

电解浮选技术在选矿及废水处理中的研究进展

董继发^{1,2}, 方建军^{1,2}, 张铃^{1,2}, 郑润浩^{1,2}, 寇青军^{1,2}

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
2. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093

中图分类号: TD91 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)04-0146-06
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.04.017

摘要 电解浮选技术是一种利用电解池原理,通过电解水来获得微泡的方法。其特征是电解产生的气泡直径小,在微细粒浮选、废水处理方面具有特征优势。随着资源“贫、细、杂”特点的突出和绿色化工思想的增强,微细粒浮选、废水中金属离子处理及油水分离的研究与应用必将获得广泛关注。本文总结了电解浮选技术在金属、非金属、煤等细粒物料及废水中油水分离、重金属离子去除、固液分离等研究进展,旨在为电解浮选法的深入研究和推广应用提供借鉴。

关键词 电解浮选;细粒浮选;废水处理;选矿

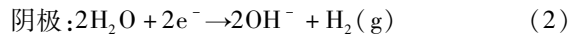
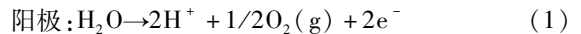
浮选作为一种重要的选矿方法,在当前选矿领域中具有举足轻重的地位。但传统的浮选工艺在浮选回收5~10 μm以下的细粒物料时,其效果并不是十分理想^[1,2]。与传统浮选工艺过程中浮选机所产生的气泡相比,电解浮选产生的气泡具有更小的直径尺寸,它利用电解水获得微泡,这使得细粒矿物与气泡之间的碰撞粘附概率增加,从而使细粒矿物的回收率得到提高^[3,4]。因此,电解浮选在有效回收细粒矿物、提高细颗粒有用矿物的回收率方面具有传统浮选工艺所不具备的优势。在废水处理领域,电解浮选生成的气泡尺寸可小至纳米级别,具有强载浮能力,与传统的溶气气浮、机械叶轮气浮产生的毫米级别的气泡相比,其截获杂质的能力更高,是近年来废水处理技术的热点之一^[5]。本文主要围绕电解浮选在选矿和废水处理中的应用进行论述,进一步总结电解浮选技术存在的优劣,进而提出展望。

1 电解浮选原理及相关设备

1.1 基本原理及影响因素

电解浮选由 Elmore 于 1904 年首次提出,并用于矿石中贵重矿物的浮选分离^[6],其基本原理是利用电解浮选过程中电极上析出的具有强负载能力的微小气泡

(H₂、O₂)来上浮分离疏水性杂质微粒的絮凝胶体或矿物颗粒,从而达到固液分离和富集矿物的目的^[7]。其反应式如下所示:



电极在矿浆中形成的金属硫化物与氧气、捕收剂三者之间存在着电化学体系,会影响浮选作用,如采用铂极-铜极电解浮选微细粒黄铜矿,黄药作捕收剂,电解浮选的氧气使金属硫化物表面发生氧化还原反应,增加了能使黄药氧化和吸附的阳极活性点,氧化的黄药的吸附层正是引起疏水性的原因。同时,氧气泡从阳极析出,加之阳极与矿浆接触,矿浆亦获得阳极电位,两者都使矿物疏水性增加,有利于浮选。此外,溶液 pH 会随较高的电流强度在短时间内变化,单位时间内溶液 pH 与可浮性无显著关系,电解对矿浆环境影响不大,电解气泡的尺寸大小仍然是影响电解浮选行为的主要因素^[8]。

电解浮选气泡析出的物理过程包括气泡的成核、长大、脱离三个阶段^[9]。电解浮选气泡的生成属于物理化学范畴中的新相生成,涉及气体的溶解、过饱和、扩散等,成核过程十分复杂。气泡的长大过程,包括电极表面微小气泡的聚集合并,以中等气泡为中心合并周围细小气泡,以及大气泡的滑移聚集合并。气泡的

