

# 防爆型涂层烘干室的设计与安全性能验证

邓振锋

(深圳市计量质量检测研究院, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 本研究设计了一款符合国际和国内标准的防爆型涂层烘干室。通过系统化的防爆设计、多级安全联动机制以及优化的通风系统, 该设备显著降低了火灾和爆炸风险。试验验证结果表明: 该设计方案在防火、防爆、通风、温度控制和紧急保护等方面均表现出色, 有效确保了涂层烘干过程的安全性及合规性。

**关键词:** 防爆型涂层烘干室; 火灾与爆炸风险; 安全设计; 性能验证

中图分类号: TQ639 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2025)07-0044-04

## Design and Safety Performance Verification of Explosion-Proof Coating Drying Chamber

DENG Zhen-feng

(Shenzhen Institute of Metrology and Quality Inspection, Shenzhen 518000, Guangdong, China)

**Abstract:** This study designed an explosion-proof coating drying chamber compliant with international and domestic standards. Through systematic explosion-proof design, a multi-level safety interlock mechanism, and an optimized ventilation system, the equipment significantly reduces fire and explosion risks. Experimental validation demonstrates that the design exhibits excellent performance in fire prevention, explosion protection, ventilation, temperature control and regulation, and emergency protection, effectively ensuring the safety and regulatory compliance of the coating drying process.

**Key words:** explosion-proof coating drying chamber; fire and explosion risks; safety design; performance verification

### 0 引言

涂层烘干室也称之为烤炉、烤箱、烘箱等, 在喷涂、化工、塑料制造、电镀、五金加工、印刷等行业中被广泛用于固化和干燥涂层。然而, 涂层烘干过程中常涉及易燃易爆物质(如有机溶剂挥发), 存在极高的火灾和爆炸风险。近年来, 涂层烘干室火灾与爆炸事故频发, 给企业带来了巨大的经济损失和人员伤亡。因此, 设计一款符合美国消防协会标准 NFPA 86-2023《Standard for Ovens and Furnaces》和国内标准 GB 14443-2007《涂

装作业安全规程 涂层烘干室安全技术规定》、GB 50058-2014《爆炸危险环境电力装置设计规范》的防爆型涂层烘干室, 对于保障生产安全具有重要意义。

目前, 涂层烘干设备的安全设计仍存在诸多不足。传统设备多采用非防爆型电气元件, 且缺乏完善的通风系统和安全联动机制, 导致火灾和爆炸事故频发。此外, 现行标准对涂层烘干室的安全设计提出了更高要求, 但部分企业仍未能有效落实。因此, 行业急需一种安全可靠、符合标准的防爆型涂层烘干室。

### 1 研究目标

本研究旨在设计一款防爆型涂层烘干室, 重点解决火灾和爆炸风险, 确保设备在易燃易爆环境下的安全性, 研究目标包括: 分析涂层烘干室的安全风险, 提出针对性的设计方案; 设计符合 NFPA 86-2023、GB 14443-2007、GB 50058-2014 等标准要求的防爆型

收稿日期: 2025-02-19

作者简介: 邓振锋(1983—), 男, 本科, 注册安全工程师、一级注册计量师, 主要从事涂层烘干设备安全性能、电力安全工器具、劳保安全防护用品的检验检测技术研究等工作。E-mail: 361543790@qq.com。

