

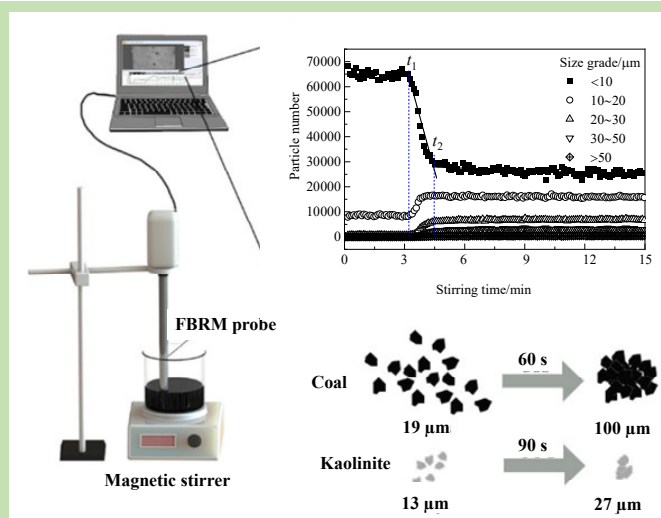


Influence mechanism of surface properties of coal and kaolinite on coagulation process

Xixi WANG, Yuan HUANG, Yue SUN, Mengyun SHI, Anran NIU, Zhe LIN*

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

Abstract: Coal slime water contains a large amount of clay minerals such as kaolinite, which brings great difficulties for flocculation and sedimentation. In order to clarify the influence mechanism of these mineral properties on the coagulation process, the interaction between the particles of coal or kaolinite were calculated by the extended DLVO theory, and the coagulation process of 20 g/L coal and kaolinite suspension with a CaCl_2 dosage of 4.5 mmol/L was monitored by a focused beam reflectometer at the stirring speeds of 60, 100 and 150 r/min. The results showed that the electrostatic interaction played a dominant role in the range of 2~200 nm for particle



surface distance. The kaolinite particles had larger electronegativity, so it was more difficult to approach to and collide to each other during the coagulation process. The higher rotation speed increased the momentum of particles and was beneficial to increase the collision frequency and shorten the time required to complete the coagulation. Under the experimental conditions, the coagulation times of coal and kaolinite were shortened from 74 and 123 s to 47 and 89 s, respectively. The hydrophobic force played a leading role in the range of particle spacing less than 2 nm, which determined the adhesion efficiency of the particles. With strong hydrophobic surface, coal particles were easier to adhere to each other after collision, and can resist higher fluid shearing action. As the result, coal particles can agglomerate to form large agglomerates of 100 μm from its initial size of 19.32 μm , while kaolinite was difficult to obtain agglomerates larger than 30 μm due to their hydrophilicity.

Key words: coal; kaolinite; coagulation; extended DLVO; focused beam reflectance measurement

收稿: 2019-12-11, 修回: 2020-03-08, 网络发表: 2020-03-30, Received: 2019-12-11, Revised: 2020-03-08, Published online: 2020-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51604273)

作者简介: 王茜茜(1998-), 河南省遂平县人, 本科, 化学工程与工艺专业, E-mail: 2565721454@qq.com; 林喆, 通讯联系人, E-mail: z.lin@cumt.edu.cn.

引用格式: 王茜茜, 黄元, 孙月, 等. 煤与高岭石表面性质对凝聚过程的影响机制. 过程工程学报, 2020, 20(12): 1448-1454.

Wang X X, Huang Y, Sun Y, et al. Influence mechanism of surface properties of coal and kaolinite on coagulation process (in Chinese) Chin. J. Process Eng., 2020, 20(12): 1448-1454, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219369.

煤与高岭石表面性质对凝聚过程的影响机制

王茜茜, 黄元, 孙月, 石梦云, 牛安然, 林喆*

中国矿业大学化工学院, 江苏 徐州 221116

摘 要: 煤泥水中含大量高岭石等黏土矿物, 为其絮凝沉降带来较大的困难。为明确矿物性质对凝聚过程的影响机制, 在应用扩展的 DLVO 理论计算煤和高岭石颗粒间作用力的基础上, 采用聚焦光束反射测量仪监测了 CaCl_2 用量为 4.50 mmol/L 时 20 g/L 的煤和高岭石的悬浮液在 $60, 100$ 和 150 r/min 的搅拌转速下的凝聚过程。结果表明, 颗粒间的静电作用力在颗粒表面间距 $2\sim 200 \text{ nm}$ 范围内起主导作用, 高岭石的电负性较大, 在凝聚过程中更难发生靠近和碰撞; 较高的转速可为颗粒提供较大的动量, 有利于提高碰撞频率, 缩短完成凝聚所需时间, 实验条件下, 煤和高岭石的凝聚时间分别由 74 和 123 s 缩短至 47 和 89 s 。疏水性作用力在颗粒表面间距小于 2 nm 的范围内起主导作用, 决定了颗粒的黏附效率; 煤因强疏水性, 在碰撞后更易黏附, 且能抵抗更高的流体剪切作用, 可由 $19.32 \mu\text{m}$ 凝聚形成 $100 \mu\text{m}$ 的大凝聚体, 而高岭石则因其亲水性难以得到较大粒度的凝聚体, 均小于 $30 \mu\text{m}$ 。

