

气升式氧化沟污水处理效果的中试研究

庞洪涛¹,施汉昌^{1*},施慧明¹,殷益明² (1.清华大学环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084; 2.江苏一环集团有限公司,江苏 无锡 214261)

摘要: 在太湖流域某小城镇污水处理厂研究中试气升式氧化沟的污水处理效果,获取了出水主要指标稳定达标的工艺参数.结果表明,出水 COD<50mg/L 的最大容积负荷为 0.88kg/(m³·d).NH₄⁺-N 污泥负荷不大于 0.06kg/(kg·d)时,出水能达到排放标准要求的 5 mg/L.直沟段 DO 降低到 0.6~1.0mg/L 后,进出水 TN 平均浓度分别为 30.7,11.3mg/L,并能保证出水 TN<15 mg/L 稳定运行 14d 以上.进气量 30m³/h 时,直段底部最大流速为 0.19m/s,中上部流速为 0.03m/s,此时沟底没有出现污泥沉降,出水各项指标稳定达标.生产型气升式氧化沟的占地面积将比传统氧化沟至少减少 25%.

关键词: 气升式氧化沟; 污水处理; 中试实验

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2009)07-0692-05

Wastewater treatment performance of a pilot-scale airlift oxidation ditch. PANG Hong-tao¹, SHI Han-chang^{1*}, SHI Hui-ming¹, YIN Yi-ming² (1.State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2.Jiangsu Yihuan Group Corporation, Wuxi 214261, China). *China Environmental Science*, 2009,29(7): 692~696

Abstract: The wastewater treatment performance of a pilot-scale airlift oxidation ditch (AOD) was studied in a wastewater treatment plant near the Taihu Lake. The main process parameters that can satisfy the current discharge standard were obtained. It was possible to achieve a COD effluent concentration <50mg/L at the maximum loading rate of 0.88kg/(m³·d). The ammonium nitrogen concentration of the effluent could be lower than 5 mg/L with a loading rate less than 0.06kg/(kg·d). After the dissolved oxygen in the straight part was maintained between 0.6~1.0mg/L, total nitrogen (TN) concentration in the effluent was less than 15mg/L and kept steadily for over 14 days. The average TN concentrations of the influent and effluent were 30.7mg/L and 11.3mg/L, respectively. When air flow rate was 30m³/h, a velocity of 0.19m/s in the bottom of straight part was sufficient to prevent the settling of activated sludge. Liquid velocity in the top of straight part was only 0.03m/s, but it did not interfere with the removal of organic pollutants. Technical and economic evaluation showed that a large-scale AOD will save at least 25% land area compared with the conventional oxidation ditch.

Key words: airlift oxidation ditch; wastewater treatment; pilot-scale experiment

氧化沟工艺具有出水水质好、工艺流程简单、基建费用低、运行管理简便等诸多优点,已成为广泛应用的污水生物处理技术之一.由于传统氧化沟采用机械表面曝气设备,存在着传质效率低、占地面积大等不足,在能源和土地资源日趋紧张的情况下,其应用也受到一定限制^[1-2].气升式氧化沟针对传统氧化沟的不足,将水下微孔曝气与折流板结合,替代机械表面曝气设备作为充氧和动力系统^[3-4],提高了氧气的利用率,并使沟深达到 6m 以上,大大减少其占地面积.气升式氧化沟的流态与传统氧化沟最大的不同在于改

变了流速在垂直断面的分布,具有底部流速大,上部流速小的特点,能够有效防止沟底的污泥沉降,减少流动的能量消耗.此外,还可以通过改变进气量,灵活调整各区域的 DO 浓度,形成稳定的缺氧区,为同步硝化反硝化脱氮创造条件.为了考察气升式氧化沟的污水处理效果,获取实际工程的各项放大参数,本研究在实验室研究的基础上设计了中试装置,并在江苏省无锡市某小型城镇污水处

收稿日期: 2008-11-17

基金项目: 国家“863”项目(2004AA601061)

* 责任作者, 教授, hanchang@mail.tsinghua.edu.cn

理厂完成中试研究,考察了不同水力停留时间(HRT)下主要水污染物的去除效果,并针对太湖流域最新颁布的城镇污水处理厂排放标准^[5],对COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的稳定达标排放进行了研究。

