

一种纳米催化剂在含肼废水处理中的应用

相李奎¹, 李鹏鹏², 吴冬杰¹

¹东力(南通)化工有限公司研发中心, 江苏 南通

²洋口镇人民政府生态环境局, 江苏 南通

收稿日期: 2025年10月30日; 录用日期: 2025年11月27日; 发布日期: 2025年12月5日

摘 要

本文提出了一种高效处理甲基肼生产废水的新方法, 采用高碘酸钠作为氧化剂, 镍基金属纳米材料作为催化剂, 对含肼废水进行氧化处理, 最后用氢氧化钠溶液中和, 实现含肼废水的完全分解及安全处理。通过系统实验, 分析了影响氧化体系反应的各种因素, 包括高碘酸钠添加比例、催化剂的选择、反应体系pH值和反应时间等。研究结果表明, 该处理方法的最佳工艺条件为: 以Ni₄₀Ti₆₀纳米复合材料为催化剂, 高碘酸钠添加比例0.5 g/L, 反应pH = 8.0, 反应时间2 h。在此条件下, 废水中肼的去除率可达98%以上, 氨氮去除率也达到98%, 处理后废水可直接进入生化处理系统进一步深度处理, 出水水质满足《污水综合排放标准》要求。本研究为含肼废水的高效、经济处理提供了新的技术路径。

关键词

纳米复合材料, 高碘酸钠, 含肼废水, 催化氧化, 安全处理

Application of a Nano-Catalyst in the Treatment of Hydrazine-Containing Wastewater

Likui Xiang¹, Pengpeng Li², Dongjie Wu¹

¹R&D Center of Dongli (Nantong) Chemical Co., Ltd., Nantong Jiangsu

²Ecological Environment Bureau of Yangkou Town People's Government, Nantong Jiangsu

Received: October 30, 2025; accepted: November 27, 2025; published: December 5, 2025

Abstract

A novel and efficient method for treating hydrazine-containing wastewater is proposed in this study. Sodium periodate was used as the oxidant and nickel-based metal nanomaterials as the catalyst for the oxidation treatment of hydrazine-containing wastewater, followed by neutralization with

sodium hydroxide solution to achieve complete decomposition and safe disposal of the wastewater. Various factors affecting the oxidation system were systematically analyzed through experiments, including the addition ratio of sodium periodate, catalyst selection, reaction pH, and reaction time. The results showed that the optimal process conditions for this treatment method were: $\text{Ni}_{40}\text{Ti}_{60}$ nanocomposite as the catalyst, sodium periodate addition ratio of 0.5 g/L, reaction pH of 7.0, and reaction time of 2 hours. Under these conditions, the removal rate of hydrazine in the wastewater reached over 98%, and the ammonia nitrogen removal rate also achieved 98%. The treated wastewater could be directly sent to a biochemical treatment system for further advanced treatment, and the effluent quality met the requirements of the "Integrated Wastewater Discharge Standard". This study provides a new technical route for the efficient and economical treatment of hydrazine-containing wastewater.

Keywords

Nanocomposite, Sodium Periodate, Hydrazine-Containing Wastewater, Catalytic Oxidation, Safe Treatment

Copyright © 2025 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. 前言

肼及其衍生物(如水合肼、甲基肼、偏二甲基肼等)作为重要的化工原料,被广泛应用于航天航空、制药、农药、染料、塑料等众多领域[1]-[3]。特别是在航天领域,肼类化合物常用作火箭推进剂,具有不可替代的作用。然而,肼及其衍生物具有强烈的毒性、致癌性和致突变性,对人体健康和生态环境构成严重威胁[4]-[6]。含肼废水若未经妥善处理直接排放,不仅会造成水体严重污染,破坏水生生态系统,还可能通过食物链富集,最终危害人类健康。

