

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.05.016

初沉池一体化密闭除臭通风优化方案

姚尧¹, 杨乐¹, 盛国荣², 王勇¹, 魏敏华³, 缪涛³
(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400030; 2. 重庆大学 建筑规划设计研究总院有限公司, 重庆 400045; 3. 重庆市三峡水务有限责任公司, 重庆 404000)

摘要: 针对现有初沉池密闭除臭通风优化方案的不足,提出了一种一体化密闭通风方案。基于初沉池实际几何特征和优化方案,利用相似模型建立了相似模型实验台,并进行了密闭隔绝性能和臭气抽吸去除率等关键参数的测试分析。结果表明,初沉池内实现最低2.8 Pa的负压即可保证密闭抽吸效果,搅拌和非搅拌工况对密闭效果的影响不显著。抽吸风量影响臭气去除率,两者呈反比关系,低抽吸风量即可满足对臭气去除率的要求,从而降低系统臭气处理成本与运行能耗。

关键词: 初沉池; 除臭; 通风; 相似模型

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)05-0096-06

Optimization Scheme of Integrated Closed Deodorization and Ventilation in Primary Sedimentation Tank

YAO Yao¹, YANG Le¹, SHENG Guo-rong², WANG Yong¹, WEI Min-hua³, MIAO Tao³

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. General Research Institute of Architectural & Planning Design Co. Ltd., Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. Chongqing Three Gorges Water Co. Ltd., Chongqing 404000, China)

Abstract: An integrated closed ventilation scheme was proposed to solve the shortcomings of the existing closed deodorization and ventilation optimization scheme in primary sedimentation tank. Based on the actual geometric characteristics and optimization scheme of a primary sedimentation tank, a similar model experimental platform was established by using similar model method, and the key parameters such as sealing isolation performance and odor removal efficiency were tested and analyzed. The minimum negative pressure of 2.8 Pa in the primary sedimentation tank could ensure the sealing suction performance, and the influence of stirring and non-stirring on the sealing was not significant. Air volume affected the odor removal efficiency, and there was an inverse relationship between the two. A low air volume could meet the requirement of odor removal efficiency, thus reducing the operation cost and energy consumption.

Key words: primary sedimentation tank; odor removal; ventilation; similar model

随着城市化进程的发展,城市污水处理量持续增大。污水处理过程中伴随着大量臭气的散发^[1]。

通信作者: 王勇 E-mail: cqwangyong@cqu.edu.cn

初沉池是污水厂主要恶臭源之一^[2],产生的臭气组分中包括 NH_3 、 H_2S 等有毒有害气体^[3]。相关研究表明,其产生的 NH_3 是 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要前体物^[4], H_2S 对人体和设备均有强烈的危害。此外,根据污水厂各构筑物臭气抽吸量的实地调研结果,初沉池臭气抽吸量相对较高,从而增加了系统后端臭气工艺的处理风量,投资成本和运行能耗明显增加。

针对初沉池臭气的密闭和收集,目前普遍对初沉池进行加盖密封以防止臭气逸散,根据臭气散发液面的面积、密闭空间体积和换气次数确定臭气的抽吸风量。李国炜等^[5]分析了各类工艺环节的密闭方法和处理方式,提出在跨度大于6 m时污水厂构筑物适宜采用普通碳钢结构支撑氟碳纤维反吊膜的密闭形式。