1 研究方法

1.1 中试试验装置

气升式氧化沟试验的工艺流程见图1。氧化沟中试装置为全钢结构,沟长9.5m,宽2m,有效水深3.0m,总容积 54m^3 。沟内共有4组升流区和降流区,每组升流区和降流区由3块钢制折流板构成,升流区底部均安装橡胶微孔曝气管,曝气区面积占整沟面积的16.5%。氧化沟由1台罗茨风机供氧,配有4台气体流量计,可单独控制每个升流区的进气量。中试装置的最大处理能力为 $216\text{m}^3/\text{d}$ ($\text{HRT}=6.0\text{h}$),进水和回流污泥均从降流区进入沟内,出水从直段流出,经二沉池泥水分离后再进入污水厂调节池。

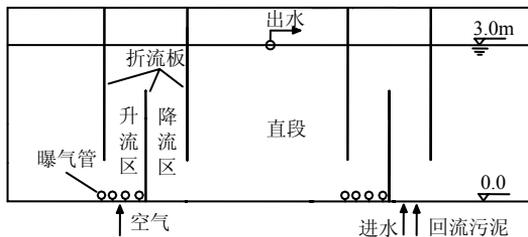


图1 中试气升式氧化沟工艺流程示意

Fig.1 Schematic diagram of a pilot scale airlift oxidation ditch

1.2 进水水质

污水处理的中试研究于2007年11月开始,至2008年7月结束。试验初期污水厂进水以生活污水为主,含有约15%的化工废水。2008年2月以后,化工企业排水逐步纳入该厂污水管网,进水中COD和TP浓度有所增加, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN变化较小,化工废水比例提高到40%, BOD_5/COD 比值由0.45降至0.37,其他水质指标见表1。

污水处理厂所在地区河流湖泊众多,且采用合流制管网,因此进水COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度偏低。为满足试验要求,在容积 2m^3 的塑料桶中配制甲

醇和碳酸氢铵混合溶液,通过计量泵定量投加来提高进水浓度及可生化性,来自集水井的原水与配水混合均匀后作为进水进入氧化沟。

表1 原水水质分析(mg/L)

Table 1 Analysis of the raw wastewater quality (mg/L)

水质指标	工况1		工况2	
	范围值	均值	范围值	均值
COD	91~172	121.5	124~191	162
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	10.2~21.9	14.6	10.5~20.8	15.7
TN	16.1~26.1	21.1	14.9~23.1	20.1
TP	0.6~1.5	0.85	1.3~2.4	1.7

注:工况1为2008年1月31日前污水水质;工况2为2008年1月31日后污水水质

1.3 排放标准

从2008年1月1日起,江苏省对太湖地区的城镇污水处理厂执行新的水污染物排放标准^[5],如表2所示。

表2 污水处理厂主要水污染物排放限值(mg/L)

Table 2 Discharge limitation of main pollutants for wastewater treatment plant (mg/L)

水厂代码	排放类别	COD	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TN	TP
1	I	50	5(8)	20	0.5
2	II	60	5(8)	15	0.5
3	I、II	50	5(8)	15	0.5

注:1、2为2007年12月31日之前建设的污水处理厂,3为2008年1月1日之后建设的污水处理厂;I类工业废水 $<50\%$,II类工业废水 $\geq 50\%$;括号内数值为水温 $\leq 12^\circ\text{C}$ 时的控制指标

2008年后新建污水处理厂的执行标准,将与现行的城镇污水处理厂污染物排放标准^[6](GB 18918-2002)中最严格的一级A标准完全相同。面对今后更为严格的排放要求,气升式氧化沟是否能实现稳定的达标排放将是其推广应用的首要因素,也是中试试验的主要研究内容。

2 结果与讨论

2.1 HRT对污水处理效果的影响

试验考察了气升式氧化沟在HRT为8.5、7.5和6.0h时对各污染物的去除效果,每个HRT稳定运行15d,结果见表3。HRT为8.5h时,COD和

NH_4^+-N 去除率均较高,此时仅在配水中添加甲醇提高 COD,因此进水 NH_4^+-N 浓度偏低.不同 HRT 下,COD 能够达到 50mg/L 排放标准的最大容积负荷为 $0.88\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$.HRT 为 7.5,6.0h 时通过在配水中投加碳酸氢铵提高 NH_4^+-N 浓度,此时 NH_4^+-N 去除效果并不理想,出水平均浓度均不达标.通过与实验室小试研究对比发现,相同 HRT 下中试的去容容积负荷远远低于小试,而造成上述 2 个工况 NH_4^+-N 处理能力下降的原因却并不相同.HRT 为 7.5h 时,受 1 月份雪灾天气影响,氧化沟平均水温低于 13°C ,低温抑制了硝化细菌的活性,降低了 NH_4^+-N 的去容效率;HRT 为 6.0h 时,正值化工厂废水陆续进入污水厂管网,

经当地环境保护部门检测发现某些企业排放的废水中含有高浓度的苯酚,而酚类物质对硝化细菌的抑制作用极强^[7],因此 NH_4^+-N 硝化效果急剧下降.

