

文章编号:0253-9993(2012)08-1378-07

煤泥浮选过程能量输入优化

李延锋, 张晓博, 桂夏辉, 赵闻达, 吴朝龙, 谢彦君

(中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:为探究浮选过程与能量输入的关系,设计了在不同浮选时段(0.5, 0.5, 1.0, 1.0, 2.0 min)驱动电机转速为1 500, 1 800, 2 100, 2 400, 2 700 r/min的情况下,进行逐步增加输入功率的浮选过程优化试验,并通过能量测试系统对浮选功耗进行测定。结果表明:在浮选初始阶段,转速越大,浮选速率越快,精煤可燃体回收率越高,精煤累积灰分也越高;在低能量输入的情况下精煤质量相对较高,但精煤可燃体回收率相对较低;在不同能量输入的浮选过程中,驱动电机转速按浮选时段设计为1 500, 1 500, 1 500, 1 500, 2 400 r/min时,其精煤累计灰分最低,且可燃体回收率较高;在总能量输入相同或相似的情况下,浮选前期阶段采用低能量输入,后期阶段采用高能量输入,有利于保证精煤质量以及提高精煤回收率。

关键词:煤泥;能量输入;浮选过程;功率;转速

中图分类号:TD923.9 **文献标志码:**A

Optimization of slime flotation process based on energy input

LI Yan-feng, ZHANG Xiao-bo, GUI Xia-hui, ZHAO Wen-da, WU Chao-long, XIE Yan-jun

(School of Chemical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to find out the relationship between flotation process and energy input, the flotation tests were optimized by increasing input power in the flotation process. The drive motor speeds were 1 500, 1 800, 2 100, 2 400 and 2 700 r/min at different flotation periods. The flotation process was separated into five flotation periods of 0.5, 0.5, 1.0, 1.0, 2.0 min. The power dissipation in the flotation process was measured by energy measurement system. The flotation results show that the flotation rate, combustible matter recovery and accumulated ash content of clean coal increases with the increasing of rotate speed in the primary stage of flotation process. The combustible matter recovery is low while the quality of clean coal is high in the case of low energy input. The accumulated ash content of clean coal is the lowest and combustible matter recovery is higher while the drive motor speeds are 1 500, 1 500, 1 500, 1 500 and 2 400 r/min at the five flotation periods, respectively. The clean coal with higher combustible matter recovery and quality can be obtained while energy input is lower at the early stage of flotation process and higher at the later stage of flotation process in the case of same or similar total energy input.

Key words: slime; energy input; flotation process; power; rotate speed

煤炭是我国的主要能源,占一次能源消费的70%以上^[1]。在未来相当长的时间内,煤炭在我国能源结构中的主导地位不会改变^[2]。但是随着机械化采煤程度的加大,煤田地质条件的不断恶化和选煤作业过程中次生煤泥的产生,使原煤中小于0.5 mm

细颗粒的含量增大,细粒级物料的有效分选成为目前选煤行业的重大技术难题之一^[3]。而浮选是根据矿物表面性质的差异实现目的矿物和脉石矿物分离的有效方法^[4-5],主要分为絮凝浮选、油团聚浮选、载体浮选和泡沫浮选等,浮选是细粒级物料分选过程中应

收稿日期:2012-04-13 责任编辑:张晓宁

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-10-0767);国家自然科学基金资助项目(50904069);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JH111793)

作者简介:李延锋(1975—),男,河南洛阳人,副教授,博士。Tel:0516-83884442, E-mail:lyf3344@126.com

用最广的选矿方法^[6-7]。浮选机械的能耗在选煤厂或者选矿厂所有设备能耗中占很大比重^[8]。对于浮选过程的能量输入优化研究可在保证细粒级物料有效分选的同时,降低能量消耗。

