



DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.14.009

设计经验

水质净化厂供氧系统配置优化计算

杨晓辉¹, 丁纯健², 赵文秀¹, 陈旺源³

(1. 上实环境水务股份有限公司, 山东 潍坊 261000; 2. 上海实业环境控股有限公司, 上海 240000; 3. 上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘要: 随着水质净化厂处理标准的逐步提高,对净水厂的建设和运行水平提出了稳定、低碳和节能等要求。精准供氧已成为净水厂建造时的常规配置,为保证充分发挥其作用,需对净水厂的水量、水质变化进行估计,并采取适当的供氧设备配置。某水质净化厂采用全地埋式设计,主要出水指标执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)准Ⅲ类标准。生物反应池配置鼓风机曝气和富氧曝气,两套曝气设备相互联动调整,实现精准供氧。通过设计优化,制氧机配置由3台(170 m³/h)调整为近期2台(80 m³/h)加1台(160 m³/h),远期3台(160 m³/h);鼓风机细化选型后实现了运行工况范围内风量的连续衔接,说明了预估计算的必要性。

关键词: 水质净化厂; 供氧系统; 配置优化; 富氧曝气; 鼓风机曝气

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)14-0051-06

Optimized Calculation of Oxygen Supply System Configuration in a Water Purification Plant

YANG Xiao-hui¹, DING Chun-jian², ZHAO Wen-xiu¹, CHEN Wang-yuan³

(1. Shangshi Environment Water Co. Ltd., Weifang 261000, China; 2. SHC Environment Holdings Ltd., Shanghai 240000, China; 3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: With the gradual improvement of water purification plant discharge standards, there is a growing demand for stability, low carbon emissions, and energy efficiency in the construction and operation of such facilities. Accurate oxygen supply has become a standard feature in the construction of water purification plants. In order to fully utilize its function, it is essential to assess the changes in water quantity and quality of water purification plants, and implement appropriate oxygen supply equipment configurations. A water purification plant is designed with an underground layout, and the primary effluent indexes need to comply with the quasi-III class limits specified in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). The biological reaction tank is equipped with blast aeration and oxygen-enriched aeration. The two sets of aeration equipment were adjusted in tandem to achieve accurate oxygen supply. Through optimization, the configuration of the oxygen generator was adjusted from 3 sets with aeration intensity of 170 m³/h to 2 sets with aeration intensity of 80 m³/h plus 1 set with aeration intensity of 160 m³/h in the near future, and eventually to 3 sets with aeration intensity of 160 m³/h in future. After carefully selecting the blower, it was essential to establish a continuous connection of the air volume within the range of operating conditions. It highlighted the importance of pre-estimation in

ensuring smooth and efficient operation.

Key words: water purification plant; oxygen supply system; configuration optimization; oxygen-enriched aeration; blast aeration

1 项目简介

某水质净化厂位于河网地区,采用全地埋式设计,近期设计规模为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,变化系数 1.74。远期设计规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,变化系数 1.58。土建按远期规模一次性建成,设备按近期规模配置。该项目所在地区属于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) II 类水的保护区,主要出水指标执行地表水准 III 类标准。

设计进、出水水质见表 1。

表 1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

指标	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD ₅ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN(以 N 计)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	NH ₃ -N (以 N 计)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP(以 P 计)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	粪大肠 菌群数/ ($\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$)
设计进 水水质	350	180	250	45	35	5	$\leq 10^6$
设计出 水水质	≤ 20	≤ 4	≤ 5	$\leq 10(12)$	$\leq 1.0(1.5)$	≤ 0.2	$\leq 1\ 000$

注: 括号内为水温 $\leq 12 \text{ }^\circ\text{C}$ 时执行的标准。

该水质净化厂污水处理工艺流程如图 1 所示。

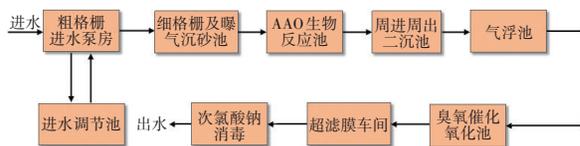


图 1 水质净化厂污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of sewage treatment process of the water purification plant

采用空气制氧+臭氧发生器设备为臭氧催化氧化池提供臭氧(考虑地面布置的美观性,并受安全距离限制,未选用液氧站),制氧机产生的氧气可同时输送到生物反应池^[1]。生物反应池的鼓风曝气和制氧机富余氧气(以下简称富氧)曝气需相互联动调整,以实现精准供氧。系统供氧流程见图 2。

