

引用格式:孙婧怡. 光催化技术处理含铀废水的研究进展[J]. 有色设备, 2025, 39(1): 18-25.

SUN Jingyi. Research progress on photocatalytic treatment of uranium-containing wastewater[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(1): 18-25.

光催化技术处理含铀废水的研究进展

孙婧怡

(东华理工大学, 江西 南昌 330013)

[摘要] 未经处理直接排放的含铀废水不仅会引发环境污染问题,也会影响人类健康。吸附法、膜分离法、化学沉淀法去除铀难以实现高效环保。在铀需求量逐步增加的背景下,寻求绿色及高效的处理方法成为亟需解决的问题。光催化技术具有高效环保和操作方便等优点,在处理含铀废水方面具有广阔的前景。本文首先介绍了光催化技术原理,然后深入分析光催化材料处理含铀废水的主要影响因素和研究现状,最后进行了总结与展望,为后续光催化技术处理含铀废水的发展提供理论依据。

[关键词] 光催化技术; 含铀废水; 材料; 氧化还原; 废水处理

[中图分类号] X703; TF805.2 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)01-0018-08

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.01.002

0 引言

铀作为核燃料循环的基石,其在核工业的发展中至关重要。在核能发展的同时,我国对铀的需求量随之增加。2024年,我国对铀的需求量达到 13 123 tU,成为全球铀需求量第二大国家。根据 IAEA (国际原子能机构)的预测,我国将在 2030 年和 2040 年对铀的需求量分别增长到 22 600 tU 和 43 400 tU^[1]。然而,核燃料的循环不可避免地会产生大量低浓度含铀废水^[2]。比如,在铀矿碱法浸出时,六价铀会与碳酸氢盐形成残留的可溶性配合物,其含量可达 0.56 mg/L^[3]。此外,张耀玲^[4]研究得出,某铀燃料元件加工设施年排放含铀废水量可达 1 540 m³。水中的铀可通过食物链的方式进入人体,引发一系列疾病甚至癌症,其也会通过大气循环或水循环扩散到河流湖泊中抑制水生生物的新陈代谢和水生植物的光合作用^[5-6]。考虑到铀对环境和人体的危害,目前我国对含铀工业废水的排放限制在 50 μg/L^[7-8],为保证铀含量在规定限值以下,寻求高效、价格低廉及环保的水处理技术已成为现阶段的研究重点。

目前已报道了多种含铀废水的处理方法,如化学沉淀法、吸附法、生物修复法等(图 1^[9-10]),但 these 方法仍存在问题。例如,化学沉淀法在处理过程中会造成水体的二次污染且处理后的废水难达到国家排放标准。吸附法用到的吸附材料合成路线复杂、抗腐蚀性差,对碳酸氢盐的铀配合物选择性较差。生物修复法只适用于铀含量低且对处理时间无要求的情况。光催化技术因具有绿色环保、高效、成本低廉、操作方便等优点成为解决含铀废水污染问题的有效方法。常见环境友好型光催化材料如 TiO₂、BaTiO₃ 等仅需光照条件就能够快速将可溶性 U(VI) 还原成不溶性 U(IV)。其在复杂含铀废水环境下,可根据还原电位精准选择性还原铀及铀配合物,并可重复利用,不存在吸附法选择性差、离子交换法交换树脂材料易失活等问题,具有良好的应用前景^[11-14]。本文主要从光催化还原原理、材料的研究进展、光催化效率的影响因素 3 个方面详细介绍了光催化处理含铀废水的现状和最新研究进展。