脱离发生在当浮力大于黏附力时,气泡脱离的临界尺寸与电解工艺条件、电极表面状态等有关。

气泡尺寸是影响电解浮选行为的主要因素,而气泡尺寸又与电流密度、电解质性质、时间等因素有关。陈延禧等^[10]用激光衍射法研究了电解气泡的大小及其分布,研究发现氧气泡大部分具有 30 - 39 μm 的中等尺寸,且尺寸随电流密度的增大而增大,氢气泡却都十分微小且均匀,直径小于 5.8 μm ,因为氢气泡易脱离电极表面,所以电流密度对氢气泡尺寸的影响不大。此外,当电解质由酸变碱时,氢气泡尺寸明显增大,在碱性介质中微小的气泡数量达 84.4%,然而在酸性介质中气泡数量几乎为 0,而氧气泡变化相反。汪朝晖等^[11]建立了电浮选过程中的液体分散相速率与气泡几何尺寸的数学关系式,发现电解生成的最大气泡量所对应的氢气泡直径随温度的增加而变大,但整个电解过程的氢气泡直径分布并未有太大的波动,随着电流密度的增加,气泡直径减小,当电流密度达到某一值时,电解液体中粒子和气泡碰撞概率达到最大。赵伟等^[12]发现气泡直径主要受其脱离电极板的时间和气泡合并现象的影响。电解反应速率的影响因素主要有电解液 pH 值、电压强度和电极反应时间,从而影响了气泡特征,电解反应速率越快,气泡的尺寸越小,浓度越高,其上浮力衰减较为明显,致使其上升速度越低。周凌锋等^[13]分析发现减小气泡直径,对气泡与颗粒的碰撞概率、浮选速率及回收率这三者的指标都有大大提高,比增加电极释放气泡的生成速度的效果要显著。

电解浮选气泡的析出和液体分散相的物理特性及减小气泡尺寸的研究,对电解浮选设备的研制工作具有重要的指导意义。

1.2 电解浮选设备

我国目前大规模应用的浮选设备主要有机械式浮选机和充气搅拌式浮选机,仅局限用于选矿行业中的泡沫浮选。此外,浮选柱在分选细粒矿物方面有着独特的优势,但气泡尺寸受充气速率和原料处理量的限制,高充气量和大处理量往往不能获得小气泡,将电解装置和现有浮选设备相结合,为电解浮选设备的研发提供了思路,开展电解浮选技术对细粒级矿物、细粒煤浮选和废水处理的研究,已成为今后电解浮选设备的研究发展方向。

1.2.1 电解浮选机

电解浮选机主要由电源、电极和浮选槽 3 部分组成^[14]。电源采用直流电源或脉冲电源。阳极在电解过程中会产生氧气,会受到电化学腐蚀,传统的石墨和

碳材料虽可用,但不耐高电流电解,为防溶解和降低能耗,现阳极常采用金属氧化物涂层电极和其他新型不溶性电极;阴极主要发生析氢反应,需要根据析氢超电势的大小选择不同的阴极材料,一般采用中及高超电势金属做阴极材料,由于铁价格便宜,且属于中超电势金属,一般选用铁板板居多。浮选槽根据废水和矿浆的流动状态,可分为流动体系和非流动体系,需根据浮选工艺进一步选择^[15]。

1.2.2 电解浮选柱

电解浮选柱与传统浮选柱相比,最大区别在于电解浮选柱采用外置式的电解水发泡装置,产生的气泡直径小,通过控制电流可调节充气量,易操作。在主柱底部设有搅拌装置,当矿浆与气泡从主柱底部对称给入时,受到搅拌,矿粒与气泡碰撞充分,矿化作用增强,气泡和矿粒一起上浮,在主柱顶部形成精矿层。矿浆从主柱中部的导流管流入次柱,矿浆中少量的气泡与矿粒再次碰撞、上浮,形成次精矿层。尾矿从次柱底部排出。长沙矿冶研究院阳华玲、朱超英等人设计研发了新型电解浮选柱,并提出在研究试验中电浮选柱处理均取得了不错的浮选指标,有待在选矿行业进一步推广。其中,香炉山钨尾矿采用电解浮选柱回收白钨矿试验,获得的钨精矿品位提高了 0.57%,钨回收率提高了 8.54%;攀枝花细粒级钛铁矿钛浮选试验,获得 TiO_2 品位 19.90%、回收率 60.65% 的钛粗精矿^[16]。

