

涂装车间前处理废渣及物化污泥二次处理方案探讨

申 标, 王 明, 完颜成功, 张 辉, 陶 磊, 乔一行
(奇瑞汽车股份有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 随着我国生态文明建设的不断推进, 环境保护已成为制造业高质量发展的核心议题之一。而在汽车制造行业中, 涂装车间作为污染物产生较为集中的环节, 其产生的前处理废渣和物化污泥属于典型的危险废物, 若处置不当, 不仅会带来高昂的运营成本, 还可能引发严重的环境风险。为了更好地践行绿色工厂及落实国家及公司的环保政策, 针对涂装现有各类危废物处理方面, 笔者通过对标学习优秀企业生产运营成功案例, 重点围绕前处理废渣、物化污泥处理系统以及如何降低固废产生量及处理费用等方面展开论述。

关键词: 固废; 环保; 绿色工厂; 废渣; 物化污泥

中图分类号: TQ639 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2026)03-0065-04

Discussion on the Secondary Treatment Plan for Pre-treatment Waste and Physicochemical Sludge in the Painting Workshop

SHEN Biao, WANG Ming, WANYAN Cheng-gong, ZHANG Hui, TAO Lei, QIAO Yi-xing
(Chery Automobile Co., Ltd., Wuhu 241000, Anhui, China)

Abstract: With the continuous advancement of China's ecological civilization construction, environmental protection has become one of the core issues in the high-quality development of the manufacturing industry. In the automotive manufacturing sector, the painting workshop, as a key link with concentrated pollutant emissions, generates pre-treatment waste residues and physicochemical sludge, which are typical hazardous wastes. Improper disposal not only leads to high operational costs but also poses significant environmental risks. To better implement the concept of green factories and align with national and corporate environmental policies, this study examines the treatment of various hazardous wastes in painting processes by benchmarking successful production and operational cases from leading enterprises. The paper focuses on pre-treatment waste residue and physicochemical sludge treatment systems, as well as strategies to reduce solid waste generation and disposal costs.

Key words: solid waste; environment protection; green factory; waste residue; physicochemical sludge

0 引言

全球可持续发展与碳中和目标引领下, 汽车产业正经历关键转型升级。作为全球最大汽车产销国, 我国近年持续强化生态环保治理, 《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》《“十四五”生态环境保护规划》等

法规政策密集落地, 明确要求工业企业严控危险废物产生与排放强度, 全面推进资源循环利用。

在整车制造四大工艺中, 涂装工艺因其涉及大量化学药剂(如脱脂剂、磷化液、钝化剂等)的使用, 成为危废产生的主要来源之一。特别是在前处理阶段, 金属表面清洗过程中会产生大量的含重金属离子的废渣以及后续污水处理过程中形成的物化污泥, 这些物质通常被归类为 HW17 或 HW21 类危险废物, 需交由具备资质的专业单位进行无害化处置, 处理单价普遍在 3 000~5 000 元/t 之间, 且呈逐年上涨趋势。

收稿日期: 2024-07-29

作者简介: 申标(1982—), 男, 本科, 工程师, 主要从事涂装工艺设备开发、涂装新工厂规划等与涂装相关工作。E-mail: shenbiao2@mychery.com。

以年产 30 万辆规模的整车厂为例,仅前处理废渣和物化污泥两项危废年产量即可达数百吨,对应的年度处理费用高达数百万元。这不仅加重了企业的财务负担,也不符合现代企业追求精益管理和绿色发展的战略方向。

为此,越来越多的企业开始探索源头减量、过程控制、末端治理相结合的综合治理路径。其中,通过技术改造实现危废的就地减量化处理,已成为行业共识和发展趋势。例如,某车企重庆工厂早在十年前便引入了先进的低温干化系统,成功将污泥含水率由 80% 以上降至 15% 以下,危废重量减少近 80%,取得了显著的经济与社会效益。

1 涂装车间固废处理方式对比

目前,国内汽车涂装车间对前处理废渣和物化污泥的处理方式主要有以下 3 种,各具特点,适用于不同发展阶段和管理水平的企业。

1.1 传统接渣小车滤水

这是最原始也是成本最低的一种处理方式。其基本原理是在刮渣机出口处设置一个带滤网的小推车或收集槽,让湿态漆渣自然沥水。虽然结构简单、初期投入少(几乎无需额外设备投资),但存在诸多弊端。1)脱水效率极低:即使静置 24 h 以上,残留水分仍高达 75%~85%,远未达到减量目的;2)易孳生细菌、产生异味:高含水率导致有机物腐败,释放 H_2S 等恶臭气体,影响车间空气质量;3)运输与存储困难:湿渣流动性强,易泄漏,需专用容器密封运输,增加人工与物流成本;4)不符合环保监管趋势:多地生态环境部门已明令禁止高含水率危废出厂,要求企业自行预处理达标后再委托处置。

