



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.2014.03.006

新型颗粒移动床连续过滤装置的特性研究

王 昶, 王静义, 贾青竹, 吴长春
(天津科技大学海洋科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: 改变传统固定床过滤装置的间歇操作,降低过程能耗,集清洗洗涤器、三相分离器及滤料“反粒径”分布三项技术,开发了一种新型颗粒移动床连续过滤装置,讨论进气速率、清洗水速率以及移动床滤层更新速率之间的相互关系,探讨最佳运行条件.结果表明:进气速率和清洗水速率要有合适的比例才能保证装置稳定运行,连续操作的最佳气水体积比为7~12,此时移动床滤层更新速率很快,滤料循环最小周期只需12 min;滤料由进水口到出水口粒径呈现由大到小的“反粒径”自然分布;随着处理负荷的增加,移动床比固定床有更好的出水水质;水力停留时间和进水浓度对出水效果和去除率具有很大的影响,浊度和化学需氧量的去除率最高可达88.89%和83.48%.

关键词: 移动床;连续过滤;三相分离器;清洗洗涤器;反粒度

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2014)03-0028-06

A New Type of Continuous Filtration Device with Particle-moving Bed and its Properties

WANG Chang, WANG Jingyi, JIA Qingzhu, WU Changchun

(College of Marine science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: In order to change the intermittent operation of the traditional fixed bed and reduce energy consumption, a new continuous filtration device with the particle moving bed was developed by integrating cleaning scrubbers, a three-phase separator and the filter “anti-particle size distribution” method. The relationship between the intake rate, the cleaning water rate and the updating rate of the moving bed filter layer were discussed, and the best operating conditions were explored. The results show that the intake rate and wash water rate should have an appropriate ratio in order to ensure the stable operation of the device. When the ratio of gas volume to water volume is 7 to 12, the continuous operation condition is best, and at this time, the moving bed filter layer updates fast. The filter cycle period only needs 12 min. The filter arranges particles in anti-particle size natural distribution, so the particle size decreases from the inlet port to the outlet port. With the increase of processing load, the moving bed has better effluent quality than the fixed bed. HRT and the influent concentration have a great effect on the effluent quality and removal rate. The removing rate of turbidity and COD can reach as high as 88.89% and 83.48% respectively.

Key words: moving bed; continuous filtration; three phase separation; gas scrubber; anti-particle size

过滤是化学工业中常见的液固分离过程,也广泛用于水处理过程,利用介质滤除水中杂质.由于传统固定床过滤需要停机反冲洗,实现连续操作还需要反冲洗再生的辅助设备,投资大、操作复杂、能耗高^[1],即使近年国内外研发了几种自动反冲洗过滤器^[2-5],仍存在过程不连续和占地面积大等问题^[4],需要在结

构设计上改进.由于气提和反冲洗是独立进行的,影响着气提过程的稳定性和连续性,而且还会因滤料和清洗液没有很好地湍动接触而得不到充分清洗,这在一定程度上增大了洗涤液的用量和处理负荷.为此,开发一种节能、操作便捷的连续过滤装置是非常重要的.

收稿日期: 2013-05-14; 修回日期: 2013-09-24

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAC11B05); 天津科技大学实验室开放基金项目(1205A212)

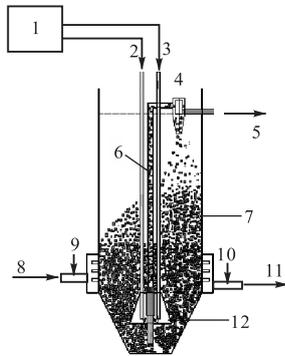
作者简介: 王 昶(1958—),男,江苏人,教授, wangc88@163.com.

