工业窑炉协同处置固体废物技术进展及趋势

闫大海 博士 研究员

中国环境科学研究院 固体废物污染控制技术研究所

2021.4.9

主要内容

- 工业窑炉协同处置的定义和意义
- 水泥窑协同处置固体废物技术发展应用现状
- 其他工业窑炉协同处置固体废物发展应用现状
- 工业窑炉协同处置固体废物政策和标准
- 工业窑炉协同处置定位和发展趋势

协同处置的定义和意义

协同处置：是指利用企业现有的工业窑炉（如水泥窑、电厂和工业锅炉、炼铁高炉等）将固体废物与其他原料或燃料协同处理，在满足企业正常生产要求、保证产品质量与环境安全的同时，实现固体废物的无害化处置和资源化利用。

我国固废物产生量巨大

固体废物集中处置设施能力严重不足

固体废物集中处置设施分布有局限性

固体废物的危害成分在工业高温窑炉的高温环境中可以发生反应或被固定化，从而消除危害性，甚至可以作为某些天然燃料和原材料的替代品

固体废物的工业窑炉协同处置可以提高固体废物无害化处置水平和资源化利用率，同时减少温室气体的排放，提高应对突发事件的能力

协同处置的关键问题

哪些工业窑炉可以协同处置固体废物?

这些工业窑炉中可以协同处置哪些类型的固体废物?

如何确保协同处置过程中工业窑炉的正常运行和产品质量?

缺少相关理论和经验

如何确保工业窑炉协同处置过程和产物的环境安全性?

缺少污染物排放专用标准
缺少产品环境安全标准
缺少污染控制技术规范

国外水泥窑协同处置固体废物情况

- 发达国家于**上世纪70年代**开始利用水泥窑协同处置固体废物。
- 经过40多年的发展，水泥窑协同处置技术已经成为发达国家**普遍采用**的**成熟技术**，对水泥工业可持续发展和固体废物处置发挥了巨大作用。
- 发达国家水泥窑协同处置固体废物主要以**替代燃料和原料**为目的；在固体废物处置设施不足的国家或在应急处置时，一些无替代燃料和替代原料价值的固体废物也利用水泥窑进行**处置**。

国外水泥窑协同处置固体废物情况

国家或地区	替代燃料使用情况	替代原料使用情况	危险废物处置情况
欧盟	• 平均燃料替代率**38%**（2017年） • 德国、荷兰等国家燃料替代率**>60%**（2013年）	• 熟料煅烧平均原料替代率**5%**（2009年） • 水泥生产平均原料替代率**>30%**（2009年）	• 协同处置危险废物**200多万吨**（2009年） • 挪威的有机物危险废物**100%**在水泥窑协同处置
美国	• 替代燃料使用量**200万吨**（2009年） • 燃料平均替代率**8%**（2009年）	• 水泥生产平均原料替代率**>30%**（2009年）	• **111**家水泥企业中**37**家开展了危险废物协同处置，处置了全美国近**60%**的危险废物（1994年） • 每年协同处置危险废物**100万吨**（1989-2000年）
日本	• 平均燃料替代率**10%**（2009年）	• 水泥生产平均原料替代率**>39.5%**（2006年）	-

我国水泥窑协同处置大宗工业固废现状

- **长期以来**，我国**几乎所有的水泥企业**都利用大宗工业固废作为替代原料加入生料或作为混合材加入熟料中。
- 水泥企业利用的大宗固废主要包括：**粉煤灰、硫酸渣、高炉矿渣、炉渣，烟气脱硫石膏、磷石膏、钢渣等。**
- 2014年我国水泥行业综合利用一般工业固废**超过8亿吨**，大宗工业固废综合利用的主要途径。

我国水泥窑协同处置危险废物现状

2015年之前——发展缓慢

- 始于2000年左右。
- 截至2014年底，我国约3000家水泥企业中仅有16家获得协同处置危险废物经营许可证，其中北京水泥有限公司、华新水泥（武穴）有限公司和河北金隅红树林有限公司**3家**开展了连续性和一定规模的多类别危险废物协同处置业务，其他都为单一危险废物协同处置企业。
- 协同处置的危险废物**燃料替代率几乎为零**，远低于欧美发达国家的平均水平。
- 主要原因：缺乏协同处置危险废物的内在动力。
  - 水泥市场需求旺盛，水泥生产企业效益好。
  - 水泥窑协同处置危险废物经济效益不明显。
  - 缺乏相关政策措施支持和标准规范引导，水泥企业跨界经营存在一定风险和不确定性。

我国水泥窑协同处置固体废物现状

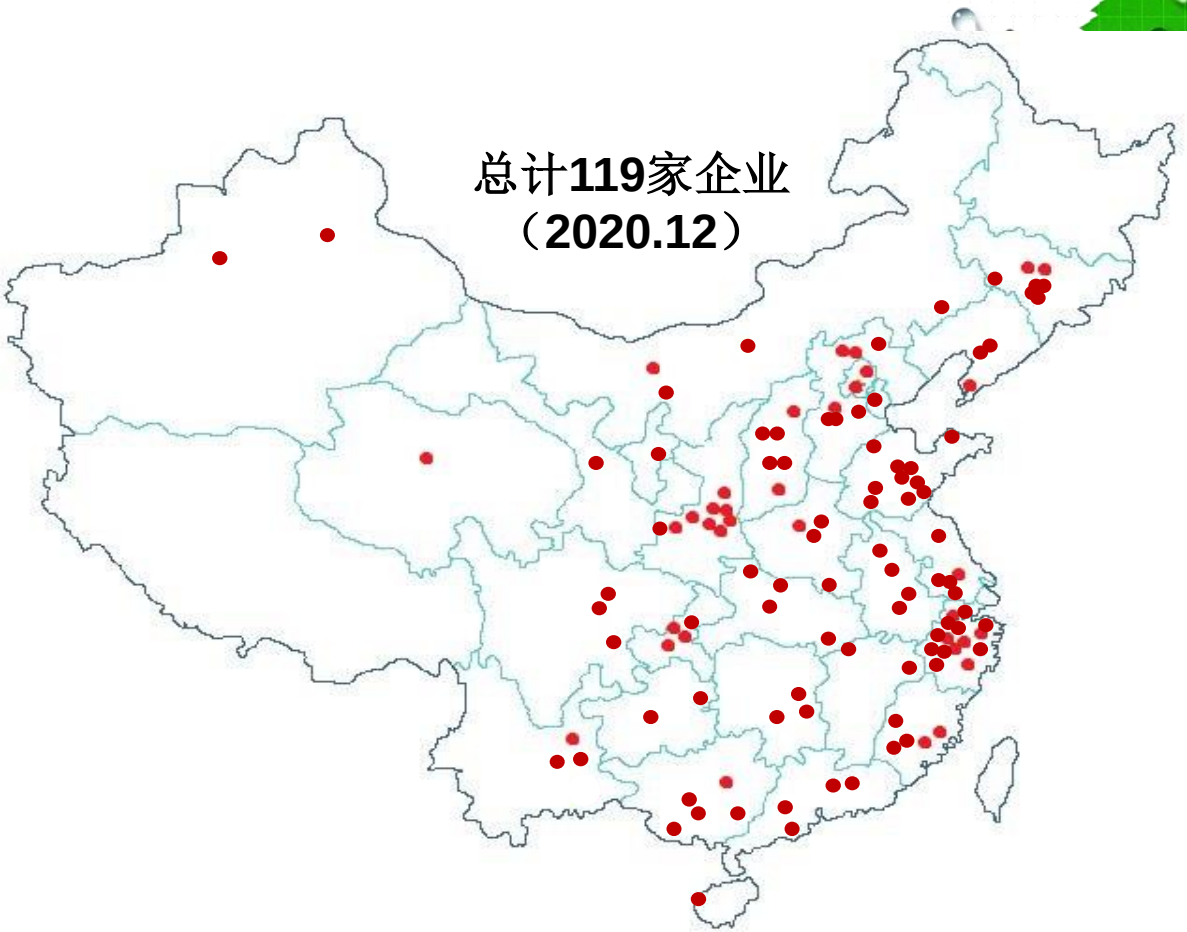
2015年之后——爆发式增长

- 危险废物：截至2020年12月，全国共有119家企业开展了协同处置危废，核发危废经营许可资质824万吨/年。另有近80个项目正在开展环评或建设，合计设计能力800余万吨/年。
- 生活垃圾：已建成项目60余项，在建、规划建设项目30余项。
- 生活污泥：已建成项目60余项，在建、规划建设项目20余项。
- 污染土壤：建成、在建和规划建设项目约30项。

主要原因

- 水泥行业脱困需要
- 部分区域处置能力需求增大
- 相关标准规范陆续出台

我国水泥窑协同处置危险废物现状



工艺设施

- 从最初的简单模仿发达国家，逐渐发展为自主开发适合我国危险废物产生特性的技术工艺体系。
- 硬件建设水平，尤其是2014年以后建设的项目，基本都能满足水泥窑协同处置危险废物相关技术标准的要求。
- 并非完美，仍有升级改进的余地。
  - **精准配伍**和调控能力差。
  - 某些关键或难点问题仍未攻克。
  - 工艺同质化严重，缺乏竞争，工艺设备升级改造慢。
  - 分散式的预处理工艺设施发展缓慢。

企业运行管理

设施运行负荷率低

- 主要原因是水泥窑协同处置危险废物企业缺少运营经验；满负荷水泥生产与处置固废矛盾突出。
- 次要原因是水泥窑协同处置危险废物企业对危险废物市场了解不足。
- 其他原因还包括水泥企业错峰停产、危险废物经营许可证申请时盲报规模、水泥生产企业保水泥产量、新建项目取证时间在年末等。

年份	核准经营能力（万吨）		实际处理量（万吨）		企业数量		单企业核准经营能力（万吨/年）		单企业实际处理量（万吨/年）		运行负荷	
	水泥窑	焚烧	水泥窑	焚烧	水泥窑	焚烧	水泥窑	焚烧	水泥窑	焚烧	水泥窑	焚烧
2017年	210	232	71	137	38	155	5.5	1.5	1.9	0.9	33.8%	59.1%
2018年	440		101	181	73		6.0		1.4		23.0%	
2019年	613		179	247	86		6.1				29.2%	

设施运行负荷该不该考核？

——水泥窑协同危废是主力还是补充？

中国环境科学研究院 CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

企业运行管理

重金属风险未有效监控。

- 仅少数企业能按相关标准要求的频次自行检验、记录熟料中重金属浸出浓度。
- 仅极少数企业能按相关标准的要求对重金属入窑速率进行检验记录。
- 多数企业对入窑重金属仅进行粗犷式配伍和控制，有些企业甚至不控制。

如何看待水泥窑协同处置含重金属废物的问题?

——稀释排放?

协同处置危险废物的水泥产品是否应该标号?

——国外协同处置固体废物的水泥产品**没有标号**。

——日本的生态水泥**不等于**协同处置固体废物的水泥。

2018年云南省水泥窑协同处置固体废物水泥及水泥熟料中重金属含量风险预警监测情况发布

2018-05-28 17:00:49　中国质量新闻网



中国质量新闻网讯 5月28日，云南省质监局官网通报2018年云南省水泥窑协同处置固体废物水泥及水泥熟料中重金属含量风险预警监测情况。通报称，按照《云南省质量技术监督局关于开展2018年第1季度重要工业产品质量监督抽查和风险预警监测的通知》（云质监办监〔2018〕4号）安排部署，2018年3月至4月,我局在全省范围内开展了水泥窑协同处置固体废物水泥及水泥熟料中重金属含量风险预警监测。云南省建筑材料产品质量检验研究院承担此次监测抽检任务。

水泥产品作为社会基础建设的主要材料，具有适用范围广，使用量大的特点。若水泥产品中重金属含量不符合标准，会导致大量危害人体健康和环境安全的重金属流入生活周边，一旦水源、耕地、空气等被污染，将给环境保护和人体健康埋下安全隐患。此次水泥窑协同处置固体废物水泥及水泥熟料中重金属含量风险预警监测主要任务是摸清水泥熟料中重金属含量、水泥熟料可浸出重金属含量以及水泥中可浸出重金属含量的情况；了解我省水泥行业产品重金属指标的含量，同时调查企业原料配比，找出重金属的主要来源，以促进产品环保质量的提升。

本次抽查工作在全省范围内选取具有代表性的水泥窑协同处置固体废物的水泥生产企业进行抽检，抽到的样品为通用水泥熟料、通用水泥，检验项目为水泥熟料中重金属含量、水泥熟料中可浸出重金属含量和水泥中可浸出重金属含量；水泥熟料检验结果判定方式为是否符合GB/T 30760-2014《水泥窑协同处置固体废物技术规范》中规定的重金属含量的技术要求。

此次风险预警监测抽查选取了6个州、市共15家企业，熟料符合率为6.7%（其中熟料重金属含量符合率20.0%，熟料可浸出重金属含量符合率53.3%）；水泥可浸出重金属含量整体符合率为20.0%。

按照《中华人民共和国政府信息公开条例》的有关规定和要求，我局将此次水泥窑协同处置固体废物水泥熟料及水泥中重金属含量风险预警监测的具体情况向社会进行公告。

- 水泥熟料和水泥产品中重金属含量限值直接照搬瑞士标准不科学，且该限值本身就是非强制的指导性限值。
- 云南协同处置危险废物企业当时就3家，其中2家明确表示质检部门此次抽查未抽到其企业样品，协同处置生活垃圾、污泥、污染土壤企业不超过5家，该文中提到抽调了15家企业应该主要为常规水泥生产企业。
- 在水泥窑协同处置相关标准中，水泥窑协同处置固体废物中所说的固体废物不包括大宗工业废渣，仅指危险废物，生活垃圾，污泥，动植物加工废物，污染土壤和应急事件废物。
- **重金属超标主要原因是云南水泥厂大量使用工业废渣作为原料和混合材。**
- **质检部门把水泥行业掺加大宗工业废渣误认为了通常意义上的水泥窑协同处置固体废物。**
- **水泥窑协同处置过程中的重金属风险不容忽视，常规水泥生产企业掺加大宗工业废渣也应进行规范。**

企业运行管理

操作运行记录不完整

- 重金属投加速率和浸出浓度数据普遍缺失外
- 大气污染物自行监测频次不足、监测指标不全、监测方法错误等问题
  - 重金属含量和重金属浸出
  - 非甲烷总烃和总有机碳

政府管理



- **支持力度差异大**
  - 明确支持：浙江
  - 谨慎：广东
  - 保守到开放：山东、江苏
  - 放任：山西、内蒙
- **监管水平差异大**
  - 北京、河北、浙江、重庆等水平较高
  - 市县级政府以及内蒙、贵州、云南等边远地区省级政府水平较低
- **重硬件设施，轻软件管理。**

中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

行业发展

行业发展过快

- 仍有11个未出台危险废物处置设施建设规划，在18个已出台危险废物处置设施建设规划的省、市、自治区中，多数仅泛泛提及支持、推进或引导水泥窑协同处置危险废物，未明确水泥窑协同处置危险废物项目规划数量、能力、布局等具体信息。
- 各地水泥窑协同处置危险废物项目环境影响评价和危险废物经营许可证审批权下放，市县级政府缺少足够的技术能力进行严格把关。

行业发展

行业发展不均衡

- 项目全国布局不均衡，与危险废物产生量和水泥窑分布不匹配。
- 行业技术管理水平差异大。
  - 技术管理水平相对较高、管理相对规范的企业，多为大型集团
  - 技术管理水平相对较弱、管理不规范的企业，多为小型民企
  - 还有一些动机不纯的问题项目、人情项目。

行业发展



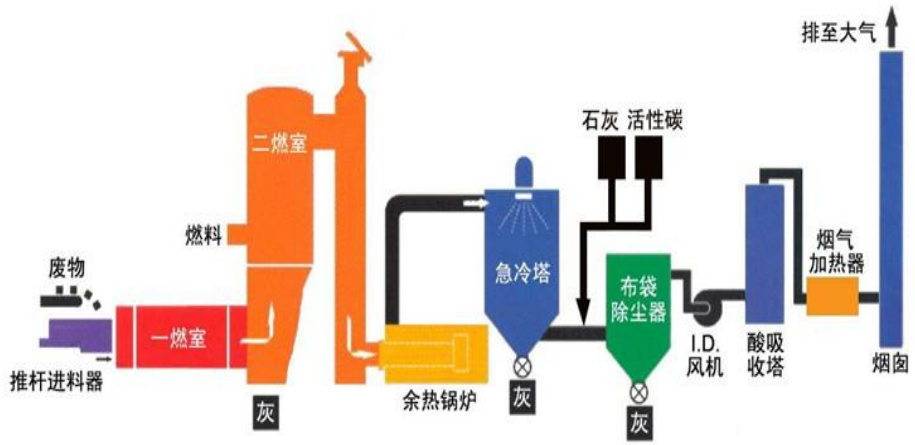
基础薄弱难以支撑快速发展

- 企业自身技术能力欠缺
- 地方政府监管能力不足
  - 市县级地方政府
- 相关技术支撑有限
  - 与水泥窑协同处置危险废物配套的专业化预处理中心很少
  - 关键或特殊的预处理和协同处置技术未能完全掌握
  - 相关的政策和标准规范还有待进一步完善

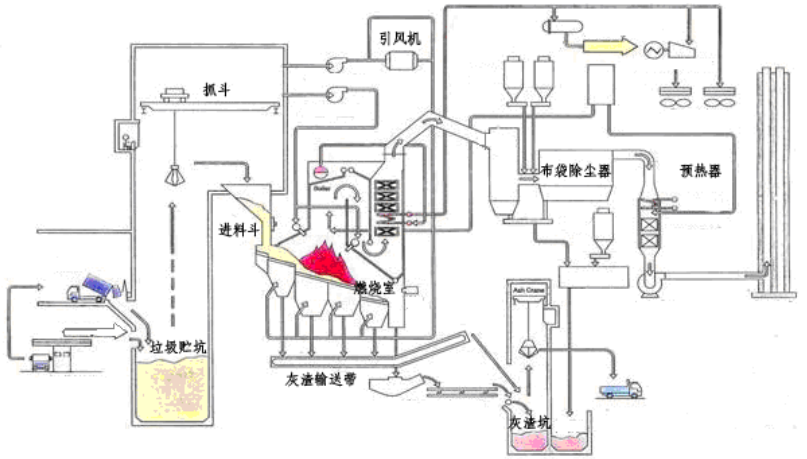
对策建议

- 提高科学认识
  - 培训、样版工程、工程示范
- 完善管理体系
  - 经营许可证绩效评估制度、环境影响评价指南、预处理产物标准、预处理技术指南、水泥制品环境安全标准、危险废物源头管理制度，修订协同处置标准
- 加强关键技术研究
  - 工程中心、重点实验室、协同处置水泥窑生产控制理论、重金属迁移转化规律、安全事故预警设备、预处理技术和设备
- 推动水泥窑协同处置与传统处置的互补协同
  - 支持技术先进的**大型水泥集团**与危险废物焚烧处置单位开展合作融合，采取**专业预处理中心配套水泥窑协同处置的运营模式**，规模化、专业化、集中化发展。
- **探索开展其他工业窑炉协同处置危险废物研究工作**

水泥窑协同处置与焚烧炉控制节点主要差异



危险废物专用焚烧炉



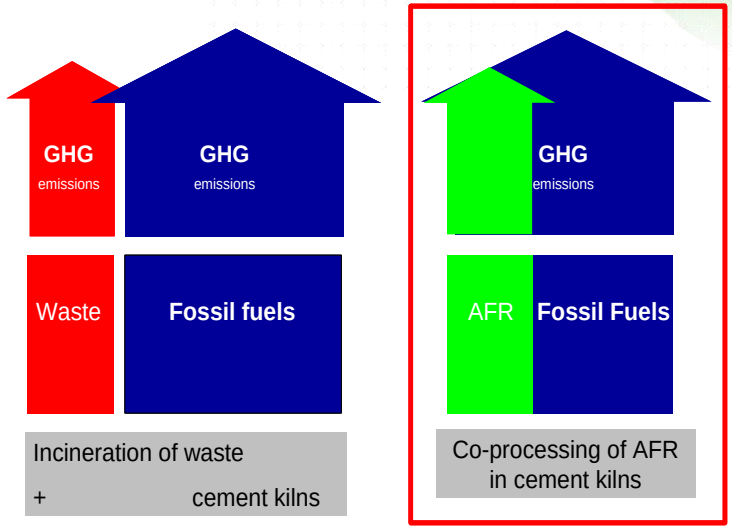
生活垃圾专用焚烧炉

- **水泥窑**
  - 重点在于废物投加控制，无需增加专用的尾气净化设备。
  - 关键技术：**废物的预处理和投加**
- **焚烧炉**
  - 除需燃烧工况控制外，还需专用的尾气净化设施。

中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

水泥窑协同处置相对专用焚烧炉的优势

- **技术优势**
  - 废物处置温度高，停留时间长；良好的湍流，燃烧过程充分，**焚烧状态易于稳定**；固相碱性的环境氛围抑制酸性物质排放，**无需专用烟气净化设施**；可固化废物中重金属，**无飞灰和废渣排放**，在可控范围内，水泥产品质量和生产不受影响；**废物处理类别都，处理能力大。**
- **经济和社会优势**
  - 利用了现有设施，**建设投资小**；**运行成本低**；不受废物产生量波动的影响；减少了全社会的废气排放，有利于实现节能减排目标。



中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

水泥窑相对危险废物焚烧炉的劣势

- 危险废物运营管理经验不足
- 严重受制于水泥窑位置和生产状况
- 处理高氯、高碱、高重金属类危险废物能力有限

燃烧过程二噁英的生成机理

- **高温气相反应生成** → 燃烧条件较好时，不占主导低位
  - 前驱物：氯代芳香烃
  - 温度：800-500℃
- **低温异相催化反应生成**
  - 前驱物反应
    - 前驱物：氯代芳香烃（源自不完全燃烧产物或不含氯有机物经氯化反应后的生成物）
    - 温度：200-450 ℃
    - 催化剂：Cu、Fe
    - 固相反应表面
  - **从头合成（de novo）反应**
    - C、Cl、O、H元素
    - 温度：200-450 ℃
    - 催化剂：Fe、Cu
    - 固相反应表面

