

干法棒磨与球磨对炼焦中煤解离特性及磨矿物浮选影响

章程¹,汪硕¹,陈方军¹,刘杰¹,王绎舒¹,郭超¹,倪超^{1,2}

(1.中国矿业大学 化工学院,江苏 徐州 221116;2.中国矿业大学 煤炭加工与高效洁净利用教育部重点实验室,江苏 徐州 221116)

摘要:为探究干法棒磨与球磨对炼焦中煤解离特性与磨矿物浮选回收效果的影响,采用筛分、浮沉、分步释放浮选试验,探究了干法棒磨与球磨条件下炼焦中煤的解离特性与磨矿产物的浮选行为,应用接触角测量仪、红外光谱仪以及 X 射线光电子能谱仪,研究了 2 种磨矿方式解离获得的煤表面性质。结果表明:与球磨相比,棒磨对炼焦中煤解离的选择性较好且磨矿物过粉碎程度显著降低;棒磨产物的浮选指标明显优于球磨产物,主要原因是棒磨产物中煤与矿物质解离程度更高,且其粒度组成更有利于浮选回收;2 种磨矿方式解离释放的煤表面性质基本相同。

关键词:炼焦中煤;棒磨;球磨;解离;浮选

中图分类号:TD94

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2020)S1-0248-06

Effect of dry rodmill and ball mill on liberation characteristics of coking middlings and flotation of grinding products

ZHANG Cheng¹, WANG Shuo¹, CHEN Fangjun¹, LIU Jie¹, WANG Yishu¹, GUO Chao¹, NI Chao^{1,2}

(1.School of Chemical Engineering & Technology, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2.Key Laboratory of Coal Processing and Efficient Clean Utilization, Ministry of Education, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to explore the effect of both dry rod mill and ball mill on the liberation characteristics of coking middlings and the flotation performance of grinding products obtained with two grinding methods. The liberation characteristics of coking middlings under dry rod mill and ball mill conditions were studied by size analysis and float-and-sink tests, and the flotation performance of grinding products were analyzed by progressive released flotation tests. Furthermore, the surface properties of coal, liberated from the coking middlings by the two grinding methods, were examined using the contact angle measuring instrument, infrared spectrometer, and X-ray photoelectron spectroscopy. The results indicated that, compared with ball mill, the rod mill has a better selectivity for liberating the coking middlings, and the degree of over-grinding in the grinding products obtained with the rod mill was also significantly lower. The flotation indexes of rod grinding products were obviously better than that of ball grinding products. The main reasons are that the rod grinding products had a higher liberation degree between the locked coal and minerals, and its particle size distribution was more suitable for flotation. The surface properties of coal released from the middlings by two grinding methods were essentially the same.

Key words: coking middlings; rod mill; ball mill; liberation; flotation

0 引 言

我国煤炭资源丰富,种类齐全,但不同煤种的储量差异较大^[1]。其中,焦煤、肥煤、瘦煤等作为主要炼焦煤资源的储量仅占我国全部煤炭资源储量的 27.60%,加之埋藏较浅的优质炼焦煤资源的大规模开发利用,炼焦煤作为一种重要的化工原料已成为我国的稀缺资源^[2-3]。然而,在这样背景下,炼焦煤分选工艺中产生的大量炼焦中煤,因灰分、硫分较高无法达到炼焦的要求,通常作为火力

发电的燃料直接使用,造成稀缺炼焦煤资源的极大浪费^[4-5]。据不完全统计,近年来我国因炼焦中煤无法合理利用导致约 0.7 亿 t/a 炼焦精煤的损失^[2]。因此,从炼焦中煤再回收满足质量要求的炼焦精煤,是解决我国炼焦煤资源短缺的有效途径^[6]。

选煤生产工艺中,炼焦中煤的来源有 2 种^[7]:一是由于分选工艺不合理或分选设备精度不高,导致部分炼焦精煤错配进入炼焦中煤;二是由于精煤与脉石矿物未完全解离,分选后作为炼焦中煤产品。

