

含 Ce(IV) 去污工艺产生废液的安全性分析和处理方法

刘志辉¹, 张涛革², 李小龙¹, 何 玮¹, 张 敏^{1,*}

1. 环境保护部 核与辐射安全中心, 北京 100082; 2. 中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006

摘要: 含 Ce(IV) 去污工艺是将强氧化剂 Ce(IV) 作为去污剂实施去污技术的统称, 其为高效的放射性污染金属去污工艺。但其产生的废液存在残留的 Ce(IV) 腐蚀处理设备、 NH_3 释放影响环境和人体健康、含有的有机质影响后续处理工艺等问题。本工作结合 $\text{Ce(IV)}/\text{HNO}_3$ 、氧化凝胶和氧化泡沫等去污技术, 对去污废液安全问题与处理方法进行了初步研究。研究表明, 通过还原法可去除废液中残留的 Ce(IV) 、加热煮沸可有效去除 NH_3 、臭氧氧化处理工艺能显著破坏分解废液中含有的有机质, 进而提高去污废液的安全性。

关键词: Ce(IV) ; 去污; 废液; 安全

中图分类号: TL944 文献标志码: A 文章编号: 0253-9950(2014)02-0109-06

doi: 10.7538/hhx.2014.36.02.0109

Safety Analysis and Treatment of Liquid Waste Produced by Decontamination Process Using Ce(IV)

LIU Zhi-hui¹, ZHANG Tao-ge², LI Xiao-long¹, HE Wei¹, ZHANG-Min^{1,*}

1. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China;

2. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China

Abstract: Decontamination process using Ce(IV) is a general term of technique applying one strong oxidizing agent (Ce(IV)) to decontamination, which is of high efficiency to decontaminate metals polluted by radionuclide. The liquid waste contains Ce(IV) , which has the potential risk of corroding equipment, releases NH_3 to endanger environment and human health, and the organics in which affect the following treatment process, and so on. This primary study is on safety and treatment of liquid waste from decontamination, in connection with such decontamination process as $\text{Ce(IV)}/\text{HNO}_3$, oxidizing gels, oxidizing foam. The result shows Ce(IV) remains can be eliminated by reduction method, problem of NH_3 release can be solved by heating, and organics can be decomposed by ozone oxidation method, so as to make liquid waste more safe.

Key words: Ce(IV) ; decontaminate; liquid waste; safety

收稿日期: 2013-06-03; 修订日期: 2013-08-20

作者简介: 刘志辉(1976—), 男, 河北蠡县人, 硕士, 副研究员, 主要从事放射性废物管理研究及审评工作

* 通信联系人: 张 敏(1982—), 男, 山西太原人, 硕士, 工程师, 主要从事核燃料循环设施审评工作, E-mail: zhangmin_ciae@163.com

去污是核设施退役十分重要的活动,具有降低放射性水平、减少工作人员的受照剂量、保护公众和环境等作用;但去污并未从根本上消除放射性核素,只是放射性核素存在的位置或方式发生了改变;同时,去污过程不可避免的会产生二次废物^[1]。

去污方法通常可分为机械-物理法、化学法、电化学法、生物法、熔炼法等。含四价铈(Ce(IV))去污工艺是指将强氧化剂 Ce(IV) 作为去污剂实施去污技术的统称,如 $\text{Ce(IV)}/\text{HNO}_3$ 去污技术、氧化凝胶去污技术、氧化泡沫去污技术等^[2]。其为高效化学法去污工艺,可用于核设施退役放射性污染金属废物的深度去污和实现 α 废物的非 α 化,具有快速、高效、二次废物产生量少的特点,是实践放射性废物最小化原则的首选技术之一。该类技术在国外,如美国、法国、比利时和日本等,都进行过大量研究,有些国家已实现了工程化应用^[2]。近年来,我国在含 Ce(IV) 去污工艺研究与应用方面开展了大量工作,并取得了可喜的成果^[3-7]。

