

A/A/O 工艺运行过程中磷的迁移与积累规律

郝瑞霞,李 瞳,刘 峰,刘 京

(北京工业大学 建工学院,100124 北京,haoruixia@bjut.edu.cn)

摘 要:为提高污水处理厂科学运行管理水平和出水质量,通过对北京某污水处理厂污水处理工艺的沿程采样分析,研究 A/A/O 工艺运行过程中磷的迁移途径、除磷效率与工艺运行控制参数之间的相关性,并进行污水处理系统内部磷平衡核算.结果表明,A/A/O 工艺缺氧段存在明显的反硝化聚磷作用,其吸磷量超过好氧段的,回流硝化液中硝酸盐质量浓度对反硝化聚磷作用有影响;除磷效果与污泥负荷、泥龄呈反向变化趋势,当污泥负荷控制在 $0.15 \text{ kg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 左右,泥龄控制在 $10 \sim 12 \text{ d}$ 时,除磷效率在 88% 左右;污水处理系统内部磷的积累与排放量具有显著的反向相关关系,排放量控制在进水量的 $2.0\% \sim 2.5\%$ 时,可以保持系统稳定除磷状态,同时可避免过量排泥造成的经济浪费.

关键词: A/A/O 工艺;反硝化聚磷;磷积累;运行控制参数

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)10-0129-05

Analysis on removing and accumulating approach of phosphorus in A/A/O technology

HAO Rui-xia, LI Tong, LIU Feng, LIU Jing

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, 100124 Beijing,
China, haoruixia@bjut.edu.cn)

Abstract: To improve the scientific management level and effluent quality of a municipal wastewater treatment plant (WWTP), the relationship between the phosphorus removal approach and operating parameters of the A/A/O technology was analyzed by sampling and analyzing samples from the treatment technology process of a WWTP in Beijing, and also the phosphorus material balance was assessed for the sewage treatment system. The results showed that the denitrifying phosphorus removal played remarkably a role for phosphorus removal in the anoxic zone of A/A/O process. The absorption of phosphorus in anoxic zone had exceeded the quantity in the oxic zone. The nitrate concentration in the returned nitrifying liquid had an influence on the denitrifying phosphorus removal. The relationship between phosphorus removal and sludge load, sludge retain time (SRT) showed negative correlation. When the sludge load was about $0.15 \text{ kg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ and the SRT was about $10 \sim 12 \text{ d}$ in A/A/O process, the phosphorus removal rate was up to 88% . There was also a negative correlation relationship between the phosphorus accumulation and the sludge emission capacities in the wastewater treatment system. When the sludge emission capacities were controlled to $2.0 \sim 2.5$ percent inflow of the treatment plant, the phosphorus removal efficiency could be kept on stable and economic status.

Key words: A/A/O process; denitrifying phosphorus removal; phosphorus accumulation; operating parameter

随着污水资源化利用率提高和城市河湖富

营养化问题的加重,对城市污水厂处理出水中氮、磷指标要求更为严格,特别是出水用于河湖补水或作为再生水厂水源的污水处理厂,其运行管理水平和氮磷去除效果对当地的污水资源化利用和水环境保护有显著影响.如何在现有工艺基础上,

收稿日期: 2010-06-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50778004);北京市自然科学基金资助项目(80820006);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07104-006).

作者简介: 郝瑞霞(1960—),女,博士,教授.

通过科学的运行管理,最大程度地发挥工艺的处理效能,降低能耗,提高出水质量,是污水厂日常运行管理中所面临的新问题.

厌氧-缺氧-好氧(A/A/O)工艺作为结构最简单的同步脱氮除磷污水处理工艺,是目前城市污水处理厂普遍采用的脱氮除磷工艺,具有较好的除 COD、氮、磷效果. 由于 A/A/O 工艺系统内微生物种群复杂,对基质、泥龄、DO 的需求不同,因此,科学地运行控制是充分发挥工艺效能的重要保障. 随着除磷机理研究在微生物学领域的深化,反硝化除磷菌(denitrifying phosphorus removal bacteria, DPB)的发现使该工艺有了更广阔的发展前景,受到国内外的普遍关注^[1-4],目前相关研究主要集中在对 A/A/O 工艺的反硝化除磷特性及影响因素方面的实验室研究^[5-6],有关实际工程中的反硝化聚磷作用分析少有报道.