《城镇污水处理厂臭气处理技术规程》(CJJ/T 243—2016)规定了密闭加盖装置应不影响设备的操作运行,初沉池密闭装置多采用龙骨支撑反吊膜密闭包裹初沉池,为避免影响刮泥桥架工作,密封装置距离初沉池液面较高,初沉池上方密闭空间巨大,密闭工程造价高。CJJ/T 243—2016规定初沉池臭气抽吸风量可按单位水面面积臭气风量指标 $3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 计算,并可增加1~2次/h空间换气量,针对巨大的密闭空间,1次空间换气量差距对总臭气抽吸量影响很大。初沉池的臭气排风量直接决定了后端臭气处理阶段的造价。同时,由于污水厂臭气抽吸管设计施工等原因,导致在初沉池空间内无法有效形成负压,造成臭气逸散。针对污水处理厂臭气收集环节存在的问题,沈为等^[6]提出了以刮泥机桥架为界两侧对称布置密闭空间的臭气密封方式,减少了臭气密闭空间的体积和臭气换气量;林培真等^[7]提出,采用随动式反吊膜加罩密封,这种方法比传统围挡加固定式反吊膜加罩更贴近池面,收集范围更小;周立等^[8]提出空间除臭的臭气收集方式,在空间顶部、底部设风口分别抽吸1/3和2/3风量,并采用负压加盖方式防止臭气逸散。可见,初沉池臭气的密闭方式和抽吸方式对臭气的收集处理效率有显著影响。笔者提出了一种新型的加盖密封臭气抽吸系统。以重庆地区某污水处理厂初沉池的实测数据为基础,建立了密闭抽吸相似理论模型和模型实验台,通过对测试数据的分析,获得了最佳臭气抽吸风量、臭气密封负压值对最佳的臭气密封去除效果的影响。

1 新型除臭通风系统的提出

总结现有初沉池加盖密封除臭装置的特点,目前初沉池普遍采用钢结构骨架支撑反吊膜加盖密封,为了包裹桥式刮泥机和保证桥式刮泥机的顺利运行,往往设置高大密封空间,反吊膜垂帘设置为出入口可供检修人员通行,垂帘处设置的密封装置平时常关,加盖装置利用缝隙进行自然补风;初沉池臭气抽吸系统的抽吸风量根据臭气抽吸空间结合一定换气次数进行设计,基于高大的密闭空间,换气次数的基数增加甚至会导致换气风量数量级提高,因此设计风量通常很大,远大于实际臭气散发量;臭气抽吸管网设计与密闭加盖装置的一体化深化设计往往脱节,风口常设置于密封装置中上部,抽吸臭气和环境空气均匀混合的气体,并非针对液面臭气浓度高的区域集中抽吸,空气抽吸量巨大导致实际臭气抽吸率低,臭气去除效果不佳。分析现有初沉池加盖密封除臭装置的缺点,提出一种新的通风系统方案,见图1。

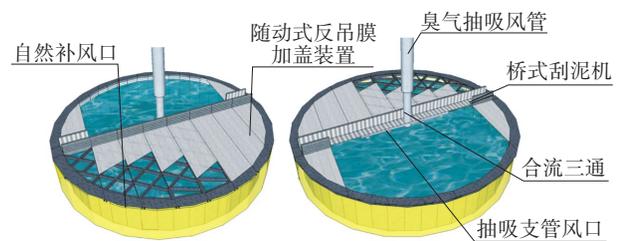


图1 改进后初沉池工程方案示意

Fig.1 Schematic diagram of improved primary sedimentation tank project

该方案由密封装置和抽吸装置两部分组成。密封装置采用贴近初沉池水面的随动式钢架支撑反吊膜进行密封,随动式反吊膜固定在桥式刮泥机上随其转动,调整自然补风口面积保证臭气密闭。抽吸装置采用沿初沉池中轴线向下穿过桥式刮泥机平台的臭气抽吸风管作为主管,通过合流三通连接臭气抽吸支管并沿桥式刮泥机两臂延伸,支管上等距离开洞设置臭气抽吸风口,风口贴近液面吸气,提升有害气体吸气量并减少空气抽吸量,从而降低了厂房后端的臭气处理风量。针对同一管网,抽吸风量降低会导致管路阻力下降,有助于提升风机能效,实现节省投资与节约能耗的双重价值。

