

以磁性粉煤灰为磁种的磁絮凝沉降研究

胡梦园, 李建军*, 王浩宇, 胡嘉琪, 朱金波

安徽理工大学, 材料科学与工程学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2022年5月24日; 录用日期: 2022年6月27日; 发布日期: 2022年7月5日

摘要

为降低成本、提升磁絮凝效果, 对粉煤灰磁珠进行球磨加工, 并以其为磁种材料对高浊度矿物污水进行磁絮凝沉降处理。以 CaCl_2 和APAM分别作为凝聚剂和絮凝剂, 获得了常规絮凝的工艺参数, 进而参照确定了磁絮凝的药剂制度。以球磨后的粉煤灰磁珠为磁种, 在250 mT的磁场辅助作用下对高浊度矿物污水进行磁絮凝沉降处理。对常规絮凝和磁絮凝的沉降效果进行了对比, 研究了磁种添加量、添加方式等关键因素对磁絮凝沉降的影响规律, 并获得了最佳工艺参数。结果表明, 在磁种添加量为3.2 g/L, 磁场250 mT的条件下, 磁絮凝沉降速度较常规絮凝提升48%; 磁絮凝沉降10 min后上清液透光率达到84.2%, 较常规絮凝提高6.7个百分点; 最终尾泥体积量减少至42 mL, 比普通絮凝提高40%。研究表明, 磁絮凝的高效沉降与粉煤灰磁种的凝聚效应及磁吸附桥联作用有关。

关键词

磁絮凝, 粉煤灰磁珠, 磁种添加量, 磁场, 高浊度矿物污水

Magnetic Flocculation Using Magnetic Coal Fly Ash as Magnetic Seeds

Mengyuan Hu, Jianjun Li*, Haoyu Wang, Jiaqi Hu, Jinbo Zhu

Department of Materials Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: May 24th, 2022; accepted: Jun. 27th, 2022; published: Jul. 5th, 2022

Abstract

To reduce the cost and enhance the magnetic flocculation effect, coal-fly-ash magnetic spheres (CMS) are processed by ball milling and used as magnetic seed material for magnetic flocculation and sedimentation treatment of high turbidity mineral wastewater. The process parameters of ordinary

*通讯作者。

flocculation were obtained using CaCl_2 and APAM as coagulant and flocculant, respectively, and then the agent regime of magnetic flocculation was determined with reference. Further, ball-milled CMS were used as the magnetic species for magnetic flocculation and sedimentation of high turbidity mineral wastewater with the assistance of the magnetic field of 250 mT. The settling effect of ordinary flocculation and magnetic flocculation was compared, and the influence of magnetic sphere addition, addition method and other factors on magnetic flocculation settling was studied, and the best process parameters were obtained. The results showed that under the conditions of 3.2 g/L of magnetic sphere addition and 250 mT magnetic field, the settling speed of magnetic flocculation was improved by 48% compared with ordinary flocculation; the transmittance of supernatant reached 84.2% after 10 min of magnetic flocculation, which was 6.7 percentage points higher than ordinary flocculation; the final volume of tailing sludge was reduced to 42 mL, which was 40% higher than ordinary flocculation. It was shown that the efficient settling of magnetic flocculation could be related to the coalescence effect of CMS and the magnetic adsorption bridging effect.

Keywords

Magnetic Flocculation, Coal-Fly-Ash Magnetic Sphere, Magnetic Seed Dosage, Magnetic Field, High Turbidity Mineral Wastewater

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

发展绿色矿山、智慧矿山对采矿、矿物加工、矿区生态保护都提出了越来越高的要求。随着采矿机械化、自动化、智能化程度的提高,大规模机械开采使得大量的粘土、脉石等伴生矿物一起被开采出来,并随矿物洗选加工过程,进入到了洗矿污水中,形成高浊度矿物污水。该矿物污水是一种多相复杂的矿物微粒分散体系,不但含有大量的悬浮颗粒,而且矿粒泥化性质复杂,因此很难澄清处理[1] [2] [3]。对于高泥化难沉降的高浊度矿物污水处理尤其困难,成为困扰矿物洗选企业绿色生产的重要障碍[4]。因此,高浊度矿物污水的高效澄清处理是当前亟需解决的问题,同时也是水处理领域的研究热点之一。高浊度矿物污水难以澄清处理的主要原因在于悬浮物的细小粒径、矿粒表面电荷及复杂的表面性质,使其难以凝聚聚团或与絮凝剂形成高质量絮团[5]。

