

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.05.016



多因素对地下污水厂 H_2S 与 NH_3 浓度的影响

杨鹏¹, 刘雪峰¹, 门玉葵¹, 刘承东²

(1. 华南理工大学 电力学院, 广州 510641; 2. 广东省市政工程设计研究总院, 广州 510060)

摘要: 依托现场实验测试, 采用二阶正交数值仿真实验, 以脱水机房为例, 分析了温度、湿度及排风量对地下污水厂 H_2S 和 NH_3 浓度的影响, 并提出了一种结合污染水平和排风能耗的综合评价指标。分析结果表明, 脱水机房 H_2S 和 NH_3 浓度受温度和排风量交互效应影响显著 ($p < 0.05$)。在 20 °C 时脱水机房内 H_2S 和 NH_3 浓度最低, 比 35 °C 时污染水平降低 2.5 倍, 综合评价指标计算结果显示, 在 2.7 次换气次数下综合评价指标较小, K 值为 4.5。对于处理量为 10 万 t/d 的污水厂, 换气次数低于 2.7 次脱水机房的恶臭浓度偏高, 高于 2.7 次排风能耗过大, 取 2.7 次换气次数范围最为合理。

关键词: 地下污水厂; 正交试验; 仿真模拟; 恶臭气体

中图分类号: X512 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)05-0124-09

Effect of multi factor on H_2S and NH_3 concentration in underground wastewater treatment plants

Yang Peng¹, Liu Xuefeng¹, Men Yukui¹, Liu Chengdong²

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, P. R. China;

2. Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute, Guangzhou 510060, P. R. China)

Abstract: With experiment test, a second-order orthogonal experiment was carried out to analyze the weight of factors affecting H_2S and NH_3 concentration in sludge dewatering of underground wastewater treatment plants; temperature, humidity and exhaust volume, and according to pollution level and energy consumption, a comprehensive evaluation index was put forward. The results indicate that Interaction between temperature and exhaust volume is important to H_2S and NH_3 concentration ($p < 0.05$). When the outdoor temperature is 20 °C, the H_2S and NH_3 concentration of the dewatering machine room is the lowest. It is reduced by 2.5 times compared with 35 °C. According to the comprehensive evaluation index, the minimum K value is 4.5 in the ventilation frequency of 2.7. Below 2.7 times of ventilation, the odor

收稿日期: 2017-11-25

基金项目: 国家自然科学基金 (51778234); 广东省自然科学基金 (2015A030310303); 广东省省级科技计划 (2017A020216024); 中央高校基本科研业务费专项资金 (B6150170)

作者简介: 作者简介: 杨鹏 (1990-), 男, 主要从事空气品质与环境控制研究, E-mail: yangpeng_hn@live.com.

刘雪峰 (通信作者), 男, 博士, 副教授, E-mail: lyxfliu@scut.edu.cn.

Received: 2017-11-25

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51778234); Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2015A030310303); Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (No. 2017A020216024); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. B6150170)

Author brief: Yang Peng (1990-), main research interests; air quality and environmental quality improvement, E-mail: yangpeng_hn@live.com.

Liu Xuefeng (corresponding author), associate professor, PhD, E-mail: lyxfliu@scut.edu.cn.

concentration is too high, and the energy consumption is too large when higher than the 2.7 times of ventilation. Therefore, the most appropriate number of ventilation is 2.7 for dewatering room with treatment capacity ten thousand per day.

Keywords: underground wastewater treatment plants; orthogonal experiment; computer simulation; odors

温度、相对湿度、排风量是脱水机房恶臭逸散的主要影响因素,温度过高、排风量不足都会造成脱水机房内恶臭气体不断聚集,恶臭气体主要成分为 H₂S、NH₃,臭阈值低、毒性大^[1-3]。若不妥善治理,将会严重影响工作人员的健康,危害较大^[4-5]。为保证地下工作环境的安全,设计的排风量普遍过大,污水厂通风系统的投入和运行费非常高,造成能源浪费^[6]。

污水处理厂的除臭系统属于末端治理:对于已产生的恶臭气体先进行密闭、收集,再通过化学、生物等方法对其进行治理。治理环节分为臭源密闭处理、恶臭气体收集输送及生化处理^[7]。目前,大部分研究主要在恶臭气体的生化处理方面,通过优化通风除臭系统的研究还比较少^[8]。影响内环境 H₂S、NH₃ 浓度场的因素很复杂^[9],其中,温度、湿度和排风量能够通过通风除臭系统进行控制。排风系统中除臭工艺的阻力非常大,风量过大造成排风系统能耗较高^[7,10-11]。H₂S 和 NH₃ 逸散本质是浓度差引起的质量扩散,研究表明,扩散系数受温度的影响比较大,温度越高,扩散系数越大^[12]。这些因素对脱水车间 H₂S 和 NH₃ 浓度的影响效应不同,根据权重效应合理选择通风系统控制目标能够达到节能的目的。因此,确定 H₂S 和 NH₃ 的主要影响因素、权重及分布逸散规律,对地下污水处理厂恶臭气体的控制和节能具有重要意义。

