

专论

DOI 10.12030/j.cjee.201804031 中图分类号 X705 文献标识码 A

罗小勇,王艳明,龚习炜,等. 垃圾焚烧固化稳定化飞灰填埋处置面临的问题与对策[J]. 环境工程学报,2018,12(10):2717-2724.

LUO Xiaoyong, WANG Yanming, GONG Xiwei, et al. Problems and countermeasures in solidification and stabilization fly ash landfill disposal of waste incineration [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(10): 2717-2724.

垃圾焚烧固化稳定化飞灰填埋处置面临的问题与对策

罗小勇¹, 王艳明^{1,*}, 龚习炜², 徐辉³

1. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092

2. 南京城建项目建设管理有限公司, 南京 210006

3. 浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018

第一作者: 罗小勇(1986—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 固废处置、污泥处理等。E-mail: luoxiaoyong@smedi.com

*通信作者, E-mail: wangyanming@smedi.com

摘要 我国飞灰安全处置是生活垃圾焚烧污染控制及风险管理的薄弱环节, 由于飞灰固化稳定化工艺的多样性, 固化飞灰化学、物理、力学特性差异大, 固化飞灰填埋设计标准、规范缺失, 导致固化飞灰填埋处置存在扬尘大、刺激性气味强、渗滤液产量大、渗滤液组分复杂、渗滤液处理难、填埋场持续运行困难等一系列问题。基于实验测试研究成果, 提出了固化飞灰的土工特性参数以及渗滤液水质典型指标的取值。通过分析提出了固化飞灰填埋场设计、运营管理、填埋作业工艺、雨污分流及渗滤液处理等相关优化建议, 为固化飞灰安全填埋处置提供系统性解决方案。

关键词 固化飞灰; 工程特性; 渗滤液水质; 填埋作业工艺

我国城市生活垃圾焚烧技术的起步较晚, 但是随着城市化进程的加快, 土地资源的日益稀缺, 垃圾焚烧占生活垃圾处理的比例逐渐增加。根据《城市生活垃圾处理行业 2015 年发展报告》^[1], 截至 2015 年底, 投入运行的生活垃圾焚烧发电厂有 220 座, 总处理能力为 22 万 t·d⁻¹, 占生活垃圾处理量的 30%。然而, 生活垃圾焚烧也产生了大量焚烧残余物, 包括焚烧炉渣和飞灰。我国焚烧炉渣产量约占原生垃圾总量的 20%~25%, 而飞灰产量约占原生垃圾总量的 2%~5%^[2]。据 E20 研究院统计, 2016 年垃圾焚烧量为 6 811 万 t, 飞灰产生量已高达 395 万 t。我国垃圾焚烧产生的飞灰处理量与产生量严重不符, 目前至少有 50% 的飞灰未得到妥善处理。飞灰安全处置已经成为生活垃圾焚烧全过程污染控制和风险管理中最为薄弱的环节。

焚烧炉渣属于一般固体废弃物, 主要进行资源化利用处置, 而飞灰属于危险废物, 极少有资源化利用。目前我国飞灰处理方式有 3 种^[3]: 1) 高温熔融处理后做建材; 2) 进入水泥窑协同处理; 3) 利用螯合剂与重金属螯合稳定之后固化进入填埋场。飞灰螯合稳定、固化养护、卫生填埋是目前最经济、最方便的一种方式, 得到大部分垃圾焚烧发电厂的应用。

1 飞灰填埋处置现状

我国的《危险废物污染防治技术政策》^[4]中第 9.3 节规定, 生活垃圾焚烧时产生的飞灰必须单独收集, 不得与生活垃圾、焚烧残渣等其他废物混合, 也不得与其他危险废物混合; 焚烧飞灰不得在

产生地长期贮存,不得进行简易处置,不得排放,焚烧飞灰在产生地必须进行必要的固化和稳定化处理之后方可运输,运输需使用专用运输工具,运输工具必须密闭;焚烧飞灰须进行安全填埋处置。