甲基肼生产过程中产生的废水是含肼废水的主要来源之一,这类废水通常含有高浓度的水合肼、甲基肼、偏二甲基肼等,具有强还原性和高毒性,属于典型的难降解有机污染物[7]-[9]。由于其在环境中的残留时间长,且能通过大气、水体等循环扩散,容易形成区域性污染。据统计,某甲基肼生产企业的废气处理废水(采用稀硫酸喷淋洗涤工艺产生)中,肼含量高达 10%~15%,COD_{Cr} 为 100,000~150,000 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 更是达到 150,000~200,000 mg/L,水质极其复杂恶劣[10]。

目前,处理含肼废水的方法主要包括物理法、化学法和生物法三大类。物理法如吸附法、萃取法、膜分离法等,虽然能在一定程度上去除废水中的肼类物质,但往往只是将污染物从水相转移到固相或其他相,容易造成二次污染,且对于高浓度含肼废水的处理效果有限[11]-[13]。生物法利用微生物的代谢作用降解肼类物质,具有成本低、环境友好等优点,但由于肼类物质的强毒性会抑制微生物活性,导致生物处理效率低下,难以应用于高浓度含肼废水的处理[14]-[16]。

化学氧化法是目前处理含肼废水最常用的方法之一,其原理是利用氧化剂的强氧化性将肼类物质氧化分解为无害或低害的物质(如氮气、水、二氧化碳等)。常用的氧化剂包括高锰酸钾、双氧水、次氯酸钠、芬顿试剂等[17]-[20]。例如,芬顿氧化法通过 Fe^{2+} 催化 H_2O_2 产生 $\cdot\text{OH}$ 自由基,具有极强的氧化能力,能有效降解多种难降解有机物。然而,对于高浓度含肼废水,传统化学氧化法往往存在氧化剂用量大、处理成本高、氧化不完全等问题,且可能产生甲醛、甲胺、亚硝胺等有毒副产物,其中亚硝胺是强致癌物,进一步增加了环境风险[21]-[23]。

随着纳米材料科学的快速发展，纳米催化剂在环境治理领域的应用受到广泛关注[24]-[26]。纳米材料具有比表面积大、表面活性位点多、催化效率高等优点，能够显著提高氧化反应的速率和选择性，降低氧化剂的用量，从而提高处理效率并降低成本。镍基金属纳米材料由于其优异的催化性能、相对较低的成本和良好的稳定性，在催化氧化领域展现出巨大的应用潜力[27]-[29]。钛作为一种常见的催化剂载体或活性组分，能够与镍形成协同作用，进一步提高催化活性和稳定性[30]-[32]。

基于以上背景，本文提出采用高碘酸钠作为氧化剂，镍钛基纳米复合材料作为催化剂，对含胍废水进行催化氧化处理。高碘酸钠作为一种强氧化剂，在适当条件下能够将胍类物质彻底氧化分解，且其还原产物碘酸钠相对稳定，对环境影响较小[33]-[35]。通过系统研究高碘酸钠添加比例、催化剂组成、反应pH值和反应时间等因素对处理效果的影响，优化工艺条件，旨在实现含胍废水的高效、经济、安全处理，为实际工程应用提供理论依据和技术支持。

2. 实验部分

2.1. 废水水质

本实验所用含胍废水取自本企业水合肼法制备甲基胍生产过程中产生废水和废气吸收产生的洗涤废液，主要水质指标见表 1 所示。

Table 1. Summary of hydrazine-containing wastewater quality
表 1. 含胍废水水质情况汇总表

名称	pH	CODcr/mg/L	NH3-Nmg/L	胍含量
废气处理废水	7~8	150,000~100,000	200,000~150,000	10%~15%

由表 1 可知，该含胍废水具有以下特点：(1)pH 值呈碱性；(2)CODcr 和 NH₃-N 浓度极高，分别达到 10⁵~1.5 × 10⁵ mg/L 和 1.5 × 10⁵~2 × 10⁵ mg/L；(3) 胍含量高达 10%~15%，毒性强。这类废水若直接采用常规方法处理，不仅处理难度大、效果差，而且处理成本极高，目前企业废水经蒸馏和高级氧化后再进行生化处理，给企业带来了巨大的经济负担和环境风险。

