

移动卸料车在矿槽多段进料中的超低排放应用与优化

曹国祥, 欧阳安宝, 吴 奇, 孙亚飞, 林小龙

(中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205)

摘要:为实现矿槽多段进料区域的粉尘超低排放,改善作业环境并达成环保目标,通过系统性分析该区域粉尘排放问题,制定了针对移动卸料车的一系列技术方案和实施对策。实践结果表明:采用密封皮带对矿槽卸料口进行密封,并优化矿槽面与仓顶平台衔接处的密封设计,使得矿槽槽面开孔处的密封覆盖率达到100%;高落差缓冲式漏斗或溜槽可伸缩式卸料车的应用大幅降低了扬尘;头部散料清扫装置解决了卸料车改向轮处的散料固结和堆积问题;移动式抑尘装置和除尘点动态切换控制技术的结合提升了除尘效率并降低了能耗。本文结果可为移动卸料车在矿槽多段进料区域中的粉尘实现超低排放提供可行的技术支持和实践经验。

关键词:超低排放; 移动卸料车; 高落差缓冲式漏斗; 清扫装置; 阻力平衡器

中图分类号:TD464

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)07-0075-05

doi:10.13402/j.gcjs.2025.07.092

Application and optimization of mobile unloading trucks in ultra-low emissions in multi-section feed of bunker

CAO Guoxiang, OUYANG Anbao, WU Qi, SUN Yafei, LIN Xiaolong

(Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: In order to achieve ultra-low dust emissions in the multi-section feed area of the bunker, improve the operating environment and achieve environmental protection goals, a series of technical solutions and implementation measures for mobile unloading trucks are formulated through systematic analysis of the dust emission problems in this area. The practical results show that: the sealing belt is used to seal the bunker unloading port, and the sealing design at the connection between the bunker surface and the warehouse top platform is optimized, so that the sealing coverage rate at the opening of the bunker surface reaches 100%; the application of high drop buffer funnel or chute retractable unloading truck greatly reduces dust; the head bulk cleaning device solves the problem of bulk consolidation and accumulation of the unloading truck's directional wheel; the combination of mobile dust suppression device and dynamic switching control technology of dust removal points improves dust removal efficiency and reduces energy consumption. The results can provide feasible technical support and practical experience for mobile unloading trucks to achieve ultra-low dust emission in the multi-section feed area of the bunker.

Key words: ultra-low emissions; mobile unloading truck; high drop buffer funnel; cleaning device; resistance balancer

钢铁工业是我国国民经济的重要支柱产业,其产量规模庞大,同时也是典型大气污染物的重要排放源^[1-3]。根据排放规律,工业粉尘排放可

分为有组织排放和无组织排放两类^[4]。目前,钢铁工业中有组织排放可以通过重力除尘、电除尘、布袋除尘等净化装置有效减少对环境的粉尘污

收稿日期:2025-04-15

作者简介:曹国祥(1993—),男,工程师,从事烧结、球团、料场及钢铁冶金节能环保方面的研究工作。

通信作者:欧阳安宝(1994—),男,工程师,从事烧结、球团、料场及钢铁冶金节能环保方面的研究工作。

染^[5-7]；然而，无组织排放具有点多面广，难以量化和处理的特点，并且受多种工艺因素和环境因素的影响，导致粉尘排放量及排放规律不易确定，因此对其进行监测、评价和控制均较为困难，是钢铁工业实现清洁生产需要解决的关键难点之一^[8]。

与其他无组织排放源相比，钢铁冶炼烧结环节中配料室、成品矿仓等基于移动卸料车卸料的矿槽多段进料区域，由于卸料口较大、物料落差较高，在卸料过程中，下落的物料会诱导周围气流产生扬尘，尤其在物料与矿槽槽壁或仓内物料面发生碰撞时，扬尘更为严重，肉眼可见粉尘外逸并堆积于卸料点周边。此外，由于矿槽槽顶位置较高，产生的扬尘受自然风力影响而四处飘散，造成更大范围的环境污染，使得矿槽进料区域成为粉尘排放控制的重点治理对象^[9-11]。

为解决上述问题，本文将对移动卸料车在矿槽多段进料区域超低排放存在的问题进行系统分析，并制定一系列实施对策和技术方案，以期为钢铁行业的节能减排和污染物超低排放提供一点参考与借鉴。