强氧化性是含 Ce(IV) 去污工艺的突出特点之一,也是其技术优势的关键所在。含 Ce(IV) 去污工艺是利用酸性介质(如硝酸溶液)中 Ce(IV) 的强氧化性,可将不锈钢或其它金属表面氧化层或金属基体溶解从而实现去污^[4]。但去污后未反应的 Ce(IV) 等将残留于废液中,对后续放射性废液贮存设备和处理设施的安全构成威胁。同时,为实现含 Ce(IV) 去污工艺良好的可操作性和二次废液产生量最小化,通常为强氧化性去污剂 Ce(IV) 提供良好载体,如凝胶、泡沫,在实现去污效果最大化的情况下,势必引入一定量的有机质,如增稠剂、发泡剂等,为后续废液的处理造成影响。

本工作拟结合 $\text{Ce(IV)}/\text{HNO}_3$ 、氧化凝胶和氧化泡沫等三项去污技术的工艺特点,就去污废液安全问题与处理方法进行初步分析和探讨。

1 含 Ce(IV) 去污工艺

1.1 $\text{Ce(IV)}/\text{HNO}_3$ 去污工艺

$\text{Ce(IV)}/\text{HNO}_3$ 去污工艺是利用 HNO_3 介质载带强氧化剂 Ce(IV) ,通过闭路循环或槽式浸泡方式,实现对金属管路或离散污染件的氧化腐蚀,随着金属表面的溶解,附着在其上的放射性污染物也进入溶液,从而达到去污目的。该工艺常用

于核设施退役污染管路的在线去污或污染金属切割件的离线去污。如在我国某核设施的验证试验^[5],是将某系统的部分设备作为试验单元,经适当改造后形成一个小的闭路系统,通过去污液的循环方式实现去污。

1.2 氧化凝胶去污工艺

凝胶具有触变性,在恒定剪切应力作用下,其粘度随剪切时间的增加而减小,当应力撤除后粘度可瞬间恢复并凝固。

氧化凝胶去污工艺是通过凝胶载带 Ce(IV) 去污剂,利用喷涂装置,将凝胶喷涂于待去污设备表面(如竖面、顶面等),达到作用时间后通过冲洗去除凝胶涂层,实现去污。去污原理^[6]为:当氧化凝胶粘附于金属表面时,其载带的 Ce(IV) 可氧化金属表层的 Fe 、 Cr 、 Ni 等元素,被氧化的金属元素连同附着的放射性污染物逐渐脱离金属表层而进入凝胶涂层中,从而达到去污目的。因氧化凝胶具有良好的施工性能,如触变性,常用于放射性污染金属手套箱、热室、设备小室等内表面去污。

1.3 氧化泡沫去污工艺

氧化泡沫去污工艺是利用泡沫载带 Ce(IV) 去污剂,通过喷泡、鼓泡或充泡方式对放射性污染设备、部件进行去污。因泡沫中空气占有 90% 的体积,二次废液产生量仅为溶液浸泡法的 10%,所以此方法特别适用于大体积空腔类和结构复杂的退役核设施的去污^[7]。

2 废液安全问题分析与探讨

2.1 残留 Ce(IV) 的影响

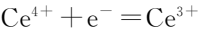
2.1.1 废液贮存与处理的安全性 少量未反应的强氧化性 Ce(IV) 残留于去污废液中是含 Ce(IV) 去污工艺的共性问题。如 $\text{Ce(IV)}/\text{HNO}_3$ 去污工艺,去污剂 Ce(IV) 的含量降低至一定比例时,需要进行更换,否则将显著影响去污效率,若将其直接输送至核设施废液处理系统时,会对贮存或后续处理设备造成严重腐蚀。对于氧化凝胶和氧化泡沫去污工艺,去污结束后,水冲洗产生的二次废液,同样存在残留 Ce(IV) 腐蚀破坏设备造成放射性污染扩散的风险。

2.1.2 处理方法探讨 消除残留 Ce(IV) 的影响,可采取回收利用 Ce(IV) 或还原的措施。由于含有残留 Ce(IV) 的废液,其 Ce(IV) 含量低、放射性污染核素的活度水平高,回收利用的难度大、代价高,通常采取直接加入还原剂将 Ce(IV) 还原为

