

含铀废水处理技术研究进展

胡鄂明¹, 邵二言¹, 赵 静²

(1.铀矿冶生物技术国防重点学科实验室,湖南 衡阳 421001;2.阜阳出入境检验检疫局 综合实验室,安徽 阜阳 236000)

摘 要:随着核能的快速发展与应用,产生的含铀放射性废水越来越多,严重影响人类的健康和环境的保护,为此,含铀放射性废水的有效治理引起了人们越来越多的关注.本文主要对化学沉淀法,吸附法,离子交换法等传统方法以及生物技术和膜技术这些新技术对含铀废水处理的最新研究状况进行了分析概述.沥青铀矿结晶法以及分子筛对放射性核素铀的吸附性能,为含铀放射性废水处理的研究拉开了新的帷幕.图1,表1,参35.

关键词:含铀废水;研究进展;处理技术

中图分类号:TL212.3

文献标识码:A

为了减少二氧化碳的排放,减缓气候变暖,国内外科学工作者在积极寻找新的清洁能源来取代石油、煤炭等化石燃料,比如核电、风电、太阳能等.核电近年来发展迅速,在保障能源需求,稳定经济发展方面发挥着重要作用.截至到2014年,我国核电发电总量为92 652千瓦时,占总发电量的2.0%,计划在2018年之前,将完成建设13座新的核反应堆,到2020年将核能发电比重由2%提升至6%.随着核电的发展,核电在满足人类能源需求的同时,在运行的过程中产生大量的含铀废水,以及铀尾矿废渣,威胁着人类的健康.放射性核素可通过稻米等食物转移至人体内部,极难排出体外,这些铀元素将在人体内形成长期放射性内照射,对人体健康健康造成巨大危害.

因此,含铀放射性废水的治理引起了相关学者的广泛关注.目前含铀废水的处理方法主要包括化学沉淀法,吸附法,离子交换法,生物技术,膜技术等.

1 传统方法

1.1 化学沉淀法

化学沉淀法,是指向放射性废水中投入沉淀剂,

核素与沉淀剂结合沉淀,或是沉淀剂凝聚成细小的可沉淀的颗粒,并与水中的悬浮微粒结合为疏松绒粒,从而吸附废水中的放射性核素,使废水中的放射性核素能够转移并浓集到小体积的污泥中去,而使剩余很少的放射性核素稀释到大体积的废水中去,从而能够达到排放标准.常用的沉淀剂包括氧化钙、碳酸钠、二氧化锰、硫酸铝、高锰酸盐、三氯化铝、三氯化铁、氯化钡等.该方法不仅可以处理低浓度放射性废水,对高浓度含铀废水也具有富集的作用.

有研究表明,采用 BaCl_2 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 作沉淀剂,处理铀矿山酸性工艺废水,方法简单,除铀率高,在所选择的条件下,均能使废水中的含铀量降至0.05 mg/L以下,达到了国家规定外排标准.此方法具有工艺简单,成本低,且易于脱水、较稳定等优点.但存在结垢严重,沉淀污泥量大及易堵塞管道,容易造成二次污染等弊端.对此,在过碱中和的基础上,采用高密度泥浆回流脱除铀矿山酸性废水中的铀金属离子,能够有效解决上述问题,并能大大提高处理含铀废水的能力.

1.2 离子交换法

离子交换法处理放射性废水主要采用离子交

收稿日期:2016-01-09

基金项目:湖南省科技厅资助项目(编号:2011KJT08,2013GK2023)

作者简介:胡鄂明(1972-),男,湖南省桃江县人,硕士,副教授,研究方向:溶浸采矿、湿法冶金、放射性废水废渣处理.

