

探究处理放射性复杂废液新型工艺

任馨玥¹ 张贲¹ 廖伯超² 林桐旭² 陈晓鸿²

1 中广核福龙燃料元件有限公司

2 中广核铀业发展有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i2.18939

[摘要] 我国燃料元件制造能力不断提升,所产生的含铀废液量也相应增加。在这样的背景下,国家对于环境保护的严格标准不断提升,促使开发高效且可靠的废水处理技术变得尤为重要。因此,本文对含铀废液的处理技术进行了系统性整理,详细介绍了传统和新兴工艺的基本原理,并对它们的技术特性及适用性进行了比较分析。

[关键词] 含铀废液; 处理; 工艺

中图分类号: F768.7 文献标识码: A

Exploring Novel Technologies for Treating Complex Radioactive Waste Liquids

Xinyue Ren¹ Ben Zhang¹ Bochao Liao² Tongxu Lin² Xiaohong Chen²

1 China General Nuclear Fu Long Fuel Element Co., Ltd.

2 China General Nuclear Uranium Development Co., Ltd.

[Abstract] With the continuous improvement in China's fuel element manufacturing capabilities, the volume of uranium-containing waste liquid generated has correspondingly increased. Against this backdrop, the nation's stringent environmental protection standards are being further elevated, making the development of efficient and reliable wastewater treatment technologies particularly crucial. Therefore, this paper systematically organizes uranium-containing waste liquid treatment technologies, detailing the fundamental principles of both traditional and emerging processes, and conducts a comparative analysis of their technical characteristics and applicability.

[Key words] uranium-containing waste liquid; treatment; workmanship

引言

随着“碳达峰”、“碳中和”目标的提出,核能这类低碳能源越来越受到人们的重视。铀(U)作为一种重要的核工业原料,在现代国防和核能源发展中发挥着重大的支撑作用。然而,在铀矿的开采、加工冶炼和使用过程中产生大量具有放射性的含铀废液。监测显示,我国西南某铀尾矿渗滤液中铀的质量浓度达19.8mg/L^[1];美国犹他州某铀矿测井中铀质量浓度为16.3mg/L。水溶液中铀主要以四价和六价形式存在。其中,六价铀(U(VI))可溶性较好,迁移性强,可扩散至地表水及地下水中,造成严重的环境问题,威胁人类健康和生态安全。在当前含铀废液处理工艺过程中,一些传统的处理工艺仍旧被采用,同时一些新型的处理方法也逐渐被开发出来。现在的含铀放射性废水处理方法如下图1所示:化学沉淀法、离子交换法、蒸发浓缩法、吸附法、膜分离法等^[2]。这些方法各具优缺点和适用范围,一般需采用两种或两种以上的方法组合使用才能达到理想的处理效果^[3]。

传统方法处理复杂的放射性废液主要涉及蒸发浓缩、化学沉淀、膜过滤以及离子交换技术等工艺。这些方法在处理效率、环保性以及经济成本等方面,均存在一定的优缺点。

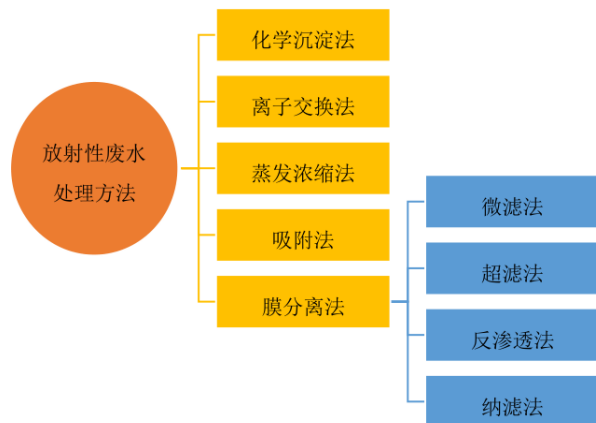


图1 含铀废水处理方法

1 探究新型工艺

将化学沉淀、活性炭吸附和反渗透膜 (RO) 过滤技术整合形成的复合处理流程, 现已成为处理含铀放射性废液的一种较为新颖的手段。随着科技的进步, 愈加高效、绿色环保, 同时能够符合更高要求的现代处理技术正在持续研发和改良。不断追求技术进步与革新, 将帮助我们更加高效地应对愈加严峻的环保问题。

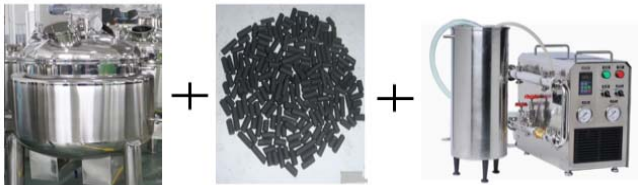
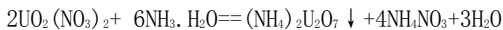


