

新型漆渣干化设备工艺可行性分析及应用案例研讨

苏卫东, 刘天兵, 夏耀峰

(浙江吉润汽车有限公司, 浙江 宁波 315010)

摘要: 本文研究了有效降低湿式喷涂工艺产生的漆渣含水率的方法, 从而降低该废弃物的排放量, 减少涂装过程的危废处理成本。通过文献查找当前机械脱水法的相关装置及其优缺点, 探讨新型烘干干化工艺用于漆渣脱水及采用蒸气冷凝水余热作为热源的可行性。涂装车间生产过程的蒸气冷凝水余热可满足漆渣的烘干热量需求, 经干化后的漆渣含水率在 10% 以下, 漆渣整体减量 50% 以上。烘干干化法可作为针对漆渣、污泥类固态危废产物非常有效的脱水工艺, 通过选用适宜的干化热源可有效降低危废处理成本。

关键词: 文丘里喷涂工艺; 漆渣; 污泥; 脱水; 干化; 工艺设备

中图分类号: TQ639 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2026)03-0031-05

Feasibility Analysis of New Sludge Drying Equipment Process and Application Case Study

SU Wei-dong, LIU Tian-bing, XIA Yao-feng

(Zhejiang Jirun Automobile Co., Ltd., Ningbo 315010, Zhejiang, China)

Abstract: The effective method of reducing the moisture content of paint sludge produced by wet spraying process is studied, so as to reduce the discharge of hazardous waste and reduce the treatment cost of hazardous waste in the coating process. The current mechanical dehydration methods and their advantages and disadvantages are reviewed. The feasibility of using new drying and curing processes to dehydrate paint sludge and the potential of using the waste heat of steam condensate as a heat source are discussed. The waste heat of steam condensate water in the production process of painting workshop can meet the heat demand of painting sludge drying. After drying, the water content of paint sludge was reduced to less than 10%, and the volume of paint sludge was reduced by more than 50%. For paint sludge, sludge and other solid hazardous waste products, drying and curing can be a very effective dehydration process. By selecting the appropriate heat source for drying, the cost of hazardous waste treatment can be effectively reduced.

Key words: venturi spray process; paint slag sludge; dewatering; drying; process equipment

0 引言

汽车涂装喷涂工艺过程中由于过喷漆雾的存在, 涂料无法完全吸附到车身表面成膜, 无法得到 100% 的使用。传统的空气喷枪涂料使用率不足 50%, 采取高压静电喷涂后涂料的使用率可达到 70% 以上。在汽车涂装行业中近些年干式喷漆室发展速度较快, 通过

石灰粉或纸盒拦截、过滤漆雾, 其中尤以纸盒式为主。传统的湿式水旋或文丘里喷漆室应用较早, 使用经验丰富, 目前仍占据一定地位。湿式喷涂工艺中产生的过喷漆雾随循环风飘落进入循环水中, 经漆雾絮凝剂脱黏、絮凝、气浮并集中收集后成为漆渣^[1]。

漆渣作为涂装生产过程的危险废弃物需花费成本委托外部单位焚烧处理, 新鲜漆渣的含水率经测量可达到 80% 以上, 即使经 7 d 静置沥干后含水率仍可达到 65% 左右(目前漆渣含水率测定无统一方法, 实测过程取 10 g 漆渣 110 °C 烘干 1 h 至恒重, 平行测定 2

收稿日期: 2025-05-22

作者简介: 苏卫东(1988—), 男, 本科, 工程师, 主要从事涂装工艺过程的管理工作。E-mail: 15669260383@163.com。

次取均值)。漆渣中的这部分含水显著增加了危废处理的费用,提高了制造成本。

本文介绍了目前漆渣(包含污泥类)物质的机械脱水方法,对一种新型漆渣干化脱水设备的工艺可行性进行了具体分析,并介绍了其在实际应用中的效果。

1 漆渣脱水干化现状

漆渣中的含水由两部分组成:与树脂中的羟基及羧基等亲水性基团形成氢键的胶束分子结合水及漆渣块毛细结构中的游离水^[2]。游离水通过静置重力沥干及机械挤压作用可以部分脱除,而机械挤压对分子结合水无脱除效果。当前主要应用于脱水的机械设备有压榨机、板框压滤机、离心分离机、叠螺机及带式脱水机等^[3]。