关键词: 煤; 高岭石; 凝聚; XDLVO; 聚焦光束反射测量仪

中图分类号: TD94 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2020)12-1448-07

1 前言

作为选煤厂生产过程的重要处理单元, 煤泥水的絮凝沉降环节是限制选煤厂产能的重要因素。当煤泥水不能被有效沉降分离时, 将导致循环洗水浓度过高, 细泥积聚, 影响分选操作效率。煤泥水难沉降最重要的原因是其含大量的高岭石^[1]、蒙脱石^[2]和伊利石^[3]等黏土矿物, 这些矿物质粒度细、表面电负性高, 易形成均匀的分散悬浮体系^[4,5]。絮凝作为有效的沉降预处理手段, 目前已伴随高效浓缩机的应用在选煤厂得到广泛应用。研究表明, 煤泥水中各种矿物组成对絮凝过程的响应有显著差异: 在相同药剂条件下, 煤、高岭石、蒙脱石、伊利石等均具有不同的凝聚或絮凝行为特征, 一般而言, 高岭石等黏土矿物比煤更加难聚沉^[6,7]。这些差异为选煤厂制定药剂制度增加了许多难度。

药剂种类和剂量的选择解决了颗粒凝聚或絮凝的问题^[8-10], 除此之外, 絮凝还应考虑动力学问题^[11,12], 即絮体的成长过程。絮凝动力学理论指出, 絮体成长经历碰撞、黏附和脱附三个阶段^[13], 主要影响因素为颗粒间的作用力和水力条件两个方面。前者主要由颗粒性质和药剂制度决定^[6,14]; 后者和流体动力相关。了解凝聚和絮凝的过程, 有助于有目的、有依据地优化设备和工艺参数, 使絮凝的效果达到最优。

为了解不同煤泥水组成对絮凝过程的影响, 本工作首先应用扩展的 DLVO(Extended DLVO, XDLVO)理论

对煤-煤和高岭土-高岭石颗粒之间静电能、范德华相互作用能和极化作用能(疏水作用能)进行计算, 分析颗粒间的综合作用力。在此基础上, 利用聚焦光束反射测量仪(FBRM)监测一定药剂剂量、不同转速条件下煤和高岭石的凝聚过程, 根据颗粒的动态凝聚行为和粒度指标, 结合颗粒间作用力计算结果, 分析颗粒表面性质对颗粒凝聚行为的影响机制, 为煤泥水处理的设备和工艺优化提供参考。

2 实验

2.1 材料与试剂

实验用煤样取自山西高平野川选煤厂, 通过粉碎、小浮沉和浮选进行脱灰后, 得到灰分为 3.57% 的低灰煤, 平均粒度为 $19.32 \mu\text{m}$ 。高岭石(分析纯, 平均粒度为 $13.33 \mu\text{m}$, 天津福晨化学药剂厂)。实验用甲醛、丙三醇、氯化钙均为分析纯试剂(国药集团化学试剂有限公司)。

2.2 实验设备与分析仪器

Particle Track G400 聚焦光束反射测量仪(Focused Beam Reflectance Measurement, FBRM, 瑞士梅特勒-托利多公司)用于监测煤泥水絮凝过程粒度变化, DSA100 接触角测量仪(德国 KRUSS 公司), ZetaPALS 电位分析仪(美国布鲁克海文公司)。

2.3 实验方法

2.3.1 颗粒表面分析与颗粒间力计算

XDLVO 理论认为^[7], 颗粒间的作用力由范德华力、静电力和疏水力三者组成, 颗粒间的凝聚或分散由总作用势能 V_T 决定: $V_T>0$, 颗粒间相互排斥分散; $V_T<0$, 颗粒间相互吸引凝聚。为计算颗粒间的作用力, 对颗粒表面参数进行测定。将煤颗粒和高岭石颗粒样品分别压片后, 利用 DSA100 接触角测量仪测定水、甲醛和丙三醇在煤和高岭石样品表面的接触角; 利用 ZetaPALS 电位分析仪测定 CaCl_2 用量为 4.5 mmol/L 时煤颗粒和高岭石颗粒的 Zeta 电位。将上述数据代入表 1^[6]中的 XDLVO 计算公式, 即可得到颗粒间的作用力。

