

炭黑生产企业非粉尘爆炸危险区域划分的深度探讨与系统论证

张成燕, 王东安, 王 辉

卡博特高性能材料(徐州)有限公司, SHE部, 江苏 徐州

收稿日期: 2026年2月2日; 录用日期: 2026年2月23日; 发布日期: 2026年2月28日

摘 要

通过实验对炭黑粉尘云的“可爆性”、最小爆炸浓度MEC、最小爆炸点火能MIE以及最低着火温度MIT进行测试, 将实验结论与过往研究数据, 同时结合实际炭黑生产工艺控制参数做比对分析得出: 尽管炭黑粉尘在特定条件下呈现“可爆性”, 但在粉尘防治得当和安全连锁系统可靠的前提下, 炭黑生产企业理论上可判定为非粉尘爆炸危险区。

关键词

炭黑粉尘, 可爆性, 最小爆炸浓度, 最低点火能, 最低着火温度

In-Depth Discussion and Systematic Demonstration on the Determination of Non-Dust Explosion Hazardous Areas in Carbon Black Production Enterprises

Chengyan Zhang, Dongan Wang, Hui Wang

Safety/Health/Environment Department, Cabot Performance Materials (Xuzhou) Co., Ltd., Xuzhou Jiangsu

Received: February 2, 2026; accepted: February 23, 2026; published: February 28, 2026

Abstract

Through experiments, the “explosibility”, Minimum Explosible Concentration (MEC), Minimum

Ignition Energy (MIE), and Minimum Ignition Temperature (MIT) of carbon black dust clouds were tested. By comparing and analyzing the experimental conclusions with previous research data, and combining them with the actual process control parameters of carbon black process, the following conclusion is drawn: Although carbon black dust exhibits “explosibility” under specific conditions, carbon black production enterprises can be determined as non-dust explosion hazard zones on the premise that dust prevention and control measures are properly implemented and the safety inter-lock system is reliable.

Keywords

Carbon Black Dust, Explosibility, MEC, MIE, MIT

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

工业级的炭黑粉尘直径约为微米级(10~20 μm)属于导电型、可燃粉尘,在空气中可燃烧、闷燃,特定情况下可能发生爆燃、爆轰[1]。炭黑生产企业往往存在不同程度炭黑粉尘的泄露、逸散,过往的安全管理经验中防止粉尘爆炸在炭黑生产企业中一直属于安全管理的中重中之重。但随着炭黑生产除尘工艺的进步以及安全连锁技术的应用,本文从炭黑粉尘爆炸实验测试数据、历史研究数据、以及结合炭黑生产企业实际工艺控制参数¹对比分析论证炭黑生产企业划归非粉尘爆炸危险区的可能性。本文对比参照《可燃性粉尘爆炸风险评估及特性参数测定方法》(GB/T 16425-2025 [2])与国外相关规范《粉尘火灾和粉尘爆炸危害、评估、保护措施测定粉尘安全特性的试验方法》VDI 2263-1-1990 [3]对粉尘可燃性判定做类比分析,在“炭黑粉尘云最小爆炸浓度测试实验中”为确保实验结果更新严禁期间采用更为严格的国外标准作为判定依据。

2. 爆炸性粉尘危险区划分原则

爆炸性粉尘环境是指可燃性导电粉尘和非导电粉尘或可燃纤维和空气混合形成达到最小爆炸浓度的混合物,并存在达到点燃可燃性粉尘的最小点火能(如电弧、火花)或存在高于最小着火温度的高温环境。

2.1. 爆炸性粉尘环境危险区域划分

参照《爆炸危险环境电力装置设计规范》(GB50058-2014)中规定,爆炸性危险环境根据其出现的频率和存在的时间可分为[4]: 20区、21区、22区。20区指粉尘爆炸性环境经常出现或长时间存在,或存在粉尘堆积(如料仓,气力输送系统、除尘系统等); 21区指正常运行时粉尘爆炸性环境偶尔出现(如投料口、打包口等); 22区指正常情况下粉尘爆炸性环境不会出现但故障情况下会短时出现(如振动筛的软连接、21区的外围空间等)。同时,相对密闭性是评估单元边界的构成爆炸性粉尘环境的重要条件之一,在敞开或相对敞开的场所较难形成爆炸性粉尘环境,如:炭黑生产工艺装置露天框架结构的构筑物中可以有效地避免粉尘的积聚。