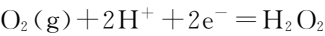
Ce(Ⅲ)的做法,如可采取过氧化氢(H₂O₂)还原法和抗坏血酸还原法。

(1) H₂O₂ 还原法

根据氧化还原反应的基本原理,氧化还原电对 的电位越高,其氧化态的氧化能力越强。一种氧化 剂可以氧化电位比它低的还原剂。据标准电极电 势表^[8],以下几个半反应的标准电极电势分别为:

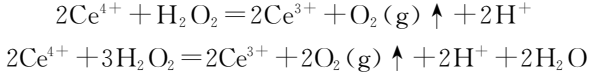


标准电极电势 $\varphi=1.61\text{ V}$,



标准电极电势 $\varphi=0.68\text{ V}$ 。

根据上述半反应可推测,H₂O₂ 与 Ce(Ⅳ)的 反应可能有以下两种:



通过 H₂O₂ 与 Ce(Ⅳ)的氧化还原滴定试验, 确定二者反应的摩尔比例。配制 $c(\text{Ce(Ⅳ)})=0.2\text{ mol/L}$ 的硝酸铈铵溶液,并由硫酸亚铁铵溶

液标定其摩尔浓度。以酸性硫酸亚铁铵标准溶液 作为滴定剂,邻菲咯啉-Fe(Ⅱ)作为指示剂,溶液 由无色或浅绿色转变为粉红色时为滴定终点。试 验中以 H₂O₂ 作为滴定剂,还原硝酸铈铵溶液中的 Ce(Ⅳ)离子。Ce(Ⅳ)离子在水溶液中为橙黄 色,而 Ce(Ⅲ)离子在水溶液中为无色,滴定过程 中当溶液由橙黄色变为无色时停止滴定,向溶液 中加邻菲咯啉-Fe(Ⅱ)指示剂(由酸性硫酸亚铁铵 溶液配制),若溶液呈粉红色,即表明已达到滴定 终点^[9]。

取一定量模拟去污废液,并测定其中残留 Ce(Ⅳ)浓度。根据 H₂O₂ 与 Ce(Ⅳ)反应的比例向 模拟废液中加入 H₂O₂,验证模拟去污废液中残留 Ce(Ⅳ)是否被全部还原,实验结果列于表 1。由 表 1 结果可知,硝酸铈铵与 H₂O₂ 反应的物质的 量比为 1.9:1。据此结果可以推测硝酸铈铵溶液 中 Ce(Ⅳ)与 H₂O₂ 的反应比例约为 2:1,反应式应为 $2\text{Ce}^{4+} + \text{H}_2\text{O}_2 = 2\text{Ce}^{3+} + \text{O}_2(\text{g}) \uparrow + 2\text{H}^{+}$ 。

表 1 H₂O₂ 还原 Ce(Ⅳ)试验结果
Table 1 Results of redox-reaction between H₂O₂ and Ce(Ⅳ)

No.	$c(\text{Ce(Ⅳ)})/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$V(\text{Ce(Ⅳ)})/\text{mL}$	$V(\text{H}_2\text{O}_2)/\text{mL}$	$n(\text{Ce(Ⅳ)})/\text{mol}$	$n(\text{H}_2\text{O}_2)/\text{mol}$	$n(\text{Ce(Ⅳ)}) : n(\text{H}_2\text{O}_2)$
1	0.199 9	20.00	3.62	0.004	0.002 1	1.9:1
2	0.199 9	20.00	3.61			
3	0.199 9	20.00	3.60			
4	0.199 9	20.00	3.59			
5	0.199 9	20.00	3.58			
6	0.199 9	20.00	3.59			

由于氧化还原滴定过程中,作为滴定剂的 H₂O₂ 会稍稍过量,因此试验获得的 Ce(Ⅳ)与 H₂O₂ 反应的摩尔比(1.9:1)略低于理论反应比 例(2:1)。硝酸铈铵溶液中存在 NO₃⁻ 在较强酸 性条件下($c(\text{HNO}_3)=2\text{ mol/L}$)具有氧化性,会 氧化一部分 H₂O₂。因此,在实际废液处理过程 中考虑加入过量的 H₂O₂。

