

潮湿褐煤干法分选实验研究

韦鲁滨 李大虎 朱学帅 刘鹏 张瑜

(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院 北京 100083)

摘要: 为提高空气重介质流化床对入料煤水分的适应性,以热气代替常温空气改善流化床对褐煤的分选效果。采用可能偏差 E_p 为评价指标,研究了热态空气重介质流化床的干燥温度、干燥时间和风量对褐煤分选效果的影响。结果表明:干燥温度为 30~50 °C 时,干燥温度越高 E_p 越低;干燥时间为 1~5 min 时,干燥时间越长 E_p 越低,超过 3 min 后 E_p 降低缓慢;风量为 8~12 m³/h 时,风量增大 E_p 先降低后升高。煤样表面水分越高,干燥温度、干燥时间和风量变化对 E_p 影响越显著。表面水分 1% 的褐煤,干燥温度 50 °C、干燥时间 5 min、风量 10 m³/h 时,褐煤分选效果最好, E_p 可达到 0.022 g/cm³。实验证明热态空气重介质流化床可用于分选潮湿褐煤。

关键词: 褐煤;干法分选;空气重介质;热态流化床;可能偏差

中图分类号: TD94 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2014)06-0005-04

Experimental study of dry preparation of moist lignite

WEI Lubin, LI Dahu, ZHU Xueshuai, LIU Peng, ZHANG Yu

(School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve the adaptability of air dense medium fluidized bed on different coal moisture, the hot air was blown to the fluidized bed instead of the air at ordinary temperature, so the lignite can be separated efficiently. The effects of drying temperature, drying time and air flow in fluidized bed were investigated with ecart probable moyen E_p . The results showed that when the drying temperature ranged from 30 °C to 50 °C, the higher the drying temperature, the lower the value of E_p . When the drying time were between 1 minute and 5 minutes, the longer the drying time, the lower the value of E_p , and E_p decreased slowly after drying 3 minutes. When the air speed were between 8 m³/h and 12 m³/h, E_p reduced first, then rose with air speed increased. The higher surface moisture of the coal sample, the more significant influence of drying temperature and time, air volume on E_p . The E_p was 0.022 g/cm³ when the drying temperature was 50 °C, the drying time was 5 minutes and the air flow for coal sample of 1% surface moisture were 10 m³/h.

Key words: lignite; dry preparation; air dense medium; hot fluidized bed; ecart probable moyen E_p

0 引言

褐煤可替代石油、天然气等做能源和化工原料,是重要的化石燃料^[1]。中国褐煤资源丰富,已探明褐煤保有储量约 2000 亿 t^[2],主要分布在中西部缺水地区,其中以内蒙古东部地区最多,约占全国褐煤总量的 3/4^[3-4]。褐煤高水分、低热值、易风化、易自燃,中国少量开采的褐煤 90% 未经分

选加工即用于电厂发电,不仅利用率低、热值低、污染大,还有安全隐患^[5]。褐煤遇水易泥化,难以采用常规的湿法分选方法,亟待开发适用于潮湿易泥化褐煤的干法分选技术。空气重介质流化床干法分选技术具有分选精度高,分选过程不用水,生产和投资成本低等优点^[6-7],成为近年来选煤领域研究的热点之一。印度国家科学与技术研究院在实验室研究的基础上,建立了 600 kg/h 中试实

收稿日期: 2014-06-29; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2014.06.002

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174214); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2012CB214904); “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAA04B02); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120023110017)

作者简介: 韦鲁滨(1962—),男,江苏扬州人,教授,博士生导师,从事矿物加工理论、工艺与设备研究。E-mail: wlb@cumt.edu.cn

引用格式: 韦鲁滨,李大虎,朱学帅,等.潮湿褐煤干法分选实验研究[J].洁净煤技术,2014,20(6):5-8,22.

WEI Lubin, LI Dahu, ZHU Xueshuai et al. Experimental study of dry preparation of moist lignite[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(6): 5-8, 22.

