

煤矿长距离掘进工作面高效通风技术优化研究

夏军亮

陕西彬长大佛寺矿业有限公司 陕西 咸阳 713500

摘要:我国煤炭开采向深广延伸,长距离、大断面掘进巷道成常态。传统局部通风技术应对超长距离(超1000米)时,出现风量衰减、通风阻力增大、瓦斯积聚、粉尘超标及能耗攀升等问题,制约掘进效率与安全生产。本文聚焦煤矿长距离掘进工作面高效通风难题,系统分析现有压入式、抽出式、混合式通风模式在长距离应用中的局限,深入探讨风筒漏风、沿程摩擦阻力等影响通风效率的关键因素。在此基础上,提出多维度、集成化的高效通风技术优化体系,涵盖高性能柔性风筒选型与智能漏风监测、变频调速局扇精准供风、基于CFD模拟的通风网络动态调控及“一通三防”协同智能预警等核心技术。该体系可提升有效风量率,降低能耗,控制瓦斯与粉尘,为长距离掘进安全高效绿色生产提供技术与理论支撑。

关键词:长距离掘进;高效通风;风筒漏风;变频调速;智能调控

引言

煤炭是我国能源安全基石,未来仍将占据主导。为满足能源战略需求,煤矿开采向深部、规模、智能加速发展,矿井开拓更复杂,长距离(超1500米甚至2000米)掘进工作面增多。这类工作面空间封闭、独头作业,通风状况关乎作业安全与掘进效率。但长距离掘进给通风系统带来巨大挑战:风流输送距离增加,沿程摩擦阻力剧增,末端风量锐减,难满足基本需求;传统风筒问题致漏风率高,加剧有效风量损失;固定转速局扇无法自适应调节,造成能源浪费或供风不足;长距离巷道易形成不良流场,增加瓦斯爆炸风险。因此,构建适应性强、高效低耗、智能化的通风技术体系是煤矿安全高效生产的关键问题。国外在柔性风筒材料、智能通风控制上经验丰富,国内在通风网络解算等方面有诸多进展,但针对我国复杂地质的超长距离掘进,仍缺系统集成、可工程化落地的方案。

1 长距离掘进工作面通风现状与核心挑战

1.1 主要通风模式及其局限性

目前,煤矿掘进工作面主要采用三种局部通风模式:(1)压入式通风:局扇安装在巷道入口附近,通过风筒将新鲜风流压送至工作面。其优点是风流有效射程远,能有效冲淡和排出工作面有害气体及粉尘,安全性较高。但在长距离应用中,风筒内正压高,漏风严重,且污风需沿整个巷道排出,排烟排尘时间长。(2)抽出式通风:局扇安装在工作面附近,通过风筒将污风直接抽出。其优点是巷道内空气质量好,排烟快。但缺点是风流有效射程短,新鲜风流进入工作面主要依靠自然扩散,稀释瓦斯能力弱,且局扇一旦吸入瓦斯超限的污风,极易引

发安全事故,故在高瓦斯矿井应用受限。(3)混合式通风:结合压入式和抽出式,通常以压入式为主,辅以抽出式。这种模式理论上能兼顾两者的优点,但系统复杂,管理难度大,两台风机的风量匹配要求高,在长距离条件下协调控制更为困难。对于长距离掘进,无论哪种模式,都难以克服风量衰减和高能耗的根本矛盾。

1.2 影响通风效率的关键因素

(1)风筒漏风:漏风主要发生在风筒接头处、吊挂不平直造成的褶皱处以及风筒材质本身的微孔渗透。研究表明,当掘进距离超过1000米时,传统风筒系统的漏风率可高达30%~50%,意味着近半数的新鲜风流未到达工作面就已损失。(2)沿程通风阻力:根据达西-魏斯巴赫公式,通风阻力与巷道长度、风流速度的平方成正比。长距离掘进导致总阻力巨大,为维持末端所需风量,必须大幅提高局扇全压,这不仅增加了设备选型难度,也导致电耗激增。(3)局扇性能与工况匹配:固定转速局扇的特性曲线是固定的^[1]。在掘进初期,巷道短,系统阻力小,局扇可能处于大流量、低压力的低效区运行,造成能源浪费;而在掘进后期,巷道长,阻力大,局扇又可能因压力不足而无法提供足够风量,甚至发生喘振。(4)瓦斯与粉尘的动态涌出:工作面瓦斯涌出量受地质构造、煤层赋存等因素影响,具有时空随机性。若通风系统不能及时响应,极易造成局部瓦斯积聚。同样,爆破、割煤等工序会产生瞬时高浓度粉尘,需要足够的风量和合理的风流组织才能有效沉降。

