

# 工业废水处理中的高级氧化技术应用与效果评估

卢耀潇

宁东泰畅水务责任有限公司 宁夏 银川 750000

**摘要：**随着工业化的快速发展，工业废水排放量逐年增加，其中含有大量的难降解有机物、重金属等污染物，对环境和人类健康构成严重威胁。传统的废水处理方法难以满足日益严格的环保要求，而高级氧化技术（Advanced Oxidation Processes, AOPs）作为一种新兴的水处理技术，因其高效、无二次污染等优点，在工业废水处理领域展现出广阔的应用前景。本文综述了高级氧化技术在工业废水处理中的应用，并对其处理效果进行了评估。

**关键词：**工业废水处理；高级氧化技术；应用

## 引言

工业废水是指在工业生产过程中产生的含有各种污染物的废水，其成分复杂、浓度高、毒性强，处理难度大。传统的物理、化学和生物处理方法在处理难降解有机物和重金属时效果有限，而高级氧化技术则通过产生强氧化性的自由基（如羟基自由基），能够高效降解这些污染物，实现废水的深度处理。

### 1 高级氧化技术概述

高级氧化技术，作为一种前沿的水处理手段，其核心在于利用一系列高效的物理和化学过程，如光照、超声波、电解以及磁场等，来催生具有极强氧化能力的自由基。这些自由基，如羟基自由基（ $\cdot\text{OH}$ ）等，拥有极高的反应活性和氧化电位，能够迅速与水体中的难降解有机物发生作用。通过开环、断键等一系列复杂的化学反应，这些自由基能够将大分子有机物逐步拆解为小分子、无害或低毒的物质，甚至在特定条件下，能直接将这些有机物矿化为最基础的二氧化碳和水，从而实现水质的彻底净化和环境的友好保护。

### 2 高级氧化技术在工业废水处理中的应用

随着工业化的迅猛发展，工业废水的排放问题日益成为环境保护的焦点。工业废水中常含有大量难降解有机物、重金属离子以及其他有毒有害物质，这些污染物对水体环境和人类健康构成了严重威胁。传统废水处理方法，如物理沉淀、化学混凝和生物处理等，往往难以有效去除这些顽固污染物。而高级氧化技术（AOPs）因其高效、快速、无二次污染等特点，在工业废水处理领域展现出了巨大的应用潜力。

#### 2.1 Fenton氧化法

Fenton氧化法是一种经典且广泛应用的高级氧化技术，其核心原理在于利用亚铁离子（ $\text{Fe}^{2+}$ ）和过氧化氢（ $\text{H}_2\text{O}_2$ ）在酸性条件下反应生成具有极强氧化能力的羟

基自由基（ $\cdot\text{OH}$ ）。羟基自由基作为一种非选择性的强氧化剂，能够与有机物发生开环、断键等反应，将其降解为小分子物质，甚至直接矿化为二氧化碳和水。因此，Fenton氧化法特别适用于处理含有难降解有机物的工业废水，如制药废水、农药废水、染料废水以及化工废水等，这些废水中往往含有大量芳香族化合物、卤代烃、硝基化合物等难以生物降解的有机物<sup>[1]</sup>。尽管Fenton氧化法具有诸多优点，但在实际应用中仍存在一些缺点和需要注意的事项：

第一缺点：由于需要投加大量的亚铁离子和过氧化氢，以及调节废水至酸性条件，导致处理成本相对较高。反应过程中会产生大量的铁泥，这些污泥的处理和处置也是一个问题。Fenton氧化法通常在酸性条件下进行，这限制了其应用范围，并可能增加废水处理的复杂性。对于某些特定的有机物，Fenton氧化法的去除效率可能不够高，需要与其他处理方法联用。

第二注意事项： $\text{Fe}^{2+}$ 和 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的投加量、反应pH值、反应时间以及温度等参数对处理效果有显著影响，需要根据实际情况进行优化。在处理含有高浓度悬浮物或重金属的废水时，需要先进行预处理，以避免对Fenton氧化过程产生干扰。Fenton氧化法通常作为预处理或深度处理步骤，需要与其他处理方法（如生物处理、混凝沉淀等）联用，以实现废水的全面处理。Fenton氧化反应通常需要特定的反应器和搅拌设备，这些设备的选择和维护对于保证处理效果至关重要。

#### 2.2 臭氧氧化法

臭氧氧化法是利用臭氧（ $\text{O}_3$ ）的强氧化性来降解有机物的一种高级氧化技术。臭氧分子具有不稳定性，容易分解产生氧原子（ $\text{O}$ ）和羟基自由基（ $\cdot\text{OH}$ ），这些活性物质能够与有机物发生直接氧化反应或间接氧化反应，将其降解为小分子物质。臭氧氧化法具有反应速度