2.2. 实验仪器及试剂

(1) 实验过程中用到的主要设备和仪器见表 2 所示。

Table 2. Main equipment and instruments used in the experiment
表 2. 实验的主要设备和仪器

设备仪器名称	规格	生产厂家
搅拌器	DF-101S-5	上海力辰邦西仪器科技有限公司
pH 计	PHS-3C	厂家上海精密科学仪器有限公司
多参数水质测定仪	5B-6C(V10)	北京连华永兴科技发展有限公司

(2) 实验过程中用到的主要实验试剂见表 3 所示。

Table 3. Main experimental reagents used in the experiment
表 3. 实验的主要实验试剂

原材料及试剂	分子式	规格	来源
高碘酸钠	NaIO ₄	分析纯(AR)	国药集团

续表

高锰酸钾	KMnO ₄	分析纯(AR)	国药集团
双氧水	H ₂ O ₂	分析纯(AR)	国药集团
氯化铜	CuCl ₂	分析纯(AR)	国药集团
氯化镍	NiCl ₂	分析纯(AR)	国药集团
四氯化钛	TiCl ₄	分析纯(AR)	国药集团
纳米催化剂 1	Ni ₆₀ Ti ₄₀ Ce(OH)CO ₃	制备	XX 大学
纳米催化剂 2	Ni ₅₀ Ti ₅₀ Ce(OH)CO ₃	制备	XX 大学
纳米催化剂 3	Ni ₄₀ Ti ₆₀ Ce(OH)CO ₃	制备	XX 大学

(3) 催化剂的制备与表征

催化剂制备(以 Ni₄₀Ti₆₀Ce(OH)CO₃ 为例)

试剂配制: 按金属离子摩尔比 Ni:Ti:Ce = 40:60:5, 精准称取 NiCl₂·6H₂O (0.04 mol, 9.512 g)、TiCl₄ (0.06 mol, 8.526 g)和 Ce(NO₃)₃·6H₂O (0.005 mol, 2.164 g), 共同溶于 50 mL 去离子水, 搅拌 30 min, 配制成 0.5 mol/L 的混合金属盐溶液; 另称取 NH₄HCO₃ (0.1 mol, 7.906 g), 溶于 100 mL 去离子水, 配制成 1.0 mol/L 的溶液。

将 NH₄HCO₃ 溶液缓慢滴入混合金属盐溶液。滴加完成后, 继续搅拌 1.5 h, 形成前驱体沉淀。关闭搅拌, 保持 30℃水浴条件下 6 h, 使前驱体颗粒生长稳定。随后采用真空抽滤分离沉淀, 用去离子水洗涤至滤液 pH = 7.0, 再用无水乙醇洗涤 3 次以去除残留水分。将洗涤后的沉淀转移至真空干燥箱, 60℃下干燥 12 h (-0.09 MPa), 去除溶剂。干燥后将样品移入坩埚, 放入马弗炉, 400℃恒温焙烧 3 h, 自然冷却至室温后, 得到 Ni₄₀Ti₆₀Ce(OH)CO₃ 纳米催化剂。

Ni₆₀Ti₄₀Ce(OH)CO₃、Ni₅₀Ti₅₀Ce(OH)CO₃ 和 Ni₄₀Ti₆₀Ce(OH)CO₃ 的 XRD 表征结果见图 1 所示, 随着钛的投料比增加, 其所对应的衍射峰 $2\theta = 58.02^\circ$ 更加明显。从峰强度分析, (a) Ni₆₀Ti₄₀ 样品的主峰强度相对较高, 随着 Ni 含量降低、Ti 含量升高, 如(b) Ni₅₀Ti₅₀、(c) Ni₄₀Ti₆₀ 主峰强度呈递减趋势, 这表明 Ni 和 Ti 的比例变化对晶相的衍射贡献有显著影响, Ni 含量越高, 对应 Ni 基晶相的衍射信号越强。

