

蒽醌法酸碱交替固定床过氧化氢工艺 升级改造关键问题梳理

仝育婷, 李雨潇, 远亚群*

(中国化学品安全协会, 北京 100026)

摘要: 蒽醌法酸碱交替固定床过氧化氢工艺因存在固有的安全风险, 目前面临淘汰或进行升级改造的问题, 但由于对现有工艺的基础理论研究不足, 造成改造思路较为局限。总结该工艺的突出风险、碱洗的风险及碱性环境加速分解过氧化氢的机理、降解物的成分及降解物的再生、工作液的研究进展、过氧化氢生产新工艺等关键问题, 并对下一步的研究思路进行展望, 可为过氧化氢生产行业的升级改造以及高效、绿色新工艺的开发提供借鉴。

关键词: 蒽醌法; 过氧化氢; 升级改造; 工作液; 新工艺

中图分类号: TQ123.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)02-0236-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.02.037

Key issues in the upgrade of anthraquinone-based acid-base alternating fixed-bed H₂O₂ process

TONG Yu-ting, LI Yu-xiao, YUAN Ya-qun*

(China Chemical Safety Association, Beijing 100026, China)

Abstract: Anthraquinone-based acid-base alternating fixed-bed H₂O₂ process faces phase-out or mandatory upgrades due to inherent safety risks. However, due to the insufficient research on the basic theories of this process, the current improvement ideas are relatively limited. We systematically summarized critical issues including prominent process risks, hazards associated with alkali washing and the mechanistic pathways of H₂O₂ accelerated decomposition in alkaline environments, composition analysis and regeneration of degradation byproducts, recent advancements in working fluid formulations, and emerging alternative H₂O₂ production technologies. Furthermore, we provide perspectives on future research directions, offering valuable references for the industry's transition toward upgraded, high-efficiency, and environmentally sustainable hydrogen peroxide production systems.

Key words: anthraquinone method; hydrogen peroxide; upgrades; working solution; new process technology

蒽醌法过氧化氢生产工艺是工业过氧化氢生产的主流方法。我国自 1987 年成功开发第一套双氧水生产装置以来, 蒽醌法合成技术一直沿用至今。蒽醌法双氧水生产工艺分为固定床工艺和流化床工艺, 其中固定床工艺又包括酸碱交替的固定床工艺及全酸性固定床工艺。蒽醌法酸碱交替固定床过氧化氢工艺因存在固有的安全风险, 近年来事故频发, 2024 年已被应急管理部列入《淘汰落后危险化学品安全生产工艺技术设备目录(第二批)》, 并要求新(扩)建项目禁用该工艺, 现有装置 5 年内改造完毕。据统计, 国内在役过氧化氢生产装置约有 122 套需要进行改造。由于基础研究不足, 造成目前的改造思路主要局限在如何让工作液再生系统与过氧化氢主生产装置隔离, 但并没有从根本上解决生产中彻底不“碱洗”等问题。研究蒽醌降解物的组成

和结构、降解反应机理、工作液的优化配置与再生^[1]、新的过氧化氢生产工艺等, 对双氧水工艺技术提升及安全生产意义重大。

1 蒽醌法酸碱交替固定床过氧化氢工艺的突出风险

蒽醌法酸碱交替固定床过氧化氢生产过程中, 蒽醌、重芳烃和磷酸三辛酯组成的工作液循环使用, 而具有易燃易爆性的工作液在系统内大量循环留存, 具有不小的安全风险, 且双氧水生产工艺属于有机工艺生产无机产品, 生产过程中伴随着工作液的酸、碱转换, 并涉及到金属催化剂参与生产, 而双氧水在碱性条件、金属离子、盐类等存在的情况下极易分解, 造成反应失控。

有人描述蒽醌法双氧水的生产为“用危险的原

收稿日期: 2025-05-14; 修回日期: 2025-12-17

作者简介: 仝育婷(1992-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为化工工艺本质安全及风险管控, tongyt12@163.com; 远亚群(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为工艺危险特性、装备及安全控制技术, 通讯联系人, yuanyaqunccsa163.com。

