悬浮填料强化硝化功能及温度影响试验研究

李 倩¹, 曹国凭¹, 郑兴灿², 尚 巍², 陈 轶², 张文安², 张朋川³ (1.河北联合大学 建筑工程学院,河北 唐山 063009; 2.国家城市给水排水工程技术研究 中心,天津 300074; 3.天津师范大学 水资源与水环境天津市重点实验室,天津 300387)

摘 要: 投加悬浮填料的 MBBR 工艺近年来在国内开始得到工程应用,但其生产性运行的 实际效能及影响因素尚未得到系统研究。以实际运行的污水处理厂 MBBR 系统为测试对象,分别 对活性污泥系统和悬浮填料+活性污泥复合系统的硝化能力及温度影响进行了试验研究,测定了 不同温度下的硝化速率,并进行温度系数的比较研究,以判断温度变化对悬浮填料强化复合系统硝 化效果的影响。测试结果表明:在填充率为45%的悬浮填料+活性污泥复合处理系统中,当温度 分别为11、14、17、20、23、26、29 和32 ℃时,硝化速率分别提高了156%、122%、105%、84%、64%、 53%、27%和14%,硝化处理效果分别提高了123%、93%、78%、60%、42%、33%、11%和6.5%。 温度变化对硝化过程有较大影响,但悬浮填料的投加可增强低温条件下复合系统的硝化能力,缓解 温度变化对硝化功能的不利影响。

关键词: 悬浮填料; 活性污泥; 硝化速率; 温度系数; 填充率 中图分类号: X703 文献标识码: C 文章编号: 1000-4602(2013)05-0050-05

Enhanced Nitrification with Suspended Carrier Addition at Different Temperatures

LI Qian¹ , CAO Guo-ping¹ , ZHENG Xing-can² , SHANG Wei² , CHEN Yi² , ZHANG Wen-an² , ZHANG Peng-chuan³

(1. School of Architectural Engineering, Hebei United University, Tangshan 063009, China;

2. National Engineering Research Center for Urban Water and Wastewater, Tianjin 300074,

China; 3. Key Laboratory of Water Resources and Water Environment, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In recent years , the MBBR process with suspended carrier has been put into engineering application in China , but the actual operation performance and its influencing factors have not been systematically studied. The MBBR system in a large municipal wastewater treatment plant was sampled and tested to determine its nitrification performance at different temperatures. The testing results showed that at 11 ,14 ,17 ,20 ,23 ,26 ,29 and 32 °C , the nitrification rates of MBBR system with 45% carrier filling rate increased by 156% , 122% , 105% ,84% ,64% ,53% ,27% and 14% , and the corresponding nitrification capacities increased by 123% ,93% ,78% ,60% ,42% ,33% ,11% and 6.5% , compared with those of activated sludge system without suspended carrier , respectively. The nitrification process was sensitive to temperature , while the low temperature nitrification capacity could be enhanced

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA063803)

and the low temperature impact on nitrification could be reduced by the addition of the suspended carrier.

Key words: suspended carrier; activated sludge; nitrification rate; temperature coefficient; filling rate

在城镇污水处理厂一级 A 提标改造中,由于原 有二级生物处理系统的设计泥龄和活性污泥产率取 值通常偏低,生物池池容严重不足,在难以新增池容 的情况下,要解决好硝化/反硝化生物脱氮问题和实 现出水水质的稳定达标实属不易,特别是低温条件 的硝化能力难以保障。基于活性污泥法与生物膜法 技术集成的移动床生物膜反应器(MBBR)是一种较 新颖、高效的污水处理工艺,其主要是基于可流化生 物载体悬浮填料的应用。悬浮填料是一种可控制理 化性质的新型生物载体,其相对密度接近于水,在反 应 器内有轻微的搅拌便可处于充分的流化状 态^[1~6]。投加悬浮填料可在不扩建原活性污泥池体 的前提下,强化系统的硝化效果,提高系统的整体脱 氮效果。