图2 新型处理工艺

1.1 化学沉淀法

化学沉淀技术, 也叫作混凝沉淀工艺, 是处理放射性废物液体的常见方案之一。Lee等提出的沉淀-混凝过程, 能够高效处理含有六价铀的前序系统和储存罐的清洗废水, 并同时处理混凝反应产生的固体废料。使用重铀酸盐沉淀法来净化含铀废水时, 核心任务是调整最佳沉淀参数, 确保铀几乎全部沉淀。这样可以使废水中铀浓度达标, 同时使沉淀物便于后续的洗涤、过滤和脱水处理。典型工艺包括: 将废水通过泵送至铵盐沉淀反应槽, 同时利用高位槽加入氨水, 将终点的pH精确调节至8.5至10.0之间, 使铀沉淀为重铀酸铵形式。在经过大约30分钟的老化过程后, 沉淀物被过滤, 并将所得的滤饼最终送至干燥和煅烧系统进行处理:



化学沉淀法是一种经济实惠且简便的处理放射性废水的技术, 能够有效削减多数放射性核素。不过, 其清洁性能欠佳是最大的问题。因此, 这种方法现在主要用作预处理工艺, 旨在减轻后续深度处理单元的压力和复杂性。

1.2 活性炭吸附法

吸附是指物质通过分子间的吸引力进行转移的现象。材料表面的分子由于引力的不完全平衡, 能够抓住附近的液体或气体分子。物质的表面积增大时, 吸附能力也会增强。因此, 在工业应用中, 通常使用具有高比表面积的材料, 如活性炭和硅胶, 来作为吸附剂。

在处理放射性废水时, 采用吸附方法是利用多孔材料的特性, 使废水中的放射性物质聚集在材料表层, 从而达到高效去除污染物的目的。这种方法具有操作简便和良好的选择性特点, 能够同时去除多种重金属, 特别适合处理低浓度的废水。尽管它的应用广泛, 但依然存在一些挑战, 比如处理吸附废渣的难度和吸附剂再生的高成本等。

根据国内某院校针对活性炭吸附处理含铀废水的试验, 从试验过程中可得出以下结论:

活性炭的用量对铀去除率的影响:

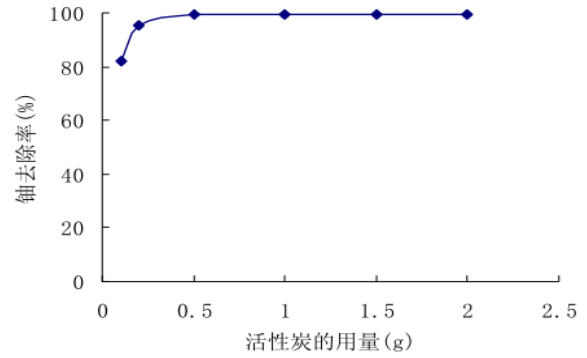


图3 活性炭的用量对铀去除率的影响

pH值对铀去除率的影响:

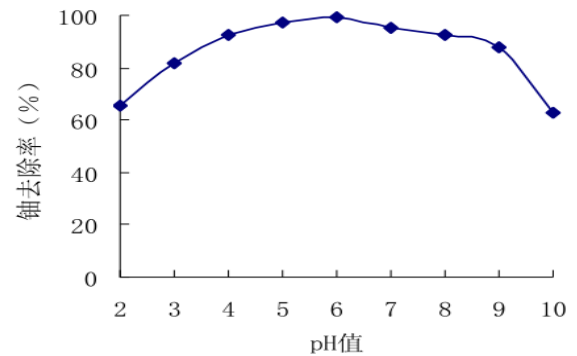


图4 pH值对铀去除率的影响

温度对铀去除率的影响:

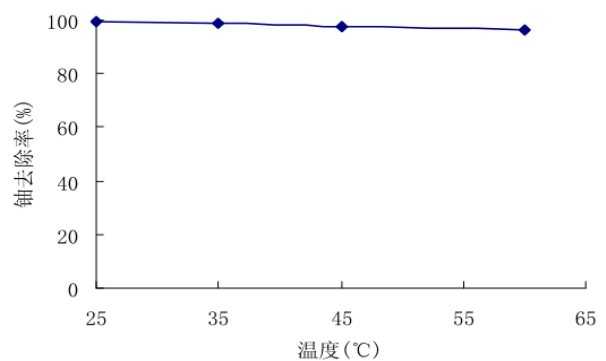


图5 温度对铀去除率的影响

搅拌时间对铀去除率的影响:

