

含尘含油高温热解煤气除尘技术研究进展

杨帅强^{1,2}, 都林¹, 李松庚^{1,2}, 宋文立^{1,3}

(1.中国科学院 过程工程研究所 多相复杂系统国家重点实验室,北京 100190;2.中国科学院大学 化学工程学院,北京 100049;

3.中国科学院大学 中丹学院,北京 100049)

摘要:高温热解气除尘问题是影响煤热解技术实现规模化应用的重要问题之一。针对高温热解煤气所携带粉尘的特点,分析了含尘含油热解气高温除尘技术的研究进展,论述了高温热解气除尘技术的特点,根据含尘热解气高温除尘技术的特点提出了热解气除尘技术未来的研究方向。高温含尘热解气具有组成复杂、对温度敏感、重质组分容易冷凝、粉尘粒径小、分离难度大等特点。旋风分离器用于高温热解气除尘,对于粒径大于 10 μm 的粗粉尘除尘效率较高,一般用作高温热解气除尘的预分离器。静电除尘技术、金属微孔过滤除尘技术(金属膜除尘技术)和颗粒床除尘技术对高温含尘热解气中粒径较小的粉尘除尘效率较高,适合进行精细除尘。现有热解气除尘技术试验结果表明,过滤温度过低,焦油容易冷凝,造成油气收率下降,温度过高,热解气二次反应加剧导致过滤过程积碳严重,影响除尘器运行周期。高温含尘热解气的除尘效率方面,金属微孔除尘技术的过滤效率最高,过滤效率大于 99%,颗粒床除尘器用于高温热解气除尘的过滤效率大于 90%,受温度影响,温度高于 400 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下,静电除尘器的过滤效率一般低于 90%。在相同过滤时间内,金属微孔过滤技术的过滤压降最高,静电除尘器压降最低,颗粒床过滤器的压降介于两者之间。静电除尘技术具有压降低、除尘效率低的“双低”特点,因此,在工艺条件优化的基础上,开发新型电极材料成为其发展方向。金属微孔过滤除尘技术具有过滤效率高和压降高的“双高”特点,开发低成本、耐高温、耐腐蚀的抗积碳材料,调控金属网孔的结构与分布是金属丝网除尘技术的发展方向。颗粒床除尘过程中存在床料积碳、热解气二次反应等问题,未来开发新型除尘滤料实现除尘提质一体化将是颗粒床除尘技术的重要研究方向。各种除尘技术用于热解气除尘均有其独特特点,充分利用各种技术的优点,通过技术组合有望实现除尘工艺技术的高效稳定运行。目前,热解气除尘技术基本都处于中试及示范工程阶段,但中试时间一般较短,缺乏长期的运行数据,热解气除尘技术实现工程应用需要进一步研究。

关键词:高温除尘;煤热解气;颗粒床;除尘技术

中图分类号:TQ533.2

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2021)01-0193-09

Advances on dust removal technology of high temperature pyrolysis of coal gas containing dust and oil

YANG Shuaiqiang^{1,2}, DU Lin¹, LI Songgeng^{1,2}, SONG Wenli^{1,3}

(1.State Key Lab of Multi-phase Complex Systems, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2.School of Chemical Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.Sino-Danish College, University of

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The problem of dust removal from high temperature pyrolysis gas is one of the important reasons affecting the large-scale application of coal pyrolysis technology. According to the characteristics of the dust carried by high-temperature pyrolysis gas, the research progress of high-temperature dust removal technology of dust containing pyrolysis gas were analyzed, the characteristics of dust removal tech-

收稿日期:2020-11-03;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.A20110301

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0605003)

作者简介:杨帅强(1983—),男,河南汝州人,博士研究生,研究方向为热解气除尘。E-mail:yshq83@163.com。通讯作者:李松庚,研究员,研究方向为固体燃料洁净转化及污染物控制。E-mail:sgli@ipe.ac.cn

引用格式:杨帅强,都林,李松庚,等.含尘含油高温热解煤气除尘技术研究进展[J].洁净煤技术,2021,27(1):193-201.

YANG Shuaiqiang, DU Lin, LI Songgeng, et al. Advances on dust removal technology of high temperature pyrolysis of coal gas containing dust and oil[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1): 193-201.



移动阅读

nology of high-temperature pyrolytic gas were discussed. According to the characteristics of high-temperature dust removal technology of dust containing pyrolytic gas, the future research direction of pyrolysis gas dust removal technology was prospected. The pyrolysis gas containing dust has the characteristics of complex composition, sensitive to temperature, easy condensation of heavy components, small particle size of dust and difficult separation. The cyclone separator is used for the dust removal of pyrolysis gas, and the dust removal efficiency of coarse dust with particle size greater than $10\text{ }\mu\text{m}$ is high, which is generally used as the pre-separator of pyrolysis gas dust removal. Electrostatic precipitator, metal microporous filter and granular bed filter have higher efficiency for dust with smaller particle size in high-temperature dust-containing pyrolytic gas, which are suitable for fine dust removal. The results of the pyrolysis gas dust removal technology show that if the filtration temperature is too low, the tar is easy to condense, causing the decrease of oil and gas yield. If the temperature is too high, the secondary reaction of the pyrolysis vapor will be intensified, which causes serious carbon deposition in the filtration process and affects the operation cycle of the dust collector. In terms of the dust removal efficiency of high-temperature dust containing pyrolysis gas, the metal microporous dust removal technology has the highest filtration efficiency, which is more than 99%. The filtration efficiency of granular bed filter for high-temperature pyrolysis gas is more than 90%. Affected by the temperature, the filtration efficiency of electrostatic precipitator is generally less than 90% when the temperature is higher than $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. In the same filtration time, the metal microporous filtration technology has the highest filtration pressure drop, the electrostatic precipitator has the lowest pressure drop, and the pressure drop of granular bed filter is between the two. Electrostatic precipitator technology has the characteristics of "double low" of pressure drop and filtration efficiency. Therefore, on the basis of optimization of process conditions, the development of new electrode materials becomes its development direction. Metal micropore filtration technology has the characteristics of high filtration efficiency and high pressure drop. The development direction of metal mesh technology is to develop low-cost, high temperature resistant, corrosion-resistant carbon deposition resistant materials, and regulate the structure and distribution of metal mesh. In the process of granular bed dust removal, there are some problems such as carbon deposition of filter material and secondary reaction of pyrolysis vapor. In the future, it will be an important research direction of granular bed dust removal technology to develop new dust removal filter material and achieve the integration of dust removal and quality improvement. In the process of dust removal of pyrolysis gas, various dust removal technologies have their own unique characteristics. Based on the advantages of the existing technology, it is expected to ensure the high efficiency and stable operation of the dust removal process through the technical combination. At present, most of the pyrolysis gas dust removal technologies are in the stage of pilot and demonstration projects. However, the pilot experiment has a short time and lacks long-term operating data. In the future, it is necessary to strengthen the research on the realization of engineering application of pyrolysis gas dust removal technology.

