关于旋流微泡浮选柱回收粗颗粒粉煤的研究

俞和胜[1]，刘常春[2]，叶浩[3]
1 中国矿业大学化工学院，江苏徐州 （221008）
2 平朔安太堡煤矿选煤厂，山西朔州 (038500)
3 南开大学城市与区域经济研究所，天津 （300457）
E-mail: sheng539@163.com; yehao3275@tom.com

摘 要：论文简要论述了 FCMC 旋流微泡浮选柱的工作原理，通过浮选柱煤泥浮选试验找到了循环压力变化趋势、充气量的大小以及柱径的不同三个结构参数因素对粗颗粒粉煤回收的影响结果，并指出了在实际生产中不断调节这三个结构参数因素的重要意义。通过浮选柱煤泥浮选试验说明了煤泥水浓度在实际生产中的影响结果，提出研究生产专门针对用于浮选柱浮选的起泡剂对浮选柱回收粗颗粒粉煤的重要意义。从而找到了改善 FCMC 旋流微泡浮选柱回收粗颗粒粉煤的有效途径。

关键词：FCMC 型旋流微泡浮选柱；粗颗粒粉煤；灰分；回收量

1. 引言

近年来，随着采煤机械化程度的提高和选煤厂煤炭分选过程机械化程度的提高，原生煤泥和次生煤泥量都有所增加，加大了选煤厂产品中、细粒级煤的含量。由于中国的能源资源和消费结构决定了中国未来几十年内仍将以煤炭为主要能源，回收细粒煤就成为了充分利用资源、节约能源必不可少的环节，而且也是提高选煤厂经济效益的有效途径。所以研制高效节能的细粒煤分选设备显得尤为重要。浮选柱的研制和开发应用就是这一背景下的产物。

选煤厂目前处理煤泥的常规方法是：+0.5mm 粒级的物料用跳汰选或者重介选；-0.5mm 粒级用浮选。在以环保、节能为一体的可持续发展战略已成为国家的一项基本政策下，浮选得到了足够的重视。以浮选柱为核心的煤泥水处理系统的应用也逐步大型化、广泛化。由中国矿业大学徐州校本部矿物加工工程研究中心研制的 FCMC 型旋流微泡浮选柱在这一背景下研制而成的，其克服了常规浮选设备的一些缺点，获得了广泛的应用。从而形成了以 FCMC 旋流微泡浮选柱为核心的高效、简易煤泥分选回收系统。

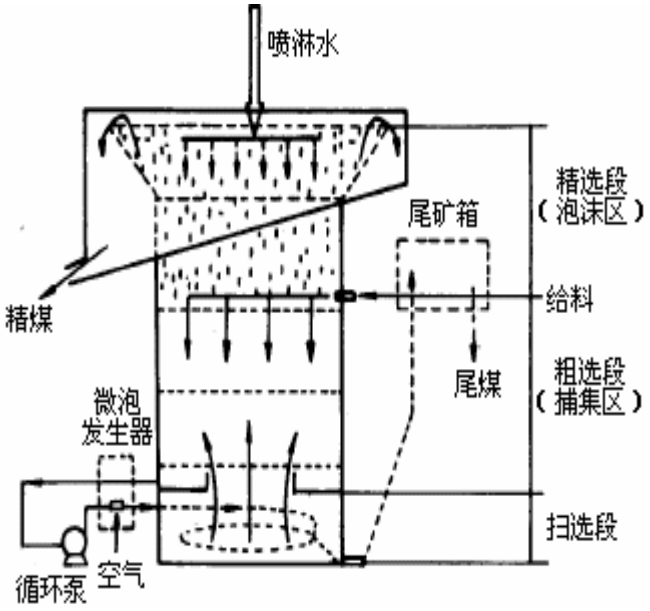


图 1 旋流微泡浮选柱的结构图

从分离总体效果看，FCMC 旋流微泡浮选柱并不亚于浮选机，这是由于浮选柱对极细粒分选的高效性。但是对于不同粒级的煤泥，并不是都能达到一个人们认可的指标。在浮选-0.5mm 级煤泥时，粗颗粒粉煤的损失比较严重，

