

大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201711062 中图分类号 X506 文献标识码 A

陈思维, 刘雪峰, 杨鹏. 不同送排风量下脱水机房竖直离子风管的通风除臭效果 [J]. 环境工程学报, 2018, 12(4): 1092-1103.
CHEN Siwei, LIU Xuefeng, YANG Peng. Ventilation and deodorizing effect of vertical ionizing air duct in dewatering room under different air supply volume and exhaust volume [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(4): 1092-1103.

不同送排风量下脱水机房竖直离子风管的通风除臭效果

陈思维, 刘雪峰*, 杨鹏

华南理工大学电力学院, 广州 510641

第一作者: 陈思维 (1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 建筑环境控制、暖通空调以及工业通风. E-mail: 251226287@qq.com

* 通信作者, E-mail: lyxfliu@scut.edu.cn

摘要 以地理式污水处理厂的通风排污系统为研究对象, 污水处理时产生的恶臭气体严重影响室内外环境, 通风系统中排风与送风风量的合理匹配对于改善厂区内空气品质至关重要。以空气品质最差的脱水机房为例, 对传统的无组织渗风以及竖直管侧向离子风下不同风量进行数值模拟, 从速度场分布, 氨气敏感浓度面积占比, 工作区域平均空气龄, 以及通风除臭效果进行仿真分析。结果表明, 竖直管侧向送离子风比传统无组织渗风对改善脱水机房空气品质作用更显著, 提高排风风量和新风比可以有效降低室内恶臭浓度和提高排污效率, 并且提高新风比对提高排污效率的影响更为显著, 给工作人员提供更好的风感和更新鲜的空气。

关键词 脱水机房; 空气品质; 离子除臭; 数值模拟; 排污效率

当前, 随着城市化进程不断加快, 城市污水处理厂发挥着越来越重要的作用。由于城市地上空间资源有限, 以及城市居民对周边环境质量的要求越来越高, 地理式污水处理厂已成为城市发展需要的必然趋势。这样不仅可以避免城市地上空间的紧张, 又可以满足将污水处理厂布置在市区内部的规划, 处理后的水可以就地排放补充自然水体^[1-2]。在地理式污水处理厂中, 脱水机房由于使用离心脱水机对污泥进行浓缩脱水, 散发的恶臭气体较多, 是污水厂内空气质量最差的工作区域。

对于脱水机房, 为了保证恶臭气体不会逸散到外部空间造成更大的污染, 排风量要大于新风量, 保持脱水机房内部为负压状态。传统的通风形式仅仅依靠排风系统来保证脱水机房内部的负压状态, 从边界上的门对脱水机房补充新风, 有些采用轴流风机对脱水机房内部的空气进行强制扰动, 避免脱水机房的空气不流动成为“死气”, 然后通过排风系统将室内臭气抽走并进行除臭处理^[3-5]。传统的通风形式是将脱水机房整体作为考虑对象, 为了达到恶臭污染物厂界标准, 将整体的恶臭浓度降低到合适的水平所需的通风能耗相对较大。目前有些脱水机房开始采用竖直管侧向送新风与高能离子除臭^[6-7]相结合的送风形式, 这种对重点区域进行控制的局部控制策略不仅可以降低关键区域的恶臭浓度, 还可以在达到相同除臭效果时减少通风带来的能耗。但是关于脱水机房排风量和新风量的标准尚无明确规定, 张旭等^[8]针对室内设计新风量理论从多个方面比较和分析了国内外新风量标准及其体系的差异; 李荷萍等^[9]采用 CFD 技术研究新风量和不同通风系统对办公室内 CO₂ 排除效果的影响, 国内学者的研究主要侧重于新风量对建筑内气流组织和污染物浓度的影响。

收稿日期: 2017-11-08; 录用日期: 2018-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51778234); 广东省自然科学基金资助项目 (2015A030310303); 广东省省级科技计划项目 (2017A020216024); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (B6150170); 广东省能源高效清洁利用重点实验室 (华南理工大学) (2013A061401005)

对于地埋式污水处理厂, 厂区室内污染程度较高, 由于采用竖直管侧向送风与离子除臭相结合的送风方式, 通风系统的设计不仅要考虑新风量与排风量的选取, 还需考虑风量的匹配问题; 并且传统的排污效率仅仅只考虑了通风稀释对降低室内污染物浓度的效果^[10-11], 由于新风中带入的高能离子能与恶臭物质反应, 传统的排污效率难以对通风除臭效果进行评价。为此, 本研究针对传统整体控制的通风形式, 以及竖管侧向送风与高能离子除臭相结合的局部控制的通风形式, 通过 *Fluent* 软件对脱水机房模型进行模拟仿真, 分析传统的无组织渗风以及竖直管侧向离子风下不同风量对脱水机房内速度场、 NH_3 浓度和空气龄的影响, 并提出针对新风中带有离子的送风形式下对通风除臭效果的评价指标。

1 计算模型

1.1 几何模型

选取某地埋式污水处理厂污泥脱水机房为研究对象, 如图 1 所示, 脱水机房位于地下负 2 层, 几何尺寸为 $22.5\text{ m}\times 19.5\text{ m}\times 4.8\text{ m}$ 。脱水机房内部有 3 个料斗仓, 是机房恶臭的主要来源, 为了方便数值模拟仿真, 将脱水机房料斗仓简化为几何尺寸为 $1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}\times 0.8\text{ m}$ 的长方体, 脱水机房的体积为 $2\,064\text{ m}^3$, 由于对脱水机房进行本底浓度测试时和日常运行大部分时间内只有一个料斗仓处于工作状态, 因此, 在仿真时只保留其中一个料斗仓。

在料斗仓的附近有 4 根竖直管, 竖直管的截面是尺寸为 $0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ 的正方形, 竖直管底面离水平底面 0.3 m 。竖直管在靠近料斗仓的两侧各有一排开孔, 每排有 12 个直径为 40 mm 的圆形开孔, 每个开孔中心间距为 150 mm 。脱水机房的排风口均匀分布在其天花板上, 共有 4 个, 排风口为几何尺寸 $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 的方形风口。

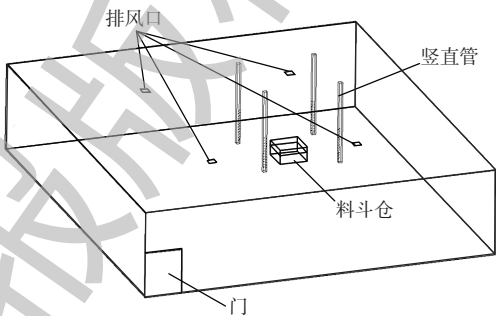


图 1 脱水机房几何模型
Fig. 1 Dewatering room geometric model

1.2 简化假设

- 为了简化数值仿真计算, 作出如下假设:
- 1) 由于脱水机房位于地下, 地下环境温度较为稳定, 假设脱水机房壁面上没有热量传递;
 - 2) 料斗仓散发出来的恶臭气体成分较为复杂, 主要包含 NH_3 、 H_2S 、挥发性有机化合物等, 其中 NH_3 可以用便携式仪器进行测量, 为了对恶臭气体的分布进行模拟, 将 NH_3 作为恶臭气体的示踪气体;
 - 3) 在数值模拟中脱水机房处于稳态, 各个边界参数不变;
 - 4) 通常离子发生器安装在新风管道内, 假定新风中离子的质量分数为定值;
 - 5) 将脱水机房料斗仓附近 2.5 m 范围内操作人员维护检修的区域定义为工作区域, 工作区域的体积为 75 m^3 。