目前,絮凝沉降[6]是处理高浊度矿物废水最常用的方法,通过加入混凝剂和絮凝剂使悬浮颗粒形成较大的絮体,加速颗粒的沉降。然而,絮体主要依靠自身的重力进行沉降,沉降效果不佳。然而,当高浊度矿物废水的水质非常复杂时,往往因为沉降力不足,难以克服流体的阻力,无法实现快速沉降。为了提高沉降动力,人们将磁、电、微波等作用引入到污水澄清过程[7] [8] [9]。其中,磁絮凝技术借助外磁场对磁絮团作用提升沉降动力,操作简单、分离效率高、且极少产生二次污染,非常适合矿物污水的治理[10] [11]。研究表明,磁絮凝技术可大幅提升高浊度矿物污水的澄清效果,具有广阔应用前景[12] [13]。然而,由于多数矿粒不具有磁性,因此要形成磁絮团,必须添加磁种材料。国内外有好多学者对此进行了探究,如冯召清等人[14]以 Fe_3O_4 为磁种对高浊度废水的浊度、COD、 UV_{254} 的去除了进行了研究,结果表明, Fe_3O_4 投加量为 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 浊度、COD、 UV_{254} 去除率分别达到 96.4%、78.7%和 27.7%。伍喜庆等人[15]以高纯天然磁铁矿为磁种对某微细粒铁尾矿进行了试验,当磁种添加量为 3 g/L 时,尾矿上清

液的浊度为 11.2 NTU。然而,目前大多数磁絮凝研究采用的是商用磁铁矿粉,存在成本高、表面活性低、沉降速度快等不足[16] [17],因此,需要寻找绿色廉价的磁种材料。粉煤灰磁珠(CMS)来源于工业固废粉煤灰,来源广、具有多孔结构、表面活性高、绿色环保、以废制废,是磁絮凝磁种的理想备选材料之一[18]。

因此,本研究针对高浊度矿物污水中的颗粒静电斥力太大以及沉降动力不足等问题,对 CMS 进行球磨加工,用作磁种,对高浊度矿物污水进行磁絮凝试验研究。以尾泥体积和上清液透光率为主要指标,研究了磁絮凝的影响因素及机理。

2. 试验方法

2.1. 试验材料

试验所使用的化学药品为氯化钙分析纯(CaCl_2 , 上海化学试剂有限公司)、1200 万的阴离子聚丙烯酰胺(AMAM, 上海国药试剂有限公司)、2500 目高岭土(中国高岭土有限公司)。CMS 来源于酒钢集团某发电厂,通过干法磁选获得。

2.2. 试验方法

2.2.1. 污水及药剂溶液配制

本试验采用 2500 目的高岭土配制高浊度矿物污水,40 g 高岭土于烧杯中加入 1 L 去离子水,然后在六联搅拌器下以 400 rpm 的转速搅拌 2 h 即可获得质量分数 4%的高浊度矿物污水。

取 0.1 g 的 APAM 于烧杯中加入 100 mL 去离子水,在磁力搅拌器上 400 r/min 搅拌 2 h,配成质量分数为 0.10%的 APAM 溶液;同时配制 1 mol/L 的 CaCl_2 溶液用于接下来的试验中。

2.2.2. 常规絮凝试验

先取 250 mL 的污水倒入量筒中,再用移液枪取 4 mL 的 CaCl_2 加入其中,盖住量筒上下摇晃 5 次,使药剂和污染物充分反应后再加入 4 mL 的 APAM,等反应充分后放入水平桌面上,分别记录 0.5、1、2、3、5、10、15、20、25、30 min 的尾泥体积,并在 30 min 时用胶头滴管取液面 2 cm 处的上清液用紫外可见分光光度计测其透光率。

2.2.3. 磁絮凝试验

磁絮凝试验流程如图 1 所示,先取 250 mL 的污水倒入量筒中,用移液枪取 4 mL 的 CaCl_2 加入其中,盖住量筒上下摇晃 5 次,使药剂和污染物充分反应后再加入 0.8 g 粉煤灰磁种,开始形成较小的絮团,最后再向量筒中加入 4 mL 的 APAM,盖住量筒上下摇晃 5 次,放置在 250 mT 的梯度磁场强度下,静止后开始计时,分别记录 0.5、1、2、3、4、5、6、7、8、9、10 min 时的尾泥体积,并在 10 min 时用胶头滴管吸取液面 2 cm 处的上清液用紫外可见分光光度计测其透光率。

磁絮凝试验中的影响因素有很多,但是主要影响因素是磁种添加量以及添加顺序,这两个因素对尾泥体积和上清液透光率的影响效果较大,因为磁种是整个磁絮凝的核心,可以提高污水处理效率,减少颗粒间地静电斥力,对高浊度矿物污水起到关键作用。对此,磁絮凝试验中对磁种添加量和添加顺序这两个关键因素进行了系统的研究。

