

# 浓度诱导CuFeTiHfZrO高熵氧化物形貌演变及性能优化

刘怡, 顾旭, 蔡胤劼, 高尚, 王宇轩, 邹菁云\*

苏州科技大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州

收稿日期: 2026年5月6日; 录用日期: 2026年6月1日; 发布日期: 2026年6月10日

## 摘要

高熵氧化物作为由多种金属元素共同构成的无序固溶体体系, 显著的晶格畸变效应与多组元协同作用赋予了其高催化活性, 在电化学催化及光降解等领域应用前景广泛。然而, 高熵材料的结构及缺陷分布对其表面的催化反应行为有重要影响。本文采用超声辅助共沉淀法构建了CuFeTiHfZr五元高熵氧化物, 通过调节前驱体浓度实现对材料形貌结构的调控, 成功制备出具有小片层、类花状、纳米颗粒等结构的高熵氧化物。以亚甲基蓝为模型污染物, 具有类花状形貌结构的样品表现出最优的降解性能, 在4 h内降解效率达到约90%。本研究为多组元氧化物的结构调控与性能优化提供了新思路, 也为有机染料降解技术的实际应用提供了重要参考。

## 关键词

高熵氧化物, 超声辅助合成, 结构调控, 形貌调控

# Concentration-Driven Morphological Evolution and Performance Optimization in CuFeTiHfZrO High-Entropy Oxides

Yi Liu, Xu Gu, Yinjie Cai, Shang Gao, Yuxuan Wang, Jingyun Zou\*

School of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou Jiangsu

Received: May 6, 2026; accepted: June 1, 2026; published: June 10, 2026

## Abstract

As a disordered solid solution system composed of a variety of metal elements, high-entropy oxides

\*通讯作者。

文章引用: 刘怡, 顾旭, 蔡胤劼, 高尚, 王宇轩, 邹菁云. 浓度诱导 CuFeTiHfZrO 高熵氧化物形貌演变及性能优化[J]. 材料科学, 2026, 16(6): 22-30. DOI: 10.12677/ms.2026.166134

have high catalytic activity due to the remarkable lattice distortion effect and the synergistic effect of multiple components, and have broad application prospects in electrochemical catalysis and photodegradation. However, the structure and defect distribution of high entropy materials have an important influence on the catalytic reaction behavior of their surfaces. In this paper, the five-element high-entropy oxide of CuFeTiHfZr was constructed by ultrasonic-assisted coprecipitation method, and the morphology and structure of the material were controlled by adjusting the concentration of precursors, and the high-entropy oxide with platelet-like, flower-like and nano-particle structures was successfully prepared. Taking methylene blue as a model pollutant, the sample with flower-like morphology showed the best degradation performance, and the degradation efficiency reached about 90% within 4 h. This study provides a new idea for the structural regulation and performance optimization of multicomponent oxides, and also provides an important reference for the practical application of organic dye degradation technology.

## Keywords

High-Entropy Oxides, Ultrasound-Assisted Synthesis, Structure Regulation, Morphology Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着现代工业生产与纺织、印染等行业的快速发展,生产过程中产生的大量有机染料废水未经有效处理便排入自然水体[1][2]。这类有机染料分子结构稳定且具有较强的生物毒性,难自然降解,在水环境中长期富集会 对生态系统和人体健康造成严重危害[3][4]。传统的氧化处理方法在实际应用中存在反应效率低、易引发二次污染等问题,难以满足高效环保的处理需求[5][6]。高级氧化技术能在反应过程中生成具有强氧化能力的活性物种,高效降解有机染料污染物[7][8]。在该技术体系中,高活性催化剂是决定降解性能的关键,然而传统的催化剂,如  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}_2$  及其复合物等,已被广泛用于有机污染物降解,但其仍面临活性位点类型单一、电子传输效率有限、结构稳定性不足以及催化性能调控空间受限等问题[9][10]。因此,构筑具有多活性中心、丰富缺陷结构和可调表面反应行为的新型氧化物催化剂,是提升染料降解效率的重要方向。

高熵氧化物是一类由五种及以上金属元素组成的新型多组元氧化物材料[11]。与传统单组元或少组元氧化物相比,高熵氧化物可通过高构型熵效应稳定复杂固溶体结构,并表现出显著的晶格畸变效应、迟滞扩散效应及多元素协同效应[12][13]。高度无序的结构能够在高熵氧化物中引入显著的晶格畸变及丰富的缺陷位点,影响其电子结构和表面反应行为,大幅提高其催化降解性能[14]。同时,多种金属离子的协同作用可提供多样化的氧化还原活性中心,有助于促进电子传递过程及活性氧物种(如  $\cdot\text{OH}$  和  $\text{O}_2^-$ )的生成[15][16]。因此,高熵氧化物在有机污染物降解、能源催化及环境修复等领域展现出广阔应用前景[17]。