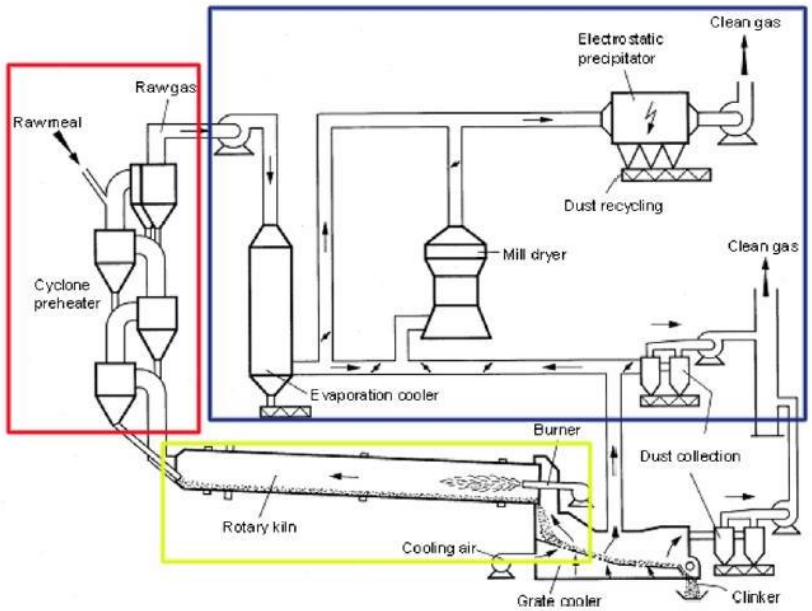
水泥窑窑尾烟气二噁英的产生途径

二噁英的潜在产生源

- 燃料带入的二噁英 → 彻底分解
- 原料带入的二噁英 → 比较少见
- 新合成的二噁英 → 主要途径

生成机理

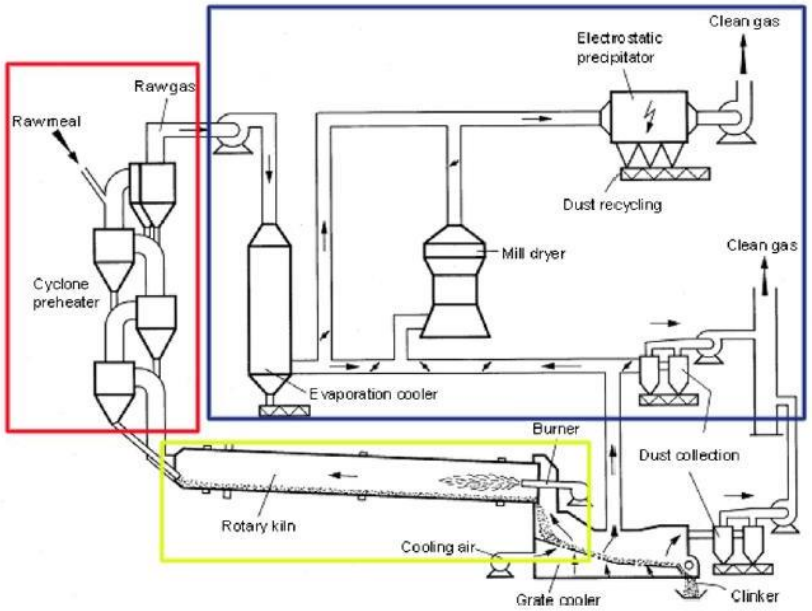
- 窑系统低温部位（预热器上部、增湿塔、余热锅炉、生料磨、除尘器）发生的二噁英低温异相催化反应生成。



中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

水泥窑窑尾烟气二噁英抑制机理

- 燃烧充分、稳定，前驱物（不完全燃烧产物）少。
- 从顶级预热器投入冷生料、增湿塔喷淋、余热锅炉换热等措施，减少了烟气在二噁英低温异相催化反应温度区间的停留时间（急冷）。
- 从水泥窑高温区投入的Cl元素被碱性物料吸收，难以到达二噁英低温异相催化反应的区域。
- 窑磨一体机运行模式时的生料磨中生料可吸附二噁英。
- 高效除尘器可高效捕集吸附二噁英的粉尘。



水泥窑窑尾烟气二噁英排放特性

推论

- 正常水泥生产的二噁英排放浓度低。
- 正确的协同处置不增加二噁英的排放浓度。
  - 不影响燃烧工况
  - 不从低温处投加有机废

推论的数据验证

- 二噁英是痕量污染物，受多种因素影响，因此从少量企业的短期、少量检测数据不能得出科学的结论。
- 科学的结论应基于大量的具有统计学意义的检测数据。
  - 纵向比较：基于同一企业的长期、大量二噁英检测数据
  - 横向比较：基于大量的不同企业的短期检测数据

二噁英检测数据来源

- 生态环境部委托的国际合作项目“中挪合作-危险废物和工业废物水泥窑协同处置环境无害化管理”
- 中国环境科学研究院承担的“水泥窑协同处置危险废物性能测试”项目
  - 数据点多：大量的不同企业的短期检测数据（横向比较）
  - 检测时间跨度大：2007-2018年
  - 数据真实权威：全部由中国环境科学研究院委托具有资质的第三方检测机构检测（非利益相关方委托）

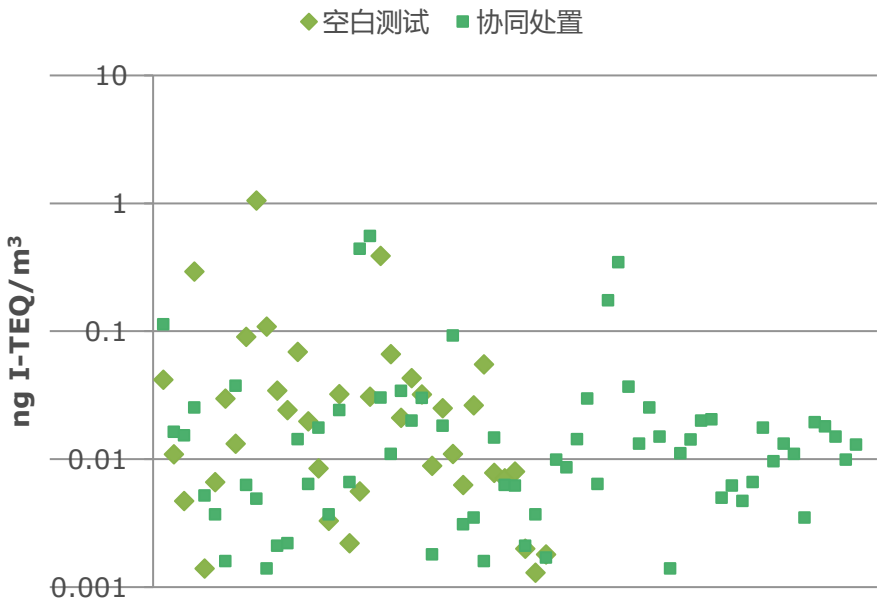
水泥窑窑尾烟气二噁英排放浓度

（ng I-TEQ/m^3，10%O_2）

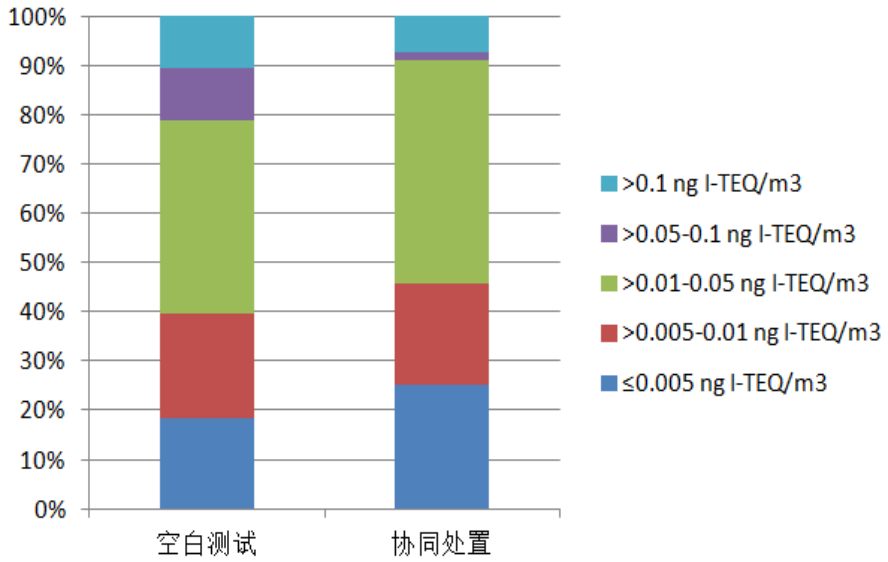
序号	测定时间	处置废物类别	空白测试			协同处置			备注
			第1次	第2次	第3次	第1次	第2次	第3次	
1厂	2007.12	甲胺磷/甲基对硫磷	0.0417	0.0198	0.0089	0.1132	0.03	0.0014	
		混合农药				0.0163	0.0018	/	
	2011.11	六六六	0.0109	0.0085	/	0.0153	0.0182	0.0111	
		DDT/氯丹				0.0253	0.0924	0.0142	
	2013.11	生活垃圾	0.0047	0.0033	/	0.0052	0.0031	/	
		DDT污染土壤	/	/	/	0.0037	0.0035	/	
2厂	2008.3	DDT污染土壤	0.2928	0.0322	0.025	0.0016	0.0016	0.02	
	2009.7	生活污泥（直接投加）	/	/	/	0.0374	0.0147	0.0204	
	2010.3	生活污泥（干化投加）	/	/	/	0.0063	0.0063	0.005	
		垃圾焚烧飞灰				0.0049	0.0062	0.0062	
3厂	2011.11	DDT污染土壤	0.0014	/	/	0.0014	0.0021	0.0047	
		PBDE污染土壤				0.0021	0.0037	/	污染土壤PBDE浓度4160mg/kg
						0.0022	0.0017	/	污染土壤PBDE浓度25000mg/kg
4厂	2008.5	废白土	0.0066	0.0022	0.011	0.0143	0.0099	0.0066	
5厂	2009.11	重金属废物	0.0297	/	/	0.0064	/	/	
6厂	2009.9	DDT	0.0132	0.0056	0.0063	0.0176	0.0086	0.0176	
						0.0037	0.0143	0.0096	
7厂	2010.6	长江漂浮物/生活垃圾	0.0902	0.0308	0.0264	0.0242	0.0297	0.0132	
8厂	2014.4	生活污泥/黄金冶炼废渣	/	/	/	0.0066	0.0064	/	
9厂	2014.7	生活垃圾	1.05	0.388	/	0.439	0.174	/	分解炉刚完成改造，采样期间分解炉内燃烧工况异常
10厂	2014.9	生活垃圾	0.1089	0.0661	/	0.5557	0.3451	/	协同处置采样期间静电除尘设施发生异常
	2015.1	生活垃圾	0.0343	0.021	/	0.0303	0.0368	/	
11厂	2015.10	垃圾焚烧飞灰	0.0242	0.0429	/	0.011	0.0132	/	
	2015.11	垃圾焚烧飞灰	/	/	/	0.0341	0.0253	/	
12厂	2016.5	DDT/六六六污染土壤	0.069	0.032	0.055	0.02	0.015	0.011	
13厂	2016.9	有机溶剂	0.0078	0.0071	0.008	0.0035	0.0194	0.018	
14厂	2017.1	固态危险废物混合物	0.002	0.0013	0.0018	0.015	0.0099	0.013	空白测试比协同处置测试提前2个月
16厂	2017.4	生活垃圾	/	/	/	0.084	0.061	0.037	
17厂	2017.9	多类危险废物	0.001	0.001	0.001	0.006	0.02	0.002	

生活垃圾协同处置

协同处置固体废物对窑尾烟气二噁英排放浓度影响



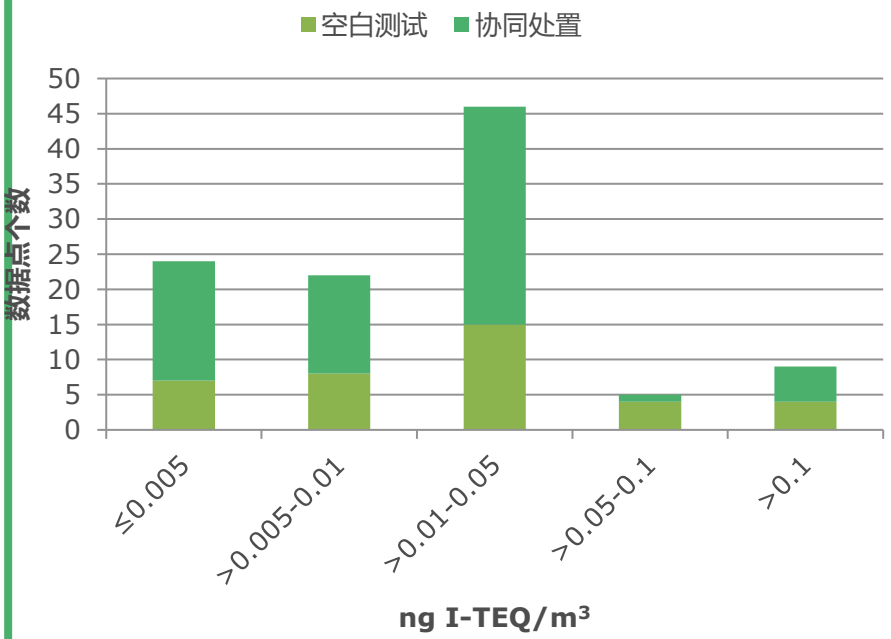
空白测试与协同处置时的二噁英排放浓度位于同一区间



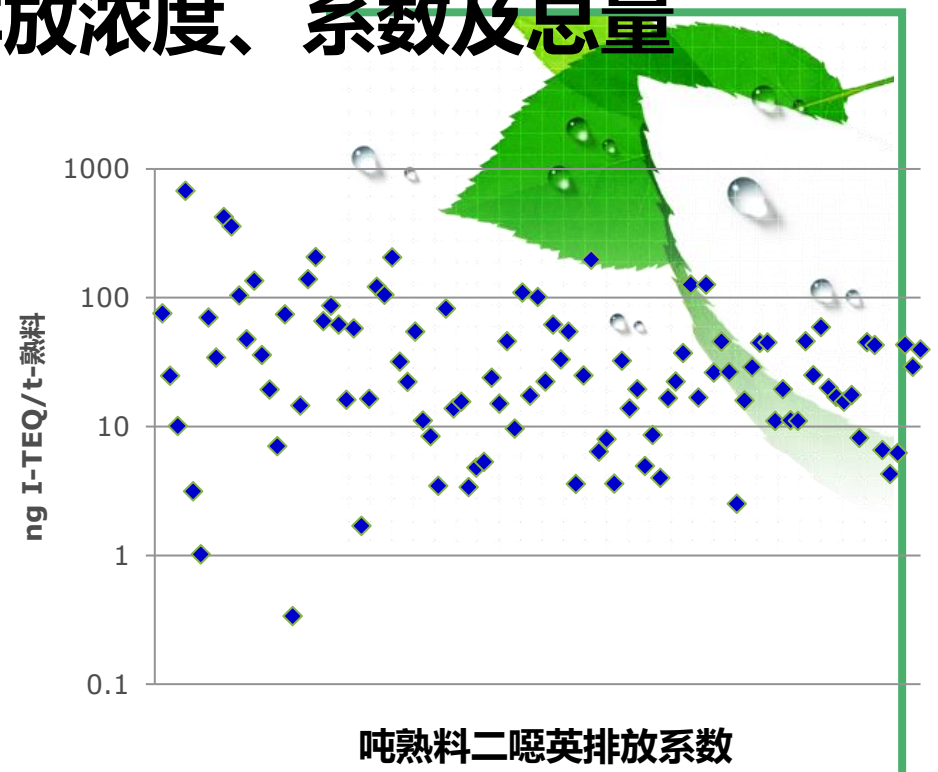
协同处置时二噁英排放浓度较高（>0.05ng I-TEQ/m³）的数据个数所占协同处置所有数据的比例，相对于空白测试并没有增加

- 水泥窑是否协同处置固体废物，协同处置固体废物的类别，对水泥窑窑尾烟气中二噁英排放浓度无明显影响，即使协同处置的废物是氯含量较高的DDT、氯丹农药和生活垃圾，水泥窑窑尾烟气中二噁英排放浓度也未明显增加。
- 水泥窑燃烧工况异常和窑尾除尘设施故障均导致二噁英排放浓度急剧增加。

水泥窑窑尾烟气二噁英排放浓度、系数及总量



水泥窑窑尾烟气二噁英排放浓度检测结果分布

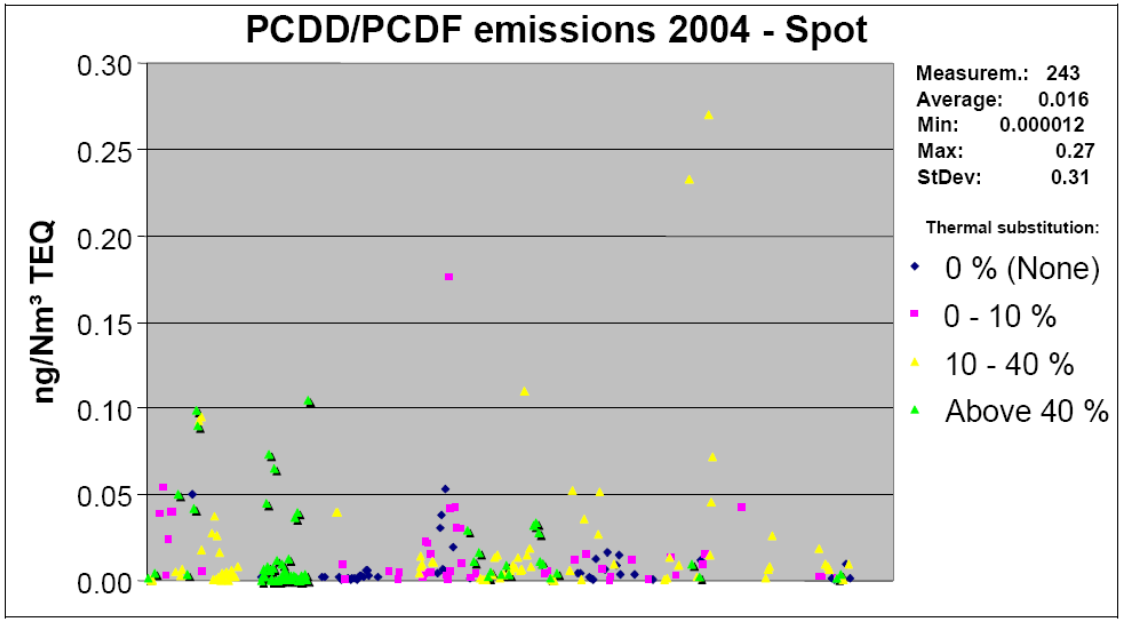


吨熟料二噁英排放系数

- 试点企业吨熟料二噁英排放系数最大值为677.08ng I-TEQ/t-熟料，最小值为0.34ng I-TEQ/t-熟料，平均值为**53.47ng I-TEQ/t-熟料。**
- 试点企业水泥窑窑尾烟气的吨水泥二噁英排放系数均值为**30.48ng I-TEQ/t-水泥**，略低于UNEP给出的排放系数**50ng I-TEQ/t-水泥**，与欧洲的统计得出的排放系数**37ng I-TEQ/t-水泥**非常接近。
- 2016年我国水泥工业水泥窑窑尾烟气的二噁英排放量总量为**73.24g。**

国外水泥窑窑尾烟气二噁英排放特性

- 2000多个水泥窑窑尾烟气二噁英检测数据表明，**正确的协同处置不增加水泥窑窑尾烟气二噁英排放。** *（Karstensen,K.H., Formation, release and control of dioxins in cement kilns, Chemosphere, 2007）*
- 2004年，欧洲水泥协会统计的其成员国水泥窑窑尾烟气二噁英排放浓度数据结果显示，**使用替代燃料不影响水泥窑二噁英排放浓度**，水泥窑窑尾烟气二噁英平均排放浓度为0.016ng-TEQ/Nm^3，绝大多数水泥窑窑尾烟气二噁英排放浓度低于0.1ng I-TEQ/Nm^3。*（CEMBUREAU, 2007）*



集中经营模式-三态分别入窑工艺

工艺特点

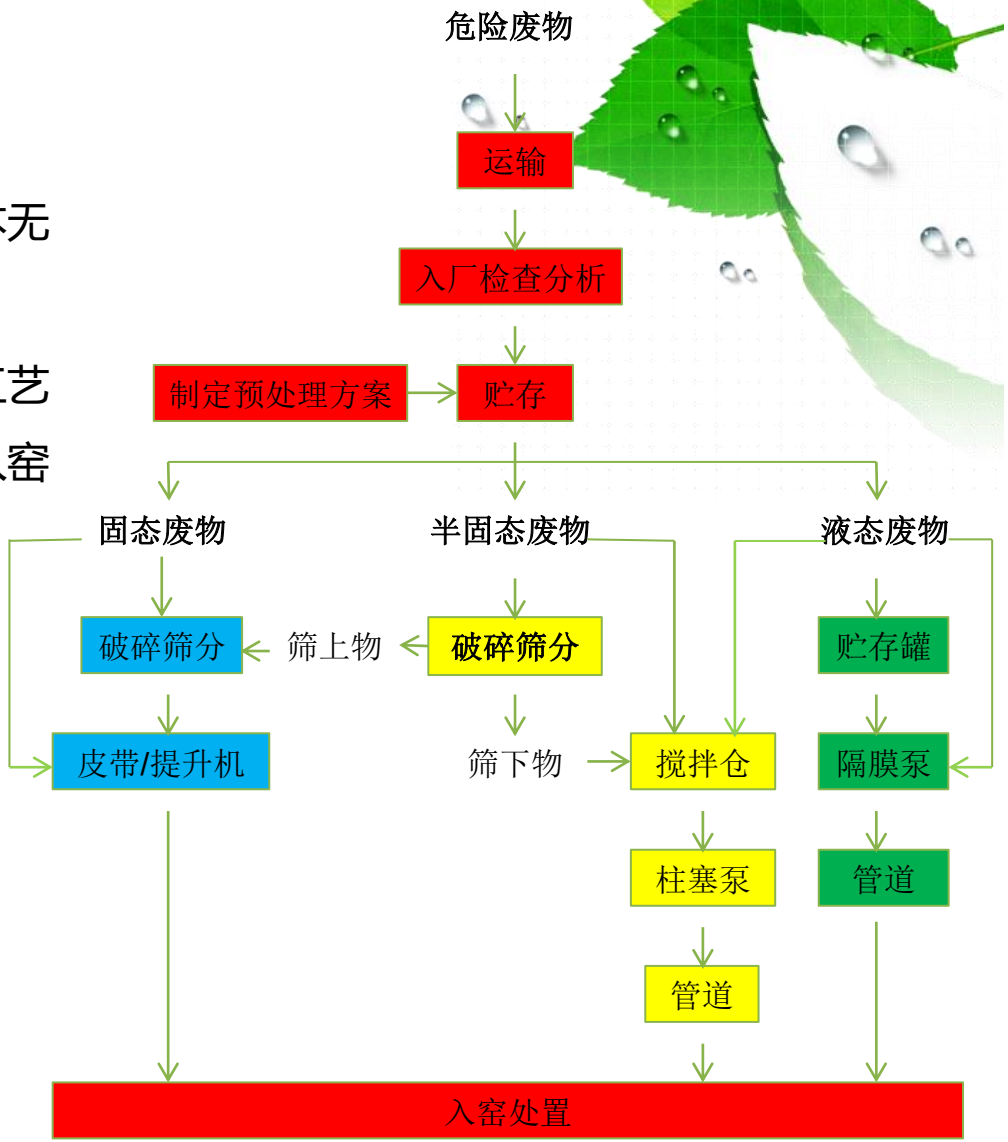
- 预处理设施在水泥企业内，基本无预处理产物中间产物环节。
- 固态、液态、半固态废物混合工艺少，以分别进行预处理后单独入窑处置工艺为主。

