

中国褐煤资源清洁高效利用现状

赵 奇^{1,2,3}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 煤化工分院,北京 100013;2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013;
3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室,北京 100013)

摘要:为实现褐煤资源清洁高效高值化利用,分析了我国褐煤资源的地域分布特征和基本煤质特性,系统梳理了褐煤主要利用方式,并对褐煤高效清洁利用方向进行展望。我国褐煤资源储量丰富且地域分布集中,其中内蒙古和云南省褐煤储量约占全国褐煤资源总量的 90%;与云南褐煤相比,内蒙古地区褐煤成煤年代较早,其水分、灰分、硫分均较低,褐煤蜡含量也较低。燃烧是当前褐煤主要利用方式。褐煤化工利用技术众多,除液化制燃料油技术在我国实现工业化,少有其他技术工业应用成熟。今后需深化褐煤燃烧技术研究,积极推进褐煤燃烧清洁高效化发展;科学规划褐煤化工利用途径,加速突破褐煤化工利用技术关键壁垒;加速配套环保技术研究,探索适于褐煤利用过程的环保工艺路径。

关键词:褐煤;地域分布;煤质特性;清洁高效利用

中图分类号:TQ536 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2018)02-0009-06

Clean and efficient utilization of lignite resources in China

ZHAO Qi^{1,2,3}

(1. Coal Chemistry Branch of China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China; 3. National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

Abstract: For realizing the clean, efficient and high-value utilization of lignite resources, the distribution and coal characteristics of lignite resources in China were analyzed, and the main utilization methods were overviewed systematically. It is found that, the reserves of lignite resources in China are abundant and the regional distribution is concentrated. The lignite reserves in Inner Mongolia and Yunnan province possessed about 90% of the total lignite resources in China. The lignite in Inner Mongolia is older than that in Yunnan, the moisture, ash, sulfur content and wax content of lignite in Inner Mongolia are lower than lignite in Yunnan. Combustion is still the main method for lignite utilization. There are numerous chemical utilization technologies, while there is less industrial application except for the liquefaction in China. In the future, the research on lignite combustion technology should be enhanced to promote the clean and efficient development. The utilization of lignite chemical industry scientifically and accelerating the breakthrough of key barriers should be focused. The research of environmental protection technology and exploring the suitable environmental technology should be developed.

Key words: lignite; regional distribution; coal characteristics; clean and efficient utilization

0 引 言

我国煤炭资源储量丰富且品种齐全,其中,褐煤保有储量约 1 300 亿 t, 占我国煤炭储量的 13%, 广泛分布在内蒙古、云南等地^[1]。褐煤多呈褐色或褐

黑色, 光泽暗淡或呈沥青光泽, 燃烧时冒白烟, 剖面有明显的木质痕迹, 易风化和自燃。近年来, 煤炭市场需求减弱, 我国煤炭产能严重过剩, 在国家加速推进供给侧结构改革的大环境下, 如何实现煤炭经济由传统粗放型向高效集约型转变, 同时提高煤炭经

收稿日期:2017-10-09;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2018.02.002

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0600304)

作者简介:赵 奇(1977—),男,河北保定人,副研究员,从事炼焦化学工业的研究。E-mail:826911314@qq.com

引用格式:赵奇.中国褐煤资源清洁高效利用现状[J].洁净煤技术,2018,24(2):9-14.

ZHAO Qi. Clean and efficient utilization of lignite resources in China[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(2): 9-14.

济效益,成为煤炭行业当前面临的主要问题。褐煤资源利用方面,燃烧发电仍是当前主要利用方式,同时全国部分褐煤大省积极开拓褐煤化工产业,一大批褐煤制油、褐煤制天然气、褐煤制化工产品等项目纷纷投产,如神华煤制油项目等。另外,褐煤提质、褐煤提取褐煤蜡、腐植酸等技术也被广泛研究。

面对诸多褐煤化工利用项目的投产和褐煤传统市场的衰退,一些争议性问题逐渐涌现,如褐煤化工产业是否可真正实现褐煤资源的高值高效化利用,利用过程中产生的环境问题是否已具备相应的解决措施,传统的褐煤利用方式是否应当逐渐退出市场等。鉴于此,笔者统计分析了我国褐煤资源的地域分布特征,研究了我国不同成煤时代的典型褐煤基本性质,通过论述褐煤燃烧、褐煤提质、褐煤液化等利用技术发展现状,探索适合我国当前发展需求的褐煤有效利用方式。