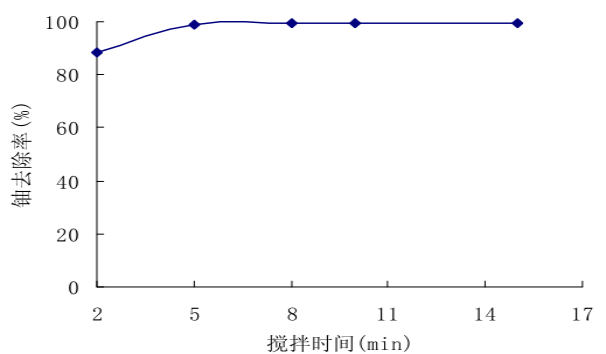


图6 搅拌时间对铀去除率的影响

沉降时间与铀去除率的关系:

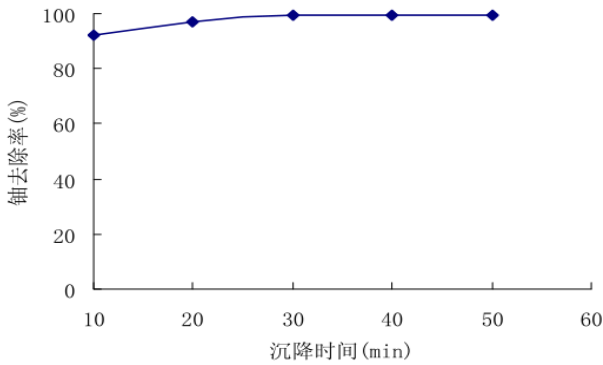


图7 沉降时间与铀去除率的关系

结合上述试验数据,可以汇总知道:

(1) 在实验室实验中,借助活性炭作为吸附介质,能有效清除废水中的铀离子。这一过程操作简便,去除效果十分优异。数据分析表明,在理想的吸附条件下(pH值为6.0,温度设定为25°C,均匀搅拌8到9分钟,随后自然沉降30分钟),铀在废水中的去除率能够超过96%。经过处理后的废水能够符合国家的排放标准。活性炭能高效地吸附并移除废水中的重金属和放射性物质。

(2) 铀废水的酸碱性初始值会影响活性炭的吸附能力。因此,开始吸附过程之前,必须将废水的pH调整至5.5到6.5的范围。

(3) 由于活性炭吸附法操作简便、吸附能力强,并且能够有效去除铀,因此特别适合用于处理实验室生成的水量较少、放射性比活度高的铀废水。然而,该技术因成本较高而在大批量废水处理时显得经济效益不佳,因此不适合应用于废水量特别大的情况。

1.3反渗透膜(RO)过滤法

近年来,膜分离技术快速进步,备受关注,已成为一种高效的分离方法。这项技术通过薄膜的选择性透过,在压力、温度或电位等差异的驱动下,可以高效地从废水中分离和浓缩放射性元素及其他污染物。膜分离技术种类繁多,常见的有微滤、超滤、纳滤以及反渗透等,应用领域非常广阔。为了提高处理效率,实践中常将多种膜技术联合使用,形成综合方法来进行废水处理。

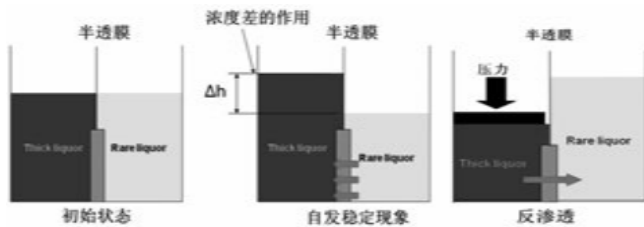


图8 渗透与反渗透原理图

反渗透膜拥有极微小的孔隙(通常小于1纳米),因此能够有效阻挡包含单价离子的大多数离子,从而确保出色的去污效果。考虑到这些优点,反渗透技术有望在实验室和中试规模的放射性废水处理领域得到广泛应用。

反渗透技术的运行机制与纳滤类似,但它的膜结构更为紧密,通常要求0.1到10.0 MPa的高操作压力。这一技术理论上可以几乎彻底清除水里的各种污染物,包括无机盐、金属离子、有机物和胶体等,从而生产出高质量的回用水。在处理含铀废水时,反渗透膜显示出惊人的效果。根据图9显示,各厂商的产品截留铀的效率普遍在99%以上。得益于这种高效的截留能力,反渗透过程不仅能将废水大幅浓缩,还能确保最终出水中的铀浓度满足严格的排放标准。

