

极寒区域大水分褐煤生产系统转载形式及粉尘控制的研究

李柏森

国能宝清煤电化有限公司 黑龙江 双鸭山 155600

摘 要：我国东北及蒙东地区露天煤矿褐煤含水量高、冬季极端寒冷，生产系统转载过程中粉尘污染严重且常规控制技术效能骤降。本研究分析大水分褐煤在低温环境下的物理特性变化，揭示冻结硬化、冻粘增强及脆性断裂三大核心诱因，阐明转载落料过程的粉尘产生与扩散规律。针对破碎站、转载溜槽、皮带导料槽等关键产尘部位，提出大倾角抗冻转载结构、封闭负压导料槽、低温适配干雾抑尘及加热防冻系统的集成控制方案。工程应用表明，综合技术可显著降低转载点粉尘浓度，为极寒区域露天煤矿绿色生产提供技术支持。

关键词：极寒区域；大水分褐煤；转载形式；粉尘控制；露天煤矿

引言：我国东北及蒙东地区褐煤含水量高，冬季极端寒冷。露天煤矿生产系统中，破碎站、转载点等环节因褐煤冻粘及落差冲击产生大量煤尘，严重威胁矿工职业健康。常规粉尘控制技术在极寒环境下效能大幅下降：水雾抑尘因结冰失效，干式除尘因结露堵塞滤袋，封闭导料槽因冻粘堆积无法正常运行。同时，大水分褐煤冻结后强度激增，转载过程产生大量细微煤尘。因此，开展极寒区域大水分褐煤生产系统转载形式及粉尘控制研究具有重要的工程应用价值。

1 极寒区域大水分褐煤物理特性与转载工艺现状

1.1 大水分褐煤的物理力学特性

褐煤是煤化程度最低的煤炭，孔隙率高达20%~50%，饱和含水率可达30%~45%。在极寒区域，水分以三种形态赋存：自由水约占60%、毛细水约占25%、结合水约占15%。当环境温度降至零下10℃以下时，自由水及部分毛细水发生相变结冰，煤体整体强度显著提升。

低温条件下褐煤的力学行为发生根本性改变。常温状态下，大水分褐煤呈塑性或半塑性，抗压强度仅0.5~1.5兆帕。当冻结至零下20℃时，冰晶对煤颗粒的胶结作用使其抗压强度激增至5~10兆帕，最高可达常温值的8倍。这种“低温硬化”现象直接导致转载设备承受的冲击载荷成倍增加。同时，冻结褐煤的黏附特性发生逆转：低温抑制了表面液膜张力，使煤与金属壁面的冻粘强度达0.05~0.12兆帕，是常温黏附力的5倍以上，极易在导料槽侧壁、溜槽底板上形成冻粘层，造成流通断面逐渐缩小直至完全堵塞。

1.2 褐煤冻结对破碎与转载的影响

褐煤在采掘、运输、转载过程中经历多次冻融循

环。研究表明，冻结褐煤的破碎能耗是常温湿褐煤的3~5倍。当冻块在转载点发生高速撞击时，其破碎模式由常温下的“韧性撕裂”转变为“脆性断裂”，产生大量粒径小于75微米的细微粉尘，显著增加了粉尘治理难度。冻结褐煤的另一个突出问题是“冻粘-堆积-堵塞”恶性循环。在低温环境下，褐煤中的自由水结冰使其表面具备强黏附性，褐煤碎块在转载溜槽内滑动受阻，逐步黏附并堆积于溜槽底板及侧壁，形成不断增厚的冻粘层。随着冻粘层增厚，有效过流断面逐渐缩小，物料流动受阻加剧，堆积物进一步挤压、冻结，最终造成转载点完全堵塞，迫使生产系统停机清理。这一循环在极寒区域冬季生产中频繁发生，严重制约了露天煤矿的生产效率^[1]。

1.3 现行转载形式与产尘特征

露天煤矿褐煤生产系统主要转载形式包括带式输送机头尾滚筒转载、破碎站卸料口卸料、溜槽转载以及筛分车间落料等。各产尘点的粉尘产生机理及浓度特征如下：破碎站卸料口处，自卸卡车卸料落差大，大水分褐煤冻结后撞击破碎产生高浓度粉尘，其中呼吸性粉尘占比较高。皮带机头转载点处，物料抛落过程中因分散和诱导气流作用产生大量粉尘。溜槽转载通道内，颗粒间摩擦及与壁面碰撞产生粉尘，同时诱导气流将粉尘从缝隙处外溢。筛分车间落料点处，筛分过程强化了细颗粒分离，产尘浓度较高。现行转载形式存在三个设计缺陷。一是溜槽倾角未考虑冻结物料流动特性，仍沿用常规煤炭设计参数，无法满足冻结褐煤的滑动要求。二是导料槽密封结构简单，低温条件下密封条硬化失效，粉尘外逸严重。三是除尘系统未做低温适应性改造，湿式抑尘冬季无法启用，干式除尘因结露失效。

