600 t/d燃煤活性石灰回转窑系统通风改善研究

顾大海
乌海包钢矿业有限责任公司　内蒙古 乌海　016000

摘　要　本文针对600 t/d燃煤活性石灰回转窑系统存在的通风不均、漏风严重、燃烧效率低等问题，通过系统诊断明确核心症结：密封失效导致无效漏风、通风阻力与流场分布不均、风机性能与工艺参数协同性不足。基于此，制定密封堵漏、流场优化、风机适配及工艺参数精细化调控的综合方案，通过升级柔性密封装置、重构预热器流场、匹配风煤料动态平衡等措施，实现系统漏风率下降，有效通风量提升至150 000 Nm^3/h以上，吨石灰煤耗降低1 kg以上，显著提升了窑系统热效率与运行稳定性。

关键词　活性石灰回转窑；通风优化；密封堵漏；能耗降低

Ventilation Improvement of a 600 t/d Coal-Fired Active-Lime Rotary Kiln System

Gu Da-hai
Wuhai Baogang Mining Co., Ltd., Wuhai 016000, Inner Mongolia, China

Abstract　A 600 t/d coal-fired active-lime rotary kiln suffered from uneven ventilation, severe air leakage, and low combustion efficiency. Systematic diagnosis identified three root causes: seal failure inducing parasitic air inflow, non-uniform flow-field distribution and high resistance, and poor matching between fan performance and process parameters. A comprehensive retrofit was therefore implemented—combining seal upgrading, flow-field optimization, fan re-selection, and fine regulation of operating parameters. Dynamic sealing devices were installed, the preheater flow field was redesigned, and a real-time air–coal–feed balance was established. As a result, the system leakage rate dropped markedly, effective ventilation rose above 150 000 Nm^3/h, and coal consumption decreased by more than 1 kg per ton of lime, substantially enhancing thermal efficiency and operational stability.

Key words　Active-Lime Rotary Kiln; Ventilation Optimization; Seal Leakage Remedy; Energy-Consumption Reduction

石灰作为钢铁、建材、化工等行业的关键原料，其质量（活性度、CaO含量）和产量直接影响下游产品性能与生产成本[1]。日产600 t燃煤活性石灰回转窑是目前国内主流产能配置，这类窑型凭借稳定的热效率与较高的产能利用率，在全国的比例为12.7%，在钢铁、建材等产业链中持续发挥关键作用。

回转窑煅烧系统以逆流热交换原理实现石灰石高效分解，其主要热工原理为石灰石物料（$CaCO_3$）在随着回转窑倾斜转动，与高温烟气（1 050 ~ 1 300 ℃）窑体内形成逆向流动，分解为CaO（活性石灰）和CO_2，成品石灰顺延储运系统进行输送、筛分和储存，高温烟气自窑头向窑尾被强制排出。

系统通风作为回转窑焙烧工艺的核心，其“呼吸”通畅与否，直接决定窑内煤粉燃烧效率、传热传质效果、温度场分布和产品分解质量及系统能耗：通风量不足会导致煤粉不完全燃烧，产生大量CO，不仅降低热效率、增加能耗，同时焙烧过程中产生的CO_2，如不能及时排除，过高浓度会抑制石灰石的持续分解，甚至发生可逆反应，造成石灰“欠烧”（活性度偏低）的情况；通风过量则会带走大量热量，同样增加能耗，且可能导致石灰“过烧”（晶粒粗大、活性下降），形成了产品的过度加工，加大企业成本。

1　回转窑系统通风现状诊断

1.1　系统组成及通风原理

600 t/d燃煤活性石灰回转窑系统主要包括竖式预热器（阶梯）、回转窑筒体、竖式冷却器三大件以及燃料制备输送、尾气的净化排放、物料的转储，见图1所示。

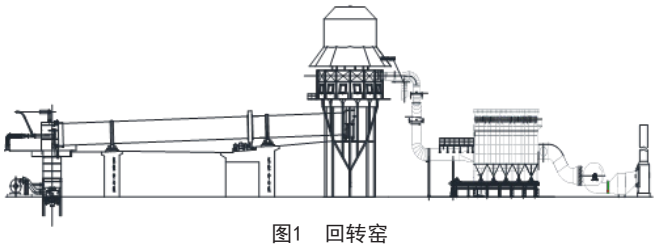


图1　回转窑

通风系统分为一次风、二次风：一次风由鼓风机送入燃烧

器，实现煤粉输送和“雾化”；二次风来自冷却器内冷却高温石灰后的热空气（温度600 ℃），进入窑内助燃，回收石灰显热。尾排风机通过负压作用将窑内烟气抽出，供氧维持系统通风平衡[2]。