数值仿真因其可视化、简单性和适应性受到研究者和设计者的青睐^[13-14]。RNG $k-\epsilon$ 湍流模型和组分运输模型被广泛应用^[15-16]。本文采用这两种模型对地下污水处理厂污泥脱水车间不同温度、湿度和排风量下的 H₂S、NH₃ 浓度分布仿真模拟,结合正交试验进行极差和方差分析,确定各因素影响权重,进一步分析主要影响因素与脱水机房 H₂S、NH₃ 浓度和通风能耗的关系,通过综合评价指标对排风量进行优化,确定出污泥脱水机房合理的通风量。

1 脱水机房计算模型

1.1 几何模型

以广州某地下污水厂污泥脱水机房为原型研究对象,如图 1 所示,其长、宽、高分别为 2 250、1 950、6 300 mm。由于整个脱水机房位于地下,温度相对

比较稳定,忽略壁面热传递。脱水过程中会产生大量恶臭气体,虽脱水机进行了密封处理,但存储污泥的 3 个料斗仓裸露在内环境,不断地向周围逸散 NH₃ 和 H₂S,料斗口的长、宽、高分别为 750、750、2 300 mm。为控制脱水机房内污染物浓度,排风系统以一定的排风量进行排风,防止恶臭气体的聚集,2 个排风口位置在靠近料斗口的壁面侧,其长、宽分别为 300、300 mm,中心高度 2 000 mm。

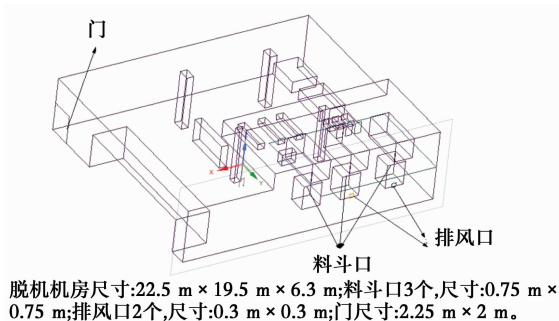


图 1 广州某地下污水厂脱水机房 3 维图

Fig. 1 3-D model of Guangzhou underground sewage plant room

六面体网格在计算精度、计算速度上都优于非结构化网格,故采用六面体结构网格对计算域进行离散。考虑到门、料斗口和排风口处扰动较大,为了提高计算收敛性,获取准确的区域参数对其进行局部加密,最终网格数量为 251 万,如图 2 所示。

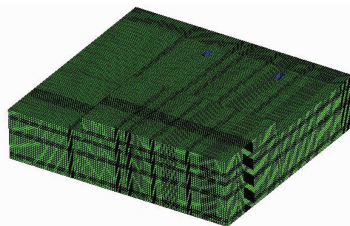


图 2 脱水机房六面体结构化网格

Fig. 2 Dewatering room hexahedral grid mechanism

1.2 模型简化

为简化计算做如下假设:室内空气为不可压缩流体;稳态计算各边界参数不变;脱水机房温度与室温温度相同,不考虑壁面热量传递,即壁面为绝热壁面;忽略机房内设备产生的热量。

1.3 数学模型

在考虑能量守恒、动量守恒和质量守恒的基础上还需保证组分守恒,其通用控制方程可表示为

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho U\varphi) = \text{div}(\Gamma_\varphi \text{grad}\varphi) + S_\varphi \quad (1)$$

式中： φ 为通用变量 u, v, w, T, τ_p ； Γ_φ 为广义扩散系数； S_φ 为广义源项。

选用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型以提高计算精度，其流动方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial \kappa}{\partial t} + u_i \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_k \nu \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + 2\nu_i S_{ij} S_{ij} \\ -\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_\epsilon \nu \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) - R + 2c_1 \frac{\epsilon}{\kappa} \nu_i S_{ij} S_{ij} - 2c_2 \frac{\epsilon^2}{\kappa} \end{cases} \quad (2)$$

式中： κ 表示湍流动能； ϵ 表示湍流耗散项。

$$\begin{cases} S_{ij} = \partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i \\ R = 2\nu S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \end{cases} \quad (3)$$

常数 $c_1, c_2, a_k, a_\epsilon$ 具体数值详见参考文献[17]。

2 多因素正交仿真实验

2.1 实验方案

影响脱水车间 H_2S 和 NH_3 浓度分布的因素有温度、湿度和排风量，地下污水厂全年运行数据显示，脱水机房内温度范围 $10 \sim 33 \text{ }^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $60\% \sim 90\%$ ，风机是变频运行，最大风量对应的排风口风压为 -25 Pa ，最小风量对应的风压为 -15 Pa 。考虑二阶交叉因素共有 6 个，如果每个因素取 2 个水平进行仿真模拟，要做 $2^6 = 64$ 次试验，需要花费相当多的时间。正交试验法可通过少量实验次数对多因素进行极差分析、方差分析，并获得有价值的科学规律^[18-19]。本文采用 $L_8(2^7)$ 正交试验，每个因素取最大值和最小值 2 水平，共需要试验 8 次。表 1 是正交试验的各因素水平值。