收稿日期:2019-09-24;责任编辑:赵 瑞

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2017M621879)

作者简介:章程(1998—),男,安徽池州人。

通讯作者:倪超(1988—),男,四川中江人,博士。Tel:0516-83995486, E-mail: sunnichao@126.com

对于第一种情况,可通过分选工艺与设备的优化减少甚至避免该部分炼焦精煤的损失。但对于第二情况,这部分炼焦中煤必须通过进一步解离,才能实现炼焦中煤中嵌布的精煤进行回收,也是目前关于炼焦中煤再选研究的重点^[8]。朱向楠等^[9-10]采用X射线衍射仪和扫描电镜,分别对煤样中的物相组成和矿物嵌布特征进行了研究,并进一步探究了颚式破碎机挤压破碎条件下炼焦中煤的解离特性。孙先凤等^[11]采用偏光显微镜观测了炼焦中煤泥破碎前后矿物质的嵌布状态、煤与矿物质的解离程度。谢卫宁等^[12]研究了颚式破碎和湿法球磨对炼焦中煤表面性质的影响及后续浮选影响规律。邹文杰等^[13]通过全面分析湿法陶瓷球磨后炼焦中煤磨矿产物的表面性质,提出采用疏水絮凝-浮选方法回收磨产物中微细的炼焦精煤,并取得良好的回收效果。此外,学者们根据炼焦中煤破碎或研磨解离后产物的密度组成、粒度组成特性,提出采用大锥角旋流器^[14]、液固流化床TBS^[15]、螺旋分选机^[4]以及浮选^[7,11]等方法回收从炼焦中煤解离出的精煤,均取得一定的效果。然而,目前的研究大多关注于炼焦中煤破碎或解离后精煤如何回收的问题,而对炼焦中煤破碎或研磨过程中的解离行为研究相对较少。实现炼焦中煤高效、高选择性的解离,最大程度避免过粉碎现象和降低破碎过程中的能量消耗,对于炼焦中煤的再选回收同样具有重要的研究与实践价值。

基于此,笔者拟通过探究干法棒磨与球磨条件下炼焦中煤的研磨解离特性,全面分析棒磨与球磨产物的表面性质与浮选效果,以期炼焦中煤解离方法与再选回收方法的选取提供借鉴。

1 试验

1.1 试样

试验所用煤样为山西省吕梁市聚德选煤厂重介分选中煤,煤种为焦煤。采集的煤样经筛分、浮沉后,选取6~3 mm 粒级、1.6~1.8 g/cm³密度级作为本研究试验样品,其灰分为37.20%。采用X射线衍射仪(德国 Bruker, D8 Advance)对煤样中嵌布的矿物种类进行分析,结果如图1所示。煤样中嵌布的主要矿物为高岭石、石英、黄铁矿以及方解石。将煤样制成光片,并在煤样光片抛面上滴上油浸液,然后置于偏光显微镜(德国,DMRXP-MPV-SP)下进行观测,结果如图2所示。可以看出,煤样中的矿物质主要呈分散状、点状分布,嵌布粒度均小于30 μm,嵌布粒度较细。可以判断,该煤样须要很小的磨矿

