选矿废水循环利用工艺研究与应用

刘文丽[1,2],曹 钊[1],张 越[2],张智超[2],徐春光[2]

(1. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司白云选矿分公司,内蒙古 包头 014080)

摘 要:白云鄂博氧化矿资源综合利用生产线,原矿经两段闭路磨矿后进行选铁、稀土,稀土尾矿磨至 <30 μm 占 70% 以上粒度时进行萤石选别。多段磨矿导致机械次生矿泥显著增加,同时选别过程加入大量的水玻璃、起泡剂,循环废水在弱碱性的状态下,加强了细泥颗粒间的静电斥力,抑制沉降,且水玻璃产生的硅酸溶胶吸附在细泥颗粒表面,形成包裹层,降低颗粒表面疏水性,增强其与水的亲和力,使细泥颗粒更加分散和稳定,水中悬浮物含量(SS)高达 5 000 mg/L 以上。采用磁混凝沉降 - 搅拌 - 絮凝 - 搅拌的工艺进行选矿废水处理,处理后废水中悬浮物含量降低到 69 mg/L,pH 值基本未发生变化,处理后的循环废水进行浮选套试,在铁、稀土、萤石的品位提高和金属回收率提高方面均优于未处理循环废水,且显著降低各环节药剂用量。

关键词:白云鄂博矿;水玻璃;细泥;悬浮物;絮凝;搅拌
中图分类号:TD928.6;X753 **文献标识码**:B **文章编号**:1009 - 5438(2026)01 - 0016 - 06

Study and Applications on Recycling Process of Beneficiation Wastewater

Liu Wenli[1,2], *Cao Zhao*[1], *Zhang Yue*[2], *Zhang Zhichao*[2], *Xu Chunguang*[2]

(1. *School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Baiyun Beneficiation Branch Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014080, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: For the production line of comprehensive utilization of oxidized ore resources in Bayan Obo, iron and rare earth separations are carried out after two - stage closed - circuit grinding of raw ore as well as fluorite separation is carried out when rare earth tailings are ground to the proportion of particle size <30 μm is over 70%. The multistage grinding causes significant increase of mechanical secondary slime as well as electrostatic repulsion between fine slime particles is strengthened so as to inhibit sedimentation when circulating wastewater is with alkalescence by adding a large amount of sodium silicate and foaming agent during beneficiation process, the silica sol generated by sodium silicate is absorbed on the surface of fine slime particles so as to form coating layer. As a result, the hydrophobic property of particle surface is reduced and affinity of it and water is enhanced so that fine slime particles are more dispersed and stable as well as the content of suspended solids (SS) in water reaches over 5 000 mg/L. The beneficiation wastewater is treated with the process of magnetic coagulating sedimentation - stirring - flocculation - stirring as well as the content of SS in wastewater is reduced to

收稿日期:2025 - 11 - 25
作者简介:刘文丽(1983 -),女,内蒙古呼和浩特市人,高级工程师,现从事矿产资源综合利用产业化应用研究工作。

69 mg/L and pH value is basically unchanged. The flotation test is carried out for circulating wastewater after treatment, it is better for circulating wastewater after treatment to improve the grade and metal recovery rate of iron, rare earth and fluorite than those for circulating wastewater without treatment as well as the dosage of reagents in every link is significantly reduced.

Key words: baiyuneboite; sodium silicate; fine slime; suspended solids; flocculation; stirring

选矿废水是选矿厂生产过程中产生的所有循环水的统称,主要包括工艺水、设备冷却水、生活用水等,其中选矿工艺水中的尾砂水占到总选矿废水的95%左右[1]。

随着国家对矿山环保越来越重视,选矿废水的排放需达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级排放标准,且国家绿色矿山建设要求矿山生产要减少对矿区及周边生态环境的扰动,选矿废水的处理已纳入选矿的重要考核指标,并决定着选厂的可持续发展[2-4]