1 中国褐煤资源分布

1.1 中国褐煤资源地理分布

我国褐煤资源地域分布较集中,华北和西南储量最大。内蒙古自治区褐煤储量最多,占全国褐煤资源量的77%,云南省次之,其褐煤资源量约占全国褐煤资源总量的12.6%。黑龙江、辽宁、山东、吉林、广西等省(自治区)的褐煤储量也相对较多,分别占全国褐煤资源总量的2.7%、1.5%、1.3%、

0.8%和0.9%。此外,四川、贵州、新疆、甘肃、河北、河南、福建、广东、山西、安徽、浙江、青海等省也均有发现,其总量约占全国褐煤资源总量的2.7%。全国典型省(区)褐煤资源分布情况见表1。

表1 全国典型省(区)褐煤资源分布

Table 1 Distribution of lignite resources in typical provinces (regions) of China

省(区)别	占全国褐煤储量/%	主要成煤时代	占本省(区)煤炭储量/%
内蒙古	77.1	晚侏罗纪	47.4
云南	12.6	晚第三纪	65.7
黑龙江	2.6	早第三纪	8.5
辽宁	1.5	早第三纪	16.5
山东	1.3	早第三纪	4.3
吉林	0.9	早第三纪	8.0
广西	0.8	第三纪	35.8
其他	2.7	第三纪	—

1.2 主要含煤省份的褐煤资源分布

1) 内蒙古自治区褐煤资源

内蒙古自治区褐煤资源储量居全国首位,其褐煤资源主要集中在区东北部,主要成煤时代为晚侏罗纪,属年老褐煤。区内大型褐煤田众多,胜利煤田、扎赉诺尔煤田、伊敏河煤田等都是我国重要的褐煤煤田。区内典型褐煤田具体情况见表2。

表2 内蒙古自治区典型褐煤田具体情况

Table 2 Information of typical brown coal fields in Inner Mongolia

煤田	保有储量/亿t	成煤年代	地理位置及储存特点
胜利煤田 ^[2]	159.31	晚侏罗纪	锡林浩特北郊,煤田面积342 km ² ,煤层厚,储量大
霍林河煤田 ^[3]	130	晚侏罗纪-早白垩纪	通辽市与锡林格勒盟交界,煤田面积540 km ² ,煤层厚,埋藏浅(低磷低硫)
扎赉诺尔煤田	80	晚侏罗纪-早白垩纪	呼伦贝尔盟西部,煤田面积1 035 km ² ,中厚煤层(低灰分褐煤)
宝日希勒煤田	64	晚侏罗纪	海拉尔近郊,煤田面积690 km ² ,64%适宜露天开采
伊敏河煤田	50(40 m以上)	晚侏罗纪	呼伦贝尔盟鄂温克旗境内,煤田面积750 km ²
大雁煤田 ^[4]	30	晚侏罗纪-早白垩纪	呼伦贝尔盟鄂温克旗境内,煤田面积320 km ²
平庄元宝山田	15	晚侏罗纪	赤峰市东部,平庄区煤田面积612 km ² ,元宝山区煤田面积1 500 km ²

2) 云南省褐煤资源

云南省为我国西南地区褐煤储量最多的省份,省内约83个县、104个山间盆地蕴藏有褐煤,其中储量亿吨以上的褐煤田有12个,主要成煤年代为第三纪。云南省典型褐煤田情况见表3。

3) 其他地区褐煤资源

除内蒙古和云南外,东北三省也是褐煤资源较

集中的地区,区内较典型的褐煤田有沈北煤田、珲春煤田等。山东、广西、山西、河北等省也有褐煤分布。山东龙口煤田、广西百色煤田、南宁煤田等是我国知名褐煤田。山西褐煤多集中在临汾地区,河北省褐煤则主要分布在万全、沽县、丰宁县青石砬、曲阳县灵山、涞源县斗军湾、张北县城关、蔚县邦等地。部分典型褐煤田情况见表4。

表3 云南省典型褐煤田具体情况

Table 3 Information of typical brown coal fields in Yunnan province

煤田	保有储量/亿 t	成煤年代	地理位置及储存特点
昭通煤田	80.00	晚第三纪	昭通市,煤田面积 230 km ² ,煤层厚、埋藏浅、易剥易采、储量集中(水分大、灰分高)
小龙潭煤田	9.90	晚第三纪	红河哈尼族彝族自治州开远市,煤田面积 9.03 km ²
先锋煤田	2.97	晚第三纪	昆明市寻甸县先锋区普鲁乡境内,煤田面积 12.5 km ²

