

国内外化工园区污泥无害化、资源化现状、技术、问题 and 研究课题



苍大强
北京科技大学
2025-11-8
杭州

主要内容

- 1, 前言
- 2, 化工工业园区及污泥特性
- 3, 污泥处置的基本方法
- 4, 国内外化工园区污泥处置技术、存在问题（研究课题）
- 5, 结论

固废定义：

人类在资源、能源开发、生产、加工、流通、消费以及生活等过程产生的**固态或泥浆状**的物质。

污泥也是固废。

固废类型：

《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》：固体废物分为**三类物质**：

- (1) 城市垃圾
- (2) 工业固体废物
- (3) 危险废物

固废处置原则：**“减量化、再利用、再循环” 3R原则。**

固废产品开发途径：

- 1) 大宗利用：陶粒、筑路、砂石、骨料、砖等。
- 2) 高附加值利用：提取有价元素、微晶玻璃、功能陶瓷、无机纤维、固废活化、固碳产品等。
- 3) 第三途径？

处置路线：

低温：胶凝材料、地聚物、压力成型材料等。

中温：中温提高产品性能等技术。

高温：陶瓷、微晶、岩棉等。

提取元素：火法、湿法

存在问题：固废利用已经实践了几十年了，获得了大量的经验和教训，需要深入分析和总结了，虽然开始建立理论和技术体系，但固废产品开发存在零散、重复、遗漏、浪费和不系统的研发活动。

- 化工园区通常会包含以下几大类工业行业

1) 石油炼制与乙烯裂解

- 化工园区的龙头，提供最基础的原料。主要产品：汽油、柴油等燃料；同时通过裂解装置生产乙烯、丙烯、丁二烯、苯、甲苯、二甲苯等。

2) 基础无机化工

- 生产“三酸两碱”等最基本的无机化学品：硫酸、硝酸、盐酸、烧碱、纯碱等。

3) 基础有机化工与高分子化工

- 利用石化龙头提供的原料，进行深度加工，合成聚合物（塑料、橡胶、纤维）的单体及中间体。主要产品：聚氯乙烯、聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯、ABS、合成橡胶等。

- 有机中间体：环氧乙烷、环氧丙烷、乙二醇、对苯二甲酸等。

• 4. 精细与专用化学品

- 产品附加值高、品种多、批量小，是化工园区升级的方向。

- 主要产品：

- 农药原药及制剂：除草剂、杀虫剂、杀菌剂。
- 染料和颜料：用于纺织、涂料、塑料着色。
- 涂料和油墨：工业涂料、建筑涂料、印刷油墨。
- 胶粘剂：各种工业用和民用胶水。
- 表面活性剂：用于日化、纺织、油田等领域。
- 食品添加剂和饲料添加剂：维生素、防腐剂、氨基酸等。
- 电子化学品：用于半导体、显示面板制造的高纯试剂、光刻胶、高纯气体等。

- 5. 生物与医药化工

- 利用化学或生物发酵技术生产医药产品及其中间体。
 - 主要产品：医药原料药、医药中间体、发酵产品（如抗生素、维生素）等。
-

- 配套与支撑行业（循环经济组成）

- 围绕核心支柱产业布局，实现资源高效利用和“三废”集中处理。

- (1) 公用工程与环保产业

- 集中供热/供电：通常设有大型热电厂，为提供蒸汽、供暖和电力。
- 工业气体供应：氧气、氮气、氢气等。
- 污水处理厂：集中处理所有企业的工业废水。
- 危险废物处置中心：包括焚烧、安全填埋、物化处理等设施，处理园区的危险废物（包括前面提到的化工污泥）。

- (2) 下游加工与材料行业

- - **塑料加工**：利用园区生产的合成树脂，加工成塑料薄膜、管材、型材等。
 - **化纤纺织**：利用园区生产的合成纤维（如涤纶、锦纶、腈纶）进行纺丝和织造。
 - **橡胶制品**：生产轮胎、输送带、密封件等。

- (3) 仓储与物流行业

- - 码头和港口：便于原材料和产品的运输。
 - 罐区和仓储设施：储存各类液体和气体化学品。
 - 专业的化学品物流公司：负责园区危险化学品运输。

- 现代化工园区的发展趋势：延伸产业链
- 为了提升附加价值和节能环保水平，现代化工园区正积极向产业链下游延伸，引入以下高端产业：
 - 新能源汽车与锂电池材料：生产正极材料、负极材料、电解液、隔膜等。
 - 高性能材料：如碳纤维、工程塑料、高性能膜材料、可降解塑料等。
 - 生命科学与医疗器械：依托医药化工基础，发展制剂生产、医疗器械制造。
 - 电子化学品与半导体材料：服务于快速发展的电子信息产业。

- 小 结

- 一个现代化化工园区是一个复杂的产业生态系统：

- 通常以“炼化一体化”为源头，向上中下游延伸，形成产业链：例如：从原油 → 基础化学品 → 精细化学品/新材料 → 终端制品的完整产业链，并配套以高效的公用工程和环保基础设施，最终实现资源、能源的梯级利用和污染的集中控制。