表 1 XDLVO 理论计算公式^[6]
Table 1 Calculation formula of XDLVO theory^[6]

Interaction energy	No.	Formula
Van der Waals	I	$V_W=-\frac{A_{132}}{6H}\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}$
	I (a)	$A_{132}=(\sqrt{A_{11}}-\sqrt{A_{33}})(\sqrt{A_{22}}-\sqrt{A_{33}})$
	I (b)	$A_L=4A_s/(1+\cos\theta)^2$
Electrostatic	II	$V_E=\pi\epsilon_a\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}[2\psi_1\psi_2p+(\psi_1^2+\psi_2^2)q]$
	II (a)	$p=\ln\left[\frac{1+\exp(-\kappa H)}{1-\exp(-\kappa H)}\right]$
	II (b)	$q=\ln[1-\exp(-\kappa H)]$
	II (c)	$\kappa=\sqrt{\frac{2N_Ae^2cZ^2}{\epsilon_a kT}}$
Hydrophobic	III	$V_H=2\pi\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}h_0I_H^0\exp(-\frac{H}{h_0})$
	III(a)	$V_H^0=2\left[\sqrt{r_3^+}\left(\sqrt{r_1^+}+\sqrt{r_2^+}-\sqrt{r_3^+}\right)+\sqrt{r_3^-}\left(\sqrt{r_1^+}+\sqrt{r_2^+}-\sqrt{r_3^-}\right)-\sqrt{r_1^+r_2^+}-\sqrt{r_1^-r_2^+}\right]$
	III(b)	$(1+\cos\theta)r_L=2\left(\sqrt{r_S^+r_L^+}+\sqrt{r_S^+r_L^-}+\sqrt{r_S^-r_L^+}\right)$

A	Hamaker constant, A_{132} represents the effective Hamaker constant of interaction between substance 1 and 2 in the medium 3, A_{11} is the Hamaker constant for substance 1 in vacuum, so as A_{22}	T	Absolute temperature/K
c	Concentration for amount of substance of ions/(mol/L)	V_H^0	Interfacial polar interaction energy constant
e	Elementary charge: 1.602×10^{-19} C	Z	Ionic valence in solution
H	Surface distance between particles/m	θ	Contact angle/ $^\circ$
h_0	Relaxation length: 0.158 nm	ϵ_a	Absolute dielectric constant of dispersion medium, F/m
K	Boltzmann constant: 1.38×10^{-23} J/K	κ^{-1}	Length of debye/m
N_A	Avogadro's number: 6.022×10^{23}	ψ	Surface potential/V. It was replaced by Zeta potential in this study
R	Particle radius/m	Subscripts	
r^+	Surface energy electron acceptor component	1,2	Solid particles
r^-	Surface energy electron donor component	3	Disperse medium
r^d	Surface energy dispersive component	L	Liquid
		S	Solid

2.3.2 凝聚实验的 FBRM 监测

在烧杯中将煤和高岭石分别配制成浓度为 20 g/L 的悬浮液进行凝聚实验。利用 FBRM 监控絮凝过程的粒度变化。 CaCl_2 用量对煤和高岭石 Zeta 电位的影响如图 1 所示。可以看出, 高岭石和煤的 Zeta 电位的绝对值均随药剂添加量增加而减小, 超过 300 mg/L 后变化不显

著, 但实验中, 其清混界面的沉降速率仍有所提高。因此, 为尽量避免药剂因素影响带来的干扰, 本研究中选择 500 mg/L CaCl_2 的药剂添加量, 即 4.50 mmol/L。通过改变搅拌转速, 考察不同转速(60, 100 和 150 r/min)条件下药剂对煤和高岭石凝聚行为的影响。

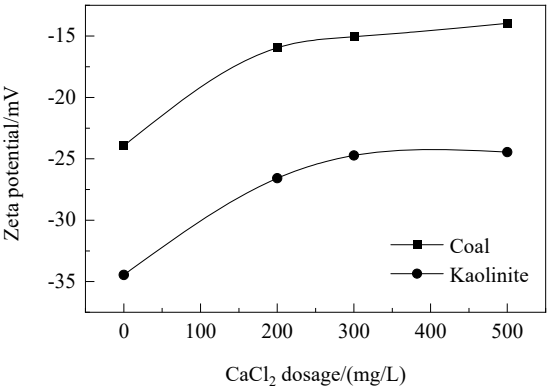


图 1 CaCl_2 用量对煤和高岭石 Zeta 电位的影响
Fig.1 Effect of CaCl_2 dosage on Zeta potentials of coal and kaolinite

