

# 高浓度煤泥水絮凝实验及分形理论的研究

范 玮

(煤炭科学研究总院 节能工程技术研究分院,北京 100013)

**摘要:**以某选煤厂煤泥水为例,选用聚丙烯酰胺(PAM)为絮凝剂,对高浓度煤泥水进行絮凝实验,研究了加药量与煤泥沉降速度的关系;分析了强、弱搅拌速度和时间对煤泥絮凝效果的影响,并最终确定了实验煤样煤泥水沉降的最佳条件。结果表明:PAM加药量为0.10%时,煤泥平均沉降速度最大为0.58 mm/s;强搅拌速度150 r/min,强搅拌时间40 s,弱搅拌速度80 r/min,弱搅拌时间60 s时,煤泥絮凝效果最好。最后在最优絮凝条件下计算了絮体的分形维数,强、弱搅拌强度下的分形维数 $D_f$ 分别为1.5737、1.7034,说明实验所得最佳强、弱搅拌强度合理,2种搅拌方式的结合有利于煤泥的絮凝沉降。

**关键词:**煤泥水;聚丙烯酰胺;絮凝;沉降速度;浊度

中图分类号:TD946

文献标识码:A

文章编号:1006-6772(2013)04-0029-04

## High concentration slime water flocculating test and fractal theory

FAN Wei

(Energy Conservation and Engineering Technology Research Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Taking the slime water of one coal preparation plant as research object, carry out high concentration slime water flocculating test, the PAM is used as flocculant. Investigate the relationship between dosage and slime setting velocity as well as the influence of stirring rate and time on flocculation effect. Determine the best flocculation condition. The results show that, when the PAM dosage is 0.10 percent, the maximum setting velocity of slime average is 0.58 mm/s. When the stirring intensity is 150 r/min and 80 r/min, it needs 40 s and 60 s respectively to get better effects. Calculate the fractal theory under the best flocculation condition, which is 1.5737 and 1.7034 when the stirring intensity is 150 r/min and 80 r/min. The combination of these two kinds of stirring methods is beneficial for slime flocculation.

**Key words:** slime water; PAM; flocculation; setting velocity; turbidity

## 0 引 言

煤泥水是煤矿湿法选煤产生的工业尾水,含有大量煤泥颗粒和岩粉。煤泥水的性质取决于原煤

中煤泥、次生煤泥含量,煤泥中可溶性物质的成分、含量及生产用水的性质。随着机械化采煤技术的发展,选煤厂入选原煤中含有大量矸石,造成煤泥水中存在大量以稳定分散状态存在的微细颗粒,形

收稿日期:2013-07-10 责任编辑:白娅娜

作者简介:范 玮(1982—),男,山西平遥人,工程师,硕士研究生,从事煤粉锅炉技术研究工作。

引用格式:范 玮.高浓度煤泥水絮凝实验及分形理论的研究[J].洁净煤技术,2013,19(4):29-32,36.

成难以沉降的高泥化煤泥水<sup>[1-2]</sup>。“十一五”期间,全国原煤入选率由2005年的31.9%提高至2010年的50.9%。2010年中国原煤产量达到33.4亿t,预计2015年,原煤产量将达到43亿t,入选原煤量势必继续加大,煤泥水处理中存在的问题将更加显著<sup>[3-5]</sup>。因此,在传统混凝工艺的基础上,寻找一种更高效、环保的煤泥水处理方法势在必行<sup>[6-7]</sup>。

絮凝作用机理主要体现在3个方面:药剂在水中均匀混合,混合后药剂与颗粒的接触碰撞以及颗粒间的碰撞生长,归纳为药剂的性质和水力条件的控制<sup>[8]</sup>。本文采用某选煤厂煤泥水为研究对象,以聚丙烯酰胺(PAM)为絮凝剂<sup>[9-10]</sup>,采用高精密度仪和连续拍摄技术等,以浑液面平均沉降速度和上清液浊度为评价指标,研究了不同悬浮物浓度与加药量之间的关系,并进一步分析了强弱搅拌强度对煤泥絮凝效果的影响。

