

燃煤污染物控制理论与技术

中国民用煤洁净化利用现状及展望

武建军¹, 郭凡辉¹, 孙少杰¹, 董继祥¹, 江尧¹, 张一昕²

(1. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 国家煤加工与洁净化工程技术研究中心, 江苏 徐州 221116)

摘要:概括论述了我国民用煤的来源和现状, 分析了民用煤不同煤种和形态的特点, 讨论了不同燃烧方式的原理及污染排放情况; 根据研究现状重点分析了关于民用煤的洁净化利用方法, 针对民用煤的燃前加工、燃烧技术和燃后处理三方面论述, 做到从源头治理, 提高过程效率, 有效处理烟气污染, 提出了我国民用煤洁净化利用的建议和思路: 研究型煤固硫机理和影响因素, 开发高固硫率型煤, 研制成本低、机械性能好、适用性强的生物质型煤, 推广型煤替代散煤; 开发高效、洁净、低成本民用灶具, 提高民用煤热效率, 实现洁净燃烧; 实现燃煤烟气处理系统的民用化。

关键词:民用煤; 污染; 洁净化; 展望

中图分类号: TQ53 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2017)04-0001-11

Status and prospect of cleaning utilization of civil coal in China

Wu Jianjun¹, Guo Fanhui¹, Sun Shaojie¹, Dong Jixiang¹, Jiang Yao¹, Zhang Yixin²

(1. School of Chemical Engineering & Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. National Engineering Research Center of Coal Preparation and Purification, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Origin and current situation of civil coal in China was discussed. The effects of characteristics of civil coal types and forms and combustion technologies on the pollutant emission were analyzed. Based on research status, the civilian coal clean utilization technologies were summarized from 3 aspects: pre-combustion processing, combustion technology and post-processing. The recommendations of civil coal clean utilization are proposed. The briquette with high sulfur retention rate should be developed based on the mechanism and influencing factors of sulfur retention. The biomass briquette with low cost, good mechanical performance and good applicability should be developed. The replacement of raw coal by briquette will be benefit to the environment. The developing of efficient, clean and low cost civil cooking stoves should be emphasized to improve the thermal efficiency of civil coal and achieve clean combustion. The civilian use of coal-fired flue gas purification system should be realized.

Key words: civil coal; pollution; clean; prospect

0 引言

我国民用燃料大致分为煤炭、液化石油气、生物质燃料以及天然气等^[1], 广泛用于家庭炊事和供暖。由于煤炭储量丰富、价格便宜, 其消耗量占绝对的比例。根据民用煤的使用形态, 商品煤质量评价

与控制技术指南(GB/T 31356—2014)将之分为民用散煤和民用型煤2类; 从煤种来讲, 民用煤可分为褐煤、烟煤和无烟煤。我国民用煤的使用以烟煤、无烟煤为主, 褐煤使用较少, 但在褐煤产区较为集中。散煤燃烧产生大量污染, 在冬季尤为严重^[2]。近年来, 随着中央和地方政府禁止劣质煤的销售, 以及洁

收稿日期: 2017-06-20; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2017.04.001

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0600401-02); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CPEUKF1704); 中国博士后科学基金资助项目(2016M601919)

作者简介: 武建军(1964—), 男, 河南郑州人, 教授, 博士生导师, 从事粉煤成型、型焦研制、煤炭干馏和燃烧固硫研究。E-mail: jjuw@163.com

引用格式: 武建军, 郭凡辉, 孙少杰, 等. 中国民用煤洁净化利用现状及展望[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(4): 1-11.

Wu Jianjun, Guo Fanhui, Sun Shaojie, et al. Status and prospect of cleaning utilization of civil coal in China[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 1-11.

净煤补助政策的推广,型煤和洁净无烟煤消耗量比例有所提高,但烟煤使用量仍占很大比重^[3-4]。

1 民用煤的污染现状

民用煤利用效率较低,并且燃烧过程中产生大量污染物^[5-6],如挥发性有机物(VOCs)、无机物(NO_x 、 SO_2 、CO等)、颗粒物(PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、BC、BrC等)、重金属(Hg、Pb等)及其他有害气体(二噁英、多环芳烃等)。民用燃煤污染物不仅造成环境污染,也是产生雾霾的重要原因之一,还引起大量健康问题,如:肺气管、呼吸道感染、免疫能力下降以及神经系统功能紊乱等^[7-12]。民用煤多为散煤,约占全国煤炭销量的20%,七成以上为烟煤,且有相当数量为劣质烟煤^[13](灰分大于40%,硫分大于2%,热值低的烟煤),燃烧1t散煤产生的污染量相当于等量电煤的5~10倍^[14]。与火力发电锅炉和工业锅炉相比,民用煤燃烧炉具多为简易小煤炉,燃烧不完全、效率低,其CO污染排放因子高出工业燃煤锅炉100倍之多^[15],烟气排放未经除尘、脱硫、脱硝处理,直接排入大气, SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的日排强度约为电厂的7、1.2、8和5倍^[16]。因民用煤使用者多居住平房,故排放高度低,低空污染严重,直接被人体吸收,危害健康,故其污染问题不容小觑。

如今 $\text{PM}_{2.5}$ 日益猖獗,民用煤燃烧“贡献”较多^[17]。褐煤作为内蒙古和黑龙江等地区的供热煤源,大多为未经洗选、加工的“蒙煤”,挥发分含量极高,约40%以上,但由于其煤化程度较低,热值仅为12.56MJ左右^[18],所以只有通过增大燃煤量来满足民用供暖热量的需求,加之其与家庭燃煤取暖炉不匹配,导致其烟气排放量的增加,造成空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 等颗粒物明显增多^[19]。含碳颗粒物危害性表现如下^[20-21]:①大气中颗粒物浓度升高可导致能见度降低,从而引起严重的雾霾;②使大气吸光强度增强15%~40%,间接影响区域辐射强度^[22-23];③其组成中多环芳烃、类腐植质和生物聚合物等,可诱发人体内的多种疾病;④重金属以及二氧化硫等组分可在BrC气溶胶表面发生凝结反应,产生毒性更大的二次反应产物。

在我国各类能源使用过程中排放的黑炭和多环芳烃清单中,民用煤产生的排放量约占总量40%^[24],其中黑炭排放因子(EF_{BC})比工业锅炉高出3个数量级^[25-26]。王庆一^[27]研究表明,云南省宣威地区民用煤多为烟煤,检测其室内苯并芘浓度高达6.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,导

致该地区肺癌的高发病率。民用煤做为我国一次污染物主要排放源,洁净化利用刻不容缓。

民用煤产生污染物的种类和数量与煤种和使用形态相关,环保部2016年发布数据,民用无烟煤、烟煤、蜂窝煤、兰炭、型煤的排放量如图1所示^[28]。

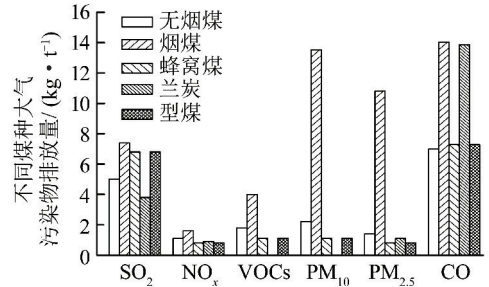


图1 不同煤种大气污染排放量^[28]

Fig. 1 Emission of air pollution from different coal^[28]

由图1可知,烟煤的总污染物排放量最大,其 SO_2 、 NO_x 、VOCs、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和CO的排放量分别是型煤的1.1、2.3、3.6、12.3、13.5和1.9倍。由此可见,型煤可以很大程度上减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 以及挥发性有机物(VOCs)的排放量,推广洁净型煤、减少散煤烟煤的使用对环境的保护具有重要意义。

