

热解半焦的清洁高效利用现状及研究进展

Current status and progress of the clean and efficient utilization of pyrolysis semi-coke

郑少伟, 王志强*, 王鹏, 程星星, 许焕焕

ZHENG Shaowei, WANG Zhiqiang*, WANG Peng, CHENG Xingxing, XU Huanhuan

(山东大学 能源与动力工程学院, 燃煤污染物减排国家工程实验室, 环境热工技术教育部工程研究中心,
山东省能源碳减排技术与资源化利用重点实验室, 济南 250061)

(National Engineering Laboratory for Reducing Emissions from Coal Combustion, Engineering Research Center of Environmental Thermal Technology, Ministry of Education, Shandong Key Laboratory of Energy Carbon Reduction and Resource Utilization, School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

摘要: 煤炭梯级利用是煤炭高效清洁利用的重要途径之一。低阶煤经过热解后所产生的固体副产品半焦约占原煤质量的50%~70%, 蕴含了原煤80%左右的能量。实现半焦的清洁高效利用是煤炭梯级利用的关键一步。综述了目前半焦在我国工业化领域中的利用情况及存在的问题, 分析了半焦作为清洁燃料大规模燃烧对实现低阶煤梯级利用的必要性, 对半焦清洁高效燃烧的技术研究进展进行了总结, 为今后该领域的研究提供参考。

关键词: 热解半焦; 利用途径; 清洁高效; 混合燃烧; 清洁燃料

中图分类号: TQ 536

文献标志码: A

文章编号: 1674-1951(2020)07-0042-08

Abstract: Cascade utilization is one of the important methods for coal's efficient and clean utilization. Semi-coke, a by-product made from low-rank coal in pyrolysis, accounts for about 50% to 70% mass of raw coal and contains about 80% of the energy in raw coal. Thus, the clean and efficient utilization of semi-coke is a key to the cascade utilization of coal. Summarizing the current problems of semi-coke applied in China's industries, the necessity to realize cascade utilization of low-rank coal by large-scale and clean combustion of semi-coke was analyzed, and the research progress on existed clean and efficient combustion technology of semi-coke was concluded. It provide a reference for future research in this field.

Keywords: pyrolyzed semi-coke; utilization methods; clean and efficient; co-combustion; clean fuel

0 引言

据《BP世界能源统计年鉴》(2019版)统计, 2018年全球发电量增长3.7%, 超历史平均水平, 全球煤炭消费量增长1.4%, 生产量增长4.3%, 增速均创近5年新高。尽管可再生能源的渗透率越来越高, 但随着用电需求的强力增长, 电力行业仍需大量的煤炭来满足供应。

煤炭是我国最丰富的化石能源, 特别是低阶煤。据报道我国低阶煤探明储量占全国总储量的一半以上^[1]。近年来随着用电需求的日益增长, 优质煤储量不断减少, 低阶煤以其资源丰富、价格低廉的优势在能源领域发挥着越来越重要的作用^[2]。目前, 工业锅炉直接燃烧是其利用的主要方式。然而, 直接燃烧不仅造成热量浪费, 而且会导致严重

的环境污染^[3]。煤炭梯级利用技术是低阶煤高效清洁利用的重要途径, 将低阶煤经热解后先转化为气、液、固3种形态的产品, 然后根据不同产品的性质经加工后再利用, 最终实现“分级转化、梯级利用、能化联合、集成联产”的新型利用方式^[4]。2017年国家能源局发布《煤炭深加工产业示范“十三五”规划》^[5], 明确提出将低阶煤热解提质列为“能源发展重大工程”。国家发改委、能源局《能源技术创新行动计划(2016—2030年)》指出重点研究低阶煤热解及热解产物的清洁高效利用技术。在国家政策和科技的支持下, 以煤热解为龙头的低阶煤梯级利用技术近几年得到了快速发展。

低阶煤经热解后所产生的固体副产品半焦约占原煤质量的50%~70%^[6], 所蕴含的能量占原煤80%左右^[7], 如何高效、清洁、大规模地利用副产品半焦已成为实现低阶煤梯级利用的关键一步。本文综述了目前半焦在我国工业化领域中的应用情况及存在的问题, 分析了半焦作为清洁燃料大规模

燃烧对实现低阶煤梯级利用的必要性,对国内外半焦清洁燃烧技术的研究进展进行了总结,为今后该领域的研究提供参考。

1 半焦的性质

半焦(又称兰炭)是无黏性或弱黏性的高挥发分低阶煤经中低温热解,析出煤气、煤焦油后得到的固体副产品^[8]。根据热解温度的不同,半焦被分成低温半焦(500~650 ℃)、中温半焦(650~800 ℃)和

高温半焦(>800 ℃)^[9]。按其形状和粒径的不同,被分为半焦混、半焦块和半焦末。由于热解过程中挥发分、水分、氮、硫等物质提前析出,使半焦具有低挥发分、低硫、低氮、高固定碳、高反应活性、较发达的孔隙结构等特点^[6,10]。文献[11-12]对半焦、烟煤、次烟煤、褐煤及无烟煤进行了工业分析及对比,结果见表1。由表1可见半焦的挥发分质量分数较低,约占烟煤的30%左右,占褐煤的22%左右,挥发分和固定碳质量分数与无烟煤相近。