本研究采用清洗洗涤器、三相分离器及滤料“反粒径”^[6]分布三项技术,改变传统的过滤模式,开发了一种新型颗粒移动床连续过滤装置,调查进气速率、清洗水速率以及移动床滤层更新速率之间的相互关系,探讨最佳运行条件,为实际应用提供有用的基础数据。

1 实验

1.1 实验装置

实验装置结构如图 1 所示,其中,长、宽、高分别为 200、150、520 mm,恒定液位高度为 470 mm,滤层高度 150 mm。



1. 清洗水和压缩空气调节控制器; 2. 压缩空气管; 3. 清洗水管; 4. 三相分离器; 5. 清洗水出口; 6. 提升管; 7. 滤料介质(活性炭); 8. 进水口; 9. 进水流量调节阀; 10. 出水流量调节阀; 11. 出水口; 12. 台柱体。

图 1 新型颗粒移动床连续过滤装置结构示意图

Fig. 1 Structure of the new type continuous filtration device with particle-moving bed

待处理液体由进水口进入过滤器,沿着水平方向流动,水中颗粒物和胶体污染物通过过滤介质的吸附和截留作用而被分离,过滤后的水由出水口排出。在过滤的同时,也进行着反冲洗过程,装置偏下方的中央,有一个台柱体,台柱的下方有一个直通管,一端进入装置底部的过滤介质,另一端进入台柱体中部,直接与一个管径较大的直通管相连,两管之间有一定的间隙,较大的直通管的另一端一直向上,与三相分离器相连。在台柱体中还有另外两只自上而下的直管,一个为压缩空气管用于通气体,另一个为清洗水管用于通洗涤清水,气体和洗涤清水在台柱体中经过中央两管之间的空隙,快速流入向上的直通管,在间隙的上部产生负压,使下方的直管内的过滤介质在下方的水压和上方的气提作用下,吸入到提升管中,在气速、液体流速以及过滤介质上升速度不同的条件下,吸附在过滤介质上的污染物就被洗涤下

来,一同进入上部的三相分离器。从上部三相分离器下来的过滤介质因位置偏离中心,沉降下来的滤料介质将会自然形成“反粒径”分布,即进口处粒径较大,出口处粒径较小,有利于降低过滤阻力。

1.2 实验流程

实验流程如图 2 所示。污水由离心泵从收集槽输送到高位槽中,高位槽中的污水以一定的流速流入过滤器,收集槽、高位槽和配液槽内部都安装搅拌器,确保水质均匀一致。过滤后的清水由出口排出,其中进水口和出水口安装了可调节流量计,通过控制面板可以调节流速、保持过滤器恒定液位。气提洗涤器中的含泥污水由三相分离器侧口排出,与过滤后的清水一同进入配液槽重复利用,整体装置基本实现次生废水的“零”排放。

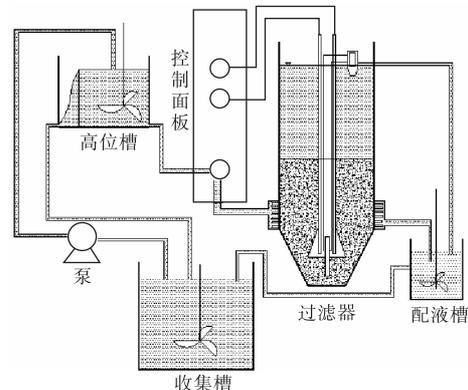


图 2 实验流程图

Fig. 2 Experimental process

1.3 运行条件和方法

过滤介质可以是石英砂、树脂、活性炭等^[7]。本实验采用活性炭作为滤料,颗粒粒径为 0.7~2.1 mm。设计最大进水流量为 160 L/h,操作温度为室温。

1.4 实验用水

配制高、中、低三种不同浓度泥浆水作为处理对象,水样指标见表 1(其中化学需氧量(COD)采用国家标准方法重铬酸钾法进行测定)。

表 1 泥浆水水质指标

Tab. 1 Mud water quality index

水样	浊度/NTU	COD/(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)
水样 1	10.9	12.0	46.7
水样 2	21.5	22.4	61.7
水样 3	57.9	27.6	153.0

2 结果与讨论

2.1 进气速率和清洗水速率对滤层更新速率和滤料循环周期的影响

滤层的更新速率和滤料循环周期是反映新型颗

粒移动床连续过滤装置性能的一个重要指标. 通过调节进气速率和清洗水速率来控制气提速率, 测定单位时间内活性炭的提升量来计算滤层更新速率和滤料循环周期.

$$v = V/t \tag{1}$$

式中: v 为单位时间内清洗滤料的体积; V 为取样器中滤料体积; t 为取样时间.