料,通过危险的过程,生产危险的产品”^[2]。整个工艺最突出的风险在于,工作液在体系循环过程中易产生降解物,必须通过碱洗过程对循环工作液中的蒽醌降解物进行再生,以维持生产稳定性。然而,过氧化氢在碱性环境中极不稳定,会快速分解为水和氧气,释放大热量,导致设备压力骤升甚至爆炸。即使企业尝试局部改造(如仅部分工作液进行碱洗),系统仍存在碱性环境,无法彻底消除过氧化氢误入碱性介质的可能性。在碱洗和酸性工序交替过程中,一旦操作失误(如阀门未关闭、pH监测失效)或设备故障(如管道泄漏),碱性物质就可能意外混入含过氧化氢的系统,造成极大的安全风险。而在长期运行中,蒽醌降解物在工作液中逐渐积累,降低氢化效率,迫使企业频繁进行碱洗再生。这种循环加剧了过氧化氢接触碱性环境的概率,形成恶性循环。近年来,过氧化氢生产、储存和使用环节的事故发生频发,大多都与碱性物质或杂质进入系统,导致双氧水剧烈分解有关。

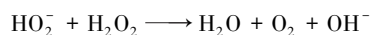
2 “碱洗”的风险及碱性环境加速分解过氧化氢的机理

2.1 “碱洗”的风险

“过氧化工艺”过程,因为过氧基(—O—O—)的存在,具有很强的分解爆炸危险。王清良等^[3]通过实验探究了 H_2O_2 在碱性介质中的分解速度与时间关系曲线,证明过氧化氢在碱性介质中很不稳定,而且质量浓度越高,分解速度越快。王建辉^[4]认为 H_2O_2 溶液的稳定性与杂质含量、表面材质和状况、pH、一定波长的光、 H_2O_2 的浓度等有关。不含杂质的 H_2O_2 溶液的分解速度一般较慢,但微量的可溶性杂质(活性离子)存在、高pH时, H_2O_2 的分解速度大大加快,稳定性急剧恶化。早期有学者研究发现 H_2O_2 的分解速率取决于碱中过渡金属杂质含量。碱中混入的过渡金属元素在中性或碱性溶液中可以形成多种复合物,碱性条件下过渡金属胶粒非均相催化分解 H_2O_2 ^[5]。

2.2 碱性环境加速分解过氧化氢的机理

周红敏等^[6]的研究中提到 H_2O_2 在20℃时发生如下平衡: $H_2O_2 \rightleftharpoons H^+ + HO_2^-$,生成 HO_2^- (过氧氢根离子)。适量的 OH^- 结合过渡金属元素生成 H_2O_2 催化活性体促进 H_2O_2 的催化分解。在碱性环境中,过氧化氢的分解速率显著加快,分解反应会被强烈催化:



认为 HO_2^- 在溶液中的活度是影响 H_2O_2 分解反应速度的关键因素之一。 HO_2^- 的结构中,负电荷集中在氧原子上,导致O—O键进一步弱化,更容易断裂, HO_2^- 的稳定性远低于 H_2O_2 ,极易发生分解。在酸性环境中, H_2O_2 主要以分子形式存在,分解速率较慢,酸性条件下, H^+ 通过质子化稳定O—O键,抑制自由基生成。分解路径以分子间反应为主(如 $H_2O_2 \longrightarrow H_2O + O_2$),需更高活化能。

由于碱性 H_2O_2 体系中含有多种少量的过渡金属,其分解机理及pH的影响非常复杂,需要做更详细深入的研究。

3 降解物的成分及降解物的再生

3.1 降解物的主要成分

蒽醌法双氧水工业生产工作液降解问题是行业研究的重点,在降解物产生与组成、降解物的再生机理、工作液的选择等各个方面已经做了比较深入细致的探讨,也在实际应用工作中取得了进展和效益,但因为降解物的种类较多,且降解物的结构和性质与有效蒽醌相近,关于降解物的分离、分析等仍面临巨大挑战,进一步研究降解物的成分及降解物的再生意义重大。

一般认为,降解物的生成可分为氢化降解和氧化降解。其中氢化降解包括芳环的氢化、羰基的氢解。以乙基蒽醌为例,目前仅确定部分降解物结构,其中氢化降解物包括2-乙基蒽、2-乙基蒽酮、2-乙基羟基蒽酮、四氢-2-乙基蒽、四氢-2-乙基蒽醌环氧化物、四氢-2-乙基羟基蒽酮、六氢-2-乙基蒽、六氢-2-乙基羟基蒽酮、八氢-2-乙基蒽醌、十氢-2-乙基蒽醌等;氧化降解物种类较少,主要为蒽醌的环氧化合物^[7-8]。