## 1 实验条件

### 1.1 实验材料及仪器

实验材料:煤样经烘干、碾磨、过筛及四分法混匀,称取所需样品,充分浸泡并间歇搅拌后配制成质量浓度为100 g/L的煤泥水。

实验药剂:絮凝剂采用1200万分子量的PAM溶液,溶液质量分数分别为0.01%、0.05%、0.10%、0.30%和0.50%。

实验仪器:可变速速度搅拌器,1000 mL量筒,移液管,高精密度浊度仪,电子天平,WGIS-50激光粒度分析仪等。

### 1.2 实验方法

以沉降3 min时的平均沉降速度和上清液浊度为评价指标。

1) 在相同搅拌强度下,分析PAM质量分数对煤泥沉降速度的影响,并最终确定100 g/L煤泥水的最佳加药量。

2) 絮凝反应通常有2种搅拌模式,第一阶段的强搅拌使药剂和水快速混合均匀,此段特点是搅拌速度快、时间短;第二阶段的弱搅拌使絮体继续生长,此段特点是搅拌速度慢、时间略长。

研究强搅拌强度对煤泥絮凝效果的影响。在最佳加药量下,保证弱搅拌强度和强搅拌时间不变,研究强搅拌速度(100、120、150、200、250 r/min)对絮凝效果的影响;保证强搅拌速度不变,研究强搅拌时间(20、40、60、80、100 s)对絮凝效果的影响。

研究弱搅拌强度对絮凝效果的影响。在最佳加药量下,保证强搅拌强度和弱搅拌时间不变,研究弱搅拌速度(60、80、100、120、150 r/min)对絮凝效果的影响。保证弱搅拌速度不变,研究弱搅拌时间(20、40、60、80、100 s)对絮凝效果的影响。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PAM加药量对沉降速度的影响

PAM加药量对煤泥沉降速度的影响如图1所示。由图1可知,随着PAM加药量的增加,煤泥沉降速度呈先增加后降低的趋势。PAM加药量为0.10%时,平均沉降速度最大,约为0.58 mm/s。PAM用量很少(0.01%)时,沉降速度很慢,微量PAM只能结合很少一部分悬浮颗粒,起不到絮凝效果。PAM用量从0.01%增至0.10%时,沉降速度迅速上升。PAM用量超过0.10%时,沉降速度反而下降<sup>[11]</sup>,说明此时PAM分散性较差,药剂主要以“点分散”的形式存在,不能充分发挥絮凝作用,导致沉降速度明显降低。

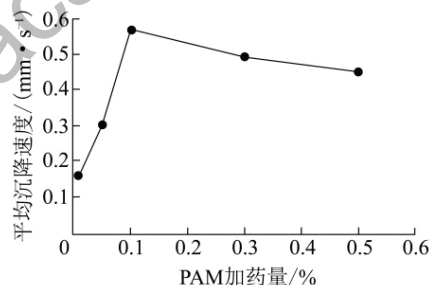


图1 PAM加药量对煤泥沉降速度的影响

### 2.2 强搅拌强度对絮凝效果的影响

强搅拌速度对絮凝效果有很大影响。适宜的强搅拌速度可使药剂与煤泥充分混合,均匀分散。强搅拌强度对絮凝效果的影响如图2所示。

由图2a)可知,搅拌时间一定的条件下,随着搅拌速度的增加,煤泥絮凝效果逐渐变好,继续增加速度,絮凝效果急剧变差。强搅拌速度过低,PAM以“点分散”形式存在,即药剂分子以基团的形式均匀分散,虽能包裹一定量细颗粒形成更大初级絮体,但在弱搅拌过程中因数量较少,相邻絮体间距较大,相当一部分细颗粒通过絮体空隙仍停留在上清液中,导致沉降速度降低,上清液剩余浊度较高<sup>[7]</sup>。强搅拌速度较高时,PAM分子以“单分子”形式均匀分散,通过分子链对煤泥颗粒进行吸附架桥作用,形成数量众多的微小絮体,在随后的弱搅