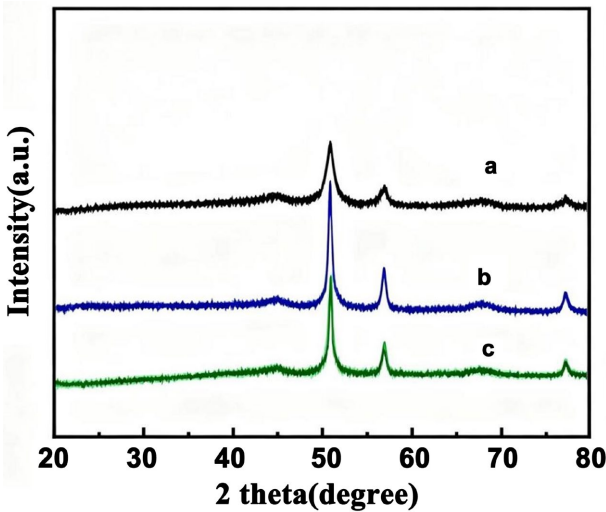


Figure 1. XRD patterns of the Ni-Ticatalyst: (a) Ni₆₀Ti₄₀Ce(OH)CO₃, (b) Ni₅₀Ti₅₀Ce(OH)CO₃, (c) Ni₄₀Ti₆₀Ce(OH)CO₃
图 1. 镍基催化剂的 XRD 图谱: (a) Ni₆₀Ti₄₀Ce(OH)CO₃, (b) Ni₅₀Ti₅₀Ce(OH)CO₃, (c) Ni₄₀Ti₆₀Ce(OH)CO₃

Ni₄₀Ti₆₀Ce(OH)CO₃ 的透射电镜图见图 2，Ni₄₀Ti₆₀Ce(OH)CO₃ 呈现出多级纳米片状组装结构，片层相互交织、堆叠，形成了丰富的孔隙结构。材料的颗粒尺寸主要集中在 2~8 nm 之间，其中最可几粒径(D_{max})为 4 nm，属于典型的纳米级颗粒。

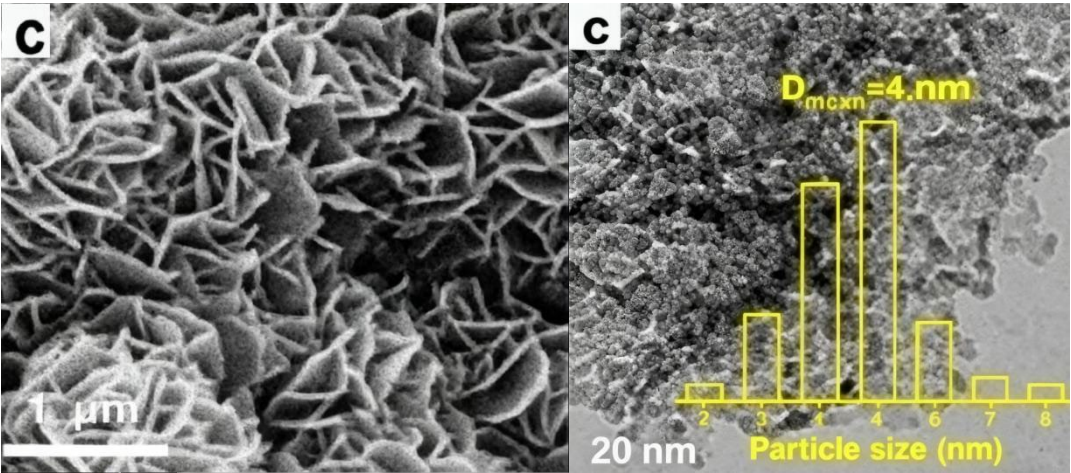


Figure 2. TEM images and the corresponding size distribution of Ni₄₀Ti₆₀Ce(OH)CO₃
图 2. Ni₄₀Ti₆₀Ce(OH)CO₃ 的 TEM 图像和对应的尺寸分布