细度才能实现良好的解离。

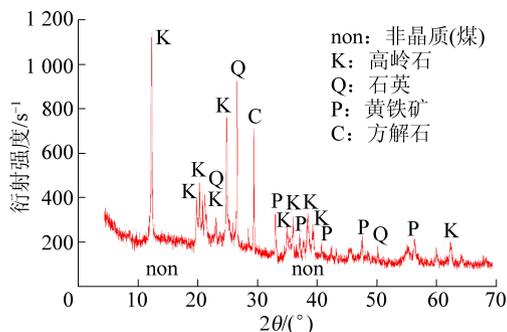


图1 煤样的X射线衍射图谱

Fig.1 X-ray diffraction patterns of coal

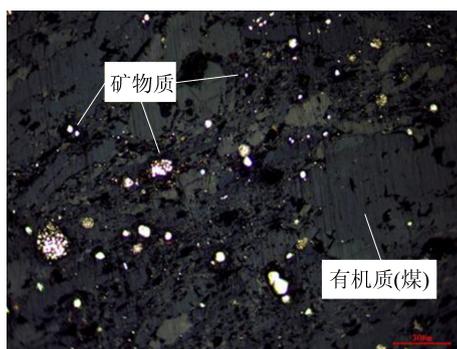


图2 炼焦中煤与矿物质的嵌布情况

Fig.2 Distribution of organic matter and minerals in coking middings

1.2 试验方法

由于煤样中矿物的嵌布粒度细,直接采用干法闭路磨矿工艺将煤样研磨至小于0.50 mm,分别采用棒磨(KJXMB-III型三辊四筒棒磨机,盐城科杰实验仪器厂)和球磨(QM-5型滚筒球磨机,长沙天创粉末技术有限公司)2种磨矿方式,每次磨矿煤样质量500 g。磨矿后的产物分别参照GB/T 477—2008《煤炭筛分试验方法》和GB/T 478—2008《煤炭浮沉试验方法》进行相应的筛分、浮沉试验,分析磨矿产物的粒度、密度组成。

参照MT/T 144—1997《选煤实验室分步释放浮选试验方法》对磨矿后的产物进行分步释放浮选试验。具体试验条件如下:采用RK/FD单槽浮选机,浮选槽容积1.5 L,矿浆浓度100 g/L,转速1 900 r/min,充气量0.25 m³/(m²·min),煤油(捕收剂)用量1 000 g/t,仲辛醇(起泡剂)用量200 g/t。

将棒磨与球磨研磨后的浮沉产物中-1.5 g/cm³密度级样品用酒精洗净、过滤、低温(恒温25℃)干燥,作为静态接触角、表面官能团和表面元素组成分析的样品。样品的静态接触角测定方法为座滴法,样品需压片,液体为自来水,接触角测定仪为上海中晨JC2000D型接触角测量仪。样品表面的官能团

采用 VERTEX 80v FT-IR HYPERION 2000 型红外显微系统(FT-IR)进行分析。样品表面的元素组成采用 ESCALAB 250XI 型 X 射线光电子能谱仪(XPS)进行全谱、精细谱和元素半定量检测。

2 结果与讨论

2.1 磨矿产物的粒度与密度组成分布

棒磨与球磨产物的粒度组成对比如表 1 和图 3 所示。可以看出,棒磨与球磨产物中,两者除 0.125~0.074 mm 粒级的产率基本相同外,棒磨产物中+0.125 mm 粒级产率均高于球磨产物中相应粒级的产率,而前者-0.074 mm 粒级产率则明显小于后者相应粒级产率。其次,棒磨产物的平均粒度为 0.163 mm,而球磨产物的平均粒度仅为 0.049 mm。上述结果充分表明,球磨产物的粒度组成比棒磨产物的粒度组成更细,即球磨对本研究中煤样的解离粒度更小。

表 1 棒磨与球磨产物的粒度组成

Table 1 Particle size distribution of both rod and ball grinding products

粒级/mm	干法棒磨闭路磨矿		干法球磨闭路磨矿	
	产率/%	灰分/%	产率/%	灰分/%
0.500~0.250	40.22	40.96	12.96	42.05
0.250~0.125	13.13	36.77	8.58	39.94
0.125~0.074	15.19	36.45	15.62	39.02
0.074~0.045	7.73	35.91	11.75	38.52
-0.045	23.73	32.06	51.09	34.70
合计	100.00	37.22	100.00	37.22