拌过程中,由于絮体增长程度有限,无法成为大小适中的絮体,导致沉降速度降低。同时,由于强搅拌速度较高时形成的絮体形体较小、数量较多,同一界面上相邻絮体间距较小,从相邻絮体空隙中通

过的细颗粒也较少,因此上清液中悬浮物含量较低,出水剩余浊度相对较好<sup>[12]</sup>。强搅拌速度在 150 r/min 时,煤泥沉降速度达到最大,约为 0.75 mm/s,同时出水浊度最低,为 105 NTU 左右。

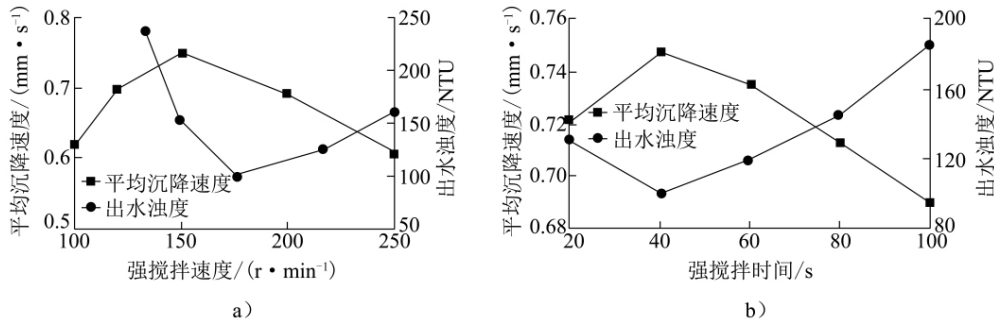


图2 强搅拌强度对煤泥絮凝效果的影响

由图 2b) 可知 随着搅拌时间的增加,煤泥絮凝沉降效果先逐渐变好后急剧变差。强搅拌时间为 40 s 时,PAM 分子最大程度地以“分子簇”形式均匀分散,依靠表层分子链吸附部分煤泥颗粒,在持续的水力搅拌下,吸附了煤泥颗粒的簇团内层分子逐渐扩散,形成更大的分子簇团;当煤泥颗粒扩散、填充到这些较大簇团内层后被内层分子链吸附,同时簇团外层吸附有煤泥颗粒的分子链在水力搅拌下蜷缩,进一步包裹部分煤泥颗粒,成为更密实、数量足够、大小适中的初级絮体;在后期弱搅拌条件下,这些初级絮体不断成长,形成密实且较大的絮体,从而实现快速沉降。搅拌时间相对较短(20 s)时,PAM 分子以“点分散”形式存在,此时,仅有药剂基团的外层分子能够伸展到溶液中,吸附一部分细颗粒,同时在短期的快速搅拌下,这些吸附了细颗粒的外层分子链相互蜷缩,进一步包裹适量细颗粒,形成数量较少、形体较大的包裹絮体,这些包裹体间隙较大,使绝大部分细颗粒通过空隙停留在上清液中,影响沉降速度。当搅拌时间过长(60,80 s)

时,PAM 簇团内层分子过分扩散,逐渐以“单分子”形式存在,吸附细颗粒后形成数量众多且形体较小的初级絮体,平均沉降速度快速下降。强搅拌时间为 100 s 时,这些吸附了煤泥颗粒的单分子链可能发生部分断裂,严重影响平均沉降速度。因此,强搅拌的最佳搅拌时间约为 40 s,此时煤泥沉降速度为 0.74 mm/s,浊度约为 100 NTU。

强搅拌的作用是使 PAM 在煤泥水中快速均匀分散。对于高浓度煤泥水而言,强搅拌强度为 150 r/min,强搅拌时间为 40 s 时,煤泥沉降效果最好。强搅拌强度过低不利于药剂充分均匀分散,絮凝效果差;强搅拌强度过大,药剂虽能充分分散,但过度分散的药剂形成大量细密的初级絮体,使后续搅拌中絮体增长缓慢,影响絮凝效果。