根据废水水质的不同,目前国内处理选矿废水的方法主要有混凝沉淀法、吸附法、化学氧化法、化学沉淀法、生物降解法以及这几种方法的联合处理工艺[5]。

白云鄂博氧化矿资源综合利用生产线,拥有选铁、选稀土、选萤石、选铌等多条生产线,是国家铌、钪等重要战略资源的产业基地。选矿原则流程长,药剂种类多,药剂用量较大,水量消耗较大,选矿废水成分复杂,回用后对生产指标影响较大[6]。

选厂对循环水系统水质改善工艺进行了大量的工业应用研究,通过对不同混凝剂、絮凝剂的对比试验、药剂组合试验,工业应用增加搅拌系统、加热药剂溶解措施,形成了氧化矿资源综合利用生产线独有的水质改善工艺,有效降低了选矿废水中悬浮物含量,选矿指标得到显著提高。

1　选矿工艺及废水特性

1.1　选矿工艺

白云鄂博氧化矿资源综合利用生产线,常态化运行选铁生产线、选稀土生产线和选萤石生产线。原矿矿石类型多,有磁矿、含铁岩、中贫氧化矿,氧化石型矿占比达到70%以上。原矿经多段破碎磨矿,粒度达到 <30 μm 占70%以上,进行萤石一次粗选,多次精选,获得萤石精矿。

氧化矿石易磨、易碎、易泥化,多次磨矿后,机械次生矿泥显著增加,细泥含量大、体积小、质量轻,沉降速度缓慢,生产过程中加入大量的水玻璃和起泡剂,水玻璃作为一种强分散剂,在水中解离出亚硅酸根离子(SiO_3^{2-}),吸附在细泥颗粒表面,使颗粒表面带同种负电荷,通过静电斥力阻止颗粒相互靠近,维持细泥分散状态,导致大量的胶体颗粒弥散在水中,废水呈超高稳定分散状态,沉降性能极差[6],且水玻璃是碱性矿物,选铁在 pH 为8.5~9.0的水溶液中进行,碱性条件下会加强颗粒间的静电斥力,抑制沉降;且水玻璃产生的硅酸溶胶吸附在细泥颗粒表面,形成包裹层,降低颗粒表面疏水性,增强其与水的亲和力,使细泥颗粒更加分散和稳定。同时生产过程中加入的松醇油,改变细泥颗粒表面性质和水相环境,也阻碍颗粒团聚与沉降。松醇油分子具有两亲性,一端亲水,一端疏水,疏水端朝向水相,易于吸附在气泡表面,形成气泡-细泥复合体,密度远小于水,产生气浮效应,无法沉降,即使部分颗粒未上浮,气泡也穿插在颗粒间,阻碍颗粒的紧密接触与团聚,延缓沉降速度。

1.2　选矿循环废水特性

1.2.1　选矿废水量分析

选矿后的尾矿通过长距离压力管道输送至尾矿库,在尾矿库干堆,尾矿浆浓度在63%以上,尾矿产率为71.28%,选矿废水除蒸发及损耗一部分外[7],尾矿库可回到厂区的水量为450 m^3/h;铁精矿、稀土精矿、萤石精矿带走的水及尾矿废水蒸发和损失的水合计为5.98%,水量为467.92 m^3/h;选矿废水循环用水率为94.02%,尾矿库回水和厂区循环水合计水量为7 359 m^3/h。表1为选矿废水量分析表。

表1　选矿废水量分析表

项目	选矿废水产生	蒸发及损耗	铁、稀土、萤石精矿带走	选矿废水循环量
废水量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	7 826.92	340.77	127.15	7 359.00
占比/%	100	4.36	1.62	94.02

1.2.2 选矿废水水质分析

氧化矿资源综合利用生产线需要回收的矿物种类较多，所以选厂使用的药剂种类也比较多，分选完成后，部分选矿药剂残留在选矿废水中，从而影响选矿废水 COD、SS 指标[8]。