为验证该方案的实际效果,以相似模型方法为

基础,建立实验台,针对初沉池的实际运行状况进行该新型除臭通风系统的测试与分析。

2 相似模型方法

相似模型方法可以降低实际现场测试的工作量,能够在实验室中对工程对象进行研究。该方法是大型工程研究的普遍方法^[9-10]。

根据相似条件理论,模型与原型相似需满足几何相似、运动相似、动力相似,其中运动相似由几何相似、动力相似来保证。几何相似要求模型与原型保持一定的尺寸比例关系,动力相似则要求模型和原型中气体流动状态遵循一定的准则数关系。在本研究中,原型初沉池内空气流速远低于当地音速,模型和原型属于同类物理现象,即不可压缩黏性流体在空间内的流动。假设原型处于没有外界传递热量的状态,模型内空气流动按照等温流体计算,对于不可压缩气体而言,重力对空间内流体流动状态影响很小,因此在准则数选择上不考虑弗劳德准则数 Fr ,简化为只包括压差、黏性力和惯性力三项。该新型初沉池模型主要研究在机械排风和自然补风的条件下,流体通过补风口进入初沉池模型的过程中,初沉池内部防止臭气逸散的最小压强,以及在臭气密闭条件下不同臭气抽吸风量对臭气去除率的影响。在空气通过补风口进入模型的过程中,边壁带来的黏性力影响较小,流体通过压力场作用进入实验体内部,因此本研究采用欧拉数 Eu 相似准则作为动力相似的依据。

欧拉数体现压力场对惯性力流动的影响,见式(1)。

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho u^2} \quad (1)$$

原型流动中,压差动力场设为 Δp ,流动速度设为 u ,模型流动中压差设为 $\Delta p'$,流动速度设为 u' 。

$$\lambda_u = \frac{u}{u'} \quad (2)$$

$$\lambda_p = \frac{p}{p'} \quad (3)$$

欧拉数相似条件下,必有 $\lambda_p = \lambda_u^2$,因此应控制原型、模型内部负压值和补入空气的流动速度成平方倍变化。本研究的目的是寻找低风量抽吸条件下的补风口风速,实验条件和原型条件下补风口风速设置较小,达不到阻力平方区对流体流速的要求,因此欧拉数不是定值,可以作为准则数保证模

型和原型动力相似。优化后的原型风机抽吸风量设计值为 $2\,000\text{ m}^3/\text{h}$,设计工作负压为 80 Pa ,设置风口风速为 5 m/s ,由式(1)计算无量纲欧拉数 $Eu=3.20$ 。模型补风口设计风速为 $3\sim 4\text{ m/s}$,最大压强为 40 Pa ,其工作状态的实测风速为 3 m/s ,实际负压为 30 Pa ,计算得到 $Eu=3.33$ 。计算结果近似符合欧拉相似准则,可以实现原型与模型的相似。

3 实验方案

3.1 实验模型设置

以重庆某污水处理厂初沉池为研究原型,该初沉池采用中心进水、周边出水的辐流式沉淀池,直径为 25 m ,设置一台转动桥式刮泥机,设计污水处理量为 $20\,000\text{ m}^3/\text{d}$,初沉池设计深度为 $4\,400\text{ mm}$,设计液面高度为 $4\,000\text{ mm}$,初沉池设计液面高度钢结构骨架支撑氟碳纤维反吊膜进行密封,实际抽吸设计风量为 $4\,461\text{ m}^3/\text{h}$,原型初沉池如图2所示。



图2 原型初沉池臭气密封抽吸装置

Fig.2 Odor sealing suction device of prototype primary sedimentation tank

优化方案拟采用桥式刮泥机两侧对称布置密闭空间的方式进行加盖密封,臭气抽吸风口伸至密闭罩下方紧贴臭气散发液面进行臭气抽吸,加盖密封装置、臭气抽吸装置随桥式刮泥机协同转动,加盖密封装置边缘设置万向滑轮支撑,利用密封盖边缘与初沉池构筑物间的缝隙补风,测试原理见图3。