3. 结果与讨论

3.1. 磁种的性能分析

CMS 原料直接是从粉煤灰中磁分离获得,平均粒径 28.6 μm 。由于 CMS 粒径大、密度高,沉降速度

很快,因此无法在磁絮凝过程汇总直接使用。为此对其进行球磨,使其平均粒径降至 11.2 μm 。最后,对球磨后 CMS 颗粒进行再磁选,获得 CMS 磁种。

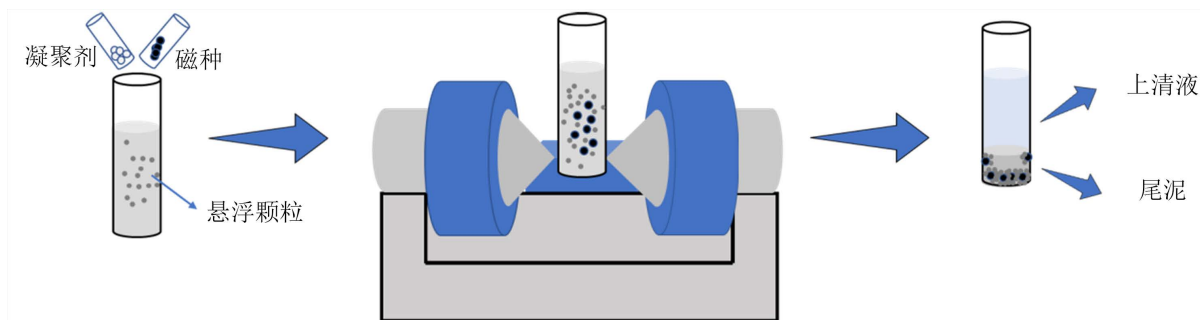


Figure 1. Flow chart of magnetic flocs formed by magnetic species and contaminants in magnetic flocculation

图 1. 磁絮凝中磁种和污染物形成磁絮团流程图

CMS 主要含有 Fe、Si、Al、Mg、Ca 等成分,还有一些 Na 和 K 等等。由表 1 可以看到球磨后 Fe 的含量由 8.75% 提高到 75.86%,而其他成分相应减少。图 2 为球磨前后 CMS 的磁滞回线,呈典型的“S”型曲线。球磨前后的磁珠饱和和磁化强度分别为 58.06 和 54.3 $\text{emu}\cdot\text{g}^{-1}$,球磨后的磁珠磁性稍有减少,但是仍满足高效磁分离的要求。并且球磨后的 CMS 比表面积更大、孔隙率更高、粒径更小,有助于促进高浊度矿物污水中的悬浮物更好的形成磁絮团,从而达到更好地澄清效果。

Table 1. Variation of composition of CMS before and after ball-milling

表 1. 球磨前后 CMS 的成分变化

成分组成	Fe (%)	Si (%)	Al (%)	Mg (%)	Ca (%)	others (%)
初始 CMS	8.75	56.43	25.62	2.92	4.83	1.54
球磨后 CMS	75.86	8.25	6.86	3.87	2.62	2.27

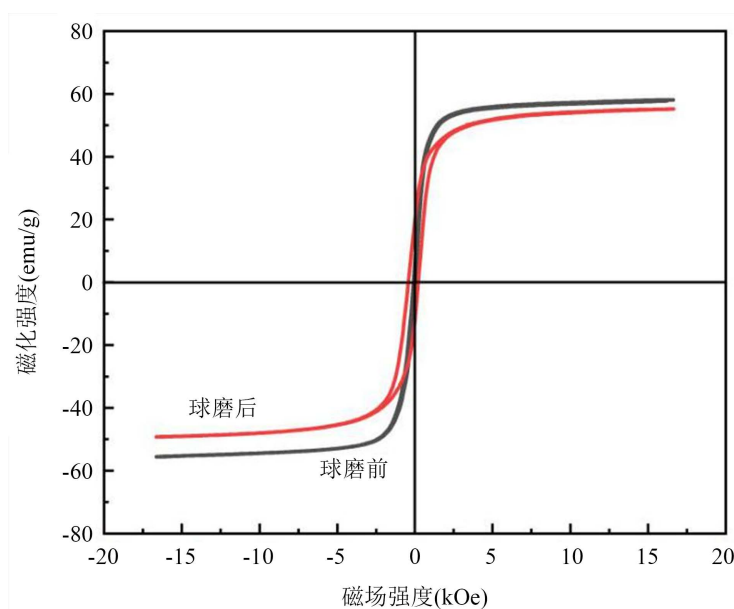


Figure 2. Magnetization intensity of CMS before and after ball milling

图 2. CMS 球磨前后的磁化强度

3.2. 常规絮凝的药剂制度

为了确定磁絮凝的药剂制度和工艺参数,对污水进行了系统的常规絮凝澄清实验,以获得最佳絮凝剂、凝聚剂等药剂制度。

3.2.1. 凝聚剂添加量

控制 CaCl_2 用量分别为 1、2、3、4、5 mL,探究不同凝聚剂用量对絮凝的尾泥体积和上清液透光率的影响,结果如图 3 所示。由图可观察到,当未加凝聚剂时,只靠重力自然沉降,30 min 并无明显变化。随着 CaCl_2 投加量的从 1 mL 增加到 4 mL,矿物污水的尾泥体积逐渐从 60 mL 减少到 50 mL,上清液透光率从 65.7% 提高到 77.8%,进一步投加 CaCl_2 用量,测试指标没有显著的变化。这主要是因为 CaCl_2 在水中主要以 Ca^{2+} 存在,对水中的悬浮胶体颗粒具有电荷中和作用,促进絮团凝聚。然而投加过量的 CaCl_2 会产生过多的正电荷,可能会引起胶体颗粒周围电荷过剩,产生同种电荷排斥现象。因此,在单因素试验时, CaCl_2 最佳投加量确定为 4 mL。