表 1 正交试验各因素水平值

Table 1 Levels of factors in orthogonal test

水平	因素		
	温度 A/ $^\circ\text{C}$	相对湿度 B/%	排气静压 C/Pa
1	10	60	-15
2	33	90	-25

注：排风量的驱动力是风机提供的静压，本次模拟的排风口边界条件为压力出边界。

表 2 正交试验极差分析

Table 2 Range analysis of the orthogonal test

因素试验号	1	2	3	4	5	6	7	指标/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	
	A(温度)	B(相对湿度)	A×B	C(排风压力)	A×C	B×C	误差	H_2S	NH_3
1	1	1	1	1	1	1	1	4.66	16.37
2	1	1	1	2	2	2	2	4.14	14.55
3	1	2	2	1	1	2	2	3.53	12.41

2.2 实验结果与分析

2.2.1 极差结果分析 按照 $L_8(2^7)$ 正交表进行仿真试验，取料斗口周围 15 个点的仿真结果对 H_2S 、 NH_3 逸散规律进行研究，如图 3 所示。

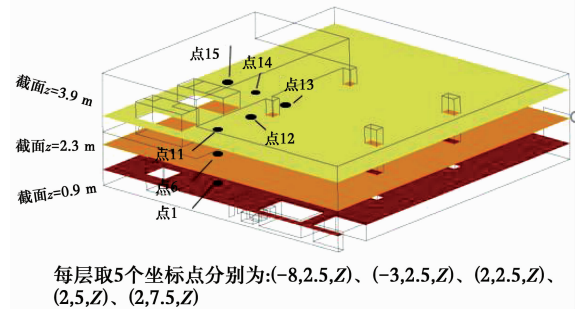


图 3 仿真结果分析点分布

Fig. 3 The distribution of simulation analysis points

8 次试验结果记为 y_1, y_2, \dots, y_8 ， K_{ij} 为第 j 列因素第 i 水平所对应的 H_2S, NH_3 浓度值之和， $\kappa_{ij} = K_{ij}$ ， $R = \kappa_{ij\max} - \kappa_{ij\min}$ ， R 值越大，说明该因素对试验指标的影响越大。表 2 是点 8 处的 H_2S 和 NH_3 浓度的极差计算结果，从结果看出， $A \times C$ 列对应 R 值最大， $R_{H_2S} = 9.4, R_{NH_3} = 6.18$ 。图 4 是 15 个点各因素极差均值，从图中可以看出，温度和排风压力交互效应对应的极差最大，其值 $R = 0.93$ ，反映出温度和排风压力交互效应对 H_2S 和 NH_3 的浓度影响最大，其次为单因素排风压力 C 、温度 A 、相对湿度 B ，极差值相差不大，分别为 0.89、0.71、0.65，交互因素 $A \times B, B \times C$ 最小。因素影响权重从大到小依次为： $A \times C > C > A > B > A \times B > B \times C$ 。

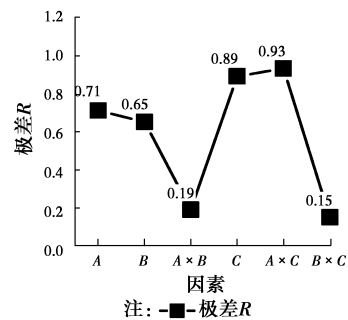


图 4 各因素均值极差

Fig. 4 Mean value of extreme difference

续表 2

因素试验号	1	2	3	4	5	6	7	指标/(mg·m ⁻³)	
	A(温度)	B(相对湿度)	A×B	C(排风压力)	A×C	B×C	误差	H ₂ S	NH ₃
4	1	2	2	2	2	1	1	4.33	15.21
5	2	1	2	1	2	1	2	6.54	22.97
6	2	1	2	2	1	2	1	4.76	16.76
7	2	2	1	1	2	2	1	6.30	22.13
8	2	2	1	2	1	1	2	3.46	12.10

2.2.2 方差结果分析 MS_j 是单因素 j 变化引起的差异,MS_e 是试验误差离差平方和,为提高检验的灵敏度,当 MS_j<2MS_e 将该因素并入误差。两水平正交试验,各因素离差平方和为

$$MS_j = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^2 K_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^2 y_i \right)^2 = \frac{1}{n} (K_1 - K_2)^2 \quad (4)$$

式中:n 为试验总次数,n=8;a 为每个水平试验次数,a=4。

表 3 是点 8 处 H₂S 和 NH₃ 浓度的方差计算,计算结果 F_{A×C}>F_{0.05}(1,4),表明温度和排气压力交互效应 A×C 对结果有显著影响。

表 3 正交试验方差分析
Table 3 Variance analysis of orthogonal test

方差来源	指标	离差平方和	自由度 f	均方 S/f	F 值	临界值	显著性
A	H ₂ S	1.41	1	1.41	6.41		
	NH ₃	61.22	1	61.22	6.17		
ΔB	H ₂ S	Δ0.45	1				
	NH ₃	Δ19.94	1				
ΔA×B	H ₂ S	Δ0.03	1				
	NH ₃	Δ1.26	1				
C	H ₂ S	1.38	1	1.38	6.27		
	NH ₃	60.01	1	60.01	6.05	F _{0.10} (1,4)=4.54	
A×C	H ₂ S	1.75	1	1.75	7.95	F _{0.05} (1,4)=7.71	*
	NH ₃	76.45	1	76.45	7.71	F _{0.01} (1,4)=21.20	*
ΔB×C	H ₂ S	Δ0.01	1				
	NH ₃	Δ0.17	1				
误差 E	H ₂ S	0.41	1				
	NH ₃	18.33	1				
修正误差 E*	H ₂ S	0.89	4	0.22			
	NH ₃	39.6	4	9.92			