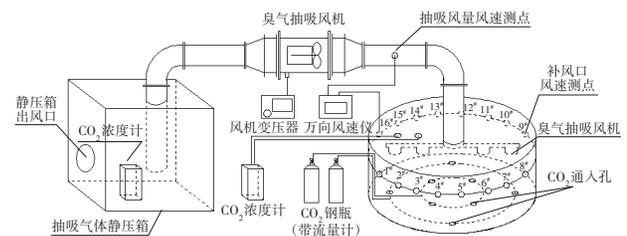


图3 实验系统的原理

Fig.3 Principle of test system

模型采用 $1:20$ 的比例建立初沉池相似模型,模型直径为 1.25 m 、高度为 465 mm 、液面高度为 285 mm ,液面距离密闭罩的高度为 180 mm ,实验模型侧

面开16个DN25补风口。采用最大风量600 m³/h、最大压力40 Pa风机作为动力源,采用DN110主管、DN75支管抽吸臭气,两段支管各开DN25抽气口5个,抽气口和补气口中心距离液面30 mm抽吸臭气,支管末端进行封闭处理,密封罩顶端开孔以方便布置测试仪器。

一般情况下,工业及民用污水散发的有害气体主要有NH₃、CH₄、H₂S、CO、CO₂、NO等。除甲烷和氨气外,大多数有害气体密度大于空气,易集聚于污水液面上方,但由于其毒性不适宜作为实验气体。综上选择二氧化碳模拟有害气体,由于二氧化碳密度大于空气,可以用它模拟硫化氢等比空气密度大的气体在隧道内的浓度分布规律。

选择CO₂作为实验中H₂S的替代气体,CO₂气体在空气中的扩散系数与H₂S在空气中的扩散系数比值近似为1,其分子质量高于H₂S,可沉聚于液面上方。25℃时CO₂溶解度为H₂S的两倍多,因此相较于H₂S气体,CO₂的抽吸难度更大,其实验结果能够保证系统的安全。设置CO₂流量为0.033 g/s(0.018 L/s)表示非搅动状态有害气体的散发量,设置CO₂流量为0.049 5 g/s(0.027 L/s)表示搅动状态有害气体的散发量,选择浮子流量计,量程为0.06~0.6 m³/h。

采用CO₂发生钢瓶作为气体发生源,连接流量计以控制通入模型的CO₂流量,布置内圈和外圈CO₂发生通道以保证液面CO₂均匀散发。

3.2 实验测试

3.2.1 CO₂密闭隔绝性能测试

利用数字式CO₂检测仪测试模型附近环境的CO₂浓度C₁,利用同一CO₂检测仪测量初沉池模型内部CO₂浓度C₂。实验中,调整CO₂通入量模拟搅拌、非搅拌两种工况模型内外CO₂浓度的变化情况,控制CO₂浓度上升至0.1%时开启风机以保证相同的初始条件。通过改变风机输入功率来改变风机风量,测量不同抽吸风量条件下模型内部的负压值ΔP和最小抽吸风量条件下补风口风速值V₀,可为较优臭气抽吸方式提供参考。同一参数实验利用不同CO₂检测仪测量三次,趋势相同时停止测量,趋势不同时加强气密性后继续测量。

3.2.2 CO₂去除率实验测试

测试参数为臭气抽吸风机后端静压箱内CO₂浓度C₃、实验装置环境CO₂浓度C₀、模型中CO₂实时通

入量q₀和抽吸风量Q₁。CO₂通入量q₀由钢瓶自带的CO₂流量计测出,CO₂收集量由布置在静压箱内部的室内空气品质仪测出,抽吸风量Q₁采用《供暖通风与空气调节》提供的方法,利用万向风速仪测定,对于直径小于200 mm圆管的截面风速测量,取三个环,每环测4个点,取12个点平均值记为圆管风速,利用风速计算空气流量Q₁。利用测得的数据可以计算CO₂臭气去除率η,见式(4)。