1 问题分析

移动卸料车卸料的矿槽仓顶多段进料区域超低排放控制特点：1) 矿槽卸料口大、密封性差；2) 矿槽卸料落差大；3) 卸料车改向轮处散料固结和散料堆积；4) 移动式卸料导致除尘点不固定；5) 矿槽横向距离远，除尘风量分配不均。这些特点使得作业区粉尘质量浓度远高于超低排放标准规定值。

(1) 矿槽槽面密封性差：1) 矿槽槽面平台卸料口密封不严。矿槽多段进料区域通常设计为长条形卸料口，以便移动卸料车在任意位置卸料，甚至在行走过程中也能确保物料落入矿槽中。然而，大范围的开孔导致矿槽面密封性较差，扬尘问题较为严重。2) 矿槽顶部与仓顶平台斜接处密封不严。在实际生产过程中，矿槽多为钢结构，而仓顶平台为混凝土结构，两者无法直接实现密封连接，因此通常在接口处采用密封胶皮进行软连接(图 1)。密封胶皮的安装位置位于梁下，其需要更换时操作极为困难，这导致许多钢厂的矿

槽在此处密封效果不佳，长期存在冒灰现象。

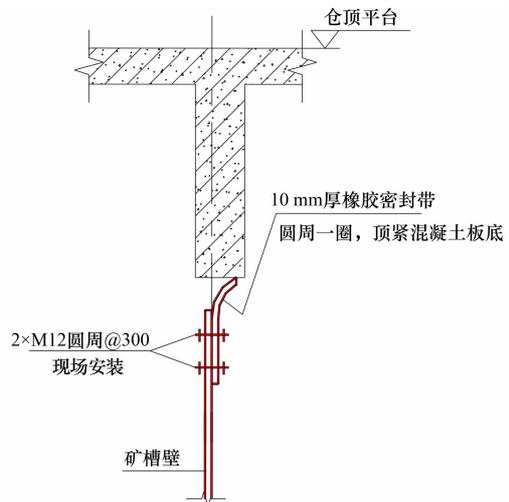


图 1 矿槽与仓顶平台的密封示意 mm

(2) 矿槽卸料落差大。移动卸料车是原料或成品进行堆存时常用的卸料设备，物料下落过程中产生的诱导气流会诱发扬尘。诱导气流是指矿石颗粒在皮带转载点下落时做抛物线运动，带动周围空气随其一起流动所形成的气流。在重力作用下，矿石颗粒速度不断增加，产生的诱导气流也随之增大，从而引发尘化作用，部分粉尘随矿石运动方向向外逸散。随着矿石不断向下运动，到达皮带面时，由于处于半密闭的有限空间内，气流发生剪切压缩作用，大量含尘气流从侧面向上运动。含尘气流的大小与空气受矿石颗粒下落时的挤压作用有关，粉尘受到的挤压力及向外逸出的速度与矿石的下落速度相关，而矿石的下落速度又取决于下落高度，高度越大，速度也越大^[12]。

(3) 卸料车改向轮处散料固结、散料扬尘大。在实际生产中，移动卸料车在物料运输和转运过程中，散料通常出现在皮带爬坡阶段和头部改向轮处。爬坡阶段，物料因突然提升导致皮带上表面的物料向两侧往下散落；而头部改向轮处，物料因黏性附着于皮带上，但随着皮带转动，物料因自重脱落至仓顶平台，造成周围散料堆积，这些掉落在地上的物料量接近输送物料量的 3‰，不仅引发扬尘问题，还可能损坏胶带机。同时，在卸料车改向轮处，皮带表面容易形成固结层。皮带表面固结层的形成原因：在皮带运输过程中，紧贴皮带表面的超细粉末因积湿形成浆状层，若未能及时清除，浆状层失水干燥后会结于皮带

表面,且随着现有皮带清理装置(如刮刀或电动辊刷)的挤压逐渐变硬,最终形成固结层。目前,皮带黏料清洁技术主要依赖刮刀清扫器进行刮除。然而,在使用一段时间后,由于刀头频繁与皮带摩擦,刮刀清扫器存在不同程度的磨损,导致刀头与皮带之间产生间隙,贴合度不足时会影响皮带清扫效果。因此,皮带粘料需要经常性人工清理,费时费力且存在安全隐患。

