

宾灯辉,朱雪梅,傅海辉,等. FCC 废催化剂中的金属污染物及其环境风险[J]. 环境工程技术学报,2019,9(4):453-459.

BIN D H, ZHU X M, FU H H, et al. The pollution characteristics and risk of main metal pollutants in spent FCC catalysts in China [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(4): 453-459.

FCC 废催化剂中的金属污染物及其环境风险

宾灯辉^{1,2}, 朱雪梅², 傅海辉^{2*}, 郝雅琼², 黄启飞², 杨延梅^{1**}, 杨子良²

1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074

2. 中国环境科学研究院土壤与固体废物研究所, 北京 100012

摘要 采集国内不同地区的 19 套流化催化裂化(FCC)装置产生的 FCC 废催化剂样品,分析其金属浓度及浸出浓度,探讨 FCC 废催化剂中的主要金属污染物、污染特性及潜在风险。结果表明:FCC 废催化剂中主要金属为镍、钒、锑、钴和锌;不同装置采集的 FCC 废催化剂中主要金属浓度与浸出浓度差别较大,其中镍、钒、锑浸出浓度较高,分别为 0.004~3.171、0.130~39.490、0.042~8.099 mg/L;FCC 废催化剂中金属浸出浓度不影响其作为危险废物填埋,而浸出 pH 过低需要进行预处理后才能进入危险废物填埋场;当 FCC 废催化剂长期堆存在地面时,锑会释放出来,危及地下水,存在一定健康风险,而镍没有类似影响。

关键词 流化催化裂化(FCC);废催化剂;金属;浸出;风险评价

中图分类号:X742 文章编号:1674-991X(2019)04-0453-07 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.2019.01.031

Pollution characteristics and risk of main metal pollutants in spent FCC catalysts in China

BIN Denghui^{1,2}, ZHU Xuemei², FU Haihui², HAO Yaqiong², HUANG Qifei², YANG Yanmei¹, YANG Ziliang²

1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

2. Research Institute of Soil and Solid Waste Management, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract The spent fluid catalytic cracking (FCC) catalysts generated from 19 FCC units in different regions of China were collected, the heavy metal contents and leaching concentrations analyzed, and the main metal pollutants, pollution characteristics and potential risks discussed. The results were as follows: The main metal pollutants in spent FCC catalyst were nickel, vanadium, antimony, cobalt and zinc. The total concentration and leaching concentration of main metal pollutants varied great among different facilities. The leaching concentration of nickel, vanadium and antimony were comparatively higher, which were 0.004-3.171, 0.130-39.490, 0.042-8.099 mg/L respectively. The metals leaching concentrations from spent FCC catalyst could meet the criteria to enter the landfills as hazardous waste, whilst the pH in leaching solution was too low to enter hazardous waste landfill which need pretreatment. If a pile of spent FCC catalyst were not environmentally managed but stored on ground for a long period, the antimony would be released, thus endangering the groundwater and leading to certain potential health risk. The nickel had no similar effect.

Key words fluid catalytic cracking (FCC); spent catalyst; metal; leaching; risk assessment

收稿日期:2018-11-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0703206);中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院委托任务项目(10010104-16-ZC0611-0063)

作者简介:宾灯辉(1993—),女,硕士研究生,主要研究方向为固体废物处理与处置,bindenghui@foxmail.com

* 通信作者:傅海辉(1986—),女,工程师,硕士,主要从事固体废物污染控制技术研究,fu_haihui123@126.com

** 责任作者:杨延梅(1975—),女,教授,博士,主要研究方向为固体废物处理处置,cqyyme@163.com

流化催化裂化(fluid catalytic cracking, FCC)工艺在石油炼制工业中占有重要地位。FCC 是现代炼油厂用来改质重质瓦斯油和渣油的核心技术,是将重质原油转化为汽油、柴油等轻质油产品的重要技术手段^[1]。FCC 是重质油在酸性催化剂、500 °C、0.1~0.3 MPa 条件下发生以裂化反应为主的一系列化学反应而生成轻质油、气体和焦炭的过程^[2]。我国 FCC 技术从 1965 年实现工业化,经过多年发展已处于国际先进水平^[3]。迄今,全国已有 150 多套不同类型的 FCC 装置^[4]。全世界石油炼制行业催化剂使用量约为 1.0×10^6 t/a,其中 FCC 催化剂占 80% 以上,我国 FCC 催化剂的使用量为 8 万~9 万 t/a,约占炼油催化剂总使用量的 70%^[5-6]。