浮选过程中的搅拌能够保持矿粒处于悬浮状态并促进矿粒和空气的均匀分散、碰撞,最终完成矿化,同时增强空气在浮选槽内高压区的溶解,促进药剂在矿粒表面的吸附^[9]。搅拌强度和搅拌时间是影响浮选效果的主要因素^[10-11]。在不同浮选时段的能量输入决定着浮选效果的好坏,浮选输入能量在不同浮选时段的分配称为浮选能量输入,简称能量输入。李振等提出浮选过程颗粒的悬浮特性受搅拌等因素决定,并得出不同的叶轮型式、不同的功率准数、不同的混合时间数^[12-13]。桂夏辉等提出了疏水性较差的物料需在高能量输入、较长的矿化时间才能浮出^[14]。杨福新根据功率准数公式得到了功率准数与雷诺数的功率曲线,不同叶轮形式的浮选机,功率消耗不同,其中直叶片和弯叶片的涡轮型叶轮功耗大,螺旋型叶轮功耗最小^[15]。赵秋月等利用扭矩传感器研究了管式搅拌反应器的功率特性,得出了搅拌功率 P 与 $N^{1.3 \sim 1.4}$ 成正比^[16]。Changunda 得出浮选速率常数和能量的输入呈线性增长关系^[17]。Jameson 认为细颗粒需要高能量状态的流体环境,通过强剪切和强紊流增加矿粒和气泡的碰撞附着概率,而粗颗粒的物料则只需较低的能量输入,但不同粒级都需要较高的含气率来保证浮选效果^[18]。本文通过设计不同浮选时段(0.5, 0.5, 1.0, 1.0, 2.0 min),逐渐增加驱动电机转速(1 500, 1 800, 2 100, 2 400, 2 700 r/min)的浮选速率试验,探究浮选的能量输入优化过程,并通过能量测试系统对浮选功耗进行测定,寻找浮选最佳过程与浮选能量输入之间的关系,对于解决实际生产过程中

的浮选问题具有重要的指导意义。

1 试 验

1.1 煤质分析

表1为煤样的粒度组成。随着粒度的减小,灰分逐渐增大。处于最佳浮选粒度 0.075 ~ 0.250 mm 粒级的含量为 57.53%,该粒级分选的好坏直接影响整个浮选过程的分选;0.500 ~ 0.250 mm 粒级为次主导粒级,灰分最低;<0.045 mm 细泥的灰分为 30.36%,比大于 0.045 mm 煤泥的平均灰分高 5.60%,说明有大量的异质细泥混在细泥中,浮选时应注意避免细泥对精煤的污染。

表1 煤泥粒度组成

粒级/ mm	产率	灰分	筛上累计		筛下累计	
			产率	灰分	产率	灰分
0.500 ~ 0.250	21.47	23.25	21.47	23.25	100	25.31
0.250 ~ 0.125	43.56	23.73	65.03	23.57	78.53	25.88
0.125 ~ 0.075	13.97	26.73	79.00	24.13	34.97	28.55
0.075 ~ 0.045	11.10	29.22	90.10	24.76	21.00	29.76
<0.045	9.90	30.36	100	25.31	9.90	30.36
合计	100	25.31				

由表2可知,1.4 ~ 1.5 g/cm³ 为主导密度级,含量高达 37.93%,灰分为 10.54%,1.5 ~ 1.6 g/cm³ 密度级含量其次,为 20.34%,灰分 24.49%,说明其可燃体与非可燃体之间可能是层状结构或者是均匀结构,有部分连生体矿物存在;1.6 ~ 1.8 g/cm³ 的密度级灰分相对偏低,说明矽石中夹杂着部分煤;>1.8 g/cm³ 密度级的产率为 13.15%,灰分为 78.81%,说明该密度级应为大量已解离的异质矿物。

表2 煤泥密度分析数据

Table 2 Density analysis of slime sample

密度级/ (g · cm ⁻³)	产率/%	灰分/%	浮物累计		沉物累计		(δ±0.1)含量	
			产率/%	灰分/%	产率/%	灰分/%	密度级/(g · cm ⁻³)	产率/%
<1.3	0.26	4.21	0.26	4.21	100	24.55	1.3	19.10
1.3 ~ 1.4	18.84	6.10	19.10	6.07	99.74	24.61	1.4	56.77
1.4 ~ 1.5	37.93	10.54	57.03	9.04	80.90	28.92	1.5	58.27
1.5 ~ 1.6	20.34	24.49	77.37	13.10	42.97	45.14	1.6	27.08
1.6 ~ 1.7	6.74	38.14	84.11	15.11	22.63	63.70	1.7	9.48
1.7 ~ 1.8	2.74	54.06	86.85	16.34	15.89	74.54	1.8	3.74
1.8 ~ 2.0	1.99	63.60	88.84	17.40	13.15	78.81	1.9	1.99
>2.0	11.16	81.52	100	24.55	11.16	81.52		
合计	100	24.55						

1.2 浮选能量输入测试系统

针对煤泥浮选过程功耗,建立浮选功耗测试系统。功耗测试系统包括数据采集、数据转换和数据处理设备。功耗测试系统的核心部件是扭矩传感器,采用动态电阻应变法,将应变片贴在转轴上组成应变电桥,接通电源就能够获得轴所受的扭矩大小,该扭矩值经压/频转换为频率值。扭矩传感器采集的信号经过信号转换器处理,将浮选机扭矩、转速和功率值实时显示在系统采集界面上,并绘制出扭矩、转速和功率曲线,采集某一时刻或某一段时间内的浮选机功耗。扭矩传感器的测量原理如图1所示,其安装方法如图2所示。