HRT 为 7.5,6.0h 时,进水 TN 浓度均大于 30mg/L,此时对 TN 仍有超过 30% 的去除率.通过分析反应器去除的 BOD_5 和 N 的质量可以判断,TN 的去除不仅是微生物的同化作用,在氧化沟内还发生了反硝化除 N 作用.在这 2 个 HRT 运行中并未严格控制反应器的 DO(DO 浓度均大于 2mg/L).说明反应器只是在局部发生了反硝化作用,对于 TN 的去除尚有潜力可挖,在后续试验中将进行更为深入地研究.

表 3 不同 HRT 时的污染物去除效果

Table 3 Removal efficiency of main pollutants with different HRT

水质 指标	HRT 为 8.5h			HRT 为 7.5h			HRT 为 6.0h		
	进水(mg/L)	出水(mg/L)	去除率(%)	进水(mg/L)	出水(mg/L)	去除率(%)	进水(mg/L)	出水(mg/L)	去除率(%)
COD	239.3	42.7	82.2	240.9	46.8	80.6	277.8	65.8	76.3
NH_4^+-N	15.8	0.35	97.7	24.1	7.34	71.1	24.4	13.7	42.9
TN	18.8	11.7	36.4	31.0	19.3	36.5	32.9	22.7	32.6
TP	0.61	0.11	82.0	1.08	0.44	60.2	1.65	0.98	40.6

由表 3 可见,气升式氧化沟对 TP 有一定的去除效果,但 TP 浓度升高后就难以达到 0.5mg/L 的排放标准.实际工程中可通过设置前置厌氧区或化学除磷等措施实现达标排放,因此中试没有将 TP 作为考察反应器处理效果的指标.

2.2 NH_4^+-N 去除效果

在当地环境保护部门加强了对化工企业排水的监管后,中试装置于 2008 年 3 月开始第 2 阶段运行,重点考察氧化沟对 NH_4^+-N 和 TN 的去除, NH_4^+-N 去除效果如图 2 所示.

在氧化沟稳定运行后,由于受到含有硝化细菌抑制性物质的化工废水冲击,出水 NH_4^+-N 浓度出现了 2 次较大的波动,持续约 7d 后恢复正常,在此期间污水处理厂的生化系统也同样发现出水 NH_4^+-N 浓度升高.未受化工废水冲击时,出水 NH_4^+-N 浓度均能稳定在 5mg/L 以下,此时 NH_4^+-N 的污泥负荷为 $0.04\text{--}0.06\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$.小试研究表明,污泥负荷小于 $0.06\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 时,出水

NH_4^+-N 均能实现稳定的达标排放,二者基本一致.此阶段的试验说明,在进水不含抑制性物质的情况下,气升式氧化沟具有良好的 NH_4^+-N 去除效果,同时具备较好的抗冲击能力,但在实际工程中应针对不同水质考虑是否设置调节池.

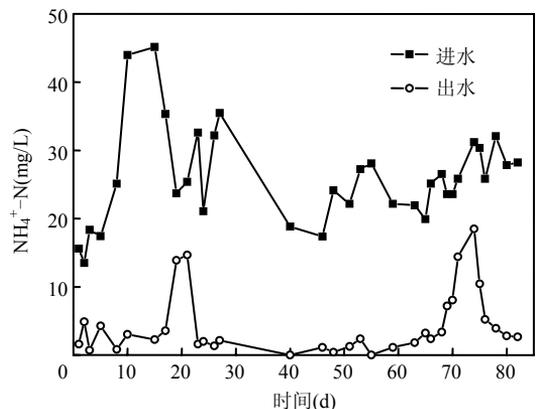


图 2 进、出水 NH_4^+-N 浓度随时间的变化

Fig.2 Variation of ammonium nitrogen concentration in influent and effluent

2.3 TN 去除效果

在研究 HRT 对污水处理效果的影响时已发现,氧化沟内能够发生同步硝化反硝化脱氮,而 DO 浓度是影响 TN 去除的主要因素.在第二阶段运行的前 40d(根据 2.1 节结果选择 HRT 为 8.0h),为保证出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 达标,反应器内的 DO 浓度始终 $>2\text{mg/L}$,进出水 TN 平均浓度分别为 $38.1,22.2\text{mg/L}$.从第 41d 开始减少进气量,逐步将反应器内的 DO 降至 2mg/L 以下,并从第 65d 开始将 HRT 从 8.0h 调整至 6.5h,提高进水负荷,进一步降低 DO,试验结果如图 3 所示.此后,在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 硝化正常条件下,出水 $\text{TN}<15\text{mg/L}$ 稳定运行 14d 以上,在此期间进出水 TN 平均浓度分别为 $30.7,11.3\text{mg/L}$,TN 去除率达到 63.2% ,去除速率为 $1.3\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$,比文献中的报道值略高^[8].