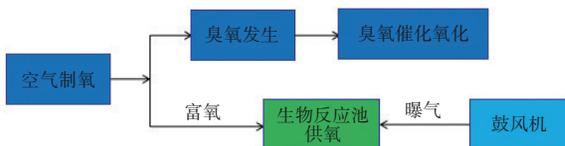


图 2 系统供氧流程

Fig.2 System oxygen supply process

2 供氧系统特点

① 曝气供氧结合模式

富氧量根据催化氧化的需求而变化,在进水污染物浓度较低时,臭氧催化氧化段无需投加臭氧,该工况下制氧机停止工作,富氧量为零。因此,制氧机富氧曝气和鼓风机曝气运行需联动调节,同时,鼓风曝气量需考虑无富氧时的风量配置。

生物反应池的富氧供氧设备采用射流曝气,且需考虑必要的搅拌功能。富氧射流曝气与鼓风机的曝气盘曝气可分别独立运行,因此在富氧量充足时,富氧曝气区域可停止鼓风机曝气。

② 项目运行前期,可能需低水量运行

该项目投运初期相邻地区管网接入可能滞后,结合工程可研设计及现状管网内水量情况,初步判断投运初期水量约 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 或者略低。

③ 进水水质有一定波动

该项目近期设计水量变化系数为 1.74,其数值较大,受气候、水量等影响,进水水质会有一定幅度的波动^[2]。

3 供氧系统配置及复核

3.1 初始方案(优化前方案)

① 制氧机配置

因项目平面布置原因,制氧车间面积较小,仅能布置 3 台制氧机,为保证远期供氧量,按照远期水量、水质计算,配置制氧机参数。设计制氧机共 3 台,单台风量为 $170 \text{ m}^3/\text{h}$,2 用 1 备。制氧供风机等无变频,风量不可调。

② 臭氧发生器配置

设计臭氧发生器的臭氧额定产量为 $10 \text{ kg}/\text{h}$,近期 3 台,2 用 1 备(峰值时 3 台全用),远期增设 3 台。单台臭氧发生量调节范围为 30%~100%。

③ 鼓风机配置

设计风机 3 大 1 小,1 台大风机备用。大风机单台 $Q=3\ 000 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $P=100 \text{ kPa}$,小风机单台 $Q=1\ 560 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $P=98 \text{ kPa}$ 。

3.2 边界条件的设定

结合项目特点及周边环境,对该水质净化厂未

来运行的状况进行预估,设定边界条件。

① 水量

水量以 $(1\sim 2.5)\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 作为边界条件。

② 供气量

因富氧量根据催化氧化的需求而变化,鼓风机风量需满足没有富氧情况下的供氧量。

以项目设计气水比4:1为基础,考虑水量、水质的变化,结合同地区市政水质净化厂实际运行参数,供气量按照2:1、4:1、6:1、8:1进行配置优化,基本可覆盖净水厂的运行工况。因实际8:1气水比与设计4:1气水比的比值已超过水量变化系数(1.74),并且净水厂在进水量峰值期的进水污染物浓度一般较低,故供气量估算不再考虑水量变化系数。

③ 催化氧化臭氧量

以设计催化氧化段最大去除COD为12 mg/L,臭氧投加量与COD去除量比值1.3:1为基础,臭氧量按照COD去除量为4、8、12、16 mg/L进行配置优化。考虑COD去除率越高,臭氧单耗量越高^[3],臭氧量与COD去除量比值取 $(1.3\sim 1.5):1$;当COD去除量为4 mg/L时,取1.3;当COD去除量为8、12 mg/L时,取1.4;当COD去除量为16 mg/L时,取1.5。

④ 大小鼓风机配置宜选用同一厂家产品

精准曝气系统通过鼓风机主控柜(MCP)实现对风机台数、风量的运行调节,不同厂家的产品很难整合到同一组MCP柜进行控制。目前,市场上精确曝气系统与多组MCP柜的对接技术尚不成熟,精确曝气系统更倾向与1组MCP柜进行对接控制,而同

一品牌供货的风机在后期运行稳定性及维修维护的便捷性等方面也具有优势。因此,大小鼓风机配置宜选用同一厂家产品。

3.3 复核计算

对设计初始方案进行复核,过程如下:

① 单独鼓风机曝气风量计算(无富氧曝气)