然而,高熵氧化物的催化性能不仅取决于其元素组成,也与材料的微观形貌、尺寸、比表面积及缺陷分布密切相关。不同形貌结构会影响催化剂表面活性位点的暴露程度、反应物分子的扩散路径以及界面电子转移行为,从而显著改变其催化降解性能[18]。对于溶液法合成体系而言,金属前驱体浓度是调控成核与生长过程的重要参数。前驱体浓度的变化会改变体系过饱和度,进一步影响晶核形成速率、颗粒生长方式及最终组装结构[19]。尽管已有研究报道了高熵氧化物在催化领域的应用潜力,但针对多组元高熵氧化物中“前驱体浓度-形貌演变-催化性能”之间关系的系统研究仍相对不足[20]。

基于此,本文选取 Cu、Fe、Ti、Hf、Zr 五元金属体系,采用超声辅助共沉淀法制备高熵氧化物——CuFeTiHfZrO。通过调节金属前驱体浓度,实现了小片层状、类花状及纳米颗粒状等不同形貌结构的可控制备,并结合 TEM、XRD 及 EDS 等表征手段分析其微观形貌、物相结构和元素分布特征。在此基础上,以亚甲基蓝为模型污染物,系统考察不同形貌高熵氧化物在不同反应时间和催化剂投加量条件下的催化降解性能。本文旨在揭示前驱体浓度对高熵氧化物形貌结构及催化行为的影响规律,为多组元氧化物催化剂的结构设计和性能优化提供实验依据。

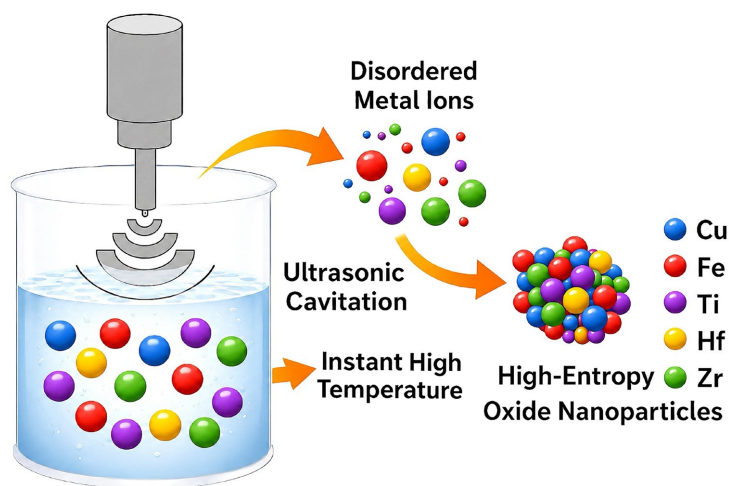
## 2. 实验部分

### 2.1. 试剂和材料

氯化铜( $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\geq 99.0\%$ , 上海阿拉丁生化)、三氯化铁( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\geq 99.0\%$ , 上海阿拉丁生化)、钛酸四丁酯( $\text{C}_{16}\text{H}_{36}\text{O}_4\text{Ti}$ ,  $\geq 99\%$ , 上海阿拉丁生化)、二氯二茂铪( $\text{C}_{10}\text{H}_{10}\text{Cl}_2\text{Hf}$ ,  $\geq 98\%$ , 上海阿拉丁生化)、乙酰丙酮锆( $\text{C}_{20}\text{H}_{28}\text{O}_8\text{Zr}$ ,  $\geq 98\%$ , 上海阿拉丁生化)、氢氧化钠( $\text{NaOH}$ ,  $\geq 98\%$ , 上海阿拉丁生化)、无水乙醇( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ,  $\geq 99.7\%$ )、亚甲基蓝(MB, Methylene Blue,  $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$ )。

### 2.2. 高熵氧化物的制备方法

本文所采用的超声辅助共沉淀法工艺示意图如图 1 所示。首先按照等摩尔比称取  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{C}_{16}\text{H}_{36}\text{O}_4\text{Ti}$ 、 $\text{C}_{10}\text{H}_{10}\text{Cl}_2\text{Hf}$ 、 $\text{C}_{20}\text{H}_{28}\text{O}_8\text{Zr}$  五种金属盐,分别溶解于无水乙醇,制备出单金属离子浓度为  $0.001 \text{ mol/L}$ 、 $0.01 \text{ mol/L}$ 、 $0.1 \text{ mol/L}$  的前驱体溶液。然后配制  $80 \text{ mL}$  浓度为  $1 \text{ mol/L}$  的  $\text{NaOH}$  乙醇溶液,将其置于超声波破碎仪(JY92-IIIN, 杭州旌斐仪器科技有限公司)中,设置功率  $30 \text{ W}$ 、频率  $20 \text{ kHz}$ ,超声处理  $30 \text{ min}$ 。随后,取等体积(各  $1 \text{ mL}$ )的五种金属前驱体溶液缓慢滴加进超声处理后的  $\text{NaOH}$  乙醇溶液,并继续超声处理  $30 \text{ min}$ 。反应结束后,通过离心分离及多次洗涤去除残余离子,并经低温干燥得到目标样品。在超声作用下,反应体系中的空化效应能够显著增强传质过程,使多种金属离子在微观尺度上充分混合并协同沉淀。随着前驱体溶液的逐步加入,体系经历成核与生长过程,最终获得不同结构特征的高熵氧化物产物。根据反应浓度的不同,将三种样品分别记作  $\text{CuFeTiHfZrO-1}$  ( $0.001 \text{ mol/L}$ )、 $\text{CuFeTiHfZrO-2}$  ( $0.01 \text{ mol/L}$ )和  $\text{CuFeTiHfZrO-3}$  ( $0.1 \text{ mol/L}$ )。