1.2 存在的主要问题

回转窑系统通风影响因素主要包括设备本体所设置的孔、洞、门，设备连接过程失效法兰、柔性密封，系统内部沿程阻力及局部阻力，风机调控能力及操作参数协同性[3]。

通过对系统通风参数、设备状态及运行数据的检测分析，发现以下核心问题。

1.系统密封不良，漏风严重，有效通风量不足。从工艺原理分析，密封不良主要存在于各主要部件的连接部位、运动部件间隙、收尘器及余热回收装置的本体密封，如窑头、窑尾密封装置老化失效，转运溜槽与预热器、窑筒体接口以及预热器推料装置（给料装置—推头）运动件的密封，收尘器箱体等。

系统漏风点主要集中在：①收尘器箱体焊缝开裂、卸灰设备串风、滤袋反吹装置（脉冲/提升阀）损坏漏风、净风室盖板密封不严等；②余热利用装置本体人孔门、膨胀节密封不严及附属管道漏风等；③料仓与预热器顶部进料管的料封作用不足；④预热器本体、检修观察孔、推头方箱、进排料管、掺冷风阀门等部位，以及吊挂砖与内圈壳体开裂处；⑤物料转运溜槽与预热器天圆地方连接法兰处，本体设置的防爆门、检修孔、排渣孔及仪器仪表测量孔径等密封不严；⑥窑口、窑尾密封装置老化，采用传统鱼鳞片密封，密封间隙大，旋转过程塑性变形，漏风率高；⑦窑头罩检修门、观察孔、燃烧器插口、热风连接孔、排窑皮门、取样口等孔洞[4]。

上述区域点位密封失效，导致冷空气大量进入系统，稀释窑内燃烧气氛，降低火焰温度，同时增加尾排风机负荷，造成有效通风量不足。尤其在预热、焙烧环节，体现在窑头、窑尾及预热器区域，漏风直接影响石灰焙烧温度，致使热交换率下降，热耗上升，严重制约产能释放与能耗优化。窑头冷风罩漏风还导致二次风温降低，热回收效率下降，窑内气流紊乱，燃烧不稳定等问题。

2.通风系统阻力及流场分布不均，传热传质效率低。系统阻力主要体现在沿程阻力和局部阻力，沿程阻力主要由管道内壁粗糙度、积灰堆积及管径变化引起；局部阻力则集中于弯头、变径段、阀门等各接口突扩突缩部位，回转窑筒体内部结圈，预热器内部结瘤，转运溜槽物料堆积导致流通截面缩小，进一步加剧气流阻力。在日常生产过程中，造成系统通风不畅的通常体现在局部阻力，尤其在预热器内部、回转窑筒体等。这些部位因物料黏结、挂壁导致气流通道变窄，造成系统通风不畅，窑内负压难以维持，煅烧带温度波动显著。例如，在高产量运行时，筒体物料填充系数增大，通风截面进一步受限，系统阻力急剧上升，转运溜槽因物料堆积，通风面积缩小，导致局部通风阻力增加，气流分布不均；竖式阶梯预热器内部结构复杂（死角多），且随着通风面积增大，含尘烟气流速降低，易在拐角处形成涡流，加剧粉尘沉降，进一步堵塞气流通道。同时，与煤灰等烟气中低熔点组分在低温区凝结附着，促进积灰板结，存在黏结增大的可能，致使恶性循环，通风阻力较大，石灰石预热温度差异达80 ~ 100 ℃。

在使用粒度偏细的石灰石原料或是物料大小粒度不均时（超出1∶3），易在预热器下料管及溜槽部位形成架桥或堵塞，影响物料均匀分布，加剧气流偏流现象。同时，细料层透气性差，导致预热段气流阻力增大，热交换效率降低，物料预热不均，进入回转窑后难以实现稳定煅烧，进一步加大系统热耗与电耗。

3.风机性能匹配与工艺参数协同性。燃煤活性石灰回转窑内，石灰石物料吸收煤粉燃烧所释放的热量分解，需考虑燃煤、石灰石分解的气体在1 200 ~ 1 300 ℃环境下气体体积密封变化后体积量；同步结合窑系统实际运行工况，充分考虑各鼓风机、排风机、引风机等设备负荷风量，合理控制系统漏风系数，确保燃料的充分燃烧与热量有效利用。在次环节中，优先确保各风机风量、风压与系统阻力特性曲线相匹配，避免因风机能力过剩或不足导致能耗增加或气流紊乱。同时，应根据原料特性、产量需求及热工制度动态调整风煤配比，优化燃烧器工作参数，如煤粉在输送过程中，实现煤粉的浓相输送即可。一次风通过压力调整，完成火焰形状调整即可。同时，冷却风机需满足冷却物料，又需确保燃料的供氧需求，避免因风量不足导致燃烧不充分或过剩空气过多造成热损增加。