(4) 移动式卸料,除尘点不固定。在实际生产过程中,移动卸料车需根据要求在矿槽上方来回移动卸料,除尘点不固定,从而影响除尘效果。现阶段主要采用移动通风槽技术和机载背负式单点除尘器技术解决该问题,但两种技术均存在一定弊端。如,单点除尘器设备复杂,包含小型除尘系统和小型空压机,故障点多且维护复杂。此外,由于除尘负荷大,不论采用滤袋还是滤筒,过滤元件清灰效果差,极易堵塞,除尘效果不如移动通风槽。然而,移动通风槽技术初投资较高,除尘风量大,运行费用也较高。但从国家对超低排放的要求来看,除尘效果和排放是硬指标,故除尘措施多倾向于采用移动通风槽技术。

(5) 矿槽横向距离远,除尘风量分配不均。由于一字排开的多个矿槽首尾间距较大,移动通风槽长度过长会导致阻力变化过大,从而引起除尘风量波动。由于阻力原因,小车在移动通风槽位置一时的风量要小于位置二(图2)。

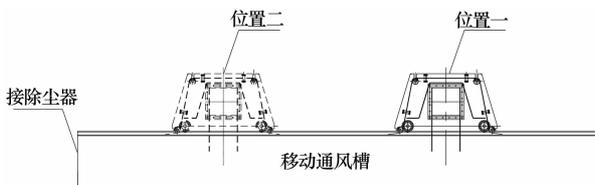


图2 移动通风槽示意

2 实施对策及技术方案

2.1 针对矿槽槽面密封性差问题的实施对策及技术方案

(1) 矿槽槽面平台卸料口的密封:根据移动卸料车的行走卸料轨迹,可选择一种自动覆压皮带装置来解决该问题。自动覆压皮带装置包括密封皮带、卸料口两侧护板、密封罩及拉伸调节装置等。首先,将槽面卸料孔两侧护板设计为喇叭

口型,使卸料车下料口密封罩与两侧护板及底面保持密切接触,并确保密封皮带能与两侧护板有效接触,从而达到防止漏风和扬尘的目的。同时,在压仓皮带两侧安装皮带限位装置,可防止皮带跑偏,确保压仓皮带始终在卸料孔密封护板内运行。

(2) 矿槽顶部与仓顶平台衔接处的密封:为解决矿槽顶部与仓顶平台衔接处密封不严的问题,可将仓顶平台开孔与矿槽开孔对应,并在矿槽钢结构接料部分设置短管,使其顶部与上部平台平齐,再用胶皮将短管与平台间的间隙密封,以此实现封闭效果并便于更换。

2.2 针对卸料落差大问题的实施对策及技术方案

(1) 高落差缓冲式漏斗。为了解决常规卸料漏斗在高落差卸料时产生粉尘无组织排放的问题,可采用多种适用于高落差物料转载的缓冲式漏斗,如积料缓冲式漏斗、阶梯缓冲式漏斗、带挡板漏斗和弧形溜料漏斗。通过采用这些漏斗形式,能够有效解决高落差物料转载过程中因物料颗粒破坏和诱导气流引起的粉尘溢出问题,进而降低物料转运点粉尘的无组织排放量。对于移动卸料车来说,根据物料特性,通常可选择使用阶梯缓冲漏斗或带弧形导料板漏斗这两种形式,以方便工艺布置。这样可以使物料从移动卸料车给料轮到仓顶平台时的速度得到减缓,即进入矿槽的初始速度降低,从而减少卸料时产生的粉尘量。

(2) 溜槽可伸缩式卸料车。在移动卸料车卸料的过程中,可以使用一种具有可伸缩式溜槽的设备。该溜槽由依次套接的多节管段构成,其下端用于物料下落。并且,在溜槽的相邻管段之间设置了驱动装置,用于实现管段的伸缩功能。溜槽具备可伸缩性,可以根据料堆面的高度调节溜槽长度,使落料高度较常规移动卸料车有所降低,从而大幅减少卸料时产生的粉尘量。

2.3 针对移动卸料车改向轮处散料固结、散料堆积问题的实施对策及技术方案

针对该问题,可采用一种“松散料刷除-固结层剥离-残留颗粒清理”的皮带黏料清理技术。其中,“松散料刷除”通过电动辊刷在烧结物料下落到料斗后对胶带机回程皮带进行清理,将附着在回程皮带上的松散料刷除,使皮带表面的固结

层暴露出来。“固结层剥离”针对皮带表面形成的固结物料,利用特制的剥离装置(由剥离辊和辊鞭构成)将物料打散脱落;剥离辊高速旋转时,辊鞭抽打固结层使其松散脱落。“残留颗粒清理”则使用经特殊设计的气刀喷射出高速气体,将固结层剥离后仍残留在回程皮带上的细颗粒全面清扫干净,从而消除固结层的形成条件并阻止其再次形成,确保皮带黏料无残留。