1.3 数值模拟

利用 *ICEM CFD* 对脱水机房中的流体区域进行网格划分, 生成六面体结构化网格。为了使模拟计算的结果更加精确, 对料斗仓、排风口以及送风口处进行网格加密化处理, 如图 2 所示。最终得到的网格质量都在 0.6 以上 (数值越接近 1, 网格质量越高), 六面体网格总数量为 344 万个。对模型进行网格无关性检验, 最终确定得到的网格数量与模拟结果没有相关性。

在 Fluent 求解设置中, 湍流模型选用标准 $k-\varepsilon$ 模型, 差分格式选择二阶迎风格式, 选择 SIMPLE 算法。

脱水机房的排风量用排风换气次数间接表示, 为了研究在竖直面侧向离子风下排风量对室内空气品质的影响, 根据污水处理厂的运行经验和实测得到的数据, 分别取排风换气次数为 4、5、6 次 $\cdot \text{h}^{-1}$ 。由于脱水机房没有回风, 定义从竖直面送入的离子新风量与排风量的比值为离子新风比, 分别取离子新风比为 0% (即竖直面不送入新风)、60%、75%、90%, 新风与排风的风速参数如表 1 所示。根据实测数据, 假定新风中离子质量分数为 $9.3 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

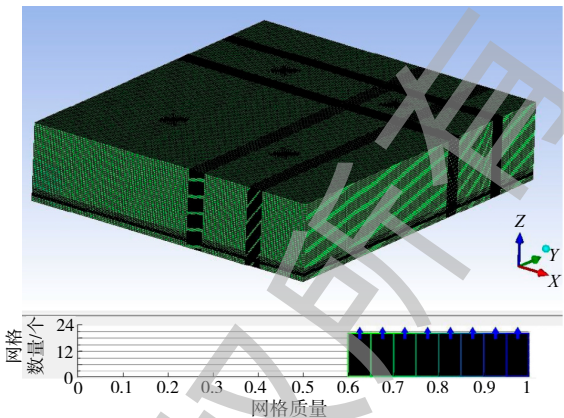


图 2 脱水机房网格及网格质量
Fig. 2 Dewatering room grid and grid quality

表 1 不同工况对应的排风和送风参数
Table 1 Exhaust and supply air parameters under different conditions

工况	排风换气次数/(次 $\cdot \text{h}^{-1}$)	排风风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	离子新风比/%	新风风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
4-0	4	3.58	0	0
4-60	4	3.58	60	8.60
4-75	4	3.58	75	10.75
4-90	4	3.58	90	12.90
5-0	5	4.48	0	0
5-60	5	4.48	60	10.75
5-75	5	4.48	75	13.44
5-90	5	4.48	90	16.12
6-0	6	5.37	0	0
6-60	6	5.37	60	12.90
6-75	6	5.37	75	16.12
6-90	6	5.37	90	19.35

2 仿真结果与分析

2.1 总风量与风量匹配对速度场的影响

为了直观地表现出数值模拟的结果, 选取人的呼吸高度 1.5 m ($z=1.5 \text{ m}$) 作为代表性平面。图 3、图 4 和图 5 分别为在排风换气次数为 4、5 和 6 次 $\cdot \text{h}^{-1}$ 下离子新风比分别为 0%、60%、75%、90% 时脱水机房内 1.5 m 高处的速度场。可以看出当离子新风比为 0% 即在无送风时, 气流从脱水机房的门里补充进来, 脱水机房内速度基本都低于 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 在料斗仓附近气流扰动很小。当离子新风比为 60%、75%、90% 时, 新风气流从每根竖直方管的两侧流进室内, 在料斗仓附近的 4 个竖直风管形成了一个“口”字型的风幕。竖直方管侧向送风对脱水机房内部气流的影响主要集中在料斗仓附近, 由于污水处理厂工作人员日常操作维护在料斗仓附近停留的时间最长, 脱水机房又处于地下负 2 层内相对密闭的空间, 竖直管侧向送风能为工作人员提供较好的风感和舒适度。

在排风换气次数相同时, 对比 3 种不同离子新风比 (图 3 (a)、3 (b)、3 (c), 图 4 (a)、4 (b)、4 (c) 和图 5 (a)、5 (b)、5 (c)) 可以看出, 在相同排风换气次数时, 提高离子新风比, 可以明显提高料斗口周围的风速, 为工作人员提供更好的风感; 在离子新风比相同时, 对比 3 种不同离子新风比 (图 3 (a)、4 (a)、5 (a), 图 3 (b)、4 (b)、5 (b) 和图 3 (c)、4 (c)、5 (c)) 可以看出, 在相

同离子新风比时，提高排风换气次数，同样可以提高料斗口周围的风速。

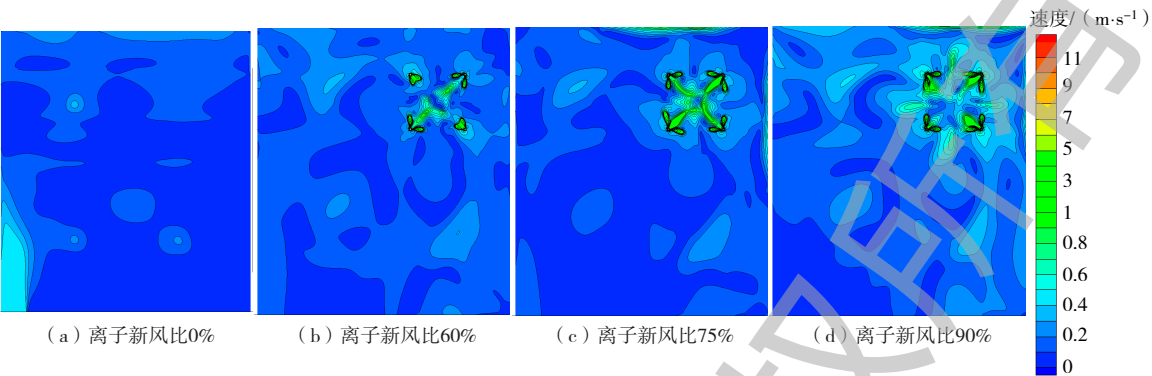


图 3 排风换气次数为 4 次 ·h⁻¹，不同离子新风比在 1.5 m 高平面的速度场
Fig. 3 Velocity field on plane of 1.5 meters under different ion new wind ratio when number of exhaust ventilation is 4 times per hour

