

# 一种大型复杂柜体自动喷粉工艺的实现方法

郑小艳, 董子瑜, 唐力明, 李航, 杨若愚

(中国联合工程有限公司, 杭州 310000)

**摘要:** 自动喷粉技术已在零部件和集装箱行业有所应用,但在大型复杂结构件中仍少有应用。本方法将大型复杂柜体的喷粉工艺分为8个工位。通过机器人和往复机的多元组合,在每个工位上配置合适的自动喷涂系统,实现了大型复杂柜体内外表面的自动喷涂功能。经测算,自动喷涂覆盖率达98%以上。此外,采用两用两备的大粉袋供粉系统,实现了大型柜体不间断高效供粉的功能;应用先进的粉末回收技术,提高粉末利用率,杜绝了废粉外溢的情况。

**关键词:** 大型复杂柜体; 自动喷粉; 机器人和往复机; 自动喷涂覆盖率; 粉末供应和回收

中图分类号:TQ639 文献标志码:A 文章编号:1007-9548(2025)10-0068-05

## A Method for Realizing Automatic Powder Spraying Process of Large and Complex Cabinet Bodies

ZHENG Xiao-yan, DONG Zi-yu, TANG Li-ming, LI Hang, YANG Ruo-yu

(China United Engineering Corporation, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** The automatic powder spraying technology has been applied in the parts and container industries, but it is still rarely used in large and complex structural components. This method divides the powder spraying process of large and complex cabinets into 8 stations. By using a multi-combination of robots and reciprocating machines, an appropriate automatic spraying system is configured at each station, achieving the function of automatic spraying on the inner and outer surfaces of large and complex cabinets. After calculation, the automatic spraying coverage rate reaches over 98%. In addition, a two-use and two-standby large powder bag powder supply system is adopted, realizing the function of uninterrupted and efficient powder supply for large cabinets; advanced powder recovery technology is applied, improving the utilization rate of powder and eliminating the situation of waste powder overflow.

**Key words:** large and complex cabinets; automatic powder spraying; robots and reciprocating machines; automatic spraying coverage rate; powder supply and recovery

## 0 引言

随着全球能源转型和碳中和战略的深入实施,新能源技术在电力工程系统中的应用逐渐成为国内外研究的热点<sup>[1]</sup>。无论是蓬勃发展的新能源汽车行业,还是起到削峰填谷、增强电网稳定性的储能行业,都有着巨大的涂装需求。粉末涂料因绿色环保的优势,发展迅速。与传统油漆涂装相比,粉末涂装具有明显的技术优

势,发展前景广阔。首先,粉末涂料具有较低的碳排放足迹;其次,粉末涂料在生产及使用的全生命周期里基本没有VOC排放,污染少;此外,粉末涂料可以循环使用,几乎无浪费,利用率接近95%。2023年,粉末涂料在新能源汽车和钢结构等新领域实现了重大突破,越来越多的新兴领域开始关注并转向粉末涂装<sup>[2]</sup>。

在一些零部件上已经成功应用了粉末喷涂技术,例如在工程机械油箱上已经有应用案例<sup>[3]</sup>。此外,在工程机械钢结构粉末喷涂技术方面也有研究<sup>[4-5]</sup>。但目前,自动喷涂技术在大型复杂结构件中仍少有应用<sup>[6]</sup>。在集装箱的喷涂作业中,自动喷涂技术已经有所应用<sup>[7-8]</sup>。

收稿日期:2025-07-16

作者简介:郑小艳(1983—),女,硕士,正高级工程师,主要从事涂装工艺与设备研究工作。E-mail:zhengxy@chinacuc.com。

但是,大型复杂整体柜式的喷涂和集装箱的喷涂又有所不同,大型柜体的内外壁都需要喷粉作业。而且由于柜体内部具有隔断多、遮挡多、长宽比大的复杂结构特征,简单的固定喷枪、伸缩喷枪或其组合无法完成所有内壁的喷粉工作。在实际案例中,为解决以上问题通常采用人工手持喷枪进行喷粉,但人工喷粉效率不高,无法满足产能需求。因此,粉末喷涂的自动化、智能化是必然发展趋势<sup>[9]</sup>。为解决人工喷涂效率低下的问题,需要由多组喷枪驱动机构携带喷枪实现高效的内外表面喷粉作业,对于工件内腔及一些受遮挡区域,则需要通过机器人完成。通过机器人和往复机的协同作业,实现大型柜体内外表面的高效喷涂作业。

