doi：10. 3969/j. issn. 1005-7854. 2022. 02. 016

含油污泥擦洗剥离技术应用试验研究

刘 庆　薛广海　李 强
（矿冶科技集团有限公司，北京 100160）

摘　要：针对难于分离的含油污泥物料，提出使用擦洗剥离技术进行含油污泥分离处理，并开展了试验研究。结果表明，最优的擦洗试验参数条件为：擦洗矿浆浓度 70 %、擦洗介质与物料的比例 1∶1、搅拌线速度 5.3 m/s、搅拌时间 10 min、不加温、双层搅拌擦洗时的擦洗效果最佳。验证试验结果表明，采用擦洗剥离技术处理后的污泥含油率可降低到 0.51%，达到含油污泥的处理标准，用擦洗剥离技术处理含油污泥具有高的可行性，可为工业化生产提供设计依据。

关键词：含油污泥；擦洗剥离；分离技术；条件试验
中图分类号：TE665　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1005-7854(2022)02-0094-05

Experimental study on scrubbing and stripping technology application for oily sludge

LIU Qing　XUE Guang-hai　LI Qiang
(BGRIMM Technology Group，Beijing 100160，China)

Abstract：For oily sludge materials are difficult to separate. Scrubbing and stripping technology is proposed and experimental research is carried out to separate oily sludge. The results show that the optimal scrubbing test parameters conditions are as follows：the concentration of scrubbing pulp is 70%，the ratio of scrubbing medium to material is 1∶1，the stirring line speed is 5.3 m/s，the stirring time is 10 min，the scrubbing effect is the best without heating and double-layer stirring scrubbing. The verification test results show that the oil content of sludge treated by scrubbing glass technology can reduced to 0.51%，which meets the treatment standard of oily sludge. The scrubbing and stripping technology is highly feasible to treat oily sludge，which can provide design basis for industrial production.

Key words：oily sludge；scrubbing and stripping；separation technology；condition experiment

在油田生产作业、石油输送、石油加工等过程中，发生石油泄漏情况时，土壤表面会受到石油污染，石油和泥土相互浸入、混合形成了含油污泥(简称“油泥”)。油泥的产生几乎是不可避免的，国内外的油田每年都产生的大量油泥。油泥中含有矿物油、硫化物、苯系物和酚类等有毒有害物质，对环境影响巨大，属于危险废弃物，随着国家环保形势日益趋严，油泥的不断产出已经严重影响到了油田的正常生产运行，急需进行无害化处理。

收稿日期：2021-07-27
第一作者：刘庆，硕士，正高级工程师，主要从事固体废弃物处理的工艺研究和装备设计工作。
E-mail：liu _ qing@bgrimm. com

含油污泥处理的目的是将含油污泥中矿物油与固相分离，分离后的矿物油回收再利用，处理后固相的含油率降到指标后，用于铺设通井路或制作成铺垫井场的基础材料。从微观角度分析，含油污泥是表面包裹着油层的颗粒，处理过程就是将颗粒表面的油层清洗分离的过程，但大部分油泥经过长时间露天堆放，石油发生氧化后牢固附着在沙土表面，难于分离，成为处理油泥的难点。

油泥处理过程与矿物擦洗剥离过程相似，都是去除矿物表面的污染物，用擦洗技术强化分离效果，常见于石英砂、磷矿、硅藻土的洗矿提纯技术，能实现大规模生产处理[1-7]，因此，将擦洗剥离技术应用到含油污泥的处理当中，具有高的适用性，有望为油泥处理提供一种新的处理方法。

1 试验方法

原料取自西部某油田产生的含油污泥，其基本物理指标见表1，粒度分布见表2。油泥样品的物质组成多是沙粒和淤泥，约78%的油泥粒度集中在0.045～0.84 mm，相对于普通擦洗矿颗粒，油泥的粒径较大。

