

# 降低苯酚装置含酚废水处理中苯系物含量的方法及市场应用前景分析

冯大利（中海壳牌石油化工有限公司，广东 惠州 516086）

**摘要：**苯系物作为高毒性、难降解的有机污染物，在苯酚生产及其他化工过程中广泛存在，对环境与公共健康构成严重威胁。本文针对苯酚装置含酚废水处理中苯系物含量高的问题，系统分析了其来源及成分特征，提出了活性碳床吸附、絮状物去除、聚结分离、纳米材料应用及构建人工湿地系统等综合治理方案。随着环保政策趋严和工业发展，含酚废水处理市场需求持续增长，该综合方案能显著提升苯系物去除率，提升企业竞争力，并展现出良好的市场应用前景。

**关键词：**苯酚装置；含酚废水处理；苯系物含量；市场应用前景

中图分类号：X703.1； X78 文献标识码：A 文章编号：1674-5167（2025）012-0010-03

## Methods for reducing the content of benzene derivatives in the treatment of phenol containing wastewater in phenol plants and analysis of their market application prospects

Feng Dali (CNOOC Shell Petrochemicals Co., Ltd., Huizhou Guangdong 516086, China)

**Abstract:** Benzene derivatives, as highly toxic and difficult to degrade organic pollutants, are widely present in phenol production and other chemical processes, posing a serious threat to the environment and public health. This article addresses the issue of high content of benzene derivatives in the treatment of phenol containing wastewater in a phenol plant. The sources and composition characteristics of these compounds are systematically analyzed, and a comprehensive treatment plan is proposed, including activated carbon bed adsorption, floc removal, coalescence separation, application of nanomaterials, and construction of an artificial wetland system. With the tightening of environmental policies and industrial development, the demand for phenol containing wastewater treatment in the market continues to grow. This comprehensive plan can significantly improve the removal rate of benzene derivatives, enhance the competitiveness of enterprises, and demonstrate good market application prospects.

**Keywords:** phenol plant; Phenol containing wastewater treatment; Content of benzene derivatives; Market application prospects

苯酚及其衍生物作为工业生产中广泛使用的化合物，因其在制药、树脂合成和农药工业等领域的重要性而备受关注，然而随着工业活动的增长，苯酚装置生产规模不断扩大，其排放的含酚废水量也日益增加。因此有效降低含酚废水中的苯系物含量，不仅是应对环境挑战的必然选择，也是实现可持续发展的关键步骤。本文旨在探讨降低苯酚装置含酚废水中苯系物含量的有效方法，并分析其市场应用前景，以此促进本行业的经济发展。

### 1 苯酚装置废水来源分析和处理方法

#### 1.1 含酚废水主要来源和运行状况

在异丙苯法生产苯酚工艺中，国内主要使用的两种工艺中，其中一种工艺的含酚废水共计有三股来源。第一股，是对原料异丙苯经空气氧化后产生的小分子有机酸进行 1.5% 的碱洗产生的废水；第二股，是对异丙苯的过氧化物加入 98% 浓硫酸分解产物进行 49℃下的水洗调整 pH 至 6.5，在水洗过程连续排放中会溶解约 1.5% 的苯酚以及其他分解产生的复杂化合

物；第三股，是使用 20% 碱液对提纯联产的丙酮产品脱去苯酚和醇醛类过程产生的废水，该股废水存在酚醛缩合的反应，导致废水中絮状物的产生。第一二股废水经过碱洗去酸在为避免系统腐蚀而带来严重的生产安全隐患。

