

滑石粉在水处理中的应用研究进展

李萍¹, 李思凡¹, 杨双春¹, 马彪²

1. 辽宁石油化工大学环境与生物工程学院, 辽宁抚顺 113001
2. 中国石油天然气股份有限公司抚顺石化分公司, 辽宁抚顺 113008

摘要 滑石是一种具有特殊层状结构的镁质硅酸盐,其化学性能稳定,具有独特的孔结构和较大的比表面积,在造纸、涂料、汽车制造等各个领域得到广泛应用。粉末状滑石具有亲油疏水性和优异的吸附性,且储量丰富,成本低廉,近年来,滑石粉成功应用到污水治理领域,已有将其作为混凝剂、助凝剂、助滤剂、吸附剂、吸油剂的相关研究。介绍了滑石的理化性质,综述了近年来国内外滑石粉应用于造纸废水、含油废水、染料废水、芳香族有机废水及重金属离子废水的研究现状,总结了滑石粉在水处理中的改性方法,评价了滑石粉应用在各种废水处理中的优缺点,并对今后滑石粉在水处理中需要开展的工作提出建议。

关键词 滑石粉;造纸废水;含油废水;染料废水;芳香族有机废水;重金属离子废水

中图分类号 X703

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.21.012

Progresses of the Application of Talcum Powder in Water Treatment

LI Ping¹, LI Sifan¹, YANG Shuangchun¹, MA Biao²

1. Department of Environmental and Biological Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, Liaoning Province, China
2. Fushun Petrochemical Company, Petro Fushun 113008, Liaoning Province, China

Abstract Talc is a kind of magnesium silicate, which have stable chemical property, a large surface area with special layered structure, and unique pore-structure. It has been widely used in various fields including papermaking, coating, automotive industry and so on. In recent years, talcum powder has been successfully applied to sewage treatment because of its lipophilic-hydrophobic property, excellent adsorption property, rich reserves and low cost. There are relevant researches that the talcum powder has been used as a coagulant, coagulant aid, filter aid, adsorbent or oil absorbent. The physical and chemical properties of talc were introduced in this paper. Then the newest research on talcum powder used in papermaking wastewater, oily wastewater, dye wastewater, aromatic organic wastewater and heavy metal ions wastewater were reviewed. Meanwhile the modification methods of talcum powder in water treatment were summarized. And the advantages and disadvantages on the talcum powder used in treatment of various wastewaters were evaluated. Finally, some suggestions are provided for the relevant research and the developments, which are expected in the future.

Keywords talcum powder; papermaking wastewater; oily wastewater; dye wastewater; aromatic organic wastewater; heavy metal ions wastewater

0 引言

滑石主要成分是含水的镁质硅酸盐,其结构是由两层硅氧四面体夹一层水镁石八面体组成的 2:1 型的单斜晶系,化学式为 $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$,其组成为 MgO 31.72%, SiO_2 63.52%, H_2O 4.76%。晶体结构如图 1 所示。

滑石结构中朝向硅氧四面体层方向的内羟基(氢和氧电负性差值小于 1.7)为极性共价键,层间以较弱的范德华力连接,无其他阳离子,使其在研磨时容易裂成薄层。滑石成分中以 Mg 为主,常有 Fe^{2+} 的类质同象,致使八面体带部分正电,同时,硅氧四面体中也会发生 Al^{3+} 代替 Si^{4+} 现象,又导致四面体

收稿日期:2013-03-01;修回日期:2013-03-29

基金项目:辽宁省人民政府资源保护办公室项目(HSXF-2012-05)

作者简介:李萍,教授,研究方向为固体废弃物资源化和环境化学,电子信箱:yangchun_bj@126.com;杨双春(通信作者),副教授,研究方向为三废治理与资源化,电子信箱:yangchun_bj@126.com

