输煤转运站曲线落煤管诱导风抑制与源头抑尘协同设计研究

何喜安　王国强　宿建翔

大唐吉林发电有限公司辽源发电分公司 吉林 辽源 136200

【摘　要】：针对曲线落煤管内煤流卷吸空气形成诱导风并加剧粉尘逸散的问题，分析了弯曲段气固两相流分离、局部负压及煤流冲击对粉尘生成与扩散的影响，提出由扩径弧形流道、导流板、环向喷雾、密封罩和负压抽排构成的协同抑尘方案，并通过 CFD 设计、实验室模拟和现场工业试验进行验证。结果表明，曲率半径由 900 mm 增至 1500 mm 并配置 30° 导流板后，出口风速由 7.0 m/s 降至 2.5 m/s，粉尘浓度由 120 mg/m3 降至 35 mg/m3，耗水量下降 9.7%。在 500～700 t/h 现场负荷下，协同方案平均粉尘浓度为 28 mg/m3，平均抑尘效率达到 92.4%，较传统方案提高 17.7 个百分点。研究表明，流场整形能够有效改善雾滴与煤尘的接触条件，协同负压抽排可进一步抑制残余粉尘外逸，为既有输煤转运站的低耗改造提供技术依据。

【关键词】：曲线落煤管；诱导风抑制；源头抑尘；流场优化；协同控制

DOI:10.12417/2811-0528.26.21.048

引言

输煤转运站落料过程中，煤流在曲线落煤管内持续加速并发生偏转，容易形成气流卷吸、局部负压和颗粒回流等复杂现象。诱导风不仅将冲击落料产生的一次粉尘带入作业空间，还会扩大细颗粒的扩散范围，使传统喷雾和末端除尘难以达到稳定治理效果。单纯提高喷雾供水量可能引发煤料增湿、管壁黏附及下游设备堵塞，单独扩大抽风量则可能增加除尘系统负荷和运行能耗。因此，曲线落煤管粉尘治理需要从煤流轨迹、气流组织、雾滴捕集和密闭抽排等环节建立协同控制关系。本文以某 300MW 机组输煤转运站为对象，采用 CFD 方法优化弧形流道和导流板结构，结合环向低压喷雾、密封罩及负压抽排装置，构建流场整形与源头抑尘一体化方案，并通过实验室模拟和现场试验评价其对诱导风、粉尘浓度、耗水量及运行适应性的改善作用，为类似输煤系统的工程改造与参数匹配提供参考。

1 输煤转运站曲线落煤管粉尘问题分析

曲线落煤管内煤流受重力作用持续加速下落，并在弯曲段发生偏转、收缩以及紊动，煤流携带的周围空气随之被加速输运。当煤流断面逐渐收窄且下游排料空间形成局部低压区时，外部空气会从落煤管出口、检修缝隙及设备连接处涌入，形成沿煤流方向运动的诱导风。其流动过程具有速度高、脉动强以及夹带范围广的特性。

以某 300MW 机组输煤转运站为例，原落煤管出口诱导风风速达到 5—8m/s，气流把落料点和管壁附近的细颗粒煤尘持续带入转运站空间，使作业区域粉尘浓度达到 GBZ 2.1—2019 相关限值的 3—5 倍。粉尘来源可划分为一次扬尘以及二次扬尘：前者主要由煤流冲击受料面、煤块破碎和物料反弹引起，后者则由诱导风携带已生成粉尘扩散形成，二者在落料瞬间叠加，构成曲线落煤管粉尘治理的主要对象。

2 诱导风抑制与源头抑尘协同设计方案

2.1 曲线落煤管流场优化设计

针对曲线落煤管弯曲段气固两相流分离以及局部负压增强问题，运用计算流体力学 CFD 对流道轮廓进行参数化设计。模型把煤流体积分数、颗粒速度以及空气压力作为耦合变量，并将出口静压以及壁面无滑移条件纳入边界设置。原落煤管直径 D 为 600 mm，曲率半径为 1.5D，即 900 mm。较小转弯半径会使煤流集中冲击外弧壁面，并在内弧侧形成回流区，促使空气向出口方向汇集。

鉴于管内压差是诱导风形成的直接驱动力，其平均风速可依据伯努利方程进行简化计算，具体表达式如下：

$$v_i = C_d\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

其中，v_i表示诱导风平均速度，单位为 m/s；C_d表示流量修正系数，无量纲；Δp 表示落煤管内部与出口区域的静压差，单位为 Pa；ρ 表示空气密度，单位为 kg/m³ 。

CFD 方案比选将曲率半径由 1.5D 扩大至 2.5D，即由 900 mm 调整为 1500 mm，使煤流偏转过程沿弧形壁面连续展开，减弱外弧冲击以及内弧涡流。弯曲段入口增设倾角为 30° 的导流板，导流板前缘与来料方向衔接，末端指向受料带中心区域，用于把分散煤流约束为贴壁稳定料束，同时减少煤流携带空气的有效截面。