快、无二次污染、操作简便等优点，特别适用于处理高浓度、难降解的有机废水，如印染废水、化工废水、造纸废水以及纺织废水等。这些废水中往往含有大量色度物质、芳香族化合物、有毒有害物质以及难以生物降解的有机物。

然而，臭氧氧化法也存在一些缺点。首先，臭氧的制备需要消耗大量的能源，这增加了处理成本。其次，臭氧本身是一种有毒气体，如果处理过程中泄漏或排放不当，可能对环境 and 人体健康造成危害。此外，臭氧氧化法对于某些特定类型的有机物可能降解效果有限，需要根据废水成分选择合适的处理条件。

同时，在应用臭氧氧化法时，需要注意一些事项。首先，要确保臭氧制备和使用的安全性，防止泄漏和爆炸等事故的发生<sup>[2]</sup>。其次，要根据废水的成分和处理要求，合理选择臭氧的投加量和处理时间，以避免过度氧化或处理不彻底的情况。此外，还需要对处理后的废水进行监测和评估，确保达到排放标准或回用要求。

### 2.3 光催化氧化法

光催化氧化法是一种利用光催化剂在光照条件下产生羟基自由基来降解有机物的高级氧化技术。常用的光催化剂有二氧化钛（TiO<sub>2</sub>）、氧化锌（ZnO）等半导体材料。当光催化剂受到足够能量的光照时，其表面会产生电子-空穴对，空穴与水分子反应产生羟基自由基，进而与有机物发生氧化反应，将其降解为小分子物质。光催化氧化法具有反应条件温和、能耗低、无二次污染等优点，特别适用于处理低浓度、难降解的有机废水，如医药中间体废水、农药废水、染料废水以及含油废水等。这些废水中往往含有大量难以生物降解的有机物和有毒有害物质。

然而，光催化氧化法也存在一些缺点。首先，光催化效率受到光照强度、光催化剂的活性以及废水成分等多种因素的影响，因此在实际应用中可能需要较长的处理时间或较高的光照强度才能达到理想的处理效果。其次，目前常用的光催化剂如二氧化钛等在某些条件下可能存在光腐蚀或失活的问题，需要定期更换或再生，增加了运行成本。此外，光催化氧化法对于某些特定类型的有机物可能降解效果有限，需要根据废水成分选择合适的处理条件。

在应用光催化氧化法时，需要注意以下事项。首先，要确保光照条件的稳定，避免光照强度波动过大影响处理效果。其次，要选择合适的光催化剂，并根据废水成分和处理要求确定光催化剂的投加量和处理方式。同时，还需要对处理后的废水进行监测和评估，确保达

到排放标准或回用要求。

### 2.4 超声降解法

超声降解法是一种利用超声波的空化效应来降解有机物的高级氧化技术。当超声波作用于液体时，会产生大量的微小气泡（空化泡），这些气泡在瞬间崩溃时释放出巨大的能量，形成高温高压环境，引发自由基反应和机械剪切作用，从而降解有机物。超声降解法具有反应速度快、适用范围广、设备简单等优点，特别适用于处理含有悬浮物、油脂、难降解有机物等污染物的工业废水，如含油废水、食品加工废水、化工废水以及印染废水等。

然而，超声降解法也存在一些缺点。首先，超声波的产生和传播需要消耗大量的能量，导致处理成本较高，特别是对于大规模废水处理，能耗问题尤为突出。其次，超声波的空化效应可能受到废水性质、温度、压力等多种因素的影响，处理效果可能因条件变化而波动。此外，长时间或高强度的超声波作用还可能对处理设备造成损坏，增加维护成本。

在应用超声降解法时，需要注意以下事项。首先，要根据废水的成分和处理要求，合理选择超声波的频率、功率和处理时间，以达到最佳的处理效果<sup>[3]</sup>。其次，要注意控制处理过程中的温度和压力，避免对设备造成损害。同时，还需要对处理后的废水进行监测和评估，确保达到排放标准或回用要求。

### 2.5 电化学氧化法

电化学氧化法是一种利用电极反应产生强氧化性物质来降解有机物的高级氧化技术。在电化学氧化过程中，通过施加电压使阳极发生氧化反应，产生羟基自由基、次氯酸等强氧化性物质，这些物质能够与有机物发生反应，将其降解为小分子物质。电化学氧化法具有反应条件可控、无二次污染、设备简单等优点，特别适用于处理含有重金属、难降解有机物的工业废水，如电镀废水、冶金废水、化工废水以及制药废水等。

然而，电化学氧化法也存在一些缺点。首先，电化学氧化过程中需要消耗电能，对于大规模废水处理来说，能耗较高，这增加了处理成本。其次，电极材料的选择和制备对电化学氧化效果有很大影响，一些电极材料可能存在耐腐蚀性差、电催化活性不高等问题，需要定期更换或维护，增加了运行成本。此外，电化学氧化法的处理效果可能受到废水成分、温度、pH值等多种因素的影响，需要在实际应用中不断优化和调整处理条件。