滤层更新速率可以由式(2)求得

$$C = v/S \tag{2}$$

式中: C 为滤层更新速率; S 为过滤器水平截面积.

滤料循环周期可以由式(3)求得

$$T = V_{\text{总}}/v \tag{3}$$

式中: T 为滤料循环周期; $V_{\text{总}}$ 为过滤器中滤料的总体积. 通过测定得到 $V_{\text{总}} = 5\ 600\ \text{mL}$.

采用自制的取样器在三相分离器下端进行取样, 并用秒表计时. 通过测定和计算, 得到不同清洗水速率和进气速率下的滤层更新速率和循环周期, 结果见表 2.

表 2 不同条件下的滤层更新速率和滤料循环周期

Tab. 2 The updating rate and cycle of the filter layer under different conditions

清洗水速率/(L·h ⁻¹)	进气速率/(L·h ⁻¹)	滤层更新速率/(mm·min ⁻¹)	滤料循环周期/min
2	25	5.83	32.0
4*	25	5.83	32.0
6	25	5.83	32.0
8	25	5.83	32.0
10	25	5.83	32.0
2	50	10.00	18.7
4*	50	10.00	18.7
6*	50	10.00	18.7
8	50	10.00	18.7
10	50	10.00	18.7
2	75	11.67	16.0
4	75	11.67	16.0
6*	75	11.67	16.0
8	75	11.67	16.0
10	75	11.67	16.0
2	100	13.33	14.0
4	100	13.33	14.0
6	100	13.33	14.0
8*	100	13.33	14.0
10	100	13.33	14.0
2	125	15.56	12.0
4	125	15.56	12.0
6	125	15.56	12.0
8	125	15.56	12.0
10*	125	15.56	12.0

注: * 表示在对应的清洗水速率和进气速率下提料稳定, 反冲洗效果良好.

由表 2 可以看出: 滤层更新速率和滤料循环周期主要是由进气速率决定的, 而清洗水速率决定了反冲洗效果和设备运行的稳定性(气、液、固三相能够有效分离). 如果进气量过大, 因清洗水很少, 气提不稳定且滤料不能得到有效的清洗; 反之, 若清洗水量太大, 不仅造成清洗水量增加, 而且还会导致三相流在提升管中速度过快, 影响进入三相分离器的分离效果. 由表 2 可知, 适宜的气水比操作范围为 7~12.

图 3 表示的是气水比在 7~12, 滤层更新速率和滤料循环周期的变化.

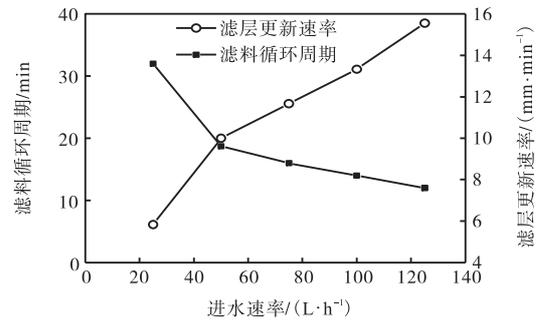


图 3 进气速率对滤层更新速率和滤料循环周期的影响
Fig. 3 Influence of intake rate on the cycle and updating rate of the filter layer

由图 3 可知: 进气速率对滤层更新速率和滤料循环周期具有显著影响. 进气速率越大, 滤层更新越快, 滤料循环周期越短, 反之亦然. 在设备稳定运行的条件下, 滤料循环周期是可以控制的, 本实验的最小值为 12 min.

2.2 处理负荷对固定床和移动床处理效果的影响

处理负荷会影响出水水质, 为了证明移动床比固定床有更高的处理负荷和更好的出水水质, 分别研究了处理负荷对固定床和移动床处理效果的影响.

2.2.1 处理负荷对固定床处理效果的影响

为了研究处理负荷对固定床处理效果的影响, 装置运行时不通入压缩空气和清洗水(此时为固定床), 以浊度为 57.9 NTU、COD 为 27.6 mg/L、SS 为 153.0 mg/L 的水样作为进水, 运行 10 h 内出水水质随运行时间的变化如图 4 所示.