本研究以北京某污水处理厂为例,通过调查该污水处理厂污水预处理-A/A/O-沉淀池工艺全过程中磷污染物的沿程变化,分析工艺过程中磷元素的迁移转化规律;评估处理系统中的反硝

化除磷效能;对比除磷效果与工艺运行控制参数之间的关系,提出适宜工艺控制参数,为强化污水处理厂科学运行管理、提高出水质量、促进污水资源化利用、控制水体富营养化问题提供参考.

1 试 验

1.1 样品采集

该污水处理系统处理能力 20 万 m³/d,采用 A/A/O 工艺,不设初沉池,剩余污泥离心脱水后外运,脱水滤液回流至污水预处理前端,处理后出水排入某再生水厂进一步处理后用于景观水体补水,出水总磷要求满足污水处理厂污染物排放一级 A 标准,其他指标执行一级 B 标准. 2009 年 3~5 月对污水处理工艺过程进行了连续沿程采样分析,共设置了 9 个采样点,污水处理工艺流程与取样点设置如图 1 所示. 测定项目包括氨氮、硝酸盐氮、总氮、总磷、COD 等,测定方法依据《水和废水标准监测分析方法》(第 4 版). 该处理系统实际运行中进出水质平均值及其执行标准见表 1.

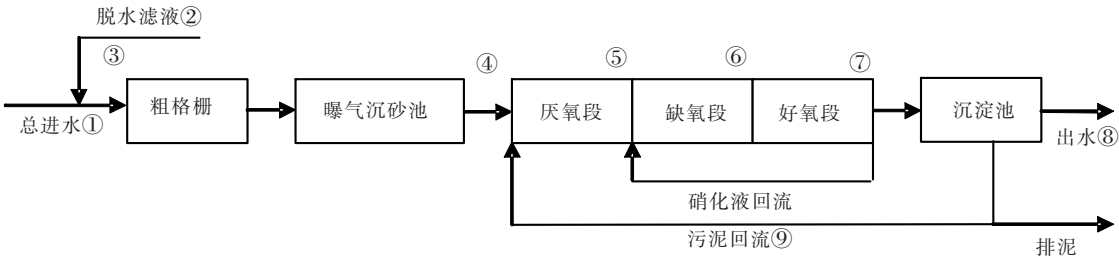


图 1 污水处理工艺与取样点设置

表 1 进出水质平均值及执行标准				mg · L ⁻¹
检测项目	进水水质	出水水质		执行标准
		设计值	实际值	
COD	537.00	60	50.50	GB 18918—2002 一级 B 标准
TN	112.15	20	18.79	
NH ₃ - N	58.92	5	0.58	
TP	5.82	1.0	0.80	一级 A 标准

1.2 仪器与试剂

紫外-可见分光光度计(Specords 100),德国 Jena 公司;荧光分光光度计(CARY Eclipse),美国瓦里安公司;超纯水机(Simplicity),密理博公司.

标准试剂、质控样品均购自中国标准物质中心;其他试剂均为分析纯.

1.3 质量保证措施

采用标准试剂配制校正溶液,校正曲线相关

系数为 0.999 9;全部样品进行平行样分析,并抽样进行精密度测试,相对偏差为 3.8%;采用质量控制样品控制分析结果的准确性,相对误差为 0.1%.

2 污水处理工艺过程中磷污染物的迁移转化途径

2.1 总磷的沿程变化

总磷质量浓度沿程变化如图 2 所示. 其中,折线为平均值,上下限为多次测量值的变化范围.