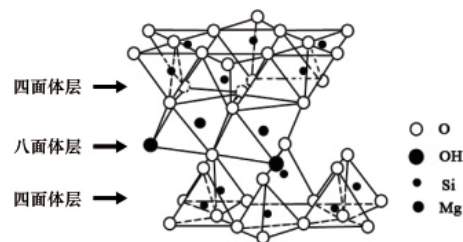


图1 滑石的晶体结构

Fig. 1 Crystal structure of talc

带部分负电,正负电荷相互抵消,故滑石单元层内电荷平衡。层内 OH—Mg—O 和 OH—Mg—OH 中镁原子与氧原子的电负性差值为 2.3,在一定条件下相互接近,通过静电引力形成离子键,结合较牢固,且滑石具有独特的孔结构及较大的比表面积,故其化学性质稳定、吸附能力较强。此外,滑石解理面的润湿角($\theta=64^\circ$)较大,因此具有疏水性。滑石耐热,耐高温,不溶于强酸强碱,同时具有良好的润滑性、电绝缘性^[1-3],因而在多个领域内得到广泛应用^[45],开发利用前景十分广阔。

目前,国内外处理污水的方法主要有物理法、化学法和生物处理法,其中,吸附法以工艺简单、成本低及出水水质较好等特点被广泛使用,其他方法则存在操作复杂、运行费用高或产生二次污染等问题。目前,使用较多的吸附剂是活性炭,但其价格昂贵、净化效果相对较慢,使其广泛应用受到制约。滑石是一种天然黏土矿物,滑石粉是滑石块经空气分离,破碎,研磨,水洗,干燥制成,其原料来源丰富、价格低廉,是一种良好的吸附材料。因此,国内外学者用滑石粉处理水污染的研究越来越多,笔者综述了近年来国内外滑石粉应用于造纸废水、含油废水、染料废水、芳香族有机废水及重金属离子废水的研究现状,并对今后的发展方向提出了建议,以期对相关研究提供参考。

1 滑石粉在水处理中的应用研究

1.1 处理造纸废水

造纸废水主要来自造纸工业生产中的制浆和抄纸生产过程,主要成分是木质素、纤维素、挥发性有机酸等,具有污染物浓度高,排放量大,难降解,可生化性差等特点^[6],是较难处理的工业废水之一。造纸废水常用的处理方法是混凝法^[7],该法适应性强、设备简单、操作方便,但存在成本高、污泥产生量大等缺点;另一种方法是生物法,它具有无二次污染、处理费用低等特点,但不能彻底降低有机污染物的含量。近年来,国内外学者有将滑石粉作为助凝剂、混凝剂、助滤剂处理造纸废水的应用研究。

1.1.1 作为助凝剂处理造纸废水

高玉兰等^[8]考查滑石粉作为助凝剂对混凝强化处理造纸废水的效果,结果表明,在最佳混凝条件下,即滑石粉与聚合硫酸铁(PFS)、聚合氯化铝(PAC)、聚合硫酸铝铁(PAFS)混合的用量各为 0.8~1.0、1.2、0.4~0.5g/L 时,COD_{Cr} 的去除率分别

提高 3.0%、4.0%和 2.5%,悬浮物(SS)去除率分别提高 27.1%、29.4%和 26.5%,但笔者未考查助凝剂滑石粉粒径的大小对造纸废水处理的影响。杨崇豪等^[9]考查超细滑石粉(SFT,平均粒径 12 μ m)强化混凝处理造纸废水的助凝效果。结果表明,SFT 作为助凝剂与 PAC 或 PFS 混凝处理造纸废水效果显著,SFT 的投料量为 1mg/L 时,其助凝效果优于聚丙烯酰胺(PAM),成本降低约 23%。杨崇豪等^[10]采用正交实验设计的方法,考查超细滑石粉 SFT(平均粒径 12 μ m)作为助凝剂处理再生造纸废水的效果。结果表明,用 SFT 代替 PAM 作助凝剂后,沉速有所提高,成本降低 0.1046 元/m³,在水样 pH 值为 6.5,PAC 300mg/L 和 SFT 3mg/L 条件下,浊度去除率达 98.8%,色度去除率达 92.3%。滑石粉作为助凝剂的原因之一是其具有较多的表面羟基,这些活性官能团可参与表面质子迁移而发生表面络合反应进而吸附污染物,此外,滑石粉属于三维球体,由碰撞理论可知其碰撞速率较大^[10],加速了助凝作用。