然而目前国内相关的研究大多停留在悬浮填料 的开发和技术改进上^[7 8],基于温度变化对悬浮填 料强化活性污泥系统硝化效果以及悬浮填料 + 活性 污泥系统(以下简称复合系统)受温度影响的研究 还比较少,因此笔者通过对活性污泥系统和复合系 统不同温度下硝化速率的测定,研究了温度对这两 种系统硝化速率的影响以及悬浮填料对复合系统硝 化作用的强化效果,同时通过两系统比硝化速率与 温度的关系式拟合,分析研究悬浮填料的投加对维 持硝化能力及抵御温度变化的作用,以期为面临升 级改造的污水处理厂,特别是北方低温及昼夜温差 较大地区的污水处理厂稳定达标运行提供理论依据 和参数。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

反应器采用聚乙烯塑料桶,有效容积为10L, 带有可调速搅拌装置,以保证悬浮填料的充分流化, 曝气采用空压机和微孔曝气头。试验用活性污泥混 合液和挂膜悬浮填料取自济宁某污水处理厂的MB-BR 好氧生物填料段,填料自投加至本试验已稳定运 行12个月,挂膜和硝化效果良好。升温采用加热 棒,降温用冰块,试验所用悬浮填料的基本性能参数 如下:外观为圆柱体,直径为25 mm 高为10 mm 密 度为0.96 g/cm³,比表面积为500 m²/m³。

1.2 试验方法

第一组试验为短时间内的升温过程,初始水温 为 11 ℃(春初),于 7 个反应器内放入已经移除填 料的活性污泥混合液 10 L,MLSS 和 MLVSS 分别为 5 437 和 3 174 mg/L,另外 7 个反应器内放入悬浮填 料和活性污泥混合液的混合样 10 L,填料填充率为 45%,DO 控制在 7 ~ 8 mg/L;反应器温度分别控制 在 11、14、17、20、23、26、29 和 32 ℃,各反应器均加 入 0.6 g NH₄Cl,保证硝化反应中有充足的 NH₃ – N, 然后于试验的 0、5、10、20、30、40、50 和 60 min 分别 对各反应器取样。

第二组试验为短时间内的降温过程,初始水温 为 25 ℃(夏季),分别测试了活性污泥系统和复合 系统在水温为 25、23、21、18、15 和 13 ℃下的硝化速 率 MLSS 和 MLVSS 分别为 3 733 和 1 966 mg/L,其 他同第一组试验。

1.3 测定项目与方法

试验主要对温度 T_{N} MLSS、MLVSS、NO₃⁻ – N、 DO 浓度进行测定, DO 和 T 用 WTW 便携式溶氧仪 测定, MLSS 和 MLVSS 根据残渣标准测定法测定, NO₃⁻ – N 浓度采用紫外分光光度法(WTW 分光光 度计)测定。

2 结果与讨论

温度是影响硝化反应的重要因素,通过不同温度下硝化速率的测定来考察温度变化对硝化速率的 影响规律,通过比硝化速率与温度的拟合关系式可 反映出系统硝化效果受温度短时间变化的影响。

2.1 悬浮填料对复合系统硝化能力的强化作用

由测定结果可得活性污泥系统在 11、14、17、 20、23、26、29 和 32 °C 下的硝化速率分别为 y =0.052 8x + 6.517 7($R^2 = 0.996$ 4)、y = 0.068 1x + 6.448 7($R^2 = 0.999$ 8)、y = 0.083 7x + 6.735 1(R^2 = 0.999 4)、y = 0.104 0x + 7.261 6($R^2 = 0.998$ 3)、 y = 0.138 7x + 7.426 6($R^2 = 0.999$ 2)、y = 0.163 6x + 7.957 1($R^2 = 0.998$ 7)、y = 0.206 9x + 8.633 3 ($R^2 = 0.999$ 6)、y = 0.257 5x + 9.110 2($R^2 =$ 0.998 9)。

填充率为 45% 的复合系统在 11、14、17、20、23、

• 51 •

26、29 和 32 ℃下的硝化速率分别为 $y = 0.135 1x + 11.7(R^2 = 0.998 4)$ 、 $y = 0.150 9x + 12.985(R^2 = 0.995 7)$ 、 $y = 0.171 5x + 11.042(R^2 = 0.998 5)$ 、 $y = 0.191 8x + 10.97(R^2 = 0.998 7)$ 、 $y = 0.226 3x + 11.166(R^2 = 0.998 7)$ 、 $y = 0.251 0x + 10.749(R^2 = 0.999 9)$ 、 $y = 0.263 7x + 10.971(R^2 = 0.999 8)$ 、 $y = 0.315 1x + 11.534(R^2 = 0.998 5)$ 。