单独鼓风机曝气风量计算见表2。

表2 鼓风机风量计算

Tab.2 Calculation of blower air volume

项目	鼓风机风量/($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)			
	$1\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$	$1.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$	$2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$	$2.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$
气水比2:1	833	1 250	1 667	2 083
气水比4:1	1 667	2 500	3 333	4 167
气水比6:1	2 500	3 750	5 000	6 250
气水比8:1	3 333	5 000	6 667	8 333

从计算结果看,若无富氧曝气,则风机风量范围需为833~8 333 m^3/h 。

② 单独臭氧发生器需氧量计算

按照近期臭氧发生器配置,最低臭氧产量为3 kg/h,正常最大臭氧产量为20 kg/h,峰值时3台设备全开,臭氧产量为30 kg/h。当前国产主流臭氧发生器生产1 kg臭氧与氧气的体积比约1:7.5,若只考虑臭氧发生器需氧,制氧机的最低制氧量为22.5 m^3/h ,正常最大制氧量为150 m^3/h ,峰值制氧量可达225 m^3/h 。

③ 制氧机工作后富氧量计算

制氧机工作后富氧量计算见表3。

表3 制氧机工作后富氧量计算

Tab.3 Calculation of excess oxygen after operation of oxygen generator

项目	催化氧化段臭氧需求量/($\text{kgO}_3\cdot\text{h}^{-1}$)				催化氧化段氧气需求量/($\text{m}^3\text{O}_2\cdot\text{h}^{-1}$)				制氧机富氧量(运行1~2台)/($\text{m}^3\text{O}_2\cdot\text{h}^{-1}$)			
	$1\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$	$1.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$	$2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$	$2.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$	$1\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$	$1.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$	$2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$	$2.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$	$1\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$	$1.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$	$2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$	$2.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$
COD去除量为4 mg/L	2.17	3.25	4.33	5.42	16.28	24.38	32.48	40.65	153.72	145.62	137.52	129.35
COD去除量为8 mg/L	4.67	7.00	9.33	11.67	35.03	52.50	69.98	87.53	134.97	117.50	100.02	82.47
COD去除量为12 mg/L	7.00	10.50	14.00	17.50	52.50	78.75	105.00	131.25	117.50	91.25	65.00	38.75
COD去除量为16 mg/L	10.00	15.00	20.00	25.00	75.00	112.50	150.00	187.50	95.00	57.50	20.00	152.50*

注: *表示制氧机开启2台,其他数值对应制氧机开启1台。

将氧气量转换为鼓风机曝气量,参数取值如表4所示。

富氧通过射流器曝气,射流器的氧转移率为80%~90%,取85%。鼓风机曝气采用盘式膜片曝气器,当曝气器供气量为 $3.9\text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{个})$ 时,清水中

氧转移率为35%,考虑活性污泥中氧转移率低于清水,故取25%。

根据表4计算结果,鼓风机曝气需风量与空气制出氧气量的体积比值为 $19.048/1.307=14.6$,据此可算出制氧机富氧量转化为鼓风机曝气空气量的参

数,结果如表 5 所示。

表 4 氧气量转换为鼓风机曝气量的参数

Tab.4 Parameters for converting oxygen quantity into blower aeration quantity

项目	需纯氧量为 1 m ³ /h	
	空气制氧	风机鼓风
氧气浓度/%	90	21
氧转移率 ¹⁴ /%	85	25
风机需风量/(m ³ ·h ⁻¹)		19.048
制氧量/(m ³ ·h ⁻¹)	1.307	

表 5 制氧机富氧量转化为鼓风机曝气空气量的参数

Tab.5 Parameters for converting excess oxygen of the oxygen concentrator into blower aeration quantity

项目	制氧机富氧量(运行 1~2 台)/(m ³ O ₂ ·h ⁻¹)				制氧机富氧量转成空气量/(m ³ 空气·h ⁻¹)			
	1×10 ⁴ m ³ /d	1.5×10 ⁴ m ³ /d	2×10 ⁴ m ³ /d	2.5×10 ⁴ m ³ /d	1×10 ⁴ m ³ /d	1.5×10 ⁴ m ³ /d	2×10 ⁴ m ³ /d	2.5×10 ⁴ m ³ /d
COD 去除量/(mg·L ⁻¹)	4	8	12	16	4	8	12	16
153.72	134.97	117.50	100.02	82.47	2 244	1 971	1 716	1 460
145.62	117.50	100.02	82.47	65.00	2 126	1 716	1 460	1 204
137.52	117.50	91.25	65.00	38.75	2 008	1 332	949	566
129.35	95.00	57.50	20.00	152.50	1 387	840	292	2 227

