

工业园区污水集中处理挑战及精细化管理技术研究

赵倩

济南市生态环境保护综合行政执法支队济阳大队

摘要: 随着工业化进程的加快,工业园区污水排放量不断增加,污水中含有高浓度的有机物、氮磷及多种难降解污染物,给环境保护和资源回用带来了严峻挑战。传统的集中污水处理工艺在应对复杂水质和高污染负荷方面存在诸多局限性,难以满足日益严格的环保标准和可持续发展的需求。本文针对工业园区污水集中处理过程中存在的问题,深入分析了污水水质特征及现有处理模式的不足,提出了采用泥膜复合工艺与纯生物膜 3D-RBC 工艺相结合的综合处理方案,并引入精细化管理技术以提升系统运行效率和处理效果。通过对某东部沿海工业园区的工程应用案例分析,验证了所提工艺组合的高效污染物去除能力和良好的运行稳定性。

关键词: 工业园区污水处理;泥膜复合工艺;3D-RBC 工艺;精细化管理

随着工业化进程的加快,工业园区的污水排放量逐年增加,且污水中含有复杂多样的有机和无机污染物,给环境保护和公共健康带来了严峻挑战。传统的污水处理方法在应对高浓度、有毒有害物质方面表现出一定的局限性,难以满足日益严格的环保标准和资源利用需求。因此,研究高效、稳定的集中污水处理工艺以及相应的精细化管理技术具有重要意义。本文旨在通过对工业园区污水集中处理现状的分析,结合最新的泥膜复合工艺和 3D-RBC 工艺,提出一套完善的精细化管理技术路线,以提升污水处理效率,实现资源的最大化利用,促进工业园区的可持续发展。

1 工业园区污水集中处理现状及问题分析

1.1 工业园区污水水质特征

工业园区污水的水质特征复杂多样,主要取决于园区内企业的类型和生产工艺。一般而言,工业污水中含有高

浓度的化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)、总氮(TN)和总磷(TP)等污染物^[1]。

1.2 现有集中处理模式及其局限性

当前,工业园区污水的集中处理主要采用生化处理工艺,包括活性污泥法(如 A²/O 工艺)、生物膜法(如 MBR、RBC 工艺)等。这些工艺在去除有机污染物和氮磷方面取得了一定成效。然而,集中处理模式存在诸多局限性。

1.3 精细化管理的提出与必要性

在工业园区污水集中处理过程中,精细化管理的提出是应对复杂污水水质和日益严格环保要求的必然选择。精细化管理指的是通过科学的管理手段和先进的技术手段,对污水处理的各个环节进行细致入微的监控和优化,以实现高效、稳定的处理效果。

2 泥膜复合工艺研究

2.1 泥膜复合工艺原理与结构特征

泥膜复合工艺是一种结合悬浮活

性污泥法与生物膜法的污水处理技术,旨在发挥两种微生物生长方式的优势,提升污染物的降解效率。其结构特征包括一个主要的反应器,内设有悬浮污泥区和挂膜填料区^[2]。悬浮污泥区中,絮体状活性污泥在水中悬浮,主要负责有机物的吸附和降解;挂膜填料区则提供大量表面积,支持生物膜的形成和生长,增强微生物的降解能力。通过曝气与搅拌装置,保证水体与微生物的充分接触,提供充足的溶解氧,促进有机物的好氧分解。

2.2 污染物降解过程及动力学机制

在泥膜复合工艺中,污染物的降解过程主要分为吸附、水解/酸化、好氧氧化及硝化/反硝化等阶段。污水中的有机污染物通过物理吸附被悬浮污泥和生物膜表面迅速吸附。随后,大分子有机物在水解菌和酸化菌的作用下被分解成小分子有机酸、氨氮等中间产物。在好氧氧化阶段,好氧微生物利用溶解氧将有机物进一步分解为二氧化碳和水,

同时将氨氮氧化为硝酸盐。硝化菌将硝酸盐转化为亚硝酸盐，再由反硝化菌在缺氧条件下将其还原为氮气，最终实现总氮的去除^[3]。整个过程的动力学机制涉及微生物的生长、代谢以及污染物的转化反应，泥膜复合工艺通过优化这些过程，提升污染物的降解效率和系统的整体性能，如图1所示。