图 5 为各因素的均值极差和显著性大小,从图中可以看出,15 个点的因素显著性分析中,因素 A×C 显著性 p<0.05,占 57%,其他因素小于 13%。结果反映出,在这些因素中,温度和排气压力交互效应 A×C 对 H₂S 和 NH₃ 浓度影响显著(p<0.05)。原因在于 H₂S 和 NH₃ 在逸散和抽排过程中,温度和

排风量存在交互效应,如图 6 所示。在 15 Pa 排风压力作用下,温度由 10 ℃ 升高到 33 ℃,H₂S 和 NH₃ 浓度分别升高 0.04、0.16 mg/m³,排风压力升高到 25 Pa,温度由 10 ℃ 升高到 33 ℃,H₂S 和 NH₃ 浓度不同程度降低。不同排风压力下,温度对 H₂S 和 NH₃ 浓度影响效果相反。

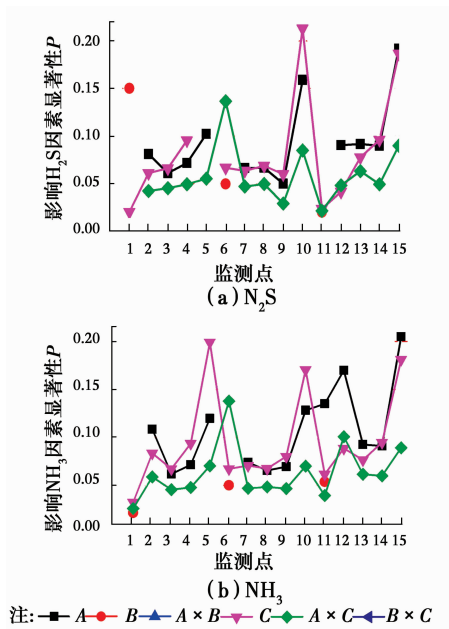


图 5 各因素显著性
Fig. 5 The significance of each factor

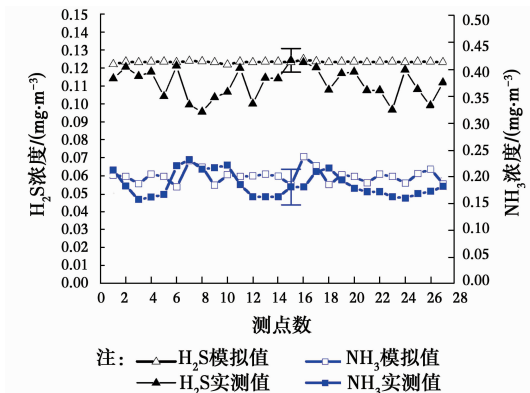


图 7 实验测量与模拟值得对比图
Fig. 7 Comparison of experimental and simulated values

3 多因素影响效应

3.1 工况设定

为了确定温度和排风量对 H₂S 和 NH₃ 浓度和能耗的影响,对温度和排风量进一步细化分析,工况情况如表 4。

表 4 参数工况值

Table 4 Value of various conditions

参数水平	温度/℃	换气次数	参数水平	温度/℃	换气次数
1	15	1.7	5	35	3.3
2	20	2.1	6		4.1
3	25	2.4	7		4.7
4	30	2.7			

以人员呼吸 $z=1.7\text{ m}$ 水平高度进行分析,图 8 是部分工况下 H₂S 的浓度变化情况,从图中可以看出,排风量的变化或温度的变化都会对 H₂S 浓度分布造成影响。

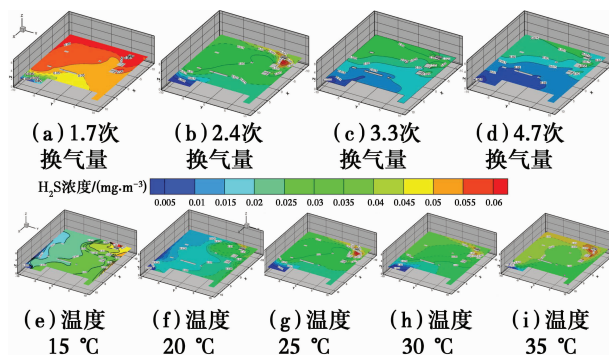


图 8 不同工况下 H₂S 浓度
Fig. 8 Changes of H₂S concentration under different working conditions