压榨机通过液压设备对装入编织袋、布袋等具有多孔、透水包装中的漆渣进行机械挤压,脱水效果有限且人工搬运工作量较大,经现场验证其效率较低。板框压滤机过滤面积较大,采用螺杆泵或气动隔膜泵可实现自动进料,通过板框内的过滤压力监控可实现自动压缩空气吹扫和出料^[4]。该设备对漆渣中的毛细结构游离水有一定的脱除效果,树脂结合的分子水仍无法脱除。因絮凝后分离收集的漆渣仍具有一定的黏性,对板框滤布的堵塞较为明显,人工清洗困难,现场可实施性较低。离心分离机内部通过高速旋转的转筒对湿漆渣产生离心作用,当分离因数足够高时可对游离水产生较好分离效果,其对漆渣的性质要求较高,对于一些黏性较大、颗粒不均匀的漆渣,脱水效果可能会受到影响。叠螺机主体由固定环和游动环组成,由疏到密的螺旋轴贯穿其中,前段为浓缩段,后段为脱水段,免除了传统的滤布结构,不会发生堵塞问题,可实现自动进出料。根据已有的使用案例介绍可将漆渣游离水进行有效脱除,脱水处理后的漆渣含水率可降至30%左右^[5]。带式脱水机由重力脱水区、压力脱水区、加压脱水区三部分组成,含水量较高的新鲜漆渣或污泥进入带式滤布上方依靠重力作用进行初步滤水。进入压力脱水区后上下滤布开始逐渐挤压漆渣、污泥进行脱水,继续进入加压脱水区,在多个呈垂直状的滚轮间轮间距由大渐小,压力则由小逐渐增大,随着滤布在不同的滚轮之间因变换上下位置而对污泥产生剪切力,从而将污泥中的毛细结合水压榨出来,产生较干的泥饼^[6]。

降低漆渣含水率具有多重效益:一方面可有效减少漆渣对生态环境的潜在污染风险,实现废弃物的减量化处理和无害化处置,从而满足日趋严格的环保法规标准;另一方面能够显著降低企业在漆渣运输及终端处置环节的运营成本,进而提升企业的经济效益和可持续发展能力。机械脱水工艺适用于对干化成本控

制较为敏感且对漆渣含水率要求相对宽松的应用场景。例如,一些小型汽车零部件涂装企业,其漆渣产生量相对较少,且资金有限,采用机械脱水设备可以在较低的成本下实现漆渣的初步干化,满足后续简单处理的要求。

2 新型漆渣干化设备原理

钱原吉等^[7]经试验测量得知干漆渣的热值可达到18.84 MJ/kg,相当于阜新烟煤的热值(18.65 MJ/kg),同时漆渣的热解活化能小于煤的热解活化能。漆渣中水分的存在降低了焚烧处理时释放的热量,因此需要尽可能对其进行脱除干化。

本案例采用的烘干脱水是一种利用热能使漆渣中的水分蒸发从而实现干化的方法。其原理是基于水分的汽化特性,当漆渣受到外部热量作用时,水分获得足够的能量克服分子间的作用力,从液态转变为气态,从而脱离漆渣。在工艺处理过程中,热风与漆渣实现充分接触,通过高效的热传导作用,热风所携带的热能迅速传递至漆渣物料,从而促使漆渣中所含水分得以快速蒸发。在这个过程中,热风不仅提供了水分汽化所需的热量,还起到了将蒸发的水汽带走的作用,维持干燥室内的水汽分压差,促进水分持续蒸发,其工作流程见图1所示。