反渗透膜型号	制造商	材料	操作条件(原料液铀含量浓度,操作压力)	铀截留率/%
BW-30	Filmtec	聚酰胺	0.295 mg/L, 1.1 MPa	>99.7
ESPA4	Hydranautics	聚酰胺	0.295 mg/L, 1.1 MPa	>99.7
RO	Sakhan	—	0.76 mg/L, 0.6 MPa	>99.6
FT-30	Filmtec	—	720 mg/L, 5.5 MPa	99.6
DTRO	—	聚酰胺	6.8 mg/L, 7.0 MPa	>99.3
TFC	—	—	0.027 mg/L, —	>99.6
HR-05	WaterFilter	芳香聚酰胺	0.09 mg/L, —	>99
AG4040	Osmonics	聚酰胺	0.187 mg/L, 0.8 MPa	>98.6

图9 反渗透处理含铀废液的性能

For instance, G. H. Hsiue et al utilized FT-30 membrane at 5.5 MPa to treat wastewater from uranium processing (initial uranium concentration of 0.72 g/L), effectively reducing the wastewater volume to 30% of its original size (increasing uranium concentration to 2.1 g/L) with a retention rate of 99.6%. 另一研究中,黄万波等[13]使用DTRO膜处理铵盐沉淀含铀废水,在7.0MPa下经两级三段工艺,出水铀浓度从6.8mg/L降至0.05mg/L以下(截留率>99.3%),并同步实现了94%的氨氮脱除率和超过70%的淡水回收率。

2 新型工艺的优缺点

首先,这项技术展示了卓越的效能。通过化学沉淀法,可以将废液中的放射性物质转化为固体沉淀。这种方法在有效减少废液体积和降低放射性浓度方面表现出色,因此显著减轻其对环境和人体可能造成的危害。接下来,陶瓷膜过滤技术能够有效去除残留的放射性物质,进一步提高处理效果。联合使用这两种方法,大幅提升了处理放射性复杂废液的整体效率。

其次,此技术提供了极大的安全保护。通过化学沉淀技术,放射性物质能够转变为稳定的固态形态,从而减少其溶解或蔓延的可能性,进而减少对生态环境及人的健康产生威胁的机会。与此同时,反渗透膜过滤技术能够高效阻断放射性物质,避免其进入环境。这种双重保护措施使该工艺在处理放射性复杂废液时更加安全和可靠。

最后,这项技术还具有一定的回收能力。通过化学沉淀法形成的固体沉淀可以进行后续处理以便回收利用,从而有效减少废物生成。这不仅能够帮助降低支出,并且与绿色环保的原则一致。

尽管这种技术优势明显,但它也有一些不足。首先,由于需要采用特殊的材料和装备,化学沉淀法与反渗透膜过滤的费用较为昂贵。这可能对一些资源匮乏的地区或组织造成困扰。其次,这项工艺较为复杂,必须严密调节化学反应条件与反渗透膜的过滤设置。这份职责要求员工具备专业技巧和广泛经验,以便应对技术挑战和降低运营风险。最后,化学沉淀法和反渗透膜过

滤技术适合处理规模较小到中等的放射性复杂废液,但对于处理大规模废液可能会受到一些限制。

根据待处理废液的特性和处理量,所采用的数据将有所不同。通常情况下,化学沉淀法能够使废液中放射性物质的浓度减少至原浓度的千分之一以下,而通过反渗透膜过滤则可以将其降低至原浓度的百分之一以下。这些数据展示了该工艺在减少放射性物质浓度方面的显著功效。

3 结语

随着核能的进步和核技术的广泛应用,处理放射性复杂废液的需求显著增长。虽然“化学沉淀+活性炭吸附+反渗透膜过滤”这种综合处理工艺以其效率高、安全性好和资源回收潜力大,在核电站、医院和实验室等领域具备广泛应用的可能性,对环境保护与健康维护具有重要作用,然而其成本较高和操作复杂性仍是推广的主要困难。因此,未来仍需继续研发,以优化流

程、降低成本并扩大处理范围。

整体来看,尽管当前的污水处理技术具有一定的成效,但其都有各自的限制。所以,今后的研究重点在于研制更高效环保的污水处理技术。

【参考文献】

[1]吕俊文,邓钦文,张宇,等.黏性土对铀尾矿酸性渗滤水的净化性能研究[J].环境工程,2014,32(1):1-5.

[2]周书葵,娄涛,庞朝晖.放射性废水处理技术[M].北京:化学工业出版社,2011:52.

[3]任萌,刘小龙,康武,等.放射性废液联合处理法研究现状与发展[J].环境工程,2019,37(S1):333-339.

作者简介:

任馨玥(1998--),女,汉族,四川遂宁人,本科,助理工程师,从事辐射安全管理研究。