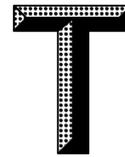


ICS 13.030.10
CCS Z 71



团 体 标 准

T/CI 928—2025

垃圾灰矿化固碳技术导则

Guidelines for carbon sequestration technology through mineralization of
waste incineration fly ash

2025-03-17 发布

2025-03-17 实施

中国国际科技促进会 发布
中国标准出版社 出版

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 工艺概述	2
4.1 工艺流程	2
4.2 总体原则	2
5 垃圾灰脱氯预处理工艺	3
5.1 技术原理	3
5.2 脱氯工艺	3
5.3 工艺要求	3
6 CO ₂ 矿化工艺	4
6.1 技术原理	4
6.2 矿化工艺	4
6.3 关键设备	5
6.4 关键设备要求	5
6.5 工艺要求	6
7 重金属稳定化工艺	6
7.1 技术原理	6
7.2 处理要求	6
8 工艺设备布置	7
8.1 设备布置要求	7
8.2 管道敷设要求	7
9 验收	7
9.1 工程验收	7
9.2 工艺验收	7
9.3 环境保护验收	8
参考文献	9

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国国际科技促进会提出并归口。

本文件起草单位：华中科技大学、中石化(大连)石油化工研究院有限公司、浙江树人学院、中国环境保护集团有限公司、长江生态环保集团有限公司、武汉市衷合环保科技有限公司、国电电力发展股份有限公司、国家能源煤基能源碳捕集利用与封存技术研发中心。

本文件主要起草人：赵永椿、孙浩程、高林、王成龙、陈浚、王泽宇、朱浩、韩怡语、张军营、张田田、朱江涛、王天堃、顾永正、魏书洲、寻志伟、刘远成、郭超、熊卓、姜华瑀、王玉洁、郑迺文、冯一帆、陈传帅、李歌、刘思远、周明涵、王怀东、亢连伟。

垃圾灰矿化固碳技术导则

1 范围

本文件给出了垃圾灰矿化固碳技术的基本原理、工艺概述、工艺设备要求等内容,为垃圾灰矿化固碳工艺设计和运行提供了指导。

本文件适用于垃圾焚烧电厂烟气CO₂矿化封存协同垃圾灰处理处置工作。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB 8978 污水综合排放标准
- GB 16889 生活垃圾填埋场污染控制标准
- GB 50231 机械设备安装工程施工及验收通用规范
- GB 50236 现场设备、工业管道焊接工程施工规范
- GB 50254 电气装置安装工程 低压电器施工及验收规范
- GB 50255 电气装置安装工程 电力变流设备施工及验收规范
- GB 50275 风机、压缩机、泵安装工程施工及验收规范
- CJ/T 538 生活垃圾焚烧飞灰稳定化处理设备技术要求
- HJ 557 固体废物浸出毒性浸出方法 水平振荡法
- HJ 662 水泥窑协同处置固体废物环境保护技术规范
- HJ 1091 固体废物再生利用污染防治技术导则
- HJ 1134 生活垃圾焚烧飞灰污染控制技术规范(试行)
- HJ 2025 危险废物收集、贮存、运输技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