污水处理工艺过程中,磷的质量浓度变化主要发生在 A/A/O 阶段:在厌氧段,聚磷菌释放磷,并吸收低级脂肪酸等易降解的有机物,由于聚磷菌释放磷,厌氧段出水总磷质量浓度迅速升高,由进水的 5.82 mg/L 升高到 26.89 mg/L;在缺氧段,污水中的磷迅速降低,出水中总磷降至 8.49 mg/L,污水中总磷质量浓度减少了

18.4 mg/L,除磷率达 68.4%;在好氧段,总磷质量浓度下降速度减缓,出水中的平均质量浓度为 2.99 mg/L,污水中总磷质量浓度降低了 5.5 mg/L,除磷率 64.8%。在二沉池总磷质量浓度进一步降低,出水中总磷质量浓度约为 1 mg/L,基本达到一级 A 标准,总磷去除率在 86.3% 以上。

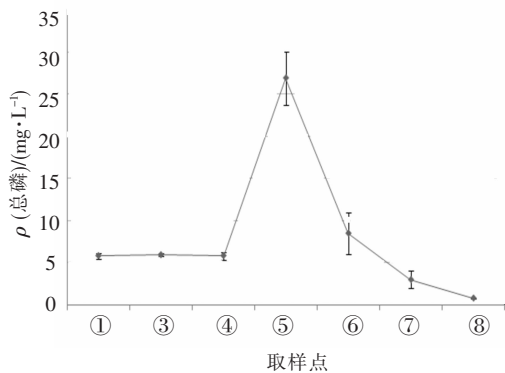


图 2 总磷质量浓度沿程变化

2.2 缺氧段的反硝化聚磷作用分析

由图 2 可知,A/A/O 工艺过程中,磷吸收在缺氧段开始发生,直至好氧段完成磷的去除,其中缺氧段吸磷量是好氧段的 3 倍以上,表明缺氧段存在明显的反硝化聚磷作用.这是由于反硝化聚磷菌在缺氧条件下,以 NO_3^- 作为电子受体吸收磷,氧化胞内贮存的 PHB,并从环境中摄磷.文献[7]对某污水处理厂 A/A/O 工艺运行过程中反硝化聚磷能力也进行了研究,认为缺氧段能够实现同时反硝化和过量摄磷,其摄磷能力接近好氧段.文献[8]指出,系统对磷的去除有 51.8% 为反硝化聚磷作用,48.2% 为好氧聚磷,相比于传统的生物脱氮除磷工艺,反硝化聚磷在系统中起到了重要的作用.本文认为,A/A/O 工艺中,缺氧段的反硝化聚磷能力大于好氧段,对于系统总磷的去除至关重要。

在缺氧段反硝化聚磷过程中, NO_3^- 质量浓度是主要影响因素,一方面过低的 NO_3^- 质量浓度会导致因电子受体不足而影响缺氧段磷的吸收,降低除磷效果;另一方面,过高的 NO_3^- 质量浓度会降低除磷速率,降低除磷效果,且过高的 NO_3^- 会导致 NO_2^- 的积累^[9]. 目前关于反硝化聚磷的适宜 NO_3^- 质量浓度尚未形成统一共识.有研究表明,缺氧段的吸磷量和硝酸盐投加量有关^[10].随着缺氧段硝态氮质量浓度升高,反应初期反硝化和吸磷速率也随之升高^[11].傅金祥等^[12]在研究硝态氮质量浓度对反硝化除磷过程的影响时发现,当缺氧段初始 NO_3^- 质量浓度低于 15 mg/L

时,TP 去除率小于 23%,当 NO_3^- 质量浓度在 25 ~ 45 mg/L 时,TP 去除率大于 60%,最高可达 70.4%;当 NO_3^- 质量浓度超过 55 mg/L 时,TP 去除率反而小于 34%,认为过高的硝酸盐氮质量浓度会抑制反硝化过程中对磷的去除.上述结果均为实验室条件下的研究结论,而关于实际工程中的反硝化聚磷作用与缺氧段硝酸盐质量浓度关系的研究未见报道。

根据分析结果和该厂运行状况,回流硝化液中硝态氮质量浓度在 5 ~ 15 mg/L 变化,折合成硝酸盐质量浓度约为 20 ~ 60 mg/L;系统内回流比一般平均为 95%,硝化液回流至缺氧段起端,硝态氮质量浓度在 2.5 ~ 7.5 mg/L 内,折合成硝酸盐质量浓度约为 10 ~ 30 mg/L;缺氧段末端硝态氮质量浓度降至 0.2 ~ 3.5 mg/L;缺氧段反硝化聚磷去除率在 10% ~ 95% 波动。