有机污染物多环芳烃(PAHs)的产生大多来自煤炭的不完全燃烧,尤其是民用燃煤,PAHs的排放因子比大型工业锅炉高3~5个数量级^[29-32]。陈颖军等^[33]通过研究不同民用煤种燃烧所产生的PAHs发现,不同煤种的PAHs排放因子差别显著,烟煤最高,无烟煤最低,二者相差3个数量级,烟煤燃烧烟气中PAHs的毒性当量远高于无烟煤。

从民用烟煤的不同燃烧形态来看,型煤的污染排放量远低于散煤^[34-35]。叶建东等^[18]利用碳平衡法计算研究北京农村地区常用的散煤和型煤的烟气污染物排放因子发现,用型煤代替散煤采暖时 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_x 和 CO_2 的排放量可分别减少14%、83%、44%和16%(图2)。梁云平等^[35]通过研究分析北京本地取暖主要的民用燃煤,发现与烟煤散煤相比,型煤能够显著降低 NO_x 、CO的排放(图3)。通过在型煤中添加固硫剂等方法,能够有效抑制 SO_x 的排放。由此可见,推广民用型煤的使用可以有效地减少民用煤的污染物排放量。

2 民用煤洁净化技术发展展望

随着社会发展和经济水平的提高,人们的环保意识逐渐增强,日常生活中,煤气、电力和天然

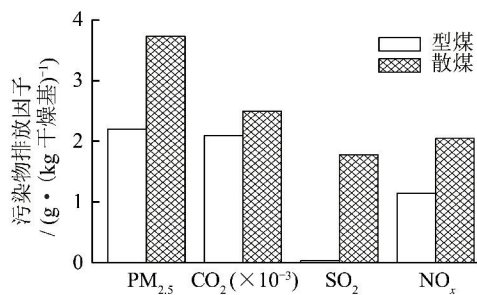


图2 不同民用煤燃烧形式的污染物排放因子

Fig. 2 Pollutant emission factor in different types of civil coal combustion

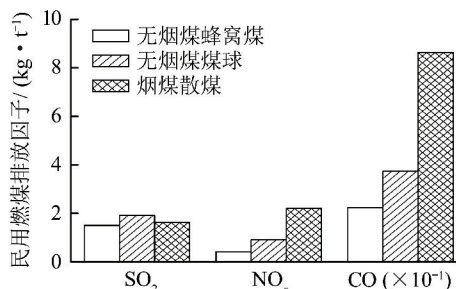


图3 民用燃煤排放因子

Fig. 3 Civil coal-fired emission factor

气等清洁能源使用比重逐渐增加,热电联产和集中供暖的推广,有效抑制了民用煤燃烧的污染物排放。但是,受到经济条件和地理位置等因素的限制,在我国偏远地区和靠近煤矿周围的用户仍存在大量使用散煤燃烧的现象。散煤燃烧效率较低,并且缺乏烟气处理装置,其污染物排放具有“数量众多、分布广泛、低空排放、季节性强、无治理设施”等特点^[36],造成环境污染加剧,严重威胁着人们的身体健康。

为此,党中央、国务院高度重视,国家能源局发布的《煤炭洁净高效利用行动计划(2015—2020年)》以及国务院发布的《大气污染防治行动计划》,均明确指出要鼓励洁净煤和型煤的使用,禁止劣质煤的销售,加大改善空气质量的力度,多个省市已出台相关的方针政策来减少燃煤污染^[37-44]。环境保护部发布了《民用煤燃烧污染综合治理技术指南(试行)》、《民用煤大气污染物排放清单编制技术指南(试行)》,以民用煤散烧污染治理为出发点,提出冬季污染防护的总体思路和政策建议,强调“民用煤污染治理应以环境空气质量改善为核心,采取因地制宜、综合治理、多措并举、分步推进的步骤实施”^[45],推动了民用煤洁净化利用的发展,因此要大力发展民用煤的洁净化利

用,不仅要源头入手,还要控制燃烧过程的效率,同时作好燃后烟气的处理。

2.1 煤炭燃前洁净化加工

2.1.1 洗选加工工艺

民用煤广泛用于采暖、炊事等,大多数用户直接购买价格便宜且未经洗选的低品质原煤,加上燃煤民用炉具构造简单,难以实现高效洁净燃烧。近13年来我国民用煤中,原煤平均占比超过81%,洗选精煤占9%左右,型煤和焦炭使用量不超过10%。民用煤9成以上为散煤,且严重缺乏燃前洁净化处理,每燃烧1t散煤,大气污染排放量相当于等量电煤的15倍以上^[5]。我国炼焦用煤的入选率较高,但对民用煤的洗选重视程度不足。煤炭洗选可脱除煤中50%~80%的灰分、30%~40%的全硫^[46],且经洗选加工之后,不仅能降低二氧化硫、氮氧化物、煤矸石等污染物,还能够提高煤炭的综合利用效率,提供适用各行各业的煤炭,减少无效运输,是合理利用资源,保护生态环境的有效手段之一。据统计^[47],我国用于非工业燃烧的民用煤平均灰分为28.6%,平均硫分为1.01%,经洗选掺配后占比分别下降了13.1%和0.35%。按照每燃烧1亿t原煤计算,通过洗选可排除灰分1301万t,硫分35万t。

煤炭洗选加工工艺成本较低,实用性强,可广泛用于民用煤的燃前处理。何龙等^[48]选用陕西旬邑矿区的高硫煤,采用重介质分选工艺,通过先破碎再分选对煤中的硫分进行了有效的脱除,提高了经济效益;朱振武等^[49]通过对原煤和相应的洗选产物进行采样分析,发现通过常规物理洗选,不仅使灰分和硫分得到一定的降低,As、Be、Cd、Co、Cr、Hg、Mn、Ni、Pb、Sb等有害元素都能实现20%以上的脱除率,一定程度上控制燃煤有害元素的排放。

实施民用煤的燃前洗选意义重大,推广该工艺发展不仅有利于优化升级民用煤的结构,还可以提高民用煤的质量品质,减少燃烧过程中污染物的排放,实现民用煤原料的洁净化。

2.1.2 提质利用

民用燃煤的使用通常采用直接燃烧的方式,其利用率较低,污染物和碳排放量较大,是造成大气污染的主要来源,加之目前民用燃烧炉技术水平低下,导致原料煤的燃烧不充分,排放了大量的有害物质,危害人体健康。民用煤中有大量低阶煤,从其煤质特性分析,直接燃烧不能充分发挥其反应性好、富氢和挥发分高等特点^[50],潜在利用价值未得到充分实

现。因此,根据煤质及其组分等对低阶煤进行提质分级利用,对于民用煤的洁净化、高附加值利用具有重要的意义。

目前,国内外低阶煤提质技术主要分为3类:干燥脱水提质技术、成型提质技术和热解提质技术^[51]。其中,热解提质技术是低变质煤高效环保利用的有效途径,在热解提质过程中,低阶煤发生焦化和热解的过程,不仅脱除了外在水分和内在水分,还降低了挥发分^[52]。半焦是低阶煤经过低温热解(500~600℃)的主要产物,其产率为50%~70%,与原煤相比,水分较低,挥发分减少,硫等有害元素含量降低,固定碳增加,发热量提高至4.19~6.28 MJ/kg,孔隙发达,有利于氧气扩散,燃烧效率较原煤提升,是优良的民用燃料^[51]。另外,半焦成型后,提高了远距离运输的能力,有利于大范围推广。

