

蒸发冷却系统循环水旋流除沙的实验研究

章立新, 刘跃, 高明, 刘婧楠, 李鑫
(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 本文开展了以低水耗为目标的水力旋流除沙研究。其技术方案是在底部集水盘的排污口附近建立一个带水力旋流器的除沙旁路,在直径为 $\Phi 50\text{mm}$ 的水力旋流器上采用非常规的 $1\sim 4\text{mm}$ 的小口径底流管排沙,溢流仍然回到底部集水盘,并根据底部集水盘的积沙情况间歇运行。实验研究了在其它结构参数和操作参数都在常规范围内且保持不变的条件下,不同底流口径与底流分流比及底流产率的关系。结果表明:当底流口径在 2mm 附近时,同时达到最小的底流分流比和最大的底流产率,说明存在一个最佳的节水除沙底流口径;在该口径下,对实验台容积为 68.7L 的进料池循环运行 30min ,除沙率可达 90% ,耗水量仅占进料池总水量的 1.75% ,达到了节水除沙的目的。

关键词: 水力旋流器; 蒸发冷却设备; 循环水系统; 节水; 除沙; 底流分流比; 底流产率

中图分类号: TV143.4 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)05-0151-05

Experiment on removal of sand by circulating water flow in evaporative cooling system

ZHANG Lixin, LIU Yue, GAO Ming, LIU Jingnan, LI Xin

(College of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: This paper aims to improve efficiency of removal of sand with less water consumption. The scheme is to set a bypass involve a hydraulic cyclone on bottom of the water tank for sand removal. The hydraulic cyclone of $\Phi 50\text{mm}$ with unconventional small range of underflow diameter ($1\sim 4\text{mm}$) were selected to investigate the sand removal performance. The overflow flows back to the water tank and its running is under an intermittent control which depends on the condition of sands accumulating. The experiment focus on the relationship between underflow diameter and underflow productivity as well as split ratio, keeping other operating and geometry parameters to be constant in their conventional range. The result shows that the underflow productivity and the split ratio reach their maximum and minimum respectively when the underflow diameter is nearby 2mm . It means that there's an optimum underflow diameter for sand removal and water saving. After applying the hydraulic cyclone with 2mm underflow diameter to an experiment system with the inlet pool's volume of 68.7L for 30minutes , it can achieve the sand removal rate of 90% and consume merely 1.75% of the total water of inlet pool, which reach the target of saving water and removing sand.

Key words: hydraulic cyclone; evaporative cooling equipment; circulating water system; water saving; removal of sand; flow diversion ratio; underflow productivity

1 研究背景

蒸发冷却设备是向空气排放废热的高效热交换装置,包括开式冷却塔、闭式冷却塔、蒸发冷却器和蒸发冷凝器,这些设备的共同特征是循环水与空气

直接接触,通过水的蒸发、温差传热、辐射等方式与空气进行热交换,因此存在循环水质的控制问题。

目前中国不少地区都面临着沙尘暴的危害,尤其北方和西北地区最为严重。而此类气象环境下空气中的颗粒物直径分布广泛,主要成份为直径大于

收稿日期:2015-04-12; 修回日期:2015-07-22

基金项目:上海市科委科研计划项目(13DZ2260900)

作者简介:章立新(1964-),男,浙江绍兴人,工学硕士,副教授,主要研究方向为冷却技术及强化传热传质、动力工程测控技术、节能节水技术等。

16 μm 的较粗颗粒,而当直径大于 16 μm 时,比较容易自然沉降^[1]。此种天气频发并且降尘量大,2000 年以后在北京地区就达到年均 10 次以上^[2],经常一次沙尘暴的降尘量能达到 100 g/m^2 以上,并且平均粒径大于 74 μm 的颗粒占 77% 以上^[3]。