Key words: high temperature dust removal; coal pyrolysis gas; granular bed; dust removal technology

0 引言

我国煤炭资源丰富,以热解为核心的煤炭分级分质转化技术对合理有效利用煤炭资源和能源,实施能源结构调整,实现煤炭清洁、高效和资源化利用,保障我国能源安全和经济可持续发展具有重要作用。煤高效清洁转化技术发展迅速,许多技术已经实现工业应用^[1-5]。但基于低阶煤组成结构特征的粉煤热解分级转化联产燃料和化学品技术商业化工程应用进展缓慢。为此,国内外开发了回转窑、流化床、下行床、移动床等热解技术,开展了不同规模的中试研究和工程示范^[1-5]。在热解分级转化规律、调控方法与技术实现途径、热解反应器工程放大等方面获得了深刻认知,这些积累为其最终实现商业化工程应用奠定了良好基础。

高温热解煤气与粉尘的分离是热解技术实现工程应用的主要技术瓶颈之一。近年来,颗粒床过滤、高温静电除尘和各种膜过滤除尘已经取得了长足的技术进步,展现出良好的应用前景。采用高效低阻

旋风分离(预除尘)-颗粒床过滤/金属膜过滤/高温静电(深度除尘)复合除尘方案,成为现阶段解决这一问题的主要方案。通过旋风分离器预除尘,降低来流煤气携带粉尘浓度,从而降低后续深度除尘装置运行负担,增加其长周期运行可靠性;通过深度除尘提高对细颗粒除尘效率,使所得焦油含尘量满足后续加工要求。

本文将结合笔者所在课题组的研究结果和已有文献报道,分析讨论热解煤气所携带粉尘特点、含尘含油高温除尘技术(颗粒床过滤、高温静电除尘、金属微孔过滤除尘技术)进展,以期对未来研究及应用提供指导。

1 含尘热解煤气特点

高温热解煤气组成复杂,除了常温不凝气体(CH_4 、 H_2 、 CO 、 CO_2 、少量 C_2 和 C_3),还含有焦油蒸气、水蒸汽以及粉尘。因其含有焦油蒸气,高温热解煤气对温度变化敏感。焦油在 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右析出,与粉尘共同作用导致除尘器及管道、阀门等堵塞^[5-7]。温度过

高,焦油又易裂解发生结焦析碳,焦油收率降低。因此,一般要求除尘温度控制在 400~600 ℃。

热解工艺种类较多,不同的热解工艺含尘浓度波动较大,粉尘浓度及组成均不同,粉尘浓度在 2~12 g/m³。无热载体热解工艺中粉尘主要来源于半焦,而以循环灰为热载体的煤热解工艺中粉尘由循环灰和半焦粉末组成。由此可见,煤粉颗粒在热解反应器内的热崩裂及运动磨损产生的半焦是粉尘的重要来源。

为了研究粉尘的组成,中国科学院过程工程研究所利用旋风分离器对煤热解中试试验产生的含尘热解气进行分离,并分析旋风分离器收集到的粉尘和旋风分离器出口粉尘的粒径分布,结果如图 1、2 所示。可知,热解煤气中的粉尘粒径较小,分布范围

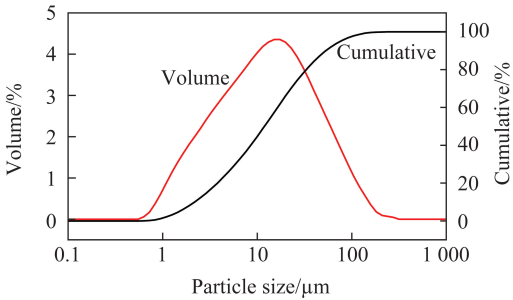


图 1 旋风分离器出口粉尘粒径分布
Fig.1 Particle size distribution of dust at the outlet of cyclone separator

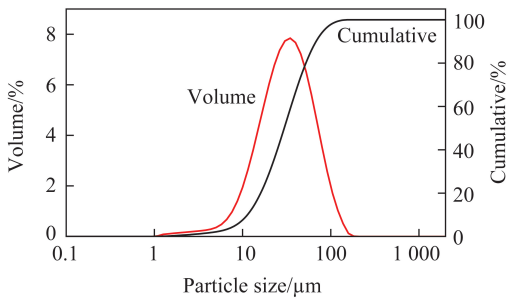


图 2 旋风分离器分离得到的粉尘粒径分布
Fig.2 Particle size distribution of dust separated by cyclone separator

较宽,旋风分离器对热解气中 10 μm 以上大粒径粉尘除尘效率较高,粒径较小的粉尘采用旋风分离器难以高效分离,需要采用其他除尘技术。

因此,煤热解气除尘过程中一般采用旋风分离器作为含尘热解气的预分离器,除去粉尘中粒径较大的粉尘。对于热解气中粒径较小的粉尘,一般采用静电除尘技术、金属微孔过滤除尘技术(金属膜除尘技术)和颗粒床除尘技术等进行精细除尘。