1 光催化技术及原理

光催化技术可通过光能引发系列化学反应,是

[收稿日期] 2024-10-12

[第一作者] 孙婧怡(2002—),女,吉林吉林人,硕士研究生,主要研究方向为辐射防护及环境保护。

[基金项目] 国家自然科学基金(41761090);江西省研究生创新专项资金项目(YC2024-B208, YC2024-S472)。

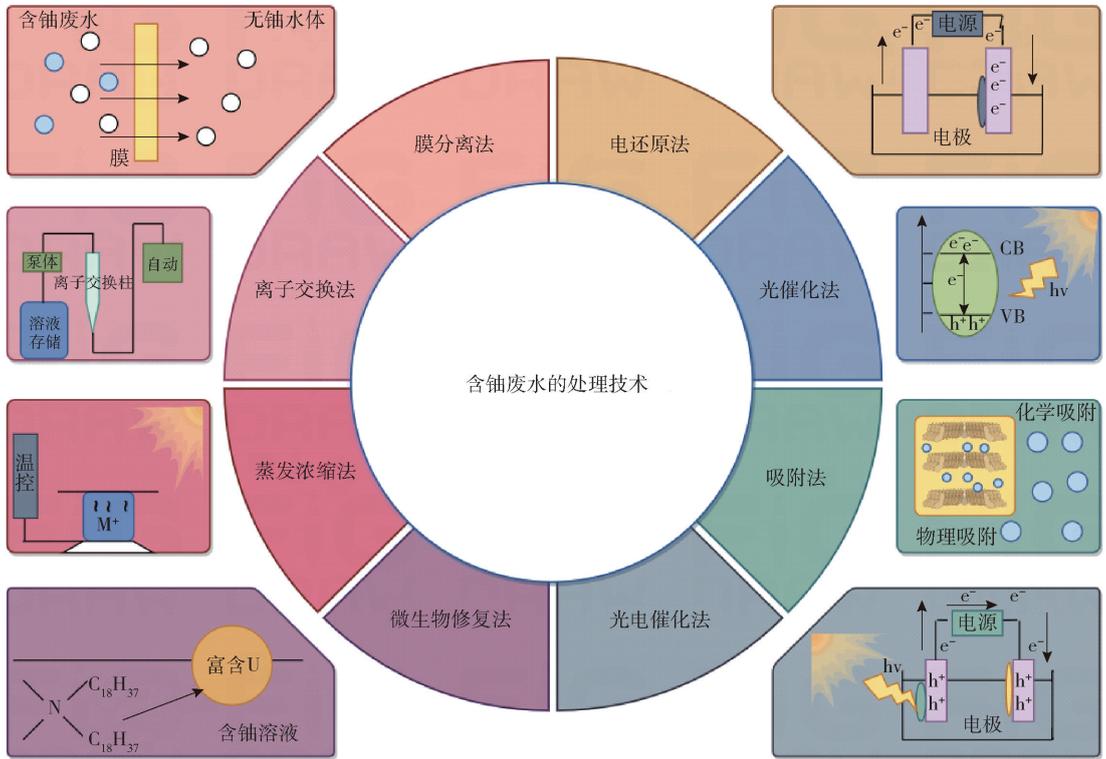


图1 含铀废水的处理方法

Fig. 1 Treatment methods for uranium-containing wastewater

一种氧化还原处理技术。如图2所示,光催化剂由电子构成的价带与不带电子的导带所构成,导带与价带之间没有任何能带的区域称为禁带。根据“能带理论”,当光催化材料受到光照且光能大于带隙能量时,价带上的电子获得能量形成激发态向导带跃迁,在内部电场作用下移动到半导体表面并对吸附的铀酰离子进行还原。价带上留下的光生空穴与水分子或有机还原剂发生氧化反应^[15-16]。光催化技术能高效去除铀的前提在于含铀废水与光催化材料的充分接触,其核心为光生载流子的有效分离。

光催化技术常用于贵金属的沉积、离子的去除、物质的降解和二氧化碳的还原。目前,光催化技术在含铀废水的处理中已取得一系列进展。张令宇等^[17]利用 CDs/SiO_2 复合材料去除 95% 以上的铀,去除容量可达 800 mg/g。Wen 等^[18]制备具有光电特性的 $\text{Zn}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{S}$ 固溶体,利用协同作用在 25 min 去除 99% 的 U(VI) 。

2 光催化材料处理含铀废水的研究进展

光催化材料的制备与性能是光催化技术处理含铀废水的重点。1972年, Fujishima 等^[19]发现 TiO_2

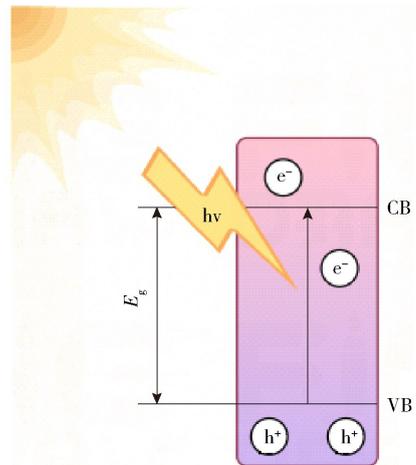


图2 光催化原理图

Fig. 2 Schematic diagram of photocatalytic principle

电极上水的光电催化分解,光催化技术就此成为人们的重点研究方向。Wang 等^[20]利用甲酸钠强化的 TiO_2 处理含铀溶液,在甲酸盐的作用下将 UO_2^{2+} 锚定在 TiO_2 界面,还原率可达 98.5%。直至目前,光催化材料除金属氧化物外,新型的钙钛矿材料和

g-C₃N₄、MOFs 等材料也具有良好的光催化除铀潜力。本节将对目前热门光催化材料处理含铀废水的进展进行详细讨论和总结。

2.1 金属氧化物基光催化材料

金属氧化物是最早发现且目前应用最广泛的光催化材料。常见的金属氧化物有 TiO₂、ZnO、SnO₂ 等,其具有成本低、化学结构稳定、活性位点丰富和对环境无二次污染等优点。