垃圾灰 waste incineration fly ash

垃圾焚烧处置过程中烟气净化系统捕集的飞灰。

3.2

水洗脱氯 water dechlorination

通过水洗的方式将可溶性氯化物从垃圾灰中脱除的过程。

3.3

氯脱除率 chlorine removal rate

水洗脱氯前后垃圾灰中Cl含量减少的比例。

3.4

液固比 liquid/solid ratio

垃圾灰浆液中液相和固相质量的比值。

3.5

垃圾灰浆液 waste incineration fly ash slurry

垃圾灰固相与液相(水或其他溶液)按一定液固比形成的液固混合物。

3.6

水洗垃圾灰 fly ash after water washing

通过水洗脱氯后的垃圾灰固相产物。

3.7

CO₂矿化 CO₂ mineralization

通过烟气(废气)中的CO₂与垃圾灰等碱性固体废弃物(矿物)发生酸碱中和反应,使之生成碳酸盐矿物的过程。

3.8

CO₂矿化转化率 CO₂ mineralization conversion rate

经过矿化塔前后烟气中CO₂的浓度差值与入口CO₂浓度的比值。

3.9

稳定剂 stabilizer

能够促进垃圾灰中的重金属发生化学反应并生成稳定的化合物,从而使重金属稳定化的化学物质。

3.10

浸出毒性 leaching toxicity

固体废物中的重金属在特定条件下浸出到水中的能力。

注:在矿化稳定化工艺中,通过降低垃圾灰的浸出毒性,可以减少其对环境和人体的潜在危害。

4 工艺概述

4.1 工艺流程

垃圾灰矿化固碳技术主要包括垃圾灰脱氯预处理技术、CO₂矿化技术,并在CO₂矿化工艺中协同稳定重金属。通过CO₂矿化工艺系统使高碱、高重金属的垃圾灰与CO₂充分接触反应,在实现垃圾灰稳定化的同时封存CO₂,稳定化的垃圾灰可直接填埋或资源化利用。

4.2 总体原则

4.2.1 垃圾灰矿化固碳技术工艺系统的总体设计宜遵循下列原则:

- a) 工艺流程及设备布置合理;
- b) 交通运输便捷;
- c) 方便施工,有利于维护检修;
- d) 合理利用地形、地质条件;
- e) 充分利用厂内公用设施;
- f) 节约用地,工程量小,运行费用低;
- g) 符合环境保护、劳动安全和工业卫生要求。

4.2.2 垃圾灰的收集、贮存和运输应符合HJ 2025规定。

4.2.3 垃圾灰宜先预处理(如筛选、脱氯)后再进行矿化固碳,以去除较大的颗粒或杂质,并提高矿化效

率。预处理过程宜采取避免垃圾灰扬尘、遗撒的措施。

4.2.4 垃圾灰矿化固碳工艺设计应具备足够的理论研究、实验验证以及模拟运行。

4.2.5 垃圾灰矿化固碳工艺系统应具备足够的自动化水平,装备自动控制系统、在线监测系统、预警及报警系统。

4.2.6 垃圾灰矿化固碳的设备满足下述要求是必要的:

- a) 保持封闭无泄漏,能够在设定工况下流畅运行;
- b) 具备防腐防水能力。

4.2.7 垃圾灰矿化固碳处理后产物指标满足 HJ 1134 及本文件指标要求,对于矿化固碳处理后不达标的产物进行重复处理。

5 垃圾灰脱氯预处理工艺

5.1 技术原理

采用水洗脱氯工艺,此过程能够有效去除垃圾灰中所含的可溶性氯盐,如 CaCl_2 、 NaCl 、 KCl 等,是 CO_2 矿化工艺必要的预处理过程。在水洗阶段结束后,通过预处理步骤清除水洗废水中的杂质,可利用 Ca^{2+} 生产碳酸钙副产品,并通过蒸发结晶技术从中提取氯化钠和氯化钾,最后经由蒸汽冷凝处理,实现水资源的循环再利用。