换树脂法和离子交换纤维法,其作用原理基本相同,都是利用可交换的活性基团与放射性废水中重金属离子交换,使重金属离子吸附在固定的构架分子上,从而达到去除放射性核素的目的。

离子交换树脂法处理含铀废水具有选择性好、脱附系数高,与化学沉淀法联合使用能够达到较好的处理效果等优点,早在20世纪80年代已经在铀矿山得到实际应用。离子交换树脂法对铀的吸附过程受到液膜扩散和孔内扩散共同控制,同时动态吸附容量是静态吸附容量的1.87倍左右^[1],吸附属于吸热过程,升温有利于铀的吸附^[2]。平爱东^[3]等研究了用D231强碱性环氧系阴离子交换树脂从溶液中吸附铀。结果表明:在pH=2.0条件下树脂对铀的吸附效果最佳,吸附率达98%以上;用0.05 mol/L H_2SO_4 + 1 mol/L NH_4Cl 溶液洗脱,铀洗脱率可达98%以上;静态和动态饱和吸附容量分别为131 mg/g和162 mg/g。

对于处理成分复杂的放射性废水,由于含有 CO_3^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , SO_3^{2-} , 三乙醇胺, 机油等干扰组分,吸附效果大幅度降低。其中机油含量对铀的吸附性能的影响巨大,当其含量大于11%时,树脂几乎完全失效。对此,应考虑与其它方法联合使用,先去除废水中的干扰组分再采用离子交换树脂法处理含铀废水,预处理对于处理成分复杂的废水是一个非常重要的技术环节。

离子交换纤维与离子交换树脂相比具有比表面积大,传质距离短,吸附、解吸速度快,循环使用性能更好,来源广泛等优点,在医药、废气治理以及含重金属离子废水处理等方面具有广泛研究^[4-7]。在含铀放射性废水处理方面的研究也引起了人们的关注^[8]。李建华等^[9]采用静态吸附法和动态柱式吸附实验研究了强碱性阴离子交换纤维(简称纤-II)对含铀矿井水中铀的吸附行为。结果表明,纤-II与201×7阴离子交换树脂相比,吸附容量相当,经处理后废水中铀含量小于0.05 mg/L,达到国家排放标准,且吸附速度和洗脱速度更快。

1.3 吸附法

吸附法处理放射性废水是指用多孔性的固体吸附剂处理放射性废水,使其中所含的一种或数种元素吸附在吸附剂的表面上,从而达到去除放射性核素的目的。在放射性废水的处理中,根据吸附材料的不同,吸附剂通常包括碳材料、天然粘土矿物、天然有机物和人工制备化合物。

1.3.1 炭材料

炭质材料具有较大的比表面积和孔隙率,化学稳定性高,而且本身无毒,环境友好等优点。采用碳纤维作电极,可以从废液中将铀大量地吸附到电极表面,再通过电脱附回收铀,在工业上具有较好的应用前景^[10,11]。活性炭吸附法可以有效处理含铀放射性废水,去除率可以达到96%以上。经研究表明^[12],聚丙烯腈/有序介孔碳复合材料(PAC/CMK-3)相比于CMK-3对铀(VI)具有更强的吸附能力,pH值为5.0时,复合材料单分子层饱和吸附量由40.90 mg/g增长至220.01 mg/g,并且吸附速率更快。

1.3.2 天然粘土矿物

天然粘土矿物包括伊利石、沸石、膨润土、针铁矿和凹凸棒石矿物等,其内部拥有多孔的物理结构和有利于吸附的表面官能团,使其对放射性核素有较强的吸附能力,且其原料来源广泛,价格低廉引起了人们极大的关注。伊利石对水溶液中铀的吸附过程属于自发反应,高温可以增加伊利石的吸附特性,可用于处理低浓度的含铀放射性废水。沸石^[13]在负载了对叔丁基杯^[4]芳烃乙酸后,对溶液中铀的吸附能力显著增强,吸附率从30%左右提高到93%。最大吸附量 Q_m 从16.89 mg/g提高到32.57 mg/g,主要机理为对叔丁基杯^[4]芳烃乙酸与铀的强络合作用和Si-O和Al-O的吸附作用,其协同作用加快了吸附速率,同时增加了吸附容量。

凹凸棒石作为一种天然吸附材料,对铀有很好的吸附效果,经热处理或改性后吸附性能显著提高。采用腐殖酸(HA)修饰凹凸棒(ATP)制备得到腐殖酸/凹凸棒(HA/ATP)处理含铀废水,不仅除铀性能增加,而且经过5次循环吸附解析后对铀(VI)的去除率仍能达到96%^[14]。针铁矿(α -FeOOH)无机胶体广泛分布在土壤中,对铀具有良好的吸附性能,然而在酸性条件下其对铀的吸附效果并不理想。谢水波等^[15]通过人工合成制得腐殖酸改性针铁矿(HA- α -FeOOH)在pH为4的条件下,对5 mg/L的含铀废水的除铀率几乎达到100%,HA- α -FeOOH吸附铀(VI)的机理主要表现为内层络合及离子交换作用。