④ 鼓风曝气与富氧曝气结合

制氧机富氧进入生物系统后,鼓风机供风量需相应减少,否则将导致曝气过量。当进水量为(1~2.5)×10⁴ m³/d时,生物反应池需风量与由制氧机富氧量转化所得供风量的关系见图 3。

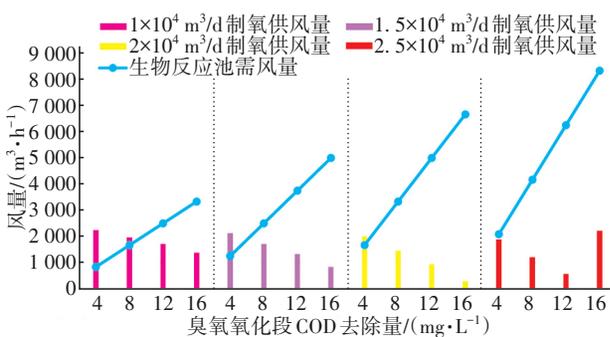


图 3 生物反应池需风量与制氧供风量的关系(初始方案)

Fig.3 Relationship between the required air volume of bio-reaction tank and the amount of air supply oxygen by concentrator (original plan)

若制氧供风量>生物反应池需风量,表示风量富余,即便生物反应池的鼓风机全关,制氧系统仍有富余氧气需排空,否则会造成过量曝气。因生物反应池配备鼓风机曝气设备,制氧供风量宜小于生物

反应池需风量。

由图 3 可知,当进水量为(1~2)×10⁴ m³/d时,均存在风量过大的问题。在进水水质较好时,生物反应池、臭氧氧化需氧量均会降低,这将加重氧气富余,造成较大浪费。当进水量增大后,生物反应池需风量增加,富余风量的问题将得到缓解。

综合生物反应池需风量与富氧量的关系及测算可知,初始设计方案主要存在以下 2 个问题:

a. 若无富氧曝气,风机风量范围需为 833~8 333 m³/h,即风机最小风量约 800 m³/h,风机组合后风量需在 833~8 333 m³/h 范围内连续不间断,否则精确曝气控制系统与风机的衔接有中断,不能充分发挥其作用。在初始方案中,小风机无备用,小风量工况下保障性较低,需对风机重新组合选型。

b. 若将制氧机富余氧气投入生物系统,则供氧量富余较大,最大富余量折合鼓风机曝气量约 1 400 m³/h,供氧量富余主要在水质较好、水量小的情况下产生。若按照初始方案配置设备,存在过量曝气问题,需将鼓风机、制氧机进行放气,从而造成浪费,且过量供氧将影响系统对 TN 的去除,不利于出水水质稳定达标。

4 供氧系统优化

结合预测,该水质净化厂运行将面临小水量以及水质、水量波动的情况,对富氧量(包括制氧机、臭氧发生器等规格选型)和风机鼓风量经过初始方案的复核以及数次迭代计算,认为制氧机能力满足臭氧发生器要求,较为适用。同时,进一步细化鼓风机选型,与市场主流风机厂家交流确定风机配置方案,最终确定供氧系统配置。

4.1 氧气制备系统配置

经分析测算并与设计院沟通,确定优化调整近期制氧机配置,将制氧机选型由 3 台(170 m³/h)调整为近期 2 台(80 m³/h)+1 台(160 m³/h)、远期 3 台(160 m³/h),近期 2 台(80 m³/h)低流量设备安装在远期设备位置,远期实施时将其更换为高流量(160 m³/h)设备。土建、电气等按远期 3 台(160 m³/h)设备安装要求进行预留。同时,制氧机风机增设变频,风量可调。近期 80 m³/h 的制氧机较 10 kg/h 的臭氧发生器所需氧气量有所富余,可以充分保证臭氧发生器的需氧量。优化配置后生物反应池需风量与制氧供风量的关系见图 4。

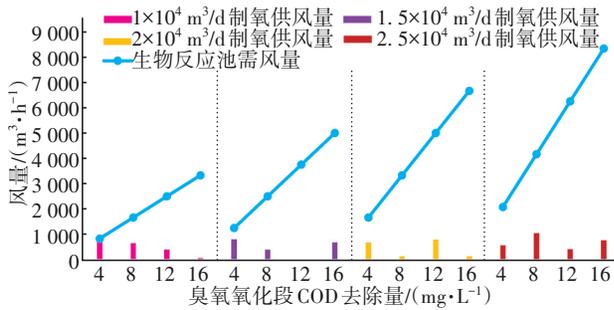


图4 生物反应池需风量与制氧供气量的关系(优化方案)