对于+0.25mm 粒级，浮选柱的分选效果比浮选机要差。本文对影响 FCMC 旋流微泡浮选柱浮选细粒煤的几个重要的因素（循环压力、充气量、浮选柱的柱径、浮选药剂类型、煤泥水浓度）进行了研究，分析提高旋流微泡浮选柱回收粗颗粒粉煤的因素，促进其在大中小型选煤厂更加大型化的应用。

2. FCMC 型旋流微泡浮选柱的工作原理

旋流微泡浮选柱结构及工作原理如图 1 所示。旋流微泡浮选柱包括浮选段、旋流段和气泡发生器三部分。浮选段又可分为两个区：旋流段和入料点之间的捕集区(或矿化区)以及入料点与溢流口之间的泡沫区(或精选区)。捕集区（粗选区）设稳流板，有效降低柱体高度。在浮选段顶部设有冲洗水装置和泡沫收集槽，给矿管位于柱高的 2/3 处，分选最终尾矿从旋流段底流口排出。气泡发生器位于柱体外部，沿切线方向与旋流段相衔接，其上设有空气吸入管。气泡发生器利用循环矿浆加压喷射，吸入空气和从矿浆准备器过来的煤泥水中的起泡剂混合，同时粉碎气泡，并通过压力释放析出大量微泡，然后沿切线进入旋流段。气泡发生器在产生合适气泡的同时，也为旋流段提供旋流力场。

在旋流微泡浮选柱内，气泡发生器的工作介质为循环的中矿。经过加压的循环矿浆进入气泡发生器，引入气体并形成含有大量微细气泡的气、固、液三相体系。含气、液、固三相的循环矿浆沿切线高速进入旋流段以后，在离心力和浮力的同时作用下，在旋流段作旋流运动，气泡和已矿化的气絮团向旋流中心运动，并迅速进入浮选段。气泡与从上部给入的矿浆反向碰撞矿化，增加了接触和粘附的几率，实现了浮选段的高选择性分选。旋流段的工作是扫选回收浮选段未及分选的精煤颗粒，以提高精煤回收率，增加浮选尾煤灰分。即，旋流分离段不仅加速了气泡在柱体断面上的分散，更重要的是对经过分离段的分选的中矿及循环中矿具有再选作用。在旋流力场作用下，两部分中矿按密度发生分离，低密度物料（包括绝大部分气泡和矿化气泡）汇集旋流分离段中部并向上进入柱分离精选段，再次经历柱分离的精选过程。气泡在柱体内上升矿化并不断受到清洗，清除夹带的高灰物质，上部较厚的泡沫层以及冲洗水的喷淋作用使精矿的品位大大提高。从而使旋流微泡浮选柱具有很高的精煤回收率和选择性[1] [2]。

旋流分离段的底部是平底形式，但内部结构采用圆锥形型结构，如图 2 简示。经过旋流力场充分作用，大量高密度的颗粒物料经由靠近底部的尾矿口排出，成最终的尾矿。而少量的微细气泡以及大量的中间密度物料由底部的机械和旋流力场的作用单独引出作为循环矿浆。采用圆锥形结构能加速高密度颗粒物料与低密度物料的分离；减少高灰物料对循环分选的影响；而且利于尾矿从尾矿口流出。

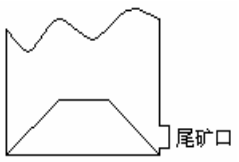


图 2 旋流分离段底部示意图

3. 旋流微泡浮选柱浮选试验研究及分析

在浮选过程中，影响 FCMC 型旋流微泡浮选柱分选的因素主要有两方面，即结构参数因素和操作参数因素。几个主要结构参数因素有循环压力、充气量、柱径；浮选柱的操作参数因素主要有矿浆浓度（即煤泥水浓度），药剂用量、种类等。由于在实际的生产中，每一家选煤厂洗选的煤种、煤量都不甚一样，对药剂的需求量就不好确定，所以在确定操作参数时主要考虑煤泥水浓度和药剂种类对浮选柱分选性能的影响。