1.3.3 天然有机物

农产品废料等天然有机物作为吸附剂能够很好的处理含铀废水,其又具有成本低廉和废物利用等优势获得环保人士的青睐。以骨粉、稻秆、茶油树木屑、谷壳和榕树叶等天然有机物为吸附剂处理含铀放射性废水,处理效果良好。比如骨粉对铀吸附为

自发过程,饱和吸附容量可达 482.50 mg/g ^[16].稻秆和茶油树木屑经改性后,对溶液中铀的吸附性能大大的提高,改性稻秆对铀(VI)去除率达到 99.72%,丁二酸改性茶油树木屑对铀的最大吸附容量(Q_m)由 21.41 mg/g 提高到 31.55 mg/g ^[17-18].

1.3.4 人工制备化合物

人工合成化合物吸附剂选择性好,吸附容量大,可有针对性的合成适合特种环境的吸附材料,可控制性强,在工业生产上有极大应用的价值,已广泛应用于实际生产并在吸附处理领域发挥重要作用.磷酸二氢钠作为吸附剂可以有效去除废水中铀,去除率高达 99%以上,但其价格昂贵,有毒性,会对水体造成其它方面的污染,从而限制了它的应用.磷酸氢钙是一种常见的工业原料,其来源广泛且价格低廉,是一种无毒的环保材料,并且对铀的吸附率高达 99%,吸附容量最高可达 341.16 mg/g ,吸附速率快,具有很好的应用前景.

经研究表明^[19],相比四钛酸钾晶须处理含铀废水,零价铁和四钛酸钾晶须联合处理含铀废水的方法效果更好,可使铀浓度约为 50 mg/L 的实际铀矿山废水中铀含量降至 0.1 mg/L 左右,去除率达 99.8%,大大提高了处理含铀废水的能力.

邓文静等^[20]利用木屑制备季铵盐型螯合吸附剂(MS)研究其对铀的去除效果.正交实验结果表明:在ECH的添加量为 10 mL ,DETA 添加量 6 mL ,醚化时间为 1 h ,接枝反应时间为 4 h 时,MS 对铀(VI)的吸附率高达 99.72%,吸附容量为 99.72 mg/g .

1.4 蒸发浓缩法

含铀废水处理蒸发浓缩法是指通过加热的方法,将含铀废水中的水分蒸发掉,使含铀废液富集浓缩成少量冷凝液.使用单效蒸发器处理只含有非挥发性放射性污染物的废水时,可达到 104 以上的去污系数,而使用多效蒸发器和带有除泡沫装置的蒸发器去污系数可以达到 $106 \sim 108$.

目前我国部分矿山铀矿冶生产排放的废水,仍然采用的是天然蒸发池工艺,该工艺具有流程简单,成本低等优点,但是效率低下.逐渐被蒸发浓缩工艺所取代,为了提高蒸汽利用率,降低运行成本,提高经济效益,各国都纷纷致力于其研制事业.目前热泵蒸发工艺已经处于研发和应用阶段.

蒸发法与化学沉淀和离子交换法相比除污更彻底,效率更高,但其耗能较大,处理费用较高,不适用于

易挥发和易起泡的废水,同时蒸发器在设计和材料选择上要考虑设备存在腐蚀、结垢、爆炸等潜在的威胁.

2 新方法

2.1 生物技术

生物技术作为处理含铀放射性废水新方法,近年来发展迅速,已取得了巨大成就.主要包括微生物吸附法和植物修复法^[21,22].

2.1.1 微生物吸附

运用微生物吸附材料处理含铀放射性废水,因其具有吸附速率快,选择性好,pH 值和温度要求区间宽,原料来源广泛,且没有二次污染物等优点,在处理含铀放射性废水领域中受到人们越来越多的重视.耐辐射奇球菌处理含铀放射性废水,其对铀的吸附过程主要表现为离子交换和表面络合的方式,最大饱和吸附量为 240 mg/g ^[23].污泥是由水和污水处理过程所产生的固体沉淀物质,目前有研究表明^[24-26],厌氧颗粒污泥,粉末活性污泥和硫酸盐还原菌颗粒污泥作为生物吸附剂能够很好的吸附溶液中铀(VI),其作用机理主要表现为离子交换吸附.其中硫酸盐还原菌颗粒污泥处理含铀废水,20 h 内对铀(VI)的去除率达到 100%,微氧条件下对铀(VI)的去除率也达到 98.89%.