$$\eta = \frac{(C_3 - C_0) \times Q_1}{q_0} \quad (4)$$

4 结果与分析

4.1 模型密闭隔绝性能测试分析

初沉池密闭隔绝性能受补风口设计参数的影响。加盖初沉池作为密闭空间,为保证除臭排风装置顺利运行,需设置补风口。在实际工程中往往通过初沉池密封装置的缝隙进行被动补风,不同初沉池补风口风速和风压不同,密闭效果难以保证。本研究统一设置了一定规格和位置的补风口,通过测试不同补风口风速下对应的初沉池模型内部负压值,研究能够防止臭气外逸的推荐补风口负压值,并测量在此负压值下的臭气抽吸量,给出对应最小密闭负压条件下的臭气抽吸量。控制抽吸风量为实验设计的最小值100 m³/h,测定在搅拌工况和非搅拌工况下模型内外CO₂浓度,结果见图4。

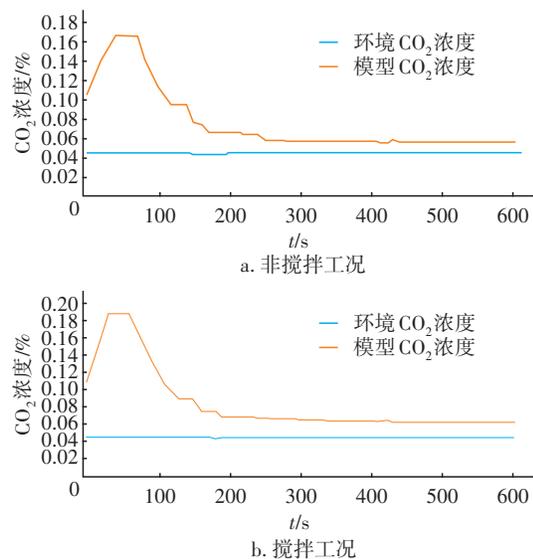


图4 模型内外CO₂浓度的变化

Fig.4 Change of CO₂ concentration inside and outside model

由图4(a)可知,模型内部CO₂浓度的变化可分为三个阶段,即0~40、40~70、70~600 s。0~40 s时,由于开启风机,连续通入CO₂状态存在延迟,抽吸风量随风机转速上升,该区间内CO₂去除量小于通入量,CO₂在模型内部不断积累导致浓度上升,CO₂浓度在40 s时达到峰值0.167 8%。40~70 s时,CO₂去除量提高至通入量,模型内部CO₂浓度维持不变,即CO₂去除量与通入量持平。70~600 s时,CO₂浓度逐渐下降且在第250秒时达到0.059 4%,之后趋于稳定,最终CO₂浓度稳定在0.057 6%左右。在此过程中,环境中的CO₂浓度几乎没有发生变化,稳定在0.046 0%左右,保证了臭气不外逸。

搅拌状态的CO₂浓度变化趋势与非搅动状态相似,CO₂浓度在30 s时达到峰值0.188 7%,最终平衡状态下的CO₂浓度为0.064 0%。

综合上述结果,在该实验模型采用的动力形式和补风条件下,100 m³/h的抽吸风量在搅拌和非搅拌两种工况下都能够起到密闭臭气的效果。进一步测试在150、200、250 m³/h抽吸风量条件下模型内部的负压值,结果表明,通过提高风机输入功率的方式提高抽吸风量会造成模型内部负压值升高,当抽吸风量为100 m³/h时,模型的负压值为2.8 Pa,该风量条件已经能起到密闭隔绝CO₂的效果,尽管进一步提高臭气抽吸风量可以达到更好的密闭效果,但会增加不必要的臭气排风量。在能够满足密闭隔绝要求的100 m³/h抽吸风量条件下,16个补风口的风速在2.79~4.25 m/s之间。现有工程的实际排风量为4 461 m³/h,优化方案下排风量为2 000 m³/h,降低臭气处理风量约55%,实现了臭气处理量的显著降低。因此,通过新型通风系统一体化设计,在保证排出臭气效果的同时,显著降低了臭气处理系统的投资与运行能耗。

