燃烧器在空气不足条件下燃烧,使物料温度达到760~810℃。Galoter干馏炉于1945年由前苏联科学院能源研究所发明,1984年爱沙尼亚建成了2台日处理3000 t的装置(UTT-3000),经改进完善,运行至今。



1—离心空气鼓风机; 2—喷流式燃烧器; 3—热载体旋风分离器; 4—页岩灰旋风分离器; 5—气流喷射式干燥器;
6—干燥页岩分离器; 7—页岩灰混合加料器; 8—转筒干馏炉; 9—除尘器; 10—油气净化旋风分离器;
11—余热锅炉; 12—泥浆泵; 13—浆液罐; 14—离心气体鼓风机; 15—澄清水泵

图2 Galoter干馏流程(热页岩灰作热载体)

ATP 技术^[17]是加拿大 UMATAC 工程有限公司为油页岩热解加工而开发的一项技术,已于 20 世纪末在澳大利亚建成示范工厂。反应器为外热式、双套筒、多间隔回转窑,由预热区、燃烧区、热解区和冷却区组成。燃烧生成的页岩灰在外筒反向运动,内筒中的待热解油页岩则作正向移动,热灰通过筒壁将热量传给页岩。ATP 技术优势在于:干馏炉处理量大;干馏尾气热值高,热值达 22.37 MJ/kg;页岩干馏、油气回收及废气处理都在密闭环境中进行,因此环保达标。其缺点是转动设备庞大,故障率高,维修困难,难以大规模推广。

处理小颗粒油页岩的 TOSCO 工艺由美国油页岩公司开发^[18],经改进后可进行弱黏煤的热解,称为 TOSCOAL 工艺。该工艺过程为:加热煤气携带碎煤进入上升管将煤料预热,干燥煤与高温瓷球接触后,煤在约 480 °C 下热解。耐热回转筛分器将半焦和瓷球的混合物分离后,得到产品半焦,瓷球经热解气加热后作为固体热载体循环利用。油气经沉降器脱除夹带的部分粉尘,进入后续气体处理单元。

TOSCOAL 工艺存在的问题有:设备复杂,热效率不高,半焦和瓷球不易分离,热解气脱尘不充分,半焦的潜热没有利用等。

2.2.3 旋转圆盘型反应器

1) 美国 LFC 工艺转盘热解器。LFC^[19]技术是美国 SGI 公司在 1987 年基于 Encoal 技术开发的低阶煤热解工艺。LFC 工艺采用煤炭低温热解提质得到稳定、洁净的固体产品,目的是有效避免煤矿与电厂间煤中惰性组分(水分和灰分)及硫的无效运输。

LFC 工艺流程如图 3 所示。原料煤(次烟煤经筛分成 3~50 mm)经三段进行处理:第一段,煤的干燥:采用惰性气体热载体将煤升温,脱除煤中绝大部分内在水和外在水。第二段,煤的热解:热惰性气体将干燥后的煤加热至热解温度 450~650 °C。第三段,精整段:半焦经冷的惰性气体淬冷使干馏反应停止,继而在旋转冷却器中与冷却水间接换热,继续冷却至常温。喷入部分工艺水,使半焦发生再水合以达到平衡。在钝化段,冷却后的半焦暴露在含氧气氛下以降低自燃倾向。