降解物积累到一定浓度,会引起工作液物性的改变、生产效率的降低、生产成本提高等,所以对降解物进行再生是非常必要的。碱洗工作液的目的是在碱液的作用下再生工作液中的部分降解物,并将部分不可再生的降解物溶解到碱液中排出,以此来达到净化工作液的作用。由于工作液中的组成及蒽醌的降解机理较为复杂,生成的降解物种类非常多,所以很难寻求一种再生剂将所有降解物转化成为有效蒽醌。

3.2 降解物的再生

目前国内蒽醌降解物再生催化剂以活性氧化铝为主,在研究的其他再生剂包括金属氧化物负载类

再生剂、有机碱类再生剂、分子筛类再生剂等。其中,金属负载型类再生剂可通过载体与金属协同作用提升降解物的再生效率;有机碱类再生剂因与工作液互溶难分离而应用受限;分子筛类再生剂因具有均匀的孔结构、高吸附性和热稳定性而表现优异;层状双金属负载类再生剂和分子筛类再生剂都具备优异的结构特征和良好的蒽醌降解物再生性能,合理利用其优势,将有利于新型蒽醌降解物催化剂的开发^[9]。

4 工作液的研究进展

蒽醌法生产过氧化氢工艺中,工作液的溶质主要是烷基蒽醌,溶剂一般由蒽醌溶剂和氢蒽醌溶剂构成。

4.1 溶质的选择

目前采用的烷基蒽醌主要是 2-乙基蒽醌(EAQ),但 EAQ 因溶解度低、易降解等问题限制了工艺效率和成本优化。近年来,以 2-戊基蒽醌(AAQ)和 2-叔丁基蒽醌(TBAQ)为代表的新型烷基蒽醌因更高的溶解度和稳定性成为改进方向。实验表明,AAQ 和 TBAQ 在混合溶剂中的溶解度显著高于 EAQ。TBAQ 在 TMB/磷酸三丁酯(TOP)体系中的溶解度也优于 EAQ^[10]。高溶解度可提升工作液中有效蒽醌的浓度,从而提高过氧化氢的产率。目前,国内各大生产厂家主要采用的是 2-乙基蒽醌,但国外许多公司如索尔维公司等主要采用 2-叔戊基蒽醌。两者相比,2-叔戊基蒽醌具有明显优势,其在混合溶剂中的溶解度远高于 2-乙基蒽醌^[11],这就直接影响单位体积工作液的氢化和氧化效率,从而影响到双氧水的生产成本。

4.2 溶剂的选择

溶剂的选择是蒽醌法过氧化氢生产工艺的关键问题之一。国内过氧化氢装置中蒽醌溶剂主要使用的是重芳烃;氢蒽醌溶剂多采用高级脂肪醇、有机酸或无机酸的酯类,目前已经应用的有磷酸三辛酯、二异丁基甲醇、醋酸甲基环己酯等。常用的溶剂体系是重芳烃与磷酸三辛酯组成的二元溶剂体系。也有采用三元溶剂体系的工作液,如以重芳烃、磷酸三辛酯和 2-甲基环己基醋酸酯作为溶剂体系,该溶剂体系对氢蒽醌的溶解度高,提高了氢化效率,但工作液密度大,不利于萃取。也有以重芳烃、磷酸三辛酯和四丁基脲作为溶剂体系,此类工作液密度适中,对氢蒽醌的溶解度大,溶剂沸点高,但四丁基脲价格昂贵。还有现有技术公开了一种以重芳烃、磷酸三辛

酯和 *N*-苯基 *N*-乙基苯甲酰胺为溶剂体系的工艺,该溶剂体系工作液工作负荷大,降低了蒽醌降解率,但 *N*-苯基 *N*-乙基苯甲酰胺的合成过程复杂,提纯困难,增加了双氧水的生产成本。CN 114702012B 公开了一种工作液,包括重芳烃、磷酸三辛酯、2-甲基环己基醋酸酯、2-辛醇,2-辛醇的存在能够在一定程度上抑制磷酸三辛酯和 2-甲基环己基醋酸酯的分解,降低了双氧水产品中的总有机碳含量^[12]。

中国化学品安全协会在 2023 年过氧化氢生产企业专项指导服务过程中,对山东及内蒙古的 12 家企业进行了调研,发现使用重芳烃、磷酸三辛酯二元溶剂的企业共 9 家,使用重芳烃、磷酸三辛酯、2-甲基环己基醋酸酯作为溶剂的企业 2 家,使用重芳烃、磷酸三辛酯、四丁基脲的企业 1 家。