3.2 温度影响

图 9 反映出换气次数 2.4 次条件下,温度从 15~35℃ 变化过程中,不同 H₂S 浓度值对应区域的变化规律。15℃ 时面积比最大区域对应 H₂S 浓度

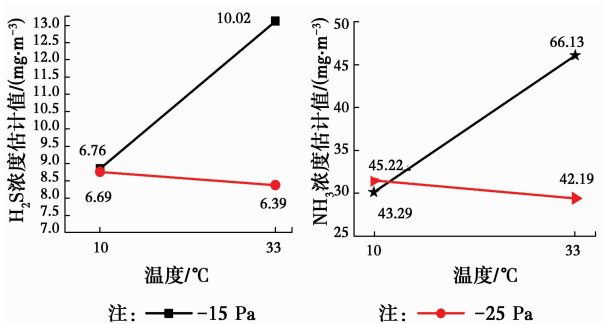


图 6 温度和排气压力交互作用
Fig. 6 Interaction between temperature and exhaust pressure

2.3 实验验证

对广州某地下污水厂污泥脱水机房进行实地测量,测量时间为 9:30 到 16:30。室外晴天,温度 15.9℃,相对湿度 59.7%,排风口静压 -10 Pa。3 台污泥脱水机有 2 台运行。在污泥脱水车间取 3 个高度分别为 0.9、2.3、3.9 m,每个高度取 9 个测点坐标 (x, y) 依次为:

$$\begin{aligned}
 &Y_1(-6.6, -6.6), Y_2(0, -6.6), Y_3(6.6, -6.6) \\
 &Y_4(-6.6, 0), Y_5(0, 0), Y_6(6.6, 0), \\
 &Y_7(-6.6, 6.6), Y_8(0, 6.6), Y_9(6.6, 6.6).
 \end{aligned}$$

对各点的 NH₃ 和 H₂S 的浓度进行测量。图 7 为测量数据与模拟数据的对比图,由于实际情况的复杂性,实测数据与模拟数据存在一定的误差,H₂S 浓度平均相对误差为 9.70%,NH₃ 浓度平均相对误差为 12.78%。对比结果:在允许误差条件下,仿真实验与实际测量基本一致。

范围为 0.019~0.033 mg/m³,同理,20、25、30、35 °C 时对应 H₂S 浓度值分别是 0.013、0.026、0.039~0.046、0.039~0.052 mg/m³。从结果能够看出,温度由 15 °C 升高到 35 °C,污染水平出现先降低后升高的趋势,在 20 °C 时最低,与 35 °C 相比降低了 2.5 倍。H₂S 浓度高于 0.052 mg/m³ 的区域随着温度的升高不断扩大,面积比由 20 °C 时的 5% 增大到 35 °C 时的 34%,高污染区域面积提高了 4.8 倍。可见,室外温度 20 °C 是脱水机房恶臭污染控制最适宜的温度,污水厂脱水机房在满足室内环境要求的条件下可适当降低除臭风量以降低运行能耗。

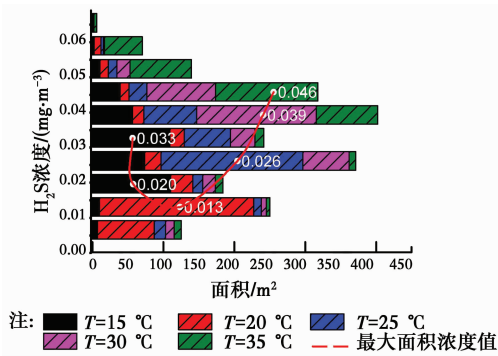


图 9 不同温度下 H₂S 浓度值对应区域面积比
Fig. 9 Area ratio of H₂S concentration at different temperatures

3.3 排风量影响

图 10 是 25 °C 时不同排风量下 H₂S 浓度与对应区域面积的关系图,最大面积对应的 H₂S 浓度代表着该排风量下恶臭的水平。图中数据显示,换气次数由 1.7 次增加到 4.7 次,H₂S 最高浓度值出现不断降低的趋势,由 0.072 mg/m³ 逐渐降到 0.026 mg/m³。用标准方差来反映 H₂S 浓度分布的均匀程度,换气次数由 1.7 次增加到 4.7 次,浓度方差值也不断下降,依次为 70.9、69.5、63.2、40.8、39.4、30.6 和 30.6。从上述结果看出,排风量对地下污水厂脱水机房恶臭浓度有影响,排风量增大恶臭的排除量也增加,高浓度区域逐渐降低,并且浓度分布趋于均匀。因此,增大排风量能够降低 H₂S 的浓度水平,抑制浓度的聚集。

研究表明,污染物浓度与换气次数存在一定的关系^[20]。

$$y(t) = (y_{初} - y_{平衡})e^{-\frac{t}{\tau}} + y_{平衡},$$

$$t \rightarrow \infty \quad y_{平衡} = \tau$$

由此可得:

$$|y'_{平衡}| = |-\tau^2 \sigma| = \tau^2 \sigma$$

式中: y 为污染物浓度; $y_{初}$ 为污染物初始浓度; $y_{平衡}$ 为污染物稳定浓度; τ 为换气指数,换气次数倒数; σ

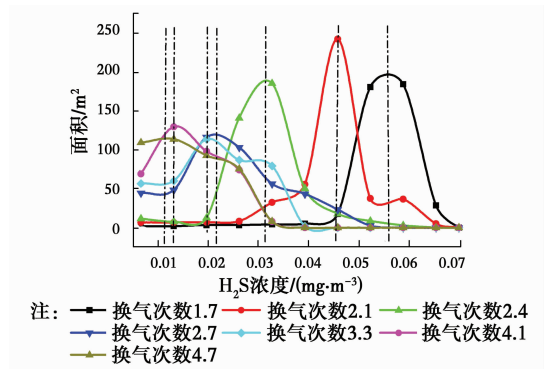


图 10 25 °C 下不同 H₂S 浓度对应区域面积
Fig. 10 Area of H₂S concentration at 25 °C

为污染物释放强度。

从公式可以看出,换气次数越大,脱水机房内 NH₃ 和 H₂S 浓度 $y(t)$ 越低,但恶臭浓度变化率 $|y'_{平衡}|$ 在不断降低。图 11 为排风口、料斗口和内部点(-5、-2、1.7)处 NH₃ 随换气次数的变化规律,从图中曲线斜率可以看出,随着换气次数增大,NH₃ 浓度变化率不断减小,换气次数超过 2.7 次,换气次数的增加对 H₂S 和 NH₃ 浓度变化作用不大,与上述结论一致。

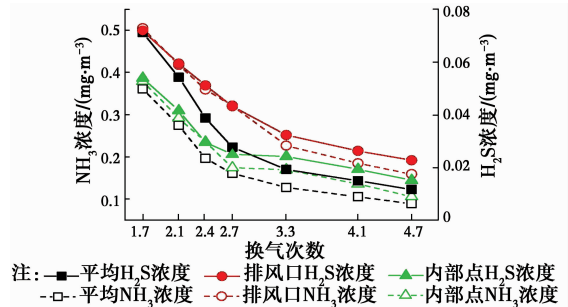


图 11 不同换气次数下 H₂S 和 NH₃ 浓度
Fig. 11 H₂S and NH₃ concentration under different ventilation times

排风量增加虽然能够降低脱水机房内恶臭浓度,但是,同时风口风速随之增大,必定会造成能耗增加。能耗正比于风管阻力,单位管长的摩擦阻力损失由式(5)计算^[21]。

$$p_m = \frac{\lambda}{d} \frac{\rho v^2}{2} \quad (5)$$

式中: p_m 为单位管长摩擦阻力损失,Pa; d 风管当量直径,m; v 为风速,m/s; λ 为摩擦阻力系数,由莫迪公式(6)求得。

$$\lambda = 0.0055 \left[1 + \left(20000 \frac{K}{d} + \frac{10^6}{Re} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (6)$$

脱水机房的通风能耗为

$$W = \frac{p \times G}{\eta_1 \eta_2} \quad (7)$$

式中： p 为全压， $p = p_m + 1/2\rho v^2$ ； G 为通风量， m^3/h ； η_1 、 η_2 为风机效率和机械效率，分别取值 0.75 和 0.98。根据广州某地下污水厂的实际情况， L 取 50 m， K 取 0.18 mm。图 12 中，换气次数与风口风速、能耗的关系显示，换气次数由 1.7 增加到 4.7，风口风速由 4.1 m/s 增大到 11.2 m/s，使得能耗由 0.29 kW 增加到 8.16 kW，增加了 27 倍，单位风量能耗增加了 6.1 倍，随着通风量增加能耗增加显著。

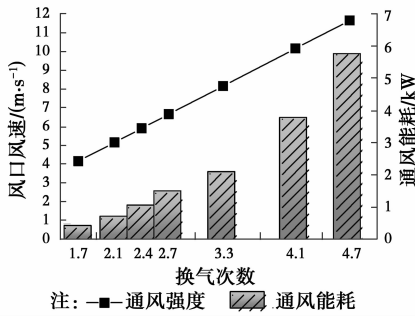


图 12 不同换气次数下的通风强度与通风能耗
Fig. 12 Ventilation strength and ventilation energy consumption under different ventilation times

设计规范《城镇污水处理厂污泥处理技术规程》要求污泥脱水机房换气次数不低于 6 次/h^[22]。但研究表明，地下污水厂脱水机房换气次数小于 6 次条件下， NH_3 浓度降到 0.09 mg/m^3 ， H_2S 浓度降到 0.012 mg/m^3 ，已经低于《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—93)中厂界一级排放标准。单位能耗对 H_2S 和 NH_3 作用分别由 0.077、0.39 $mg/(m^3 \cdot kW)$ 降为 0.001、0.007 $mg/(m^3 \cdot kW)$ ，如图 13 所

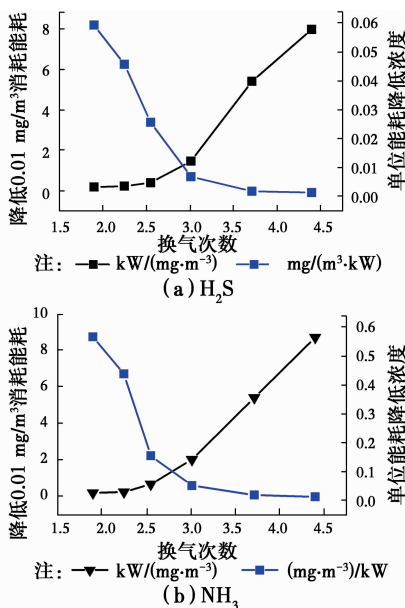


图 13 单位能耗与 H_2S 和 NH_3 浓度关系
Fig. 13 Relationship between unit energy consumption and H_2S and NH_3 concentration

