

大型石化园区固体废物固化与稳定化工程解决方案

任洪理^{1,2} 谭权忠³

1. 原中国石油华东设计院; 2. MP 全球咨询公司; 3. 恒逸实业(文莱)有限公司

摘要: 石化工业园区固体废物固化与稳定化的工程研究是一个技术性很强的问题, 也是填埋处理实现的关键。本文对固体废物填埋处理进行深入研究, 提出阶段覆盖渗滤液净化工程解决方案, 使渗滤液得到有效处理, 实现碳足迹合规管理。建立了关键的工程设计参数, 运用设计的案例验证了给定的各种模型的相互关系, 对废物管理提出更好的合规性解决方案。

关键词: 固体废物; 填埋场; 固化; 稳定化; 工程设计

随着我国对炼油化工大型装置及精细化工装置建设数量的增多, 装置产生的固体废物数量明显增多, 近几年国家出台了多项针对固体废物处理的环境保护法律法规, 对固体废物管理的要求更加严格, 标准规范更加健全。规定谁污染谁治理的原则, 这样对石化工业园区固体废物处理带来了新的研究课题, 对配套完整的石化装置的固体废物处理进行固化与稳定化工程方案尤为重要。

在过去的时间内, 国内炼化企业已建设多套与炼油厂配套的固体废物填埋场, 其工程设计的填埋方式多为山谷式填埋场或依靠自然条件采用简易填埋储存方法, 将固体废物简单埋入填埋场中, 使固体废物没有得到较好的末端处理^[1]。而在平原地区建设固体废物填埋场其方案确定时不确定性因素较多, 对解决工程设计方案问题的研究更为苛刻。

因此, 建设一套符合环境保护规范要求的固体废物处理填埋场设计方案显得更为重要, 更为严格。以符合现行环境保护法律法规的要求开展工

程设计研究, 消除二次污染, 遵循的技术路线符合“资源化、减量化、无害化”的原则, 对废物管理做到更好的解决方案。

1 合理确定选址方案

固体废物填埋场的场址选择和最终确定是石化园区固体废物填埋场工程设计中相当复杂而耗时过程, 必须以场地的详细调查、工程设计和费用分析、环境影响评价为基础, 从工程学、经济学、法律合规性和社会学等方面进行综合评价, 任何一个环节出现问题都会对后续的填埋场的正常营运产生重大影响, 因此选址必须谨慎。

选址的总体原则主要有两点: 一是从环境污染角度考虑的安全性原则; 二是从经济学角度考虑的经济合理性原则。最严重的错误往往由选址方案不当产生, 造成浪费和后果。一般难以放弃旧场址而重新选择场址, 对污染场址恢复也需要巨大的投资, 而且也不能保证达到预期的效果。一般的选择要同时提出两个以上方案供优选。

因地制宜, 因场地而异, 一个场地

的经验对另一个场地可能并不适用, 只具有参考性不具有复制性。选择一个适宜的场址就显得尤为重要。从设计经验中得知选择一个合理的场址方案, 填埋场设计工作就已经成功了一半。

2 工程设计

固体废物填埋场的工程设计是一项技术性很强的问题, 是综合全部因素的结果, 也是填埋处理能否实现的关键。与一般工程项目的设计内容部分相同, 如选址、五通一平、厂区布局、建筑物、构筑物、防洪、防火、绿化、环保、防渗工程、填埋工艺、渗滤液收集处理以及气体收集处理等。其中最终覆盖设计是填埋场设计中特有的重要内容, 也是在工程设计中容易忽视的单项工程。

2.1 大型工业园区(以炼油厂为例)固体废物来源分析

在这里本文重点以当前大型炼油厂为例进行研究, 某单位新建一套 10 000 kt/a 炼油厂, 对建设项目的环境影响报告数据进行深入分析研究。产生的固体废物多为废催化剂、废保护