表 1 不同燃料的工业分析
Tab. 1 Industrial analysis on different fuels

样品	工业分析/%				热值/ (MJ·kg ⁻¹)	w(S _{ar})/%
	w(M _{ar})	w(V _{ar})	w(A _{ar})	w(FC _{ar})		
半焦	2.13	8.73	11.96	77.18	27.41	0.33
烟煤	3.44	28.89	7.75	59.92	24.32	0.26
次烟煤	10.02	23.93	13.92	52.13	22.50	0.18
褐煤	10.53	38.84	9.13	41.50	19.31	0.93
无烟煤	2.22	6.16	11.26	82.58	21.90	0.40

文献[13]对不同粒径的半焦性质进行了研究,结果发现随着半焦粒径的减小,水分、挥发分的含量减少,而固定碳的含量增加。灰分含量不与粒径的减小呈线性变化,粒径范围在5~30 mm的中小块半焦的灰分含量最少。文献[14]对半焦的表面结构及吸附特性进行了研究,发现半焦表面呈现不规则的多孔结构,比表面积大,具有很好的吸附性能。

2 半焦的利用现状

由于半焦具有低挥发分、高固定碳、高反应活性、高电阻率、较发达的孔隙结构等特性^[15],可以将其单独或掺混后应用到很多领域。目前主要利用在冶金、化工、吸附等领域。

2.1 冶金领域

半焦在冶金领域主要用于高炉喷吹燃料和冶炼还原剂。作为高炉喷吹燃料时,选用与无烟煤特征相近的半焦来替代无烟煤,通过节煤降焦的方法降低炼铁企业的生产成本。文献[16]通过试验发现,在高炉喷吹中利用半焦代替无烟煤时,半焦挥发分的分解以及碳表面的亲氧基团有助于混煤燃烧。半焦质量分数在45%以内时,用半焦代替无烟煤对混煤燃烧率没有明显影响。文献[17]在太钢高炉开展了喷吹半焦的工业试验,并将其用到了正常生产中。结果表明,半焦自身理化性能和热态下的指标使其适合作为喷吹煤种使用,在生产中可以替代高价格的无烟煤。通过生产实践表明,利用半焦替代部分无烟煤喷吹,能有效降低生产燃料成

本,吨铁成本约降低3元。但由于半焦自身可磨性较低,对设备的磨损加剧,同时由于半焦煤粉粒度较粗,喷吹量不稳定,增加了一定的安全生产隐患。为了推广半焦作为高炉喷吹料的应用,在GB/T 25211—2010《兰炭产品技术条件》中对能用作高炉喷吹原料的兰炭提出了具体要求。当半焦作为冶炼还原剂时,可以替代传统硅铁生产过程中的碳质还原剂冶金焦,半焦相对冶金焦具有比电阻大、气孔率高、化学反应活性好等特点,在进行电炉冶炼时比冶金焦具有更好的理化性能^[18]。半焦也可以用于非高炉炼铁工艺中的直接还原法炼铁,可以摆脱炼铁行业对冶金焦的依赖,以避免炼铁、烧结过程中对环境的污染。

2.2 化工领域

半焦在化工领域主要用于电石生产原料和化肥造气原料。电石是一种重要的化工产品,主要用来生产乙炔^[19]。焦炭是电石生产的重要原料,而我国炼焦煤资源缺乏,焦炭产量受限^[20],将半焦适量掺入冶金焦生产电石可以增大炉内电阻,提高电石炉稳定性,同时可以增加电石产量并降低电耗。而且半焦价格低廉,可以降低成本,具有较好的经济性^[13]。文献[21]在23 MW电石炉上进行了掺混半焦试验,结果表明掺用部分半焦生产电石是可行的,过量掺混半焦会使电耗增加,出炉喷生料现象加重,电石产量降低。当掺混半焦的质量分数为30%~40%时各项生产指标达到最佳。目前半焦制电石已实现了工业化生产,半焦由于其良好的反应

活性,已经成为电石行业占主导地位的碳素原料。为了促进半焦制电石的推广应用,在GB/T 25211—2010《兰炭产品技术条件》中,对用作电石还原剂的半焦产品提出了明确要求。在化肥生产方面,大多数氮肥企业都是利用无烟煤来制气^[22]。随着无烟煤价格的不断提高,无烟煤的成本已占到尿素制造成本的57%,寻求新的造气原料是降低成本的重要途径^[23]。半焦因其性质与无烟煤相似,掺烧半焦对企业节能降耗,降低成本具有重要意义。由于半焦灰熔点温度低,热稳定性差,反应活性较高,无法延续常规的制气工艺条件和操作控制手段,如何稳定炉况,提高气化强度,保证合格的煤气组分,是实现长期稳定、连续、经济运行的关键所在。

2.3 吸附领域

半焦在吸附领域可以直接作为吸附剂用于废气和废水处理,成本低廉且工艺简单。同时通过对半焦适当的改性处理所制备的活性焦是一种具备吸附和催化双重性能的物质。活性焦的中孔发达,对吸附质有强烈的吸附能力,可以有效净化废气(SO₂, NO_x, 甲苯废气)、脱除汽油和柴油中的硫化