随着 FCC 装置运行时间的增长,FCC 催化剂表面会沉积焦炭,也会沉积原料油中的镍、钒、锑、铁、钙等组分,使 FCC 催化剂活性降低,产品分布变差,选择性下降;同时,随着碱金属和碳浓度升高,水热稳定性变差,转化率降低。此时,需及时卸除催化活性低的 FCC 催化剂,补充新鲜催化剂以保持催化裂化反应的稳定^[7]。从再生器处卸除的 FCC 催化剂,除作为平衡剂再利用外,大部分只能废弃,是 FCC 废催化剂的主要来源。此外,还有产生自污染控制设施的少量 FCC 废催化剂,包括三级旋风分离器收集捕捉的部分粒径小于 20 μm 的细颗粒(即三旋细粉)和后续烟气净化过程产生的烟气脱硫脱硝渣中捕捉到的催化剂超细粉^[8]。FCC 废催化剂已于 2016 年列入新修订的《国家危险废物名录》(以下简称《名录》),但是很多企业对 FCC 废催化剂的危害成分与污染特性不甚了解,普遍认为主要污染物是镍,也有的观点认为 FCC 废催化剂中不存在氧化态镍。Garbarino 等^[9]在 FCC 废催化剂中未检出氧化态镍,认为 FCC 废催化剂表面的镍以类尖晶石结构 $\text{Ni}_x\text{Al}_2\text{O}_{3+x}$ ($x \leq 0.25$) 形态存在,本体中的镍以 $\text{Ni}_{0.25}\text{Al}_2\text{O}_{3.25}$ 形态存在。而李丹丹^[10]认为,镍在 FCC 废催化剂粒子表面(10 nm 以内)主要以氧化态镍形态存在,而在粒子内部主要以 NiAl_2O_4 的形式存在。由于再生器卸除 FCC 废催化剂为 FCC 废催化剂的主要来源,因此,选取不同装置的再生器卸除 FCC 废催化剂,研究其主要金属污染物、污染特性与其潜在风险,以期为后续的资源化利用或处理处置提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

试剂包括浓硫酸、浓硝酸、盐酸、氢氟酸、高氯酸等,均为优级纯。

仪器:AE240 型电子分析天平(梅特勒);SHZ-82A 型水平(翻转式)振荡装置(中绿实业有限公司);PB-10 型 pH 计(赛多利斯);Nissin 电热板;Agilent 7500 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,安捷伦)。

1.2 样品采集

2016 年 6 月—2017 年 6 月先后对广东、上海、湖北、江苏、安徽、河北等不同地区的石油炼化企业 19 套 FCC 装置废催化剂的产生与处理处置情况进行调研,采集了 21 个 FCC 废催化剂样品,编号为 S1~S21。现场采集的 FCC 废催化剂样品是从再生器中随机取 200~500 g 卸载到桶状/袋状容器中,温度过高的样品冷却至室温再取样。其中,2 个样品从袋装样中取样时混入了少量旋风除尘细粉(S7 和 S20),后期又重新采集再生器直接卸除的废催化剂样品。所采集样品用密封袋封装运回实验室,室内混匀,缩样至 100 g 左右,冷藏,待测。所采集样品均为极细的粉末状固态物质,颜色深浅不一,其中 S14 样品颜色最深,为深灰黑色。

1.3 样品检测

1.3.1 pH 测定

根据 HJ 557—2010《固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法》和 GB/T 15555.12—1995《固体废物 腐蚀性测定 玻璃电极法》制得 FCC 废催化剂样品的浸出液,并测定其 pH。

1.3.2 金属浓度分析

按照 HJ 766—2015《固体废物 金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》对 FCC 废催化剂样品进行消解。根据实验室实际情况,将微波消解改为电热板消解,经过比对,2 种消解方法对结果影响可忽略不计。用 ICP-MS 测定金属浓度,每个样品平行测定 3 次,取平均值。

按照 HJ/T 299—2007《固体废物浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》制备 FCC 废催化剂样品的浸出液,再根据 GB 5085.3—2007《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》附录 B“固体废物元素的测定 电感耦合等离子体质谱法”检测浸出液中的金属浓度,每个样品平行测定 3 次,取平均值。