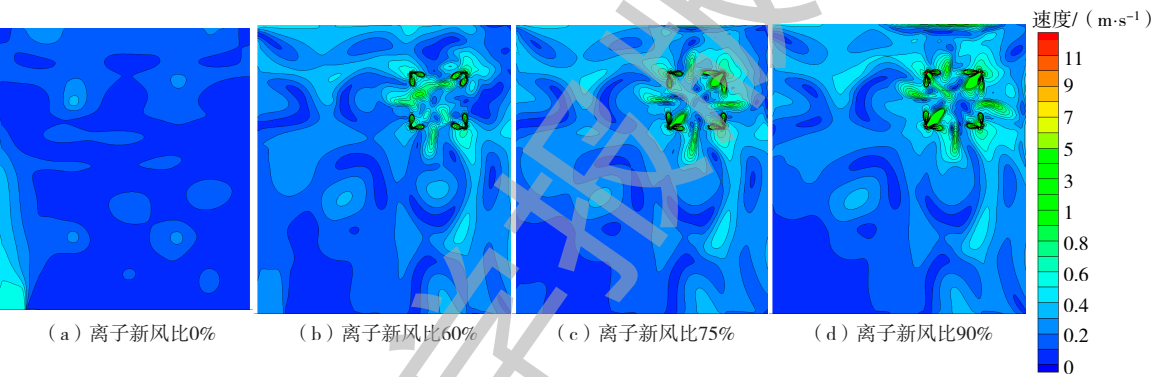


图 4 排风换气次数为 5 次 ·h⁻¹，不同离子新风比在 1.5 m 高平面的的速度场
Fig. 4 Velocity field on plane of 1.5 meters under different ion new wind ratio when number of exhaust ventilation is 5 times per hour

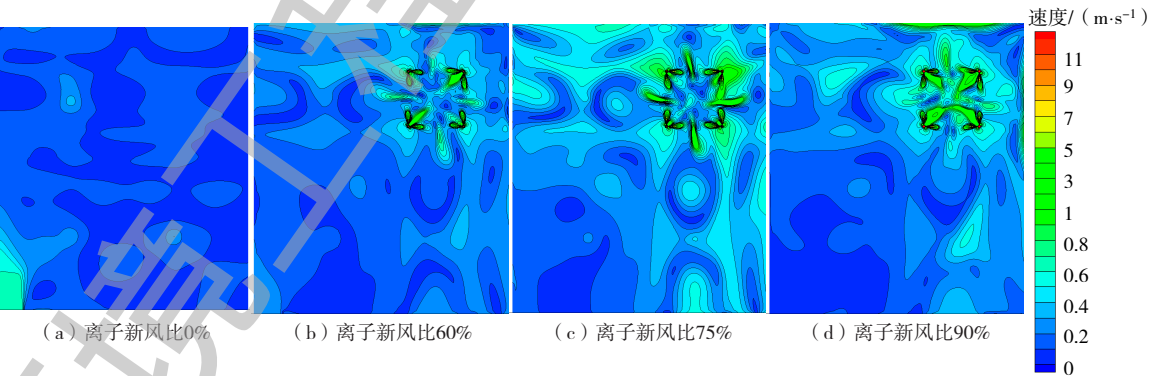


图 5 排风换气次数为 6 次 ·h⁻¹，不同离子新风比在 1.5 m 高平面的的速度场
Fig. 5 Velocity field on plane of 1.5 meters under different ion new wind ratio when number of exhaust ventilation is 6 times per hour

2.2 总风量与风量匹配对 NH₃ 浓度场的影响

竖直管侧向送入的离子风中带有的正氧离子，会与脱水机房中恶臭气体的多种成分发生氧化反应，以正氧离子与恶臭的代表气体 NH₃ 为例，会产生如下的氧化反应：

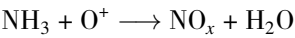


图 6、图 7 和图 8 分别为排风换气次数为 4、5 和 6 次 $\cdot h^{-1}$ 下离子新风比分别为 0%、60%、75%、90% 时脱水机房内 1.5 m 高处的 NH_3 浓度场。当没有离子新风时, NH_3 从料斗仓处向外扩散, 辐射半径较大, 由于从门处有气流补充进入室内, 越靠近门的区域 NH_3 浓度越低。当有离子新风时, 4 根竖直管侧向送风在料斗仓附近形成“口”字型的风幕, 加上新风中正氧离子与 NH_3 的氧化反应, 导致料斗仓附近的 NH_3 难以向外扩散, NH_3 被限制在“口”字型内较窄的区域里。

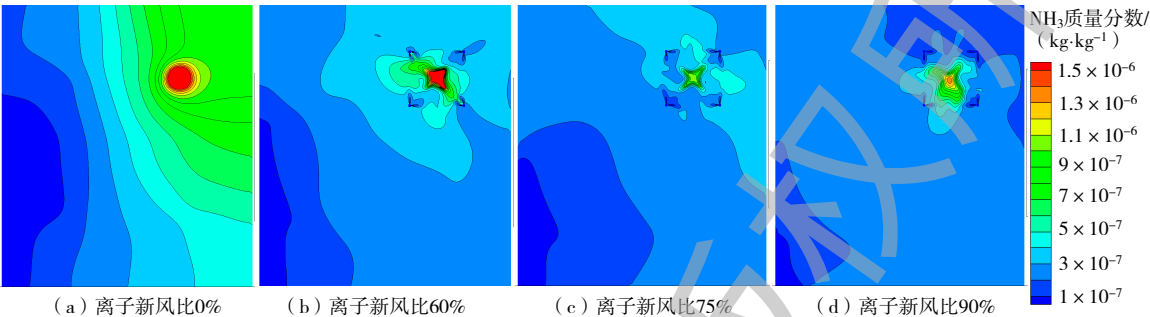


图 6 排风换气次数为 4 次 $\cdot h^{-1}$, 不同离子新风比在 1.5 m 高平面的 NH_3 浓度场
Fig. 6 NH_3 concentration field on plane of 1.5 meters under different ion new wind ratio when number of exhaust ventilation is 4 times per hour