- 这种集群化发展模式，不仅降低了物流和生产成本，也为实现我们之前讨论的污泥等废弃物的集中、专业化和资源化处理提供了先决条件。

- 化工污泥的成分与特点:
- 化工污泥是污水处理过程中产生的沉淀物，与市政污泥有本质区别:
- 1. 成分复杂
 - 水分: 通常占95%以上，包括间隙水、毛细水、吸附水和内部水，脱水困难。
 - 有机质: 成分复杂，可能包括难降解的有机毒物，如酚类、苯系物、多环芳烃、卤代烃、持久性有机污染物等。
 - 重金属: 是化工污泥中最常见且危害最大的污染物之一，如汞、铬、镉、铅、砷、锌、镍、铜等。
 - 盐分: 部分化工行业（如农药、染料）污泥中含盐量很高，影响后续生物处理和土地资源化利用。
 - 营养元素: 如氮、磷等，但比例通常失衡，且因有毒物质存在，其营养价值被抑制。
 - 病原微生物: 由于部分化工废水生化性差或含有杀菌物质，病原体数量可能少于市政污泥，但仍可能存在。

- 2. 物理与处理特性
 - 颗粒细小，持水性强：污泥由胶体微粒和悬浮物组成，形成稳定的胶状结构，导致脱水极其困难。
 - 持水性强：常规脱水后含水率仍高达75%-85%。
 - 易腐败，恶臭：含有大量有机物，在贮存和运输过程中易发酵，产生硫化氢、氨气等恶臭气体。
 - 不稳定：性质随生产原料、工艺、季节变化波动大，给处理处置带来很大不确定性。

污泥中有两种：

(1) 一般固废（无害固废）

(2) 危废

危险废弃物定义：

被列入国家危险废物名录或根据国家规定的危险废物鉴别标准和鉴别方法认定的具有危险特性的废物。

通常危废量占固废总量6-7%，数量虽小，但危害大。

危险特性：腐蚀性、毒性、易燃性、反应性、感染性。

上述危害具有潜在性、长期性和灾难性。

- 化工污泥的**危险废弃物**判定
- 决定污泥“命运”最关键的一步。在中国，判断是否危废，主要依据《国家危险废物名录》（2021年版）以及《危险废物鉴别标准》。
- **第一步：对照《国家危险废物名录》**
- 最直接、最常用的方法：名录中是否明确列出了？
- 与化工污泥相关的典型危废包括：
 - **HW06 有机溶剂废物**：来自有机溶剂的回收、处理过程。
 - **HW11 精（蒸）馏残渣**：来自化工行业的精馏、热解过程。
 - **HW12 染料、涂料废物**：来自油墨、染料、颜料、油漆的生产。
 - **HW13 有机树脂类废物**：来自合成树脂、合成橡胶等生产过程。
 - **HW17 表面处理废物**：电镀、化学镀等过程产生的污泥和废液。
 - **HW18 焚烧处置残渣**：从危险废物焚烧炉产生的飞灰和底渣。
 - **HW45 含有机卤化物废物**：如含氟、氯、溴等有机物的生产过程中产生的废物。
- 如果污泥列入危废名录，即可判定为危险废物。

- 第二步：进行危险特性鉴别
- 如果名录中无法明确对应，则必须依据 GB 5085.1-7 《危险废物鉴别标准》进行检测和鉴别。危险特性包括：
 1. 腐蚀性鉴别：pH值 ≥ 12.5 或 ≤ 2.0 。
 2. 急性毒性鉴别：经口摄入、皮肤接触或吸入蒸气，可引起急性中毒。
 3. 浸出毒性鉴别：规定的浸出液中任何一种重金属（如铜、锌、铅、镉等）或有毒有机物的浓度超标。这是判断污泥是否危废的关键指标。
 4. 易燃性鉴别：闪点 $\leq 60^{\circ}\text{C}$ 的液体、气体或易自燃固体。
 5. 反应性鉴别：不稳定，易发生剧烈反应或与水、酸接触产生有毒气体。
 6. 毒性物质含量鉴别：废物中本身含有名录中列出的有毒物质（如多氯联苯、多环芳烃等）且含量超过标准限值。
- 只要具备上述一种或多种危险特性，即可判定为危废。

危废处理方法

第一要求：无害化

- 1) 固化填埋法（逐步禁止）
- 2) 烧结法固化（不完全无害化：玻璃相问题）
- 3) 高温熔融法（最彻底）USTB已经开发成功（浙江）。

第二要求：资源化

制备各种无害产品。

- 小 结：

- • 成分决定特性：污泥中是否含有重金属、有毒有机物、高腐蚀性酸碱、易燃溶剂等。
- • 来源与检测相结合：
- • 首先查名录：根据生产工艺和废物描述进行初步判断。
- • 名录不清则做鉴别：通过专业机构采样检测，对照《危险废物鉴别标准》进行判定。
- • “名录”优先原则：只要在名录中，无论检测结果如何（除非能证明其来源和成分确实不符），原则上都按危险废物管理。

