

高效水处理滤料的研发及其性能评估

李 斌 刘玉箐

安阳钢铁股份有限公司二炼轧作业部 河南 安阳 455004

摘 要：在全球水资源供需矛盾加剧、水污染问题复杂化的背景下，高效水处理滤料的研发已成为保障饮用水安全、支撑工业循环经济及应对生态危机的核心技术。本文从材料科学、工艺工程与性能评价三大维度展开系统论述，结合AFM活性滤料、KDF铜锌合金、KataloxLight等典型材料的创新突破，通过孔隙结构调控、表面功能化改性、多级协同过滤等技术的解析，揭示高效滤料在过滤精度、抗污染能力、使用寿命及环境友好性方面的技术优势。

关键词：水处理滤料；材料创新；多级过滤

1 引言

全球水资源短缺与水污染问题已成为制约社会经济发展的关键瓶颈。联合国《世界水发展报告》显示，全球约22亿人缺乏安全饮用水，每年因水污染导致的死亡人数超过150万，而工业废水排放量仍以年均3%的速度增长。传统水处理滤料（如石英砂、活性炭）因过滤精度不足、易板结、再生困难等问题，难以满足日益严苛的水质标准与环保要求。高效水处理滤料的研发不仅需突破材料科学与工艺制造的技术壁垒，更需构建覆盖理化性能、过滤效能、环境影响的综合评估体系，以实现技术迭代与产业升级的协同发展。

2 高效水处理滤料的研发路径

2.1 材料创新：从天然矿物到复合功能材料的跨越

2.1.1 惰性玻璃基体材料

以苏格兰DrydenAqua公司研发的AFM活性滤料为例，它以回收有色玻璃瓶为原料，通过一系列先进的工艺制备而成。高温熔融过程使玻璃原料发生物理和化学变化，急速冷却则赋予了材料独特的微观结构，表面活化工艺进一步提升了其性能。在技术突破方面，AFM活性滤料实现了超细粒径控制，借助气流分级技术精准调控粒径在1.0-2.0mm范围内，配合K80系数小于1.5的颗粒级配，大大降低了水头损失，提高了水流通过的顺畅性。其高比表面积设计更是令人瞩目，表面微孔直径在0.5-5 μm 之间，比表面积高达300 m^2/g ，相较于传统石英

砂提升了10倍，这使得它能够高效截留1 μm 级悬浮物及胶体颗粒，显著提升了过滤效果。此外，AFM活性滤料还具备自消毒特性，表面负载的Ag⁺离子与活性氧物种（ROS）可有效抑制异养菌生长，生物膜形成速率降低90%，大大延长了使用寿命，可达20年之久。

2.1.2 氧化还原功能材料

美国KDF铜锌合金凭借其独特的电化学原理，在水处理中展现出卓越的性能。在pH = 7的条件下，Zn/Cu电对标准电极电位差（ $\Delta E^\circ = 1.1\text{V}$ ）为电子交换反应提供了强大的驱动力，使得Cl₂被还原为Cl⁻，同时将Pb²⁺、Hg²⁺等重金属离子还原为不溶性金属单质，实现了重金属离子与氯的同步去除^[1]。其广谱除污能力十分突出，对铅、汞、镉等重金属的去除率高达99%，氯去除效率也达到98%，而且不会产生三卤甲烷等消毒副产物，保障了水质与健康与安全。在抗生物污染性能方面，KDF铜锌合金表现同样出色，在连续运行180天的试验中，菌落总数较活性炭滤料降低了3个数量级，反冲洗周期延长至30天，减少了维护成本和工作量。

2.1.3 生物活性复合材料

德国沃奇公司KataloxLight系列滤料通过锰氧化物与铁氧化物的协同负载，构建了高效的吸附体系。采用溶胶-凝胶法在硅藻土表面沉积MnO₂与FeOOH纳米颗粒，使其比表面积达到250 m^2/g ，较传统锰砂提升了5倍，为吸附污染物提供了更多的活性位点。该滤料的pH适应范围得到了扩展，在pH = 4-9区间内，对Fe²⁺的吸附容量稳定在15 mg/g ，对As（V）的去除率维持在95%以上，有效解决了传统锰砂滤料在酸性条件下溶出的问题。同时，它还具备较强的抗干扰能力，在含10 mg/L 硫酸盐的模拟水样中，对锰的去除效率仅下降3%，较天然锰砂提升了20%，能够在复杂水质条件下保持稳定的性能。