表4 其他省份典型褐煤田情况

Table 4 Information of typical brown coal fields in other provinces

煤田	保有储量/亿 t	成煤年代	地理位置及储存特点
沈北煤田 ^[5]	10.00	第三纪	沈阳市新城子区,煤田面积 250 km ² ,低硫低磷煤
珲春煤田 ^[6]	4.48	第三纪	吉林省东部,中、朝、俄交界地带,煤田面积约 460 km ²
舒兰煤田	3.29	—	吉林省舒兰县和永吉县境内,煤田面积 400 km ²

2 中国褐煤性质

褐煤变质程度介于泥炭与长焰煤之间,我国煤炭分类标准中,将褐煤分为褐煤 1 号(透光率 PM ≤ 30%)和褐煤 2 号(透光率 PM > 30% ~ 50%)。

为了解我国褐煤基本特性和合适的利用途径,笔者分别选取来自内蒙古、云南、黑龙江、山东、新疆、贵州等地不同矿区和不同煤层的 20 余个代表性褐煤样,对各煤样的元素特性和工艺特性进行分析,结合相关文献^[7-8]的统计数据,对分析结果进行了检验和校正。

2.1 元素分析

煤中主要元素包括碳、氢、氧、氮、硫等,C、H 与煤炭变质程度和发热量等工艺性质密切相关;氧含量可反映煤炭氧化程度;N 和 S 为有害元素,利用过程中易产生环境污染、毒害催化剂等,需要严格控制或脱除。我国不同成煤时代褐煤元素分析见表 5。

表5 不同成煤时代褐煤元素分析

Table 5 Proximate analysis of lignite with different age of coal formation

成煤时代	%			
	w(C _{daf})	w(H _{daf})	w(O _{daf})	w(N _{daf})
新近纪	68.41	5.67	22.99	1.54
古近纪	72.82	5.76	18.67	1.81
晚侏罗纪	72.30	5.10	20.33	1.09
早中侏罗纪	75.43	5.19	17.74	0.95

褐煤碳含量为煤中最低,我国年轻褐煤碳含量通常为 60% ~ 70%,年老褐煤碳含量通常为

70.0% ~ 76.5%。煤中氢含量在低变质程度阶段变化不明显。我国年轻褐煤氢含量多在 5.0% ~ 6.5%,而年老褐煤氢含量在 4.5% ~ 5.5%。我国褐煤氧含量在 15% ~ 30%。煤中氮含量通常较低,且与变质程度无关,我国褐煤氮含量为 1% ~ 2%。煤中硫含量主要受成煤沉积环境影响,我国华北区和东北区褐煤田多为陆相沉积,褐煤硫含量较低,如内蒙古霍林河、伊敏等地褐煤硫含量为 0.2% ~ 0.7%;西南区褐煤田多为海陆交互相沉积,褐煤硫含量较高,如云南褐煤的硫分多在 1% ~ 3%,甚至高达 3% 以上。

2.2 工艺特性

为分析褐煤利用途径,进一步对各煤样的工业分析、发热量、焦油含量、褐煤蜡含量、灰成分及煤灰熔融性指标进行分析,不同成煤时代褐煤的工业分析及发热量指标见表 6。

表6 不同成煤时代褐煤工业分析及发热量

Table 6 Proximate analysis and calorific value of lignite with different age of coal formation

成煤时代	工业分析/%			发热量/(MJ · kg ⁻¹)	
	M _{ad}	A _d	V _{daf}	Q _{gr,ad}	Q _{gr,daf}
新近纪	23.35	10.89	55.92	19.39	27.24
古近纪	10.56	23.26	49.68	20.57	29.63
晚侏罗纪	12.59	17.45	45.56	20.33	28.56
早中侏罗纪	9.23	10.55	38.60	25.71	29.54

1) 水分

我国褐煤水分很高,全水分通常为 10% ~

40%，而新近纪褐煤全水分最高可达30%~40%，云南可宝新近纪褐煤全水分甚至高达46.6%。水分高不仅会降低褐煤热值，增加运输成本，还导致利用过程能耗增加，褐煤干燥技术应运而生。