物,处理含油废水和焦化废水等^[24-26],是半焦高值化利用的一个新途径^[27-28]。利用活性焦对烟气脱硫时,活性焦的吸附特性和催化特性使烟气中二氧化硫与烟气中的水蒸气和氧气反应生成硫酸并吸附在活性焦的微孔表面^[29]。目前,活性半焦烟气脱硫技术已经投入到了工业实际应用中,SO₂去除率高达98%,细颗粒物的排放量低于20 mg/m³,并且处理过的烟气排放前不需要烟气换热系统,具有良好的应用前景^[30]。在脱硝方面,半焦本身就具有NO催化还原性能,同时还可作为载体用于选择性催化还原法(SCR)脱硝催化剂。在喷入氨气进行还原作用时,使烟气中的氮氧化物转化成氮气和水脱除。废水处理方面,由于半焦具有丰富的多孔结构,可直接作为吸附剂处理污水^[31]。同时可利用半焦制备高性能活性焦,吸附水中的微量污染物,对废水进行深度净化。文献[32]研究发现半焦制备的活性焦对煤气化和煤焦化废水中的有机物具有较好的吸附性,化学需氧量(COD)最高可达166 mg/g。

现将半焦主要利用途径及特点进行总结,见表2。

表2 半焦主要利用途径及特点
Tab. 2 Main utilization methods and their characteristics of semi-coke

主要利用领域及途经		特点	应用情况
冶金领域	高炉喷吹燃料	设备简单,经济性好,对设备磨损严重,有一定安全隐患	工业试验阶段,未能大规模广泛应用
	冶炼还原剂	提高产品质量,降耗增产,经济性好	应用成熟,目前市场已趋于饱和
化工领域	电石生产原料	经济性好,设备简单	技术日趋成熟,已实现工业生产
	化肥造气原料	降低造气成本,热损失减小,工艺成熟	实现了工业化应用
吸附领域	半焦基吸附剂	工艺简单,易操作,成本低廉,无污染	试验室研究、工业应用

3 半焦清洁燃烧技术

虽然半焦在冶金、化工、吸附等领域有着广泛的应用,但由于90%以上的半焦都用于生产铁合金、硅铁等高能耗材料,市场单一并受国家严格调控,对半焦的需求量很难扩大^[13]。因此,要实现半焦的大规模利用必须扩展其在工业锅炉、民用燃料等发面的应用。作为工业锅炉燃料,由于半焦自身挥发分较低,存在着火稳燃困难,燃尽率低等问题,利用现役的燃煤锅炉无法实现半焦的清洁高效燃烧。为了实现半焦在工业锅炉上的大规模应用,国内外研究人员对如何大规模清洁高效燃烧半焦进行了相关研究。主要分为2种技术路线,一种是针对半焦的单独燃烧,研究大规模纯燃半焦的技术;另一种是将半焦与其他煤种进行掺混燃烧,实现半焦在现役燃煤锅炉上的大规模掺烧^[33]。作为民用清洁燃料,近年来随着国家雾霾治理工作的逐步推

进,民用散煤污染物排放治理已成为雾霾治理的重要环节,由于半焦自身的燃烧特性与无烟煤相似,利用半焦代替民用散煤作为洁净燃料实现清洁燃烧引起很多学者的关注。

3.1 纯燃半焦技术

中国科学院工程热物理所研发团队针对半焦自身的燃烧特性,开发了半焦预热燃烧技术,通过预热燃烧器将半焦先预热到850~950℃再送入锅炉炉膛中燃烧。针对预热燃烧技术先后搭建了0.2 MW和2.0 MW预热燃烧试验平台。文献[7]利用0.2 MW预热燃烧台对半焦开展了预热燃烧和氮氧化物排放特性的研究,试验结果表明预热燃烧技术可以实现半焦的稳定、高效燃烧,燃烧效率最高可达98.8%,NO_x排放质量浓度为207 mg/m³。2017年,该研发团队在热功率为2 MW的预热燃烧试验台开展了神木半焦预热燃烧中试试验,试验结果显示半焦的燃烧效率可达到95%以上,同时NO_x原始

排放质量浓度低于 200 mg/m^3 (标态,下同)。2019年,该研发团队针对超低挥发分碳基燃料成功研发了 16 MW 内循环预热式燃烧器,经测试燃烧效率为 99.27% , NO_x 排放质量浓度为 110 mg/m^3 ;并将这种新型预热燃烧器应用于 35 t/h 煤粉工业锅炉进行了工程试验,试验结果显示锅炉氮氧化物原始排放质量浓度低于 200 mg/m^3 ,最低可到 116 mg/m^3 ,燃烧效率可达 99% 以上。实现了纯燃半焦的稳定、低氮、高效运行。

