

矿井通风技术及通风系统节能技术探讨

王 雪

河北大白阳金矿有限公司 河北 张家口 075100

摘要：矿井通风技术是保障井下安全的核心，其系统节能对降低能耗与碳排放意义重大。本文系统分析了通风系统的基本组成、主要通风方式及现状问题，指出布局不合理、设备低效、管理粗放等痛点。通过优化通风系统设计、升级设备、推广节能技术及强化管理监测四大对策，提出分区通风、智能调控、余热回收等关键技术路径。实践案例表明，综合节能措施可降低通风能耗20%以上，为矿井低碳化转型提供理论支撑与技术参考。

关键词：矿井通风；通风系统；节能技术

引言：矿井通风系统是金属非金属矿山安全生产的“呼吸系统”，其可靠性与能效直接影响井下作业安全与成本。随着矿山开采深度增加与能源效率要求提升，传统通风系统面临风阻过大、设备低效、管理滞后等挑战。本文聚焦通风技术基础、现状分析与节能对策，探讨高效低阻通风网络构建、智能调控技术应用及全生命周期管理路径，为金属非金属矿山通风系统节能提供系统性解决方案。

1 矿井通风技术基础

1.1 通风系统的基本组成

矿井通风系统是保障井下作业安全的核心设施，其基本组成包括通风动力设备、通风网络、风流调控装置及监测系统。通风动力设备以主通风机为核心，轴流式通风机因其大风量、高效率特性，在金属非金属矿山应用占比超70%。通风网络由巷道、风桥、风门等构成，形成复杂的立体风流路径，部分矿山因巷道布局不合理，导致风阻系数高达 $0.5-1.2\text{Ns}^2/\text{m}^8$ 。风流调控装置如调节风窗、风门等用于动态分配风量，确保各作业区域风量达标^[1]。监测系统则通过传感器实时采集风速、风压、有害气体浓度等参数，为通风管理提供数据支持。通风系统的设计与维护需遵循《金属非金属地下矿山通风技术规范》等规范要求，确保冗余配置与定期检修。

1.2 主要通风方式

矿井通风方式按进回风井位置可分为中央式、对角式及混合式。中央式通风适用于小型矿山或开采初期，其进回风井均位于井田中央，管理简便但抗灾能力较弱；对角式通风通过多组进回风井分散布置，在大型金属非金属矿山应用广泛，可降低风阻20%-30%；混合式通风结合了前两者优势，适用于超大型矿山或复杂地质条件。通风方式的选择需综合考虑矿山开拓方式、开采深度及有害气体涌出量。

2 矿井通风系统现状分析

2.1 通风系统布局

当前矿井通风系统布局普遍存在局部阻力过大、风流短路等问题。部分老旧矿井因巷道断面不足或支护方式不合理，导致风阻系数偏高；新建矿井则可能因通风网络设计复杂，出现风流分配不均现象。例如，某铁矿因采区通风巷道过长且未设置辅助通风机，导致工作面风量不足，被迫降低开采强度，据统计，因风量不足导致该采区月产量下降约15%。优化布局需从巷道设计、风网结构及通风构筑物三方面入手。例如，采用梯形或拱形断面替代矩形断面可降低风阻10%-15%；通过简化通风网络、减少角联分支可提升风流稳定性；合理设置风门、风桥等构筑物可避免风流短路。

2.2 通风设备运行情况

主通风机作为通风系统的核心动力源，其运行效率直接影响能耗与安全性。调研发现，部分矿井主通风机存在选型偏大、叶片角度不匹配等问题，导致实际运行工况偏离高效区。局部通风机管理粗放，存在“一风吹”或循环风现象，既浪费电能又威胁安全。以某铜矿为例，其主通风机选型偏大，实际运行效率仅为65%，通过优化选型后，效率提升至80%，年节电量达50万kWh。提升设备运行效率需从选型优化、智能调控及维护管理三方面改进。例如，采用变频调速技术可使主通风机根据实际需风量动态调整转速；推广对旋式局部通风机可提升局部通风效率20%-30%；建立设备全生命周期管理档案可延长设备寿命2-3年。

2.3 通风系统管理与监测

当前通风系统管理存在信息化水平低、监测数据利用率不足等问题。部分矿井仍依赖人工巡检，数据采集频率低且易出错；监测系统多独立运行，未与通风网络解算软件联动，难以实时评估通风状态。智能化管理需