邓钦文等^[27]探讨了大肠杆菌 JM109 去除含铀废水的试验研究,结果表明该微生物具有较强的吸附铀的能力,其中对处理低浓度的含铀废水方面潜力较大.在最优条件下,吸附量最高达到 693.8 mg/g ,吸附过程符合准二级动力学模型.

马佳林等^[28]开展了酵母菌,枯草芽孢杆菌和小球藻对水体中铀(VI)的吸附性能及机理研究.实验结果列于表 1.结果表明,3 种微生物对铀都具有较好的吸附效果,去除率均在 97.13%以上.其中枯草芽孢杆菌对铀(VI)的最佳吸附率为 98.03%,最大吸附容量高达 512.5 mg/g .

表 1 三种微生物对铀的吸附

Tab.1 Three microorganisms adsorption of uranium

微生物	最佳 pH	最佳吸附率 /%	最大吸附量 /(mgU/g)
酵母菌	6	97.19	341.2
小球藻	6	97.13	356.5
枯草芽孢杆菌	5	98.03	512.5

2.1.2 植物修复

植物修复法是一种以植物忍耐、分解或超量积累某些化学元素的生理功能为基础,利用植物及其共存微生物体系来吸附、降解、挥发和富集环境中污染物的环境污染治理方法.具有能耗低,费用低廉,处理低水平污染物的高效性,金属可恢复性,易于实施和对环境扰动小等优点.这些优点决定了植物修复法可适用于大面积水污染的修复治理,因此在水体污染的修复中受到了广泛关注.有研究表明,水莎草、牧草、美洲商陆、榨菜、印度芥菜等均具有较强的富集铀的能力,被广泛的用于研究铀污染土壤的修复.对于含铀废水的研究,聂小琴等^[29]通过室内水培和静态吸附实验,研究了铀矿区土著水生植物大藻和凤眼莲对真实铀矿坑水和不同铀浓度水中铀的去除能力.结果表明,活体大藻和凤眼莲可以有效处理低浓度含铀放射性废水,均可使初始浓度低于 4.5 mg/L 的含铀废水经处理后达到国家规定外排标准.

胡南等^[30]研究了铀在植物—微生物共生体系满江红中的分布,结果表明,微生物满江红鱼腥藻和蕨类植物满江红都参与了去除水体中铀的过程.

张如金等^[31]研究甲酸、苹果酸和柠檬酸三种酸处理下浮萍对铀吸附作用的影响.通过空白对照试验表明,三种酸处理下的浮萍对铀的饱和吸附量明显提高,其中以 0.4×10^{-5} mol/mL 甲酸处理下的浮萍吸附效果最佳.由于浮萍广泛分布于湖泊、河流,来源丰富,因此在处理含铀废水方面具有广阔的应用前景.

2.2 膜技术

膜分离技术是指在分子水平上不同粒径分子的混合物在通过半透膜时,实现选择性分离的技术,利用膜的“筛分”作用,从而达到物系分离的目的,技术原理如图 1 所示.

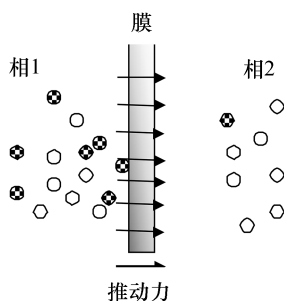


图 1 膜分离技术原理

Fig.1 Principles of membrane separation technology

现在国内外用到的膜技术主要有微滤法、超滤法、纳滤法、反渗透以及絮凝沉淀—超滤、无机离子吸附剂离子交换—超滤、水溶性多聚物络合—超滤等组合工艺.与传统工艺相比,膜分离技术在放射性废水处理方面,具有能耗低,节能环保,出水水质好,净化系数高,运行稳定可靠等优点.目前应用膜分离技术处理含 U、Cs、Am、Pu、Sr、Co 等放射性废水方面的实验研究已取得突破性进展.