1.1.2 作为助滤剂处理造纸废水

膜生物反应器(MBR)是一种由膜分离单元与生物处理单元相结合的新型水处理技术。具有操作简单,适应性强等特点,已用于处理造纸废水的研究^[11],但是膜污染问题亟待解决,刘旭东等^[12]采用向 MBR 中投加滑石粉的方法处理造纸废水。结果表明,滑石粉投加量为 1.2g/L(0.1mm 孔径的筛网筛出)时,COD_{Cr} 去除率可达到 90%以上,滑石粉助滤剂的加入,使膜污染阻力下降 68.5%,滤饼阻力下降 91.1%,减缓膜污染的同时又延长了膜的使用寿命。由于助滤剂滑石粉具有较强的吸附性,所以污泥絮凝体更易聚集,黏性也相应减小,使膜污染阻力有所下降,新型廉价滑石粉助滤剂的研发是滑石应用研究的新方向。

1.1.3 作为混凝剂处理造纸废水

杨福廷等^[13]采用多种阳离子(十六烷基三甲基氯化铵(CTAB)、十二烷基三甲基溴化铵(DTAB)、十八烷基三甲基溴化铵(OTAB))表面活性剂对滑石粉进行有机改性,考查改性滑石粉在不同条件下对脱墨废水的处理效果。结果表明,在 CTAB-滑石粉用量 15g/L、硫酸质量分数 10%、铝用量 5ml/L、pH 值为 6.0、搅拌 20min、静止 4h 条件下,COD_{Cr} (含量在 1600mg/L)去除率可达 82.1%。滑石粉改性的最佳条件:温度 90 $^\circ$ C、时间 50min,表面活性剂的质量分数为 25%。笔者只考查了 CTAB-滑石粉用量对 COD_{Cr} 去除率的影响,而未考虑 DTAB-滑石粉及 OTAB-滑石粉用量对 COD_{Cr} 去除率的影响。Clauss 等^[14]将滑石粉添加到活性污泥曝气池中考查对造纸废水中絮状物的沉降速率的影响。结果表明,絮状物沉降速率得到提高,滑石粉可与其他污水处理剂共存,污泥渣的产量并未增多,生物剩余污泥脱水效果较好。王莹茹等^[15]用超细滑石粉(1250 目)对造纸废水进行实验,研究了投加量、pH 值等因素对造纸废水混凝效果的影响。结果表明,超细滑石粉在处理造纸废水过程中既有混凝作用,又有助凝作用,pH 值和投加量是影响实验的主要因素,在 pH 值为 2.0,投加 5g/L 超细滑石粉的条件下,造纸废水处理效果最为显著。将滑石粉

直接作为混凝剂是因为其高效吸附性,而经阳离子表面活性剂改性后的滑石粉能中和带负电荷的污染物粒子,破坏了这些粒子间原有作用力的平衡,使其与滑石粉聚结更容易,从而可提高造纸废水 COD_{Cr} 的去除率。