¹文中描述的炭黑生产工艺控制参数参照博特高性能材料(徐州)有限公司实际工艺。

2.2. 爆炸粉尘环境危险区域的豁免情景

依照《爆炸危险环境电力装置设计规范》GB50058-2014 中可划归非粉尘爆炸危险区域的豁免条件[4]: 装有良好除尘效果的除尘装置, 当该除尘装置停车时, 工艺机组能联锁停车; 设有为粉尘爆炸环境服务, 并用墙隔绝的送风机室, 其通向爆炸性粉尘环境的风道设有能防止爆炸性粉尘混合物进入的安全装置; 区域内使用爆炸性粉尘的量不大, 且在排风柜内或风罩下进行操作, 符合以上条件之一, 可划为非粉尘爆炸危险区。同时规范还明确了密封结构的管口、人孔, 焊接输送及设计防泄漏阀门的法兰等部位不视为释放源, 可划为非粉尘爆炸环境危险区域。

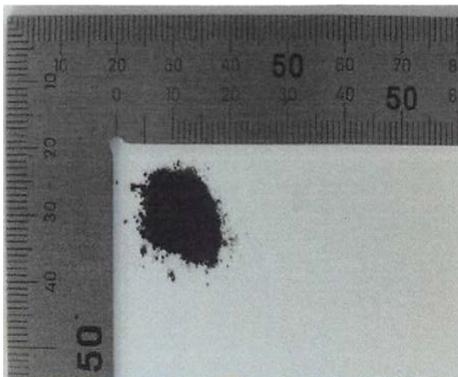
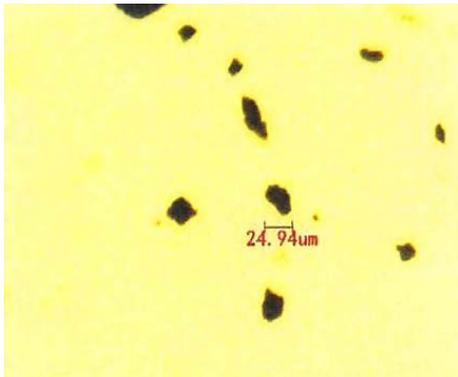
3. 炭黑粉尘爆炸实验数据分析

目前, 国内外关于粉尘爆炸特性参数测定标准相对一致, 主要包括粉尘云的可爆性、粉尘云最小点火能、粉尘云最低着火温度、粉尘云最小爆炸浓度、粉尘云最大爆炸压力和最大压力上升速率、粉尘爆炸最低氧含量等[5]。

依照粉尘爆炸特性参数标准体系[6]如图 1 所示, 选取卡博特某工厂特种炭黑造粒前的粉尘为实验样本见表 1, 对粉尘云的可爆性进行判定, 对粉尘云最小的爆炸浓度(MEC)、粉尘云最小点火能(MIE)带电感/不带电感、粉尘云最低着火温度(MIT)进行测试。所选取的样品基本性质如下:

Table 1. Description of sample

表 1. 样品的基本特性

项目	结果	检测方法
水分含量	0.98%	GB/T 2914-2008
粒径分布	d (0.1) = 2.1 μm d (0.5) = 10.8 μm d (0.9) = 32.3 μm	ISO 13320-2020 激光衍射分析法(干法分散)
样品照片		
收到的样品外观		
样品处理	以原始状态进行试验	
备注	水分和粒径分布对粉尘爆炸特性有显著影响。	