2) 灰分

我国褐煤灰分通常为20%~30%，内蒙古各矿区的褐煤普遍灰分较低，一般为10%~20%，而云南、黑龙江部分矿区褐煤灰分最高可达到40%~50%。

3) 挥发分

我国侏罗纪褐煤挥发分相对较低，通常<50%，最低为37%；新近纪褐煤挥发分多为50%~60%；古近纪褐煤挥发分随岩相组成不同而有较大差异。

4) 发热量

我国早、中侏罗纪褐煤的发热量较高， $Q_{gr,daf}$ 为29.54 MJ/kg，新近纪褐煤发热量较低， $Q_{gr,daf}$ 为27.24 MJ/kg。我国褐煤平均发热量 $Q_{gr,daf}$ 为28.71 MJ/kg。

5) 灰成分及灰熔融性

煤炭灰成分及灰熔融性指标决定其在燃烧、气化等利用过程中能否顺利结渣和排渣，因此了解褐煤的灰成分及灰熔融性对判断褐煤的适用途径至关重要。我国不同成煤时代褐煤的灰成分见表7。

表7 不同成煤时代褐煤灰成分

Table 7 Ash composition of lignite with different age of coal formation

成煤时代	煤灰成分含量/%			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
新近纪	39.31	18.25	9.61	16.17
古近纪	48.15	28.10	7.45	5.99
晚侏罗纪	45.57	16.12	11.52	12.44
早中侏罗纪	32.40	13.67	12.33	17.88

由表7可知，不同成煤时代褐煤的灰成分不同，如古近纪褐煤灰成分中，Al₂O₃ 含量明显偏高，而CaO含量较低；早中侏罗纪褐煤灰成分中，Al₂O₃ 含量偏低，而CaO含量较高。

有学者就我国不同地区的140多个褐煤灰熔融性进行分析，其结果与此次试验数据综合整理后结果见表8。可知，内蒙古地区典型褐煤的煤灰软化温度(ST)<1 250℃，变形温度(FT)≤1 300℃；而云南地区典型褐煤，ST>1 450℃，FT>1 500℃。

表8 我国典型褐煤ST、FT温度分布情况

Table 8 Temperature distribution of ash fusibility of typical Chinese lignite

煤灰熔融性 温度/℃	ST		FT	
	样品 数/个	占总样品 比例/%	样品 数/个	占总样品 比例/%
>1 500	15	21.23	16	22.54
1 350~1 500	14	19.72	16	22.54
1 250~1 350	20	28.17	25	35.21
1 150~1 250	18	25.35	12	16.90
≤1 150	4	5.63	2	2.82

6) 焦油

我国褐煤热解焦油产率通常为6%~15%。褐煤热解焦油产率通常作为评判其是否适合液化及热解提油利用的主要依据，同时为其他工艺应用提供指导。

7) 褐煤蜡

褐煤蜡是由含蜡质的煤经溶剂萃取而得的矿物蜡，其广泛应用于不同工业领域。褐煤中褐煤蜡含量与挥发分、氢含量呈正相关关系，也与煤岩显微组分密切相关。我国褐煤蜡含量相对较低，侏罗纪褐煤可燃基蜡含量为0.2%~1.0%，而新生代褐煤蜡含量最高可达8%~9%，平均2.5%~5.5%。

3 褐煤的利用

3.1 褐煤燃烧

燃烧是我国褐煤目前主要利用方式，我国褐煤约90%用于发电和工业锅炉燃料。根据褐煤性质，我国电站锅炉多采用煤粉锅炉，少量采用旋风炉，流化床燃烧技术也正逐渐推广。此外，褐煤富氧燃烧、褐煤水煤浆燃烧、褐煤与生物质共燃烧等技术被广泛研究^[9-10]，研究方向涉及燃烧化学反应特性、污染物排放、锅炉热效率等方面。也有学者对褐煤用于高炉喷吹的可行性进行研究，王海洋等^[11]研究发现内蒙古某地褐煤用于高炉喷吹时添加比例可达40%。此外，有学者还研究了褐煤燃烧过程中砷、汞等有害元素的扩散规律^[12]。

3.2 褐煤提质

1) 干燥脱水技术

褐煤干燥脱水技术分蒸发脱水和非蒸发脱水2类。蒸发脱水常用介质有热烟道气、过热蒸汽、热油等，蒸汽管式干燥、滚筒干燥、蒸汽流化床干燥、床混式干燥、蒸汽空气联合干燥、振动混流干燥、热油干