根据《生活垃圾卫生填埋处理技术规范》(GB 50869-2013),焚烧飞灰属于危险废物,不能直接进入生活垃圾填埋场进行填埋处置。焚烧飞灰需进行固化、稳定化处理,满足《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889-2008)中6.3节的要求,才能进入生活垃圾填埋场,且需要设置与生活垃圾填埋库区有效分隔的独立填埋库区。GB 16889-2008第6.3条规定,焚烧飞灰进入生活垃圾填埋场处理的条件是:1)含水率小于30%;2)二恶英的含量低于 $3\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;3)按照HJ/T 300制备的浸出液中危害成分浓度低于GB 16889-2008中的限值。

我国固化飞灰填埋处置经历3个发展阶段:

1)与生活垃圾混合填埋;2)单独分区填埋;3)专门的固化飞灰填埋场。早期垃圾焚烧比例相对较小,飞灰产量小,固化飞灰主要进入生活垃圾混合填埋。固化飞灰与生活垃圾混合填埋容易引起渗滤液收集导排层淤堵、飞灰渗滤液水质造成末端生活垃圾渗滤液处理站无法正常运行的问题,如图1所示。而固化飞灰单独分区填埋或专门的飞灰填埋场渗滤液产量相对较小,固化飞灰渗滤液单独收集处理,可以避免对生活垃圾填埋场的运营产生影响。



图1 某垃圾填埋场固化飞灰与生活垃圾混合填埋
Fig. 1 Solidified fly ash mixed with domestic waste in landfill

随着垃圾处理资源化和多元化处理政策的实施,原生垃圾填埋将逐渐减少,目前部分发达地区正逐步实现原生垃圾的零填埋,垃圾焚烧量急剧增加,与之相应的固化飞灰填埋量也相应随着增加。随着环境保护部对固化飞灰最终处置要求的提高,固化飞灰转变为单独分区填埋或专门的飞灰填埋场,如图2所示。因此,配套的飞灰填埋场的设计、建设与运营也相应增加。



(a) 固化飞灰填埋场库区全貌



(b) 固化飞灰独立分区填埋

图2 国内某固化飞灰填埋场

Fig. 2 Solidified fly ash landfill in China

由于国内飞灰填埋场的建设刚刚起步,对此尚缺乏专门的研究,更无专门的设计标准与规范,目前大都参考生活垃圾填埋场工程相关标准与规范。固化飞灰是生活垃圾焚烧后的残余物,其在化学成分、土工特性与生活垃圾有着显著的不同,根据生活垃圾填埋相关规范进行固化飞灰填埋处置必然会造成设计、建设与运营缺少针对性,同时也引发固化飞灰填埋处置中一些新的问题。

2 固化飞灰填埋面临的问题

2.1 飞灰固化稳定化工艺问题

飞灰固化稳定化是进行填埋处置的前提条件。飞灰稳定化是利用化学药剂钝化重金属变成不溶

于水的无机矿物质或高分子络合物。飞灰固化是指把飞灰掺合并包容在惰性基材中, 固化后废物与环境接触的面积显著减小, 进而限制污染物的迁移。目前飞灰固化稳定化工艺多, 固化剂、稳定剂种类繁多, 造成固化稳定化飞灰的化学组分、物理形态、力学特性差异较大^[5-7]。水泥、石灰固化飞灰, 虽然成本低, 飞灰固化后物理力学特性好, 但增重和增容较大, 且随着时间增长, 重金属有重新释放危险。化学药剂稳定化飞灰, 虽然成本高, 但固化不增容或少增容, 处理效果稳定, 由于水泥类固化剂添加很少, 呈螯合散粒状。焚烧飞灰实际固化稳定化过程中一般为几种固化剂、稳定剂通过一定的配比联合使用, 焚烧飞灰常规固化、稳定化工艺流程如图 3 所示。不同的固化剂、稳定剂所形成的固化飞灰将直接影响飞灰填埋作业工艺、渗滤液水质、渗滤液处理工艺, 进而造成固化飞灰填埋场设计中的不确定性, 使填埋场无法正常持续运行。