对于民用煤的提质利用,需完善与优化各种提质技术的联合发展,实现各种高附加值的洁净燃料生产,加强低温煤焦油和焦炉煤气用作制取其他清洁燃料和化工产品方面的应用,充分发挥煤炭热解产物的多效利用。同时,在不断学习国外先进的提质利用技术的基础上,开拓创新,推动我国洁净化利用的发展进程。

2.1.3 民用型煤

随着社会经济的快速发展,传统的燃烧方式已经不能满足环保要求,采用成型工艺制民用燃料替代民用散煤,既符合我国节能减排的要求,也是顺应时代发展的方式,具有广阔的应用前景。我国民用型煤的使用类型较多,包括蜂窝煤、半焦成型、生物质型煤等。和燃烧散煤相比,型煤可节煤15%~20%,提高热效率10%~15%,减小烟尘排放量60%~80%^[53],是提高燃烧效率和减少污染的最有效的方法之一^[54]。

我国民用型煤经历了从煤球到蜂窝煤的演变过程,民用型煤的成型工艺主要分为3种^[55]:有黏结剂冷压成型、无黏结剂冷压成型和热压成型。采用有黏结剂冷压成型并添加固硫剂、膨松剂等容易实现具有良好燃烧特性的民用燃料,且生产条件容易满足,近年我国民用型煤的研究重点在上点火蜂窝煤及其配套炉具。吴运员^[56]使用原煤、黄土、锯末、石灰粉、氯化钠、石蜡、纤维素胶和硝酸钾等压制成速燃上点火蜂窝煤,实现上点火一点就燃、上火快、火力旺、无烟无毒等优点。同

时,目前所研制的各高效炉具,其热效率大于50%,大大减少了对大气的污染。

半焦成型工艺是将半焦粉碎后,在特定的温度、压力和湿度条件下,挤压成规则和高密度的棒状、球状等的固体燃料。半焦的孔隙率大而机械强度较低,因此成型性能较差,需在成型过程中添加黏结剂。有学者^[57]采用低阶煤热解后生成的优质半焦为原料,加入生物质黏结剂,多级充分混合均匀,冷态挤压成型,得到了干球抗压强度大于80 kg/cm²、全水分小于2%、全硫质量分数小于0.3%、低位发热量大于26.80 MJ的型焦,产品工艺指标较普通工艺有较大的优势。夏碧华等^[58]研究的一种半焦成型工艺,选用复合黏结剂,以Ca(OH)₂为固硫剂,制得的型煤工业分析指标优于国家标准,当固硫剂为2%时,固硫率高达32.64%。另外,半焦成型制民用燃料可作为无烟煤优良的替代品^[59],在民用煤燃烧中,无烟煤的效果较好,但从储量上分析,无烟煤仅占7.92%,远不及烟煤的73.73%。低阶煤热解后半焦的各项指标也表现出同无烟煤相似的优势,可以有效地解决无烟煤储量不足的劣势。

生物质型煤技术是煤炭资源洁净化利用方式之一。与原煤相比,使用生物质型煤能够明显减少大气污染物的排放,便于储存和运输。加大生物质型煤产业的发展,可有效替代并节约化石能源,改善能源结构,缓解全球气候状况^[60]。我国生物质资源丰富,每年秸秆的理论资源量达到8.2亿t^[61],生物质能源除少量用于燃烧、液化和气化等方面外大部分被废弃^[62-64],造成资源浪费。因此,应充分利用资源优势加快生物质型煤技术的研究。何方等^[65]以城市生活垃圾、农林废弃物等生物质和云南昭通褐煤为原料,制成了蜂窝状民用生物质复合型煤,发现其具有着火点低、燃烧速率较快的特点,达到温度峰值的时间可通过生物质添加量进行调控。Qi J等^[66]通过将无烟煤与10%~30%的各种农作物秸秆混合,发现在生物质比例为15%~20%时,节能和减少污染物排放效果最佳,认为生物质型煤可作为固体燃料,以节约一次能源并减少污染物排放。

型煤燃烧技术是民用煤洁净化利用的有效方法,在现代工业水平下,煤炭开采过程中粉煤含量较高,通过粉煤成型可以大大减少煤炭在运输过程中的损失。在加工过程中,通过合适的添加剂、与不同煤种进行掺配,使得煤中的灰分、硫分、灰熔融性、固定碳等指标得到明显改善,改变单一煤种的性能缺

陷,例如可以有效改善褐煤易复吸、自燃的特性,得到防水性较好的褐煤型煤,可以有效利用各种生物质资源,减少资源浪费的同时保护生态环境,降低污染物和温室气体的排放。

2.2 洁净燃烧技术

2.2.1 洁净化燃烧方式

根据用途不同,民用炉具分为:炊事型、采暖型和炊事采暖型。根据燃烧方式不同,民用炉具可以分为正式燃烧和反式燃烧。

正式燃烧(图4(a))即下部点火,上部加煤,从下往上燃烧。生煤加入后在生煤层经历预热、干燥、干馏的过程,产生挥发分等可燃物,由于炉膛上部温度较低、氧气不足,可燃物未经完全燃烧,直接随烟气排出,降低了燃料热效率,同时对环境造成极大污染。剩余燃料经过氧化层燃烧后,产生的煤灰经过炉箅子漏出。

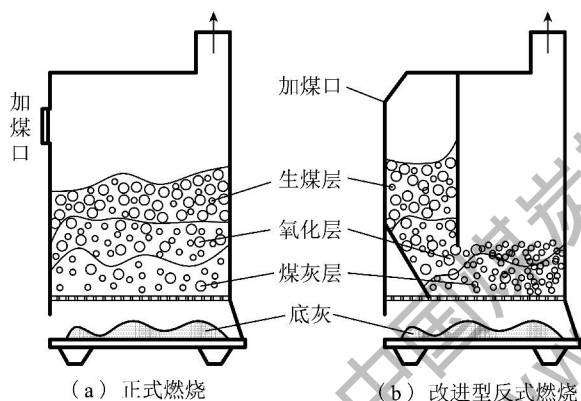


图4 燃烧方式示意

Fig. 4 Structure of combustion mode

反式燃烧即在上部点火,下部加煤,燃料从上向下燃烧。下部煤在预热、干燥过程中产生的挥发分等可燃物经过上部高温燃烧区时被烧掉,增加了燃料的热效率,减轻燃煤污染。改进型反式燃烧(图4(b)),是利用燃烧室的高温,使得生煤经过预热、干燥、干馏的过程,产生的挥发分等可燃物,由燃烧室的负压吸入燃烧室进行充分燃烧,直至燃料完全燃尽,煤灰从炉箅子漏出。

不同的燃料具有不同的化学组成,导致其燃烧特性也不相同,从而炉具结构要针对燃料而设计,正式燃烧技术多用于无烟煤炉具和无烟煤型煤炉具,而反式燃烧技术用于烟煤燃料和生物质燃料采用。据不完全统计,目前国内农村民用采暖炉具约6 000万台以上^[4],民用煤与炉具的匹配具有广阔的发展空间。

2.2.2 燃烧中固硫

燃前脱硫和燃后烟气脱硫设备庞大、流程复杂,而燃中固硫技术操作简单,成本低廉,受到人们的重视^[67-68]。燃中固硫技术运用于民用煤燃烧的有配煤及型煤燃烧固硫技术,在配煤过程和生产民用型煤过程中配入一定量的固硫剂,使得煤炭在燃烧过程中产生的 SO_2 与固硫剂相结合,最终形成固态残渣随煤灰排出炉具,有效降低了燃煤对环境造成的污染。