在生产过程中，异丙苯既作为生产原料，又作为回收含酚废水中苯酚的萃取剂，在含酚量在 3000-5000ppm (49℃) 的废水高效率降至 30-75ppm，对维持下游生化处理稳定运行过程中起到关键作用，因此在该工艺过程中被广泛应用。但异丙苯本身属于苯系物之一，其在纯水中的溶解性一般小于 50ppm (25℃)，但在复杂的含酚废水环境，其溶解度会上升至 100-300ppm，甚至更高。异丙苯在水中不易降解，容易导致生化细菌不能适应，大面积死亡，生化处理不合格，装置运行可靠性降低，甚至引起对排放水域的污染。这三股废水收集到一起后，进行 2 次 pH 调整至 4.5，让苯酚由酚钠转变为苯酚，再使用在水中低溶解度的异丙苯溶剂进行萃取。萃取的温度、塔盘层数、油水比以及油相的分散

情况都是非常关键的因素。随着装置的运行，系统一些杂质逐步积累，含酚废水中的组分多环化合物越来越多，酚醛类絮状物逐步在萃取系统积累，一些焦油类的重组分也逐步堵塞在塔盘分布孔上，导致异丙苯未能充分与苯酚充分接触而直接进入到废水系统中，再者废水系统中的絮状物会吸附大量的异丙苯，随着萃取后的含酚废水的输送至下游生化处理。

## 1.2 含酚废水的处理方法

从废水来源看，降低异丙苯溶解度的关键是在优化前端生产工艺同时，加强后端含酚废水处理工艺的研究与开发，如采用蒸馏、吸附、高级氧化等方法，可以更高效地去除废水中的异丙苯，尽可能地降低因环境超标排放标准而带来的罚款或治理成本。从成本分析角度来看，苯酚装置废水中苯系物的来源所引发的环境风险和处理难度直接增加了处理成本，法规要求苯及其衍生物的排放必须达到一定标准，这就需要投入相应的处理技术和设备，异丙苯在水中升高的溶解度和生物的难降解性意味着去除它们通常需要更复杂的处理方法，比如高级氧化过程、活性炭吸附或膜分离技术，这些技术相比于传统生物处理方法成本更高。

## 1.3 废水样品采集与成分分析

确定采样点应在苯酚装置废水排放流程中所有可能含有异丙苯的节点上，包括生产过程后的初级处理出口、任何中间处理阶段和最终的排放口，设定的采样点需考虑污染物的稳定性以及混合后稀释的影响，采样时间应该选择在装置运行的不同阶段，比如启动、正常运行和停机阶段，以更全面地监测苯系物的排放情况，为了获得具有代表性的样品，应进行连续采样或对不同时间点进行复合采样。

成分分析涉及检测废水中异丙苯的浓度以及其他可能存在的苯系物，用于分离和测量苯系物的常见方法有气相色谱-质谱联用（GC-MS）和高效液相色谱（HPLC），但一般生产装置产生的苯系物组分比较固定，所以气相色谱（GC）方法更为应用广泛，直接进行分析读取。进行苯系物分析时必须对分析仪器进行校准，使用已知浓度的标准溶液来建立校准曲线，目的是确保所获得的浓度数据准确反映了样品中真实的异丙苯含量，需要注意的是由于异丙苯具有较强的疏水性和挥发性，在整个采集与分析过程中都应采取措施避免样品的挥发损失和交叉污染。

## 2 苯酚装置废水处理中降低苯系物含量的创新组合方案

### 2.1 活性碳床吸附

在苯酚装置废水处理的过程中，使用改性活性碳床结合来去除特定苯系物异丙苯，从而减少对下游生化的运行负荷。具体操作是将有较高含量异丙苯

（100–200ppm）的含酚废水通过改性活性碳床，大部分异丙苯被吸附在活性碳的表面。活性炭的装填量和吸附停留时间的影响，新的碳床会将异丙苯吸附至20–50ppm。但随着运行周期异丙苯吸附效果将逐步降低，可以通过定期蒸汽脱附再生，以恢复其吸附能力。再生后的效率会逐步降低，所以再生时注意以最小化活性碳表面结构的损伤，延长其使用寿命。