在应用电化学氧化法时，需要注意以下事项。首先，要根据废水的成分和处理要求，选择合适的电极材

料和电化学反应器设计,以达到最佳的处理效果。其次,要注意控制处理过程中的电压、电流等参数,避免对设备造成损害或影响处理效果。同时,还需要对处理后的废水进行监测和评估,确保达到排放标准或回用要求。

### 3 高级氧化技术的效果评估

#### 3.1 降解效率评估

降解效率是评价高级氧化技术处理废水效果的核心指标之一。通常,我们通过检测废水处理前后的化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)以及色度等指标来评估其降解效率。以Fenton氧化法为例,该技术在处理制药废水时展现出了极高的降解效率。研究表明,通过优化 $Fe^{2+}$ 和 $H_2O_2$ 的投加量、反应pH值等参数,Fenton氧化法能够将制药废水的COD去除率提高至99%以上。这意味着,原本含有大量难降解有机物的废水,在经过Fenton氧化法处理后,其有机物含量得到了极大的降低,废水的可生化性也得到了显著提高。臭氧氧化法在印染废水的处理中也表现出了优异的降解效率。印染废水通常含有大量染料和助剂,色度高、难降解。采用臭氧氧化法处理印染废水,不仅能够有效去除废水中的色度,还能同时降低COD和BOD。实验数据显示,臭氧氧化法处理印染废水时,色度去除率可达95%以上,COD和BOD的去除率也相当可观。除了Fenton氧化法和臭氧氧化法,光催化氧化法、超声降解法和电化学氧化法等高级氧化技术也都在不同类型的废水处理中展现出了高效的降解能力。例如,光催化氧化法在处理农药废水时,能够有效降解废水中的有机磷农药等难降解有机物;超声降解法在处理含油废水时,能够破坏废水中的乳化油滴,提高废水的沉降性和过滤性;电化学氧化法在处理含重金属废水时,能够通过电极反应将重金属离子转化为沉淀或无害物质,从而去除废水中的重金属污染。

#### 3.2 生物毒性评估

除了降解效率外,生物毒性也是评价高级氧化技术处理废水效果的重要指标之一。废水中的有毒有害物质对水生生物和人体健康都构成严重威胁。因此,评估高级氧化技术处理后的废水生物毒性具有重要意义。以光催化氧化法为例,该技术在处理农药废水时,不仅能够有效降解废水中的有机磷农药等难降解有机物,还能显著降低废水的生物毒性。实验结果表明,处理后的废水

对水生生物急性毒性显著降低,说明光催化氧化法能够有效去除废水中的有毒有害物质,降低废水的生物毒性<sup>[4]</sup>。类似地,其他高级氧化技术如Fenton氧化法、臭氧氧化法、超声降解法和电化学氧化法等也都能在不同程度上降低废水的生物毒性。这些技术通过产生羟基自由基等强氧化性物质,与废水中的有毒有害物质发生反应,将其降解为无害或低毒物质,从而降低废水的生物毒性。

#### 3.3 经济性评估

经济性是评价高级氧化技术是否具备实际应用价值的重要指标之一。虽然高级氧化技术的初期投资较高,但其长期运行成本相对较低,且处理效果优于传统方法。以电化学氧化法为例,该技术在处理含重金属废水时虽然设备成本较高,但处理效率和处理效果均优于传统化学沉淀法。电化学氧化法通过电极反应将重金属离子转化为沉淀或无害物质,无需添加大量化学药剂,减少了处理过程中的二次污染和药剂费用。同时,电化学氧化法的设备寿命长、维护成本低,长期运行下来具有显著的经济优势。

### 结语

高级氧化技术在工业废水处理领域展现出广阔的应用前景。通过合理选择和组合不同的高级氧化技术,可以有效降解废水中的难降解有机物和重金属等污染物,提高废水的处理效率和可生化性。未来,随着技术的不断进步和成本的逐渐降低,高级氧化技术将在工业废水处理领域得到更广泛的应用。同时,还需要加强对高级氧化技术的机理研究和技术创新,以推动其在环境保护领域的深入应用。

### 参考文献

- [1]郑辉.高级氧化技术在污水处理中的应用——以工业废水处理为例[J].中国战略新兴产业,2024,(15):110-113.
- [2]余水平,王元月,何友文,等.高级氧化技术在工业废水深度处理中的应用进展[J].江西化工,2023,39(03):7-12.
- [3]张立果.高级氧化技术在工业废水处理中的运用探析[J].资源节约与环保,2022,(05):100-102+109.
- [4]孟琪莉,孙冲.高级氧化技术在工业难降解有机废水处理中的应用研究进展[J].工业用水与废水,2021,52(03):1-5+13.