Fig.4 Relationship between the required air volume of bio-reaction tank and the amount of air supply oxygen by concentrator (optimized plan)

由图4可知,制氧机型号优化后,风量只在极少数运行工况下存在富余,利用制氧系统风机变频调节基本可以解决氧气浪费问题,同时解决了鼓风机、制氧机、臭氧发生器等系统的风量调配衔接问题。极少数的富余情况(气水比为2:1、水量 $\leq 1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)因设备配置局限,仍存在供氧过量的情况,此时可考虑通过风机间歇曝气等解决。

4.2 曝气鼓风机配置

针对该项目风压高、风量调节范围大、最小风量偏低的特点,由6个进口品牌风机厂家提供9台风机参数,进行组合选型。

表7 风机组合方案

Tab.7 Blower combination plans

编号	组合方案	风量调整范围/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	备注
1	编号5+2组合:2大2小,1台大风机备用	800~9 600	磁浮风机+空浮风机
2	编号5+2组合:1大3小,1台小风机备用	800~9 600(大风机故障时,800~9 000)	磁浮风机+空浮风机
3	编号5组合:4小,3用1备	800~9 000	磁浮风机
4	编号5+6组合:2大2小,1台大风机备用	800~10 000	磁浮风机
5	编号5+6组合:1大3小,1台小风机备用	800~10 000(大风机故障时,800~9 000)	磁浮风机
6	编号5+7组合:2大2小,1台大风机备用	800~12 000	磁浮风机+单级离心风机
7	编号5+7组合:1大3小,1台小风机备用	800~12 000(大风机故障时,800~9 000)	磁浮风机+单级离心风机
8	编号5+9组合:2大2小,1台大风机备用	800~11 000	磁浮风机+单级离心风机
9	编号5+9组合:1大3小,1台小风机备用	800~11 000(大风机故障时,800~9 000)	磁浮风机+单级离心风机
10	编号8+9组合:2大2小,1台大风机备用	800~9 000	单级离心风机,大小风机风量无重叠,小风机故障后需尽快维修,否则在风量为2 000 m^3/h 附近会频繁切换大小风机

以上方案的风机风量均可实现连续调节不中断,避免了精确曝气系统控制下风机频繁启停的问题。其中第1、2、6、7、8、9号组合,采用不同类型风机,需配套多组MCP、PLC和精确曝气系统才能达到风机选型的最优控制,故不推荐。第3、4、5、10组合采用同品牌同类型风机,配套1组MCP即可实现与

风机参数见表6。

表6 风机参数

Tab.6 Blower parameters

编号	风机类型	品牌	风压/kPa	风量调节范围/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
1	空浮(小)	①	100	1 100~1 680
2	空浮(大)			2 000~3 600
3	磁悬浮	②		4 200~8 200
4		③		3 100~7 200
5		④(小)		800~3 000
6		④(大)		1 080~4 000
7	单级离心 ^[5]	⑤(大)		2 160~6 000
8		⑥(小)		800~2 000
9		⑥(大)		2 000~5 000

风机选型目标为经优化配置后,常用风机总风量不小于9 000 m^3/h ;风机宜选用同一厂家、同一类型,便于精确曝气控制;风机风量实现800~9 000 m^3/h 范围内连续衔接、不中断。

由表6可知,1、5、8号风机宜作为小风机,但1号风机最小风量 $> 800 \text{ m}^3/\text{h}$,不适用。5、8号风机的最大风量分别为3 000、2 000 m^3/h ,为保证大小风机风量衔接连续,大风机的最小风量不宜超过3 000 m^3/h ,而3、4号风机的单台风量较大,不适用。

剩余风机(2、5、6、7、8、9号)搭配方案如表7所示。

精确曝气系统的对接。

该项目按采用同品牌同类型风机组合进行设备采购,方案4中标,即该水质净化厂配置4台鼓风机,2大2小,1台大风机备用。

5 实际应用效果

因小水量下对设备配置的要求较高,故以进水

量为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 为例,分析设备运行状态。

① 制氧系统不运行

当进水水质较好、无需臭氧氧化出水即可达标时,制氧机可不运行,生物反应池仅采用鼓风机供氧。该水量下生物反应池需风量范围为 $833 \sim 3\,333 \text{ m}^3/\text{h}$ 。风机配置为小风机2台(单台风量 $800 \sim 3\,000 \text{ m}^3/\text{h}$)+大风机2台(单台风量 $1\,080 \sim 4\,000 \text{ m}^3/\text{h}$),风机风量可实现 $800 \sim 10\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 范围内连续衔接,其配置满足需求。在该水量下,风机可能的运行台数为1台小风机、2台小风机或1台大风机。