选矿循环废水水质指标见表2。

表2 选矿循环废水水质指标

SS/(mg·L^{-1})	COD/(mg·L^{-1})	pH
5 000	521	7.8

选矿生产中大量使用水玻璃，废水呈碱性，循环回用后会影响到整个选矿过程的 pH 作业环境；选矿废水中的悬浮物含量、化学需氧量偏高，是由于废水中含有残余的油类、捕收剂等选矿药剂及微细粒矿石颗粒导致[9]，循环势必会影响选矿生产指标。

2 选矿废水处理及循环使用

国内处理选矿废水的方法主要有混凝沉淀法、吸附法、化学氧化法、化学沉淀法、生物降解法以及这几种方法的联合处理工艺。由于该废水中含有的成分较复杂，采用磁混凝沉降－搅拌－絮凝－搅拌的工艺进行选矿废水处理，该工艺方法可快速、高效、稳定地处理选矿废水。

2.1 混凝沉降试验

选矿废水中悬浮颗粒多为胶体状态，表面带同种电荷(一般为负电荷)，相互排斥而难以聚集，保持稳定分散。向水中投加混凝剂，其电离出带正电的离子，中和胶体颗粒表面的负电荷，消除排斥力，失去电荷的颗粒相互碰撞，结合成更大的絮体，辅以搅拌措施，强化颗粒接触，促进絮体生长，在重力作用下逐渐下沉，实现固液分离，使循环废水变澄清[10]。

试验药剂有聚合氯化铝[$Al_2(OH)_nCl_{6-n}]_m$、聚合硫酸铝[$Al_2(OH)_m(SO_4)_{3-n/2}]$、聚合硫酸铁粉末[$Fe_2(OH)_n(SO_4)_{3-n/2}]_m$、液态聚合硫酸铁[$Fe_2(OH)_n(SO_4)_{3-n/2}]_m$。

2.1.1 静置沉降试验

取5个1 000 mL量筒，分别装满选矿废水，废水悬浮物含量为5 000 mg/L，当水样加到1 000 mL刻度时开始计时，观察废水静置沉降现象，颗粒大的悬浮物在自身重力下，快速沉降，颗粒小的仍悬浮于液体中。不同静置沉降时间下，分别从5个量筒中取上清液，测量其悬浮物含量[11]，如图1所示。

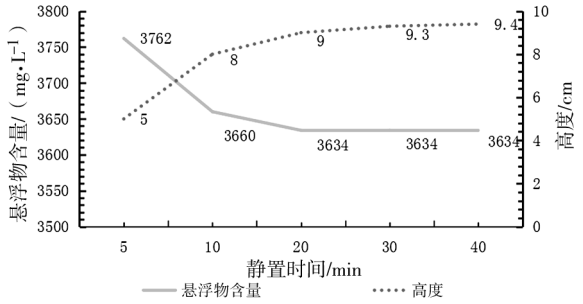


图1 静置时间对上清液沉降高度及悬浮物含量的影响

由图1可知，静置时间在10 min以内时，上清液沉降高度变化较快，同时其悬浮物含量下降也较快；随着静置时间的延长，上清液沉降高度虽逐渐上升，但变化速度极慢。在30～40 min期间，上清液沉降高度稳定在9.4 cm不再变化，此时其悬浮物含量也基本恒定在3 634 mg/L，不再下降。

2.1.2 混凝剂沉降对比试验

配制混凝剂聚合氯化铝[$Al_2(OH)_nCl_{6-n}]_m$、聚合硫酸铝[$Al_2(OH)_m(SO_4)_{3-n/2}]$、聚合硫酸铁粉末[$Fe_2(OH)_n(SO_4)_{3-n/2}]_m$、液态聚合硫酸铁[$Fe_2(OH)_n(SO_4)_{3-n/2}]_m$均为10%质量浓度水溶液。用4个1 000 mL量筒装满选矿废水，在室温、pH等条件不变的情况下，分别取相同量的配制后的聚合氯化铝、聚合硫酸铝、聚合硫酸铁粉末、液态聚合硫酸铁溶液加入试验水样，进行混凝试验。加入液态聚合硫酸铁溶液的量筒中絮体形成的较快、较大，沉降速度快，水质透明度好。分别测定不同混凝剂沉降时间下的上清液的高度和悬浮物含量，如图2、图3所示。