5 过氧化氢生产新工艺

近年来,过氧化氢生产领域的研究重点逐渐从传统的蒽醌法转向更环保、高效的新工艺。研究者致力于开发操作更温和、无污染物产生的绿色方法,如直接合成法、电催化、光催化、生物催化法等合成方法,尽管新的工艺方法尚未实现工业化,但可以为未来实现 H₂O₂ 绿色、高效及安全生产提供帮助和启发。

5.1 氢氧直接化合法生产过氧化氢

直接合成过氧化氢是指氢气和氧气直接反应产生过氧化氢,只需要一步就可反应,避免了有害的反应条件、化学品和副产物,近年来,该工艺因简单、环保、原子效率高等优点,逐渐成为过氧化氢行业的一大研究热点。目前,氢氧催化直接合成过氧化氢研究取得了许多重大进展,研究的重点主要集中在对催化剂的研究,如催化机理、催化活性中心、催化载体及改性等方面。贵金属催化剂是氢氧直接合成过氧化氢反应中使用最多的催化剂,一般有 Pd、Au、Pt 等贵金属以及它们的合金等^[13]。氢氧直接合成过氧化氢作为一种绿色合成过氧化氢的方法,目前研究大多仍处于实验阶段,也获得了一些具有工业化前景的成果和专利^[14]。研究和设计高活性选择性的催化剂和适宜的反应体系提高反应产率,对于未来直接合成过氧化氢的工业化应用有着重要的意义。

5.2 光催化法合成过氧化氢

作为一种绿色、碳中性的替代方案,太阳能驱动的分氧(O₂)和水(H₂O)合成 H₂O₂ 的氧还原策略受到越来越多的关注。过氧化氢光合成由于水分子

中氢提取过程的高能垒限制,存在催化活性不足的问题。上海交通大学张礼知和龙明策等通过机械化学策略合成含有 COF 的酞式蒽醌(kf-AQ)^[15],该材料能够在无牺牲试剂的碱性水环境(pH=13)中,利用氧气直接光催化合成 H₂O₂[在 λ>400 nm 光照下产率达 4 784 μmol/(h·g)],该过程由于氢提取能垒的显著降低得以实现,表现出高效的 H₂O₂ 光合成活性。目前光催化生产 H₂O₂ 高到了毫摩尔水平,但远远达不到工业生产要求。O₂ 的有效吸附、可见光有效利用、产生 H₂O₂ 路径的优化和抑制 H₂O₂ 快速分解等问题还需进一步解决,而且光催化剂的稳定性也需要进一步提高。但光催化产 H₂O₂ 技术尽管处于起步阶段,仍具有巨大的发展前景。

5.3 电化学法合成过氧化氢

电化学方法利用两电子氧还原反应为 H₂O₂ 制备提供了简便、安全、低成本的生产替代方案。该方法仅需氧气、电解液和电能即可高效生成高纯 H₂O₂。然而,传统的酸性或碱性介质中 H₂O₂ 的合成常面临复杂的 pH 调节和分离困难等问题。因此,研究者们近年来开始关注在中性条件下合成 H₂O₂ 的技术,这种方法不仅能够提供稳定的储存介质,且不需复杂的后处理过程,具有巨大的应用潜力。合肥工业大学吕珺教授等人通过程序碳化处理蚕丝,使得其中氨基酸分子中的氮氧元素均匀掺杂至碳骨架中,制备了具有优异催化性能的氮氧掺杂碳材料,显示出极高的电催化活性和效率^[16],是近年来中性条件下报道的最高性能的催化剂之一。

5.4 生物催化法合成过氧化氢

受限于 H₂O₂ 在碱性条件下(电化学工作环境)和光照条件下的不稳定易分解特性,电催化和光催化方法并不适合大量生产 H₂O₂。与化学工业催化相比,生物体中的酶催化反应可在温和条件下特异性地产生 H₂O₂,不少研究者将目光聚焦到了生物体的酶促反应上。含黄素的氧化还原酶,包括葡萄糖氧化酶(GOD)、乙醇氧化酶(AOX)和甲酸氧化酶(FOD)等,在温和条件下不需要能量输入就能催化过氧化氢的产生,为过氧化氢的合成提供了新的思路。如中国科学院长春应用化学研究所董绍俊院士团队报道了一种钯单原子组装体催化剂——Pd/C,该催化剂在模拟甲酸氧化酶合成过氧化氢方面表现出优异的性能, H₂O₂ 的选择性可以达到 75%^[17]。生物催化法合成 H₂O₂ 在绿色化工与能源领域潜力巨大,但需突破酶稳定性、反应效率及成本瓶颈。未来,通过人工酶设计、反应工程优化及多技