优化后的结构见图 1。流道扩径过渡段、2.5D 弧形段以及 30° 导流板共同构成诱导风抑制单元，可降低局部压力梯度以及气流脉动强度。在额定输煤量对应的设计工况下，出口诱导

风速度控制目标由 5—8 m/s 降至 2—3 m/s，并为后续雾滴进入落料核心区保留稳定空间。

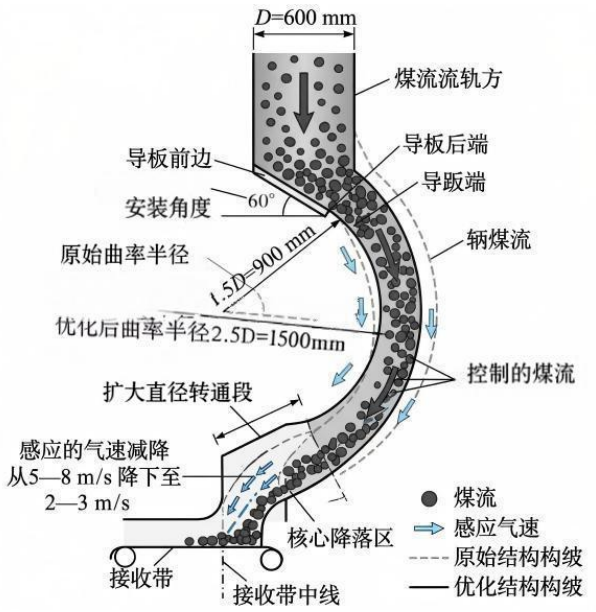


图 1 优化后曲线落煤管结构架构图

2.2 源头抑尘装置集成设计

结合优化后出口诱导风降至 2—3 m/s 的设计条件，源头抑尘装置把低压喷雾以及负压抽排集成于落煤管出口与受料带密封罩之间。喷雾支管沿落料点上方环向布置，喷嘴朝煤流中心线倾斜，使雾滴顺着降速气流进入颗粒富集区。供水压力设为 0.3—0.5 MPa，雾滴粒径控制在 50—100 μm，兼顾细煤尘碰撞捕集以及抗气流偏移能力，并可限制煤料过度增湿。喷嘴选用可拆卸防堵结构，前端设置过滤单元，以适应输煤转运站工业水水质以及连续运行需求。

负压抽排口设置在密封罩上部，并避开煤流冲击路径，抽风量按 1500—2000 m^3 /h 进行配置。负压抽排借助风机在罩内维持微负压，把未被雾滴捕集的悬浮颗粒引入既有布袋除尘管网。抽风口前设置均流格栅以及挡料构件，削弱局部高速吸气对雾场的牵引，避免大颗粒煤料进入抽排支管。密封罩以落料点为中心围合 1 m 范围，形成相对封闭的抑尘区，检修门以及带式输送机接口运用柔性密封进行衔接，减少外部空气无序补入。

装置运行参数与输煤设备启停信号进行联锁，煤流到达前开启抽排支路，喷雾随物料进入同步投入；断料后关闭喷雾，抽排维持短时延迟，用于排出罩内残余含尘空气。供水支路设置压力调节阀以及流量监测点，抽风支路设置风量调节阀以及压差监测点，可依据煤种含水率、输煤量以及罩内负压变化修正运行参数。喷雾承担落料瞬间的颗粒润湿，负压抽排约束残余粉尘外溢，两类装置与前端流场整形共同构成连续控制边界。

2.3 协同控制逻辑与参数匹配

协同控制系统以可编程逻辑控制器 PLC 作为核心控制单元，把落煤量、喷雾压力、抽排风量以及密封罩内负压纳入同一控制回路。落煤量信号由皮带秤或给料机控制系统实时传输，喷雾支路配置压力变送器，抽排支路配置风量计与压差变送器，相关信号经现场总线传入 PLC 后完成工况识别。煤流启动信号提前触发抽排风机，喷雾支路则依据落料确认信号投入运行，使罩内气流组织先于粉尘释放形成稳定的微负压环境。

参数调节采用额定输煤量对应的基础值作为控制基准。当实时落煤量较基准值增加 10%时，PLC 把喷雾压力设定值提高 5%，同时把抽排风量设定值提高 8%，以适应粉尘生成量以及含尘气流输运强度的同步变化。喷雾压力调节范围保持在 0.3—0.5 MPa，抽排风量维持在 1500—2000 m^3 /h，调节过程设置上下限约束，避免供水压力过高造成煤料增湿，也防止抽排能力过大而牵引雾滴偏离落料核心区。

控制程序设置煤流确认、延时投入以及断料延时停机等状态转换条件。煤流信号持续稳定后，喷雾与抽排装置按照设定顺序投入，系统指令响应时间控制在 0.5 s 以内。断料信号出现后，喷雾支路停止供水，抽排风机继续运行一段预设时间，把密封罩内残余含尘空气导入布袋除尘系统。压力、风量或负压信号超出限定范围时，PLC 发出报警并把相关支路切换至保护工况。