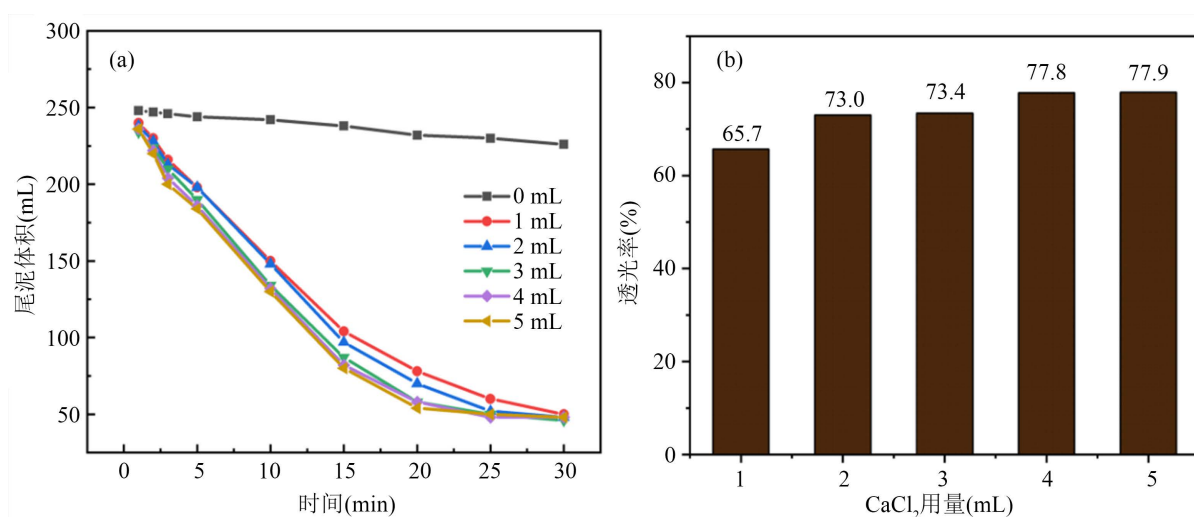


Figure 3. Variation of tailing sludge volume (a) and supernatant transmittance (b) with different CaCl_2 dosage

图 3. 尾泥体积(a)和上清液透光率(b)随着不同 CaCl_2 用量的变化

3.2.2. 絮凝剂添加量

由于只加入凝聚剂,沉降缓慢,效果不佳,所以在絮凝试验过程中投加絮凝剂和凝聚剂共同发挥作用,促进絮团快速沉降,在 CaCl_2 投加量为 4 mL 的基础上,分别投加 APAM 的用量为 1、2、3、4、5 mL,探究不同 APAM 用量对絮凝中尾泥体积和上清液透光率的影响。结果如图 4 所示,随着 APAM 投加量从 1 mL 增加到 4 mL,尾泥体积逐渐减小,透光率明显提高,沉降 15 min 后尾泥体积分别达到 82、80、70、56 mL,对应的透光率分别为 65.9%、70.3%、72.0%、77.5%,如果再继续增加絮凝剂的用量,污水沉降指标并无明显变化,反而会造成药剂残留对污水造成二次污染,不利于后续循环水的处理。

综上所述,最佳的絮凝药剂制度确定为 4 mL 的 CaCl_2 和 4 mL 的 APAM,为了更好地对比常规絮凝和磁絮凝的沉降效果,将常规絮凝和磁絮凝确定相同的药剂制度。

3.3. 磁絮凝沉降效果及影响因素

3.3.1. 磁絮凝的沉降效果

图 5 为絮凝和磁絮凝对尾泥体积和上清液透光率的影响,图 5(a)可观察到磁絮凝在前 4 min 沉降速度

最快, 常规絮凝尾泥体积减少了 125 mL, 磁絮凝的尾泥体积减少了 185 mL, 磁絮凝沉降速度较常规絮凝提升 48%。磁絮凝沉降速率的提高可能是由两个因素引起的。首先, 絮体中磁种的加入增加了重力, 这也是絮体沉降和尾泥压缩的动力。其次, 磁絮体在梯度磁场中所受磁力比自身重力大得多, 因此可以大幅提升絮团沉降速度。如方程[19] (1)所示, 在 250 mT 磁力作用下, 磁力约比重力大一个数量级。由于磁絮凝中加入了磁种, 增加了絮体的重力促进沉降。

$$F_M = \mu_0 k V H \text{grad} H \quad (1)$$

其中 μ_0 为真空磁导率, k 为絮体体积磁化率, H 为外加磁场强度, $\text{Grad}H$ 为磁场梯度。除此之外, 磁絮凝澄清效果也比常规絮凝好, 在沉降 10 min 后上清液透光率达到 84.2%, 较常规絮凝提高 6.7 个百分点; 最终尾泥体也提高了 40%。结合图 5(a)中插图可知, 常规絮凝形成的絮团比较松散, 而磁絮凝的絮体更加密实。这表明磁种的加入有利于矿物颗粒凝聚, 从而有利于形成密实的大“矾花”, 不但可加速絮团沉降, 提升澄清效果, 而且可大幅压缩尾泥体积。