主要优势

- 安全事故风险小。

主要劣势

- 占地面积大；
- 对半固态废物适用性较差。



工艺应用

- 工艺设计
  - 金隅建都院
- 主要应用企业
  - 金隅水泥



固态废物管状输送带



半固态废物破碎筛分一体机



液态废物贮存输送装置

集中经营模式-三态混合入窑工艺

工艺特点

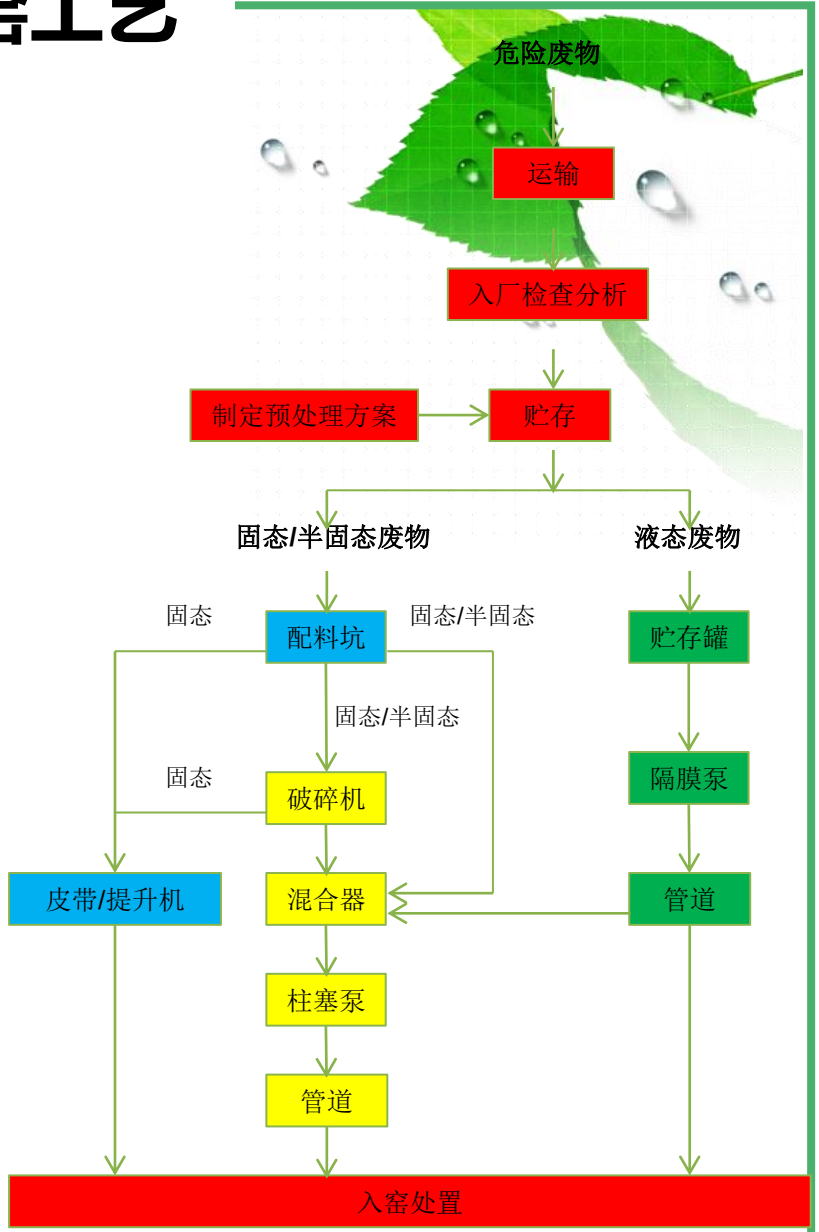
- 预处理设施在水泥企业内，基本无预处理产物中间产物环节。
- 固态、液态、半固态废物以混合后转变为半固态废物入窑处置工艺为主。

主要优势

- 占地面积小；
- 对半固态废物适用性较好。

主要劣势

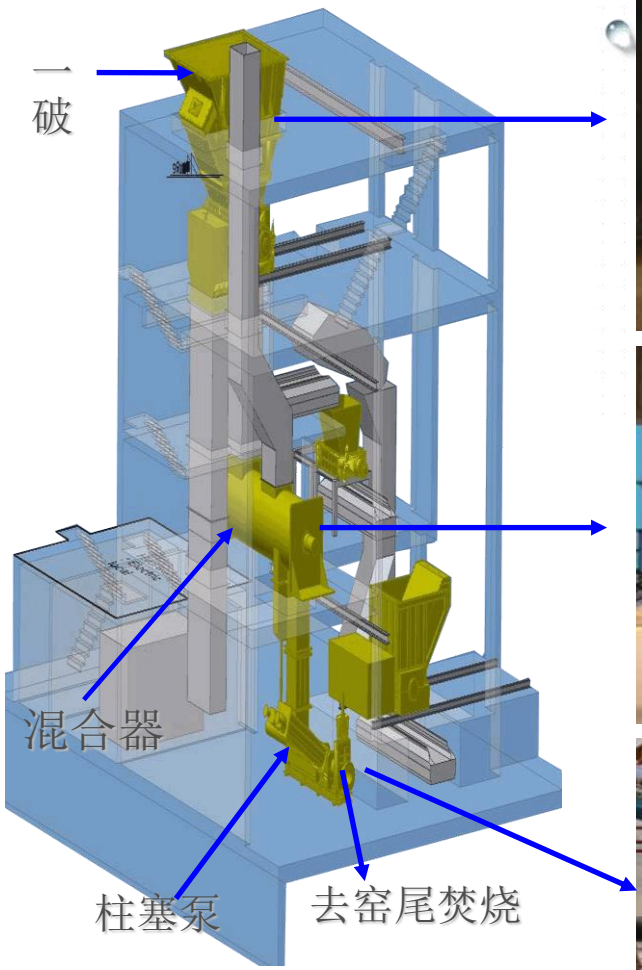
- 安全事故风险大；
- 不能实现精细配伍；
- 固态废物输送流程长。



主要应用企业

- **工艺设计**
  - 天津水泥设计院
- **主要应用企业**
  - 红狮水泥
  - 金圆水泥
  - 海螺水泥





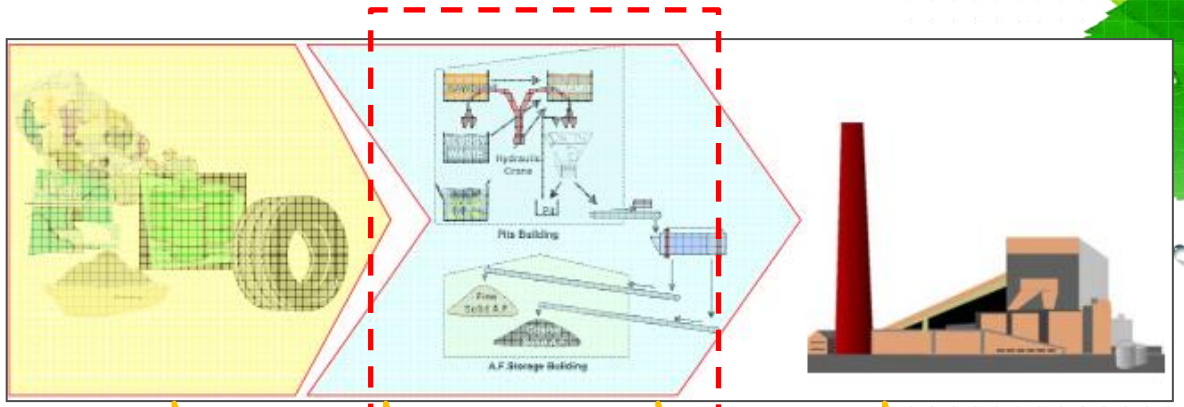






中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

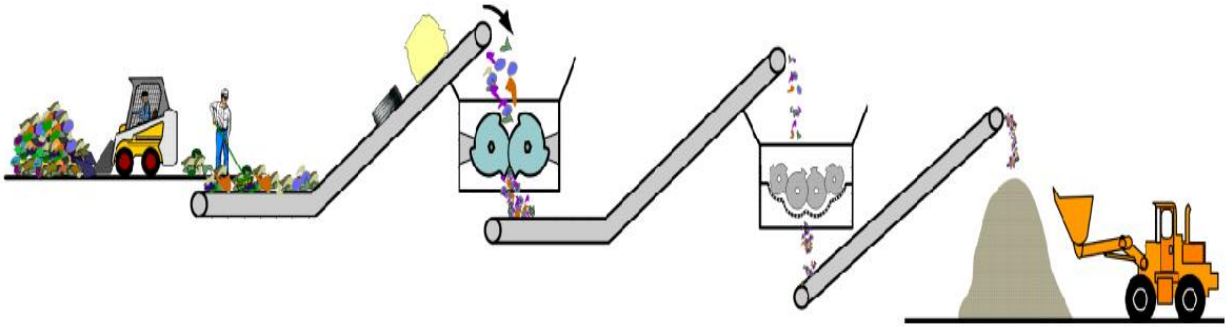
分散经营模式



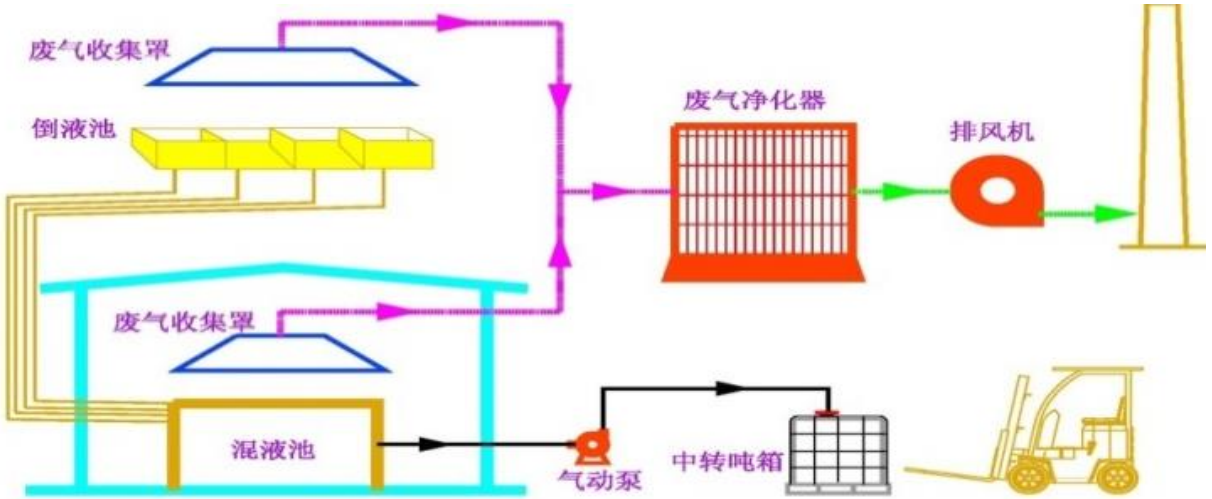
- **工艺特点**
  - 有预处理产物中间产物环节，预处理设施多在水泥企业外，采用一对多模式。
- **主要优势**
  - 将分散的预处理风险集中在一个地方，由专业的团队运营，安全事故风险小；对水泥生产影响小；环境部鼓励模式。
- **主要劣势**
  - 需在水泥厂外新增用地；我国目前的管理体系和商业模式不够成熟；半固态预处理产物的运输效率低；不宜拆包预处理的废物（瓶装实验室废物、高毒性废物等）的处理方式需进一步探讨。

分散经营模式

固态废物预处理流程

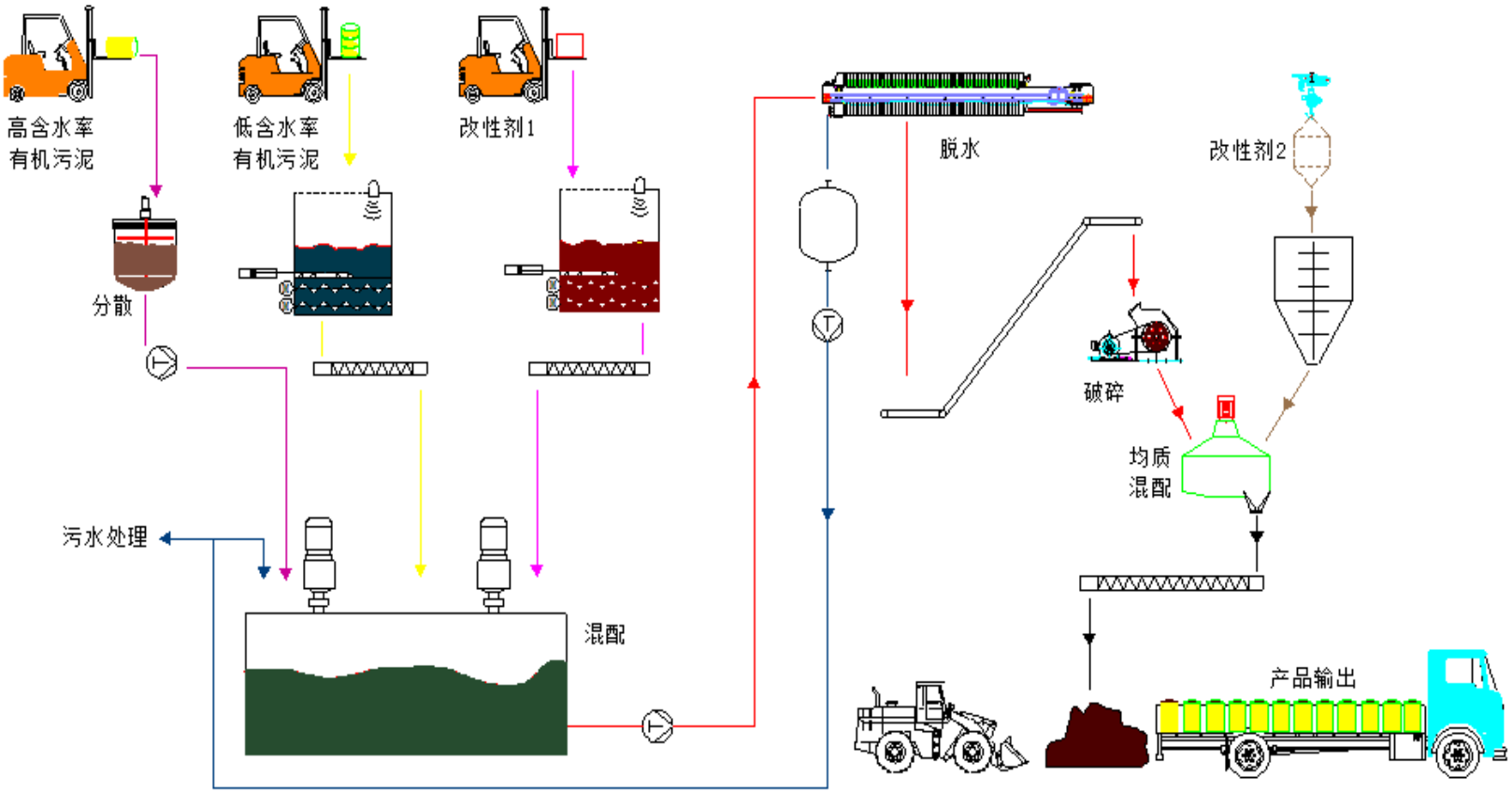


液态废物预处理流程



分散经营模式

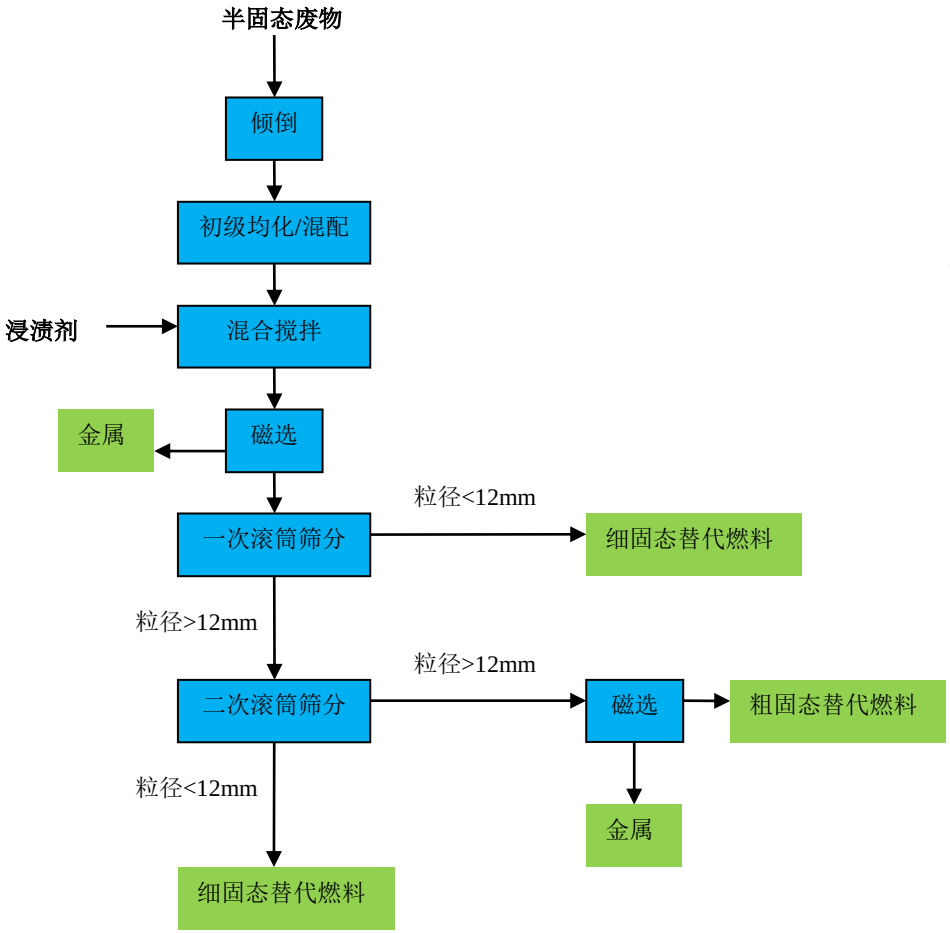
高粘性半固态废物预处理流程



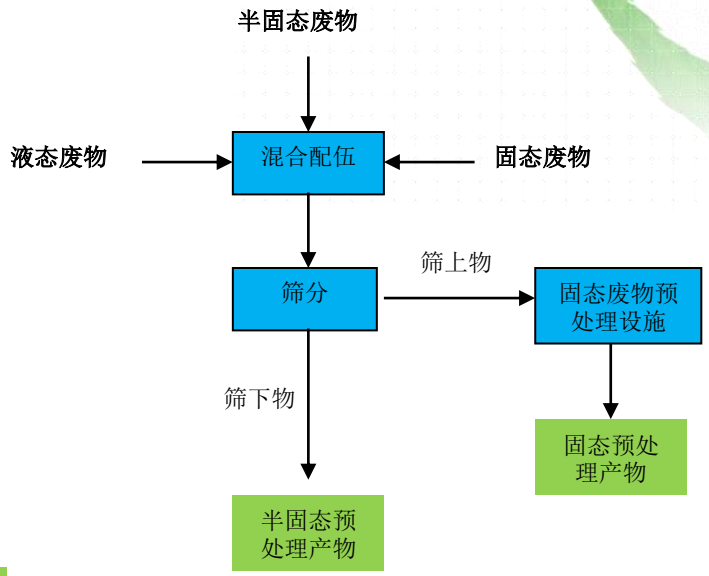
金隅红树林

分散经营模式

半固态废物预处理流程



Geocycle

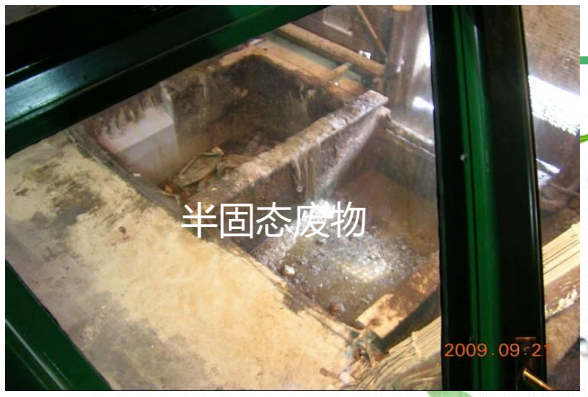


重庆立洋环保

中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

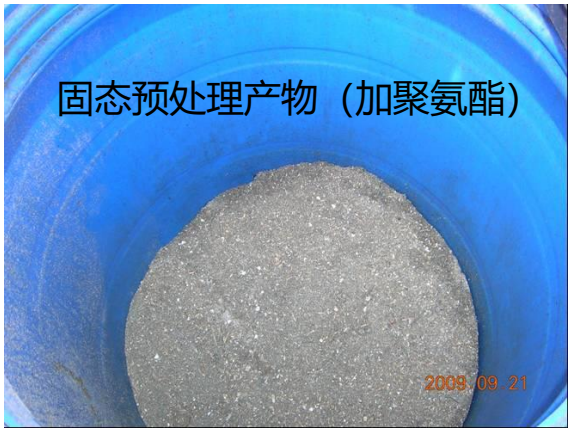
分散经营模式-比利时Geocycle预处理厂











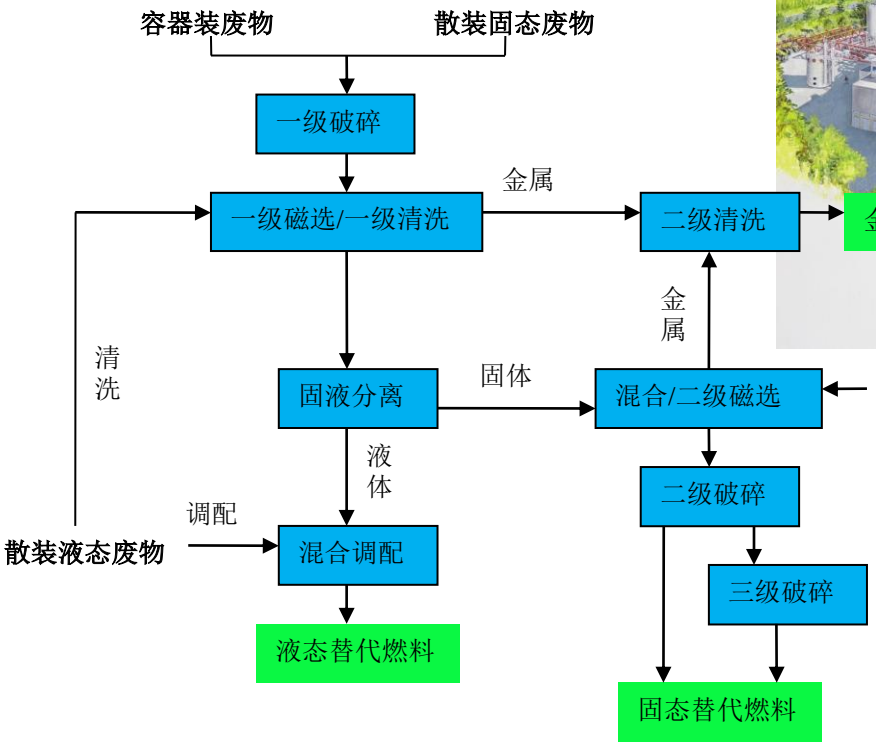


中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

分散经营模式-挪威Renor预处理厂









破碎-分离一体化系统

中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

分散经营模式-重庆立洋预处理厂


固态废物预处理线


半固态废物预处理线


液态废物预处理线

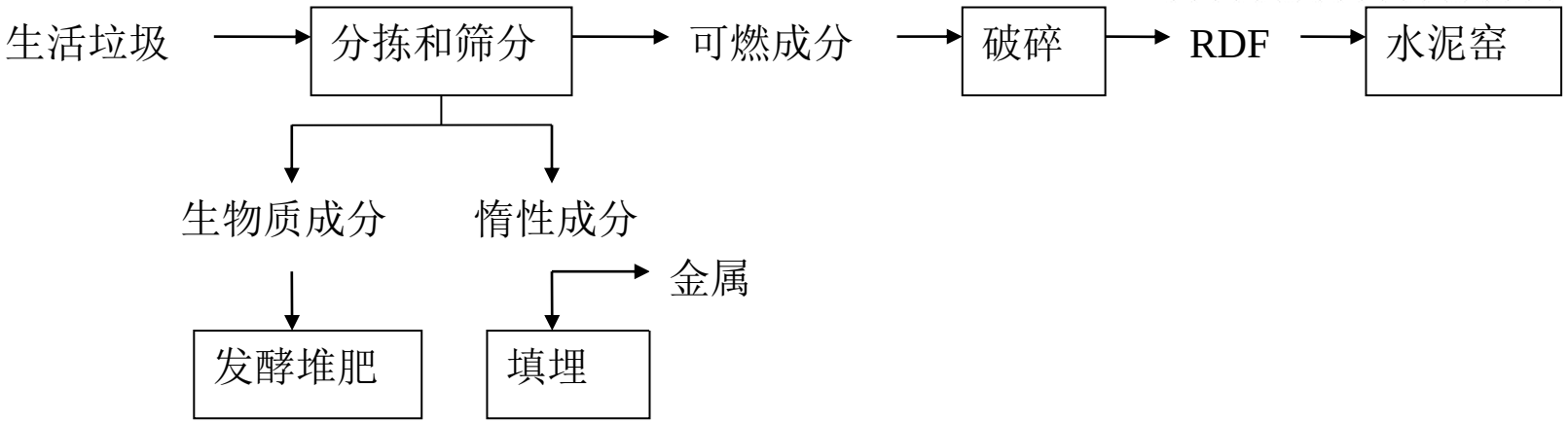

废物贮存库-AGV

我国水泥窑协同处置生活垃圾现状

- 始于**2010年**左右。
- 主要工艺类别：
  - RDF工艺：中材环境（溧阳），遵义欣环垃圾处理厂-拉法基，扶绥垃圾处理厂-海螺
  - 发酵入窑工艺：华新
  - 外挂炉工艺：流化床气化（海螺），炉排炉气化（南京凯盛），热盘炉焚烧（华润）、立式旋转炉气化（金隅）、L型焚烧炉焚烧（洛阳黄河同力）、推杆炉焚烧（成都水泥设计院）、阶梯炉焚烧（蒂森克虏伯）