2 结果与讨论

2.1 FCC 废催化剂 pH

FCC 废催化剂 pH 检测结果见图 1。由图 1 可见,除了 S1 和 S2 样品 pH 为 7.6 左右外,其余 FCC 废催化剂均呈弱酸性,pH 稳定在 5~6,且波动不大。由此可知,FCC 废催化剂呈弱酸性或中性,不存在强腐蚀性。这与 FCC 催化剂是酸性分子筛催化剂的特性相吻合^[11]。

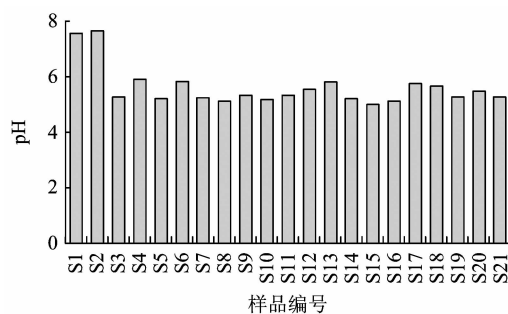


图 1 FCC 废催化剂的 pH

Fig. 1 pH of the leaching solution of spent FCC catalysts

2.2 FCC 废催化剂中特征金属及其污染特性

2.2.1 特征金属筛选

随机选择 3 个样品的消解液进行 17 种金属的全量分析,金属浓度见图 2。由图 2 可知,3 个样品检测出的金属共有 10 种,分别为铝、钒、铬、铁、钴、镍、铜、锌、镉和铅。其中,铝、镍、钒和镉的浓度显著高于其他金属,平均浓度分别为 0.991%、0.875%、0.354% 和 0.286%;其次为锌和钴,浓度分别为 0.026% 和 0.025%。

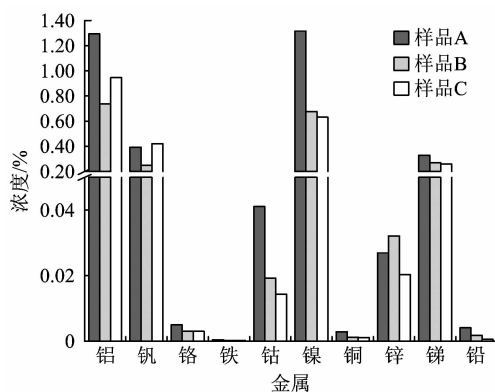


图 2 FCC 废催化剂中金属浓度

Fig. 2 Concentration of metal in spent FCC catalysts

FCC 催化剂主要由载体、黏合剂和活性分子筛组成:载体一般为具有催化活性的无定形硅铝酸、天

然活性白土、半合成高岭土等;分子筛是一种硅铝酸盐化合物,主要由氧化钠、氧化铝和氧化硅组成^[12]。因此,FCC 废催化剂中铝浓度较高。有研究发现,废 FCC 平衡剂中 Al_2O_3 浓度高达 35% 以上^[13]。原料油中的镍和钒等金属会随着 FCC 反应的进行而在催化剂表面累积,这是 FCC 催化剂失去活性的主要原因。为减缓镍对 FCC 催化剂的污染,会加入铈型钝镍剂,这是 FCC 废催化剂中出现铈的主要原因^[14]。

FCC 废催化剂中铝浓度较高主要是由于催化剂的构造造成的,但是其通过暴露途径被人体摄入的危险性较低。综上,主要研究 FCC 废催化剂中镍、钒、铈、钴和锌 5 种金属污染物。

2.2.2 特征金属浓度

对 FCC 废催化剂样品中的镍、钒、铈、钴和锌的浓度进行检测,结果见图 3。由图 3 可知,在 5 种特征金属中,镍浓度最高,约 67% 的样品中镍浓度均超过 0.500%,6 个样品中镍的浓度高达 1.000% 以上,其中,样品 S18 中镍浓度最高,为 1.845%;其次为钒,浓度低于 1.000%;铈浓度位列第三,16 个样品中铈浓度为 0.100%~0.400%,均低于 0.400%;钴和锌浓度分别低于 0.060% 和 0.120%。FCC 废催化剂中特征金属的浓度大致为镍>钒>铈>锌>钴,且不同装置产生的 FCC 废催化剂中镍、钒、铈、钴和锌的浓度各不相同。由于 FCC 废催化剂样品取自不同地区的不同装置,每个装置中原料油的浓度、催化剂种类和工艺控制过程都会导致 FCC 废催化剂样品中金属浓度存在差异。