**Figure 1.** Schematic illustration of ultrasound-assisted synthesis of amorphous CuFeTiHfZrO  
**图 1.** 超声辅助合成无定形 CuFeTiHfZrO 的原理示意图

### 2.3. 表征设备与催化降解实验

探究前驱体浓度对  $\text{CuFeTiHfZrO}$  微观结构的调控规律, 采用透射电子显微镜(TEM, Tecnai G2 F20, FEI 公司, 美国)及其附带的能谱仪观察样品的微观形貌与元素分布; 采用 X 射线衍射仪(XRD, D8 Advance, Bruker 公司, 德国)分析样品的物相结构; 采用紫外-可见分光光度计(UV-3600, 岛津公司, 日本)监测亚甲基蓝溶液在 664 nm 处的特征吸收峰强度。

催化降解实验以初始浓度为 5 mg/L 的 MB 为模型污染物, 设置以下对照实验。第一组: 在催化剂投加量为 0.5 g/L、室温条件下, 分别以  $\text{CuFeTiHfZrO-1}$ 、 $\text{CuFeTiHfZrO-2}$ 、 $\text{CuFeTiHfZrO-3}$  为催化剂, 记录反应时间 0 h、1 h、2 h、3 h、4 h 的 MB 溶液紫外特征峰; 第二组: 在室温条件下、反应时间 4 h, 分别以  $\text{CuFeTiHfZrO-1}$ 、 $\text{CuFeTiHfZrO-2}$ 、 $\text{CuFeTiHfZrO-3}$  为催化剂, 记录催化剂投加量为 0.1 g/L、0.2 g/L、0.3 g/L、0.4 g/L、0.5 g/L 的 MB 溶液紫外特征峰。根据不同反应条件下亚甲基蓝溶液在 664 nm 处的特征吸收峰强度变化, 评价材料的催化降解性能。

## 3. 结果

### 3.1. 前驱体浓度诱导形貌演变

前驱体溶液中的金属离子浓度对所制备的高熵氧化物的形貌结构有显著的影响。图 2 展示了三种不同浓度前驱体制备的材料形貌图, 呈现出明显差异的结构形态。其中图 2(a)是在较低浓度条件下所制备的  $\text{CuFeTiHfZrO}$ , 体系过饱和度较低, 成核速率受到一定限制, 产物结构特征以二维片状为主。图 2(b)是中等浓度下制备的  $\text{CuFeTiHfZrO}$ , 随着浓度提高, 成核与生长过程逐渐趋于平衡, 表现出纳米花状的结构形态, 该结构由多个纳米片状单元堆叠而成, 具有较好的分散性。图 2(c)是高前驱体浓度条件下制备的  $\text{CuFeTiHfZrO}$ 。随着前驱体浓度的增加, 体系中成核速率显著提高, 导致大量晶核在短时间内形成并发生竞争性生长, 最终呈现出明显的大颗粒状形貌, 并伴随一定程度的团聚现象, 不利于材料表面活性位点的充分利用。

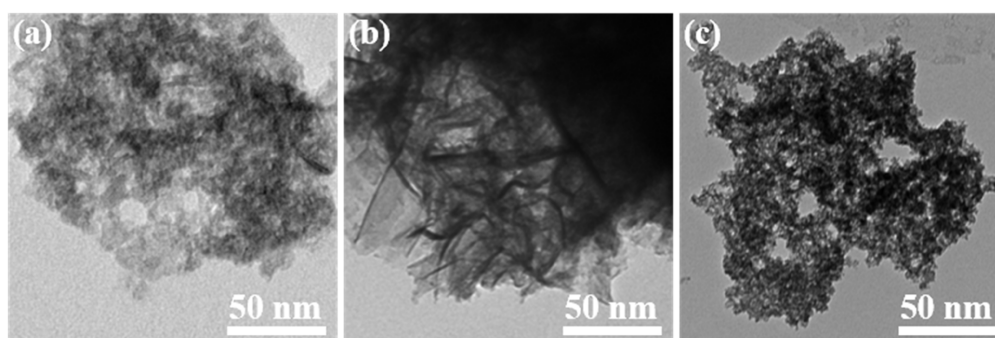
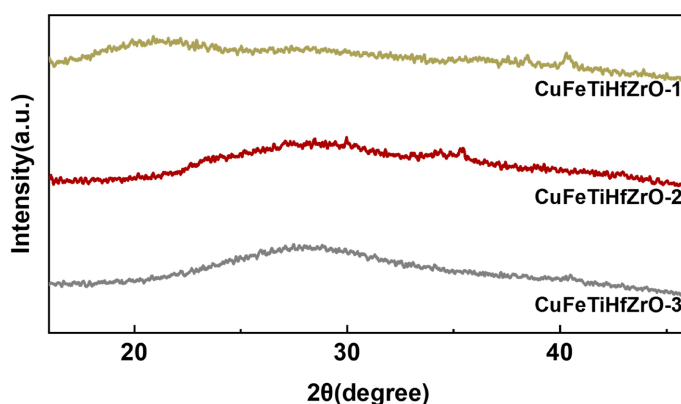