过滤器对 SS 有非常好的处理效果, 出水 SS 没有检出. 由图 4 可以看出: 在初始 1.5 h 内, 固定床对污水有较好的处理效果, 此时出水 COD 和浊度分别为 2.7 mg/L 和 5.81 NTU; 但是随着时间的延长, 出水水质越来越差, COD 和浊度逐渐增大, 9 h 后出水 COD 和浊度分别为 14.4 mg/L 和 15.5 NTU, 此后出水水质趋于稳定.

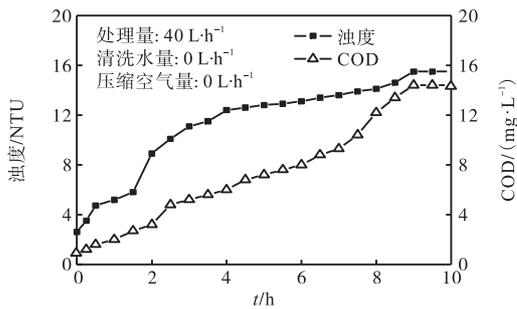


图4 固定床出水水质随运行时间的变化

Fig. 4 The fixed bed effluent quality with the running time

初始 1.5 h 内固定床对泥浆水有很好的处理效果,这是因为活性炭可以通过截留和吸附去除水中的大部分颗粒物和溶解性有机物。但是,随着运行时间的延长,出水水质变差,出水的 COD 和浊度逐渐升高。这是因为随着处理量的增加,越来越多的颗粒物和溶解性物质被吸附在活性炭中,由于不能及时得到反冲洗,活性炭的吸附达到饱和,此后很难对微型颗粒物和溶解性物质进行吸附。当连续运行时间为 9 h 时,即处理量达到 360 L 时,出水浊度和 COD 的值达到最大并趋于恒定。因为活性炭的截留作用仍然存在,所以仍然能去除一些较大的固体颗粒,从而降低出水 COD 和浊度。

2.2.2 处理负荷对移动床处理效果的影响

为了研究处理负荷对移动床处理效果的影响,装置运行同时通入压缩空气和清洗水(此时为移动床),以浊度为 57.9 NTU、COD 为 27.6 mg/L、SS 为 153.0 mg/L 的水样作为进水,运行 10 h 内出水水质随运行时间的变化如图 5 所示。

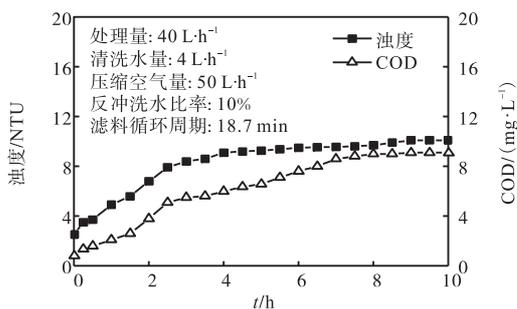


图5 移动床出水水质随运行时间的变化

Fig. 5 The moving bed effluent quality with the running time

由图 5 可以看出,移动床一开始也会出现和固定床出水相似的趋势,1.5 h 内出水效果很好,此时出水 COD 和浊度分别为 2.6 mg/L 和 5.59 NTU,此后出水水质会有所下降,但仍有较好的处理效果,7 h 后出水 COD 和浊度分别为 9.57 mg/L 和 8.6 NTU,并趋

于稳定。

初始 1.5 h 内移动床对泥浆水有很好的处理效果,这与固定床的原理是一样的。7 h 后出水水质达到稳定,COD 和浊度分别为 9.57 mg/L 和 8.6 NTU,去除率分别为 65.33%和 85.15%(比固定床的 47.83%和 73.23%要高)。这是因为移动床在过滤的同时进行了滤料反冲洗,活性炭吸附和截留的物质通过脱附作用被及时排除,通过这样一个传质过程活性炭就能得到及时再生,当处理 7 h 后,即处理量达到 280 L 时,移动床中活性炭的截留和吸附作用与再生作用达到一个动态平衡。