2.2.3 特征金属的浸出浓度

固体废物的危害主要取决于其所释放出的污染物浓度,以及释放出的污染物对周围环境介质和人类健康的影响程度^[15]。因此,通过对 FCC 废催化剂中特征金属镍、钒、铈、钴和锌等浸出浓度的研究,进一步确定其释放潜能与潜在风险。

FCC 废催化剂样品中特征金属的浸出浓度如图 4 所示。由图 4 可知,FCC 废催化剂样品中镍的浸出浓度为 0.004~3.171 mg/L,平均值为 1.000 mg/L,这与刘腾等^[16]研究得出 FCC 废催化剂样品中镍的浸出浓度约为 1.4~2.5 mg/L 相吻合;钒的浸出浓度为 0.130~39.490 mg/L,平均值为 7.102 mg/L,其中 S5、S6、S17 和 S21 样品中的浸出浓度均超过 10 mg/L;铈的浸出浓度为 0.042~8.099 mg/L,平均值为 3.004 mg/L,其中 S8、S18 和 S20 样品中的

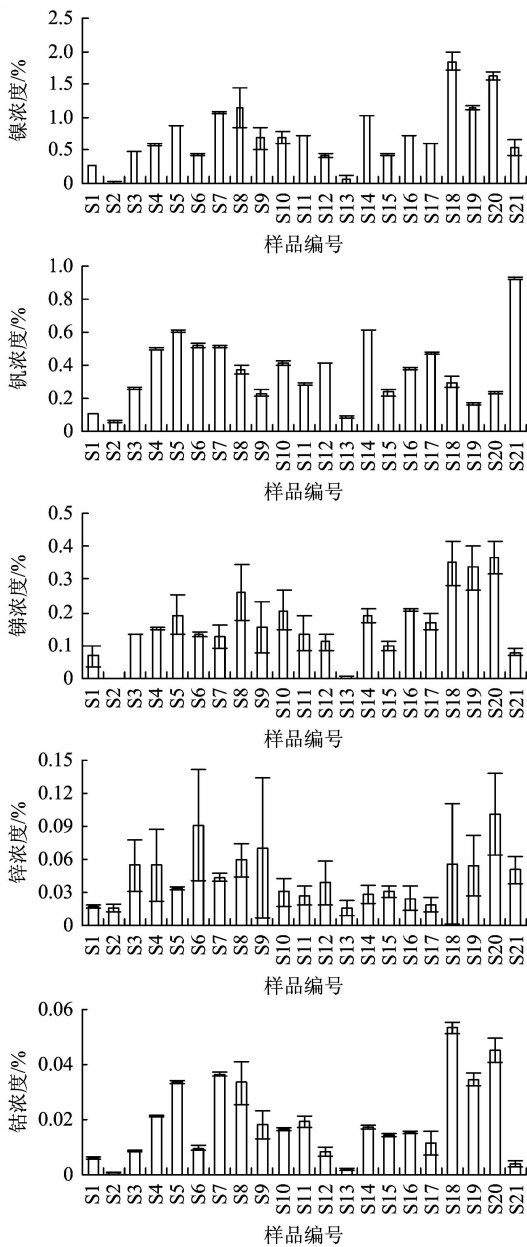


图 3 FCC 废催化剂中特征金属浓度

Fig. 3 Concentration of characteristic metals in spent FCC catalysts

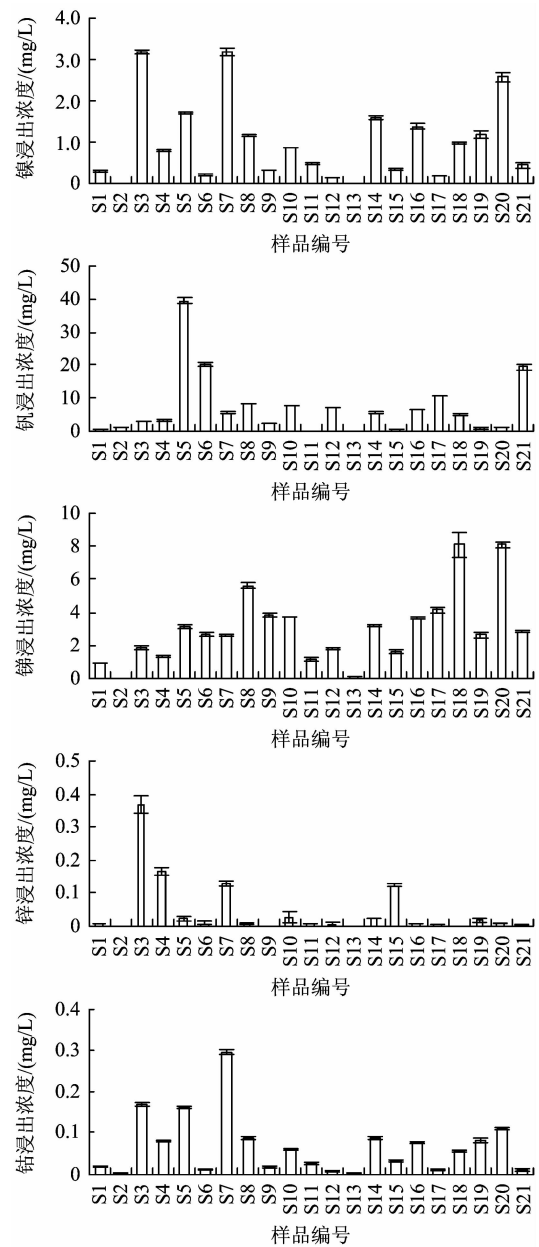


图 4 FCC 废催化剂中特征金属的浸出浓度

Fig. 4 Concentration of characteristic metals in leaching solution of spent FCC catalyst