2 褐煤转载过程粉尘产生机理与扩散规律

2.1 冻融循环对褐煤破碎特性的影响

为探究极寒环境对褐煤破碎特性的影响,对不同含水率及不同温度的褐煤样品进行落重试验。结果表明,同一温度下含水率越高,冻结后强度增幅越大;同一含水率下温度越低,破碎比能耗呈指数增长。以含水率35%的褐煤为例,常温下破碎特征能量为0.8千瓦时每吨,零下15℃时升至2.5千瓦时每吨,零下30℃时高达4.2千瓦时每吨。破碎产物粒度分布分析显示,冻结褐煤破碎后,粒径小于0.075毫米的细微粉尘产率较常温褐煤提高2~3倍。通过扫描电镜观察发现,冻结褐煤的断裂面呈典型的脆性断口特征,煤颗粒沿原生裂隙发生穿晶断裂,形成大量棱角状微细颗粒。这些颗粒因表面无液膜包裹,分散性强、悬浮时间长,极易随气流扩散^[2]。

2.2 转载落料过程的粉尘产生动力学

转载点粉尘产生受物料特性、落差高度、诱导气流三重因素控制。物料在落料过程中重力势能转化为动能和破碎能。大水分褐煤在零下20℃下冲击破碎时,破碎消耗能量占总能量的15%~25%,远高于常温工况的5%~8%。诱导气流是粉尘扩散的主要驱动力,物料下落时带动周围空气运动,形成高速诱导气流。落料点料流冲击卸料面,产生瞬时高压射流。实测表明,落差5米的转载点,最高诱导风速可达4~6米每秒,携带粉尘从导料槽缝隙高速喷出。这一过程形成“落料-破碎-产尘-气流携带-缝隙外溢”的完整粉尘扩散链条。

2.3 极寒条件下粉尘扩散的特殊规律

极寒环境对粉尘扩散具有双重效应。一方面,低温使空气密度增大、分子黏性降低,粉尘沉降速度减缓,悬浮时间延长。另一方面,极寒条件下空气干燥,相对湿度常低于30%,细微粉尘间缺乏液桥力,团聚效应微弱,以单颗粒形式悬浮扩散。此外,矿区冬季常伴有强风,平均风速3~5米每秒,粉尘从产尘点逸出后迅速扩散为区域性污染。这种扩散模式使得局部除尘难以根治粉尘问题,必须从转载源头进行封闭和抑制。

3 极寒转载结构优化与粉尘控制技术

3.1 抗冻粘转载结构设计

针对褐煤冻粘造成的转载堵塞问题,提出“大倾角溜槽、防粘衬板、加热防冻”三位一体的转载结构优化方案。溜槽倾角优化方面,常规转载溜槽倾角一般按50度至55度设计。但冻结褐煤与钢质溜槽的滑动摩擦角高达38度至42度。据此确定极寒区域褐煤转载溜槽倾角不应小于55度,推荐采用60度至65度,倾斜段长度不超过3米。这一设计可确保冻结褐煤在自重作用下顺利滑落。

防粘衬板技术方面,在溜槽受料面及侧壁铺设超高分子量聚乙烯衬板。该材料摩擦系数低、耐低温性能优异、表面具有疏冰特性,可显著降低褐煤冻粘强度。现场应用表明,超高分子量聚乙烯衬板可使冻粘积料减少80%以上。加热防冻系统方面,在关键转载点敷设伴热带或电加热板,维持壁面温度在零上5度以上。采用智能温控器分区控制,加热功率密度为150~250瓦每平方米,当环境温度低于零下15度时自动启动^[3]。

3.2 封闭导料与负压除尘集成技术

双层密封导料槽采用“耐磨橡胶裙边、聚氨酯防溢帘、双层观察窗”组合密封结构。裙边与皮带搭接长度为40~60毫米,防溢帘间隔500毫米布置,形成迷宫式密封通道。同时增设负压抽吸口,连接除尘管道,使导料槽内保持微负压状态,有效抑制粉尘外逸。干雾抑尘系统进行低温适配型改造,主要措施包括:设置加热保温水罐维持水温在10~15摄氏度;对供水管路实施伴热保温;选用耐低温不锈钢防冻型喷嘴;优化气水比例。经现场测试,在零下25℃环境下该干雾抑尘系统仍可正常运行,除尘效率达85%~92%。负压收尘网络方面,在各转载点密闭罩上方设置吸尘罩,通过主除尘管道汇入袋式除尘器。除尘管道内壁敷设电伴热带,管道坡度不小于5度,最低点设置自动排水阀。袋式除尘器采用疏水性滤料,并增设脉冲喷吹系统定时清灰,有效防止结露糊袋。

3.3 转载溜槽降噪抑尘一体化设计

阶梯式缓冲溜槽将直落式溜槽改为多级阶梯结构,每级台阶高度300~500毫米,使物料逐级跌落,单级冲击速度降低60%以上。同时每级台阶下设置集尘腔,利用涡流效应捕获细颗粒粉尘。曲线落料管技术通过计算机流道仿真,将落料管设计为对数螺旋线形式,使物料紧贴管壁滑落,避免空中分散。与传统直落式相比,可降低诱导气流速度50%~70%,产尘量减少60%~80%。软连接密封装置在各转载设备连接处安装柔性密封套,采用耐低温硅橡胶材质,耐受温度零下50℃至200℃,有效阻断粉尘从接缝处外逸。