## 1 大型柜体工件喷涂特点

### 1.1 工件类型特点

大型柜体工件的内外壁都需要喷粉作业。由于柜体内部结构复杂,其结构特征包括外壁板、内侧板、底面及其沟槽、立柱槽钢及其背面、槽钢内腔、加强筋板等,无法仅靠固定喷枪、伸缩喷枪或其组合完成所有的内外表面喷粉。

### 1.2 输送吊挂方式

工程机械结构件普遍采用自行葫芦小车或积放链悬挂方式吊挂,需保证吊挂位置和吊挂链条的一致性,以确保同类型工件吊挂后姿态一致,才能借助检测系统实时反馈工件的运行位置。通过自动识别系统识别工件,与粉房系统联锁,调用相应的自动喷涂程序进行作业。

### 1.3 离线编程模式+人工纠偏

离线编程模式具有编程速度快的特点,但如果由于定位偏差导致离线编程程序轨迹与实际喷涂轨迹存在偏差,则需要多次修改模拟验证<sup>[10]</sup>。本方法在离线编程的基础上,在工件进入自动粉房前自动检测工件吊挂姿态,若偏移量较大影响自动喷涂,则人工对工件进行纠偏,从而实现工件的自动喷涂。

### 1.4 粉末的供应

大型柜体整体喷涂面积大,粉末使用量大,若采用人工搬运,加粉次数会很多。为确保生产线连续稳定运行,需配置高功率粉末供应设备,以实现高效、不间断地供粉。此外,为保证涂层的最佳外观,需严格控制新粉和回收粉的配比,以达到良好的喷涂效果。

### 1.5 粉末的回收

目前回收装置粉末外溢主要有两种情况:一种是大旋风分离效果不佳,大量粉末被带到滤芯除尘器,或因滤芯堵塞导致除尘器过滤效率降低,排放的废气中粉尘浓度超标;另一种是在清理除尘器底部的废粉箱时,除尘器锁气卸灰的阀门处于开启状态导致粉末掉

落,或者从废粉箱倒出废粉时产生扬尘。以上两种现象需要杜绝,防止粉末外溢。

## 2 大型柜体工件喷涂实施方案

根据工艺需要和粉末特点,将自动喷粉工艺分成8个工位。每个工位根据需求合理配置喷涂设备,以实现自动喷涂的目的。针对大型柜体内、外表面的不同空间及遮挡状态,制定了一整套智能化自动喷涂方案(智能往复机+机器人+仿生智能多轴喷涂系统),通过3D激光轮廓传感器自动扫描柜体结构,实现顶、底、内腔多个隔断、前后端面的自动喷涂。

### 2.1 顶部焊缝/卷边/斜撑反面/柜体内腔夹缝位置喷涂

顶部焊缝/卷边/斜撑反面/柜体内腔夹缝位置的特点:范围几乎涵盖了整个柜体,但待喷涂位置不仅狭长且不规则。因此,以上位置由一套机器人喷涂系统完成,详见图1所示。

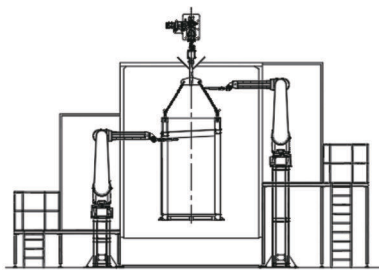


图1 机器人喷涂系统

根据工件宽度和喷枪喷幅,本工位配置2套固定机器人,单侧设计2把自动喷枪,共配置4把自动喷枪,用于喷涂顶部焊缝/卷边/斜撑反面/柜体内腔夹缝位置。

本工位通过识别系统给出的工件信息,结合输送位置,调用预编辑好的喷涂程序,通过机器人对相应位置进行自动喷涂。

### 2.2 U型槽内腔位置和中间立柱背面喷涂

U型槽内腔位置和中间立柱背面的特点:形状规格品类有限,呈空间分布,所需喷涂动作单一。因此,由1套伴随往复机系统完成喷涂,详见图2所示。

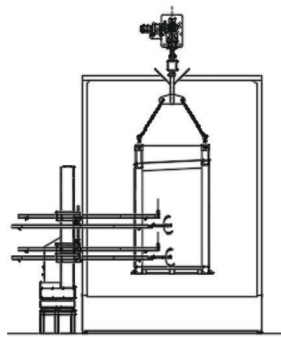


图2 伴随往复机系统

本工位配置 1 套带 4 个 U 轴的伴随往复机系统, 其中包含 1 套整体升降机、1 套伴随往复机、2 套单独前后运动 U 轴往复机和 2 套单独前后运动 U 轴往复机。为了满足喷涂需求, 共配置 4 把自动喷枪, 其中 4 把喷枪可以根据喷涂需要进行旋转。