3 结果与讨论

3.1 颗粒间的相互作用力

水、甲醛和丙三醇在煤及高岭石颗粒表面的接触角见表 2；样品在 CaCl_2 用量 4.50 mmol/L 时的 Zeta 电位见表 3。将这些数据代入表 1 的 XDLVO 计算式，可得 XDLVO 作用力随颗粒表面间距的变化，其中接触角数据用于计算固体(煤和高岭石)表面能参数和疏水性作用力，Zeta 电位用于计算静电作用力。

表 2 三种介质在煤及高岭石颗粒表面的接触角
Table 2 The contact angles of three mediums on the particle surfaces of coal and kaolinite

Material particle	Contact angle/ $^\circ$		
	Water	Formaldehyde	Glycerol
Coal	79.0	75.3	77.8
Kaolinite	0	0	19.5

表 3 不同 CaCl_2 用量下煤及高岭石的 Zeta 电位
Table 3 The Zeta potentials of coal and kaolinite with different CaCl_2 dosages

CaCl_2 dosage/(mmol/L)	Zeta potential/mV	
	Coal	Kaolinite
0	-23.94	-34.46
4.50	-13.97	-24.46

XDLVO 理论计算得到颗粒之间的范德华作用、静电作用和界面极化作用随颗粒表面间距的变化如图 2 所示。可以看出，煤[图 2(a)]和高岭石[图 2(b)]的静电作用能均为正值(斥力)，且均随颗粒的靠近逐渐增大，但增幅不大。这是由于两种颗粒的表面均带负电荷(表 3)，同性电荷之间必然表现为斥力，由于煤的电负性弱于高岭石，在相同颗粒表面间距下，其静电斥力也相对较小。范德华力为引力，因而煤和高岭石的范德华作用能始终为负值，但图 2(a)中，煤的范德华作用能的绝对值在颗粒表面间距大于 2 nm 时较小，颗粒表面间距小于 2 nm 后迅速增大；而高岭石的范德华力则始终较小。这是因为 XDLVO 描述的范德华力为长程范德华力(区别于分子间力)，其值和介质有关：式 I 显示长程范德华力与颗粒在介质中的哈马克常数正相关，采用表 3 的参数代入式 I(a)和 I(b)计算可得，在水中煤和高岭石的哈马克常数分别为 7.9×10^{-21} 和 2.8×10^{-28} ，高岭石比煤小约 10^7 ，表明高岭石在水中更易分散。煤和高岭石的疏水性作用能则完全相反，煤为负值，颗粒间表现为引力作用，高岭石为正值，表现为斥力。疏水性作用能也在颗粒表面间距小于 2 nm 后迅速增大。

从综合作用力来看，煤颗粒间的距离大于 200 nm 时长程范德华力起主导作用，表现为微弱引力，在 2~200 nm 时静电力为优势作用力，表现为较大的斥力，而小

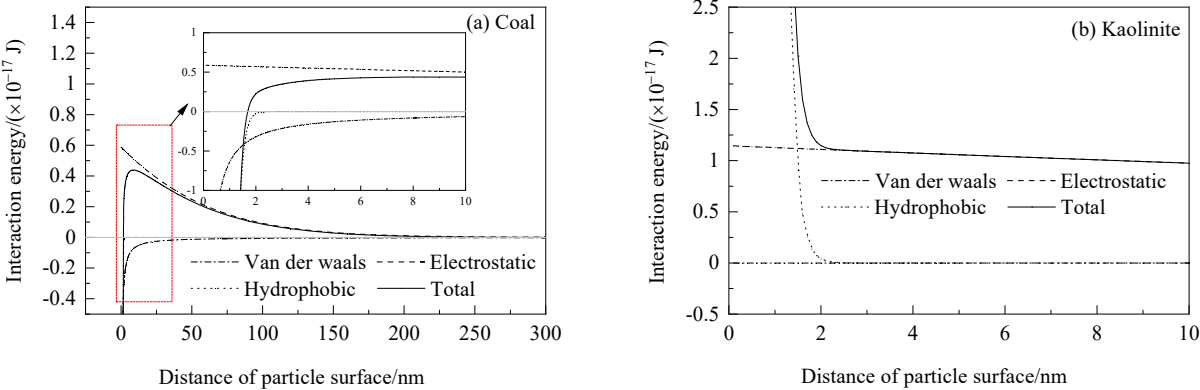


图 2 颗粒间作用能随颗粒表面距离的变化
Fig.2 Changes of interaction energy between particles with distance of particle surface