浸出浓度均超过 5 mg/L; 钴和锌的浸出浓度都较低, 约 81% 的样品浸出浓度低于 0.100 mg/L, 其中浸出浓度高于 0.100 mg/L, 钴的样品有 S3、S5、S7 和 S20, 锌的样品有 S3、S4、S7 和 S15。总体而言, FCC 废催化剂样品中特征金属的浸出浓度大致为钒 > 镍 > 锡 > 锌 ≈ 钴, 且不同装置产生的 FCC 废催化剂中镍、钒、锡、钴和锌的浸出浓度差异较大。

FCC 废催化剂中特征金属的浓度高低与其浸出浓度并不一致, 如 FCC 废催化剂中镍的浓度较高, 但锡的浸出浓度总体高于镍, 可见在 FCC 废催

化剂中, 镍浓度较高但相对稳定。相对而言, 锡比镍易浸出, 更易释放到环境中, 对环境产生影响。

2.3 FCC 废催化剂主要处理处置方法与环境风险

通过对 19 套 FCC 装置实地调研与部分问卷调查得知, 在《名录》颁布之前, 大多数企业将 FCC 废催化剂作为工业固体废物进行处置, 主要是送入一般工业固体废物填埋场填埋。《名录》颁布之后, 企业将 FCC 废催化剂贮存在企业内部, 或送到危险废物处置企业填埋或处置利用。由于贮存的 FCC 废催化剂最终也要送去填埋, 因此, 主要考虑 FCC 废

催化剂填埋处置、不规范的填埋或地面堆存产生的环境风险。

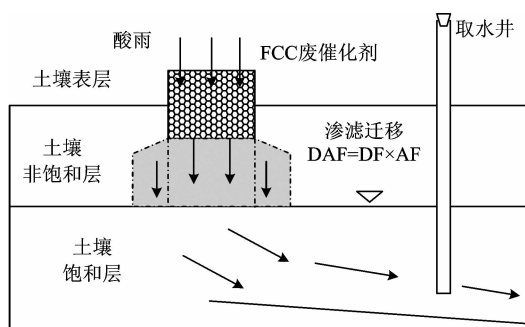
2.3.1 危险废物填埋

FCC 废催化剂必须严格按照 GB 18598—2001《危险废物填埋污染控制标准》的相关要求进行填埋,直接入场必须满足以下 2 个条件:1)危险废物浸出液中有 1 种或 1 种以上的有毒有害成分浓度低于允许危险废物进入填埋区的控制限值;2)危险废物浸出液的 pH 为 7.0~12.0。