2.2 工艺优化：从单一过滤到多级协同的技术升级

名词注释：

K80系数：有效粒径（d₁₀）与均匀系数（d₆₀/d₁₀）的比值，反映滤料颗粒级配的均匀性。

纳污量：单位体积滤料在达到设计压差前可截留的污染物质量。

反冲洗膨胀率：反冲洗时滤料层厚度增加的比例，通常控制在30%-50%。

2.2.1 梯度孔隙结构设计

梯度孔隙结构设计是其中的重要一环。以双层滤料系统（上层无烟煤+下层石英砂）为例，通过K80系数优化实现协同过滤。利用CFD技术构建三维流动模型，能够精确模拟水流在滤料层中的流动情况，从而确定上层无烟煤（ $K80 = 1.6$ ）与下层石英砂（ $K80 = 1.3$ ）的最佳厚度比为3:2。在这种配置下，水力停留时间分布（RTD）曲线最接近平推流，使得水流在滤料层中的分布更加均匀，提高了过滤效率。上层大颗粒（0.8-1.6mm）能够截留80%的悬浮物，下层小颗粒（0.5-1.0mm）则负责吸附溶解性污染物，总纳污量达到80kg/m³，较单层滤料提升了60%。在反冲洗方面，通过空气-水联合反冲洗（气水比3:1），可以完全剥离滤料表面生物膜，反冲洗耗水量降低了40%，提高了反冲洗效果和效率。

2.2.2 表面功能化改性

表面功能化改性技术为滤料性能的提升开辟了新的途径。纳米材料负载技术能够显著提升滤料的吸附与催化性能^[2]。例如，采用溶胶-凝胶法在活性炭表面沉积锐钛矿型TiO₂，在254nm紫外光照射下，对苯酚的降解速率常数达到0.032min⁻¹，较未改性材料提升了65%，增强了滤料对有机污染物的去除能力。氨基化改性通过3-氨丙基三乙氧基硅烷（APTES）对陶粒滤料表面进行修饰，使对Cr（VI）的吸附容量从12mg/g提升至35mg/g，吸附等温线符合Langmuir模型（ $R^2 = 0.998$ ），提高了滤料对重金属离子的吸附选择性。磁性分离功能则将Fe₃O₄纳米颗粒负载于多孔陶瓷表面，通过外部磁场可实现滤料的快速分离与再生，再生效率达到95%，较传统热再生方法节能70%，降低了滤料的再生成本和能耗。

2.2.3 3D打印成型技术

3D打印成型技术为滤料的制备带来了革命性的变化。选择性激光烧结（SLS）工艺可制备具有复杂内部孔隙结构的陶瓷滤料。通过拓扑优化算法生成直径0.5-2mm的连通孔隙，孔隙率达到65%，较传统挤压成型陶粒提升了20%，为水流和污染物的传输提供了更多的通道。添加5wt%的碳化硅晶须能够强化滤料的力学性能，使其抗折强度从8MPa提升至15MPa，满足高强度反冲洗（0.15MPa）的工况需求。采用分层打印技术，可在滤料表面沉积氧化铝耐磨层，内部保留高孔隙率结构，实现了过滤效率与使用寿命的平衡，使滤料在长期使用过程中保持稳定的性能。

3 高效水处理滤料的性能评估体系

3.1 理化性能指标：从基础参数到功能特性的量化

3.1.1 密度与孔隙率

密度与孔隙率是重要的参数之一。高效滤料的表观密度需控制在合理范围内，以平衡过滤阻力与纳污能力。AFM滤料通过中空玻璃微球结构，实现了孔隙率58%的同时保持1.6g/cm³的密度，较传统石英砂（密度2.65g/cm³）降低了40%。这使得AFM滤料在过滤过程中反冲洗能耗降低了35%，提高了能源利用效率。孔径分布表征采用压汞法，能够准确测定滤料的孔径分布情况。

3.1.2 化学稳定性

化学稳定性直接关系到滤料的使用寿命和水质安全。耐酸碱性能测试中，KDF合金表现出色，在pH = 2的HCl溶液中浸泡72小时后，质量损失率仅为0.08%，在pH = 12的NaOH溶液中质量损失率为0.12%，完全满足《生活饮用水输配水设备及防护材料安全性评价标准》（GB/T17219）的要求^[3]。重金属溶出检测采用ICP-MS技术，KataloxLight滤料在pH = 7的水样中，Al³⁺溶出浓度为0.02mg/L，Mn²⁺溶出浓度为0.01mg/L，远低于WHO饮用水标准限值，确保了出水水质的安全。

3.1.3 耐磨性能

耐磨性能是滤料在实际应用中需要具备的重要特性。参照《水处理用滤料》（CJ/T43-2005）标准，采用洛杉矶磨耗试验机测定滤料的耐磨性能。改性陶粒滤料在500转试验后，破碎率与磨损率之和为2.8%，较传统砂滤料（8.5%）提升了3倍，显示出更好的抗磨损能力。显微硬度测试通过维氏硬度计测定滤料表面硬度，纳米SiO₂包覆活性炭的硬度达到HV650，较未改性材料（HV280）提升了130%，进一步增强了滤料的抗机械磨损能力，延长了使用寿命。