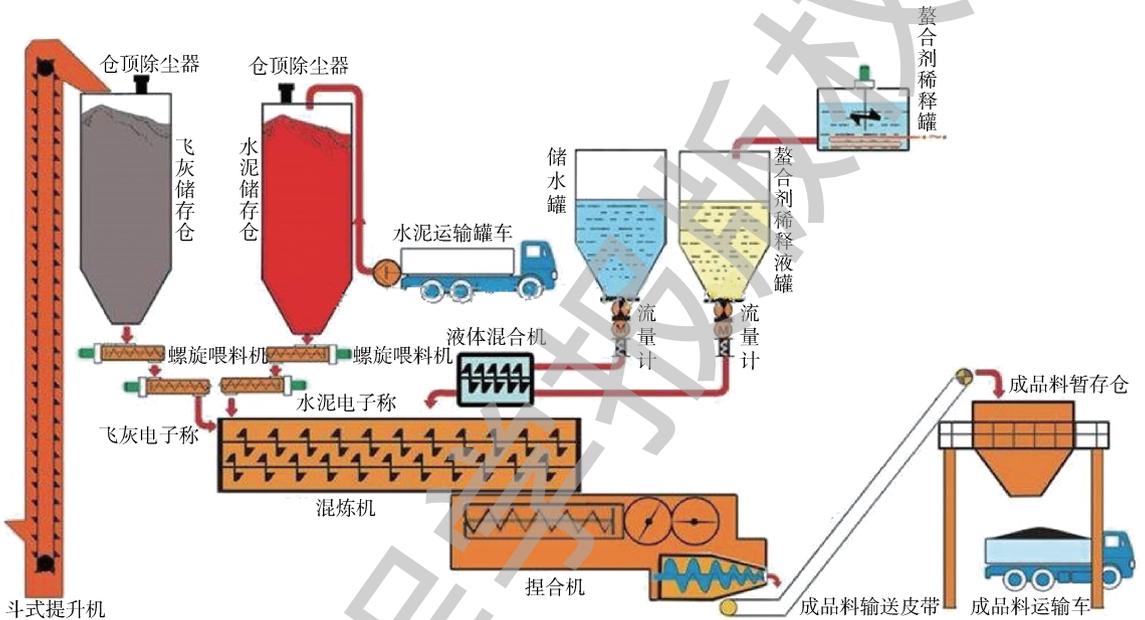


图 3 焚烧飞灰常规固化、稳定化工艺流程

Fig. 3 Typical solidification and stabilization process of incinerated fly ash

2.2 飞灰填埋场设计中问题

焚烧后的固化飞灰的土工特性与生活垃圾完全不同, 其最大的不同在于没有生化降解特性。国内某垃圾焚烧厂采用“SNCR (炉内) + 半干法 (旋转喷雾反应塔) + 干法 (碳酸氢钠) + 活性炭喷射 + 布袋 + SCR”的烟气净化系统, 焚烧飞灰采用水泥、石灰、有机高分子螯合剂进行固化稳定化。通过对固化飞灰填埋场飞灰堆体进行现场勘察取样, 进行室内实验, 获得其土工特性, 并与焚烧厂炉渣、垃圾土进行对比分析, 如表 1 所示。由表 1 可知, 固化飞灰属于砂砾类土, 其含水量小于持水量, 压缩系数为 1.33~2.96, 属高压缩性土, 渗透系数为 $10^{-3} \sim 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 属于中等透水, 内摩擦角大于 30° , 黏聚力为 0 kPa。固化飞灰工程特性完全不同于生活垃圾, 直接影响固化飞灰填埋库区的水平防渗系统、渗滤液产量计算、竖向堆高、填埋堆体沉降、边坡稳定分析、填埋坡度等一系列关键设计参数的确定。

对某固化飞灰填埋场渗滤液水质取样测试, 水质指标如表 2 所示。由表 2 可知, 固化飞灰渗滤液 pH 为 9.3, 钙离子浓度为 $5740 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 显著高于生活垃圾填埋场; 而 COD 浓度为 $1155 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 显著低于生活垃圾填埋场。研究^[8-9]表明: 当渗滤液中钙、镁、铁等阳离子含量较高, 且 pH 呈碱性时, 渗滤液导排容易发生化学淤堵现象; 当 COD 含量较高时, 容易发生生物淤堵。因此, 固化飞灰填埋场设计中应考虑渗滤液收集导排系统的化学淤堵问题。