涂层烘干室；通过试验和模拟验证设计方案的可行性和安全性。

## 2 涂层烘干室风险识别

涂层烘干室在运行过程中存在多种安全风险,主要包括以下几个方面。

### 2.1 火灾与爆炸风险

1)可燃气体聚集:涂层烘干过程中,有机溶剂挥发可能形成爆炸性混合气体,当浓度达到爆炸极限时,遇到火源可能引发爆炸。

2)电气设备故障:非防爆型电气设备在易燃易爆环境中可能成为点火源,引发火灾或爆炸。

3)温度失控:加热系统故障或温度传感器失效可能导致烘干室温度过高,加速可燃气体挥发,增加火灾风险。

4)机械故障:机械运动部件(如风机、门锁)故障可能导致通风系统失效或设备无法正常启闭,增加安全隐患。

5)静电积聚与放电:在涂层烘干过程中,工件、设备和操作人员之间的摩擦可能导致静电积聚。当静电积聚到一定程度时,可能产生火花放电,引燃可燃气体导致火灾或爆炸。

### 2.2 通风系统故障风险

1)通风量不足:通风系统设计不合理或风机故障可能导致有害气体无法及时排出,增加火灾和爆炸风险。

2)气流组织不合理:气流组织不当可能导致可燃气体聚集在局部区域,形成高浓度危险环境。

## 3 设计方案

### 3.1 方案概述

通过系统化的安全设计,方案围绕以下几个核心目标展开。

1)全面的安全防护:通过防爆结构设计、多级安全联动机制、优化通风系统等措施,构建全方位的安全防护体系。

2)严格的温度控制:采用高精度的温度控制系统,确保烘干过程的温度偏差、温度均匀度和波动度,避免因温度失控引发的安全隐患。

3)高效的通风与可燃气体监测:通过合理的气流组织和可燃气体监测系统,及时排出可燃气体,降低火灾和爆炸风险。

4)符合国际和国内标准:严格按照 NFPA 86-2023、GB 14443-2007、GB 50058-2014 等标准进行设计,确保设备的安全性和合规性。

### 3.2 方案指标

方案指标如下:核心技术参数见表 1,室体与防爆

结构见表 2,温控系统见表 3,通风与防爆控制见表 4,安全联动逻辑见表 5。

表 1 核心技术参数

项目	技术参数
适用标准	NFPA 86-2023、GB 14443-2007、GB 50058-2014
加热方式	电加热(不锈钢电阻丝加热管,表面温度≤溶剂闪点的 80%)
工作模式	间歇式,单批次最大装载量≤150 kg
容积	2.0 m <sup>3</sup> (内胆尺寸 1.2 m×1.0 m×1.7 m)
使用最高温度	120 °C
控温精度	温度偏差±1 °C,温度均匀度±2 °C,温度波动度±1 °C(PID+SSR 控制)
升温速率	常温至 120 °C≤25 min(满载工况)
防爆等级	电气设备:Ex d IIB T4;室体:Ex tD A21 IP65
电源参数	三相 380 V±10%,50 Hz,总功率 12 kW

表 2 室体与防爆结构

组件	参数及要求
外壳材料	外层 2.0 mm 镀锌钢板,内层 1.5 mm SUS316L 不锈钢
隔热层	120 mm 厚硅酸铝纤维棉,导热系数≤0.03 W/(m·K),耐火极限≥1 h
门体设计	高强度杆式门锁(上下同步锁),双层密封(硅胶+陶瓷纤维绳)
泄压装置	重力式泄压装置,泄压面积 0.2 m <sup>2</sup> ,移动部分质量≤10 kg/m <sup>2</sup>

表 3 温控系统

组件	参数及要求
加热元件	304 不锈钢电热管(功率密度≤8 W/cm <sup>2</sup> ),分 3 区布置
功率分配	顶部 2 区各 4 kW,侧部 1 区 4 kW,总功率 12 kW
表面温度控制	加热管表面温度≤150 °C(根据使用场景确认溶剂闪点≥180 °C)
超温保护	双冗余热电偶+机械式温控开关(动作值设定温度+10 °C)

表 4 通风与防爆控制

参数	技术要求
安全通风量	≥20 次/h 换气(根据使用场景需求为≥16 次/h 换气,按 GB 14443-2007 附录 A 的间歇式新鲜空气量要求,一次性溶剂载量 G 和溶剂蒸气的爆炸下限计算值 a 进行计算)
风机配置	防爆离心风机(Ex d IIB T4),风量≥15 m <sup>3</sup> /h,风压≥300 Pa
气流组织	上送下排,顶部均流板+底部可调格栅,风速 0.3-0.5 m/s
可燃气体监测	可燃气体浓度探测器(量程 0%LEL~100%LEL,精度±2%)
开机预排气程序	开机启动预排气程序,排气≥4 次容积后启动加热系统
关机延时通风程序	关闭加热系统后,风机延时通风 5-10 min

表5 安全联动逻辑

触发条件	动作响应
可燃气体浓度 $\geq 25\%$ LEL	声光报警→切断加热系统并启动应急通风(全速排风)
温度 $\geq$ 设定值+10℃	声光报警→切断加热系统并启动应急通风(全速排风)
风机未启动状态启动加热	启动加热→加热无法启动
加热未关闭状态关闭风机	关闭风机→风机无法关闭→风机持续通风

## 4 验证方法

为确保设计方案的有效性和安全性,本研究采用了一系列严格的验证方法,涵盖防火、防爆、通风、温度控制及紧急保护等方面。

### 4.1 验证项目与方法

验证使用测试设备及辅助参考方法见表6。

表6 验证使用测试设备及辅助参考方法

验证项目	测试设备	辅助参考方法
泄压装置	手持式电子推拉力计(ALGOLHF-10)、卡尺、计时器	GB/T 9158—2015《建筑门窗力学性能检测方法标准》、JJG 139—2014《拉力、压力和万能试验机》
风量与风压	手持热敏式风速计(FLUKE 923)、手持式压差计(JY DP3000)、计时器	GB/T 1236—2017《工业通风机用标准化风道性能试验标准》、JJF 1939—2021《热式风速仪校准规范》
可燃气体监测	标准气体动态配气装置(百万科技 MF-4B)、异丁烷标准气体、计时器	JJG 693—2011《可燃气体检测报警器》
温度性能	多通道温度巡检(FLUKE 2638A)配备9组T型热电偶及温度性能测试架	JJF 1101—2019《环境试验设备温度、湿度校准规范》
超温保护	多功能过程校验仪(FLUKE 754)	JJF 1664—2017《温度显示仪校准规范》