于 2 nm 后, 在范德华力和疏水性作用下产生强引力, 因此, 如果煤颗粒具有较大的动能, 在相互靠近的过程中能够克服中间段的斥力做功, 在碰撞后能形成稳定的凝聚体。颗粒的动能来源于流体的运动, 这就是研究搅拌转速影响的初衷。而对于高岭石而言, 颗粒间作用能基本上一直为斥力作用, 越靠近, 斥力越大, 因此, 单从 XDLVO 理论来看, 高岭石的凝聚必须通过颗粒间反电荷胶粒的吸附架桥作用实现。

3.2 不同转速下的颗粒凝聚

3.2.1 煤和高岭石在不同转速下的凝聚时间

图 3 为高岭石的凝聚过程(横坐标表示搅拌持续时间), 高岭石悬浮液在搅拌 3 min 后加入药剂(CaCl_2)。可以看出, 加 CaCl_2 后, 高岭石的粒度分布发生了显著变化: 小于 10 μm 的颗粒数量迅速减少, 其他各粒度级的凝聚体数量增加, 表明在药剂作用下, 细颗粒的高岭石发生了凝聚。如前所述, XDLVO 计算的结果显示高岭石不能通过低价阳离子的压缩双电层作用实现凝聚, 而实验却显示凝聚确实发生了, 这很可能是由于其晶体表面电荷分布的差异引起的: 层状结构的高岭石易沿着与层面平行的方向(001 面, 底面)解离, 使层面存在的大量显负电性的 Si-O、Al-O 断键暴露出来, 同时部分 Si^{4+} 被同晶 Al^{3+} 置换, 形成永久负电荷; 而端面(010, 110)的 Si-O 和 Al-O 断键可与水介质中的 H^+ 发生化学吸附带正电^[15]; Ca^{2+} 可能削弱底面(约占总表面的 88%^[16])的负电性, 颗粒间斥力减小, 易于相互靠近, 使底面与相邻颗粒带正电的端面相吸而发生“纸牌屋”式聚集。

为分析颗粒凝聚所需时间, 将图 3 所示的粒度变化曲线分为 3 段, 并拟合为三段直线, 线段的交点所在时刻分别定义为 t_1 和 t_2 , 其中 t_1 可认为是加药后颗粒开始

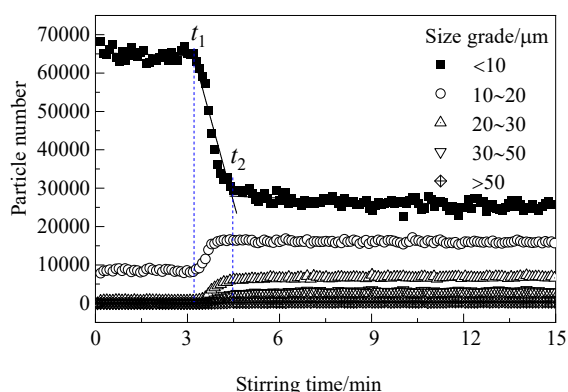


图3 搅拌转速为 100 r/min 时高岭土加 CaCl_2 后各粒级颗粒数量随时间的变化

Fig.3 Variation of particle number with different size grades of kaolinite after adding CaCl_2 at stirring speed of 100 r/min

凝聚的起点, t_2 是凝聚完成的时刻, t_2-t_1 即为凝聚反应时长。 t_2 时刻后, 各粒度级的数量基本达平衡, 不再随时间增加而变化。搅拌转速不同, 药剂混合扩散时间也应当不同, 因此反应时间的长短也可能存在差别。

图 4 为搅拌转速对颗粒凝聚反应时间的影响。可以看出, 随转速由 60 r/min 提高至 150 r/min, 煤和高岭石完成凝聚反应的时间分别由 74 和 123 s 缩短到 47 和 89 s。一方面是由于药剂扩散快, 更重要的是较大转速可增大体系的湍动能耗散率, 从而增大颗粒的碰撞频率^[17]。但对于不同的颗粒, 所需时间不同, 高岭石所需时间整体上高于煤颗粒, 这与它们的表面性质相关。煤颗粒表面的负电位较低, 在颗粒相互靠近的过程中, 起主导斥力作用的静电力相对较小, 有利于颗粒的碰撞; 其次, 煤颗粒表面为疏水性, 一旦颗粒发生碰撞, 强疏水性作用力可将颗粒牢牢黏附到一起, 即有效碰撞概率较高。而高岭石电位高、表面亲水, 既不利于碰撞发生, 也不利于颗粒有效黏附, 颗粒只有在合适条件下通过端面-底面吸附作用才能凝聚, 所以碰撞效率较低, 所需凝聚反应时间较长。