表1 固化飞灰土工特性
Table 1 Geotechnical characteristics of solidified fly ash

飞灰及土类别	平均粒径 d_{50}/mm	极配特性	比重 d_s	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	含水量 $\omega/\%$	持水量/ $\%$
固化飞灰	0.8~4.87	极配不良	2.68	1.1~1.45	15.1~50.2	20.1~130.9
炉渣	4.98	极配良好	2.86	1.17~1.54	—	22.0~23.5
垃圾土 ^[10]	—	极配不良	2.0	1.0~1.15	26.0~60.0	30.0~45.0

飞灰及土类别	渗透系数 $k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	压缩系数 $a_{v1.2}/\text{MPa}^{-1}$	修正压缩指数 C_c	固结系数 $C_v/(\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c/kPa
固化飞灰	$9.1 \times 10^{-5} \sim 6.5 \times 10^{-3}$	1.33~2.96	0.147~0.208	0.095~0.845	32.5~35.8	11.9~19.5
炉渣	$1.1 \times 10^{-2} \sim 6.1 \times 10^{-3}$	0.45	0.12	0.15~1.06	46.5	0
垃圾土 ^[10]	$10^{-2} \sim 10^{-4}$	0.34	—	—	12~33	0~30

表2 固化飞灰渗滤液水质
Table 2 Leachate water quality of solidified fly ash

水质类别	pH	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	COD/ (mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	SS/ (mg·L ⁻¹)	Ca ²⁺ / (mg·L ⁻¹)	Cl ⁻ / (mg·L ⁻¹)
设计进水水质	7~10	50	150	20	30	300	—	—
实测水质	9.3	516	1 560	129	20	200	5 740	51 400
垃圾渗滤液水质 ^[11]	5~8	1 000~20 000	6 000~30 000	600~4 000	100~200	500~4 000	400	1 000~8 000

2.3 填埋作业工艺中的问题

固化飞灰填埋作业规模较小,远小于生活垃圾填埋处理规模。目前,国内固化飞灰填埋大都参照生活垃圾的填埋作业工艺,填埋作业方式比较粗放,填埋作业面积大。固化飞灰经入场检测合格后,运输至填埋作业区进行倾倒入料,摊铺、压实后,填埋至设计标高后进行中间覆盖,最终进行封场覆盖。上述填埋作业方式容易产生如下问题:1) 固化飞灰在进入填埋场之前为危险废物,其本身一般含有 H₂S、NH₃-N 等刺激性气味,倾倒入料、摊铺、压实作业过程中容易产生扬尘,对填埋作业人员容易产生职业健康安全问题;2) 填埋作业面积大,雨污分流困难,导致渗滤液产量较大;3) 由于填埋引起的扬尘散落在 HDPE 日覆盖膜上,导致 HDPE 膜上初期污水处理量大。

2.4 飞灰渗滤液水质问题

固化飞灰渗滤液水质有别于一般生活垃圾渗沥液^[12],生活垃圾焚烧后,飞灰中有机物含量极少,渗沥液污染物以重金属为主^[13],渗沥液处理工艺以去除重金属为主要目标。通过对国内几处飞灰填埋场渗滤液水质取样进行分析,得到渗滤液水质中的非重金属指标,并与生活垃圾渗滤液水质进行对比分析,如表2所示。由上述实测水质可知,固化飞灰渗滤液中污染物除重金属外,BOD₅、COD和NH₃-N远高于设计进水水质,渗滤液处理后无法直接达标排放。此外Cl⁻含量极高,高盐水质大大限制了处理工艺的选择,导致常见的生化技术和膜分离技术都无法正常运行,同时对渗滤液抽排泵及渗滤液处理设备具有腐蚀性,直接影响固化飞灰填埋场后续填埋运行。Ca²⁺含量较高,其原因为垃圾焚烧过程中会产生大量的酸性气体,为了控制它们的排放,通常会向烟气中喷入含钙的吸附剂,从而导致了飞灰中有比较高的钙含量。Ca²⁺含量高,极易造成固化飞灰填埋场渗滤液收集导排层及导排管结垢淤堵。