根据 GB 18598—2001 规定,允许进入填埋区的镍和锌浸出浓度限值分别为 15 和 75 mg/L,该标准中没有规定钒、铈、钴的相应限值。本研究中,FCC 废催化剂的特征金属的浸出浓度远远低于标准限值。但根据图 1 可知,有 19 个 FCC 废催化剂样品浸出液 pH 均低于 6,不满足 GB 18598—2001 要求,因此,FCC 废催化剂普遍需进行必要的预处理后方能进入危险废物填埋区。

2.3.2 不规范填埋或地面堆存

调研发现 FCC 废催化剂存在地面堆存和不规范贮存等现象。其中最不利情况为废物与土壤直接接触,废物上面没有防水遮挡,受酸性降水影响,废物中的有毒有害物质会释放出来危害环境(图 5)。



注:DAF 为稀释衰减系数;DF 为稀释系数;AF 为衰减系数。

图 5 FCC 废催化剂中污染组分迁移示意

Fig. 5 Schematic diagram of pollutants migration in spent FCC catalyst

如图 5 所示,当 FCC 废催化剂处置不当时,污染物受酸雨影响而被淋滤浸出,经过迁移到达环境保护对象(此处为地下水),造成危害。有害组分从堆存处渗漏,经过包气带进入地下水混合带(堆存区域的地下水),对有害组分有稀释作用,稀释系数用 DF 表示。在与地下水混合后,有害组分随地下水迁移至取水井,该过程有衰减作用,衰减系数用

AF 表示。

根据 GB 5085.3—2007,同时参考美国国家环境保护局(US EPA)制定的《浸出毒性评价方法》(Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP, 1311 法),固体废物中的污染物经释放后垂直下渗和横向扩散的 DF、AF 通常都取 10。如果仅考虑较为不利情况垂直下渗后,忽略水平方向扩散,直接到达地下水井附近,则 DAF 为 10;同时考虑扩散,则 DAF 为 $10 \times 10 = 100$ 。

笔者主要考虑最不利情况下的不当填埋或堆存后,经酸雨淋溶进入地下水而被饮用后的环境风险。由于浸出毒性是模拟工业固体废物不恰当填埋处置或堆存时,有害物质受酸雨浸出影响对地下水造成的污染,故用 2.2.3 节的浸出浓度代表废物中有害组分被淋溶浸出浓度($C_{\text{浸出}}$)。

FCC 废催化剂中的污染物到达地下水的暴露浓度($C_{\text{暴露}}$)计算方法如下:

$$C_{\text{暴露}} = C_{\text{浸出}} / \text{DAF} \quad (1)$$

2.3.3 风险评价

选择地下水作为主要环境保护对象。依据 GB/T 18484—2017《地下水质量标准》将地下水质量分为 5 类,其中第 III 类是地下水化学组分浓度中等,主要适用于集中式生活饮用水水源及工、农业用水,即饮用不会带来健康风险。因此,评价方法之一是将暴露浓度与 GB/T 18484—2017 III 类标准进行比较,超过 III 类标准即为有风险,否则为没有风险。由于 GB/T 18484—2017 中没有钒的标准限值,采用 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》进行评价。

为简化评价,可以将式(1)进行调整,将 $C_{\text{浸出}}$ 与标准限值 \times DAF ($C_{\text{标准}}$) 进行比较,当 $C_{\text{浸出}} / C_{\text{标准}} > 1$ 时,表明存在风险。特征金属的风险评价见表 1。

从表 1 可知,FCC 废催化剂中镍、钒和铈会影响地下水环境质量,钴和锌不会产生影响。因添加钝镍剂而引入的铈的环境风险尤为突出,除个别样品外,FCC 废催化剂中铈的释放均会危及地下水环境质量。虽然钒的评价标准参考了 GB 3838—2002,但不排除其存在环境风险的可能,需要进一步研究确定。

为了保护人体健康,进一步评价被镍、钒和铈污染的饮用地下水可能造成的健康风险。针对饮用地下水的暴露途径,采用下式估算人均日摄入量(Dose):