剂、废油泥、废白油、废白土、废吸附剂、废活性炭、废瓷球以及废分子筛,其他主要是废干燥剂、脱硫剂及部分炉渣等。这些固体废物主要来自以下装置,常减压、催化裂化、重整、加氢、聚丙烯、加氢裂化、制氢、罐区、污水处理场以及电厂等装置。

分析数据结果,这项新建的10 000 kt/a炼油厂每年产固体废物约8 000 t,其中,一般工业固体废物占30%~40%,危险固体废物占60%~70%,固体废物综合利用率20%~30%。其固体废物产生量比在0.7~0.8 kg/t。

2.2 工艺方案优化设计

针对炼油厂固体危险废物的特性,其处置方法的选择主要是从危险废物的成分和物化性质上考虑,其主要污染物是废弃的催化剂、炉渣及3种污泥^[2]。催化剂、炉渣呈粉末状,主要成分为无机物,少部分催化剂含有油污,3种污泥含有油类等有机物。由于炼油厂所排出的固体废物大多数经过高温燃烧,再进行焚烧没有意义,因此不推荐采用焚

烧法处理,本工程解决方案采用固化/稳定化技术开展的工程设计。

危险废物的固化/稳定化技术是物理化学技术之一,是将污染物通过化学转变,引入到某种稳定固体物质的晶格中去,通过物理过程把污染物直接掺入到惰性基材中。常采用的是水泥固化、石灰固化、塑性材料固化、有机聚合物固化、熔融固化和陶瓷固化。将危险废物变成高度不溶性的稳定物质。

固化/稳定化是一种将废物与能聚结成固体的材料混合,从而将废物捕获或者固定在这个固体结构中的技术。但在控制废物处理方面他们代表着不同的概念。固化是在危险废物中添加固化剂,稳定化是将有毒有害污染物转变为低溶解性、低迁移性及低毒性物质的过程。

本工程设计在8 000 t/a固体废物填埋场工程设计中,对危险废物的处理就采用固化/稳定化工艺流程,如图1所示。将粉碎后的危险废物与水泥、添加剂和水以一定的比例在进料

机M-101和混合器M-102中进行掺混。经过充分搅拌共混,再注入水泥/废物固化体运输桶V-104,最终填埋在危险废物填埋场深池V-106中达到末端处理的目的。

增容比是在固化/稳定化所形成的固化体积与被固化危险废物体积的比值。

$$C_i=V_s/V_w$$
 (1)

式中, C_i 为增容比;

V_s 为固化体体积 (m³);

V_w 为危险废物的体积 (m³);