本工位根据识别系统给出的工件信息, 调用预编程序对 U 型槽内腔和中间立柱背面进行自动喷涂。

### 2.3 柜体前后端板和内端板喷涂

柜体前后端板和内端板的特点: 需要喷涂的区域单一, 但单位时间内的喷涂作业量大。因此, 以上位置的喷涂由三轴重载伴随喷涂系统搭载足够多的喷枪完成作业, 详见图 3 所示。

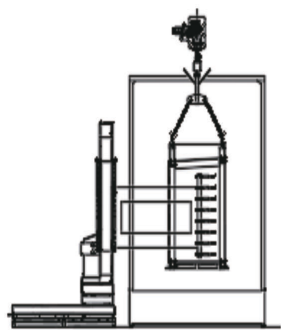


图 3 三轴重载伴随喷涂系统

本工位配置 1 套三轴重载伴随喷涂系统, 包含 1 台重载往复机、1 套 XT+YT 轴伴随系统及 16 把自动喷枪, 可根据工件喷涂位置调用预编程序, 对柜体前后端板和内端板进行自动喷涂。

### 2.4 立柱内侧面 U 型槽内部喷涂

立柱内侧面 U 型槽内部的特点: 待喷涂的形式单一但需要从固定角度喷涂才能满足喷涂质量的要求。因此, 以上位置喷涂由三轴轻型往复机伴随喷涂系统完成, 详见图 4 所示。

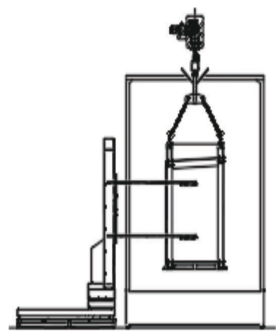


图 4 三轴轻型往复机伴随喷涂系统

本工位配置 1 套三轴轻型往复机伴随喷涂系统, 包含 1 台轻型往复机、1 套 XT+YT 轴伴随系统以及 4

把自动喷枪。这 4 把枪的角度可调, 往复机通过连杆控制这 4 把自动喷枪, 调用预编程序对所需位置进行喷涂作业。

### 2.5 柜体内外背板喷涂

柜体内外背板的特点: 外背板结构单一, 可通过激光扫描工件轮廓信息; 内背板需要通过开口位置进行喷涂。因此, 以上位置喷涂由往复机喷涂系统完成, 详见图 5 所示。

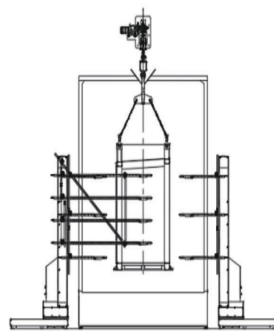


图 5 伴随往复机喷涂系统

本工位配置 1 套伴随往复机喷涂系统, 包含 1 台二维往复机、1 台三维往复机、1 套 XT 轴伴随系统、1 套 XT+YT 轴伴随系统和 7 把自动喷枪, 用于喷涂柜体内外背板。根据工件的特点, 本工位设置了激光扫描系统。外背板根据激光扫描工件轮廓信息, 结合工件信息以及输送位置信息, 对特定位置进行自动喷涂。内背板则根据工件喷涂位置调用预编程序快速接近内背板进行自动喷涂。

### 2.6 柜体两侧的顶部/顶部的平面+顶部背板的反面+底部平面+固定位置喷涂

柜体两侧的顶部/顶部的平面+顶部背板的反面+底部平面+固定位置特点: 位置固定且结构单一, 喷涂作业重复度高。因此, 以上位置喷涂是由 2 套多轴往复机系统协同完成喷涂, 这 2 套往复机系统配置略有不同, 详见图 6 所示。

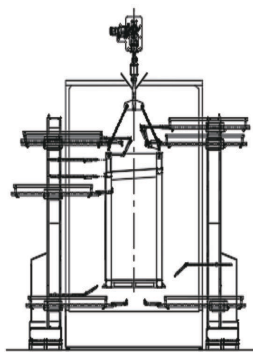


图 6 多轴往复机喷涂系统

1套配置包含1台独立滑块往复机、2套独立滑块、3套单独前后运动的U轴和7把自动喷枪。首先,工位最顶部单侧设计1套固定高度的U轴往复机,用于喷涂工件顶部,通过激光识别,当检测到障碍物时退出喷枪,绕过障碍物后继续喷粉。其次,工位底部单侧设计1套可独立上下移动的U轴往复机,用于喷涂工件底部,结合激光进行自动喷涂。最后,工位顶部单侧设计1套可独立上下移动的U轴往复机,结合工件位置信息,调用预编程序对工件顶部背板的反面进行喷涂。另外1套系统较前者多了1套独立滑块,1套单独前后运动U轴和1把自动喷枪。这套机构调用预编程序对工件内侧顶部进行喷涂。