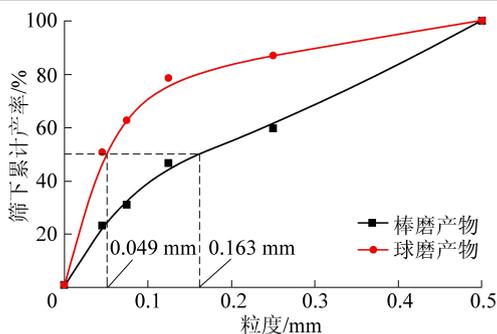


图 3 棒磨与球磨产物的筛下累计曲线

Fig.3 Cumulative curves of under-size in both rod and ball grinding products

棒磨与球磨产物的密度组成对比如图 4 所示。由于磨矿前本试验煤样的密度为 1.6~1.8 g/cm³,因此磨矿产物中-1.6 g/cm³和+1.8 g/cm³密度级产物必然为磨矿解离得到的产物。可以明显看出,棒磨产物中-1.6 g/cm³和+1.8 g/cm³密度级的产率均高于球磨,棒磨中 1.6~1.8 g/cm³密度级的产率相较更

低。上述结果表明,与球磨产物相比,棒磨产物中煤与脉石矿物解离得更加充分。

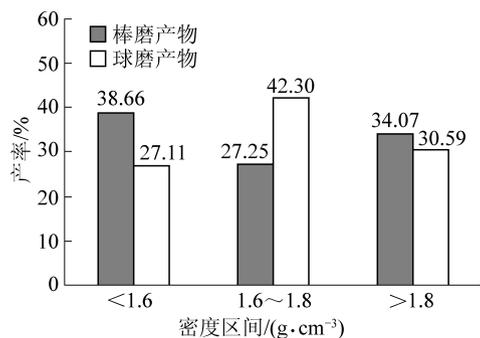


图 4 棒磨与球磨产物的密度组成

Fig.4 Density constitution of both rod and ball grinding products

通过上述棒磨与球磨产物的粒度与密度组成的对比分析可知,与球磨相比,棒磨研磨后产物的粒度组成更粗,但煤与矿物的解离效果反而更好,表明棒磨对中煤的选择性解离效果更好。分析原因,球磨破碎物料过程中主要依靠钢球的冲击与磨剥作用,钢球与物料之间为点接触,在接触点位置作用力大、破碎力大,容易在接触点上产生高度应力集中,对物料的破碎作用强,因此物料过粉碎现象严重^[16-17]。但是,钢球冲击破碎物料过程中,钢球破碎的精确性较差,因此本研究中对中煤解离的选择性较差。棒磨破碎物料过程中,利用钢棒间的线与线接触,主要通过挤压破碎物料,并且钢棒与钢棒之间具有缝隙,因此破碎产物的粒度均匀,过粉碎现象不明显^[12,17]。其次,钢棒通过较大面积的线接触甚至面接触挤压破碎物料过程中,容易在 2 种矿物解离面的位置产生应力集中导致物料破碎,因此棒磨研磨的选择性较好。综上分析,不难发现,本研究中棒磨研磨解离中煤的选择性优于球磨,且研磨产物的粒度明显比球磨研磨产物更大,过粉碎现象明显比球磨更少。

2.2 磨矿产物的分步释放浮选结果

棒磨与球磨产物的分步释放浮选结果如图 5 所示。可以明显看出,在相同的精煤灰分下,棒磨产物的浮选精煤产率均高于球磨产物的浮选精煤产率。通过 1 次粗选、5 次精选后,棒磨产物的浮选精煤灰分更低且精煤产率比球磨产物的浮选精煤产率高 13.53%。上述结果充分表明,本研究中棒磨产物的浮选指标优于球磨产物的浮选指标。分步释放浮选试验最终的精煤灰分与精煤产率数据对比,从另一个角度证明,与球磨相比,采用棒磨获得的磨矿产物中煤与矿物质的解离程度更高,这与第 2.1 节中的试验结果一致。

