

离子交换树脂产业发展现状及最新研究进展

孟 坤^{1,2*}, 周远建^{1,2}, 陈敏剑^{1,2}, 王建东^{1,2}, 彭章华³

(1. 中蓝晨光化工研究设计院有限公司, 四川 成都 610041; 2. 中蓝晨光成都检测技术有限公司, 四川 成都 610041; 3. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 简要综述了离子交换树脂当前的产业发展状况和最新研究进展, 包括新树脂合成、废树脂处理、以及离子交换树脂在工业水处理、生物医药、湿法冶金、核工业和电子领域的应用, 并对未来的产业发展方向提出了展望。

关键词: 离子交换树脂; 工业水处理; 循环再生; 核工业

中图分类号: TQ425.23

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)07-0067-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.07.013

The current development status and latest research progress of the ion exchange resin industry

MENG Kun^{1,2*}, ZHOU Yuan-jian^{1,2}, CHEN Min-jian^{1,2}, WANG Jian-dong^{1,2}, PENG Zhang-hua³

(1. China Bluestar Chengrand Co., Ltd., Chengdu 610041, China;

2. China Bluestar Chengrand (Chengdu) Testing Technology Co., Ltd., Chengdu 610041, China;

3. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: This article briefly reviews the current industrial development status and the latest research progress of ion exchange resins. It includes the synthesis of new resins, the treatment of waste resins, and the applications of ion exchange resins in industrial water treatment, biomedicine, hydrometallurgy, nuclear industry, and electronics. And then it puts forward prospects for the future industrial development direction.

Key words: ion exchange resin; industrial water treatment; cyclic regeneration; nuclear industry

离子交换树脂作为一种具有分离和提纯功能的高分子材料,自20世纪40年代问世以来,广泛应用于工业水处理、食品及饮用水、生物医药、石油化工、环境保护、湿法冶金和核工业等领域,几乎涉及到联合国可持续发展目标(SDGs)的各个核心内容。因此,了解离子交换树脂当前在各个领域应用的研究进展,有助于各科研单位开展离子交换树脂的研究工作。本文中整理了近3年离子交换树脂国内外的研究进展,展示了离子交换树脂材料在各个领域的应用创新。

1 离子交换树脂产业发展现状

中国的离子交换树脂材料的研究起步于20世纪50年代,在其后的产业化进程中,主要应用于普通工业水处理领域,经过长期发展,国内大多数树脂生产企业已经掌握了技术含量较低的普通工业水处理离子交换树脂生产技术。但是,随着技术的进步,许多生产厂商开始加大研发投入和市场开拓,合成出大量具有吸附、催化、螯合、交换等特殊功能的新

型树脂,并开始应用于食品加工、生物制药、湿法冶金、电子领域和核工业等领域。如图1所示,当前的离子交换树脂可以根据可交换离子种类分为:阴离子交换树脂和阳离子交换树脂;根据所带活性基团的性质分为:强酸阳离子树脂、弱酸阳离子树脂、强碱阴离子树脂、弱碱阴离子树脂、螯合树脂、两性树脂、氧化还原树脂;根据离子交换树脂的孔结构分为:凝胶型树脂和大孔型树脂。

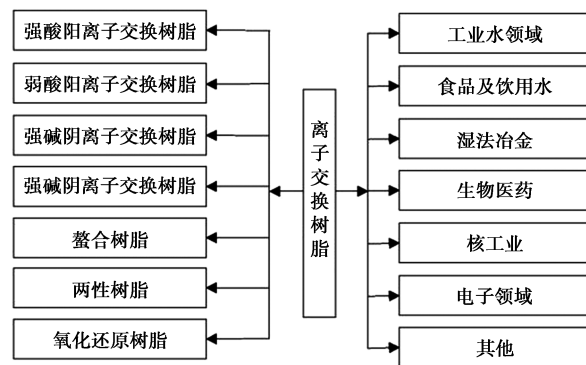


图1 离子交换树脂分类及应用

收稿日期: 2026-03-05; 修回日期: 2026-05-05

作者简介: 孟坤(1991-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为高分子材料标准化, 通讯联系人, 645359172@qq.com。