2 煤热解气除尘技术

目前,煤热解所得高温热解气精细除尘的技术主要包括静电除尘技术、金属微孔过滤除尘技术和颗粒床除尘技术等,技术特点见表 1。

表 1 热解气除尘技术的特点

Table 1 Characteristics of dedusting technology with pyrolysis gas

热解气除尘技术		温度影响	压降	投资	除尘效率/%	研究现状	优点
静电除尘技术		高温敏感	低	高	<90	实验室及中试	压降低,气体处理量大,结构简单
金属微孔过滤技术		无影响	高	高	>99	实验室及中试	耐高温,除尘效率高
颗粒床过滤技术	固定床	无影响	高	低	>90	实验室及中试	耐高温,过滤效率高,滤料成本低
	移动床	无影响	高	低	>90	实验室及中试	耐高温,过滤效率高,滤料成本低,压降稳定

2.1 静电除尘

静电除尘主要是在高压电场作用下,气体发生电离,使含尘气体中的粉尘颗粒带负电荷,在电场力作用下,带负电的固体颗粒向带正电荷的阳极板定向移动集聚,当阳极板上的固体颗粒达到一定程度,利用振打装置对极板产生的冲击力使粉尘脱离极板进入灰斗,达到除尘目的^[8-9]。采用静电除尘器作用在细颗粒物(粒径<30 μm)上的静电力是重力的 100 倍以上^[9],因而,静电除尘器可以高效除去气流

中的颗粒物。静电除尘器处理含尘气体压降低,气体处理量大,设备构造简单,除尘效率高,广泛应用于燃煤电厂烟气除尘,除尘温度一般为 200 ℃^[8]。目前,静电除尘器主要从温度、气氛、放电电极性质及材料、颗粒性质等方面展开研究^[10-11]。

高温下静电除尘的性能易发生变化,主要是由于温度对静电除尘器运行环境基本特性(如密度、黏度和电阻率)产生影响。温度升高会降低气体密度,导致气体分子的平均自由程变长,从而使气体离

子的迁移率增加。这些变化使气体分子有更多时间加速以达到电离,从而降低了所需的电场强度。但发生电击穿的电压量也随着气体密度的降低而降低,同时,临界电压的降低速度比起始电压的降低速度快^[9],造成静电除尘器能工作的电压范围缩小,降低效率。温度增加,气体黏度增加,静电力不受影响,导致气体中粉尘阻力增加,容易被气流带出除尘器,造成除尘效率下降^[9]。

不同气氛对静电除尘器的除尘效率影响较大。柳佳佳^[10]在400~600℃下,考察了气氛对除尘效率的影响。在相同电压条件下,热解气的除尘效率介于空气和N₂之间,空气气氛下的除尘效率为94.9%~98.4%,热解煤气气氛下的除尘效率为63.3%~86.9%,N₂气氛下的除尘效率为61.6%~76.6%。相同温度条件下,N₂气氛下除尘效率随电压增大基本呈线性上升,空气气氛下除尘效率随电压增加呈缓慢增加,热解煤气气氛下除尘效率随电压增大先减小后增大^[10]。Chen等^[11]发现热解气中提高CO₂含量可以提高热解气的除尘效率,但随着温度增加,CO₂对除尘效率的影响逐步减弱。

颗粒的电阻率对静电除尘器运行也有很大影响,低电阻率粒子在到达收集电极时,电荷消散太快,使其获得与收集电极相同的电荷,并被排斥回气流中,高电阻率的粒子电荷消散太慢,可能导致过量电荷积聚,造成危险的“反电晕”现象^[9],温度增加,水分从粉尘表面蒸发,会增加比电阻,当温度超过150℃时,通过增加导电率来降低电阻率,提高过滤效率,然而,粒子电阻率的过度降低将增加电荷耗散率,并可能导致粉尘粒子被夹带^[9]。

高压是解决温度引起的静电除尘效率下降的方法^[8]。较高的压力会增加气体密度,并允许在发生电击穿前施加较高电压^[8]。虽然,压力增加也会增加密度和提高起振电压,但较高的温度会减小这种影响,其结果是静电除尘器工作电压范围更大^[9]。研究表明,与环境条件下相比,高温高压使得静电除尘器运行效率更高^[9]。

浙江大学与淮南矿业集团合作建立了一套12 MW循环流化床热、电、气焦油多联产工业示范装置^[12-13]。该装置采用两级旋风与一台高温静电除尘器相结合的方式对热解气进行除尘,总体除尘效率在85%左右^[12]。此外,中国科学院工程热物理研究所也对静电除尘器用于煤热解气的除尘效果进行了研究,并将静电除尘技术用于240 t/d固体热载体粉煤热解中试工艺,该工艺对静电除尘后的含尘气体进行焦油洗涤及离心分离相结合,所得焦油

含尘率为0.47%^[14]。

2.2 金属微孔过滤除尘技术

金属微孔过滤除尘技术(金属膜过滤技术)以金属丝网为过滤材料,利用筛滤、惯性碰撞等机理脱除气体中的粉尘^[15]。金属微孔材料按结构形式进行分类,主要有金属烧结丝网、金属纤维毡和烧结金属粉末等^[15]。

烧结金属网一般采用多层金属编织丝网,经过特殊的叠层压制并在真空条件下经过烧结等工艺制造而成^[15]。金属丝网的网孔呈交错分布,网孔均一,因而,空隙分布均匀。金属丝网具有较高的机械强度,良好的耐磨性、耐热性。因而,可以在高过滤速度下,保持较高的过滤效率^[15]。