擦洗剥离试验分为两步：1)擦洗剥离。将油泥与水搅拌混合成泥浆，通过物理碰撞、摩擦将油相由从泥沙表面剥离，记录泥浆浓度、擦洗介质比例、擦洗时间、搅拌速度、温度及擦洗结构等试验条件，取出泥浆进行筛分，筛上物是擦洗剥离出的粗粒，观察粗粒中存在油粒的情况，并且烘干、称重，评价擦洗效果，通过多组对比试验优化擦洗试验参数，取得最优的擦洗试验条件，这一步是整个试验流程的核心。2)用最优参数条件进行擦洗试验。对擦洗后的筛下物进行浮选分离，得到浮油和细粒，将筛上物(粗粒)和细粒混合，检测其含油率是否达到油泥的处理标准，评价擦洗剥离技术的可行性。

表1 含油污泥指标

Table 1 Index of oily sludge /%

指标	湿基含油率	湿基含水率	湿基含固率	合计
含量	11.18	3.35	85.47	100.0

表2 含油污泥的粒度分布

Table 2 Particle size distribution of oily sludge

粒度/mm	>0.840	0.270～0.840	0.106～0.270	0.045～0.106	<0.045
百分比/%	16.97	18.01	43.40	16.60	5.02

2 试验结果与讨论

2.1 工艺参数条件优化试验

2.1.1 擦洗矿浆浓度的选择

对于擦洗工艺，首先将油泥和水调制成矿浆，在搅拌作用下，油泥颗粒表面相互作用，浆体的浓度越高，颗粒间碰撞、摩擦的概率越高，擦洗效果越强，但浓度越大，浆体的流动性越差，搅拌功率越大，因此需要找到擦洗浓度的上限。搅拌试验时发现，矿浆浓度在70%以下，油泥样品都可搅动成浆，而矿浆浓度超过70%时，同样的搅拌不能使矿浆充分流动，浆体流动性变差，因此擦洗浓度选择70%。

2.1.2 有无介质对擦洗效果的影响

擦洗剥离是通过摩擦法将硬度明显小于泥沙的油相剥离出来，擦洗分为无介质和有介质擦洗两种。无介质擦洗是单纯靠机械搅拌力增强物料颗粒间的碰撞、摩擦力度，达到去除颗粒表面污物的目的。有介质擦洗是在物料颗粒间擦洗的基础上添加摩擦介质，如球磨材料、棒磨材料等，是一种强化擦洗的方法，其优点是擦洗力度强、工作效率高，缺点是耗能高，物料颗粒受到强介质摩擦作用，颗粒遭到破坏，会出现过磨现象，油泥颗粒变小，影响下一步的浮选提纯工序。

试验过程：将300 g物料样品调成70%浓度的矿浆，分别进行有介质擦洗和无介质擦洗试验，其他试验条件：介质和物料比例为1∶1、搅拌时间5 min、搅拌线速度3.20 m/s，分4组试验进行。擦洗后物料用20目筛网(孔径为0.84 mm)筛分，使用筛上物质量占样品总质量的百分比来描述是否过磨，用筛上物的油粒情况来评价擦洗效果好坏。如果筛上物存在的油粒少，说明擦洗分离出的油相粒度小，油粒溶入到矿浆(筛下物)中，可用浮选方法进行油固分离，擦洗效果好；反之，筛上物存在的油粒多，说明擦洗出的油粒大，直接增加了处理后油泥的含油率，对筛上物需要增加特殊的提纯工序才能降低含油率，使油泥处理流程趋于繁琐，擦洗效果难以达到要求。试验结果见表3。

表3 有无介质的擦洗试验结果

Table 3 Results of scrubbing experiment with or without medium

擦洗介质粒径/mm	筛上物占比/%	筛上物外观描述
—	13.34	砂粒表面有油污，没有擦洗干净，存在大块油粒
8	11.57	有大量小油粒
15	4.90	砂粒出现过磨现象，存在少量小油粒
15/8	5.78	小油粒数量介于擦洗介质粒径为8 mm和15 mm的油粒数量