当前参与离子交换树脂市场竞争的主要企业可以分为 3 个梯队^[1]:①以美国陶氏化学、德国朗盛、英国漂莱特、日本三菱化学等跨国公司为代表的国际厂商,以雄厚的技术研发实力、先进的生产工艺、完整的产品生产线占据了大部分的高端市场份额,并且由于技术和品牌有较大竞争力,因此产品价格远高于国产。②国内以蓝晓科技、争光股份、江苏苏青和淄博东大等企业为代表的国内厂商,依靠自身核心产品性能已达到行业领先水平,逐步实现国产替代化,这类企业产品生产规模较大,产品种类齐全,工艺成熟,属于行业领先企业。③国内外较多的中小规模企业资金和技术水平有限,整体竞争能力较弱,这类企业主要分布在中国及印度。

2 离子交换树脂最新研究进展

本部分将对近 2 年离子交换树脂在国际上的合成和应用进行综述。针对合成可以发现,当前国际上对离子交换树脂的合成主要以增加多功能性为主,例如合成带有磁性的离子交换树脂。此外,当前研究开始针对废树脂再生、废树脂降解处理,符合当前绿色环保的主题。

2.1 新树脂合成

Tong 等^[2]提出了一种紫外光引发合成磁性离子交换树脂(MGD)的新策略。在低压紫外光引发条件下,以 1-碘己烷为长碳链烷基化试剂,通过悬浮聚合法成功制备出 2 种新型磁性树脂。得益于紫外光引发,树脂聚合反应时间显著缩短至 2 h。所制备的 MGD 树脂表现出高合成稳定性与良好重现性,树脂颗粒具有丰富的微孔和介孔结构,粒径范围为 50~250 μm。

2.2 废树脂处理

针对废树脂的处理,Han 等^[3]针对木质纤维素生物炼制中发酵糖浆的脱毒,开发了一种绿色高效的超声辅助树脂再生方法。针对传统树脂吸附技术存在的抑制剂污染导致吸附容量下降以及酸碱再生溶液大量消耗的问题,通过超声辅助低浓度氢氧化钠溶液实现了中毒树脂的再生。在优化条件(超声功率 50%,即 325 W,处理 30 min)下,树脂吸附容量恢复率达 70%,且物理损伤最小。Abdiyanov 等^[4]对原位浸出所得富液处理过程中的离子交换树脂清洗进行了探究,采用氢氧化钠与氢氧化铵作为清洗剂,对 AMP 与 Purolite 2 类树脂进行了清洗处理,并比较了经清洗与未清洗树脂的再生效率。通过质谱、分光光度及 X 射线荧光技术对碱洗液中的杂质

含量进行分析,评估了清洗效果。结果表明,碱性清洗能有效去除树脂上残留的硅与磷杂质,为提升树脂再生效率与延长使用寿命提供了可行方法。

2.3 离子交换树脂应用

离子交换树脂自从问世以来,广泛应用于工业水处理、食品及饮用水、生物医药、石油化工、环境保护、湿法冶金和核工业等领域。其中工业水处理、食品及饮用水等方面的应用较为基础,目前响应绿色环保主题,开始针对废树脂处理、废树脂再生等领域研究增多。而针对核工业,目前主要集中于针对核电站废离子交换树脂的处理进行研究,包含水泥固化、塑料固化与玻璃固化等具有前景的技术路线。

2.3.1 工业水处理方向应用

针对废树脂,Stamer 等^[5]以废弃发泡聚苯乙烯(EPS)为原料,通过多步骤工艺结合等离子体与化学处理进行功能化,成功制备出强酸阳离子交换树脂(SAC)与强碱阴离子交换树脂(SBA),用于产出水的脱盐处理。图 2 给出了该离子交换过程的示意图^[5],该研究不仅为产出水处理提供了新型可持续离子交换材料,也为塑料废物的资源化利用开辟了环保可行的新途径。