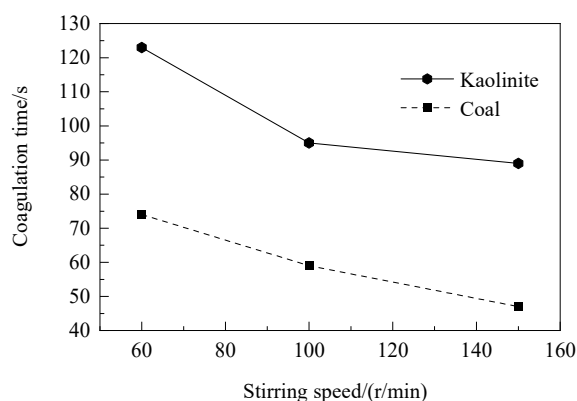


图4 搅拌转速对颗粒凝聚时间的影响

Fig.4 Effect of stirring speed on coagulation time of particles

由此可见, 在 60~150 r/min 搅拌转速范围内, 提高搅拌转速, 一定程度上促进了药剂分散, 提高了颗粒碰撞频率, 使颗粒粒度分布能在较短时间内达平衡, 即缩短了凝聚反应所需时间; 较高转速同时还能导致更多的破碎和脱附, 使颗粒凝聚体所能达到的平衡粒度减小, 也可能减少凝聚所需时间, 但这是不利于絮凝的因素。对不同的物系, 相同水力条件下, 因颗粒间作用力差异, 所需反应时间可能不同, 在本实验药剂条件下, 煤颗粒的凝聚完成时间比高岭石约少 40 s, 即易凝聚的颗粒所需凝聚时间越短。

3.2.2 煤和高岭石在不同转速下的凝聚成长过程

由于 FBRM 可以对煤颗粒、高岭石颗粒凝聚的动态过程进行测定, 所以可通过 FBRM 得出不同时间、不同粒度占总颗粒的体积百分比。通过改变转速, 检测煤、高岭石悬液中各个时间点中体积百分比占比最多的粒级, 绘制转速与体积百分比占比最多的粒度关系, 得到转速对颗粒凝聚粒度的影响, 如图 5 所示(图中横坐标表示加药后的持续时间)。

由图 5 可以看出, 加药以后, 在任意转速下, 颗粒

均因凝聚使粒度变大, 但因物料不同, 成长所需时间和达到稳定的平衡粒度级是不同的。

在相同的搅拌转速下, 煤达到稳定的搅拌时间均约需 60 s, 而高岭石均约需 90 s。需要注意的是, 前述凝聚反应时间和这里的相对稳定时间不完全等同: 反应时间是各个粒度级数量发生显著变化的最长时长, 而这里的相对稳定时间是占比最大的粒度级达到平衡所需的时间, 仅从时间的角度, 前者更能说明凝聚的完成过程。