通过对焚烧厂烟气处理工艺及飞灰固化、稳定工艺流程、处理过程进行分析,发现造成固化飞灰渗滤液水质与设计水质异常原因如下。

1) 飞灰本身COD含量很低。飞灰稳定化过程中采用有机螯合剂,且在飞灰加湿环节采用焚烧厂渗滤液处理的浓缩液作为加湿用水,导致飞灰渗滤液中COD显著增高。

2) 飞灰本身不含 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。焚烧厂烟气处理工程中向烟气喷氨水脱硝以及飞灰加湿环节采用渗滤液处理的浓缩液作为加湿用水, 导致飞灰渗滤液中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 偏高。

3) 由于生活垃圾中的塑料材质中含氯多, 生活垃圾焚烧后 Cl^- 进行释放, 垃圾焚烧烟气处理后在飞灰中富集大量的氯。此外, 飞灰加湿环节采用渗滤液浓缩液作为加湿用水, 同样会导致飞灰渗滤液中 Cl^- 偏高。

3 对策措施与建议

3.1 飞灰填埋库区设计的对策

固化飞灰填埋场设计过程中, 应调查垃圾焚烧烟气处理工艺、焚烧飞灰的固化稳定化工艺, 并对焚烧厂固化稳定化飞灰取样, 进行化学组分、浸出液水质特性、土工特性指标等测试, 为固化飞灰填埋场的设计提供依据。飞灰的化学组成对固化飞灰中重金属特性和稳定化处理都有一定的影响^[4], 化学组分主要测试 C、O、Si、Cl、S、P、Na、K、Mg、Ca、Al、Fe 等含量。飞灰固化稳定工艺将决定固化飞灰的形态、气味/化学组分, 从而影响填埋作业工艺的设计, 固化飞灰浸出液指标将直接影响渗滤液处理工艺的选择, 渗滤液收集导排层的设计。浸出液水质特征主要包括 COD、 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-H}$ 、 Cl^- 、SS 以及重金属离子等。土工特性指标包括密度、含水率、比重、持水量、压缩系数、压缩指数、抗剪强度等参数。比重、密度用于飞灰库区库容量的评估, 含水量、持水量用于固化飞灰渗滤液产量计算。压缩系数、压缩指数用于固化飞灰填埋场堆体的沉降计算, 固化飞灰内摩擦角、黏聚力等抗剪强度指标将用于飞灰堆体填埋坡比、堆体边坡稳定的分析。

3.2 飞灰填埋场运营管理措施

由于固化飞灰填埋作业规模较小, 远小于生活垃圾填埋处理规模; 而固化飞灰在进入填埋场之前为危险废物, 其本身一般含有刺激性气味, 作业过程中容易产生扬尘; 固化飞灰自身渗滤液产生量小, 但渗滤液非常难处理。因此, 灰渣填埋场的作业管理相对于生活垃圾填埋场要求更高, 需进行科学设计, 精细化管理, 逐步建立完善的、操作性强的填埋作业管理制度, 其核心是减少固化飞灰渗滤液的产生量, 目标是做到渗滤液的“零”产生。

根据国内许多已建飞灰填埋场实际运行中固化飞灰浸出液、渗滤液含有一定量的 COD、 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$, 导致常规以去除重金属为主的渗滤液处理工艺出水无法达标排放; 同时, 渗滤液中 Cl^- 含量极高, 对渗滤液处理工艺、渗滤液处理设备正常运行及使用寿命造成极大的影响。因此, 建议填埋运营单位在固化飞灰入场检测中, 除满足 GB 16889-2008^[15] 第 6.3 条规定外, 还需加强对固化飞灰浸出液中 COD、 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 Cl^- 的检测, 并与固化飞灰产生单位签订相关入场补充协议, 明确 COD、 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 Cl^- 等含量的限值。根据工程实际经验, 固化飞灰浸出液指标限值建议采用表 3 中的指标, 实际运营过程中应根据固化飞灰渗滤液处理工艺进行调整。