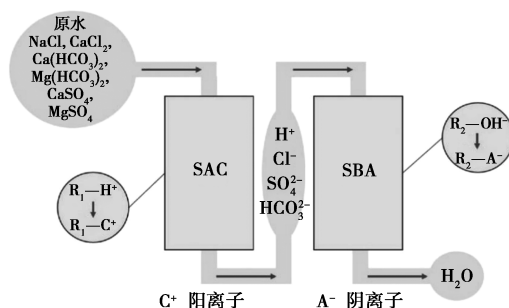


图 2 离子交换过程示意图

Yang 等^[6]以废弃离子交换树脂为原料,通过碳化制备低成本碳材料,并采用化学共沉淀法在其表面负载氧化铁制得磁性碳材料。表征分析证实磁性碳材料表面成功负载氧化铁,且其结构、官能团与原始碳材料基本一致。循环实验进一步证明磁性碳材料具有良好的回收与重复使用性能,在多次吸附-脱附及催化氧化过程中保持稳定。该研究实现了废弃树脂向高附加值、可循环利用的染料废水处理材料的转化,兼具环境效益与资源回收价值。

在针对树脂应用研究过程中,Munoz-arango 等^[7]发现使用 1-丁基-3-甲基咪唑氢氧化物([Bmim][OH])对高选择性离子交换树脂(A530E)进行高氯酸盐脱附实验,性能表现最优,经过 3 次连续脱附

循环,在第二轮循环中实现高达 23.48 mg/g 的高氯酸盐脱附量,恢复了树脂初始吸附容量的近 22%,脱附效率为其他 2 种试剂的 2 倍,但整体再生效率仍低于 50%,证实了离子液体可有效用作高氯酸盐负载树脂的脱附剂,为水处理领域提供了新型再生方案的应用路径。Tseka 等^[8]评估了 3 种大孔强碱阴离子交换树脂—聚丙烯酸型(A860S)、聚苯乙烯型(A502PS)和聚苯乙烯-聚丙烯酸混合型(MPR1000)对 2 种工业水源中溶解性有机碳(DOC)的去除性能,证明了化学吸附是主要去除机制,树脂优先去除腐殖质和结构单元,对低分子质量酸类和中性物质去除率低。Liu 等^[9]探索了一种集成化的全氟/多氟烷基化合物(PFAS)处理流程,旨在实现饮用水中痕量 PFAS(ng/L~μg/L)的完全脱氟与资源回收。该方法采用“离子交换吸附(IX)→树脂再生(使用质量分数 5% NaCl 与体积分数 60% 甲醇)→废再生液蒸馏→釜底残液紫外/亚硫酸盐(UV/sulfite)处理”的集成工艺,结果表明,该流程对地表水和地下水中的 PFAS 去除率接近 100%,并对绝大多数 PFAS(除少数短链氟化磺酸盐和醚类外)实现近乎完全的脱氟。再生树脂在 3 个使用周期内保持与原始树脂相当的 PFAS 吸附性能。废再生液经蒸馏可有效浓缩 PFAS 于釜底,大幅减少废液体积并去除过量甲醇,为后续 UV/sulfite 处理创造有利条件。Boschian 等^[10]研究了一种采用 IRA-400 离子交换树脂去除过氧化氢中磷酸盐的方法,并评估了树脂的性能。结果表明,该树脂能够去除 90% 的磷酸盐,且至少可重复再生 3 次而保持吸附活性不变(连续 5 批次的结合效率均保持在 91% 以上)。该方法可通过放大处理规模,实现更大量过氧化氢的处理,并在更严格结合条件下生产磷酸盐含量更低的过氧化氢产品。Jasim 等^[11]采用强酸型阳离子交换树脂 Purolite® C100,通过填充柱色谱技术探究了选择性离子交换法去除水溶液中铅离子(Pb^{2+})和铜离子(Cu^{2+})的性能。结果发现, Pb^{2+} 与 Cu^{2+} 在树脂上存在明显竞争,相同条件下两者去除率趋于接近。吸附过程高度符合 Langmuir 等温模型,且在 80 min 内离子交换量保持稳定,表明树脂对金属的吸附接近平衡。该技术适用于中小型工业废水处理设施,建议在碱性条件(通过 NaOH 等调节 pH)、足量强酸型阳离子交换树脂及充分接触时间下运行,以实现重金属离子的最优去除。