该干化设备由湿料系统(图2)、干化设备主机(图3)和干料系统组成。湿料系统由翻斗提升机、带双螺旋破碎机的料仓和单螺旋湿料输送机组成。上浮在喷漆室循环水池表面的漆渣经刮渣机或吸浮渣泵收集后落入料斗小车,经充分沥水后将其运送至翻斗提升机,翻斗提升机将漆渣倒入料仓,料仓内的双螺旋破碎机对其进行均匀破碎处理,再通过单螺旋输送机将漆渣输送至干化设备主机上部的进料口等待处理。

干化设备主机是整个漆渣干化系统的核心设备,由破拱机、切条成型机、网带机、加热系统、内循环风机、冷却系统及外部冷却塔等组成。湿漆渣经主机上部的切条机切成条形后均匀铺放到双层网带上面,在干化箱体内缓慢折回式传输。经加热器生成的循环热风持续对网带进行吹扫,使漆渣完成脱湿干燥过程,最终形成干化漆渣^[8]。经过网带后含湿量升高的湿热循环风,首先通过与外部冷却塔连通的表冷器进行除湿处理,冷却水随后排出系统;完成除湿的循环风继而通过加热器进行二次加热处理^[9]。干化设备主机内通过这些过程进行持续的漆渣脱水干化。干料系统由干料仓、单螺旋干料输送机及外部承装袋支架组成。网带末端经充分脱水干燥后的漆渣落入干料仓,干料仓内的物位计检测到漆渣高度达到设定值时启动单螺旋干料