5.2 脱氯工艺

5.2.1 垃圾灰水洗脱氯典型工艺流程参见图 1。

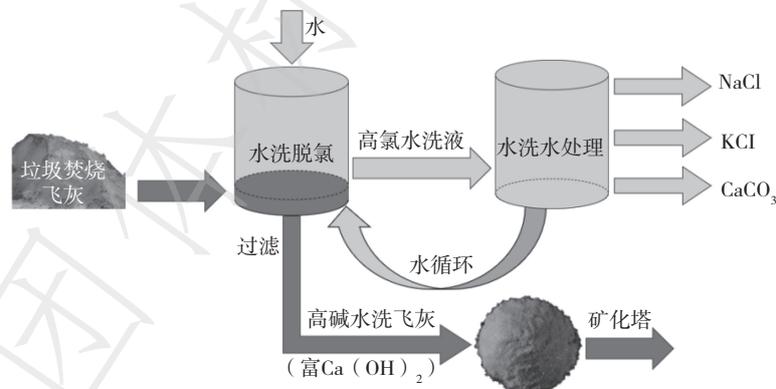


图 1 垃圾灰脱氯典型工艺流程示意图

5.2.2 垃圾灰脱氯典型工艺宜包括垃圾灰制浆单元、水洗单元、水洗水处理单元等。

5.2.3 垃圾灰水洗脱氯工艺方案(设备尺寸、液固比等)宜综合垃圾灰的成分、垃圾灰来源、垃圾焚烧厂尾气处理工艺、处理标准确定。

5.3 工艺要求

5.3.1 垃圾灰脱氯工艺宜设置灰—水自动计量控制系统,并采用全密闭装置,同时设置返料设施。

5.3.2 垃圾灰脱氯液固比和温度宜根据垃圾灰氯含量等特性确定。

5.3.3 垃圾灰脱氯处理过程污染防治、技术方法和控制要求有必要符合本文件及 HJ 1134 的规定。

5.3.4 垃圾灰水洗脱氯过程产生的生产废水有必要返回工艺过程进行循环使用,不宜外排。废水处理直接对环境排放的,宜满足 GB 8978 要求。

- 5.3.5 垃圾灰水洗设备宜具备耐磨、防腐、密闭等性能。
- 5.3.6 垃圾灰水洗脱氯过程中产生可燃、有毒有害气体的工段及车间有必要配置相应的气体报警装置和废气收集、净化系统。
- 5.3.7 废气收集、净化宜在密闭设备或系统中进行,并定期进行泄漏检测及维护。
- 5.3.8 水洗脱氯工艺的氯脱除率,指水洗前后垃圾灰中Cl含量减少的比例,宜根据公式(1)计算:

$$\Delta\omega = \frac{\omega_1 M_1 - \omega_2 M_2}{\omega_1 M_1} \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

式中:

- M_1 ——水洗前垃圾灰质量,单位为克(g);
- ω_1 ——水洗前垃圾灰中Cl含量,%;
- M_2 ——水洗后垃圾灰质量,单位为克(g);
- ω_2 ——水洗后垃圾灰中Cl含量,%。

- 5.3.9 垃圾灰和水洗垃圾灰中的Cl含量宜通过X射线荧光光谱仪进行测定。
- 5.3.10 水洗脱氯后垃圾灰中可溶性氯盐含量宜符合HJ 1134要求。
- 5.3.11 经检测不符合要求的垃圾灰处理物(包括固体和水相)宜进行二次处理,直至合格后方可进行CO₂矿化工艺流程。

6 CO₂矿化工艺

6.1 技术原理

CO₂矿化工艺涉及的原理本质为酸碱中和反应,垃圾灰含CaO呈碱性,烟气中CO₂溶于水呈酸性。碱性的垃圾灰浆液与烟气充分接触发生CO₂矿化反应,生成碳酸钙,从而将CO₂封存于垃圾灰中。