1.2 处理含油废水

含油废水主要来源于石油工业,钢铁,煤气工作站,机械工业的冷却润滑油等,废水中油面的覆盖使水体丧失自净能力,破坏水中生态平衡,不仅危害人体健康,而且影响农作物的生产^[6]。目前,气浮法^[7]是处理含油废水的主要方法,但该方法能耗高、絮凝剂用量多且占地面积大,其他方法如电化学法、吸附法^[8,9]等也存在着运行费用高、适用范围小等缺点。近年来,一些学者对滑石粉作为吸油剂的研究为处理含油废水提供了一条新途径。余仁焕等^[20]考查滑石用量、粒度这两个因素对充气旋流器的净化含油污水的效果。结果表明,滑石粉(150g/m³水)细度为0.074mm占81%时,除油率达到78.30%,滑石粉对充气旋流器的除油效果显著,与不投加滑石粉相比,除油率提高约5%。还有研究学者^[21]考查在不同条件下滑石粉处理含油废水的效果。结果表明,在20℃,滑石粉投加量为20g/L,慢速搅拌15min条件下,汽油COD去除率为97.8%,柴油去除率为81.5%。滑石是天然的疏水亲油矿物,能促进疏水亲油颗粒在油水中分离,故可将滑石粉作为吸油剂处理含油废水。

1.3 处理染料废水

染料废水组分复杂、色度深,对环境造成严重污染。阳离子染料废水中由于含有复杂的芳香基团而难以生物降解脱色,可生化性差^[22],所以染料废水不易治理。染料废水传统的处理方法(过滤、混凝等)只是将污染物由液相转化成固相或气相,并未将污染物完全去除,且易造成二次污染^[23]。因此,有关本低、效果好、绿色环保的治理技术正在不断开发。

冯云姝等^[24]考察滑石粉投加量、染料废水浓度、慢速搅拌时间、温度等因素对阳离子染料亚甲基蓝、结晶紫、中性红的吸附效果的影响。结果表明,在25℃,滑石粉投加量为10g/L,慢速搅拌10min时,染料废水(0.015g/L)中3种阳离子染料脱色率均大于99%,其中,温度变化对阳离子染料废水脱色效果无显著影响。Liu等^[25]考查改性滑石粉对阳离子染料亚甲基蓝的去除率,结果表明,40℃时,浓硝酸浸泡滑石,以200℃煅烧2h时制得改性滑石粉对亚甲基蓝的吸附率为84.6%。由此可见,滑石粉处理阳离子染料废水脱色率较高,主要有以下原因:①滑石端面在水或空气等的作用下形成活性官能团OH、Si—O、Si—OH和Mg—O,染料中的阳离子被这些活性官能团吸附;②滑石中镁氧八面体中存在OH—Mg—O和OH—Mg—OH,当半径与Mg²⁺相近的阳离子与滑石接触时,这些离子可以从配位八面体中置换出Mg²⁺,故可去除水中阳离子。

1.4 处理芳香族有机废水

随着石油化工,塑料等工业的发展,工厂排放的含有苯、甲苯、酚类等芳香族化合物的废水越来越多,该类废水污染物结构稳定,难降解^[26],目前,处理芳香族有机废水的方法主

要有Fenton试剂高级氧化法和液膜技术分离法,前者虽然操作方便、反应快速,但运行成本较高,在国内较少应用;后者使用的液膜易老化,也存在着膜污染及费用昂贵等问题。

Hashizume^[27]考查滑石粉对废水中苯和甲苯的吸附情况,并将吸附效果分别与蒙脱石和介孔硅材料进行比较,结果表明,滑石粉在5h内完全吸附苯和甲苯,但对甲苯的吸附性更好,二者等温吸附线为直线,滑石粉对苯和甲苯的吸附效果与改性蒙脱石相当,但优于介孔硅材料。Arseguet等^[28]将辣根过氧化酶或过氧化氢偶联剂对滑石粉进行改性,考查改性滑石粉对水中酚类物质的去除情况。结果表明,在滑石粉的粒径大小、数量及作用时间等最佳条件下,此方法可以有效净化污水中的酚类物质,改性滑石所表现出的吸附性使生物催化剂不受污染,延长了催化作用,是去除水中含有酚类污染物的有效方法。Sener等^[29]考查超声处理滑石粉对废水中多环芳烃萘的吸附效果。结果表明,改性滑石粉对萘的吸附等温线符合Langmuir和Freundlich方程式,但对Freundlich等温线的符合效果更好,对萘的吸附容量由276mg/g提高到359mg/g,吸附效果不受水溶液中pH值的影响,吸附动力学符合拟二阶动力学方程。滑石粉可用来处理芳香族有机废水,主要因为其表面硅氧结构具有疏水性,使其极易与非极性的有机分子(例如苯)发生中性吸附。偶联剂或高能量超声改性滑石粉后可增强其表面活性,提高其疏水性质,可有效吸附有机分子污染物。