综上可知,活性污泥系统和复合系统在各温度 下硝化反应均呈零级反应,这是由于系统含有较高 浓度的氨氮和 DO,加上硝化过程的半饱和速率基 质浓度较低,氨氮和 DO 浓度均满足整个硝化过程 所需,因而硝化速率不随氨氮和 DO 浓度的变化而 变化^[9]。

两种系统不同温度下的硝化速率比较如图1所 示。



systems under different temperatures

由图 1 可知 在 11 ~ 32 ℃范围内 随着温度的 上升,两种系统的硝化速率均升高。在 11、14、17、 20、23、26、29 和 32 ℃下,与单纯活性污泥系统相 比,复合系统的硝化速率分别提高了 156%、122%、 105%、84%、64%、53%、27% 和 14%,这是由于活 性污泥系统中硝化菌所占比例很小,在 5% 左 右^[10],而悬浮填料由于呈多孔圆柱状,其比表面积 较大,有利于世代周期较长的硝化菌依附生长,因此 悬浮填料的投加增大了复合处理系统的有效硝化生 物量。

从水力停留时间角度考虑,由于悬浮填料的投加会占用曝气池的部分有效容积,缩短曝气池的实际水力停留时间,使得填料段的实际水力停留时间 和填料的填充率具有一定的相关性。因此,分析比较两种系统的硝化效果时,首先要进行有效容积的 校正。填料的填充率是填料的堆积体积与曝气池的 有效容积之比 3.5 L的 SPR -1 悬浮填料堆积体积 相当于1 L的实际体积^[11],因此 45%填充率下填 料与悬浮填料+活性污泥混合液的实际体积之比为 0.13。

根据硝化速率试验结果,对悬浮填料的强化硝 化效果进行比较分析,见表1。

表1 不同温度下悬浮填料强化硝化效果

Tab. 1 Reinforced nitrification effect of suspended carrier under different temperatures

项	目	硝化速率/(mg・L ⁻¹ ・min ⁻¹)		NO3 N 增加
		活性污泥	复合系统	量/(mg • L ⁻¹)
温度/℃	11	0.052 8	0.135 1	0.064 7 <i>t</i>
	14	0.068 1	0.1509	0.063 2t
	17	0.083 7	0.171 5	0.065 5 <i>t</i>
	20	0.104 0	0.1918	0.062 9 <i>t</i>
	23	0.138 7	0.226 3	0.058 2t
	26	0.163 6	0.251 0	0.054 8t
	29	0.206 9	0.2637	0.022 5 <i>t</i>
	32	0.257 5	0.315 1	0.016 6 <i>t</i>
注: 活性污泥系统的 HRT 为 t min ,复合系统的 HRT 为 0. 87 t min。				

由表1可知,相同污泥浓度下,温度为11、14、 17、20、23、26、29和32℃时,复合系统的硝化效果 较活性污泥系统的硝化效果分别提高了123%、 93%、78%、60%、42%、33%、11%和6.5%,表明悬 浮填料的投加能强化活性污泥系统的硝化效果,且 其强化效果随着温度的降低而越为明显,在相对低 温(11和14℃)下,此强化效果非常明显,但在32 ℃下这种优势已经减弱到6.5%。

2.2 温度变化对处理系统硝化性能的影响分析

采用升温过程和降温过程进行硝化速率的测 定,以分析短时间内出现温度变化对硝化能力的影 响。按照系统中活性污泥浓度,分别计算出活性污 泥系统和复合系统的比硝化速率,并建立其与温度 的关系式,如图2所示。



• 52 •





Fig. 2 Relationship between specific nitrification rate and temperature in two kinds of systems