6.2 矿化工艺

6.2.1 CO₂矿化技术典型工艺流程示意图参见图2。

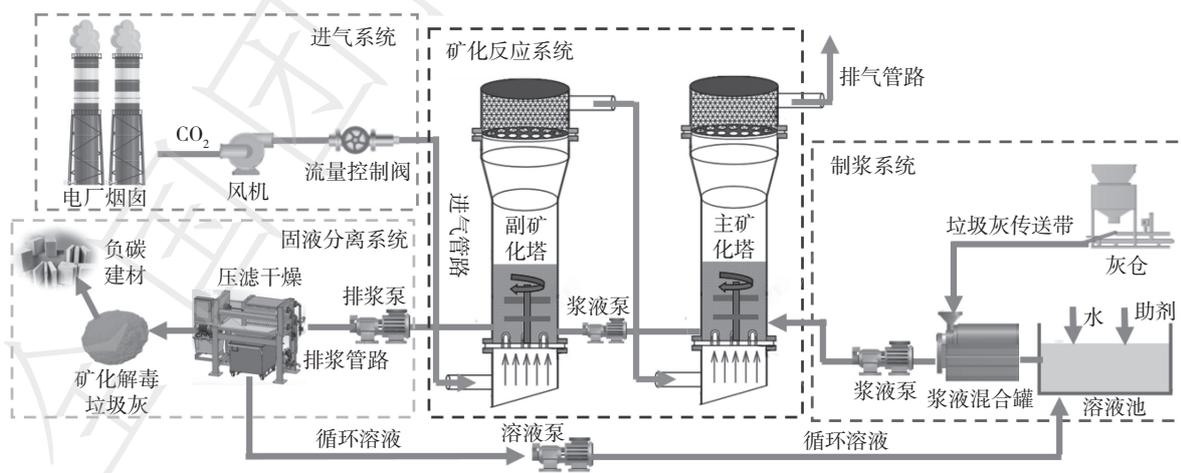


图2 垃圾灰CO₂矿化技术典型工艺流程示意图

- 6.2.2 CO₂矿化工艺宜采用垃圾灰湿法CO₂矿化技术以提高CO₂与垃圾灰的反应性。
- 6.2.3 CO₂矿化工艺宜包括进气系统、制浆系统、矿化反应系统和固液分离系统。

6.2.4 CO₂矿化工艺宜采用主副双矿化塔布置方式,使垃圾灰充分固碳降碱。

6.3 关键设备

6.3.1 垃圾灰矿化固碳技术涉及设备尺寸参数宜根据烟气处理量、水洗垃圾灰组分、CO₂控制规划和环境影响评价要求的CO₂固定效率、垃圾灰重金属控制要求、垃圾灰的综合利用、垃圾灰的填埋堆存、场地尺寸等因素,经全面优化后确定。

6.3.2 制浆系统包括但不限于物料传送带、浆液混合罐、溶液池、输送泵等设备。

6.3.3 矿化反应系统包括但不限于CO₂矿化塔、输送泵、烟气在线监测设备等。

6.3.4 固液分离系统包括但不限于压滤机、物料传送带、输送泵等设备。

6.4 关键设备要求

6.4.1 物料传送带

物料传送带宜采用封闭式输送装置,输送速度与出力量宜根据混浆罐尺寸、液固比、CO₂矿化效率等因素确定。

6.4.2 溶液池

溶液池容纳含CO₂矿化助剂的水溶液,溶液池尺寸宜根据与垃圾灰的固液比、垃圾灰浆液输送速度、溶液循环量等因素确定。

6.4.3 浆液混合罐

宜配置2座浆液混合罐,浆液混合罐尺寸宜根据CO₂矿化塔尺寸确定,保证CO₂矿化塔连续运行。每座浆液混合罐配置搅拌装置、溢流装置和液位计。

6.4.4 输送泵

输送泵与工艺介质具有相容性,宜满足工艺要求的额定流量和扬程,输送泵宜一用一备,输送泵宜采用耐磨与防腐材质。

6.4.5 CO₂矿化塔

CO₂矿化塔宜采用双塔布置,宜采用鼓泡式反应塔或鼓泡—喷淋式反应塔,塔内布置搅拌装置、溢流装置、液位计、pH计、除雾器、压力传感器等装置,CO₂矿化塔尺寸宜根据塔内烟气流速、液位段高度、CO₂矿化转化率、垃圾灰处理量综合设计。CO₂矿化转化率是指经过矿化塔前后烟气中的CO₂的浓度差值与入口CO₂浓度的比值,根据公式(2)计算。CO₂矿化转化率作为固碳评价技术指标。

$$\varphi = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中:

φ ——CO₂矿化转化率,%;

C_{in} ——矿化塔入口CO₂浓度,%;

