

# 炭黑除尘：系统设计、过滤器选择和除尘器安全性

炭黑被广泛应用于整个橡胶行业。了解炭黑粉尘的特性以及这些特性给粉尘控制带来的具体挑战，对于设计和实施有效的粉尘收集系统至关重要。精心设计的集尘系统将确保符合OSHA法规和NFPA炭黑粉尘安全标准。

## 1 炭黑粉尘的特性和粉尘收集方面的挑战

炭黑是一种主要由元素碳组成的黑色细粉末。它是通过石油、天然气或煤焦油等碳氢化合物材料的受控不完全燃烧或热分解产生的。它在物理和化学上都有别于普通的烟尘或黑碳；黑碳（烟尘）通常由大约60%的元素碳组成，而炭黑是一种高度精炼的形式，通常含有97%以上的元素碳。

### 1.1 燃烧性

炭黑主要由元素碳（通常超过95wt.%）组成，少量的氢、氧、硫和氮作为杂质存在。这种化学成分使炭黑粉尘在适当的情况下，例如悬浮在空气中的云层中，有可能会燃烧。

### 1.2 粒度

炭黑颗粒非常小，通常直径在10~500 nm之间。这种小颗粒尺寸使捕获和过滤这些颗粒更具挑战性，因为它们很容易通过空气传播并穿透标准过滤器。

### 1.3 结构表面积

炭黑的表面积特别高，通常在20~2000 m<sup>2</sup>/g之间。这种大的表面积影响了炭黑与周围材料（包括过滤器）的相互作用方式，这会导致过滤器负载增加并缩短过滤器使用寿命。

### 1.4 形态学

炭黑颗粒具有不规则、无定形的结构，由熔融的球形初级颗粒组成，这些初级颗粒形成大的团聚体。团聚体会改变灰尘的粒度分布，导致小颗粒和大团聚的混合，这会使过滤策略复杂化。

### 1.5 电导率

炭黑由于其相互连接的导电颗粒网络而表现出导电性。这种特性会导致灰尘收集系统中积聚静电，从而存在点火和爆炸的风险。当过滤介质被碳浸渍时，这些特性也可用于消除静电。

### 1.6 疏水性

炭黑颗粒通常是疏水性的，这会使它们难以润湿并导致它们聚集。这意味着湿式洗涤系统可能对炭黑的效果较差。

### 1.7 孔隙率

炭黑是一种具有颗粒间孔和颗粒内孔的高度多孔材料。孔隙率会影响吸附能力、导电性和分散性等性能。这可能会对灰尘收集产生间接影响，因为炭黑的多孔性会影响分散，导致灰尘分布不均匀，从而影响灰尘捕获的效率。炭黑的吸附特性也会导致对生产环境中存在的气体和蒸汽的吸附，这可能会影响灰尘特性，包括可燃性。

## 2 炭黑粉尘的健康风险和允许接触限值

暴露在炭黑粉尘中会对工人和环境造成一些健康和安全风险。其中许多风险来自于炭黑颗粒的极小尺寸；直径为2.5 μm或更小的呼吸颗粒物（PM<sub>2.5</sub>）会对健康造成更大的风险，因为它们会被深深吸入肺部，滞留在肺组织中，甚至会进入血液，进入其他身体系统。与炭黑粉尘相关的一些关键风险包括以下内容：

### 2.1 呼吸系统问题

吸入炭黑粉尘会引起呼吸系统的刺激和炎症，导致咳嗽、呼吸急促和胸闷等症状。长期暴露在炭黑粉尘中也会导致慢性支气管炎和肺气肿等肺部疾病。

### 2.2 眼睛刺激

如果炭黑粉尘颗粒与眼睛接触，会刺激眼睛，导致眼睛产生发红、发痒和流泪等症状。

### 2.3 皮肤刺激

炭黑粉尘会引起皮肤刺激和皮炎，尤其是对敏感

皮肤或已有皮肤状况的人。

## 2.4 潜在致癌性

国际癌症研究机构 (IARC) 将炭黑列为2B类致癌物, 这意味着它可能对人类致癌。有证据表明, 接触炭黑和多环芳烃 (PAHs) 可能是一个特别令人担忧的问题, 多环芳烃通常共存。IARC将PAHs归类为第1类致癌物, 这意味着已知PAHs会导致人类癌症, 包括肺癌、皮肤癌和癌症。