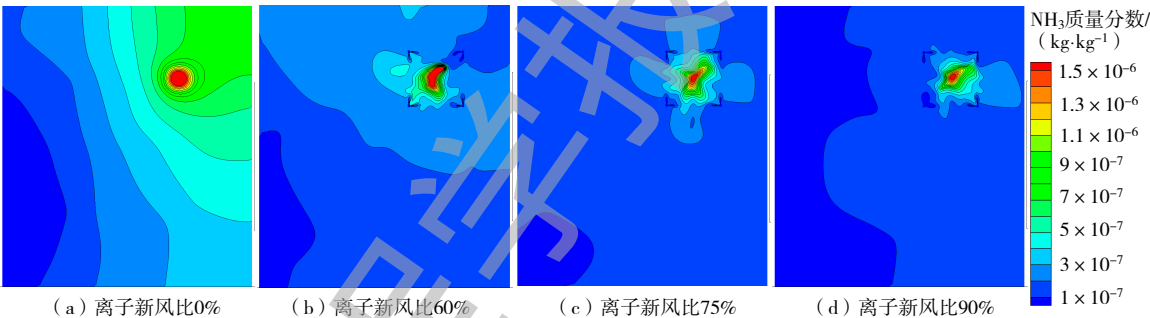


图 7 排风换气次数为 5 次 $\cdot h^{-1}$, 不同离子新风比在 1.5 m 高平面的 NH_3 浓度场
Fig. 7 NH_3 concentration field on plane of 1.5 meters under different ion new wind ratio when number of exhaust ventilation is 5 times per hour

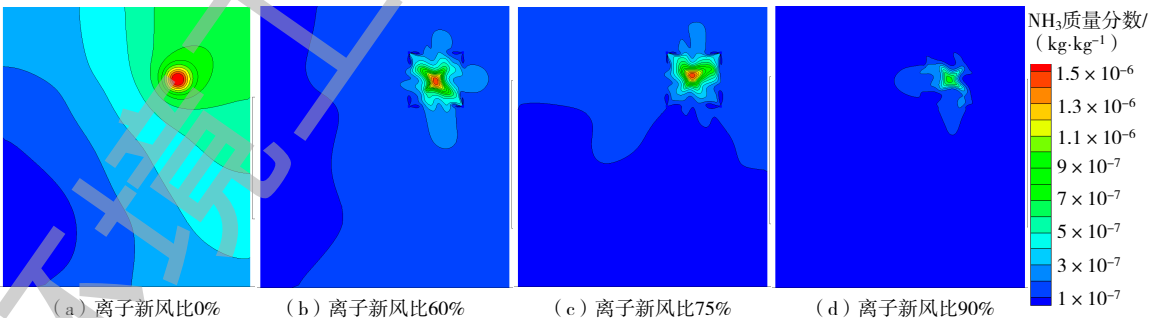


图 8 排风换气次数为 6 次 $\cdot h^{-1}$, 不同离子新风比在 1.5 m 高平面的 NH_3 浓度场
Fig. 8 NH_3 concentration field on plane of 1.5 meters under different ion new wind ratio when number of exhaust ventilation is 6 times per hour

图 9 是各种工况分别在 0.7、1.5 和 2.3 m 这三个不同高度的平面上高于某敏感浓度的区域面积占比, 其中氨气的敏感浓度取国家规定的 2 级臭气强度下对应的氨气浓度 $0.41 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。从图 9 可以看出, 相对于没有离子送风, 在 3 个不同水平高度上开启离子送风时高于氨气敏感浓度的区域面积时都要小很多。当排风换气次数为 $4 \text{ 次}\cdot\text{h}^{-1}$, 增大离子新风比, 高于氨气敏感浓度的区域面积减小的程度很明显, 面积占比平均减小 60% 左右; 而当排风换气次数为 $5 \text{ 次}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $6 \text{ 次}\cdot\text{h}^{-1}$, 高于氨气敏感浓度的区域面积减小的程度很小, 面积占比平均减小 28%。

2.3 总风量与风量匹配对空气龄的影响

空气龄于 20 世纪 80 年代提出, 是指空气从入口到达房间某一位置的时间, 反映了室内空气的新鲜程度。某点的空气龄越小, 说明该点的空气越新鲜, 空气品质就越好[12-14]。

之前空气龄的测定主要依靠示踪气体脉冲法、上升法、下降法, 实验较为繁琐, 测量精度要求很高。用 CFD 方法求解空气龄, 数值计算方法是根据示踪气体的质量守恒方程, 得到其质量浓度输运方程, 然后根据示踪气体法, 可以推导出空气龄的输运方程:

$$\begin{aligned} &\partial(\mu\tau_p)/\partial x + \partial(v\tau_p)/\partial y + \partial(\omega\tau_p)/\partial z = \\ &\partial(\Gamma\partial\tau_p/\partial x)/\partial x + \partial(\Gamma\partial\tau_p/\partial y)/\partial y + \partial(\Gamma\partial\tau_p/\partial z)/\partial z + 1 \end{aligned}$$

(1)

式中: μ 、 v 、 ω 为 x 、 y 、 z 的三个坐标轴方向的速度; Γ 为扩散系数。

从式 (1) 可以看出, 空气龄与流动和扩散系数有关。利用空气龄输运方程, 在 Fluent 中运用空气龄的 UDS 求解程序可以对空气龄进行求解。

图 10、图 11 和图 12 分别为在排风换气次数为 4、5 和 6 次 $\cdot\text{h}^{-1}$ 下离子新风比分别为 0%、60%、75%、90% 时脱水机房内 1.5 m 高处的空气龄分布。可以看出, 当没有离子新风时, 由于从门处有气流补充进入室内, 越靠近门的区域空气龄的数值越小, 空气越新鲜, 而料斗仓处于离门较远的地方, 空气龄较大。当有离子新风时, 料斗仓附近的竖离子管从管侧直接将新风送入室内, “口” 字型区域内的空气龄明显低于脱水机房内部其他空间, 料斗仓附近的空气新鲜程度更高, 对于排除料斗仓散发恶臭气体的能力更强, 工作人员在对料斗仓进行正常操作和维护时空气环境质量更高。

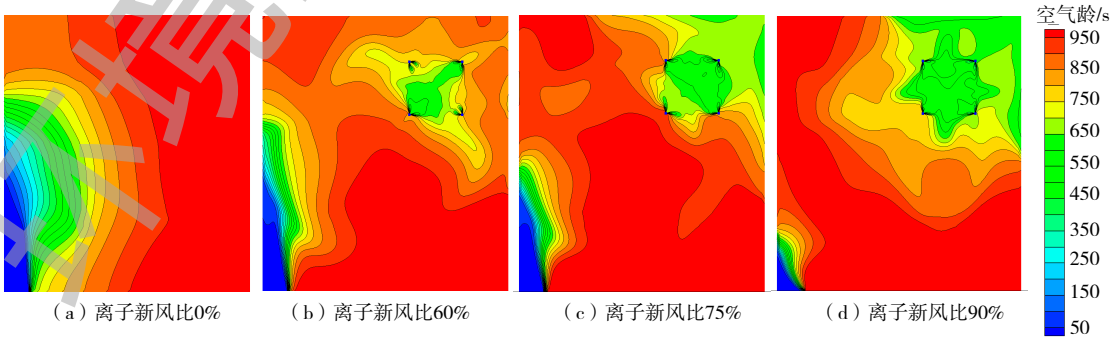


图 10 排风换气次数为 $4 \text{ 次}\cdot\text{h}^{-1}$, 不同离子新风比在 1.5 m 高平面的空气龄分布
Fig. 10 Air-age field on plane of 1.5 meters under different ion new wind ratio when number of exhaust ventilation is 4 times per hour