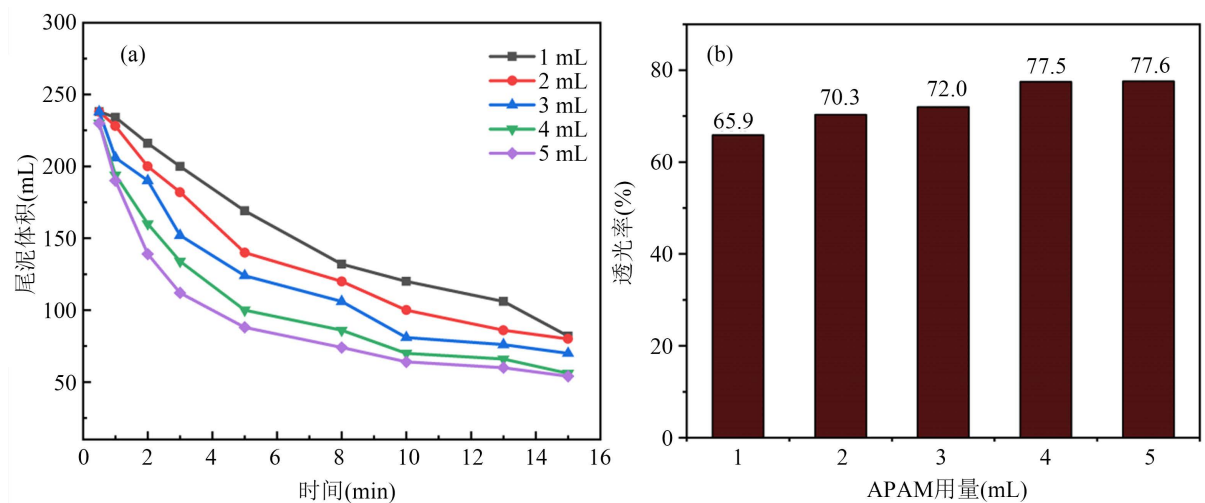


Figure 4. Effect of different APAM dosages on tailing sludge volume (a) and supernatant transmittance (b)

图 4. 不同 APAM 用量对尾泥体积(a)和上清液透光率(b)的影响

3.3.2. CMS 添加量对磁絮凝的影响

试验结果表明, CMS 的加入可以显著加快矿物颗粒的沉降速度。如图 6 所示, 随着磁种投加量的增加, 沉降速率逐渐加快, 透光率也不断提高。当磁种添加量分别为 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0g 时, 10 min 后尾泥体积为 102、86、70、62、54、52 mL。当磁种投加量为 0.8 g 时, 沉降速度最快, 若继续投加磁种无助于加速沉降。研究表明, 适量的磁种可以增加矿物颗粒的碰撞几率, 对矿物污水具有较好的吸附性能, 同时还可以促进悬浮颗粒物和磁种形成大而密实的磁絮团, 进而加快沉降速率。但是 CMS 添加过多, 会对磁絮凝过程产生一定的抑制效果, 这是因为过量的微细磁种颗粒将成为悬浮污染物, 对上清液透光率负面影响。因此, 综合考虑沉降速度和透过率的变化, 本试验确定 CMS 的最佳投加量为 0.8 g (3.2 g/L), 上清液的透过率达到 84.2%。

3.3.3. 磁种添加顺序对磁絮凝的影响

磁种的添加方式也会对磁絮凝产生一定的影响, 因此在 CaCl_2 , CMS 和 APAM 添加量分别为 4 mL, 3.2 g/L 和 4 mL 的药剂制度下探讨以下六种磁种投加方式: ① $\text{CaCl}_2 + \text{CMS} + \text{APAM}$ ② $\text{CMS} + \text{CaCl}_2 + \text{APAM}$ ③ $\text{CaCl}_2 + \text{APAM} + \text{CMS}$ ④ $\text{CaCl}_2/\text{CMS} + \text{APAM}$ ⑤ $\text{CaCl}_2 + \text{CMS}/\text{APAM}$ ⑥