C_{out} ——矿化塔出口CO₂浓度,%。

6.4.6 烟气在线监测设备

烟气在线监测设备用于监测矿化塔进出口CO₂浓度等,CO₂浓度测量范围宜在0%~20.00%,准确

度宜为0.01%，具备实时性、稳定性、准确性。

6.4.7 压滤机

压滤机属于固液分离装置，压滤机尺寸宜根据CO₂矿化塔额定运行容量、液固比等参数确定，固相产物含水率根据公式(3)计算。

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

式中：

- w —— 含水率，%；
- m₁ —— 样品初始重量，单位为克(g)；
- m₂ —— 样品干基重量，单位为克(g)。

6.4.8 风机

风机选型宜满足所处理介质的要求，风机宜设置变频调节器，并按照工艺要求和节能原则调节装置。

6.5 工艺要求

- 6.5.1 CO₂矿化设备宜具备耐磨、防腐、密闭等性能。
- 6.5.2 CO₂矿化塔及其附属部件(输送泵、pH计、压力/温度传感器等)宜接入自动控制系统。
- 6.5.3 垃圾灰浆液的浓度/液固比有必要控制在工艺允许的范围，垃圾灰浆液的浓度/固液比与消耗量宜入自动控制系统。
- 6.5.4 经CO₂矿化后产物利用过程的污染防治宜按照HJ 1091规定执行。

7 重金属稳定化工艺

7.1 技术原理

采用CO₂矿化协同重金属固定一体化技术进行垃圾灰中重金属稳定化处理。在CO₂矿化反应过程中，垃圾灰溶液中的金属离子将和CO₃²⁻反应形成沉淀，使重金属浸出浓度下降。其次，Pb、Zn和Cu等重金属与Ca属于类质同象，反应过程中通过同晶替代的方式形成沉淀，从而导致自身的浸出浓度降低。另外，Pb、Zn和Cu等重金属在向碳酸盐转变过程中可能依附于形成的CaCO₃沉淀的表面，从而形成共沉淀，也可降低重金属的浸出浓度。

7.2 处理要求

- 7.2.1 处理前宜对垃圾灰进行重金属含量分析，确定其中主要重金属的种类和含量。
- 7.2.2 根据重金属种类与特性，在CO₂矿化过程中添加合适的重金属稳定剂，以强化重金属稳定性。
- 7.2.3 垃圾灰稳定化处理工艺设备符合CJ/T 538的规定。
- 7.2.4 对经过矿化稳定化处理前后的垃圾灰产物进行浸出毒性分析，宜按照HJ 557方法制备浸出液。经矿化稳定化处理后的垃圾灰浸出液中重金属浓度宜不超过GB 8978最高允许排放浓度。
- 7.2.5 垃圾灰处理产物用于水泥熟料生产时，重金属浸出浓度及氯含量符合HJ 662的要求。
- 7.2.6 垃圾灰处理产物填埋时，重金属浸出浓度及含量符合GB 16889的要求。

8 工艺设备布置

8.1 设备布置要求

8.1.1 垃圾灰矿化固碳技术工艺设备以满足以下原则为宜：

- a) 物料输送管道顺畅、短捷为原则,结合现场场地、工艺流程、物料顺序布置;
- b) 方便维护、生产安全、消防安全等基本原则;
- c) 因地制宜,满足厂区总体规划要求。

8.1.2 矿化后垃圾灰如需贮存,其贮存场地符合 HJ 2025 要求。

8.1.3 CO₂矿化塔宜靠近烟囱布置。

8.1.4 布置风机、泵等设备时,宜采取降噪措施。

8.1.5 矿化助剂仓、稳定剂存储仓位置宜满足方便装卸要求。

8.1.6 副产物矿化垃圾灰的处理宜结合工艺流程和场地布局,布置在相对独立且交通便利区域;垃圾灰的堆存储存区域宜在副产物处理附近。

8.1.7 存在环境和安全隐患的吸收剂、矿化助剂制备系统及浆液罐宜布置在人流相对集中区域的常年最小频率风向的上风侧或主导风向的下风侧。

8.1.8 电气装置施工及验收按照 GB 50254、GB 50255 规定进行。

8.1.9 厂区布置应急事故池是十分必要的,用来处置事故状态下的泄漏物、救援产生废水的临时储存措施,防止次生事故和环境污染。

8.2 管道敷设要求

8.2.1 浆液管道具有一定坡度,宜根据浆液含固量选取。

8.2.2 垃圾灰浆液、助剂溶液输送管道、管件、阀门等部件根据介质性质采取防腐处理是十分必要的。

8.2.3 管道内液体与气体流速有必要满足 CO₂矿化转化率、重金属固定率等要求,经全面优化后确定。

8.2.4 管道布置在保证能耗最小化的情况下宜短捷、顺畅。

9 验收

9.1 工程验收

9.1.1 垃圾灰矿化固碳技术工程验收按《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》和本文件进行组织。工程竣工验收前,严禁投入生产性使用。