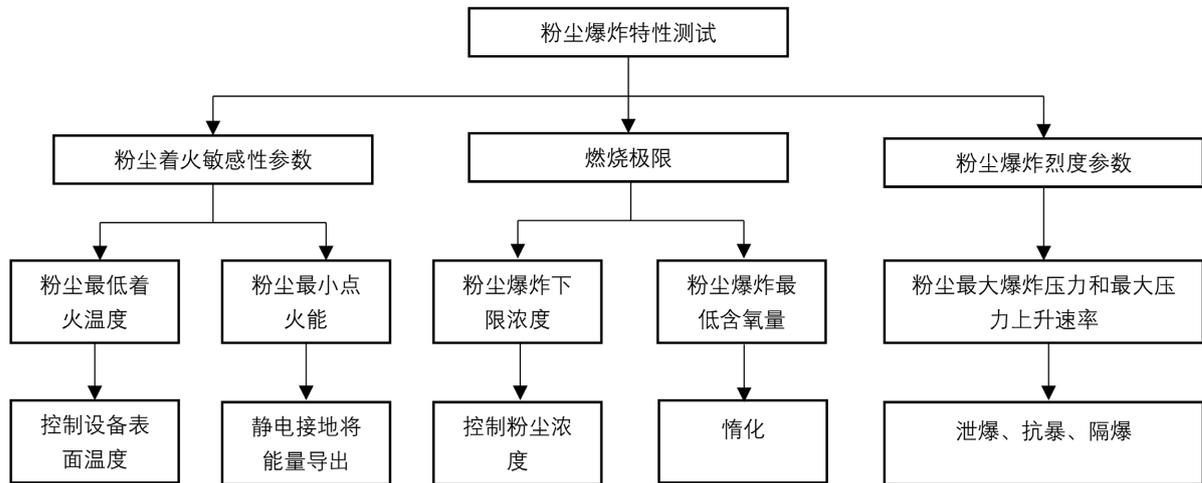


Figure 1. Standard system for dust explosion characteristic parameters
图 1. 粉尘爆炸特性参数标准体系

3.1. 炭黑粉尘云可爆性测试实验

3.1.1. 实验测试条件及依据

燃烧爆炸三要素[7]是指可燃物、助燃物和点火源，三者缺一不可。类似的粉尘爆炸需满足三个基本条件：粉尘本身具有可燃性、悬浮在空气中达到爆炸极限浓度区间、存在足够能量的点火源。影响粉尘爆炸性的主要因素包含：粉尘的化学成分(需考虑含水量影响)，粉尘云爆炸前气相的初始压力和温度，粉尘颗粒粒径大小、形状及其分布以及大量辐射热传递的可能性，以上因素亦可视为爆炸性粉尘云的基本参数[8]。

依据《可燃性粉尘爆炸风险评估及特性参数测定方法》(GB/T 16425-2025)中 5.3.3.4(a)在任一次爆炸过程中，如果测得 $P_{ex} - P_{igniter} \geq 0.03 \text{ MPa}$ ，则认为该次试验发生了爆炸[2]。

本次实验检测设备 Siwek 20 L 球，点火源：2 个能量为 1 kJ 化学点火具，样品以原始状态进行实验，实验环境温度 24℃，相对湿度 70%。

3.1.2. 实验数据及结论分析

检测方法依照 ISO/IEC 80097-20-2:2016 爆炸环境第 20-2 部分：材料特性可燃性粉尘实验方法，检测设备 Siwek 20 L 球，点火源 - 两个能量为 1 kJ 化学点火具，样品以原始状态进行实验，实验环境温度 24℃，相对湿度 70%。在此实验条件下实验结论如表 2 所示。

Table 2. Dust explosibility screening test
表 2. 粉尘可爆性实验数据

序号	C [g/m ³]	P_{ex} [MPa]	ΔP [MPa]	是否爆炸?
1	750	0.489	0.456	是

其中， c ：粉尘云浓度。

P_{ex} ：爆炸压力。

$\Delta P = P_{ex} - P_{igniter}$ ($P_{igniter} = 0.033 \text{ MPa}$ ：点火具的爆炸压力)。

由此得出：在 750 g/m³ 浓度下， $\Delta P = 0.456 \text{ MPa} \geq 0.030 \text{ MPa}$ ，发生爆炸，在此实验条件下，该炭样