2 电解浮选在选矿中的研究进展

常规的浮选工艺和浮选设备并不能最大限度地利用细粒物料,细粒物料存在质量效应和比表面积效应的难题。因其质量小,所具备的动能低,导致与气泡黏附、碰撞不充分,不易矿化;细粒物料的比表面积大,易团聚,导致捕收剂选择性吸附能力差,回收率低。

电解浮选产生的气泡微小,具备能与细粒物料黏附、碰撞充分的尺寸,能克服细粒浮选存在的难题,有效提高细粒物料的回收率。近年来,利用电解浮选法来有效回收细粒有用物料受到了越来越多的关注,下文主要总结电解浮选技术在细粒金属和非金属矿物、细粒煤中的研究现状,为细粒物料的回收利用提供参考。

2.1 细粒金属矿物

在 20 世纪 70 年代末,电解浮选的研究工作开始陆续得到了国外学者的开展,电解浮选首先被应用于分选含锡矿泥,主要研究电解浮选中细粒颗粒与气泡的碰撞、黏附,气泡尺寸和电解条件参数对浮选的影响^[17]。

孙伟等^[18]研究了在改良的哈里蒙德管实验装置内,不同阴极孔径电解不同粒级白钨矿的浮选性能和操作参数的关系,并得到了电解氢气泡的尺寸分布。当气含率为4.017%,阴极孔径为38 μm 时,0~10 μm 粒级的白钨矿的最高回收率为90.10%。通过增大电流使气泡密度增大,平均气泡尺寸随之减小,发现在油酸钠捕收剂的存在下,气泡尺寸分布得更加均匀。其中,当阴极孔径为38~150 μm 时,氢气泡的直径通常在12~117 μm 之间,85%以上的氢气泡的直径在30~70 μm 之间。同时,还对气泡尺寸及粒度对碰撞概率、黏附概率、捕收概率的影响做了相关研究,从而为利用电解浮选法来有效浮选回收细粒白钨矿及细粒萤石提供了理论依据及技术支持。目前,常规的白钨矿选矿方法主要以粗粒重选、细粒泡沫浮选为主,或者采用“重—磁—浮”等联合工艺进行选别,电解浮选在其选别工艺的应用上以电浮选柱处理居多。

大多数锡选厂由于资金和技术的限制,会将小于10 μm 级别的锡粒脱泥丢弃,造成锡金属资源的流失,电解浮选能有效解决这一问题,极大地提高锡的回收,实现细粒级锡石的有效利用。覃文庆等^[19]在经改造后的哈里蒙德管电解浮选实验装置内,对不同粒级细粒锡石的电解浮选行为及碰撞黏附机理进行了研究,利用高速摄影研究颗粒与气泡间的匹配关系。实验研究表明,气泡的数量、尺寸、速度及气泡间桥连作用受电解操作参数如电流、电解时间、电解质浓度等影响,电解浮选细粒锡石的最佳条件是油酸钠捕收剂的剂量为10 mg/L,矿浆pH值为8.0,电流为100 mA。同时,指出细粒锡石的粒度与气泡之间存在着一个最佳匹配度,即不同粒度的锡石颗粒对应不同尺寸的气泡。在细粒锡石粒度与气泡尺寸相匹配的范围内,锡石回收率达到最大值。此外,文章还通过相关的经验公式对电解浮选过程中的碰撞黏附概率进行了理论计算,以此揭示了细粒锡石与氢气泡的黏附机理。

2.2 细粒非金属矿物

电解浮选在细粒非金属矿物的研究,主要围绕气泡性质对细粒非金属矿物浮选行为的影响。

戴智飞等^[20]通过研究捕收剂浓度、电解强度、阴极孔径等因素,指出了电解浮选回收0~10 μm ,10~38 μm 和38~74 μm 三个粒级的细粒萤石时所需要的最佳参数,确定了捕收剂油酸钠的最佳浓度为 5.0×10^{-1} mol/L;当阴极孔径一定时,随着电流强度的增加,细粒萤石的回收率随之增加;当电流强度一定时,电解浮选回收不同粒级的萤石颗粒对应所需的最佳阴极孔径各不相同,颗粒粒度与气泡尺寸之间存在最佳的匹配范围。