化工园区的污染物成分

- 极其复杂，是多种有毒有害物质的“集合体”。其具体成分高度依赖于园区内的主导产业，但我们可以从环境介质（水、气、渣）和化学类别两个维度进行系统性的梳理。
- 特点：
 - 复杂性：成百上千种化学物质共存。
 - 毒性：大量致癌、致畸、致突变物质。
 - 累积性：即使低浓度，长期排放也可能在环境中累积。
 - 协同性：多种污染物同时存在可能产生“ $1+1>2$ ”的复合污染效应。

- 化工园区污染物的主要成分分类：

- 一、按环境介质分类

- 1. 水体污染物

- 化工园区最显著和受严格监管的污染物。

- • 无机污染物：

- • 重金属：如汞、铬、镉、铅、砷（类金属）、锌、镍、铜等。它们具有生物累积性，难以降解，对生物体和人体有剧毒。

- • 氰化物：高毒物质，来自电镀、金属加工等行业。

- • 氟化物：来自氟化工、磷肥生产等。

- • 氨氮：导致水体富营养化，消耗水中溶解氧。

- • 磷酸盐：同样导致富营养化。

- • 强酸、强碱：改变水体pH值，破坏水生生态系统。

- 1. 水体污染物
- 有机污染物
 - 挥发性有机物：如苯、甲苯、二甲苯、氯苯等。部分有“三致”作用，易挥发至大气。
 - 半挥发性有机物：如多环芳烃、邻苯二甲酸酯类。多环芳烃是强致癌物。
 - 持久性有机污染物：如多氯联苯、二噁英等。难以降解，能长距离迁移，并通过食物链富集，危害极大。
 - 石油类物质：形成油膜，隔绝氧气，危害水生生物。
 - 卤代有机物：如三氯甲烷、四氯化碳等，毒性强，难降解。
 - 新兴关注污染物：如全氟化合物、药品及个人护理品、内分泌干扰物等。

• 2. 大气污染物

- 化工园区是工业VOCs和恶臭气体的重要来源。

- **挥发性有机物**：是形成臭氧和细颗粒物 的重要前体物，本身也具有毒性和恶臭。

- **有毒及恶臭气体**：

- - 硫化氢：剧毒，有臭鸡蛋味。

- - 氨气：刺激性气味。

- - 氯气、氯化氢：强刺激性，形成酸雨。

- - 氟化氢：强腐蚀性和毒性。

- **颗粒物**

- - 总悬浮颗粒物：包括烟尘、粉尘。

- - 可吸入颗粒物：表面吸附有毒金属和有机物，危害更大。

- **温室气体**

- - CO₂：主要来自燃料燃烧和化工过程。

- - 甲烷、氧化亚氮：某些化工过程的副产品，温室效应极强

- 3. 固体废物污染物及特点

- 主要指污水处理产生的污泥、废催化剂、精馏残渣等。

- 富集的有毒物质：污泥中高度富集了水处理过程中转移来

- 的重金属和难降解有机污染物（见上文）。

- 高水分：导致处理处置难度大、成本高。

- 不确定性：成分随生产变化而波动。

按黄园区工业行业划分的典型污染物

- 主导行业 典型水体/大气污染物 典型固体废物：
- 石油炼制/乙烯：油类、硫化物、酚类、苯系物、 H_2S 、VOCs
废催化剂、含油污泥、酸渣、碱渣等。
- 农药/医药：高浓度有机废水、含卤有机物、氨氮、难降解有机物、VOCs 高毒性精馏残渣、反应釜残渣、废母液
- 染料/颜料 色度高、含重金属（如铬）、苯系物、芳香胺类 含重金属的废颜料、过滤残渣等。
- 电镀/金属加工：含氰废水、高浓度重金属（铬、镉、镍、铜等）、酸性废水 电镀污泥（重金属极高）、废酸、废碱氟化工 含氟废水、氟化氢、含氟有机物 含氟石膏、氟化钙污泥等。

- 小结：
- 化工园区污染物的核心在于其复杂性、毒性和累积性。环境治理面临的巨大挑战包括：
 1. 处理技术难度高：难降解有机物和重金属需要组合工艺才能有效去除。
 2. 二次污染风险：例如，焚烧处理VOCs可能产生二噁英；处理含氮废水可能产生温室气体 N_2O 。
 3. 监测与监管困难：污染物种类繁多，难以实现全面、实时的监测。
 4. 环境风险叠加：“水、气、渣”污染相互关联、迁移转化，形成复杂的复合污染局面。
- 化工园区的环境管理必须采取“源头削减、过程控制、末端治理、风险管控”的系统性思维，而理解其污染物的具体成分是这一切工作的基础和前提。

- 日本和欧洲化工园区污泥处理的技术、问题和发展趋势：
- 技术层面：
 - 日本、欧洲的路线差异很大：
 - 日本因为土地有限，焚烧比例极高；欧洲更强调资源回收：欧洲焚烧比例约45%，日本高达70%以上。国外认为高温处理是无害化的最好路线。
- 存在问题：
 - 技术研发和理论缺陷；欧洲法规虽严，但成本压力大。日本的污泥焚烧面临公众抵制。
- 发展趋势：
 - 欧洲的热解气化+磷回收，日本的AI节能焚烧。
- 典型案例：（1）荷兰 鹿特丹港 （2）日本北九州生态园

• 污泥处理技术:

• 分成（1）预处理、（2）核心处理、（3）资源化 三部分。

• 日本欧洲——预处理与脱水

• 高级脱水技术:

• 高压隔膜压滤机、带式压滤机应用广泛，常结合石灰/铁盐调理剂提高脱水效率（干固率 $>30\%$ ）。

• 热水解（THP）应用:

• 用于厌氧消化前处理（尤其在荷兰、德国），显著提升有机物降解

• 极致高效脱水:

• 广泛采用高效离心机、板框压滤机，追求高干固体含量（ $>40\%$ ）。

• 热干燥技术成熟:

• 流化床干燥、圆盘干燥等应用普遍，干燥后污泥热值高，利于后续能源利用。

- 多元化处置路线：

- **高温处理：焚烧（主流）：** 高比例焚烧：（约70%以上），小型设施也常见。

- 大型流化床焚烧炉为主（成熟度高），能量回收（热电联产），满足严格排放标准（如欧盟BAT/BREF）。

- **厌氧消化（重要）：**

- 大型集中式消化设施（通常与餐厨垃圾等协同消化），产生沼气用于供热/发电/提纯制车用燃料/注入天然气管网。

- **农业和土地修复（特定区域）：**

- 经严格处理后（如高级厌氧消化+深度脱水+巴氏杀菌/堆肥）在农业/土地修复中谨慎应用，受法规严格限制。

- **极致能量回收与灰渣利用：**

- 注重高效余热利用（发电/蒸汽）。

- **熔融技术处理飞灰：** 制备建材（如骨料）和提取元素应用较多。

- **土地利用极少：**

- 法规严格、公众接受度低，农业利用几乎停滞，少量用于绿地建材。

- 前沿探索活跃:
- 热解/气化:
 - 中试及示范项目增多（如荷兰、奥地利），旨在生产生物炭/合成气。
- 磷回收技术规模化:
 - 从焚烧灰渣（如Struvite结晶）中提取磷已进入商业化应用阶段（如德国、荷兰）。
- 化学回收/材料化:
 - 探索从污泥中提取纤维素、PHA等高值化学品。
- 追求高值化与节能:
- 灰渣高值利用深化:
 - 持续研发熔融渣制更高性能建材、提取金属等技术。
- 生物质利用探索:
 - 研究污泥制氢、藻类协同处理等方向。
- 过程智能化:
 - 应用AI优化焚烧/干燥等工艺参数，降低能耗。

- 日本欧洲面临的主要挑战

- 1) 经济性与成本：高昂的达标成本：

- 日益严格的排放标准（如POPs、重金属、微塑料）及安全处置要求显著增加投资与运营成本。

- 2) 资源化产品市场：

- 回收产物（如磷肥、生物炭）的市场接受度、认证体系、经济竞争力仍需培育。

- 3) 高额能源消耗：

- 依赖焚烧和热干燥导致高能耗，能源价格波动对运营成本冲击大。

- 4) 灰渣利用瓶颈：

- 建材市场需求、产品质量标准、公众对含灰渣建材接受度仍需突破。

- 5) 新兴技术成熟度:
 - 热解/气化等大规模工程应用仍需验证其经济性和稳定性。
- 6) 污染物限制:
 - 对PFAS、微塑料等新污染物监管严，现有技术处理难度大，尚无成熟解决方案。
- 7) 老旧设施更新:
 - 部分焚烧设施老化，升级改造以符合最新环保要求压力大。
- 8) 填埋空间枯竭:
 - 飞灰等残余物的安全处置（非熔融灰）仍依赖填埋，空间日益紧张。
- 9) 社会与环境接受度: 公众担忧：对焚烧排放、土地利用潜在风险（污染物残留）存在疑虑，邻避效应显著。

- “美国、韩国、澳大利亚和俄罗斯化工园区污泥处理技术、存在问题和发展趋势”

- 一、主流处理技术： 生物处理技术：

- 1) 好氧/厌氧工艺（活性污泥法、生物膜法、厌氧氨氧化）：
广泛用于有机物降解，其中厌氧技术在处理高浓度废水时具备低能耗优势。
- 2) 生物膜反应器（MBR）：在化工园区应用案例中，COD去除率可达95%，显著降低处理成本。

- 能源回收+新能源：

- 3) 污泥热解气化：如中国郑州案例将污泥转化为清洁能源，推动“污染治理-能源回收”闭环。
- 光伏+污水处理厂：结合可再生能源降低碳足迹（中研网）。
- 4) 智能化管理： AI优化与物联网监测：通过实时调整曝气参数降低能耗：长三角试点项目能耗减少约15%。
- 5) 数字孪生技术：实现工艺动态模拟，提升调度效率。