生活垃圾预处理技术现状

- **RDF工艺**



中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES



垃圾综合分选设施



可燃垃圾破碎设施

中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES







RDF 制备



RDF 计量



RDF 输送





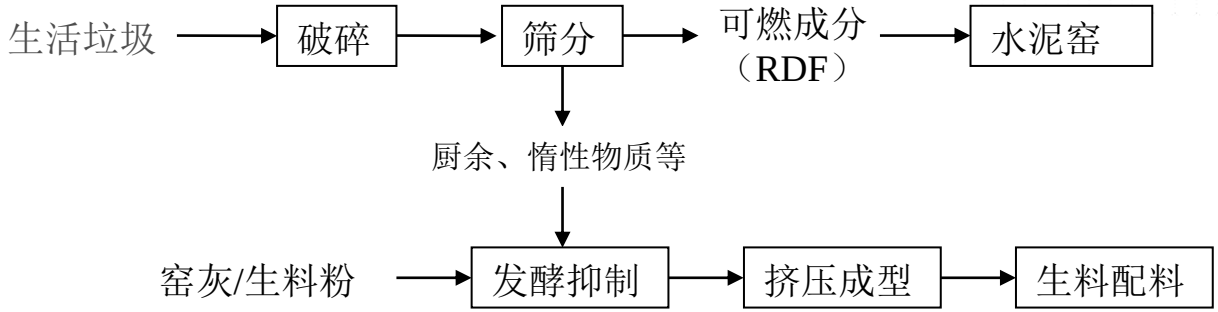


RDF投加

中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

生活垃圾预处理技术现状

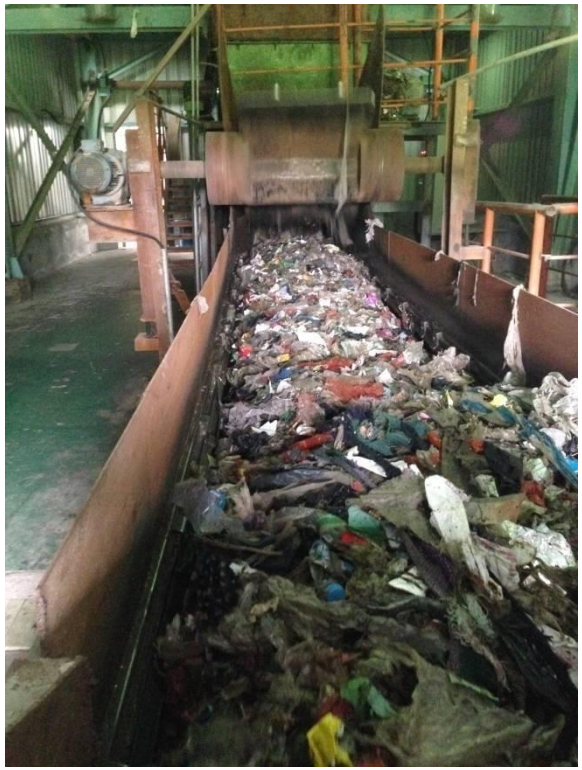
❖ RDF+替代原料工艺



中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

生活垃圾预处理技术现状

- RDF+替代原料工艺



RDF



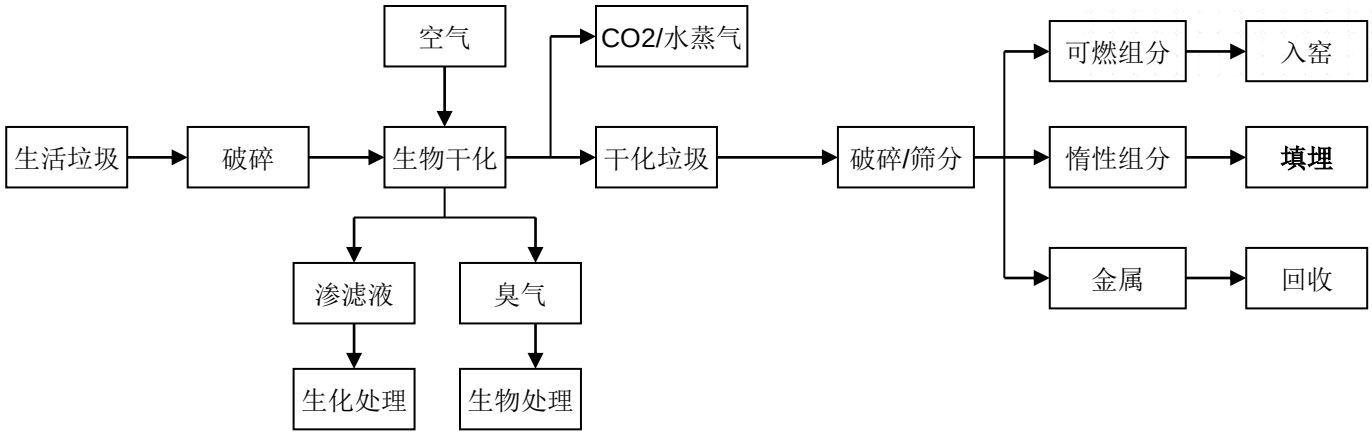
分选设施



厨余和惰性物质

生活垃圾的预处理技术

生物干化工艺



中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES



生活垃圾生活干化



破碎、筛分

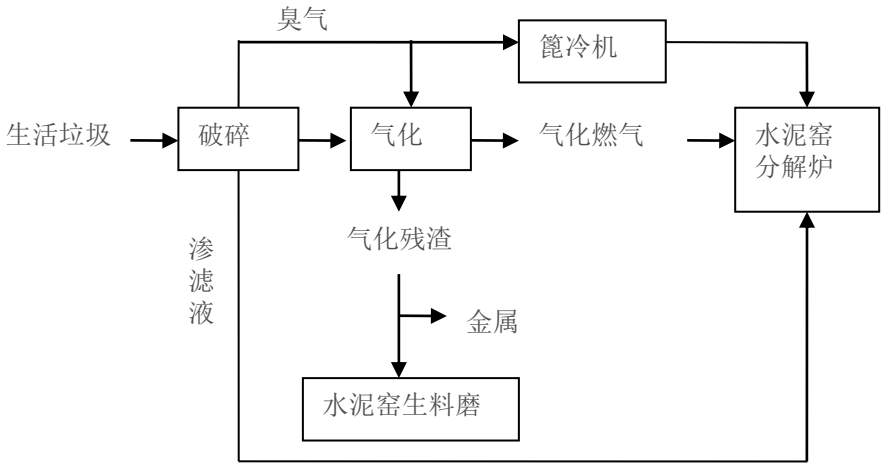


臭气生物处理设施



入窑前可燃组分

气化工艺





气化炉



气化气输送管道



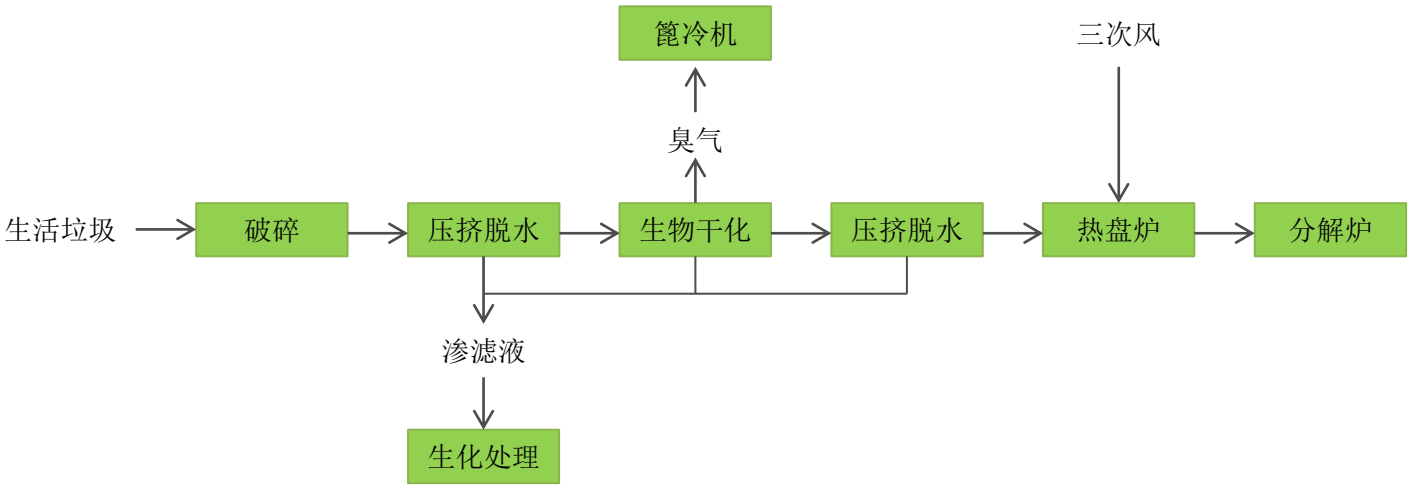
气化残渣

中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

生活垃圾预处理技术现状

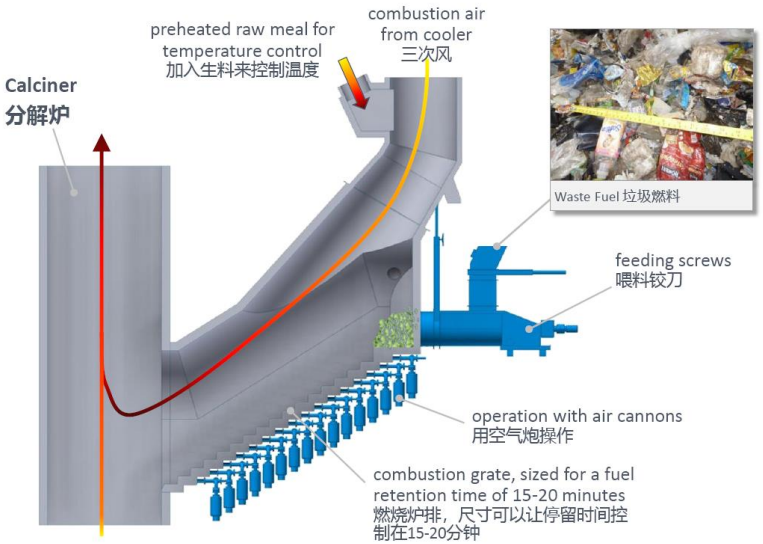
- 热盘炉工艺





中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

其他外挂炉



阶梯焚烧炉



立式旋转气化炉

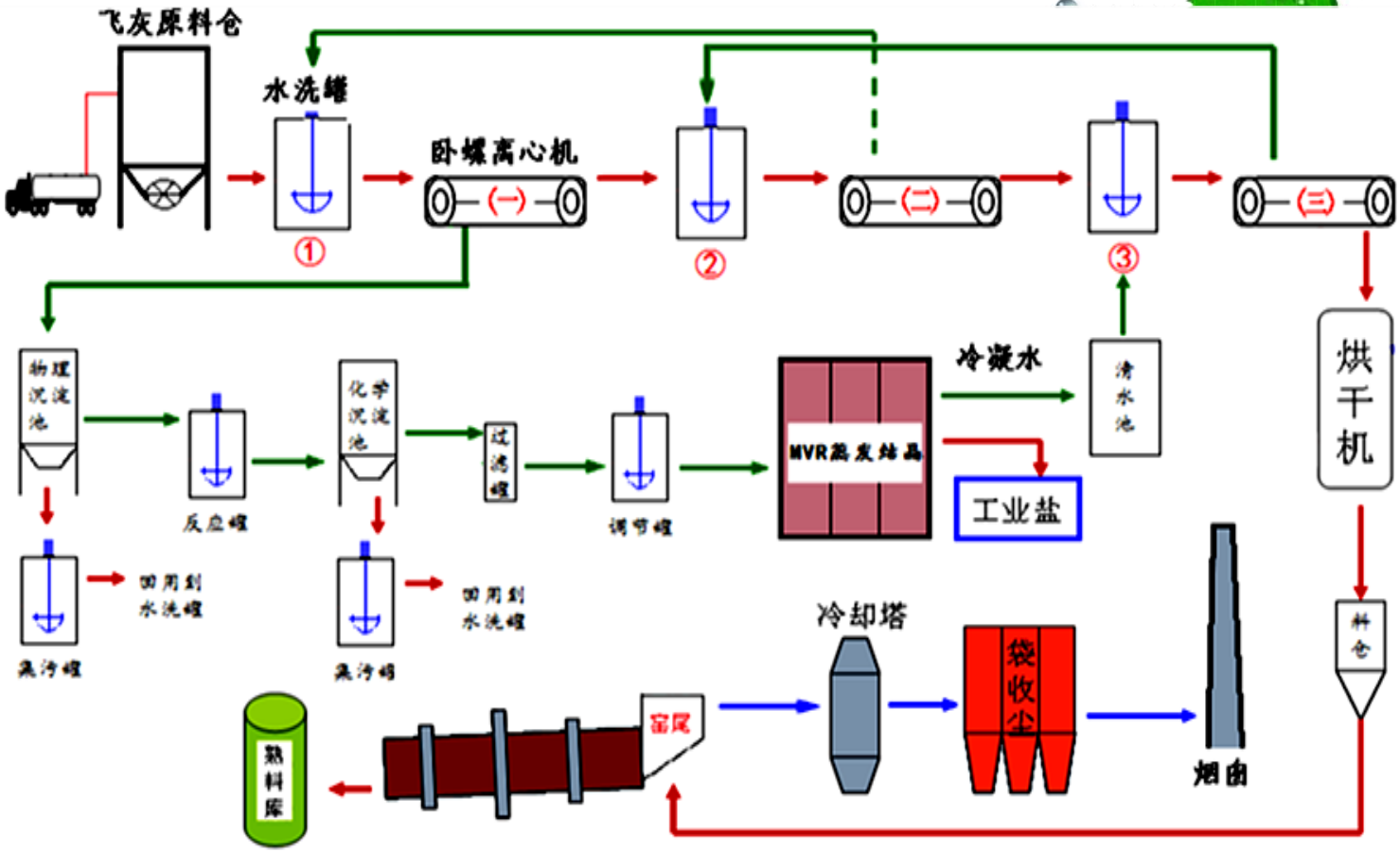
中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

典型废物的预处理技术现状及案例

❖ 生活垃圾焚烧飞灰

- 水洗：脱除飞灰中的可溶性氯盐
- 水洗液处理
  - 废水除重金属后排海
    - 工艺：水泥窑废气和化学试剂沉淀重金属，含氯废水排入海域。
    - 主要问题：地域限于沿海城市
  - **废水除重金属、除盐后回用**
    - 工艺：水泥窑废气和化学试剂沉淀重金属，含氯废水采用蒸发结晶法脱除氯盐后回用
    - 主要问题：氯盐不易找到合适的出路
  - 废水送至污水处理厂集中处置
    - 工艺：水洗废水运至当地的废水处理厂处理
    - 主要问题：难以满足综合污水排放标准

北京琉璃河水泥厂



中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

北京琉璃河水泥厂



典型废物的预处理技术现状及案例

生活污泥

- 均化
  - 主要工艺：单独搅拌，或与相容的液态、固态废物混合、搅拌后投加.
  - 主要特点：处理量小。
- 余热干化
  - 余热间接干化
    - 主要工艺：水泥窑烟气非接触式加热导热油，高温导热油非接触式干化污泥，污泥中蒸发出的废气冷凝后进入水泥窑焚烧处置。
    - 主要问题：建设运行成本高。
  - 余热直接干化
    - 主要工艺：水泥窑烟气直接接触式干化污泥，污泥中蒸发出的废气处理后排入大气
    - 主要特点：污泥蒸发废气量大不易处理

中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

北京水泥厂-均化



搅拌坑

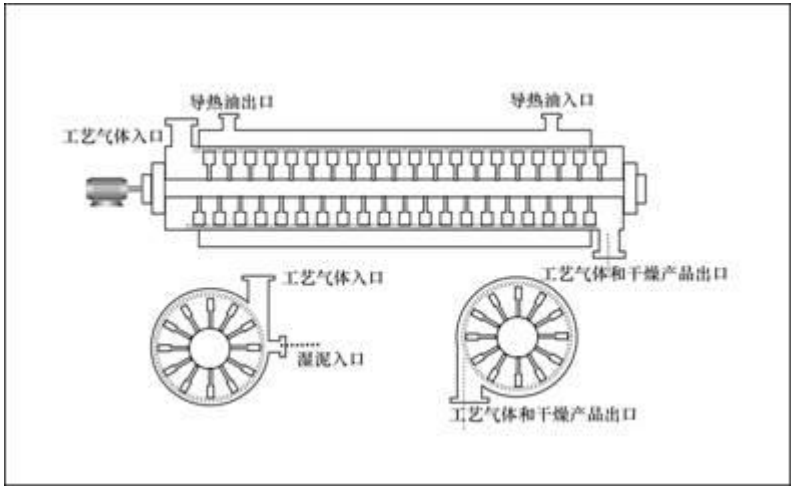


搅拌器和柱塞泵

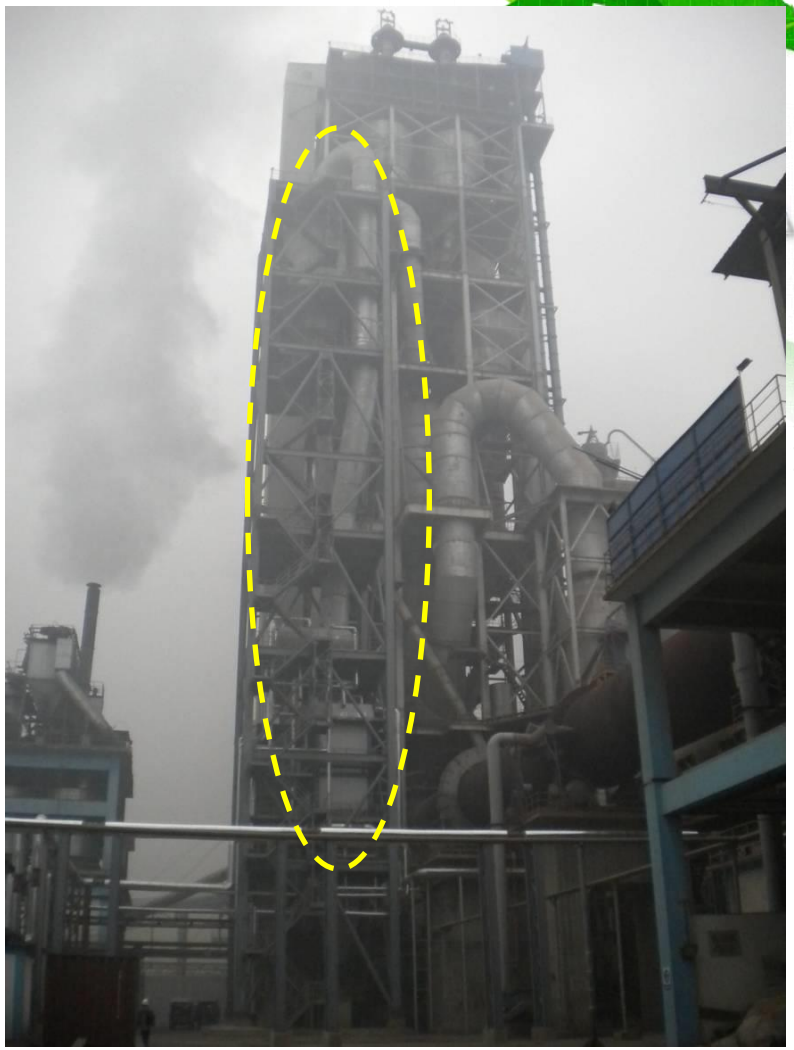
中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