1.5 处理重金属离子废水

重金属离子废水对自然环境和人类健康有很大的破坏性,目前,国内外处理重金属离子废水主要有离子交换法,超滤法,电解法,电渗析法等,对于重金属污染水体的处理技术,大部分仍存在成本高,易造成二次污染等问题^[30]。从环保和经济效益角度出发,对重金属废水的处理方法探寻迫在眉睫。有研究表明^[31],滑石经超细粉碎后, ζ 电位负值更大,表面活性增强,这表明滑石吸附重金属的可行性。

魏林^[32]以动态吸附的实验方法研究滑石粉对水中Cu²⁺、Pb²⁺、Cd²⁺吸附效果。结果表明,滑石对这3种重金属离子的吸附等温线符合Langmuir和Freundlich方程式,在3种重金属离子初始浓度等同时,吸附能力由大到小的顺序为Pb²⁺、Cu²⁺、Cd²⁺,最优条件下,Pb²⁺去除率为99.95%,Cu²⁺去除率大于98%,Cd²⁺去除率为99.9%。但是笔者并未考查滑石粉对各个金属离子不同初始浓度的吸附效果的影响,也未考虑滑石粉的回收和再利用等问题。Chandra等^[33]研究了滑石对水中Pb²⁺的吸附行为,探讨了吸附剂量、温度等因素对吸附效果的影响。结果表明,滑石对Pb²⁺的吸附等温线符合Langmuir方程,吸附过程中焓变 $\Delta H < 0$,表明Pb²⁺的吸附是一个放热的过程,自由能 $\Delta G < 0$,表明该反应是自发的,由此可见,滑石对水中Pb²⁺有良好的吸附作用。王健^[34]考查滑石粉(200目)对不同浓度Zn²⁺(10、100、400mg/L)的去除率的变化。结果表明,Zn²⁺在3种初始浓度下的去除率依次降低,分别为97%、28%和21%,滑石对Zn²⁺这一作用过程比较缓慢,随着溶液pH的增大,滑

石吸附 Zn^{2+} 的速率加快,吸附率也相应升高。滑石是天然矿物质的一种,天然矿物质在处理重金属离子废水中发挥重要作用。Rashed^[35]研究了 pH 值、天然矿物(滑石、黄铜矿、重晶石)的粒径大小、吸附时间等因素对水中 Pb^{2+} 的吸附效果,结果表明,吸附等温线符合 Langmuir 和 Freundlich 方程式,当 pH 值为 7~9 时,吸附平衡时间达 72h 后, Pb^{2+} 的去除率随着天然矿物量的增加而增加。随着核技术的应用及含铀磷肥的使用,重金属铀的污染也越来越严重, Sprynskyy 等^[36]以动态吸附实验研究多种条件下滑石对水溶液中铀的吸附效果。结果表明,一级动力学模型能够很好地描述铀离子在滑石上的动力学吸附行为。铀的初始浓度较低(10mg/L)时,属于单分子层吸附,实验中滑石的比表面积($3.5m^2/g$)较小,不足以吸附水溶液中的铀,当滑石的比表面积为 $58.3m^2/g$ 时,铀的最大吸附容量为

41.6mg/g,该实验还表明了水溶液中存在的其他重金属离子也会影响滑石对铀的吸附。滑石粉对重金属离子废水的吸附作用,主要是因为其结构中内羟基具有很强的化学活性,与重金属离子结合组成可变电荷表面,发生配合反应,使重金属离子在滑石表面富集,最后去除废水中的重金属离子。