凡是可以在燃烧过程中产生的 SO_2 、 SO_3 发生物理吸附或者化学反应,生成固态残渣留在煤灰中的物质,都可以用作固硫剂,常用固硫剂有钙基固硫剂、废弃物或天然型固硫剂和纳米固硫剂^[69]。

2.3 烟气污染物的减排及节能化

燃煤烟气中含有多种气态和固态污染物,如颗粒物、多环芳烃、 SO_x 、 NO_x 和重金属等,目前污染物洁净化技术和装置在工业上广泛应用,而在民用煤燃烧烟气污染物处理方面应用较少,本文结合工业烟气污染物净化技术,对民用煤烟气污染物洁净化技术作出推测,并提出建议。

2.3.1 烟气脱硫

煤炭中的硫,按照存在形式可以分为有机硫和无机硫,硫元素的来源主要有2个途径:原生硫——成煤植物本身所蕴含的硫;次生硫——成煤过程中进入的硫^[70]。在煤炭燃烧过程中,随着煤炭热解、挥发分燃烧、半焦燃烧等过程的进行,硫的释放及其转化有所不同,随着温度的变化,硫元素在燃烧过程中主要生成 H_2S 、 SO_2 、 SO_3 等气体。Majcrowicz等^[71]研究发现,不同类型硫化物分解温度不同,有机硫、黄铁矿硫、噻吩硫、硫酸盐硫的分解温度分别在300~400、400~450、480~500、1 100℃。由于硫酸盐分解温度高于民用炉具炉膛温度,所以硫酸盐一般不会氧化,最终赋存在煤灰当中。

国内已经工业化应用的烟气脱硫技术主要有湿法、半干法、干法脱硫工艺。干法脱硫技术是指利用 CuO 、活性炭等固体物质的颗粒或者粉末,对烟气中的硫进行吸附。用活性炭吸附法脱除烟气中的硫,具有系统简单、成本低廉、脱除率高和可再生等优点^[72],将此方法用于民用烟气脱硫上,具有技术可行性。湿法脱硫工艺是利用石灰石、碱液等物质与烟气接触,通过化学反应吸收烟气中的硫。冯超等^[73]通过在民用炉体内设置水包、功能内胆、导烟板等装置,使得烟气通过功能内胆中的碱液,有效

脱除了烟气中的硫元素。

2.3.2 烟气脱硝

NO_x 的排放是造成我国雾霾天气和光化学烟雾的主要原因之一,民用煤燃烧过程产生 NO_x 的途径主要有3类:燃料煤中氮化物热分解后在空气中氧化产生;燃料的原子基团与空气中氮气反应;燃烧产生的高温使空气中的氮气氧化产生。在减少 NO_x 的排放研究过程中,吴碧君^[74]对氮氧化物的生成机理进行研究,发现降低温度能有效的减少 NO 的排放量,但是当温度低于 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 时又会向生成 N_2O 的方向转化,因此不能仅通过降低温度来抑制 NO_x 的排放。通过静置燃烧试验发现,在氧含量较低的气氛下,氮析出率下降,析出平缓,在还原性气氛下, NO 生成时间延迟,生成量减少^[75]。

国内主要烟气脱氮技术有催化还原法 (SCR) 和非催化还原法 (SNCR),降低 NO_x 的排放可以通过燃烧过程的控制和燃后的烟气处理,采用分级燃烧和再燃烧技术^[76],在脱硫工艺的基础上实现脱硫脱硝一体化技术。

2.3.3 多环芳烃减排

多环芳烃 (PAHs) 的毒性和三致性 (致癌、致畸、致突变) 很强,严重危害人体健康^[77]。原煤燃烧过程中多环芳烃主要来源于:① 原煤本身所含多环芳烃的挥发;② 原煤加热过程中芳香族化合物的高温分解;③ 自由基之间的化合反应。煤炭燃烧过程中,多环芳烃排放会随着挥发份含量、排烟温度的增大而呈现上升趋势,为降低多环芳烃的生成可合理配入二次风和延长燃烧时间^[78-79]。

为减少民用煤燃烧烟气中多环芳烃的产生,可以采取以下措施:在挥发分大量析出阶段,可以为炊事炉、取暖炉配入二次风,使多环芳烃充分燃烧;在排烟过程中,可通过催化剂将多环芳烃分解、转化^[80-81],或利用活性炭吸附多环芳烃,湿法除尘器对多环芳烃也有较好的脱除效果,捕获后的 PAHs 可以利用微生物降解法和光降解法进行无害化处理^[82-85]。结合民用炉的使用特点和实际情况,利用以上技术途径大力研发,有望得到价格低廉、处理效果良好的多环芳烃脱除、转化装置。

2.3.4 烟气汞的分类和减排

中国煤中汞的含量平均 0.19 mg/kg ,约为世界平均值的2倍,燃煤释放的汞已经对我国部分地区的的环境造成了污染,因此加强燃煤过程中汞污染的防控有重要意义^[86-89]。煤炭燃烧时,当炉内温度

$600\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$,燃煤中的大部分汞将由化合态转化为单质而停留在烟气中,汞排放量随着热解时间、加热速率的提高而增大^[89]。燃煤烟气中汞主要以 Hg^0 的稳定形式存在,而单质汞 Hg^0 挥发性高,不具有极性,水溶性低,难以被飞灰吸附,是控制汞排放的难点^[88]。

民用煤燃烧烟气中,控制烟气中汞的形态转化是减少汞排放的重要途径。固态颗粒附着汞 Hg^p 通过静电除尘器,在静电作用下被滤掉;由于 Hg^{2+} 的亲水性,可湿法脱硫装置中被脱除;通过加入添加剂使 Hg^0 转化为易于处理的 Hg^{2+} ^[88]。除此之外,还可采用活性炭吸附法^[90]、钙基类物质吸附法^[91-93]、硅酸盐吸附法^[94]、电晕放电氧化法^[95-96]、金属及金属氧化物催化氧化法^[97]、光催化氧化法^[98]等方法脱除烟气中的汞。

2.3.5 颗粒物减排

由于民用煤一般为高挥发分煤,且炉具的燃烧温度较低,难以实现煤的充分燃烧,产生大量的颗粒物,其烟尘排放量占总排放量的43%^[99]。目前对民用煤颗粒物排放还没有有效的控制措施,直接排入大气,危害人体健康,是引起雾霾的重要原因。

张军营等^[100]研究发现, $\text{PM}_{2.5}$ 以及 PM_{10} 的排放量与温度、煤中含硫量均呈正相关关系。黄卫等^[101]通过研究不同煤种中颗粒的排放组分发现,随着煤的成熟程度的提高,PM中的碳含量下降而元素O、S和N升高,并且PM、OC和EC的排放因子随煤化程度的提高,呈幂指数关系递减。赵承美等^[17]通过对单颗粒 $\text{PM}_{2.5}$ 的形貌、物理结构以及化学组成研究发现,就烟碳有机颗粒而言,烟煤的排放量要远高于无烟煤,并且随着民用煤中S含量的增多,富S颗粒的相对含量也随之升高。

李庆等^[102]针对高挥发分烟煤,改进炉具采用底部加料的模式,并增加二次风来促进煤的完全燃烧,与传统炉具相比改进后的炉具能够使烟煤一次 $\text{PM}_{2.5}$ 排放降低94%。

综合目前的除尘方法和民用炉具的使用条件,烟尘罩配合袋式除尘器可适用于民用炉具除尘。通过烟尘罩将烟气收集进入除尘器,经除尘器的沉降以及静电效应作用,将烟气吸收,经后续的清灰工作以实现除尘的持续工作。通过提高民用煤的质量、改进燃烧炉具和烟气吸收处理3种途径可实现民用煤颗粒物的减排,减缓环境污染的严峻形势。

