第 7 卷◆第 10 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2737-4580(P) / 2737-4599(O)

# 铁盐与铝盐复配投加对市政污水化学除磷效果的影响

杨俊军[1] 刘怡[2]
1.中机国际工程设计研究院有限责任公司；2.湖南省水务规划设计院有限公司
DOI:10.32629/jpm.v7i10.9072
[摘 要] 针对市政污水化学除磷过程中单一混凝剂投加适应性问题，采用三氯化铁与硫酸铝开展复配烧杯试验，分析 Fe/Al 摩尔比、药剂投加量及反应 pH 对除磷效果的影响。结果显示，Fe/Al 摩尔比为 1∶1、总金属离子投加量为 32 mg/L、反应 pH 为 7.0 时，总磷去除率达到 93.15%，出水总磷浓度为 0.33 mg/L。铁铝复配体系的除磷表现受离子比例及水解条件共同影响。研究形成了铁铝复配投加的参数控制方法。
[关键词] 市政污水；化学除磷；铁盐；铝盐；复配投加

## Effect of Combined Dosing of Iron Salts and Aluminum Salts on the Chemical Phosphorus Removal Efficiency in Municipal Wastewater

Yang Junjun[1] Liu Yi[2]
1.Zhongji International Engineering Design and Research Institute Co., Ltd.;
2.Hunan Water Affairs Planning and Design Institute Co., Ltd.
[Abstract] To address the suitability of single coagulant dosing in the chemical phosphorus removal process for municipal wastewater, a combined coagulation experiment was conducted using ferric chloride and aluminum sulfate to analyze the effects of the Fe/Al molar ratio, chemical dosage, and reaction pH on phosphorus removal efficiency. The results showed that when the Fe/Al molar ratio was 1:1, the total metal ion dosage was 32 mg/L, and the reaction pH was 7.0, the total phosphorus removal rate reached 93.15%, with a total phosphorus concentration in the effluent of 0.33 mg/L. The phosphorus removal performance of the iron–aluminum combined system is jointly influenced by the ion ratio and hydrolysis conditions. This study established a parameter control methodology for the combined iron–aluminum dosing.
[Key words] municipal wastewater; chemical phosphorus removal; iron salts; aluminum salts; combined dosing

## 引言

市政污水中的磷主要来源于生活污水、含磷洗涤剂及部分工业废水，进入水体后容易参与藻类生长及水体富营养化过程。化学除磷主要利用金属盐水解产物与磷酸盐发生沉淀、吸附及絮凝反应，常用药剂包括铁盐和铝盐。铁盐具有较强的磷酸盐沉淀能力，铝盐则能够形成具有吸附作用的氢氧化物絮体，两类药剂的反应特征存在一定差异[1]。

现有研究主要围绕单一金属盐投加量、反应 pH 及混凝条件展开，部分研究涉及复合混凝剂的制备与除磷性能[2]。铁铝复配体系中，两种金属离子的水解过程存在相互影响，配比变化会改变絮体形成状态及磷酸盐去除路径。单纯依据单盐投加参数确定复配剂量，难以准确反映不同水质条件下的反应变化[4]。

本文选取市政污水作为研究对象，以三氯化铁和硫酸铝作为除磷药剂，设置单盐投加及不同铁铝摩尔比复配试验，围绕总磷去除率、残余金属浓度和药剂消耗量开展分析，研究复配比例、投加量及反应 pH 对除磷过程的影响，并建立相应的运行参数控制方法。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验污水及水质特征

试验污水取自市政污水处理厂二级处理前端进水采样点，采用混合采样方式收集水样，采样后置于密闭容器中低温保存，试验前恢复至室温并充分搅拌。原水总磷浓度为 4.82 mg/L，正磷酸盐浓度为 3.76 mg/L，COD 为 186.42 mg/L，悬浮


Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

文章类型：论文| 刊号（ISSN）：2737-4580(P) / 2737-4599(O)

物浓度为 128.63 mg/L，pH 为 7.24，碱度为 186.37 mg/L（以 $CaCO_3$ 计）。试验期间采用同批次水样开展基础对照，分组试验前测定水质初始值。试验期间采用同批次水样开展基础对照，分组试验前测定水质初始值。