2.3. 实验方法

针对含胼废水，采用多级氧化工艺处理方法，实现胼的分解及安全处理的目的。实验定量取含胼废水(pH: 3.5, NH₃-N: 177120 mg/L, 胼含量约 13%) 100 mL 置于 200 mL 烧杯中，分别添加高碘酸钠等氧化剂和纳米催化剂。实验结果见表 4 所示。

Table 4. Effect of oxidants and catalysts on the decomposition of hydrazine-containing wastewater
表 4. 氧化剂和催化剂对含胼废水分解效果的影响

氧化剂	催化剂	NH ₃ -N mg/L	NH ₃ -N 去除率
双氧水	Ni ₅₀ Ti ₅₀ Ce(OH)CO ₃	56,678	68%
高锰酸钾	Ni ₅₀ Ti ₅₀ Ce(OH)CO ₃	47,822	73%
高碘酸钠	Ni ₅₀ Ti ₅₀ Ce(OH)CO ₃	5314	97%
次氯酸钠	Ni ₅₀ Ti ₅₀ Ce(OH)CO ₃	26,568	85%
高碘酸钠	-	109,814	38%
高碘酸钠	Ni ₆₀ Ti ₄₀ Ce(OH)CO ₃	12,398	93%
高碘酸钠	Ni ₄₀ Ti ₆₀ Ce(OH)CO ₃	1571	98%
高碘酸钠	四氯化钛	61,992	65%
高碘酸钠	NiCl ₂	104,501	41%
高碘酸钠	氯化铜	97,416	45%
双氧水	Ni ₄₀ Ti ₆₀ Ce(OH)CO ₃	17,712	90%
高锰酸钾	Ni ₄₀ Ti ₆₀ Ce(OH)CO ₃	23,026	85%

表 4 可以看出，直接使用高碘酸钠不加催化剂，氨氮的去除率只有 38%，加入常规的金属离子催化，

去除效率不足 70%。而采用添加高碘酸钠和纳米催化剂的方法，分解效率可达到 98%左右。故采用直接向废水中添加高碘酸钠和纳米催化剂的工艺分解含胍废水。

深入研究和探讨催化剂的具体使用量、高碘酸钠的添加量、反应体系的 pH 值、以及整个反应过程所需的时间等多个关键因素，对胍去除效率所产生的显著影响，旨在全面理解和掌握这些因素在胍去除过程中的作用机制及其相互之间的协同效应，从而优化反应条件，提高胍的去除效果(见表 5 和图 3)。