3.1 浮选柱的结构参数实验研究与分析

3.1.1 循环压力实验及分析

循环压力是指在 FCMC 型旋流微泡浮选柱循环的中矿通过循环泵所产生的循环压力，压力来自于循环泵的作用。在循环泵的作用下，循环矿浆沿切线高速进入旋流段以后，在旋流段就产生了离心力。矿浆在离心力和浮力的同时作用下，实现浮选过程。显然，离心力场对细颗粒的浮选起到了强化的效果，而循环泵的作用直接关系到旋流段产生的离心力的强弱，所以循环泵的压力间接的反映了浮选柱旋流段中力场对 FCMC 型浮选柱浮选能力的影响。所以分析微泡浮选柱中离心力场，也就能说明循环压力对浮选的影响[3][4]。

在试验的过程中通过调节循环泵前后（主要是泵后）的调节阀来改变浮选柱浮选过程的压力状况。实验时，气泡发生器的小盖全开；煤泥水浓度 67～110g/L；入料煤泥水中的煤粒粒度-0.5mm。药剂的调节以泡沫层的状况而定，一般以人工视泡沫层状况良好为准。当取 100 克精煤样品时，不同压力情况下，精煤中+0.25mm 及-0.074mm 粒级产量见表 1 。

表 1 压力试验结果表

压力，Mpa	+0.25mm 产量，g	-0.074mm 产量，g
0.20	12	51.4
0.19	4.9	61.2
0.18	7.7	55.3
0.16	7	55.9
0.15	6.7	53.0
0.14	8.6	52.2

从表 1 可以看到，在 0.18MPa 以上压力的时候，压力增大较粗颗粒回收的增加也是比较明显的，但是从表 5-1 可以看到，压力为 0.20MPa 时，微细颗粒的回收就不太理想（仅为 51.4g）；而当压力为 0.19MPa 时，粗粒回收最差。而当压力在 0.18MPa 之下时，粗粒（即 0.25mm 以上颗粒）的回收基本上是一个增加的趋势。 由表 1 可得到+0.25mm 粒级回收产量随压力变化的回归曲线方程为：

$$y = 0.5821x^2 - 4.4264x + 14.48 \qquad \text{.....(1)}$$

在求出回归方程之后，对原来的假定进行显著性检验，检验两个量之间的线性相关性是否密切。表示这种关系的最重要的指标是相关系数。查用相关系数时，遇到三个数，一个是变量数，在这里是 2；一个是自由度，它等于数据组数减去变量个数，在这里是 4；再一个是置信水平（取 5%）。此时，R＝0.7203，R 值小于相关系数检验表中的 R 值 0.811，所以所求出的回归曲线方程没有实际意义。但求出的 R 值＝0.7203 是接近于 1 的，表明粗粒的回收产量于压力之间关系还是密切的。

因为当前 FCMC 型旋流微泡浮选柱已经广泛应用到大中小型的选煤厂了，而从大部分的厂家反馈信息来看，都以 0.18MPa 作为他们在生产中的压力指标，现在来看，适当减小压力对回收粗颗粒是有利的，而且微细颗粒的回收并不会减小太多。减小压力不仅对循环泵有好处，对管路也是相当有益的。因此通过对压力因素的分析，建议生产中采用低压力，但低的程度要根据实际的生产状况来决定。

3.1.2 充气量实验及分析

充气量一般被认为是达到浮选柱最佳化控制最灵活、最敏感的参数。本试验在研究充气量的时候，是用气泡发生器的气盖的开关程度来间接表征充气量的大小。试验过程中循环泵压力定为 0.18MPa；煤泥水浓度 67～110g/L；入料煤泥水中的煤粒粒度-0.5mm。药剂的调节以泡沫层的状况而定，一般以人工视泡沫层状况良好为准。将气盖开到全开、1/2 开、1/3 开三种状态，视为三种不同的充气量。取精煤样品 100 克时，气盖在打开不同程度下精煤样中+0.25mm 及-0.074mm 粒级产量见表 2 。