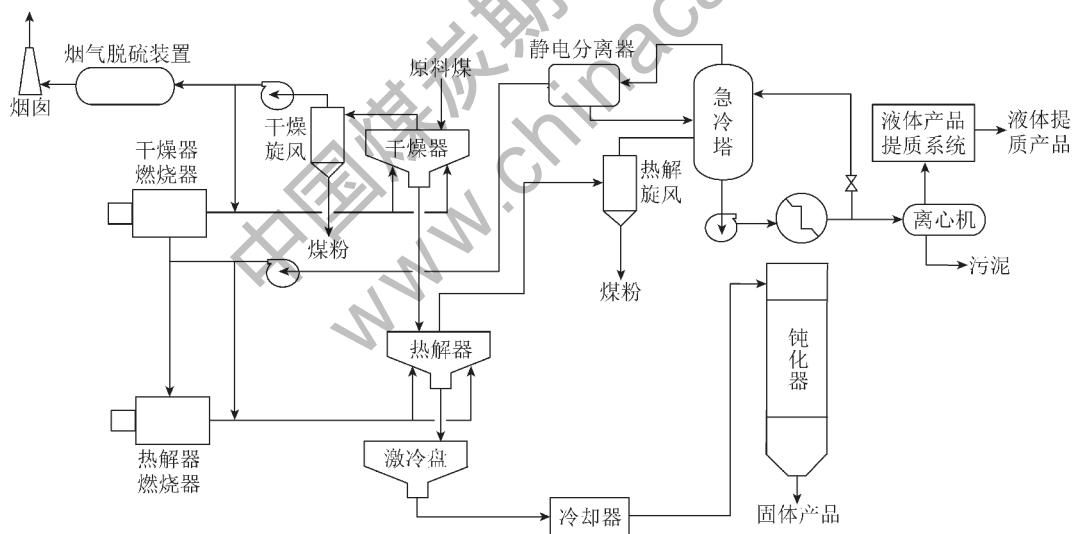


图 3 LFC 工艺流程

处理能力 1000 t/d 的示范厂于 1992 年在科罗拉多州建成并投产,所得固体产品(即半焦)发热量比原煤提高 50%,燃烧稳定性好;通过添加 MK 粉尘抑制剂,有效地抑制了半焦微细粉尘的量。原褐煤经提质后,热值增至原来的 1.36 倍,水分从 31% 降低至 8%,硫排放由 2.4% 降低至 1.8%。

2) 神雾无热载体蓄热式旋转床干馏炉。神雾依托自身在蓄热燃烧器、燃气辐射管、环形转底炉等方面的技术优势,开发了无热载体蓄热式旋转床干

馏工艺^[20]。

旋转床式干馏炉是一种环形炉,经过破碎和烘干的煤炭块料在装料装置作用下进入环形反应床层,随干馏炉转动,煤料被环形空腔顶部的蓄热式辐射管(工艺热效率 90%~92%)预热,逐渐升温至 550 °C 左右发生热解。由于燃烧废气另行导出,可保证热解气体产品品质。干馏后半焦由出料装置卸出炉外,进入喷雾熄焦冷却装置进行冷却。热交换后的热蒸汽作为原料煤烘

干或生产蒸汽的热源。从油水分离罐分离出的高浓度污水送入污水焚烧系统焚烧或生化处理后作为制作水焦浆用水。目前,神雾已在昌平试验基地建成年处理3万t低阶煤干馏热解生产线,设计单炉煤炭处理量达到100万t/a。

同LFC转盘热解器类似,由于温和热解反应中煤的停留时间在0.5h左右,受煤层厚度限制,大规模生产中反应器及支撑结构十分庞大,钢材耗量大,安装困难,经济性差。

3 块煤热解工艺发展与应用趋势

我国拥有大量廉价块煤资源,急待高效、清洁转化利用,尽管国内外已经开展了相关研究工作,但是至今尚没有一种成熟技术可供工业化应用。制约块煤热解技术实现工业化应用的主要技术问题有:如何开发新型反应器以适应热解工艺的特点,以及如何控制和降低热解系统中粉尘生成量,降低焦油中粉尘含量,提高系统长周期运转性能。

3.1 低阶块煤热解反应器开发

在大规模生产中,应用直立炉热解低阶块煤,若采用气体热载体方式,对原料的黏性、热稳定性都有严格的要求,如褐煤及弱黏煤一般需要事先进行压锭处理,以保证料层透气性并防止热解过程中破碎、粉化^[21];采用固体热载体热解方式时,因引入几倍质量的热载体,需合理设计热解炉体上部的快速混合段。

应用回转式热解器则对原料煤的黏性和粒度限制大大放宽,但由于传热面积限制,电加热及气体热载体直接加热方式要求回转热解器内煤填充率控制在一定范围内(一般不高于25%),某些气体热载体外热式(气走管程)回转炉保证了热解气相产物品质,却因内构件复杂难以清理、检修;固体热载体回转热解可通过提高回转窑内物料填充率来保证处理量,尤其适用于以油、气为目标产品的生产工艺。

3.2 热解产物分离技术开发

含焦油蒸汽的热解气夹带大量粉尘,且细粉(10 μm以下颗粒)含量较高,若脱尘不充分极易堵塞管道或后续油气处理设备。采用常规气固分离手段难以达到预期的效果^[22],如:旋风分离器要求较高的风速和压力降,不能适应负荷波动较大的情况,且对5 μm以下的细颗粒分离能力有限;静电除尘器和布袋除尘器可以捕集细灰,

