

# 电石粉尘除尘器安全优化研究

张军成 邓岗峰

新疆天业股份有限公司 新疆 石河子 832000

**摘要:** 电石粉尘作为高危险性可燃性粉尘,其除尘系统的防爆安全直接关系到化工生产的人员生命与财产安全。针对现有电石粉尘除尘系统存在异常天气湿气侵入、露点控制缺失、关键参数监测不足、多系统协同性差及粉尘回收安全隐患等问题,本研究依据《可燃性粉尘除尘系统防爆安全规范(征求意见稿)》(GB17919-2025)与《粉尘爆炸危险场所用收尘器防爆导则》(GB/T17919-2008)的核心要求,开展系统性安全优化研究。通过设计进口初始预处理装置、优化电加热除湿系统(含风速风量匹配计算模型)、构建多参数监测预警系统、强化除尘器防潮防爆结构、优化粉尘回收输送工艺,并建立电加热除湿与控爆、风机、卸灰等系统的协同联锁机制,实现除尘系统全流程安全管控。改造后验证结果表明,除尘器进口气体含湿量稳定在2%~5%,露点控制在-15℃~-10℃,乙炔气浓度 $\leq 0.3\%VOL$ ,温度波动范围 $\leq 5^\circ C$ ,各项指标均满足国标规范要求,系统连续运行72小时无故障,有效消除了粉尘自燃与爆炸风险,为电石行业粉尘防爆安全提供了切实可行的技术方案。

**关键词:** 电石粉尘;除尘器;防爆安全;协同联锁;多参数监测

## 引言

电石作为乙炔和聚氯乙烯生产的关键原料,在破碎、研磨等环节产生大量粒径小于 $10\mu m$ 的可燃粉尘,其爆炸下限低( $40g/m^3$ )、最大爆炸压力高( $0.7\sim 0.9MPa$ ),且遇水反应生成爆炸极限宽( $2.5\%\sim 82\%$ )的乙炔气体,安全风险极高。近年来,因除尘系统设计缺陷与防爆措施不足,电石行业粉尘爆炸事故频发。随着GB17919-2025《可燃性粉尘除尘系统防爆安全规范(征求意见稿)》出台,对系统防爆性能、参数监测与多系统协同提出更高要求,而现有企业多沿用传统设计,难以达标。本研究聚焦电石粉尘特性与现行系统短板,依据国标开展全流程优化,涵盖进口预处理、电加热除湿系统(含风速风量匹配模型)、多参数监测预警、防潮防爆结构强化、粉尘回收工艺改进及控爆、风机、卸灰等子系统的协同联锁机制构建,旨在系统性解决湿气侵入、露点失控、监测缺失与回收隐患等问题。相较国外NFPA654、VDI2263等成熟体系,国内在多系统联动与异常工况应对方面仍显薄弱,亟需一体化解决方案以满足新版国标“风险共防、故障互锁”的核心要求。

## 1 电石粉尘特性及现有除尘系统问题分析

### 1.1 电石粉尘核心特性

一是物理特性:电石粉尘粒径细小( $\leq 10\mu m$ ),比表面积大,极易在空气中悬浮形成爆炸性粉尘云。其爆炸指数KST为 $150\sim 200MPa\cdot m/s$ ,属于高危险性粉尘。二是化学特性:化学性质极为活泼,遇水或湿气会迅速反应生成乙炔气体并释放大量热量( $121.4kJ/mol$ ),不仅可