北京水泥厂-余热间接干化





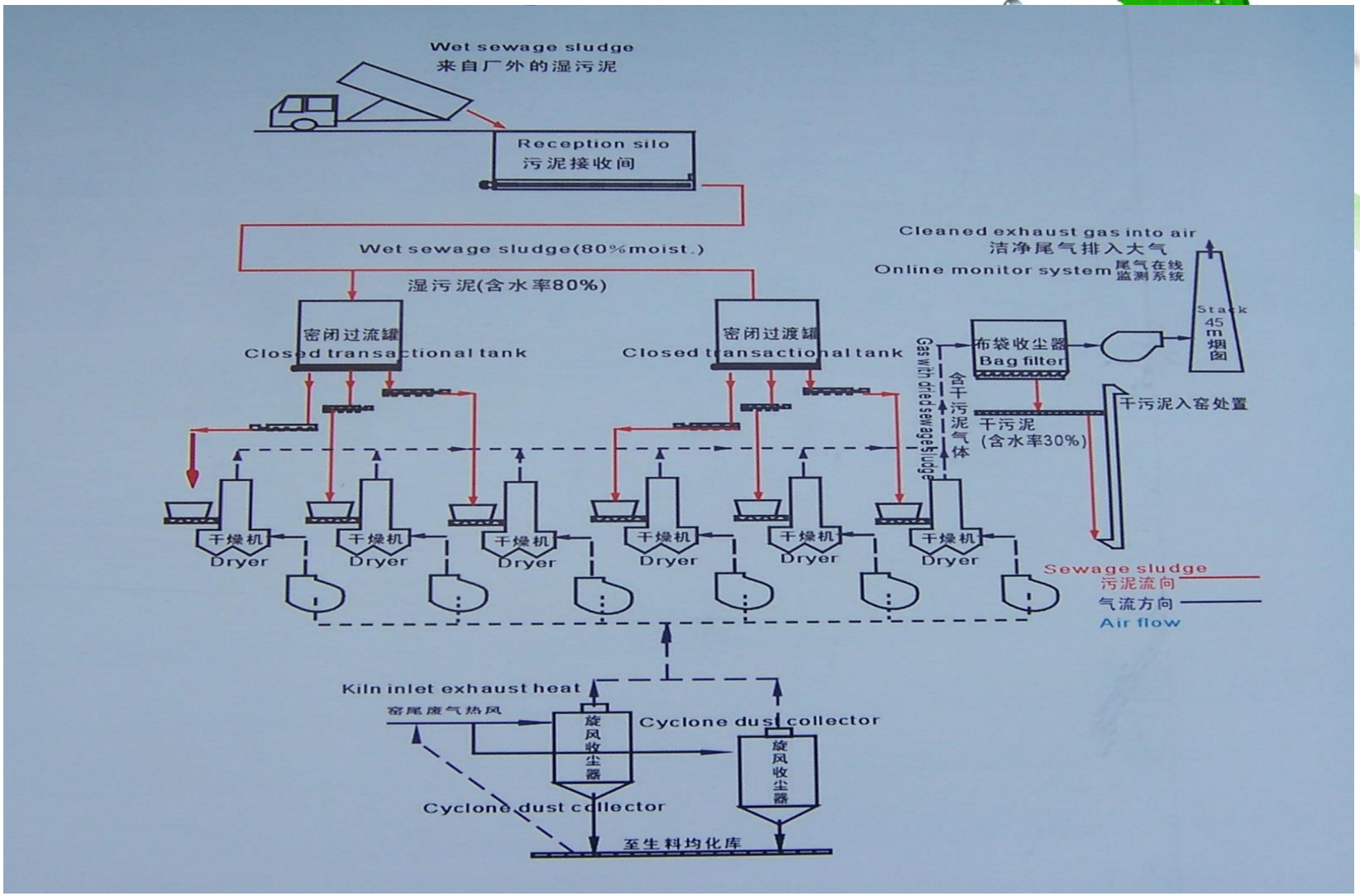
污泥干燥机



高温烟气加热导热油系统

中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

广州越堡水泥厂-余热直接干化



中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

典型废物的预处理技术现状及案例

- 有机物污染土壤
  - 筛分
    - 主要工艺：筛分后直接入窑。
    - 主要问题：处理量小。
  - 均化、流态化
    - 主要工艺：与液态废物混合搅拌制成浆状废物。
    - 主要问题：搅拌不易均匀，堵塞柱塞泵，处理量较小。
  - 热脱附
    - 主要工艺：利用三次风脱除污染土壤有机物。
    - 主要问题：建设运行成本高。

北京水泥厂





中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

重庆拉法基



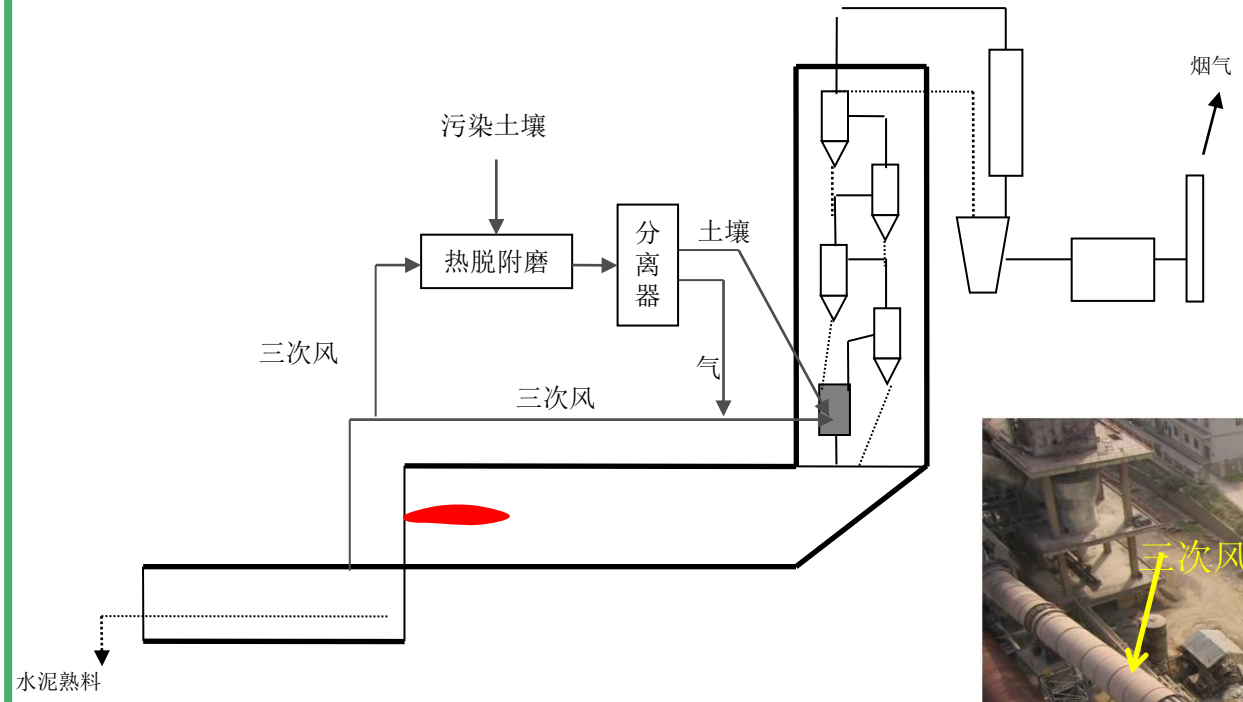






中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

华新（武穴）水泥厂



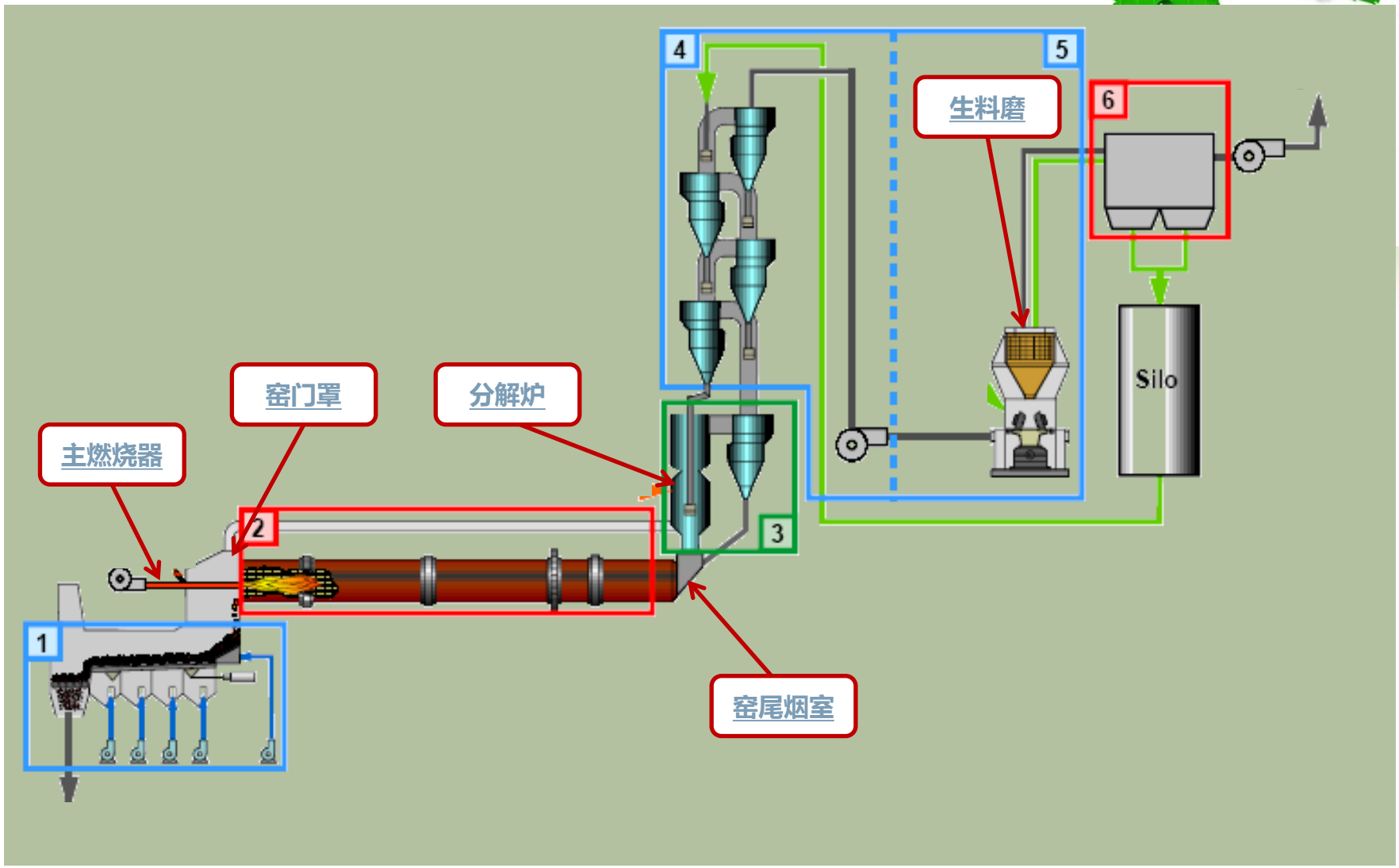
热脱附工艺



污染土壤处理装置

中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

固体废物投加



固体废物投加

投加位置	适于投加的废物特性
主燃烧器	● 液态或易于**气力输送**的小粒径固态废物； ● 含POPs物质或高毒、难降解有机物质的废物； ● 热值高、含水率低的有机废液。
窑门罩	● 不适于在窑头主燃烧器投加的液体废物，如各种低热值液态废物； ● 易于**气力输送**的小粒径固态废物。
分解炉	● 所有废物
窑尾烟室	● 受物理特性限制无法从窑头投加的高毒、难降解有机物。 ● 不可燃，有机质含量低
生料磨	● 不含有机物（**有机质含量<0.5%，二噁英含量小于10ng I-TEQ/kg，其他特征有机物含量<常规水泥生料中相应的有机物含量**）和氰化物（**CN^-含量<0.01mg/kg**）的固态废物（强制条款）

中国环境科学研究院 CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

窑头主燃烧器投加点

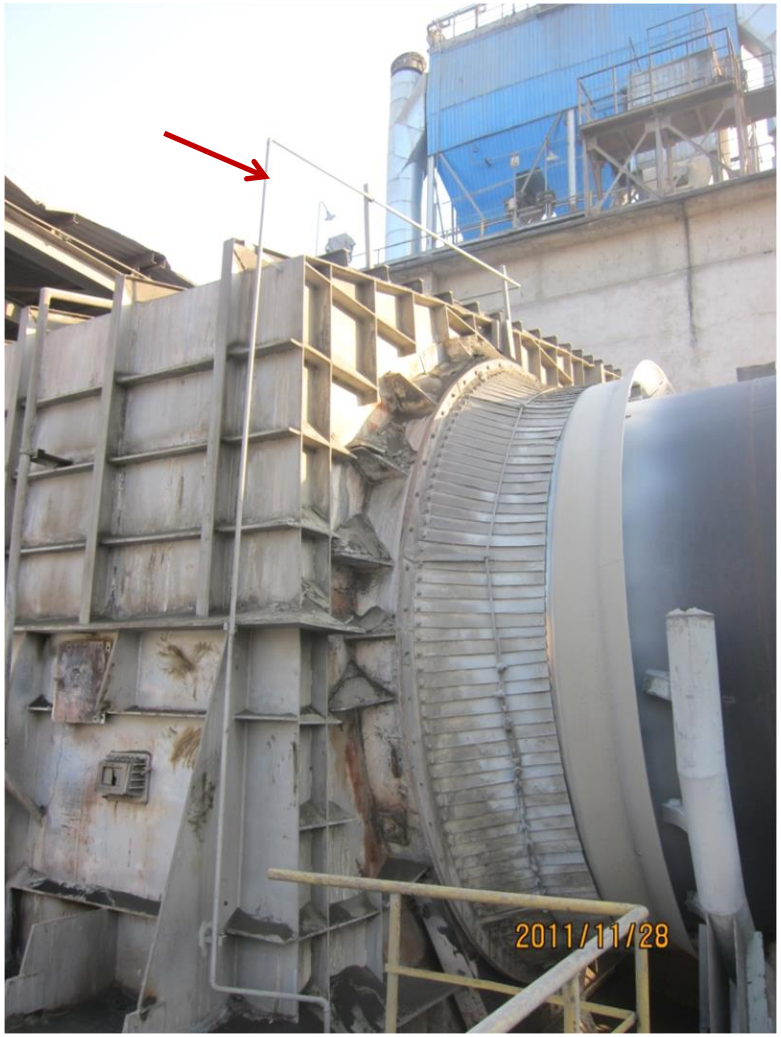






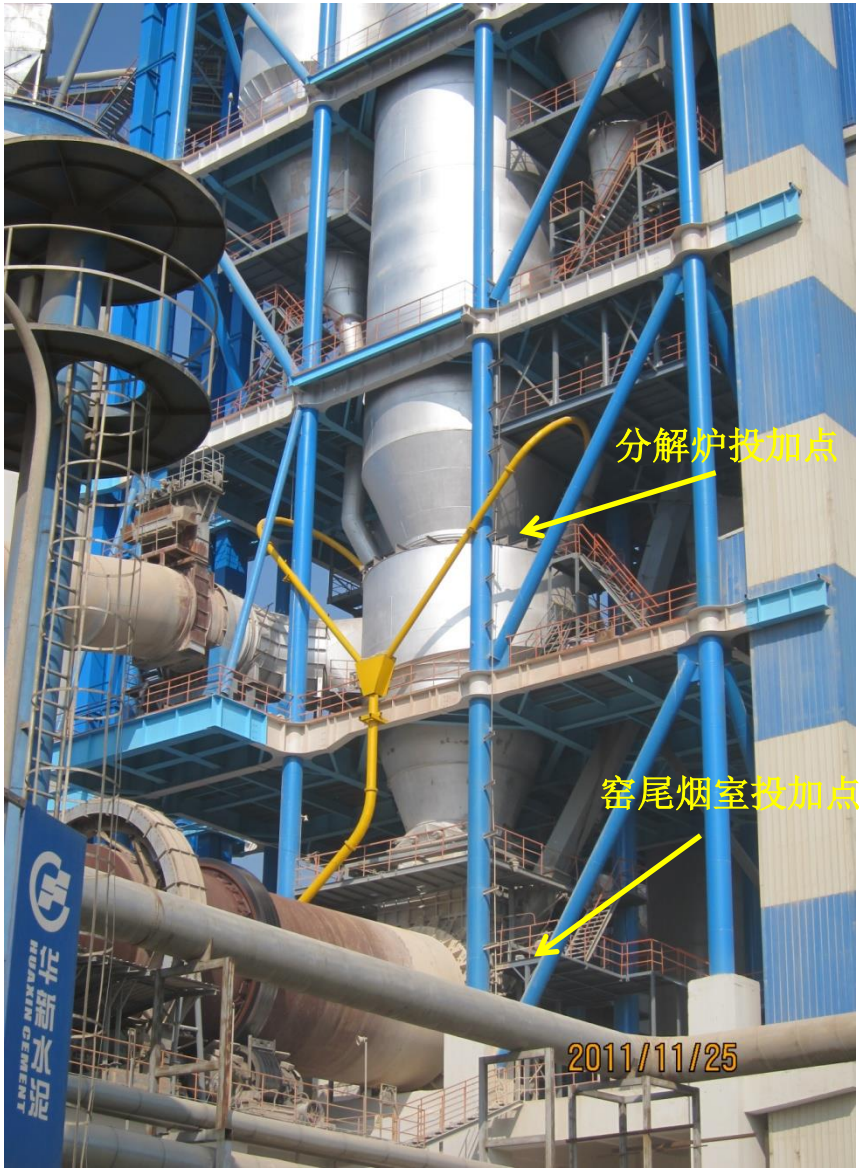
中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

窑门罩投加点





窑尾投加点



中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

窑尾投加点



液态废物的分解炉投加点



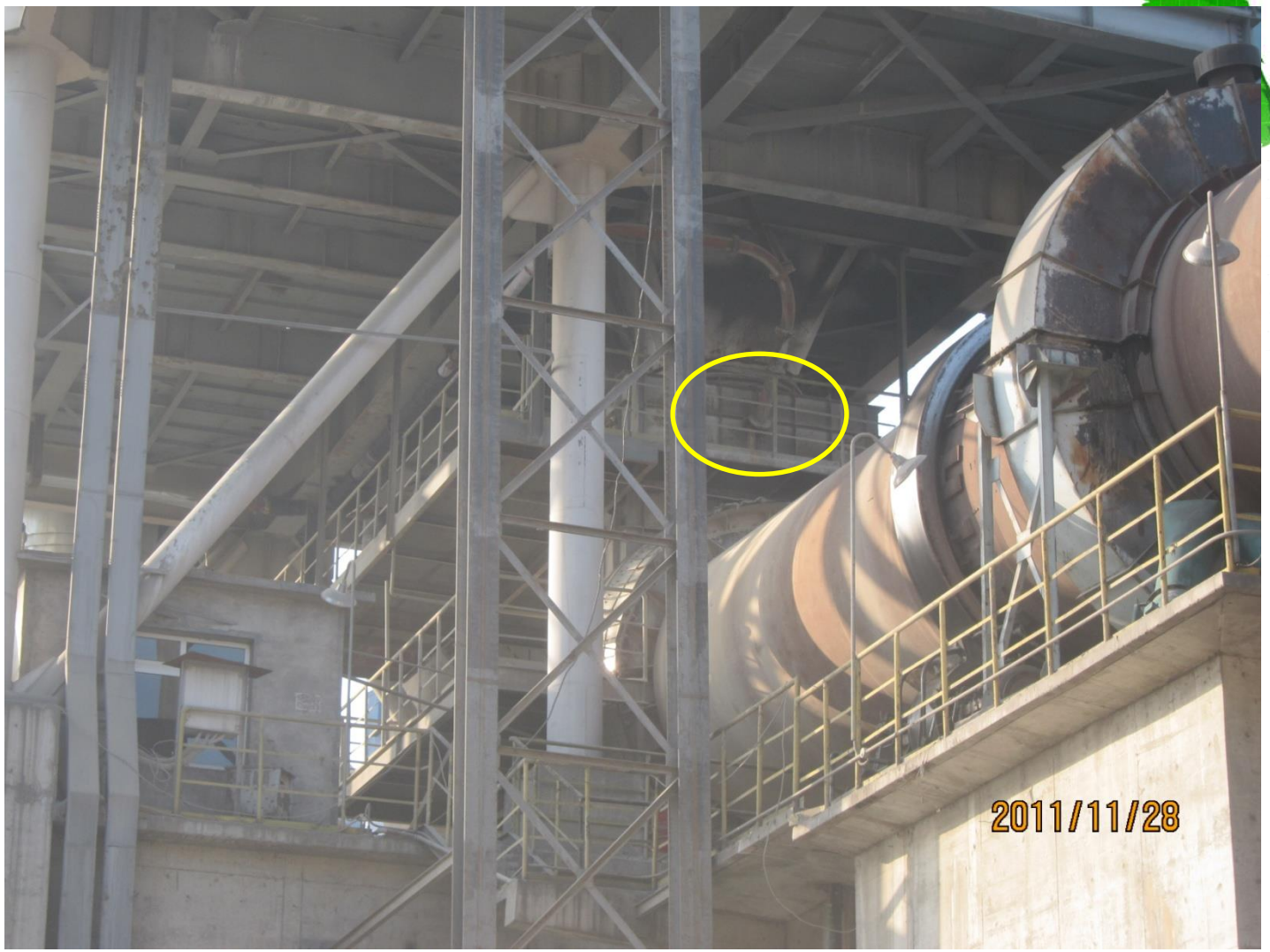
固态废物的分解炉投加点



小瓶装废物人工投加点

中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

窑尾投加点



半固态废物窑尾烟室投加点

协同处置危险废物的规模

废物特性和形态			可投加的危险废物的最大质量
可燃			与废物低位热值相关，参见表二。
不可燃	液态		一般不超过水泥窑熟料生产能力的10%。
	固态	含有机质或氰化物的细颗粒态	一般不超过水泥窑熟料生产能力的15%。
		含有机质或氰化物的块状	一般不超过水泥窑熟料生产能力的4%。
		不含有机质 和氰化物	一般不超过水泥窑熟料生产能力的15%。
	半固态		一般不超过水泥窑熟料生产能力的4%。

可燃危险废物**低位热值** (MJ/kg)	3	5	10	15	20	25	30	35	40
可投加的可燃危险废物质量占水泥窑熟料生产能力的百分比（%）	15	16	22	19	18	15	12	10	9