但操作安全性对气体组成敏感,通常不能耐受250℃以上的温度;陶瓷过滤器虽具有除尘效率高的优势,用于高温热解气除尘则存在限制,过滤膜孔隙可能永久性堵塞导致压力持续增大;移动颗粒床过滤除尘器在小试装置上的除尘效果显著^[23],已经处于工业化试行阶段,而应用于大型化操作则需要配置过滤介质的循环再生(脱灰和升温)系统,循环量大,控制复杂。高温条件下如何实现热解气与粉尘的高效分离已成为制约块煤热解工艺成功实施工业化的关键所在。当前该领域学者探索的重点集中在:开发高温静电除尘器、旋风分离器与移动颗粒床过滤器串联、旋风分离器与陶瓷过滤器串联等复合型除尘体系。其中,旋风分离器串联移动颗粒床过滤器的组合式除尘系统的可行性较高,即将旋风分离器作为预脱尘设备,以较低的压降(一般<2 kPa)达到脱除大部分粗颗粒的效果;下游的移动颗粒床过滤器的负荷已大大减小,滤料再生体系的占地也相应缩小。值得注意的是,选择何种形式的移动床颗粒过滤器^[24],如何科学分配旋风分离器-颗粒过滤器的压降和除尘效率等问题,还需要展开系统的实验研究。

4 结 语

本文重点探讨了典型直立干馏炉和回转型热解反应设备在块煤热解提质领域的应用情况,并对各反应器的适用范围、工艺优缺点进行了分析对比。固体热载体块煤热解工艺具有广阔的应用前景,在典型炉型的选择和优化上,直立炉需加强进料段设计,改进固固混合效果,圆盘式热解器的应用亟待开发与反应器契合的进料段快速预混和物料运动过程中的再混合技术,卧式回转热解器则可通过提高回转窑内物料填充率来保证处理量。综合来看,通过改进回转型热解设备进行块煤提质,操作方便、可行性高,具备应用于大型化工业生产的优势。开发复合型除尘设备系统,突破热解气高效除尘技术发展的瓶颈,有助于块煤热解工艺实现工业化应用。

参考文献:

- [1] 李志强. 浅谈伍德炉与考伯斯炉[J]. 煤气与热力, 1992(7): 18-23.
- [2] 郭信中. 大同煤在JLH-D型直立炉中结渣原因的分析[J]. 煤气与热力, 1992(1): 32-35.
- [3] 孙秉侠, 张晓光. JLH-D型直立炉的改进[J]. 燃料与化工,

- 1995(1):20-22.
- [4] 米志平,王宁波.煤炭低温干馏技术现状及发展趋势[J].洁净煤技术,2010,16(2):33-37.
- [5] 石油五厂低温干馏车间.干馏炉操作知识[M].北京:石油工业出版社,1959:1-73.
- [6] 陈晓菲,赵杰,薛选平,等.SH2007型内热或直立炭化炉能耗分析[J].重型机械,2010(S2):133-136.
- [7] 曾明明,薛选平,史剑鹏,等.SH2007型内热式直立炭化炉出焦装置的改造[J].重型机械,2010(S2):114-116.
- [8] 崔乐平.内热式中低温煤热解炉的开发与应用[J].煤气与热力,2001,21(3):225-228.
- [9] Lewis A E. Process for oil shale retorting using gravity-driven solids flow and solid-solid heat exchange; USA, 688688 [P]. 1984-11-06.
- [10] Coburn T T. High liquid yield process for retorting various organic materials including oil shale; USA, 224414 [P]. 1988-07-26.
- [11] 郭治.一种煤热解提质方法;中国,200910089227.7 [P]. 2009-12-23.
- [12] 詹敏述,刘书贤,崔哲,等.大差异颗粒静态混合的实验研究[J].化工进展,2012,31(S1):306-310.
- [13] 孙建新,黄诚,段永宏.SJ型干馏方炉在窑街页岩炼油技术领域的开发与应用[J].中外能源,2010(12):80-83.
- [14] 尚文智.集气阵伞;中国,200610111738.0 [P]. 2007-05-23.
- [15] 邢永平.外热式回转反应炉夹套的改进设计[J].化工设计通讯,2011,37(2):88-93.
- [16] 林国臣,刘金忠,秦绍敬.抚顺炉与Galoter炉炼油技术经济初步比较[J].山东煤炭科技,2011(4):188-190.
- [17] 刘光启,邓蜀平,蒋云峰,等.ATP技术用于褐煤热解提质的技术经济分析[J].洁净煤技术,2007,13(6):25-28.
- [18] 吴永宽.国外煤低温干馏技术的开发状况与面临的课题[J].煤质技术,1995(1):39-45.
- [19] 徐晓光,赵毅.褐煤提质技术的应用现状及前景[J].热力发电,2012,41(5):1-11.
- [20] 吴道洪.蓄热式无热载体旋转床干馏新技术[R].北京:北京神雾环境能源科技集团,2011.
- [21] 张翠珍,衣晓青,刘亮.煤热解特性及热解反应动力学研究[J].热力发电,2006,35(4):17-20.
- [22] 樊英杰,郑化安,张辉.粉煤热解含尘干馏气除尘技术研究及应用[J].煤化工,2014(5):1-5.
- [23] 许世森.移动颗粒层过滤高温除尘过程结构和参数优化实验研究[J].中国电机工程学报,1999,19(5):13-17.
- [24] 夏军仓,许世森,郜时旺,等.移动颗粒层过滤高温高压煤气除尘技术的试验研究[J].动力工程,2003,23(2):2337-2341.