本工程设计中水泥固化体的增容比取1.8。

在工程设计中,增容比是设计的关键参数,是评价固化处理方法。炼油厂固体废物采用固化/稳定化技术处置危险废物是目前的优选解决固体废物处理方案。

2.3 建设规模确定与应用模型及参数

工程设计中的建设规模,实质就是计划填埋量,是在计划填埋年限中各年计划填埋量与覆土量之和。填埋量一方面受到填埋场地形和设施容量的影响,另一方面也受到企业装置的

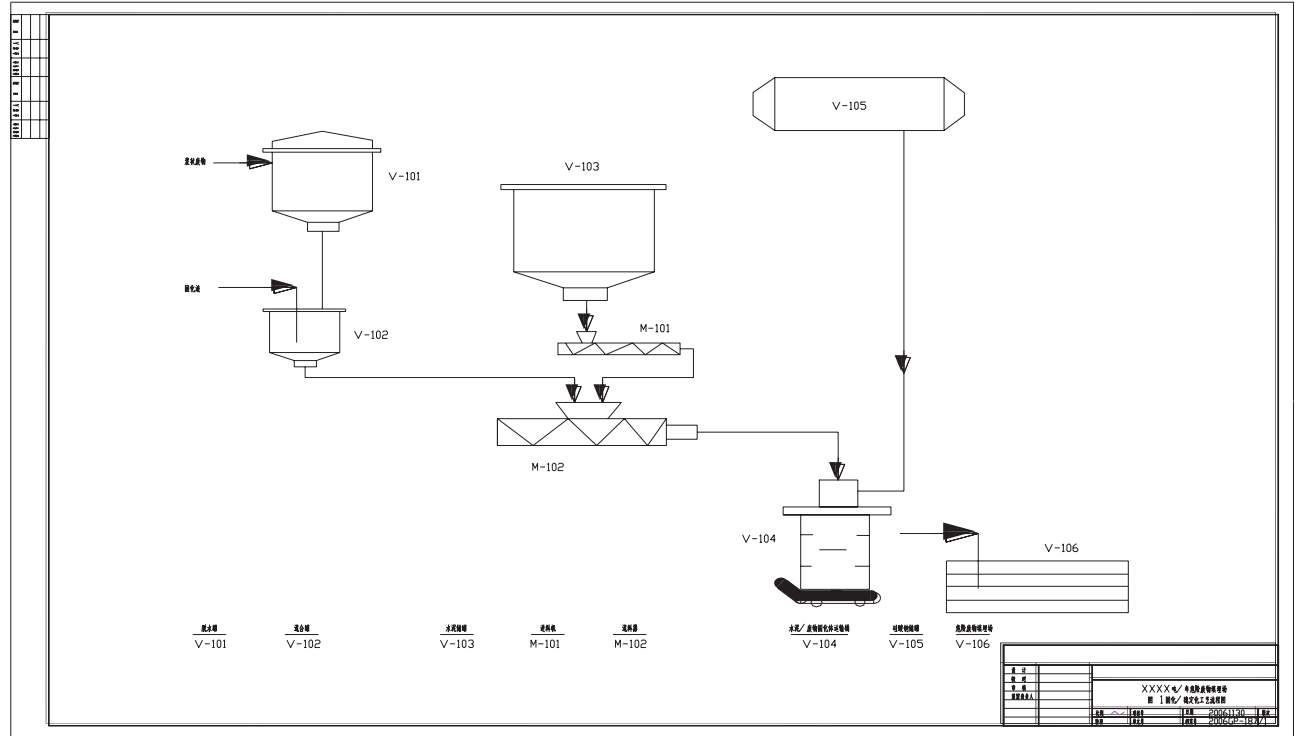


图1 危险废物的处理固化/稳定化工艺流程

结构调整变化影响，产生的固体废物种类变化，造成废物密度变化，填埋场实际的填埋量就会发生变化。根据国家标准，填埋场场址必须有足够大的可使用面积以保证填埋场建成后具有 10 年以上的使用期，在使用期内能充分接纳所产生的固体危险废物。

建设规模确定方法：对工业园区固体废物填埋场以实吨位统计，通过标准计量装置实际称重或通过统计数据确定产生量。

总堆埋容积 V_a ： $V_a = V_b + V_f$ (2)

有效堆埋容积 V_b ： $V_b = 1.18V_o$ (3)

总覆盖量 V_f ： $V_f = 0.1V_b$ (4)

填埋高度：地上 H_a ，地下 H_b ；炼油厂固体废物压实后密度：约 1.0 t/m^3 ；使用年限： T （一般规定 10 ~ 20 年）。

即 $T = V_a / \sum_{i=1}^n V$ (5)

每年处理固体废物量： V ；假定使

用年限： n ；道路占地面积： A_d ，道路系数 $f_d = 0.10 \sim 0.18$ ；绿化占地面积： A_l ，绿化系数 $f_l = 0.10 \sim 0.15$ 。

建设规模 W_a ： $W_a = fV_a/T + 0.1V_b$ (f 为修正系数,产生量的因素函数) (6)

即 $W_a = f(V_b + V_f)/T + 0.1V_b$ (7)

所需场地占地面积：

$A = V_a/(H_a + H_b) + A_d + A_l$ (8)