CaCl₂/CMS/APAM。图 7 所示, 可观察到最终尾泥体积处理由小到大依次为④ > ⑤ > ⑥ > ① > ② > ③, 上清液透光率④ > ③ > ⑤ > ② > ① > ⑥。结果表明, CaCl₂ 和 CMS 同时加入后再加入 APAM, 更有利于与悬浮污染物的反应, 10 min 后尾泥体积为 50 mL, 相应上清液的透光率达到 84.2%, 而其他投加方式错过了磁种与污染物反应的最佳时间, 导致磁种只能附着在絮团边缘, 不能很好的形成磁絮团, 处理效果不理想。综合上述讨论, 可以得出磁种的最佳投加策略是先加入 CaCl₂/CMS, 然后再加入 APAM。

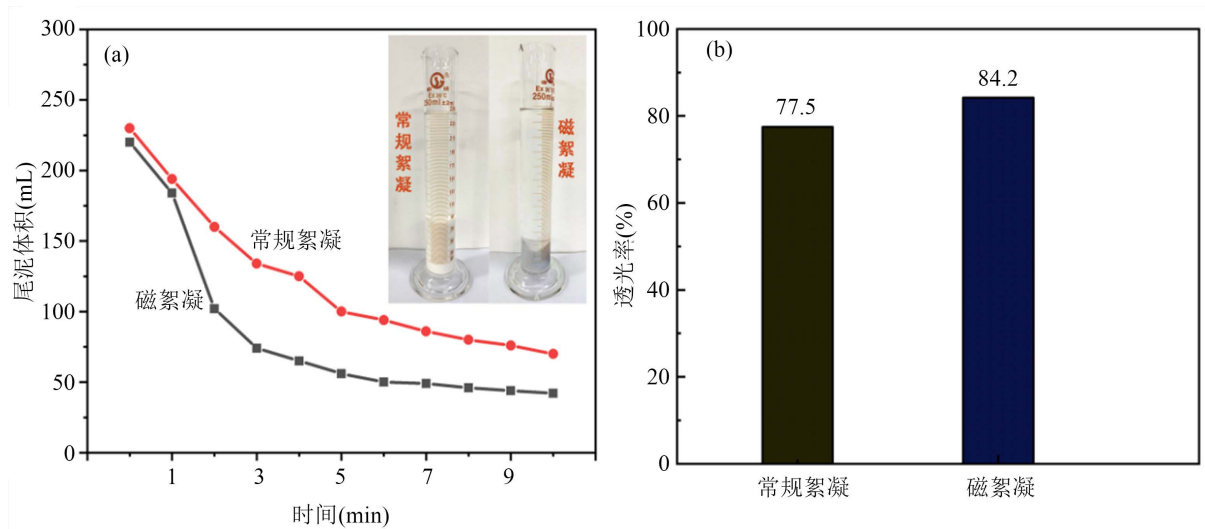


Figure 5. Variation of tailing sludge volume (a) and supernatant transmittance (b) for ordinary flocculation and magnetic flocculation. The inset in Figure (a) shows the comparison of the effect of ordinary flocculation and magnetic flocculation
图 5. 常规絮凝和磁絮凝的尾泥体积(a)和上清液透光率(b)的变化, 图(a)中插图为常规絮凝与磁絮凝效果对比图

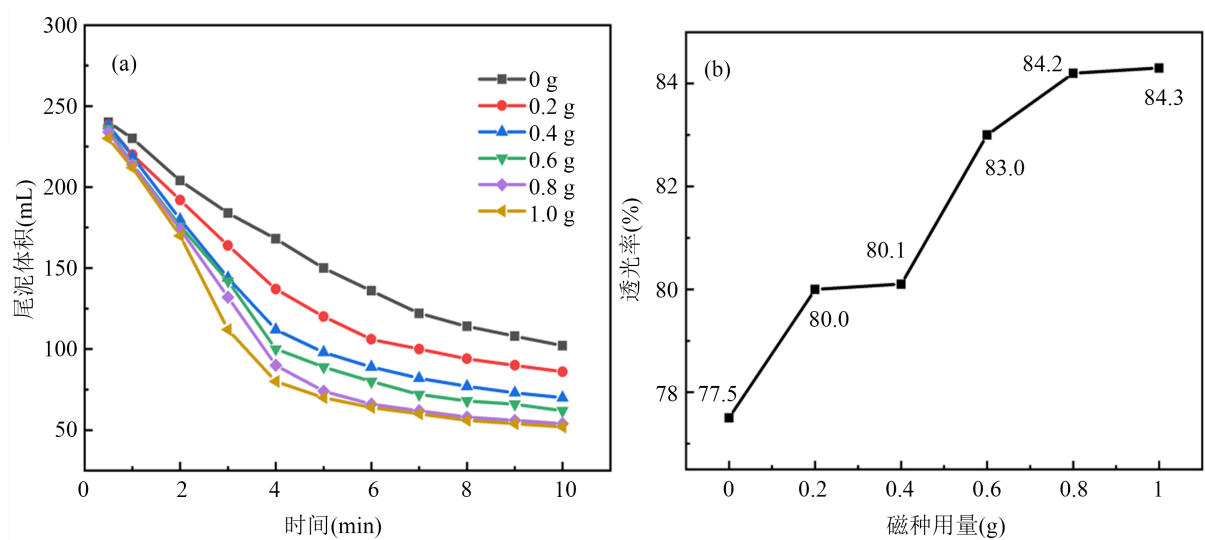


Figure 6. Effect of different CMS dosages on tailing sludge volume (a) and supernatant transmittance (b)
图 6. 不同磁种投加量对尾泥体积(a)和上清液透光率(b)的影响