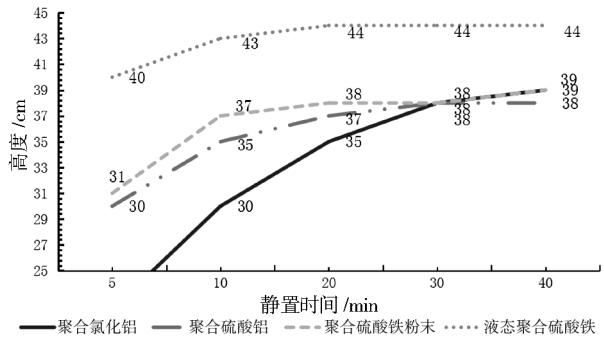


图2 混凝剂种类对上清液沉降高度的影响

由图2可知，沉降时间在10 min以内时，上清

液沉降高度变化较快;随着沉降时间的延长,上清液沉降高度虽逐渐上升,但变化速度极慢。在 30 ~ 40 min期间,聚合氯化铝溶液上清液沉降高度稳定在 39 cm,聚合硫酸铝溶液稳定在 38 cm,聚合硫酸铁粉末溶液稳定在 39 cm,液态聚合硫酸铁溶液稳定在 44 cm。从图中曲线走势来看,聚合硫酸铝和聚合硫酸铁粉末的作用效果非常接近,液态聚合硫酸铁沉降效果最好。

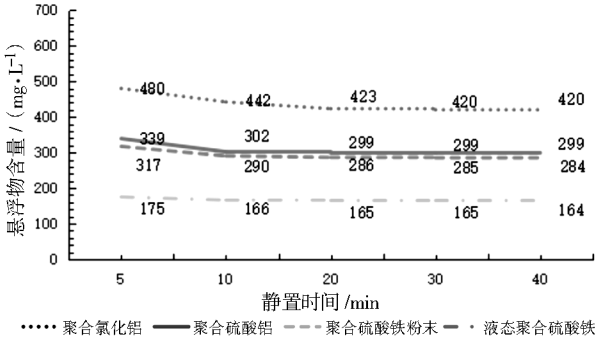


图 3　混凝剂种类对上清液悬浮物含量的影响

由图 3 可知,聚合氯化铝溶液加入试验水样中,经过 5 min 后,其对应的上清液悬浮物含量相对较高,随着时间推移,悬浮物含量整体呈现出下降的趋势,到 40 min 时,上清液悬浮物含量维持在一个相对稳定的较低水平,为 420 mg/L;聚合硫酸铝溶液加入试验水样中,随着时间增加,上清液悬浮物含量逐步降低,大约在 10 min 后,上清液悬浮物含量下降趋势趋于平缓,稳定在 299 mg/L;聚合硫酸铁粉末配置的溶液加入试验水样中后,变化趋势和聚合硫酸铝类似,上清液悬浮物含量基本稳定在 284 mg/L;在整个时间段内,液态聚合硫酸铁溶液加入试验水样中,上清液悬浮物含量迅速降低,相较于其他三种混凝剂是最低的,而且几乎没有明显变化,一直保持在较低水平,稳定在 164 mg/L。总体来说,这几种混凝剂都能在一定程度上降低上清液悬浮物含量,其中液态聚合硫酸铁效果相对较好且稳定。

2.2　液态聚合硫酸铁药剂用量试验

取 5 个 1 000 mL 量筒装满选矿废水,在室温、pH 等条件不变的情况下,分别加入配制好的 10% 浓度的不同量的液态聚合硫酸铁溶液,当加入量为 0.175 mg/L 时,沉降 10 min 时,其絮体形成的速度快,絮体大,沉降速度快,不同加药量沉降时间对应的上清液沉降高度及悬浮物含量结果如图 4 所示。