品的炭黑粉尘云状态“可爆”。

3.2. 炭黑粉尘云最小爆炸浓度测试实验

3.2.1. 实验测试条件及依据

粉尘爆炸极限指可燃粉尘与空气混合后遇火源发生爆炸的浓度范围，因为粉尘云爆炸或燃烧仅在单位体积粉尘云质量处于一定范围内才会发生一般数量级从 $10\sim 10^3$ g [9]-[11]，爆炸极限随粉尘不同而异，爆炸极限是粉尘爆炸必须需满足三个条件之一。

依照德国标准《粉尘火灾和粉尘爆炸危害、评估、保护措施测定粉尘安全特性的试验方法》VDI 2263-1-1990 [3]中关于粉尘可爆性的判定分两步进行：首先在哈特曼管中用能量为 10 J 的静电火花作为点火源进行筛选，如形成火焰传播，则认为发生粉尘爆炸；如未发生火焰传播，则利用 20 L 球形爆炸装置进行第二步测试；此步骤测试时使用的点火具能量为 2 kJ，当粉尘云引爆后产生的压力大于或等于 0.05 MPa 时，认为发生了粉尘爆炸。依照 VDI 2263-1-1990 标准作为粉尘可爆性的判定依据，即当 $P_{ex} \geq 0.05$ MPa 时，视为发生爆炸。

3.2.2. 实验数据及结论分析

检测方法：GB/T 16425-2018 粉尘云爆炸下限浓度测试方法，本次实验检测设备 Siwek 20 L 球，点火源：2 个能量为 1 kJ 化学点火具，样品以原始状态进行实验，实验环境温度 24℃，相对湿度 70%。在此实验条件下实验结论如表 3 所示。

Table 3. Minimum explosion concentration of dust cloud

表 3. 粉尘云最小爆炸浓度

序号	C [g/m ³]	$P_{ex 1}$ [MPa]	$P_{ex 2}$ [MPa]	$P_{ex 3}$ [MPa]	是否爆炸?	备注
1	40	0.041	0.046	0.048	否	H = 40 g/m ³
2	50	0.05	0.051	0.052	是	L = 50 g/m ³

其中， c ：粉尘云浓度。

P_{ex} ：爆炸压力。

MEC：粉尘云最小爆炸浓度。

$H < MEC < L$

——L：发生爆炸的最低粉尘浓度。

——H：不发生爆炸的最高粉尘浓度。

由此得出：在本实验条件下，粉尘云浓度为 50 g/m³ 时 3 次实验数据 P_{ex} 均 ≥ 0.05 MPa 认为发生爆炸，粉尘云浓度为 40 g/m³ 时 3 次实验数据 P_{ex} 均 ≤ 0.05 MPa 认为未发生爆炸，因此炭黑粉尘云的最小爆炸浓度 MEC：40~50 g/m³。

3.3. 炭黑粉尘云最小点火能测试实验

3.3.1. 实验测试条件及依据

粉尘云最小点火能测试结果受多种因素影响，包括粉尘自身性质、粉尘分散状态、火花发生参数以及环境特征[12]等。

依照 GB/T 16428-1996《粉尘云最小点火能测试方法》中规定：粉尘云的 E_{min} 介于 E_1 (连续 20 次实验未被点燃的最大能量值)和 E_2 (连续 20 次均出现被点燃的最小能量值)之间，即： $E_1 < E_{min} < E_2$ [13]。在

该实验条件下连续测试超过 20 次，观察粉尘能否被点燃。

3.3.2. 实验数据及结论分析

检测方法：依照 ISO/IEC 80097-20-2:2016 爆炸环境第 20-2 部分：材料特性可燃性粉尘实验方法，检测设备哈特曼管(MIKE 3)，样品以原始状态进行实验，实验环境温度 24℃，相对湿度 70%。粉尘云最小点火能(带电感)检测回路电感：1 mH、电极间距：6 mm；粉尘云最小点火能(不带电感)检测回路电感：<25 μH、电极间距：6 mm。在此实验条件下实验结论如表 4、表 5 所示。

Table 4. Minimum ignition energy of dust cloud (with inductance)