验系统。加拿大、南非等亦开展实验室研究工作,主要围绕设备结构^[8-9]、加重质流化特性^[10-11]、分选性能^[12-13]、入料粒度^[14-15]、操作参数^[16-17]等进行间歇性实验室研究。中国矿业大学自20世纪80年代以来,开展了空气重介质流化床技术研究工作,已经过实验室、半工业、工业化实验,正在进行商业化推广应用^[18-20]。中国矿业大学(北京)针对空气重介质流化床工业应用中存在的问题,开展了新型空气重介质振动流化床相关研究^[21-22]。空气重介质流化床对原煤水分要求苛刻,入料煤水分对分选效果有重要影响,尤其是褐煤孔隙结构发达、外在水分较高^[23-24],使加重质黏附量大,流化床中易累积水分,造成加重质流化特性恶化,分选效果差,介耗增加^[25-26]。为此对煤样进行干燥脱水,成为空气重介质流化床分选的前提之一,杨国华等^[27]采用选前干燥煤样再分选方法解决褐

煤水分问题。为简化工艺过程,笔者采用热态空气重介质流化床,在分选过程中对潮湿褐煤进行干燥分选一体化处理,研究了干燥温度、干燥时间、风量及煤样表面水分对褐煤分选效果的影响,以期实现潮湿褐煤的高效干法分选。

1 实验条件

1.1 实验样品

采用0.3~0 mm 磁铁矿粉作为加重质,主导粒级0.074~0.25 mm,占磁铁矿粉总量的53.61%,真密度4.166 g/cm³,堆密度2.345 g/cm³。

入料煤样为25~13 mm 褐煤,表面水分3%~1%,采用饱和水蒸气环境下人工增湿方法改变空气干燥煤样表面水分。煤样浮沉实验结果见表1。由表1可知,分选密度为1.70 g/cm³时,分选密度 $\delta \pm 0.1$ 含量为9.22%,煤样属易选煤。

表1 25~13 mm 煤样浮沉实验结果

密度级/ (g·cm ⁻³)	产率/%	灰分/%	浮物累计/%		沉物累计/%		$\delta \pm 0.1$ 含量	
			产率	灰分	产率	灰分	密度/(g·cm ⁻³)	产率/%
<1.30	7.73	5.58	7.73	5.58	100.00	34.70	1.30	48.11
1.30~1.40	29.75	8.41	37.48	7.83	92.27	37.14	1.40	51.56
1.40~1.50	10.41	17.14	47.89	9.85	62.52	50.81	1.50	20.67
1.50~1.60	5.69	20.50	53.58	10.98	52.11	57.54	1.60	10.49
1.60~1.70	2.48	33.57	56.06	11.98	46.42	62.08	1.70	9.22
1.70~1.80	4.70	39.43	60.76	14.10	43.94	63.69	1.80	17.67
1.80~2.00	18.14	51.13	78.90	22.62	39.24	66.60	1.90	23.28
>2.00	21.10	79.89	100.00	34.70	21.10	79.89		
合计	100.00	34.70						

1.2 实验装置

实验所用热态空气重介质流化床分选装置由动力供风系统、分选系统、加热系统以及检测系统组成(图1)。

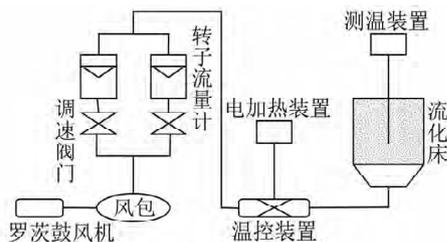


图1 热态空气重介质流化床示意

分选装置显著特征为:以热气代替常温空气给入流化床,使加重质流化的同时对入料进行干燥,以达到提高分选效果的目的。

1.3 实验方法

实验采用多孔板气体分布器作为空气重介质流化床布风装置,配以合适层数的滤布以使床层达到良好流化状态。选取一定质量表面干燥的煤样,进行人工增湿后,立即放入流化床中,在设定条件下进行分选实验。将人工附加水质量占人工增湿前煤样的质量分数定义为煤样表面水分。研究干燥温度(30、40、50℃)、干燥时间(1、3、5 min)、风量(8、10、12 m³/h)及煤样表面水分(1%、2%、3%)对褐煤分选效果的影响。实验采用可能偏差 E_p 为分选效果评价指标, E_p 越小,分选精度越高。

2 结果与讨论

2.1 干燥温度对分选效果的影响

干燥温度对热态空气重介质流化床分选效果影

响显著。风量 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 的条件下,分别对不同表面水分的煤样进行分选,分选时间均为 3 min ,研究干燥温度对热态空气重介质流化床分选效果的影响,结果如图2所示。由图2可知,干燥温度为 $30 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,随着干燥温度的升高, E_p 显著降低,分选效果变好;煤样表面水分越高,随干燥温度升高, E_p 降低越快。表面水分 1% 的褐煤在风量 $10 \text{ m}^3/\text{h}$,分选时间 3 min ,干燥温度 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,分选效果最好, E_p 达到 $0.022 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