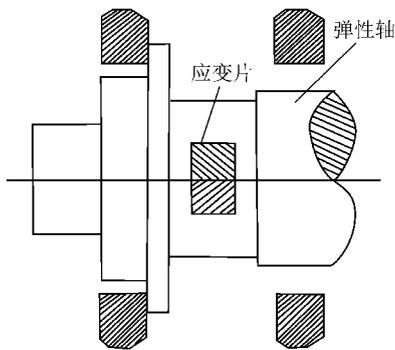


图1 测量原理

Fig. 1 Measurement principle

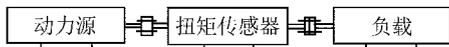


图2 测试系统连接

Fig. 2 Connected chart of measurement system

1.3 浮选输入能量计算方法

浮选过程的有用功主要集中在浮选机的搅拌轴上,煤泥浮选过程中搅拌轴转动所消耗的功率可通过扭矩传感器测得的扭矩值和从浮选机上测得的转速计算后得到。

$$P = 2\pi MN/60 = MN/9.55 \quad (1)$$

式中, P 为搅拌轴输出的机械有效功率,kW; M 为搅拌轴的扭矩, $N \cdot m$; N 为浮选机的轴转速(与主轴电机同步), r/min 。

测量步骤如下:

- (1)测量浮选机空转时(浮选槽内没有矿浆)的扭矩值;
- (2)测量浮选机加入煤样(质量浓度为100 g/L)后的扭矩值;
- (3)利用式(1)计算出各转速下空转和负载时的功率值;
- (4)用负载功率减去空转功率,计算出各转速下的有效功率值;

(5)根据 $W = Pt$ (W 为功,kJ; t 为时间,min),可计算出浮选输入的能量。

图3为有效功率、空载功率和负荷功率与浮选机搅拌轴转速之间的关系。

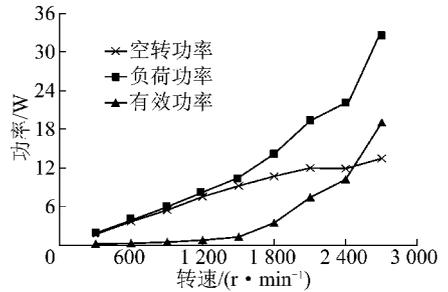


图3 浮选机搅拌轴转速与功率关系

Fig. 3 Relationship between stirring speed and power of flotation machine

1.4 试验方法

设计了在驱动电机转速为1 500,1 800,2 100,2 400,2 700 r/min的条件下,开展不断增加输入功率的浮选速度试验,以达到能量输入与物料可浮性变化的适配。浮选的药剂有煤油320 g/t、仲辛醇110 g/t,矿浆质量浓度100 g/L,充气流量 $0.37 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$,浮选前期的搅拌调浆转速为1 800 r/min。调浆搅拌,包括煤泥润湿时间120 s、捕收剂接触时间60 s和起泡剂接触时间10 s,共190 s。设计5次浮选刮泡过程,刮泡时间分别为0.5,0.5,1.0,1.0,2.0 min,依次得到 J_1, J_2, J_3, J_4, J_5 五种精煤产品和尾煤,共6种浮选产品。在5次刮泡过程中,不断增加输入功率,并利用能量测试系统计算浮选功耗。

2 结果与讨论

2.1 单一转速能量输入分选过程

图4为单一转速能量输入分选过程的精煤累积灰分和精煤累积可燃体回收率之间的关系曲线。

由图4可看出:在5种单一转速的浮选过程中,精煤累积可燃体回收率与精煤累积灰分均随着浮选的进行以及能量输入的增加而增加,但增大幅度不同。在0~0.5 min浮选开始初期,转速越大,精煤可燃体回收率越高,转速为1 500 r/min的精煤可燃体回收率最小,只有60.79%;而转速为2 700 r/min的精煤可燃体回收率最大为73.30%。由此可见,输入浮选体系能量的起点越大,浮选速度越快,精煤可燃体回收率越高。精煤累积灰分的变化规律与之相同,即在浮选初期,随着转速的增加,精煤累积灰分逐渐升高,精煤的质量越差。从整个浮选过程来看,高能量的输入会提高精煤累积可燃体回收率,例如转速为