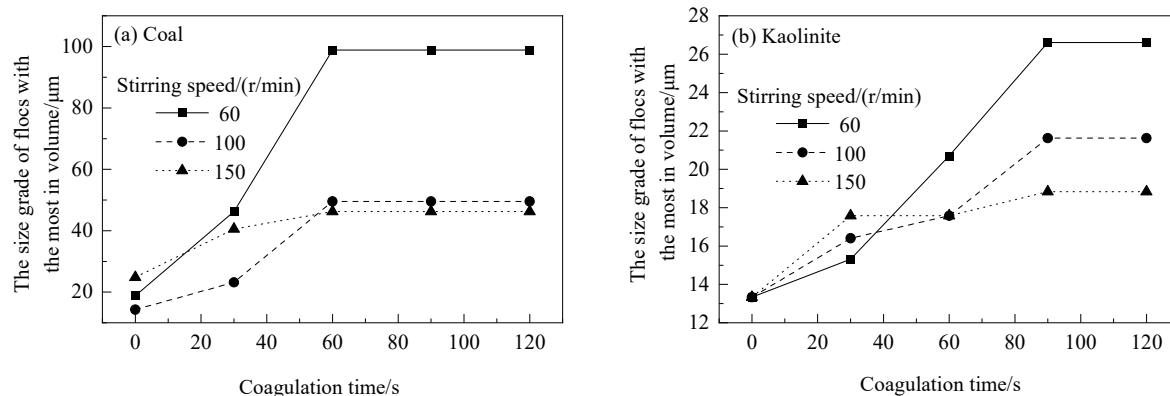


图 5 转速对颗粒凝聚体粒度分布的影响

Fig.5 Effect of stirring speed on particle size distributions of agglomeration

从最大占比的粒度级来看, 转速越大, 所得最大占比粒级的粒度越小, 也可认为是平均粒度越小, 与絮凝动力学的观点是吻合的。搅拌转速越大, 颗粒凝聚形成的聚集体平衡粒度越小。煤颗粒由于强疏水性和较大的原始粒度($19.32\ \mu\text{m}$), 更容易成长为大颗粒($\sim 100\ \mu\text{m}$); 高岭石因较小的原始粒度($13.33\ \mu\text{m}$)和较弱的颗粒间作用力, 凝聚体的粒度较小($< 30\ \mu\text{m}$)。紊流絮凝动力学^[18]认为, 絮体的破碎与湍流的微涡旋尺度相关, 湍流程度越高, Kolmogoroff 微涡旋的尺度越小, 任何粒度大于该微涡旋尺度的絮体, 均可能会被微涡旋的剪切作用侵蚀或撕裂而导致破碎^[19], 亦即絮体平衡粒度与微涡旋的尺度相关^[20]。显然, 搅拌转速越大, 湍流强度越大, Kolmogoroff 涡尺度越小, 絮体就越小, 但并不是所有大于微涡的聚集体均会破碎, 因为聚集体的破碎与否还与颗粒间的作用力有关, 如果药剂使用得当或颗粒自身性质易于凝聚, 使颗粒间引力作用足够大, 聚集体有可能不被破碎, 从而得到较大的粒度^[21,22]。由前文可知, 转速越大, 碰撞频率越高, 所需凝聚时间越短, 但凝聚或絮凝的目的是使颗粒团聚得到更大的聚集体, 从而有利于沉降或气浮等下游操作, 因此, 对于凝聚或絮凝而言, 还必须考虑平衡后的稳定粒度。因此, 搅拌转速必

须在碰撞频率和平衡粒度间进行取舍, 根据具体的工艺需求来确定。

由图 5 还可以看出, 对于不同的原料, 因颗粒间作用力的不同, 其平衡粒度也不同。煤颗粒表面疏水作用力很大, 能够抵抗更高的剪切力, 因此, 其最终平衡粒度大于高岭石。当然, 这还可能与颗粒的初始粒度有关。本研究中, 高岭石的初始平均粒度为 $13.33\ \mu\text{m}$, 而煤的初始平均粒度为 $19.32\ \mu\text{m}$, 同等颗粒数量聚集黏附的情况下, 煤的凝聚体也是大于高岭石的。

综合上述实验结果可知, 对于煤泥水而言, 煤颗粒表面的低电负性和强疏水性均有助于其凝聚并大, 同时, 其较大的初始粒度也有利于其长成更大的聚集体, 而高岭石则因为强电负性和亲水性及细粒度等因素, 不利于凝聚并大, 是较难处理的组分。

4 结 论

结合 XDLVO 理论计算和 FBRM 煤泥水在不同钙离子浓度下的凝聚过程监测, 得到以下结论:

(1) XDLVO 理论计算表明, 在颗粒凝聚的过程中, 静电作用力在颗粒表面间距为 $2\sim 200\ \text{nm}$ 的距离范围内起主导作用, 而疏水性作用力在颗粒表面间距小于 $2\ \text{nm}$

时起主导作用。

(2) 在 60~150 r/min 条件下, 搅拌转速越大, 碰撞频率越高, 颗粒完成凝聚所需的时间越短。得益于较弱的静电斥力和强的疏水性引力, 煤颗粒间更容易发生碰撞和黏附, 而高岭石则因强电负性和亲水性需要更长的时间。实验条件下煤和高岭石的凝聚时间分别由 74 和 123 s 缩短到 47 和 89 s。

(3) 搅拌转速越大, 颗粒凝聚形成的聚集体平衡粒度越小。煤颗粒由于强疏水性和较大的原始粒度(19.32 μm), 更容易成长为大颗粒(~100 μm), 而高岭石因较小的原始粒度(13.33 μm)和较弱的颗粒间作用力, 凝聚体的粒度较小(<30 μm)。