2.3.2 生物医药应用

在生物医药应用领域,Tabtimtong 等^[12]以蔗糖

为原料、水为溶剂,在不锈钢间歇反应器中采用多种离子交换树脂催化剂催化合成 5-羟甲基糠醛(HMF),并且研究了不同离子交换树脂催化剂对产物分布及重复使用性能的影响,CT-251 是水介质中蔗糖脱水制备 HMF 和 LA 的有效且可重复使用的催化剂。Zuo 等^[13]证实了绿色经济的水-氯化胆碱共溶剂体系在温和条件下,利用不同离子交换树脂催化剂于水/甲基异丁基酮双相系统中,能够高效催化葡萄糖和果糖转化为 5-羟甲基糠醛(HMF)。机理研究和定量计算分析表明,葡萄糖在含水体系中的转化比在纯低共熔溶剂中更为有利,并揭示了水-氯化胆碱体系中铝、铬、锡等路易斯酸性位点在葡萄糖异构化过程中的催化能力与能垒差异。Zhang 等^[14]研究通过将盐酸小檗碱与离子交换树脂结合,有效掩蔽了其不良苦味。研究首先揭示了不同温度及 β -环糊精浓度下盐酸小檗碱的溶解度方程,为结合参数的选择提供了依据;随后探究了多种因素对反应过程的影响,并通过特性分析与口感评价验证了复合物的形成;最后在 pH 为 1.0、4.5、6.8 的溶液介质中进行了体外释放研究。本研究成功制备了口感良好的盐酸小檗碱-树脂复合物,为其掩味制剂的开发提供了可行方法。

2.3.3 湿法冶金

在湿法冶金领域,Dong 等^[15]研究了强碱阴离子交换树脂对硫代硫酸盐溶液中金的吸附行为与机理。对比实验表明,I 型季铵功能基的凝胶型 Amberlite IRA-400 树脂对金具有更优的吸附性能和选择性。提高树脂投加量、氨浓度及溶液 pH 有利于金的吸附,而增加铜离子与硫代硫酸盐浓度则对金的负载不利。微观表征证实,金以 $[\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$ 络合阴离子形式通过离子交换取代树脂功能基中的 Cl⁻被吸附,该实验为高效回收金提供了理论依据。Tian 等^[16]研究采用阴离子交换树脂 D301 从低浓度溶液中提取 5 价铌[Nb(V)]。结果表明,D301 树脂对 Nb(V)的最大吸附容量达 293.6 mg/g,显著高于已报道的其他吸附材料。吸附机制主要为阴离子交换,其中叔胺基团是主要的活性位点。此外,D301 树脂在捕获 Nb(V)时表现出良好的再生能力和优异的重复使用性,具备商业化应用潜力。研究证明 D301 树脂在从低浓度溶液中高效提取 Nb(V)方面具有广阔前景,并为开发面向资源回收及环境应用的多功能吸附材料提供了重要参考。

2.3.4 核工业的应用

在核电站的运行过程中,核燃料循环过程中的

分离纯化过程,会产生大量有害且对环境有风险的放射性废物。通常其反应堆回路冷却水、乏燃料贮存池水及核电站工艺废水中存在多种放射性核素,需通过离子交换技术进行有效处理。核电站废离子交换树脂约占该行业固体废物总量的 4%,但是目前缺乏可靠的处理方法。Atkinson 等^[17]通过构建基于多准则决策分析(MCDA)的客观评估框架,确立涵盖工程、经济和环境 3 大维度的 8 个关键绩效指标(KPIs),并采用层次分析法进行双重权重计算与排序。评估表明,水泥固化、塑料固化与玻璃固化是最具前景的技术路线,而氧化技术因二次废物多、