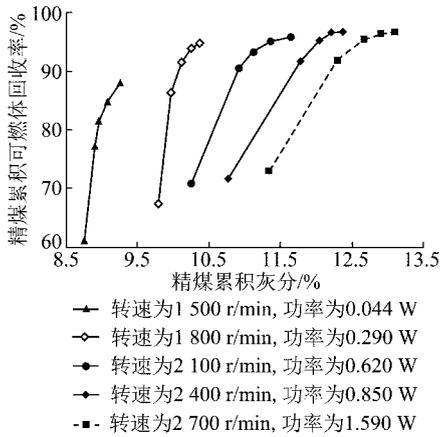


图4 精煤累积可燃体回收率与精煤累积灰分的关系

Fig. 4 Relationship between combustible material recovery and accumulated ash content of clean coal

1 500 r/min 时,精煤累积可燃体回收率为 88.36%,功率为 0.044 W;而转速为 1 800 r/min 时,精煤累积可燃体回收率达到 94.78%,功率为 0.290 W。由 5 条曲线可看出,斜率逐渐降低,即随着浮选进行,浮选槽中煤粒的可浮性逐渐变差,单位可燃体回收率所需要的能耗越来越高,即可浮性好的矿粒所需能量低,可浮性差的矿粒所需能耗高。相比较 5 种单一转速的整个浮选过程的浮选指标与能耗数值,在精煤可燃体回收率相差不大时,能量消耗差别很大。例如转速为 1 800 r/min 时,精煤累积可燃体回收率为 94.78%,功率为 0.290 W;而在转速为 2 100 r/min 时,精煤累积可燃体回收率为 95.75%,功率却为 0.620 W,后者比前者多消耗 0.330 W 的能量却只换来不到 1% 的精煤可燃体回收率,这是极不合算的。相比较能量消耗,精煤累积灰分同样差别很大,转速为 2 400 r/min 时,累积灰分为 12.39%,功率为 0.850 W,而转速为 2 700 r/min 时,由于高灰细泥的污染,精煤累积灰分达到 13.10%,功率为 1.590 W。由上述分析可知,在低转速低能耗条件下,虽然不能得到较高的回收率,但能浮出高质量的精煤;而在高转速高能耗的条件下,可以对难浮矿粒进行强制回收,从而提高精煤累积可燃体回收率,但其精煤累积灰分较高。所以在满足产品要求的前提下,是否能在最低能量输入条件下得到最好的浮选指标,即在浮选初期浮出易浮矿物时采取低能量(低转速)输入,而在浮选后期浮出难浮矿物时,逐渐提高转速,高能量输入来优化浮选过程,这也是我们接下来要研究的问题。

2.2 不同能量输入分选过程

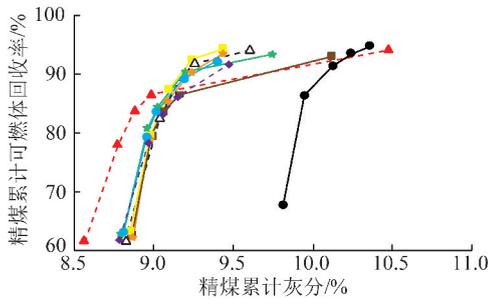
根据上述浮选过程设计浮选速度试验,在相同的浮选时间里,通过调整浮选机的轴转速来调整浮选过程能量输入。实验中的最小功率为 0.182 W,浮选过

程转速设计为 1 500,1 500,1 500,1 500,1 800 r/min;最大功率为 1.516 W,浮选过程转速设计为 2 400,2 700,2 700,2 700,2 700 r/min。为比较能量输入与浮选指标的关系,将功率区间 0.182 ~ 1.516 W 分成 5 个较小的功率区间,图 5 为不同输入功率下的精煤累积灰分和精煤累积可燃体回收率之间的关系。

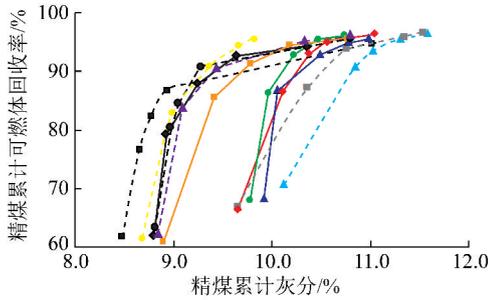
从整体来看,该煤泥可浮性较好,每一组的精煤可燃体回收率都比较高,均达到了 95%,浮选过程较为完全。故而在 5 min 的浮选时间内,比较精煤累积灰分,更能体现浮选精度和效率。由图 5 可知,精煤累积可燃体回收率逐渐升高,但幅度逐渐变缓。说明剩余物料的可浮性越来越差;精煤累积灰分同样逐渐增大,说明从 $J_1 \sim J_5$ 灰分逐渐增加,因此低灰物料优先浮出,高灰物料后浮。在能耗相差不大的情况下,在浮选初期,若采用较低的转速,其精煤累积灰分较低,但精煤可燃体回收率也较低;若初期采用高转速,虽然可以保证精煤可燃体回收率,但细泥由于水流夹带作用将精煤污染,精煤质量较差。如转速设计为 1 500,1 500,2 400,2 700,2 700 r/min 与 2 400,2 400,2 400,2 700 r/min 相比,浮选功率均为 1.146 W,但在起点阶段,灰分分别为 8.63% 和 10.51%,精煤可燃体回收率分别为 63.44% 和 71.44%;而在浮选过程完全时,精煤累积灰分分别为 10.51% 和 12.37%,相差近 2%,精煤累积可燃体回收率却相差不大。所以在浮选能耗相当的前提下,浮选初期采用低转速可较好地保证精煤质量;若初期高转速,可保证精煤可燃体回收率。