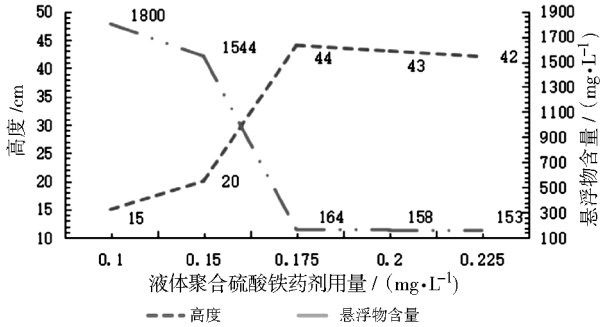


图 4　液态聚合硫酸铁加入量对上清液沉降高度和悬浮物含量的影响

从图 4 中可以看出,当液态聚合硫酸铁加药量在 0.1 ~ 0.175 mg/L 时,上清液沉降高度急剧上升,从 15 cm 上升到 44 cm,同时上清液悬浮物含量急剧下降,从 1 800 mg/L 下降到 164 mg/L,之后两者都趋于稳定。继续增加药剂量沉降高度和悬浮物含量无明显变化,但水颜色趋向于变红,同时悬浮物含量基本无变化,这可能意味着在加药量为 0.175 mg/L 时,试验条件达到了一个临界点,此时液态聚合硫酸铁的混凝效果最强,混凝剂水解产生的大量氢氧化物沉淀会形成网状结构,卷扫水中未被完全吸附的细小颗粒和部分难降解有机物。

2.3　混凝阶段加入磁粉

在液态聚合硫酸铁最佳加药量为 0.175 mg/L 时,加入磁粉,由于磁粉具有高比表面积和强磁性,迅速吸附在混凝形成的絮体上,增大絮体的密度,提高沉降速度。根据多次试验结果最佳加入量为 0.135 mg/L,改变搅拌速度进行搅拌强度试验,如图 5 所示。

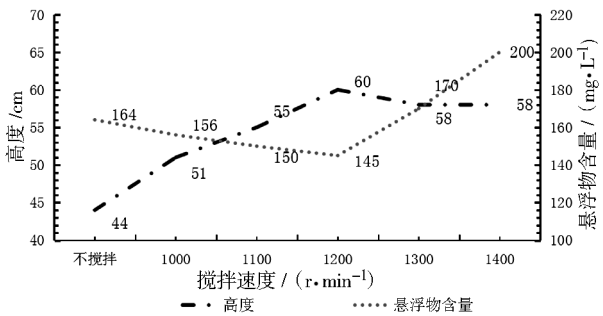


图 5　加入磁粉搅拌对上清液沉降高度和悬浮物含量的影响

当搅拌速度从“不搅拌”增加到 1 200 r/min 时，搅拌 10 s 可观察到大的絮体形成，上清液沉降高度逐渐上升，同时上清液悬浮物含量逐渐下降，这表明适当提高搅拌速度可以促进矿物和药剂、磁粉作用，有效形成絮体，促使絮凝沉降，使上清液变得更加清澈，同时上清液沉降高度也增加。当搅拌速度超过 1 200 r/min 时，由于搅拌速度太快，已形成的絮体又被打散，上清液沉降高度略有下降，悬浮物含量略有上升，说明过高的搅拌速度会对絮凝沉降效果产生一定的负面影响。从试验效果可知，1 200 r/min 为最佳搅拌速度。

2.4 絮凝剂药剂试验

选矿废水 pH 值为 7.8，属弱碱性，结合无机铁盐混凝剂的使用，通过大分子量的架桥吸附作用，进一步处理选矿废水中的悬浮物和降低水中有机物含量，试验选择阴离子型聚丙烯酰胺(APAM)，分子量为 2 000，固体物含量≥90%。