采用金属粉末烧结过滤器结构简单,通常采用一定粒度分布的金属化合物颗粒在磨具内加热到熔点制成,孔隙率为20%~40%,金属粉末烧结过滤器能抵抗除尘过程中常发生的热冲击,由于采用耐腐蚀性合金制成,因此,不易受腐蚀性气体成分的影响^[16-17],但金属粉末烧结过滤器使用过程中过滤压降较大。

烧结金属纤维介质是由直径2~40 μm短细金属纤维形成的非织物结构^[17]。金属纤维是在真空或氢气气氛下烧结而成,孔隙率可以达到90%左右^[17]。金属纤维过滤器与金属粉末烧结过滤器相比,两者强度接近,过滤过程中金属纤维过滤器的流动阻力较小,但金属纤维过滤器的可靠性较差,使用周期短^[17]。

金属过滤器的操作温度可以达到1 000℃,具体使用温度受合金和烧结过程中所产生孔径的影响^[9]。温度超过400℃下运行时,小于100 μm的粉尘通过金属微孔过滤器的除尘效率达到99.99%,过滤后的粉尘浓度低于10 mg/m³^[9]。

金属丝网除尘器的压降一般受进口气流流量、气流含尘浓度、气流入口温度等因素影响。张婉婧等^[18]采用金属丝网过滤器对工业炉窑高温含尘烟气进行处理,研究发现,当进口气流量和气流含尘浓度增加时,系统压力快速增加,但当含尘气流浓度大于53 g/m³时,压降下降,可能是阻塞孔道粉尘层脱落所致。当温度低于300℃时,除尘器系统压降主要来自金属丝网滤袋的表面压降;当温度大于300℃时,压降快速上升,600℃时,系统压降在3 000 Pa左右,而金属丝网表面压降不足1 500 Pa,远低于系统压降,说明除尘器结构压降带来的影响较大^[18]。由于热解气含尘量高,容易在金属丝网表面沉积,导致金属网除尘压降大,金属丝网过滤器与

其他过滤器相结合进行除尘时,可以减少金属丝网除尘压降,增加除尘效率^[19-20]。

煤炭科学技术研究院有限公司煤化工分院^[21-22]在其开发的新型小粒径低阶煤移动床定向热解装置上开展中试研究,热解给煤量控制在 50 kg/h,热解产生的含尘热解气经除尘系统除尘后进入后续工段处理。除尘系统采用金属膜对高温热解煤气进行处理,除尘温度在 500 ℃ 左右,经金属膜除尘后焦油尘含量低于 1%^[22]。采用金属膜进行除尘,最大优势在于具有良好的耐高温性能,除尘效率高。但金属微孔过滤技术长期运行压降较高,有待进一步研究^[23]。

2.3 颗粒床除尘技术

颗粒床除尘技术主要是利用随机填充堆积的滤料与含尘气体接触,在拦截、惯性碰撞、分子扩散等多种力作用下,气体中携带的固体粉尘被滤料捕捉,使气体净化。含尘气体在颗粒层的过滤过程一般分为深层过滤与滤饼过滤^[23-24]。颗粒床种类较多,一般根据床层滤料在颗粒床中的运动状态不同,可分为固定床和移动床 2 种形式^[23-24]。由于颗粒床本身具有耐高温且除尘效率高的特点,被认为是最有可能解决热解气高温除尘的技术之一^[24]。

颗粒床除尘器滤料的材质要求性质稳定、耐磨、耐高温不易被腐蚀、价格便宜、来源广泛^[23]。通常颗粒床滤料的选择根据滤料颗粒在床层内部的运动状态不同存在差异,固定床一般采用流化清灰,要求床料密度小,便于流化,以降低再生的压力,较常用的为珍珠岩、半焦等轻质床料。移动床要求床料颗粒密度适中,流动性良好,常用床料为陶瓷球、石英砂、半焦等。床料粒径对过滤效率和压降影响较大,一般情况下,粒径越小,过滤效率越高,但床层过滤压降越大^[23]。

过滤过程中,颗粒床性能受温度的影响较大。一般情况下,高温能够增加气体黏度,加剧分子扩散作用,有利于 1 μm 以下微细粉尘的脱除^[24]。热解气在热解温度下,易导致热解气在床料表面发生二次反应,床料积碳增加,焦油收率下降。热解气除尘温度下降过多,容易使热解气的重质组分发生冷凝,床料表面的重质组分如沥青等组分黏性较大,减少捕集到的粉尘被二次夹带,提高过滤效率。但温度过低,大量焦油组分冷凝床料结块,降低空隙率,导致过滤阻力快速增加。因此,热解气颗粒床温度控制在 450~600 ℃。

2.3.1 固定床除尘技术

固定床除尘技术指床层滤料在过滤过程中不发

生位置移动,含尘气体通过颗粒床后,固体颗粒被过滤下来^[24]。固定床过滤器如图 3 所示,除尘过程一般包括过滤和反吹 2 个阶段,工业上一般采用双床切换,保证除尘的连续操作。

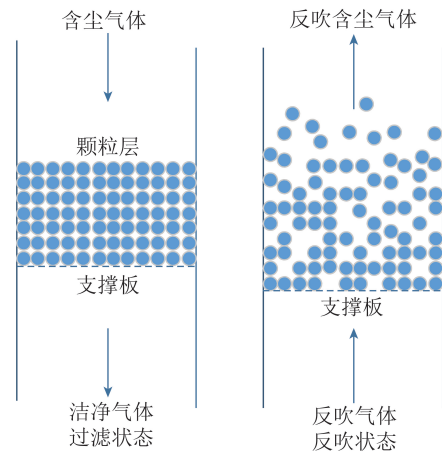


图 3 固定床颗粒过滤器^[24]

Fig.3 Fixed bed filter^[24]