Figure 2. TEM morphologies of  $\text{CuFeTiHfZrO}$  with different precursor concentrations

图 2. 不同前驱体浓度下  $\text{CuFeTiHfZrO}$  的 TEM 形貌图

### 3.2. 结构分析与元素分布

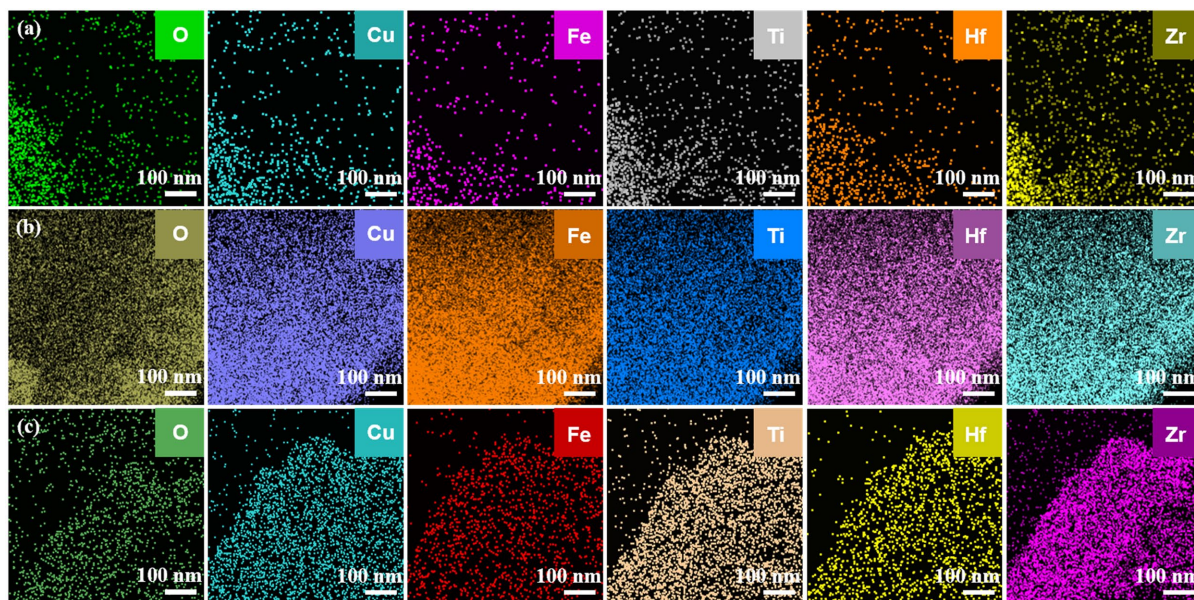
通过 X 射线衍射分析材料的物相组成、晶体结构及结晶度。根据图 3 所示的 XRD 图可知, 三组样品均未出现明显尖锐的衍射峰, 而是以宽弥散峰为主, 表明所得高熵氧化物结晶度低, 以无定形结构特征为主。此外, 三种样品中均未观察到单一金属氧化物(如  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  或  $\text{ZrO}_2$  等)的特征峰, 各金属元素在体系中实现了良好的固溶, 形成了均匀的高熵氧化物相。



**Figure 3.** XRD patterns of CuFeTiHfZrO at different precursor concentrations

**图 3.** 不同前驱体浓度下 CuFeTiHfZrO 的 XRD 图谱

为探究金属前驱体浓度对高熵氧化物中元素混溶状态的影响，对三组样品进行了 EDS 能谱分析。由图 4(a)~(c)可知，不同前驱体浓度下制备的高熵氧化物中各元素在纳米颗粒中均匀分布，各元素之间具有良好的重叠性，且整体信号强度分布均一，未观察到局部富集或贫化区域。各组分在纳米尺度上实现了均匀混合，不存在元素偏析或相分离现象。高熵体系中显著的构型熵效应，有助于降低体系的吉布斯自由能，从而稳定多组分固溶体结构。同时，多金属离子在合成过程中具有相近的成核与生长动力学行为，促进了元素在晶体生长过程中的同步掺入与均匀分散。不同前驱体浓度下均成功构建了结构稳定且成分均一的高熵氧化物固溶体。