1.2 药剂配置及试验装置

选用分析纯三氯化铁和硫酸铝作为铁源与铝源，分别配制质量浓度为 10 g/L 的储备液，按照有效金属离子含量换算实际投加浓度。复配比例采用 Fe/Al 摩尔比表示，避免不同药剂结晶水及分子质量差异对配比计算产生影响。试验装置采用六联搅拌器，配备烧杯、精密 pH 计及分光光度计。储备液置于避光密闭容器中，使用前充分摇匀并检查溶液状态。药剂投加前分别测定储备液浓度，试验过程中使用稀盐酸和氢氧化钠溶液调节反应 pH，所有投加量统一按照铁、铝金属离子质量浓度计算。

1.3 铁铝复配试验方案

设置空白对照组、单一铁盐组、单一铝盐组及铁铝复配组。单盐组按照相同金属离子总投加量设置对照，初始投加浓度均为 32 mg/L。复配组设置 Fe/Al 摩尔比为 3∶1、2∶1、1∶1、1∶2 和 1∶3，比较不同配比条件下的磷去除变化。在筛选适宜配比后，将总金属离子投加量分别设定为 16、24、32、40 和 48 mg/L，分析剂量变化对处理效果的影响。

pH 试验设置 5.5、6.0、6.5、7.0、7.5 和 8.0 六个水平，保持复配比例及总投加量一致。水质适应性试验采用不同初始总磷浓度的污水开展，分别设置 2.50、4.82 和 7.10 mg/L 三个水平，并根据进水磷浓度调整金属离子投加量。每组设置三次平行试验，记录反应期间水质变化及絮体状态。

1.4 反应过程及检测方法

每组取 500 mL 污水置于烧杯中，先调节初始 pH，再加入对应药剂。快速搅拌阶段转速设为 250 r/min，持续 2 min；慢速絮凝阶段转速设为 50 r/min，持续 15 min；随后静置沉淀 30 min。取上清液进行水质检测，总磷及正磷酸盐采用钼酸铵分光光度法测定，残余铁、铝浓度采用相应水质分析方法测定[4]。总磷去除率按照初始总磷浓度与处理后总磷浓度之差占初始浓度的比例计算，单位药剂除磷效率按照单位金属离子投加量对应的磷去除质量计算[5]。平行试验结果取算术平均值。

## 2 铁铝复配投加除磷效果分析

2.1 单一铁盐与铝盐除磷效果对比

在相同金属离子总投加量 32 mg/L 的条件下，分别开展铁盐、铝盐及空白对照试验。三组处理采用相同搅拌程序和沉淀时间，处理后测定上清液总磷浓度。单一铁盐组总磷去除率为 87.62%，剩余总磷浓度为 0.60 mg/L；单一铝盐组去除率为 85.94%，剩余总磷浓度为 0.68 mg/L。铁盐组的磷去除表现略高于铝盐组，两种药剂均能够降低水样中的磷浓度。

铁盐水解后形成的羟基络合物能够与磷酸根发生沉淀反应，部分磷随铁系絮体沉降。铝盐水解形成的氢氧化铝絮体具有较大的比表面积，能够吸附水体中的磷酸盐及细小颗粒。两组试验的残余磷浓度存在差异，反映出金属离子水解产物及絮体性质对磷去除过程的影响。单盐试验中，铁盐对正磷酸盐的去除率为 89.37%，铝盐为 87.16%，与总磷变化趋势基本一致。

2.2 铁铝复配比例对除磷效果的影响

在总金属离子投加量保持 32 mg/L、初始 pH 为 7.0 的条件下，改变 Fe/Al 摩尔比开展复配试验。不同配比条件下的总磷去除率分别为 89.26%、91.48%、93.15%、92.37%和 89.83%，对应 Fe/Al 摩尔比依次为 3∶1、2∶1、1∶1、1∶2 和 1∶3。铁铝比例接近 1∶1 时，处理后总磷浓度降至 0.33 mg/L，去除率达到最高值。