表 1 特征金属的风险评价
Table 1 Risk evaluation of characteristic metal

金属	标准限值/(mg/L)	DAF = 10		DAF = 100	
		$C_{标准1}$ /(mg/L)	超标样品数	$C_{标准2}$ /(mg/L)	超标样品数
镍	0.020	0.200	18	2.000	3
钒	0.050	0.500	19	5.000	10
铈	0.005	0.050	20	0.500	19
钴	0.050	0.500	0	5.000	0
锌	1.000	10.000	0	100.000	0

注:钒为 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》的标准限值,其余金属为 GB/T 14848—2017《地下水质量标准》Ⅲ类限值;样品总数为 21。

$$\text{Dose} = \frac{C_i \times \text{CR} \times F_E \times D_E}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (2)$$

式中: C_i 为饮用地下水中金属 i 的浓度,mg/L;CR 为饮用水摄入量,取 1.85 L/d; F_E 为暴露频率,取 $365 \times 0.6625 \approx 242$ d/a(借鉴美国 3MRA 推荐参数,人在暴露区停留时间为 954 min/d); D_E 为持续暴露时间,取 74.8 a;BW 为人体平均体重,取 60.6 kg;AT 为平均寿命,取 27 302 d。饮水量、暴露周期和平均体重等参考《中国人群暴露参数手册(成人卷)》和 US EPA 的推荐参数^[17-18]。

饮用地下水中金属 i 带来的风险(R_i)计算公式如下:

$$R_i = \text{Dose}/\text{RfD}_i \quad (3)$$

式中,RfD _{i} 为经口摄入的参考剂量,mg/(kg·d)。当 $R_i < 1$ 时,风险可接受;当 $R_i \geq 1$ 时,风险不可接受^[20]。将 Dose 代入式(2),反推得出饮用地下水中不会带来健康风险的最大金属浸出浓度,从而进一步推出 FCC 废催化剂中最大可接受的浸出浓度,DAF 取 100,估算结果见表 2。

表 2 人均日摄入量和最大可接受的金属浸出浓度

Table 2 Average daily intake and maximum acceptable leaching concentration of selected metals

金属	RfD _{i} / [mg/(kg·d)] ^[19]	最大可接受的浸出 浓度/(mg/L)	超标 样品数
钒	9×10^{-3}	44.5	0
镍	2×10^{-2}	98.8	0
铈	4×10^{-4}	2.1	13

由表 2 可知,在所有 FCC 废催化剂样品中,有约 62% 的样品中铈会因影响地下水质量而带来不可接受的健康风险。

4 结论

(1)FCC 废催化剂中特征金属为镍、钒、铈、钴、锌,浓度为镍 > 钒 > 铈 > 锌 > 钴,浸出浓度为钒 > 铈 > 镍 > 锌 ≈ 钴,且不同装置 FCC 废催化剂中的金属浓度与浸出浓度差异较大。经估算,FCC 废催化剂中钴和锌浸出浓度较低,释放进入水体后,不会影响地下水环境质量,而镍、钒、铈会影响地下水环境质量。

(2)FCC 废催化剂中金属浸出浓度不影响进入危险废物填埋场,但由于浸出液 pH 较低,进入填埋场前须进行预处理。

(3)若 FCC 废催化剂在地面长期堆存,其中铈会释放出来,危及地下水环境质量而存在一定健康风险。

参考文献

- [1] 吴秀章. 催化裂化对炼油厂产品结构和产品质量的影响[J]. 石化技术,2000(2):74-78.
- [2] ZHANG J, SHAN H, LIU W, et al. Synergistic process for coker gas oil catalytic cracking and gasoline reformation[J]. Energy & Fuels, 2013, 27(2):654-665.
- [3] 许友好. 我国催化裂化工艺技术进展[J]. 中国科学:化学, 2014, 44(1):13-24.
XU Y H. Advance in China fluid catalytic cracking (FCC) process[J]. Scientia Sinica Chimica, 2014, 44(1):13-24.
- [4] 容元伟,张彪. 催化裂化工艺技术的应用与进展[J]. 化工管理,2017(21):74.
- [5] 赵晓敏. FCC 废催化剂的综合回收利用[J]. 炼油技术与工程,2017,47(4):51-55.
- [6] 杜晓辉,唐志诚,张海涛,等. 镍钒污染对催化裂化催化剂的影响[J]. 化学工程与装备,2011(5):1-5.
DU X H, TANG Z C, ZHANG H T, et al. Effect of vanadium and nickel contamination on the property of FCC catalyst [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2011(5):1-5.