2.4 平面布置优化

2.4.1 合理划分功能区域

一项园区标准规模的工程设计的固体废物填埋场，厂址确定后进行总平面布置，合理地划分功能区域，直接影响到废物处理或生产装置的建设费用。总平面布置应该具有布置紧凑、用地节省、工艺流程合理、消防设施可靠、功能清晰、运输便捷、动力区接近负荷中心、工程管线简捷以及管理方便等特点。

2.4.2 优化单元功能运营

工业园区固体废物填埋场单元功能划分直接影响运营的合理性，本工程设计分为：称重计量区、贮存区、预处理区、危险废物填埋处理区、一般工业固体废物填埋处理区、渗滤液收集处理区、渗滤液输送区、卸车场、环形道路以及绿化区，如图 2 所示。

将全场环形道路、绿化、各区域综合布置，合理合并建筑物功能，形成划分各功能区。道路的宽度按规范要求明确，优化单元功能总占地将减少许多，合理的单元功能分区优化可以达到节约用地、节能降耗的效果。

2.5 防渗工程设计

防渗工程首先是依据被处置废物的性质、场地的水文地质条件、建造的费用等选择合适的衬层。保持将填埋场内外隔绝，防止渗滤液渗漏进入

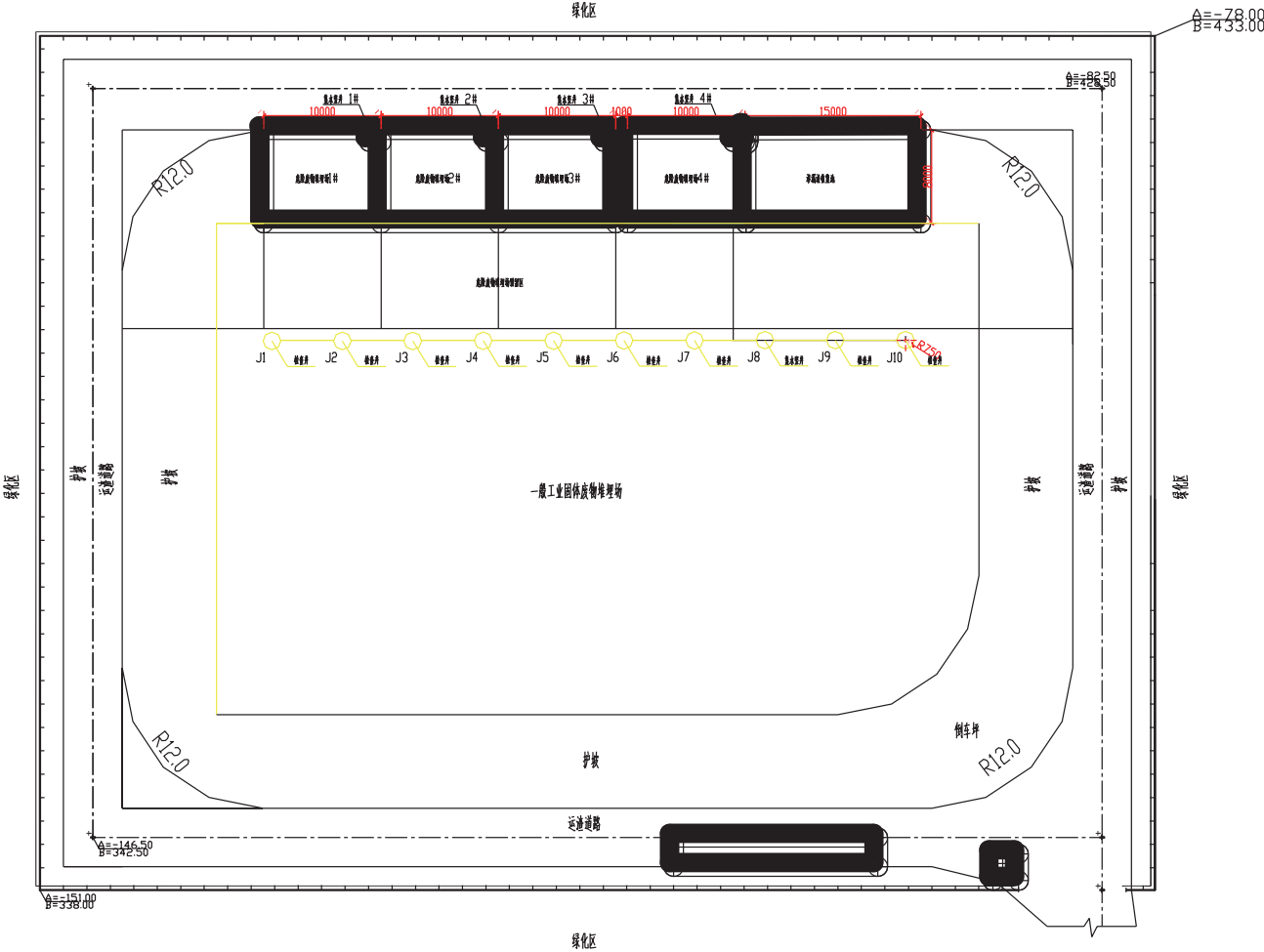


图 2 工业园区固体废物填埋场工程设计