1991 年,Amadelli 等^[21]首次利用 TiO₂ 进行光催化还原 U(VI),但研究发现 TiO₂ 存在只对紫外光响应和载流子寿命短的问题。因此,更多的研究方向偏向于通过制备异质结或纳米结构复合材料进行调控。Rao 等^[22]制备了 MoS₂@TiO₂ Type II 型异质结,其在 80 min 能够去除 100% U(VI)。这归因于 Type II 型异质结的形成可缩短带隙,并在一定程度上减小材料的团聚,使光催化材料和溶液中的 U(VI) 充分接触。此外,其也有效加速光生载流子的分离,增大光响应范围,产生大量光生电子进而对 U(VI) 进行高效还原。Dong 等^[23]制备了 TiO₂@[SO₄]/CdS 双壳空心纳米球,研究发现晶粒的堆积形成了较大的孔径和丰富的活性位点,加强了 U(VI) 的吸附并为 U(VI) 的还原提供反应场所。复合材料的制备可缩短单体材料的带隙,扩大光响应范围,表面的硫酸根离子与溶液中 H⁺ 和氧气反应生成 H₂O₂,进一步将 UO₂ 氧化为 U₃O₈,利于铀的回收。

ZnO 是过渡元素组成的无机材料,具有较高的电子迁移率且制备成本较低,在紫外光下还原活度高,设计不同形貌特征的纳米结构和耦合异质结的 ZnO 成为提高 U(VI) 还原率的研究重点^[24]。Sun 等^[25]报道了一种利用原位 Se 连接的椭球体 ZnSe/ZnO 材料以还原 U(VI)。ZnSe 由于低结合能容易提供电子,而 ZnO 由于高结合能更倾向于接受电子,光生电子在内部电场作用下转移到 ZnO 表面,与 U(VI) 发生还原反应。另外,由于协同作用,具有出色导电性的 Se 引入加速载流子的转移,30 min 内对 U(VI) 的去除率达到 90.2%。

相比于上述 2 种金属氧化物半导体,SnO₂ 具有高载流子密度和优越的可见光响应能力,能够在太阳光下还原含铀废水。然而,该材料具有载流子复合严重的问题,常需空穴捕获剂辅助还原过程。Zhang 等^[26]为解决该缺陷,制备了一种 SnO₂/Cd-

CO₃/CdS 复合材料用于改变能带结构。其中,SnO₂ 和 CdCO₃ 促进光生载流子的分离,CdS 捕获光生空穴,抑制载流子的复合。而较小的粒径促进 U(VI) 附着在 SnO₂ 表面被光生电子还原。这种复合材料保证在无空穴捕获剂的情况下达到较好的还原能力。

综上所述,常见金属氧化物在处理含铀废水方面具有一定应用潜力,对铀还原能力如表 1 所示。但大多金属氧化物需要经过紫外光照射才能高效去除铀,也存在难回收及材料除铀后易失活等问题。

表 1 金属氧化物半导体去除 U(VI) 的应用

Table 1 Applications of metal oxide semiconductors in the removal of u(vi)

金属氧化物	改性方法	结果	参考文献
SnO ₂	耦合异质结	提取容量 0.1g/g	[26]
ZnO	耦合异质结	去除率 97%	[27]
TiO ₂	耦合异质结	去除率 99%	[28]

2.2 金属有机骨架光催化材料

MOFs 是金属离子(簇)与有机配体组装形成的晶体多孔材料,具有较大的比表面积,其孔道可根据需要进行修饰^[29]。MOFs 对 U(VI) 的还原通常分 3 步进行:①与 U(VI) 配体配合进行吸附;②配合物进入活性位点;③光照激发的光生电子对 U(VI) 进行还原。

Vanish Kumar 等^[30]研究了应用于光催化处理含铀废水的 MOFs 材料,结果表明,Zn-MOF 在可见光下 U(VI) 还原性能优异,但不能对其循环使用。而由于共价有机框架(COFs)材料适用于强酸强碱环境并具有拓扑结构可变、纳米孔尺寸可调和易于功能化等优点,因此现阶段研究着重于金属与共价有机框架(COFs)组成复合材料以去除铀^[31]。Zhong 等^[32]制备了具有介孔结构的 MOF/COF 异质结 NH₂-MIL-125(Ti-150)@TpPa-1,比表面积达到 607.35 m²/g,孔径为 4 nm,能够对 U(VI) 快速吸附。此外,—NH₂/O/—OH 的孤立电子促进光生电子的转移,光生电子和产生的活性自由基协同对 U(VI) 进行还原,去除率达到 80%。Bi 等^[33]制备核壳结构 Ti-MOF@DATp 材料,形成 Z 型异质结,由于静电作用的原因能够排斥其他共存离子,进而对