马亮^[21]研究了不同电解条件下的气泡性质与颗粒的相互作用,建立模型并将作用过程分为三个阶段:单个颗粒被单个气泡捕获、多个颗粒被同一气泡捕获、气泡群的形成。

李艳等^[22]研究了不同粒级高岭石的电解浮选行为,建立了浮选速率常数 k 与影响因素的多元线性回归模型,间接描述了气泡性质对不同粒级高岭石的电解浮选行为的影响。当电流强度为150 mA时,细粒级0~36 μm 的高岭石在阴极孔径小(38 μm)的哈里蒙德管中电解浮选速率大,粗粒级45~74 μm 的高岭石在阴极孔径大(74 μm)的哈里蒙德管中电解浮选速率小,并存在显著的线性关系。

2.3 细粒煤

随着煤炭开采过程的机械化,大量的细粒煤被产出,该部分细粒煤难以通过常规浮选来有效回收,导致了煤浮选产率较低。在细粒煤的电解浮选方面,研究主要与电解质的浓度与类型有关。马明芳等^[23]研究发现不同电解质对精煤产率都有着最佳的电解质浓度,并不是单纯地与离子化合价成正比或反比的线性关系。通过浮选试验,确定了粒度为-0.5 mm煤样的最佳浮选条件为煤油1 000 g/t,仲辛醇120 g/t,入料浓度60 g/L。并研究了NaCl、MgCl₂、AlCl₃、Na₂SO₄、MgSO₄和Al₂(SO₄)₃等6种不同电解质条件下的浮选行为,结果表明,最佳电解质为MgSO₄,最佳电解质浓度为1 g/L。电解浮选使细粒煤被有效回收,从而提高了最终的精煤产率。刘颖洲等^[24]以马兰矿8#煤精煤为研究对象,确定了精煤产率最高的电解质是Na₂SO₄,达70.139%,并发现随着电解质浓度的增加,对应的精煤产率最大并且细粒级尺寸的气泡含量最多且粒级范围逐渐减小。

因电解浮选技术发展不完善,选厂从资金投入和预算考虑,我国在电解浮选技术处理微细粒物料方面应用不多,仍然以常规的泡沫浮选优化流程或湿法冶金等联合工艺为主,虽然电解浮选在细粒物料方面取得了系列的理论研究,但在生产实践的运用方面仍然很少。电解浮选产生的微泡和细粒物料之间的相互碰撞作用,受到很多因素的影响,如气泡尺寸、矿浆浓度、细粒物料粒级大小等,两者仍然存在着复杂的机理关系,需要更深入的理论探索和研究。

3 电解浮选在废水处理中的研究进展

工业生产过程中产生的废水,已经成为环境污染的重要污染源之一。在20世纪80年代,电解浮选法开始应用于废水处理领域,并在处理含油废水、重金属离子、污泥固液分离等方面均具有良好的效果。电解

浮选通过电解产生的微泡,使微泡与废水中的油粒、悬浮物黏附上浮,形成浮渣层从水中分离;加絮凝剂使重金属离子絮凝沉淀,微泡吸附上浮,从而实现分离。

电解浮选技术处理废水所需设备简单,可通过改变电流、电位等参数来调节气泡量,便于实施自动控制,且有效避免使用有毒化学物质絮凝,通用性强,具有广阔的推广前景。下文主要综述了近年来电解浮选技术在废水处理领域的研究现状,并加以评述,指出存在问题。

3.1 含油废水

含油废水中的油分存在悬浮、乳化、溶解等三种状态,悬浮状态的油分本身具有良好的可浮性,可依靠油分与水的密度差通过隔油池分离,但乳化和溶解状态的油分难以分离^[25]。电解浮选处理含油废水可达到较高的去除率。曹伟丽等^[26]在电解浮选处理采油废水的试验中,研究了电流强度、电导率、极板间距等因素对处理效果的影响。研究发现用石墨电极电解浮选时间为20 min、电流密度小于200 A、极板间距1.5 cm时,废水中悬浮物含量、油含量显著降低,处理效果明显。