土壤和地下水，阻止外界水进入废物填埋层而增大渗滤液的产生量。填埋场的衬层系统是实现危险废物与环境隔离的必需工程，包括衬层结构、材质和相互配套的系统必须严格按照国家环境保护要求的规范标准执行。我国《危险废物填埋污染控制标准》，依据不同的地质详勘基础条件，确定采取相应防渗措施。填埋场的防渗工程复合衬层中天然材料衬层厚度标准见表 1^[3]。

人工合成材料虽然有多种，但目前最常用的是高密度聚乙烯（HDPE），其渗透系数低于 1.0×10^{-12} cm/s 的聚合物防渗膜，用以阻止渗滤液向地下水扩散。工程中采用的双衬层防渗工程标准剖面如图 3 所示，防渗工程包括两项内容，一是设置防渗衬里；二是建立排水、集水等设施对浸出液进行妥善处理。

渗滤液收集系统的设置，收集可能渗出的所有渗滤液，能顺利地 from 填埋场中导排出来。对渗滤液的体积估算，采用式（9）。

$$Q=CIA/1000 \tag{9}$$

式中， Q 为日平均浸出液量（m³/d）；
 C 为流出系数，%，一般取 0.2～0.8；
 I 为平均降雨量（mm/d）；
 A 为填埋场集水面积（m²）。

2.6 填埋气体产生与控制处理

工业园区固体废物填埋场产生的气体主要含有氨、二氧化碳、一氧化碳、氢、硫化氢、甲烷以及氮和氧等。其中甲烷和二氧化碳是填埋场气体中的主要气体。甲烷在空气中的浓度 5%～15%^[5]，会发生爆炸。当甲烷浓度达到这个临界水平时，只有少量的气体存在于填埋场内，这种情况下填