- 俄罗斯化工园区污泥处理技术
- 主流技术（如热解、厌氧消化）；2）现存问题（法规/设施等）；3）发展趋势（资源化/新技术）。（语言问题）

- 澳大利亚化工园区污泥处理技术、存在问题和发展趋势。

- 现状与挑战、发展趋势

- 主流技术

- ► 热解/焚烧（高温减量）、化学稳定化（重金属固化）

- ► 生物修复（低毒有机污泥）。

- 向"资源回收"转型：磷/金属提取、污泥制建材。

- 核心问题

- 处理成本高昂（\$400-800/吨）、跨州运输合规壁垒、干旱地区脱水困难。

- 澳大利亚：政策：

- 1) "就地处理"： 园区要配套处理设施。依据：

《国家工业化学品管理方案》(NICNAS)+各州《环境许可制度》

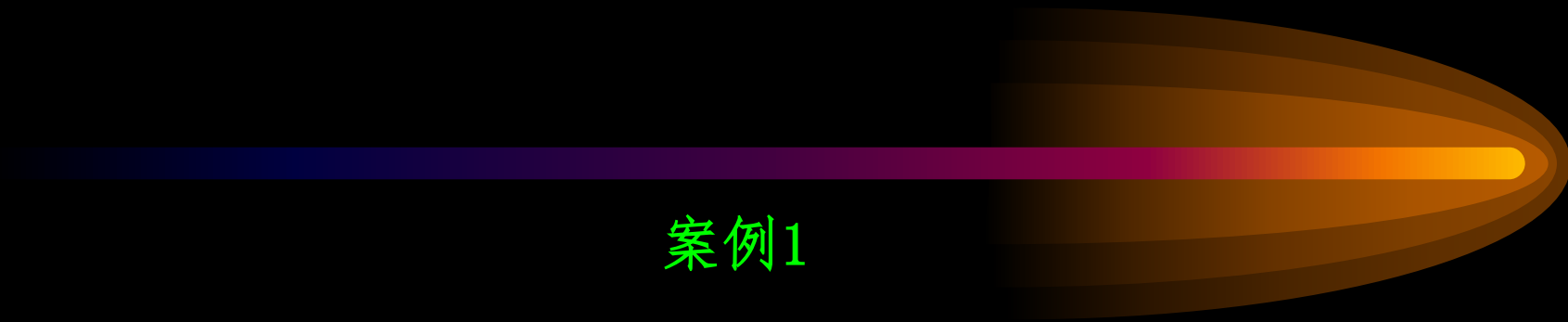