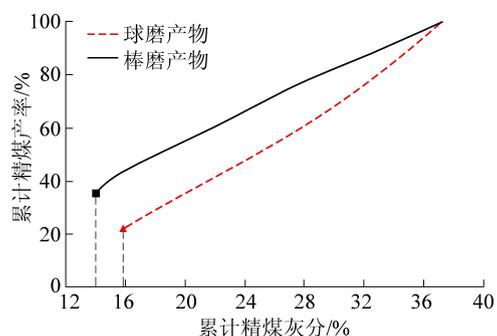


图5 棒磨与球磨产物的分步释放浮选曲线

Fig.5 Progressive released flotation curves of both rod and ball grinding products

2.3 磨产物-1.5 g/cm³密度级样品性质分析

为进一步探究导致棒磨与球磨产物浮选结果差异的原因,分析了2种磨产物中-1.5 g/cm³密度级样品的表面性质,包括样品的静态接触角、表面官能团以及表面元素组成。

棒磨与球磨产物-1.5 g/cm³密度级样品静态接触角测定结果如图6所示。可以看出,棒磨产物中-1.5 g/cm³密度级样品表面的静态接触角为91°,球磨产物中该密度级样品表面的静态接触角为90°。该结果表明,2种磨矿方式解离获得低密度级样品表面的接触角基本一致,表面的疏水性基本相同。



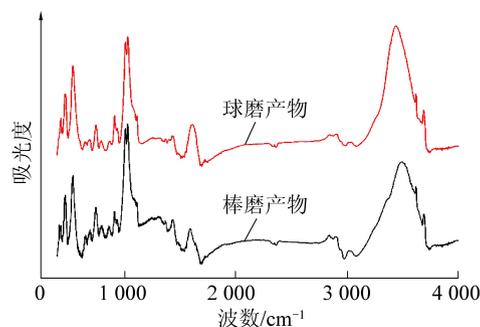
(a) 棒磨产物

(b) 球磨产物

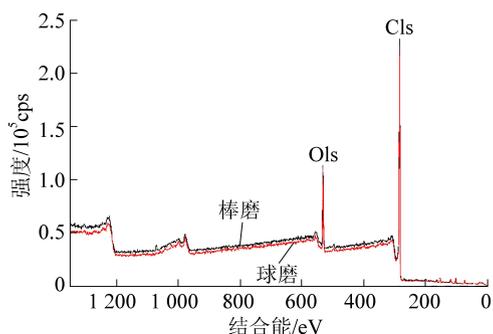
图6 棒磨与球磨产物-1.5 g/cm³密度级样品的静态接触角Fig.6 Static contact angle of -1.5 g/cm³ density grade sample in both rod and ball grinding products

棒磨与球磨产物-1.5 g/cm³密度级样品的红外光谱测定结果如图7所示。由于本研究中测试样品为煤样,并根据文献[18-20]的研究结果,红外谱图中3 640和3 620 cm⁻¹应为煤中高岭石的吸收峰,3 440 cm⁻¹应为-OH的吸收峰,2 930、2 850、1 430 cm⁻¹应为-CH₃和-CH₂的吸收峰,1 600 cm⁻¹应为苯环或C=C的吸收峰,1 090 cm⁻¹应为C-O的吸收峰,1 000 cm⁻¹左右以及小于500 cm⁻¹应为煤中

矿物质的吸收峰,700~900 cm⁻¹为煤中芳香烃的吸收峰。分析图7的结果表明,棒磨与球磨破碎产物中1.5 g/cm³密度级样品的红外光谱基本一致,表明2种磨矿方式解离得到的低密度级样品表面的官能团组成一致。

图7 棒磨与球磨产物-1.5 g/cm³密度级样品的红外光谱Fig.7 FTIR spectrums of -1.5 g/cm³ density grade sample in both rod and ball grinding products