电解浮选一系列的电化学反应产生的臭氧、次氯酸等还能对水体有杀菌的作用,当细菌细胞膜的跨膜电压上升至高于1 V时,细胞膜会被击穿造成细胞质流失,造成细菌死亡^[27]。任连锁^[28]统计了某油田废水油分的粒径分布,单纯的重力沉降可去除22.6%的油分,通过比较试验确定了电解板间距1.0 cm~1.5 cm和电流密度100~150 A/m²的最佳电解参数,电解浮选除油率达75%,除菌率高达99%,但所需电解时间过长,高达30 min。

电解浮选单独处理含油废水较难达到排放要求,且电耗大,常与絮凝法联用,克服了除油率不高的缺点。满春生等^[29]将絮凝剂硫酸铝钾加入水中使其水解产生Al(OH)₃胶体,在电压20 V、絮凝剂投量60 mg/L、浮选时间30 min的条件下,电解炼油废水,得到了浮选速率方程,确定了浮选速率常数 k 为0.466 L/g/min。王车礼^[30]等建立了絮凝-电解浮选除油的动力学方程,电解10 min,除油率可达90%以上,并发现除油率随电流密度的增加而增大,但除油速率常数 k 值增加不多。崔金玉^[31]等通过絮凝-电解浮选处理乳化油废水,在絮凝剂聚合硫酸铁投放量为50 mg/L,电流密度为31.25 A/m²,电极板间距为1.0 cm时,废水中乳化油的去除率高达95.3%。

3.2 含重金属离子废水

电解浮选处理含重金属离子被称作绿色电化学工

艺^[32]。电解浮选的能耗取决于废水的导电性,含重金属离子废水其本身就是一种拥有丰富离子类型的电解质,具有优良的导电性,采用电解浮选处理,具有优势。许珂敬等^[33]研究了胶东某铜矿废水在pH=8的条件下,加油酸钾和黄原酸盐螯合析出,再进行电解浮选,使用效果用测定废水中残留离子浓度来确定。实验结果表明,电解浮选能有效降低废水中的Cu²⁺、Zn²⁺、Pb²⁺,以及Co²⁺等重金属离子含量,并在铜回收方面具有非常显著的效果,铜回收率可达98%。V. A. Kolenikov等^[34]使用Fe(OH)₃、Na₃PO₄以及Na₂S等作絮凝剂,采用电解浮选处理电镀废水中的重金属离子,发现Na₃PO₄和Na₂S的浮选效率较高,电解浮选后的重金属离子的浓度从初始的2 mg/L大幅下降,其中,Cu²⁺、Zn²⁺、Ni²⁺降至10~50 ug/L,Cr²⁺和Fe³⁺降至10 ug/L。

3.3 活性污泥

活性污泥常用来处理废水,但其生长产生的微生物絮凝体会残留在废水中,须再对处理过的废水进行固液分离,电解浮选可高效实现活性污泥的固液分离,简化处理工艺。Ali RezaRahmania等^[35]进行了利用电解浮选来不断增厚活性污泥的实验。实验结果表明,电解浮选工艺在增厚活性污泥方面具有较好的效率。万晶等^[36]进行了电解浮选用于活性污泥固液分离的验证性试验,在进水SS(悬浮物)浓度为1 607 mg/L、停留时间为25 min、分离区电流密度为4 mA/cm²等条件下,悬浮固体颗粒物的去除率高达98.9%,证实了电解浮选用于活性污泥的固液分离是可行的。陈金釜等^[37]采用不溶性电极进行电解浮选,研究了活性污泥固液分离过程中电解浮选性能操作参数的影响。实验结果表明,电解浮选能有效去除活性污泥中的悬浮固体颗粒,去除率随水力停留时间和电流密度等主要因素的增大而增大,可达97%以上,浮渣平均含水率为95.9%,低于溶气气浮和二沉池等处理技术的污泥含水率。

电解浮选处理废水已经是一种被肯定的有效方法^[38]。在废水处理中有着气泡小、捕收杂质能力强且去除率高的优点,且采用不溶性的电极,不会造成二次污染,是其他处理技术所不能比拟的。近年来,随着该技术的应用与推广,电解浮选在废水处理领域仍然有着广阔的前景。