东南大学热能工程所在增压条件下对半焦的燃烧特性进行了研究。先后在增压热重分析仪、小型加压喷动流化床及 1 MW 增压流化床燃烧中试试验台上进行研究试验。文献[34–36]利用加压热重分析仪研究了压力对半焦燃烧特性的影响,试验结果表明半焦的着火温度和燃尽时间均随着压力的提高而降低。随着压力升高,最大失重率不断增加,在 0.7 MPa 以前,失重率增加量较多,半焦燃烧稳定性显著增强,压力继续增大,燃烧稳定性几乎不再发生变化。文献[37–38]利用小型加压喷动流化床及 1 MW 增压流化床燃烧中试试验台对半焦增压燃烧进行了系统研究,结果表明,在常压或低压下,半焦的燃烧过程主要受过量空气系数的影响,随着压力的进一步升高,炉膛温度增加,半焦的燃烧效率提高,当系统的压力到达 0.5 MPa 时,小型试验台和大型试验台中半焦的燃烧效率可达到 94.7% 和 99.2% ,此时压力是影响燃烧过程的主要因素。文献[39]研究了半焦加压燃烧条件下污染物排放及灰渣特性。结果表明,随着系统燃烧压力的升高,碳氧化物排放量增多, NO 和 SO_2 减少。半焦由异相燃烧向均相燃烧过渡,灰渣中高温矿物质减少。

富氧燃烧技术是一种高效节能燃烧技术,拥有火焰温度高, CO_2 , NO_x 排放低等优势^[40–41]。文献[42]利用热重分析仪及水平管式炉对半焦富氧燃烧特性进行了研究。结果表明,随着氧气体积分数的增加,半焦的着火温度、最大反应速率温度、燃尽温度、活化能、反应时间均降低。半焦的燃烧特性随氧气体积分数的提升不断变好,当氧气体积分数升高到 21% 以上时,能够改善半焦的燃烧特性,解决半焦难着火、反应速率低、易生成 CO 气体等问题,当氧气体积分数升高至 60% 时,燃烧特性指数等参数的变化曲线逐渐趋于平缓。文献[43]利用高温沉降炉研究了4种典型动力用煤(无烟煤、贫煤、烟煤和褐煤)制备成的半焦在不同温度($800\sim 1200^\circ\text{C}$)和氧气体积分数($21\%\sim 50\%$)下的燃烧特性,结果发现随着温度和氧气体积分数的提高,4种半焦的燃尽

率均有提高,并且随着煤阶的升高,燃尽率的升高幅度增加。

虽然以上技术均可实现半焦作为单独燃料进行燃烧发电,但增压循环流化床技术和富氧燃烧技术目前还处于基础试验研究阶段。半焦预热燃烧技术在 35 t/h 煤粉工业锅炉完成了工程示范,具有很大的优势和潜力,为实现工业锅炉纯燃半焦奠定了基础。

3.2 半焦掺混燃烧技术

半焦掺混燃烧技术是指先将半焦与原煤进行掺混,所得到的混合燃料再投入到现役锅炉中进行燃烧发电,实现大比例掺烧、稳燃、燃尽、低排放的高效清洁燃烧技术。目前针对半焦的掺混燃烧技术,研究人员主要关注混合燃料的着火特性、稳燃特性、燃尽率及 NO_x 排放等问题。文献[12]在 350 kW 热态试验炉上对不同挥发分含量的煤种与神木热解半焦掺混燃烧(半焦掺混比例即质量分数为 50%)时不同煤质对混合燃料着火特性及 NO_x 排放的影响进行了研究。结果表明,随着混合燃料挥发分含量增加,混煤着火距离减小,着火点温度下降,主燃区 NO_x 排放量减少。总体来看,大比例掺混热解半焦时混煤的挥发分不应低于 16% 。文献[14]利用热重分析仪对半焦与烟煤的混合燃烧特性进行了研究,研究结果表明半焦与烟煤掺混燃烧过程中存在一定的交互作用,烟煤提前着火燃烧释放热量,对半焦进行加热,促进半焦的着火燃烧,同时烟煤在提前着火燃烧时与半焦争夺氧气,又影响半焦的着火燃烧。但总体上来看,将烟煤与半焦掺混燃烧可以降低半焦的着火点,增加燃烧区的燃烧温度,有利于混合燃料的燃烧。文献[44]采用热重分析仪和一维沉降炉对半焦和烟煤掺混燃烧特性及 NO_x 生成特性进行了研究,并与无烟煤和烟煤掺混燃烧进行了试验比较。研究结果表明,随着烟煤掺混比例的增加,混煤的着火温度和燃尽温度降低,半焦与烟煤之间存在着明显的相互作用。与无烟煤相比,半焦具有较好的燃烧性能和较低的 NO 转化率。文献[45]利用高温热天平、 3 MW 煤粉燃烧中试试验台系统研究了大比例掺混半焦情况下混煤的着火、燃尽及 NO_x 排放特性。初步确定了适合大容量电站锅炉的半焦最佳掺混比例(质量分数)为 40% 左右。文献[46]在 110 MW 电站锅炉上进行了掺烧半焦试验,实现了掺混 33% (质量分数)半焦时的安全稳定运行。文献[47]在 300 MW 煤粉锅炉上开展了大比例掺烧半焦的试验,利用炉内分层掺混的方式实现了在 300 MW 负荷下掺混 50% (质量分数)半焦的锅炉的稳定安全运行。按照 350

MW 掺烧 45% (质量分数) 半焦, 电站煤粉锅炉每年可消耗半焦 27.7 万 t 计算, 投入工业应用后预计每年可消耗千万吨热解半焦, 可节约燃料成本约 30 亿元, 同时有效减少 NO_x 和 SO_2 原始排放, 经济和生态效益显著。