表 2 充气量试验结果表

气盖开启状况	+0.25mm 产量，g	-0.074mm 产量，g
全开	2.8	52.6
1/2 开	29.2	37.4
1/3 开	14.8	46.2

从中可以看出，当气盖 1/2 开的时候粗粒的回收较为明显，但是同时可以看出，这种气盖开启状况下，细粒的回收下降也是较为显著（为 37.4g）。由表 2 可得出不同气盖开启状况下+0.25mm 粒级回收产量的回归曲线为：

$$y = -20.4x^2 + 87.6x - 64.4 \quad \text{……} (2)$$

求出的 R 值＝1，表明粗粒的回收产量与充气量之间有着确定性的函数关系。也表明，求出的回归方程具有实际意义。

从现场生产的情况来看，许多厂家的浮选柱司机在生产过程中并不作气盖开启的调节，也就不对充气量进行调节。其实这是不太实际的。由实验可知，气盖的状况是不为全开也不

为全闭，处于中间的开启状况为最佳。从试验分析来看，调节到合理的充气量可以提高粗粒回收也不会使得回收细粒有所下降，这是最具有实际意义的。到底调节到那个开启状况最为合理，还得根据生产实践来定。

3.1.3 浮选柱柱径试验及分析

柱径是旋流微泡浮选柱最基本的几何参数之一。合适的柱径对浮选柱浮选细粒煤的能力是至关重要的。浮选柱直径一般由精矿所需要的物料流量决定，该流量又取决于泡沫最大负载量。泡沫负载量 C 称为进入泡沫产品的每单位浮选柱横截面面积大固体物料率。

在理论上，柱径 Dc 与产品产出率 Y 及泡沫最大负载量 C_{max} 之间的关系可表示如下：

$$D_c = \sqrt{\left[\frac{4Y}{\pi C_{\max}}\left(\frac{1}{\rho_f}+\frac{1-S}{S}\right)^{-1}\right]\frac{Q_f}{N}} \qquad \cdots\cdots(3)$$

式中：Y——产品产出率；

N——浮选柱数量；

C_{max}——泡沫最大负载量；

ρ_f——给料流中矿粒的比重；

S——给料的相对固体含量（按重量）；

Q_f——体积给料量。

该式表示对于 C_{max} 期望的 Y 和 C_{max} 值来说，Dc 是 Qf 和 N 的一个函数，方程式（3）中括号内各项在按比例扩大中保持不变[5]。

本试验对三种柱径的浮选柱做了实验室试验，即在 φ100mm，高度为 1715mm（下体尾矿流出口至上体精煤溢流槽口，下同）；φ200mm，高度为 1835mm；φ300mm，高度为 2065mm 三种系列的浮选柱上做了试验研究，来分析柱径对浮选柱浮选效果的影响。实验可得，不同柱径下，+0.25mm 及-0.074mm 粒级的产率如表 3 。

表 3 柱径试验结果表

柱径，mm	+0.25mm 产率，%	-0.074mm 产率，%
100	1.83	83.1
200	2.74	72.0
300	1.22	82.5

从表 3 可以看出，柱径的不同对粗粒的回收量也是有一定的影响的。不同的柱径下回收的粒级 0.25mm 以上的量是明显不同的。当柱径是 200mm 的时候粗粒的回收较为明显，但是这种柱径下，细粒的回收也有所下降。+0.25mm 粒级回收产量随柱径变化的回归曲线方程为：

$$y = -1.215x^2 + 4.555x - 1.51 \qquad \cdots\cdots(4)$$

对于此回归线，求出的 R 值＝1，表明粗粒的回收产率与柱径之间有着确定性的函数关系。也表明，求出的回归方程具有实际意义。

从现场生产的情况来看，经过许多厂家对浮选柱的使用来看，在成系列的 FCMC 型旋流微泡浮选柱中 FCMC－2000、FCMC－3000 的使用最为厂家们推崇，这表明这两中系列的浮选柱的柱径比较符合实际选煤颗粒的回收。找到合理的柱径不仅让粗粒回收增加，从而也不会使回收细粒有所下降，这是最具有实际意义的。从实验室和生产实践来看中等直径柱径的浮选柱要比小柱径的浮选柱和大柱径的浮选柱效果要好。