**Figure 4.** EDS elemental mapping of CuFeTiHfZrO at different precursor concentrations: (a) CuFeTiHfZrO-1; (b) CuFeTiHfZrO-2; (c) CuFeTiHfZrO-3

**图 4.** 不同前驱体浓度下 CuFeTiHfZrO 的 EDS 元素分布图: (a) CuFeTiHfZrO-1; (b) CuFeTiHfZrO-2; (c) CuFeTiHfZrO-3

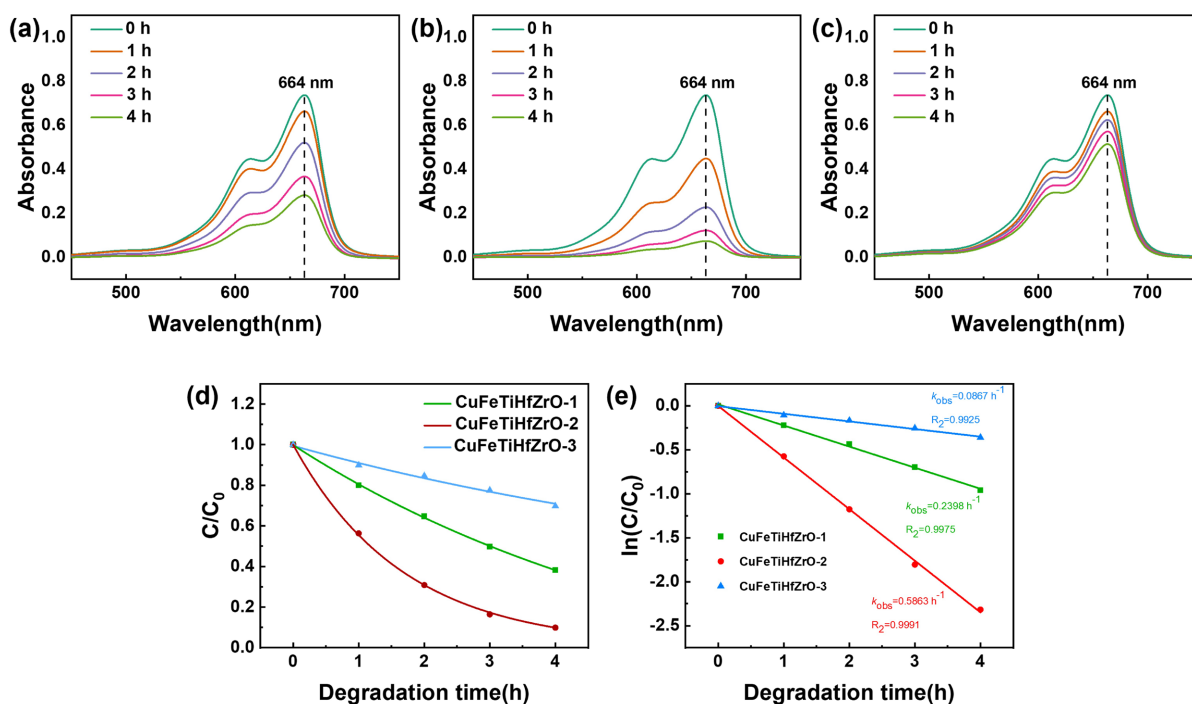
### 3.3. 催化性能分析

本文以 MB 降解反应为模型反应，对高熵氧化物的催化性能进行了系统研究，重点分析了材料形貌

结构、催化剂投加量对降解效率的影响。通过 MB 的紫外特征峰吸收峰强度的变化对 MB 浓度进行定量分析, 根据朗伯比尔定律, 结合浓度与吸光度的关系计算出 MB 剩余浓度( $c = \frac{A_t}{A_0} c_0$ )。为揭示其反应动力

学行为, 对降解过程进行动力学拟合, MB 的降解过程符合一级动力学模型, 其表达式为  $\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = kt$ 。