为寻求该煤泥的可浮性与能耗匹配的最佳耦合方式,在图 5 每个小的功率区间中选取两组最优的浮选过程,如图 6 所示。

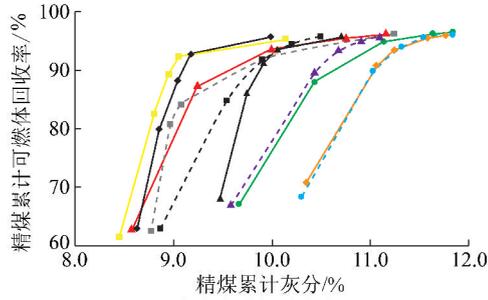
由图 6 可知,不同能耗状态条件下的最优指标,其精煤累积灰分大部分在 8.5% ~ 10.5%,且这 10 组能量输入方式都是以 1 500 r/min 的最低能量开始的,在起点处精煤可燃体回收率与精煤灰分相差不大,并且浮选过程中的能量增加幅度也是较小的,即相邻浮选时间段的功率差值较小,煤泥可浮性变化趋势较缓。在保证精煤累积可燃体回收率的前提下,较大的浮选能耗并不一定能得到较好的精煤产品。例如:当设计转速为 1 500,1 800,2 400,2 400,2 400 r/min 与 1 500,2 100,2 100,2 700,2 700 r/min 相比,精煤累积可燃体回收率相差不大,但精煤累积灰分分别为 9.82% 和 10.43%,相差较大,而前者功率只有 0.617 W,后者却达到 1.151 W。这是由于过高的转速,过大的能量输入会造成浮选液面不稳定,紊流强



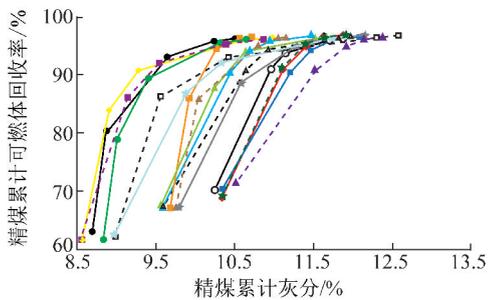
(a) 0.182~0.435 W



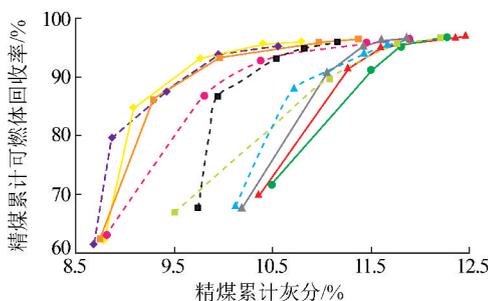
(b) 0.457~0.704 W



(c) 0.722~0.972 W



(d) 0.982~1.248 W



(e) 1.249~1.516 W

- 转速为1 500,1 500,1 500,1 500,1 800 r/min, 功率为0.182 W
- 转速为1 500,1 500,1 500,1 800,1 800 r/min, 功率为0.218 W
- 转速为1 500,1 500,1 800,1 800,1 800 r/min, 功率为0.254 W
- 转速为1 500,1 800,1 800,1 800,1 800 r/min, 功率为0.272 W
- 转速为1 500,1 500,1 500,1 500,2 100 r/min, 功率为0.314 W
- 转速为1 500,1 500,1 500,1 800,2 100 r/min, 功率为0.350 W
- 转速为1 500,1 500,1 800,1 800,2 100 r/min, 功率为0.382 W
- 转速为1 500,1 800,1 800,1 800,2 100 r/min, 功率为0.417 W
- 转速为1 500,1 500,1 500,1 500,2 400 r/min, 功率为0.435 W