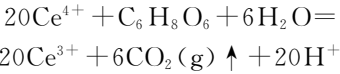
模拟废液预处理试验过程中,按照 1 mol H₂O₂ 还原 2 mol Ce(Ⅳ)的比例,一次性过量加入 工业 H₂O₂ 溶液时,去污废液中残留的 Ce(Ⅳ)可 很快全部被还原,去污废液由黄色变为浅绿色,去 污废液表面只产生少量小气泡。该结果表明,当 去污液丧失去污能力时,还原残留的 Ce(Ⅳ)所需 工业 H₂O₂ 的量较少,因此在保证 H₂O₂ 与所有 去污废液充分混合的前提下,可一次性加入还原

剂,该操作不会因反应激烈而产生大量气泡。

(2) 抗坏血酸还原法

抗坏血酸具有较强的还原性,长期暴露在空气 中易被氧化,在微酸性水溶液中易被氧化为去氢抗 坏血酸。抗坏血酸分解后的产物呈黄色且成分复 杂^[10]。前人对抗坏血酸的稳定性研究做过大量工 作。鉴于抗坏血酸易被还原的特性,试验过程中用 碘标准溶液对抗坏血酸的有效含量进行标定^[11]。

在酸性溶液中 Ce(Ⅳ)的氧化能力较强,假设 Ce(Ⅳ)能够将抗坏血酸完全氧化,则二者可能发 生的反应为:



通过抗坏血酸与 Ce(Ⅳ)的氧化还原滴定试 验,确定二者反应的摩尔比例关系。为了使抗坏

血酸与 Ce(Ⅳ)尽可能的充分反应,滴定过程中利用磁力搅拌器搅拌溶液,以加快反应速度。滴定过程中选抗坏血酸溶液为滴定剂,滴定硝酸铈铵溶液,在 Ce(Ⅳ)相对过量的状态下利于抗坏血酸完全氧化。滴定终点的判断方法同 H₂O₂ 还原 Ce(Ⅳ)试验。

滴定前需测定抗坏血酸的有效含量^[12]。用浓度为 0.05 mol/L 的抗坏血酸标准溶液滴定 0.1 mol/L 的硝酸铈铵溶液。当溶液由橙黄色变为无色时停止滴定,向溶液中加入邻菲咯啉-Fe(Ⅱ)指示剂,若溶液呈粉红色,即表明已达到滴定终点。

取一定量模拟去污废液,并用滴定法测定其

中残留 Ce(Ⅳ)浓度。根据抗坏血酸与 Ce(Ⅳ)反应的比例向模拟废液中加入抗坏血酸,验证预模拟去污废液中残留 Ce(Ⅳ)是否被全部还原,结果列于表 2。由表 2 结果可知,硝酸铈铵与抗坏血酸反应的摩尔比例为 6 : 1。假设抗坏血酸在与 Ce(Ⅳ)的反应过程中被完全氧化且产物为 CO₂ 和 H₂O 时,硝酸铈铵与抗坏血酸反应的摩尔比例应为 20 : 1。据此可以推断硝酸铈铵与抗坏血酸氧化还原反应过程中,抗坏血酸并没有被完全氧化为 CO₂ 和 H₂O。因此,虽采用抗坏血酸处理去污废液中残留 Ce(Ⅳ),能够将其有效还原,但会在废液中引入有机物杂质。

表 2 抗坏血酸还原 Ce(Ⅳ)试验结果
Table 2 Results of redox-reaction between Vc and Ce(Ⅳ)