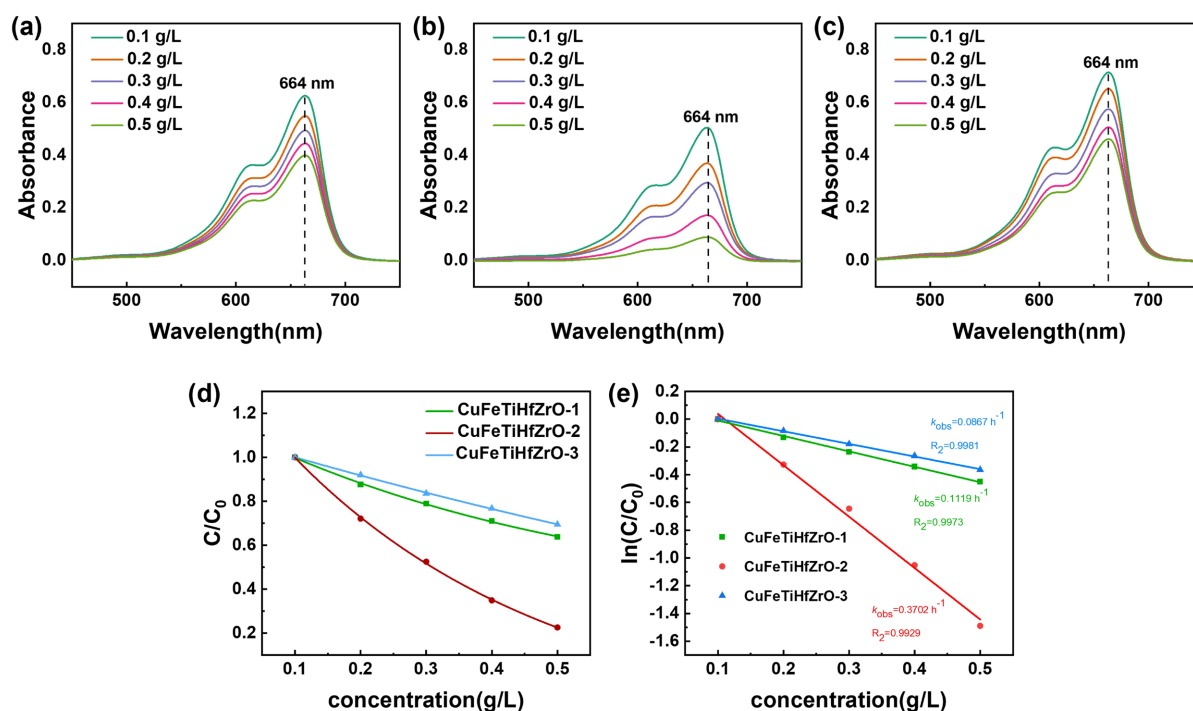
随着反应时间的延长, MB 浓度持续降低, 但不同形貌结构的高熵氧化物表现出明显差异的催化降解效率。在小片层状结构高熵氧化物(CuFeTiHfZrO-1)的催化作用下, MB 相对浓度在 4 h 内由初始的 100% 下降至约 38%, 降幅约 62% (图 5(a))。相比之下, 类花状结构样品(CuFeTiHfZrO-2)表现出更优异的催化性能, 在相同时间内 MB 的相对浓度下降至约 10%, 降幅达 90% (图 5(b))。而由高浓度前驱体制备的纳米颗粒状高熵氧化物(CuFeTiHfZrO-3)的催化效果较弱, 反应 4 h 后 MB 相对浓度仅降至约 70%, 降幅仅 30% (图 5(c))。图 5(d)展示了在具有不同形貌结构的高熵氧化物的催化作用下, 溶液中的 MB 相对浓度随反应时间的变化趋势。可明显看出 CuFeTiHfZrO-2 降解速率最快, 依据反应动力学公式可得出其降解速率为  $0.58 \text{ h}^{-1}$ , 显著高于 CuFeTiHfZrO-1 ( $0.24 \text{ h}^{-1}$ )和 CuFeTiHfZrO-3 ( $0.09 \text{ h}^{-1}$ ) (图 5(e))。类花状结构由多级纳米单元组装而成, 具有更大的比表面积, 暴露出更丰富的活性位点, 有利于反应物分子的吸附与活化。相比之下, 小片层状结构在一定程度上存在堆叠现象, 限制了部分活性位点的利用, 而颗粒状结构则因粒径较大、比表面积较低, 导致催化活性下降。因此, 调节金属前驱体浓度从而调控产物微观形貌对于提升高熵氧化物的催化性能具有重要意义。



**Figure 5.** UV-Vis absorption spectra and relative concentration changes of methylene blue degraded by CuFeTiHfZrO with different morphologies: (a) CuFeTiHfZrO-1; (b) CuFeTiHfZrO-2; (c) CuFeTiHfZrO-3; (d) Curves of relative concentration ( $C/C_0$ ) versus reaction time for three samples; (e) Linear fitting curves of the pseudo-first-order kinetic model

**图 5.** 不同形貌 CuFeTiHfZrO 催化降解亚甲基蓝的紫外 - 可见吸收光谱及相对浓度变化: (a) CuFeTiHfZrO-1; (b) CuFeTiHfZrO-2; (c) CuFeTiHfZrO-3; (d) 三种样品的相对浓度( $C/C_0$ )随反应时间变化曲线; (e) 一级动力学模型线性拟合曲线

