

导料槽密封性研究与应用

曲学华，亢瑞新

(内蒙古大唐国际托克托发电有限责任公司，内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要 在散状物料输送过程中，导料槽密封失效会引发粉尘逸散、物料损耗等问题，需结合输送物料特性与实际运行工况开展导料槽密封性研究。研究目标是借助理论分析、技术创新与实验验证，提升导料槽密封性能。研究先分析导料槽工作原理、密封性相关理论及影响因素，再研发新型密封结构与高性能聚氨酯基复合密封材料，同时实现技术与材料协同优化，最后通过数值模拟与实验验证方案有效性。研究结果显示，经优化的导料槽密封效能明显增强，可有效控制粉尘逸散，符合工业输送的环保与稳定要求。

关键词 导料槽；密封性；散状物料输送；密封结构设计；密封材料

中图分类号：TM62

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.035

0 引言

导料槽是散状物料输送系统中的关键部件，其密封效果直接关系到生产环境质量、设备运行寿命与环保合规要求。当前阶段，传统导料槽常因密封结构设计不合理、密封材料性能不足等问题，难以达到高效密封的使用需求。这一问题不仅导致物料浪费，还会加重粉尘污染，对工作人员身体健康与周边生态环境产生不利影响。基于上述问题，围绕导料槽密封主题，从基础理论分析、技术与材料创新、模拟与实验研究三个方面展开，从而有望突破现有密封技术瓶颈。

1 导料槽密封性基础理论

1.1 导料槽工作原理及结构组成

在火电厂输煤系统中，导料槽核心功能为在煤炭输送过程构建封闭通道，工作原理以物料引导、气流控制、密封防护三者协同为核心。实际运行时，煤炭从落煤管、料斗、给料机等上游设备落入导料槽，伴随气流运动形成诱导风，导料槽需靠自身结构约束煤炭运动轨迹，避免煤炭撒落，同时平衡槽内气流压力，削减粉尘逸散。就结构组成而言，导料槽主要包含槽体、盖板、侧挡板、密封件及支撑组件五大核心部分。槽体承担煤炭输送主体通道作用，多由钢板焊接制成，需具备足够刚度承受煤炭冲击，防止结构变形破坏密封空间；盖板覆盖槽体顶部，通过螺栓与槽体连接形成封闭空间，部分盖板设计为可拆卸样式，方便后期设备的检修与维护；侧挡板装于槽体两侧，与输送带边缘配合，限制煤炭横向偏移，避免煤炭撞击槽体侧壁产生粉尘飞溅；密封件为保障密封性的关键部件，

主要设置在侧挡板与输送带接触处、盖板接缝处，用于填充间隙，阻断粉尘逸散通道；支撑组件包含支架、托辊等，用于固定槽体，保证导料槽与输送带维持平行状态，避免结构偏移致使密封件与输送带接触不均，破坏密封效果。

1.2 密封性相关理论

从流体力学角度分析，导料槽内粉尘逸散本质为内外压力差驱动气流流动的过程。当煤炭下落产生的诱导风使槽内压力高于外界大气压时，气流会携带粉尘向压力较低的外界流动，若密封结构无法阻断气流通道，便会出现粉尘外溢，此过程符合伯努利方程中压力差与流体流速的关联规律，即槽内与外界压力差越大，气流流速越快，粉尘逸散风险越高。从材料力学角度分析，密封件长期使用中要维持自身形态和弹性，抵抗煤炭摩擦、温度变化造成的变形和磨损，性能需达成弹性回复性与耐磨性的平衡。密封件与输送带接触时，需靠自身弹性贴合输送带表面，填充微小间隙，同时具备足够硬度减少煤炭摩擦造成的损耗，这涉及材料的弹性模量、断裂伸长率等力学参数与实际工况的适配性。

1.3 密封性影响因素

从结构设计层面看，密封件的截面形状、侧挡板的高度与角度、盖板的拼接方式均会影响密封性。密封件截面设计不合理时，难以与输送带表面完全贴合，会形成初始间隙；侧挡板高度不合理，易造成裙板密封不足或磨损加剧，使煤炭在输送过程中溢出，同时导致诱导风直接扩散至外界；盖板拼接处若未采用密封胶或搭接结构，接缝处会成为粉尘逸散通道。从物

料特性层面看，煤炭的粒度、湿度、磨损性方面的差异会对密封效果产生不同影响。细颗粒煤炭，比如较为干燥细碎的煤种，更易随气流穿过密封间隙；高湿度煤炭易粘结在密封件表面，导致密封件变形，破坏贴合度；高磨损性煤炭会加速密封件的损耗，缩短密封件使用寿命，增加密封失效风险。从运行工况层面看，输送带运行速度、煤炭输送量、环境温度是关键影响因素。输送带速度提升，煤炭下落形成的诱导风会随之增强，槽内压力差变大，粉尘逸散风险升高^[1]。