固定床过滤过程中,随时间增加,粉尘逐步在滤料颗粒之间沉积,造成床层压降增加。为了增加床层的容尘量,增加过滤时间,双层或多层滤料配置成为近年来固定床研究的重要方向。通常在上层配置粒径大、密度小的轻质滤料,下层配置粒径小、密度大的重质滤料,上层粗滤料可以增加床层容尘量,下层细滤料实现精细除尘。常温条件下,采用上层 1~2 mm 珍珠岩(高度 180 mm)、下层 0.3~0.5 mm 石英砂(高度 45 mm)作为床料,过滤风速为 0.15~0.50 m/s 时,上层除尘效率为 96.08%~98.78%,下层过滤效率为 80.91%~90.57%,整体除尘效率为 99.25%~99.89%,过滤 120 min 压降为 940~3 450 Pa。捕集粉尘的粒度分布表明,上层可以脱除 5 μm 以上粉尘,下层可以有效脱除 2.5 μm 以上粉尘^[25]。在 450 ℃ 高温条件下,利用固定床对模拟热解气除尘,与无焦油环境相比,焦油存在可使颗粒床过滤效率由 83.8% 提高到 96.39%^[26],由此可见,热解气中焦油存在能够在一定程度上提高过滤效率。

固定颗粒床用于热解气除尘具有耐高温、设备投资低、滤料性能稳定、除尘效率高等优势,但反吹产生的含尘气体需要进一步处理。

2.3.2 移动床除尘技术

移动床除尘技术主要利用缓慢移动的床料捕集热解气中的粉尘,由于床料不断移动,粉尘被移出除尘器,在除尘器外部通过再生装置进行粉尘与床料分离,再生后的床料循环回除尘器。移动床操作过程中床料不断更新,克服了固定床频繁反吹的问题,操作过程压降相对稳定。目前,移动床除尘技术作

为高温气体除尘的热点之一^[27-36],主要集中在结构形式改进。依据进入过滤器中的含尘气体与滤料移动方向的不同,移动床包括错流移动床、顺流移动床、逆流移动床等^[24]。

错流式颗粒层除尘器如图 4(a)所示,含尘气体与过滤介质流动方向互相交叉,过滤介质在 2 层或多层滤网(百叶栅)中流动。过滤时,过滤介质在重力作用下缓慢向下流动,含尘气流经百叶窗后进入过滤介质,固体粉尘被过滤介质截留,带有粉尘的过滤介质从除尘器下方不断流出^[24]。错流过滤器进行过滤时,颗粒层向下移动,易受百叶窗布置结构和床料颗粒间相互作用力的影响,在两侧百叶窗位置过滤介质受阻力较大导致移动速率比中心区域的床料移动速度慢,随过滤时间增加,粉尘易在百叶窗附近堆积,从而形成滞留区^[31-34]。滞留区的存在导致床层压降逐步上升、热解气中腐蚀性物质将破坏百

叶窗结构、过滤介质易结块等问题^[24]。目前,对错流式移动床如何减小滞留区进行了大量研究^[31-34],但未彻底解决,仍需进一步研究。顺流式颗粒床除尘器(图 4(b))过滤阶段,含尘气流的流动方向与颗粒层移动方向一致。含尘气体与颗粒平行流动有利于促进含尘气流与滤料颗粒接触,由于床料夹带粉尘移动,低气流下除尘效率较高,但存在粉尘被干净气体夹带问题^[24]。逆流式颗粒床除尘器(图 4(c))中,含尘气流流动方向与滤料颗粒移动方向相反。含尘气体与滤料颗粒逆向接触,在多种力作用下,粉尘被滤料捕集并带出颗粒床,洁净气流从干净滤料的表面流出。逆流除尘虽然缓解了顺流移动床粉尘被干净气体夹带的问题,但要求过滤气流速不能过大,防止床料流化^[24]。移动颗粒床用于热解气除尘过滤效率高、压降稳定,但需要增加床料与粉尘分离设备。

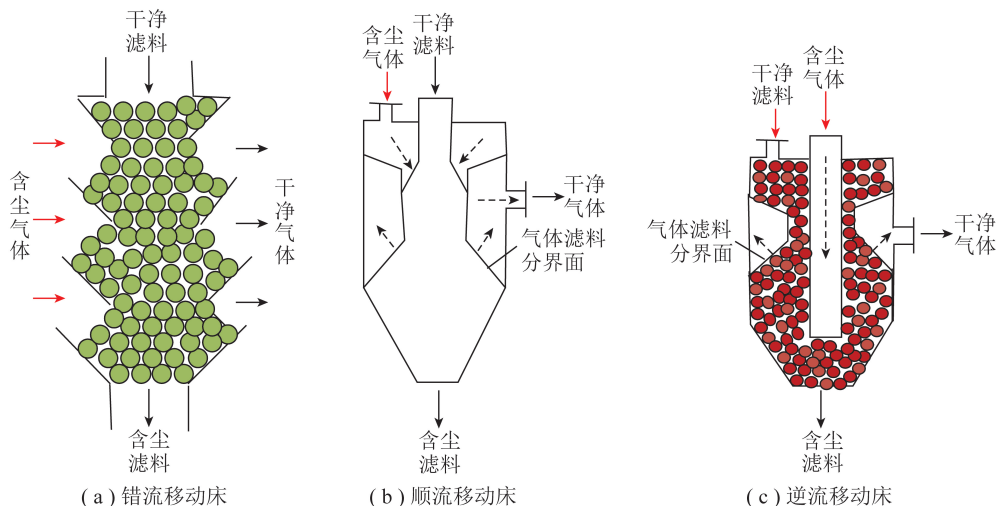


图 4 不同形式的移动床颗粒过滤器示意^[24]

Fig.4 Schematic diagram of different types of moving bed filter^[24]