U(VI) 进行选择性捕获。位于 DATp 表面的 DAAQ 单体上的 $\text{C}=\text{O}$ 键带有电负性,能够吸附 U(VI)

并与大量光生电子进行铀的还原,在模拟光照下能去除 95% 的 U(VI),还原机理如图 3 所示。

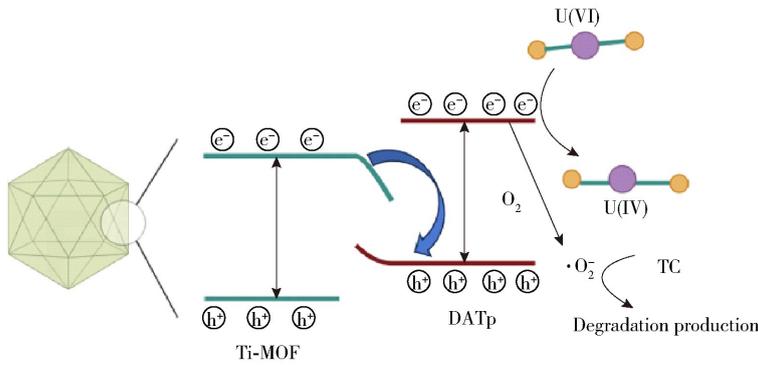


图 3 Ti-MOF@DATp 还原机理^[33]

Fig. 3 Reduction mechanism of Ti-MOF@DATp^[33]

2.3 非金属光催化材料

$\text{g-C}_3\text{N}_4$ 是目前主流的非金属光催化材料,现阶段能够实现对其低成本制备,且该材料可以循环利用、对光吸收范围广。但其载流子寿命短、比表面积较小,因此常用掺杂、耦合异质结等手段对 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 进行改进。

Zhu 等^[34] 制备 MoO_3 QDs/ $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 纳米片(图 4),利用多级结构保持较高的比表面积,其相比于单体 $\text{g-C}_3\text{N}_4$,复合材料具有更大的孔径和比表面积,提高对 U(VI) 的去除能力。此外, MoO_3 QDs/ $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的量子限域效应促进了光生电子的产生,这种协同效应是未来需重点考虑的研究方向。

组建三维结构提高比表面积的方法也可对 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 进行优化。Jiang 等^[35] 研制了三维大孔 $\text{g-C}_3\text{N}_4$,以提升其对含铀废水的还原能力。结果表明,材料的互连大孔结构可使比表面积增大,对 U(VI) 的去除容量比块体 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 高 1.83 倍,不仅与 U(VI) 进行了充分的接触,也加速了载流子的迁移。

2.4 钙钛矿类光催化材料

钙钛矿(CaTiO_3)的经典结构如图 5(a)所示,通过改变钙钛矿的化学组成即改变 A 或 B 离子的电负性,可减少光生电子跃迁需要的能量,进而促进光生载流子的激发并提高其对 U(VI) 的还原效率^[36]。另外,对钙钛矿材料进行掺杂,形成氧空位对金属电子不对称的化学状态进行影响,能够促使光响应的起始范围在可见光区域,减少还原 U(VI) 所需成本。因此,钙钛矿类材料具有极大开发潜能,是最前沿的光催化剂之一^[37]。

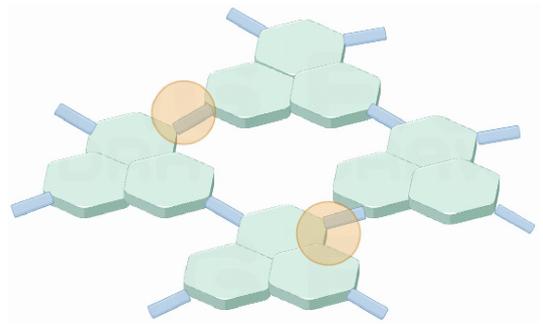


图 4 MQDs- C_3N_4 纳米片结构^[34]

Fig. 4 Structure of MQDs- C_3N_4 nanosheets^[34]