2.3 工艺优化与关键运行参数

泥膜复合工艺的优化主要围绕提高处理效率、降低能耗和稳定系统运行展开。关键运行参数包括污泥浓度、曝气量、泥龄、回流比和温度等。适当提高污泥浓度和泥龄可以增加微生物群体的数量和活性，提升有机物的降解能力。曝气量的优化是确保溶解氧充足，满足好氧微生物的代谢需求，同时避免能源的浪费。回流比的调整有助于维持系统内部的固液平衡，防止污泥沉淀过快或过慢。

3 纯生物膜 3D-RBC 工艺研究

3.1 3D-RBC 工艺原理与设计思路

3D-RBC (Three-Dimensional Rotating Biological Contactor) 工艺是一种先进的生物膜处理技术，通过三维结构的旋转生物接触器，提供高效的微生物生长环境和污染物降解条件。其原理基于在旋转填料表面形成稳定的生物膜，利用机械旋转将生物膜周期性地暴露于污水和空气中，实现有机物的连续好氧降解。设计思路，3D-RBC 工艺注重填料的三维结构设计，通常采用立体网状、蜂窝状或多孔材料，以大幅度增加填料的比表面积，提供更多的微生物附着位点，提升生物膜的负载量。旋转速度的控制至关重要，既要保证填料的适当浸没时间，确保有机物的有效接触和传质，又要避免因旋转过快而导致的生物膜剥离和能耗增加^[4]。

3.2 工艺流程示意与实物装置

3D-RBC 工艺的流程图主要包括预处理、3D-RBC 主体反应器、沉淀

区及出水处理等几个关键环节。预处理阶段通过格栅和沉砂池去除污水中的大颗粒悬浮物和沙砾，防止堵塞反应器内的填料。主体反应器部分，旋转生物接触转盘由电动机驱动缓慢旋转，填料表面形成生物膜，在转盘的浸没和暴露过程中实现有机物的好氧降解。沉淀区则用于分离脱落的生物膜碎屑和悬浮固体，确保出水清澈。实物装置如图2所示，3D-RBC 反应器通常呈圆筒状或方形槽体，内部布置有多个并列的转盘轴，填料材料采用高比表面积的多孔介质。装置外部配备进水管、出水管、曝气系统及在线

监测仪表，辅助设备包括电控柜和维护平台，便于系统的运行控制和日常维护。整个装置设计紧凑，结构合理，适用于工业园区大规模污水处理需求。

3.3 处理效果与影响因素分析

3D-RBC 工艺在实际应用中表现出优异的处理效果，主要体现在高效去除有机污染物和氮磷的能力上。通过优化生物膜的生长环境和提升传质效率，3D-RBC 能够实现 COD 去除率达到 90% 以上，总氮和总磷的去除率亦可达到较高水平。此外，3D-RBC 工艺具有较低的能耗和操作成本，相较于传统的活性污泥法和其他生物膜法，能源