3.4 极寒粉尘控制综合解决方案

综合上述技术,提出极寒区域大水分褐煤生产系统粉尘控制集成方案。在破碎站卸料口,采取封闭卸料间结合干雾抑尘和负压收尘的综合措施,预期除尘效率达95%以上。在转载溜槽,采用超高分子量聚乙烯衬板、阶梯缓冲和电加热防冻技术,预期除尘效率达80%以上。在皮带导料槽,采用双层密封和负压抽吸技术,预期除尘效率达90%以上。在皮带机头,采用曲线落料管、防尘罩和雾帘技术,预期除尘效率达85%以上。在筛分车

间,采用全封闭结构结合袋式除尘器,预期除尘效率达98%以上。现场应用表明,该集成方案在极寒环境下运行稳定,转载点粉尘浓度显著降低,满足国家排放标准要求,设备冻堵停机次数减少85%以上,取得了显著的环境效益和经济效益^[4]。

4 工程应用效果与综合评价

4.1 典型矿区应用概况

为验证本文提出的极寒转载结构优化与粉尘控制技术的工程适用性,选取内蒙古东部某大型露天煤矿作为应用示范点。该矿区年产量1500万吨,褐煤全水分38%~42%,冬季极端气温可达零下35℃以下,生产系统包含破碎站2座、转载点16处、皮带输送线路9条。改造前,冬季生产期间各转载点粉尘浓度普遍在200~400毫克每立方米,破碎站卸料口峰值浓度超过600毫克每立方米,设备因冻粘堵塞日均停机2~3次,严重制约生产效率。

4.2 技术改造实施情况

依据本文第三部分提出的技术方案,该矿在2024年至2025年冬季停产检修期间完成了系统性改造。具体措施包括:一是将主要转载溜槽倾角由52度统一调整至62度,并铺设超高分子量聚乙烯衬板。二是在破碎站卸料口、主转载溜槽底板等关键部位敷设智能电伴热带,总长度约850米。三是将传统导料槽改造为双层密封负压结构,增设干雾抑尘系统并配套加热保温水罐。四是在筛分车间加装袋式除尘器,实现全封闭负压收尘。

4.3 应用效果分析

经过一个完整冬季的运行监测,改造效果显著。在粉尘控制方面,各转载点粉尘浓度由改造前的200~400毫克每立方米降至15~28毫克每立方米,破碎站卸料口峰值浓度由600毫克每立方米以上降至35毫克每立方米以下,降幅均超过90%。所有监测点粉尘浓度均满足《煤炭工业污染物排放标准》要求。在设备运行方面,因冻粘堵塞导致的转载点停机由日均2~3次降至每周不足1次,冬季生产期间设备综合运转率由71%提升至89%。加热防冻系统采用智能温控分区管理,实测冬季总耗电量约18万千

瓦时,折合每吨原煤增加成本0.12元,远低于因停机造成的生产损失。在经济效益方面,减少停机清理人工成本约32万元,降低设备维修费用约45万元,提高产量带来的直接经济效益约210万元。综合计算,该矿冬季三个月内因技术改造获得的经济效益约287万元,投资回收期不足一个采暖季。

4.4 技术适用性讨论

该技术方案在极寒区域具有较强的适用性和推广价值。超高分子量聚乙烯衬板与电加热系统的组合有效解决了冻结褐煤的冻粘问题,封闭负压导料槽与低温适配干雾抑尘的协同应用突破了常规湿式除尘在极寒环境下失效的技术瓶颈。需要指出的是,对于极端低温低于零下40℃的区域,电加热功率密度需适当提高,同时应对压缩空气管路增加干燥装置,防止气路结冰影响干雾雾化效果。

结束语

本研究揭示了极寒环境下大水分褐煤“低温硬化、冻粘增强、脆性断裂”对转载粉尘产生的驱动机制,提出了涵盖转载结构、密封抑尘、加热防冻的系统性技术方案。工程验证表明该技术体系可靠有效,可显著提升极寒区域露天煤矿粉尘治理水平。未来应进一步探索转载过程粉尘扩散的数值模拟方法,为结构优化提供更精准的理论指导。

参考文献

- [1]张晓强.露天煤矿采掘过程中粉尘控制技术的创新与应用——以内蒙古为例[J].内蒙古科技与经济,2026(2):137-140.
- [2]袁地镜.露天煤矿初级破碎站粉尘治理的“隔-控-除”协同机制及其工程应用[J].煤矿机械,2025,46(8):163-166.
- [3]张宝健,张志远,许勃,等.皮带转载点封闭式自动化干雾抑尘技术研究[J].煤矿现代化,2025,34(4):75-78,82.
- [4]王和堂,徐超航,朱小龙,等.煤矿粉尘防控理论与技术新进展及展望[J].中国矿业大学学报,2026,55(2):326-349.