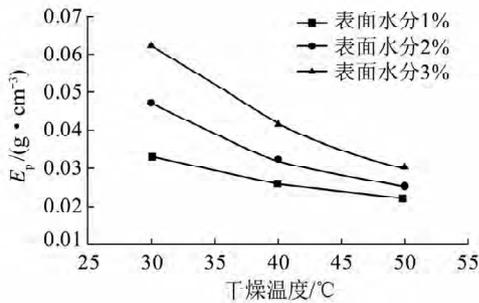


图2 干燥温度对分选效果的影响

干燥温度对热态空气重介质流化床分选效果的影响主要体现在:①干燥温度决定气相(热风)与固相(煤粒)间通过对流和传导方式进行的热量传递速率,间接影响煤粒表面水分蒸发速率;②已经黏附在煤粒表面的加重质颗粒脱落时会带走部分水分,温度升高加速加重质的脱落,使煤粒自身携带水分快速减少,加重质向煤粒表面黏附的趋势降低。干燥温度较低($30 \text{ }^\circ\text{C}$)时,气固两相间温度场梯度较小,水分蒸发缓慢,煤粒表面水分高,加重质黏附到煤粒上,严重影响煤粒按自身密度分层的趋势,分选效果较差。干燥温度较高($50 \text{ }^\circ\text{C}$)时,煤粒表面水分蒸发速率加快,表面水分大大减少,加重质颗粒与煤粒的黏附相对减少,煤粒更接近按自身密度不同而分层的理想过程。

2.2 干燥时间对分选效果的影响

干燥时间对热态空气重介质流化床分选效果影响很大。风量 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 的条件下,分别对不同表面水分的煤样进行分选,干燥温度均为 $40 \text{ }^\circ\text{C}$,研究干燥时间对分选效果的影响,结果如图3所示。由图3可知,干燥时间为 $1 \sim 3 \text{ min}$ 时,随着干燥时间的增加, E_p 逐渐减小,分选效果变好;干燥时间为 $3 \sim 5 \text{ min}$ 时, E_p 降低缓慢,分选效果改善不明显。表面水分 1% 的褐煤在风量 $10 \text{ m}^3/\text{h}$,干燥温度 $40 \text{ }^\circ\text{C}$,干燥时间 5 min 时,分选效果最好。煤样表面水分越高,

干燥时间对 E_p 的影响越显著。

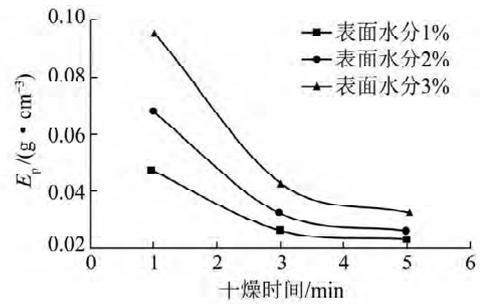


图3 干燥时间对分选效果的影响

干燥时间对分选效果的影响主要体现在:①干燥温度不变,气相(热风)与固相(煤粒)间温度场梯度分布基本保持不变,热对流和热传导方式进行的能量传递速率恒定,干燥时间由 1 min 增至 5 min ,延长了传递时间,增加煤粒表面热能累积,促进水分蒸发,黏附在煤粒表面的加重质减少,分选效果变好;②干燥时间延长,煤粒与煤粒之间,加重质颗粒与煤粒之间的碰撞次数增加,动量传递增加^[28],使得黏附在煤粒表面的加重质脱落,煤中轻、重产物按密度分离较完全,分选效果变好。

2.3 风量对分选效果的影响

风量是热态空气重介质流化床的重要影响因素。干燥温度 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,分别对不同表面水分的煤样进行分选,分选时间均为 3 min ,研究风量对分选效果的影响,结果如图4所示。