2.4.1 聚丙烯酰胺(APAM)溶解试验

聚丙烯酰胺(APAM)分子量较大，溶解速度和水温密切相关，首先进行不同水温条件下，聚丙烯酰胺(APAM)的溶解时间变化试验，为后期成果工业转化提供设计依据。

配制聚丙烯酰胺(APAM)水溶液，质量浓度为 1‰。取 5 个 500 mL 量筒，分别加入 20 ℃、30 ℃、40 ℃、50 ℃、60 ℃蒸馏水，并将量筒分别置于对应温度水浴槽内，确保试验过程温度不变，缓慢加入等量的 APAM，开始计时并持续以 200 r/min 的速度进行搅拌，观察、记录 APAM 完全溶解时间，直至药剂完全溶解，溶液内无肉眼可见颗粒且呈均匀透明黏稠状为止。试验结果如图 6 所示。

为验证不同水温溶解对药剂作用效果的影响，取 5 份 500 mL 经液态聚合硫酸铁溶液混凝作用后的上清液，分别加入相同量不同温度蒸馏水溶解的 APAM，进行絮凝沉降试验。由图 6 可知，水温升高可显著加快 APAM 的溶解速度，50 ℃时溶解时间为 23.15 min，60 ℃时，溶解时间为 11 min。但从图 6 中可知，在其他条件不变的情况下，在相同的试验水样中，分别加入不同温度蒸馏水溶解后的聚丙烯酰胺(APAM)溶液，观察其沉降效果，发现 60 ℃溶解，其絮凝作用效果变差，可能是因为高温导致 APAM 分子链断裂(降解)，降低其絮凝性能，影响使用效果。

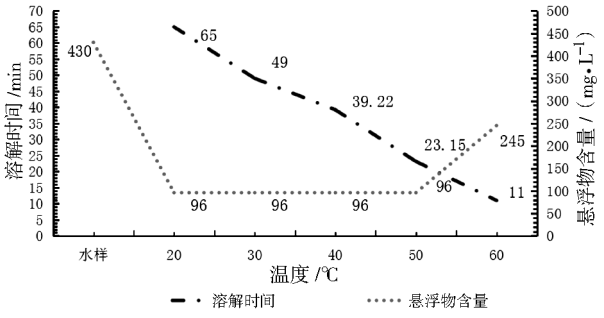


图 6 水温对 APAM 溶解速度及上清液悬浮物含量的影响

2.4.2 聚丙烯酰胺(APAM)药剂用量试验

在 50 ℃水温条件下配制聚丙烯酰胺(APAM)水溶液，质量浓度为 1‰。取 5 个 1 000 mL 量筒装满选矿废水，在室温、pH 等条件不变的情况下，分别加入配制好的 10% 浓度的液态聚合硫酸铁溶液 0.175 mg/L，加入磁粉在 1 200 r/min 搅拌 10 s 的情况下，分别加入不同药剂量的聚丙烯酰胺(APAM)溶液，聚丙烯酰胺(APAM)通过吸附、电性中和和相互间的架桥作用促使小絮体形成更大的絮体，在 400 r/min 慢速搅拌的作用下，既可以使絮凝药剂和絮体能够充分接触，又不会破坏已形成的大絮体；搅拌 10 s 后，对比沉降速度及上清液澄清度，如图 7 所示。