- 2) 2025年推行"污泥资源化证书"交易机制

- ➡ 是否聚焦特定州（如维多利亚州/昆士兰）？

- ➡ 是否有目标化工品类（如矿业污泥、有机化工厂）？

- 执行：按州检索EPA年报（示例：QLD工业废物数据）

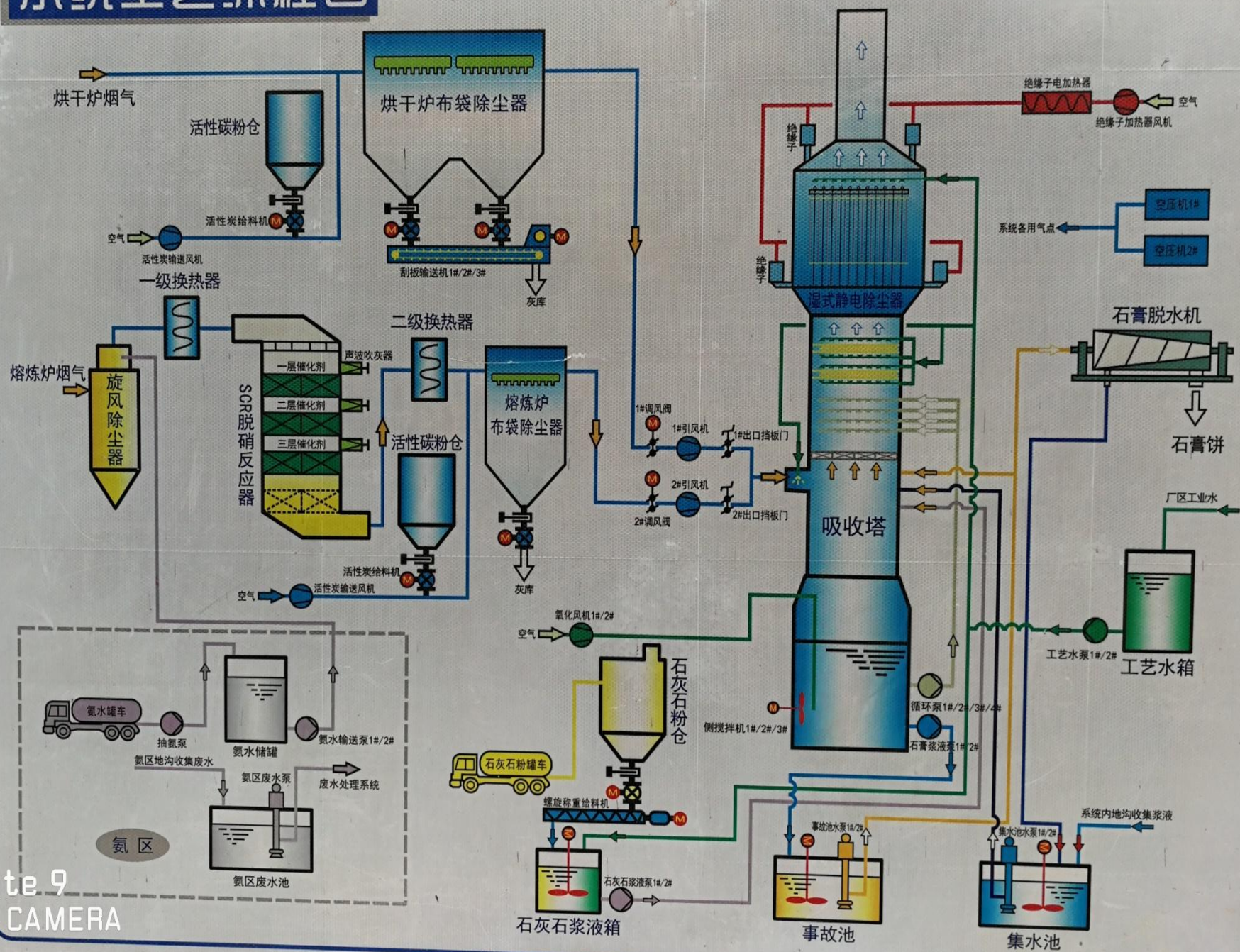
- ▶ 调取企业案例（如CSBP化学公司污泥处理方案）。



案例1

不锈钢酸洗先+电镀污泥（危废）处理和
产品制备案例
（天然气高温熔融炉）

系统工艺流程图

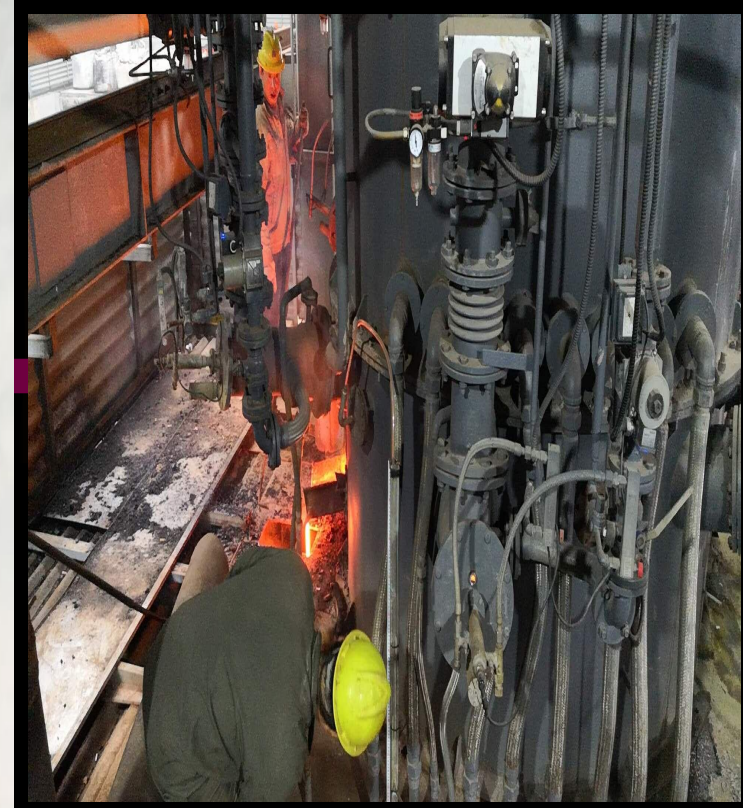


固废
危废
高温熔融
竖炉



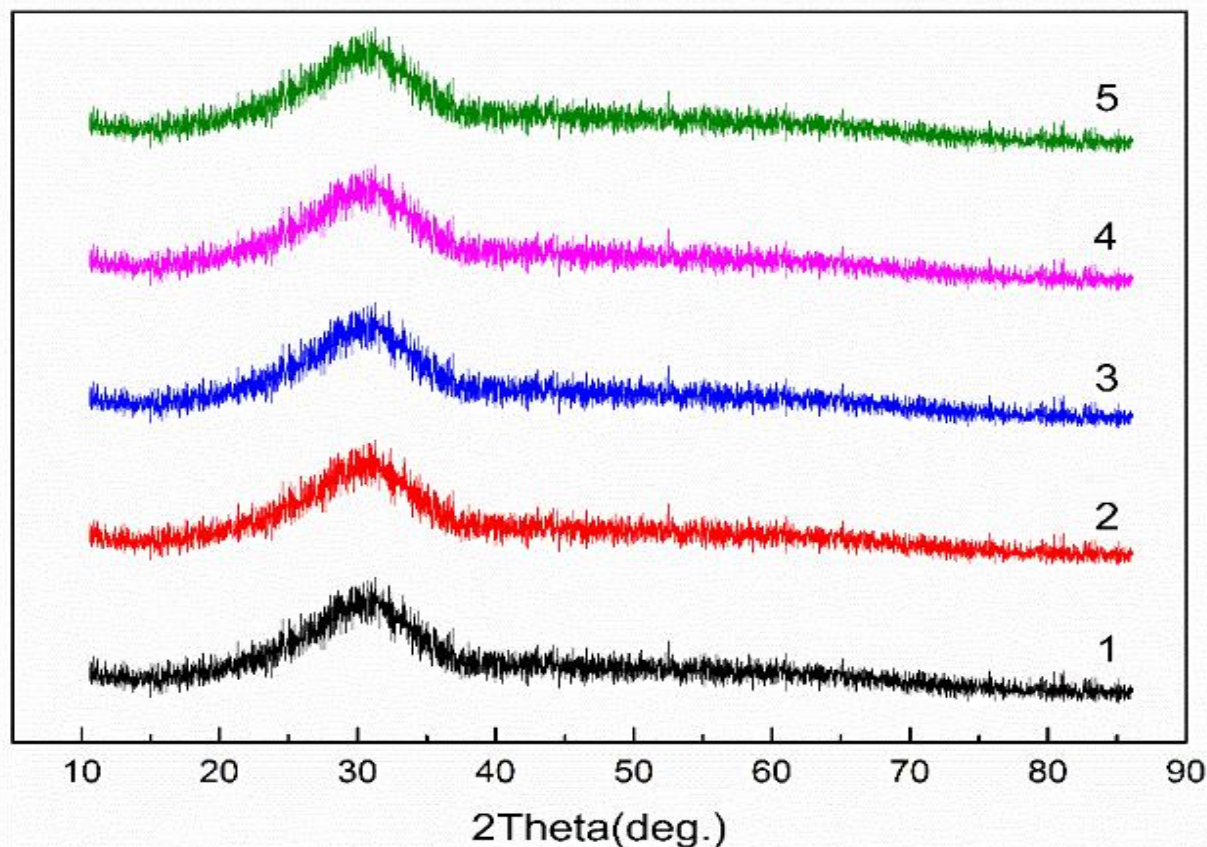