除此之外,还可采用一种多效耦合皮带清洁机进行清理^[13]。在烧结物料下落到料斗后,胶带机回程皮带依次经过电动辊刷、剥离辊鞭和气刀,分别清除黏附在胶带面上的松散物料、固结层物料和残留颗粒,实现胶带黏料的高效清理。同时,清理下来的物料可通过刮板输送机收集到漏斗内,实现散料的回收利用。经估算,多效耦合皮带清洁机能够清除 95% 以上的皮带黏料,大幅减少人工对回程落地散料的清扫量。目前,该多效耦合皮带清洁技术和装备已在宝钢湛江钢铁有限公司得到应用。运行结果显示,该技术对烧结物料运输皮带黏料清理具有显著效果,回程带面上的黏料量大幅减少,皮带表面黏附的物料绝大部分均被清除干净。

2.4 针对矿槽除尘点不固定问题的实施对策及技术方案

(1) 抑尘措施。当物料含水率在 6% ~ 8% 时,扬尘不大。此时,除采取除尘措施外,还可以选用干雾抑尘设备作为抑尘手段。在移动卸料车下料点处安装干雾抑尘装置,通过高频声波的音爆作用,在喷头共振室将水高度雾化,生成粒径为 10 μm 以下的微细水雾颗粒,并将其喷向起尘点。水雾颗粒与粉尘颗粒相互碰撞、黏结、聚结增大后,在自身重力作用下沉降,从而达到抑尘效果。

(2) 除尘点动态切换控制技术。移动卸料车配备位置监测功能,矿槽槽上除尘点设置电动蝶阀。当移动卸料车在某一矿槽卸料时,其对应除尘管道上的电动蝶阀打开。为避免移动卸料车移动至其他矿槽卸料时,上一矿槽扬尘尚未完全沉降的情况,电动蝶阀采用延迟关闭机制,确保除尘效果。

(3) 水分监控动态节能技术。1) 物料含水量对扬尘量和除尘系统的运行效率有重要影响。通过物料含水量检测系统^[14],可以实时监测物料含水量变化,并结合扬尘量预测模型,判断物料转运点的扬尘量大小;2) 根据实际扬尘量动态调节阀开度:在扬尘量较大时,增大阀门开度以提高除尘效率,确保排放达标;在扬尘量较小时,减小阀门开度以减少风量浪费,同时避免因风量过大导致的二次扬尘,实现除尘效率与能源消耗的优化平衡;3) 阀门开度与电机频率连锁控制,进一步达到节能目的。

以某钢铁炼铁厂高炉槽除尘为例,除尘系统配套风机工况风量为 600 000 m^3/h ,进口负压为 5 500 Pa,风门开度为 85%。通过系统模拟,依据生产工艺流程优化除尘管道管径及走向,提高管网风量平衡与稳定性,并在关键位置安装气动除尘阀门,与移动卸料小车设备运行情况联锁,有效减少风量浪费。经测算,模拟系统风机风量为 453 322.53 m^3/h ,与实际生产风量 510 000 m^3/h 相比,减少了 56 677.47 m^3/h ,风量降低约 10%。

2.5 针对矿槽横向距离远,除尘风量分配不均问题的实施对策及技术方案

全平衡负压除尘系统技术阻力平衡原理:每个分支除尘点至除尘器的距离、部件阻力构件存在差异,导致每支除尘管道至除尘器的阻力不一致。如果不进行人为干预,除尘风量的分配将趋向于各支管阻力平衡一致的方向调整。例如,假设三支分支管的管径相同但横向位置不同,在不进行人为阻力干预的情况下,会导致每段除尘风量分配不均。此时,需要通过人为增加阻力来实现除尘风量的均匀分配。

为解决除尘风量分配不均的问题,可采用一种全平衡负压除尘系统技术^[15]。在除尘系统设计阶段,通过对系统进行阻力平衡计算,并根据计算结果在管路上设置具有预设阻力的阻力平衡器。系统投入运行后,无需初调整即可实现管网阻力平衡。同时,阻力平衡器所采用的高耐磨材料确保了系统的长期稳定运行。