参考文献

- [1] 张明青, 刘炯天, 王永田. 水质硬度对煤泥水中煤和高岭石颗粒分散行为的影响 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(9): 1058–1062.
Zhang M Q, Liu J T, Wang Y T. Effects of water hardness on the dispersion of fine coal and kaolinite in coal slurry [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(9): 1058–1062.
- [2] 张明青, 刘炯天, 刘汉胡, 等. 水质硬度对煤和蒙脱石颗粒分散行为的影响 [J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(1): 114–118.
Zhang M Q, Liu J T, Liu H H, et al. Effects of water hardness on the dispersion of fine coal and montmorillonite [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(1): 114–118.
- [3] 林喆, 杨超, 沈正义, 等. 高泥化煤泥水的性质及其沉降特性 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 313–315.
Lin Z, Yang C, Shen Z Y, et al. The properties and sedimentation characteristics of extremely sliming coal slime water [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 313–315.
- [4] 亓欣, 匡亚莉. 黏土矿物对煤泥水处理的影响 [J]. 煤炭工程, 2013, (2): 102–105.
Qi X, Kuang Y L. Clay mineral affected to treatment of coal slurry water [J]. Coal Engineering, 2013, (2): 102–105.
- [5] 亓欣, 匡亚莉. 黏土矿物对煤泥表面性质的影响 [J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(7): 126–128.
Qi X, Kuang Y L. Effects of clay minerals on the surface properties of coal slime [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(7): 126–128.
- [6] Lin Z, Li P, Hou D, et al. Aggregation mechanism of particles: effect of Ca^{2+} and polyacrylamide on coagulation and flocculation of coal slime water containing illite [J]. Minerals, 2017, 7(2): 1–10.
- [7] Zhang M, Liu Q, Liu J. Extended DLVO theory applied to coal slime–water suspensions [J]. Journal of Central South University, 2012, 19(12): 3558–3563.
- [8] 冯泽宇, 董宪姝, 马晓敏, 等. 离子特性对煤泥水凝聚过程的影响 [J]. 矿产综合利用, 2018, (5): 63–67.
Feng Z Y, Dong X S, Ma X M, et al. Study on the effect of ionic properties on particle surface potential during flocculation of coal slurry [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018, (5): 63–67.
- [9] 陈军, 闵凡飞, 刘令云, 等. 高泥化煤泥水的疏水聚团沉降实验研究 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(12): 2507–2512.
Chen J, Min F F, Liu L Y, et al. Study on hydrophobic aggregation settlement of high muddied coal slurry water [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2507–2512.
- [10] Yang Z C, Liu S Y, Zhang W B, et al. Enhancement of coal waste slurry flocculation by ctab combined with bioflocculant produced by azotobacter chroococcum [J]. Separation and Purification Technology, 2019, 211: 587–593.
- [11] Ofori P, Nguyen A V, Firth B, et al. Shear-induced floc structure changes for enhanced dewatering of coal preparation plant tailings [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 172(2/3): 914–923.
- [12] 马晓敏, 樊玉萍, 董宪姝, 等. 药剂吸附与剪切条件对煤泥水絮凝效果的影响 [J]. 中国矿业, 2019, 28(4): 156–162.
Ma X M, Fan Y P, Dong X S, et al. Effect of flocculant adsorption and shearing strength on flocculation efficiency of coal slurry [J]. China Mining Magazine, 2019, 28(4): 156–162.
- [13] Watanabe Y. Flocculation and me [J]. Water Research, 2017, 114: 88–103.
- [14] 常青. 论疏水絮凝与疏水作用力 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(10): 3787–3796.
Chang Q. Discussion on hydrophobic flocculation and hydrophobic force [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(10): 3787–3796.
- [15] Yukselen Y, Aksoy A. A study of factors affecting on the Zeta potential of kaolinite and quartz powder [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62: 697–705.
- [16] 李宏亮, 闵凡飞, 彭陈亮. 不同 Ca^{2+} 浓度及 pH 值溶液中高岭石颗粒表面 Zeta 电位模拟 [J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(4): 361–367.
Li H L, Min F F, Peng C L. Zeta potential simulation of kaolinite particle surface in different Ca^{2+} concentration and pH value suspension [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(4): 361–367.
- [17] Šulc R, Dittl P. The effect of process conditions on the flocculation process occurring in an agitated vessel [J]. Polish Journal of Chemical Technology, 2012, 14(3): 88.
- [18] 艾恒雨, 赵琦, 汪明明, 等. 絮凝过程水力学控制指标研究进展 [J]. 中国给水排水, 2015, 31(10): 32–37.
Ai H Y, Zhao Q, Wang M M, et al. Research progress on hydraulics control index of flocculation process [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(10): 32–37.
- [19] Nan J, Wang Z, Yao M, et al. Characterization of re-grown floc size and structure: effect of mixing conditions during floc growth, breakage and re-growth process [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23: 23750–23757.
- [20] Marques R D, Ferreira S S. Flocculation kinetics of low-turbidity raw water and the irreversible floc breakup process [J]. Environmental Technology, 2017, 38(7): 901–910.
- [21] Wang Z, Nan J, Yao M, et al. Effect of additional polyaluminum chloride and polyacrylamide on the evolution of floc characteristics during floc breakage and re-growth process [J]. Separation and Purification Technology, 2017, 173: 144–150.
- [22] 邹青柯, 朱佳, 韦伟. 混凝剂投加量及污泥回流量对絮体破碎再絮凝的影响 [J]. 环境工程, 2018, 36(8): 65–68.
Zou Q K, Zhu J, Wei W. Effect of coagulant dosage and amount of sludge reflux on breakage and re-growth of flocs [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(8): 65–68.