Kryvoruchko 等^[32]采用络合—超滤工艺处理含铀放射性废水,以聚乙烯亚胺为络合剂,使用孔径为 0.02 μm 的聚酰胺超滤膜过滤,结果表明,在优化条件下络合物截留率最高达到 99.9%.谢水波等^[33]通过人工制备乙基纤维素/海藻酸钠 (HE/SA) 高分子复合多孔膜,探讨了其对模拟含铀放射性废水中铀(VI)的吸附特性.结果表明,吸附机理主要表现为颗粒内部扩散和离子交换作用,最大吸附容量达 357.1 mg/g.国外核电厂废水处理以超滤作为预处理手段,联合离子交换或反渗透技术来处理放射性废水,进一步降低了放射性废水的浓度和二次废物体积,不仅减轻了环保压力,也带来了很好的经济效益和社会效益,这些革新性的放射性废水处理技术为我国核设施放射性废水的处理提供新的思路.

2.3 分子筛除铀法

NaY 型分子筛是近些年来开发的新型分子筛无机微孔材料,被广泛应用于吸附、催化和离子交换等领域.以粉煤灰为原料,采用超声辅助碱熔水热法制备 NaY 型纳米分子筛对铀、锶和铯具有较好的吸附性能,在 100 mg/L 的含铀溶液,在 pH=4 的条件下震荡吸附 20 min,分子筛对铀的吸附容量即可达到 21.23 mg/g^[35].由于分子筛来源广泛,价格便宜,吸附容量大以及可多次重复使用等优点,引起了相关工作的高度关注.

2.4 沥青铀矿结晶法

借鉴天然沥青铀矿的形成条件,按照核废物安全回归自然的思想,在传统净化处理技术的基础上,提出了一种新的除铀方法—沥青铀矿结晶法.它是指通过向含铀废液中加入化学物质来改变铀的价态,使之与氧有效结合形成比较稳定的沥青铀矿的方法,从而达到处理含铀废液的目的.崔春龙等^[34]探讨了在不同物化条件下,沥青铀矿结晶法处理含铀废液的特性.结果表明,升高温度、降低 Eh 有

利于提高除铀速度以及除铀效率,在物理化学条件为 $\text{pH}=3$ 、 $T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $E_h=+61.1\text{ mV}$ 时,溶液中铀元素主要形成 UO_2 和 UO_3 以沥青铀矿的形式析出,除铀率高达 99.6%,效果良好。

3 结束语

随着对含铀废水处理方法的不断研究,传统的处理方法由于成本高、二次污染等原因将会被取代。目前生物技术和膜技术在含铀废水领域发展十分迅速,展现出巨大的潜力,越来越受到大家的青睐,通过相关科研工作者的不断努力,已经被逐步的实用于工程实例。

特别是分子筛的应用和沥青铀矿结晶法的提出,都表现出各自的优良性能,为含铀废水处理提供了新思路,相信在不久的将来定会引起它们在放射性核素吸附方面的研究热潮。

参考文献:

- [1] 胡鄂明,张皖桂,王清良,等.离子交换树脂对铀的静态和动态吸附行为研究[J].南华大学学报(自然科学版),2015,02:42-46.
HU E-ming, ZHANG Wan-gui, WANG Qing-liang, et al. Study of Ion Exchange Resin's Static and Dynamic Adsorption Behavior for Uranium (VI) [J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2015, 02: 42-46.
- [2] Rahmati A, Ghaemi A, Samadfam M. Kinetic and thermodynamic studies of uranium (VI) adsorption using Amberlite IRA-910 resin [J]. Annals of Nuclear Energy, 2012, 39 (1): 42-48.
- [3] 平爱东,罗明标,刘建亮,等.D231 强碱性环氧系阴离子交换树脂吸附铀性能研究[J].东华理工大学学报(自然科学版),2013,01:69-75.
PING Ai-dong, LUO Ming-biao, LIU Jian-liang, et al. Study On The Properties Of D231 Strong Basic Epoxy Anion Exchange Resin For Uranium Adsorption [J]. Journal Of East China Institute Of Technology (Natural Science), 2013, 36 (1): 69-75.
- [4] Burinskii S V, Turkin E I. Fibrous sorbents for removing heavy metal compounds from waste-waters [J]. Fibre chemistry, 2008, 40(3): 198-201.
- [5] Greenleaf J E, SenGupta A K. Flue gas carbon dioxide sequestration during water softening with ion-exchange fibers [J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 135(6): 386-396.
- [6] Feng S Q, Shen X Y, Ji Y L. Submicron ion-exchange fibers of polystyrene and styrene-butadiene-styrene copolymer blends [J]. Journal of Macromolecular Science, Part B, 2011, 50(9): 1 673-1 681.
- [7] 张阳,王立升,周永红,等.离子交换纤维吸附辣椒碱的动力学[J].化工进展,2011,06:1188-1192.
ZHANG Yang, WANG Li-sheng, ZHOU Yong-hong, et al. Adsorption Kinetics Of Capsaicin On Ion Exchange Fiber [J]. Chemical Industry And Engineering Progress. 2011, 06: 1 188-1 192.
- [8] 雷云逸,林昆华,汪福顺,等.含羧基离子交换纤维合成及其对 UO_2^{2+} 的吸附性能研究[J].核技术,2009,09: 689-694.
LEI Yun-yi, LIN Kun-hua, WANG Fu-shun, et al. Synthesis Of Carboxylic Ion Exchange Fiber And Its Application In Uranium Extraction [J]. Nuclear Techniques, 2009, 09: 689-694.
- [9] 李建华,王红英,程威,等.离子交换纤维处理含铀矿井水[J].铀矿冶,2012,02:100-102.
LI Jian-hua, WANG Hong-ying, CHENG Wei, et al. Processing Of Uranium-bearing Pit Water By Ion Exchange Fibre [J]. Uranium Mining And Metallurgy, 2012, 02: 100-102.
- [10] Chakrapani G. Removal of uranium from drinking water and other aqueous systems using modified powdered activated carbon [C] // Proceedings of the Trombay symposium on desalination and water reuse: technology interventions in water purification and management challenges and opportunities. 2015.
- [11] Li Z, Chen F, Yuan L, et al. Uranium (VI) adsorption on graphene oxide nanosheets from aqueous solutions [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 210: 539-546.
- [12] 苏晓龙,杨倩,崔丹妮,等.聚丙烯腈/有序介孔碳复合材料吸附铀(VI)的性能研究[J].江西化工,2015,02:89-94.
SU Xiao-long, YANG Qian, CUI Dan-ni, et al. PAN / Ordered Mesoporous Carbon Composite Material Properties Of Adsorption Of Uranium (VI) [J]. Jiangxi Chemical, 2015, 02: 89-94.
- [13] 张晓峰,陈迪云,彭燕,等.沸石负载对叔丁基杯[4]芳烃乙酸对铀的吸附行为[J].中国环境科学,2015,06:1686-1692.
ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, et al. Adsorption Behavior Of Uranium By Zeolite Loaded With Pcalix [4] arene Acetate [J]. China Environmental Science, 2015, 06: 1 686-1 692.
- [14] 蒋海燕,张伟,周书葵,等.腐殖酸修饰凹凸棒对 U(VI) 的吸附性能及机理[J].环境工程学报,2015,02:

- 705-710.
- JIANG Hai-yan, ZHANG Wei, ZHOU Shu-kui, et al. Adsorption Properties And Mechanism Of U(VI) Onto Humicacid/Attapulgite Composites [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 02: 705-710.
- [15] 谢水波,冯敏,杨金辉,等.腐殖酸改性针铁矿对铀(U(VI))的吸附性能及机理研究[J].环境科学学报, 2014, 09: 2 271-2 278.
- XIE Shui-bo, PENG Min, YANG Jin-hui, et al. Adsorption Of U(VI) By Humic Acid-modified Goethite And Its Mechanism [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 09: 2 271-2 278.
- [16] 王攀峰,聂文斌,花榕,等.骨粉对放射性废水中钍的吸附行为研究[J].原子能科学技术, 2015, 07: 1 165-1 169.
- WANG Pan-feng, NIE Wen-bin, HUA rong, et al. Study On Adsorption Of Thorium From Radioactive Wastewater Onto Bone Powder [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 07: 1 165-1 169.
- [17] 肖益群,周彦同,夏良树,等.改性稻秆吸附U(VI)的特性研究[J].核化学与放射化学, 2015, 01: 51-57.
- XIAO Yi-qun, ZHOU Yan-tong, XIA Liang-shu, et al. Adsorptive Characteristic Of U(VI) By Modified Rice Stem [J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2015, 01: 51-57.
- [18] 张晓峰,陈迪云,彭燕,等.丁二酸改性茶油树木屑吸附铀的研究[J].环境科学, 2015, 05: 1686-1693.
- ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG yan, et al. Adsorption Of Uranium With Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid [J]. Environmental Science, 2015, 05: 1 686-1 693.
- [19] 彭燕,陈迪云,张志强.零价铁-四钛酸钾晶须处理铀矿山废水[J].环境工程, 2014, 03: 15-56.
- PENG Yan, CHEN Yun-di, ZHANG Zhi-qiang. Combined Treatment Of Uranium Mine Wastewater By Zero-valent Iron And Potassium Tetratitanate Whisper [J]. Environmental Engineering, 2014, 03: 15-56.
- [20] 邓文静,周书葵,刘迎九,等.木屑季铵螯合吸附剂的制备及其吸附铀矿酸法废水中U(VI)[J].中国有色金属学报, 2015, 09: 2604-2611.
- DENG Wen-jing, ZHOU Shu-kui, LIU Ying-jiu, et al. Preparation Of Quaternary Ammonium Salt Modified Sawdust Chelate Adsorbent And Its U(VI) Adsorption In Wastewater From Uranium Milling Plant [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 09: 2604-2611.
- [21] Williams K H, Bargar J R, Lloyd J R, et al. Bioremediation of uranium-contaminated groundwater: a systems approach to subsurface biogeochemistry [J]. Current opinion in biotechnology, 2013, 24(3): 489-497.
- [22] Giloteaux L, Holmes D E, Williams K H, et al. Characterization and transcription of arsenic respiration and resistance genes during in situ uranium bioremediation [J]. The ISME journal, 2013, 7(2): 370-383.
- [23] 杨杰,董发勤,代群威,等.耐辐射奇球菌对放射性核素铀的吸附行为研究[J].光谱学与光谱分析, 2015, 04: 1 010-1 014.
- YANG Jie, DONG Fa-qin, DAI Qun-wei, et al. Biosorption Of Radionuclide Uranium By Deinococcus Radiodurans [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 04: 1 010-1 014.
- [24] 陈华柏,谢水波,刘金香,等.粉末活性污泥处理含铀废水的特性[J].环境工程学报, 2015, 03: 1 141-1 147.
- CHEN Hua-bai, XIE Shui-bo, LIU Jin-xiang, et al. Adsorption Characteristics Of Uranium By Powdered Activated Sludge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 03: 1 141-1 147.
- [25] 谢水波,陈胜,马华龙,等.硫酸盐还原菌颗粒污泥去除U(VI)的影响因素及稳定性[J].中国有色金属学报, 2015, 06: 1 713-1 720.
- XIE Shui-bo, CHEN Sheng, MA Hua-long, et al. Influence Factors And Stability Of U(VI) Removal By Sulfate Reducing Bacteria Granular Sludge [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 06: 1 713-1 720.
- [26] 陈华柏,谢水波,刘金香,等.厌氧颗粒污泥吸附铀(VI)的特性与机理[J].中国有色金属学报, 2014, 09: 2 418-2 425.
- CHEN Hua-bai, XIE Shui-bo, LIU Jin-xiang, et al. Characteristics And Mechanism Of Uranium(VI) Absorbed By Anaerobic Granular Sludge [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 09: 2 418-2 425.
- [27] 邓钦文,王永东,吕俊文,等.大肠杆菌JM109对废水中铀(VI)的吸附实验研究[J].南华大学学报(自然科学版), 2014, 01: 29-33.
- DENG Qin-wen, WANG Yong-dong, LV Jun-wen, et al. Study on Adsorption Uranium(VI) in Water by Escherichia coli JM109 [J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2014, 01: 29-33.
- [28] 马佳林,聂小琴,董发勤,等.三种微生物对铀的吸附行为研究[J].中国环境科学, 2015, 03: 825-832.
- MA Jia-lin, NIE Xiao-qin, DONG Fa-qin, et al. The Adsorption Behavior On Uranium By Three Kinds Of Microorganisms [J]. China Environmental Science, 2015, 03: 825-832.
- [29] 聂小琴,丁德馨,董发勤,等.水生植物大藻和凤眼莲对