回流硝化液中硝酸盐质量浓度与缺氧段反硝化聚磷效率的对比分析表明,回流硝化液中硝酸盐质量浓度对缺氧段反硝化聚磷作用的影响具有分段特点: NO_3^- 质量浓度在低于 25 mg/L 和大于 55 mg/L 时磷的去除率明显降低;在 25 ~ 55 mg/L 内时,缺氧段 TP 去除率基本稳定在 80% 左右。

3 工艺运行参数与除磷效果的分析

3.1 系统进水 $\rho(\text{COD})/\rho(\text{TP})$ 对除磷效率的影响

A/A/O 除磷效率与进水碳源数量、质量以及碳磷比密切相关.聚磷生物和反硝化细菌的生成量与可利用的低级脂肪酸的质量浓度有关,进水中低级脂肪酸等易生物降解碳源数量是生物脱氮除磷反应中主要的碳来源.由于该污水厂进水主要是城市生活污水,进水 COD 平均在 500 ~ 600 mg/L 内, $\rho(\text{BOD}_5)/\rho(\text{COD}) > 0.46$,而且在 A/A/O 工艺之前未设初沉池,因此,进水中碳源数量和质量基本满足脱氮除磷的需要。

据文献报道,当进水碳磷比小于 32 时,A/A/O 系统对磷的去除效果随碳磷比的上升而线性增加,当进水碳磷比高于 32 时就可以实现稳定高效的出水水质^[13].该厂进水碳磷比 $\rho(\text{COD})/\rho(\text{TP})$ 与磷去除率的关系如图 3 所示.可以看出, $\rho(\text{COD})/\rho(\text{TP})$ 在 80 ~ 100,基本处于文献提出的适宜范围;进水中 $\rho(\text{COD})/\rho(\text{TP})$ 对总磷去除率有一定的影响,但影响规律不明显。

3.2 除磷效率与污泥龄、污泥负荷的相关性分析

污泥龄(SRT)是影响除磷脱氮的主要运行控制参数之一,除磷脱氮二者对污泥龄的要求是相

矛盾的. 对于典型的城市污水水质, 同化除磷效率与泥龄密切相关, 泥龄越短, 同化除磷的效率越高. 污泥负荷 (F/M) 是活性污泥法的一个重要运行、控制参数, 污泥负荷与出水水质有明显的关系. 因此, 泥龄和污泥负荷对氮磷的去除有重要影响.

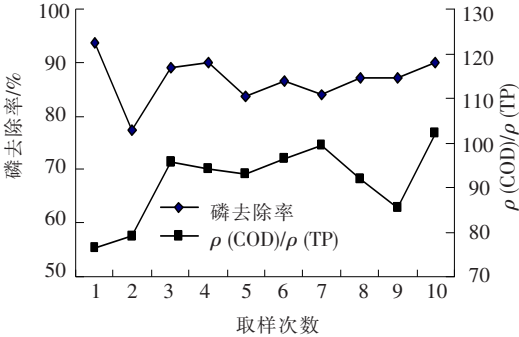


图 3 $\rho(\text{COD})/\rho(\text{TP})$ 与 TP 去除率的对比

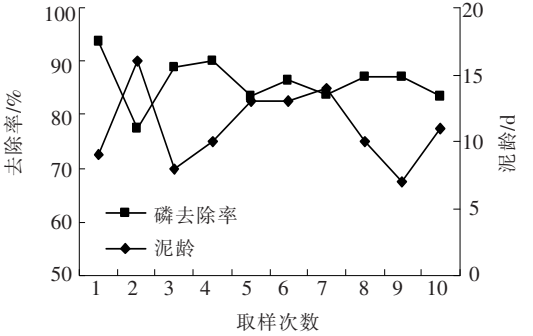
总磷的去除率与泥龄、污泥负荷关系如图 4 所示. 可以看出, 系统除磷效率与泥龄、污泥负荷具有反向变化关系. 当污泥负荷控制在 $0.15 \text{ kg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 左右, 泥龄控制在 $10 \sim 12 \text{ d}$ 时, 除磷效果在 88% 左右, 此时二沉池出水中各项指标亦均满足排放标准要求.