### 2.3 弱搅拌强度对絮凝效果的影响

弱搅拌为絮凝反应的第二阶段,搅拌速度相对慢,搅拌时间较长,在不破坏已有絮体的情况下促使絮体继续生长。弱搅拌对煤泥絮凝效果的影响如图 3 所示。

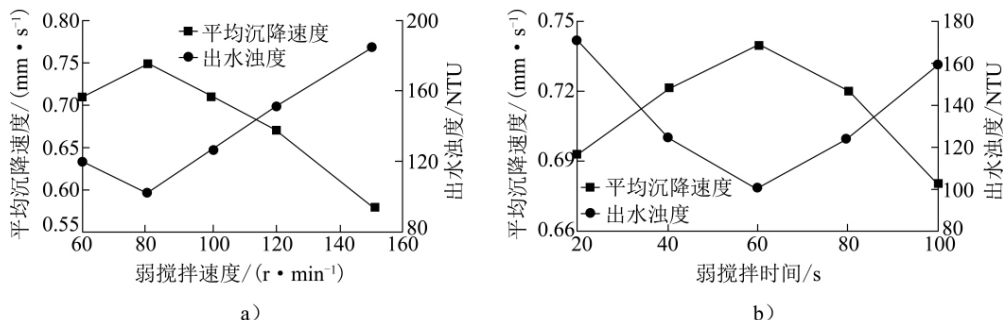


图3 弱搅拌强度对煤泥絮凝效果的影响

由图 3a) 可知 随着弱搅拌速度的增大, 浑液面平均沉降速度呈现先增加后减小的趋势, 出水浊度则相反。弱搅拌速度为 80 r/min 时, 水力条件更易于初级絮体的有效聚集, 此时, 多个初级絮体碰撞聚集, 包裹大量细颗粒和初级包裹絮体, 形成较高级的大包裹絮体; 在持续的弱搅拌速度下, 这些大包裹絮体继续碰撞聚集, 进一步包裹低级絮体及初始颗粒, 并不断生长形成更大的包裹絮体。弱搅拌速度过低 (60 r/min) 时, 虽然初级包裹絮体能够相互碰撞, 但由于絮体间碰撞产生的黏结力较小, 初级絮体很难有效聚集, 无法形成更高级的包裹絮体, 沉降速度相对偏低。弱搅拌速度较高 (100 r/min) 时, 初级絮体可形成较高级的包裹絮体, 但当其成长到一定程度后, 由于絮体间碰撞较为激烈, 导致部分大包裹絮体开始破碎, 重新生成较低级包裹絮体, 沉降速度有所降低<sup>[13]</sup>。弱搅拌速度继续增大 (120 r/min), 初级包裹絮体碰撞相当激烈, 当包裹速率与破碎速率相等时, 絮体不再生长, 停留在初级包裹絮体阶段, 平均沉降速度明显降低。因此, 弱搅拌速度为 80 r/min 时, 煤泥沉降速度最大, 为 0.74 mm/s, 浊度最低, 为 102 NTU。

由图 3b) 可知 随着弱搅拌时间的增加, 浑液面的平均沉降速度呈现先增加后减小的趋势, 出水浊度则相反。弱搅拌时间为 60 s 时, 出水浊度降至最低, 此时絮体间不断聚集、包裹大量细颗粒, 最终成长为高级、密实性较好的大包裹絮体, 由于这些大包裹絮体吸附、包裹了大量细颗粒, 因此上清液中

细颗粒含量较低, 出水浊度相应减小。弱搅拌时间较短 (20 s) 时, 絮体成长受到限制, 可形成少数较低级的包裹絮体, 去除部分细颗粒, 因此上清液中剩余浊度相对较低。弱搅拌时间较长 (100 s) 时, 已形成的大包裹絮体开始破碎, 絮体中的细颗粒重新悬浮于上清液中, 难以去除, 水质较差, 剩余浊度明显上升。因此, 弱搅拌时间为 60 s 时, 煤泥沉降速度最大, 为 0.74 mm/s, 浊度最低, 为 98 NTU。