### 2.2 破乳、聚结、分离

当含酚废水萃取剂异丙苯出现乳化时，传统的分离方法无法处理。这是因为乳化液滴形成了稳定的分散体系，阻碍了油滴的聚并与沉降。一般情况，为了打破这种稳定性，采用改良型的絮凝剂来促进颗粒的聚结与沉降，在比重作用下上浮分离，但引入的絮凝剂不能成为现有系统的新污染源。可以利用pH值的调整和增加水相密度的方法，破乳和沉降分离。聚结器也能在乳化后起到很好的分离效果。其滤芯会将悬浮的油液小颗粒在亲油滤材下聚结成大油珠，在液体同性互亲作用下实现液液分离。聚结器的选型可以有专业的厂家根据所需求的流量、组成、乳化液粒径分布等信息计算后提供成熟选型的设备。旋液分离设备也可以用来加速乳化层的分离，随后经过沉降或者浮选过程，完成油水分离。但对于生产大处理量低含量要求的装置，存在较大的设备投资和运行维护成本。

### 2.3 汽提

汽提一般是让废水与水蒸气直接接触，确保废水中的挥发性有毒物质能够按照一定比例进行扩散，通过加热或者减压使得溶液中的一部分组分蒸发，然后再通过冷凝等手段从气相中去除轻组分的方法。在苯酚装置废水处理中，汽提可以应用在经过聚结处理后的阶段，将与苯系物结合形成的絮状物中的有机物进一步去除。具体操作是将废水让絮状物聚结沉降分离后，根据苯系物相对较高的蒸气压和挥发性，在控制的温度和压力条件下，将其转移到气相中，经过汽提的气体含有高浓度的苯系物，通过冷凝器冷凝后，收集凝结出的液体，从而实现苯系物的有效分离和回收。

### 2.4 气浮

气浮主要向含酚废水中曝入空气，从水中析出的微小气泡作为污染物载体，通常废水中乳化油等污染物质会粘附在气泡表面，慢慢随着气泡上浮，然后通过收集气泡的方式最终达到分离的效果。操作时利用特定的气体溶解系统，如电解产气或者使用纳米技术产生的微气泡，具有更强的负载能力和较高的上升速度，从而提高了气浮过程中絮凝物的去除效率，或者引入先进的在线水质监测设备和自动化控制系统可以实时监测苯系物的浓度、水流的pH值、温度等关键参数，并据此调整气浮系统的运行条件，如气泡大小、注气量和絮凝剂投加

量，增加处理效果的稳定性，并降低了对操作人员的依赖。该过程即为生化处理的好氧过程。

## 2.5 超滤膜

超滤膜主要在溶液中通过一种半透膜的方式，结合外部压力使溶剂和溶质中的小分子物质能够过滤到膜的另一侧，且溶质中的大分子物质和胶体由于无法通过滤膜孔洞而被拦截，能够在压力驱动下从水中分离出悬浮颗粒和大分子物质，当整合到絮凝过程后，超滤膜不仅能有效去除废水中的悬浮固体和部分胶体，还能进一步截留因絮凝形成的较小絮状物。

在苯酚装置含酚废水生化处理中先后通过调节 pH 进行水解酸化、排油出渣、厌氧生化、好氧生化、絮凝和超滤膜出水过程。每一步的过程除微生物的参与外，物理分离苯系物也非常重要。絮凝剂或者其他化学试剂将苯系物转化成更易于去除的絮状物，这些絮状物的存在通常会提高传统过滤技术的阻力，使得过滤变得困难，而超滤膜技术在这里的应用就显现出其优势，可以在低压差的条件下运行，有效拦截细小的絮状物，同时保持较高的水通量，此外超滤膜相比传统的过滤系统具有自清洁特性，即在操作过程中可通过反冲洗等方法来移除膜表面的堵塞物，维持膜的过滤效率，这一点在长期连续运行的工业应用中至关重要，因为它能大幅度减少膜更换频率，从而降低整体的维护成本。