2 密封技术与材料创新

2.1 新型密封结构设计

在火力发电站输煤系统中，导料槽须应对燃煤颗粒冲击、高诱导风及长期磨损等工况，侧板密封结构采用“双层密封+连续支撑”方案。侧板处配备直板式防溢裙板，取整体无拼接样式，与导料槽长度完全匹配，借夹持器与角铝完成固定，确保裙板与输送带表面紧密贴合，阻断燃煤颗粒与粉尘从侧板间隙溢出；裙板下方搭配超高分子量聚乙烯托板装置，对输送带形成连续支撑，避免输送带因承载燃煤出现“波浪形”波动，输煤系统中燃煤输送量波动大，输送带易因物料分布不均产生局部下沉，该托板可消除波动对裙板贴合度的破坏。出口密封结构以风速控制与二次防护为核心，采用“PTFE 抑尘帘+彩钢板导流”组合方案。出口处布置多道 PTFE 抑尘帘，帘体由密集抑尘条构成，抑尘条直径约 0.2 mm，通过无螺栓连接完成固定；在输煤系统中，燃煤下落产生的诱导风易携带细煤尘从出口逸散，该结构依流体力学原理，让直线运动的诱导风穿过帘体后形成涡流，消耗诱导风能量以降低风速，同时吸附逸散煤尘；出口外侧加装彩钢板与导料槽出口连接，形成二次密封屏障，减小外界风力对出口区域气流的干扰，避免外界气流倒灌带动煤尘扩散。尾部密封结构采用“多层橡胶条密封箱”方案，尾部密封箱内设置多道直径 6 mm 的橡胶条，呈叠加排列形成多重密封屏障；在输煤系统中，导料槽尾部因输送带运行动态变化，易出现密封间隙，该结构既能阻止含尘气体与燃煤颗粒从尾部外溢，又能让少量残留燃煤通过密封间隙后回落至导料槽内随物料运走，避免燃煤堆积引发堵料。

2.2 高性能密封材料研发应用

在输煤系统中，裙板须长期与输送带、燃煤颗粒接触，通过弹性贴合输送带表面，并抵御燃煤摩擦损耗，

其抗拉强度 $\geq 285 \text{ kgf/cm}^2$ ，撕裂强度 $\geq 115 \text{ kgf/cm}$ ，硬度控制在 $60\pm 5^\circ$ ，阿克隆磨耗 < 0.035 ，可有效承受燃煤颗粒长期冲击与摩擦；同时该材质具备一定的耐煤尘吸附性能，避免煤尘黏附导致裙板变形。出口阻尼挡尘帘与内部迷宫式阻尼帘均采用“聚氨酯+碳纤维复合”材质，于聚氨酯基体中添加碳纤维增强相。输煤系统运行环境温度波动较大，冬季低温易导致密封材料变硬脆化，夏季高温易引发材料老化，该材料使用温度范围覆盖 $-30 \sim 120^\circ\text{C}$ ，可适应电厂不同季节运行工况，保持稳定弹性与结构强度；碳纤维增强相能显著提升材料耐磨表现与结构稳定性，抵御燃煤颗粒长期摩擦，避免阻尼帘断裂破损；其中出口 PTFE 抑尘帘于聚氨酯基体中进一步复合聚四氟乙烯成分，增强材料不粘性，防止细煤尘黏附堵塞帘体间隙，确保抑尘条长期保持通透^[2]。

2.3 密封技术材料协同优化

结构设计通过夹持器给予裙板稳定接触压力，让裙板材料的弹性充分发挥，紧密贴合输送带表面，输煤系统中输送带运行存在轻微振动，稳定的接触压力可确保裙板始终与输送带贴合，避免间隙产生；裙板材料的高耐磨特性则保障双层密封结构长期使用中不会因燃煤摩擦引发密封间隙扩大，同时超高分子量聚乙烯托板装置的连续支撑特性，避免输送带因承载燃煤出现波动，破坏裙板与输送带的贴合状态。在出口密封系统中，“PTFE 抑尘帘+彩钢板导流”结构与“聚氨酯+碳纤维+聚四氟乙烯复合帘体”协同优化。结构设计的迷宫式布置路径延长气流与帘体的接触时间，让复合帘体的涡流效应与粉尘吸附能力充分发挥——输煤系统中诱导风携带的细煤尘颗粒小、易扩散，延长接触时间可提升煤尘吸附效率；帘体材料的高弹性确保在气流冲击下不易变形，避免因帘体破损导致密封失效；碳纤维增强相增强帘体结构强度，抵御长期气流冲击与燃煤颗粒碰撞，避免帘体断裂；聚四氟乙烯成分则防止煤尘黏附堵塞帘体，确保结构长期保持高效控风效果^[3]。