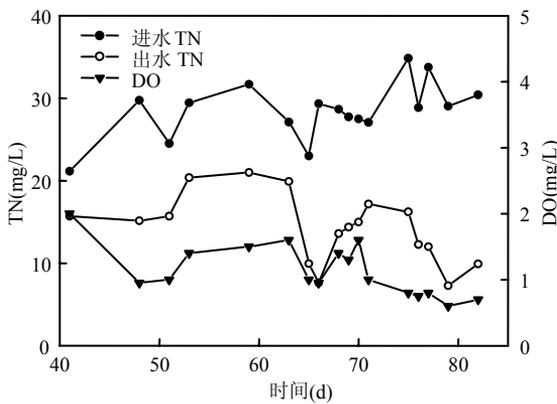


图 3 进出水 TN 与 DO 浓度随时间变化

Fig.3 Variation of total nitrogen and dissolved oxygen concentrations in the influent and effluent

中试研究表明,气升式氧化沟的升流区与直沟段可产生约 1mg/L 的 DO 梯度,并且直沟段 DO 分布均匀,能够形成稳定的缺氧区.由图 3 可见,氧化沟的出水 TN 浓度与 DO 浓度变化趋势一致.当直沟段 $\text{DO}>1\text{mg/L}$ 时,出水 TN 还不能达到 $<15\text{mg/L}$ 的排放标准,而 DO 为 $0.6\sim 1.0\text{mg/L}$ 时, TN 去除率明显提高,并能稳定达标.气升式氧化沟发生同步硝化反硝化的 DO 浓度比文献中通常报道的 $0.1\sim 0.5\text{mg/L}$ 略高^[9-10],其原因在于其直段中上部流速仅有 0.03m/s ,低流速不但会降低

氧气的传质速率,还能减小湍流强度,增加污泥絮体的凝聚作用,二者共同作用使污泥絮体内部更易形成缺氧区^[11-12].气升式氧化沟发生反硝化的 DO 浓度比传统氧化沟略高,将有利于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化,并能增加运行管理中针对反硝化 DO 控制的灵活性.

2.4 流速与混合效果

邓荣森^[13]指出,氧化沟内为防止产生污泥堆积,有必要确保 0.2m/s 的水流流速,而气升式氧化沟最大水流流速出现在沟底,因此只要其沟底流速能大于传统氧化沟要求的最小流速即可.前期的流动特性研究表明,气升式氧化沟直段底部水平方向水流流速 $>0.15\text{m/s}$ 即可保证沟内污泥不沉降^[14],此时直段上部流速 $<0.05\text{m/s}$,如此低的流速是否会对混合效果及生物处理产生影响还有待检验,因此在各项指标稳定达标阶段(进气量 $30\text{m}^3/\text{h}$)对反应器内的流速和污泥浓度分布进行了测试.

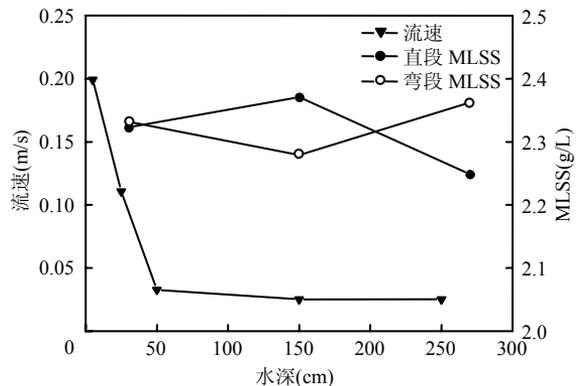


图 4 直段水流流速与污泥浓度随水深的变化

Fig.4 Variation of liquid velocity and MLSS in straight part with the change of water depth height

在氧化沟直段和弯段中部水深分别为 30, 150, 270cm 处取样,测定直段流速以及直段和弯段污泥浓度随水深的变化情况,实验结果如图 4 所示.不同取样点的污泥浓度最大差值为 0.1g/L ,说明沟内活性污泥分布均匀,混合效果良好.此时直段水平方向最大流速为 0.19m/s ,中上部流速仅有 0.03m/s ,而此阶段 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 均能达标,说明只要能够保证沟内泥水的良好混合,