备注："—"指的是无擦洗介质

由表 3 可知，无介质擦洗时不能去除砂粒表面的油相，并形成大块油粒，有介质擦洗强度要比无介质擦洗的大，可分离出油泥中的油相，但要注意 20 目筛网筛上物质量变小，物料粒径变细，不利于后续的浮选分离工艺。因此，使用擦洗介质粒径大、小结合的介质擦洗，既能保证擦洗强度，也不会使颗粒表面过磨，可得到最优结果。

2.1.3　介质比例对擦洗效果的影响

取 300 g 物料样品，调成 70%浓度的矿浆，搅拌 5 min，搅拌线速度为 3.20 m/s，加介质擦洗搅拌，介质质量分别是物料质量的 1 倍、2 倍、3 倍，试验结果见表 4。在介质与物料比为 2∶1 和 3∶1 的情况下，筛上物固体颗粒都出现了过磨现象，擦洗介质越多，物料颗粒磨损越大，大颗粒粒径变成小颗粒，增加了后续的浮选难度。由表 4 可知，介质与物料比为 1∶1 时，沙粒表面基本无油污，筛上物结胶成的油粒也基本被磨掉，擦洗效果最好。

表 4　擦洗介质与物料比对擦洗效果的影响

Table 4　Effects of the ratio of scrubbing medium to material on scrubbing

擦洗介质量/g	介质与物料比例	筛上物占比/%	筛上物外观描述
300.00	1∶1	5.66	效果较好，有少量油粒
600.00	2∶1	3.66	无油粒
900.00	3∶1	1.35	明显过磨，无油粒

2.1.4　擦洗时间对擦洗效果的影响

取 300 g 物料样品，调成 70%浓度的矿浆，设置搅拌线速度为 3.20 m/s，介质与物料比例为 1∶1，研究擦洗时间对擦洗效果的影响，试验结果见表 5。由表 5 可知，擦洗时间越长，固体颗粒的擦洗效果越好。但是长时间擦洗会出现过磨现象，筛上物粗粒明显变少。由表 5 可知，擦洗时间控制在10 min，擦洗效果最好，擦洗时间较短，且可保证物料颗粒不过磨，同时也能减少能耗，有利于降低成本。

表 5　擦洗时间对擦洗效果的影响

Table 5　Effects of scrubbing time on scrubbing

搅拌时间/min	筛上物占比/%	筛上物描述
5	5.70	存在大油粒和大量小油粒
10	4.10	无大油粒，有少量小油粒
15	2.74	存在个别小油粒

2.1.5　搅拌速度对擦洗效果的影响

取 300 g 物料样品，调成 70%浓度的矿浆，介质与物料比例为 1∶1，在不同线速度下搅拌 10 min，结果见表 6。由表 6 可知，搅拌速度越快，颗粒表面擦洗的效果越好，但物料中筛上的大颗粒越少，说明出现过磨现象。因此，在保证擦洗效果情况下，应避免固体颗粒过度磨损。由表 6 可知，在线速度为 5.30 m/s 情况下，擦洗效果最好。

表 6　擦洗搅拌速度对擦洗效果的影响

Table 6　Effects of scrubbing stirring speed on scrubbing

线速度 m/s	筛上物占比/%	筛上物描述
3.20	4.04	无大油粒，有少量小油粒
5.30	3.00	有个别小油粒，砂粒表面光滑，无油污
6.60	1.74	砂粒明显减少

2.1.6　温度对擦洗效果的影响

取 300 g 物料样品，调成 70%浓度的矿浆，搅拌线速度为 5.30 m/s，介质与物料比例为 1∶1，在不同温度下搅拌擦洗 10 min。由于石油遇热后其流动性变好，胶粒油粒消失，附着在砂粒表面的油质也溶于液体，试验结果见表 7。在加热时，加热温度越高，擦洗效果越好，但加热温度相对低的时候，筛分出的油粒容易黏连在筛网上，不利于筛分分级处理，只有加热到 60 ℃，油粒完全溶于液体中，才能消除油粒黏连筛网现象。但加热油泥物料耗能较大，不利于降低处理成本，且在不加热时同样可以实现砂粒表面油污的剥离，也不会出现筛网黏连现象，因此，推荐不加热进行油泥擦洗剥离。