表 4. 粉尘云最小点火能(带电感)测试

序号	E [mJ]	U [KV]	实验次数	着火次数	是否点燃?
1	1000	11	80	0	否

Table 5. Minimum ignition energy of dust cloud (without inductance)

表 5. 粉尘云最小点火能(不带电感)测试

序号	E [mJ]	U [KV]	实验次数	着火次数	是否点燃?
1	1000	11	80	0	否

其中， E ：电容所储存的能量。

U ：储能电容的电压。

MIE：粉尘云最小点火能(带电感)。

$$E_1 < \text{MIE} < E_2$$

—— E_1 ：无法点燃粉尘云的最高能量。

—— E_2 ：能够点燃粉尘云的最低能量。

由此得出：在本实验条件下，炭黑粉尘云的最小点火能无论是带电感测试还是不带电感测试均未被点燃，炭黑粉尘云的最小点火能 $\text{MIE} > 1000 \text{ mJ}$ 。

3.4. 炭黑粉尘云最低着火温度

3.4.1. 实验测试条件及依据

按照《粉尘云最低着火温度测定方法》(GB/T16429-1996)中相关原则[14]：当 $L > 300^\circ\text{C}$ ， $\text{MIT} = L - 20^\circ\text{C}$ ，当 $L \leq 300^\circ\text{C}$ ， $\text{MIT} = L - 10^\circ\text{C}$ 。

3.4.2. 实验数据及结论分析

检测方法：依照 GB/T16429-1996 粉尘云最低着火温度测定方法，炭黑粉尘云最低着火温度使用检测设备高德伯格-格润瓦尔德实验炉 Godbert-Greenwald oven，样品以原始状态进行实验，实验环境温度 24℃，相对湿度 70%。在此实验条件下实验结论如表 6、图 2 所示。

Table 6. Minimum ignition temperature of dust cloud

表 6. 粉尘云最低着火温度

序号	T_{oven} [°C]	试验次数	着火次数	是否点燃?	备注
1	460	1	1	是	$L = 460^\circ\text{C}$
2	440	10	0	否	$H = 440^\circ\text{C}$