3.3 填埋作业工艺改进措施

固化飞灰进入飞灰填埋场一般存在 2 种状态, 一种为散状固化飞灰, 另一种为袋装或者吨袋飞灰。固化飞灰填埋作业工艺应根据固化飞灰入场的形态、含水率、气味、工程特性的因素确定。填埋作业工艺分为摊铺式填埋和吊装式填埋 2 种, 摊铺式填埋作业适用于散装固化飞灰。吊装式填埋适合于吨袋固化飞灰。飞灰填埋场实际运行过程中可根据填埋物的状态选择其中 1 种或 2 种组合进行填埋作业。由表 3 可知, 固化飞灰属于高压缩性土, 含水量低, 参照生活垃圾的填埋方式将产生扬尘、气味、库容率低等问题。散装飞灰摊铺填埋过程中应控制固化飞灰的含水率、压实度等指标, 进行分层碾压, 有利于提高固化飞灰堆体的稳定性, 又可以增加库容。固化飞灰本身含水率低, 摊铺过程中容易引起扬尘, 产生刺激性气味, 对填埋作业人员的职业健康安全不利, 建议在填埋作业过程中喷洒一定量的水, 即可以控制扬尘, 同时有利于在最优含水率 $\pm 2\%$ 的情况下获得最大的压

实度。

由于散装飞灰摊铺填埋过程中不可避免地会产生扬尘,临时覆盖膜上的扬尘导致填埋库区初期雨水无法进行直排,需要同渗滤液一样进入渗滤液处理站进行处理。同时,垃圾焚烧烟气处理过程中一般会加入氨水,飞灰固化/稳定化过程中一般会加入有机高分子螯合剂,造成固化飞灰填埋过程中产生刺激性的气味。为了保护填埋作业人员职业健康安全,防止扬尘产生,减少初期污水量和渗滤液产量,固化飞灰应逐渐由散装转变为袋装,填埋作业方式应逐渐由摊铺式填埋转变为吨袋吊装填埋。

表3 固化飞灰浸出液指标含量限值
Table 3 Content limit of solidified fly ash leachate index

pH	COD/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N/ (mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	Cl ⁻ /(mg·L ⁻¹)	Ca ²⁺ /(mg·L ⁻¹)
7~10	1 000~1 500	50~100	25~50	40~80	300	8 000	500
汞/(mg·L ⁻¹)	铜/(mg·L ⁻¹)	铅/(mg·L ⁻¹)	镉/(mg·L ⁻¹)	镍/(mg·L ⁻¹)	砷/(mg·L ⁻¹)	总铬/ (mg·L ⁻¹)	六价铬/ (mg·L ⁻¹)
0.05	40	0.25	0.15	0.5	0.3	4.5	1.5

3.4 雨水分流措施

固化飞灰含水率底,远小于其持水量,固化飞灰自身不但不产生渗滤液,同时还可以吸收储存一定量的渗滤液。然而实际运行过程中,由于填埋作业管理、填埋作业工艺、雨污分流等原因,固化飞灰渗滤液产量却较大。渗滤液主要来源于填埋作业过程中雨水入渗。在固化填埋场设计及运行过程中,实现清污分流,最大限度地减少渗沥液的产生量,是固化飞灰填埋场可持续运行最基本的原则和保证。实现雨污分流,建议采取如下措施:1)分期建设,分区填埋,有效减少填埋区汇水面积;2)设置临时或永久排水沟,合理截流、导排;3)填埋作业前采用1.0 mm的HDPE膜对填埋区表面进行全面临时覆盖,填埋作业时局部揭开后填埋,填埋作业完成后及时覆盖;4)设置飞灰暂存仓库,如遇降雨、降雪、大风等不良天气,则不进行固化飞灰填埋作业,在良好天气情况下进行集中填埋。

3.5 飞灰渗滤液处理建议

由固化飞灰渗滤液水质特性可知,渗滤液非常难处理,不仅去除重金属,还需处理一定量BOD₅、COD和极高含量的Cl⁻。同时,由于固化飞灰由于填埋处理规模较小,自身含水率低,持水量较大,其渗滤液产量相对于生活垃圾渗滤液很小,渗滤液处理规模小,运行时间短,渗滤液处理后满足GB 16889-2008中排放标准,直接导致单位处理成本高。因此,固化飞灰固化飞灰渗滤液可以考虑预处理去除重金属离子后,进入生活垃圾渗滤液处理站进行最终处理;或者预处理后再进入生活污水处理厂集中处理,污水处理厂处理规模一般为万吨级,可以有效稀释渗滤液中的BOD₅,COD和Cl⁻。