成本高而效能较低;模拟当前“暂存待处理”策略的对照方案在 14 个选项中排名第 11 位,证实其长期不可持续性。

针对水泥固化,水泥因稳定的物理化学性质和优良的机械性能,成为应用最早、最广泛的固体废物固化基材。水泥固化具有设备简单、结构稳定、工作温度低和成本效益高等突出优点。目前常用的胶凝材料主要包括普通硅酸盐水泥(OPC)、硫铝酸盐水泥(SAC)、碱矿渣水泥、铝酸钙水泥和地质聚合物等,其中 OPC 应用最为普遍。表 1 针对当前水泥固化的主要类型进行了一个总结^[18]。

表 1 针对当前水泥固化的主要处理方法总结

类型	主要成分	主要水化产物	特性
硅酸盐水泥	硅酸盐	水化硅酸钙凝胶(C-S-H)、钙矾石	成本效益高、工艺简单,但抗浸出性差、负载容量低
碱激发水泥	硅酸盐水泥+高炉矿渣	C-S-H 凝胶、硬硅钙石	抗压强度高、孔隙率低
硫铝酸盐水泥	硫铝酸钙、二钙硅酸盐	C-S-H 凝胶、钙矾石、氧化铝凝胶	具有高水化活性、早期强度高、孔隙率低和抗浸出性好等优势
地质聚合物	硅酸盐水泥+粉煤灰/ 偏高岭土	碱激发硫铝酸盐凝胶(A-S-H)	具有高机械强度、低渗透性、高早期强度、耐热和耐化学腐蚀等优异性能,是固化低放废物的理想候选材料

El-sayed 等^[19]通过实验室规模实验,系统探讨了模拟废放射性离子交换树脂在水泥基体中的固化/稳定化处理及其最终固体废物形态的特性表征。研究重点分析了水灰比和树脂掺量对固化体性能的影响,并对硬化养护 28 d 的固化体进行了机械完整性、热分析及质量损失评估。结果表明,基于水泥作为惰性基体的良好性能及其多重优势,可安全推荐其用于未经预处理的废放射性离子交换树脂的固化/稳定化处理。Cheng 等^[20]发现采用硫铝酸盐水泥基材料(SACM)固化含放射性核素的废离子交换树脂(IER),即使在 60%~70%的高掺量下,固化体的抗压强度仍满足标准要求。相对于传统的 OPC 固化体在废物处理和贮存方面存在的局限,SACM 在伽马辐照后表现出优异的耐久性和稳定性。Crivelli 等^[21]在室温条件下,采用一种新型特种地质聚合物作为基质,对经研磨与水化预处理后的废树脂进行包埋固定。测试结果表明,该工艺能够包埋高达 30%的树脂,且完全符合意大利废物接受标准(该标准严于多数国家)。除了可在室温操作的优势外,该工艺还能显著减少最终处置废物的体积,较其他地质聚合物固化工艺具有更优的减容效果。Castro 等^[22]开发了一种基于低温蒸气热处理耦合高性能等离子体尾气处理的新型工艺,该技术可实现高效减容并获得非反应性固体产物。该废离子交换树脂处理工艺能够实现至少 84%的高体积缩减

率,所得固体产物具有不溶性、无团聚、无气味的特性。其最显著的优点在于不吸水性,因而在水泥基体的凝结硬化过程中不会产生影响,有效避免了树脂珠粒的收缩问题。Hita 等^[23]以高炉矿渣和粉煤灰为前驱体,采用 Na_2SiO_3 和 Na_2CO_3 作为碱性激发剂,对核级废离子交换树脂(SIERs)进行固化。通过测试凝结时间、和易性、流变性能及反应动力学,优化了用于废物包封的水泥基体。结果表明,提高粉煤灰含量会减缓反应动力学、延迟凝结并降低黏度和屈服应力,而增加矿渣含量则加速聚合、提高黏度。 Na_2CO_3 激发会促进早期碳酸钙沉淀,导致凝结加快和黏度升高,而 Na_2SiO_3 则能较长时间保持流动性。

针对塑料固化,是利用热塑性或热固性高分子聚合物包封废离子交换树脂的放射性废物处理技术。由于塑料的可塑性、易加工成型性及优异的辐射稳定性,可实现高达 50%~60%的树脂负载量,且固化体具有高抗压强度和良好的热传导性^[24]。其中,热固性固化以废树脂为反应主体,通过添加引发剂等助剂在加热下形成不可逆的交联结构;热塑性固化则将废树脂作为添加剂,通过熔融共混形成均质体系。然而,该工艺常需对树脂进行脱水或研磨预处理,且固化体的耐老化性与化学稳定性通常低于水泥基材料。研究表明,通过球磨处理可显著改善放射性核素(如 Cs、Co)在聚合物基体中的分布均