## 2.6 人工湿地系统构建

考虑到苯酚装置产生的废水高含盐、高 COD 的特性，在越来越大规模化的炼化一体化项目中，对产生的工业废水集中收集，优化预处理，统一处理是最节能最高效的处理方式。在经过前期的生产装置预处理、生化处理等一系列过程后，可以考虑构建人工湿地系统进一步缓冲和处理来将其危害性降至 0。人工湿地系统需要选择合适的场址和设计合理的湿地结构，植物在人工湿地中起到关键作用，不仅提供根系供微生物附着，增加微生物群落的多样性，而且通过根系的分泌物质可以改善废水的质量，还能吸取部分污染物，常用的植物有芦苇、香蒲等，这些植物具有较强的耐污染性和生物量大、生长快的特点，床体材料通常选用的是砂、碎石或者泥炭，这些材料可以支撑植物生长，同时也为微生物提供了良好的附着表面，床体中的微生物群落是处理污染物的主要力量，通过吸附、分解等方式降解污染物，特别是对于苯酚等难降解有机物，生物降解是最主要的去除途径，针对苯系物的处理，人工湿地还需考虑其对苯酚类有毒物质的抗性，需要引入特定的微生物菌群或通过植物 - 微生物联合作用来提高清除效率。

## 3 市场应用前景分析

### 3.1 行业需求

随着环保法规日益严格，工业企业对苯酚废水处

理的需求不断增加。特别是在石油化工、制药、印染等行业，苯酚废水的处理成为刚需。例如，制药行业中，每生产 1 吨药品可能会产生数吨含有苯酚的废水，这些废水必须经过处理才能排放。

### 3.2 技术发展趋势

传统的物理化学方法虽然能有效去除苯酚，但存在能耗高、二次污染等问题。因此，高级氧化技术和生物技术受到更多关注。这些技术具有高效、环保的特点，是以后苯酚废水处理的发展的重要方向。

### 3.3 市场规模

据统计，全球苯酚废水处理市场规模预计在 2025 年达到数十亿美元，并以每年约 5% 的速度增长。这主要归因于环保法规的推动以及工业界对可持续发展的重视。

### 3.4 政策支持

各国政府纷纷出台严格的环保法规，对苯酚废水的排放提出了更高的标准。如欧盟的《水框架指令》和美国的《清洁水法》都明确规定了苯酚的排放限值。我国的《水污染防治行动计划》也对工业废水的处理和排放提出了严格要求。这些法规的实施为苯酚废水处理市场提供了广阔的发展空间。

### 3.5 竞争格局

目前，苯酚废水处理市场竞争激烈，主要参与者包括大型跨国公司和一些专注于环保技术的中小企业。这些企业通过不断创新和优化技术，争夺市场份额。同时，新型高级氧化技术和生物处理技术的应用为市场带来了新的机遇。随着新兴市场国家工业化进程的加快，特别是在石油化工、制药和印染等行业，对苯酚废水处理的需求不断增加。

综上所述，通过综合运用传统和高级处理技术，可以实现高效、经济的废水处理。降低苯酚装置含酚废水中苯系物含量不仅能满足环保法规的要求，还能减少对环境和人类健康的危害。随着环保法规的日益严格和工业界对可持续发展的重视，苯酚废水处理市场具有巨大的发展潜力。企业应抓住机遇，加强技术创新，提升市场竞争力，共同推动苯酚废水处理行业的发展。

### 参考文献：

- [1] 李其森. 气相色谱 - 质谱联用技术测定水中苯系物的研究 [J]. 产品可靠性报告, 2023,(09):97-100.
- [2] 王朝杰, 李倩. 气相色谱法同时检测室内空气中 TVOC 和苯系物的研究与探索 [J]. 广州化工, 2023,51(14):114-116.

### 作者简介：

冯大利 (1981- )，男，湖北宜昌人，大学本科，初级职称，研究方向：化工生产。