OO HUAWEI Mate 9
LEICA DUAL CAMERA





熔渣离开高速离心辊后，温度急剧降低，其冷却速度很高。纤维的XRD检测结果见下图。熔渣粘度和温度急降，抑制了析晶，纤维玻璃化程度高——实现危废的无害化。



纤维产品的XRD谱图



案例2

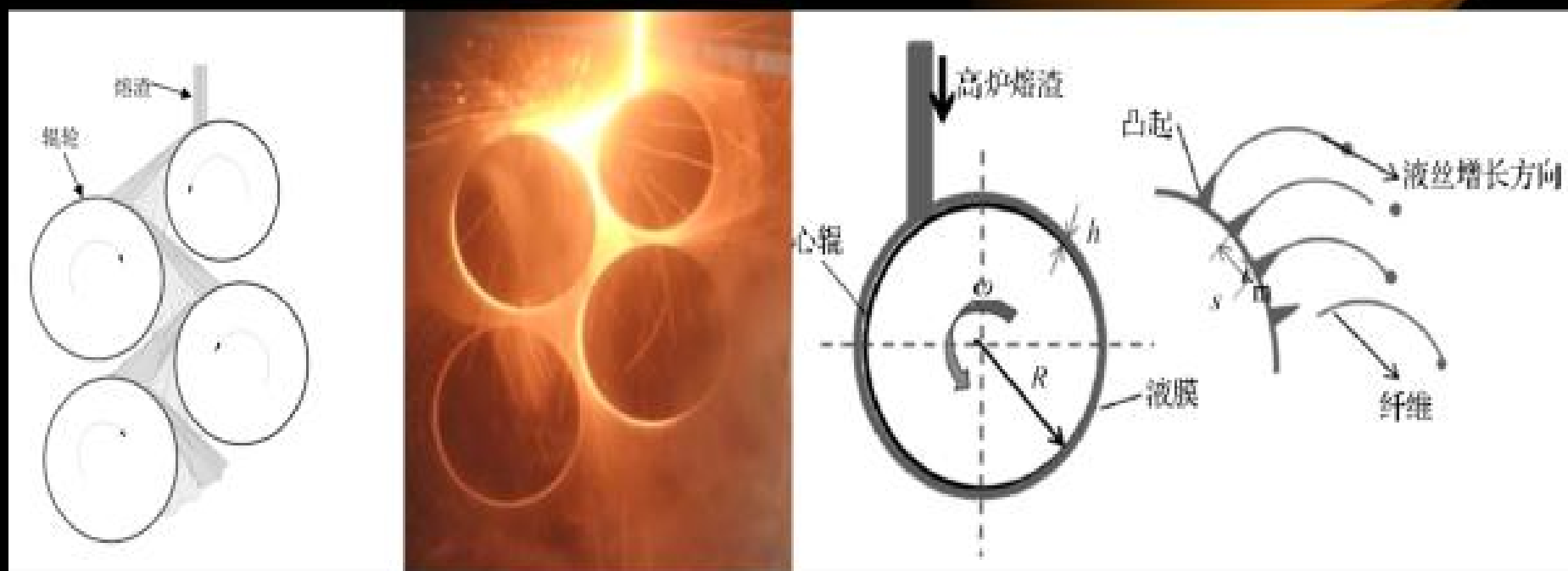
60% 赤泥+气化渣+粉煤灰+脱硫石膏+废石灰等

(电炉熔融炉)

复配成型后需要进熔炉进行燃烧，传统的熔炉是以焦炭作为燃料，但是会对环境产生一定影响，已经严重影响了行业的整体发展。为了适应国家关于支持新能源、新装备制造的方针政策，我公司研发了核心装备“天然气熔融炉”。该熔炉以天然气作为燃料，符合国家产业政策。