#### 4.1.1 泄压装置测试

测试设备:手持式电子推拉力计、计时器。

测试方法:将手持式电子推拉力计与重力式泄压装置固定连接,连接点位于几何中心位置,快速拉启泄压装置至全开状态,记录在拉启过程中的最大拉力及所用时间,重复多次,以确保数据的准确性和可靠性。

结果验证:重力式泄压装置移动部分质量 $\leq 7.8 \text{ kg/m}^2$ ,全部开启时间 $\leq 1 \text{ s}$ 。

#### 4.1.2 风量与风压测试

测试设备:手持热敏式风速计、手持式压差计。

测试方法:开启启动加热计算风量( $Q=\text{风速}\times\text{截面积}$ ),关闭加热系统后计算延时通风时间,在设备满负荷运行状态下,通过风速计测量送风口和出风口风速,

同时记录风道压差,验证风压稳定性。

结果验证:开机预排气 $\geq 5.3$ 倍容积,关机延时通风有效,实测风量 $\geq 23 \text{ m}^3/\text{h}$ ,风压 $\geq 350 \text{ Pa}$ 。

#### 4.1.3 可燃气体监测测试

测试设备:标准气体动态配气装置、异丁烷标准气体、计时器。

测试方法:对烘干室的可燃气体浓度探测器释放异丁烷标准气体,验证传感器响应时间、报警阈值准确性及是否发出声光报警和切断加热系统并启动应急通风系统(全速排风)。多次重复试验,确认逻辑关联是否准确可靠。

结果验证:传感器响应时间 $\leq 3 \text{ s}$ ,切断加热系统时间 $\leq 1 \text{ s}$ ,启动应急通风系统时间 $\leq 1 \text{ s}$ ,排风系统启动后可燃气体浓度降至 $10\%$ LEL以下时间 $\leq 30 \text{ s}$ 。

#### 4.1.4 温度性能测试

测试设备:多通道温度记录仪、配9个T型热电偶、温度测试架。

测试方法:在空载和满载(150 kg五金件)工况下,布置9个测温点,设备稳定30 min后记录各测温点温度,依据JJF 1101—2019计算温度偏差、均匀度、波动度。

结果验证:空载时温度偏差 $+0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、均匀度 $\pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、波动度 $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;满载时温度偏差 $+0.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 、均匀度 $\pm 1.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、波动度 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

#### 4.1.5 超温保护测试

测试设备:多功能过程校验仪。

测试方法:多功能过程校验仪输入超温模拟量信号,验证双冗余保护(PID控制器+机械温控开关)是否发出声光报警和切断加热系统并启动应急通风系统(全速排风)。

结果验证:切断加热系统时间 $\leq 1 \text{ s}$ ,启动应急通风系统时间 $\leq 1 \text{ s}$ 。

## 4.2 验证项目与结论

验证项目与结论见表7。

## 5 研究成果

### 5.1 降低火灾和爆炸风险

#### 5.1.1 防爆结构设计

1)采用Ex d IIB T4防爆等级的电气设备。2)设备外壳采用2.0 mm镀锌钢板(外层)和1.5 mm SUS316L不锈钢(内层),隔热层采用硅酸铝纤维棉,厚度120 mm,耐火极限 $\geq 1 \text{ h}$ 。3)设计重力式泄压装置,面积为 $0.2 \text{ m}^2$ ,爆破压力 $\leq 5 \text{ kPa}$ ,复位压力 $\leq 3 \text{ kPa}$ ,确保在超压情况下快速泄压。

#### 5.1.2 多级安全联动机制

1)可燃气体浓度监测与报警:安装可燃气体浓度

探测器,量程为 0%LEL~100%LEL,精度±2%。当可燃气体浓度≥25%LEL时,设备立即发出声光报警和切断加热系统并启动应急通风系统(全速排风),切断加热系统(延时≤1 s),启动应急通风系统(延时≤1 s)。