如《天工开物》所言：“风火相济，乃成至宝。”风机选型与工艺运行须遵循“风随料走、风煤协同”原则，确保系统风量与物料流量动态匹配，避免因风量滞后或超前引发煅烧波动。由此可见，系统仪表计量是操作的关键，系统是否设置氧含量、CO含量在线监测等热工仪表装置，必要时增加联动联控程序，摆脱操作人员经验调节，实现数智化、自动化精准操控，是当下应考虑的重要问题。

2 通风优化方案设计与实施

2.1 核心优化目标

通过综合改造，实现以下目标：①降低系统漏风率至8%～10%以下；②提升有效通风量至150 000 m³/h以上；③窑内氧含量稳定在13%～15%，CO含量降至0.5%以下；④石灰活性度提升至360 mL以上，吨石灰煤耗降低1 kg以上[5]。

2.2 改善优化建议

1.密封堵漏改造，减少无效漏风。针对系统主要漏风点部位及属性，采用“日常维护、分类密封”原则进行治理。

静态密封——设备本体预留的检修门、孔、口等以耐高温材料为主进行密封处理，确保高温环境下密封性能稳定可靠；对工艺收尘器进行系统排查漏风点，包括箱体、盖板、卸料器等锁风装置。必要时，增加灰斗料位计，以物料锁粉，防止因卸料器锁风失效导致冷风漏入。其余部分以更新维护和更换密封胶条为主，进行系统密封。预热器密封：对法兰接口采用高温密封材料 ，检修门、观察孔采用高温压垫密封结构，加装密封垫圈，确保关闭后无间隙。其他静态区域不做赘述。

动态密封——针对窑头、窑尾等旋转或移动部位，考虑其运动轨迹、行程、周期及解除强度、温度，将传统鱼鳞片密封升级为柔性密封+捆绑式拉紧装置，密封间隙控制在1～2 mm，耐高温达500 ℃，避免高温变形；在密封装置外侧增加耐磨解除片，中间增加隔热层，外部设置均匀受力收口装置并依靠外力进行收口。预热器推头方箱采用关节式结构适配拉杆的运动余量，确保在运动轨迹范围内有少量位移，不损坏本体结构，仍能保持良好密封效果。

2.流场优化，提升传热传质效率。预热器流场优化：①控制预热器内部料层厚度（内置溜料管高度）；②优化预热器内部梁体结构；③增大预热器有效容积，使用新材料代替耐火材料；④优化物料质量，如煤粉中的灰分、原料中的砂土、小颗粒等杂质含量，减少结瘤风险；⑤合理测算烟气流速，避免含尘烟气过快或过缓，造成管道冲刷磨损或是物料沉积；⑥优化烟气管道弯头曲率半径和统一使用通径管道，减少局部阻力损失，提升气流均匀性；⑦在关键节点加装导流板，避免涡流区形成；⑧科学模拟预热器内部热流场分布，评估流场均匀性与物料停留时间匹配度，确保物料堆积厚度和内衬结构，降低阻力系数。

3.优化工艺参数调整，合理协同风量配比。通过日常生产数据的收集与理论计算分析，结合系统热工标定结果，控制功能性和介质性空气的进入，合理匹配冷却机供风，以此保障烧成带稳定燃烧氛围。综合核算进气风量、物料分解量及尾排气量和热回收烟气的平衡，确保一定的过量系数，努力实现进气量与排气量的平衡，避免系统正压或负压过大。

3 结束语

通风系统作为燃煤活性石灰回转窑的“呼吸中枢”，其优化水平直接决定生产效能与产品质量。本次通过分类治理密封漏点、重构流场降低阻力、协同调控风煤料参数，系统性解决了传统窑型通风瓶颈，实现了漏风率、有效通风量等关键指标的精准达标，既提升了石灰产品质量的同时，又降低了单位能耗，为产能释放奠定了坚实基础。本研究不仅为同类窑型的通风优化提供了可复制的技术路径，更助力企业在降本增效、绿色生产的发展道路上稳步前行，为钢铁、建材等下游产业链的高质量发展提供了原料保障。

参考文献

[1]翁磊超,孙铁柱,马杰.直接蒸发冷却在回转窑工艺段通风降温气流组织模拟研究[J].制冷与空调(四川),2023,37(4):546-555.

[2]李嘉诚,孙铁柱,翁磊超.基于多目标评价的回转窑工艺段直接蒸发冷却送风方式优化研究[J].制冷与空调(四川),2025,39(1):56-65.

[3]张兴,王蒙,冯忠辉,等.回转窑结圈原因及预防[J].耐火与石灰,2021,46(5):19-21.

[4]李青山,武浩.我公司回转窑窑头窑尾密封漏料治理[J].水泥工程,2020(2):41.

[5]李振雷,洪爱艳.窑系统通风不良的原因分析及解决方法[J].中国水泥,2018(11):90-91.

（本文编辑 曹 阳）