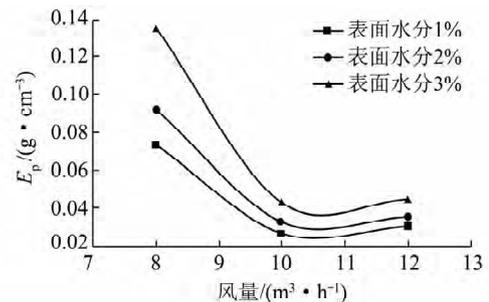


图4 风量对分选效果的影响

由图4可知,随着风量的增加, E_p 先降低后升高。风量为 $8 \sim 10 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,随着风量的增加, E_p 逐渐减小;风量为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, E_p 为 $0.03 \text{ g}/\text{cm}^3$,分选效果较好;风量为 $10 \sim 12 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, E_p 出现增加趋势,分选效果开始变差。煤样表面水分越高,风量对 E_p 的影响越显著。在风量为 $8 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, E_p 都在 $0.07 \text{ g}/\text{cm}^3$ 以上,分选效果很差。表面水分 1% 的褐煤在分选时间 3 min ,干燥温度 $40 \text{ }^\circ\text{C}$,风量 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,分选效果最好。

风量对分选效果的影响主要体现在:①风量增大,加重质颗粒与煤粒之间动量传递增强,加重质脱落几率增大,分选效果变好;②风量与床层密度关系密切。风量为 $8\text{ m}^3/\text{h}$ 时,气速较小,加重质流动性差,床层密度分布不均匀^[29],分选效果不理想。风量增加,床层流动性改善且均匀,有利于煤样分选;风量为 $10\text{ m}^3/\text{h}$ 时,床层均匀稳定,床层密度接近分选密度,此时分选效果最好;风量继续增大到 $12\text{ m}^3/\text{h}$,流化床内加重质颗粒返混严重,运动错配效应增加^[30],不利于分选。

3 结 论

干燥温度、干燥时间和风量是影响潮湿褐煤在热态空气重介质流化床中分选效果的重要因素,其合理选取应根据煤样表面水分确定。

1) 干燥温度为 $30\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ 时,随着干燥温度的升高,煤样表面水分迅速减少,加重质颗粒与煤粒的黏附相对减少, E_p 显著降低,分选效果变好。表面水分1%的褐煤在风量 $10\text{ m}^3/\text{h}$,分选时间3 min,干燥温度 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 时,分选效果最好, E_p 达到 $0.022\text{ g}/\text{cm}^3$ 。

2) 干燥时间为 $1\sim 3\text{ min}$ 时,随着干燥时间的增加, E_p 逐渐减小,分选效果变好;干燥时间为 $3\sim 5\text{ min}$ 时, E_p 降低缓慢,分选效果改善不明显。干燥时间5 min时,分选效果最好。

3) 随着风量的增加, E_p 先降低后升高。风量为 $8\sim 10\text{ m}^3/\text{h}$ 时,随着风量的增加, E_p 逐渐减小;风量为 $10\text{ m}^3/\text{h}$ 时, E_p 达到 $0.03\text{ g}/\text{cm}^3$,分选效果较好;风量为 $10\sim 12\text{ m}^3/\text{h}$ 时, E_p 出现增加趋势,分选效果开始变差。风量为 $10\text{ m}^3/\text{h}$ 时,分选效果最好。

参考文献:

- [1] 白向飞. 中国褐煤及低阶烟煤利用与提质技术开发[J]. 煤质技术 2010(6):9-11.
- [2] 邓晓阳. 我国高灰高水易泥化褐煤的分选工艺[J]. 煤炭加工与综合利用 2011(3):1-4.
- [3] 白中华,赵玉冰,黄海东,等. 中国褐煤提质技术现状及发展趋势[J]. 洁净煤技术 2013,19(6):25-29.
- [4] 陶建红. 褐煤干燥特性研究[J]. 洁净煤技术 2010,16(4):67-69.
- [5] 刘炯天. 关于我国煤炭能源低碳发展的思考[J]. 中国矿业大学学报:社会科学版 2011,40(1):6-12.
- [6] 韦鲁滨,朱学帅,马力强,等. 褐煤空气重介质流化床干法分选与干燥一体化研究[J]. 煤炭科学技术 2013,41(6):125-128.
- [7] LUO Zhen-fu, FAN Mao-min, ZHAO Yue-min, et al. Density-dependent separation of dry fine coal in a vibrated fluidized bed [J]. Powder Technology 2008,187(2):119-123.
- [8] Houweligen J A, De Jong T P R. Dry cleaning of coal: review fundamentals and opportunities [J]. Geologica Belgica 2004,7(3/4):335-343.
- [9] Eveson G F. Dry cleaning of large or small coal or other particulate materials containing components of different specific gravities: US, 3367501 [P]. 1968-06-26.
- [10] Choung J, Mak C, Xu Z. Fine coal beneficiation using an air dense medium fluidized bed [J]. Coal Preparation 2006,26(1):1-15.
- [11] Mohanta S, Daram A B, Chakraborty S, et al. Characteristics of minimum fluidization velocity for magnetite powder used in an air dense medium fluidized bed for coal beneficiation [J]. Particle and Particle Systems Characterization 2012,29(4):228-237.
- [12] Sahu A K, Tripathy A, Biswal S K, et al. Stability study of an air dense medium fluidized bed separator for beneficiation of high-ash Indian coal [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization 2011,31(3/4):127-148.
- [13] Macpherson S A, Iveson S M, Galvin K P. Density-based separation in a vibrated reflux classifier with an air-sand dense-medium; tracer studies with simultaneous underflow and overflow removal [J]. Minerals Engineering 2011,24(10):1046-1052.
- [14] Mohanta S, Chakraborty S, Meikap B C. Influence of coal feed size on the performance of air dense medium fluidized bed separator used for coal beneficiation [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research 2011,50(18):10865-10871.
- [15] Firdaus M, O'Shea J P, Oshitani J, et al. Beneficiation of coarse coal ore in an air-fluidized bed dry dense-medium separator [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2012,32(6):276-289.
- [16] Mak C, Choung J, Beauchamp R, et al. Potential of air dense medium fluidized bed separation of mineral matter for mercury rejection from Alberta sub-bituminous coal [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization 2008,28(2):115-132.
- [17] Mohanta S, Chakraborty S, Meikap B C. Optimization process of an air dense medium fluidized bed separator for treating high-ash non-coking Indian coal [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review 2013,34(4):240-248.
- [18] 唐利刚,赵跃民,骆振福,等. 宽粒级加重质的流化特性[J]. 中国矿业大学学报 2009,38(4):509-514.
- [19] Zhao Y M, Luo Z F, Chen Z Q, et al. The effect of feed-coal particle size on the separating characteristics of a gas-solid fluidized bed [J]. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 2010,110(5):219-224.
- [20] 张翠玉. 空气重介质流化床流化特性及密度梯度分布研究[J]. 洁净煤技术 2014,20(3):12-15.
- [21] 曾鸣,魏汝晖,梁世红,等. 新型干法分选机分选过程影响因素分析[J]. 煤炭学报 2011,36(5):845-848.
- [22] 韦鲁滨,梁世红,魏汝晖,等. 新型空气重介质流化床分选特性研究[J]. 中国矿业大学学报 2011,40(5):733-736.

(下转第22页)

号煤 > 1 号煤 结合不同配煤比例水煤浆浆体性能, 考虑运行成本及气化反应效率等多种因素, 确定较好配比方案为: 1 号、2 号煤质量比 = 1: 1 或 1 号、3 号煤质量比 2: 1。以上 2 种配煤方案在工业应用中, 制浆浓度为 53% ~ 55%, 煤质分析指标及水煤浆浓度均达到最初设计值。

表4 不同配煤比例水煤浆浆体性能

配煤比例	实测浓度/%	表观黏度/(mPa·s) (100 s ⁻¹ , 25 °C)	流动性	稳定性 (8 h 后)
w(1号): w(2号) = 2: 1	50.25	927	B	B
	51.37	1032	B	B
	52.53	1149	B	B
	53.49	1280	B-	A
w(1号): w(2号) = 1: 1	51.60	919	B	B
	52.45	1046	B	B
	53.12	1158	B	B
	54.38	1274	B-	A
w(1号): w(3号) = 2: 1	52.61	980	B	B
	53.17	1059	B	B
	54.21	1137	B	B
	55.52	1289	B-	A
w(1号): w(3号) = 1: 1	53.42	931	B	B
	54.37	1029	B	B
	55.45	1176	B	B
	56.62	1255	B-	A

3 结 论

1) 东明煤、扎赉诺尔煤、宝矿提质煤传统制浆工艺的最高成浆浓度分别为 48.54%、51.76%、56.08%; 采用分级研磨高浓度制浆工艺技术后, 3 种煤样最高成浆浓度分别为 51.72%、54.82%、59.21%, 煤浆浓度比传统制浆工艺提高 3% 以上。

2) 作为主要煤源的东明煤, 制浆浓度达不到设计值 53%, 考虑到煤价、气化效率、经济效益等因素, 在分级研磨高浓度制浆工艺技术的前提下采用配煤制浆方法进一步提浓, 东明煤、扎赉诺尔煤质量比 1: 1 或东明煤、宝矿提质煤质量比 2: 1 配煤时所制水煤浆浓度为 53% ~ 55%, 满足水煤浆浓度设计要求。

参考文献:

[1] 张荣曾. 水煤浆制备技术[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 56.