综上所述,煤炭烟气污染物的脱除装置在工业

上已广泛应用,民用煤燃烧的污染物脱除在理论上可行,考虑经济性和易操作性的同时,可以根据不同地区煤种、不同杂质而有针对性地研发、设计民用炉具燃烧优化方案和烟气污染物一体化脱除装置。

3 建 议

1) 推广民用型煤。研制固硫率高的蜂窝煤,从型煤固硫机理和影响因素,型煤粘结剂等方面进行型煤燃烧脱硫一体化研究;利用我国丰富的生物质原料,研究开发成本低、机械性能好、适用性强的生物质型煤。

2) 研究高效民用灶具,不断提高民用煤热效率。当前民用煤燃烧多采用简单炉具,且对于污染物的排放不加以处理,造成严重的空气污染问题,在今后的研究,应着重开发经济、高效、洁净的新型民用炉具。

3) 实现烟气处理的民用化。现今的烟气处理技术多用于工业化生产中,对于民用燃煤及其炉具缺乏有效的烟气及颗粒物处理办法,如何从工业化生产中得到启发,研发出成本低、结构简单有效的民用化烟气处理系统是亟待解决的问题。

参考文献 (References):

[1] 鲁唯斯. 海峡西岸经济区大气污染物排放清单研究[D]. 厦门:厦门大学,2014.

[2] 柴发合,薛志钢,支国瑞,等. 农村居民散煤燃烧污染综合治理对策[J]. 环境保护,2016(6):14-19.
Chai Fahe, Xue Zhigang, Zhi Guorui, et al. Complex control measures of rural coal combustion pollution[J]. Environmental Protection, 2016(6):14-19.

[3] 麦方代,王东升,刘明锐,等. 京津冀地区洁净型煤使用现状及建议[J]. 环境保护,2016(6):25-27.
Mai Fangdai, Wang Dongsheng, Liu Minrui, et al. Clean coal using situation and recommendations in Beijing, Tianjin, Hebei area[J]. Environmental Protection, 2016(6):25-27.

[4] 王东升,刘明锐,白向飞,等. 京津冀地区民用燃煤使用现状分析[J]. 煤质技术,2016(3):47-49.
Wang Dongsheng, Liu Mingrui, Bai Xiangfei, et al. The situation analysis of civil coal in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Coal Technology, 2016(3):47-49.

[5] 颜丙磊,唐夕媛,吕佳霖,等. 我国民用煤现状及污染物排放分析[J]. 煤炭加工与综合利用,2017(1):1-3.
Yan Binglei, Tang Xiyuan, Lyu Jialin, et al. Analysis of status civil coal and the emission of pollutants in China[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2017(1):1-3.

[6] 沈明昊. 浅析燃煤对大气环境的污染及防治[J]. 西北煤炭, 2008(1):46-48.

Shen Minghao. Environmental pollution and prevention of coal burning[J]. Northwest Coal, 2008(1):46-48.

[7] 周林,邵龙义,刘君霞,等. 宣威肺癌高发区室内 PM₁₀ 对肺泡上皮细胞凋亡的影响[J]. 中国环境科学,2010,30(7):1004-1008.
Zhou Lin, Shao Longyi, Liu Junxia, et al. Affects of indoor PM₁₀ in Xuanwei on lung cell apoptosis[J]. China Environmental Science, 2010,30(7):1004-1008.

[8] Tian L, Lucas D, Fischer S L, et al. Particle and gas emissions from a simulated coal-burning household fire pit[J]. Environmental science & technology, 2008,42(7):2503-2508.

[9] Lan Q, Chapman R S, Schreinemachers D M, et al. Household stove improvement and risk of lung cancer in Xuanwei, China[J]. Journal of the National Cancer Institute, 2002,94(11):826-835.

[10] 邵龙义,杨园园,吴明远,等. 宣威肺癌高发区室内 PM₁₀ 的氧化性损伤能力及其与微量元素的关系[J]. 环境与健康杂志, 2008,25(12):1094-1096.
Shao Longyi, Yang Yuanyuan, Wu Mingyuan, et al. The oxidative damage ability of indoor PM₁₀ in Xuanwei lung cancer high incidence village and its relationship with trace elements[J]. Journal of Environmental and Health, 2008,25(12):1094-1096.

[11] 周林,邵龙义,宋晓焱,等. 宣威肺癌高发区室内 PM₁₀ 的生物活性研究[J]. 毒理学杂志,2009,23(6):439-441.
Zhou Lin, Shao Longyi, Song Xiaoyan, et al. Biological activity of indoor PM₁₀ in Xuanwei lung cancer high incidence area[J]. Journal of Toxicology, 2009,23(6):439-441.

[12] 杨婧,郭晓爽,滕曼,等. 我国大气细颗粒物中金属污染特征及来源解析研究进展[J]. 环境化学,2014,33(9):1514-1521.
Yang Jing, Guo Xiaoshuang, Teng Man, et al. A review of atmospheric fine particulate matter associated trace metal pollutants in China[J]. Environmental Chemistry, 2014,33(9):1514-1521.

[13] 肖蕃. 散煤治理难推进[N]. 中国能源报,2016-05-09(3).

[14] 武晓娟. 散煤治理亟待突破[N]. 中国能源报,2016-03-21(1).

[15] 魏巍. 中国人为源挥发性有机化合物的排放现状及未来趋势[D]. 北京:清华大学,2009:3-10.

[16] 潘涛,薛亦峰,钟连红,等. 民用燃煤大气污染物排放清单的建立方法及应用[J]. 环境保护,2016(6):20-24.
Pan Tao, Xue Yifeng, Zhong Lianhong, et al. The methodology for air pollutants emission inventory from residential coal combustion and its application[J]. Environmental Protection, 2016(6):20-24.

[17] 赵承美,邵龙义,蒋靖坤,等. 民用煤燃烧排放 PM_{2.5} 的微观形貌和化学组分[J]. 中国电机工程学报,2016,36(16):4422-4428.
Zhao Chengmei, Shao Longyi, Jiang Jingkun, et al. Microscopy morphology and chemical composition of PM_{2.5} from household coal combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(16):4422-4428.