3.3 系统内部磷的积累与排泥量的相关性分析

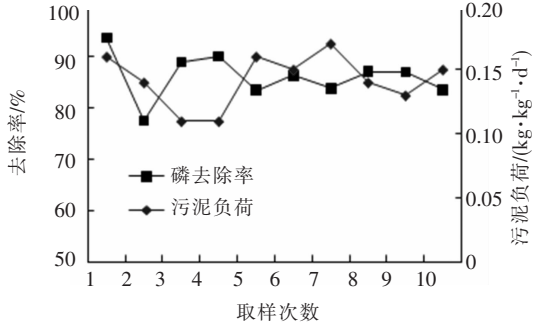
污水处理系统进水中的磷主要是通过排泥、排水等途径排除, 正常运行时系统内部磷的输入

与输出达到平衡状态时可以获得稳定的除磷效果, 因此, 通过计算系统内部磷的积累能够判断磷的去除效果以及排泥量是否适宜.

该污水厂处理系统内部磷物料平衡核算如图 5 所示.



(a) 总磷去除率与泥龄关系



(b) 总磷去除率与污泥负荷关系

图 4 总磷去除率与污泥龄、污泥负荷的关系

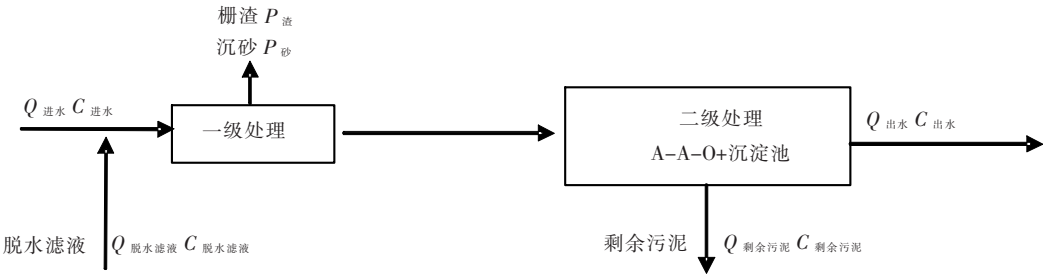


图 5 污水处理系统磷物料核算

系统内部磷的积累量用 ΔP 表示, 当 $\Delta P < 0$ 时, 说明系统除磷效果较好, 磷过量排放; 当 $\Delta P = 0$ 时, 系统磷处于输入与输出平衡状态, 此时运行效果最佳; 当 $\Delta P > 0$ 时, 系统中磷有积累, 需要加大排泥量. 系统内部磷的积累量可用下式表示:

$$\Delta P = Q_{\text{进水}} C_{\text{进水}} + Q_{\text{脱水废液}} C_{\text{脱水废液}} - Q_{\text{剩余污泥}} C_{\text{剩余污泥}} - Q_{\text{出水}} C_{\text{出水}} - P_{\text{砂}} - P_{\text{渣}} \quad (1)$$

其中, 栅渣与沉砂主要是拦截固体与去除油脂, 磷的质量浓度 $P_{\text{砂}}$ 、 $P_{\text{渣}}$ 相对较少, 相对于污水厂进水输入的磷较小, 分别约占 0.003% 与 0.007% , 可

忽略不计. 故磷的积累量可表示为

$$\Delta P = Q_{\text{进水}} C_{\text{进水}} + Q_{\text{脱水废液}} C_{\text{脱水废液}} - Q_{\text{剩余污泥}} C_{\text{剩余污泥}} - Q_{\text{出水}} C_{\text{出水}} \quad (2)$$

根据污水厂实际运行日报和水样沿程分析结果计算了系统内磷的积累与排泥量的关系, 如图 6 所示. 可以看出, 系统内部磷的变化与排泥量具有显著的反向相关关系, 排泥量大时系统内部磷积累量减少, 反之相反; 系统磷的正负积累量占磷输入量的 10% 左右. 排泥量一般控制在 $4\,000 \sim 5\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ (约占进水量 $2\% \sim 2.5\%$) 可以保持系统稳定除磷状态, 保证出水质量, 同时也可以