在沙尘暴天气下,沙粒会随气流进入蒸发冷却设备内,导致循环水含沙率高,不仅加快泵的磨损,而且很容易在管路中特别是在底部集水盘积聚沙粒,严重的会堵塞底部的出水口和上部喷头,对使用开式冷却塔的系统甚至会堵塞工艺系统的主换热器。此时,一般的排污不能解决问题,需要停运冷却系统清淤,不仅耗费大量的人工,而且耗水量也很大。而恰恰在沙尘暴频发的北方和西北地区,缺水比较严重,因此人们希望能在除沙的同时尽量减少水耗。

选择使用水力旋流器来除沙并优化其结构以达到节水的目的。具体技术方案是在底部集水盘的排污口附近建立一个带水力旋流器的除沙旁路,在公称直径为 $\Phi 50\text{ mm}$ 的水力旋流器上采用非常规的 1~4 mm 的小口径底流管排沙,溢流仍然回到底部集水盘,并根据底部集水盘的积沙情况间歇运行。

水力旋流器的工作原理如下:多相流介质在一定压力下以较高的切向速度进入水力旋流器内,通过离心力和重力的作用分离出粗重的固相颗粒,并使其沿器壁沉降到旋流器底部,在底部形成浓度较高的两相流,最后从底流口排出;而细小的固相颗粒与液相水一起通过内旋流从顶部溢流口排出。

以往研究者在研究各种操作参数以及几何参数的改变对旋流器性能的影响时,实验参数集中在常用的较小的范围内。如王元文等^[4]对 $\Phi 170\text{ mm}$ 的旋流器研究时,底流口直径集中在 12~20 mm 之间,刘培坤等^[5]对 $\Phi 50\text{ mm}$ 的旋流器的底流口直径研究则限定在 4~6 mm 之间,Oliveira 等^[6]对 $\Phi 50\text{ mm}$ 的旋流器的底流口直径的研究范围在 3~5 mm 之间。本文也使用直径为 $\Phi 50\text{ mm}$ 的水力旋流器,在入口流量为 3 m^3/h 的条件下,做了在更小的底流口直径范围内(1~4 mm)的除沙实验,得出了底流口直径与底流产率和底流分流比的变化规律,并结合实际除沙要求,测试了经优选的底流口径下定时除沙的总分离效率。

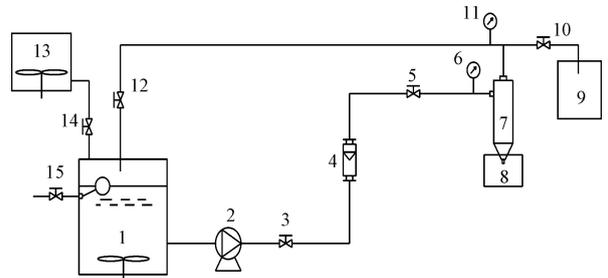
2 实验系统设计及实验方法

北方地区各次降尘的粒径范围跨度较大,而降尘的不同颗粒粒径浓度与黄河的污泥类似,污泥的

d_{50} 直径为 17 μm ^[5],针对此类粒径的固液两相流,通常选用内径为 50 mm、分级粒度为 5~12 μm 的水力旋流器来除去固体沙粒。本实验系统所选该型号的旋流器入口几何尺寸为 14.5 × 4.5 mm,溢流口直径 14 mm,分级粒径比污泥的 d_{50} 分离粒径还要小。系统的入口质量浓度为 3% (约为普通冷却塔经历 3~5 次大规模降尘后的浓度),通过更改底流口尺寸和操作参数可以满足将大部分易沉降的粗粒子清除的功能。

本实验考虑到系统扬程要求较高、运行工质流量较低、清沙系统中的固体沙粒体积浓度不高的特点,选用了 60 m 扬程、5 t/h 流量的螺杆泵。为了节省电能,减小启动电流,方便调节入口的压力,以及延长螺杆泵的使用寿命,在系统中加置了 380V 交流变频器。为获得较稳定的入口 0.2 MPa 的表压,经多次实验选定电机运行频率为 35 Hz。通过阀门调节入口体积流量为 3 m^3/h 。本实验定制的底流管内径尺寸分别为 4、3、2.5、2、1.5 和 1 mm。选用的固相物为均匀性好、颗粒密度为 3.2 g/cm^3 、纯度在 95% 以上的金刚沙 (SiC),粒径尺寸分别为 1 000 目 (15.0 μm)、800 目 (18.8 μm)、600 目 (25.0 μm)、400 目 (37.5 μm) 和 320 目 (46.9 μm)。