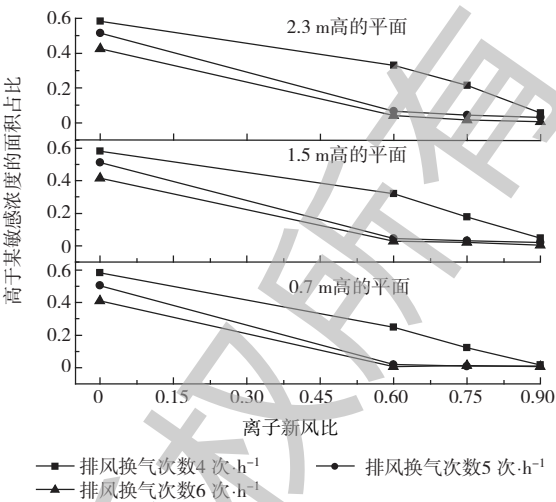


图 9 3 个高度平面上高于敏感浓度的区域面积占比
Fig. 9 Proportion of the area above the sensitive concentration in three height planes

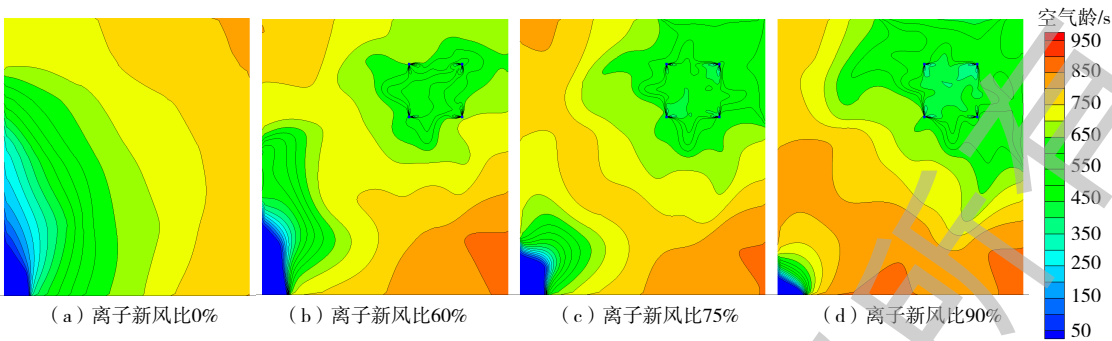


图 11 排风换气次数为 5 次·h⁻¹，不同离子新风比在 1.5 m 高平面的空气龄分布
Fig. 11 Air-age field on plane of 1.5 meters under different ion new wind ratio when number of exhaust ventilation is 5 times per hour

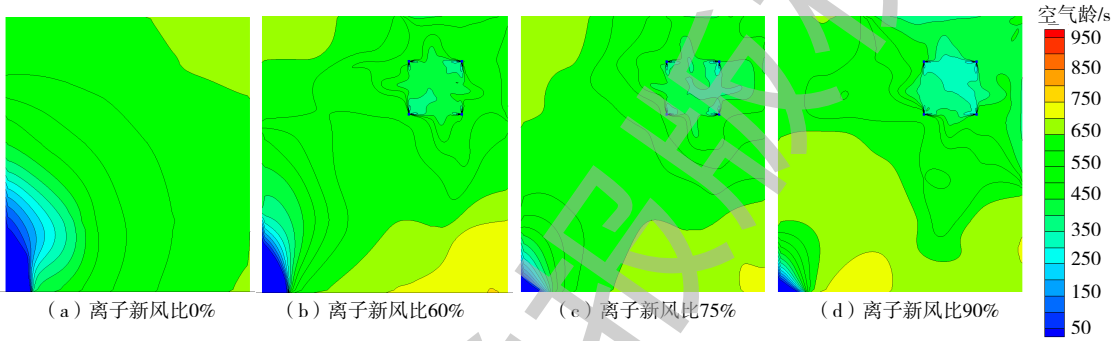


图 12 排风换气次数为 6 次·h⁻¹，不同离子新风比在 1.5 m 高平面的空气龄分布
Fig. 12 Air-age field on plane of 1.5 meters under different ion new wind ratio when number of exhaust ventilation is 6 times per hour

图 13 和图 14 分别为不同离子新风比和不同排风换气次数下工作区域的平均空气龄。从图 13 可以看出，在排风换气次数相同时离子新风比越大，工作区域内的平均空气龄越小，开启离子新风时离子新风比每提高 15%，工作区域平均空气龄平均减少 39 s。从图 14 可以看出，在离子新风比相同时排风换气次数越大，工作区域内的平均空气龄越小；开启离子新风时排风换气次数每提高一次，工作区域平均空气龄平均减少 103 s。

2.4 总风量与风量匹配对通风除臭效果的影响

通常用排污效率来反映通风对污染物的排除能力。排污效率的定义如下：

$$\varepsilon = (C_e - C_s) / (C_{pj} - C_s) \quad (2)$$

式中： C_e 为排风处的污染物浓度； C_s 为送风处的污染物浓度； C_{pj} 为全局污染物的平均浓度。

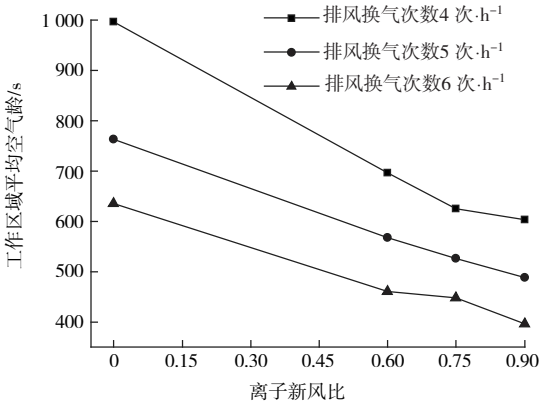


图 13 不同离子新风比下工作区平均空气龄
Fig. 13 Working area average air age under different ion new wind ratio