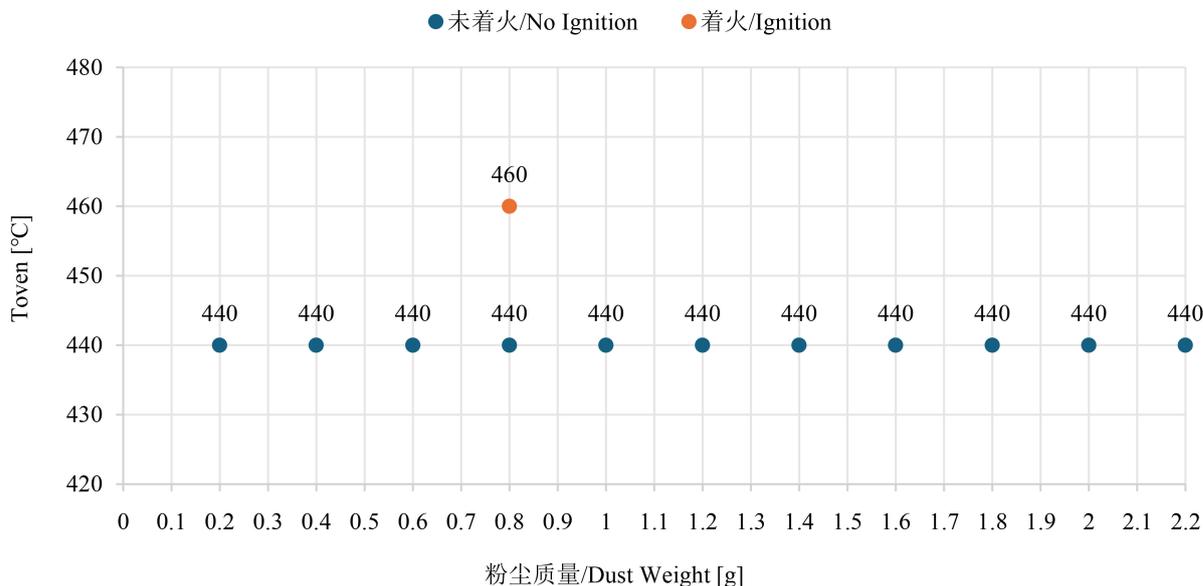


Figure 2. Minimum ignition temperature test of dust cloud

图 2. 炭黑粉尘云最低着火温度测试

其中, MIT: 粉尘云最低着火温度。

L : 发生着火的最低实验温度。

H : 不发生着火的最低实验温度。

T_{oven} : 实验温度。

由此得出: 在本实验条件下, 发生着火最低温度 L 为 460°C , 炭黑粉尘云的最低着火温度 $\text{MIT} = 440^{\circ}\text{C}$ 。

4. 实验结论与经验数据差异性比对分析

尽管通过上述实验结论得出在特定条件下炭黑粉尘呈现可爆性, 但发生爆炸需满足一定的参数条件, 与实际炭黑生产企业的控制参数存在一定的差异性, 结合炭黑生产企业实际控制参数与爆炸性触发条件对比进行差异性分析见表 7。

Table 7. Gap analysis between carbon black dust explosion test and experience data

表 7. 炭黑粉尘爆炸性测试实验数据与经验数据的差异性分析

序号	指标	经验数据	实验数据	差异分析	国内某炭黑工厂工艺控制参数
1	粉尘云最小爆炸浓度 MEC	依据《爆炸危险环境电力装置设计规范》(GB 50058-2014)附表 E 中粒径为 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 炭黑粉尘, 爆炸下限浓度 $36\sim 45\ \text{g/m}^3$ [2]。Turkevich 等[15]研究了空气中各种碳纳米粉末(包括炭黑、石墨烯和石墨)粉尘云的着火和爆炸特性。他们发现微米煤尘、细颗粒炭黑和石墨最小爆炸粉尘浓度(MEC)在 $100\ \text{g/m}^3$ 的范围内。	$40\sim 50\ \text{g/m}^3$	MEC 的实验数据和经验数值基本保持一致。	炭黑生产在密闭系统进行、密闭式管道输送、产尘点处负压收集、湿法造粒、工艺装置布置在露天框架结构的构筑物中避免粉尘的积聚; 先进的 PCME 粉尘探测技术以及除尘系统联锁停车技术的应用即使是存在散落的飘逸性粉尘, 也达不到爆炸下限 $40\sim 50\ \text{g/m}^3$ 。

续表

2	粉尘云最低着火温度 MIT	依据《爆炸危险环境电力装置设计规范》(GB 50058-2014)附表 E 中粒径为 10~20 μm 炭黑粉尘, 炭黑的高温表面堆积粉尘层(5 mm)的引燃温度为 535 $^{\circ}\text{C}$, 粉尘云的引燃温度则高于 600 $^{\circ}\text{C}$ [2]。李刚, 刘宗阳[16]等在粉尘云的最低着火温度测试中, 导电炭黑和色素炭黑在 450 $^{\circ}\text{C}$ 时发生着火现象。	440 $^{\circ}\text{C}$	实验得出的 MIT 测量值略小于经验数值, 这与试验样品中粒径差异有关。	炭黑生产工艺在主袋滤器前温度很高但系统内无氧, 无爆炸条件; 炭黑生产工艺在主袋滤器之后, 炭黑温度低于 200 $^{\circ}\text{C}$, 远低于粉尘云最低着火温度 MIT 440 $^{\circ}\text{C}$ 。
3	粉尘云最小点火能(带电感) MIE	参照《工贸行业重点可燃性粉尘目录(2015 版)》中可燃性悬浮粉尘物质最小点火能及能量分级中常见的易爆粉尘如环氧树脂、铝、镁、煤、糖、面粉等的 MIE 在 1~100 mJ, 同时此标准中并未收录炭黑粉尘 [17]。根据炭黑企业提供炭黑 SDS 中记载其最小点火能 > 10,000 mJ, 粉尘爆炸性分类属于 ST1-低粉尘等级。同时有研究 [15]表明多种碳纳米材料(包括炭黑)最小点火能 10 ² ~10 ³ J。	>1000 mJ	受实验条件限制(最大点火能测试为 1000 mJ), 最小点火能测试得出: 炭黑粉尘云最小点火能 > 1000 mJ 与经验数值中相关描述相符。同常规可燃粉尘相比炭黑粉尘的 EIA 相对较高。	炭黑输送管道已经设置静电跨接/静电接地, 不会达到最小的点火能, 无爆炸条件。
4	粉尘云最小点火能(不带电感) MIE		>1000 mJ		