出于这些原因, 职业健康与安全管理局 (OSHA) 对炭黑进行了监管, 以保护工人免受与工作场所相关的潜在健康和安全隐患。OSHA已将炭黑的允许接触限值 (PEL) 确定为每立方米空气3.5毫克 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ), 以8h时间加权平均值 (TWA) 计算。雇主必须确保工人接触炭黑的程度不超过这一限度。雇主还应了解美国国家职业安全与健康研究所 (NIOSH) 和美国政府工业卫生学家会议。这些建议基于最佳实践和健康指南, 但不具有法律效力。NIOSH为炭黑本身和存在多环芳烃的炭黑制定了单独的比率建议 (表1)。

表1 炭黑接触限值 (OSHA、NIOSH 和 ACGIH)

OSHA PEL	NIOSH REL	ACGIH TLV
8 h TWA	Up to 10 h TWA	8 h TWA
3.5 $\text{mg}/\text{m}^3$	3.5 $\text{mg}/\text{m}^3$ , 0.1 $\text{mg}$ PAHs/ $\text{m}^3$ (存在多环芳烃的炭黑)	3 $\text{mg}/\text{m}^3$ (可吸入颗粒物)

## 3 炭黑及其燃烧风险

炭黑属于可燃固体。这意味着, 如果暴露在点火源 (如火花或火焰) 中, 它可能会起火燃烧。炭黑也有粉尘爆炸的危险, 这意味着, 如果它被细分并分散在空气中, 它可以形成一种爆炸性混合物, 通过火花或火焰点燃。



图1 粉尘火灾和爆炸五边形

炭黑等粉末状材料的燃烧风险取决于几个因素, 通常称为爆炸五边形。爆炸五边形的所有五个元素都必须存在, 才能发生可燃粉尘爆炸 (图1)。其中包括以下内容:

(1) 可燃粉尘: 散布在空气中能燃烧或支持燃烧的细小固体物质:

(2) 分散: 可燃粉尘必须分散在空气中, 形成浓度高于最小爆炸浓度 (MEC) 的粉尘云。

(3) 氧气: 大气中必须有足够的氧气支持燃烧过程。

(4) 点火源: 需要火花、火焰、热表面或静电等点火源来启动燃烧过程。

(5) 封闭: 尘云必须封闭在封闭空间内, 如房间、容器或设备, 才能发生爆炸。

粉末材料的燃烧性能取决于颗粒大小、浓度、化学成分和点火源的存在等因素。可燃材料的爆炸指数包括最小爆炸浓度 (MEC)、最小点火能量 (MIE)、最大爆炸压力 ( $P_{\text{max}}$ ) 和  $K_{\text{st}}$  值 (根据密闭容器中爆炸过程中的压力上升率确定的粉尘相对爆炸严重程度的衡量标准)。  $K_{\text{st}}$  值用于根据粉尘的爆炸潜力将其分为不同的爆炸类别 (St 0、St 1、St 2和St 3)。(请注意, 粉尘的爆炸指数和ST级是特定样品的特定值; 设施中的炭黑粉尘可能具有与以下典型炭黑材料不同的值和ST级。需要进行材料测试来确定特定粉尘样品的确切爆炸指数值。)

元素碳是一种能量丰富的材料, 有可能在氧气存在的情况下支持燃烧反应。典型的炭黑粉尘通常被归类为ST 1级材料, 或可燃材料的最低级别 (弱爆炸)。然而, ST 1级粉尘 (如炭黑) 仍会产生非常大的破坏性粉尘爆炸。影响炭黑燃烧风险的其他因素包括:

(1) 颗粒尺寸: 较小的颗粒产生更高的燃烧风险, 因为: 1) 它们更有可能以云的形式悬浮在空气中; 和2) 它们具有更高的表面积以促进与空气中的氧气的反应。

(2) 静电特性: 炭黑在搬运和加工过程中会积聚静电, 如果管理不当, 可能会成为点火源。

(3) 最小爆炸物浓度 (MEC): 炭黑的MEC相对较高, 通常为50  $\text{g}/\text{m}^3$  或更高, 具体取决于样品特性。这比炭黑的PEL高出几个数量级, 因此如果符合OSHA PEL, 一般设施的爆炸风险较低。然而, 粉尘