- 转速为1 500,1 800,2 100,2 400,2 400 r/min, 功率为0.457 W
- 转速为1 800,2 100,2 100,2 100,2 400 r/min, 功率为0.479 W
- 转速为1 800,1 800,2 100,2 400,2 400 r/min, 功率为0.500 W
- 转速为1 500,1 500,2 400,2 400,2 400 r/min, 功率为0.518 W
- 转速为1 500,1 500,1 500,1 500,2 700 r/min, 功率为0.534 W
- 转速为1 500,2 100,2 100,2 400,2 400 r/min, 功率为0.563 W
- 转速为2 100,2 100,2 100,2 100,2 400 r/min, 功率为0.592 W
- 转速为1 500,1 800,2 400,2 400,2 400 r/min, 功率为0.617 W
- 转速为1 800,2 100,2 100,2 400,2 400 r/min, 功率为0.644 W
- 转速为1 800,1 800,2 400,2 400,2 400 r/min, 功率为0.673 W
- 转速为1 500,1 500,1 500,1 800,2 700 r/min, 功率为0.704 W

- 转速为1 500,2 100,2 400,2 400,2 400 r/min, 功率为0.722 W
- 转速为2 100,2 100,2 100,2 400,2 400 r/min, 功率为0.748 W
- 转速为1 800,2 100,2 400,2 400,2 400 r/min, 功率为0.760 W
- 转速为1 500,1 500,1 800,1 800,2 700 r/min, 功率为0.786 W
- 转速为1 500,2 400,2 400,2 400,2 400 r/min, 功率为0.803 W
- 转速为1 500,1 800,1 800,1 800,2 700 r/min, 功率为0.821 W
- 转速为1 800,2 400,2 400,2 400,2 400 r/min, 功率为0.868 W
- 转速为2 100,2 100,2 400,2 400,2 400 r/min, 功率为0.904 W
- 转速为1 500,1 500,1 500,2 100,2 700 r/min, 功率为0.941 W
- 转速为1 800,1 800,1 800,1 800,2 700 r/min, 功率为0.972 W

- 转速为1 800,2 400,2 400,2 400,2 700 r/min, 功率为0.982 W
- 转速为2 100,2 100,2 400,2 400,2 700 r/min, 功率为1.003 W
- 转速为1 500,1 500,2 100,2 700,2 700 r/min, 功率为1.100 W
- 转速为1 500,1 800,2 100,2 700,2 700 r/min, 功率为1.118 W
- 转速为2 100,2 400,2 400,2 400,2 700 r/min, 功率为1.123 W
- 转速为1 800,1 800,2 100,2 700,2 700 r/min, 功率为1.136 W
- 转速为2 400,2 400,2 400,2 400,2 700 r/min, 功率为1.146 W
- 转速为1 500,1 500,2 400,2 700,2 700 r/min, 功率为1.146 W
- 转速为1 500,2 100,2 100,2 700,2 700 r/min, 功率为1.151 W
- 转速为1 800,2 100,2 100,2 700,2 700 r/min, 功率为1.169 W
- 转速为1 800,1 800,2 400,2 700,2 700 r/min, 功率为1.182 W
- 转速为1 500,2 100,2 400,2 700,2 700 r/min, 功率为1.197 W
- 转速为2 100,2 100,2 100,2 700,2 700 r/min, 功率为1.202 W
- 转速为1 800,2 100,2 400,2 700,2 700 r/min, 功率为1.215 W
- 转速为1 500,2 400,2 400,2 700,2 700 r/min, 功率为1.220 W
- 转速为1 800,2 400,2 400,2 700,2 700 r/min, 功率为1.238 W
- 转速为2 100,2 100,2 400,2 700,2 700 r/min, 功率为1.248 W

- 转速为2 100,2 400,2 400,2 700,2 700 r/min, 功率为1.249 W
- 转速为1 500,1 500,2 700,2 700,2 700 r/min, 功率为1.271 W
- 转速为2 400,2 400,2 400,2 700,2 700 r/min, 功率为1.294 W
- 转速为1 500,1 800,2 700,2 700,2 700 r/min, 功率为1.312 W
- 转速为1 800,1 800,2 700,2 700,2 700 r/min, 功率为1.330 W
- 转速为1 500,2 100,2 700,2 700,2 700 r/min, 功率为1.355 W
- 转速为1 800,2 100,2 700,2 700,2 700 r/min, 功率为1.393 W
- 转速为2 400,2 400,2 700,2 700,2 700 r/min, 功率为1.421 W
- 转速为2 100,2 700,2 700,2 700,2 700 r/min, 功率为1.473 W
- 转速为2 400,2 700,2 700,2 700,2 700 r/min, 功率为1.516 W