② 制氧系统运行

当制氧机运行、富余氧气供氧时,生物反应池采用富氧曝气+鼓风机曝气,运行状态见图5。由图5可知,当进水量为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,富氧量为 $73 \sim 931 \text{ m}^3/\text{h}$,鼓风机需补充风量 $0 \sim 3\,260 \text{ m}^3/\text{h}$,因此除气水比为2:1工况下需变频调整制氧机制氧量,必要时鼓风机间歇工作外,其他工况下鼓风机均可连续工作,保证供氧系统、精确曝气系统稳定运行。

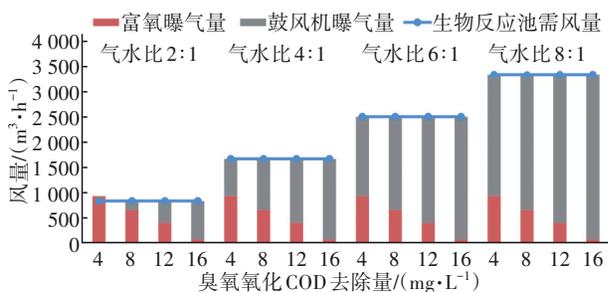


图5 富氧与鼓风机协同曝气运行状态($1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)

Fig.5 Collaborative aeration operation status of enriched oxygen and blower ($1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)

6 结语

实践证明,优化后的设备配置适用于水质净化厂运行需求,有利于实现稳定、低碳、节能运行,也说明对水量、水质变化进行预估计算、对系统配置进行复核优化的必要性。

① 细化并优化制氧机配置。在保证臭氧发生器需氧量前提下,调整制氧机规格,减少制氧机制氧量,避免氧气浪费。

② 细化鼓风机选型。核算具体风机的风量需求,并与市场上常用型号的进口品牌风机厂家交流选型,实现鼓风机供风量既满足设计最高水量、

水质需求,又可应对运行初期低负荷工况,风机供风区间连续不中断,与精确曝气系统衔接良好。

参考文献:

- [1] 董卫华,杨健,张淑芬,等. 纯氧曝气的研究进展[J]. 中国资源综合利用,2006,24(11):28-30.
DONG Weihua, YANG Jian, ZHANG Shufen, *et al.* Progress of the research on pure oxygen aeration [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2006, 24 (11): 28-30 (in Chinese).
- [2] 张岩. 上海中心城区城镇污水水质特性分析[J]. 净水技术,2023,42(11):101-111.
ZHANG Yan. Analysis of influent quality characteristics of urban wastewater in Shanghai central districts [J]. Water Purification Technology, 2023, 42 (11): 101-111 (in Chinese).
- [3] 高群丽,张耀宗,孙锦程,等. 臭氧氧化技术深度处理市政污水实验研究[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2022,43(3):103-109.
GAO Qunli, ZHANG Yaorong, SUN Jincheng, *et al.* Experimental research on advanced treatment of municipal wastewater by ozone oxidation technology [J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 43 (3): 103-109 (in Chinese).
- [4] 彭宏,杨忠明,吴金苗,等. 新型射流曝气器的研究与应用[J]. 环境工程,2012,30(5):135-139.
PENG Hong, YANG Zhongming, WU Jinmiao, *et al.* Study and application of new type jet aerator [J]. Environmental Engineering, 2012, 30(5): 135-139 (in Chinese).
- [5] 白生云. 好氧活性污泥法污水处理鼓风机选型及节能[J]. 山西建筑,2014,40(13):142-143.
BAI Shengyun. The air blower type selection and energy saving of aerobic activated sludge sewage treatment [J]. Shanxi Architecture, 2014, 40 (13): 142-143 (in Chinese).

作者简介:杨晓辉(1983-),女,山东青岛人,本科,高级工程师,从事市政污水处理与回用工作。

E-mail:yxhta@163.com

收稿日期:2024-01-11

修回日期:2024-03-12

(编辑:沈靖怡、衣春敏)