若不允許飞灰渗滤液预处理后接入生活垃圾渗滤液处理站或污水处理场,渗滤液处理工艺则需解决2个难点问题:1)水质高盐问题;2)去除水质中超标的COD、NH₃-N,确保水质达标排放。尽管GB 16889-2008和GB 18918-2002^[6]排放标准中对盐分无要求,但高盐水质大大限制了处理工艺的选择,导致常见的生化技术和膜分离技术都无法正常运行。为确保工艺的正常运行,需先除盐处理,目前仅有蒸发技术适用于去除高盐问题。在蒸发除盐的基础上,检测蒸馏水水质,有针对性地选择蒸馏水处理工艺,同时根据除盐后水质选择有效的深度处理工艺。针对重金属超标采用“物化+还原氧化+絮凝沉淀”工艺;针对COD和NH₃-N超标采用“水解+MBR+臭氧+活性炭过滤”工艺。因此,固化飞灰渗滤液处理在投资允许的情况下,可在图4工艺的基础上进行深入优化研究。

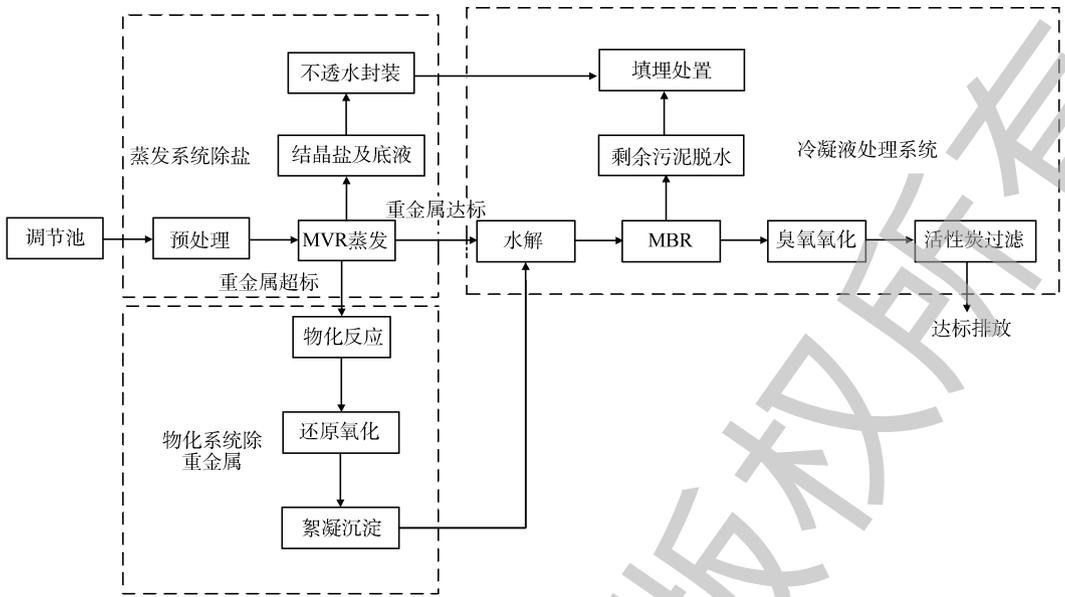


图 4 固化飞灰渗滤液处理工艺

Fig. 4 Leachate treatment process of solidified fly ash

4 结语

1) 固化飞灰在化学组分、土工特性等方面与生活垃圾有着显著的不同, 参照生活垃圾填埋场相关规范进行固化飞灰填埋场设计、运营缺少针对性。

2) 固化飞灰填埋处置存在固化/稳定化工艺多样性造成固化飞灰化学组分、土工特性差异较大, 直接影响填埋场渗滤液组分、产量, 堆体沉降、边坡稳定, 水平防渗结构等一系列关键设计参数的计算与选择。固化飞灰填埋场设计前应调查飞灰固化稳定化工艺, 并对固化飞灰取样进行相关设计参数测试分析。

3) 固化飞灰摊铺式填埋容易导致扬尘、刺激性气味、渗滤液产量大等问题, 应由散装摊铺式填埋转变为吨袋吊装式填埋。填埋运营管理应精细化, 雨污分流应采取全面积临时覆盖、暂存集中填埋等措施, 最大限度减少渗滤液产生。