4. 磁絮凝机理分析

综上所述, 磁絮凝沉降速度高于常规絮凝, 其澄清效果也大幅提升。这除了与磁絮团的沉降动力有很大的关系以外, 还与磁种的凝聚效应、磁吸附桥联等因素有关。

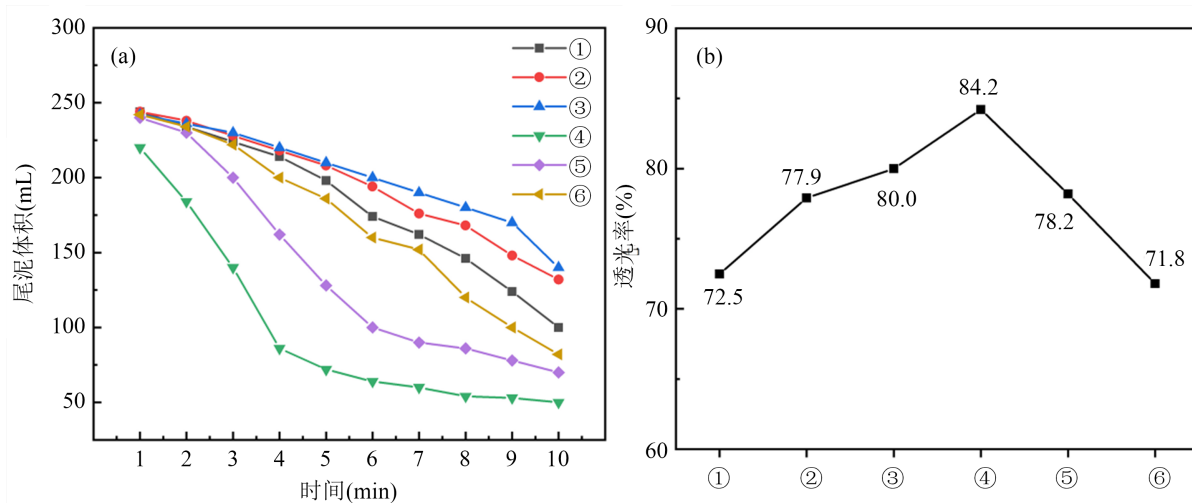


Figure 7. Changes in tailing sludge volume (a) and supernatant transmittance (b) of magnetic flocculation by magnetic species dosing method

图 7. 磁种投加方式对磁絮凝的尾泥体积(a)和上清液透光率(b)的变化

4.1. 磁种的凝聚效应

悬浮矿物颗粒通常带有负电，因此很难凝聚成团。当向矿物废水中同时加入 CaCl_2 和磁种时，胶体颗粒表面吸附 Ca^{2+} ，其表面电荷得到部分中和，从而提升凝聚效果。磁絮凝过程加入了 CMS 颗粒，在一定条件下，其表面可以带正电荷，所以也起到了凝聚剂的作用。同时，CMS 磁种颗粒也是的微细颗粒，其加入增加了悬浮颗粒的浓度，从而提高了颗粒间碰撞几率，促进颗粒凝聚。磁种与悬浮颗粒凝聚成团，有利于密实磁絮团的形成。

4.2. 磁吸附桥联

经初步凝聚后，磁种和悬浮颗粒形成了微磁絮体，当加入 APAM 高分子絮凝剂后，高分子碳链通过桥联作用与微絮团相结合，加之沉降过程的卷扫效应，最终形成密实的磁絮团。磁絮团的形成示意图如图 8 所示，磁絮团不但可在磁场辅助的作用下快速沉降，而且各个磁种颗粒被外磁场磁化、彼此之间产生磁引力，从而起到压缩尾泥体积的作用。

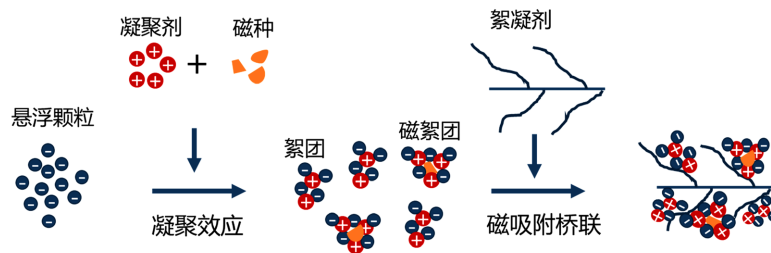


Figure 8. Schematic diagram of the formation of magnetic flocs

图 8. 磁絮团的形成示意图

5. 结论

1) 通过对 CMS 进行球磨，使磁种的平均粒径从 $28.6 \mu\text{m}$ 降至 $11.2 \mu\text{m}$ ，通过减小沉降速度，增加比表面积，提升了其在磁絮凝中的应用效果。