4 结语

电解浮选技术作为一种绿色化学工艺,兼具微米级气泡尺寸的特点,在微细粒物料的选矿及废水处理领域中具有非常高的浮选效率。从近年来众多学者的理论研究上看,电解浮选仍需做更深层次的理论研究,

需进一步完善电解浮选气泡与细粒物料碰撞理论体系,优化电解操作参数,如确定最佳电流密度,电解质类型和浓度,确定物料粒度与最佳气泡尺寸的匹配范围等,对实现电解浮选技术的最优化有重大意义。从工艺成本上看,电解过程的高能耗仍然是限制电解浮选应用的主要问题,未来发展离不开新型电解浮选设备的研发与推广,研发节能降低电耗,研发活性高、性能稳且价格低廉的新型电极材料已成为新趋势。

参考文献:

- [1] 李振,王纪镇,印万忠,等. 细粒矿物浮选研究进展[J]. 矿产保护与利用,2016(2):70-74.
- [2] PEASE J D, CURRY D C, YOUNG M F. Designing flotation circuits for high fines recovery[J]. Minerals engineering, 2005, (19): 831-840.
- [3] YOON R H, LUTTRELL G H. The effect of bubble size on fine particle flotation[J]. Mineral processing and extractive metallurgy review, 1989, 5(1-4): 101-122.
- [4] SARROT V, HUANG Z, LEGENDRE D, et al. Experimental determination of particles capture efficiency in flotation[J]. Chemical engineering science, 2007, 62(24): 7359-7369.
- [5] 李志健,付政辉. 电气浮选技术处理含油废水的研究进展[J]. 工业水处理,2009,29(10):5-8.
- [6] ELMORE F E. A process for separating certain constituents of subdivided ores and like substances, and apparatus therefore [P]. British,1905.
- [7] 邓晓刚,陈器,廖振方. 脉冲电浮法在矿物浮选中的应用理论研究[J]. 矿山机械,2006,34(4):66-67.
- [8] G. BHASKAR. RAJU, P. RKHANGAONKAR, 张学敏. 微细粒黄铜矿的电解浮选[J]. 河北冶金,1983(3):58-63,68.
- [9] 陈繁忠,李穗中. 电解气浮法技术进展[J]. 广东化工,1997(4):60-61.
- [10] 陈延禧,龚允怡. 用激光衍射法研究电解气泡的大小及其分布[J]. 化学学报,1992,50(10):967-972.
- [11] 汪朝晖,廖振方,陈德淑. 电浮选过程中气泡行为的研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011(3):103-108.
- [12] 赵伟,李振,周安宁,等. 铝电极电浮选阴极的气泡特征及其影响因素研究[J]. 矿产保护与利用,2018(3):87-92.
- [13] 周凌锋,张强. 气泡尺寸变化对微细粒浮选效果的研究[J]. 有色金属(选矿部分),2005(3):21-23.
- [14] 贺国旭,朱广东,邵会波. 电浮选法在处理含重金属离子废水中的应用[J]. 湿法冶金,2011,30(3):201-204.
- [15] 贺国旭,张秋霞,杨维春. 电浮选方法在废水处理中的应用[J]. 净水技术,2010(5):42-47.
- [16] 阳华玲,朱超英,易峦,等. 微细粒浮选柱的研究现状及其新进展[J]. 湖南有色金属,2014,30(5):11-16.
- [17] 佚名. 含锡矿泥的电浮选[J]. 国外金属矿选矿,1979(5):64.
- [18] WEI S, LIANG M, YUE H H, et al. Hydrogen bubble flotation of fine minerals containing calcium[J]. Mining science and technology (China), 2011, 21(4): 591-597.
- [19] 覃文庆,王佩佩,任浏祎,等. 颗粒气泡的匹配关系对细粒锡石浮选的影响[J]. 中国矿业大学学报,2012,41(3):420-424,438.
- [20] 戴智飞,黄红军,孙伟,等. 电解浮选中气泡性质对细粒萤石回收的影响[J]. 化工矿物与加工,2017,46(5):9-12.
- [21] 马亮. 浮选过程中含钙矿物颗粒与气泡的相互作用研究[D]. 长沙:中南大学,2011.
- [22] 李艳,孙伟,胡岳华. 气泡性质对高岭石浮选行为的影响[J]. 中国有色金属学报,2009,19(8):1498-1504.
- [23] 马明芳. 电化学浮选研究[J]. 能源技术与管理,2019,44(3):154-156.
- [24] 刘颖洲,董宪妹,代娟. 电解浮选中气泡尺寸对精煤产率的影响[J]. 煤炭技术,2014,33(4):244-246.
- [25] 张翼,于婷,毕永慧,等. 含油废水处理方法研究进展[J]. 化工进展,2008(8):22-28.
- [26] 曹伟丽,王彦龙,郭明,等. 采油污水的电气浮选技术研究[J]. 应用化工,2014(8):1547-1548.
- [27] 冯玉杰. 电化学技术在环境工程中的应用[M]. 化学工业出版社,2002.
- [28] 任连锁. 电解-浮选法处理含油污水的研究[J]. 净水技术,2005,24(1):9-11.
- [29] 满春生,孙福德. 电解凝聚浮选法处理含油废水[J]. 重庆环境保护,1987(2):11-14.
- [30] 王车礼,张登庆,陈毅忠,等. 电解絮凝浮选法处理油田废水[J]. 水处理技术,2003(3):163-165.
- [31] 崔明玉,王栋,曹同川. 絮凝-电气浮选法处理乳化油废水[J]. 环境技术,2005,23(2):29-31.
- [32] 邵会波, S O VARAXIN, V A KOLESNIKOV, 等. 电镀污水净化新工艺-电浮选方法简介[J]. 化学通报(印刷版),2003,66(12):837-842.
- [33] 许珂敬,杨新春. 新浮选技术在废水处理中的应用[J]. 矿产保护与利用,1996(4):47-49,57.
- [34] KOLESNIKOV V A, VARAKSIN S O, KRYUCHKOVA L A. Electroflotation extraction of valuable components from wash waters of electroplating works, with water recycling[J]. Russian journal of electrochemistry, 2001, 37(7):760-764.
- [35] RAHMANI A R, NEMATOLLAHI D, GODINI K, et al. Continuous thickening of activated sludge by electro-flotation[J]. Separation & purification technology, 2013, 107:166-171.
- [36] 万晶,陈金奎,施汉昌. 电解浮选用于活性污泥固液分离的正交实验研究[J]. 环境工程学报,2007,1(7):106-109.
- [37] 陈金奎,万晶,施汉昌. 电解浮选用于活性污泥固液分离的研究[J]. 环境科学,2006,27(11):2333-2338.
- [38] 李良阁. 电解浮选处理工业废水的应用[J]. 河南城建学院学报,1993(1):10-13.