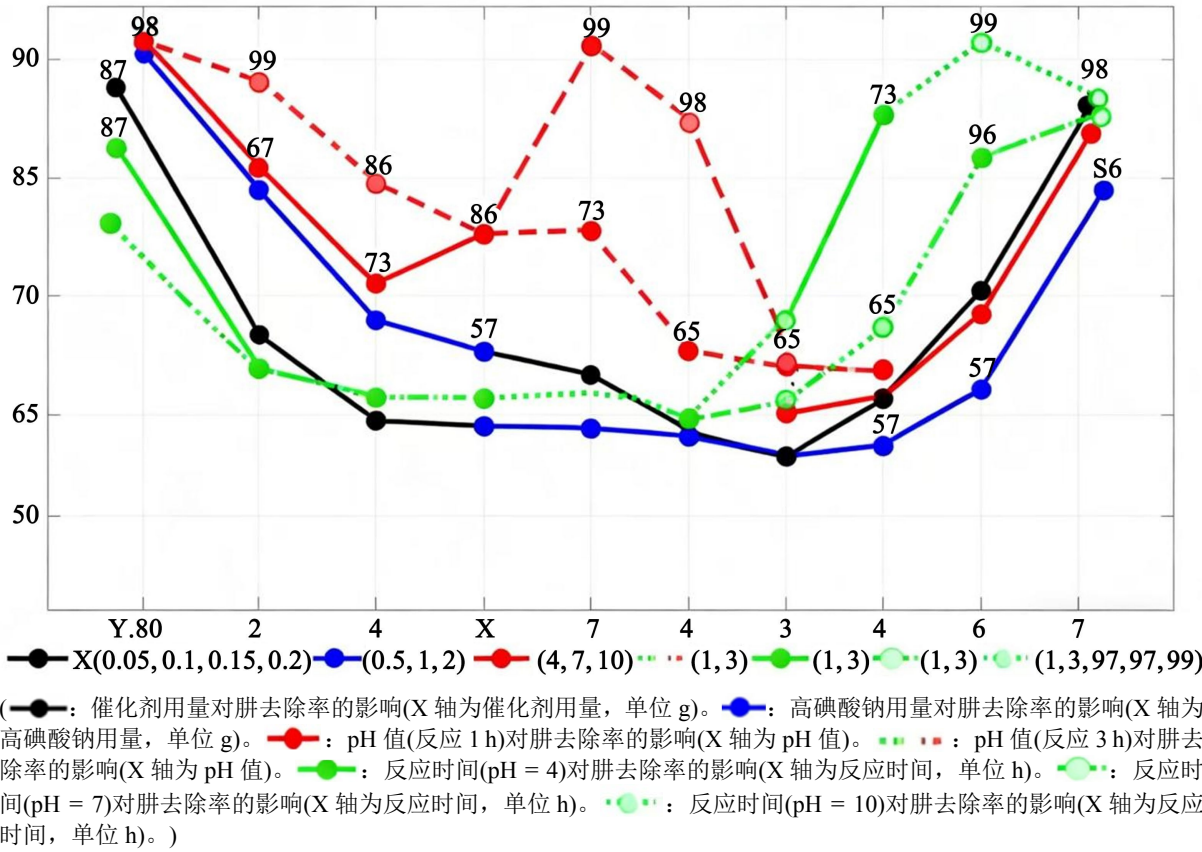


Figure 3. Line graph of catalyst dosage, sodium periodate dosage, pH value, reaction time, etc., on hydrazine removal rate
图 3. 催化剂用量、高碘酸钠用量、pH 值、反应时间等对胍去除率折线图

Table 5. The impact of different reaction conditions on the removal efficiency of hydrazine-containing wastewater
表 5. 不同反应条件对含胍废水去除效果的影响

序号	$\text{Ni}_{40}\text{Ti}_{60}\text{Ce}(\text{OH})\text{CO}_3$ 催化剂用量(g)	高碘酸钠用量(g)	pH 值	反应时间(h)	胍的去除率(%)
1	0.05	1	8	2	87
2	0.1	1	8	2	97
3	0.15	1	8	2	97
4	0.2	1	8	2	99
5	0.1	0.5	8	2	98
6	0.1	1	8	2	99
7	0.1	2	4	2	67
8	0.1	0.5	8	2	98

续表

9	0.1	0.5	10	2	98
10	0.1	0.5	4	1	57
11	0.1	0.5	8	1	73
12	0.1	0.5	10	1	86
13	0.1	0.2	4	3	65
14	0.1	0.5	8	3	99
15	0.1	0.5	10	3	98

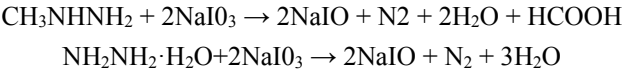
综合考虑物料成本与反应效率，最终选定条目 8 作为反应条件。实验步骤如下：取 1 L 含胍废水置于 1.5 L 烧杯中，开启搅拌，再加入 0.5 g 高碘酸钠和 0.1 g 催化剂，反应 2 h，最后进行沉淀分离(取 10 ml 混合液放入离心管中，3000 r/min，时间 5 min)，取上清液进行分析检测。

催化剂的回收与重复使用性能是评价其实际应用价值的重要指标。Ni₄₀Ti₆₀Ce(OH)CO₃ 为催化剂在反应结束后，通过离心分离回收催化剂，用去离子水和无水乙醇交替洗涤 3 次，在 60℃ 下真空干燥 6 h，然后用于下一次实验。重复使用 5 次的实验，催化效果没有明显影响。