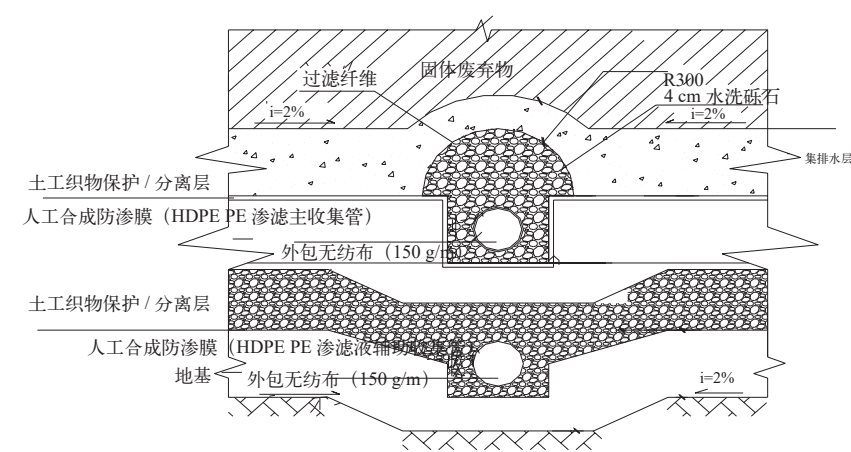


图 3 双衬层渗滤液收集系统剖面图

埋场内几乎没有发生爆炸危险的气体。填埋场微量气体虽然含量很小，其毒性大，对公共健康具有危害性。国外报道采集的气体样品中发现存在 116 种有机化合物，许多是挥发性有机化合物（VOCs），这种有机物的浓度均较低^[6]。

填埋场气体的产生量可通过现场实际测量或采用经验式推算：

$$L_o=W(1-C) C_o \text{CCOD VCOD} \tag{10}$$

式中， W 为固体废物质量（kg）；
 CCOD 为单位质量废物的 COD（kg/kg）；
 VCOD 为单位 COD 相当的填埋场产气量（m³/kg）；
 L_o 为固体填埋废物理论产气量（m³）；
 C 为固体废物含水率质量分数（%）；
 C_o 为固体废物中的有机物含量质量分数（%）（干基）。

气体收集控制工程常用的方法有渗透性排气和密封法排气两种，工程设计中的选择要根据产生量和气体的用途决定，石化工业园区的固体废物的填埋场由于产气量有限，本文选有组织排放，设置较为完善的排气和导

气系统。

2.7 填埋场地下水监测

填埋场地下水监测目的就是保护地下水不受到污染，使环境和人类健康的威胁减少至最小。设置地下水保护标准的目的在于后续期间顺流主导流点之上，受控填埋场部位中地下水测得的有毒有害成分浓度不超过含水层的限制。

堆埋场工程设计中地下水的保护分 3 阶段：监测、评估以及必要的情况下在填埋场运行期间和封场 30 年之内，监测治理地下水污染。

在填埋场工程设计中，设置四处监测井，以满足填埋场地下水监测系统的长期需要。

2.8 封场覆盖

填埋场到了使用年限后，需要按有关规定进行封场和后期管理，封场是填埋场工程设计、建设中的一个重要环节^[7]。现代化的填埋场的终场覆盖应由 5 层组成，从上至下为表层、保护层、排水层、防渗层和排气层。

本文提出阶段性覆盖，在完成部分填埋后既绿化，增加植物种植，形成生物滤床，将渗滤液投配到有植物的土壤表面，使渗滤液在流经地表土壤植物系统时得到充分净化。比较有利于渗滤液的处理，边覆盖边回灌净化渗滤液，达到封闭处理效果。

表 1 填埋场的防渗工程复合衬层中天然材料衬层厚度标准		
基础层条件	天然材料衬层厚度 /m	
渗透系数≤ 1.0×10^{-7} cm/s，w 厚度≥ 3 m	≥ 0.5	
渗透系数≤ 1.0×10^{-6} cm/s，厚度≥ 6 m	≥ 0.5	
渗透系数≤ 1.0×10^{-7} cm/s，厚度≥ 3 m	≥ 1.0	

数据来源：GB18598—2001《危险废物填埋污染控制标准》^[4]