减少过量排泥造成经济浪费。

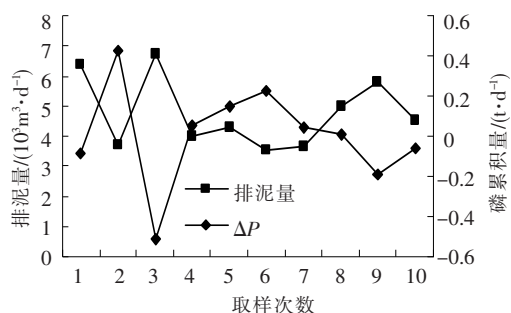


图 6 系统内磷的积累量与排泥量的关系

4 结 论

1) A/A/O 工艺在缺氧段存在反硝化聚磷作用,其吸磷量是好氧段吸磷的 3 倍以上,回流硝化液中硝酸盐质量浓度对缺氧段反硝化聚磷作用具有分段影响特点,出水中总磷质量浓度约为 1 mg/L 左右,基本达到一级 A 标准,总磷去除率在 86.3% 以上。

2) 由于该厂 A/A/O 工艺前端未设初沉池,进厂水经过预处理后直接进入厌氧段,从而确保了进水中有机碳源的质量和数量满足除磷生物的需要;进水碳磷比对氮磷去除率影响不明显。

3) 工艺系统除磷效果与污泥负荷、泥龄呈反向变化。当污泥负荷控制在 0.15 kg/(kg·d) 左右,泥龄控制在 10~12 d 时,除磷效果比较好,可以达到 88% 左右,出水各项指标均满足排放标准要求。

4) 污水处理系统内部磷的积累与排泥量具有显著的反向相关关系;磷的正负积累量占系统磷输入量的 10% 左右。当排泥量控制在进水量的 2.0%~2.5% 时,可以保持系统稳定除磷状态,同时可避免过量排泥造成的经济浪费。

参考文献:

[1] 吴昌永,彭永臻,彭铁,等. A²O 工艺中的反硝化除磷及其强化[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,141(18): 46-50.

[2] YILMAZ G, LEMAIRE R, KELLER J, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal from nutrient-rich industrial wastewater using granular sludge [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, 100(3): 529-541.

[3] KONDO T, TSUNEDA S, EBIE Y, *et al.* Characterization of the microbial community in the anaerobic/oxic/anoxic process combined with sludge ozonation and phosphorus adsorption [J]. *Journal of Water and Environmental Technology*, 2009, 7(3): 155-162.

[4] SOEJIMA K, OKI K, TERADA A, *et al.* Effects of acetate and nitrite addition on fraction of denitrifying phosphate-accumulating organisms and nutrient removal efficiency in anaerobic/aerobic/anoxic process [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2006, 29(5/6): 305-313.

[5] 张荣兵,文洋,鲍海鹏,等. A²/O 工艺 DO 的空间分布及控制品质评价指标研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(9): 70-74.

[6] 王强,王继华,张晓琦,等. 一株反硝化聚磷菌生长及脱氮除磷特性[J]. 化工学报, 2010, 61(16): 1540-1544.

[7] 王博,白雪,续蕾,等. 清河污水处理厂二期工程生物除磷过程解析[J]. 给水排水, 2010, 36(18): 28-31.

[8] 张志超,黄霞,肖康,等. 脱氮除磷膜-生物反应器的除磷效果及特性[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2008, 48(9): 92-94.

[9] 孙晓洁,周少奇,丁进军,等. 不同电子受体影响下的反硝化除磷过程[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2007, 35(6): 120-126.

[10] 刘洪波,孙力平,夏四清. 生物膜中反硝化除磷作用的研究[J]. 工业用水与废水, 2006, 37(1): 402-403.

[11] 罗固源,吉芳英,罗宁. 硝酸盐电子受体反硝化同时除磷试验分析[J]. 环境工程, 2004, 22(1): 32-35.

[12] 傅金祥,王颖,池福强,等. 电子受体质量浓度对反硝化除磷过程的影响[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2007, 23(5): 806-808.

[13] 王晓莲,王淑莹,彭永臻. 进水 C/P 比对 A²/O 工艺性能的影响[J]. 化工学报, 2005, 156(19): 1765-1769.

(编辑 刘 彤)