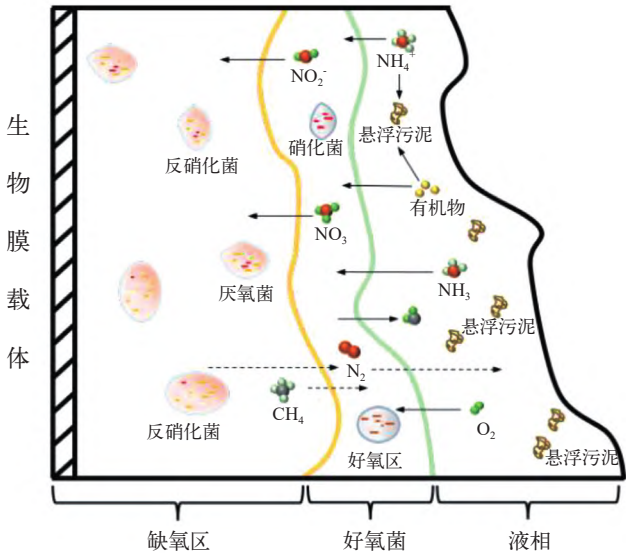


图1 泥膜复合工艺结构及污染物降解过程

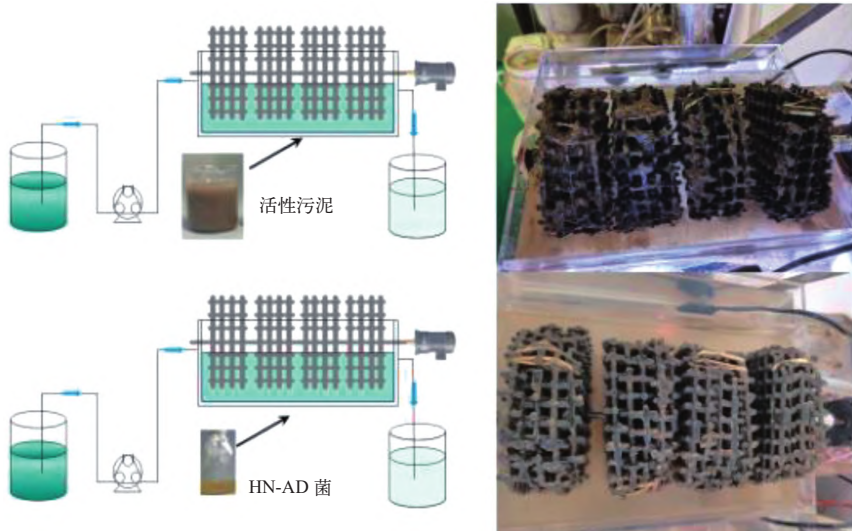


图2 工艺流程示意图和实物装置图

利用更为高效,污泥产量较低,减少了后续污泥处理的压力。影响 3D-RBC 处理效果的因素主要包括填料的选择与配置、转盘的旋转速度、污泥负荷和运行温度等。填料材料和结构决定了生物膜的附着能力和传质效率,适宜的旋转速度能够确保生物膜的稳定性和充分的曝气条件。污泥负荷过高可能导致生物膜过度生长或剥离,而过低则可能影响降解效率。运行温度对微生物活性有直接影响,适宜的温度范围能够维持高效的降解过程。通过科学调控这些因素,3D-RBC 工艺能够在不同污水条件下保持稳定高效的处理性能,为工业园区污水集中处理提供可靠的技术支持^[5]。

4 精细化管理技术与整体技术路线

4.1 工业园区污水处理精细化管理框架

工业园区污水处理的精细化管理框架包括污染源管理、过程控制、数据监测与分析、优化调度与运行决策等关键组成部分。污染源管理是通过园区内各企业的污水排放进行分类管理,实施分级预处理和定制化处理措施,减少高浓度或特殊污染物对集中处理系统的冲击。过程控制环节涉及对污水处理各阶段的工艺参数进行精准调控,如曝气量、泥龄、回流比等,以适应不同水质条件下的处理需求。数据监测与分析是精细化管理的核心,通过部署在线监测仪器,实时获取 COD、BOD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、溶解氧等关键指标数据,并利用大数据分析技术对数据进行深入挖掘和趋势预测。优化调度与运行决策则基于数据分析结果,动态调整工艺参数和运行策略,实现资源的高效配置和系统的最优运行。

4.2 核心控制点与在线监测系统

在工业园区污水集中处理的精细化管理中,核心控制点的确定与在线监测系统的建设是实现高效管理的关键。核心控制点主要包括进水水质参数(如

COD、BOD、氨氮和总磷等)、处理工艺参数(如曝气量、泥龄、回流比等)以及环境因素(如温度、pH 值等)。这些参数的实时监测和控制能够确保污水处理系统在最佳运行状态下运行,及时响应水质变化,防止污染物超标排放。在线监测系统则通过布设多种传感器和监测仪器,持续采集关键参数数据,并将数据传输至中央控制平台。该系统通常集成自动化控制技术,能够实时显示各项指标的状态,并通过预警机制在异常情况下发出警报。

4.3 自动化运行与智慧管控平台

自动化运行与智慧管控平台是实现工业园区污水处理精细化管理的重要支撑工具。该平台集成了自动化控制系统、数据采集系统和智能分析系统,通过统一的管理界面,实现对污水处理全过程的实时监控和智能调控。自动化运行主要包括对曝气设备、泵站、阀门等关键设施的自动化控制,根据在线监测数据和预设的运行策略,自动调节工艺参数,确保系统在最佳状态下运行。智慧管控平台则基于物联网、大数据和人工智能技术,对采集到的海量数据进行实时分析和处理,提供决策支持和优化建议。平台功能包括实时监控、故障诊断、预测性维护、能耗优化和运行报告生成等。