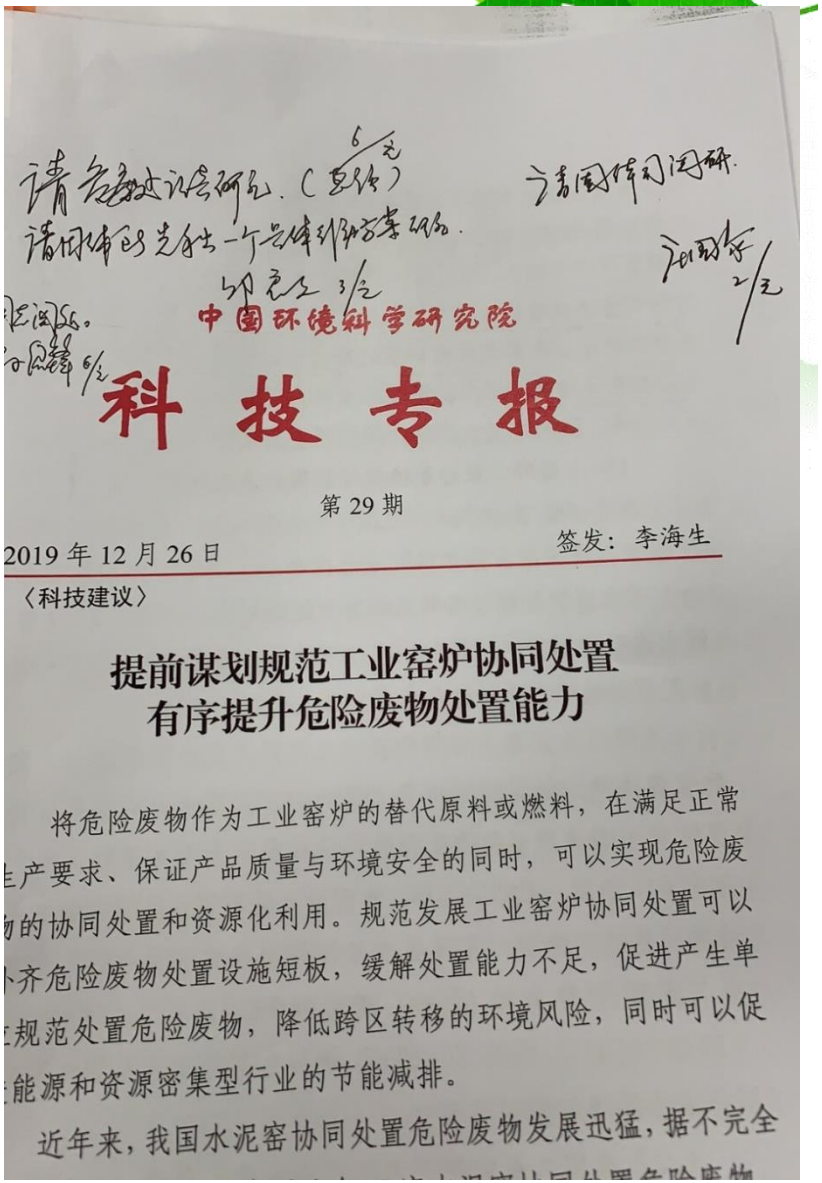
水泥窑协同处置危险废物经济效益

水泥窑协同处置危险废物项目经济效益（3万吨/年）

项目	金额（万元）	核算依据
一、建设投资	**3500**	处理能力小于5万吨/年时，每万吨危险废物建设投资700-1000万；处理能力大于5万吨/年时，每万吨危险建设投资500-800万。
二、运营成本	**1290-2130**	吨成本430-710元
1.设备折旧及维修	350	建设投资10%。
2.电耗	300	处理1吨危险废物电耗100khw，电费1元/kwh。
3.水耗	1.5	生活用水用量1650吨/年；生产用水用量5000吨/年；消防用水10吨/年；水价2元/吨。
4.危险废物运输	150	运费平均1元/吨公里，运距平均50km
5.药品和试剂	10	
6.人员	300	50人，平均每人年薪6万/年
7.熟料减产	0~210	处置1吨危险废物减产0~0.7吨熟料（与预处理水平有关），每吨熟料利润100元。
8.熟料煤耗增加	-540~90	处置1吨危险废物增加煤耗-0.3~0.05t（与废物热值有关），每吨煤600元
9.营业费用	750	营业收入10%，包括市场开发和宣传费5%，差旅费3%，客户服务费2%。
10.原料替代	-30	危险废物灰分平均20%，天然原料50元/吨
三、收入	**7500**	
1.危险废物处置费	7500万	平均2500元/吨
四、毛利润	**5370-6210**	吨利润1790-2070元

其他工业窑炉协同处置进展

- 锅炉
- 水煤浆气化炉
- 冶金窑炉
- 其他建材窑炉



中国环境科学研究院

科技专报

第 29 期

2019 年 12 月 26 日　　签发：李海生

〈科技建议〉

提前谋划规范工业窑炉协同处置 有序提升危险废物处置能力

将危险废物作为工业窑炉的替代原料或燃料，在满足正常生产要求、保证产品质量与环境安全的同时，可以实现危险废物的协同处置和资源化利用。规范发展工业窑炉协同处置可以补齐危险废物处置设施短板，缓解处置能力不足，促进产生单位规范处置危险废物，降低跨区转移的环境风险，同时可以促进能源和资源密集型行业的节能减排。

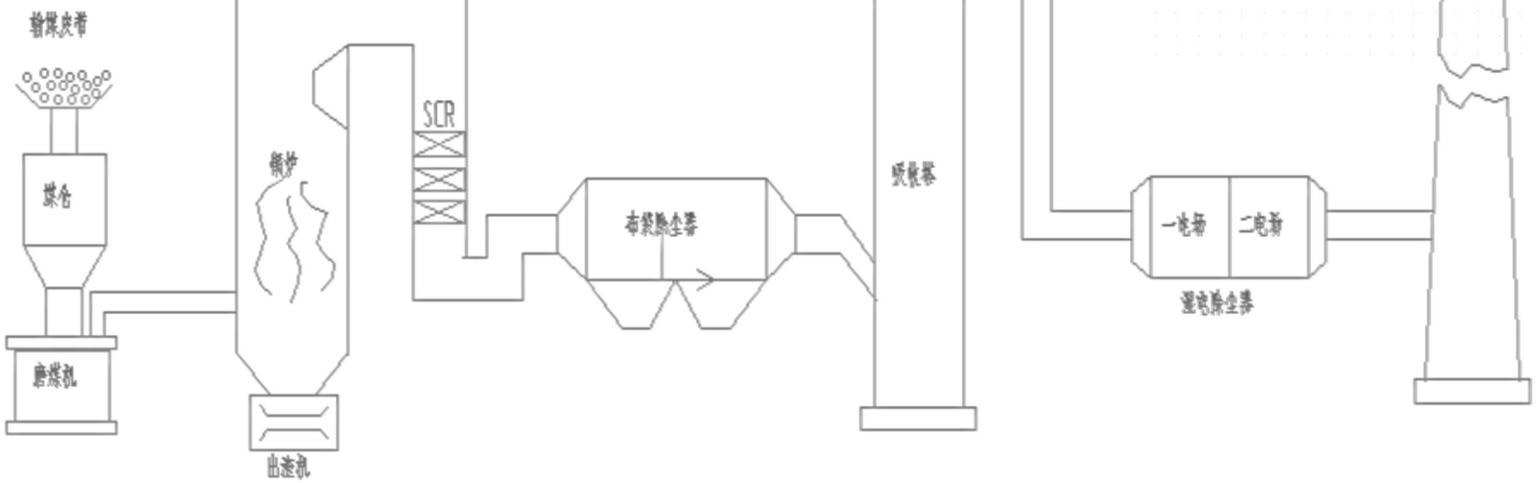
近年来，我国水泥窑协同处置危险废物发展迅猛，据不完全

锅炉类型



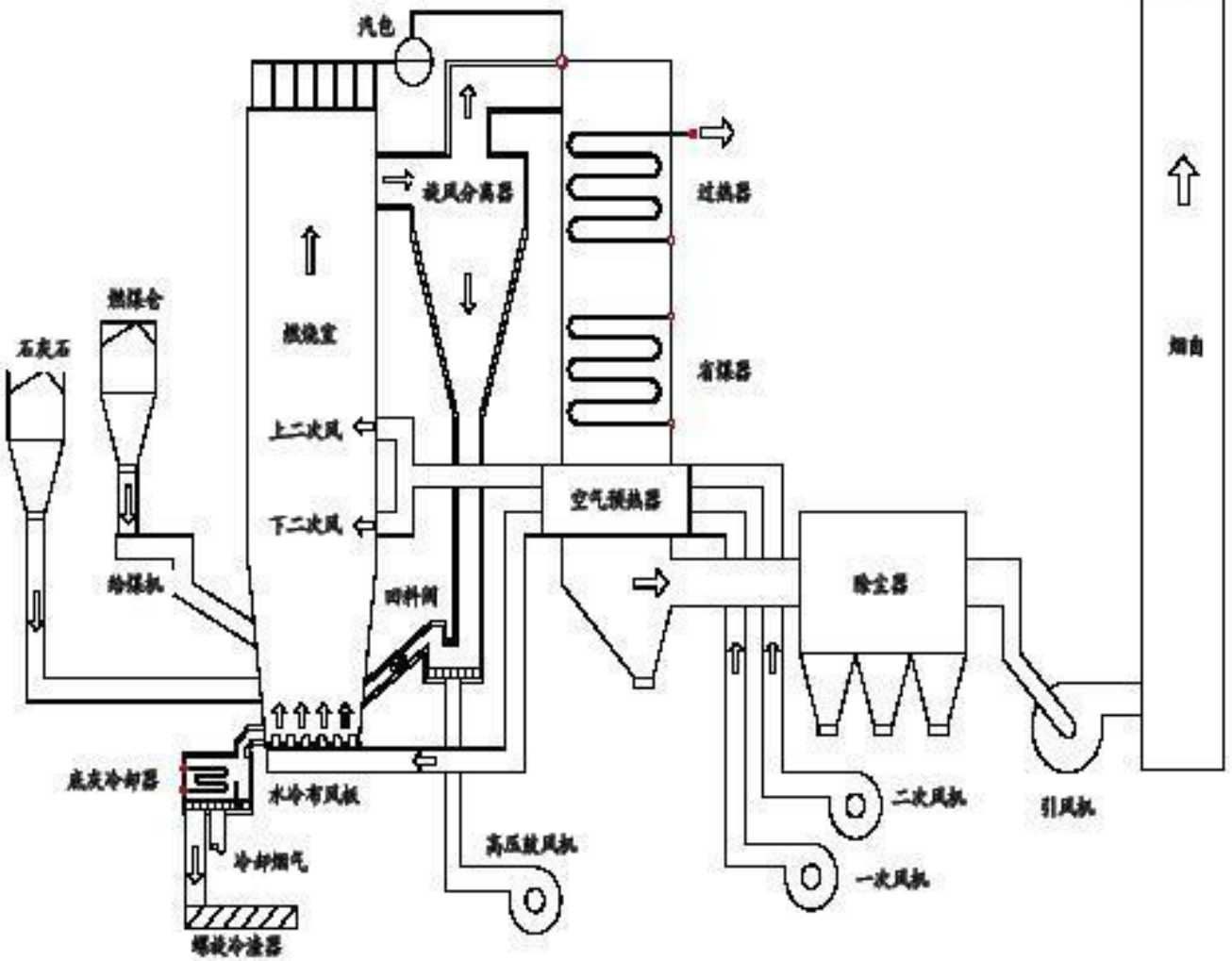
- 按用途分类
  - 工业锅炉
  - 电站锅炉
  - 热水锅炉
- 按燃烧方式分类
  - 火床炉（链条炉、炉排炉、人工炉）
  - 室燃炉（**煤粉炉**、燃油锅炉、燃气锅炉）
  - 旋风炉
  - 流化床锅炉（鼓泡床、**循环流化床**）

煤粉锅炉



中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

循环流化床锅炉



中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

锅炉协同处置固体废物原理

- **煤粉锅炉内热工参数**
  - 温度：火焰中心温度大于1500℃
  - 停留时间：气相在1000℃以上停留时间约5s；
  - **入炉煤粒径：50um**
  - 气氛：氧化性
  - 压力： -20至-200Pa
- **循环流化床锅炉内热工参数**
  - 温度：炉膛温度850-970℃
  - 停留时间：气相在炉膛内停留时间约3-4s；固相在炉膛内停留时间约80min
  - **入炉煤粒径：15mm**
  - 气氛：氧化性
  - 压力： -150至50Pa
- 主要反应
  - $C_mH_nS_rN_pCl_qF_s+O_2 \rightarrow CO_2+H_2O+SO_2+N_2+NOx+HCl+HF$
- 固体废物在煤粉炉内的物理化学反应
  - 固体废物就是C、H、O、N、S、Si、Al、Ca、Na、K、Cl、F等常量元素及重金属等微量元素组成的化合物。
  - C、H等有机组分彻底分解为H_2和CO_2，并回收其中的热能。
  - 其他元素分布在炉渣、煤粉灰、脱硫副产物和排放烟气中。

气化炉内O_2分布图

国外锅炉协同处置现状

- 美国
  - 1993年，美国协同处置危险废物的锅炉有127台
  - 生物质废物也是美国锅炉常用的替代燃料
- 欧洲
  - 2009年，63个电厂锅炉协同处置废物；协同处置的废物主要包括生活污泥、造纸污泥、RDF、动物组织废物和废木材，某些危险废物也在锅炉协同处置；电厂锅炉的**燃料替代率一般约10%**，流化床锅炉以及仅协同处置木屑的煤粉炉的燃料替代率相对较高。
  - 2009年，德国大约有40台电厂锅炉使用废物作为替代燃料，**燃料替代率25%**，总计协同处置了280万吨废物。

我国锅炉协同处置现状

- 锅炉协同处置一般固体废物
  - 有小范围应用，全国约数十项：农林生物质、生活污泥、印染污泥
  - 2017年，国家能源局、环境保护部开展燃煤耦合生物质发电技改试点工作，最终确定了84家试点单位，82家为协同处置农林生物质和生活污泥，2家为生活垃圾
  - 近两年，个别环保公司联合五大发电集团开始推进锅炉协同处置生活垃圾（RDF）项目
- 锅炉协同处置危险废物
  - 仅有个别工程试验和应用案例：抗生素药渣、含油污泥、煤液化油渣、制革污泥、油基岩屑，其中河南一家和贵州二家锅炉协同处置单一类别危险废物项目已取得了危险废物经营许可证（河南为抗生素药渣，贵州为油基岩屑）
  - 山东省环保厅编制了地方标准《油田含油污泥流化床焚烧处置工程技术规范（试行）》（DB37/T 2670-2015）
  - 近两年有多家环保公司和电力企业开始推进锅炉协同处置危险废物项目

锅炉协同处置潜力

- 2017年底，我国现有锅炉总台数为**44.56万台**，主要包括电站锅炉和工业锅炉。
- 2015年，我国拥有电站锅炉**8283台**，以煤粉炉和流化床为主，煤粉炉容量占80%以上。2017年我国电站锅炉蒸发量38.8万蒸吨/h，火力发电装机容量11亿千瓦，燃煤发电量在火电发电量中的占比达91.07%。
- 截至到2017年底，在用工业锅炉总台数约43.56万台，蒸发量为43.4万蒸吨/h。在工业锅炉中，燃煤锅炉、燃油/气锅炉和燃生物质锅炉的台数分别占67.75%、25.84%、6.41%。在燃煤锅炉中，**层燃锅炉仍然是应用的主要炉型**，占燃煤工业锅炉台数的95%左右。

欧盟锅炉协同处置固体废物标准

$$\frac{V_{waste} \times C_{waste} + V_{proc} \times C_{proc}}{V_{waste} + V_{proc}} = C$$

V_{waste}：来自废物焚烧的烟气排放量（废物热值低于10%时以10%计）

C_{waste}：废物焚烧炉排放限值

V_{proc}：协同资源化处理设施常规燃料的烟气排放量

C_{proc}：协同资源化处理设施常规生产时的排放限值

C：总排放限值

锅炉共烧废物的大气污染物排放限值C_{proc}

燃料类别	污染物	单位	排放限值			
			<50MWth	50-100MWth	100-300MWth	>300MWth
固体燃料[2)]	SO_2	mg/m^3	-	400 300（使用煤泥）	200 300（使用煤泥） 250（使用煤泥的流化床）	**150** **200（流化床）**
	NOx	mg/m^3	-	300 250（使用煤泥）	200	**150** **200（使用褐煤粉）**
	粉尘	mg/m^3	50	20	20	**10** **20（使用煤泥）**
生物质燃料[2)]	SO_2	mg/m^3	-	200	200	**150**
	NOx	mg/m^3	-	250	200	**150**
	粉尘	mg/m^3	50	20	20	**20**
液体燃料[3)]	SO2	mg/m^3	-	350	200	**150**
	NOx	mg/m^3	-	300	150	**100**
	粉尘	**mg/m^3**	**50**	**20**	**20**	**10**

锅炉共烧废物的大气污染物排放限值C

污染物	单位	排放限值	测试方法
Cd+Tl	mg/m^3	0.05	**0.5-8小时采样周期内均值**
Hg	mg/m^3	0.05	**0.5-8小时采样周期内均值**
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V	mg/m^3	0.5	**0.5-8小时采样周期内均值**
二噁英	**TEQ ng/m^3**	**0.1**	**6-8小时采样周期内均值**

美国固体燃料锅炉协同处置危险废物标准

污染物	排放标准限值	
	现有锅炉	新建锅炉
二恶英/呋喃	CO和HC满足标准即可	CO和HC满足标准即可
汞	排放浓度不超过 0.011mg/Nm^3	排放浓度或理论最大排放浓度不超过0.011mg/Nm^3
半挥发性金属 (铅+镉)	排放浓度不超过0.18mg/Nm^3	排放浓度不超过0.18mg/Nm^3
低挥发性金属 (砷+铍+铬)	排放浓度不超过0.38mg/Nm^3	排放浓度不超过0.19mg/Nm^3
总氯元素 (氯化氢+氯气)	440（以氯计，ppmv）	73（以氯计，ppmv）
颗粒物质(PM)	68mg/Nm^3	34mg/Nm^3
一氧化碳（CO）	CO 100ppmv或HC 10 ppmv	CO 100ppmv或HC 10 ppmv
碳氢化合物(HC，以丙烷计)	10ppmv	10ppmv
有机污染物[2)]	每种主要有机有害污染物（POHC）的焚毁去除率应达到99.99%。若燃烧危险废物含有F020，F021，F022，F023，F026或F027类废物(主要为含二恶英和呋喃类的废物)[3)]，则每种主要有机有害污染物的破坏去除率应达到99.9999%。	

美国液体燃料锅炉协同处置危险废物标准

污染物	排放标准限值	
	现有锅炉	新建锅炉
二恶英/呋喃	0.40TEQng/Nm^3；CO和HC满足标准（对于配置干法净化装置的锅炉）	0.40TEQng/Nm^3；CO和HC满足标准（对于配置干法净化装置的锅炉）
汞	废物热值小于23.26MJ/kg时，排放浓度不超过0.019mg/Nm^3；废物热值大于等于23.26MJ/kg时，来自废物的排放浓度不超过0.018mg/MJ-废物热值	废物热值小于23.26MJ/kg时，排放浓度不超过0.0068mg/Nm^3；废物热值大于等于23.26MJ/kg时，来自废物的排放浓度不超过0.00051mg/MJ-废物热值
半挥发性金属(铅+镉)	废物热值小于23.26MJ/kg时，排放浓度不超过0.15mg/Nm^3；废物热值大于等于23.26MJ/kg时，来自废物的排放浓度不超过0.035mg/MJ-废物热值	废物热值小于23.26MJ/kg时，排放浓度不超过0.078mg/Nm^3；废物热值大于等于23.26MJ/kg时，来自废物的排放浓度不超过0.0026mg/MJ-废物热值
低挥发性金属(铬)	废物热值小于23.26MJ/kg时，排放浓度不超过0.37mg/Nm^3；废物热值大于等于23.26MJ/kg时，来自废物的排放浓度不超过0.056mg/MJ-废物热值	废物热值小于23.26MJ/kg时，排放浓度不超过0.012mg/Nm^3；废物热值大于等于23.26MJ/kg时，来自废物的排放浓度不超过0.006mg/MJ-废物热值
重金属可选限值[2)]	废物热值小于23.26MJ/kg时，Cd+Pb+Se<0.15mg/Nm^3，Sb+As+Be+Cr+Co+Mn+Ni<0.37 mg/Nm^3,废物热值大于等于23.26MJ/kg时，来自废物Cd+Pb+Se的排放浓度不超过0.035mg/MJ-废物热值，Sb+As+Be+Cr+Co+Mn+Ni放浓度不超过0.056 mg/MJ-废物热值	废物热值小于23.26MJ/kg时，Cd+Pb+Se<0.078mg/Nm^3，Sb+As+Be+Cr+Co+Mn+Ni<0.012mg/Nm^3,废物热值大于等于23.26MJ/kg时，来自废物Cd+Pb+Se的排放浓度不超过0.0026mg/MJ-废物热值，Sb+As+Be+Cr+Co+Mn+Ni放浓度不超过0.006 mg/MJ-废物热值
总氯元素(氯化氢+氯气)	废物热值小于23.26MJ/kg时，排放浓度不超过31ppmv；废物热值大于等于23.26MJ/kg时，来自废物的排放浓度不超过22mg/MJ-废物热值	废物热值小于23.26MJ/kg时，排放浓度不超过31ppmv；废物热值大于等于23.26MJ/kg时，来自废物的排放浓度不超过22mg/MJ-废物热值
颗粒物质(PM)	80mg/Nm^3	20mg/Nm^3
一氧化碳（CO）	CO 100ppmv或HC 10 ppmv	CO 100ppmv或HC 10 ppmv
碳氢化合物(HC，以丙烷计)	10ppmv	10ppmv
有机污染物[3)]	每种主要有机有害污染物（POHC）的焚毁去除率应达到99.99%。若燃烧危险废物含有F020，F021，F022，F023，F026或F027类废物(主要为含二恶英和呋喃类的废物)[4)]，则每种主要有机有害污染物的破坏去除率应达到99.9999%。	

我国锅炉协同处置固体废物标准

- 我国还没有颁布锅炉协同处置固体废物的专用污染控制标准。
- 锅炉协同处置首先应执行锅炉相关污染控制标准，仅规定了烟尘（颗粒物）、二氧化硫、氮氧化物、汞的排放限值。
- 对于除烟尘（颗粒物）、二氧化硫、氮氧化物、汞之外的其他污染物，我国现有的锅炉协同处置一般固体废物项目只能参照执行《生活垃圾污染控制标准》中的排放限值，锅炉协同处置危险废物项目只能参照执行《危险废物焚烧污染控制标准》中的排放限值。锅炉协同处置固体废物执行传统焚烧炉污染控制标准并不科学。
- **2018年1月，原环境保护部土壤司给环科院固体所下达了《锅炉协同处置固体废物污染控制技术规范》的编制任务。2020年7月，生态环境部立项了《燃煤锅炉协同处置固体废物污染控制标准》编制项目。**

固体所锅炉协同处置研究基础

- **国家环保公益重点专项**“工业窑炉协同处置危险废物环境风险控制技术”（2012-2015年）：锅炉协同处置危险废物模拟实验和现场验证试验，编制了《锅炉协同处置固体废物污染控制标准》和《锅炉协同处置固体废物环境保护技术规范》建议稿。
- 神华集团鄂尔多斯煤制油(2014年)：自备**循环流化床锅炉**协同处置自产**煤液化残渣**工程试验。
- 华润古城电力（2017-2019年）：煤粉锅炉协同处置固体废物实验室模拟实验和现场工程试验，已取得国内第一个**煤粉锅炉**协同处置危险废物经营许可证（15万吨/年，**抗生素药渣**），目前企业正在开展协同处置**其他危险废物**许可证申请。
- 嘉兴新嘉爱斯热电（2019-2021年）：**循环流化床锅炉**协同处置固体废物实验室模拟实验和现场工程试验
- 荆门国电(2018-2019年)：**煤粉锅炉**协同处置**RDF**工程试验，目前企业拟在浙江华能电厂建设该项目
- 山东琦泉热电（2019-2020年）：**循环流化床锅炉**协同处置**抗生素药渣**工程试验，目前企业正在开展环评
- 阜新华电(2020年)：**循环流化床锅炉**协同处置**油泥**工程试验，目前企业拟开展环评
- 新疆新天煤化工(2019-2020年)：**煤粉锅炉**协同处置自有**煤气化焦油渣和污泥**工程试验
- 华能西安热工院(2020-2021年)：**煤粉锅炉**协同处置**RDF**工程试验
- 内江国电(2019-2021年)：**循环流化床锅炉**协同处置**油基岩屑**工程试验
- 粤电云浮（2020-2021年）：**循环流化床锅**炉协同处置**多种危险废物**工程试验