（下转第 33 页）

- Optimization of process conditions by surface response method[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(2-3): 1733-1738.
- [7] 杨乐. 纳米 Fe_3O_4 类Fenton工艺深度处理焦化废水效能及参数优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [8] 倪常彪. 光—电/臭氧高级氧化耦合曝气生物膜反应器工艺对化工废水的处理效果研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2024.
- [9] 王斐. 类石墨相氮化碳基光催化-自芬顿体系的构建及其在去除有机危害物中的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
- [10] 陈江耀, 张德林, 李建军, 等. 光催化与生物技术联用工艺处理油漆废气中试研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(6): 1389-1393.
- [11] 刘叶凤, 孙奎, 黄廷洪, 等. 构型限制Co-P催化剂的设计合成及对亚甲基蓝的光催化降解[J]. 化工进展, 2021, 40(S1): 231-237.
- [12] 周希同. 基于 $\text{BiO}_2\text{-x}$ 的复合半导体光催化剂的制备及其光催化降解性能研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
- [13] 黄决. 表面修饰纳米 TiO_2 光催化降解有机废水研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- [14] NELSON K, MECHACA, SAMUEL M H, et al. Recent Trends in the Application of Photocatalytic Membranes in Removal of Emerging Organic Contaminants in Wastewater[J]. Processes, 2025, 13(1): 163.
- [15] ABE RYU. Recent progress on photocatalytic and photoelectrochemical water splitting under visible light irradiation[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, 2010, 11(4): 179-209.
- [16] MASOUMI Z, SHOKOHI R, ATASHZABAN Z, et al. Stabilization of Excess Sludge From Poultry Slaughterhouse Wastewater Treatment Plant by the Fenton Process[J]. Avicenna Journal of Environmental Health Engineering, 2015, 2(1): e3239.
- [17] 李珏秀, 雷新睿, 赵锐, 等. 锰氧化物用于催化氧化挥发性有机物的研究进展[J]. 中原工学院学报, 2024, 35(4): 57-68.
- [18] BUI S T T, SEUL H C, YOUNG S O, et al. Iron-doped ZnO as a support for Pt-based catalysts to improve activity and stability: enhancement of metal-support interaction by the doping effect[J]. RSC Advances, 2018, 8(38): 21528-21533.

(上接第29页)

3 工程应用案例

在某单位 10 000 kt/a 石化园区固体废物处理的工程设计中, 拟建设在平原、表层土壤较厚的地区, 土层防渗层一般, 为增大容量工程设计按半地下托盘式。

本工程所产固体废弃物 8 000 t/a, 固体废物压实后密度为 1.0 t/m^3 , 根据式 (2) ~ 式 (4) 得到总堆埋容积 V_a 为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3$, 有效堆埋容积 V_o 为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$, 由式 (5) 得到使用年限为 15 年, 总覆盖量 V_f 为 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$, 由式 (2) 计算所需占地面积为 $16\,282.08 \text{ m}^2$, 不包含设备费、营运费及征地费用, 估算 968.7 元/ m^2 , 建设一套规模为 8 000 t/a 固体危险废物填埋场工程总投资 1 亿元人民币以上。

4 结语

通过对固体废物填埋场工程设计的研究, 确定了关键的工程设计参数, 运

用设计的案例验证了本文给定的各种模型参数的相互关系。采用固化/稳定化技术处理工业园区危险固体废物的填埋处理方法, 提出阶段覆盖解决渗滤液在流经地表土壤植物系统时充分净化方案, 使渗滤液得到有效处理。工程解决方案的模型参数符合各项规范标准, 达到 HSE 设计的合规性要求。本成果可供石化工业园区填埋场工程设计提供可靠的解决方案和工程设计参考价值。

参考文献:

- [1] 赵由才. 实用环境工程手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999.
- [2] 边炳鑫, 张鸿波, 赵由才. 固体废物预处理与分选技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999.
- [3] 国家环境保护总局科技标准司. 危险废物填埋污染控制标准: GB 18598—2001 [S]. 北京: 中国环境科

学出版社, 2001.

- [4] 生态环境部固体废物与化学品司法规与标准司. 危险废物贮存污染控制标准: GB 18597—2001 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [5] ZHAO YOUCAI, STANFORTH R. Integrated hydrometallurgical process for production of zinc from electric arc furnace dust in alkaline medium[J]. Journal of hazardous materials, 2000, 80(1/2/3): 223-240.
- [6] LIN MIN, ZHAO YOUCAI. Filtration improvement of zinc sludge by using unconventional alkalization sequences[J]. Journal of environmental sciences, 2000, 12(1): 63-67.
- [7] 国家环境保护总局科技标准司. 一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准: GB 18599—2001 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.