

污水处理厂运营管理中化学除磷工艺的优化及药剂投加技术

曾宏德

中法水务管理（中山）有限公司

摘要：磷是污水里的主要污染物之一。这种物质排放量一旦超标，水体就会出现富营养化问题，促使藻类疯狂繁殖，进而打破水体原有的生态平衡。化学除磷技术是借助化学药剂清除污水中的磷，具有操作简便、效率较高、适用场景广泛等优势。本文深入剖析了化学除磷的基本原理与影响因素，着重讲解了污水处理厂在化学除磷工艺上的优化办法，以及除磷药剂的投加技术，希望能为污水处理厂的运营管理工作提供有价值的参考。

关键词：污水处理；化学除磷工艺；药剂投加技术；优化策略

随着公众环保意识的逐步增强，社会各界对污水处理厂磷污染物去除效果的关注度显著提升。化学除磷作为污水处理领域成熟且高效的除磷技术，已在污水处理厂的日常运营管理中得到广泛应用。

实践表明，通过对化学除磷工艺进行系统性优化，并配套应用精准化药剂投加技术，不仅能够大幅提升磷的去除效率，确保出水水质稳定达标，还能有效控制药剂消耗成本，最终实现污水处理效能与经济性的双重提升，达成事半功倍的运营效果。

1 简述化学除磷的基本原理及影响因素

1.1 化学反应原理

化学除磷的核心操作，是往污水里投加化学药剂。污水中那些可溶解的磷，会和药剂里的金属离子（如铝、铁等）发生反应，从而生成不容易溶解的磷酸盐沉淀，磷也就这样被去除了。以铝为例，其的化学反应方程式是：
$$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{PO}_4^{3-} \rightarrow \text{AlPO}_4 \downarrow + 3\text{SO}_4^{2-}$$

现实生活中，铝盐（如硫酸铝、氯化铝）、铁盐（如硫酸亚铁、氯化铁）以及石灰等都是常见的除磷药剂。

1.2 影响除磷效果的因素

1) pH 值因素。实际操作中，pH 值对化学除磷反应的影响很明显。不同金属盐在不同 pH 值区间里，除磷效果有着较大的差别。以铁盐为例，当 pH 值处于 5 ~ 6 时，生成的磷酸铁沉淀稳定性最强，除磷效果也更理想；铝盐的 pH 值为 6 ~ 7 时，除磷效率更高。这是因为 pH 值的高低会改变金属离子的水解形态，进而作用于其与磷的反应，最终导致反应产物的溶解度出现差异。

2) 温度因素。温度对化学除磷的作用主要体现在反应速率上。通常情况下，温度上升，反应进行的速度会加快。不过在污水处理厂的实际运行过程中，温度变化幅度比较小，往往会在某个区间内上下波动。比如在 10 ~ 25℃，温度对除磷效果的影响相对有限；但当温度降到 5℃ 以下时，反应速率可能会明显变慢，这时就需要对药剂投加量

或是反应条件做相应调整，比如适当增加药剂的投放量，又或者采取措施提高污水的温度。

3) 污水中的干扰物质因素。实践中，污水里的一些物质可能会对化学除磷反应形成干扰。例如，有机物含量过高时，可能会和金属离子发生络合反应，削弱金属离子与磷的结合能力。另外，硫化物的存在可能会与金属离子反应生成硫化物沉淀，这样一来，能够用于除磷的有效金属离子数量就会减少，从而影响除磷效果。

2 化学除磷工艺的优化

2.1 优化对药剂的选择

实际生活中，化学除磷工艺常选用的药剂包括铁盐、铝盐与钙盐。这些药剂各有自身的长处和短板，实际应用时必须仔细挑选。铁盐的除磷效果不错，生成的磷酸铁沉淀也比较稳定。常用的铁盐有三氯化铁和硫酸亚铁。三氯化铁的除磷效率很高，可它存在一定的腐蚀性；硫酸亚铁的价格相对低些，但其除磷效果稍差一点。

在实际生活与工程应用中,化学除磷工艺常用药剂主要分为铁盐、铝盐与钙盐3大类。这类药剂各具优势与局限性,需结合实际场景谨慎选型。

1) 铁盐类药剂:铁盐除磷效果好,生成的磷酸铁沉淀稳定性较强,常用品种包括三氯化铁与硫酸亚铁。其中,三氯化铁除磷效率高,但具有一定腐蚀性;硫酸亚铁价格相对低廉,除磷效果却稍逊一筹。实际应用时,需综合污水水质、处理成本及设备耐腐蚀性能等因素确定具体选用种类。

2) 铝盐类药剂:以硫酸铝为代表的铝盐也是主流除磷药剂之一。其优势在于适用pH值范围较宽,在多数水质条件下均可发挥除磷作用,且生成的沉淀颗粒粒径较大,易于沉降分离。需要注意的是,铝盐投加量若超过阈值,可能导致水体铝污染,因此必须严格控制投加量。