此外, 催化剂投加量对 MB 降解行为具有显著影响。在室温条件下, 随着高熵氧化物投加量的增加, 各样品的催化活性均得到了不同程度的提升, 但其增强幅度存在明显差异。当小片层结构样品(CuFeTiHfZrO-1)投加量由 0.1 g/L 提高至 0.5 g/L 时, MB 相对浓度降至约 63%, 降幅为 37% (图 6(a))。当类花状结构样品(CuFeTiHfZrO-2)投加量由 0.1 g/L 提高至 0.5 g/L 时, MB 的相对浓度从 100% 下降至约 22%, 下降幅度达到 78% (图 6(b))。而纳米颗粒状样品(CuFeTiHfZrO-3)随投加量变化的响应较弱, 即使在投加量为 0.5 g/L 下, MB 相对浓度仍维持在约 70%, 整体降解效果有限(图 6(c))。图 6(d)展示了三种高熵氧化物不同投加量条件下 MB 相对浓度随时间的变化趋势, 催化剂投加量增加可提高有效活性位点的数量, 促进反应进行, 提升降解效果。CuFeTiHfZrO-2 仍表现出最优的降解速率, 其降解速率为  $0.37 \text{ h}^{-1}$ 。CuFeTiHfZrO-1 和 CuFeTiHfZrO-3 的降解速率仅为  $0.11 \text{ h}^{-1}$  和  $0.09 \text{ h}^{-1}$  (图 6(e))。进一步证实了具有大比表面积的花状结构高熵氧化物, 暴露出更多的活性位点, 展现出更优异的催化性能, 表明前驱体浓度影响高熵氧化物的形貌结构及其催化性能。



**Figure 6.** UV-Vis absorption spectra and relative concentration changes of methylene blue catalytically degraded by CuFeTiHfZrO with different catalyst dosages: (a) CuFeTiHfZrO-1; (b) CuFeTiHfZrO-2; (c) CuFeTiHfZrO-3; (d) Curves of relative concentration ( $C/C_0$ ) versus catalyst dosage for three samples; (e) Linear fitting curves of the pseudo-first-order kinetic model

图 6. 不同催化剂投加量下 CuFeTiHfZrO 催化降解亚甲基蓝的紫外 - 可见吸收光谱及相对浓度变化: (a) CuFeTiHfZrO-1; (b) CuFeTiHfZrO-2; (c) CuFeTiHfZrO-3; (d) 三种样品的相对浓度( $C/C_0$ )随催化剂投加量变化曲线; (e) 一级动力学模型线性拟合曲线

#### 4. 讨论

综上, 类花状形貌结构的高熵氧化物(CuFeTiHfZrO-2)表现出最佳的催化活性, 且随投加量的增加, 降解速率明显加快。这主要归因于中等浓度的前驱体溶液下成核与生长过程相对平衡, 制备出的高熵氧化物分散性良好, 具有更大的比表面积, 暴露出更多的活性位点, 有利于活性氧物种的生成。相比之下, CuFeTiHfZrO-1 由于前驱体浓度低, 成核速率受限, 形成小片层结构且局部有堆叠, 而 CuFeTiHfZrO-3 因

前驱体浓度过高, 快速成核导致颗粒团聚, 形成了大颗粒状结构产物, 比表面积小, 多处活性位点被覆盖, 催化活性低。

## 5. 结论

本文采用超声辅助合成方法制备的 CuFeTiHfZrO 样品均表现为无定形固溶体结构特征, 且各金属元素在纳米尺度上均匀分布, 未出现元素偏析或相分离。同时, 通过调控金属前驱体浓度能实现小片层状、类花状、纳米颗粒状结构的可控制备。其中, 中等浓度金属前驱体下制备出的 CuFeTiHfZrO-2, 由于成核密度适中、原材料充足, 形成了分散性良好、粒径适中的类花状形貌结构, 展现出最优异的催化活性。在室温条件下, 反应 4 h、催化剂使用量 0.5 g/L 时, CuFeTiHfZrO-2 对 MB 的降解效率达 90%, 明显高于低浓度和高浓度金属前驱体条件下制备的样品, 验证了本文的核心策略: 通过前驱体浓度调控成核与生长过程, 控制高熵氧化物的结构形貌, 并最终决定其催化性能。本文为多组元高熵氧化物催化材料的设计提供了新的思路, 同时为开发用于有机染料降解的高效催化材料提供了可行路径。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(52202044), 苏州市科技局项目(SYC2022018)。