4) 固化飞灰渗滤液 BOD_5 、 COD 、 NH_3-N 、 Cl^- 等指标严重超标, 造成渗滤液处理困难, 应完善固化飞灰入场检测标准, 补充 BOD_5 、 COD 、 NH_3-N 、 Cl^- 等含量限值。

5) 建议编制固化飞灰填埋场相关设计规范、标准, 指导工程设计、建设与填埋运行。

参考文献

- [1] 中国环境保护产业协会城市生活垃圾处理专业委员会. 城市生活垃圾处理行业 2015 年发展报告 [J]. 中国环卫产业, 2016(8):5-10.
- [2] 张建铭. 垃圾焚烧灰渣特性及其在路基工程中的应用研究 [D]. 杭州:浙江工业大学, 2010.
- [3] 蒋旭光, 常威. 生活垃圾焚烧飞灰的处置及应用概况 [J]. 浙江工业大学学报, 2015, 43(1):7-17.
- [4] 国家环境保护总局. 危险废物污染防治技术政策: 环发 [2001]199 号 [S]. 北京:中国环境科学出版社, 2001.
- [5] 刘辉, 孟菁华, 史学峰. 生活垃圾焚烧飞灰重金属稳定化技术综述 [J]. 环境科学与管理, 2016, 41(5):69-71.
- [6] 林祥. 城市生活垃圾焚烧飞灰药剂稳定化研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2006.
- [7] 罗春晖, 刘振鸿, 池冬华. 城市生活垃圾焚烧飞灰的稳定化技术 [J]. 东华大学学报 (自然科学版), 2004, 30(2):130-133.
- [8] BOOKER J R, ROWE R K. Modelling impacts due to multiple landfill cells and clogging of leach[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(1):1-14. DOI:10.1139/97-069.

- [9] FLEMING I R, ROWE R K, CULLIMORE D R. Field observations of clogging in a landfill leachate collection system [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1991, 36(4): 685-707. DOI:10.1139/99-036.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范: CJJ 176-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [11] 住房和城乡建设部标准定额研究所. 生活垃圾渗滤液处理技术导则: RISN-TG023-2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [12] 罗小勇, 王艳明, 熊建英, 等. 垃圾填埋场污泥坑原位修复工程实践 [J]. *环境工程学报*, 2018, 12(9): 2707-2716. DOI:10.12030/j.cjee.201803196.
- [13] 何晶晶, 章骅, 曹群科. 上海浦东垃圾焚烧发电厂飞灰性质研究 [J]. *环境化学*, 2004, 23(1): 38-42.
- [14] 张岩. 垃圾焚烧飞灰中重金属的渗滤特性及飞灰固化处理的实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [15] 环境保护部. 生活垃圾填埋场污染控制标准: GB 16889-2008[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [16] 国家环境保护总局. 城市污水处理厂污染物排放标准: GB 18918-2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- (本文责任编辑: 郑晓梅)

Problems and countermeasures in solidification and stabilization fly ash landfill disposal of waste incineration

LUO Xiaoyong¹, WANG Yanming^{1,*}, GONG Xiwei², XU Hui³

1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China

2. Nanjing Urban Construction Investment Holding (Group) Co., Ltd., Nanjing 210006, China

3. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

* Corresponding author, E-mail: wangyanming@smedi.com

Abstract The safe disposal of fly ash in China is a weak link in the pollution control and risk management of municipal solid waste incineration. Due to various fly ash solidification stabilization processes, the chemical fly ash has different chemical, physical, and mechanical characteristics, and the solid fly ash landfill design standards and specifications are missing. The solidified fly ash landfill disposal has a series of problems such as large dust, strong irritating odor, large leachate production, complex leachate components, difficult leachate treatment and difficulty in continuous operation of the landfill site. Based on the results of field and laboratory tests, the engineering characteristics of solidified fly ash and the typical values of leachate quality were proposed. Through comparison and analysis, solidified fly ash landfill operations, rain and sewage diversion, and leachate treatment were proposed. Other related optimization proposals provide a systematic solution for solidified fly ash safe landfill disposal.

Key words solidified fly ash; engineering characteristics; leachate quality; landfill operation technology