2 滑石粉在各种废水处理中的应用比较

滑石这一非金属矿物已得到广泛应用,社会经济效益显著,这也越来越显示出其在环保领域中应用的可行性。现将滑石粉在各种废水处理中的优缺点比较如下,见表 1。尽管滑石粉在废水处理方面有一些不足之处,但是滑石粉以储量大、分布广^[37,38]、成本低、污染小等优点在水处理工艺中也有着极为可观的应用前景。

表 1 滑石粉在各种废水处理中的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages on the various wastewater treatment of talcum powder

废水名称	适用范围	主要优点	主要缺点
造纸废水	一般作为造纸废水的深度处理	用量少,絮凝体沉降性好,可用于深度净化	滑石粉再生困难
含油废水	溶解油	吸附效果好,除油率较高	吸附量有限
染料废水	低浓度染料废水的深度处理	脱色效果明显	对阴离子污染物去除困难
芳香族有机废水	除高浓度有机物之外的有机废水	吸附时间短,吸附容量大	选择性较低
重金属离子废水	浓度偏低的重金属离子	重金属离子去除率较高	难以回收处理后的重金属

3 结论与展望

滑石粉处理废水效果显著,主要取决于滑石的结构和性质:(1)独特的孔隙结构及较大的比表面积;(2)表面官能团 OH—、H—O—H、Si—O 活泼;(3)天然的疏水亲油性;(4)化学稳定性。用于水处理的滑石粉改性方法主要有表面覆盖改性法、机械粉碎改性法、超声处理法和酸化改性法^[39,40],滑石粉经改性后,比表面积增大,表面活性增强,吸附性能提高,故可用来处理废水。笔者建议今后需要围绕以下几个方面开展工作:(1)滑石粉作为水处理药剂的改性方法较少,在滑石自身特性的基础上,应拓展研究局部活性改性方法或外膜层改性方法,以提高改性滑石对特定污染物吸附的选择性,此外,酸化滑石粉中酸液排放问题也应着重考虑;(2)滑石粉处理的废水多为实验室模拟废水或污染物单一的废水,滑石粉能否大批量的投入到生产实际操作中还有待考察;(3)有研究表明,SN(十八烷基二甲基羟乙基季铵)与硅酸镁杂化后的混合物可吸附染料废水中的阴离子,硅酸镁层间结构类似于滑石^[41],故可考虑滑石与 SN 杂化用于染料废水中阴离子的去除;(4)依据滑石具有润滑性和吸附性等特点,可考查滑石粉在膜分离技术中的助滤作用;(5)应加强滑石粉回收再利用等方法的研究,为进一步开发滑石粉在水处理中的应用提供理论基础。随着人们对滑石粉净化水污染的深入研究,以及滑石的加工改性技术的不断开发,期待滑石粉在水处理方面会

有重大突破。

参考文献 (References)

- [1] Mierczynska-Vasilev A, Beattie D A. The effect of impurities and cleavage characteristics on talc hydrophobicity and polymer adsorption [J]. International Journal of Mineral Processing, 2013, 118: 34-42.
- [2] Yoneda A, Yonehara M, Osako M. Anisotropic thermal properties of talc under high temperature and pressure [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2012, 190-191: 10-14.
- [3] 李晶, 尹小龙, 张虹, 等. 天然矿物材料处理重金属废水研究进展[J]. 能源环境保护, 2012, 26(2): 5-8.
Li Jing, Yin Xiaolong, Zhang Hong, et al. Energy Environmental Protection, 2012, 26(2): 5-8.
- [4] Serra M F, Picicco M, Moyas E, et al. Talc, spodumene and calcium carbonate effect as secondary fluxes in triaxial ceramic properties[J]. Procedia Materials Science, 2012, 1: 397-402.
- [5] Prasad B K. Lubricated sliding wear behavior of a cast iron: Effect of graphite and/or talc fraction in oil [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2010, 19(3): 413-420.
- [6] Wang H L, Liu G S, Li P, et al. The effect of bioaugmentation on the performance of sequencing batch reactor and sludge characteristics in the treatment process of papermaking wastewater [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2006, 29(5/6): 283-289.
- [7] Pokhrel D, Viraraghavan T. Treatment of pulp and paper mill wastewater—A review[J]. Science of the Total Environment, 2004, 333(1/3): 37-58.
- [8] 高玉兰, 王礼同, 汪万芬. 滑石粉强化混凝处理造纸废水的研究[J]. 皖