参数匹配还需结合煤种含水率、输煤负荷以及落料点密封状态进行修正。含水率较低且细煤尘比例较高时，优先在允许范围内增加喷雾压力；密封罩内负压不足时，则调节抽排风量与风阀开度，避免单独提高风机频率形成局部高速吸气。由此把流道整形、雾化捕集以及负压约束纳入连续控制链路，使各执行单元保持相互适配。

3 协同设计方案效果评估与验证

3.1 实验室模拟测试结果分析

为检验协同设计对诱导风以及粉尘扩散的抑制能力，搭建直径 600 mm 的等比例封闭试验台，煤样含水率为 8.2%，输煤量稳定在 600 t/h。测点位于出口下游 500 mm 处，运用热线风速仪以及激光粉尘仪连续采集数据。每组工况运行 20 min 并重复 3 次，测试均值见表 1。

表 1 实验室模拟方案性能对比表

方案	曲率半径/mm	导流板倾角/°	喷雾压力/MPa	抽排风量/$m^3 \cdot h^{-1}$	出口风速/$m \cdot s^{-1}$	粉尘浓度/$mg \cdot m^{-3}$	耗水量/$L \cdot h^{-1}$
原方案	900	0	0.40	0	7.0	120	620
协同方案	1500	30	0.40	1800	2.5	35	560

原方案保留 900 mm 曲率半径以及常规喷雾，协同方案把曲率半径调整为 1500 mm，同时配置 30° 导流板、环向喷雾以及负压抽排。两组喷雾压力均为 0.40 MPa，以削弱供水差异的干扰。协同方案出口风速由 7.0 m/s 降至 2.5 m/s，降幅为 64.3%；粉尘浓度由 120 mg/m³ 降至 35 mg/m³，降幅达到 70.8%。

出口风速下降说明扩径弧段以及导流板削弱了煤流卷吸。粉尘降幅高于风速降幅，表明低速气流延长了雾滴与细颗粒的接触时间，负压抽排进一步约束残余粉尘外逸。耗水量下降 9.7%，试验期间未出现连续积煤，方案并非依靠增水取得抑尘效果。

3.2 现场工业试验数据验证

现场工业试验选取某 300MW 机组输煤转运站作为验证对象，保持原煤种、带式输送机运行方式以及测点位置基本一致，分别考察传统喷雾方案和协同设计方案在不同输煤负荷下的粉尘控制表现。现场测点布置于落料点下游 500 mm 处，连续采集出口风速、密封罩内负压以及作业区域粉尘浓度。试验结果表明，协同方案在 500～700 t/h 输煤负荷范围内均保持稳定抑尘效果，粉尘浓度为 26～30 mg/m³，平均值降至 28 mg/m³，达到相关职业卫生控制要求。

从现场监测曲线来看，传统方案在落料瞬间出现明显粉尘峰值，且高负荷工况下峰值持续时间延长；协同方案借助弧形流道、导流板以及密封罩内微负压，能够把出口风速稳定控制在 2.3～2.8 m/s，粉尘峰值随之受到限制。现场平均抑尘效率达到 92.4%，较传统方案提高 17.7 个百分点，耗水量还低于原试验方案，说明流场整形对喷雾捕集具有协同作用。

4 结语

曲线落煤管粉尘治理的关键在于削弱煤流卷吸空气的能力，并使喷雾捕集区域与煤尘释放区域保持稳定匹配。扩径弧形段和导流板能够改善煤流偏转状态，降低出口风速及局部气流脉动；密封罩、环向喷雾和负压抽排则形成对落料粉尘的分级控制。试验结果表明，该方案在不同输煤负荷下具有较好的稳定性，可在降低粉尘浓度和抑尘能耗的同时减少供水需求。工程应用中应依据管径、煤种含水率、输煤负荷及既有除尘管网能力校核结构与运行参数，避免直接套用固定值。对于空间受限或落料轨迹变化较大的转运站，还需结合现场测量和流场分析开展模块化调整，以保障长期运行中的防堵、防积煤及检修可靠性。

参考文献：

[1] 施雯,何浩天.基于 BIM 技术的蒸发系统工艺管道及钢架台设计[J].大众标准化,2025,(22):178-180.

[2] 蒋仲安,张兆盈,张勇,杨向东,陈雅.选煤厂转载点多种控尘措施及智能排风效果分析[J].矿业安全与环保,2024,51(06):9-17+25.

[3] 尚明,张晓辉,曾红久,汤国伟.选煤厂选煤工艺产尘特性研究——以哈拉沟选煤厂为例[J].中国安全生产科学技术,2025,21(05):95-101.

[4] 梁杰,史帅.关于输煤系统粉尘综合治理的研究与应用[J].中国设备工程,2024,(24):248-250.

[5] 佟云,许诺,徐露露,赵旭鹏,杨绪霆,丁晓文.某热电厂全封闭导料槽技术对输煤系统粉尘治理效果分析[J].工业卫生与职业病,2025,51(06):564-566.