2.3.3 高温热解气颗粒床中试试验

高温热解气颗粒床除尘中试情况见表 2。中国科学院过程工程研究所基于前期颗粒床除尘研究^[24,36],在 3 000 t/a 下行床“煤拔头”工艺中试车间进行了颗粒床除尘中试试验,除尘系统由旋风分离器和颗粒床除尘器组成。颗粒床除尘器采用粒径 2~5 mm 膨胀珍珠岩作为床料,过滤时间为 5 min。采用过热蒸汽作为反吹气,反吹时间为 30 s。经过 72 h 连续运行,可使焦油含尘率由 12%降低至 1% (质量分数)左右,整个除尘过程中,过滤压降低于 500 Pa,反吹压降低于 200 Pa^[24,37]。经过改进,过滤后焦油中粉尘含量为 0.67%。

新疆广汇煤炭清洁炼化有限公司利用自行设计的多层固定颗粒床除尘装置进行了中试试验。中试

装置设计气量为 800 m³/h,过滤流速为 2 m/s,反吹风速为 0.5 m/s。中试采用模拟干馏煤气(0.074 mm 煤粉和煤焦油组成)进行,干馏煤气进入多级除尘滤盘组成的颗粒床除尘器,净化后的煤气通过引风机送至下游工序。反吹过程,由预热至 620 ℃的热煤气将床层中的粉尘带至颗粒床底部,模拟干馏煤气进行连续 84 h 除尘试验。试验中,过滤和反吹温度均在 600 ℃左右,床层压差 2 500 Pa,可将 100 g/Nm³ 干馏煤气净化至 50 mg/Nm³ 以下^[38-39]。

大连理工大学与神木富油能源科技有限公司合作在 60 万 t/a 煤固体热载体热解示范装置用固定床对高温热解气进行中试试验,固定床设计 4 组,每组配置 4 个过滤单元,共 16 个床层(15 个床层过滤,1 个床层反吹),单个床层处理量 3 600 m³/h,运

表 2 颗粒床中试试验
Table 2 Pilot test of granular bed dust removal technology

除尘形式	中试单位	热解气除尘规模 (中试平台)	床料	床料直径/ mm	焦油尘含量/%	压降/Pa	除尘温度/℃
固定床	中国科学院过程工程研究所	3 000 t/a 热解 中试平台	膨胀珍珠岩	3~5	~1	<500	450~500
	新疆广汇煤炭清洁炼化有限公司	800 m ³ /h 热解气	—	0.30~0.45	—	<2 500	600
	大连理工大学、神木富油能源科技有限公司	54 000 m ³ /h 热解气	轻质高强度滤料(上层) 石英砂(中层) 黄沙(下层)	2 1~3 0.5~1.0	—	<6 000	400~500
移动床	中国科学院山西煤炭化学研究所	75 t/h CFB 锅炉相匹配 的燃烧/煤热解多联供中 试平台(煤干馏量 5 t/h)	半焦	5~10	3.48	1 000	600
	神华煤制油化工公司	6 000 t/a 褐煤 热解中试装置	半焦	—	—	—	500~700

行时反吹时间 25 s(可根据实际情况调节),单个床层置换时间为 35 s(可调节),滤料厚度为 500 mm,过滤气速为 0.22 m/s。该床层采用上粗下细的设计理念,上部布置轻质高强度滤料作为容尘层,下层采用石英砂,黄沙作为床料。床层温度为 400~500℃,整个装置运行 71 h,装置过滤压差达到 6 kPa 左右,反吹气压差最高达到 15.66 kPa^[40]。

中国科学院山西煤炭化学研究所在陕西府谷建成一套与蒸发量 75 t/h CFB 锅炉相匹配的燃烧/煤热解多联供中试平台,干馏热解煤量为 5 t/h。热解产生的煤气采用旋风分离器与错流移动颗粒床除尘器相结合进行除尘。颗粒床所用床料为 5~10 mm 半焦,移动速度为 1 cm/min,床料厚度为 300 mm,进煤量为 2 t/h,此工况下,颗粒床除尘器压差为 1 000 Pa 左右,焦油含尘量为 3.48%^[35]。此外,神华煤制油公司在 6 000 t/a 褐煤热解中试装置中利用 500~700℃热解半焦为床料,采用移动床操作形式对热解气进行过滤,除尘后的油气进入后续单元处理,详细试验结果未见报道^[21]。

由颗粒床中试试验可知,煤热解气中试及示范工程热解气量可达到 54 000 m³/h,所用床料主要包括半焦、珍珠岩、石英砂和黄沙等,床料粒径为 0.3~5.0 mm,处理后焦油尘含量低于 3.5%,热解气尘含量可以达到 50 mg/Nm³。中试过程中,颗粒床过滤压降在 500~6 000 Pa,温度为 400~700℃。

3 结 论

1) 旋风分离器用于热解气除尘,对粒径大于 10 μm 的粗粉尘除尘效率较高,一般用作热解气除尘

的预分离器。静电除尘、金属微孔过滤除尘(金属膜除尘)和颗粒床除尘对含尘热解气中粒径较小的粉尘除尘效率较高,适合进行精细除尘。通过不同除尘技术组合可实现除尘装置的高效稳定运行。

2) 中试试验结果显示,金属微孔除尘的过滤效率最高,其次为颗粒床除尘,静电除尘过滤效率最低。运行压降最高为金属微孔过滤技术,静电除尘器压降最低,颗粒床过滤压降介于两者之间。

3) 目前,热解气除尘技术基本都处于中试及示范工程阶段,中试温度为 400~700℃,以避免焦油冷凝或二次热解,中试规模最高为 54 000 m³/h,但目前的中试时间还较短,缺乏长期运行数据。热解气除尘技术实现工程应用需要长期试验结果的验证。