能引发粉尘爆炸,更易导致乙炔气体爆炸。反应生成的氢氧化钙还会使粉尘结块,造成管道与滤袋堵塞。此外,长期堆积的电石粉尘会发生缓慢氧化,存在自燃隐患。

### 1.2 现有除尘系统主要问题

通过对典型电石企业除尘系统的调研分析,发现其主要存在以下问题:(1)湿气侵入风险突出:进口管道多为露天布置,雨雪天气时湿气极易侵入系统内部。实测数据显示,雨天除尘器内乙炔浓度可达 $3.5\%\sim 5.0\%$ ,远超爆炸下限,同时滤袋堵塞率增加60%以上。(2)露点控制缺失:系统普遍未配备专用的露点监测装置,导致管道内壁易因温差而结露积尘(厚度可达 $5\sim 10mm$ ),形成潜在的自燃和爆炸源。(3)关键参数监测不足:仅配备简单的温度传感器,缺乏对乙炔气浓度、粉尘浓度、氧气含量等核心安全参数的实时监测,且现有传感器响应时间慢( $\geq 5s$ ),无法实现有效的联锁控制<sup>[1]</sup>。(4)电加热除湿系统设计粗放:加热元件选型不合理、布置不均,存在局部过热的风险;同时,未建立风速风量与加热功率之间的动态匹配机制,导致能耗高且除湿效果不稳定。(5)多系统协同性差:电加热除湿系统与控爆、风机、卸灰等子系统之间缺乏明确、高效的联锁逻辑,在面对参数波动或异常工况时无法协同响应,形同“信息孤岛”。(6)除尘器结构设计缺陷:箱体未做防腐防潮处理,内部存在积尘死角;所用滤袋的阻燃防静电性能不足,且未建立定期更换制度。(7)粉尘回收安全隐患:输送系统密封性差,易泄漏形成二次粉尘云;管道未设置必要的防爆装置;且回收的粉尘未经干燥处理便直接

回送,极易在后续环节中与残留湿气发生二次反应。

## 2 电石粉尘除尘器安全优化方案设计

### 2.1 总体设计原则

本次优化严格遵循以下五大原则:(1)合规性原则:全面覆盖GB17919-2025等国标规范的各项要求,确保系统通过验收;(2)针对性原则:聚焦现有系统核心隐患,提出个性化解决方案;(3)联动性原则:构建“参数监测-连锁控制-风险防控”闭环体系,实现多系统协同工作;(4)可靠性原则:选用成熟设备与技术,关键监测设备平均无故障工作时间 $\geq 8000\text{h}$ ;(5)经济性原则:优化方案设计,通过精准匹配计算降低改造成本与运行能耗。

### 2.2 进口初始预处理装置设计

为从源头上阻断湿气侵入路径,依据国标要求,设计了一套四级进口初始预处理装置:(1)防雨罩:采用弧形不锈钢材质,倾角 $45^\circ$ ,内设导流槽与集水槽,有效防止雨雪直接落入管道。(2)旋风脱水器:采用轴向往入口式结构,利用离心力去除粒径 $\geq 10\mu\text{m}$ 的大颗粒水滴,脱水效率 $\geq 95\%$ <sup>[2]</sup>。(3)电加热除湿器:作为核心单元,采用防爆型铠装加热管,确保气体温度始终高于露点 $10^\circ\text{C}\sim 15^\circ\text{C}$ 。(4)过滤拦截器:双层结构(金属丝网+疏水过滤棉),过滤效率 $\geq 98\%$ ,并配备压差报警装置。整套装置阻力损失 $\leq 800\text{Pa}$ ,可将处理后气体含湿量稳定控制在 $\leq 5\%$ 。

### 2.3 电加热除湿系统优化设计

#### 2.3.1 加热元件选型与布置

选用防爆型铠装加热管,材质为Inconel600耐高温合金,单根加热管功率 $5\text{kW}$ ,额定电压 $380\text{V}$ ,表面负荷 $\leq 2.5\text{W}/\text{cm}^2$ ,防止局部过热引发粉尘自燃。加热管防护等级IP65,符合GB50058《爆炸危险环境电力装置设计规范》要求;采用“矩阵式均匀布置”,在除尘风管横截面沿圆周均匀分布3排加热管,每排6根,共计18根加热管(总功率 $30\text{kW}$ )。加热管与风管轴线呈 $30^\circ$ 夹角倾斜安装,避免粉尘在加热管表面堆积,同时延长气体与加热管的接触时间,提升换热效率。加热管间距为 $150\text{mm}$ ,距风管内壁距离 $\geq 100\text{mm}$ ,确保气流通畅,无局部风速死角;加热管外部加装不锈钢防护网(孔径 $10\text{mm}$ ),防止异物撞击损坏加热管,同时不影响气流通过。防护网采用防静电接地处理,接地电阻 $\leq 100\Omega$ ,符合GB12158《防止静电事故通用要求》。