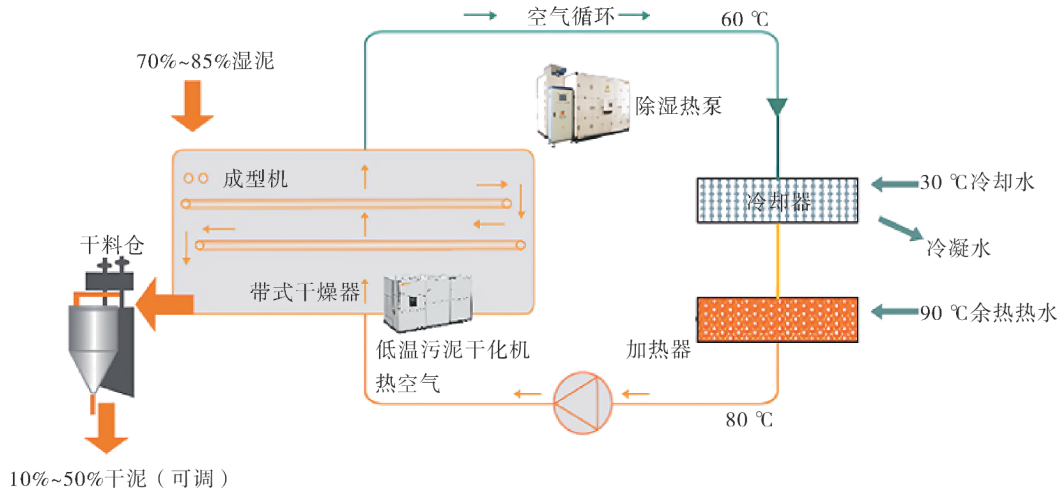


图1 干化系统流程

输送机,将漆渣输送至外部的承装容器如吨袋内,最终统一外运处理。

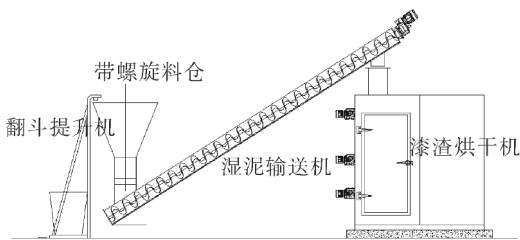


图2 湿料系统

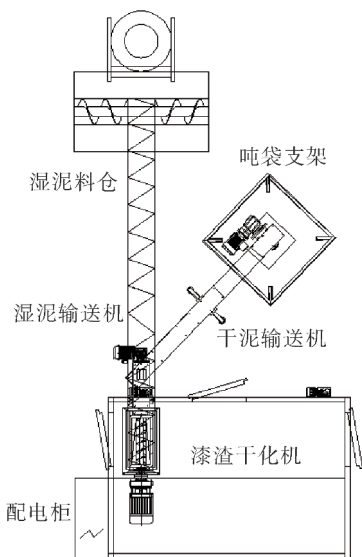


图3 干化设备主机

3 热源选用分析

能源消耗是干化设备运行维护成本的重要组成部分,加热热源来源广泛,可选直热式如电加热、蒸气加热、燃气换热,热泵式及余热回收式等。直热式电加热烘干设备的能耗表现尤为显著,以处理1 t含水率为70%的漆渣为例,将其含水率降低至20%,经测算电加热烘干设备的耗电量为1 000~1 500 kW·h。按照当地工业电价0.8~1.2元/(kW·h)计算,仅电费成本就高达800~1 800元/t。这是因为电加热烘干设备主要依靠电加热元件将电能转化为热能,能量转换效率相对较低,且在烘干过程中需要持续保持较高的温度,导致能耗较大。蒸气加热烘干设备虽然能耗相对较低,但蒸气的产生需要消耗大量的燃料,如天然气、煤炭等。若采用天然气作为燃料,生产1 t蒸气需要消耗70~80 m³天然气,按照当地天然气价格3~4元/m³计算,生产1 t蒸气的燃料成本为210~320元。处理1 t漆渣需要消耗3~5 t蒸气,蒸气成本为630~1 600元/t,再加上蒸气发生器及配套设备的运行能耗,总成本也不容忽视。直热式因其能耗和成本问题较为突出,可实施性低。

热泵式烘干设备基于逆卡诺循环原理工作,其核心流程为:压缩机将低温低压的制冷剂气体压缩为高温高压状态,随后该高压气体在冷凝器中进行等压冷凝放热,所释放的热能用于加热烘干室内的循环空气,从而促使漆渣所含水分发生相变蒸发。在蒸发器中,水蒸气经冷却后凝结为液态水并排出系统;与此同时,制冷剂通过膨胀阀进行节流减压,实现降温后返回压缩机,从而完成整个制冷循环^[9]。热泵式干化设备利用了低品位热源的热量,减少了对高品位能源(如电能、天

燃气等)的直接消耗,同时通过热量的循环利用,提高了能源利用率。相比传统的加热烘干技术,能耗可降低40%~60%。

余热回收是一种高效的节能技术手段,在汽车涂装生产过程中存在多种可利用的余热资源,主要包括:烤炉烟气余热、RTO(蓄热式热氧化器)废气余热、蒸气冷凝水余热以及空压机系统余热等。这些热源的有效回收利用能够显著提升生产过程中的能源利用效率^[1]。若不加以回收利用,这些余热不仅会导致能源利用率降低,还可能对环境造成潜在的负面影响。在烟气余热方式中,通过热交换器将RTO等排出的高温烟气中的热量传递给导热油,导热油再将热量传递给烘干设备的热风,使热风温度升高。通过实施余热回收利用技术,漆渣干化工序的能源消耗显著降低了30%~50%,不仅有效减少了对外部能源的依赖,同时实现了生产成本的优化控制。这种加热方式不仅提高了能源利用效率,还减少了温室气体排放,具有良好的经济效益和环境效益。

本案例选用涂装车间生产过程中产生的蒸气冷凝水余热提供脱水干化热源,供、需热可行性评估如下:某整车厂涂装车间经统计连续两年生产期间的漆渣为3.1 kg/台,漆渣含水率按70%计算,采用热风烘干脱水时将漆渣由20℃加热至50℃,水的比热容为4.2 kJ/(kg·℃),50℃时水的汽化潜热为2 382.5 kJ/kg,漆渣的比热容参照醇酸树脂漆渣的比热容为2.5 kJ/(kg·℃),据此进行吸热量的估算。夏季车间蒸气使用量较低,历史数据显示单台蒸气耗量最低达到0.12 t/台,蒸气冷凝水及主管路疏水阀排水温度可达到90℃,按照换热后温度下降到60℃,余热利用率按照50%,估算可有效利用余热量,计算数据见表1~2所列。