4.4 工艺耦合与多维度协同管理

工艺耦合与多维度协同管理是提升工业园区污水处理精细化管理水平的重要策略。工艺耦合指的是将不同的污水处理工艺有机结合,形成优势互补,实现污染物的全面去除和资源最大化利用。例如,将泥膜复合工艺与 3D-RBC 工艺相结合,可以充分发挥悬浮污泥和生物膜的协同作用,提升有机物和氮磷的去除效率。多维度协同管理涉及对污水处理系统的各个方面进行综合协调,包括工艺流程、设备运行、能耗管理、污泥处理和资源回用等。通过跨部门、跨领域的协同,

优化系统整体性能,避免各工艺单元的局部优化带来的系统不稳定。具体实施中,可以采用集成化的管理平台,整合不同工艺单元的数据和控制策略,统一调度和优化运行。

5 工程应用与案例分析

5.1 工业园区案例概况

某工业园区位于东部沿海地区,涵盖化工、电子、机械制造等多个行业,污水排放量年均达到 1.5 万 t。园区内企业排放的污水水质复杂,COD 浓度高达 800 mg/L,氨氮浓度约为 50 mg/L,总磷约为 10 mg/L,部分企业还排放含有重金属和有机溶剂的污水。为应对日益严峻的环保压力 and 提升资源回用率,园区决定实施集中污水处理项目,采用泥膜复合工艺与 3D-RBC 工艺相结合的处理方案,并引入精细化管理技术。该项目包括总投资 5 000 万元,设计处理规模为每日 1 万 t 污水。工程建设于 2024 年初启动,经过 1 年多的建设与调试,现已全面投入运行。项目的实施不仅显著提升了污水处理能力,实现了 COD 去除率达 95%、氨氮去除率 90%、总磷去除率 85%,而且通过资源回用系统,实现了部分处理水的循环利用,显著降低了园区的用水需求和污泥处理成本。该案例为其他类似工业园区污水处理提供了宝贵的经验和参考,展示了先进工艺与精细化管理相结合的巨大潜力和应用价值。

图 3 展示了园区公用工程站各关键设备的能耗分布情况,直观反映了不同设备在整个污水处理过程中的能源消耗比例。通过对能耗数据的分析,可以识别出高能耗环节,进一步制定节能减排措施,以提升系统的整体能源利用效率。以上内容详细解析了园区各组成部分及其功能,帮助读者全面理解公用工程站在工业园区污水集中处理系统中的能源消耗情况和优化策略。如需进一步细化或补充具体数据和案例,可根据实