锅炉协同处置阶段性研究结论

- 绝大多数**有害有机物**在锅炉高温环境中的**热降解率大于99.99%**。
- 粉煤灰、炉渣和脱硫石膏中重金属浸出率低，表明煤粉锅炉粉煤灰和炉渣对重金属具有**固化作用**
- 锅炉烟气中二噁英排放**浓度低**，适当掺烧固体废物**不增加**锅炉烟气中二噁英排放浓度。

循环流化床锅炉协同处置案例

废物	制革污泥，干化后污泥掺加比50%；
锅炉	嘉兴新嘉爱斯220t/h高温高压循环流化床



湿污泥传送带



干化后污泥



干污泥传送带

煤粉锅炉协同处置案例

废物	抗生素药渣，干化后掺加比5%
锅炉	驻马店华润古城电厂1025t/h煤粉炉





煤粉锅炉协同处置案例

废物	RDF，100t/d
锅炉	杭州聚华能源公司利用荆门国电长源电厂1960t/h煤粉炉+10.8WM流化床气化炉





冶金

冶金窑炉类别		是否适合协同处置
钢铁工业	烧结机-高炉	是
	焦炉	是
	回转窑	是
	转炉	需进一步研究
	电炉	需进一步研究
	转底炉	需进一步研究
	精炼炉	否
	矿热炉	否
	其他	需进一步研究
有色工业	鼓风炉	需进一步研究
	闪速炉	需进一步研究
	反射炉	需进一步研究
	其他	需进一步研究

冶金

- **国外**

➢1995年德国一个钢铁企业首先开始利用炼铁高炉协同处置废塑料，随后该技术在德国和日本逐渐有了更多应用。

➢烧结机协同处置电炉含锌粉尘；

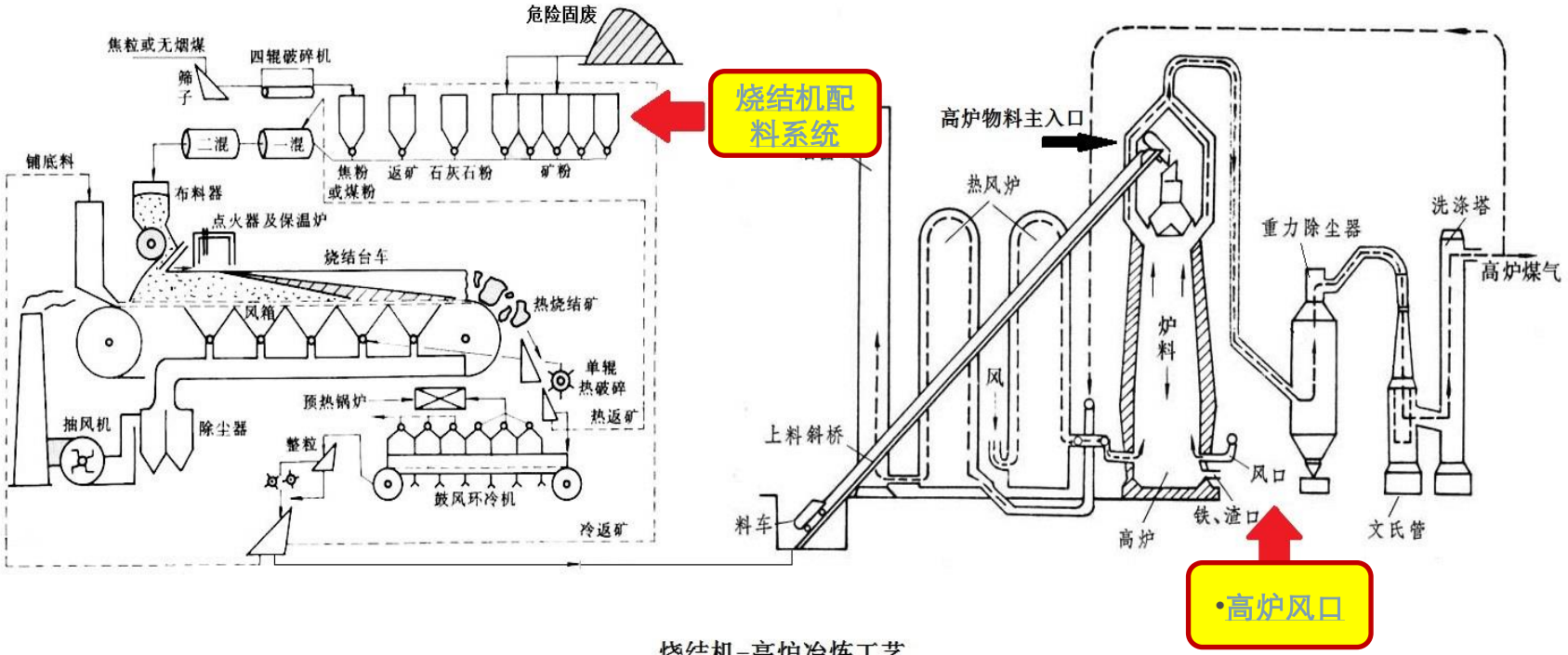
➢炼锌鼓风炉协同处置转炉富锌飞灰。

- **我国**

➢**炼铁回转窑**协同处置含铅锌的钢厂粉尘和电解锌渣，**烧结机**协同处置垃圾焚烧飞灰、铬渣，**焦炉**协同协同处置焦油渣和废塑料，**高炉**协同处置废轮胎、废塑料、电镀污泥，**炼钢转炉**协同处置铁质包装桶等技术已有工程试验或小规模试用

➢铅锌冶炼鼓风炉协同处置自身产生及钢铁行业产生的高锌、铅粉尘

烧结机—高炉系统



烧结机-高炉冶炼工艺

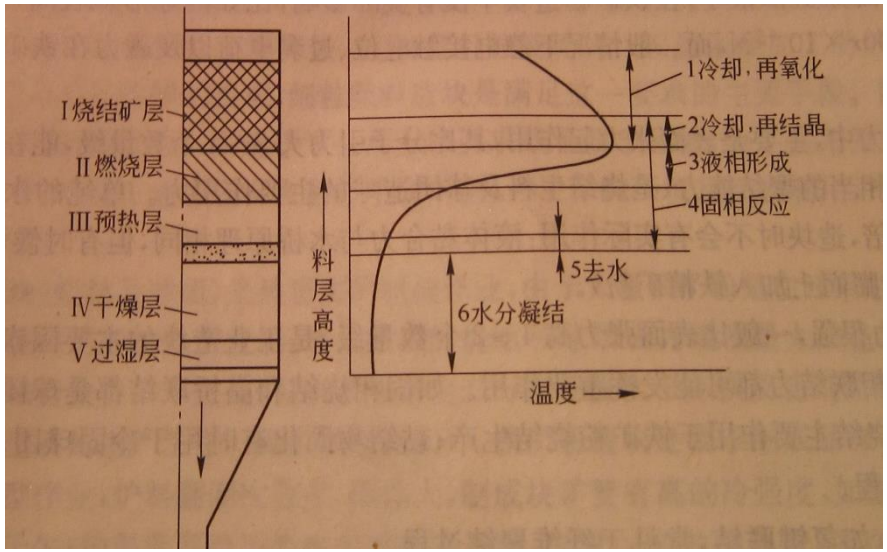
中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

烧结矿生产

主要工艺

原料/燃料 → 混合 → 造球 → 烧结 → 烧结矿产品

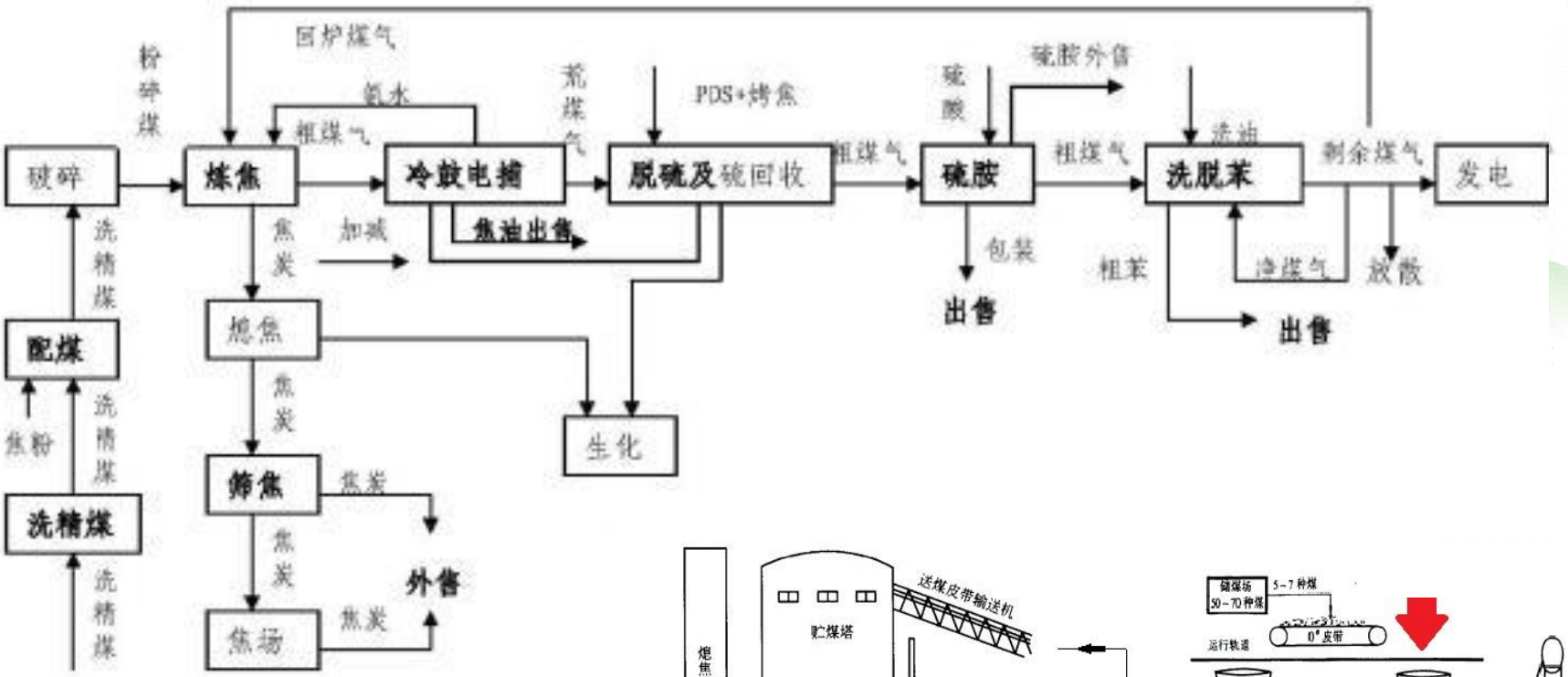


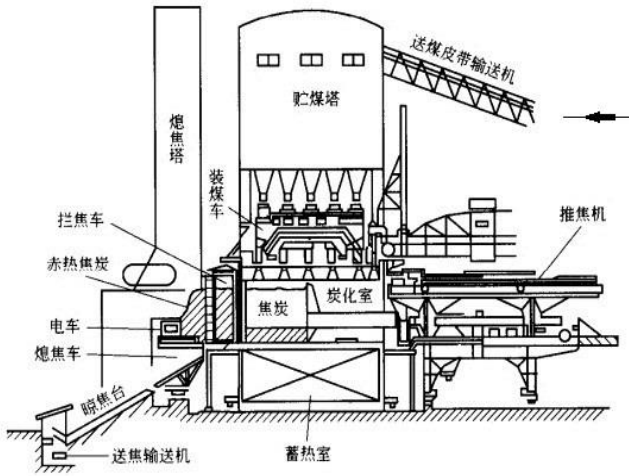


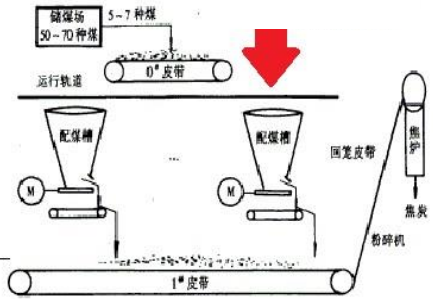


中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

炼焦工艺







中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

炼焦炉协同处置废物案例

废物

（1）煤焦油残渣和工业污泥，掺加比1%；

（2）氯代有机物：1,4-对二氯苯，掺加比7%。

炼焦炉

首钢京唐公司7.63米焦炉。



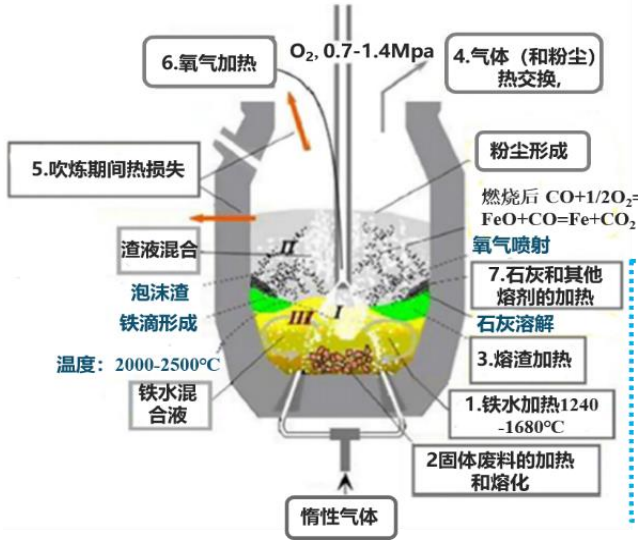




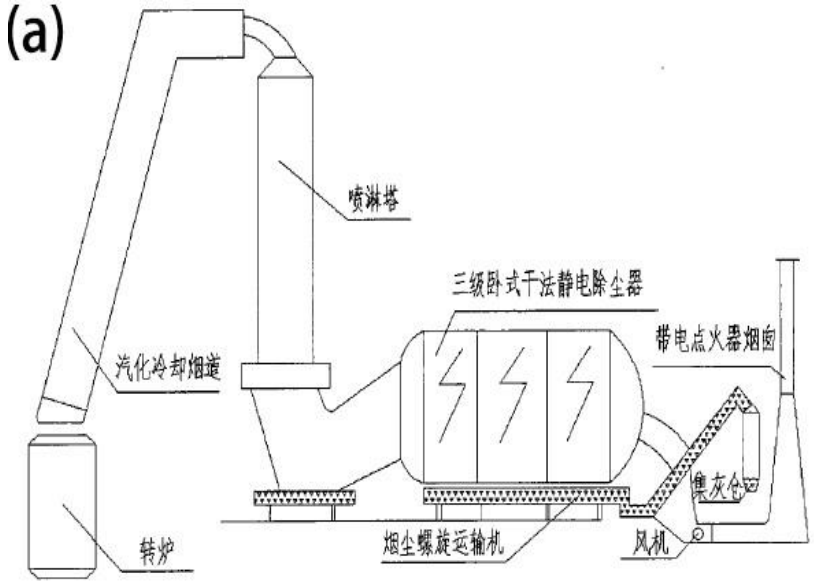

1 | 2 | 3
4 | 5 | 6

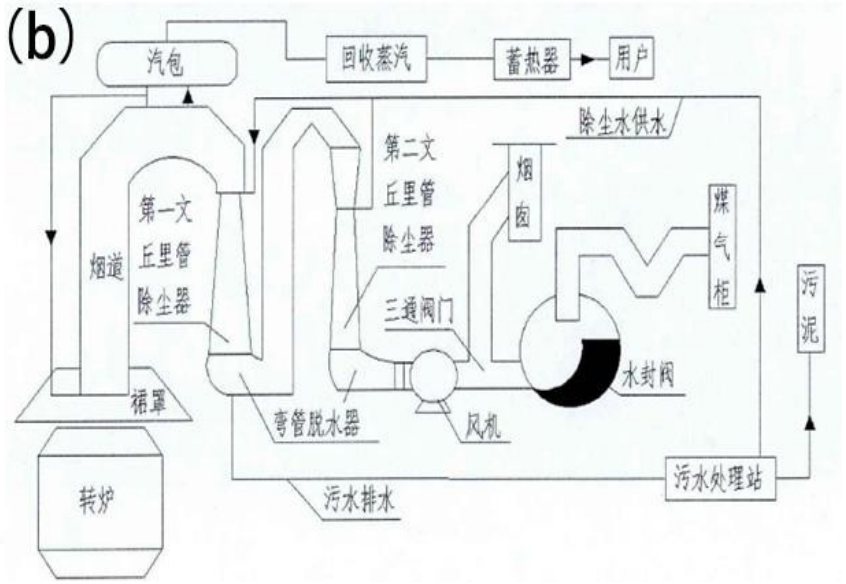
1-危废料仓；2-混料设备；3-物料输送皮带；4-型煤输送；5-现场气体环境监测；6-炼焦炉

炼钢转炉工艺



反应区：
Ⅰ 一次氧化区：
氧射流的冲击面积
Ⅱ二次氧化区：
渣+铁液滴+气体乳浊液
Ⅲ[O]饱和熔体渗透到熔池外围的氧化





中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

炼钢转炉协同处置废物案例

废物	废弃铁质包装桶（倒残未清洗），3万吨/年
转炉	上海宝钢股份，3个250吨转炉,3个300吨转炉







煤气化

- 固定床气化炉
  - UGI炉、Lurgi炉和BGL炉等
- 流化床气化炉
- 气流床气化炉
  - 常压气流床粉煤气化、粉煤加压气化、水煤浆加压气化（Texaco、Destec（E-Gas）、多喷嘴对置式、多元料浆以及清华炉）。

煤气化

国外

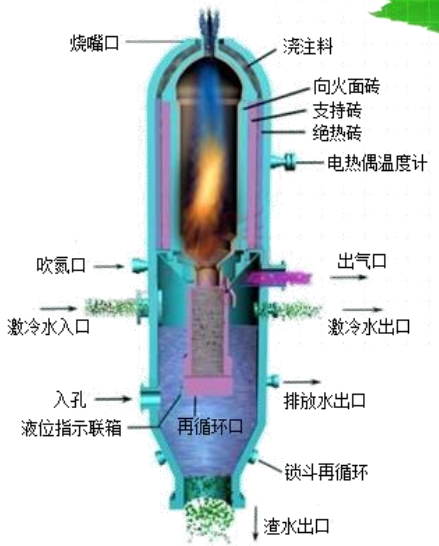
- 美国大平原煤气工程采用加压鲁奇炉协同处置焦油和废水
- 西班牙某电厂采用加压气流床气化炉协同处置橄榄壳（2%）和葡萄籽粉（4%）
- 南美供热企业利用常压鼓泡流化床气化炉协同处置棕榈仁壳

我国

- 试验项目
  - 中国石化九江分公司Shell气化炉协同处置脱油沥青、新疆环境保护科学研究院利用鲁奇炉协同处置污水处理污泥
  - 神华集团陕西神木化学工业有限公司利用德士古水煤浆气化炉协同处置煤液化油渣
  - 山东晋煤日月化工有限公司利用水煤浆气化炉协同处置精馏残夜、废催化剂、焦油、废活性炭
- 工程项目
  - 浙江凤登环保股份有限公司及其子公司利用多元料浆水煤浆气化炉协同处置多种固废
  - 江苏索普利用多喷嘴对置水煤浆气化炉协同处置多种固废（建设中）

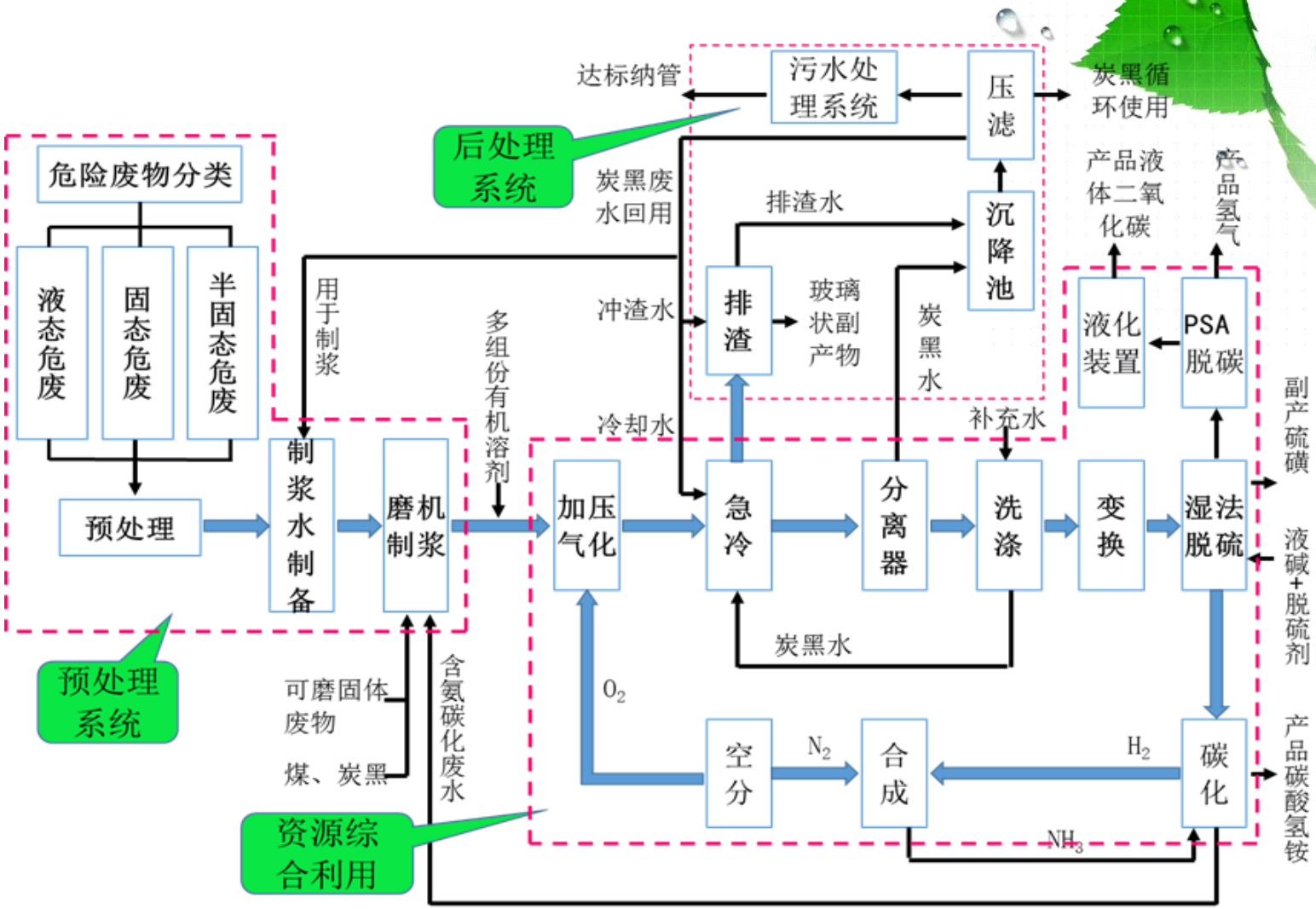
水煤浆气化炉协同处置原理

- **气化炉内热工参数**
  - 温度：1300℃以上
  - 气固相停留时间：6-10s
  - 气氛：喷嘴附近氧化性，其他部位还原性
  - 压力：1.3MPa
- **主要反应**
  - $C_mH_nS_r+m/2O_2=mCO+(n/2-r)H_2+rH_2S$
  - $CO+H_2O=H_2+CO_2$