- 水中铀的去除[J].核化学与放射化学,2015,04:243-249.
- NIE Xiao-qin,DING De-xin,DONG Fa-qin,et al.Uranium Removal From Water By Pistia Stratiotesl And Eichhornia Crassipes [J]. Journal of Nuclear And Radiochemistry, 2015,04:243-249.
- [30] 胡 南,丁德馨,潘长春,等.铀在植物—微生物共生体系满江红体内的分布[J].南华大学学报(自然科学版),2014,04:18-22.
- HU Nan, DING De-xin, PAN Chang-chun, et al. Distribution Of Uranium In The Plant-microbe Symbiotic System-Azolla Imbircata[J].Journal of University Of South China(Science and Technology),2014,04:18-22.
- [31] 张如金,王 帅,胡永林,等.三种酸处理下浮萍对铀吸附作用的研究[J].江西化工,2014,04:84-86.
- ZHANG Ru-jin,WANG Shuai,HU Yong-lin,et al.A Study On Application Of Adsorption On Uranium Palayed By Duckweed With The Help Of Three Kinds Of Acid [J]. Jiangxi Chemical,2014,04:84-86.
- [32] Kryvoruchko A P,Yurlova L Y,Atamanenko I D,et al.Ultrifiltration removal of U (VI) from contaminated water [J].Desalination,2004,162: 229-236.
- [33] 谢水波,罗景阳,刘 清,等.羟乙基纤维素/海藻酸钠复合膜对六价铀的吸附性能及吸附机制[J].复合材料学报,2015,01:268-275.
- XIE Shui-bo, LUO Jing-yang, LIU Qing, et al. Adsorption Characteristics And Mechanism Of Hydroxyethyl Cellulose/sodinm Alginate Blend Films For Uranimn[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2015,01:268-275.
- [34] 崔春龙,李 强,王晓丽,等.模拟含铀废液的除铀方法与效果[J].环境工程学报,2015,01:145-149.
- CUI Chun-long,LI Qiang,WANG Xiao-li,et al.Technique And Effect Of Removing Uranium From Simulant Uranium-bearing Wastewater[J].Chinese Journal Of Environmental Engineering,2015,01:145-149.
- [35] 范培培.NaY 型纳米分子筛的制备及其对铀、镭、铯吸附性能的研究[D].东华理工大学,2012.
- FAN Pei-pei.Study On The Preparation And Adsorption Properties Of NaY Zeolite To UO_2^{2+} , Sr^{2+} And Cs^+ [D]. East China Institute Of Technology,2012.

A Study on the Research Progress in Treatment of Uranium-bearing Wastewater

HU E-ming¹, SHAO Er-yan¹, ZHAO jing²

(1. Key Discipline Laboratory for National Defense for Biotechnology in Uranium Mining and Hydrometallurgy, University of South China, Hengyang 4210012, China; 2. The complex Lab of Fuyang Entry-exit Inspection And Quarantine Bureau, Fuyang 236000, China.)

Abstract: With the rapid development and application of nuclear energy, the environmental pollution caused by the uranium containing radioactive wastewater is getting wors and worse, which will also have a negative impact on human health and the environment protection. Therefore, the effective governance of the uranium containing radioactive wastewater has attracted more and more attention. In this paper, This study gives an overview of many traditional methods, like chemical precipitation method, adsorption method, ion exchange method, and some new methods, like biotechnology and membrane technology, which was applied to solving the uranium-containing waste water. When it comes to radioactive nuclide uranium, the crystallization process and the adsorption function conducted by molecular sieve have also paved the way for the study on treatment of uranium-bearing wastewater. 1fig., 1tab., 35refs.

Keywords: uranium containing radioactive wastewater ; research progress; treatment technoiogy

Biography: HU E-ming (1972-), male, Taojiang County of Hunan Province, master, associate professor, major research on solution leaching, hydrometallurgy, radioactive wastewater and waste residue treatment.