通过以上实验数据与以往研究经验值对比分析得出尽管炭黑粉尘在一定条件下呈现“可爆性”, 但需满足特定条件: 炭黑粉尘云的最小爆炸浓度 40~50 mg/m^3 , 最低着火温度在 440 $^{\circ}\text{C}$; 最小点火能 > 1000 mJ。与炭黑生产工艺实际控制参数相比: 正常生产工作环境中因粉尘泄露、逸散出现的影响人员作业令人体感不适的粉尘浓度要比最小爆炸浓度低几个数量级 [8]-[10], 同时炭黑在密闭系统进行生产、产尘点处负压收集、密闭式管道输送、湿法造粒、工艺装置布置在露天框架结构的构筑物中避免粉尘的积聚; 实际只可能在工艺设备内部(如除尘器、斗式提升机、炭黑粉尘输送管道)出现粉尘云浓度达到最小爆炸浓度 40~50 g/m^3 的情况; 实际炭黑生产工艺在主袋滤器前温度较高但系统内无氧, 无爆炸条件; 炭黑生产工艺在主袋滤器之后, 炭黑温度低于 200 $^{\circ}\text{C}$, 远低于粉尘云最低着火温度 MIT 440 $^{\circ}\text{C}$, 同时炭黑输送管道均已设置静电接地/跨接, 消除静电影响, 无爆炸条件。

5. 结论

粉尘爆炸需要同时满足粉尘爆炸环境(包含粉尘属性为可燃性粉尘、爆炸下限浓度 C_{\min} 、粉尘云爆炸极限氧浓度 LOC)和有效的点火源(粉尘云最低点火能 MIE 和粉尘云最低着火温度 MIT), 尽管炭黑粉尘属于可燃性粉尘, 在空气中可燃烧或闷燃, 但依据实验测试结果和与过往研究经验值对比得出以下结论:

1) 炭黑粉尘云可爆性测试实验得出在浓度 750 g/m^3 浓度下, $P = 0.456 \text{ Mpa} \geq 0.030 \text{ Mpa}$, 判定炭黑粉尘云状态为“可爆”。

2) 粉尘云最小爆炸浓度测试实验得出: 炭黑粉尘云最小爆炸浓度 MEC: 40~50 g/m^3 , 实际生产中只可能在设备内部浓度出现此场景。炭黑生产工艺装置多采用露天或开敞式的布置常见为露天框架结构的

构筑物,可有效避免粉尘的积聚。炭黑生产装置中的反应炉、袋滤器、粉碎机、干燥机、湿法造粒机、料仓等设备均采用整体密闭或负压操作;造粒前的炭黑粉尘使用密闭式管道输送,有效防治粉尘的外泄。可能存在炭黑粉尘泄露的部位如:提升机、螺旋输送机、包装机等部位都设有负压吸尘系统。采用湿法造粒防止二次扬尘。另外,随着炭黑生产企业更为先进的 PCME 粉尘监测、除尘系统工艺联锁停等技术的应用以及实验室专用通风橱、通风柜的使用彻底排除了发生粉尘爆炸的可能性。

3) 炭黑粉尘云的最小点火能无论时带电感测试还是不带电感测试各 80 次的实验中均未被点燃,实验得出炭黑粉尘云的最小点火能 $MIE > 1000 \text{ mJ}$; 炭黑粉尘云的最低着火温度 $MIT = 440^\circ\text{C}$ 。炭黑生产工艺在主袋滤器前温度较高但系统内无氧,无爆炸条件;粉尘袋滤器之后,炭黑温度低于 200°C ,管道设有静电接地,不会达到炭黑粉尘爆炸最小点火能 MIE 和最低着火温度 MIT 。