匀性,从而提升其长期包容性能与浸出阻力。为应对铯等关键核素的高迁移性挑战,当前研究正致力于开发高性能环氧树脂等新型复合材料、优化工艺参数,并探索与矿物掺合料的协同使用,以进一步提高固化体的稳定性与安全性,满足放射性废物的长期处置要求。

2.3.5 电子领域应用

针对电子领域的应用,Zhang 等^[25]通过多步反应合成了一种新型磺化超交联树脂。该树脂在有机介质中表现出优异稳定性,能将 PGMEA 中 Ti、Co、Ni、Cu 等离子浓度降至 10×10^{-9} 以下,纯度从 98.90% 提升至 99.48%。热力学分析表明该吸附过程为非自发反应。树脂在丙二醇甲醚醋酸酯(PGMEA)中 18 h 内保持化学稳定,该树脂是一种稳定可靠的 PGMEA 纯化材料,可提升光刻胶溶剂纯度并潜在优化光刻胶性能。

2.4 小结

离子交换树脂(IER)作为一种经典的分离与纯化材料,其应用已远超传统的水处理与湿法冶金范畴。近期研究揭示,通过材料创新、工艺耦合与机理深化,IER 技术正沿着以下几个关键方向取得突破性进展。

(1)从“交换”到“靶向捕获”:选择性与功能性的飞跃

传统 IER 的选择性瓶颈正被新型功能化树脂打破。针对特定战略资源与高危污染物,研究人员开发了高选择性树脂,实现了从复杂基质中的高效回收与深度去除,如战略金属回收(包括钒、铌、稀土等稀缺资源)和新兴污染物深度去除(针对全氟烷基物质、高氯酸盐等新兴痕量污染物)。

(2)从“消耗”到“循环再生”:绿色工艺与可持续性

解决废树脂的再生难题和实现全流程绿色化是当前研究热点。如高效再生策略:针对中毒或负载树脂,开发了超声辅助化学再生、氧化还原介导电渗析、有机溶剂-酸耦合洗脱等新技术。还有废弃物高值化转化:将废弃树脂(WIER)视为“二次资源”,通过热解、碳化将其转化为磁性碳基吸附剂(MCM)或多孔碳材料,用于染料、磷酸盐等污染物的去除,实现了“以废治废”的循环经济模式。

(3)从“化工材料”到“特种应用”:前沿领域的跨界拓展

IER 的应用边界正不断向高端领域延伸。如核工业废物安全处置:针对放射性废树脂,开发了新型

固化基材(如硫酸铝水泥、地质聚合物 HYPEX[®]工艺)和低温蒸气-等离子体联合处理技术,实现了废物的高效减容(大于 84%)和长期稳定固化,满足最严苛的核安全标准。生物医药与电子级纯化:在制药领域,IER 色谱法用于前药盐型的高效、可控制备。在微电子领域,磺化超交联树脂能将光刻胶溶剂(PGMEA)中的金属杂质降至 10^{-9} 级,纯度提升至 99.48% 以上。