棒磨与球磨产物-1.5 g/cm³密度级样品的XPS宽扫图谱如图8所示。基于图8的XPS宽扫图谱,棒磨与球磨产物中-1.5 g/cm³密度级样品表面元素半定量分析结果见表2。从图8可知,棒磨与球磨产物中-1.5 g/cm³密度级样品表面的XPS宽扫图谱基本一致。其次,表2的结果表明,2种样品表面的元素组成相同,各元素的含量也基本相等。上述结果证明,本研究中干法棒磨与球磨解离得到的低密度产物的表面元素组成基本一致。

图8 棒磨与球磨产物-1.5 g/cm³密度级样品表面的XPS宽扫图谱Fig.8 XPS wide energy spectrums of -1.5 g/cm³ density grade sample in both rod and ball grinding products表2 棒磨与球磨产物-1.5 g/cm³密度级样品表面元素的半定量分析结果Table 2 Semi-quantitative analysis results of surface chemical composition of -1.5 g/cm³ density grade sample in both rod and ball grinding products

磨矿方式	C1s	O1s	Si2p	Na1s	Al2p	N1s	Cl2p	Ca2p	S2p	%
棒磨	79.40	12.59	1.92	0.52	1.91	2.40	0.46	0.45	0.34	
球磨	78.69	12.87	2.39	0.36	2.24	2.26	0.54	0.44	0.20	

上述棒磨与球磨产物中 -1.5 g/cm^3 密度级样品表面的静态接触角、官能团组成、表面元素的半定量分析结果充分证明,采用棒磨与球磨干法研磨炼焦中煤解离获得的低密度产物表面性质基本一致。本研究中,磨矿产物中 -1.5 g/cm^3 密度级样品可认为是炼焦中煤通过磨矿方式解离释放的煤。因此,上述结果表明,炼焦中煤通过干法棒磨与球磨解离获得的煤表面性质基本相同。

2.4 讨论与结果

根据第2.2节研究结果可知,在相同浮选条件下,棒磨产物的浮选指标明显优于球磨产物。同时,根据第2.3节的研究结果,相同炼焦中煤样品通过干法棒磨与球磨解离获得的 -1.5 g/cm^3 密度级产物表面性质几乎完全相同,即通过2种磨矿方式解离获得的煤样表面性质相同,可排除棒磨与球磨的磨矿产物中浮选目标矿物表面性质的影响。因此,本研究中导致棒磨与球磨产物浮选效果差异的原因包括:①2种磨矿方式对中煤的解离行为与解离程度不同;②2种磨矿产物的粒度分布不同,尤其 -0.045 mm 粒级含量具有明显区别。首先,因为棒磨产物中解离获得的低密度产物比球磨产物中含量更大,这部分低密度产物即希望通过研磨中煤解离获得的目标产物(煤),其灰分低,采用浮选回收时这部分低密度物应进入泡沫产品(浮选精煤)。所以,相同浮选条件下,棒磨产物的浮选精煤产率高于球磨产物的浮选精煤产率。其次,颗粒粒度是影响浮选效果的重要因素^[21]。从粒度角度分析,通常中等粒度颗粒的浮选效果最好,而过粗或过细颗粒的浮选效果均变差^[22-23]。其中,粗粒浮选效果差主要是因为颗粒与气泡粘附后颗粒的脱附概率高,而微细粒浮选效果差则主要因为微细有用矿物颗粒与气泡的碰撞概率低,以及微细脉石矿物颗粒对精矿的污染^[24-25]。本研究中,浮选对象为煤粒且粒度上限为 0.5 mm ,因此不存在粒度过大颗粒对浮选的影响。但磨矿产物中 -0.045 mm 粒级的微细颗粒对浮选效果具有重要影响。从第2.2节的研究结果可知,球磨产物中 -0.045 mm 粒级的含量明显高于棒磨产物相应粒级的含量,反之,棒磨产物中处于适宜浮选粒度范围内的颗粒含量则高于球磨产物,因此,即使在相同表面性质的条件下,棒磨产物的浮选精煤产率也应高于球磨产物的浮选精煤产率。