3.2 浮选柱的操作参数实验研究与分析

3.2.1 浮选煤泥水浓度实验及分析

煤泥水浓度是煤泥浮选工艺过程中的重要因素之一，对浮选技术指标有直接的影响。它是由煤泥粒度组成、细泥含量及对产品的数量要求确定的[6]。在有大量细泥存在的情况下，提高煤浆浓度，对粗颗粒的浮选是不利的。当原料中细泥含量少时，适当地提高煤浆浓度，对粗颗粒的浮选是有利的[7] [8] [9]。浮选柱对煤浆浓度的要求比较严格，如果入浮选的煤泥水浓度不符合浮选柱的煤泥水浓度要求，那么浮选柱就不能正常工作，产品也就不合格。一般入旋流微泡浮选柱的煤泥水浓度要求在120g/L以下，所以在对煤泥水浓度这个因素单独研究时，循环泵压力一定，为0.18MPa；煤泥水浓度采用60g/L、80g/L、100g/L三种不同浓度；入料煤泥水中的煤粒粒度-0.5mm。捕收剂为煤油，起泡剂为C_{12}，药剂量按煤泥量的多少来加，具体添加的捕收剂（煤油）、起泡剂（C_{12}）见下页表 4 。实验可得，取精煤样品100克时，煤泥水浓度与精煤样中+0.25mm粒级产量的关系见表 5 。

表 4 药剂用量结果表

煤泥水浓度，g/L	煤油用量，g	起泡剂用量，g
60	1.33	0.20
80	1.78	0.27
100	2.22	0.34

表 5 煤泥水浓度试验结果表

煤泥水浓度，g/L	+0.25mm 产率，%	-0.074mm 产率，%
60	1.83	83.1
80	1.42	82.9
100	1.01	83.5

由表 5 可以得到，+0.25mm 产率随煤泥水浓度变化的回归曲线为：

$$y = -0.41x + 2.24 \quad \text{..... (5)}$$

此时求出的 R＝1，表明煤泥水浓度与粗粒回收是线性相关的。

从表 5 可以看出煤泥水浓度越高对浮选柱回收粗粒级煤颗粒（即 0.25mm～0.5mm 煤粒）越是不利。实际上，现场的生产情况也是如此，当煤泥水浓度高的时候不仅发挥不了浮选柱对细粒的高选择性，粗粒更是几乎完全损失，影响生产工艺不说，还会失去巨大的经济效益。

3.2.1 浮选起泡剂试验及分析

煤泥浮选是利用煤和矿物杂质的表面物理化学性质的差异实现分选的过程。为了强化分选效果，浮选中添加了各种浮选剂。浮选剂的作用主要是提高煤粒表面疏水性和煤粒在气泡上粘着的牢固度；在矿浆中促使形成大量气泡，防止气泡兼并和改善泡沫的稳定性，使煤粒有选择性地粘着气泡而上浮；调节煤与矿物杂质的表面性质，提高煤泥的浮选速度和选择性[10]。可见浮选药剂在浮选煤泥过程的作用是不可忽视的。

当循环泵压力一定，为0.18MPa；煤泥水浓度60g/L三种；入料煤泥水中的煤粒粒度-0.5mm。捕收剂为煤油时，起泡剂分别为GF起泡剂；C_{12}起泡剂；仲辛醇起泡剂三种不同药剂，取精煤样品100克，起泡剂的选择与精煤样中+0.25mm粒级产量的关系见表 6 。

表 6 药剂试验结果表

药剂名称	+0.25mm 产率，%	－0.074mm 产率，%
GF	0.51	82.0
C_{12}	1.83	81.8
仲辛醇	1.22	81.4

从表 6 可以直观的看出只有 C_{12} 起泡剂在浮选粗粒级（0.25～0.5mm）的时候有显著的效果，而其他两种起泡剂即 GF 和仲辛醇对粗粒级的浮选效果不是很好。所以对于 FCMC 型漩流微泡浮选柱来说，研究更加有效的起泡剂是一个比较重要的研究方向。合适的药剂对浮选柱回收粗颗粒肯定会有很大的效果的。