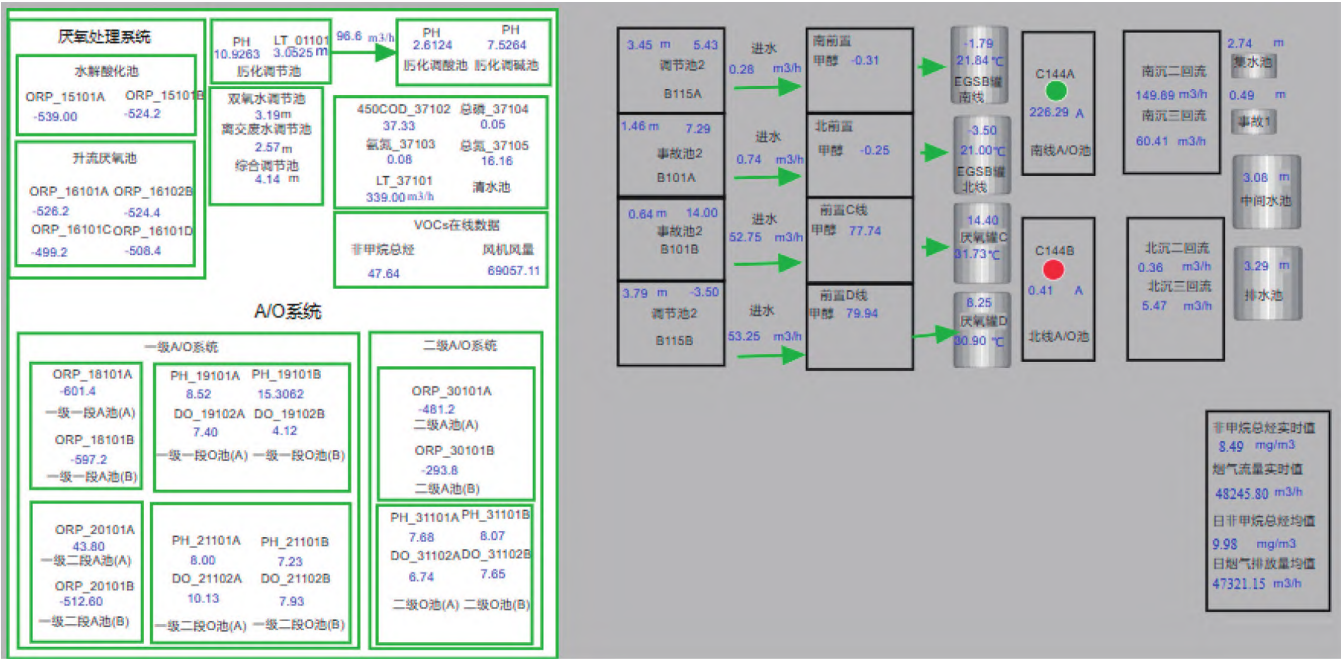


图3 园区公用工程站能耗分布分析图

际工程情况进行调整和完善。

5.2 工程实施方案与运行结果

该工业园区污水集中处理工程的实施方案主要包括污水预处理、泥膜复合工艺、3D-RBC工艺、沉淀与固液分离及深度处理等环节。预处理阶段通过格栅和沉砂池去除大颗粒悬浮物和沙砾，确保后续工艺的稳定运行。泥膜复合工艺部分负责主要有机物和氮的去除，通过悬浮污泥和生物膜的协同作用，实现高效的污染物降解。3D-RBC工艺则进一步提升有机物和氮磷的去除效果，确保出水水质达标。沉淀区用于分离脱落的生物膜碎屑和悬浮固体，出水经过深度处理，如活性炭吸附和紫外消毒，最终达到排放或回用标准。运行结果显示，整体系统实现了高效的污染物去除，COD去除率达95%以上，氨氮去除率90%，总磷去除率85%，出水水质稳定符合国家排放标准。通过精细化管理技术的应用，系统运行稳定性和自动化程度显著提升，设备故障率降低，运行成本减少约20%。

该工业园区公用工程站的整体结构及其关键设备布局如图4、图5所示。公用工程站作为园区污水集中处理系统

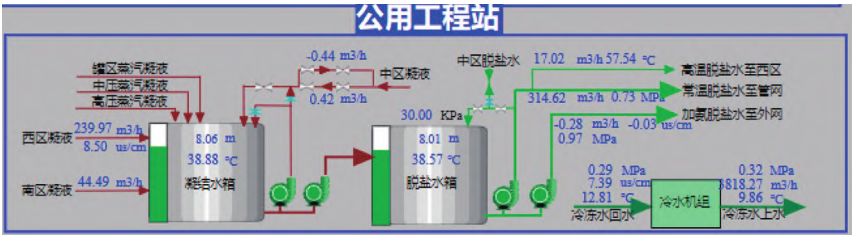


图4 园区公用工程站

的核心枢纽，承担着污水的接收、初步处理、调节与分配等多重任务，确保整个处理系统的高效运转。通过各功能区的合理布局与协同工作，实现了对复杂工业园区污水的高效集中处理。污水在接收区经过初步筛选和沉降后，进入调节池进行流量和浓度的均衡。生化处理单元通过泥膜复合工艺与3D-RBC工艺的结合，大幅提升了有机物和氮磷的去除效率。污泥处理区则有效降低了污泥产量，并通过稳定化和脱水处理减少了污泥处置的环境压力。深度处理与出水区确保了出水水质的优良，满足了排放和回用的多重需求。控制与监测系统的智能化管理进一步保障了整个工程站的稳定、高效运行。通过图4可以清晰地看到园区公用工程站在污水集中处理系统中的关键作用及其各组成部分的协同机制。这为工业园区的污水治理提供

了一个高效、可靠的技术框架，具备良好的推广应用前景。

5.3 经济与环境效益评估

该污水集中处理项目在经济和环境方面均取得了显著效益。经济效益方面，项目总投资5000万元，预计年处理成本约3000万元，主要包括能源消耗、化学药剂、设备维护和人力成本等。通过实施精细化管理和优化工艺运行，项目降低了20%的运营成本，即年节约成本约600万元。此外，污水的部分回用减少了园区的水资源消耗，节约用水成本，每年节约节约用水费用200万元。污泥产量的降低和资源化利用减少了污泥处理费用，进一步节约成本。