根据 Arrhenius 方程 温度对硝化速率的影响可 表示为 $r_T = r_{(20)} \cdot \theta^{(T-20)}$,分别对图 2 中的两组数据 进行拟合,式中 r_T 为 *T* 时的比硝化速率; $r_{(20)}$ 为 20 ℃时的比硝化速率; θ 为温度系数; R^2 为相关系数。 整个试验过程中均为硝化状态,因此 θ 主要体现了 反应器中硝化菌对于温度变化的敏感性。

此关系式与已有的研究结果相一致^[12~15],即温 度对硝化作用的影响与对异养好氧微生物的影响相 似 $\mu_{\max(T)} = \mu_{\max(20)} e^{k(T-20)}$,只是影响系数有所不同。 比硝化速率与温度的关系式至少在 10 ~ 30 °C 的温 度范围内适用,在较高温度(30~35 °C)下,硝化速 率恒定,在 35~40 °C 范围内,硝化速率开始递减,直 至为零,因为温度不但影响硝化菌的比增长速率,而 且影响硝化菌的活性,当温度 > 30 °C 时,蛋白质的 变性会降低硝化菌的活性。

在升温过程(11~32 ℃)中,活性污泥系统的温 度系数(1.078 1)大于复合系统的(1.039 9),表明 短时间内温度由 11 ℃升至 32 ℃的过程中,复合系 统硝化速率受温度变化的影响小于活性污泥系统; 而降温过程(25~13 ℃)中,复合系统的温度系数 (1.165 9)大于活性污泥系统的(1.155 1),可知降 温过程中复合系统硝化速率的下降速率稍高于活性 污泥系统,这是因为悬浮填料上附着生长着很多世 代周期较长的硝化菌,增加了复合系统的有效生物 量,然而硝化菌对温度的突然变化较为敏感,当温度 很快升高时(几个小时之内),增长速率低于预期 值;而当温度突然下降时,污泥活性的减弱要超出预 期值^[12],因此复合处理系统的温度系数较活性污泥 系统大。

总体来说 悬浮填料的投加强化了尤其是低温

条件下活性污泥法的硝化效果,并且悬浮填料的投加缓冲了活性污泥所受温度急剧变化的影响,对于 我国北部和部分南方冬季低温地区的污水处理工程 有实际应用价值,此类地区每年的冬季长达数月,且 冬季寒冷地区的昼夜温差比较大^[16],即使有保温设施,也难以保持水温的恒定,所以悬浮填料的投加能 在一定程度上保证污水处理厂活性污泥系统在温差 变化较大时保持较高的硝化能力。

3 结论

 1. 悬浮填料的投加提高了活性污泥系统的硝 化速率,在相同污泥浓度下,当温度为11、14、17、20、23、26、29和32℃时,填充率为45%的复合系统的硝化速率较活性污泥系统的分别提高了156%、122%、105%、84%、64%、53%、27%和14%,硝化效果分别提高了123%、93%、78%、60%、42%、33%、11%和6.5%。

② 短时间内的升温和降温过程,活性污泥系 统和复合系统的比硝化速率与温度关系均符合Arrhenius 方程,活性污泥系统中 $r_{T} = 0.0450 \times 1.0781^{(T-20)}$ 、 $r_{T} = 0.0680 \times 1.1551^{(T-20)}$;复合系统 中 $r_{T} = 0.0878 \times 1.0399^{(T-20)}$ 、 $r_{T} = 0.1077 \times 1.1659^{(T-20)}$ 。

 ③ 投加悬浮填料能够强化活性污泥系统的硝 化能力,特别是低温条件下的硝化能力,并有利于抵 御短时间内温度变化所带来的不利影响。

参考文献:

- [1] 孙华 涨菊萍 李湘霖. 投加悬浮填料改善活性污泥
 法处理性能的试验研究[J]. 重庆环境科学 2001 23
 (6):37-40.
- [2] 何国富,周增炎,高廷耀.投加悬浮填料强化传统活 性污泥法的脱氮功能试验研究[J].环境工程 2003, 21(4):15-17.
- [3] 张燕,周小红,陈洪斌,等.温度对强化混凝-悬浮填 料床生物氧化工艺运行的影响[J].给水排水 2006, 32(S1):27-31.
- [4] 何国富 周增炎 ,高廷耀. 悬浮填料活性污泥法的脱 氮效果及其影响因素 [J]. 中国给水排水 ,2003 ,19 (6):6-8.
- [5] 刘雨 赵庆良,郑兴灿. 生物膜法污水处理技术[M].北京:中国建筑工业出版社 2000.
- [6] 郑雅楠,滝川哲夫,郭建华,等.SBR法常、低温下生 活污水短程硝化的实现及特性[J].中国环境科学,

• 53 •

2009 29(9):935 -940.