2.2.3 固定床和移动床中滤料清洁程度的比较

运行 10 h 后固定床和移动床中的滤料清洁程度如图 6 所示。从图 6 中可以看出:移动床层中的滤料因为在不断清洗再生,比固定床中的滤料洁净。



(a) 固定床



(b) 移动床

图6 固定床与移动床中的滤料

Fig. 6 Filter of the fixed bed and the moving bed

2.3 滤料“反粒径”分布的测定

滤料粒径从进水口到出水口方向上由大到小的分布,称为“反粒径”分布。“反粒径”过滤相当于逐级分步处理,能改善水质并充分发挥整个滤层的截污作用,提高滤料截污量,降低过滤阻力,减少能耗。

为研究本装置滤料分布情况,装置运行 1 h 后,从进水口方向到出水口水平位置 0、5、10、15、20 cm(本装置滤层宽 20 cm)处分别采取一定量的活性炭,用离线粒度分析仪测得各处活性炭的平均粒径,结果如图 7 所示。

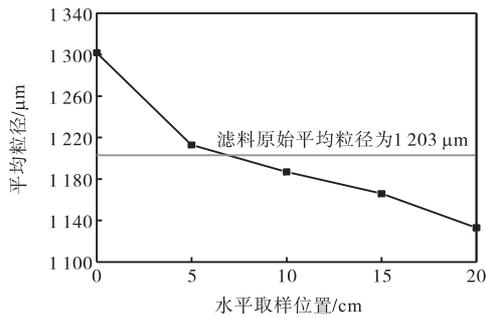


图7 滤床不同位置处颗粒粒径分布

Fig. 7 Particle size distribution of different positions of the filter bed

由图7可知:从进水口到出水口处滤料平均粒径逐渐变小,进水口处滤料平均粒径为1302 μm,出水口处滤料平均粒径为1133 μm,形成了明显的粒径梯度分布,“反粒径”分布效果很好。

2.4 水力停留时间(HRT)对不同浓度泥浆水去除效果的影响

HRT 决定了污水与滤料的接触时间,影响着出水水质。为测定 HRT 对出水水质的影响,本实验进水流量控制在 15 ~ 80 L/h,通过改变流量来调节 HRT, HRT 在 2.3 ~ 12.0 min。待流速固定 1 h 后测定出水的 SS 和 COD, 3 种水样测定方法相同,测定结果如图 8 和图 9 所示。

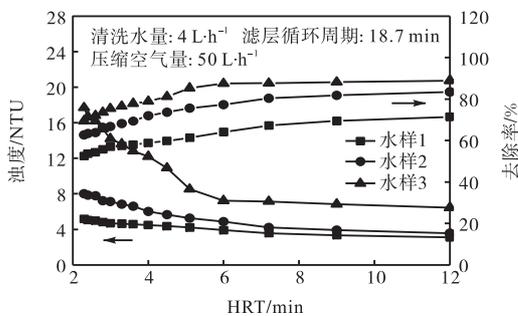


图8 HRT 对不同水样出水浊度的影响

Fig. 8 Effects of HRT on effluent turbidity of different samples

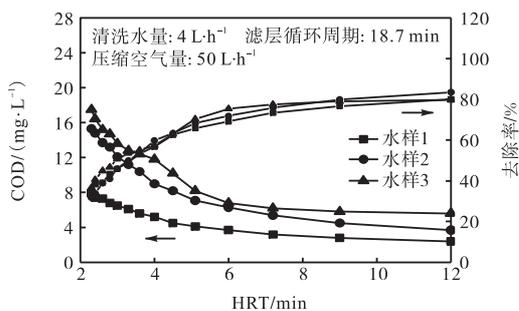


图9 HRT 对不同水样出水 COD 的影响

Fig. 9 Effects of HRT on effluent COD of different samples

由图 8 可以看出: HRT 与浊度处理有很重要的关系, HRT 越长, 处理效果越好, 去除率越高, 反之亦然。同时, 在 HRT 相同的条件下, 高浓度泥浆水的出水水质虽然比低浓度要差, 但是去除率相对较高, 这可能是因为浓度高时, 水样中粒径大的颗粒对浊度贡献较大, 而这些大粒径颗粒物质都能通过活性炭的截留作用去除, 这样就大大提高了浊度的去除率; 低浓度水样中小粒径物质和一些胶体物质对浊度贡献较大, 这些物质主要靠活性炭的吸附作用去除, 而活性炭吸附作用不能完全去除这些物质, 所以去除率相对较低。