3) 钙盐类药剂:钙盐(如石灰)的除磷原理主要是通过与磷反应生成羟基磷灰石沉淀实现。该类药剂的核心优势是成本低廉,可有效降低处理

费用;但除磷效果对pH值敏感度高,且反应过程中易在管道、设备内壁形成结垢,增加维护难度。

近些年来,为了获得更高的除磷效率和更低的运营成本,一些新型药剂在化学除磷中得到了实际应用。比如,新型药剂聚合氯化铝(PAC)具备高效的除磷能力和良好的混凝性能,已经受到大众的广泛关注。研究表明,相同条件下,PAC比硫酸铝能更有效地降低水中的磷含量,产生的污泥量也比较少。有项试验室研究显示,用PAC处理含磷污水时,磷的去除率能达到95%以上,而使用硫酸铝时,去除率大约为85%。

另外,一些新型复合药剂的应用也表现出了良好的性能。这类药剂通常是把两种或更多种不同的化学成分混合制成,包含多种金属离子或者添加了助凝剂成分,能够提高除磷效率。例如由硫酸铝和聚丙烯酰胺组成的复合药剂,经证实能在较大的pH值区间内保持高效的除磷能力^[1]。

2.2 优化反应条件

现实中,混合搅拌的条件必须做

好优化。充分的混合搅拌,是化学除磷反应能够顺利进行的关键。药剂投加之后,需要快速搅拌,让药剂和污水可以均匀混合,确保金属离子与磷能充分接触并发生反应。在此过程中,搅拌强度与搅拌时间也得根据实际情况做出调整。

通常而言,搅拌强度太大可能会损坏已经形成的沉淀颗粒,搅拌强度太小又会造成混合不均匀,保持合适的搅拌强度就显得格外重要。比如采用机械搅拌时,搅拌速度一般控制在100~200 r/min,搅拌时间控制在1~3 min最为合适。

进行混合搅拌时,反应时间与沉淀时间的把控也要引起重视。反应时间与沉淀时间,直接关系到除磷效果的好坏。适当延长反应时间能让反应进行得更充分,而反应时间过长会增加设备的占地面积,还会提高运行成本。沉淀时间则需要保证生成的沉淀能充分沉降到容器底部,针对不同的药剂和污水水质,反应时间与沉淀时间并不一样,以铁盐除磷为例,其反

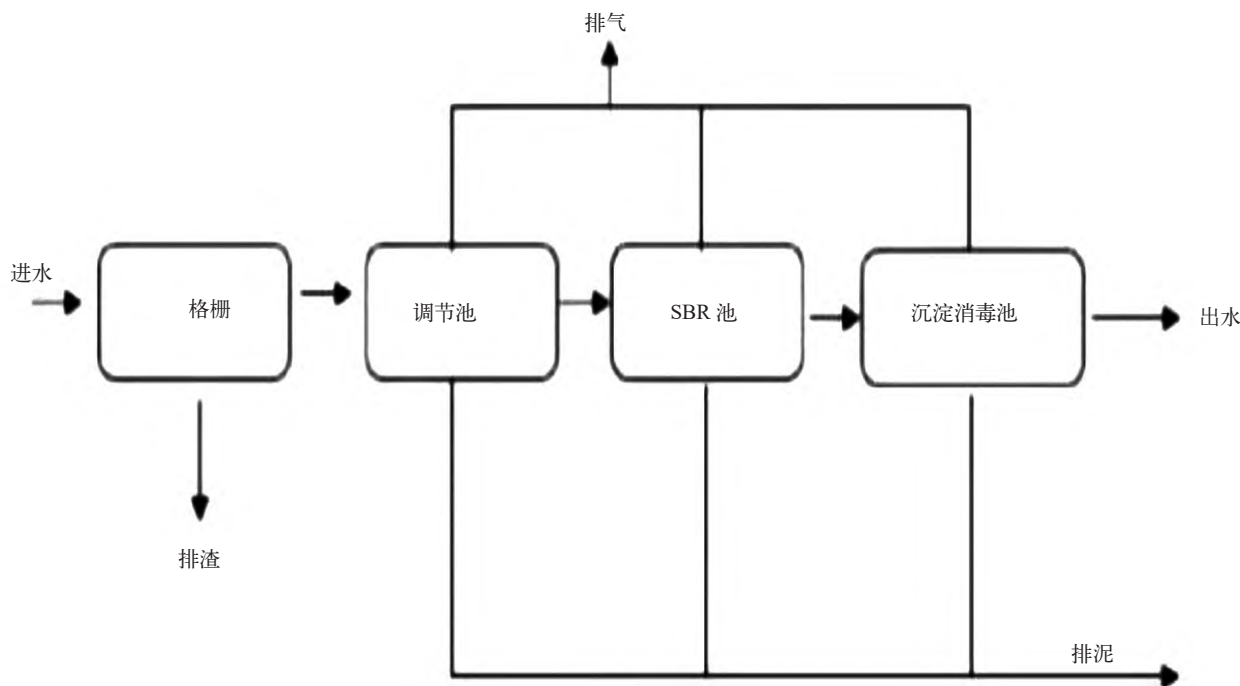


图1 污水处理厂化学除磷工艺流程

应时间一般在 10 ~ 30 min，沉淀时间则在 30 ~ 60 min。

2.3 优化与生物除磷工艺的协同

污水处理厂化学除磷工艺流程详见图 1。在当前污水处理厂的实际运营中，除磷作业并非单一采用化学除磷工艺，而是常与生物除磷工艺配合使用；在实践中可通过两种工艺的协同运行，进一步提升整体除磷效果。