钙钛矿材料具有强吸附能力和优良的导电能力。Lu 等^[38] 用溶剂热法制备 CaTiO_3 并深入探索除铀的机理。研究得出, CaTiO_3 表面的含氧基团与 U(VI) 配位导致了两者的整合,但可见光下光生电子只还原了少量 U(VI),纯钙钛矿的光催化除铀能力仍不足,因此需要通过形成异质结的方式增强钙钛矿类材料还原铀的性能。LIS^[39] 制备了图 5(b) 所示的 $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{LaFeO}_3$ 复合材料, $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 在引入动态气体模板 NH_4Cl 后加热氧化可形成具有孔洞的层状结构,为 U(VI) 的还原提供了丰富的活性位点。 LaFeO_3 均匀分布在 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 片层上防止团聚。 $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{LaFeO}_3$ 带隙缩短至 2.67 eV,通过形成异质结改善能带结构和电子转移,导致载流子寿命得到有效提升。这种协同效应可使光生电子从 LaFeO_3 向 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 快速迁移,提高与 U(VI) 的还原效率。

Mei 等人^[40] 利用 $\text{SrTiO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$ 异质结构对 U(VI) 进行还原。实验结果表明,形成的异质结构

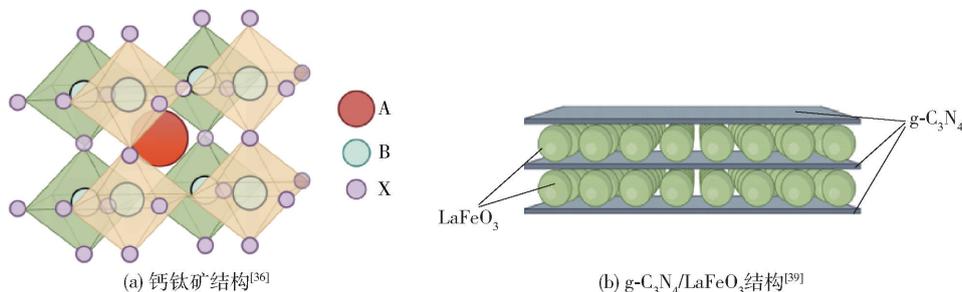


图 5 (a) 钙钛矿结构^[36] (b) g-C₃N₄/LaFeO₃结构^[39]

Fig. 5 (a) Perovskite structure^[36] and (b) g-C₃N₄/LaFeO₃ structure^[39]

加速了光生电子从 g-C₃N₄ 向 SrTiO₃ 迁移的过程,抑制了载流子的复合,在 15 min 内能够去除 100% 的 U(VI),但仍存在需要空穴捕获剂辅助除铀的缺陷。

除上述介绍的材料外,其他材料如铋基半导体、I-III-VI₂族三元半导体等也具有优秀的光催化性能。李小燕等^[41]在 Bi₂WO₆的基础上掺杂 Cu,增强 Bi₂WO₆的结晶性,Cu 的加入增强了对 U(VI)的吸附并减小带隙,提高载流子迁移速率,提升除铀性能。但值得注意的是,过量的 Cu 会形成光生载流子的复合位点,降低催化效率,因此要在适当范围内对材料进行改性。

3 光催化还原铀的重要影响因素

光催化还原技术的机制是光生电子将 U(VI) 还原成 U(IV) 的过程。因此,光生电子的产生是光催化还原技术的重中之重。此外,U(VI) 与材料的有效接触是还原的前提。然而,光催化的过程会受到外部因素的影响。本节将结合目前领域研究现状讨论光催化处理含铀废水的重要影响因素。

3.1 pH 值

光催化材料的表面状态和 U(VI) 在溶液中的形态会随着含铀废水 pH 值的变化而不同,这种性质和状态的变化会对光催化结果产生影响。因此,pH 值是一个重要的光催化参数。

Zhang 等^[42]研究了用 WO₃/g-C₃N₄ 处理不同 pH 值下含铀废水的效率。溶液 pH 值的增加导致 U(VI) 的去除率逐步上升。在 pH 值为 4.0~5.0 的情况下,U(VI) 的去除率从 54.7% 显著增长到 99.6%,但当 pH 值继续升高时,U(VI) 去除率呈下降趋势。该现象的发生可总结为 2 种原因。①材料表面电荷在 pH 值上升时从正电性变为负电性,其与呈正价的 UO₂²⁺ 存在静电吸引,加强材料对 U

(VI) 的物理吸附,进而提高还原效率。②废水偏碱性时存在的碳酸氢根离子与 U(VI) 配合增大 U(VI) 的还原势垒,也与光生电子进行竞争,降低还原效率。随着 pH 值从 3.0 增加到 5.0,TNA(碳纳米管阵列)的还原率上升至 98%,然而在碱性环境下对 U(VI) 的去除率下降^[43]。因此,对含铀废水的光催化还原处理需重点关注溶液的 pH 变化。