- 西学院报, 2009, 25(2): 73-75.
Gao Yulan, Wang Litong, Wang Wanfen, et al. Journal of West Anhui University, 2009, 25(2): 73-75.
- [9] 杨崇豪, 周瑞云, 张洁. 超细滑石粉强化混凝处理造纸废水[J]. 中国造纸, 2006(6): 28-30.
Yang Chonghao, Zhou Ruiyun, Zhang Jie. China Pulp & Paper, 2006(6): 28-30.
- [10] 杨崇豪, 宋继琴. 用正交实验法研究超细滑石粉对再生纸造纸废水混凝处理效果的影响[J]. 工业污水处理, 2001, 21(7): 20-22.
Yang Chonghao, Song Jiqin. Industrial Water Treatment, 2001, 21(7): 20-22.
- [11] Beier S, Cramer C, Mauer C, et al. MBR technology: A promising approach for the (pre-)treatment of hospital wastewater [J]. Water science and technology, 2012, 65(9): 1648-1653.
- [12] 刘旭东, 王召玲. 滑石粉对 MBR 法处理造纸废水的影响 [J]. 沈阳建筑大学学报, 2006, 22(5): 821-824.
Liu Xudong, Wang Zhaoling. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2006, 22(5): 821-824.
- [13] 杨福廷, 崔素芳, 曹亚鹏, 等. 表面活性剂对滑石粉的改性及在废水处理中的应用[J]. 精细化工, 2002, 19(S1): 48-50.
Yang Futing, Cui Sufang, Cao Yapeng, et al. Fine Chemicals, 2002, 19(S1): 48-50.
- [14] Clauss F, Balavoine C, Hélaine D, et al. Controlling the settling of activated sludge in pulp and paper wastewater treatment plants [J]. Water Science and Technology, 1999, 40(11/12): 223-229.
- [15] 王莹茹, 胡文云, 廖桂敏. 超细滑石粉对造纸废水混凝效果的影响[J]. 工业安全与环保, 2008, 34(7): 6-8.
Wang Yingru, Hu Wenyun, Liao Guimin. Industrial Safety and Environmental Protection, 2008, 34(7): 6-8.
- [16] Shokrkar H, Salahib A, Kasiria N, et al. Prediction of permeation flux decline during MF of oily wastewater using genetic programming [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2012, 90(6): 846-853.
- [17] Moosai R, Dawe R A. Gas attachment of oil droplets for gas flotation for oily wastewater cleanup [J]. Separation and Purification Technology, 2002, 33(3): 303-314.
- [18] Yang C L. Electrochemical coagulation for oily water demulsification[J]. Separation and Purification Technology, 2007, 54(3): 388-395.
- [19] Kumagai S, Noguchi Y, Kurimoto Y, et al. Oil adsorbent produced by the carbonization of rice husks [J]. Waste Management, 2007, 27(4): 554-561.
- [20] 余仁焕, 李新国. 利用充气旋流器净化含油污水的研究 [J]. 冶矿, 1996, 5(3): 95-99.
Yu Renhuan, Li Xinguo. Mining & Metallurgy, 1996, 5(3): 95-99.
- [21] 冯云姝, 李萍, 崔爽, 等. 滑石粉处理含油废水的研究 [J]. 环境科技, 2010, 23(6): 18-20.
Feng Yunshu, Li Ping, Cui Shuang, et al. Environmental Science and Technology, 2010, 23(6): 18-20.
- [22] Charumathi D, Das N. Packed bed column studies for the removal of synthetic dyes from textile wastewater using immobilized dead *C. tropicalis*[J]. Desalination, 2012, 285(31): 22-30.
- [23] Li X, Du L S, Wang C, et al. Nanofiltration coupled with electrolytic oxidation in treating simulated dye wastewater [J]. Journal of Membrane Science, 2012, 409-410(1): 329-334.
- [24] 冯云姝, 李萍, 崔爽, 等. 滑石粉处理阳离子染料废水的试验研究[J]. 工业用水与废水, 2011, 42(1): 25-27.
Feng Yunshu, Li Ping, Cui Shuang, et al. Industrial Water & Wastewater, 2011, 42(1): 25-27.