燥等均为蒸发脱水技术。其中蒸汽管式干燥技术应用最广,但过程能耗高,且易产生大量尾气,其他蒸发干燥技术效果一般,适用性较低^[13-14]。

非蒸发脱水通过改变褐煤结构特性来脱除褐煤中氧及部分水,热能脱水、机械热挤压脱水、溶剂萃取脱水是常见非蒸发脱水工艺。美国 K-Fuel 工艺是较典型的热能脱水工艺,目前已进入工业应用阶段,该技术能耗虽低,但脱水率也较低;德国热压脱水工艺(MTE)是典型机械热挤压脱水,该工艺融合了机械力与热法脱水优点,流程简单,条件温和,适合与电厂集成;日本学者先后利用四氢萘、二甲醚等溶剂进行脱水,该技术脱水效率较高,且能耗仅为传统技术的1/2。

2) 成型提质技术

褐煤成型提质技术分无黏结剂成型技术和有黏结剂成型技术^[15]。无黏结剂成型方面,热压成型技术目前已实现工业化生产,典型的技术有德国无黏结剂冲压成型技术、神华-中国矿业大学(北京)的褐煤热压提质技术(HPU)、澳大利亚“冷干工艺”、无黏合剂煤块制作技术(BCB)等;黏结剂成型方面,常用黏结剂有生物质、油品、黏土等,该技术适用于变质程度较高的褐煤。我国山东临沂地区曾建设一型煤示范厂。

3) 热解提质技术

德国 Lurgi-squel-gas 低温热解工艺(L-S)、美国低阶煤提质联产油工艺(LFC)、澳大利亚流化床快速热解工艺;国内方面,大连理工大学固体热载体法快速热解工艺、中国科学院过程工程研究所“煤拔头”工艺以及近年来煤炭科学技术研究院有限公司开发的小粒径低阶煤热解工艺等都是典型的适用于低阶煤的热解工艺^[16-17]。此外,有学者还利用太阳能进行煤炭热解工艺。低阶煤热解工艺众多,但大多数技术未解决热解粉尘问题,目前尚无以褐煤为原料的热解工业应用。

3.3 褐煤化工利用

褐煤气化、褐煤液化、褐煤溶剂抽提、褐煤制吸附剂材料等是研究较多的褐煤化工利用技术^[18]。

适于褐煤气化的技术有壳牌气化技术、航天炉气化技术(HT-L)、加压气流床气化技术(GSP)技术等,大唐多伦煤制烯烃项目、神华宁煤煤制甲醇项目均是以褐煤气化为源头的煤化工利用项目。褐煤液化分直接液化和间接液化2类,神华集团煤制油项目即为褐煤直接液化项目,煤炭科学技术研究院

有限公司长期致力于煤直接液化技术研究,并为神华集团煤制油项目的顺利打通提供了技术保障。中国科学院山西煤炭化学研究所间接液化为主要研究方向,通过溶剂抽提,可获得腐植酸、褐煤蜡以及无灰煤等产品。褐煤碳化吸附剂可应用于食品、医药、工业废气、废水治理等方面,但受常规抽提溶剂毒性较大、操作复杂,吸附剂制备技术不成熟等因素影响,目前尚无大规模工业应用实例。

4 结论与展望

1) 深化褐煤燃烧技术研究,积极推进褐煤燃烧清洁高效化发展。未来较长时间内,燃烧发电仍是我国褐煤主要利用途径,因此,需积极研究褐煤清洁高效燃烧技术,提高燃烧过程中煤炭利用效率,同时有效控制煤中有害元素、烟尘、VOCs等污染物的燃烧扩散和排放,实现褐煤燃烧利用途径多样化,燃烧过程清洁化和高效化。

2) 科学规划褐煤化工利用途径,加速突破褐煤化工利用关键技术壁垒。工业成熟的褐煤化工利用技术屈指可数,且相关化工产品市场需求不稳定,利用过程损耗及污染物排放情况尚不清楚,因此,一方面应根据资源赋存特征及市场需求,科学规划褐煤化工利用途径,另一方面需加速突破技术壁垒,解决褐煤提质利用过程中粉尘量大、油尘分离难,常规褐煤抽提溶剂毒性大、抽提操作流程复杂,化工转化过程副产物再利用等技术难题,努力拓宽褐煤化工利用方向,扩大褐煤应用市场。