No.	$c(\text{Ce(Ⅳ)})/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$V(\text{Ce(Ⅳ)})/\text{mL}$	$V(\text{Vc})/\text{mL}$	$n(\text{Ce(Ⅳ)})/\text{mol}$	$n(\text{Vc})/\text{mol}$	$n(\text{Ce(Ⅳ)}) : n(\text{Vc})$
1	0.099 1	30.00	10.15	0.003	0.000 5	6 : 1
2	0.099 1	30.00	10.16			
3	0.099 1	30.00	10.22			
4	0.099 1	30.00	10.20			
5	0.099 1	30.00	10.18			
6	0.099 1	30.00	10.17			

由于抗坏血酸还原 Ce(Ⅳ)的反应速率比 H₂O₂ 反应速率慢,模拟去污废液中 Ce(Ⅳ)浓度已经较低,因此在用抗坏血酸还原处理模拟去污废液时,抗坏血酸反应不明显,废液颜色短时间内没有明显变化。

2.2 废液中 NH₄⁺ 影响

2.2.1 安全分析 含 Ce(Ⅳ)去污工艺中,去污剂 Ce(Ⅳ)是以硝酸铈铵化合物的形态加入,进而在酸性介质、凝胶或泡沫中表现为离子态,利用其强氧化性腐蚀金属基层,最终实现放射性污染物的去除。在去污作用过程中,Ce(Ⅳ)离子随去污作用的进行,其含量降低,但 NH₄⁺ 量基本保持不变,且最终全部进入二次废液中。鉴于 NH₄⁺ 的特性,去污废液贮存、处理过程中可能有 NH₃ 气释放,造成工作环境污染,对作业人员的健康构成影响。

2.2.2 NH₄⁺ 测定及处理措施探讨 含 Ce(Ⅳ)去污工艺去污产生的废液中 NH₄⁺ 含量的测定,是采取相应处理措施降低或消除其影响的基础。试验采用蒸馏中和滴定法^[13]测定模拟去污废液中铵的含量:将模拟去污废液置于烧瓶中,用

H₂O₂ 还原其中残留的 Ce(Ⅳ),并用氢氧化钠溶液和 1% 盐酸溶液将 pH 值调节至 6.0~7.4,加入少许沸石,加入氧化镁使其呈微碱性,加热蒸馏,释放的氨气由硼酸溶液吸收。移取 50 mL 硼酸-指示剂溶液,放在接收瓶内,确保冷凝管出口在硼酸溶液液面以下。蒸馏时,馏出液速度控制为 10 mL/min,接收到 200 mL 时停止蒸馏。以甲基红-甲基蓝为指示剂,用盐酸标准溶液滴定馏出液中的铵含量,滴定到溶液显紫色即为终点。滴定前用基准无水碳酸钠标定配制的盐酸标准溶液的浓度。模拟去污废液中铵氮质量浓度($\rho(\text{N})$, mg/L)用以下公式计算:

$$\rho(\text{N}) = (V_2 - V_1) / V_0 \times c(\text{HCl}) \times 14.01 \times 1\,000$$
式中: V_0 ,废液样品的体积, mL; V_1 ,试样滴定所消耗的盐酸标准溶液的体积, mL; V_2 ,空白试验滴定所消耗盐酸标准溶液的体积, mL; $c(\text{HCl})$,盐酸标准滴定液的浓度, mol/L; 14.01,氮的相对原子质量, g/mol。不同 pH 条件下去污废液中铵去除率的实验结果列于表 3。表 3 结果表明,在溶液 pH=11.5~12、废液煮沸时间为 20~30 min 时,废液中铵去除率较高。废液中铵去除率随溶

表 3 去污废液中铵去除率的测定结果
Table 3 Removal rate of ammonium in consumed stimulant Ce(Ⅳ)/HNO₃ solution

煮沸时间 (Boiling time)/min	不同 pH 下铵的去除率(Removal rate of ammonium under different pH)/%						
	10.05	10.85	11.00	11.50	12.00	12.50	13.00
30	90.8	91.1	95.8	99.2	99.9	-	-
20	88.1	-	94.7	95.8	99.7	-	-
10	78.9	-	82.3	86.9	93.8	95.8	-
5	-	-	-	-	87.2	88.5	89.8