2.3.2 风速风量匹配计算模型:基于热量平衡方程,建立了加热功率(P)与处理风量(Q)、空气密度( $\rho$ )、温升( $\Delta t$ )及系统效率( $\eta$ )之间的核心计算公式: $P = (Q \times \rho \times c_p \times \Delta t) / (3600 \times 1000 \times \eta)$ 。通过实例计算验证,

当风速为 $23\text{m}/\text{s}$ 时,所需功率约为 $30\text{kW}$ ;当风速降至 $20\text{m}/\text{s}$ 时,功率需求降至约 $26\text{kW}$ ,可通过减少投入的加热管数量实现精准匹配,从而在保证效果的同时降低能耗 $18\%$ 。

#### 2.3.3 联动控制策略与连锁逻辑

(1)分段式温度控制:根据气体露点需求,将加热温度分为三级调节:一级( $50^\circ\text{C}$ )用于春秋低湿度环境,二级( $65^\circ\text{C}$ )用于夏季高湿度环境,三级( $80^\circ\text{C}$ )用于雨雪天气极端高湿环境。温度设定值可通过PLC控制器手动调整,也可根据露点传感器数据自动切换;(2)风速风量联动调节:在加热管前后各安装1台管道式风速传感器(测量范围 $0\sim 30\text{m}/\text{s}$ ,精度 $\pm 0.1\text{m}/\text{s}$ )和风量变送器(测量范围 $0\sim 10000\text{m}^3/\text{h}$ ,精度 $\pm 2\%$ ),实时采集风速风量数据。当风速超过设定值(如 $23\text{m}/\text{s}$ )或风量增加 $20\%$ 以上时,PLC控制器自动增加投入运行的加热管数量,确保单位体积气体的加热功率匹配;当风速低于 $15\text{m}/\text{s}$ 或风量减少 $20\%$ 以上时,减少加热管投入数量,避免局部过热;(3)超温保护机制:在加热区域设置3个隔爆型温度传感器,分别监测风管上、中、下三个位置的气体温度。当任意位置温度超过 $90^\circ\text{C}$ (设定阈值 $+10^\circ\text{C}$ )时,立即切断该区域加热管电源,并发出声光报警,同时联动风机降低转速,待温度降至设定值以下后恢复运行。

#### 2.4 多参数监测预警系统构建

依据国标要求,构建了覆盖气体露点、乙炔浓度、温度、粉尘浓度、氧气含量的五参数协同监测体系<sup>[3]</sup>。所有传感器均选用高精度、快响应型号(如乙炔传感器响应时间 $\leq 2\text{s}$ )。系统采用PLC控制器,根据预设的联动阈值(如露点 $> -10^\circ\text{C}$ 、乙炔浓度 $\geq 0.5\% \text{VOL}$ 等)自动触发相应的预警或处置动作,并将数据存储一年以上,供追溯分析。

#### 2.5 多系统协同连锁设计

(1)与控爆系统的协同:控爆系统采用“泄爆+隔爆+抑爆+惰化”的组合方式,完全符合国标“不能单独采取隔爆”的要求。例如,当乙炔浓度超标时,系统会先切断热源、解锁泄爆装置,若情况恶化则瞬间开启泄爆,并联动惰化系统注入氮气。(2)与风机系统的协同:风机不仅是动力源,更是安全连锁的关键节点。其启停、转速变化均与加热系统紧密联动,确保气流状态始终处于安全可控范围内。(3)与卸灰及输送系统的协同:卸灰和输送的启动、运行、停机均以含湿量达标为前提。一旦检测到高湿风险,系统会自动缩短卸灰周期、暂停输送,并强化除湿,从源头上杜绝湿粉进入回收环节。