3) 加速配套环保技术研究,探索适于褐煤利用过程的环保工艺路径。环保要求日益趋严,传统褐煤利用工艺很难达到相关排放指标。因此,需加强相关环保技术与设备的研发工作,积极探索褐煤选矿及其他褐煤利用前净化技术,推进褐煤利用过程中污染物释放规律及相关控制技术研究工作,扩大烟尘治理、VOCs治理等技术在褐煤利用企业的应用范围,努力建设环境友好型褐煤产业。

参考文献(References):

- [1] 赵振新,朱书全,马名杰,等.中国褐煤的综合优化利用[J].洁净煤技术,2008,14(1):28-31.
ZHAO Zhenxin, ZHU Shuquan, MA Mingjie, et al. Comprehensive and optimal utilization of lignite in China[J]. Clean Coal Technology, 2008, 14(1): 28-31.
- [2] 王月.胜利煤田褐煤用于气化型煤吸烟研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2013:1-5.

- WANG Yue. Research of Shengli coalfield lignite preparing for gasification briquette [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2013:1-5.
- [3] 白祥玉. 霍林河煤田聚煤特征和控煤因素分析[J]. 露天开采技术, 2014(3):210-212.
- [4] 刘子春, 张良, 温吉洋. 大雁煤田沉积环境与聚煤规律研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2008(3):24-25.
- [5] 田忠富, 胡忠娟, 孔玲珍. 沈北煤田煤层气含气性特征[J]. 煤炭技术, 2011, 30(1):136-137.
- TIAN Zhongfu, HU Zhongjuan, KONG Lingzhen. Gas-bearing properties of coal-bed gas in Shenbei coalfield[J]. Coal Technology, 2011, 30(1):136-137.
- [6] 温玉娥. 珲春煤田聚煤环境浅析[J]. 西部探矿工程, 2014(9):159-160.
- [7] 傅雪海, 路露, 葛燕燕, 等. 我国褐煤资源及其物性特征[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(10):104-107.
- FU Xuehai, LU Lu, GE Yanyan, et al. China lignite resources and physical features [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(10):104-107.
- [8] 王世昌. 中国典型褐煤的挥发分发热量分布规律分析[J]. 内蒙古电力技术, 2011, 29(6):9-13.
- WANG Shichang. Analysis on distribution regularities for volatile constituent calorific value of typical lignituous coal in China [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2011, 29(6):9-13.
- [9] 鄢晓忠, 邱靖, 尹艳山, 等. 褐煤中官能团对其燃烧特性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(4):169-173.
- YAN Xiaozhong, QIU Jing, YIN Yanshan, et al. Effects of functional groups in lignite on its combustion characteristics[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4):169-173.
- [10] 任海飞. 集成预干燥褐煤富氧燃烧发电系统的技术经济性分析[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2013:5-8.
- [11] 王海洋, 张建良, 王广伟, 等. 褐煤用于高炉喷吹的可行性[J]. 钢铁研究学报, 2017, 29(1):39-43.
- WANG Haiyang, ZHANG Jianliang, WANG Guangwei, et al. Feasibility research of brown coal injection for blast furnace[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2017, 29(1):39-43.
- [12] 王馨, 姚多喜, 冯启言. 褐煤燃烧过程中重金属元素分布特征及其对环境影响评价[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5):1389-1395.
- WANG Xin, YAO Duoqi, FENG Qiyuan. Distribution characteristics and environmental impact of heavy metals during lignite combustion[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(5):1389-1395.
- [13] 杜倩. 褐煤提质工艺及脱水机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014:6-9.
- [14] 曲洋. 宝日褐煤提质过程热碎特性研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016:1-4.
- [15] 邵俊杰, 何立新. 褐煤提质工业性试验项目的总结和思考[J]. 中国煤炭, 2014, 40(5):101-104.
- SHAO Junjie, HE Lixin. Summary and reflection on industrial pilot project of lignite upgrading[J]. China Coal, 2014, 40(5):101-104.
- [16] 王少华. 褐煤提质转化现状及途径探讨[J]. 煤炭加工与综合利用, 2014(3):59-61.
- [17] 邵徇. 褐煤提质技术现状与发展方向展望[J]. 煤质技术, 2016(4):12-15.
- SHAO Xun. The technical situation and development prospect of lignite upgrading technology [J]. Coal Quality Technology, 2016(4):12-15.
- [18] 曹咸春. 褐煤的综合利用及基础研究发展现状[J]. 矿山机械, 2015, 43(6):4-7.
- CAO Xianchun. Current status of comprehensive utilization and fundamental research of lignite[J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(6):4-7.