4 展 望

1) 结合具体的除尘工艺优化工艺条件和除尘器结构,开发新型抗积碳材料(除尘滤料)。热解气成分复杂,除尘过程中易受工艺条件影响,如温度过低易导致焦油冷凝,造成油气收率下降和粉尘局部堆积结块。温度过高又会加剧热解气二次反应。因而,需根据不同的除尘工艺对工艺条件进行优化。静电除尘器应针对高温条件下除尘效率降低、除尘器部件积碳严重导致除尘器绝缘子性能下降等问题,在工艺条件优化的基础上,开发新型电极材料。金属丝网过滤技术存在过滤材质价格较高,除尘过程中易受到热解气中酸性气体的腐蚀,金属材质表面易积碳造成网孔阻塞,压降增加快等问题,因此,开发低成本、耐高温、耐腐蚀的抗积碳材料,调控金

属网孔的结构与分布是金属丝网除尘技术的发展方向。颗粒床除尘过程中存在床料积碳、热解气二次反应等问题,未来开发新型除尘滤料实现除尘提质一体化将是颗粒床除尘的重要研究方向。

2)多种技术优化组合。粉尘主要来自于煤热解部分,通过将除尘器与煤热解相结合如将颗粒床除尘器与热解装置耦合,颗粒床除尘器直接在热解反应器内部进行除尘,既可以充分利用热解的热量也可以从源头上降低粉尘,减少焦油损失。另外,颗粒床与静电除尘器或金属丝网相结合,可以强化除尘效率,因此,通过技术组合保证除尘工艺高效稳定运行,将成为未来热解气除尘技术研究的另一方向。

参考文献(References):

- [1] 温亮,岑建孟,石振晶,等.气化床炉温对热电气焦油多联产技术的影响[J].动力工程学报,2009,29(8):789-793.
WEN Liang, CEN Jianmeng, SHI Zhenjing, et al. Effects of gasifier bed temperature on heat - power - gas - tar poly - generation technology [J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29 (8) : 789-793.
- [2] QU X, LIANG P, WANG Z F, et al. Pilot development of polygeneration process of circulating fluidized bed combustion combined with coal pyrolysis [J]. Chemical Engineering & Technology, 2011, 34(1):61-68.
- [3] 樊英杰,郑化安,张生军.粉煤热解含尘干馏气除尘技术研发及应用[J].煤化工,2014(5):1-5.
FAN Yingjie, ZHENG Hua'an, ZHANG Shengjun. Technical research of dedusting the dusty retorting gas in the process of low-temperature pyrolysis of pulverized coal and its application [J]. Coal Chemical Industry, 2014(5):1-5.
- [4] 任文君,刘志华,周洪义,等.粉状煤炭热解技术工业化现状与瓶颈[J].煤炭加工与综合利用,2020(4):48-52.
REN Wenjun, LIU Zhihua, ZHOU Hongyi, et al. Industrialization status and bottleneck of pulverized coal pyrolysis technology [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2020(4):48-52.
- [5] 刘巧霞,张月明,黄勇,等.煤热解技术概述及问题分析[J].山西化工,2015,35(4):40-44.
LIU Qiaoxia, ZHANG Yueming, HUANG Yong, et al. The overview of coal pyrolysis technology [J]. Shanxi Chemical Industry, 2015, 35(4):40-44.
- [6] 周琦.热解气二次反应油尘分离过程分析及工艺调控方法[J].煤质技术,2021,36(1):69-74.
ZHOU Qi. Analysis and control of secondary reactions of pyrolysis gas containing dust and oil vapor [J]. Coal Quality Technology, 2021, 36(1):69-74.
- [7] 刘春雷,甘晓雁.低温热解工艺热解气含尘问题研究[J].煤炭加工与综合利用,2016(6):51-53.
LIU Chunlei, GAN Xiaoyan. Study for dust inclusion of thermal decomposition gas under low temperature thermal decomposition [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2016(6):51-53.
- [8] SEVILLE J P K. Gas cleaning in demanding applications [M]. New York:Blackie Academic & Professional, 1997:201.
- [9] PATRICK J Woolcock, ROBERT C Brown. A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas [J]. Biomass and Bioenergy, 2013, 52:54-84.
- [10] 柳佳佳.热解煤气高温放电特性及静电除尘实验研究[D].杭州:浙江大学,2018:30-57.
LIU Jiajia. Experimental study on the characteristics of discharge and electrostatic precipitation for high temperature pyrolysis gas [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018:30-57.
- [11] CHEN Quanlin, FANG Mengxiang, CEN Jianmeng et al. Electrostatic precipitation under coal pyrolysis gas at high temperatures [J]. Powder Technology, 2020, 362:1-10.
- [12] 方梦祥,柳佳佳,岑建孟,等.高温静电除尘技术研究进展及应用前景[J].高电压技术,2019,45(4):1108-1117.
FANG Mengxiang, LIU Jiajia, CEN Jianmeng, et al. Research progress and application prospect of high temperature electrostatic precipitation technology [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45 (4) : 1108-1117.
- [13] 何毓忠,胡露钧,何海涛.煤的多联产项目中高温电除尘器的试验研究[J].山西焦煤科技,2013(8):8-10.
HE Yuzhong, HU Lujun, HE Haitao. Experimental study on high temperature electrostatic precipitator in coal poly - generation project [J]. Shanxi Coking Coal Science & Technology, 2013 (8) : 8-10.
- [14] 敬旭业,王坤,董鹏飞,等.240 t/d 固体热载体粉煤热解工艺及中试研究[J].洁净煤技术,2018,24(1):50-56.
JING Xuye, WANG Kun, DONG Pengfei, et al. Pilot plant study on 240 t/d pulverized coal pyrolysis technology with solid heat carrier [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(1):50-56.
- [15] 刘洁,王云英,况春江,等.金属微孔材料及其在高温煤气除尘中的应用研究[J].环境污染治理技术与设备,2003,4(7):32-36.
LIU Jie, WANG Yunying, KUANG Chunjiang, et al. Metal micro-porous material and its use in high-temperature coal gas cleaning [J]. Techniques Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2003, 4(7):32-36.
- [16] HIMANSHU Singh, PRATEEK Saxena, YOGESH Madan Puri. Materials selection and manufacturing of metal membranes for industrial applications [J]. Materials Letters, 2020, 269:127557.
- [17] STEFFEN Heidenreich. Hot gas filtration: A review [J]. Fuel, 2013, 104:83-94.
- [18] 张婉婧,魏小林,李腾,等.工业炉窑高温含尘烟气金属丝网除尘技术研究[J].洁净煤技术,2020,26(5):90-96.
ZHANG Wanjing, WEI Xiaolin, LI Teng, et al. Research on metal wire work filter dust removal technology for high temperature dusty flue gas of industrial furnace [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(5):90-96.
- [19] 梁鹏,王志锋,董众兵,等.炉前煤低温干馏工艺中的挥发分除尘[J].燃料化学学报,2006,34(1):25-29.
LIANG Peng, WANG Zhifeng, DONG Zhongbing, et al. Hot dust removal in the process of low temperature coal pyrolysis [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2006, 34(1):25-29.
- [20] 陈静升,张志刚,樊英杰,等.一种中低温干馏煤气催化裂解和