构建“监测-分析-决策”一体化平台。例如，通过物联网技术实现传感器数据实时上传，利用大数据分析预测通风系统风险，结合AI算法自动生成调控方案。另外，需加强人员培训，提升对异常数据的敏感度与应急响应能力^[2]。某铅锌矿引入智能化监测平台后，通风系统故障发现时间从平均4小时缩短至30分钟，故障处理效率提升60%。

3 通风系统节能技术关键方向

3.1 通风设备节能

通风设备节能技术是降低矿井通风系统能耗的核心环节，涵盖高效电机应用、流体动力学优化及余热回收三大方向。（1）高效电机应用：传统异步电机因效率较低、功率因数不足，导致主通风机长期处于低效运行状态。采用永磁同步电机替代后，其高功率密度与无刷结构可显著提升电机效率，实测数据表明效率提升幅度达5%~8%。（2）流体动力学优化：风机叶片型线设计直接影响气流效率。通过计算流体力学（CFD）数值模拟技术，可分析叶片表面压力分布与涡流形成机理，优化叶片扭曲角与弦长分布。某企业应用该技术后，风机内部流动损失降低12%，全压效率提升6%，年维护成本下降15%。（3）余热回收技术：通风机排出的热风温度通常可达40~60℃，通过热交换器预热井下进风，可减少锅炉燃料消耗。某矿实施余热回收系统后，冬季井下进风温度提升8~10℃，锅炉天然气用量减少20%，年节约成本超50万元。推广智能局部通风机可结合瓦斯浓度传感器自动调节风量，避免过度通风造成的电能浪费。

3.2 通风网络优化

通风网络优化通过调整巷道参数、增设辅助通风机或封闭废弃巷道，构建低阻高效的风流路径。传统通风系统常采用固定风量分配模式，导致部分区域风量过剩或不足。采用“按需分风”技术后，可通过智能风门或调节风窗实时调整各用风点风量。例如，某矿根据采掘面推进进度动态调节风量，使工作面有效风量达标率从82%提升至98%，同时降低主通风机功率10%。利用图论算法分析通风网络连通性与风阻分布，通过封闭废弃巷道、增设并联巷道等方式优化网络结构。某矿封闭3条废弃巷道后，总风阻下降15%，主通风机功率降低12%，年节电费用超80万元。在开拓新采区时同步设计通风巷道，可避免后期改造成本，例如某矿提前规划通风系统，使新采区投产周期缩短30天。在超长巷道或高阻力区域增设局部辅助通风机，可显著降低主通风机负荷。某矿在3000米运输大巷安装对旋式辅助通风机后，巷道末端风量提升40%，主通风机功率下降8%。但需注意辅

助通风机与主通风机的协同控制，避免风流紊乱。通风网络优化需结合矿井中长期生产规划，避免短期行为。

3.3 自然风压利用

自然风压是地层温度差异引起的空气流动，合理利用可显著降低通风能耗，但需警惕其波动性对通风稳定性的影响。在冬季，地表冷空气下沉与井下热空气上升形成自然风压，可辅助机械通风。某铜矿通过安装自然风压监测装置，结合气象数据预测自然风压变化规律，动态调整主通风机运行时间。在春秋过渡季节，自然风压与机械通风协同作用可实现“零能耗”通风。某铅锌矿通过调节通风机转速与自然风压匹配，在特定时段完全关闭主通风机，仅依靠自然风压维持井下通风，年节电费用超60万元。自然风压受季节、昼夜温差影响显著，需设置安全冗余。例如，某金矿在自然风压利用系统中增设备用通风机，当自然风压波动超过阈值时自动启动，确保通风系统稳定性。通过实时监测井下粉尘浓度与风速，动态调整通风策略，避免粉尘积聚风险。自然风压利用需解决监测精度与调控响应速度问题。某智能化矿山采用高精度微压差传感器与AI预测模型，将自然风压预测误差控制在±5%以内，通风策略调整响应时间缩短至2分钟内。

3.4 智能调控技术

智能调控技术基于物联网、大数据与AI算法，实现通风系统自适应优化，是通风系统节能的未来发展方向。（1）多参数传感器网络：通过部署风速、风压、瓦斯浓度、温度等多参数传感器，实时采集通风系统运行状态。某知名矿井在井下布置200余个传感器节点，数据采集频率达1次/秒，为智能调控提供高精度数据支撑。（2）数字孪生技术：利用数字孪生技术构建通风系统虚拟模型，模拟不同调控方案的效果^[3]。（3）强化学习算法：基于强化学习算法自动生成最优控制策略，实现通风系统动态优化。某智能化矿井应用该技术后，通风系统响应速度提升50%，能耗降低22%。（4）未来展望：融合5G通信与边缘计算技术可进一步提升调控实时性。AI算法可结合历史数据预测通风系统故障，提前制定维护计划，降低非计划停机风险。（5）实践成效：某大型矿井应用智能调控技术后，通风系统综合效率提升25%，年节电费用超800万元，同时减少通风管理人员30%，实现“减人提效”目标。