因此,该方法仅适用于产能较小或环保要求不高的过渡阶段,难以满足现代化绿色工厂的标准。

1.2 真空加热风干燥

该方法通过抽真空结合热风循环的方式加速水分蒸发,曾在部分企业得到应用。典型代表是重庆长安福特一工厂,其采用定制化的真空热风干燥设备已有近十年运行经验。据公开数据,该系统可将漆渣含水率降至约 60%,相比传统方法有一定改善,然而,其局限性同样明显。1)减量效果有限:仍保留较多水分,危废减重比例不足 50%;2)能耗较高:需持续供应热风 and 维持真空环境,电力和热能消耗大;3)设备复杂、维护成本高:真空泵、加热器、控制系统等部件多,故障率相对较高;4)投资较大:以 30 JPH 的生产线为例,整套系统投资预估在 120 万元左右,性价比不高。

综上所述,尽管较传统方式有所进步,但仍非最优

解决方案。

1.3 低温除湿干化

这是一种近年来兴起的先进干化技术,广泛应用于市政污泥、工业污泥等领域,在汽车行业也开始逐步普及。其核心技术在于利用热泵除湿+密闭循环空气的方式,在低温条件下(40~80℃)实现高效脱水。

该技术的最大优势在于:1)能将污泥含水率从 80% 降至 10%~15%,减重率达 80% 以上;2)全封闭运行,无废气外排,避免二次污染;3)运行温度低,杜绝火灾、爆炸、烫伤等安全隐患;4)自动化程度高,操作简便,适合连续化生产;5)设备寿命长(可达 15 年以上),综合运营成本低。

2 低温除湿干化

2.1 污泥处理全流程设计

为确保处理效果稳定可靠,低温除湿干化系统通常采用“两级脱水”工艺,即先机械压滤再热力干化,形成协同效应。

1) 工作特点

系统可调节性强,含水率在 10%~40% 之间可调;高度集成化、自控程度高、故障率低、稳定性高。

2) 工艺步骤

一级脱水——板框压滤机处理:原始污泥(含水率约 99%)首先进入板框压滤机;在高压作用下挤出自由水,使含水率降至 70% 左右;此阶段去除的是物理结合水,能耗低、速度快。

二级脱水——低温箱式干化机处理:将压滤后的泥饼切割成小块,均匀铺放在特制托盘中;托盘送入低温干化箱体内,高温低湿空气由下往上穿透物料层;水分被空气吸收后进入除湿热泵系统,冷却至露点以下凝结成水排出;干燥空气经再加热后重新送回干化室,实现闭环循环;经过 12~24 h 连续干燥,最终产物为含水率 $\leq 15\%$ 的干泥颗粒。

冷凝水处理:干化过程中产生的冷凝水含有微量 COD 和悬浮物,不能直接排放;应通过管道输送至厂区污水处理站进行集中处理,确保达标排放。该流程设计科学合理,兼顾了脱水效率与运行安全,特别适合处理黏性大、不易分散的涂装污泥。

2.2 干化系统

涂装车间污泥除湿干化原理是热风循环冷凝除湿烘干;控制系统包括除湿热泵系统、电气自控系统等。整个系统基于热泵热回收技术,能量利用率极高。每消耗 1 kW·h 电能,可蒸发 2~3 kg 水分,远高于传统热风干燥的能效比。

2.3 技术特点

1) 节能:运用热泵热回收技术,密闭运行;每 kW·

h 电能可除湿 2~3 kg 以上。

2)安全:75 ℃以下低温干化过程,非常适合污泥干化;系统运行安全,无爆炸隐患,无需充氮运行;粉尘浓度<60 g/m³;物料温度<60 ℃。最终处理完成状态是块状,没有粉尘危险;污泥处理后的温度低(<50 ℃),不需要降温,能储存。

3)环保:全封闭运行模式,无废气外溢;冷凝装置简单,节约处理成本。

4)稳定:采用巴斯德(巴氏)灭菌方法—低温加热杀菌,干化温度 70 ℃以上时间可达 90~20 min,可有效杀菌 90%以上。

5)智能:系统自动运行,污泥处理后的含水率可任意调节(10%~50%)。

6)节约:占地面积小。

7)耐用:采用不锈钢等耐腐材料、换热器采用电镀防腐处理,使用寿命长

8)变频调节:适合不同含水率(10%~40%)干料调节,适应性更强。

3 低温干化和传统干化对比

针对油漆污泥,高温除了带来燃爆的安全隐患外,会造成大量废气外排,造成环境污染。低温干化与传统热风干化的核心区别为空气循环和除湿方式不同,前者是干燥室与除湿系统间的闭式循环,后者为热源加热空气、吸湿空气直排的开式系统,能源利用率较低,见表 1。