## 参考文献

- [1] Yaseen, D.A. and Scholz, M. (2019) Textile Dye Wastewater Characteristics and Constituents of Synthetic Effluents: A Critical Review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **16**, 1193-1226. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2130-z>
- [2] Forgacs, E., Cserhati, T. and Oros, G. (2004) Removal of Synthetic Dyes from Wastewaters: A Review. *Environment International*, **30**, 953-971. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.001>
- [3] Kayani, K.F. (2024) Bimetallic Metal-Organic Frameworks (BMOFs) for Dye Removal: A Review. *RSC Advances*, **14**, 31777-31796. <https://doi.org/10.1039/d4ra06626j>
- [4] Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R. and Nigam, P. (2001) Remediation of Dyes in Textile Effluent: A Critical Review on Current Treatment Technologies with a Proposed Alternative. *Bioresource Technology*, **77**, 247-255. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(00\)00080-8](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(00)00080-8)
- [5] Pradhan, S., Mohapatra, C., Dutta, B., Barick, K.C., Vasundhara, M. and Prasad, N.K. (2026) Efficient Photo-Fenton Degradation of an Organic Dye by Reusable Magnetic (Al<sub>0.6</sub>Mn<sub>0.6</sub>Fe<sub>0.6</sub>Co<sub>0.6</sub>Ni<sub>0.6</sub>)O<sub>4</sub> High Entropy Oxides. *New Journal of Chemistry*, **50**, 487-499. <https://doi.org/10.1039/d5nj03007b>
- [6] Gao, Y., Wang, Z., Cui, C., Wang, B., Liu, W., Liu, W., *et al.* (2020) Amorphous Manganese Oxide as Highly Active Catalyst for Soot Oxidation. *Environmental Science and Pollution Research*, **27**, 13488-13500. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07909-y>
- [7] Pignatello, J.J., Oliveros, E. and MacKay, A. (2006) Advanced Oxidation Processes for Organic Contaminant Destruction Based on the Fenton Reaction and Related Chemistry. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **36**, 1-84. <https://doi.org/10.1080/10643380500326564>
- [8] Ma, D., Yi, H., Lai, C., Liu, X., Huo, X., An, Z., *et al.* (2021) Critical Review of Advanced Oxidation Processes in Organic Wastewater Treatment. *Chemosphere*, **275**, Article ID: 130104. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130104>
- [9] Gusain, R., Gupta, K., Joshi, P. and Khatri, O.P. (2019) Adsorptive Removal and Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants Using Metal Oxides and Their Composites: A Comprehensive Review. *Advances in Colloid and Interface Science*, **272**, Article ID: 102009. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102009>
- [10] Li, H., Fu, B., Huang, H., Wu, S., Ge, J., Zhang, J., *et al.* (2022) Catalytic Degradation of Organic Pollutants by Manganese Oxides: A Comprehensive Review. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, **34**, 395-406. <https://doi.org/10.1080/26395940.2022.2123047>
- [11] Gild, J., Samiee, M., Braun, J.L., Harrington, T., Vega, H., Hopkins, P.E., *et al.* (2018) High-Entropy Fluorite Oxides. *Journal of the European Ceramic Society*, **38**, 3578-3584. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.04.010>
- [12] Sarkar, A., Velasco, L., Wang, D., Wang, Q., Talasila, G., de Biasi, L., *et al.* (2018) High Entropy Oxides for Reversible Energy Storage. *Nature Communications*, **9**, Article No. 3400. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05774-5>

- 
- [13] Das, S., Kumar, S., Sarkar, S., Pradhan, D., Tiwary, C.S. and Chowdhury, S. (2024) High Entropy Spinel Oxide Nanoparticles for Visible Light-Assisted Photocatalytic Degradation of Binary Mixture of Antibiotic Pollutants in Different Water Matrixes. *Journal of Materials Chemistry A*, **12**, 16815-16830. <https://doi.org/10.1039/d4ta02294g>
- [14] Chen, Z., Huang, X., Zuo, Y., Wang, H., Chen, W., Kong, L., *et al.* (2025) High-Entropy Perovskite Embedded in Carbon-Based Catalyst toward Peroxymonosulfate Activation to Degrade Rhodamine B: Performance and Mechanism Insights. *Water Research*, **282**, Article ID: 123919. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123919>
- [15] Rost, C.M., Sachet, E., Borman, T., Moballegh, A., Dickey, E.C., Hou, D., *et al.* (2015) Entropy-Stabilized Oxides. *Nature Communications*, **6**, Article No. 8485. <https://doi.org/10.1038/ncomms9485>
- [16] Lyu, Z., Wang, Y., Sun, Y. and Dai, Y. (2026) Nanostructured High-Entropy Oxides for Catalysis: Linking Entropy to Function. *Nanoscale*, **18**, 7825-7848. <https://doi.org/10.1039/d5nr05294g>
- [17] Jia, D., Chigan, T., Li, X., Li, H. and Yang, P. (2024) Photocatalytic Degradation Performance for High-Entropy Oxide ( $\text{La}_{0.2}\text{Ce}_{0.2}\text{Gd}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Fe}_x$ ) $\text{O}_2$  Enriched with Defects. *Journal of Alloys and Compounds*, **982**, Article ID: 173808. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.173808>
- [18] Thanh, N.T.K., Maclean, N. and Mahiddine, S. (2014) Mechanisms of Nucleation and Growth of Nanoparticles in Solution. *Chemical Reviews*, **114**, 7610-7630. <https://doi.org/10.1021/cr400544s>
- [19] Zhang, M., Ye, J., Gao, Y., Duan, X., Zhao, J., Zhang, S., *et al.* (2024) General Synthesis of High-Entropy Oxide Nanofibers. *ACS Nano*, **18**, 1449-1463. <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c07506>
- [20] Albedwawi, S.H., AlJaberi, A., Haidemenopoulos, G.N. and Polychronopoulou, K. (2021) High Entropy Oxides-Exploring a Paradigm of Promising Catalysts: A Review. *Materials & Design*, **202**, Article ID: 109534. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109534>