表 7 擦洗温度对擦洗效果的影响

Table 7 Effects of scrubbing temperature on scrubbing

擦洗温度/℃	筛上物占比/%	筛上物描述
30	3.04	砂粒表面基本干净，油粒黏在筛网上
45	2.97	情况同上
60	2.77	无油粒

2.1.7 搅拌器结构试验

搅拌器结构试验的目的是在擦洗过程中保证均匀流动，不在擦洗搅拌槽内沉料、积料，保证擦洗工艺的连续运转。工业用擦洗机以立式搅拌擦洗为主，以双槽擦洗机最为常见[8,9]。双槽擦洗机可以使油泥浆上下流动，从第一槽体上部进料，从底部进入第二个槽体，通过旋流作用上升到槽体表面，溢流出料。与单槽擦洗机相比，双槽擦洗加长了浆体的流动距离，增加了擦洗的作用时间，擦洗效果也更好，油泥浆体在双槽擦洗机内流动方向如图 1 所示。

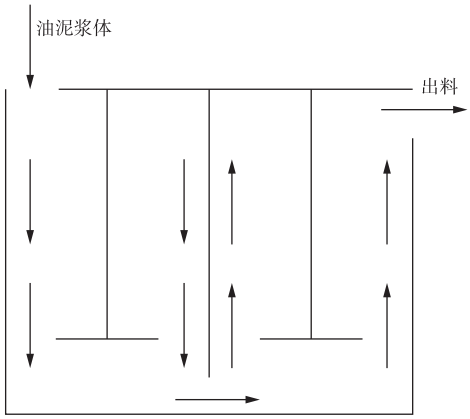

图 1 油泥浆体流动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sludge slurry flow

在搅拌浆体过程中，固体颗粒的沉降速度受粒径、密度及浆体浓度影响很大[10]，含油污泥本身的泥沙颗粒比较粗，粒径大于 0.84 mm 的固体占比为 16.97 %，在搅拌槽内极易沉槽，因此，在油泥擦洗中如何让污泥固体均匀悬浮成为试验的关键。

增加搅拌强度可使浆体颗粒受到向上的力，可抵消颗粒向下的力，只要颗粒受到向上的力足够大，即可使搅拌浆体均匀悬浮，由于搅拌速度已经确定，那么增加搅拌桨层数获得更大的搅拌强度是使颗粒悬浮的有效方法。为此，取 1 500 g 物料样品，调成 70% 浓度的矿浆，介质与物料比例为 1∶1，搅拌线速度为 5.30 m/s，搅拌 10 min，分别使用单层叶轮和双层叶轮进行连续擦洗试验，试验结果见表 8。单层叶轮试验中，擦洗搅拌槽内留存料和出料的固体浓度趋于平衡，但留存料和出料中粒径大于 0.84 mm 的粗颗粒占比差距大，说明多数粗颗粒物料留存在了搅拌槽体中。双层叶轮试验中，搅拌强度明显加强，留存料和出料的浓度趋于一致，粗颗粒占比也趋于一致，说明在擦洗过程中浆体均匀流动，不存在粗颗粒沉槽积料的现象。说明使用双层叶轮能够增加擦洗机内物料的悬浮能力，保证在擦洗过程中浆体进出料的浓度趋于一致，粗颗粒随浆体流动，不会在擦洗机内堆积，可保证擦洗工序的正常运转。

表 8 搅拌器结构试验结果

Table 8 Results of agitator structure experiment

	留存料的固体浓度/%	留存料的粗颗粒占比/%	出料的固体浓度/%	出料的粗颗粒占比/%
单层叶轮	76.20	12.54	66.67	0.60
双层叶轮	75.80	3.41	68.50	3.22

2.2 浮选试验

选择最优擦洗参数条件进行验证试验。试验参数条件为：浆体浓度 70%、擦洗介质与物料比例 1∶1、搅拌线速度 5.30 m/s、搅拌时间 10 min、矿浆不加温，验证设备使用双槽擦洗机，搅拌叶轮使用双层。对擦洗出的物料进行筛分，筛上物的颗粒表面洁净，没有油污，小油粒基本被磨掉。对筛下物进行浮选提纯，分离出油渣后，将细粒与粗粒混合，检测含油率，结果为 0.51%，符合含油污泥的处理标准。