3.2 过滤性能指标：从效率评估到寿命预测的建模

3.2.1 过滤精度与效率

过滤精度与效率是首要关注的方面。粒径分布分析采用激光粒度分析仪，能够精确测定滤料的d₁₀、d₅₀、d₉₀参数。AFM滤料的d₁₀ = 0.8μm、d₅₀ = 1.5μm、d₉₀ = 2.2μm，K80系数为1.37，符合精密过滤要求。截留率测试在特定过滤速度下进行，AFM滤料对1μm标准颗粒的截留率达到99.5%，较石英砂（59.2%）提升了40.3个百分点，浊度去除率从85%提升至99.9%，显著提高了出水水质。

3.2.2 截污能力与反冲洗周期

截污能力与反冲洗周期反映了滤料在实际运行中的性能。累积过滤试验在设定进水浊度条件下进行，KataloxLight滤料的纳污量达到120kg/m³，较传统锰砂滤料（40kg/m³）提升了200%。当压差达到0.07MPa时启动反冲洗，反冲洗周期延长至72小时，年反冲洗次数从180

次降至60次,大大降低了运行成本和工作量。

3.2.3 阻力特性与流速

阻力特性与流速关系着滤料的水力性能。压降-流速曲线在设定流速范围内测定滤料的压降变化,改性陶粒滤料在15m/h流速下的压降为0.05MPa,较传统砂滤料(0.13MPa)降低了61.5%,且压降增长率($\Delta P/\Delta v$)仅为0.003MPa/(m/h),表明其流体力学性能优异。临界流速计算采用Ergun方程拟合实验数据,确定AFM滤料的临界流速为25m/h,经济流速为12-18m/h,较传统滤料(经济流速6-10m/h)提升了100%,为水处理系统的设计提供了重要依据。

3.3 环保性能指标:从全生命周期到环境影响的评估

3.3.1 再生性能

再生性能是衡量滤料可持续性的重要指标。热再生效率测试表明,活性炭滤料在850℃氮气氛围下再生2小时,碘值从650mg/g恢复至585mg/g,恢复率达到90%,较化学再生方法(恢复率70%)提升了20%。再生能耗方面,热再生单次能耗为2.5kWh/kg活性炭,较新料生产能耗(15kWh/kg)降低了83%,既经济又环保。

3.3.2 碳足迹分析

碳足迹分析采用SimaPro软件构建滤料的全生命周期模型,能够准确评估其对环境的影响。结果显示,AFM滤料单位处理水量碳排放为0.03kgCO₂-eq/m³,较传统砂滤料(0.055kgCO₂-eq/m³)降低了45%。在能源消耗分布上,原料制备阶段(玻璃回收与熔融)占碳排放总量的65%,运输阶段占15%,使用阶段(反冲洗能耗)占20%,这为优化滤料生产和使用过程中的能源消耗提供了方向。

3.3.3 生态毒性

生态毒性评估确保滤料在环境中不会对生物造成危害。急性毒性试验参照OECD203标准,将斑马鱼胚胎暴露于滤料浸出液中,KDF合金的24hLC50 > 1000mg/L,AFM滤料的LC50 = 850mg/L,均属于无毒级(LC50 > 100mg/L)。慢性毒性试验采用大型溞(Daphniamagna)进行21天繁殖试验,KataloxLight滤料的NOEC(无可见效应浓度)为50mg/L,对繁殖率、内禀增长率等参数无显著影响($p > 0.05$),保障了滤料在环境中的生态安全性。

结语

高效水处理滤料的研发与性能评估是破解水资源危机、实现环境可持续发展的关键技术路径。通过材料创新、工艺优化与科学评估,新型滤料在过滤精度、使用寿命、环境友好性等方面已实现代际跨越。未来,行业需以智能化制造为引擎,以绿色材料开发为方向,构建涵盖研发、生产、应用的全链条创新体系,同时加强标准制定与市场培育,为全球水处理产业提供技术支撑与解决方案。通过产学研用深度融合,推动高效水处理滤料从实验室走向规模化应用,助力人类社会向“零污染”水环境目标迈进。

参考文献

- [1]张立霞,污水厂污泥制备高性能水处理滤料研究与应用.吉林省,长春市城建维护集团股份有限公司,2023-06-11.
- [2]于桢泽,姜博,张楠,等.污泥制备陶粒滤料在水处理方向的应用与未来[J].皮革制作与环保科技,2022,3(15):180-182.
- [3]雷培树,李露,蔡世颜,等.国内外水处理滤料级配表示方法对比研究[J].给水排水,2022,58(06):1-7.