### 2.7 柜体内顶部和内底部喷涂

柜体内顶部+内底部特点:大部分面积是整面,个别区域需要特定角度喷涂。以上位置喷涂由1套多U轴独立滑块往复机系统完成,详见图7所示。

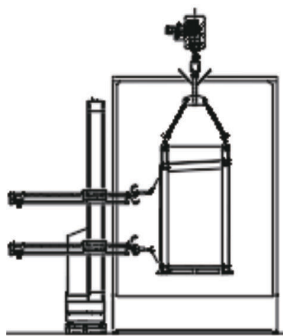


图7 多U轴独立滑块往复机喷涂系统

多U轴独立滑块往复机系统由2套各自独立上下移动并旋转的U轴往复机组成,共配有4把自动喷枪。每台U轴往复机包含1台独立滑块往复机,2套独

立滑块,2套单独前后运动及旋转U轴系统,以及2把自动喷枪。本工位根据工件喷涂位置调用预编程序对相应位置进行喷涂。

### 2.8 底部沟槽喷涂

底部沟槽特点:喷涂困难且容易出现失效。因此,以上位置喷涂由1套旋转式喷涂系统和1套防止失效系统完成,详见图8所示。

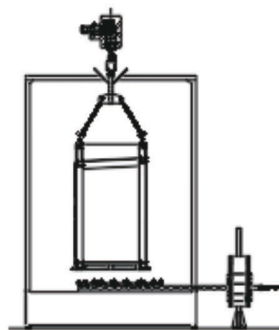


图8 旋转式喷涂系统和防失效喷涂系统

根据本工位的特点,以及防止工位失效,本工位配置1套旋转式喷涂系统和1套防止失效系统。旋转式喷涂系统包含1套旋转R轴、固定支架及3把自动喷枪。防止失效系统包含1套固定喷涂设备、7把自动喷枪和1套手动调节喷涂系统(带4把手动喷枪)。本工位根据工件喷涂位置结合外形尺寸,运动信息以及喷枪喷幅,调用预编程序对底部沟槽进行自动喷涂,同时手动调节喷涂高度,对特定位置进行喷涂,防止本工位失效。

### 2.9 大型柜体粉末喷涂的详细配置

共配置60把往复机自动喷枪、4把机器人自动喷枪和4把手动喷枪以及相配套的喷涂设备,详细配置见表1所列。

表1 大型柜体粉末喷涂的详细配置清单

工序	自动喷涂设备	喷枪数
顶部焊缝/卷边/斜撑反面/柜体内腔夹缝位置	机器人	4台机器人自动喷涂
U型槽内腔位置和中间立柱背面位置	1套带4个U轴的伴随往复机系统	4把自动喷枪
柜体前后端板和内端板位置	1套三轴重载伴随喷涂系统	16把自动喷枪
立柱内侧面U型槽内部位置	1套三轴轻型伴随喷涂系统	4把自动喷枪
柜体内外背板位置	1套伴随往复机喷涂系统	7把自动喷枪
柜体两侧的顶部/顶部的平面+顶部背板的反面+底部平面+固定位置喷涂位置	2套多轴往复机系统	15把自动喷枪
柜体内顶部和内底部	1套多U轴独立滑块往复机系统	4把自动喷枪
底部沟槽	1套旋转式喷涂系统,1套防止失效系统	10把自动喷枪,4把手动喷枪

## 3 粉末的供应和回收解决方案

### 3.1 粉末的供应

为减少人工加粉次数,本方案采用大粉袋供粉系

统。大粉袋供粉系统共配置有4套独立的大粉袋,两用两备,根据重量传感器的反馈自动切换大粉袋,确保粉末供应不间断。其次,为确保涂层的最佳外观,配

置有新旧粉末配比系统以控制新粉和回收粉的配比。此外,本系统配置有高功率粉泵,高功率粉泵具有流量输出大的特点。因此,在大粉袋在线自动切换功能、新旧粉配比系统和高功率粉泵的共同作用下,可以实现不间断高效供粉的功能。