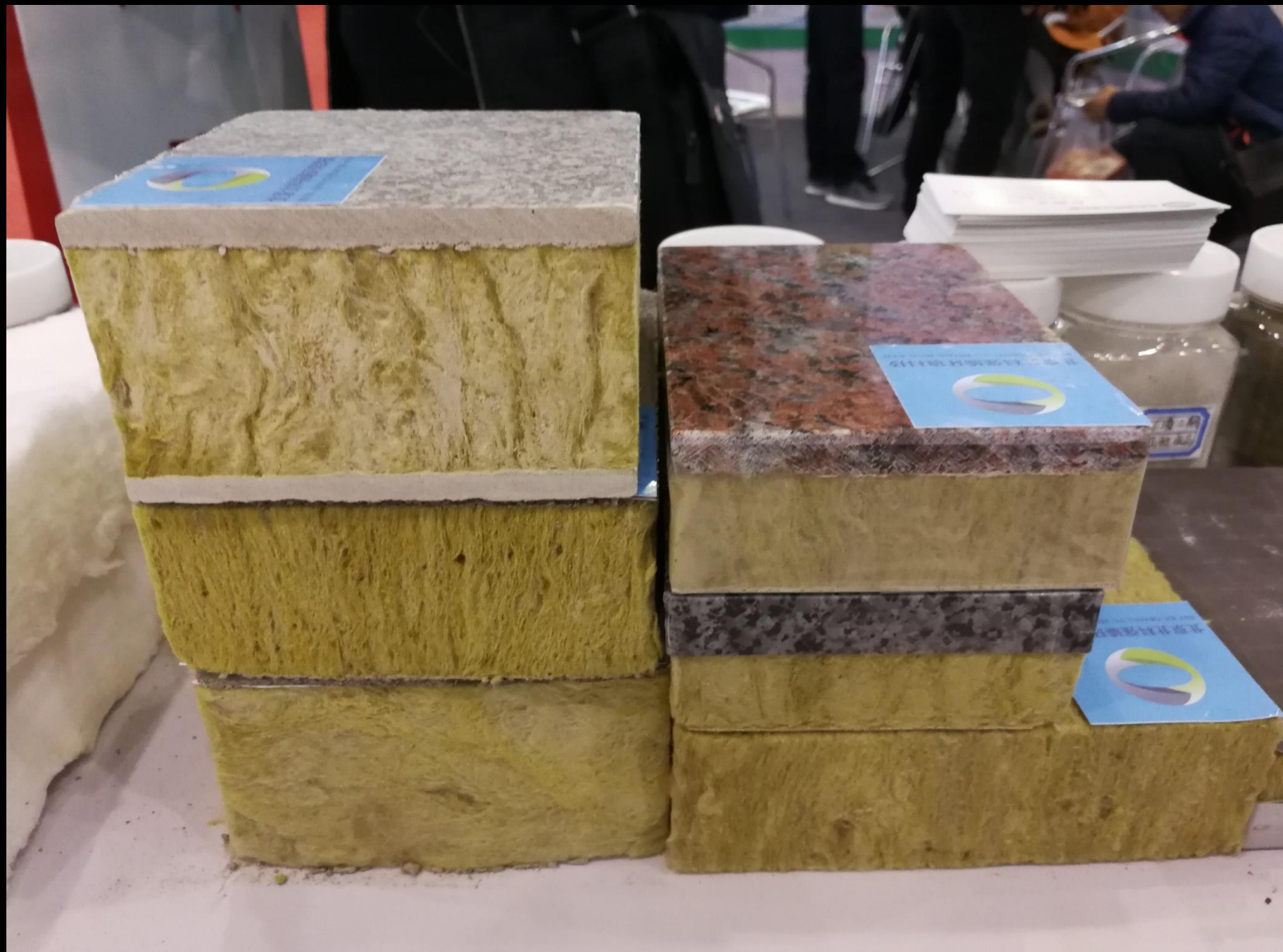
熔渣在离心辊表面形成液膜，随后由于表面张力的作用熔体细丝断裂成纤。离心成纤影响因素多。



高速离心成纤原理示意图



北京北科强瑜环境科技
BEI KE QIANG YU HUAN JING KE JI



- 降低原料的熔点--节能降本

- 1 原料1

•	原形	DT	ST	HT	FT
•	900	1343	1460	1495	1520

- 2 原料2

•	900	1388	1450	1490	1500
---	-----	------	------	------	------

- 3 原料3

•	900	1156	1186	1201	1286
---	-----	------	------	------	------

- 4 原料4

•	902	1264	1281	1306	1333
---	-----	------	------	------	------

- 5 原料5

•	902	1179	1196	1210	1236
---	-----	------	------	------	------

结 论

技术可行性判定:

- (1) 原理可行性
 - (2) 技术可行性
 - (3) 经济可行性
 - (4) 环境接受能力
- 实践结果是最好的证明。

科学节能\减排方法:

- 源头治理: 过程前处理——靠管理 (低投入)
- 过程治理: 过程中处理——靠技术 (中投入)
- 末端治理: 过程后处理——靠投入 (高投入)



谢谢！

苍大强