当铁离子比例较高时，体系中铁水解产物占比增加，磷酸盐沉淀反应占据较大作用比例，铝系絮体对细小磷颗粒的吸附作用相对减弱。随着铝离子比例增加，氢氧化铝絮体数量增多，吸附及网捕作用发生变化，但铁系沉淀产物所占比例下降。两类金属离子比例失衡时，絮体结构及磷去除路径随之改变。Fe/Al 为 1∶1 时，两种金属离子水解产物共同参与沉淀与絮凝过程，絮体分布较均匀，沉降后上清液浊度为 8.37 NTU。复配比例筛选以总磷去除率、残余金属浓度及絮体沉降状态作为联合判断指标。

2.3 复配药剂投加量对除磷效果的影响

确定 Fe/Al 摩尔比为 1∶1 后，分别设置 16、24、32、40 和 48 mg/L 五个总金属离子投加水平。随着投加量增加，总磷去除率依次达到 82.36%、89.42%、93.15%、93.78%和 93.91%。16 mg/L 投加条件下，药剂与水体中磷酸盐的反应比例偏低，部分磷仍以溶解态存在。投加量提高至 24 mg/L 后，金属离子与磷酸根接触机会增加，絮体生成量随之上升。

投加量达到 32 mg/L 时，出水总磷浓度为 0.33 mg/L，继续增加至 40 mg/L 后，去除率仅提高 0.63 个百分点。投加量达到 48 mg/L 时，去除率进一步提高 0.13 个百分点，增幅逐渐收窄。按照单位金属离子投加量计算，五组药剂除磷效率分别为 0.25、0.18、0.14、0.11 和 0.09 mg/mg。药剂消耗量增加后，单位投加量对应的磷去除质量呈下降趋势。综合出水磷浓度与药剂消耗量，32 mg/L 作为该水质条件下的适宜投加水平。

2.4 pH 条件对复配除磷效果的影响

保持 Fe/Al 摩尔比为 1∶1、总金属离子投加量为 32 mg/L，分别调节反应初始 pH 至 5.5、6.0、6.5、7.0、7.5 和 8.0。各组总磷去除率依次为 84.72%、89.63%、92.46%、93.15%、92.71%

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

和 89.84%。pH 由 5.5 升至 7.0 时，除磷效率逐渐提高，处理后水样的总磷浓度由 0.74 mg/L 降至 0.33 mg/L。pH 继续升高后，除磷率出现小幅下降。

酸性条件下，铁盐和铝盐的水解过程受到抑制，金属离子与磷酸根形成沉淀的反应程度发生变化。pH 处于 6.5～7.5 时，铁铝水解产物能够形成较稳定的絮体结构，沉淀与吸附过程共同参与磷去除。碱性条件下，部分金属离子以不同羟基络合形态存在，铝离子还可能受到氢氧根竞争作用影响。pH 为 7.0 时，出水残余铁浓度为 0.18 mg/L，残余铝浓度为 0.24 mg/L，两项指标均处于本组试验较低水平。

2.5 不同进水水质下的除磷适应性

选取初始总磷浓度为 2.50、4.82 和 7.10 mg/L 的污水开展适应性试验，Fe/Al 摩尔比保持 1∶1，按照金属离子总投加量与进水总磷浓度约 6.64 的质量比调整投加量，分别投加 16.60、32.00 和 47.14 mg/L。三组处理后的总磷去除率分别为 92.08%、93.15%和 91.82%，对应出水总磷浓度为 0.20、0.33 和 0.58 mg/L。

进水总磷浓度增加后，药剂投加量同步提高，但去除率并未呈现持续上升趋势。高磷浓度水样中，磷酸根与金属离子的反应比例、悬浮颗粒表面吸附状态及絮体碰撞频率均发生变化。对碱度为 145.28～216.43 mg/L 的不同水样开展补充检测，发现碱度变化会影响反应过程中的 pH 稳定性，悬浮物浓度则与絮体聚集及沉降状态存在关联。运行过程中按照进水总磷浓度调整金属离子投加量，并结合反应后 pH 修正药剂比例。