(上接第66页)

3) 试验商品分子筛的浓缩分离效率较高,对于高浓度、中低及超低浓度的煤层气一次浓缩可提高浓度20%以上,CH₄和N₂分离效果较好。

参考文献:

- [1] 李旭.世界煤层气开发利用现状[J].煤炭加工与综合利用,2006(6):41-45.
- [2] 崔荣国.国内外煤层气开发利用现状[J].国土资源情报,2005(11):22-26.
- [3] 黄星,曹文胜.变压吸附PSA净化天然气技术[J].低温与特气,2014,32(3):6-9.
- [4] 杨雄,刘应书,李永玲,等.变压吸附法富集低体积分数含氧煤层气的研究[J].煤炭学报,2011,36(1):91-96.
- [5] 刘应书,郭广栋,李永玲,等.变压吸附浓缩低甲烷浓度煤层气的试验研究[J].低温与特气,2010,28(2):5-8.
- [6] 李永玲,刘应书.低浓度含氧煤层气吸附富集过程中吸附塔大径比的影响规律[J].煤炭学报,2014,39(3):492-497.
- [7] 周圆圆,杨华伟,张东辉.甲烷/氮气变压吸附分离的实验与模拟[J].天然气化工,2011,36(5):21-27.
- [8] 慈红英,李明,卢少瑜,等.CH₄/N₂在炭分子筛上的吸附动力学[J].煤炭学报,2010,35(2):316-319.
- [9] 刘曰武,苏中良,方虹斌,等.煤层气的解吸/吸附机理研究综述[J].油气井测试,2010,19(6):37-44.
- [10] 杨明莉.煤层甲烷变压吸附浓缩的研究[D].重庆:重庆大学,2004.
- [11] 杨江峰,赵强,于秋红,等.煤层气回收及CH₄/N₂分离PSA材料的研究进展[J].化工进展,2011,30(4):793-801.
- [12] Buczek B. Development of texture of carbonaceous sorbent for use in methane recovery from gaseous mixtures [J]. Inżynieria Chemiczna i Procesowa, 2000, 21(3):385-392.
- [13] Carrott P J M, Cansado I P P, Ribeiro Carrott M M L. Carbon molecular sieves from PET for separations involving CH₄, CO₂, O₂ and N₂ [J]. Applied Surface Science, 2006, 252(17):5948-5952.
- [14] Zhou Li, Liu Xiuwu, Li Jingwen. Synthesis of ordered mesoporous carbon molecular sieve and its adsorption capacity for H₂, N₂, O₂, CH₄ and CO₂ [J]. Chemical Physics Letters, 2005, 413(1/3):6-9.
- [15] Olga Gorska, Aleksandra W Cyganiuk, Andrzej Olejniczak. Salix viminalis wood as a new precursor for manufacturing of carbon molecular sieves for effective methane/nitrogen separation [J]. Open Chemistry, 2015, 13(1):748-755.
- [16] 张薄,辜敏,鲜学福,等.CH₄, N₂, CO₂在椰壳活性炭内的吸附平衡及扩散[J].煤炭学报,2010,35(8):1341-1346.
- [17] 席芳,林文胜,顾安忠,等.炭分子筛吸附分离甲烷/氮混合物研究进展[J].制冷技术,2010,38(9):41-44.
- [18] 席芳,林文胜,顾安忠,等.CH₄/N₂混合气在炭分子筛上的变压吸附分离[J].煤炭学报,2011,36(6):1032-1035.
- [19] 辜敏,鲜学福,张代均,等.变压吸附技术分离CH₄/N₂气体混合物[J].煤炭学报,2002,27(2):197-200.