胍含量的测定：采用碘酸钾滴定法。NH₃-N 含量的测定：采用纳氏试剂分光光度法。

3. 结果与讨论

通过 LC-MS 检测到 HCOOH 了甲酸，和反应过程中生成无色无味难溶于水的气体，推测为 N₂。推测可能的反应方程式如下：



当催化剂用量从 0.05 g/L 增加至 0.1 g/L 时，胍去除率从 87% 升至 97%，当催化剂用量超过 0.1 g/L 后，去除率增长效果不大，因此最佳催化剂用量为 0.1 g/L。高碘酸钠用量从 0.2 g/L 增加至 0.5 g/L 时，胍去除率从 65% 升至 98%；当高碘酸钠用量超过 0.5 g/L 后，去除率无明显提升，过量高碘酸钠会增加后续处理难度与成本，因此最佳高碘酸钠用量为 0.5 g/L。反应时间超过 2 h 后，去除率基本稳定，表明反应已达平衡，因此最佳反应时间为 2 h。

高碘酸钠在镍钛基纳米催化剂的协同作用下，能够高效氧化分解甲基胍生产废水中的胍类物质。与高锰酸钾、双氧水、次氯酸钠等氧化剂相比，高碘酸钠的处理效果最佳，NH₃-N 去除率和胍去除率分别达到 98% 和 98%。

Ni₄₀Ti₆₀Ce(OH)CO₃ 催化剂具有良好的稳定性和重复使用性能，重复使用 5 次后，催化活性没有明显下降，能够有效降低处理成本。

总之，本研究为含胍废水的高效处理提供了新的思路和技术支撑，具有重要的理论意义和实际应用价值。随着研究的不断深入和技术的不断完善，该方法有望在含胍废水处理领域得到广泛应用，为环境保护和水资源可持续利用做出贡献。

参考文献

[1] Smith, J.R. and Jones, A.B. (2010) Hydrazine and Its Derivatives: Properties, Synthesis and Applications. *Chemical Reviews*, **110**, 5805-5853.
[2] Wang, L., Li, Y. and Zhang, H. (2015) Recent Advances in the Treatment of Hydrazine-Containing Wastewater. *Journal*