综上,尽管实验得出炭黑粉尘在特定条件下呈现“可爆性”,参考实际炭黑生产工艺及安全设施设计在主袋滤器前温度高但系统内无氧,无爆炸条件;炭黑粉尘在主袋滤器炭黑温度最高 240°C 左右且在主袋滤器入口设有温度连锁(温度超过 260°C 持续 10 s 系统会自动触发连锁停车);粉尘袋滤器之后炭黑在管道内使用空气输送,炭黑温度低于 200°C 远低于粉尘云最低着火温度 $MIT 440^\circ\text{C}$,同时管道设有静电接地不会达到炭黑粉尘爆炸最小点火能,无爆炸条件。炭黑生产工艺装置设置了和工艺装置联锁的除尘系统如:袋式除尘器设置压差、温度报警如发生滤袋破损等引起的粉尘泄露或温度异常升高时触发联锁报警,袋式除尘器出口管道上设置了先进的颗粒物检测装置当颗粒物超标时联锁报警。实验室产生少量粉尘的操作在设置局部除尘装置,如通风橱、通风柜中进行,确保环境中的粉尘控制在极低水平。通过以上分析,结合《爆炸危险环境电力装置设计规范》GB50058-2014 规定的粉尘爆炸环境危险区域划分的豁免条件[4],炭黑工厂在粉尘防治系统和安全联锁系统可靠的前提下分离粉碎工序、造粒干燥工序、输送包装工序的主要产尘点可判定为非粉尘爆炸危险区。

参考文献

- [1] 郝之勇. 炭黑粉尘防爆与安全技术研究应用[J]. 橡胶技术与装备, 2025(51): 14-17.
- [2] 应急管理部. 可燃性粉尘爆炸风险评估及特性参数测定方法: GB/T 16425-2025 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2025.
- [3] The Association of German Engineers (1990) Dust Fires and Dust Explosions, Hazards, Assessment, Protective Measures Test Methods for the Determination of the Safety Characteristic of Dusts: VDI 2263-1-1990. The Association of German Engineers.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 爆炸危险环境电力装置设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [5] 国家生产监督管理总局. 粉尘防爆术语: GB/T 15604-2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [6] 江湖一佳, 刘柏清, 丁建旭, 等. 国内外粉尘爆炸特性参数测定标准对比研究与分析[J]. 工业安全与环保, 2023(19): 66-70.
- [7] 薛琨, 韩文虎, 陈东平. 现代燃烧和爆炸理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2020.
- [8] ECKHOFFRK, 李刚. 可燃粉尘爆炸基础研究综述[J]. 安全与环境学报, 2021(3): 1068-1075.
- [9] ECKHOFFRK (2003) Dust Explosions in the Process Industries. 3rd Edition, Gulf Professional Publishing/Elsevier.
- [10] ECKHOFFRK (2016) Explosion Hazards in the Process Industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 8, 126-127.
- [11] ECKHOFFRK (2019) Dust Explosion Fundamentals. Elsevier, 7-32.
- [12] 王志宇, 杨遂军, 栾伟玲, 等. 粉尘云最小点火能测试技术综述[J]. 科学技术与工程, 2023(4): 1357-1369.
- [13] 中国煤矿工业协会. 粉尘云最小点火能测试方法: GB/T 16428-1996 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [14] 中国煤矿工业协会. 粉尘云最低着火温度测试方法: GB/T 16429-1996 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [15] Turkevich, L.A., Dastidara, G., Hachmeister, Z., et al. (2015) Potential Explosion Hazard of Carbonaceous Nanoparticles: Explosion Parameters of Selected Materials. *Journal of Hazardous Materials*, 295, 97-103.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.03.069>

- [16] 李刚, 刘宗阳, 常伟达, 张晓宇. 碳素材料粉尘着火爆炸实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(2): 298-304.
- [17] 国家安全生产监督管理总局. 工贸行业重点可燃性粉尘目录 2015 版[S]. 北京: 中国化学品安全协会, 2015.