4.2 抽吸风量影响臭气去除效果分析

初沉池臭气去除效果受臭气抽吸量的影响。在工程设计中,加盖密封装置距离液面高差较大,基于空间换气次数而设计的臭气抽吸风量远高于实际臭气散发量,臭气去除率是决定初沉池臭气抽吸效果的重要指标。定义臭气去除率 η ,见式(5)。

$$\eta = \frac{Q_{\text{臭气去除量}}}{Q_{\text{臭气散发量}}} \quad (5)$$

在臭气抽吸量设计方面,过大的设计臭气抽吸

量会提高空气抽吸量,只能维持较低的臭气去除率;过小的设计臭气抽吸量不能维持一定负压,虽然臭气去除率有所提高,但是臭气有逸散的可能。

当抽吸风量为100、150、200、250 m³/h时,搅拌工况的CO₂去除率分别为48.4%、40.0%、42.7%、35.8%,非搅拌工况的CO₂去除率分别为42.0%、35.8%、35.0%、29.8%。可见,搅拌工况下,CO₂去除率随抽吸风量的增大整体呈现减小趋势。在满足臭气密闭抽吸的前提下提高臭气抽吸风量,通过补风口进入装置的空气量增大,环境中进入模型的CO₂量不足,空气中除CO₂的其他组分是收集装置抽吸气体的主要成分,因此去除率整体下降。抽吸风量为100 m³/h时,臭气去除率达到峰值48.4%,此时臭气抽吸风量为实验设计最小值,在满足密闭条件的前提下,通过补气口进入模型内部的补风空气量处于实验设计最小值,因此抽吸系统捕获的气体中空气含量最低。在最小设计风量条件下,CO₂气体通入量速率与CO₂去除量的比值处于最大值,在此条件下CO₂气体容易在模型内部集聚,CO₂在模型内部含量较高,因此抽吸系统捕获的气体中CO₂含量较大。当抽吸风量为150~200 m³/h时,CO₂去除率略有上升,虽然这一区间内空气抽吸量进一步增大,但随补风空气进入模型实验台的CO₂量提高,补风空气中的CO₂成为影响去除率的重要因素。在200 m³/h抽吸风量条件下,CO₂去除率高于150 m³/h抽吸风量下的去除率,但此时抽吸装置抽吸的CO₂中,补风空气送入的CO₂为主要组分,用来代替臭气通入的CO₂去除率较低。在非搅拌工况下,CO₂去除率随臭气抽吸风量的升高而降低,总体和搅拌工况的变化趋势一致,其原因也与前述分析相同。

针对优化后的原型(抽吸风量为2 000 m³/h),该风量条件可以保证模型内部的密闭隔绝性能和较高的臭气去除率。

5 结论

① 针对初沉池臭气抽吸相似模型,维持一定负压值可以达到密闭效果。该相似模型中,搅拌工况和非搅拌工况条件下抽吸风量在100 m³/h时即可达到较好的臭气密闭效果,补风口的风速最小值为2.79 m/s,模型内负压值为2.8 Pa。针对初沉池原型,抽吸风量在2 000 m³/h的工况下,密闭空间对应形成的2.8 Pa以上负压就能够满足臭气密闭隔绝

要求。实际工程中应根据补风口参数并结合适宜的抽吸风量设计最佳密封隔绝抽吸风量。

② 臭气抽吸风量对臭气去除率的影响较大,但需要控制臭气抽吸风量。抽吸风量达到一定程度后,导致空气抽吸量增大,不能有效排出臭气,同时导致臭气去除率降低。针对该密闭抽吸优化初沉池模型,当抽吸风量为 $100\text{ m}^3/\text{h}$ 时去除率最高,达到48.4%。针对实际初沉池的情况,当设计风量从 $4\,461\text{ m}^3/\text{h}$ 降低到 $2\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 时已能满足密闭要求。在保证效果的前提下,显著降低了传统臭气排风量,进而降低了污水处理厂臭气处理系统的投资成本与运行能耗。