[18] 叶建东,章永洁,蒋建云,等. 农村型煤替代散煤采暖对比分

- 析[J]. 建筑节能, 2016, 44(11): 102-103.
- Ye Jiandong, Zhang Yongjie, Jiang Jianyun, et al. Comparison and analysis about mould coal and raw coal for rural heating[J]. *Euiding Energy Efficiency*, 2016, 44(11): 102-103.
- [19] 迟晓德, 周晶. 哈尔滨城市空气 PM_{2.5} 污染主要来源分析[J]. *环境科学与管理*, 2013, 38(11): 1-4.
- Chi Xiaode, Zhou Jing. Analysis on major sources of PM_{2.5} pollution in Harbin [J]. *Environmental Science and Management*, 2013, 38(11): 1-4.
- [20] 贺晋瑜, 燕丽, 雷宇, 等. 京津冀地区燃煤锅炉 PM_{2.5} 减排潜力分析[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(4): 1247-1253.
- He Jinyu, Yan Li, Lei Yu, et al. PM_{2.5} emissions reduction potential from coal-fired boilers in Beijing-Tianjin-Hebei area[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(4): 1247-1253.
- [21] 周艳军. PM_{2.5} 的污染危害及预防对策[J]. *产业与科技论坛*, 2013(11): 114-115.
- Zhou Yanjun. Hazards and preventive measures of PM_{2.5} [J]. *Estata and Science Tribune*, 2013(11): 114-115.
- [22] Hecobian A, Zhang X, Zheng M, et al. Water-soluble organic aerosol material and the light-absorption characteristics of aqueous extracts measured over the Southeastern United States[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(13): 5965-5977.
- [23] Lukács H, Gelencsér A, Hammer S, et al. Seasonal trends and possible sources of brown carbon based on 2-year aerosol measurements at six sites in Europe[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112: 23.
- [24] 郗建荣. 民用煤采暖分散燃烧致污染严重[N]. *法制日报*, 2016-03-17(6).
- [25] Zhang Y, Schauer J J, Zhang Y, et al. Characteristics of particulate carbon emissions from real-world chinese coal combustion [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(14): 5068-5073.
- [26] Streets D G, Gupta S, Waldhoff S T, et al. Black carbon emissions in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(25): 4281-4296.
- [27] 王庆一. 我国农村地区居民室内污染严重[J]. *中国能源*, 2014, 36(12): 36-37.
- Wang Qingyi. Serious pollution of indoor air in Chinese rural area [J]. *Energy and Environment*, 2014, 36(12): 36-37.
- [28] 中华人民共和国环保部. 民用煤大气污染排放清单编制指南(试行)2016[S].
- [29] Junk G A, Ford C S. A review of organic emissions from selected combustion processes [J]. *Chemosphere*, 1980, 9(4): 187-230.
- [30] Baek S O, Field R A, Goldstone M E, et al. A review of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: sources, fate and behavior[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1991, 60(3/4): 279-300.
- [31] Davies M, Rantell T D, Stokes B J, et al. Characterization of trace hydrocarbon emissions from coal fired appliances [R]. Final Report on Esc. Project No, 1992.
- [32] Yang H H, Lee W J, Chen S J, et al. PAH emission from various industrial stacks [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1998, 60(2): 159-174.
- [33] 陈颖军, 冯艳丽, 支国瑞, 等. 民用煤室内燃烧条件下多环芳烃的排放特征[J]. *地球化学*, 2007, 36(1): 49-54.
- Chen Yingjun, Feng Yanli, Zhi Guorui, et al. Characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons emitted from indoor combustion coals[J]. *Acta Geochimica*, 2007, 36(1): 49-54.
- [34] 姚渭溪, 沈迪新, 李玉琴, 等. 烟煤作民用燃料可行性的探讨[J]. *环境科学*, 1984, 5(4): 83-87.
- Yao Weixi, Shen Dixin, Li Yuin, et al. Discussion on the feasibility of using bituminous coal as civil fuel[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 1984, 5(4): 83-87.
- [35] 梁云平, 张大伟, 林安国, 等. 北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征[J]. *环境科学*, 2017, 38(5): 1775-1782.
- Liang Yunping, Zhang Dawei, Lin Guoan, et al. Emission characteristics of residential coal combustion flue gas in Beijing [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 38(5): 1775-1782.
- [36] Zhang J, Smith K R, Ma Y, et al. Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: A database for emission factors [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(26): 4537-4549.
- [37] 平立华, 孟运平, 潘树仁, 等. 江苏省煤炭资源现状及开发利用建议[J]. *沉积与特提斯地质*, 2015(1): 14.
- Ping Lihua, Meng Yunping, Pan Shuren, et al. Current states and proposals for the exploitation and utilization of the coal resources in Jiangsu [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2015(1): 14.
- [38] 宋崇, 杨勇. 河北省出台大气污染防治条例实行依法“铁腕治污”[J]. *中国应急管理*, 2016(1): 67.
- Song Chong, Yang Yong. Hebei introduced air pollution control regulations, the implementation of "iron hand" for pollution control according to the law [J]. *China Emergency Management*, 2016(1): 67.
- [39] 戴丽. 散煤治理 众所周知难[J]. *节能与环保*, 2016(9): 11.
- Dai Li. It is well known that the control of bulk coal is difficult [J]. *Energy Conservation & Environmental Protection*, 2016(9): 11.
- [40] 汲奕君, 冯昱, 何迎, 等. 天津市煤炭消费的行业结构和影响因素分析[J]. *环境污染与防治*, 2015, 37(7): 101-104.
- Ji Yijun, Feng Yu, He Ying, et al. Analysis on industry structure and influencing factors of coal consumption in Tianjin [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2015, 37(7): 101-104.
- [41] 宋旭. 京津冀大气污染治理更精准——专访农工党中央生态环境工作委员会副主任周扬胜[J]. *中国环境管理*, 2017, 9(2): 17-20.
- Song Xu. The treatments of air pollution in Beijing Tianjin and Hebei are more accurate—an interview of the vice director of Party Central Committee with the ecological environment; Zhou Yangsheng [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2017, 9(2): 17-20.