- **固体废物在气化炉内的物理化学反应**
  - 固体废物就是C、H、O、N、S、Si、Al、Ca、Na、K、Cl、F等常量元素及重金属等微量元素组成的化合物，气化可以回收C、H元素并制取合成气
  - 有机组分彻底分解为CO、H_2和CO_2，并回收其中的热能
  - 重金属固化于玻璃态炉渣中
  - Cl、S、N等元素主要转变为HCl、H_2S和N_2
  - 纯氧助燃、急冷和净化工艺，无NOx生成、二噁英少、其他常规污染物排放少。

水煤浆气化炉协同处置工艺



中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

水煤浆气化炉协同处置案例

- **浙江凤登环保股份有限公司**
  - 水煤浆气化炉规模：4万吨/年合成氨
  - 协同处置处置危险废物规模：8.64万吨/年
- **绍兴化工有限公司**
  - 水煤浆气化炉规模：5万吨/年合成氨
  - 协同处置危险废物规模：10万吨/年
- **宁波四明化工**
  - 水煤浆气化炉规模： 12万吨/年合成氨
  - 协同处置危险废物规模：4万吨/年





其他建材窑炉

国外：以有机固废为主

- 石灰窑：石油焦、木材生物质、热解油、甘油三油酸酯等，主要是作为替代燃料使用

国内：以无机固废为主

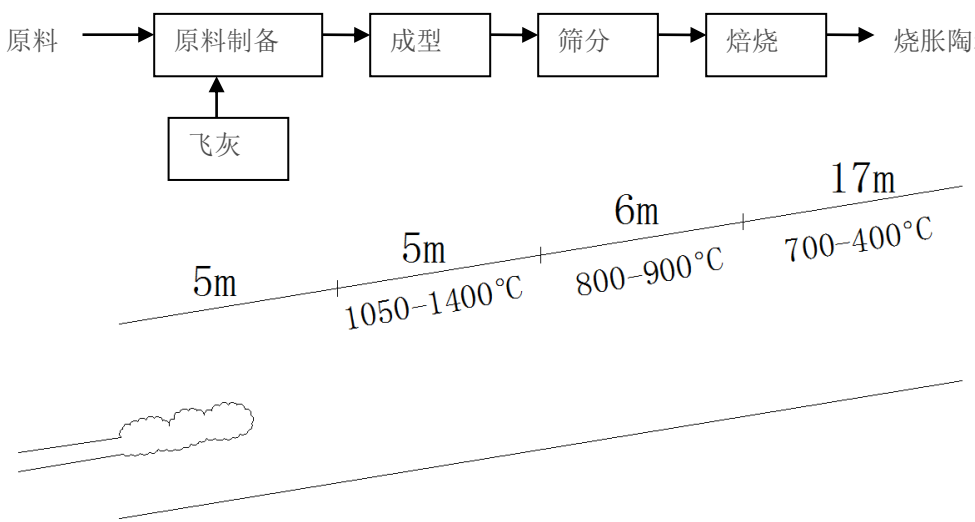
- 陶粒窑：工业污泥、生活垃圾焚烧飞灰
  - 国内三个项目取得危险废物经验许可证
  - 非法处置有机污染土壤
- 烧结砖窑：生活污泥、工业污泥、重金属污染土壤
  - 协同处置垃圾焚烧飞灰项目前期准备中，但被《生活垃圾焚烧飞灰污染控制技术规范》禁止
  - 非法处置油基岩屑

陶粒

主要工艺











回转窑区域	气相温度 /°C	固相温度 /°C	固相停留时间 /min	各段窑长（以33m窑为例）
预热段	400-800	常温-600	20-25	17m
	800-1100	600-1050		6m
膨胀段	1100-1350	1050-1250	10-15	5m
冷却段	常温-1100	300-1050	5	5m

中国环境科学研究院 CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

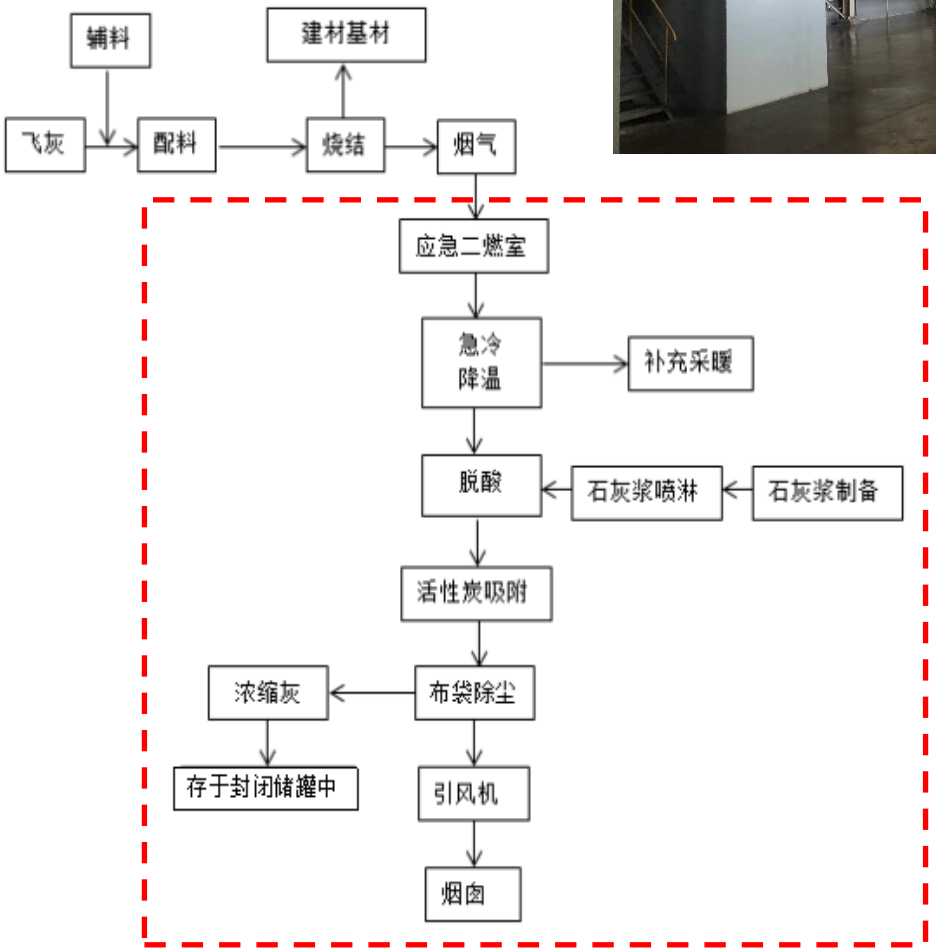
烧结建材基材







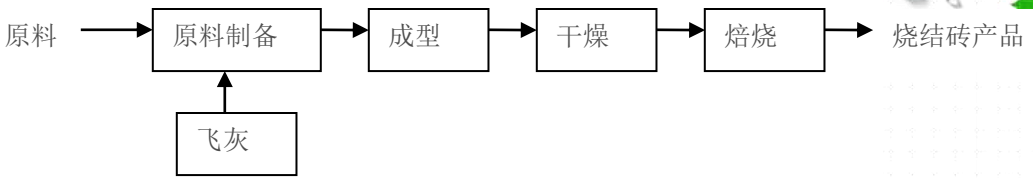




中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

烧结砖

主要工艺



砖窑区域		砖坯温度	砖坯停留时间
预热段		常温－400℃	8h-12h
焙烧段	加热段	400℃－900℃	7h-8h
	烧成段	900℃－最高烧成温度（950-1100℃）	1h-2h
保温段		最高烧成温度－900℃	2h-4h
冷却段		900℃－出窑温度（80-120℃）	8h-10h







其他

其他可能协同处置危险废物的工业窑炉（美国EPA,1984）

工业	炉型或工艺
炭黑	油炉
铜冶炼	反射炉
铅冶炼	高炉
锌冶炼	多床培烧炉 悬浮培烧炉 流化床培烧炉
钢铁冶炼	平炉
石灰	长回转窑 带预热器的短回转窑

我国协同处置固体废物相关政策（近3年）

部 门	文件名称	主要相关内容
国务院	《"十三五"生态环境保护规划》（2016年12月5日）	**"引导和规范水泥窑协同处置危险废物"**
国家发改委等14部委	**《循环发展引领行动》（2017年4月21日）**	"因地制宜推进水泥行业利用现有水泥窑协同处理危险废物、污泥、生活垃圾"，"因地制宜推进火电厂协同处置污水处理厂污泥，推进钢铁企业消纳铬渣等危险废物"
国家发改委等7部委	**《关于促进生产过程协同处置城市及产业废弃物的意见》（2014年5月）**	"在水泥、电力、钢铁等行业培育一批协同处理废弃物的示范企业，在有废弃物处理需求的城市建成60个左右协同处置废弃物示范项目，引导相关科研机构研发适合国情的成套技术装备，建立健全针对不同固体废弃物协同处理的技术规范和标准体系"
国家能源局	**《关于开展燃煤耦合生物质发电技改试点工作的通知》（2017年11月）**	确定了84家试点单位，其中81个试点单位协同处置的废物类别为农林生物质废物和生活污泥，另外2个试点单位协同处处置的废物类别为生活垃圾
环境保护部	《水泥窑协同处置固体废物污染防治技术政策》（2016年12月6日）	"水泥窑协同处置固体废物应作为城市固体废物处置的重要补充形式"，"本技术政策发布之后新建、改建或扩建处置危险废物的水泥企业，应选择单线设计熟料生产规模4000吨/日及以上水泥窑；新建、改建或扩建处置其他固体废物的水泥企业，应选择单线设计熟料生产规模3000吨/日及以上水泥窑"
工信部和环境保护部	《关于进一步做好水泥错峰生产的通知》（2016年10月25日）	"协同处置城市生活垃圾及有毒有害废弃物等任务的生产线原则上可以不进行错峰生产，但要适当降低水泥生产负荷"
工信部	《建材工业发展规划（2016-2020年）》（2016年9月28日）	"支持利用现有新型干法水泥窑协同处置生活垃圾、城市污泥、污染土壤和危险废物等"
工信部	《关于印发水泥企业电耗核算办法的通知》2016年9月2日	"采用水泥窑协同处置固体废物等消耗的电量应单独统计，不包含在水泥综合电耗范围内"
水泥协会	《水泥工业"十三五"发展规划》（2017年6月）	"支持利用现有新型干法水泥窑协同处置生活垃圾、城市污泥、污染土壤和危险废物"

我国协同处置固体废物相关政策（近3年）

部　门	文件名称	主要相关内容
河南省环境保护厅	《河南省危险废物集中处置设施建设布局规划指导意见（2019-2020年）》（2019年1月2日）	“在企业自愿的基础上，条件许可的企业可以依托已有水泥熟料生产线，建设危险废物协同处置项目。**禁止利用落后产能协同处置危险废物**”
江苏省人民政府	《江苏省环境基础设施三年建设方案（2018-2020年）》（2019年3月7日）	“水泥窑协同处置危险废物应满足《水泥窑协同处置固体废物污染防治技术政策》、《水泥窑协同处置固体废物环境保护技术规范》等相关要求，单线设计熟料生产规模**不低于4000吨/日**”
	《关于加强危险废物污染防治工作的意见》（2018年11月9日）	“**鼓励依托水泥窑企业、钢铁企业的现有工业窑炉协同处置危险废物和依托火电厂协同处置工业污泥等。**南京、无锡、徐州、常州、镇江等具备水泥窑协同处置条件的地区必须建设水泥窑协同处置设施”
重庆市生态环境局	《重庆市危险废物集中处置设施建设布局规划（2018-2022年》（2018年11月15日）	“鼓励渝西、渝东北片区择优建设水泥窑协同处置危险废物项目，作为区域危险废物集中处置的有效补充，禁止利用落后水泥窑产能协同处置危险废物”，“水泥窑协同处置设施应利用现有新型干法水泥窑，单线设计熟料生产规模**4000吨/日及以上**”，“鼓励水泥窑协同处置项目发展水泥生产企业和危险废物预处理中心分散联合经营模式，减少水泥窑协同处置过程环境风险”
新疆维吾尔族自治区人民政府	《自治区危险废物处置利用设施建设布局指导意见》（2018年9月20日）	“因地制宜推进水泥窑协同处置危险废物，作为区域危险废物处置能力的有效补充。已有水泥窑处置能力且满足协同处置区域内当前及中远期危险废物处置需求的，该区域原则上不再新、改、扩建综合类危险废物处置项目中的焚烧处置项目。区域内已有综合性危险废物集中处置设施的，原则上不再批准开展水泥窑协同处置危险废物项目建设。**禁止利用落后产能协同处置危险废物**”
辽宁省环境保护厅	《关于开展水泥窑协同处置危险废物试点工作的通知》（2018年7月2日）	“在大连、鞍山、本溪、辽阳、铁岭5市开展水泥窑协同处置危险废物试点，各建设1个水泥窑协同处置危险废物项目”，“试点期间，水泥窑协同处置危险废物应满足单线设计熟料生产规模**不低于4000吨/日**”
辽宁省环境保护厅	《辽宁省“十三五”危险废物污染防治规划》（2018年2月）	“本着有效补充、积极引导原则，引导和规范水泥窑协同处置危险废物，按区域布局，形成对专业化焚烧设施的有效补充，并为突发情况下危险废物处置提供支撑，研究探索水泥窑协同处置的管理模式和监管方法”
海南省人民政府办公厅	《海南省人民政府办公厅关于加强危险废物污染防治工作的意见》（2018年5月6日）	“鼓励水泥生产企业利用现有水泥窑协同处置城市生活垃圾、污水处理厂污泥、生活垃圾焚烧飞灰和工业危险废物，开展水泥窑协同处置生活垃圾焚烧飞灰示范研究，到2022年，水泥窑协同处置危险废物能力达到3万吨/年”
广东省环境保护厅	《广东省环境保护厅关于固体废物污染防治三年行动计划（2018-2020年）》（2018年4月27日）	“以江门、惠州、韶关等市为重点，加快建设一批水泥窑协同处置工业固体废物项目”
	《广东省关于加快推进危险废物处理设施建设工作的通知》（2020年8月）	“**各地级以上市要推进危险废物协同处置，利用钢铁企业的工业窑炉、火电厂锅炉等协同处置危险废物**”

我国协同处置固体废物相关政策（近3年）

部 门	文件名称	主要相关内容
陕西省环境保护厅	《陕西省危险废物处置利用设施建设规划（2018-2025年）》（2018年4月）	“鼓励水泥、电力行业因地制宜利用工业窑炉协同处置利用危险废物，作为区域危险废物处置的有效补充。依托在陕西的水泥生产基地，在现有水泥窑协同处置基础上，分梯次推进渭南、咸阳、汉中、宝鸡市等各水泥生产线设立危险废物协同处置系统”“水泥窑协同处置危险废物应满足单线设计熟料生产规模**不低于4000吨/日**”
山东省人民政府	《关于印发山东省打好危险废物治理攻坚战作战方案（2018—2020年）的通知》（2018年8月2日）	“鼓励利用水泥窑协同处置危险废物”
湖南省环境保护厅	《湖南省重点固体废物环境管理“十三五”规划》（2017年11月28日）	“有序开展大中型新型干法水泥企业协同处置危险废物的试点工作”
广西壮族自治区人民政府	《关于加强全区危险废物处置利用设施建设的指导意见》（2017年11月20日）	“鼓励在南宁、百色、贺州、崇左等市择优建设水泥窑协同处置危险废物项目，提升我区危险废物无害化处置兜底保障能力，力求无害化处置能力与需求量基本匹配，并形成竞争机制”
山东省环境保护厅	《山东省“十三五”危险废物处置设施建设规划》（2017年9月27日）	“鼓励利用水泥窑协同处置危险废物”
四川省环境保护厅	《四川省危险废物集中处置设施建设规划（2017-2022年）》（2017年9月26日	“因地制宜推进水泥行业利用现有水泥窑协同处理危险废物，作为区域危险废物处置的有效补充，以德阳市、内江市、自贡市、绵阳市、广元市、达州市、泸州市为重点，开展协同处置试点。**禁止利用落后产能协同处置危险废物”**
安徽省环境保护厅	《安徽省“十三五”危险废物污染防治规划（2017年7月）	“因地制宜推进水泥行业利用现有水泥窑协同处理污水处理厂污泥、生活垃圾、危险废物等固体废物”
福建省环境保护厅	《福建省“十三五”危险废物污染防治规划》（2016年12月）	“鼓励利用水泥回转窑等工业窑炉协同处置危险废物和工业污泥”，“十三五期间，三明、龙岩、泉州、南平4个市重点推进水泥企业协同处置垃圾焚烧发电飞灰和工业危险废物项目”，“符合条件的水泥生产企业新建协同处置危险废物项目，享受省级技术改造财政补贴待遇”，**“采取‘以奖代补’的方式，支持设区市人民政府提升危险废物处置能力，**重点扶持危险废物综合处置设施及填埋场项目、水泥窑协同处置危险废物项目”
河北省环境保护厅	《河北省“十三五”利用处置危险废物污染防治规划》（2016年8月）	“作为危险废物处置设施的有益补充，引导地方开展水泥窑协同处置试点工作。选择基础条件好的水泥生产企业，**优先考虑熟料生产规模5000吨/日**以上新型干法窑生产线开展试点工作”
云南省环境保护厅	《云南省危险废物利用处置规划（2016-2020年）》（2016年8月）	“鼓励在滇西建设危险废物集中处置设施，鼓励采用水泥回转窑等工业炉窑协同处置危险废物”
浙江省环境保护厅、浙江省发改委	《浙江省危险废物集中处置设施建设规划（2015-2020年）》（2015年11月20日）	“鼓励采用水泥回转窑等工业窑炉协同处置危险废物”

中国环境科学研究院 CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES

我国协同处置固体废物相关政策（近3年）

- 截至2018年底，全国总计**18**个省、市、自治区制订的“十三五”危险废物污染防治相关规划中提出了鼓励、推进或引导水泥窑协同处置危险废物。
- **福建省**明确提出符合条件的水泥生产企业新建协同处置危险废物项目享受省级技术改造财政补贴待遇，采取‘以奖代补’的方式支持水泥窑协同处置危险废物项目。
- **江苏省、重庆市、辽宁省、陕西省**明确提出将协同处置危险废物的水泥窑生产规模从2000吨/日提高到了4000吨/日，**河北省**提出优先考虑熟料生产规模5000吨/日以上水泥窑开展试点工作，**河南省、新疆自治区、四川省**明确提出了禁止利用落后产能协同处置危险废物。

工业窑炉协同处置标准



- **欧盟**
  - 水泥窑协同处置固体废物
  - 锅炉协同处置固体废物
  - 其他工业窑炉协同处置固体废物
- **美国**
  - 水泥窑协同处置危险废物
  - 固体燃料锅炉协同处置危险废物
  - 液体燃料锅炉协同处置危险废物
  - 轻骨料窑协同处置危险废物
  - 盐酸生产炉协同处置危险废物
- **我国**
  - 水泥窑协同处置固体废物标准体系已经建立
  - 其他工业窑炉协同处置固体废物标准空白

我国水泥窑协同处置固体废物相关标准

发布部门	标准名称	发布和实施时间
环境保护部	《水泥窑协同处置固体废物污染控制标准》(GB30485-2013)	2013年12月发布，2014年3月实施
	《水泥窑协同处置固体废物环境保护技术规范》（HJ662-2013）	2013年12月发布，2014年3月实施
	《水泥窑协同处置危险废物经营许可证审查指南》	2017年6月发布和实施
住建部	《水泥工厂设计规范》（GB50295-2008）	2008年9月发布，2009年1月实施
	《水泥窑协同处置工业废物设计规范》(GB50634-2010)	2010年11月发布，2011年10月实施
	《水泥窑协同处置污泥工程设计规范》(GB50757-2012)	2012年3月发布，2012年8月设施
	《水泥窑协同处置垃圾工程设计规范》(GB50954-2014)	2014年1月发布，2014年8月实施
水泥标准委员会	《水泥窑协同处置固体废物技术规范》(GB/T30760-2014)	2014年6月发布，2015年4月实施

我国工业窑炉协同处置废物标准

国家层面

- **《燃煤锅炉协同处置固体废物污染控制标准》（生态环境部已立项，2021-2023）**
- **《水煤气气化炉协同处置固体废物环境保护技术规范》（生态环境部已立项编制研究）**
- **《转炉协同处置固体废物污染控制技术规范》（已列入环境部2022年编制研究计划）**
- **《固体废物生产轻质骨料污染控制标准》（列入环境部优先编制标准目录）**
- 《固体废物有色冶炼窑炉协同处置污染控制标准》（列入环境部标准编制规划）
- 《固体废物钢铁冶炼窑炉协同处置污染控制标准》（列入环境部标准编制规划）
- 《固体废物生产墙体材料污染控制标准》（列入环境部标准编制规划）
- 《固体废物生产路用材料污染控制标准》（列入环境部标准编制规划）

地方层面

- 《油田含油污泥流化床焚烧处置工程技术规范（试行）》（DB37/T 2670-2015）（山东地标，已发布）
- 《陶粒窑处置生活垃圾焚烧飞灰技术规范》（DB12/T XX-XXXX）（天津地标，在编）

主要政策障碍

- 属于利用还是处置
  - 固体法：处置
  - 《巴塞尔公约》：利用
  - 《固体废物再生利用污染防治技术导则》（HJ1091-2020）：再生利用
  - 发改委等部位联合发文：协同资源化处理
- 产生的次生固废（如粉煤灰、炉渣和脱硫副产物）的鉴别
  - 粉煤灰、炉渣和脱硫副产物日产生量巨大，鉴别期间难以贮存
  - 锅炉所用煤种常变、废物特性不稳定、废物配伍比例不固定，难以对次生固废进行鉴别
- 应对建议
  - 将标准名称改为《xxx炉协同资源化处理固体废物污染控制标准》，在标准中规定有害元素入窑炉限值和次生固废污染物控制限值，企业自建和监督性抽检结合，满足该限值后次生固废即可按一般固废进行管理。

工业窑炉协同处置定位和发展趋势

- **定位**
  - 适合产废企业处置自有废物和“点对点”定向利用
  - 传统处置设施的补充
    - 处置类别受限
    - 处置地点受限
    - 处置时间受限
    - 专业人员不足
- **十四五期间发展趋势**
  - 水泥窑协同处置新增项目趋缓，提升运营管理水平是趋势
  - 锅炉协同处置快速发展，政府需做好规划、甄别，避免一哄而上
  - 水煤浆气化炉协同与其他工业窑炉协同处置相比具有技术互补优势
  - 建材和冶金行业工业窑炉协同处置不均衡点状发展



谢　　谢！

中国环境科学研究院
CHINESE RESEARCH ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SCIENCES