通用的排污效率是在单纯考虑由通风稀释室内污染物,再由排风带走污染物,从而降低室内污染物浓度的基础上定义而得。对于送入离子新风的通风系统,通用排污效率的定义不能很好地说明离子除臭对污染物的去除作用,当新风中离子除臭作用使室内污染物浓度降低到很低的水平,除臭排污效果很好,此时通用的排污效率计算结果却可能很低。因此,在此引入针对带有离子新风的通风系统的除臭排污效率,定义如下:

$$\epsilon_{\Delta} = [(C_e - C_s) + C_{\Delta}] / (C_{pj} - C_s) \tag{3}$$

式中: C_{Δ} 为新风中带入的高能离子通过化学反应消耗掉的污染物浓度。

由于新风口是直接从外部引入新风,不掺杂污染物在内,送风处的污染物浓度为0。因此,排污效率可以简化为:

$$\epsilon_{\Delta} = (C_e + C_{\Delta}) / C_{pj} \tag{4}$$

已知竖直管送入的新风量,和新风中正氧离子的质量分数,可得新风中含有的正氧离子量。根据正氧离子与 NH_3 的强氧化反应的化学方程式,可以得到由于氧化反应消耗掉的 NH_3 浓度。

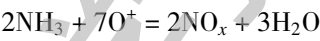


表 2 为不同工况下所有排风口和脱水机房整体的 NH_3 平均质量浓度,以及通过计算新风中氧离子的量和化学方程式得到的由于氧化反应消耗掉的 NH_3 平均质量浓度。可以看出,随着排风换气次数和离子新风比的增加,所有排风口和脱水机房整体 NH_3 平均质量浓度不断降低。

表 2 不同工况下 NH_3 平均质量浓度
Table 2 NH_3 average mass concentration under different conditions

采样位置	不同工况												mg·m ⁻³
	4-0	4-60	4-75	4-90	5-0	5-60	5-75	5-90	6-0	6-60	6-75	6-90	
所有排风口	0.579	0.402	0.351	0.300	0.463	0.280	0.231	0.174	0.386	0.198	0.151	0.098	
脱水机房整体	0.517	0.332	0.311	0.274	0.415	0.240	0.200	0.151	0.356	0.169	0.138	0.077	
氧化反应消耗	0	0.191	0.239	0.287	0	0.191	0.239	0.287	0	0.191	0.239	0.287	

图 15 是根据传统的排污效率以及新定义的除臭排污效率的定义,利用表 2 中脱水机房整体和排风口的 NH_3 平均浓度,以及由于氧化反应消耗掉的 NH_3 平均浓度计算得出的 2 种排污效率。从脱水机房整体和排风口的 NH_3 平均浓度考虑,随着排风换气次数和离子新风比的改变,排污效率应该有较大差别。但是从图 15 可以看出,传统的排污效率的变化不大,这表明排污效率传统的定义不适用于离子送风系统;而随着排风换气次数和离子新风比的增加,除臭排污效率不断增大,这是因为除臭排污效率综合考虑了通风稀释和离子除臭对室内污染物的排除作用。因此,相对于传统的排污效率,除臭排污效率能够更好地说明带有离子新风的通风排污效果。

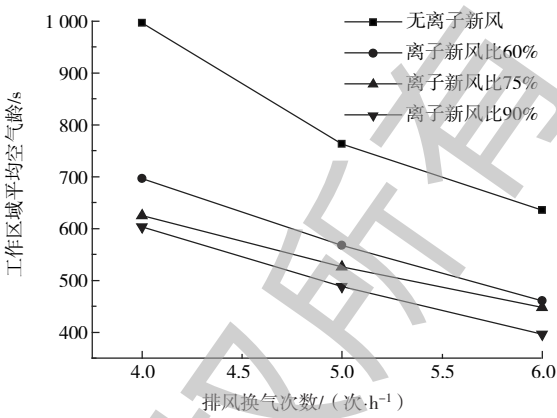


图 14 不同换气次数下工作区平均空气龄
Fig. 14 Working area average air age under different air change frequency

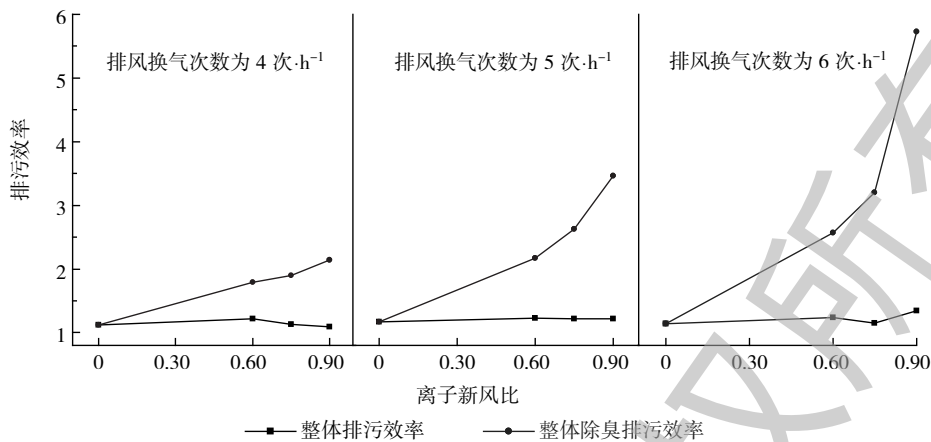


图 15 不同离子新风比时 2 种排污效率
Fig. 15 Two kinds of contaminant removal efficiency under different ion new wind ratio

表 3 是对脱水机房的除臭排污效率进行的双因素的方差分析, 对于给出的 $\alpha=0.1$, 查表得出 $F_{0.1}(2, 4)=4.32$ 。由于 $F_1=4.995>4.32$, $F_2=1.960<4.32$, 说明离子新风比对除臭排污效率有显著影响, 而排风换气次数对除臭排污效率的影响相对较小。

表 3 除臭排污效率方差分析
Table 3 Variance analysis of deodorization and contaminant removal efficiency

指标及统计值	平方和	自由度	均方	F 比 ($\alpha=0.1$)
离子新风比	7.793	2	3.896	4.995
排风换气次数	3.058	2	1.529	1.960
误差 E	3.120	4	0.780	—
总和 T	1.615	8	—	—

常用房间新风量 (即名义通风量) 来描述从外界进入房间的总空气流量。但是实际上室内的气流往往难以达到均匀混合的程度, 名义通风量不能考虑气流组织对换气或者排污的影响, 无法对房间整体的通风效果进行评价, 因此, 用有效通风量综合考虑名义通风量和气流组织对通风效果的影响^[15]。有效通风量 Q_e 的定义如下:

$$Q_e = N_e V = 3\,600V / \bar{\tau} \quad (5)$$

式中: Q_e 为有效通风量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; V 为房间体积, m^3 ; N_e 为有效换气次数, $\text{次} \cdot \text{h}^{-1}$; $\bar{\tau}$ 为房间的体平均空气龄, s 。

已知工作区域的体积和平均空气龄, 可以计算工作区域的有效换气次数和有效通风量, 不同离子新风比和不同排风换气次数下工作区域的有效通风量如图 16 和图 17 所示。