3.2 共存离子

实际水体中的共存离子会对目标离子的去除产生严重的阻碍作用,其与目标离子共同竞争光催化材料产生的光生电子从而降低还原率。

Chen 等^[44]评估了含铀废水中常见的阴阳离子对还原效率的影响。结果表明,阳离子对 U(VI) 的还原影响较小,甚至部分阳离子由于存在惰性对还原过程没有任何影响。而在阴离子 NO₃⁻ 存在时去除率显著下降,这是由于 U(VI) 与 NO₃⁻ 配合形成 UO₂NO₃⁺,NO₃⁻ 与光生电子共同竞争阻碍了 U(VI) 的还原。Jia 等^[45]表明 Fe³⁺ 和 Cu²⁺ 可对 U(VI) 的还原产生干扰,这是由于 Fe³⁺ 和 Cu²⁺ 的还原电位与 U(VI) 相近,从而与 U(VI) 共同竞争光生电子所致。

综上所述,对于铀的还原,需要注意 Fe³⁺ 和 Cu²⁺ 阳离子的竞争和 NO₃⁻ 阴离子的配合。此外,也要注意共存离子浓度,浓度较高且还原电位相近的阳离子会进一步降低还原效率。

3.3 U(VI) 初始浓度

Wu 等^[46]配置了不同初始浓度的铀溶液,探究 U(VI) 在初始浓度不同时对还原效率的影响。在可见光照射下,当初始浓度为 25 mg/L 时,材料对铀的去除率达到 100%。然而,初始浓度为 12.5 mg/L 溶液的 U(VI) 去除率仅达 50% 左右,这是由于浓度过低导致 U(VI) 与材料接触不充分。而在高浓度下,

大量铀沉积在材料表面,阻碍了还原的进行。Li等^[47]研究表明,随着初始浓度的升高,U(VI)的去除率从95%降至83%,还原的U(VI)包覆在材料表面减少反应活性位点,导致还原效率降低。除此之外,初始浓度对还原效果的影响也随着材料吸附容量和活性位点的不同而变化^[48]。

4 总结与展望

相比于传统含铀废水处理技术,光催化还原法具有极大的应用潜力。本文从光催化原理、不同光催化剂应用的进展及影响因素3个方面进行了综述,但对于未来光催化法处理含铀废水的研究和发展,目前仍需解决以下重点问题。①光催化材料通常以颗粒形式对废水进行还原,虽然增大了与铀酰离子的接触面积,但难以对材料进行回收和分离。②部分光催化材料如钙钛矿在还原铀酰离子的过程中会产生对环境有污染威胁的元素,对环境造成二次污染。③大多数光催化材料只对紫外光具有响应能力,因此光照成本较高。④目前对光催化处理含铀废水的技术局限于实验室规模,很难达到工业应用标准。

因此,光催化还原含铀废水技术需要进一步探索与发展。①根据需求掺杂磁性元素如铁等,以方便粉末材料回收。②需要研制绿色光催化材料,以防止对水体的二次污染。③通过能带调控等手段增强材料对可见光的响应,实现在自然光下进行还原。④引入电催化或吸附法等与光催化技术耦合,协同作用以高效处理含铀废水。随着对光催化技术机理的深入研究与新型光催化材料的制备,光催化除铀技术将继续发展成为高效及清洁的除铀技术。

[参考文献]

[1] 周思聪,李子颖,郭建,等. 核能发展新形势下我国铀资源保障研究[J]. 世界核地质科学,2024,41(4):703-711,731.

[2] 张益硕,周仲魁,李龙祥,等. 新型三元复合材料对低浓度含铀废水的去除性能及机制[J]. 稀有金属,2024,48(2):196-213.

[3] 张钊熔,段星星,夏明哲. 白银东大沟水体和底泥中重金属污染评价[J]. 物探与化探,2019,43(3):649-657.

[4] 张耀玲,王梅,张锐,等. 核工业含铀废水的膜蒸馏减量化处理实验研究[J]. 水处理技术,2021,47(11):101-105.

[5] 贾志远,任华平,师振峰,等. 新疆某砂岩型铀矿中性浸

出试验研究[J/OL]. 铀矿冶,1-8[2024-12-03]. <https://doi.org/10.13426/j.cnki.yky.2024.09.01>.

[6] 樊小磊,詹作泰,高柏,等. 重金属废水处理技术研究进展[J]. 中国有色冶金,2023,52(4):112-127.

[7] 张益硕,周仲魁,李龙祥,等. 羟基磷灰石改性膨润土对铀的吸附效果及其机制[J]. 复合材料学报,2023,40(12):6740-6755.