表 1 低温干化和传统干化对比

项目	转筒式	转盘式	桨叶式	低温干化
干燥温度/℃	200~300	>150	>150	40~80
干燥方式	热对流 (直接)	热传导 (间接)	热传导 (间接)	热对流 (直接)
供热方式	热风、烟气	蒸气、导热油	蒸气、导热油	热泵
粉尘含量	高	低	较高	无
安全性	填充度高,运行温度高	运行温度高,充氮气	运行温度高	低温
废气处理系统	有	有	有	无
机械摩擦	大	大	大	无
使用寿命/a	3~5	5~7	3~5	15
热耗/ (kJ·(kg 水) ⁻¹)	3 400	2 800	2 800	无
电耗/(kW·h· (kg 水) ⁻¹)	0.07	0.05	0.04	0.25~0.30
折总能耗/(kW· h·(kg 水) ⁻¹)	1.01	0.83	0.82	0.25~0.30

虽然低温干化的单位电耗略高,但由于其能量循环利用、无辅助燃料消耗、无尾气处理能耗,整体综合

能耗仅为传统方式的 1/3~1/4,真正实现了“低能耗、高效率、零排放”。

1)环保性:低温干化运用闭式循环系统,无废气或者水蒸气排放,而传统干化(转筒式、转盘式、桨叶式)需要进行复杂的尾气处理,可能会对大气造成污染;低温箱式干化机冷凝出来的冷凝水通过管道回到污水处理站中二次处理,不造成二次污染。

2)安全性:干化污泥出料为颗粒状,无粉尘污染,不会产生尘爆危险,而传统干化(转筒式、转盘式、桨叶式)产生粉尘含量较高,散发到空气中达到一定浓度会有尘爆危险;低温箱式干化机运行温度低,无烫伤危险,而传统干化(转筒式、转盘式、桨叶式)干燥温度至少 150 ℃,会对操作人员造成安全隐患。

3)能源方面:低温干化机使用热泵作为供热源,只需耗电,无需其他能源,而传统干化(转筒式、转盘式、桨叶式)采用蒸气作为热源,需要专门接入蒸气。

4)耐用性:低温干化机采用耐腐蚀材料,使用寿命长;而传统干化(转筒式、转盘式、桨叶式)机械磨损较大,设备使用寿命大幅缩短。

4 设计选型

4.1 干化温度

依据 GB/T 23485—2009《城镇污水处理厂污泥处置—混合填埋用泥质》及相关行业规范要求,污泥干化的温度设定需综合考量安全性、有机物留存性、能耗情况等多方面因素。按温度区间可分为 150 ℃以下的低温干化与 150 ℃以上的高温干化,按热传递形式则可划分为直接热干化和间接热干化两类。

1)低温干化:低温干化可分为直接式与间接式两类,其中间接低温干化存在热利用率低、设备占地广的问题,因此在污泥处理领域的应用相对有限;直接低温干化通过热风直接接触污泥实现干化,不仅热效率更高,且较低的作业温度能避免污泥中有机物发生裂解与挥发,仅通过循环热风将污泥中的水分脱除。

2)高温干化:高温干化包含直接高温干化与间接高温干化两种形式。直接高温干化借助高温热媒与污泥直接接触,干化效率处于较高水平;但高温直接加热的方式易造成污泥中有机质裂解,不仅提升了尾气处理和热能回收的难度,也使得整体处理的能耗与各项运营成本偏高。

3)设备干化温度选用:利用低温干化技术,回风温度 40~55 ℃(上层);送风温度 60~75 ℃(下层),有效防止污泥干化过程导致的安全事故。

4.2 除臭及其他要求

1)为防止臭气外泄,采用密闭冷凝去水。

2)采用可调节定时控制模式,有利于调节出料的

含水率。

5 低温干化工艺成本分析

5.1 方案及工艺介绍

传统工艺：传统前处理废渣处理方法是在刮渣机的后端用可滤水的小车接渣滤出游离水，一般过滤后的渣含水率均在80%以上，如果在工厂储存放置2 d左右含水率还在75%以上。该方法设备投入小，但是不能实现废弃物的有效减量，在厂区内的堆放、运输和管理都比较困难。