## 2.4 絮体分形维数的计算

以最佳强、弱搅拌强度 (搅拌速度、搅拌时间) 为基础, 计算絮体的分形维数。在显微镜下对絮体进行拍摄, 图片经像素化处理后得到絮体投影面积  $A$  和投影周长在某一方向上的最大长度  $L$ <sup>[14]</sup>, 分形维数  $D_f$  与  $A, L$  的计算关系<sup>[15]</sup> 为

$$A = \alpha L^{D_f} \quad (1)$$

$$\ln A = D_f \ln L + \ln \alpha \quad (2)$$

$$D_f = \frac{\ln A - \ln \alpha}{\ln L} \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  为比例系数。

在强搅拌速度 150 r/min, 强搅拌时间 40 s, 弱搅拌速度 80 r/min, 弱搅拌时间 60 s 时, 得到的分形维数如图 4 所示。

由图 4 可知, 强搅拌时煤泥水中已形成较小的初级絮体, 经弱搅拌后絮体得到进一步生长。分形维数越好, 表示絮凝效果越好, 强、弱搅拌强度下的分形维数  $D_f$  分别为 1.5737, 1.7034, 证明 2 种搅拌方式的结合有利于煤泥的絮凝沉降。

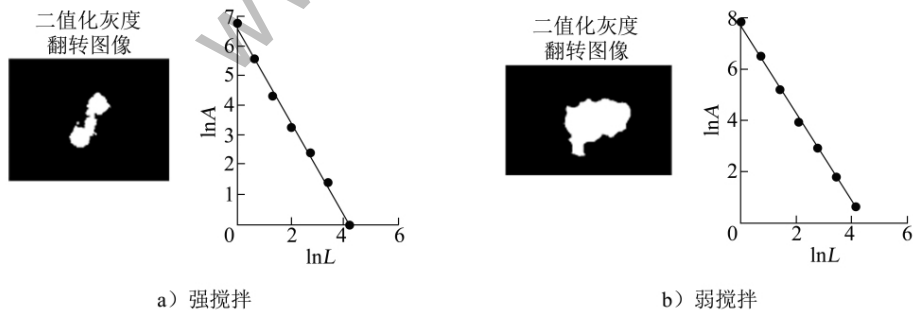


图 4 搅拌的分形维数

## 3 结 论

絮凝在煤泥水处理中具有重要作用。絮凝效果的好坏与废水性质, 絮凝剂种类、用量, 水力条件等有关<sup>[16]</sup>。实验研究了 PAM 加药量, 强、弱搅拌强度等对高浓度煤泥水絮凝效果的影响。

1) 煤泥水质量浓度为 100 g/L 时, PAM 的最佳加药量为 0.10%。

2) 高浓度煤泥水快速絮凝的最佳水力条件为: 强搅拌速度 150 r/min, 强搅拌时间 40 s, 弱搅拌速度 80 r/min, 弱搅拌时间 60 s。

(下转第 36 页)

化管理路线,在稳定生产的同时,有效利用次产品矸石掺配末原煤,实现末原煤发热量稳定,最大化接近末原煤质量控制上限,避免人为因素造成的质量过剩和质量超标问题。城郊选煤厂末原煤均质化生产实现了数字化、自动化控制代替人为控制,稳定末原煤生产质量,从根本上解决了末原煤质量过剩问题,具有较高的推广价值。