表1 漆渣干化需求热量

项目	数据
产量/台	400
湿渣产生量/kg	1 240
漆渣含水量/kg	868
含水升温吸热量/kJ	156 240
含水汽化潜热量/kJ	2 068 010
干漆渣量/kg	372
漆渣升温吸热/kJ	27 900
加热干化总吸热量/kJ	2 252 150

依据计算结果可知涂装车间每日蒸气冷凝水余热即使在夏季蒸气使用量较低时仍可满足漆渣脱水干化的热量需求,该烘干热量供给方案可行。

表2 蒸气冷凝水余热热量

项目	数据
产量/台	400
蒸气耗量/(kg·台 ⁻¹)	120
蒸气冷凝水水量/kg	48 000
降温放热/kJ	6 048 000
换热利用率/%	50
可利用余热量/kJ	3 024 000

在漆渣干化过程中,废气排放是一个不容忽视的环保问题。漆渣中通常含有大量的有机溶剂、树脂等有机成分,在干化处理过程中,随着温度升高和水分蒸发,这些有机物质会挥发形成VOC废气,如苯、甲苯、二甲苯、醇类、酯类等。这些有机废气如果未经处理直接排放到大气中,会对空气质量造成严重污染,对人体健康造成极大危害,引发呼吸道疾病、眼睛刺激等问题,同时也会对植物的生长和生态系统造成破坏。

需要依据现场情况选取适宜的方法进行处理,常见的废气处理技术包括吸附法、燃烧法、催化氧化法等。

4 应用效果验证

本工艺设备的干化主机及湿料、干料系统安装于涂装车间内部文丘里区域,蒸气冷凝水收集水箱及冷却风塔放置于车间外部承重平台,干化设备主机脱水过程中产生的冷凝水排放至附近文丘里地沟。主机内部的循环风接入喷漆室下部的排风管,抽入至RTO焚烧处理,可实现定时定量排放。通过PLC程序对主机内部温湿度、网带运行速度、电机启停等自动化控制,实现一键启停、免人工值守操作。干化设备出渣及干漆渣状态见图4~5所示。



图4 干化设备出渣



图5 干化后漆渣

漆渣干化设备调试运行过程中实测,完全沥水后的漆渣含水率为60%~70%,干化后的漆渣含水率在10%以下,检测数据见表3所列,漆渣减重超过60%,效果较为显著。

表3 漆渣脱水前后含水率对比

项目	容器质量 /g	烘干前 /g	烘干后 /g	含水率 /%	平均值 /%
烘干前	0.260 0	10.004 2	3.702 3	64.67	64.11
	0.260 5	10.536 2	4.005 8	63.55	
烘干后	0.261 3	10.051 2	9.441 0	6.23	6.41
	0.262 6	10.147 5	9.497 4	6.58	

5 结语

本新型漆渣干化方案特点：采用蒸气冷凝水气液换热，无额外热源成本，密闭式干化运行无废热排放；除湿性能比经计算超过 6:1 kgH₂O/(kW·h)，电力能源利用效率高；低温干化，烘干温度<70℃，VOC、H₂S、NH₃等析出量大大减少，粉尘浓度<60 g/m³，可定时排风置换，安全可靠；干料为条状颗粒，出料温度低(<50℃)，直接储存；漆渣烘干过程中产生的冷凝水经文丘里地沟直接排放，无需额外二次处理；出料含水率可任意调节(10%~50%)，减重最高可达90%以上，转运工作量大幅降低；在干化过程中，有机组分得以完整保留，且干化产物的高热值特性使其具备优异的资源化利用潜力；采用程序自动控制，节约大量人工成本。

本方案适用于所有具有固液分离、降低固体物含水率需求的场合，如污水站的污泥减重，可直接进行复制应用，将产生显著的环保和经济效益。

参考文献：

[1] 徐国庆, 申标, 王秀锦, 等. 一种涂装喷漆室循环水净化系统应用介绍[J]. 现代涂料与涂装, 2020(4): 46-48.