4 矿井通风系统节能技术优化对策

4.1 优化通风系统设计

矿井通风系统设计是节能的基础，需从全生命周期视角出发，结合矿井地质条件、开采工艺及未来发展规

划,构建高效、低阻的通风网络。核心措施;分区通风规划:将矿井划分为多个独立通风单元,通过“分而治之”减少风流交叉与阻力损失。例如,针对高粉尘区域与低粉尘区域分别设计专用通风系统,避免风量浪费。巷道布局优化:采用“一巷多用”技术,将运输巷与回风巷合并,减少巷道掘进量;优化巷道断面形状,优先选用拱形或梯形断面以降低风阻系数。动态需求匹配:根据矿井开采进度动态调整通风系统,预留扩展接口以适应未来产能提升。实践案例:某新建金矿通过分区通风设计与巷道布局优化,使通风网络复杂度降低40%,主通风机功率减少25%,年节电量超200万kWh。

4.2 升级改造通风设备

通风设备的能效水平直接决定系统能耗,需通过技术升级与智能化改造提升运行效率。关键方向;主通风机高效化改造:采用三元流叶轮、永磁同步电机等技术,提升风机效率10%-15%;推广变频调速技术,使风机转速根据实际需风量动态调整,避免“大马拉小车”。局部通风机智能化升级:部署智能传感器与AI算法,实现粉尘浓度超标自动断电、风量按需调节;推广对旋式局部通风机,提升局部通风效率30%以上。通风构筑物密封性提升:使用高分子材料密封风门、风桥,减少漏风量50%以上;优化调节风窗结构,降低局部阻力损失。经济效益:某铁矿实施设备升级后,通风系统综合效率提升18%,年维护成本降低30%,设备寿命延长5年以上。

4.3 推广应用节能技术

节能技术的规模化应用需政策引导与技术示范双轮驱动,形成可复制、可推广的解决方案。实施路径;自然风压协同利用:安装自然风压监测装置,结合气象数据预测自然风压变化规律,在冬季或过渡季节利用自然风压辅助机械通风,减少主通风机运行时间。通风网络智能调控:部署多参数传感器网络,实时采集风流状态、设备工况及环境参数;利用数字孪生技术构建通风

系统虚拟模型,模拟不同调控方案的效果,生成最优控制策略。余热回收与梯级利用:利用通风机排出的热风预热井下进风,减少锅炉能耗;在井口建设余热发电装置,将废热转化为电能^[4]。

4.4 加强通风系统管理与监测

精细化管理与实时监测是保障节能效果的关键,需构建标准化流程与数字化平台。具体措施;标准化运维流程:制定《矿井通风系统运维规范》,明确巡检周期、数据记录及异常处理流程;建立设备全生命周期管理档案,实现“一机一档”精准管控。智能监测平台建设:开发通风系统智能管理平台,集成设备监控、数据分析与决策支持功能;通过物联网技术实现传感器数据实时上传,利用大数据分析预测通风系统风险。

结束语

矿井通风系统节能技术的优化升级是保障安全、降低能耗、实现绿色开采的必由之路。通过系统设计优化、设备升级改造、节能技术推广及管理监测强化,可显著提升通风系统效率,降低运行成本。未来需进一步融合物联网、大数据与AI技术,构建“智能感知-动态调控-协同优化”的通风管理体系。同时政策引导与技术示范应双轮驱动,推动节能技术在全行业的规模化应用,为煤炭行业低碳转型注入新动能。

参考文献

- [1]张宏利.矿井通风技术及通风系统节能技术探讨[J].山西化工,2025,45(1):215-217.DOI:10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2025.01.076.
- [2]张田隆.矿井通风技术及通风系统优化设计探讨[J].科海故事博览,2022(17):97-99.
- [3]栗鹏刚,张萌.矿井通风智能化技术研究现状与未来发展方向[J].神华科技,2018,16(08):46-48.
- [4]郭元华,李艳刚,马鸿录,李亚俊.矿井通风系统分时段节能通风设计[J].湖南有色金属,2020,36(06):5-7.