术融合,该技术有望成为传统蒽醌法的颠覆性替代方案。

6 总结及展望

随着过氧化氢应用领域越来越广泛,对蒽醌法生产过氧化氢工艺出现的问题亟需解决,研究蒽醌法酸碱交替固定床过氧化氢工艺碱洗的问题、降解物的成分及降解物的再生、工作液的研究进展、过氧化氢生产新工艺等方面的问题对现有装置的升级改造有一定的参考价值。当前过氧化氢生产工艺研究的侧重点一是仍然要聚焦蒽醌法的优化升级。蒽醌法目前是应用最广泛的生产方法,未来需继续在工艺细节上优化。如彻底取消碱洗工序,利用真空闪蒸脱水及活性氧化铝再生工作液,降低过氧化氢误入碱性环境的风险;开发更高效的加氢催化剂,提高催化剂的活性、选择性和稳定性,降低贵金属用量,降低成本;同时,优化工作液配方,探索新的蒽醌衍生物和溶剂组合,提高氢化效率和产品收率;此外,改进加氢反应器,如采用更先进的流化床或浆态床反应器,提高反应效率和装置处理能力。二是持续加强新工艺研发突破。例如,利用太阳能驱动的光化学反应,将水分解产生过氧化氢,实现绿色、可持续生产。此外,氢气和氧气直接合成过氧化氢的工艺也有望取得进展,解决目前存在的安全性、效率和催化剂污染等问题。随着下游行业对过氧化氢纯度和浓度要求的提高,需要更高浓度的过氧化氢,未来也需要开发更高效的浓缩技术和精制工艺,提高产品浓度和纯度,满足市场需求。

参考文献

- [1] 刘航,方向晨,贾立明,等.蒽醌法生产过氧化氢反应机理和工作液研究进展[J].工业催化,2013,21(8):18-22.
- [2] 华安.华安 HSE 之声:双氧水生产装置现状、技术复杂性、防控措施、典型事故分析及案例汇编[Z].https://mp.weixin.qq.com/s/cghxluenpOM_gkG1uNnuLw.
- [3] 王清良,黄爱武,杨金辉,等.过氧化氢的氧化特性及其在不同介质中的分解行为研究[J].矿冶,2005,(1):59-61.
- [4] 王建辉.蒽醌法双氧水生产中的安全问题[J].江苏化工,2004,(5):54-55.
- [5] 张学金,李友明,陆瑞江.过渡金属元素作用下 H₂O₂ 碱性分解动力学及机理[J].华南理工大学学报:自然科学版,2010,38(9):40-45.
- [6] 周红敏,石双群.Fe(III)、Cr(III)对过氧化氢分解作用的再研究[J].河北化工,1995,(2):22-24.

(下转第 246 页)