从技术原理来看，生物除磷主要依托微生物的代谢作用，将水体中的磷吸收至微生物细胞内部实现富集去除；化学除磷则通过药剂与水体中溶解性磷发生化学反应，形成不溶性沉淀后完成分离清除。两者的协同方式具有多样性，例如在生物除磷单元之后，对经生物处理的出水追加化学除磷工序，以进一步降低水体中磷的残留浓度。该协同模式既能充分发挥生物除磷的低成本优势，又可借助化学除磷对溶解性磷的高效去除能力，实现两种工艺的优势互补^[2]。

3 污水处理厂除磷药剂投加技术

3.1 确定药剂投加量

污水处理厂的除磷工艺中，药剂投加量不能随意设定。确定投加量前，要先做污水水质分析，搞清楚污水里磷的具体含量。实际操作时，技术人员需依照化学方程式算出药剂的投加量。但在实际运营过程中，污水里存在干扰物质，反应条件也会发生变化，理论上的投加量并不精准，常常需要调整，一般要通过小试或者中试来确定最适合的投加量。污水处理厂刚运营时，可以做一系列不同投加量的试验，观察除磷效果，画出除磷率和投加量的关系曲线，再根据曲线确定在符合排放标准的前提下，投加量的最小值，具体见表 1。

3.2 药剂投加方式

污水处理厂采用化学除磷方法时，药剂投加方式一般会把单点投加和多

表 1 除磷率和投加量的关系

投加量 / (mg/L)	除磷率 (%)
5	30
10	50
15	70
20	85
25	90

点投加结合起来。单点投加指的是在污水处理流程的某一个点投加药剂。这种方式操作简单，但可能造成局部药剂浓度过高，既影响反应效果，还可能对后续处理单元形成冲击。比如在初沉池前单点投加铁盐，投加量若过大，初沉池里的污泥性质就可能发生改变，污泥的沉降性能也会受到影响。多点投加则是将药剂分多个点投加到污水处理流程中。像可以在污水进入生物处理单元前投加药剂，生物处理单元出水后再投加一次。这种方式能让药剂在污水中分布更均匀，提升除磷效果，同时减轻对单个处理单元的冲击。不过需要更多设备和管道，会增加投资成本，运行管理的复杂程度也会提高。

污水处理厂还会根据实际情况，采用连续投加或间歇投加的方式。连续投加是在污水处理过程中不间断地投加药剂。这种方式能让污水中药剂浓度保持相对稳定，有助于反应持续进行。它适用于污水流量和磷浓度比较稳定的情况。间歇投加是按一定时间间隔投加药剂。例如可以每隔 1 ~ 2h 投加一次。在污水流量和磷浓度波动较大时，间歇投加有一定优势，能根据实际情况灵活调整投加量和投加时间。但间歇投加需要对设备进行精确控制，以保证投加准确。

3.3 药剂投加设备的选择与维护

现实发展过程中，污水处理厂要保证除磷效果，就必须重视药剂投加设备的选择与维护工作。从运营管理的实际情况来看，计量泵与重力投加装置是最常用的药剂投加设备。计量

泵作为常用设备，能够精确控制药剂投加量。依据不同的工作原理，计量泵可分为柱塞式计量泵、隔膜式计量泵等类型。柱塞式计量泵的计量精度较高，维护起来却比较复杂；隔膜式计量泵则具备较好的耐蚀性，适合投加腐蚀性较强的药剂。另外，重力投加装置依靠药剂自身的重力完成投加，结构简单，成本也较低。但这种装置的投加量不容易精确控制，受液位高度与药剂流量的影响很大^[3]。

4 结语

污水处理厂运营管理期间，若想提升除磷效果、削减运营成本，核心在于优化化学除磷工艺，同时改进药剂投加技术。实践中，优化药剂选择、调整反应条件、与生物除磷工艺协同运用等措施的实施，显著提高了除磷的效率与效果。在此基础上，精准确定药剂投加量、选用合适的投放方式及投加设备，并实施有效地维护管理，进一步增强了药剂投加的准确性与可靠性。污水处理厂发展中，需结合自身实际状况，如污水水质、处理规模、运行成本等因素，全面考量化学除磷工艺与药剂投加技术方案，以便获得最佳的污水处理成效。

参考文献：

[1] 楼朝刚, 陈伟, 楼洪海, 等. 节地高效型 MBC 技术在地下式污水处理厂的 应用[J]. 工业用水与废水, 2025, 56(01): 96-100.

[2] 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(02): 1-8.

[3] 陈珺, 赵荣生, 杨廷光, 等. 慈溪东部污水处理厂化学除磷工艺模拟与实时控制[J]. 给水排水, 2022, 58(04): 56-60.