液 pH 值变化较小。

基于上述试验结果,含 Ce(Ⅳ)去污产生的废液中 NH₄⁺ 的去除,可考虑加热-蒸馏法,其具有工艺简单、成本低且无需外加剂的优势。但对于传统工业废水中高浓度氨氮的去除方法较多^[14-15],如吹脱工艺、沸石吸附、化学沉淀、反渗透、蒸馏等。因而在实际应用时,应结合核设施现场条件,开展验证试验,以确定适宜的处理工艺和参数。

2.3 有机质的影响

2.3.1 残余有机质对废液处理工艺的影响 为了提高氧化凝胶的触变性,需要添加一定量的增稠剂;氧化泡沫技术的优势为优良的发泡效果,大大降低了二次废液的产生量,但势必引入发泡剂等有机质。无论是增稠剂,还是发泡剂,其不但影响了废液的处理工艺(如产生泡沫影响处理效果),还可导致去污废液的化学需氧量(COD)显著增高,处理后无法满足排放要求。

2.3.2 残余有机质的处理 含 Ce(Ⅳ)去污工艺产生废液中有机质的处理可采用臭氧氧化法。该方法在生活污水、工业废水处理方面的应用发展迅速。国外,有将臭氧氧化技术用于破坏分解表面活性剂的实例。臭氧为自然界存在的强氧化剂之一,其在水中的氧化还原电位为 2.07 V,具有较强的氧化分解能力,可将有机质最终氧化分解为 CO₂ 和 H₂O 等无机物。用臭氧氧化处理含有有机质废液具有氧化能力强、无有害物质形成、原料为空气、二次废物产生量小等特点^[16]。以泡沫去污废液为例,试验研究臭氧氧化法破坏分解含 Ce(Ⅳ)去污废液中的有机质。依据泡沫去污过程中使用的有机质量配制模拟去污废液,以化学需氧量表征废液中有机质的含量,其初始值为 9 860 mg/L。试验废液用量为 40 L,处理方式为 8 h/d(间歇式),O₃ 质量浓度为 75~83 g/m³,流

量约为 6 L/min。反应器为 φ300 mm 有效容积为 200 L 的有机玻璃柱,试验结果示于图 1。图 1 结果表明:臭氧氧化法可有效去除废液中残余的有机质,88 h 处理时间内,COD 值由 9 860 mg/L 降至约 152 mg/L,有机质的去除率高达约 98%,剩余的有机质已不足以影响核设施废液处理系统对凝胶、泡沫废液的处理。同时,处理后的废液中 COD 含量低于我国《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)规定的三级标准限值^[17](COD 的最高允许排放质量浓度为 500 mg/L);若放射性核素的活度水平满足要求,进而可考虑实施排放。

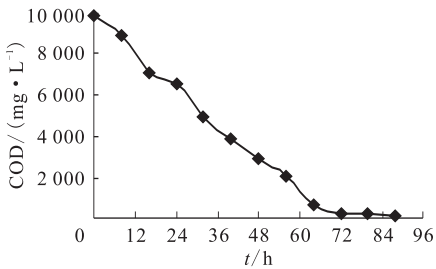


图 1 去污废液中有机质的处理情况
Fig. 1 Degradation of organics of decontaminating liquid waste containing Ce(Ⅳ)

3 结 论

含 Ce(Ⅳ)去污工艺产生的废液均存在残留 Ce(Ⅳ)对贮存或处理设施的腐蚀问题,采用 H₂O₂ 或抗坏血酸还原法可实现残留 Ce(Ⅳ)的处理,消除其影响,保证后续放射性废物处理设施的安全。按 1 mol H₂O₂ 还原 2 mol Ce(Ⅳ)的比例加入 H₂O₂ 时,模拟去污废液中残留的 Ce(Ⅳ)全部被还原至 Ce(Ⅲ);而与抗坏血酸反应的摩尔比例为 6 : 1,抗坏血酸还原 Ce(Ⅳ)的反应速度相对