3 运行效果及社会效益

矿槽多段进料区域超低排放技术方案已在多

个国内钢厂成功实施, 粉尘无组织排放均通过了超低排放评估验收, 并在中国钢铁工业协会官网进行了相关内容的公示。

基于移动卸料车卸料的矿槽多段进料区域超低排放技术路线研究符合当前国家的钢铁产业政策、顺应钢铁行业的发展趋势, 将对钢铁行业的节能减排和实现污染物超低排放起到积极的推动作用。该技术的研发与推广所带来的社会效益主要体现在如下。

(1) 减少矿槽进料区域含尘废气的无组织外排量和新鲜空气消耗量, 降低岗位粉尘浓度, 改善操作人员的作业环境, 扭转钢铁企业“脏、乱、差”的不利形象, 促使钢铁冶金工厂向花园式工厂转变, 适应生态城市发展需求。

(2) 可促进钢铁行业关键技术装备的升级, 提高废气收集率。该技术路线在烧结行业具有广泛的应用前景, 将在新一轮烧结节能、提质、减排的升级改造中发挥重要作用, 为钢铁绿色制造贡献力量。

(3) 提出的技术路线还可解决跨行业、跨领域的共性问题, 能够推广应用至化工、制药、电力、建材等行业。在当前环保要求日益严格、企业降本增效需求紧迫的情况下, 粉尘无组织排放控制正是市场急需的技术, 其应用前景十分广阔。

4 结 论

本文通过系统性分析, 探讨了移动卸料车在矿槽多段进料区域实现超低排放过程中存在的问题, 并提出了一系列技术方案和实施对策。实践结果表明: 1) 采用密封皮带对矿槽卸料口进行密封, 并优化矿槽面与仓顶平台衔接处的密封设计, 使矿槽面开孔处的密封覆盖率达到 100%; 2) 高落差缓冲式漏斗或溜槽可伸缩式卸料车的应用显著降低了扬尘; 3) 头部散料清扫装置有效解决了卸料车改向轮处的散料固结和堆积问题, 减少散料 90% 以上; 4) 移动式抑尘装置、除尘点动态切换控制技术以及水分监控动态节能技术的使用, 解决了因矿槽除尘点不固定而引起的除尘困难的问

题, 实现了除尘系统与卸料点位置的同频同步变化, 并可降低除尘总风量; 5) 通过设计并安装除尘管网阻力平衡装置, 解决了矿槽横向距离远、除尘风量分配不均的问题, 实现了风量平衡。

参考文献:

- [1] 姜涛. 烧结球团生产技术手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2014.
- [2] 叶恒棣. 钢铁烧结烟气全流程减排技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2019.
- [3] 邢奕,张文伯,苏伟,等. 中国钢铁行业超低排放之路[J]. 工程科学学报,2021,43(1):1-9.
- [4] 田澍,刘涛. 打赢蓝天保卫战背景下的钢铁行业超低排放政策探讨[J]. 环境保护,2019,47(10):20-22.
- [5] 王禹男. 重力降尘室在烧结生产中的应用[J]. 黑龙江冶金,2012,4(3):51-52.
- [6] 刘永民,任滨,艾易. 静电除尘在烧结机头烟尘治理中的应用[J]. 工业安全与环保,2002,28(8):4-6.
- [7] 李浩鸣. 烧结机头烟气袋式除尘技术首台套应用工程经济分析[J]. 工程建设,2023,55(12):88-98.
- [8] 生态环境部,国家发展和改革委员会,工业和信息化部,等. 关于推进实施钢铁行业超低排放的意见[R/OL]. (2019-04-22)[2019-04-28]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201904/t20190429_701463.html.
- [9] 迟志勇. 高炉原料矿槽槽上除尘方式综述[J]. 工业安全与环保,2006,32(8):37-39.
- [10] 周冬霞. 高炉矿槽移动卸料车除尘[J]. 冶金丛刊,2012(5):43-45.
- [11] 王永平. 高炉矿槽移动卸料车粉尘治理技术开发及应用[J]. 工业安全与环保,2017,43(5):19-20;23.
- [12] 王冬雪. 散料自由下落诱导气流流动规律研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.
- [13] 谭潇玲,刘克俭,温荣耀,等. 多效耦合智能皮带清洁机设计与试验研究[J]. 烧结球团,2023,48(5):59-66.
- [14] 曾小信,李宗平,过宇晟. 烧结混合料粒度及水分检测系统的研究与实现[J]. 工程建设,2023,55(8):69-73.
- [15] 李准,黎前程. 全平衡负压除尘系统技术研究及工程应用[J]. 烧结球团,2017,42(3):75-78;85.