低流速并不会对生物处理产生影响。

2.5 技术经济评价

传统氧化沟工艺采用表面机械曝气,曝气设备以曝气转刷、转盘和垂直轴表面曝气机为主,在不增加水下搅拌装置的情况下沟深通常为3.0~4.5m^[13]。气升式氧化沟中试装置水深已达到3m,根据鼓风机和曝气装置的性能,实际工程可将沟深增加到6~8m。在相同的设计负荷下,按沟深6m计算,气升式氧化沟的占地面积将比传统氧化沟减少25%~50%。

气升式氧化沟底部流速大于上部,可有效防止沟底的污泥沉降,直段中上部流速为0.03m/s时对生物处理亦无影响,能有效降低保证流动混合的动力需求。中试试验处理污水的气水比为3.6~6.0,实际生产的大中型污水处理厂气水比经验值为6~10,对于生产型氧化沟,随着沟深的增加,氧气的利用率和气升作用产生的动力都将得到提高,气水比会进一步降低。按气水比为4,鼓风机曝气系统电耗占全厂电耗50%估算,全厂电耗将会减少约25%。除此之外,气升式氧化沟对水质变化适应性较强,出水达标稳定,反应器结构简单、易于放大,施工建设与维护管理简便,在中小城镇污水处理中将具有广阔的应用前景。

3 结论

3.1 不同HRT下,COD能达到50mg/L排放标准的最大容积负荷为0.88kg/(m³·d)。受低温和进水有毒物质影响,NH₄⁺-N在HRT为7.5,6.0h时均超出5mg/L的排放标准。

3.2 未受化工废水冲击时,污泥负荷为0.04~0.06kg/(kg·d)的NH₄⁺-N出水均能稳定达标。直沟段DO降低到0.6~1.0mg/L后,TN平均去除率达到63.2%,并能保证出水浓度<15mg/L稳定运行14d以上。

3.3 进气量30m³/h时,直沟段底部最大流速为0.19m/s,中上部流速0.03m/s,此时沟内污泥分布均匀,混合效果良好,出水主要污染物浓度稳定达标。

3.4 生产型气升式氧化沟的占地面积将比传统氧化沟减少25%~50%,与传统活性污泥法相比

处理工艺电耗也将减少约25%。

参考文献:

- [1] 牟全君.我国10万t/d以下城市污水处理工艺[J]. 环境污染治理技术与设备,2007,7(3):96-100.
- [2] 区岳州,胡有为.氧化沟污水处理技术及工程实例[M]. 北京:化学工业出版社,2005:1-10.
- [3] 施汉昌,殷益明.气升式深水型氧化沟:中国,200510008928.5[P]. 2005-11-09.
- [4] 庞洪涛,施汉昌,施慧明.新型气升式氧化沟流体学特性的数值模拟[J]. 中国环境科学,2008,28(5):438-443.
- [5] DB32/1072-2007 太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值[S].
- [6] GB18918-2002 城镇污水处理厂污染物排放标准[S].
- [7] Henze M, Harremoës P, Jansen J, et al.污水生物与化学处理技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999:53-55.
- [8] Hao X D, Doddema H J, van Groenestijn J W. Conditions and mechanisms affecting simultaneous nitrification and denitrification in a pasveer oxidation ditch[J]. Bioresource Technology, 1997,59(2/3):207-215.
- [9] Holman J B, Wareham D G. COD, ammonia and dissolved oxygen time profiles in the simultaneous nitrification/ denitrification process[J]. Biochemical Engineering Journal, 2005,22(2): 125-133.
- [10] 周丹丹,马放,董双石,等.溶解氧和有机碳源对同步硝化反硝化的影响[J]. 环境工程学报,2007,1(4):25-28.
- [11] Gillot S, Capela S, Heduit A. Effect of horizontal flow on oxygen transfer in clean water and in clean water with surfactants[J]. Wat. Res., 2000,34(2):678-683.
- [12] 刘艳臣,范 龙,王志强,等.Carrousel 氧化沟内特性参数的分布[J]. 中国环境科学,2007,27(6):792-796.
- [13] 邓荣森.氧化沟污水处理理论与技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006:1-8.
- [14] 庞洪涛,施汉昌,施慧明.气升式氧化沟流动特性中试研究[J]. 中国环境科学,2008,28(12):1057-1061.

作者简介: 庞洪涛(1980-),男,辽宁大连人,清华大学环境科学与工程系博士研究生,主要从事水污染控制技术的研究.发表论文3篇。