- [2] 陈 鹏. 中国煤炭性质、分类和利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 39.
- [3] 何国锋. 我国水煤浆技术的现状与发展方向[M]//何国锋, 段清兵. 水煤浆新技术研发及实践. 北京: 中国石化出版社, 2012: 17-20.
- [4] 高志芳, 朱书全, 吴晓华. 褐煤提质改性对水煤浆特性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(9): 112-116.
- [5] 高志芳, 朱书全, 黄 波, 等. 粒度分布对提质褐煤水煤浆性能影响的研究[J]. 选煤技术, 2009(1): 1-5.
- [6] 王志光, 饶志雄, 张德祥. 云南褐煤水煤浆成浆性分析[J]. 山东冶金, 2007, 29(4): 41-43.
- [7] 王传成, 刘建忠, 虞育杰, 等. 内蒙古褐煤的成浆特性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(S1): 85-90.
- [8] 龚志华, 顾兆云, 徐志强, 等. 提高印尼褐煤成浆性的试验研究[J]. 煤炭加工与综合利用, 2008(1): 26-28.
- [9] 刘焯炜, 张胜局, 何国锋, 等. 褐煤改性对水煤浆浓度影响的研究[J]. 煤质技术, 2013(1): 8-10.
- [10] 赵世永, 张晋陶. 粒度对比对神府煤水煤浆稳定性的影响[J]. 煤炭工程, 2006, 38(12): 89-91.
- [11] 贺鑫平, 余 涛, 周敬林. 分级研磨制浆工艺应用于水煤浆气化的工程分析[J]. 煤化工, 2012, 40(5): 19-23.
- [12] 何国锋, 段清兵, 梁 兴, 等. 低阶煤制高浓度水煤浆技术研究与应用[M]//徐振刚, 曲思建. 煤化工技术理论与实践, 北京: 中国石化出版社, 2009: 139.
- [13] 段清兵, 梁 兴, 张胜局, 等. 提高神华煤气化水煤浆浓度的可行性研究[J]. 洁净煤技术, 2009, 15(2): 49-51.
- [14] 张桂玲, 杜丽伟, 刘焯炜. 提高内蒙古低阶煤气化水煤浆浓度的实验研究[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(4): 55-58.
- [15] 段清兵, 刘焯炜, 何国锋, 等. 粒度级配对新疆低阶煤成浆性影响的研究[J]. 煤化工, 2014, 42(3): 35-38.

(上接第8页)

- [23] 初 茉, 李华民. 褐煤的加工与利用技术[J]. 煤炭工程, 2005, 37(2): 47-49.
- [24] 戴和武, 杜铭华, 谢可玉, 等. 我国低灰褐煤资源及其优化利用[J]. 中国煤炭, 2001, 27(2): 14-18.
- [25] 韦鲁滨, 朱学帅, 刘道春, 等. 褐煤流态化温和干燥研究[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(2): 300-304.
- [26] Sahu A K, Tripathy A, Biswal S K *et al.* Stability study of an air-dense medium fluidized bed separator for beneficiation of high-ash Indian coal[J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2011, 31(3/4): 127-148.
- [27] 杨国华, 陈清如. 振动穿流床煤炭干燥动力学研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(6): 644-648.
- [28] 陶秀祥, 杨玉芬, 骆振福, 等. 水分对空气重介流化床选煤过程影响的综合分析与研究[J]. 选煤技术, 1995(2): 10-13.
- [29] 陶秀祥, 陈清如, 骆振福, 等. 煤炭外水分分布规律及其对流化床分选的影响[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(4): 326-330.
- [30] 韦鲁滨, 陈清如, 梁春城. 空气重介流化床粗粒物料分选机理的研究[J]. 中国矿业大学学报, 1996, 25(1): 12-18.