实验系统如图 1 所示,实验时将固液两相流体按指定浓度配置好后注入料液桶 13 和进料池 1,并持续搅拌使其固液两相分布均匀。利用高扬程的泵 2 将流体吸出,并使其拥有较高的出口压力,流体通过转子流量计 4 后以较高的速度切向进入水力旋流器 7 中,在水力旋流器里通过离心力和重力的作用使得粗沙粒能够与水的分离。从外旋流分离出来的高浓度重相沙水混合物从底流口排出进入底流接水盆 8 中,轻相的水沙混合物则由溢流口排出。



1 - 进料池, 2 - 螺杆泵, 3、5、10、12、14 - 调节阀, 4 - 转子流量计, 6、11 - 压力表, 7 - 水力旋流器, 8 - 底流接水盆, 9 - 溢流接水盆, 13 - 料液桶, 15 - 补水阀

图 1 水力旋流除沙的实验系统示意图

在进行不同底流口径与底流产率及底流分流比

的关系研究时,开启阀10,同时关闭阀12和阀15,调节阀14使实验过程中进料池1液位不变以保持稳定的旋流器进口压力,同时保持进料浓度不变,用底流接水盆8和溢流接水盆9分别接取底流和溢流。底流分流比的测量采用的是体积法,底流产物量的测量采用的是烘干称重法。

在模拟实际除沙工况所进行的定时总分离效率实验中,开启阀12和补水阀15,同时关闭阀10和阀14,靠补水的浮球阀使实验过程中进料池1的液位不变以保持稳定的旋流器进口压力,用底流接水盆8接取底流,溢流则回到进料池1,随着旋流除沙的进行,进料的浓度不断下降,最后用烘干称重法测量底流产物量。

3 实验结果分析

考察水力旋流器分离效果的指标有分离效率^[7]、分级效率^[7]、分流比等。通常的定义,分离效率是指底流中固相质量与入口水流中固相质量之比;分级效率是指底流中某一粒度的固相质量与入口水流中该粒度固相质量之比;分流比为底流的体积流量与溢流的体积流量之比。

由于本文研究背景的固相来源不是连续的,量也不是很大,所以对即时除沙的能力要求不高,但希望尽量减小水耗,所以,本文关注底流分流比、底流产率及连续运行一段时间后的总分离效率。

其实,底流分流比和底流产率是与分级效率相关的两个指标。根据横流沉降理论^[7],针对某一粒径的颗粒,可计算出理论分级效率 $E_{a1}(d)$,其与旋流器长度、旋流器筒体半径、底流口后台阶高度、入口半径、溢流口半径、流体相密度、颗粒相密度、流体相黏度、入口速度、沉降系数有关;同时分级效率还与顶盖短路流和底流阻塞效应有关,对分级效率的贡献项分别为 $E_{a2}(d)$ 和 $E_{a3}(d)$,实际分级效率 $E_a(d)$ 为上述几项之和。对本文实验来说,改变底流口直径,影响其分离结果的就是底流阻塞效应。林高等人使用的底流阻塞效应^[7]对分级效率影响的计算公式为:

$$E_{a3}(d) = c_1 R_f^{-c_2} (d/d_m)^2 \ln\left(\frac{d/d_m}{c_v}\right) \quad (1)$$

式中: c_1 、 c_2 为常数; d 为沙粒直径; d_m 为分离极限; c_v 为体积浓度; R_f 为底流液相分配率。本实验中 $c_1 = 2$, $c_2 = 1$ 。而选定了粒径的 d 、 d_m 、 c_v 均为定值,如果底流液相分配率 R_f 越小,也即底流产率 $(1 - R_f)$ 越大,则 $E_{a3}(d)$ 越大,实际分级效率 $E_a(d)$ 也越大。