- of Hazardous Materials, **283**, 654-666.
- [3] Liu, X., Wang, G. and Chen, J. (2019) Application of Nanomaterials in the Treatment of Industrial Wastewater. *Environmental Pollution*, **245**, 1049-1062.
- [4] USEPA (2005) Health Assessment Document for Hydrazine. Environmental Protection Agency.
- [5] WHO (2017) Guidelines for Drinking-Water Quality. World Health Organization.
- [6] Kim, J.H., Park, S.J. and Lee, K.H. (2012) Toxic Effects of Hydrazine and Its Derivatives on Aquatic Organisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **81**, 145-152.
- [7] Li, Q., Xu, X. and Li, P. (2018) Treatment of Methylhydrazine-Containing Wastewater by Advanced Oxidation Processes. *Chemical Engineering Journal*, **346**, 289-298.
- [8] Zhang, Y., Wang, L. and Liu, H. (2016) Catalytic Oxidation of Hydrazine in Wastewater Using Nickel-Based Catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, **181**, 603-611.
- [9] Chen, G., Zhang, J. and Li, Y. (2014) Degradation of Hydrazine in Aqueous Solution by UV/H₂O₂ Process. *Journal of Environmental Sciences*, **26**, 1023-1030.
- [10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] 王鹏, 李爱民, 张全兴. 吸附法处理含胂废水的研究进展[J]. 离子交换与吸附, 2013, 29(4): 379-388.
- [12] 刘红, 王连军, 孙秀云. 萃取法回收废水中胂类物质的研究[J]. 化工进展, 2015, 34(1): 234-239.
- [13] 张峰, 李艳, 王涛. 膜分离技术在含胂废水处理中的应用[J]. 膜科学与技术, 2017, 37(2): 123-128.
- [14] 赵庆良, 任南琪. 水污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [15] 马放, 杨基先, 周丹丹. 环境微生物学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [16] 王慧, 张立秋, 李金惠. 生物法处理含胂废水的研究进展[J]. 环境工程学报, 2016, 10(8): 4001-4008.
- [17] 陈欢林. 环境工程原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [18] Schwarzenbach, R.P., Egli, T., Hofstetter, T.B., von Gunten, U. and Wehrli, B. (2010) Global Water Pollution and Human Health. *Annual Review of Environment and Resources*, **35**, 109-136. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-100809-125342>
- [19] 徐新华, 汪大翥, 宋爽. 工业废水中专项污染物处理手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [20] Li, X., Zhang, L. and Wang, Y. (2012) Fenton Oxidation of Hydrazine in Wastewater: Kinetics and Mechanism. *Journal of Hazardous Materials*, **209**, 196-202.
- [21] 王宗平, 刘勇弟, 徐文英. 高级氧化技术处理难降解有机废水的研究进展[J]. 环境科学进展, 1999, 7(3): 54-63.
- [22] 孙红文, 王春霞, 张景成. 持久性有机污染物的环境化学与生态毒理学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [23] USEPA (2010) Nitrosamines: A Review of Sources, Exposures, and Health Effects. Environmental Protection Agency.
- [24] Burda, C., Chen, X., Narayanan, R. and El-Sayed, M.A. (2005) Chemistry and Properties of Nanocrystals of Different Shapes. *Chemical Reviews*, **105**, 1025-1102. <https://doi.org/10.1021/cr030063a>
- [25] Zhang, L., Liu, J. and Li, Y. (2015) Nanocatalysts for Environmental Applications. *Catalysis Today*, **258**, 2-13.
- [26] Yu, J., Low, J.X., Wong, K.L., et al. (2017) Semiconductor-Based Photocatalysts and Photoelectrochemical Cells for Solar Fuel Production: A Review. *Energy & Environmental Science*, **10**, 73-100.
- [27] Chen, X. and Mao, S.S. (2007) Titanium Dioxide Nanomaterials: Synthesis, Properties, Modifications, and Applications. *Chemical Reviews*, **107**, 2891-2959. <https://doi.org/10.1021/cr0500535>
- [28] Kudo, A. and Miseki, Y. (2009) Heterogeneous Photocatalyst Materials for Water Splitting. *Chemical Society Reviews*, **38**, 2539-2551.
- [29] Rostamizadeh, M., Tavasoli, A. and Rahimpour, M.R. (2011) Nickel-Based Catalysts for Hydrogen Production through Steam Reforming of Methane. *Applied Catalysis A: General*, **391**, 1-18.
- [30] Zhang, X., Li, Z. and Wang, X. (2013) Synthesis and Catalytic Properties of Nickel-Titanium Composite Oxides. *Journal of Solid State Chemistry*, **201**, 173-178.
- [31] Liu, Y., Zhang, H. and Chen, G. (2015) Preparation of Ni-TiO₂ Catalysts and Their Application in the Oxidation of Organic Pollutants. *Catalysis Communications*, **66**, 10-14.
- [32] Xu, H., He, H., Liu, Y. and Ying, W.Y. (2016) Ti-Based Catalysts for the Selective Catalytic Reduction of NO_x with Ammonia. *Catalysis Reviews*, **58**, 145-208.
- [33] Sharma, V.K., Bhattacharyya, M. and Lee, J.Y. (2006) Sodium Periodate as an Oxidizing Agent in Organic Synthesis. *Chemical Reviews*, **106**, 5295-5353.

-
- [34] Wang, L., Zhang, Y. and Liu, H. (2014) Oxidation of Hydrazine Using Sodium Periodate in the Presence of Metal Ions. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **47**, 215-220.
- [35] Li, Q., Xu, X. and Li, P. (2020) Catalytic Oxidation of Methylhydrazine with Sodium Periodate over Nickel-Titanium Nanocomposites. *Journal of Environmental Management*, **258**, Article 110035.