3 总结

当前离子交换树脂领域的发展,呈现出“功能精准化、过程绿色化、系统集成化、设计智能化、应用高端化”的鲜明特征。未来研究将继续聚焦于以下方面。

(1)精准设计:开发针对锂、铷、铯等特定离子具有超选择性的下一代树脂。

(2)极限工况:研制耐受更高温、辐射和化学腐蚀的树脂,适用于先进核能系统和极端工业环境。

(3)闭环循环:构建从树脂合成、使用、再生到最终资源化回收的全生命周期绿色技术体系。

(4)人工智能驱动:深度融合 AI 与模拟计算,实现树脂材料与工艺的“从分子到工厂”的全链条智能设计与优化。

参考文献

- [1] 华经产业研究院.2024—2030 年中国离子交换树脂行业市场深度分析及投资潜力预测报告[R/OL].(2024-06-11)[2026-01-07].<https://e.m.163.com/news/a/J4DA73560552SV13.html>.
- [2] Tong X R, Zhu W J, Qin Z C, et al. Medium-chain alkylated magnetic ion-exchange resins via low-pressure UV initiation for superior phosphate adsorption[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 379: 135028.
- [3] Han J, Pyo S H, Xu Y. Ultrasound-assisted regeneration of ion exchange resins for efficient detoxification of lignocellulosic hydrolysate in biorefinery[J]. Renewable Energy, 2025, 252: 123568.
- [4] Abdiyanov A E, Vidyayev D G, Nezamaev G A, et al. Alkaline cleaning of ion-exchange resins[J]. Russian Physics Journal, 2024, 67: 296-300.
- [5] Stamer K, Baltaeva M, Manakhov A, et al. Polystyrene waste-derived ion-exchange resins for water desalination[J]. Materials Chemistry and Physics, 2025, 339: 130548.
- [6] Yang C Y, Hu S F, Kao C L. Fabrication of recyclable magnetic carbon material adsorbent from waste ion exchange resin[J]. Waste Management Bulletin, 2024(1): 205-216.
- [7] Munoz-arango D, Montano D F, Veloso-cid N, et al. Characterization of perchlorate desorption and regeneration of the highly selective ion-exchange resin A530E using 1-butyl-3-methylimidazole chloride, 1-butyl-3-methylimidazole hydroxide, and choline chloride[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13:

- 118977.
- [8] Tseka T, Finkbeiner P, Phiri Z, *et al.* Comparative evaluation of ion-exchange resins for natural organic matter removal from power plant source waters[J]. *Journal of Water process Engineering*, 2025, 78; 108829.
- [9] Liu B C, Chen J C, You Y Y, *et al.* Cyclic removal and destruction of per- and polyfluoroalkyl substances from water using ion exchange, resin regeneration, and UV/sulfite reduction[J]. *Water Research*, 2025, 272; 122915.
- [10] Boschian L, Culetic A, Liu S Y, *et al.* Phosphate removal from hydrogen peroxide solutions using the ion exchange resin IRA-400[J]. *Journal of Chromatography A*, 2025, 1743; 465690.
- [11] Jasim A Q, Ajjam S K. Removal of heavy metal ions from wastewater using ion exchange resin in a batch process with kinetic isotherm[J]. *South African Journal of Chemical Engineering*, 2024, 49; 43–54.
- [12] Tabtimtong N, Padungwat A, Lertna N, *et al.* Sucrose conversion to 5-hydroxymethylfurfural over commercial ion-exchange resin[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2015, 199; 107940.
- [13] Zuo M, Zheng X Y, Che W R, *et al.* Insight into 5-hydroxymethylfurfural synthesis and separation from the aqueous solvent with ion exchange resin catalysts, mechanisms, and theoretical calculations[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 362; 131904.
- [14] Zhang T Y, Zhang S M, Wu F, *et al.* Preparation of berberine hydrochloride ion-exchange resin complex by β -cyclodextrin inclusion[J]. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 2025, 104; 106472.
- [15] Dong Z L, Jiang T, Xu B, *et al.* Adsorption behaviors and mechanisms of gold recovery from thiosulfate solution by ion exchange resin[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2024, 34; 3372–3385.
- [16] Tian C Z, Xu Z Y, Zou W J, *et al.* Investigating the efficacy of D301 ion exchange resin in the recovery of Nb(V) via adsorption experiments and theoretical calculations[J]. *Surface and Interfaces*, 2026, 80(1); 108262.
- [17] Atkinson C M, Robshaw T J, Walker G D, *et al.* Optioneering in nuclear ion exchange resin disposal[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2025, 185; 105719.
- [18] Li B Y, Chen M Q. A comprehensive review on treatment technologies of spent ion exchange resins in nuclear power plants[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12; 114116.
- [19] El-sayed Y S, Eskander S B, Bayoumi T A, *et al.* Incorporation of spent ion exchange resin simulate into cement composites[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2024, 210; 111357.
- [20] Cheng H, Sun C, Xu X G, *et al.* Cementation of spent radioactive ion-exchange resin using sulphoaluminate cement with fiber and SCMs: Mechanical properties, durability, and irradiation resistance[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 479; 141514.
- [21] Crivelli F, Cao S, Corrado M, *et al.* Development of a new process for the radioactive ion exchange resins conditioning-HYPEX®[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2025, 180; 105639.
- [22] Castro H A, Rodriguez R A, Bianchi H L. Thermal treatment and high performance plasma treatment applied to spent ion exchange resins; Study of solid product embedding with ordinary Portland cement[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2026, 448(3); 114714.
- [23] Hita M J D, Torres E, Geddes D A, *et al.* Immobilisation of simulant nuclear-grade spent ion-exchange resins in alkali-activated cement; Fresh state properties of the cement matrix[J]. *Journal of Nuclear materials*, 2025, 617(11); 156169.
- [24] Kim J, Singh B K, Um W. Effect of ion exchange resin particle size on homogeneity and leachability of Cs and Co in polymer waste form[J]. *RSC Advances*, 2021, 11(5); 2729–2732.
- [25] Zhang N, Liu F, Li D, *et al.* Synergistic strengthening of ion-exchange resins by post-crosslinking and selective sulfonation for PGMEA purification[J]. *Industrial Chemistry & Materials*, 2025, 3(5); 631–642. ■