参考文献:

- [1] 张晓伟,汤滔.《恶臭污染物排放标准》修订的若干意见[J]. 中国环境监测,2011,27(6):53-55.
ZHANG Xiaowei, TANG Tao. Several advices on recension of "Emission Standards for Odor Pollutants" [J]. Environmental Monitoring in China, 2011, 27(6): 53-55(in Chinese).
- [2] 董晓清,张钊彬,邵培兵. 污水处理厂臭气污染控制技术进展[J]. 安徽农业科学,2014,42(14):4388-4390,4393.
DONG Xiaoping, ZHANG Zhaobin, SHAO Peibing. Research progress on the treatment of odor in municipal wastewater treatment plants [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(14): 4388-4390, 4393 (in Chinese).
- [3] 杜亚峰,李军,赵珊,等. 污水处理厂恶臭气体分布规律及挥发性气体定量评价[J]. 净水技术,2018,37(7):69-74.
DU Yafeng, LI Jun, ZHAO Shan, et al. Distribution pattern of malodorous odor and quantitative evaluation of volatile gas in a sewage treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(7): 69-74 (in Chinese).
- [4] 梁云平,林安国,郭晓东,等. 北京市某典型污水处理厂氨气排放研究[J]. 中国环境监测,2017,33(6):63-68.
LIANG Yunping, LIN Anguo, WU Xiaodong, et al. Ammonia emission characteristics of a municipal sewage treatment plant in Beijing[J]. Environmental Monitoring in China, 2017, 33(6): 63-68(in Chinese).
- [5] 李国伟,赖震宏. 污水处理厂除臭设计体会[J]. 广东化工,2010,37(10):239-241.
LI Guowei, LAI Zhenhong. The deodorization design experience in wastewater treatment plant [J]. Guangdong Chemical Industry, 2010, 37(10): 239-241 (in Chinese).
- [6] 沈为,吴运松,卢东昱,等. 印染园区集中式污水处理厂除臭工程设计实例[J]. 中国给水排水,2017,33(12):67-70.
SHEN Wei, WU Yunsong, LU Dongyu, et al. Design case of odor removal project in dye industrial zone's wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(12): 67-70(in Chinese).
- [7] 林培真,宋旭,祝雅杰,等. 地下污水处理厂除臭工程设计问题探讨[J]. 中国给水排水,2018,34(16):50-54.
LIN Peizhen, SONG Xu, ZHU Yajie, et al. Discussion on deodorization project design of underground wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16): 50-54(in Chinese).
- [8] 周立,李桥龙,陈晓华,等. 北京槐房埋地式污水厂除臭通风一体化系统设计[J]. 中国给水排水,2018,34(16):55-60.
ZHOU Li, LI Qiaolong, CHEN Xiaohua, et al. Design of integrated system of deodorization and ventilation for Beijing Huafang Underground WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16): 55-60(in Chinese).
- [9] 陈林乐. 白鹤滩水电站地下厂房通风空调热态模型试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.
CHEN Linle. Study on Ventilation and Air Conditioning Thermal Model Experiment of Baihetan Hydropower Station's Underground Powerhouse [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015(in Chinese).
- [10] 谢东. 地下水电站厂房气流组织CFD数值模拟方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.
XIE Dong. Numerical Simulation of Airflow Distribution in Underground Hydropower Station [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015(in Chinese).

作者简介:姚尧(1994-),男,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,主要研究方向为构筑物空间气流组织与设备节能优化。

E-mail: yaoywill@foxmail.com

收稿日期:2019-08-11

修回日期:2019-11-22

(编辑:任莹莹)