9.1.2 垃圾灰矿化固碳技术安装工程验收符合 GB 50231、GB 50236、GB 50275 和安装文件的有关要求。

9.1.3 垃圾灰矿化固碳技术工程完工后,施工单位向建设单位提交工程竣工验收申请。验收程序和内容按建设项目竣工验收程序执行。

9.1.4 垃圾灰矿化固碳技术工程竣工验收依据主管部门的批准文件、设计文件及设计变更文件、合同及其附件和设备技术文件等。

9.1.5 垃圾灰矿化固碳技术工程中选用国外引进的设备、材料、器件宜按供货商提供的技术规范、合同规定及商检文件执行,并符合我国现行国家或行业标准的有关要求。

9.2 工艺验收

9.2.1 工程安装、施工完成后有必要进行调试前的启动验收,启动验收合格和对在线仪表进行校验后方

可进行分项调试和整体调试。

9.2.2 通过垃圾灰矿化固碳技术装置整体调试,各系统运转正常,技术指标达到设计和合同要求后,进行启动试运行。

9.2.3 装备有必要通过168 h运行,运行期间各子装置运转正常,技术指标达到设计和合同要求。

9.2.4 及时消除整体试运行中出现的问题。

9.3 环境保护验收

9.3.1 垃圾灰矿化固碳技术装置竣工环境保护验收按《建设项目竣工环境保护验收管理办法》的规定进行。一般在自生产试运行之日起的3个月内,向环境保护行政主管部门申请该垃圾灰矿化固碳技术装置的竣工环境保护验收。对生产试运行3个月仍不具备环境保护验收条件的,可申请延期验收,但生产试运行期限最长不超过一年。

9.3.2 垃圾灰矿化固碳技术装置竣工环境保护验收除满足《建设项目竣工环境保护验收管理办法》规定的条件外,建议在生产试运行期间对工艺进行性能试验,性能试验报告作为环境保护验收的重要内容。

9.3.3 垃圾灰矿化固碳技术验收中技术性能试验包括但不限于以下项目:

- a) CO₂矿化转化率;
- b) CO₂固定量;
- c) 电能消耗;
- d) 水量消耗;
- e) 重金属浸出浓度;
- f) 重金属固定率;
- g) 垃圾灰可溶盐含量。

9.3.4 垃圾灰矿化固碳技术装置竣工环境保护验收的主要技术依据包括:

- a) 项目环境影响报告书审批文件;
- a) 各类污染物环境监测报告;
- b) 批准的设计文件和设计变更文件;
- c) 垃圾灰固碳性能试验报告;
- d) 试运行期间烟气连续监测报告;
- e) 完整的启动试运(验)、试运行记录等。

9.3.5 经环境保护验收合格后,垃圾灰矿化固碳技术装置方可正式投入使用运行。

参 考 文 献

- [1] T/SZAEM 0001 生活垃圾焚烧飞灰重金属浸出毒性检测技术规范
 - [2] DB32/T 4076 生活垃圾焚烧稳定化飞灰填埋处置技术标准
 - [3] 建设项目竣工环境保护验收暂行办法(国环规环评[2017]4号)
-

全国团体标准信息平台

中国国际科技促进会
团体标准
垃圾灰矿化固碳技术导则
T/CI 928—2025

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)

网址 www.spc.net.cn

总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 1 字数 17 千字
2025年7月第1版 2025年7月第1次印刷

*

书号:155066·5-15731 定价 38.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107



T/CI 928-2025