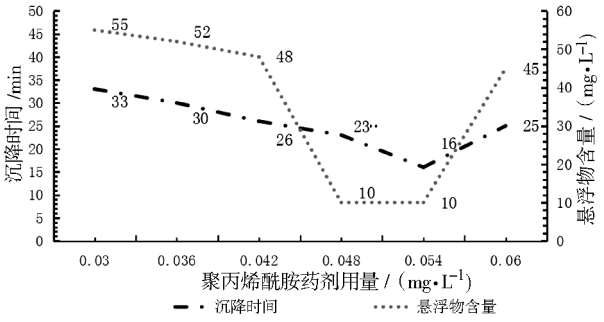


图 7 聚丙烯酰胺加入量对沉降速度及上清液悬浮物含量的影响

从图 7 结果来看，聚丙烯酰胺加药量在 0.048 ~ 0.054 mg/L 区间，上清液悬浮物含量维持在 10 mg/L 的低水平，沉降时间也处于 16 ~ 23 s，时间较短，是絮凝效果最佳区间，此时药剂与废水悬浮物作用平衡，絮体形成，沉降效率最优。当加药量超过 0.054 mg/L，达到 0.060 mg/L 时，因过量药剂使吸

附作用失衡,发生“再分散”,絮体变小或分散,沉降阻力变大,沉降速度变慢。实际应用过程,结合水质波动,在 0.048 ~ 0.054 mg/L 区间内动态调整加药量,确保处理效果,工业生产时,悬浮物含量可降低至 100 mg/L。

3　处理后选矿循环废水对生产指标的影响

采用磁混凝沉降 - 搅拌 - 絮凝 - 搅拌的工艺处理后水中悬浮物含量降低至 69 mg/L,COD 及 pH 值变化很小,具体处理后水质指标见表 3。

表 3　处理后水质指标

SS/(mg·L^{-1})	COD/(mg·L^{-1})	pH
69	518	7.9

使用处理前后循环废水进行选铁、选萤石小型套试试验,试验结果如表 4、表 5 所示。

表 4　水质对比试验(质量分数)　%

用水种类	产品名称	品位		金属回收率	
		铁	萤石	铁	萤石
废水	浮选精矿	67.22	86.96	88.81	42.08
澄清水	浮选精矿	67.29	86.07	93.98	50.63

表 5　药剂消耗对比　kg/t

用水种类	捕收剂用量	
	铁	萤石
废水	0.37	33.82
澄清水	0.31	20.56

注:铁捕收剂单位为 kg/t 原矿,萤石捕收剂单位为 kg/t 精矿。

由表 4 和表 5 可知,处理后澄清水在铁、萤石的品位提高和金属回收率提高方面均优于废水,且显著降低各环节药剂用量。

4　结论

(1)白云鄂博氧化矿资源综合利用生产线选矿废水循环用水率为 94.02%,尾矿库回水和厂区循环水合计水量 7 359 m^3/h。生产线回收的矿物种类有铁、稀土、萤石、铌等,使用的药剂种类比较多,分选完成后,部分选矿药剂残留在选矿废水中,从而影响选矿废水的 pH、COD、SS 指标。

(2)采用磁混凝沉降 - 搅拌 - 絮凝 - 搅拌的工艺进行选矿废水处理,处理后废水中悬浮物含量由 5 000 mg/L 降低到 69 mg/L,COD 由 521 mg/L 降为 518 mg/L,变化极小,pH 值基本未发生变化。

(3)混凝沉降试验,聚合氯化铝、聚合硫酸铝、聚合硫酸铁粉末、液态聚合硫酸铁四种药剂中液态聚合硫酸铁溶液混凝效果最好;水温升高可显著加快聚丙烯酰胺(APAM)的溶解速度,但在 60 ℃蒸馏水溶解时,药剂絮凝作用变差。

(4)采用磁混凝沉降 - 搅拌 - 絮凝 - 搅拌的工艺进行选矿废水处理,先加入液体聚合硫酸铁溶液,最佳药剂量为 0.175 mg/L,以 1 200 r/min 的速度进行磁混凝搅拌,最后加入聚丙烯酰胺(APAM)溶液,最佳药剂量为 0.048 ~ 0.054 mg/L,搅拌速度为 400 r/min,该工艺可快速、高效、稳定地处理选矿废水。

(5)使用处理前后循环废水进行选铁、选萤石小型套试试验,处理后澄清水在铁、萤石的品位提高和金属回收率提高方面均优于废水,且显著降低各环节药剂用量。

参　考　文　献

[1] 胡尚军,谢贤,黎洁,等. 选矿废水处理技术现状及展望[J]. 矿产保护与利用,2021,41(4):43 - 49.