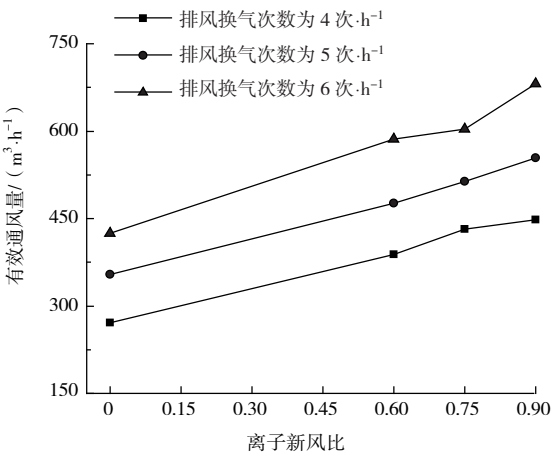


图 16 不同离子新风比下工作区有效通风量
Fig. 16 Working area effective ventilation under different ion new wind ratio

从图 16 可以看出, 在排风换气次数相同时离子新风比越大, 工作区域内的有效风量越大, 开启离子新风时离子新风比每提高 15%, 工作区域内有效风量平均增加 $39\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 。从图 17 可以看出, 在离子新风比相同时排风换气次数越大, 工作区域内的有效风量越大; 开启离子新风时排风换气次数每增加一次, 工作区域内有效风量平均增加 $101\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 。

2.5 离子浓度对通风除臭效果的影响

为了研究不同离子浓度对脱水机房内部通风除臭效果的影响, 取排风换气次数为 $5\text{ 次}\cdot\text{h}^{-1}$, 新风中离子质量分数分别取 9.3×10^{-8} 、 5.1×10^{-7} 和 $9.3\times10^{-7}\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 等 3 个不同的水平进行数值仿真。

图 18 和图 19 为排风换气次数为 $5\text{ 次}\cdot\text{h}^{-1}$, 新风中离子质量分数分别为 9.3×10^{-8} 、 5.1×10^{-7} 和 $9.3\times10^{-7}\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时脱水机房内 1.5 m 平面上高于某敏感浓度的区域面积占比和整体 NH_3 平均浓度随离子新风比的变化曲线。当离子质量分数为 5.1×10^{-7} 和 $9.3\times10^{-7}\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 高于敏感浓度的区域面积占比随离子新风比的增加而减小, 整体 NH_3 平均浓度也随着离子新风比的增加而减小。但是当离子质量分数为 $9.3\times10^{-8}\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 随着离子新风比的增加, 高于敏感浓度的区域面积占比随之有所增加, 整体 NH_3 平均浓度基本保持不变。这是因为当离子质量分数太小时, 竖直管送入的离子风对料斗仓散发的 NH_3 去除量较小, 此时增加新风比不但会减弱离子风的除臭能力, 还会在料斗仓附近形成强扰动, 导致 NH_3 从料斗仓向脱水机房其他区域的迁移量增大。

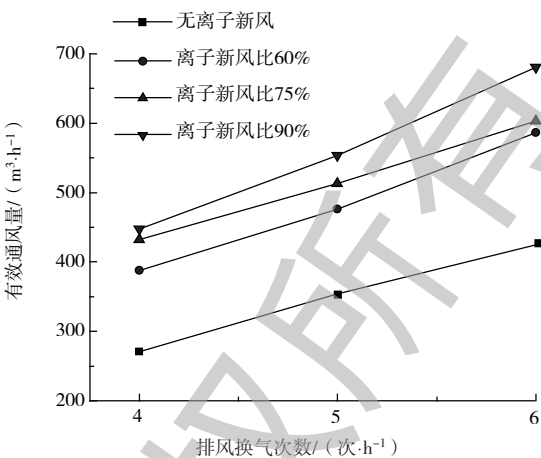


图 17 不同排风换气次数下工作区有效通风量
Fig. 17 Working area effective ventilation under different air change frequency

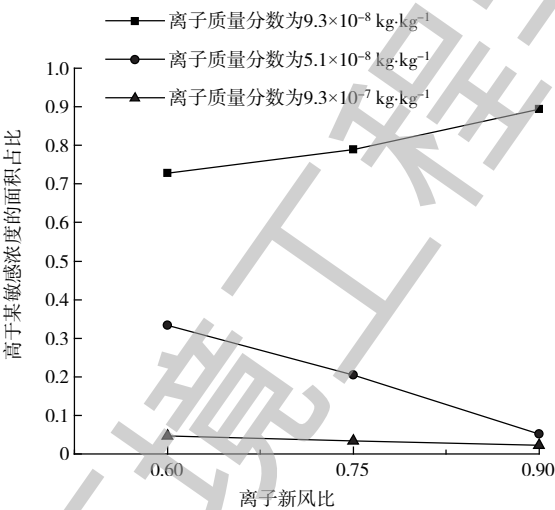


图 18 1.5 m 平面高于敏感浓度的区域面积占比
Fig. 18 Proportion of area above sensitive concentration on plane of 1.5 meters

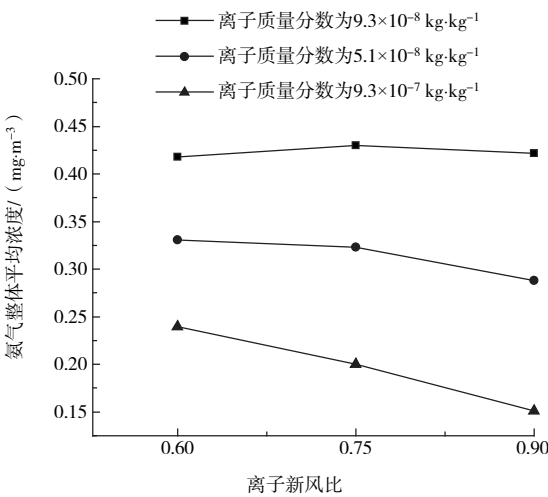


图 19 不同离子新风比下整体 NH_3 平均浓度
Fig. 19 Overall average NH_3 concentration under different ion new wind ratio

图 20 和图 21 分别为整体除臭排污效率随离子新风比和离子质量分数的变化曲线。可以看出, 随着离子新风比的增加, 离子质量分数越大时整体除臭排污效率增加的趋势越显著, 离子质量分数越小时整体除臭排污效率增加的趋势越不明显; 整体除臭排污效率与离子质量分数呈正相关, 整体除臭排污效率随着离子质量分数增大而增大。

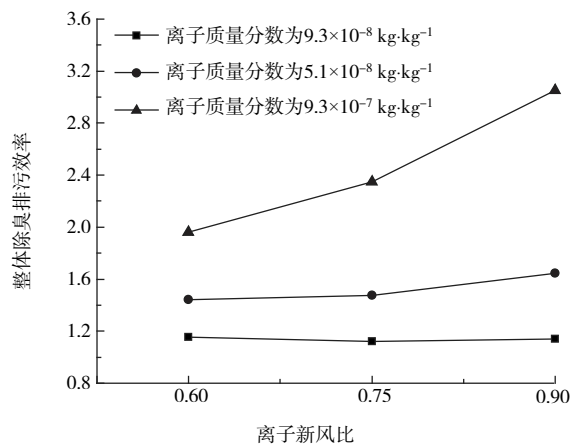


图 20 不同离子新风比下整体除臭排污效率
Fig. 20 Overall deodorization and contaminant removal efficiency under different ion new wind ratio