图5 不同功率区间精煤灰分与可燃体回收率的关系

Fig. 5 Relationship between accumulated ash content of clean coal and combustible material recovery at different power range

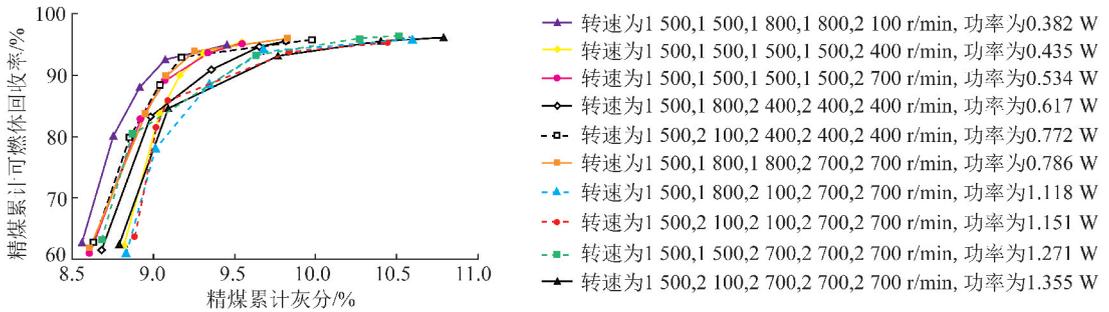


图6 不同功率区间最优两组指标的比较

Fig. 6 Comparison of two groups of optimal indexes at different power range

度较高,导致低灰粗颗粒的脱落几率增加,精煤质量下降。这10组能量输入方式中,转速设计为1 500,1 500,1 500,1 500,2 400 r/min 获得了最优的浮选指标,其功率输入仅为0.435 W,精煤累积灰分最低为9.48%,精煤累积可燃体回收率较其他能量输入方式差距不大,说明该组的能量输入与该煤泥在浮选中的可浮性变化较为适配。

2.3 单一能量输入与不同能量输入分选过程指标对比

将图4与图5,6相比,可以看出,在能量消耗相当的前提下,逐步增加能量输入的浮选过程,其精煤可燃体回收率和灰分起点低,但随着精煤灰分的增加,精煤可燃体回收率增加的幅度快于单一能量输入的浮选过程,并且浮选过程完全后,逐步增加能量输入的浮选过程,其精煤累积灰分更低,精煤质量更好。如浮选过程单一转速为2 100 r/min 与浮选过程设计转速为1 500,1 800,2 400,2 400,2 400 r/min 相比,浮选功率分别为0.620 W 和0.617 W,相差不大,在起点处精煤灰分分别为10.23%和8.68%,精煤可燃体回收率分别为70.71%与62.01%,显然后者更低。但随着浮选的进行,精煤累积灰分与精煤累积可燃体回收率均逐渐增大,在浮选完全后,精煤累积可燃体回收率相差不大,而精煤累积灰分相差较大,前者为11.65%,后者为9.82%,可见后者精煤质量更好。所以在相同的能量消耗前提下,浮选过程能量输入方式为浮选前期低能量而后逐渐升高可获得较好的分选指标。

3 结论

(1)在5种单一转速的浮选过程中,精煤累积可燃体回收率与精煤累积灰分均随着浮选时间和能量消耗的增加而增加,在浮选初期(0~0.5 min),转速越大,精煤可燃体回收率越高,精煤灰分也越高。低转速、低能耗条件下,精煤灰分较低,但精煤可燃体回收率也较低;高转速高能耗条件下,精煤可燃体回收

率较高,但精煤灰分较高。

(2)在不同能量输入的浮选过程中,浮选的功率区间为0.182~1.516 W,其中不同浮选时段转速设计为1 500,1 500,1 500,1 500,2 400 r/min 时,精煤灰分最低,且精煤可燃体回收率也较高,功率输入仅为0.435 W。这表明易浮物料在较低能量输入的条件下即可获得较好的浮选精度,但随着浮选的进行,停留在浮选槽中的物料变得越来越难浮,此时需要较高的能量输入才可浮出。

(3)在相同或相似的能量消耗前提下,浮选前期选择低能量输入(低转速),精煤灰分较低;浮选后期高能量输入(高转速)能保证精煤可燃体的有效回收。因此,随着浮选过程的进行,逐渐增加浮选的能量输入更能满足物料对能量的需求,从而达到浮选能量输入与浮选过程的最佳耦合。

参考文献:

- [1] 张波. 我国选煤技术的发展方向与环境保护[J]. 科技情报开发与经济,2009,19(33):108-109.
Zhang Bo. The development direction and environment protection of China's coal preparation technology [J]. Science and Technology Information Development and Economic,2009,19(33):108-109.
- [2] 邓晓阳. 影响中国选煤可持续发展的潜在问题及对策[A]. 国际选煤技术交流大会论文集[C],徐州:中国矿业大学出版社,2005:61-64.
Deng Xiaoyang. The potential problems and countermeasures of affect the sustainable development of China's coal preparation [J]. International Coal Preparation Technology Exchange Conference Proceedings [C]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 2005:61-64.
- [3] 侯彤,陶秀祥,吕则鹏,等. 高灰难选细粒煤泥降灰技术进展[J]. 洁净煤技术,2008,14(5):18-20.
Hou Tong, Tao Xiuxiang, Lü Zepeng, et al. Outlook of deashing of high-ash and difficult-to-float tiny coals [J]. Clean Coal Technology, 2008, 14, (5): 18-20.
- [4] William J O, Orhan O, Anh V N. Effect of mechanical and chemical clay removals by hydrocyclone and dispersants on coal flotation [J]. Minerals Engineering, 2010, 23: 413-419.

- [5] Muganda S, Zanin M, Grano S R. Influence of particle size and contact angle on the flotation of chalcopyrite in a laboratory batch flotation cell[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2011, 98: 150-162.
- [6] Albijanic B, Ozdemir O, Nguyen A V, et al. A review of induction and attachment times of wetting thin films between air bubbles and particles and its relevance in the separation of particles by flotation[J]. *Advances in colloid and interface science*, 2010, 159(1): 1-21.
- [7] Bhattacharya S, Dey S. Evaluation of frother performance in coal flotation: a critical review of existing methodologies[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2008, 29(4): 275-298.
- [8] 程 敢. 煤泥可浮性及浮选功耗研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
Cheng Gan. Study on fine coal floatability and flotation power[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.
- [9] 张 波. 煤泥浮选的影响因素与生产操作要领[J]. *选煤技术*, 2011, 4(8): 39-40.
Zhang Bo. Factors affecting and production operations essentials of fine coal flotation[J]. *Coal Preparation Technology*, 2011, 4(8): 39-40.
- [10] 程宏志, 潘永强. 充气速率和叶轮线速度对浮选效果的影响[J]. *选煤技术*, 1994(2): 18-21.
Cheng Hongzhi, Pan Yongqiang. Influence of aeration velocity and impeller speed to floatation effect[J]. *Coal Preparation Technology*, 1994(2): 18-21.
- [11] 赵朝成, 郑远扬. 转子转速对吸入式气浮净化机浮选动力学的影响[J]. *石油大学学报*, 1997, 21(2): 70-73.
Zhao Chaocheng, Zheng Yuanyang. Effect of rotating speed on kinetics of oil/water separation by induced air flotation machine[J]. *Oil University Journal*, 1997, 21(2): 70-73.
- [12] 李 振, 刘炯天, 曹亦俊. 搅拌调浆机制的固-液悬浮特性[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(3): 502-506.
Li Zhen, Liu Jiongtian, Cao Yijun. Solid-liquid suspension characteristics of stirred pulp-mixing mechanism[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(3): 502-506.
- [13] 李 振, 刘炯天, 闫小康, 等. 浮选过程中搅拌调浆特性研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2011, 40(1): 133-139.
Li Zhen, Liu Jiongtian, Yan Xiaokang, et al. Research on the characteristics of stirred pulp-mixing in the flotation process[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2011, 40(1): 133-139.
- [14] 桂夏辉, 刘炯天, 陶秀祥, 等. 难浮煤泥浮选速率试验研究[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(11): 1895-1900.
Gui Xiahui, Liu Jiongtian, Tao Xiuxiang, et al. Studies on flotation rate of a hard-to-float fine coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(11): 1895-1900.
- [15] 杨福新. 机械搅拌式浮选机能耗分析[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2004(5): 31-36.
Yang Fuxin. Analysis of energy consumption of mechanical flotation machines[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2004(5): 31-36.
- [16] 赵秋月, 张延安, 刘 燕, 等. 管式搅拌反应器功率特性研究[J]. *过程工程学报*, 2009, 9(6): 278-280.
Zhao Qiuyue, Zhang Yan'an, Liu Yan, et al. Study on power characteristics of stirred tubular reactor[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2009, 9(6): 278-280.
- [17] Changunda K, Harris M, Deglon D A. Investigating the effect of energy input on flotation kinetics in an oscillating grid flotation cell[J]. *Minerals Engineering*, 2008, 18(21): 924-929.
- [18] Jameson G J. Advances in fine and coarse particle flotation[J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2010, 49(4): 328-330.