6 结语

本文系统研究了工业园区污水集中处理过程中面临的问题，并通过泥膜

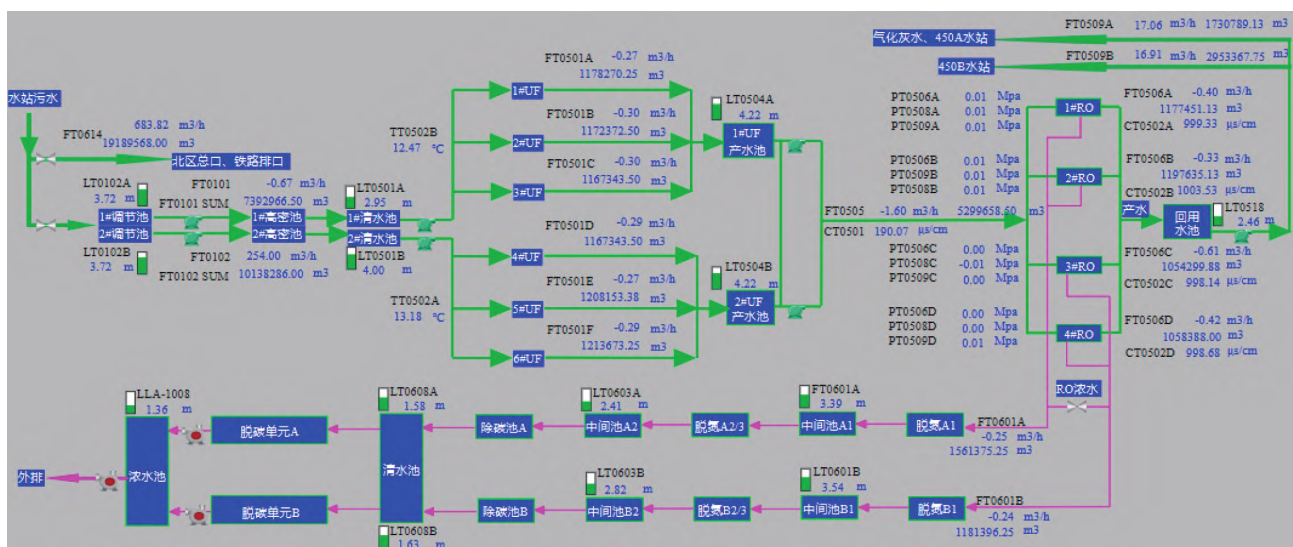


图5 园区公用工程站关键设备布局分析图

复合工艺与纯生物膜3D-RBC工艺的有机结合,提出了一套高效、稳定的综合处理方案。通过对实际工程案例的分析,验证了该方案在提升污染物去除效率、降低运行成本和实现资源回用方面的显著优势。精细化管理技术的引入,进一步优化了系统运行参数,实现了污水处理过程的智能化和自动化,提升了整体管理水平和运行稳定性。研究表明,泥膜复合工艺与3D-RBC工艺的结合能够有效应对工业园区污水水质复杂、多变

的特点,实现对有机物、氮磷等主要污染物的高效去除。精细化管理技术的应用不仅提高了处理系统的运行效率,还实现了能源和资源的节约,具有良好的经济效益和环境效益。

参考文献:

- [1] 谯兴芳,徐林. 环保工程中污水处理工艺技术研究[J]. 石化技术, 2024, 31 (10): 286-287+274.
- [2] 沈伟晨. 工业污水集中处理排放信

息披露问题研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021.

- [3] 吴南宏. 工业污水集中处理技术分析[J]. 资源节约与环保, 2020(08): 84+92.
- [4] 覃文辉. 工业污水集中处理技术分析[J]. 化工管理, 2020(23): 48-49.
- [5] 李根锋,徐军,吴楠. 化工园区污水集中处理管理模式的优化[J]. 工业用水与废水, 2014, 45 (05): 39-41+61.

走进标杆

工业纪实类视频节目《走进标杆》

深入解读制造业领域的技术和管理创新

机械工业信息研究院

流程工业

PharmaTEC 制药业

2025年我们将走进:

- 科技型企业
- 数字化和智能化企业
- 传统能源企业转型

- 新能源和可再生能源企业
- 技术装备制造企业
- 绿色化工和材料企业

广告