- [7] 郑文芳. FCC 催化剂中镧和铈的浸取与分离技术[D]. 西安:西北师范大学,2014.
- [8] LIU X M, LI L, YANG T T, et al. Zeolite Y synthesized with FCC spent catalyst fines: particle size effect on catalytic reactions[J]. *Journal of Porous Materials*, 2012, 19(1):133-139.
- [9] GARBARINO G, RIANI P, INFANTES-MOLINA A, et al. On the detectability limits of nickel species on NiO/ γ -Al₂O₃, catalytic materials[J]. *Applied Catalysis A: General*, 2016, 525:180-189.
- [10] 李丹丹. FCC 废催化剂的无害化及水处理应用研究[D]. 北京:北京化工大学,2016.
- [11] HE M Y. The development of catalytic cracking catalysts: acidic property related catalytic performance[J]. *Catalysis Today*, 2002, 73(1):49-55.
- [12] BAYRAKTAR O, KUGLER E L. Visualization of the equilibrium FCC catalyst surface by AFM and SEM-EDS [J]. *Catalysis Letters*, 2003, 90(3/4):155-160.
- [13] 任飞,沙昊,朱玉霞. 催化裂化废催化剂上镍形态的 XRD 研究[J]. *石油炼制与化工*, 2017, 48(7):38-43.
- [14] 王国峰. 金属钝化剂在 FCC 中的应用[C]//第十一届全国工业催化技术及应用年会论文集. 北京:工业催化杂志社,2014.
- [15] QUINA M J, BORDADO J C, QUINTA-FERREIRA R M. Percolation and batch leaching tests to assess release of inorganic pollutants from municipal solid waste incinerator residues [J]. *Waste Management*, 2011, 31(2):236-245.
- [16] 刘腾,邱兆富,杨骥,等. 废 FCC 催化剂的形态、成分分析及环境风险评价[J]. *无机盐工业*, 2016, 48(11):71-74.
- LIU T, QIU Z F, YANG J, et al. Morphological, composition analysis, and environmental risks assessment of spent FCC catalysts [J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2016, 48(11):71-74.
- [17] 赵秀阁,段小丽. 中国人群暴露参数手册:成人卷[M]. 北京:中国环境科学出版社,2014.
- [18] Committee on the Institutional Means for Assessment of Risks to Public Health, National Research Council. Risk assessment in the federal government: managing the process [M]. Washington DC: National Academy Press, 1983.
- [19] 环境保护部. 污染场地风险评价技术导则: HJ 25.3—2014 [S]. 北京:中国环境科学出版社,2014.
- [20] 刘华峰,于可利,李金惠,等. 危险废物焚烧设施的环境风险评价[J]. *环境科学研究*, 2005, 18(增刊1):48-52.
- LIU H F, YU K L, LI J H, et al. Environment risk assessment of hazardous waste incineration [J]. *Research of Environmental Sciences* 2005, 18(Suppl 1):48-52. □

欢迎订阅 2020 年《环境工程技术学报》

《环境工程技术学报》是由中华人民共和国生态环境部主管,中国环境科学研究院主办的综合性学术期刊,2015 年起收录为“中国科技核心期刊”(中国科技论文统计源期刊)。主要刊载国内外环境工程技术领域的最新研究成果,报道环境工程及环保实用技术应用的典型案例,关注环保产业政策和行业动态,以及环境工程新技术、新成果的转化应用。本刊主要面向环境、生态、管理工程技术学领域的科研人员、技术研发人员、各级环保管理人员、环保企业经营者与生产者以及相关专业大专院校师生。

《环境工程技术学报》为双月刊,大 16 开,单月 20 日出版。每期定价 60 元,全年 360 元。欢迎国内读者到当地邮局订阅,邮发代号:2-620;中国国际图书贸易总公司承担本刊国外发行,发行代号:6338BM。如有漏订可直接与编辑部联系。

编辑部地址:北京市朝阳区安外大羊坊 8 号 中国环境科学研究院

邮政编码:100012

电话/传真:010-84915126

网 址:www. hjpgcjsxb. org. cn

电子邮箱:hjpgcjsxb@vip. 163. com