(上接第66页)

- [17] Dong H, Yu H, Xu R, *et al.* Research on application effect and mechanism of degradable multifunctional dust suppression foam in coal mines[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(3); 112694.
- [18] Jin H, Zhang Y, Wu G, *et al.* Optimization via response surface methodology of the synthesis of a dust suppressant and its performance characterization for use in open cut coal mines[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, 121; 211–223.
- [19] Fan T, Zhou G, Wang J. Preparation and characterization of a wetting-agglomeration-based hybrid coal dust suppressant[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 113; 282–291.
- [20] Li K, Yang L, Jiang F, *et al.* Preparation and research on a coal dust suppressant from modified lignosulfonates[J]. *Environmental Engineering*, 2012, 30(1); 66–69.
- [21] Zhou G, Xu Y, Wang Q, *et al.* Wetting-consolidation type dust suppressant based on sugarcane bagasse as an environmental material: Preparation, characterization and dust suppression mechanism[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 330; 117097.
- [22] Ren B, Yuan L, Zhou G, *et al.* Effectiveness of coal mine dust control: A new technique for preparation and efficacy of self-adaptive microcapsule suppressant[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32(6); 1181–1196.
- [23] Zhou G, Wang C, Li S, *et al.* Preparation and characteristics analysis of an ecoenvironmental protection cyclic solidification dust-fixing agent extracted from waste shrimp shells to suppress dust in coal resource-based cities[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 296; 113224.
- [24] Wang H, Nie W, Zhang H, *et al.* A synthesis of a dust suppressant using the cellulose extracted from maize straw[J]. *Starch-Stärke*, 2020, 72(3/4); 1900187.
- [25] Wang Q, Zhao Z, Zhao Y, *et al.* Performance optimization and mechanism analysis of applied Enteromorpha-based composite dust suppressant[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, 45(7); 4897–4913.
- [26] Wu M, Hu X, Zhang Q, *et al.* Preparation and performance evaluation of environment-friendly biological dust suppressant[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 273; 123162.
- [27] Hu X, Liu J, Feng Y, *et al.* Application of urease-producing microbial community in seawater to dust suppression in desert[J]. *Environmental Research*, 2023, 219; 115121.
- [28] Geng Z, Feng Y, Zhao Y, *et al.* Study on the timeliness and maintenance mechanism of dust suppression performance of microbial dust suppressant[J]. *Powder Technology*, 2023, 426; 118618.
- [29] Wang H, He S, Zhang Q, *et al.* Experimental study on synthesis of biological dust suppressant by microbial fermentation[J]. *Journal of the China Coal Society*, 2021, 46(2); 477–488. ■