- ses, 2024, 12(6): 1201.
- [8] Ma B, Zheng J F, Xian Z Y, *et al.* Optimal operation strategy for Wind-Photovoltaic Power-Based hydrogen production systems considering electrolyzer Start-Up characteristics [J]. *Processes*, 2024, 12(8): 1756.
- [9] 杨福胜, 王梓龙. 生命周期视角下氢的制取及其在化工领域的应用 [J]. *西华大学学报: 自然科学版*, 2025, 44(1): 141-154.
- [10] 宋东新, 王世乐, 苗剑, 等. 可再生能源制氢技术经济性探讨及成本分析 [J]. *中外能源*, 2023, 28(11): 24-29.
- [11] 杨胜, 樊艳芳, 侯俊杰, 等. 可再生能源 ALK-PEM 联合制氢系统多时间尺度优化运行策略 [J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(3): 68-80.
- [12] 刘淑琴, 戚川, 纪雨彤, 等. 煤炭地下气化制氢技术路径 [J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(8): 1-10.
- [13] 俞和胜, 祁海鹰, 谭忠超. “双碳”背景下传统化石能源脱碳制氢增值化利用技术 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2023, 63(8): 1226-1235.
- [14] 郑玉华, 侯丹丹. 基于不确定性分析的不同制氢方式能源投入回报研究 [J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2022, 44(11): 219-227.
- [15] 罗进成, 李锁华, 商玮珂, 等. 化石资源与新能源融合下的制氢技术发展及展望 [J]. *应用化工*, 2024, 53(11): 2777-2782.
- [16] Mio A, Barbera E, Massi Pavan A, *et al.* Sustainability analysis of hydrogen production processes [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 54: 540-553.
- [17] Huang J, Balcombe P, Feng Z. Technical and economic analysis of different colours of producing hydrogen in China [J]. *Fuel*, 2023, 337: 127227.
- [18] 中国政府网. 国家发展改革委、国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》 [EB/OL]. (2022-03-24) [2025-05-10]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-03/24/content_5680973.htm.
- [19] 中国电力报. 我国累计规划建设绿氢项目超 400 个 [EB/OL]. (2024-11-22) [2025-05-10]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1816407061249059972&wfr=spider&for=pc>.
- [20] Du Y Y, Huang H, Liu H B, *et al.* Life cycle assessment of abandonment of onshore wind power for hydrogen production in China [J]. *Sustainability*, 2024, 16(13): 5772.
- [21] Zhang J X, Wang Z H, He Y, *et al.* Comparison of onshore/offshore wind power hydrogen production through water electrolysis by life cycle assessment [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, 60: 103515.
- [22] Gu Y, Chen Q Q, Wang D F, *et al.* Strategy-based optimization and life cycle environmental impact assessment of a stable photovoltaic power-to-hydrogen system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 315: 118747.
- [23] 陈健, 姬存民, 卜令兵. 碳中和背景下工业副产气制氢技术研究与应用 [J]. *化工进展*, 2022, 41(3): 1479-1486.
- [24] Busch P, Kendall A, Lipman T. A systematic review of life cycle greenhouse gas intensity values for hydrogen production pathways [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 184: 113588.
- [25] 许传博, 王乐凯, 史超凡, 等. 多情景下我国氢能产业中长期供需结构及碳排放模拟研究 [J]. *气候变化研究进展*, 2025, 21(2): 221-235.
- [26] 陈馨. 典型制氢工艺生命周期碳排放对比研究 [J]. *当代石油石化*, 2023, 31(1): 19-25.
- [27] Ozawa A, Kudoh Y. Assessing uncertainties of Life-Cycle CO₂ emissions using hydrogen energy for power generation [J]. *Energies*, 2021, 14(21): 6943. ■
-
- (上接第 239 页)
- [7] 张涛, 段正康, 李晟, 等. 双氧水工作液中蒽醌的降解与再生 [J]. *化学研究与应用*, 2015, 27(10): 1427-1433.
- [8] 邱彬, 柴春玲, 明扬帆, 等. 蒽醌降解物再生剂的研究进展 [J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2024, 22(4): 1-6.
- [9] 石乃友, 赵润琪, 黄少玲, 等. 双氧水生产中蒽醌降解物再生催化剂的研究进展 [J]. *化工技术与开发*, 2025, 54(S1): 34-37, 72.
- [10] 刘春雪. 烷基蒽醌溶解度测定及其氢化反应本征动力学研究 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [11] Liu G Z, Cheng S Y, Wang L, *et al.* Measurement and correlation of solubility of 2-amylanthraquinone in TMB/TOP solutions [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2004, 55(4): 640-642.
- [12] 山东华鲁恒升化工股份有限公司. 一种工作液及其制备方法和在蒽醌法生产双氧水中的应用; CN 202210359435.X [P]. 2022-07-05.
- [13] 梁海瑞, 王滢, 刘国柱. 氢氧直接合成过氧化氢用催化剂的研究进展 [J]. *化工进展*, 2021, 40(4): 2060-2069.
- [14] 胡长诚. 国外过氧化氢制备工艺研究开发新进展 [J]. *化工进展*, 2003, (1): 29-33.
- [15] Zhang X, Cheng S, Chen C, *et al.* Keto-anthraquinone covalent organic framework for H₂O₂ photosynthesis with oxygen and alkaline water [J]. *Nat Commun*, 2024, 15(1): 2649.
- [16] Wang X Y, Shen W Q, Zhang C, *et al.* A chlorine-resistant self-doped nanocarbon catalyst for boosting hydrogen peroxide synthesis in seawater [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 64(7): e202419049.
- [17] Chen J, Ma Q, Zheng X, *et al.* Kinetically restrained oxygen reduction to hydrogen peroxide with nearly 100% selectivity [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 2028. ■