低温干化工艺：含水率80%的污泥(或废渣)，经过压滤机处理后进入低温除湿干化机，放置于底部通风的料斗内部，速度较高的热干风由下向上将污泥接触，使污泥脱水干化，脱去的水蒸气进入除湿热系统，降低温度使其低于露点，水蒸气变成冷凝水排出系统，继续加热对脱水的空气进行升温，二次加热后的空气在系统中继续处理污泥，整个工艺过程中空气循环利用，密闭，无需外排尾气。

涂装前处理废渣及污泥低温除湿干化系统，使固废的含水量降至15%。

5.2 取得的收益计算

1) 能够使单车危废排放量降低，降低运营成本。

2) 每年为企业产生收益，也大幅提升了企业的环保形象和影响力。

3) 前处理废渣及物化污泥(含水率80%)费用计算见表2。

表2 前处理废渣及物化污泥(含水率80%)费用计算

名称	危险等级	单车产量/(kg·车 ⁻¹)	处理方式	处理费用/(元·t ⁻¹)	含水率/%	15万辆年处理费用/万元	30万辆年处理费用/万元
前处理废渣	毒性	0.95	委外处理	4 000	80	57	114
污水处理站物化污泥	毒性	2.20	委外处理	4 000	80	132	264

4) 前处理废渣及物化污泥(含水率15%)费用计算

单车产生的废渣及物化污泥量为： $(2.2+0.95) \times (1-0.8) \times (1+0.15) = 0.7245 \text{ kg}$ 。

年产15万辆前处理废渣及物化污泥处理费用为： $0.7245 \times 150\,000 / 1\,000 \times 4\,000 = 43.47$ 万元，节省固废处理费用为： $57 + 132 - 43.47 = 145.53$ 万元。

年产30万辆前处理废渣及物化污泥处理费用为： $0.7245 \times 300\,000 / 1\,000 \times 4\,000 = 86.94$ 万元，节省固废处理费用为： $114 + 264 - 86.94 = 291.06$ 万元。

5) 设备投入计算

按照年产15万辆，需要设备处理污泥能力为： $(2.2+0.95) \times 150\,000 / 1\,000 = 472.5 \text{ t}$ ，设备投入大约需要100万元。

按照年产30万辆，需要设备处理污泥能力为： $(2.2+0.95) \times 300\,000 / 1\,000 = 945 \text{ t}$ ，设备投入大约需要180万元，设备按照一步到位投资。

6) 运营费用计算

设备布置需要2.5 m宽、10 m长、4.5 m高的空间；运营成本每分离1 t水用电约300 kW·h，某地本地工业用电费用是0.52元/(kW·h)。

年产15万辆系统运营费用为： $(3.15 \times 150\,000 / 1\,000 - 0.7245 \times 150\,000 / 1\,000) \times 300 \times 0.52 = 5.6757$ 万元。

年产30万辆系统运营费用为： $(3.15 \times 300\,000 / 1\,000 - 0.7245 \times 300\,000 / 1\,000) \times 300 \times 0.52 = 11.3513$ 万元。

年产15万辆计算节省费用为： $145.53 - 5.6757 = 139.8543$ 万元。

年产30万辆计算节省费用为： $291.06 - 11.3513 = 279.7087$ 万元。

设备投资回收期为：年产15万辆 $180 / 139.8543 = 1.29$ 年，年产30万辆 $180 / 279.7087 = 0.64$ 年。

6 结语

综上所述，在涂装车间增设前处理废渣及物化污泥低温除湿干化系统，是一项兼具经济性、环保性、安全性与前瞻性的战略举措。它不仅能够帮助企业显著降低危废处理成本，减轻环保合规压力，更能全面提升企业的绿色制造能力和品牌影响力。该项目已在多家头部车企成功落地，技术成熟、运行稳定，具备良好的复制性和推广前景。

参考文献：

[1] 杨斌. 污泥干化减量化技术研究及应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2019(24): 182-183.
 [2] 刘金龙, 刘格宏, 武春雷, 等. 关于化工污泥脱水的研究[J]. 天津化工, 2023(2): 1-5.
 [3] 傅伟良, 张城镇, 张绪坤, 等. 污泥热泵低温干化技术优势与问题探讨[J]. 环境工程, 2024(2): 121-124.
 [4] 李晓熠, 谢亚男. 低温煤泥干燥工艺在东周窑选煤厂的应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2022(19): 145-147.
 [5] 余晓波, 陶磊, 张皖阳. 浅谈汽车涂装废水处理工艺[J]. 现代涂料与涂装, 2022(1): 69-72.
 [6] 张天林, 王刚, 蒋荣芳. 浅谈某涂装车间废水处理系统运行控制[J]. 现代涂料与涂装, 2014(8): 64-66.

(下转第72页)