示。通过继续增加排风量的方式改善空气质量显然是不可取的。

3.4 综合评价指标

为了反映脱水机房恶臭污染水平和能耗水平，参考《实用供热空调设计手册》中 IAQ 污染物评价方法，提出综合污染水平指标及综合能耗指标。

$$I = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{C_{H_2S}}{S_{H_2S}} + \frac{C_{NH_3}}{S_{NH_3}} \right)} \quad (8)$$

$$E = \sqrt{\frac{E_c}{\max(E_{H_2S}, E_{NH_3})}} \quad (9)$$

式中： C 为脱水机房不同换气次数下平均浓度； S 是《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—93)中厂界一级排放标准值。 E_c 是实际排风能耗， E_{H_2S} 、 E_{NH_3} 是达到厂界一级排放标准值 S 需要的能耗。

结合污染水平和能耗水平，引入综合评价指标作为脱水机房通风除臭性能统一量化评价指标。

$$K = \exp(I) + \exp(E) \quad (10)$$

从式(10)可以看出， I 值越小，污染程度越低， E 越小，能耗水平越低， K 值越小，脱水机房通风除臭性能越好。

根据式(8)~式(10)可得不同换气次数下通风量与 K 的关系，如图 14 所示。从图中可以看出，在 2.7 换气次数， K 最小为 4.5，对应的 H_2S 和 NH_3 浓度约为 0.022、0.16 mg/m^3 ，排风口风速 6.8 m/s，能耗 1.5 kW。换气次数低于 2.7 次，脱水机房的浓度偏高，高于 2.7 次，风速过大，造成能耗过高，对于污水处理量 10 万 t/d 的脱水机房，排风量设置为 2.7 次换气次数最为合理。

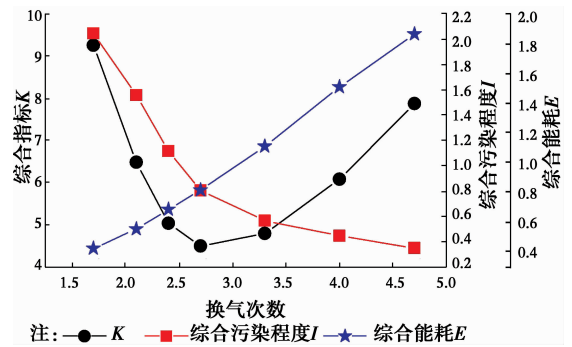


图 14 综合评价指标 K 与换气次数关系
Fig. 14 Relationship between of comprehensive evaluation index K and ventilation rate

评价指标方程化能够更加方便直观地判断脱水机房排风量是否合理。根据上述结果，对综合评价指标 K 进行非线性拟合，拟合模型选择指数函数，拟合曲线为，拟合结果为

$$y = \exp(4.51459 - 1.84878x + 0.28403x^3)$$

式中: y 表示综合评价指标 K ; x 表示换气次数。

4 结论

1)通过正交仿真试验确定了温度和排风量的交互作用对污泥脱水车间 H₂S 和 NH₃ 浓度的影响最大,且影响作用显著($p < 0.05$)。

2)室外温度 20 ℃时,脱水机房 NH₃ 和 H₂S 浓度最低,有利于通风节能;换气次数超过 2.7 次后,通风量增加对 H₂S 和 NH₃ 浓度变化不明显;综合评价指标 K 计算结果显示,对于污水处理量 10 万 t/d 的脱水机房,排风量为 2.7 次换气次数综合性能最好。

3)过大的排风量对进一步改善空气品质的作用效果并不明显,反而使能耗急剧增加。因此,要降低综合评价指标 K ,单纯依靠机械排风是远远不够,主动控制脱水机房的恶臭气体还可以从气流组织的控制入手。

参考文献:

- [1] 周杰,吴敏,牛明星,等.污泥干化过程恶臭气体释放的研究进展[J].中国给水排水,2015(4):25-27.
ZHOU J, WU M, NIU M X, et al. Research progress in odorous gases emitted from sludge drying process [J]. China Water & Wastewater, 2015(4): 25-27. (in Chinese)
- [2] ZARRA T, GIULIANI S, NADDEO V, et al. Control of odour emission in wastewater treatment plants by direct and undirected measurement of odour emission capacity [J]. Water Science & Technology: A Journal of the International, 2012, 66(8): 1627-1633.
- [3] 董晓清,张钊彬,邵培兵.污水处理厂臭气污染控制技术的研究进展[J].安徽农业科学,2014(14):4388-4390.
DONG X Q, ZHANG Z B, SHAO P B. Research progress on the treatment of odor in municipal wastewater treatment plants [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014(14): 4388-4390. (in Chinese)
- [4] 王秀艳,易忠芹,王钊,等.污水处理厂恶臭气体健康风险评估[J].土木建筑与环境工程,2013,35(5):50-54.
WANG X Y, YI Z Q, WANG Z, et al. Health risks assessment of odor gases from sewage treatment plant [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2013, 35(5): 50-54. (in Chinese)
- [5] 睦光华,李建军,孙国萍.城市污水处理厂恶臭污染源调查与研究[J].环境工程学报,2008,2(3):399-402.
SUI G H, LI J J, SUN G P. Investigation of odor pollution in a municipal wastewater treatment plant [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, 2(3): 399-402. (in Chinese)
- [6] 郑理慎,陈志平,王薇,等.污水厂生物除臭设计中存在的问题探讨[J].中国给水排水,2011,27(12):14-17.
ZHENG L S, CHEN Z P, WANG W, et al. Discussion on existing problems in design of bio-deodorization system in sewage treatment plants [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(12): 14-17. (in Chinese)
- [7] 黄重成.埋地式污水处理厂生物除臭工艺设计[J].能源与环境,2014(2):87-88.
HUANG C C. Biological deodorant technology for underground wastewater treatment plant [J]. Energy and Environment, 2014(2): 87-88. (in Chinese)
- [8] 刘洪波,邓特刚,李小松.基于CFD的污泥脱水机房恶臭扩散分布规律研究[J].环境工程学报,2009(5):875-880.
LIU H B, DENG T G, LI X S. Study on odor dispersion and distribution characteristics in sludge dewatering room based on CFD [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009(5): 875-880. (in Chinese)
- [9] 李元元,吴健萍,齐长青,等.垃圾填埋场恶臭气体排放影响因素的研究[J].环境卫生工程,2010,18(3):7-9.
LI Y U, WU J P, QI C Q, et al. Influencing factors of odor emission in waste landfill sites [J]. Environmental Science and Engineering, 2010, 18(3): 7-9. (in Chinese)
- [10] 刘绪为,尤颖,王利剑,等.正定新区全地下污水处理厂生物除臭设计计算[J].中国给水排水,2015(4):69-71.
LIU X W, YOU Y, WANG L J, et al. Design and calculation of biological deodorization in fully underground wastewater treatment plant in Zhengding New District [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(4): 69-71. (in Chinese)
- [11] 李成江.地下式污水处理厂的发展与关键技术问题[J].给水排水,2016(8):36-39.
LI C J. Development and key technologies for underground wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016(8): 36-39. (in Chinese)
- [12] 曲秀英.扩散系数实验技术研究[J].大庆石油地质与开发,2012,31(4):46-49.
QU X Y. Studies on the experimental technique of diffusion coefficient [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2012, 31(4): 46-49. (in Chinese)
- [13] WU X W, HUANG M Q, HAN B, et al. Orthogonal design and numerical simulation of flow and pollutant configurations in fractured stopes [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(8): 3338-3344
- [14] ZHANG Z W, GUO K, LI J, et al. Based on numerical

- simulation of orthogonal experimental design of blast furnace's coal lance operation parameters [J]. *Metalurgia International*, 2012, 17(2): 64-67.
- [15] 程卫民,姚玉静,吴立荣,等. 基于 Fluent 的矿井火灾时期温度及浓度分布数值模拟[J]. *煤矿安全*, 2012, 43(2): 20-24.
- CHENG W M, YAO Y J, WU L R, et al. Fluent-based numerical simulation of temperature and concentration during mine fire [J]. *Safety in Coal Mines*, 2012, 43(2): 20-24. (in Chinese)
- [16] 蒋永清,任喆,孙超,等. 埋地管道泄漏天然气在分层填筑土壤扩散数值模拟研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2016, 12(6): 105-109.
- JIANG Y Q, REN Z, SUN C, et al. Numerical simulation research on diffusion of natural gas leaking from buried pipeline in layered filling soil [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(6): 105-109. (in Chinese)
- [17] KIM J J, BAIK J J. A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG $k-\epsilon$ turbulence model [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(19): 3039-3048.
- [18] ZENG C, YANG K, LI X, et al. Optimization study on influential factors for simulation calcium oxalate calculus models in vitro by orthogonal design with multi-targets [J]. *Modernization of Traditional Chinese Medicine*, 2013, 15(9): 1937-1940.
- [19] YU Y, YANG Q, WANG X, et al. Optimization of the design of ducted-fan hovering micro air vehicles using finite element simulation and orthogonal design [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering*, 2013, 227(3): 443-452.
- [20] 陈世和. 采用换气指数预测室内污染物浓度的理论方法[C]//第6届全国建筑环境与设备技术交流大会文集, 广州, 2015.
- CHEN S H. A theoretical method for predicting indoor pollutant concentration by ventilation index [C] // The Sixth National Building Environment and Equipment Technology Exchange Conference, Guangzhou, 2015. (in Chinese)
- [21] 王智超,李永,李效禹,等. 对一种通风管道当量粗糙度计算方法的探讨[J]. *建筑热能通风空调*, 2010, 29(4): 35-37.
- WANG Z C, LI Y, LI X Y, et al. Discussion of equivalent roughness calculation method for a ventilation duct [J]. *Building Energy & Environment*, 2010, 29(4): 35-37. (in Chinese)
- [22] 北京城市排水集团有限责任公司. 城镇污水处理厂污泥处理技术规程: CJJ/T 243—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Beijing Urban Drainage Refco Group Ltd. Technical specification for sludge treatment of municipal wastewater treatment plant: CJJ/T 243-2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)