3 结 论

1)在干法磨矿条件下,棒磨对炼焦中煤的解离效果优于球磨,主要表现在棒磨对炼焦中煤研磨解

离的选择性更好,在较粗的解离粒度下可解离出更多的煤,并且磨矿产物的过磨现象远低于球磨。其次,棒磨产物的过粉碎现象明显低于球磨产物。

2)在相同浮选条件下,棒磨产物的浮选效果明显优于球磨产物,主要原因是棒磨对炼焦中煤的解离程度更高,且棒磨产物的粒度组成更有利于浮选回收。

3)在干法磨矿条件下,采用棒磨与球磨从炼焦中煤中解离获得的煤表面的接触角、官能团组成以及表面元素组成均基本相同,即煤的表面性质相同。

参考文献(References):

- [1] 毛节华,许惠龙.中国煤炭资源分布现状和远景预测[J].煤田地质与勘探,1999,27(3):2-5.
MAO Jiehua, XU Huilong. The present distribution situation and prospect forecast of the coal resources in China[J]. Coal Geology & Exploration, 1999, 27(3):2-5.
- [2] 陈鹏.煤炭性质、分类和利用[M].2版.北京:化学工业出版社,2009:36-40.
- [3] 夏灵勇,魏立勇,刘敏,等.稀缺炼焦煤中煤再选潜势研究[J].选煤技术,2019(1):18-23.
XIALingyong, WEI Liyong, LIU Min, et al. Study of the potentials for rewashing the middling product produced through primary scarce coking coal washing process[J]. Coal Preparation Technology, 2019(1):18-23.
- [4] 章力.重介中煤破碎磨矿再选试验研究[J].煤炭科学技术,2018,46(S2):273-276.
ZHANG Li. Test study of reparation of crushing and grinding coal in heavy medium middlings[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(S2):273-276.
- [5] 陈占文,郭德.我国中煤再选研究现状与可行性分析[J].煤炭科学技术,2014,42(5):114-117,128.
CHEN Zhanwen, GUO De. Present status and feasibility analysis on middlings rewash in China[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(5):114-117, 128.
- [6] 沈丽娟,陈少辉,陈建中.炼焦中煤再选试验研究[J].煤炭技术,2015,34(5):298-300.
SHEN Lijuan, CHEN Shaohui, CHEN Jianzhong. Experimental study on reparation of coking middlings[J]. Coal Technology, 2015, 34(5):298-300.
- [7] 李臣威,张鹏德,桂夏辉,等.炼焦中煤解离再选试验研究[J].煤炭科学技术,2016,44(10):203-209.
LI Chenwei, ZHANG Pengde, GUI Xiahui, et al. Experimental study on liberation and separation of coking middlings[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(10):203-209.
- [8] XIE W, HE Y, ZHU X, et al. Liberation characteristics of coal middlings comminuted by jaw crusher and ball mill[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(5):669-674.
- [9] 朱向楠,何亚群,谢卫宁,等.炼焦中煤矿物学特性及再选试验研究[J].煤炭科学技术,2013,41(2):125-128.