由水样 1 的处理效果可知: 当 HRT 为 12 min 时, 出水浊度为 3.11 NTU, 所以对于低浓度污水只要保持 HRT 足够长, 出水浊度就能小于 5 NTU, 完全能达到 GB/T 18920—2002《城市污水再生利用·城市杂用水水质》标准中浊度小于 5 NTU 的要求。对于较高浓度泥浆水浊度的去除率可以达到 88.89%, 说明此设备也适用于钻井泥浆等高浓度泥浆水的处理。

由图 9 可以看出: HRT 对 COD 的影响和对浊度的影响基本一致, HRT 越长, 处理效果越好, 去除率越高, 反之亦然。当 HRT 为 12 min 时, 对水样 1、水样 2、水样 3 的 COD 去除率可以分别达到 80.00%、83.48% 和 79.71%。还可以看出: 水样变化对 COD 的去除率的影响相对较小, 这可能是因为水样中的 COD 主要是由溶解性的有机物造成的, 而这些物质不能通过活性炭截留作用进行去除, 只能通过活性炭吸附进行去除。

新型颗粒移动床连续过滤装置不仅可以实现连续操作, 而且还可以通过改变过滤介质实现不同的分离效果, 这一点也是本研究今后的重要内容之一。

3 结论

(1) 新型颗粒移动床连续过滤装置能连续运行, 无需停机反冲洗和备用设备, 减少投资和占地面积。

(2) 进气速率决定了滤层更新速率和滤料循环周期, 清洗水速率决定了反冲洗的效果和三相分离的稳定性, 新型颗粒移动床连续过滤装置气水比适宜的操作范围为 7 ~ 12。

(3) 固定床过滤一段时间后就容易被穿透而失去吸附能力, 新型的颗粒移动床过滤装置能够实现过滤和反冲洗同时进行, 保持长期稳定的处理效果, 具有很高的抗冲击性。

(4) 新型颗粒移动床连续过滤装置能够实现滤料的“反粒径”分布。

(5) 新型颗粒移动床连续过滤装置对 SS、COD 和浊度具有很好的去除效果, 通过调节 HRT 可以达到不同的出水水质。

参考文献:

- [1] 周凯宏, 王学超. 浅谈过滤技术的两个问题: 滤料与反冲洗[J]. 净水技术, 1995(4): 34-39.
- [2] 陈志强, 吕炳南, 温沁雪, 等. 内循环连续式砂滤器的微絮凝过滤试验[J]. 中国给水排水, 2002, 18(1): 45-49.
- [3] 陈楠, 覃当麟, 陈永利, 等. 逆流连续砂滤器: 中国, 201120085451.1 [P]. 2011-03-28.
- [4] 王燕燕, 戴凌汉. 自动反冲洗过滤器的改进与研究[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2010, 37(3): 119-122.
- [5] 郭二民, 李海生, 李明, 等. 传统过滤器改造连续动态过滤器的研究[J]. 环境科学研究, 2005, 18(5): 56-58.
- [6] 李敏贤. 新型连续式砂滤器的设计与研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
- [7] Rolland L, Molle P, Liénard A, et al. Influence of the physical and mechanical characteristics of sands on the hydraulic and biological behaviors of sand filters[J]. Desalination, 2009, 248(1/2/3): 998-1007.
- [17] Singh M, Chaturvedi R. Statistical optimization of media for enhanced azadirachtin production from redifferentiated zygotic embryo cultures of neem (*Azadirachta indica* A. Juss.) [J]. In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant, 2012, 48(1): 92-98.
- [18] Murashige T, Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue culture[J]. Physiologia Plantarum, 1962, 15(3): 473-497.
- [19] Prakash G, Srivastava A K. Statistical media optimization for cell growth and azadirachtin production in *Azadirachta indica* (A. Juss) suspension cultures[J]. Process Biochemistry, 2005, 40(12): 3795-3800.
- [20] Lewis A C, Van Emden H F. Assays for insect feeding[M]. New York: Insect-Plant Interactions, 1986: 95-119.

责任编辑: 周建军

责任编辑: 郎婧

(上接第 27 页)