3 导料槽密封性应用数值模拟与实验研究

3.1 实验方案设计应用

以大唐某电厂输煤系统现场为平台实施密封性能测试。测试分三阶段：第一阶段，选取现场原有传统密封结构，即普通橡胶密封件、螺栓连接盖板，测试不同输送带速度、物料输送量条件下的密封性能；第

二阶段，更换为弹性补偿式密封结构与迷宫式盖板拼接结构，保持其余工况参数不变实施测试；第三阶段，于新型结构基础上，分别采用纳米增强复合橡胶密封件、陶瓷—聚合物复合涂层槽体，验证长期运行时的密封稳定性。各工况参数组合均重复测试3次，取平均值减小误差；于导料槽周边设置5个检测点，包括入口1 m处、中部6 m处、出口11 m处、左侧挡板中部、右侧挡板中部，同步记录各点粉尘浓度、槽内静压及密封件磨损量^[4]。实验关键数据整理为表1，反映不同密封方案的核心性能指标。

表1 不同密封方案实验性能测试结果

密封方案	平均粉尘浓度 (mg/m ³)	槽内平均静压(Pa)	72 h 密封件磨损量 (mm)	盖板接缝泄漏率 (%)
传统结构 + 普通橡胶	8.6	103 120	0.35	12.8
新型结构 + 普通橡胶	3.2	102 850	0.21	3.5
新型结构 + 纳米增强橡胶	2.3	102 780	0.08	2.1
新型结构 + 纳米橡胶 + 陶瓷涂层	2.1	102 750	0.07	1.8

3.2 模拟与实验结果对比分析

对比分析选取三个核心维度，粉尘浓度、槽内静压与密封间隙气流速度，每个维度按输送带速度1.5 m/s、2.0 m/s、2.5 m/s分组，计算模拟值与实验值的相对偏差。从整体对比结果看，模拟值与实验值趋势一致，且偏差率均控制在10%以内，符合工程模拟的精度要求。其中，槽内静压的偏差率最小，原因是静压受气流湍流影响较小，模拟模型中的 RNGk-ε 模型能较好捕捉压力分布规律；粉尘浓度的平均偏差率为8.5%，偏差主要源于模拟中假设粉尘为均匀分布的离散相，而实际物料中粉尘粒度存在差异，部分细粉易吸附于槽壁，未完全参与气流运动；密封间隙气流速度的偏差率为7.8%，主要因实验中密封件存在轻微弹性形变，导致实际间隙与模拟设定值存在微小差异。为进一步验证长期运行下的模拟可靠性，选取“新型结构+纳米增强橡胶”方案，对比连续72 h运行的模拟磨损量与实验磨损量^[5]。完整对比数据整理为表2，清晰呈现各指标的模拟与实验差异。

表2 模拟与实验结果关键指标对比

输送带速度(m/s)	指标类型	模拟值	实验值	偏差率(%)
1.5	粉尘浓度(mg/m ³)	1.9	2.0	5.0
1.5	槽内静压(Pa)	102 680	102 950	0.26
1.5	间隙气流速度(m/s)	3.2	3.4	5.9
2.0	粉尘浓度(mg/m ³)	2.2	2.3	4.3
2.0	槽内静压(Pa)	102 780	103 050	0.26
2.0	间隙气流速度(m/s)	3.5	3.8	7.9
2.5	粉尘浓度(mg/m ³)	2.8	3.0	6.7
2.5	槽内静压(Pa)	103 560	103 820	0.25
2.5	间隙气流速度(m/s)	5.1	5.5	7.3

4 结语

本研究围绕导料槽密封主题开展系统研究，从基础理论剖析入手，延伸至技术与材料创新，再到模拟实验验证，最终构建出一套相对完整的研究体系，切实解决导料槽密封领域的相关问题。后续研究可进一步拓展应用场景，针对不同特殊物料的输送工况，优化密封方案设计。随着研究持续推进，导料槽密封技术将逐步完善，对推动散状物料输送领域可持续发展发挥更大作用，助力行业实现环保标准与经济效益的双重提升。

参考文献：

- [1] 赵学义.皮带传送机械中导料槽的优化设计[J].科技创新与应用,2025,15(02):127-130.
- [2] 李一庆,王兰超.矿用皮带机运输带优化及导料槽结构改造研究[J].现代制造技术与装备,2024,60(04):77-79.
- [3] 朱国燕,卜步龙,张龙,等.极寒地区室内矿石转运除尘密封净化性能研究[J].金属矿山,2024(07):210-214.
- [4] 刘远富,黄俊程,张国光.综合原料场皮带输送机故障原因分析及控制措施[J].仪器仪表用户,2024,31(02):65-67.
- [5] 薛峰瑞.矿用皮带机运输带优化及导料槽结构改造研究[J].机械管理开发,2023,38(03):124-125.