仍有可能在储存箱、有盖的输送系统、搅拌器和灰尘收集系统内积聚到爆炸性浓度。

表2 炭黑爆炸指数

	KST(bar/s)	P <sub>MAX</sub> (bar)	最小爆炸浓度 (MEC)	最小点火能量 (MIE)
炭黑 (典型试品)	30~100 bar/s	10 bar	>50 g/m <sup>3</sup>	>10 J

应注意的是, 如果炭黑与其他易燃或可燃材料 (包括其他可燃固体或可燃气体和蒸汽 (混合混合物)) 混合, 爆炸指数 (表2) 可能会发生巨大变化。确定特定粉尘爆炸风险的最佳方法是通过材料测试进行粉尘危害分析 (DHA)。

## 4 炭黑集尘系统设计

了解炭黑粉尘的材料特性、接触和燃烧风险以及监管接触限值将有助于设计粉尘控制系统。粉尘控制系统必须确保工人不会暴露在高于规定PEL的炭黑中。它还必须符合美国国家防火协会 (NFPA) 关于可燃粉尘收集的标准。在设计炭黑集尘系统时, 有几个因素需要考虑。

### 4.1 除尘器类型

建议对炭黑进行干式除尘; 由于材料的疏水性, 不建议进行湿式收集。炭黑粉尘最常见的除尘器类型是袋式除尘器和筒式除尘器 (图2)。对于大多数使用炭黑的用户, 筒式除尘器提供了显著的优势。这些除尘器占地面积更小, 初始成本更低, 操作和维护更容易, 成本更低。它们还可以配置各种类型的过滤器滤芯。



图2 筒式集尘器可有效控制大多数应用场合的炭黑

### 4.2 捕集方法和捕集罩设计

对于产生大量炭黑粉尘的地方, 建议采用源捕获系统, 将粉尘源封闭或置于捕获罩内。如果无法完全控制粉尘产生过程, 可能需要二次环境过滤或通风系

统来清洁整个设施的空气。在某些设施中, 可以使用正负压区来防止炭黑粉尘扩散到清洁区域。

### 4.3 过滤

选择一种过滤介质, 既能提供较高的过滤效率, 又能进行有效的清洁和维护。常用的炭黑过滤介质包括聚酯和聚四氟乙烯膜过滤器。由于炭黑粉尘的静电特性, 建议使用防静电过滤介质来收集炭黑粉尘。由于炭黑粉尘的粒径较小, 因此应根据满足 PEL 所需的捕集率, 选择最低效率等级值 (MERV) 为 14 或更高的筒式过滤器。在必须满足非常严格的空气质量标准的情况下, 或者在处理高度敏感的工艺或设备时, 可能有必要使用 HEPA 后置过滤器。渐进式过滤系统由不同过滤效率的过滤器组合而成, 可以用较便宜、效率较低的过滤器去除较粗的颗粒, 从而延长较昂贵、效率较高的 MERV 或 HEPA 过滤器的使用寿命 (表 3)。

表3 MERV (最低效率额定值) 14、15、16和高效空气过滤器的捕获效率

过滤器类型	粒径0.3~1.0μm	粒径1.0~3.0 μm	粒度3.0~10 μm
MERV 14	≥75%	≥85%	≥90%
MERV 15	≥85%	≥90%	≥90%
MERV 16	≥95%	≥95%	≥95%
HEPA	≥99.97%	≥99.97%	≥99.97%

由于炭黑会快速装入过滤器, 因此在过滤器上安装过滤器脉冲装置也很重要。这将把过滤器上多余的粉尘脉冲到收集箱中, 从而延长过滤器的使用寿命。过滤介质还应具有适当的气布比, 以防止压降过大和过滤器堵塞。

### 4.4 接地

由于炭黑粉尘具有很强的静电特性, 接地对于最大限度地降低静电放电和点火风险至关重要。

### 4.5 系统尺寸和气流

除尘器的大小必须与处理过程中产生的空气量和粉尘负荷相适应。确保系统在所有粉尘产生点都有足够的气流和捕集速度, 以防止粉尘逸散到工作场所。

### 4.6 防爆保护

由于炭黑粉尘具有可燃性, 因此有必要采取防爆措施, 如防爆通风、抑制系统或隔离装置, 以最大限度地降低粉尘爆炸的风险。确保粉尘收集系统符合 NFPA 标准和 OSHA 有关可燃粉尘的规定。

### 4.7 除尘器安全和 NFPA 合规性

处理炭黑的设施必须采取措施, 确保遵守有关收

(下转第11页)