- [7] 郭志涛.新型悬浮填料的研制及应用研究[D].南 京:南京大学 2011.
- [8] 李碧. MBBR 工艺的研究现状与应用[J]. 中国环保 产业 2009 (1):20-23.
- [9] 邹平 陈良才 魏宏斌 ,等. 悬浮填料活性污泥法处理 低温地区综合污水 [J]. 中国给水排水 ,2008 ,24 (12):47-49.
- [10] 郑兴灿,李亚新. 污水除磷脱氮技术[M]. 北京:中 国建筑工业出版社,1998.
- [11] 杨敏 孙永利 郑兴灿 等. 悬浮填料强化硝化及其工程应用效果研究[J]. 给水排水 2010 36(12):36 39.
- [12] Henze M, Harremoes P, la Cour Jansen J, et al. Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes (2nd ed) [M]. Berlin: Springer ,1997.
- [13] 郑平,徐向阳,胡宝兰.新型生物脱氮理论与技术[M].北京:科学出版社 2004.
- [14] Dosta J ,Fernández I ,Vázquez-Padín J R ,et al. Shortand long-term effects of temperature on the Anammox process [J]. J Hazard Mater ,2008 ,154 (1/3): 688 – 693.

(上接第49页)

一定要根据前面已经计算出的节点 7 的实际节点水 压 H₇ 求出配水支管实际管段总流量 Q₄₄₋₇ ,切不可 将虚拟管段流量加和来计算系统设计流量。

5 结论

随着时代的发展,建筑物内部结构日趋复杂化, 这就使得自动喷水灭火系统的喷头大多呈现非对称 布置的情况。目前手册中所介绍的特性系数法水力 计算仅适用于系统为对称布置的情况,导致对于非 对称布置系统应用特性系数法进行水力计算存在困 难。通过参考其他自动喷水灭火系统计算的相关资 料、系统分析了管系特性系数的实质是:管系特性系 数仅是管段比阻、管段计算长度、喷头流量系数的函 数 而与配水支管上各喷头的节点流量、节点水压无 关。管系特性系数的影响因素包括喷头构造、系统 管道布置形式、配水支管管径、管段长度。上述分析 为引入虚拟节点水压和虚拟节点流量的概念来计算 非最不利配水支管管系特性系数的方法提供了理论 依据 进一步完善了特性系数法水力计算 扩大了特 性系数法在自动喷水灭火系统水力计算中的适用范 围。示例中给出的计算样例为非对称布置情况下的

- [15] Kim J H ,Guo X J ,Park H S. Comparison study of the effects of temperature and free ammonia concentration on nitrification and nitrite accumulation [J]. Process Biochem 2008 43(2):154-160.
- [16] 白晓慧 陈英旭,王宝贞.活性污泥法低温硝化及其运行控制条件研究[J].环境科学学报,2001,21 (5):569-572.



作者简介:李倩(1985 -),女,河北南和人,硕 士研究生,主要从事水处理技术方面的研 究。

E - mail: liqianxiaoniu@163.com 收稿日期:2012 - 12 - 07

自动喷水灭火系统水力计算提供了参考。

参考文献:

- [1] 核工业第二研究设计院. 给水排水设计手册: 建筑给水排水(第2版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [2] 樊建军, 王峰, 董毅, 等. 自动喷水灭火系统水力计算 方法[J]. 中国给水排水 2007 23(14):33-36.



作者简介: 李雪飞(1985 -), 女, 辽宁鞍山人, 本科, 助理工程师, 从事建筑给排水设 计。

E - mail: lixuefei198588@ yahoo. cn 收稿日期: 2012 - 08 - 12

• 54 •