4. 结论

本文分析了五个因素，即循环压力、充气量、柱径、煤泥水浓度、药剂种类对旋流微泡浮选柱回收粗颗粒粉煤的影响。从而得出循环压力在浮选柱浮选细粒煤中的影响是很大的，在压力 0.18Mp 以下时，粗粒的回收随压力的减少有较为明显的增加；充气量的大小（即气盖开启的不同状况）对粗粒的回收量是有一定程度的影响，当气盖 1/2 开的时候粗粒的回收较为明显；浮选柱柱径为 200mm 的实验室浮选柱模型的浮选精煤产率和浮选效率都是最好的，表明中等直径的浮选柱柱径比较符合实际选煤颗粒的回收；煤泥水浓度不应太高；浮选药剂的能力不同对回收细粒煤中较粗颗粒有着不同的影响。通过实验研究，找到了改善 FCMC 旋流微泡浮选柱回收粗颗粒粉煤的有效途径。

参考文献

[1] 谢广元等.FCMC-1500 型旋流微泡浮选柱在煤泥浮选中的应用研究[J].煤炭科学技术，1997，25（11）：26～28.
[2] 刘炯天.旋流－静态微泡浮选柱及洁净煤制备研究.博士学位论文.1999 年 5 月.
[3] J.Bouchard， A.Desbiens， R.del Villar Recent advances in bias and froth depth control in flotation columns Minerals Engineering 18(2005)，709-720.
[4] L.G.Bergh， J.B.Yianatos and C.P.Acuna Hierarchical control strategy for flotation columns Minerals Engineering， Vol.8.No.12， P1583-1591， 1995.
[5] G.H.勒特雷尔等.浮选柱浮选的设计及按比例扩大的依据.第十八届国际选矿会议论文 785-791.
[6] 刘炯天，胡军，马力强等.浮选柱分选技术的发展与应用[J].煤炭加工与综合利用.2000（1）：1～5.
[7] V.l.Davis，JR.，F.L.Stanley， P.J.Bethell， G.H.Luttrell and M.J.Mankosa Column flotation at the middle fork preparation facility Coal Preparation，1994 Vol.14，pp133-145.
[8] Jorge ubio Modified column flotation of mineral particles Int.J.Miner.process.48(1996)183-196.
[9] 丁立亲等.编著.浮选的理论和实践.煤炭工业出版社.1987 年 6 月第 1 版.
[10] 浮游选煤技术.中国矿业大学出版社.2004 年 3 月第一版.

Research on recovery of coarse granule powdered coal using cyclonic micro-bubble column flotation

Yu Hesheng，Liu Changchun，Ye Hao
School of Chemical and Technology，China University of Mining and Technology，Xuzhou，221008

Abstract

The separation principle of FCMC cyclonic micro-bubble column flotation was briefly discussed in the paper. By flotation experiment of coal slurry water， the effects of the winds of change of circulation pressure， inflating amount and difference of diameter of the column flotation on the recovery results for coarse granule powdered coal， and the important significance of the adjustment of these factors was pointed out. By flotation experiment of coal slurry water， the influence of concentration of coal slurry water on floatation results in practice was illuminated， and the important significance of the study on the frother specialized in the recovery of coarse granule powdered coal was proposed. So we find an effective method to improve the recovery of coarse granule powdered coal using FCMC cyclonic micro-bubble column flotation.

Keywords：*FCMC cyclonic micro-bubble column flotation； coarse powdered coal； ash content； reclaim amount*

作者简介：
俞和胜（1984- ），男，江苏南京人，中国矿业大学在读硕士生，主要从事煤炭深加工和细粒煤分选及脱水的研究工作；
叶浩（1982- ），男，江苏徐州人，南开大学在读硕士生，主要从事区域经济发展和区域经济空间布局研究工作。