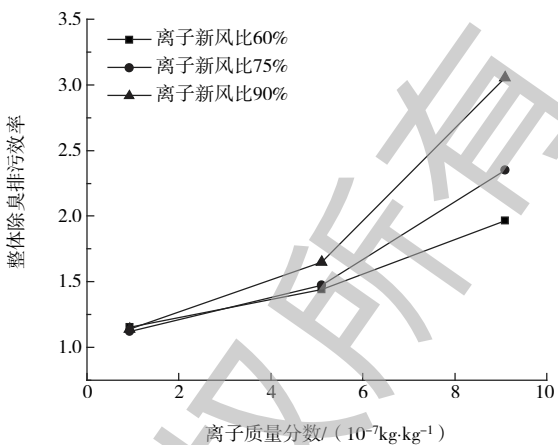


图 21 不同离子质量分数下整体除臭排污效率
Fig. 21 Overall deodorization and contaminant removal efficiency under different ion mass fraction

3 结论

- 1) 相对于传统排污效率的定义，综合考虑了离子除臭和通风稀释的除臭排污效率能够更好地对通风系统的除臭排污效果进行评价。
- 2) 在地理式污水处理厂内，传统的通风模式对室内整体和局部的空气品质很不利。传统通风模式下，脱水机房整体的除臭排污效率最高仅为 1.12；开启离子新风后，整体除臭排污效率最低为 1.79，最高可达 4.97，室内 NH_3 浓度平均下降 51%，工作区域的平均空气龄平均减少 33%，工作人员迎面空气更新鲜，恶臭刺激更小。
- 3) 排风换气次数相同时离子新风比每提高 15%，工作区域的 NH_3 浓度平均减少 20%，空气龄平均减少 7%，有效风量增加 8%；离子新风比相同时排风换气次数每增加 1 次，工作区域的 NH_3 浓度平均减少 24%，空气龄平均减少 18%，有效风量增加 21%；但是从排污效率的角度考虑，提高离子新风比比提高排风换气次数对除臭排污效率的影响更显著。
- 4) 整体除臭排污效率与离子质量分数呈正相关，脱水机房新风中离子质量分数的选取不宜过小，过小时增加新风比会降低通风除臭效果。

参考文献

[1] 段寒涛. 地理式污水处理厂技术及应用前景分析 [J]. 中国新技术新产品, 2017(10):97-98. DOI:10.3969/j.issn.1673-9957.2017.10.061.

[2] 牛超, 陶飞, 明皓. 浅谈我国地下污水处理厂的发展现状及前景 [J]. 才智, 2016(4):259.

[3] 杨鑫, 祝双燕, 涂小平, 等. 城镇污水处理过程中的通风除臭方法和设计 [J]. 甘肃科技, 2016, 32(17):66-67. DOI:10.3969/j.issn.1000-0952.2016.17.023.

[4] CAPELLI L, SIRONI S, ROSSO R D, et al. Predicting odour emissions from wastewater treatment plants by means of odour emission factors [J]. Water Research, 2009, 43(7):1977-1985. DOI:10.1016/j.watres.2009.01.022.

[5] 杨婧. 浅析城镇污水处理厂通风系统设计 [J]. 甘肃科技, 2017, 33(7):90-91. DOI:10.3969/j.issn.1000-0952.2017.07.029.

[6] 潘建华. 高能离子除臭工艺在广州猎德污水处理厂的应用 [J]. 中国市政工程, 2013(1):32-33.

[7] 江燕. 氧离子法除臭技术及其运用 [J]. 科技与企业, 2012(1):160-161.

[8] 张旭, 周翔, 王军. 民用建筑室内设计新风量研究 [J]. 暖通空调, 2012, 42(7):27-32. DOI:10.3969/j.issn.1002-8501.2012.07.005.

[9] 李荷萍, 钟珂. 新风量和气流组织形式对室内污染物排除效果的影响 [J]. 洁净与空调技术, 2007(1):18-21.

- [10] 凌继红, 于会洋, 李猛, 等. 气流组织对负压隔离病房排污效率的影响[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014, 47(2): 174-179. DOI:10.11784/j.tdxzb.201206039.
- [11] 李强民, 邓伟鹏. 排除人员活动区内人体释放污染物的有效通风方式: 置换通风[J]. 暖通空调, 2004, 34(2): 1-4.
- [12] 李冬宁, 李先庭, 窦春鹏. 实际空调系统中空气龄的计算方法[C]//中国建筑学会和中国制冷学会. 全国暖通空调制冷 2002 年学术文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 81-87.
- [13] TIAN L, LIN Z, LIU J, et al. The impact of temperature on mean local air age and thermal comfort in a stratum ventilated office[J]. Building & Environment, 2011, 46(2): 501-510. DOI:10.1016/j.buildenv.2010.08.013.
- [14] 苏新明, 王晶, 李西园, 等. 载人航天器乘员舱空气龄分布数值仿真及试验研究[J]. 航天器工程, 2014, 23(2): 80-86. DOI:10.3969/j.issn.1673-8748.2014.02.013.
- [15] 蒋选, 李先庭, 邵晓亮, 等. 局部纯净风量的物理意义、获取方法及应用场合[J]. 暖通空调, 2014, 44(7): 86-92.

(本文责任编辑: 郑晓梅)

Ventilation and deodorizing effect of vertical ionizing air duct in dewatering room under different air supply volume and exhaust volume

CHEN Siwei, LIU Xuefeng*, YANG Peng

School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China

Abstract Taking the ventilation and blowdown system of buried water treatment plant as the research object, foul gas produced by sewage treatment seriously affects indoor and outdoor environment. The reasonable matching of exhaust air volume and air supply volume in the ventilation system is essential for the improvement of air quality inside the plant area. Take the dewatering room which has the worst air quality as an example, numerical simulation of the traditional air supply model and the situation of different air flow within the ion wind from the sides of vertical tubes were made. And simulation analysis was made from the perspective of velocity field distribution, area ratio of ammonia sensitive concentration, mean air age in the work area, and ventilation deodorization effect. The results showed that relative to the traditional air supply mode, the effect of the composite air supply mode on the improvement of the air quality of the dewatering room can be more significant. Increasing the exhaust air volume and the fresh air ratio can effectively reduce the indoor odor concentration and improve the contaminant removal efficiency. Improving fresh air ratio can have a more significant impact on improving the contaminant removal efficiency, and it can give the staff a better sense of wind and fresh air.

Key words dewatering room; air quality; ion deodorization; numerical simulation; contaminant removal efficiency