2) 磁絮凝试验表明,磁种的添加可以增加悬浮颗粒物的碰撞机率,在磁种添加量为 3.2 g/L,磁场 250 mT 的条件下,沉降 10 min 后磁絮凝相较于常规絮凝尾泥体积减少了 40%,上清液透光率提高了 6.7 个百分点,同时沉降时间缩短了 1/3。

3) 通过对比常规絮凝和磁絮凝的沉降效果,可得出磁絮凝的沉降速度不仅和磁絮团的沉降动力有关,还和磁种的凝聚效应、磁吸附桥联相关。

基金项目

安徽省自然科学基金(1908085ME127);大学生创新创业基金资助项目(202110361073);国家自然科学基金面上(51374015)。

参考文献

- [1] 顾大钊,李庭,李井峰,等.我国煤矿矿井水处理技术现状与展望[J].煤炭科学技术,2021,49(1):11-18.
- [2] 麻博,林智炜,孙超,等.复合絮凝剂的制备及其在高浊矿井水中的应用[J].洁净煤技术,2022,28(2):186-194.
- [3] 李刚,柴阳,朱轲,等.复合絮凝剂在含悬浮物矿井水处理中的应用[J].煤炭加工与综合利用,2021(11):92-96.
- [4] 杨廷超.煤矿矿井水处理技术及资源化综合利用[J].煤炭与化工,2021,44(12):61-63+68.
- [5] Mishchuk, N. (2008) Electric Double Layer and Electrostatic Interaction of Hydrophobic Particles. *Journal of Colloid and Interface Science*, **320**, 599-607. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.12.047>
- [6] Ma, J., Fu, K., Fu, X., et al. (2017) Flocculation Properties and Kinetic Investigation of Polyacrylamide with Different Cationic Monomer Content for High Turbid Water Purification. *Separation and Purification Technology*, **182**, 134-143. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.03.048>
- [7] 杨涛,郝学凯,陈永祥,等.电场强度对污水厂剩余污泥电渗深度脱水的影响[J].能源与环境,2018(2):78-79+81.
- [8] Vashist, V., Chauhan, D., Bhattacharya, A., et al. (2020) Role of Silica Coated Magnetic Nanoparticle on Cell Flocculation, Lipid Extraction and Linoleic Acid Production from *Chlorella pyrenoidosa*. *Natural Product Research*, **34**, 2852-2856. <https://doi.org/10.1080/14786419.2019.1593164>
- [9] Lv, M., Zhang, Z., Zeng, J., et al. (2019) Roles of Magnetic Particles in Magnetic Seeding Coagulation-Flocculation Process for Surface Water Treatment. *Separation and Purification Technology*, **212**, 337-343. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.011>
- [10] Housni, S., Abramson, S., Guigner, J.M., et al. (2020) Flocculation and Magnetically-Assisted Sedimentation of Size-Sorted Beidellite Platelets Mixed with Maghemite Nanoparticles. *Nano Research*, **13**, 3001-3011. <https://doi.org/10.1007/s12274-020-2964-9>
- [11] 李建军,谢蔚,余海洋,等.高岭土污水的磁絮凝沉降和影响因素研究[J].选煤技术,2018(5):26-31.
- [12] 白成帅.超磁分离技术在矿井水井下处理中的应用[J].煤炭科技,2017(4):150-151+154.
- [13] 刘海燕.磁絮凝技术在工业污水处理中的应用[J].中国资源综合利用,2022,40(2):202-204.
- [14] 冯召清,关智杰,杨贤,等.磁絮凝高效处理高浊度废水的性能及机理研究[J].环境科学学报,2022,42(3):197-206.
- [15] 伍喜庆,刘天宇,岳涛.磁种絮凝法澄清某铁尾矿浆试验[J].金属矿山,2018(7):183-187.
- [16] 朱脉勇,陈齐,童文杰,等.四氧化三铁纳米材料的制备与应用[J].化学进展,2017,29(11):1366-1394.
- [17] Tang, J., Wang, J., Jia, H., et al. (2019) The Investigation on Fe₃O₄ Magnetic Flocculation for High Efficiency Treatment of Oily Micro-Polluted Water. *Journal of Environmental Management*, **244**, 399-407. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.068>
- [18] Farwa, M., Muhammad, Z., Ijaz Ahmad, B., et al. (2019) Possible Applications of Coal Fly Ash in Wastewater Treatment. *Journal of Environmental Management*, **240**, 27-46. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.054>
- [19] Ambashta, R.D. and Sillanpaa, M. (2010) Water Purification Using Magnetic Assistance: A Review. *Journal of Hazardous Materials*, **180**, 38-49. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.105>