- [25] Liu W L, Zhao S L, Cui S, et al. The research on the adsorptive capability and adsorption isotherm of modified talcum powder to methylene blue[J]. Advanced Materials Research, 2013, 610-613: 1443-1448.
- [26] Asenjo N G, Álvarez P, Granda M, et al. High performance activated carbon for benzene/toluene adsorption from industrial wastewater [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(3): 1525-1532.
- [27] Hashizume H. Adsorption of aromatic compounds in water by talc [J]. Clay Science, 2009, 14(2): 61-64.
- [28] Arseguel D, Baboulène M. Removal of phenol from coupling of talc and peroxidase. Application for depollution of waste water containing phenolic compounds [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 1994, 61(4): 331-335.
- [29] Sener S, Özyilmaz A. Adsorption of naphthalene onto sonicated talc from aqueous solutions [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2010, 17(5): 932-938.
- [30] Barakat M A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2011, 4(4): 361-377.
- [31] 杨华明, 邱冠周, 王淀佐. 滑石粉超细粉碎过程的结构变化 [J]. 硅酸盐学报, 1999, 27(5): 580-583.
Yang Huaming, Qiu Guanzhou, Wang Dianzuo. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1999, 27(5): 580-583.
- [32] 魏林. 滑石粉对重金属离子的吸附性研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
Wei Lin. Study on the adsorption of talcum powder to adsorb the heavy iron [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [33] Navin C, Nitin A, Priya S, et al. Separation of lead ions from aqueous solutions by adsorption at talc surface [J]. Nisair Online Periodicals Repository, 2005, 64(9): 674-678.
- [34] 王健. 粘土矿物与重金属离子的长期相互作用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
Wang Jian. Long-term interaction between clay minerals and heavy metal ions[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007.
- [35] Rashed M N. Lead removal from contaminated water using mineral adsorbents[J]. Environmentalist, 2001, 21(3): 187-195.
- [36] Sprynskyy M, Kowalkowski T. Adsorption performance of talc for uranium removal from aqueous solution [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 171(3): 1185-1193.
- [37] 陈从喜, 贾岫庄. 我国滑石工业的现状与挑战[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2012(5): 1-12.
Chen Congxi, Jia Youzhuang. China Non-Metallic Mining Industry Herald, 2012(5): 1-12.
- [38] 陈立松, 彭春艳. 世界滑石的生产、消费及市场概况[J]. 化工矿物与加工, 2008(7): 33-37.
Chen Lisong, Peng Chunyan. Industrial Minerals & Processing, 2008(7): 33-37.
- [39] Castillo L A, Barbosa S E, Maiza P, et al. Surface modifications of talcs. Effects of inorganic and organic acid treatments [J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(8): 2578-2586.
- [40] 黄丽婕, 李艺. 超细滑石粉的表面改性及应用特性 [J]. 广西轻工业, 2007, 98(1): 29-30.
Huang Lijie, Li Yi. Guangxi Journal of Light Industry, 2007, 98(1): 29-30.
- [41] Wei Y P, Gao H W. SN@silicate: An anionic dye sorbent and its reuse [J]. Journal of Materials Chemistry, 2012, 22: 5715-5722.

(责任编辑 赵业玲)