[2] 冯立明, 冯恩祺, 孙吉涛. 油漆废渣的脱水处理及多元化应用进展[J]. 环境工程, 2018(8): 148-152.

[3] 李清林. 制浆造纸废水污泥脱水性能的优化研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2012.

[4] 仝武刚. 污泥脱水设备的研究与应用[C]. 环境污染防治应用技术交流会, 2010.

[5] 赵永欢, 高海军, 赵京涛. 叠螺式污泥脱水机在涂装漆渣脱水中的应用[J]. 现代涂料与涂装, 2018(5): 70-72.

[6] 刘海茹, 王斌, 陈鑫. 污水厂污泥处理中深度脱水工艺设备的探讨[J]. 工程建设与设计, 2021(10): 118-120.

[7] 钱原吉, 吴占松. 油漆废渣的热解特性与热解工艺[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008(2): 236-239.

[8] 张仲欣, 朱文学, 张玉先, 等. 双仓串联横流循环式烘干机设计[J]. 洛阳工学院学报, 2002(2): 1-4.

[9] 霍成. 高温复叠式空气源热泵循环性能理论与实验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.

[10] 闫俊海, 高龙, 刘寅孟, 等. 低温干燥冷藏调湿多功能储粮系统及特性分析[J]. 粮油食品科技, 2022(6): 169-175.

[11] 孙红东. RTO 烟气余热利用综合节能技术的应用分析[J]. 中国设备工程, 2016(17): 2.

(上接第 18 页)

参考文献：

[1] 兰彬, 黄前龙, 盖国晖, 等. 水性防腐涂料的改性方法研究进展[J]. 现代涂料与涂装, 2025(3): 41-44.

[2] 钟存清, 李建彪, 刘阳. 现代色谱分析技术在涂料检测中的应用[J]. 中国质量监管, 2023(3): 86-87.

[3] 宋方方, 梁树雄, 黄远婷, 等. 溶剂型聚氨酯防水涂料挥发性有机化合物含量气相色谱检测方法探讨[J]. 中国建筑防水, 2024(2): 54-58.

[4] B THIÉBAUT, A LATTUATI-DERIEUX, M HOCEVAR, et al. Application of headspace SPME-GC-MS in characterisation of odorous volatile organic compounds emitted from magnetic tape coatings based on poly (urethane-ester) after natural and artificial ageing [J]. Polymer Testing, 2007, 26(2): 243-256.

[5] 贾丽, 夏敏, 尹建武, 等. 高效液相色谱法测定硝基涂料中的增塑剂邻苯二甲酸酯类[J]. 分析实验室, 2004(12): 28-31.

[6] 伦伟灿, 郝晶晶, 彭军. 涂料中重金属元素检测技术及标准

方法的研究概述[J]. 合成材料老化与应用, 2025(1): 51-54.

[7] 李文. 石墨炉原子吸收分光光度法测定建筑用外墙涂料中重金属含量[J]. 居舍, 2021(18): 31-34.

[8] 赖冬梅, 刘瑞阳, 毛佳伟, 等. 氢化物发生原子荧光光度法测定内墙涂料中可溶性汞含量的不确定度评定[J]. 分析仪器, 2021(1): 67-70.

[9] 金琦春, 王晓格, 郑姝倩, 等. XRF 法测定涂料用钛白粉中元素含量的研究[J]. 中国涂料, 2024(8): 59-63.

[10] 吴志刚, 曹璨. 微波灰化-电感耦合等离子体质谱法测定电泳涂料中 15 种金属元素[J]. 化学分析计量, 2023(1): 6-10.

[11] 王崇武, 解正坤, 何文华. 涂料性能检测自动化与智能化[J]. 上海涂料, 2021(6): 46-53.

[12] 刘仲义, 吴清锋, 陈纪文, 等. 涂料检测用机器人漆膜制备系统设计与工艺研究[J]. 机电产品开发与创新, 2020(3): 42-45.

[13] 於杰, 陈雪红, 王伟, 等. 绿色涂料产品认证进展及实施规则简述[J]. 涂层与防护, 2021(6): 42-47.