[8] Shuib X, Chun Z, Xinghuo Z, et al. Removal of uranium (VI) from aqueous solution by adsorption of hematite[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2009, 100(2): 162-166.

[9] Buema G, Noli F, Misaelides P, et al. Uranium removal from aqueous solutions by raw and modified thermal power plant ash[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2014, 299: 381-386.

[10] 马梦月,杨仕仪. 含铀废水的危害及其重要处理技术研究进展[J]. 有色设备,2024,38(4):34-43,64.

[11] 李小燕,温馨,张益硕,等. 直接Z型异质结BaCO₃/BaTiO₃@TiO₂光催化还原U(VI)性能与机理研究[J/OL]. 东华理工大学学报(自然科学版),1-9[2024-12-06]. <https://kns-cnki-net.webvpn.ecut.edu.cn/kcms/detail/36.1300.n.20241104.1641.002.html>.

[12] 宋艳,陈树森,康绍辉,等. 光催化材料CdS/TiO₂的制备及其光催化还原U(VI)性能研究[J]. 原子能科学技术,2022,56(7):1251-1257.

[13] Singh K, Verma R, Chauhan A, et al. Waste Water Treatment Using Piezoelectric Materials: A Review on Piezo-photocatalysis[J]. Topics in Catalysis, 2024: 1-28.

[14] 张建勋. 净化河水的废锰砂和废离子交换树脂处置方法[J]. 精细与专用化学品,2024,32(5):14-16,30.

[15] 马兴招,唐利斌,左文彬,等. 金属氧化物异质结光电探测器研究进展[J]. 红外技术,2024,46(4):363-375.

[16] 唐丽. 重金属废水处理技术及设备的研究[J]. 有色设备,2024,38(3):10-18.

[17] 张令宇,李凯,王哲,等. 空气中CdS/SiO₂复合材料光诱导除铀[J]. 核化学与放射化学,2024,46(4):358-366.

[18] He W, Xiao Q, Qiu Z, et al. Synergistic piezo-photocatalytic reduction of U(VI) by Zn_{0.7}Cd_{0.3}S solid solution homojunction[J]. Chemical Engineering Journal, 2024: 152947.

[19] Fujishima A, Honda K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode[J]. nature, 1972, 238(5358): 37-38.