较慢,并且抗坏血酸的氧化产物较为复杂,会在废液中引入有机物杂质。为此,推荐 H_2O_2 还原法处理去污废液中残留的 $\text{Ce}(\text{IV})$,以消除腐蚀影响,保证废液贮存或处理设备的安全。

废液中含有的 NH_4^+ ,在后续贮存、处理过程中可能有 NH_3 气释出,对环境和人员构成影响。将废液 pH 值调节为 11~12,加热煮沸 20~30 min,废液中铵的去除率高达 90% 以上,可显著降低或消除废液处理过程中 NH_3 释放,保证作业人员的安全。

废液中残留的有机质,如发泡剂,对后续废物处理工艺构成影响。采用臭氧氧化法处理工艺,88 h 处理时间内,初始 COD 值由 9 860 mg/L 降至约 152 mg/L,可有效去除废液中的有机质,降低其影响,即减弱或消除废液处理过程中的发泡现象,且可避免放射性活度浓度处理达标时因 COD 超标无法排放的问题。

参考文献:

- [1] 罗上庚,张振涛,张华.核设施与辐射设施的退役[M].北京:中国环境科学出版社,2010:74-76.
- [2] Ponnet M, Klein M, Rahier A. 使用四价铈和臭氧的化学去污工艺 MEDOC:从实验室和中间试验到工业应用[J]. 国外核动力,2000(6):31-39.
- [3] 张渊,任宪文,黄毓英,等.放射性污染不锈钢设施的铈硝酸氧化法去污技术研究[C]//中国核学会核设施退役技术经验交流会议论文集. 张家界:中国核学会,2001:65-70.
- [4] 马鹏勋,张涛革,武明亮,等. $\text{Ce}(\text{IV})$ /硝酸去污技术工程应用安全性初步研究[J]. 辐射防护,2007,27(6):229-335.
- [5] 马鹏勋,任宪文,武明亮. $\text{Ce}(\text{IV})/\text{HNO}_3$ 去污技术现场验证试验[C]//全国核与辐射设施退役学术交流会议论文集. 绵阳:中国核学会,2007:94-101.
- [6] 刘志辉,王永仙,梁宇,等. 氧化凝胶去污技术初步研究[M]//中国核科学技术进展报告:核化工分卷. 北京:原子能出版社,2009:82-88.
- [7] 郭强,任宪文,谢建勋,等. 模拟后处理厂污染样品的泡沫去污技术研究[J]. 辐射防护,2001,21(4):250-254.
- [8] 彭崇慧,冯建章. 定量分析化学简明教程[M]. 第二版. 北京:北京大学出版社,1997:247-249.
- [9] 中华人民共和国标准. GB 3311—1982 铈铈合金中铈的测定:氧化还原容量法[S]. 北京:中国标准出版社,1982.
- [10] 袁军,郑婷婷. 抗坏血酸降解产物的色谱分析[J]. 华西药理学杂志,2001,16(4):305-306.
- [11] 马正. VC 药片中抗坏血酸含量的测定及比较[J]. 科技创新导报,2008(4):141.
- [12] 中华人民共和国标准. GB/T 15347—1994 化学试剂抗坏血酸[S]. 北京:中国标准出版社,1994.
- [13] 中华人民共和国标准. GB/T 223. 36—1994 钢铁及合金化学分析方法:蒸馏分离-中和滴定法测定氮量[S]. 北京:中国标准出版社,1994.
- [14] 刘乾亮,马军,王争辉,等. 直接接触式膜蒸馏工艺处理高浓度氨氮模拟废水中操作条件的影响[J]. 环境工程学报,2012,6(7):2237-2241.
- [15] 陈建. 物化法去除氨氮废水方法综述及工程实例[C]//2012 全国冶金节水与废水利用技术研讨会论文集. 青岛:中国金属学会,中国水利企业协会,2012:616-620.
- [16] 武明亮,周连泉,王旭东,等. 臭氧氧化法处理泡沫去污废液中有机质的初步研究[J]. 辐射防护,2012,32(1):34-39.
- [17] 中华人民共和国标准. GB 8978—1996 污水水综合排放标准[S]. 北京:中国标准出版社,1996.