3.3 半焦制备民用燃料

近年来, 随着我国雾霾治理工作的不断推进, 电厂工业锅炉已完成了超低污染物排放改造, 达到了清洁排放的要求。而民用散烧煤多为无组织排放, 对环境污染严重, 每年秋冬成为雾霾频发的重要原因之一, 寻找一种清洁燃料来替代民用燃煤成为雾霾治理的关键。半焦由于其自身燃烧特性与无烟煤接近, 近年来利用半焦替代民用散煤燃烧得到了很多学者的关注。文献[15]在民用取暖炉上分别对半焦和无烟煤的点火时间、燃尽率等进行研究, 结果表明半焦的燃烧效率高于无烟煤, 且产生的灰渣和有害气体污染物少。文献[48]对半焦型焦应用于民用燃料的燃烧性能进行研究, 并与原煤进行对比, 结果表明半焦型焦的有效利用率远远高于无烟煤, 燃烧过程中排放的颗粒污染物远低于榆林烟煤, 略低于无烟煤。文献[11]选取了不同区域具有代表性的半焦、烟煤和无烟煤为研究对象, 对比了不同煤种污染物排放特性。结果显示半焦的颗粒污染物、 NO_x 及 SO_2 的排放量都低于烟煤和无烟煤。2016 年 10 月, 国家环保部在《民用煤燃烧污染综合治理技术指南(试行)》中指出, 对于煤炭资源丰富、经济条件较好且污染严重的地区应优先选用低硫、低挥发分的优质半焦作为民用燃料。近些年, 我国各地政府多采用财政补贴的方式, 推进洁净型煤替代工作。目前采暖季洁净型煤销售价格约为 1 250 元/t, 补贴后的售价约为 750 元/t。在当前财政补贴标准下, 半焦型焦的生产厂家能具有良好的经济效益。

4 结束语

(1) 半焦具有低挥发分、低硫、低氮、高固定碳、高反应活性、较发达的孔隙结构等特点, 目前在冶金、化工、吸附等领域都有利用。由于 90% 以上的半焦用于生产铁合金、硅铁等高能耗材料, 市场单一并受国家严格调控, 需求量很难扩大。因此, 实现煤炭梯级利用必须扩展其在工业锅炉及民用燃料等行业的清洁高效燃烧利用。

(2) 针对半焦清洁高效燃烧技术, 目前有 2 种研究路线, 第 1 种是纯燃半焦技术, 包括预热燃烧技术、增压循环流化床技术、富氧燃烧技术。其中预热燃烧技术已在 35 t/h 工业锅炉上完成了工程示

范, 为半焦大规模纯燃产业化应用奠定了基础。第 2 种是在现役燃煤锅炉上将半焦与原煤大规模掺烧, 目前已在 300 MW 电站煤粉锅炉上实现了掺烧 50% (质量分数) 半焦时的安全稳定运行。验证了电站锅炉大比例掺烧半焦的可行性。

(3) 为实现半焦的高效利用, 未来应继续稳定优化传统市场(铁合金、硅铁、电石等), 开拓半焦大规模利用的潜力市场, 推进其作为工业及民用洁净燃料的应用, 逐步实现大规模工业化利用。同时要培育新兴市场, 拓展半焦在吸附剂、催化剂载体、精细化工产品方面的应用。制定相关产业政策和行业标准, 对不同品质半焦实现精准、高效、安全利用。

参考文献:

- [1] YAO Y, ZHU J G, LU Q G. Experimental study on nitrogen transformation in combustion of pulverized semi-coke preheated in a circulating fluidized bed[J]. Energy & Fuels, 2015, 29(6): 3985-3991.
- [2] SONG H J, LIU G R, ZHANG J Z, et al. Pyrolysis characteristics and kinetics of low rank coals by TG-FTIR method [J]. Fuel Processing Technology, 2016, 156: 454-460.
- [3] KATALAMBULA H, GUPTA R. Low-grade coals: A review of some prospective upgrading technologies [J]. Energy & Fuels, 2009, 23(7): 3392-3405.
- [4] 潘生杰, 陈建玉, 范飞, 等. 低阶煤分质利用转化路线的现状分析及展望[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(5): 7-12.
PAN Shengjie, CHEN Jianyu, FAN Fei, et al. Present situation analysis and prospect of low rank coal quality-based utilization conversion route [J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(5): 7-12.
- [5] 李好管. “十三五”规划关于中国能源、煤炭工业、煤炭深加工产业发展的政策导向(下)[J]. 煤化工, 2017, 45(5): 1-7, 17.
LI Haoguan. Policy orientation about development of China's energy, coal industry and deep coal processing industry in the thirteenth five-year plan [J]. Coal Chemical Industry, 2017, 45(5): 1-7, 17.
- [6] 张颢. 低阶粉煤热解半焦规模化利用技术研究进展[J]. 煤质技术, 2018(4): 1-5, 9.
ZHANG Yang. Research progress of semi-coke large-scale utilization technology of low rank pulverized coal pyrolysis [J]. Coal Quality Technology, 2018(4): 1-5, 9.
- [7] 朱建国, 贺坤, 欧阳子区, 等. 0.2 MW 细粉半焦预热燃烧试验研究[J]. 电站系统工程, 2015, 31(5): 9-12.
ZHU Jianguo, HE Kun, OUYANG Ziqu, et al. 0.2 MW experimental study on preheated combustion of pulverized