- 除尘一体化;CN201310214426.2[P].2013-05-31.
- [21] 白效言,裴贤丰,张颢,等.小粒径低阶煤热解油尘分离问题分析[J].煤质技术,2015(6):1-4.
BAI Xiaoyan, PEI Xianfeng, ZHANG Biao, et al. Analysis on separation of tar and dust during pyrolysis of small-sized low rank coal [J]. Coal Quality Technology, 2015(6):1-4.
- [22] 张颢.新型低阶煤移动床热解装备中试试验研究[J].洁净煤技术,2018,24(2):51-55.
ZHANG Yang. Pilot test study on new moving bed equipment for low rank coal pyrolysis [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(2):51-55.
- [23] 张兵.固定床颗粒层的除尘性能与实验研究[D].沈阳:东北大学,2013:1-13.
ZHANG Bing. Experimental studies and dust removal features of a fixed bed granular filter [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013:1-13.
- [24] 颜深,孙国刚,孙占朋,等.颗粒床过滤除尘技术研究进展[J].化工进展,2017,36(9):3152-3163.
YAN Shen, SUN Guogang, SUN Zhanpeng, et al. Advances in research on granular bed filter for dust removal [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(9):3152-3163.
- [25] TIAN Surui, YANG Guohua, LI Zhen, et al. Cascade filtration properties of a dual-layer granular bed filter [J]. Powder Technology, 2016, 301:545-556.
- [26] 杜鑫,黄茂丽,齐彬彬,等.粉煤热解含尘干馏气两级净化实验研究[J].煤炭学报,2018,43(10):2911-2917.
DU Xin, HUANG Maoli, QI Binbin, et al. Experimental study on the two-stage purification of retorting gas in the process of pulverized coal pyrolysis [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(10):2911-2917.
- [27] 李初福,门卓武,刘书贤,等.热解气除尘装置:CN201420706624.0[P].2014-11-21.
- [28] 赵建涛,吴勃,王淳,等.低温干流煤气的颗粒床除尘设备及除尘方法:CN201210299374.9[P].2012-08-22.
- [29] HSIAU S S, SMID J, WANG C Y, et al. Velocity profiles of granules in moving bed filters [J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54(3):293-301.
- [30] ROBERT C Brown, HUAWEI Shi, GERALD Colver, et al. Similitude study of a moving bed granular filter [J]. Powder Technology, 2003, 138(2/3):201-210.
- [31] CHEN Yishun, HSIAU Shu San, LEE Hsuan Yi, et al. Filtration of dust particulates using a new filter system with louvers and sub-louvers [J]. Fuel, 2012, 99:118-128.
- [32] CHEN Yishun, HSIAU Shu San, SMID Jiri, et al. Removal of dust particles from fuel gas using a moving granular bed filter [J]. Fuel, 2016, 186:174-187.
- [33] HSIAU S S, SMID J, TSAI F H, et al. Placement of flow-corrective elements in a moving granular bed with louvered-walls [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2004, 43(8):1037-1045.
- [34] CHOU C S, YANG T L, CHANG J C. Flow patterns and wall stresses in a moving granular filter bed with an asymmetric louvered-wall and obstacles [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2006, 45(2):79-89.
- [35] 曲旋,张荣,毕继诚,等.CFB燃烧/煤热解多联供技术的中试初探[J].化工进展,2008,27(S1):386-390.
QU Xuan, ZHANG Rong, BI Jicheng, et al. Technology development of circulating fluidized bed combustion combined with coal pyrolysis [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2008, 27(S1):386-390.
- [36] 宋文立,姚建中,郝丽芳,等.一种颗粒除尘过滤器及除尘过滤方法:CN201210180811.5[P].2012-06-04.
- [37] 孙国刚,詹敏述,颜深,等.煤、油页岩热解气颗粒床高温过滤研究初步[C]//2015中国(北京)国际过滤技术高峰论坛会议论文集.北京:北京天泽天和流体工程技术有限公司,2015:213-242.
- [38] 张健,赵创,王兴云,等.颗粒床除尘技术在高温煤气除尘中的工程示范研究[J].化肥设计,2018,56(4):5-8.
ZHANG Jian, ZHAO Chuang, WANG Xingyun, et al. Engineering demonstration studies of granular bed dust collecting technology in high temperature coal gas dust removal [J]. Chemical Fertilizer Design, 2018, 56(4):5-8.
- [39] 宋东升,林发现,宋自力,等.荒煤气除尘装置:CN201721136403.4[P].2017-08-30.
- [40] 樊永臻.颗粒层过滤及其在粉煤热解荒煤气除尘中的应用[D].大连:大连理工大学,2017:34-49.
FAN Yongzhen. Study on granular bed filter and its application in dedusting of pulverized coal's raw pyrolyzed gas [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017:34-49.