- [42] 黄建. 煤炭清单与减排政策研究[D]. 上海:复旦大学,2011.
- [43] 王庆一. 中国减碳路在何方(下)[J]. 节能与环保,2013(8):52-54.
Wang Qingyi. Where does China's carbon reduction road(below)[J]. Energy Conservation & Environmental Protection,2013(8):52-54.
- [44] 陈俊武,陈香生. 中国中长期碳减排战略目标初探(II)-中国煤炭消费过程的碳排放及减排措施[J]. 中外能源,2011,16(6):1-11.
Chen Junwu, Chen Xiangsheng. A preliminary study on china's long and medium-term strategic goals for reducing carbon emissions(II)-Carbon emissions during coal consumption in china and solutions[J]. Sino-Global Energy,2011,16(6):1-11.
- [45] 郭薇. 加强民用煤燃烧污染综合治理[N]. 中国环境报,2016-10-31(2).
Guo Wei. Strengthen the control of pollution caused by civil coal combustion[N]. China Environment News,2016-10-31(2).
- [46] 原煤洗选作用[J]. 能源与节能,2017(3):142.
Coal washing effect[J]. Energy and Energy Conservation,2017(3):142.
- [47] 马剑. 发展动力煤洗选加工促进节能减排[J]. 选煤技术,2011(4):1-5.
Ma Jian. Developing power coal preparation washing process to promote energy saving and emission reduction[J]. Coal Preparation Technology,2011(4):1-5.
- [48] 何龙,沙杰. 高硫煤破碎脱硫效果的分析研究[J]. 山西焦煤科技,2016,42(2):35-37.
He Long, Sha Jie. Analyze and research on crushing desulfurization effect of high sulfur coal[J]. Shanxi Coking Coal Science & Technology,2016,42(2):35-37.
- [49] 朱振武,嵇玉群. 煤炭洗选中有害痕量元素的迁移与脱除[J]. 煤炭学报,2016,41(10):2434-2440.
Zhu Zhenwu, Zhu Yuqun. Migration and removal of toxic trace elements during coal washing[J]. Journal of China Coal Society,2016,41(10):2434-2440.
- [50] 周琦. 低阶煤提质技术现状及完善途径[J]. 洁净煤技术,2016,22(2):23-30.
Zhou Qi. Status and improvement approach of low rank coal upgrading technologies[J]. Clean Coal Technology,2016,22(2):23-30.
- [51] 陶凤惠,曾鸣,施杰,等. 褐煤低温干馏及产物的利用[J]. 洁净煤技术,2014,20(1):78-82.
Tao Fenghui, Zeng Ming, Shi Jie, et al. Lignite low-temperature pyrolysis and utilization of its products[J]. Clean Coal Technology,2014,20(1):78-82.
- [52] 王文清. 浅谈褐煤提质的意义[J]. 山西化工,2012,32(3):44-46.
Wang Wenqing. A brief meaning of quality improvement of lignite[J]. Shanxi Chemical Industry,2012,32(3):44-46.
- [53] 刘建兵. 论型煤民用[J]. 山西科技,2011(3):142.
Liu Jianbing. Briquetted coal in civilian use[J]. Shanxi Science and Technology,2011(3):142
- [54] Chen C Y, Yeh K L, Aisyah R, et al. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review[J]. Bioresource Technology,2011,102(1):71-81.
- [55] 赵巍,李远才,万鹏,等. 影响型煤成型质量的工艺参数研究[J]. 煤炭科学技术,2012,40(6):121-124.
Zhao Wei, Li Yuancai, Wan Peng, et al. Study on technical parameters affected to coal briquette quality[J]. Coal Science and Technology,2012,40(6):121-124.
- [56] 吴运员. 速燃点火蜂窝煤:1693431[P]. 2005-11-09.
- [57] 安徽乾海环保科技有限公司. 半焦生产民用洁净型煤的方法及实现该方法的系统:104152204A[P]. 2014-11-19.
- [58] 夏碧华,赵飞翔,高建,等. 燃料半焦成型工艺研究[J]. 煤炭加工与综合利用,2017(5):83-94.
Xia Bihua, Zhao Feixiang Gao Jian, et al. Research on the semi-coke fuel molding process[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization,2017(5):83-94.
- [59] 徐婕,陈刚,郑化安,等. 半焦成型制清洁民用燃料产业化的可行性分析[J]. 煤化工,2016,44(6):28-31.
Xu Jie, Chen Gang, Zheng Huaan, et al. Feasibility analysis on the industrialization of moulded semi-coke as clean domestic fuel[J]. Coal Chemical Industry,2016,44(6):28-31.
- [60] 马力通,徐晓博,李珺. 生物质型煤产业关键技术与应用前景[J]. 山东化工,2013,42(1):26-29.
Ma Litong, Xu Xiaobo, Li Jun. Key technology and application prospects of bio-briquette industries[J]. Shandong Chemical Industry,2013,42(1):26-29.
- [61] 崔明,赵立欣,田宜水,等. 中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价[J]. 农业工程学报,2008,24(12):291-296.
Cui Ming, Zhao Lixin, Tian Yishui, et al. Analysis and evaluation on energy utilization of main crop straw resources in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008,24(12):291-296.
- [62] Alauddin Z A B Z, Lahijani P, Mohammadi M, et al. Gasification of lignocellulosic biomass in fluidized beds for renewable energy development: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2010,14(9):2852-2862.
- [63] Zeng X, Ma Y, Ma L. Utilization of straw in biomass energy in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2007,11(5):976-987.
- [64] Heinimö J, Junginger M. Production and trading of biomass for energy—an overview of the global status[J]. Biomass and Bioenergy,2009,33(9):1310-1320.
- [65] 何方,王华,胡建杭. 民用生物质复合蜂窝煤的燃烧特性研究[J]. 煤炭转化,2003,26(2):48-51.
He Fang, Wang Hua, Hu Jianhang. Combustion characteristic of biomass compound type of honeycomb briquette for civil use[J]. Coal Conversion,2003,26(2):48-51.
- [66] Qi J, Li Q, Wu J, et al. Biocoal briquettes combusted in a house-

- hold cooking stove: Improved thermal efficiencies and reduced pollutant emissions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(3):1886-1892.
- [67] 应莹, 武建军, 韩甲业, 等. 调质对钙基固硫剂固硫效果影响的 TG-FTIR 研究[J]. *能源技术与管理*, 2007(4):60-62.
Ying Ying, Wu Jianjun, Han Jiaye, et al. TG-FTIR study on the effect of on the variation characteristics of calcium based sulfur fixing agent on desulfurization [J]. *Energy Technology and Management*, 2007(4):60-62.
- [68] 武建军, 杨晓东, 韩甲业, 等. 添加剂抑制 CaSO₄ 高温分解的 TG-FTIR 研究-复合固硫剂[J]. *中国矿业大学学报*, 2005, 34(5):660-663.
Wu Jianjun, Yang Xiaodong, Han Jiaye, et al. Prohibition of CaSO₄ decomposition at high temperature by oxides/carbonates additives [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2005, 34(5):660-663.
- [69] 杨巧文, 赵昕伟, 陈思, 等. 煤炭燃烧中固硫技术的研究现状[J]. *新型工业化*, 2015(3):5-10.
Yang Qiaowen, Zhao Xinwei, Chen Si, et al. The research status of sulfur-fixing technology during coal combustion [J]. *The Journal of New Industrialization*, 2015(3):5-10.
- [70] 张双全. 煤及煤化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [71] Majchrowicz B B, Franco D V, Yperman J, et al. An Investigation into the changes of structure and reactivity during desulfurization of a bituminous coal [J]. *Fuel*, 1991, 70(3):434-441.
- [72] 华晓宇. 基于活性焦炭改性协同脱除二氧化硫和汞机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [73] 冯超, 李晓霜. 能净化燃煤烟气的民用炉灶: 2564890 [P]. 2003-08-06.
- [74] 吴碧君. 燃烧过程中氮氧化物的生成机理[J]. *电力环境保护*, 2004, 19(4):9-12.
Wu Bijun. The composing mechanism of NO_x in Combustion [J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2004, 19(4):9-12.
- [75] 刘汉涛. 煤粉燃烧氮析出规律及脱硝试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2005.
- [76] 刘金伟. 燃煤锅炉 NO_x 污染控制技术发展现状及建议[J]. *北方环境*, 2011(8):145-147.
Liu Jinwei. Present situation and development suggestions of NO_x pollution control technology for coal-fired boiler [J]. *Northern Environment*, 2011(8):145-147.
- [77] Nisbet I C T, LaGoy P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1992, 16(3):290-300.
- [78] 祁明峰. 煤燃烧过程中多环芳烃生成机理和控制实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [79] 傅钢. 煤燃烧过程中多环芳烃类有机污染物排放特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [80] 曹志勇. 燃烧过程中多环芳烃类污染物排放特性及其催化分解实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [81] 崔石, 石建稳, 何焱, 等. Pd/CeO₂-Al₂O₃ 对烟气中多环芳烃的催化氧化性能研究[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(11):2712-2717.
Cui Xing, Shi Jianwen, He Zhi, et al. The catalytic oxidation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in flue gas [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(11):2712-2717.
- [82] 姜岩, 杨颖, 张贤明. 典型多环芳烃生物降解及转化机制的研究进展[J]. *石油学报(石油加工)*, 2014, 30(6):1137-1150.
Jiang Yan, Yang Ying, Zhang Xianming. Review on the biodegradation and conversion mechanisms of typical polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2014, 30(6):1137-1150.
- [83] 王涛, 蓝慧, 田云, 等. 多环芳烃的微生物降解机制研究进展[J]. *化学与生物工程*, 2016, 33(2):8-14.
Wang Tao, Lan Hui, Tian Yun, et al. Research progress on microbial degradation mechanisms for polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2016, 33(2):8-14.
- [84] 慕俊泽, 张勇, 彭景吓. 多环芳烃光降解研究进展[J]. *安全与环境学报*, 2005, 5(3):69-74.
Mu Junze, Zhang Yong, Peng Jinghe. Advances in study on photolysis of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2005, 5(3):69-74.
- [85] Wey M Y, Chao C Y, Wei M C, et al. The influence of heavy metals on partitioning of PAHs during incineration [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, 77(1):77-87.
- [86] 王起超, 沈文国, 麻壮伟. 中国燃煤汞排放量估算[J]. *中国环境科学*, 1999, 19(4):318-321.
Wang Qichao, Shen Wenguo, Ma Zhangwei. The estimation of mercury emission from coal combustion in China [J]. *China Environmental Science*, 1999, 19(4):318-321.
- [87] 郑刘根, 刘桂建, 齐翠翠, 等. 中国煤中汞的环境地球化学研究[J]. *中国科学技术大学学报*, 2007, 37(8):953-963.
Zheng Liugen, Liu Guijian, Qi Cuicui, et al. Study on environmental geochemistry of mercury in chinese coals [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2007, 37(8):953-963.
- [88] 潘伟平, 张永生, 李文瀚, 等. 燃煤汞污染监测及控制技术[J]. *科技导报*, 2014, 32(33):57-60.
Pan Weiping, Zhang Yongsheng, Li Wenhan, et al. Mercury monitoring and controlling technologies for coal power plants [J]. *Science & Technology Review*, 2014, 32(33):57-60.
- [89] 赵毅, 马双忱, 华伟, 等. 电厂燃煤过程中汞的迁移转化及控制技术研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, 4(11):59-63.
Zhao Yi, Ma Shuangchen, Hua Wei, et al. Study on the control technique and the law of transport for mercury resulting from combustion of coal in power plant [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(11):59-63.
- [90] Huggins F E, Yap N, Huffman G P, et al. XAFS characterization of mercury captured from combustion gases on sorbents at low temperatures [J]. *Fuel Processing Technology*, 2003, 82(2):167-196.