[2] 刘馥雯,郭琳,刘晨,等. 选矿废水处理及回用技术进展[J]. 有色金属科学与工程,2017,8(1):134 - 138.

[3] 许道刚,韩海生,孟祥松,等. 湖南柿竹园多金属矿选矿废水处理试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2023(1):51 - 56.

[4] 王京. 新时代绿色矿山建设的改建措施探究[J]. 现代矿业,2021,37(11):252 - 254,260.

[5] 张小娟,孙水裕,杜青平,等. 含松醇油实际选矿废水的 COD 生物降解[J]. 环境工程学报,2013,7(11):4241 - 4245.

[6] 冯章标,阳华玲,王长福,等. 某钨铜矿选矿废水处理与分质回用工艺研究[J]. 矿冶工程,2023,43(3):52 - 55,60.

[7] 王洋,吴丽丽,赵彦杰,等. 硫化铅锌矿选矿废水全循环使用研究与应用[J]. 矿冶,2024,33(4):556 - 565.

[8] 贾鹏飞,田春友,徐福德,等. 白钨选矿废水净化处理工艺的研究与应用[J]. 有色金属(选矿部分),2018(2):60 - 61,73.

(下转第 30 页)

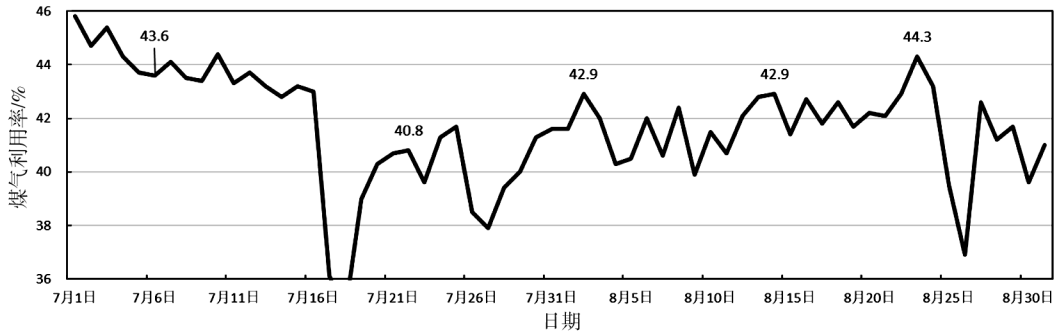


图 4 高炉煤气利用率趋势图

3 结论

(1)大型高炉大比例配加湿熄焦冶炼时,高炉管理者及操作者要在思想上高度重视,不能单一追求产量,应及时退负荷、降强度,以高炉稳定顺行为第一位。

(2)大比例配加湿熄焦时,焦炭质量大幅降低,料柱骨架作用减弱,这时应提高烧结矿质量,尤其冶金性能,并控制有害元素入炉,减轻烧结矿质量降低与湿熄焦负面影响的叠加效应。

参 考 文 献

[1] 曹锋. 长钢 1 080 m^3 高炉干湿熄焦转换冶炼实践[J]. 中国钢铁业,2019(3):46 – 47.

[2] 张伟,王再义,张立国,等. 高炉中碱金属和锌的循环及危害控制[J]. 鞍钢技术,2016(6):9 – 14.

(上接第 21 页)

[9] 陈家灵,谢海云,张培,等. 磷石膏治理重金属废水的研究进展[J]. 矿冶,2022,31(5):80 – 87.

[10] 刘文丽,邹冬雪,张荣,等. 絮凝剂在降低选矿尾矿水中悬浮物含量的应用[J]. 包钢科技,2021,47(4):13 – 16.

[11] 冯秀娟,刘祖文,朱易春. 混凝剂处理选矿废水的研究[J]. 矿冶工程,2005,25(4):27 – 29.