3 结论

1)采用擦洗剥离技术可对含油污泥进行油泥分离处理，技术可行。

2)擦洗工艺参数条件对油泥分离效果有一定影响，通过调整工艺参数条件可获得较佳的处理效果。针对本文所用原料，在擦洗矿浆浓度 70%、物料与擦洗介质的比例 1∶1、搅拌线速度

5.30 m/s、搅拌时间 10 min、不加温条件下采用双层搅拌擦洗时，擦洗效果最佳。可从油泥中剥离出大部分油相，处理后固体的含油率为 0.51%，达到含油污泥处理标准的要求。试验结果可为工业化生产提供设计依据。

参考文献

[1] 蔡怀智. 非金属矿工业擦洗机的研制及其应用概况[J]. 矿产综合利用，1990(4)：47-51.
CAI H Z. Development and application of industrial scrubbing machine for non-metallic minerals [J]. Comprehensive Utilization of Minerals，1990 (4)：47-51.

[2] 黄富荣，杨书良. 云南滇池地区风化磷块岩擦洗-脱泥结果预测初步研究[J]. 化工地质，1992，14(1)：39-47.
HUANG F，YANG S L. Preliminary study on prediction of scrubbing desliming results of weathered phosphorite in Dianchi Lake area，Yunnan Province[J]. Chemical Geology，1992，14(1)：39-47.

[3] 孙宝岐，唐甲莹. 硅砂“无氟无酸”浮选工艺的研究与应用[J]. 玻璃，1993(5)：1-5.
SUN B Q，TANG J Y. Floatation process without fluorine an acid for silica sand in research and its application[J]. Glass，1993(5)：1-5.

[4] 付文章，张渊. 四川泸县天兴长石石英砂岩矿选矿试验研究. [J]. 矿产综合利用，1998(1)：5-8.
FU W Z，ZHANG Y. Experimental research on mineral processing of tianxing feldspar-quartz sandstone[J]. Comprehensive Utilization of Minerals，1998(1)：5-8.

[5] 利珀特 J. 土壤湿法清洗-第一家高效土壤擦洗厂[J]. 国外金属矿选矿，2007(8)：42-44.
LIPPERT J. Soil wet cleaning-the first efficient soil scrubbing plant[J]. Metallic Ore Dressing Abroad，2007(8)：42-44.

[6] 汪灵，李萍，殷德强，等. 沐川黄丹石英砂岩加工玻璃工业用石英砂试验研究[J]. 矿物岩石，2010，30(4)：1-6.
WANG L，LI P，YIN D Q，et al. Expermental study of processing quartz sand used for glass industry by quartzose sandstone of Huangdan，Muchuan county，Sichuan [J]. Mineraloy and Petrology，2010，30(4)：1-6.

[7] 张开永. 硅藻土擦洗—摇床分选试验研究[J]. 华北科技学院学报，2017，14(5)：55-58，63.
ZHANG K Y. Experimental study on diatomite scrubbing and shaking table separation[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology，2017，14(5)：55-58，63.

[8] 姚建超，孙晓旭，何建成，等. GCX 型无介质高效擦洗机的研制[J]. 有色金属(选矿部分)，2019(2)：84-86，90.
YAO J C，SUM X X，HE J C，et al. Development of GCX no medium scrubber machine[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)，2019 (2)：84-86，90.

[9] 邓爱民. 新型高效擦洗机的研究与开发[J]. 有色冶金设计与研究，1997，18(4)：47-51.
DENG A M. Research and development of new high efficiency scrubbing machine[J]. Design and Research of Nonferrous Metallurgy，1997，18(4)：47-51.

[10] 张和照. 固液悬浮搅拌槽的设计[J]. 化工设计，1993(4)：11-18.
ZHANG H Z. Design of solid-liquid suspension stirring tank [J]. Chemical Design，1993(4)：11-18.

（编辑：王爱平）