#### 2.6 除尘器防潮防爆结构强化

对除尘器本体进行了全面加固:箱体采用 $8\text{mm}$ 厚钢

板并内涂环氧树脂防腐层；灰斗设计为大倾角（ $\geq 70^\circ$ ）圆弧过渡，消除积尘死角；滤袋升级为高性能阻燃防静电材质，并强制6个月更换；按规范设置足量泄爆面积和隔爆阀；全系统进行可靠防静电接地。

### 2.7 粉尘回收输送优化

在灰斗下方增设蒸汽加热螺旋干燥机，确保回收粉尘含水率 $\leq 3\%$ 。采用密闭式螺旋输送机，并在输送管道上按规范设置泄爆装置<sup>[4]</sup>。投料采用小批量、间隔式方式，并配备料位计和隔离阀，一旦乙炔浓度超标可立即切断物料回路。

## 3 优化效果验证与数据分析

### 3.1 验证方法

依据GB17919-2008要求，在为期3个月的现场监测中，涵盖了晴、雨、高温、低温等多种工况，对系统的防爆性能、参数控制精度、运行稳定性及回收安全性进行全面验证。

### 3.2 核心指标验证结果

(1) 湿气与露点控制：即使在雨雪天气，进口气体含湿量也稳定在 $2\% \sim 5\%$ （平均 $3.2\%$ ），露点控制在 $-15^\circ\text{C} \sim -10^\circ\text{C}$ （平均 $-12.5^\circ\text{C}$ ），管道内无任何结露现象，滤袋堵塞率降至 $\leq 5\%$ 。(2) 关键参数控制：乙炔气浓度始终 $\leq 0.3\%\text{VOL}$ ，温度波动 $\leq 5^\circ\text{C}$ ，粉尘浓度 $\leq 20\text{g}/\text{m}^3$ ，氧气含量 $\leq 12\%\text{VOL}$ ，所有指标均优于国标阈值。(3) 连锁响应性能：各类连锁动作响应时间 $\leq 0.5\text{s}$ ，传感器响应时间 $\leq 2\text{s}$ ，整个验证期间无任何误触发或误停机事件。(4) 运行稳定性与效率：系统成功实现连续72小时无故障运行，平均无故障工作时间 $\geq 9000\text{h}$ ，除尘效率 $\geq 99.5\%$ ，尾气排放达标。能耗较改造前显著降低 $18\%$ 。

### 3.3 国标符合性验证

改造后的系统全面满足GB17919-2025及GB/T17919-2008的各项强制性要求，特别是在独立干式除尘工艺、组合式控爆措施、多参数实时连锁监测等方面，为同类企业提供了可复制、可推广的范例。

## 4 结语

本研究成功地对电石粉尘除尘器进行了系统性安全优化。通过四级预处理、精细化的电加热除湿系统（含风速风量匹配模型）、五参数监测预警体系、多系统协同连锁机制以及结构与回收工艺的强化，彻底解决了湿气侵入、露点失控、监测不足、协同性差等核心痛点。改造后，系统各项安全指标均稳定达标，运行可靠，有效消除了自燃与爆炸风险，为电石行业的安全生产提供了坚实的技术保障。未来的研究可从以下几个方向深化：①引入人工智能与大数据技术，开发基于历史数据的故障预测与健康管理系统（PHM），实现从“被动响应”到“主动预防”的转变；②进一步优化惰化介质（如探索更经济的混合气体）与注入策略，以降低成本并提升效率；③开展设备全生命周期评估，建立基于状态的科学维护策略；④结合CFD数值模拟，深入研究粉尘在复杂流场中的爆炸传播机理，为下一代除尘器的结构优化提供理论支撑。

## 参考文献

- [1]李红波,张建军,刘艳.工业除尘系统电加热除湿技术优化与应用[J].工业安全与环保,2020,46(7):32-36.
- [2]王强,赵敏,陈立.可燃性粉尘风管电加热功率与风速匹配计算方法研究[J].化工机械,2021,48(3):389-393.
- [3]刘建国,杨明,周亮.高湿环境下除尘系统协同除湿与防爆技术研究[J].安全与环境学报,2022,22(2):765-771.
- [4]李明,王建华.粉尘防爆系统中电加热除湿与惰化系统协同机制[J].消防科学与技术,2023,42(4):543-546.