Research Progress of Electrolytic Flotation Technology in Beneficiation and Wastewater Treatment

DONG Jifa^{1,2}, FANG Jianjun^{1,2}, ZHANG Ling^{1,2}, ZHENG Runhao^{1,2}, KOU Qingjun^{1,2}

1. Faculty of Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming 650093, China

Abstract: Electrolytic flotation technology is a method to obtain microbubbles by electrolyzing water based on the principle of electrolytic cell. It is characterized by the small diameter of the bubble produced by electrolysis, and has the advantages in fine particle flotation and wastewater treatment. With the prominent resources characteristics of poor, fine and miscellaneous and the enhancement of green chemical industry, the research and application of fine particle flotation, metal ion treatment in wastewater and oil – water separation will be widely concerned. This paper summarized the research progress of electrolytic flotation technology in the separation of oil and water, removal of heavy metal ions, solid – liquid separation of metal, non – metal, coal and other fine – grained materials and waste water, in order to further study the electrolytic flotation method and lay a foundation for its popularization and application.

Key words: electrolytic flotation; fine particles flotation; waste water treatment; mineral processing

引用格式:董继发,方建军,张铃,郑润浩,寇青军. 电解浮选技术在选矿及废水处理中的研究进展[J]. 矿产保护与利用,2020,40(4):146 – 151.

Dong JF, Fang JJ, Zhang L, Zheng RH and Kou QJ. Research progress of electrolytic flotation technology in beneficiation and wastewater treatment[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2020, 40(4): 146 – 151.

投稿网址:<http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E – mail:kcbh@chinajournal.net.cn