2.6 复配投加与单盐投加综合性能比较

以相同金属离子总投加量 32 mg/L 作为比较条件，铁盐、铝盐及铁铝复配组的总磷去除率分别为 87.62%、85.94%和 93.15%，复配组的出水总磷浓度为 0.33 mg/L，低于两种单盐组。残余金属检测结果显示，铁盐组残余铁浓度为 0.29 mg/L，铝盐组残余铝浓度为 0.37 mg/L，复配组残余铁、铝浓度分别为 0.18 mg/L 和 0.24 mg/L。

单盐组主要依靠对应金属离子的水解沉淀及絮体吸附完成磷去除，复配组中两类金属水解产物共同参与反应。相同投加水平下，复配组总磷去除率较铁盐组提高 5.53 个百分点，较铝盐组提高 7.21 个百分点。复配体系在药剂投加比例、絮体形成及残余金属控制方面呈现出不同于单盐体系的变化特征。

## 3 铁铝复配除磷机制及运行控制

3.1 铁铝复配化学除磷作用机制

铁盐与铝盐进入污水后发生逐级水解，形成不同羟基络合物及金属氢氧化物。铁离子与磷酸根之间能够形成难溶性磷酸铁沉淀，铝离子则参与磷酸铝沉淀及氢氧化铝絮体形成。两类反应共同改变水体中溶解性磷的分布状态。

铁铝复配体系中，金属氢氧化物絮体表面存在活性羟基位点，磷酸根能够在固液界面发生配位交换，形成内层络合结构。絮体生长期间，细小颗粒及沉淀物随碰撞聚集进入絮体内部，形成吸附、网捕及共沉淀相结合的除磷过程。Fe/Al 摩尔比改变后，体系中不同水解产物的相对含量随之变化，进而影响沉淀反应程度、絮体表面性质及颗粒聚集状态。两类金属离子保持适宜比例时，化学沉淀与絮凝吸附共同参与磷去除。

3.2 复配投加运行参数控制

运行过程中按照进水总磷浓度核算金属离子需求量，铁铝摩尔比控制在 1∶1 附近，药剂储备液分别配制后按比例同步投加。反应初始 pH 控制在 6.5～7.5，快速混合阶段保持较高搅拌强度，慢速絮凝阶段降低转速，沉淀阶段控制水流扰动。连续运行期间定期检测进水总磷、出水总磷及残余铁铝浓度，根据检测结果修正药剂投加量。进水碱度变化较大时，增加反应 pH 检测频次，并结合沉淀池出水状态调整反应条件。

## 结论

铁盐与铝盐复配投加涉及金属离子水解、磷酸盐沉淀及絮体吸附等多个反应过程，复配比例和反应条件共同影响磷去除表现。研究围绕单盐对照、复配比例、药剂投加量及水质条件开展分析，形成了以 Fe/Al 摩尔比、金属离子总投加量和反应 pH 为主要控制参数的运行方法。后续研究可结合不同污水处理工艺的水质波动特征，进一步完善复配药剂的投加控制及运行评价方法。

## [参考文献]

[1]常龙艳,田文清,樊怡乐,等. 侧流技术强化市政污水脱氮除磷研究与应用进展[J].化工环保,2025,45(2):163-170.

[2]丁心贺,甘永海,孔明,等. 聚氯化铝钛混凝剂的制备及其除磷性能[J].环境工程学报,2024,18(11):3238-3250.

[3]文金梅,吴京,廖文强,等. 铁盐对生物除磷系统的影响研究进展[J].水处理技术,2024,50(11):1-6+13.

[4]杨旸,侯成,江心白,等. 铁基材料除磷性能及影响因素研究进展[J].离子交换与吸附,2024,40(1):61-71.

[5]郑雯佳,孙继成,王巧英,等. 基于膜分离的铁盐除磷效果影响因素[J].净水技术,2023,42(4):86-94+136.

作者简介：杨俊军，出生年月：1984 年 7 月 18 日，男，汉族，籍贯：湖南省永州市，学历：硕士研究生，职称：给水排水高级工程师，研究方向：市政给排水工程；

刘怡，出生年月：1987 年 11 月，女，汉族，籍贯：江苏，学历：硕士，职称：高级工程师，研究方向：市政给排水。


Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.