- [91] Zeng H, Jin F, Guo J. Removal of elemental mercury from coal combustion flue gas by chloride-impregnated activated carbon[J]. Fuel, 2004, 83(1): 143-146.
- [92] 赵毅, 刘松涛, 马宵颖, 等. 改性钙基吸附剂的汞吸附特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(8): 50-54.
Zhao Yi, Liu Songtao, Ma Xiaoying, et al. Experimental investigation on mercury adsorption characteristics by modified Ca-based sorbent[J]. Proceeding of the CSEE, 2009, 29(8): 50-54.
- [93] 骆骏. 浸溴改性钙基/矿物吸附剂脱除烟气中汞的实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [94] 高洪亮, 王向宇, 周劲松, 等. 改性沸石对气态汞吸附的实验研究[J]. 化学工程, 2008, 36(4): 9-11.
Gao Hongliang, Wang Xiangyu, Zhou Jinsong, et al. Experimental study on mercury vapor adsorption with modified zeolite[J]. Chemical Engineering, 2008, 36(4): 9-11.
- [95] 王顺, 李多松, 田立江. 直流电晕氧化联合石灰浆液吸收烟气脱硫脱硝汞工艺[J]. 环境工程, 2014, 32(4): 59-62.
Wang Shun, Li Duosong, Tian Lijiang. Combined process of simultaneous removal of SO₂, NO_x and Hg from flue gas by oxidation over DC corona and absorption with lime slurry[J]. Air Pollution Control, 2014, 32(4): 59-62.
- [96] 徐飞. 脉冲放电电凝并结合碱液吸收烟气多种污染物协同脱除研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [97] Galbreath K C, Zygarricke C J, Tibbetts J E, et al. Effects of NO_x, α-Fe₂O₃, γ-Fe₂O₃, and HCl on mercury transformations in a 7-kW coal combustion system[J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86(4): 429-448.
- [98] Li Y, Murphy P D, Wu C Y, et al. Development of silica/vanadia/titania catalysts for removal of elemental mercury from coal-combustion flue gas[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(14): 5304-5309.
- [99] 毛健雄, 毛健全, 赵树民. 煤的清洁燃烧[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1-414.
- [100] 张军营, 魏凤, 赵永椿, 等. PM_{2.5} 和 PM₁₀ 排放的一维炉煤燃烧实验研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(S1): 257-260.
Zhang Junying, Wei Feng, Zhao Yongchun, et al. Experiment research of emissions of PM_{2.5} and PM₁₀ during coal combustion in one dimensional furnace[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(S1): 257-260.
- [101] 黄卫, 毕新慧, 张国华, 等. 民用蜂窝煤燃烧排放颗粒物的化学组成和稳定碳同位素特征[J]. 地球化学, 2014, 43(6): 640-646.
Huang Wei, Bi Xinhui, Zhang Guohua, et al. The chemical composition and stable carbon isotope characteristics of particulate matter from the residential honeycomb coal briquettes combustion[J]. Geochimica, 2014, 43(6): 640-646.
- [102] 李庆, 段雷, 蒋靖坤, 等. 我国民用燃煤一次颗粒物的减排潜力研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(16): 4408-4414.
Li Qing, Duan Lei, Jiang Jingkun, et al. Investigation of reducing potential for primary particulate emission from residential coal combustion in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(16): 4408-4414.

(上接第 52 页)

- [3] 程星星, 金保升, 钟文琪, 等. 加装 SCR 脱硝装置的锅炉系统数值模拟[J]. 热力发电, 2009, 38(6): 51-54, 91.
Cheng Xingxing, Jin Baosheng, Zhong Wenqi, et al. Numerical simulation of additionally installed SCR denitrification equipment[J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(6): 51-54, 91.
- [4] 张彦军, 高翔, 骆仲决, 等. SCR 脱硝系统入口烟道设计模拟研究[J]. 热力发电, 2007, 36(1): 15-17, 23.
Zhang Yanjun, Gao Xiang, Luo Zhongyue, et al. Simulation study on design of inlet flue duct for SCR denitrification cation system[J]. Thermal Power Generation, 2007, 36(1): 15-17, 23.
- [5] 陈莲芳, 周慎杰, 王伟. 选择性催化还原烟气脱硝反应器流场的模拟优化[J]. 动力工程学报, 2010, 30(3): 224-229.
Chen Lianfang, Zhou Shenjie, Wang Wei. Simulation optimization on flow field of SCR denitrification reactors[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(3): 224-229.
- [6] 刘小波, 陈冬林, 姜昌伟, 等. 燃煤锅炉选择性催化还原脱硝反应器结构的模拟优化[J]. 动力工程学报, 2010, 30(5): 384-389.
Liu Xiaobo, Chen Donglin, Jiang Changwei, et al. Simulation optimization of a SCR denitrification reactor for coal-fired boilers[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(5): 384-389.
- [7] 陈冬林, 刘欢, 邹婵, 等. 300 MW 燃煤锅炉烟气 SCR 脱硝系统流场的数值模拟与优化设计[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(1): 103-108.
Chen Donglin, Liu Huan, Zou Chan, et al. Numerical modeling and optimal designing of flow field for a 300 MW coal-fired boiler SCR deNO_x system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(1): 103-108.
- [8] 朱天宇, 李德波, 方艳艳, 等. 燃煤锅炉 SCR 烟气脱硝系统流场优化的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2015, 35(6): 481-488, 508.
Zhu Tianyu, Li Debo, Fang Qingyan, et al. Flow field optimization for scr system of coal-fired power plants[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(6): 481-488, 508.
- [9] 凌忠钱, 曾宪阳, 胡善涛, 等. 电站锅炉 SCR 烟气脱硝系统优化数值模拟[J]. 动力工程学报, 2014, 34(1): 50-56.
Ling Zhongqian, Zeng Xianyang, Hu Shantao, et al. Numerical simulation on optimization of scr denitrification system for coal-fired boilers[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2014, 34(1): 50-56.
- [10] 雷达, 金保升. 氨氮比不均匀性对电站 SCR 系统脱硝效率的影响[J]. 锅炉技术, 2010, 41(6): 72-74.
Lei Da, Jin Baosheng. Effect of ammonia nitrogen ratio on denitrification efficiency of SCR system in power station[J]. Boiler Technology, 2010, 41(6): 72-74.