- semi-coke [J]. Power System Engineering, 2015, 31 (5): 9-12.
- [8]贾建军. 神木兰炭产业发展简析[J]. 煤炭加工与综合利用, 2018(4): 7-8.
- JIA Jianjun. A brief analysis on the development of semi-coke industry in Shenmu county [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2018(4): 7-8.
- [9]马宝岐, 罗雄威. 我国半焦产业发展趋势及建议[J]. 煤炭加工与综合利用, 2014(4): 22-26.
- MA Baoqi, LUO Xiongwei. The developing trend of China's semi-coke industry [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2014(4): 22-26.
- [10]刘靖, 何选明, 李翠华, 等. 兰炭特性及应用研究进展[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(4): 7-12.
- LIU Jing, HE Xuanming, LI Cuihua, et al. Research on the characteristic and application of semi-coke [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(4): 7-12.
- [11]侯吉礼, 尚文智, 刘军利, 等. 兰炭(半焦)替代原煤清洁燃烧的排放对比研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(8): 287-289.
- HOU Jili, SHANG Wenzhi, LIU Junli, et al. Comparison of emission from Lantan (semi-coke) instead of raw coal for clean and efficient combustion [J]. Coal Technology, 2016, 35(8): 287-289.
- [12]陈登科, 闫永宏, 彭政康, 等. 不同挥发分含量煤种与热解半焦混燃热态试验研究[J/OL]. 洁净煤技术: 1-12 [2020-06-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20200414.1353.002.html>.
- CHEN Dengke, YAN Yonghong, PENG Zhenggang, et al. Thermal experimental study on co-combustion of pyrolysis semi-char and coal with different volatile content [J/OL]. Clean Coal Technology: 1-12 [2020-06-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20200414.1353.002.html>.
- [13]王越, 张子良. 半焦基本性质及其利用途径分析[J]. 煤质技术, 2018(2): 1-5.
- WANG Yue, ZHANG Ziliang. Analysis on semi-coke basic properties and utilization path [J]. Coal Quality Technology, 2018(2): 1-5.
- [14]赵世永. 神木煤与半焦混合燃烧特性的热重分析[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(7): 80-82.
- ZHAO Shiyong. Thermal gravity analysis on combined combustion features of Shenmu coal and semi coke [J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(7): 80-82.
- [15]张鑫. 兰炭替代无烟煤高效清洁利用的研究[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(3): 103-106.
- ZHANG Xin. Feasibility on semicoke substitute for anthracite in energy conservation and emissions reduction [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(3): 103-106.
- [16]彭致富, 张建良, 毕传光, 等. 焦粉与兰炭对高炉混煤燃烧特性的影响[J]. 钢铁, 2019, 54(12): 10-18.
- PENG Zhengfu, ZHANG Jianliang, BI Chuanguang, et al. Effect of coke powder and semi-coke on combustion characteristics of blast furnace blended coal [J]. Iron & Steel, 2019, 54(12): 10-18.
- [17]巩黎伟. 太钢高炉喷吹兰炭煤生产实践[J]. 炼铁, 2018, 37(5): 16-19.
- GONG Liwei. Semi-cook coal injection practice in Taiyuan steel's BF [J]. Ironmaking, 2018, 37(5): 16-19.
- [18]SMIRNOVA A A. On the capability of birds for symbolization [J]. Biology Bulletin, 2011, 38(9): 878-884.
- [19]杨胜高. 降低电石成本的方法初探[J]. 低碳世界, 2014(8): 316-317.
- [20]赵红涛, 武建军. 浅析电石用碳素原料[J]. 聚氯乙烯, 2011, 39(7): 3-4, 39.
- ZHAO Hongtao, WU Jianjun. Analysis on carbon materials for production calcium carbide [J]. Polyvinyl Chloride, 2011, 39(7): 3-4, 39.
- [21]林金元. 兰炭在电石生产中的应用[J]. 化工技术经济, 2004, 22(12): 23-25.
- LIN Jinyuan. Application of semi-coke in calcium carbide production [J]. Chemical Techno - Economics, 2004, 22(12): 23-25.
- [22]刘学彦. 造气工段掺烧兰炭技术总结[J]. 氮肥技术, 2014, 35(2): 41-43, 49.
- LIU Xueyan. Technical summary of blending combustion semi coke in producing gas [J]. Nitrogenous Fertilizer Technology, 2014, 35(2): 41-43, 49.
- [23]辛收良. 兰炭掺烧技术的研究与应用[J]. 化肥设计, 2013, 51(1): 53-55.
- XIN Shouliang. Research and application for combustion technology mixing with blue carbon [J]. Chemical Fertilizer Design, 2013, 51(1): 53-55.
- [24]DIAS J M, ALVIM-FERRAZ M C M, ALMEIDA M F, et al. Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: A review [J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85(4): 833-846.
- [25]AHMADPOUR A, DO D D. The preparation of active carbons from coal by chemical and physical activation [J]. Carbon, 1996, 34(4): 471-479.
- [26]GAO L, DONG F Q, DAI Q W, et al. Coal tar residues based activated carbon: Preparation and characterization [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2016, 63: 166-169.
- [27]苗文华, 吴鹏, 滕济林. 低阶煤制备活性焦及其吸附性能研究[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(6): 32-35, 41.
- MIAO Wenhua, WU Peng, TENG Jilin. Preparation and adsorption of activated coke made from low rank coal [J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(6): 32-35, 41.
- [28]李兰廷, 解炜, 梁大明, 等. 活性焦脱硫脱硝的机理研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(8): 79-83.