### 3.2 粉末的回收

防止废粉外溢、提高粉末回收系统的效率,能有效提高粉末的利用率,同时减少对环境的污染。对于分离效果差的情况,采用高效大旋风分离装置和滤芯自动反吹装置,对滤芯除尘器的压差进行检测,防止堵塞,确保回收效果。对于倒出废粉时溢粉的情况,在废粉收集装置(收集箱+柔性收集袋)的下方安装有压力传感器实时反馈粉末重量来提醒取废粉。此外,废粉收集装置在前端管道上安装有上下两个自动阀门,并通过气路与锁气卸灰装置联锁,确保在倒出废粉时锁气卸灰装置始终有一个阀门处于关闭状态,避免粉末掉落、避免扬尘。

## 4 结语

为实现大型复杂柜体喷粉智能化、自动化,结合柜体结构的复杂性,将喷粉工艺分成8个工位。通过机器人和往复机的多元组合,在每一个工位上配置合适的自动喷涂系统,实现了大型复杂柜体内外表面自动喷涂功能。经过测算,自动喷涂覆盖率达到98%以上。

此外,为了减少人工加粉的次数,采用了两用两备的大粉袋供粉系统和新旧粉末配比系统,实现大型柜体不间断高效供粉的功能,达到了最佳的涂层外观。此外,应用高效大旋风分离装置、滤芯自动反吹装置、废粉收集装置,称重装置以及阀门联锁等设备,提高粉末的利用率,杜绝了废粉外溢的情况。

大型柜式自动喷涂的实现具有里程碑意义,本方法的应用提高了粉末涂料自动化喷涂覆盖率。该研究成果不仅可以用于同类柜体的粉末涂装,还能横向迁移至集装箱和专用车驾驶室,对于实现粉末智能自动化喷涂、推广“漆改粉”、实现绿色生产均具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 陈小华. 新能源技术在工程电力系统中的智慧能源集成优化方法研究[C]. 人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集(一), 2025: 93-96.
- [2] 吴向平, 宁波, 李馨. 我国粉末涂料与涂装行业运行分析[J]. 涂层与防护, 2025, 46(2): 36-43.
- [3] 刘翠梅, 齐祥安. 工程机械油箱“水改粉”涂装新工艺的研究应用[J]. 现代涂料与涂装, 2019, 22(3): 20-22.
- [4] 朴泫, 徐旭锋, 陆卫中. 海洋环境钢管桩纤维增强环氧粉末复合涂层技术[J]. 桥梁建设, 2021, 51(5): 61-66.
- [5] 赵趁妮, 刘翠梅, 齐祥安. 工程机械钢结构件新粉末涂层体系研究[J]. 涂料工业, 2021, 51(9): 64-68.
- [6] 宋延超, 陈亮, 李连成. 工程机械大型结构件机器人自动喷涂技术应用探索[J]. 现代涂料与涂装, 2024, 27(6): 24-26.
- [7] 鄢海新. 集装箱新型喷涂自动化工艺方法研究[J]. 现代涂料与涂装, 2024, 27(10): 69-72.
- [8] 危遥义, 李永. 集装箱粉末涂料及涂装工艺研究[J]. 涂层与防护, 2022, 43(04): 35-39.
- [9] 何志强. 涂装线自动静电粉末喷涂系统的研究与开发[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [10] 訾斌, 潘敬锋, 李元. 智能喷涂机器人编程方法与遥控操作技术研究综述[J]. 控制与决策, 2025, 40(4): 1057-1078. ◆

(上接第67页)操作注意事项等信息,在电气设备周围设置明显的警示标志,提醒操作人员注意安全。

## 4 展望

随着科技的持续进步和安全管理理念的不断革新,物联技术和大数据分析将在涂层烘干室的运行监测中发挥关键作用。通过实时收集和分析烘干室内部的温度、气体浓度、燃气管道压力及设备状态等关键数据预测潜在的故障与安全隐患,并提前采取有效的预防和控制措施。这不仅将推动涂层烘干室事故预防与控制技术的不断完善,还将为工业生产提供更为坚实的安全保障。

## 5 结语

涂层烘干室的事故预防与控制是一项系统而复杂

的工程,通过遵循 NFPA 86-2023 标准、GB 14443—2007 标准等相关标准和规范,从设备的设计与安装、安全操作规程、安全管理制度建设等多个环节入手,采取有效的事故预防和控制措施,可以大大降低涂层烘干室事故的发生,保障员工的生命健康和企业的财产安全。

### 参考文献:

- [1] 姜中亚, 张泽广. 涂层烘干室本质化安全技术探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2011(12): 216-220.
- [2] 胡振东. 浅谈涂装车间烘干炉设备导入管理思路[J]. 现代涂料与涂装, 2020(10): 50-53. ◆