## 参考文献:

- [1] 周荣,郝春建,陈常州.城郊选煤厂块煤防破碎系统的研究与实践[J].煤炭加工与综合利用,2009(5):10-12.
- [2] 何茂林.城郊选煤厂煤泥水处理系统改造设计[J].煤炭工程,2012(3):26-28.
- [3] 郝春建,姬吉星,景雷刚.城郊选煤厂煤泥水处理系统改造实践[J].选煤技术,2012(4):43-46.
- [4] 张云生,姬吉星.城郊选煤厂主厂房振动及噪声治理的研究与实践[J].选煤技术,2012(4):36-39.
- [5] 何茂林.城郊选煤厂煤泥水处理系统改造实践[J].洁净煤技术,2012,18(2):27-30.
- [6] 谢广元.选矿学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010.
- [7] 陶鹏,张振红,陈东剑.末原煤水分对经济效益影响的数学模型[J].煤炭加工与综合利用,2007(3):22-25.
- [8] 陈晓东.原煤的均质化[J].煤炭科学技术,1991(9):39-43.
- [9] 任亮.基于提高配煤质量的工艺指标研究[J].淮北职业技术学院学报,2009,8(5):142-143.
- [10] 凌丽伟.自动化配煤技术在陈四楼选煤厂的应用[J].中州煤炭,2011(5):79-80,82.
- [11] 何茂林.新桥选煤厂中煤生产流程及末原煤质量控制的技术改造[J].洁净煤技术,2009,16(2):21-24,44.
- [12] 戴少康.选煤工艺设计实用技术手册[M].北京:煤炭工业出版社,2010.
- [13] 孙增勇.天池选煤厂选矸系统的设计[J].洁净煤技术,2012,18(6):20-23.
- [14] 韩恒旺,訾涛,鲁和德,等.梁北选煤厂的扩能改造[J].洁净煤技术,2011,17(6):4-6.
- [15] 胡志东,蒲建国.孔庄选煤厂工艺系统改造实践[J].洁净煤技术,2012,18(1):26-29,37.

(上接第32页)

3) 通过分形维数的计算,证明实验所得最佳强、弱搅拌强度合理,强、弱搅拌强度下的分形维数  $D_f$  分别为 1.5737, 1.7034。

## 参考文献:

- [1] 张明旭.选煤厂煤泥水处理[M].徐州:中国矿业大学出版社,2005.
- [2] 吕英.煤炭行业节能环保处长座谈会在厦门召开[EB/OL].[2011-04-08].http://www.ccpua.org/article/detail.asp?articleId=121.
- [3] 苟鹏,叶向德,吕永涛,等.煤泥水的水质特性及处理技术[J].工业水处理,2009,29(1):53-57.
- [4] 刘晓梅,刘炯天,吕鑫磊.煤泥水处理药剂综述[J].洁净煤技术,2009,15(5):20-24.
- [5] 宋风华,陈光柱,罗成名,等.煤泥水自动加药控制系统设计[J].煤矿机械,2012,33(2):168-170.
- [6] 郑毅,丁曰堂,李峰,等.国内外混凝机理研究及混凝剂的开发现状[J].中国给水排水,2007,23(10):14-17.
- [7] 梁娟,杨青,丁然,等.混凝剂投加量对水质及絮体尺寸变化特性的影响[J].给水排水,2012,38(S1):5-9.
- [8] 张洪伟,谢玉杰,梁彦辉.水煤浆浓度影响因素研究[J].洁净煤技术,2013,19(3):71-73.
- [9] 许宁,马强,陶秀祥,等.pH值对煤泥水凝聚沉降效果影响的研究[J].洁净煤技术,2009,15(6):13-14,8.
- [10] 李冬梅,施周,梅胜,等.高浓度悬浊液架桥絮凝体形体的形态学研究[J].中国给水排水,2006,22(19):95-99.
- [11] 王佳雁,龚伦.煤泥水处理药剂的探索与实践[J].洁净煤技术,2011,17(1):22-24,32.
- [12] 常青.水处理絮凝学[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [13] Spicer P T, Pratsins S E. Shear-induced flocculation: the evolution of floc structure and the shape of the size distribution at steady state[J]. Water Research, 1996, 30(5):1049-1056.
- [14] Thomas R, Hundt, Charles R O'Melia. Aluminum-fulvic Acid Interactions: Mechanisms and Applications[J]. American Water Works Association, 1988, 80(4):176-186.
- [15] R K Chakraborti, K H Gardner, J F Atkinson, et al. Changes in fractal dimension during aggregation[J]. Water Research, 2003, 37(4):873-883.
- [16] 王光泽,宋万军,张宁.煤泥水处理系统的优化[J].洁净煤技术,2013,19(2):21-23.