- ZHU Xiangnan, HE Yaqun, XIE Weining, *et al.* Study on mineralogy features of coking middlings and re-preparation [J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(2):125-128.
- [10] 朱向楠, 陶有俊, 何亚群, 等. 炼焦中煤挤压破碎条件下破碎解离特性研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(4):714-719.
- ZHU Xiangnan, TAO Youjun, HE Yaqun, *et al.* Crushing and liberation characteristics of coking middlings under extrusion crushing [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(4):714-719.
- [11] 孙先凤, 马力强, 于跃先, 等. 中煤泥破碎解离特性与再选试验研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(2):215-221.
- SUN Xianfeng, MA Liqiang, YU Yuexian, *et al.* Study on crushing liberation characteristics and re-preparation experiment of middlings slime [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(2):215-221.
- [12] 谢卫宁, 何亚群, 朱向楠, 等. 破碎方式对中煤表面性质及后续浮选的影响 [J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(9):134-138.
- XIE Weining, HE Yaqun, ZHU Xiangnan, *et al.* Crushing method affected to surface properties and late floatation of middlings [J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(9):134-138.
- [13] ZOU W, CAO Y, LIU J, *et al.* Wetting process and surface free energy components of two fine liberated middling bituminous coals and their flotation behaviors [J]. *Powder Technology*, 2013, 246:669-676.
- [14] 张磊, 刘文礼, 马克富, 等. 炼焦中煤再选技术试验研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2011, 39(3):125-128.
- ZHANG Lei, LIU Wenli, MA Kefu, *et al.* Experiment study on reparation technology of coking middlings [J]. *Coal Science and Technology*, 2011, 39(3):125-128.
- [15] 赵闻达, 李延锋, 谢彦君, 等. 中煤破碎再选的应用研究 [J]. *煤炭工程*, 2012(7):97-99.
- ZHAO Wenda, LI Yanfeng, XIE Yanjun, *et al.* Experiment study on middlings crushing [J]. *Coal Engineering*, 2012(7):97-99.
- [16] 张锦瑞, 梁冰, 赵礼兵. 球磨机机理与磨矿介质制度研究现状及发展趋势 [J]. *有色矿冶*, 2013, 29(1):42-45.
- ZHANG Jinrui, LIANG Bing, ZHAO Libing. Technology development and trend on the grinding of the ball mill [J]. *Non-Ferrous Mining and Metallurgy*, 2013, 29(1):42-45.
- [17] 涂亚楠, 王磊, 梅杰文, 等. 干法磨矿对长焰煤粒度分布与堆积效率的影响 [J]. *煤炭工程*, 2019, 51(3):122-126.
- TU Yanan, WANG Lei, MEI Jiewen, *et al.* Effect of dry-grinding methods on particle size distribution and packing density of long flame coal [J]. *Coal Engineering*, 2019, 51(3):122-126.
- [18] XIA W, YANG J, LIANG C. Effect of microwave pretreatment on oxidized coal flotation [J]. *Powder Technology*, 2013, 233:186-189.
- [19] GRZYBEK T, PIETRZAK R, WACHOWSKA H. The influence of oxidation with air in comparison to oxygen in sodium carbonate solution on the surface composition of coals of different ranks [J]. *Fuel*, 2006, 85(7/8):1016-1023.
- [20] XING Y, GUI X, CAO Y, *et al.* Effect of compound collector and blending frother on froth stability and flotation performance of oxidized coal [J]. *Powder Technology*, 2017, 305:166-173.
- [21] JAMESON G J. The effect of surface liberation and particle size on flotation rate constants [J]. *Minerals Engineering*, 2012, 36:132-137.
- [22] JAMESON G J. Advances in fine and coarse particle flotation [J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2010, 49(4):325-330.
- [23] 谢广元, 倪超, 张明, 等. 改善高浓度煤泥水浮选效果的组合柱浮选工艺 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39(5):947-953.
- XIE Guangyuan, NI Chao, ZHANG Ming, *et al.* Enhanced separation of high concentration coal slurry by a two stages process with different flotation columns [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(5):947-953.
- [24] TRAHAR W J. A rational interpretation of the role of particle size in flotation [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1981, 8(4):289-327.
- [25] 倪超, 谢广元, 李彪, 等. 强化重力沉降作用的浮选柱降灰研究 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39(12):2513-2518.
- NI Chao, XIE Guangyuan, LI Biao, *et al.* Enhancement of gravity sedimentation in column flotation to reduce clean coal ash [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(12):2513-2518.