- LI Lanting, XIE Wei, LIANG Daming, et al. Mechanism of removal of SO_2 and NO on activated coke [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(8): 79-83.
- [29] 赵玉良, 葛延, 马玄恒, 等. 小颗粒煤半焦的应用分析及展望[J]. 煤炭加工与综合利用, 2017(6): 7-12, 95.
- ZHAO Yuliang, GE Yan, MA Xuanheng, et al. Application analysis and prospect of small coal semi-coke [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2017 (6): 7-12, 95.
- [30] 杨婷, 白世刚, 王振平, 等. 成型活性半焦的制备工艺与应用进展[J]. 化工进展, 2020, 39(S1): 180-185.
- YANG Ting, BAI Shigang, WANG Zhenping, et al. Research progress in preparation and application of activated semi-coke monolith [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(S1): 180-185.
- [31] LI Y X, CHENG J Y, SUN Y H. Adsorption of multicomponent volatile organic compounds on semi-coke [J]. Carbon, 2008, 46(6): 858-863.
- [32] 吴鹏, 滕济林, 张旭辉. 兰炭活性焦的制备及应用性能研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(11): 333-335.
- WU Peng, TENG Jilin, ZHANG Xuhui. Preparation and application properties research on activated coke based on semi-coke [J]. Coal Technology, 2017, 36(11): 333-335.
- [33] 张锦萍, 王长安, 贾晓威, 等. 半焦-烟煤混燃特性及动力学分析[J]. 化工学报, 2018, 69(8): 3611-3618.
- ZHANG Jinping, WANG Changan, JIA Xiaowei, et al. Co-combustion characteristics and kinetic analysis of semi-coke and bituminous coal [J]. CIESC Journal, 2018, 69(8): 3611-3618.
- [34] 熊源泉, 郑守忠, 章名耀. 加压条件下半焦燃烧特性的试验研究[J]. 锅炉技术, 2001, 32(11): 12-14, 25.
- XIONG Yuanquan, ZHENG Shouzhong, ZHANG Mingyao. Experimental research on municipal waste combustion and development of combustion equipment [J]. Boiler Technology, 2001, 32(11): 12-14, 25.
- [35] 陈晓平, 谷小兵, 段钰锋, 等. 气化半焦加压着火特性及燃烧稳定性研究[J]. 热能动力工程, 2005, 20(2): 153-157, 215-216.
- CHEN Xiaoping, GU Xiaobing, DUAN Yufeng, et al. A study of the ignition characteristics and combustion stability of gasified semi-char under an elevated pressure [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(2): 153-157, 215-216.
- [36] 陈晓平, 谷小兵, 段钰锋, 等. 半焦加压燃烧特性研究[J]. 工程热物理论, 2004, 25(2): 345-347.
- CHEN Xiaoping, GU Xiaobing, DUAN Yufeng, et al. Investigation on the combustion characteristics of semi-coke at elevated pressure [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(2): 345-347.
- [37] 段钰锋, 周毅. 半焦加压燃烧特性的试验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2006, 12(4): 353-357.
- DUAN Yufeng, ZHOU Yi. Experimental study on combustion characteristics of coal - chars at elevated pressures [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2006, 12(4): 353-357.
- [38] 熊源泉, 郑守忠, 金保升, 等. 煤气化半焦增压流化床燃烧特性中试试验研究[J]. 热能动力工程, 2007, 22(2): 154-157, 225.
- XIONG Yuanquan, ZHENG Shouzhong, JIN Baosheng, et al. An experimental study of the combustion characteristics of coal gasification semi-coke in a pilot-scale pressurized fluidized bed [J]. Thermal Power Engineering, 2007, 22(2): 154-157, 225.
- [39] 殷俊平, 钟文琪, 周冠文, 等. 半焦加压燃烧的污染物排放及灰渣特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(2): 232-239.
- YIN Junping, ZHONG Wenqi, ZHOU Guanwen, et al. Characteristics on pollutant emission and ashin using semi-coke pressurized combustion [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(2): 232-239.
- [40] 陶子宸, 王长安, 王鹏乾, 等. 半焦富氧燃烧扩散效应研究[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(9): 155-161.
- TAO Zichen, WANG Changan, WANG Pengqian, et al. Study of diffusional effect in oxy-fuel combustion of semi-coke [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(9): 155-161.
- [41] 徐文, 肖彬. 富氧燃烧对烟气酸露点的影响[J]. 工业炉, 2017, 39(6): 57-59.
- XU Wen, XIAO Bin. Effect of oxygen enriched combustion on acid dew-point of flue gas [J]. Industrial Furnace, 2017, 39(6): 57-59.
- [42] 钱彬. 煤粉高温裂解以及半焦的富氧燃烧基础试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [43] 王悦新. 富氧条件下典型煤焦燃烧特性及燃烧动力学的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [44] ZHANG J P, JIA X W, WANG C A, et al. Experimental investigation on combustion and NO formation characteristics of semi-coke and bituminous coal blends [J]. Fuel, 2019, 247: 87-96.
- [45] 韩志江, 陈楠, 张建文, 等. 半焦大比例掺烧特性研究及锅炉性能数值仿真预测[J]. 锅炉技术, 2019, 50(2): 43-48.
- HAN Zhiqiang, CHEN Nan, ZHANG Jianwen, et al. Study on characteristics of large-ratio blending semi-coke and boiler performance prediction with numerical simulation [J]. Boiler Technology, 2019, 50(2): 43-48.
- [46] 杨忠灿, 王志超, 李炎, 等. 电站煤粉锅炉掺烧兰炭试验研究[J]. 锅炉技术, 2017, 48(3): 31-36.
- YANG Zhongcan, WANG Zhichao, LI Yan, et al.