3.1 底流分流比

底流分流比是指底流的体积流量与入口水流的体积流量之比。水力旋流器的分流比很大程度上受到底流直径的影响^[8],传统观点认为分流比随着底流口直径的减小而一直减小^[9],而本实验却得到了不同的结果。

图2为不同粒径下底流口直径与底流分流比的关系图。

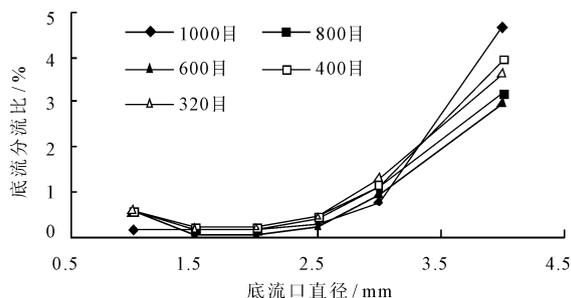


图2 不同粒径下底流口直径与底流分流比关系图

由图2可知,流体中固相的粒径大小对底流分流比有一定影响,但影响不大。在实验的粒径范围内,底流分流比随着底流口直径的变大都是呈先减小后增大的趋势,而且都是在底流口直径为2 mm时底流分流比达到最小值。而在1000目的实验中,底流直径为1~2 mm的区段,其底流分流比虽然是减小的,但其变化的幅度相当小,这是因为1000目的粒径细微,固液两相间的跟随性比较好,两相流粘度也比较小,底流口不易形成固相颗粒聚集,所以底流分流比受底流口直径变化的影响并不大。所以,2 mm的底流口直径相对符合节水的要求。

3.2 底流产率

底流产率是指底流中固相的质量与底流总质量之比。图3反映了本实验中底流口直径对底流产率的影响。

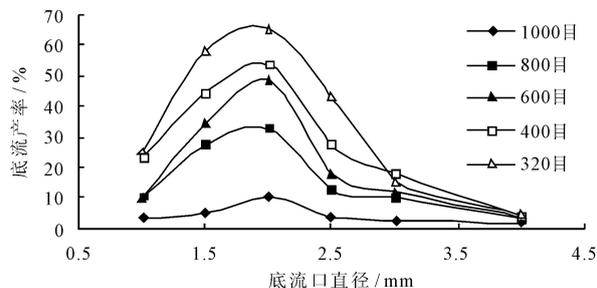


图3 不同粒径下底流口直径与底流产率的关系

由图3中曲线可知,流体中固相的粒径大小对底流产率的影响较大。但在实验的粒径范围内,无论颗粒粒径的大小如何,底流口直径从1 mm增大到2 mm

的过程中,底流产率均呈现稳定增大的趋势,而在底流直径从2 mm增大到4 mm的过程中则呈现出逐步减小的趋势,且从2 mm增大到2.5 mm的过程中,变化最为剧烈。由此可知,存在一个最大的底流产率对应的底流口直径,也正好在2 mm附近。

产生上述现象的原因是,由于离心力的作用,在旋流器的中心部位存在空气柱,其直径约为底流口直径的80%。空气柱的直径以近似线性规律随着底流口直径的增大而增大^[10]。而底流的出流面积为底流口截面积减去空气柱截面积,也就是说底流口出流面积与底流口直径的二次方成正比,若底流口直径为 D_u ,则底流的出流面积 $S_{出}$ 为:

$$S_{出} = S_{底} - S_{空} \approx 0.09\pi D_u^2 \quad (2)$$

因此随着底流口直径的减小,底流的出流面积迅速减小,当底流口直径在4、3、2.5、2 mm的变化过程中,出流截面迅速缩小,但是空气柱仍旧是连续的且较稳定,也即式(1)仍基本是适用的,所以底流分流比下降,而沙粒相对于水来说密度更大,更易聚集到底流出流截面上,致底流产率在不断增大。而当底流口直径从2、1.5、1 mm继续变小时,实际观测到的空气柱是间歇不连贯的,底流口的出流状况也是不稳定的。这是由于底流出流面积的迅速减小导致底流出流的阻力急剧增大,空气柱附近的水压力也随之增大,底流口的空气柱进一步被周围的水挤压,空气柱直径不再保持文献[10]所说的为底流口直径的80%,此时,中心空气柱会间隙性消失,原来空气柱所占的空间会有大量水排出,而其压力下降并不足以克服原有的底流空气负压时又会有空气被吸入底流口,重新形成空气柱,如此循环往复。所以底流口直径在2~1 mm区段时,底流分流比增大,产物中液相的比例上升,致底流产率下降。

3.3 总分离效率

针对具体的沙尘成分的总分离效率的实验如下:

对应于普通的100 m³/h的冷却塔(底盘容积为2 m×3.5 m×0.3 m),设较大规模沙尘暴每10 d一次^[2],假设该地区经历3次大规模降尘,则一个月内颗粒的质量浓度约为3~5 g/L。在本实验的操作参数与选定的底流口直径为2 mm的结构参数下,近似模拟沙尘暴降尘的沙粒,分别取1200、1000、800、600、400、320目(其中1200目对应粒径为12.5 μm)的金刚砂200 g,放入68.7 L的水中(即进料池固定水位的容积为68.7 L,初始含固量为2.91 g/L),进行除沙实验。实验时,溢流回到进料池中,并自动补充清水保持进料池的液位稳定,连续运行

30分钟,得到各级沙粒在底流的累积除沙率的结果如图4所示:

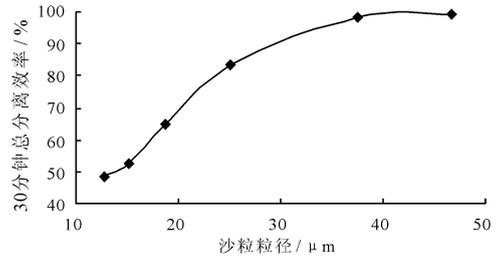


图4 固定时段内沙粒粒径与总分离效率的关系

由图4可知,针对文献[3]所述的粒径在74 μm以上的绝大多数的降尘可近乎完全被清除,即便是含量很低(占总降尘量不足10%)且比较细的粒径为12.5~15 μm的沙粒也有50%左右被清除。

再按沙尘暴的降尘粒径分布特征近似混合的沙粒(即选定1000、800、600、400、320目按各颗粒质量的比例为5%:10%:25%:30%:30%配制),连续运行30分钟后的除沙量占总沙量的90%以上,未能除尽的细沙粒相对于系统的影响比较小,所以能够达到除沙的目的,所以将除沙率90%作为一次除沙的目标。

再者,考察在该条件下的节水性能。试验中除沙运行30 min,总耗水量约为1.2 L,仅占进料池总水量(68.7 L)的1.75%;即运行时的耗水流量为2.4 L/h,仅占旋流器入口流量(3 m³/h)的0.08%;再按一个循环水量为100 m³/h的冷却塔水池的蓄水量(约为2.1 m³)为试验中进料池总水量的30.6倍计,耗水流量约为73.4 L/h,占冷却塔循环水量的0.073%,除沙一次的总耗水量为36.7 L。由于无需常年连续运行,根据积尘情况,若每周运行一次,则全年总耗水量约为1.9 m³。这相对于相应塔型的开式冷却塔一年的飘水损失131 m³(按国标0.015%的飘水率计)已经是很低的了,就传统的排污而言,相当于1次/年的换水率,故其节水效果十分明显。

4 结 语

针对蒸发冷却设备的循环水系统在沙尘天气的沙粒特征和除沙需要及节水要求,本文在直径为Φ50 mm的水力旋流器上采用非常规的1~4 mm的小口径底流管进行除沙实验。

实验结论为:

(1) 流体中固相的粒径大小对底流分流比和底流产率都有影响,对后者的影响更大;

(2)在实验条件下,对不同的固相粒径,随着底流口直径的变大,底流分流比都呈先减小后增大的趋势,底流产率都呈先增大后减小的趋势,即存在一个既能节水又能有效除沙的最佳底流口直径,其值在 2 mm 附近;

(3)在所选最佳底流口直径下,循环 30 min,能将 90% 以上的符合沙尘样本特征的混合沙粒清除,且所耗水量仅占池中总水量的 1.75%,折算到一个 100 m³/h 的冷却塔,耗水流量仅占冷却塔循环水流量的 0.073%。

本文的实验结果对蒸发冷却设备的节水除沙具有指导意义。但是底流阻塞效应对于底流分流比和底流产率影响的成因很复杂,因此底流口直径和底流分流比及底流产率之间的关联仍需要做更多的理论研究。

参考文献:

[1] 张仁健,王明星,浦一芬,等. 2000 年春季北京特大沙尘暴物理化学特性的分析[J]. 气候与环境研究, 2000,5(3):259-266.
[2] 王涛,陈广庭,钱正安,等. 中国北方沙尘暴现状及对

策[J]. 中国科学院院刊, 2001(5):343-348.
[3] 万的军,穆桂金,雷加强. 基于绿洲尺度沙尘暴天气降尘的变化特征研究[J]. 水土保持学报, 2009,23(1):26-30.
[4] 王元文,张少明,方莹. 水力旋流器分离性能实验研究[J]. IM&P 化工矿物与加工, 2005(11):25-28.
[5] 刘培坤,王书礼,王静. 水力旋流器用于污泥脱水的实验研究[J]. 过滤与分离, 2001,11(2):14-15+21.
[6] Oliveira D C, Almeida C A K, Vieira L G M, et al. Influence of Geometric Dimensions on the performance of a filtering hydrocyclone: An experimental and CFD study [J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2009,26(3):575-582.
[7] 林高平,邹宽,章立新,等. 水力旋流器内固液两相分离理论: II 数学模型[C]//. 中国工程热物理学会 2002 多相流学术会议论文集,北京:中国工程热物理学会, 2002,536-542.
[8] 辛舟,龚俊,黄建龙. 旋流分离技术在黄河泥沙分离中的应用[J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30(4):67-69.
[9] 许妍霞. 水力旋流分离过程数值模拟与分析[D]. 上海:华东理工大学, 2012:81.
[10] 梁政,王进全,任连城,等. 固液分离水力旋流器流场理论研究[M]. 石油工业出版社, 2011:75-99.

(上接第 150 页)

- [5] 王立辉. 突扩跌坎型底流消能工水力特性研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2008.
[6] 孙双科,柳海涛,夏庆福等. 跌坎型底流消力池的水力特性与优化研究[J]. 水利学报, 2005,36(10):1188-1193.
[7] 叶菲,缅甸 A II, 等. 萨彦舒申斯克水电站消力池运行经验[J]. 郑文才,译. 水利水电快报, 1995(20):10-15.
[8] 孙永娟,孙双科. 高水头大单宽流量底流消能技术研究成果综述[J]. 水力发电, 2005,31(8):70-72.
[9] 李双宝,马俊,邓良军. 金安桥水电站表孔泄流及底流消能研究[J]. 水力发电, 2011,37(1):38-41.
[10] 彭文明,胡小红,陈强等. 官地水电站 RCC 大坝泄洪底流消能技术研究与应用[J]. 水力发电, 2013,39(9):23-25+96.
[11] 李树宁,杨敏,董天松等. 跌坎消力池水动力荷载特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2014,33(3):138-142.
[12] 秦翠翠. 跌坎消力池水力特性研究[D]. 天津:天津大学, 2011.
[13] 练继建,杨敏. 高坝泄流工程[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2008.
[14] 辜晋德,练继建. 水跃区底部压力脉动的沿程变化规律研究[J]. 水利学报, 2008,38(2):196-200.