[20] Wang G, Zhen J, Zhou L, et al. Adsorption and photo-

- catalytic reduction of U (VI) in aqueous TiO₂ suspensions enhanced with sodium formate[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2015, 304: 579 – 585.
- [21] Amadelli R, Maldotti A, Sostero S, et al. Photodeposition of uranium oxides onto TiO₂ from aqueous uranyl solutions [J]. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*, 1991, 87(19): 3267 – 3273.
- [22] Rao G, Liu X, Liu P. Fabrication of MoS₂@ TiO₂ hollow-sphere heterostructures with enhanced visible light photocatalytic reduction of U (VI)[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 331, 263 – 273 (2022).
- [23] Dong Z, Zhang Z, Li Z, et al. Double-shelled hollow nanosphere assembled by TiO₂@ surface sulfate functionalized CdS for boosting photocatalysis reduction of U (VI) under seawater conditions [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 431: 133256.
- [24] Oksuz A E, Yurddaskal M, Kartal U, et al. ZnO nanostructures for photocatalytic degradation of methylene blue: Effect of different anodization parameters[J]. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 2022, 59(6): 859 – 868.
- [25] Sun Q, Li B, Hu J, et al. Construction of an in-situ Se-linked ZnSe/ZnO heterojunction for efficient photocatalytic U (VI) reduction[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1008: 176684.
- [26] Zhang Y, Zhu M, Zhang S, et al. Highly efficient removal of U (VI) by the photoreduction of SnO₂/CdCO₃/CdS nanocomposite under visible light irradiation[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2020, 279: 119390.
- [27] 雷铭, 刘岳林, 谢水波, 等. ZnO/g-C₃N₄ 复合光催化剂的制备及光催化还原 U(VI) [J]. *材料工程*, 2022, 50(10): 157 – 164.
- [28] Liu Y, Yuan Y, Ni S, et al. Construction of g-C₃N₄/Ag/TiO₂ Z-scheme photocatalyst and Its improved photocatalytic U (VI) reduction application in water [J]. *Water Science and Technology*, 2022, 85(9): 2639 – 2651.
- [29] 许柳琪, 蔡丽露, 陈静映, 等. 金属有机框架在光催化领域的研究进展[J]. *上海化工*, 2024, 49(5): 62 – 65.
- [30] Kumar V, Singh V, Kim K H, et al. Metal-organic frameworks for photocatalytic detoxification of chromium and uranium in water [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2021, 447: 214148.
- [31] 赵冬冬, 王冰, 崇玉亮, 等. 二维共价有机框架材料光催化和电催化研究进展[J]. *材料工程*, 2023, 51(5): 58 – 75.
- [32] Zhong X, Liu Y, Zeng W, et al. Excellent photoreduction performance of U (VI) on metal organic framework/covalent organic framework heterojunction by solar-driven[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 285: 120405.
- [33] Bi R X, Liu X, Lei L, et al. Core-shell MOF@ COF photocatalysts for synergistic enhanced U (VI) and tetracycline cleanup through space and carrier separation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 485: 150026.
- [34] Zhu X, Dong Z, Xu J, et al. Visible-light induced electron-transfer in MoO₃ QDs/g-C₃N₄ nanosheets for efficient photocatalytic reduction of U (VI) [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 926: 166609.
- [35] Jiang L, Gao H, Cao R, et al. Construction of Novel Three Dimensionally Macroporous g-C₃N₄ for Efficient Adsorption/Photocatalytic Reduction of U (VI) [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2020, 35(3): 359 – 366.
- [36] 张琴琴, 李再兴, 陈晓飞, 等. 钙钛矿型光催化材料的应用现状及进展[J]. *精细化工*, 2022, 39(12): 2398 – 2408, 2480.
- [37] 余泽旭, 周书葵, 段毅, 等. 光催化还原水中六价铀的研究进展[J]. *应用化工*, 2024, 53(2): 392 – 397.
- [38] Lu S, Zhu K, Hayat T, et al. Influence of carbonate on sequestration of U (VI) on perovskite[J]. *Journal of hazardous materials*, 2019, 364: 100 – 107.
- [39] Li S, Yang X, Cui Z, et al. Efficient photoreduction strategy for uranium immobilization based on graphite carbon nitride/perovskite oxide heterojunction nanocomposites [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2021, 298: 120625.
- [40] Mei P, Xiao J, Huang X, et al. Enhanced Photocatalytic Reduction of U (VI) on SrTiO₃/g-C₃N₄ Composites: Synergistic Interaction [J]. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2022(7).
- [41] 李小燕, 王杨, 何登武, 等. Cu 掺杂 Bi₂WO₆ 的光催化还原 U(VI) 特性[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(5): 1025 – 1032.
- [42] Zhang X Y, Wang J J, Li P, et al. Removal of U (VI) from aqueous solution via photocatalytic reduction over WO₃/g-C₃N₄ composite under visible light[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 428: 131209.
- [43] Qin Z, Ye Y, Li C, et al. Removal and recovery of aqueous uranium using photocatalytic reduction method: Performance and implication[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 306: 122670.
- [44] Chen L, Chen B, Kang J, et al. The synthesis of a novel

conjugated microporous polymer and application on photocatalytic removal of uranium (VI) from wastewater under visible light [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 431: 133222.

- [45] Lei J, Liu H, Wen F, et al. Tellurium nanowires wrapped by surface oxidized tin disulfide nanosheets achieves efficient photocatalytic reduction of U (VI) [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 426: 130756.
- [46] Wu P, Yin X, Zhao Y, et al. Porphyrin-based hydrogen-bonded organic framework for visible light driven photocat-

alytic removal of U (VI) from real low-level radioactive wastewater [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 459: 132179.

- [47] Li X, Ouyang J, Zhang P, et al. Sandwich-like 2D/2D ZnIn₂S₄/Ti₃C₂ composite for highly efficient photocatalytic reduction of U (VI) [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2023, 332(7): 2759 – 2770.
- [48] 樊小磊. 十六烷基三甲基溴化铵/壳聚糖复合改性膨润土对含铀废水的去除与机理研究[J]. *中国有色冶金*, 2023, 52(2): 126 – 137.

Research progress on photocatalytic treatment of uranium-containing wastewater

SUN Jingyi

(East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Direct discharge of untreated wastewater containing uranium not only leads to environmental pollution but also affects human health. Adsorption, membrane separation, and chemical precipitation methods are difficult to efficiently and environmentally remove uranium. Against the backdrop of the increasing demand for uranium, seeking green and efficient treatment methods has become an urgent problem to be solved. Photocatalysis technology has advantages of high efficiency, environmental friendliness, and ease of operation, and has broad prospects in the treatment of uranium-containing wastewater. This paper first introduces the principle of photocatalytic technology, then deeply analyzes the main influencing factors and current research status of photocatalytic materials in the treatment of uranium-containing wastewater, and finally summarizes and prospects, providing a theoretical basis for the development of photocatalytic technology in the treatment of uranium-containing wastewater.

Keywords: photocatalytic; uranium-containing wastewater; materials; redox; wastewater treatment ▲