- Experimental research on pulverized coal power station blending with semi-coke [J]. Boiler Technology, 2017, 48 (3): 31-36.
- [47] 杨剑锋, 杜进, 黄璞, 等. 300 MW 电站煤粉锅炉大比例掺烧半焦的试验研究 [J/OL]. 热力发电, 2020 (7): 69-76 [2020-06-03]. <https://doi.org/10.19666/j.rld.201911270>.
- YANG Jianfeng, DU Jin, HUANG Pu, et al. Experimental research on large proportion co-firing of semi-coke in a 300 MW pulverized coal boiler [J/OL]. Thermal Power Generation, 2020 (7): 69-76 [2020-06-03]. <https://doi.org/10.19666/j.rld.201911270>.

- [48] 苗文华, 林红, 张旭辉. 兰炭型焦用于民用燃料的研究

[J]. 煤炭加工与综合利用, 2016 (6): 65-68.

MIAO Wenhua, LIN Hong, ZHANG Xuhui. Research on the use of semi coke for civil fuel [J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2016, 65-68.

(本文责编: 张帆)

作者简介:

郑少伟 (1994—), 男, 陕西宝鸡人, 在读硕士研究生, 从事煤炭清洁燃烧方向的研究 (E-mail: 1461971712@qq.com)。

王志强* (1978—), 男, 山东济南人, 副教授, 博士, 从事煤炭清洁燃烧方向的研究 (E-mail: jacky wzq@sdu.edu.cn)。

“边缘计算在能源互联网中的应用”专刊征稿启事

2020年, 国家正式组织实施新型基础设施建设工程, 重点发展新兴产业。能源互联网作为未来可能接入设备最多的物联网生态圈, 产业发展空间巨大。在能源领域, 新型电气信息技术的发展对能源互联网的发展起到了重要的支撑作用, 同时也带来了诸如安全性、网络负载及异构设备融合等问题, 边缘计算具有靠近数据源、实时性好、低时延、响应快等特征, 可以在一定程度上缓解这些问题。《华电技术》作为行业科技创新、技术交流平台, 特推出“边缘计算在能源互联网中的应用研究专刊”, 并邀请华北电力大学李彬教授担任特约主编, 欢迎业内同仁踊跃投稿。

一、征文范围(包括但不限于)

拟围绕边缘计算在能源领域的国内外发展现状与趋势综述、边缘计算在能源互联网中的应用场景、典型应用案例分析、产品化及实践案例、边缘计算+能源互联网架构模型、新技术融合等内容, 主要征集以下方向论文:

- (1) 边缘计算在能源互联网中的技术发展前景和趋势分析;
- (2) 边缘计算相关标准化工作;
- (3) 边缘计算在能源领域 5G 网络中的应用;
- (4) 边缘计算与能源区块链、人工智能等交叉领域研究;
- (5) 边缘计算在能源互联网中的智能数据分析服务;
- (6) 边缘计算在能源互联网中的信息安全问题;
- (7) 边缘计算在能源互联网中所衍生的商业模式;
- (8) 区域边缘计算中心建设及部署方案;
- (9) 能源互联网中边缘计算与云计算的协同优化技术及相关架构;
- (10) 边缘计算的落地应用场景以及解决方案和产品;
- (11) 能源互联网中的边缘计算的项目实践案例;
- (12) 基于边缘计算的能源行业中的业务应用, 如: 智能巡检、安防监控、智能配用电、电动汽车车联网、光伏云网等;
- (13) 其他相关研究。

二、时间进度

专刊拟于 2020 年 8 月 31 日截稿, 2020 年 10 期 (10 月 25 日) 后择期出版。

三、征文要求

- (1) 专刊只收录未公开发表的论文, 拒绝一稿多投。作者对论文内容真实性和客观性负责。
- (2) 按照《华电技术》论文格式要求使用 Word 软件排版, 请登录《华电技术》在线采编系统 (<http://www.hdpower.net>) 下载论文模板。
- (3) 请保留论文中图片、曲线和表格的原始格式文件, 并在投稿时按规定提交。
- (4) 论文作者应遵守相关学术不端规定。

四、投稿方式

- (1) 在线投稿 (推荐): 登录《华电技术》在线采编系统 (<http://www.hdpower.net>), 完成在线全文投稿。
- (2) 邮箱投稿: direfish@163.com (李教授); hdjs-chd@vip.163.com (编辑部)
- (3) 咨询联系: 刘 芳 0371-58501060 13838002988; 杨满成 010-63918755 13801175292