2)超温保护:采用双冗余热电偶和机械式温控开关,动作值设定为温度设定值+10℃。当温度超过设定值时,设备立即发出声光报警和切断加热系统并启动应急通风系统(全速排风),切断加热系统(延时≤1 s),启动应急通风系统(延时≤1 s)。

表7 验证项目与结论

验证项目	验证标准	验证结论
泄压装置测试	泄压装置移动部分单位面积质量≤12.5 kg/m <sup>2</sup>	泄压装置功能正常,泄压面积符合 要求,移动部分单位面积质量符合 要求
风量与风压测试	风量≥15 m <sup>3</sup> /h 风压≥300 Pa	通风系统性能稳定, 风量和风压满足设计要求
可燃气体监测测试	可燃气体浓度≥25%LEL时,设备立即报警,切断加热系统并启动应急通风系统	可燃气体监测系统响应迅速,报警功能正常,切断加热系统并启动应急通风系统(全速排风),联动逻辑正常
温度性能测试	温度偏差±1℃ 温度均匀度±2℃ 温度波动度±1℃	温度性能符合设计要求
超温保护测试	温度超过设定值+10℃时,设备立即报警,切断加热系统并启动应急系统	超温保护功能正常,报警功能正常,切断加热系统并启动应急通风系统(全速排风),联动逻辑正常

### 5.1.3 优化通风系统

1)通风量设计为≥20次/h换气。采用防爆离心风机(Ex d IIB T4),风量≥15 m<sup>3</sup>/h,风压≥300 Pa,确保可燃气体及时排出。

2)气流组织设计为上送下排,顶部均流板和底部可调格栅,风速控制在0.3~0.5 m/s,确保室内气流均匀。

### 5.2 温度性能控制

温度采用PID+SSR控制技术,加热管布局 and 热风循环系统使室内温度偏差±1℃,温度均匀度±2℃,温度波动度±1℃,确保温度在可控安全范围和涂层烘干质量。

## 6 展望

随着工业化和智能化的快速发展,未来涂层烘干室的设计和应用将面临更高的要求。

### 6.1 智能化与自动化升级

1)利用物联网技术,将设备运行数据实时传输至云端服务器,操作人员可以通过手机或电脑端的监控平台随时随地查看设备状态。系统还能够自动分析数据,提前发现潜在故障并发出预警。

2)结合大数据分析技术,对设备运行数据进行深度挖掘和分析。通过对历史数据的学习和建模,系统能够预测设备可能出现的故障模式和风险点,提前制定针对性的维护策略。

3)开发基于人工智能的智能预警系统,实时监测设备运行状态,自动识别异常情况并发出警报。例如,根据设备运行时间和关键参数的变化趋势,预测加热管的使用寿命,提醒操作人员及时更换,避免因加热管故障导致的温度失控风险。

4)引入自动化控制系统,实现涂层烘干过程的全自动化操作。通过预设的工艺参数和自动化控制逻辑,设备能够自动完成加热、通风、排风等操作,减少人为误操作的可能性。

### 6.2 预防性维护与健康管理

1)使用物联网和大数据技术,建立设备健康管理系统。系统能够实时监测设备各部件的运行状态,如电气元件的绝缘性能、风机的振动情况等,并根据监测数据评估设备健康状况。当设备健康状况下降到一定程度时,系统自动提醒操作人员进行预防性维护。

2)根据设备的实际运行情况和健康状况,制定个性化的智能维护计划。维护计划不仅包括常规的定期维护项目,还根据设备的实际运行数据动态调整维护内容和时间间隔。例如,对于通风系统,根据实际风量和风压的变化情况,合理安排风机的清洗和保养周期,确保通风系统始终处于良好运行状态。

通过智能化升级和预防性维护措施,未来涂层烘干室将更加安全、高效、智能。这些改进不仅有助于降低火灾和爆炸风险,还能提高生产效率,为企业创造更大的经济效益和社会效益。随着技术的不断进步,涂层烘干室的设计和应用将朝着更加智能化、自动化的方向发展,为工业生产提供更可靠的解决方案。

## 7 结语

本研究设计的防爆型涂层烘干室采用系统化的防爆设计、多级安全联动机制和优化的通风系统。验证结果表明,该设备在防火、防爆、通风、温度控制和紧急保护等方面均表现出色,显著降低了火灾和爆炸风险,取得了显著的安全性成果。

### 参考文献:

[1] 罗伟平. 防爆涂层烘干室检验检测的研究[J]. 机电工程技术, 2016, 43(2): 116-118.  
 [2] 姜中亚, 张泽广. 涂层烘干室本质安全技术探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(12): 216-220.  
 [3] 李兵, 刘立东. 涂装车间烘干炉安全风量研究[J]. 现代涂料与涂装, 2024, 27(8): 43-46.