2 高效通风技术优化体系构建

针对上述挑战,本文提出一个集“硬件升级-精准调控-智能协同”于一体的高效通风技术优化体系。

2.1 硬件升级：高性能柔性风筒与智能漏风监测

2.1.1 高性能柔性风筒的精细化选型与应用

传统风筒多采用缝绉+胶粘的接头方式，不仅强度低、易老化，而且每个接头都是一个显著的漏风点。对于长达数千米的巷道，接头数量可达上百个，累积漏风损失触目惊心。为此，应全面推广热合式高强柔性风筒。该风筒采用先进的高频热合或超声波焊接技术，将整幅高强度基布（如涤纶长丝或玻璃纤维）与双抗PVC涂层一次性熔合，形成无缝或极少接头的整体结构。这不仅能将单节风筒长度从常规的10米大幅延长至50-100米，显著减少接头数量，还能将风筒本体的透气率降至每平方米每24小时小于5立方米的极低水平。在材质选择上，应优先考虑纳米改性复合材料。通过在PVC涂层中掺入纳米二氧化硅等粒子，可大幅提升风筒的耐磨性、抗撕裂性和抗老化能力，使其在复杂恶劣的井下环境中服役寿命延长一倍以上^[2]。此外，风筒直径的确定需进行严谨的经济流速计算。根据流体力学原理，风阻与风速的平方成正比，而风筒成本则随直径增大而增加。综合考虑局扇能耗、风筒购置与维护成本，通常将经济风速设定在6-8m/s之间。例如，对于一个最大需风量为500m³/min的工作面，选用Φ1000mm的风筒（对应风速约10.6m/s）可能在初期投资上略高，但其带来的低风阻和低漏风效益将在长期运行中充分体现，全生命周期成本反而更低。同时，应配套使用快速接头和自动调平吊挂装置，确保风筒平直、无褶皱，最大限度减少局部阻力损失。

2.1.2 智能漏风在线监测与诊断系统

即便采用了高性能风筒，也无法完全杜绝漏风，尤其是在风筒被设备刮蹭或遭遇意外损伤时。因此，建立一套实时、精准的漏风监测系统至关重要。该系统由分布式感知层、数据传输层和智能分析层构成。（1）感知层：在风筒入口、出口及沿线每隔200-300米的关键位置部署无线风速/风压一体化传感器节点。这些节点采用低功耗设计，内置高精度MEMS传感器，能够实时采集风流参数。（2）传输层：利用矿用本安型LoRa或UWB（超宽带）无线通信技术，将各节点数据稳定、可靠地汇聚至安装在局扇附近的网关。（3）分析层：地面监控中心的软件平台基于质量守恒定律和沿程阻力递减模型，对上传数据进行实时处理。通过对比入口与出口的风量差，并结合各中间节点的压力梯度变化，可以精确反演出漏风发生的区段和估算漏风量大小。例如，若发现某两个相邻监测点之间的压力降异常增大，则可判定该区段存在集中漏风。系统不仅能以可视化方式在电子地图上高亮显示故障区段，还能通过机器学习算法对历史漏风数

据进行分析，预测风筒的潜在薄弱环节，从而实现从“事后维修”到“事前预防”的根本性转变。

2.2 精准调控：变频调速局部通风机与CFD动态模拟

2.2.1 基于多参数反馈的变频调速局扇控制系统

传统的固定转速局扇无法感知环境变化。而变频调速局扇核心在于构建一个闭环反馈控制系统。系统以PLC（可编程逻辑控制器）或工业计算机为核心，实时采集来自工作面的多源传感信号，主要包括：（1）瓦斯浓度：来自T1（工作面）和T2（回风流）甲烷传感器的数据，是判断供风是否充足的核心指标。（2）粉尘浓度：来自粉尘传感器的数据，用于评估排尘效果。（3）末端风速：来自风筒出口附近风速传感器的数据，直接反映有效风量。控制器内嵌预设的安全阈值和模糊PID（比例-积分-微分）控制算法^[3]。当任一参数（如T1瓦斯浓度）接近预警值（如0.8%）时，控制器会立即发出指令，平滑提升变频器的输出频率，从而提高局扇转速和全压，迅速增大风量以稀释有害气体。反之，当所有参数均处于安全低位时，系统会自动降低频率，使局扇运行在高效节能区间。这种“按需分配”的模式，彻底避免了能源浪费，实现了安全与经济的双赢。

2.2.2 基于CFD的通风网络数字孪生与动态优化

CFD（计算流体动力学）技术为通风优化提供了强大的虚拟试验场。其应用可分为静态优化与动态调控两个阶段。（1）静态优化（事前规划）：在掘进开始前，利用激光扫描或地质勘探数据，构建巷道高精度三维模型。在CFD软件中设置边界条件（如入口风量、出口压力、壁面粗糙度），模拟不同方案下的流场。通过分析速度矢量图、迹线图和浓度云图，可以科学地确定最优的风筒出口位置、仰俯角和偏转角，确保新鲜风流能有效覆盖整个工作面断面，避免形成瓦斯积聚的“死角”或粉尘沉降的“涡流区”。甚至可以模拟导流板、引射器等辅助装置的效果，为物理改造提供依据。（2）动态调控（事中决策）：随着掘进的推进，巷道长度、断面形状乃至瓦斯涌出规律都在不断变化。此时，可将CFD模型升级为一个数字孪生体。该孪生体通过API接口与现场的智能预警平台实时对接，同步获取最新的巷道几何信息、瓦斯涌出速率、粉尘产生强度等动态参数。当平台预测到未来某个工况（如下一个循环爆破后）可能出现通风不足时，可先在数字孪生体中进行多方案仿真推演，快速找出最佳的局扇调速曲线或风筒调整策略，再将指令下发给现场设备执行。这种“虚拟先行、实体验证”的模式，极大地提升了通风管理的前瞻性和科学性。

2.3 智能协同：“一通三防”一体化智能预警平台

2.3.1 多源异构数据融合中心

该平台作为整个优化体系的“大脑”，首先需要建立一个强大的数据湖，接入并标准化处理来自各个子系统的海量数据。这些数据包括但不限于：通风系统的风机状态、风量风压；瓦斯监测系统的CH₄、CO、O₂浓度；粉尘监测系统的PM_{2.5}、PM₁₀、总粉尘浓度；火灾监测系统的束管分析数据、温度、烟雾；以及人员定位、视频监控、地质雷达等辅助信息^[4]。通过时空对齐、数据清洗和特征提取，将这些多源异构数据转化为可供分析的统一格式。

2.3.2 基于AI的风险超前预测与评估

平台的核心能力在于利用人工智能技术进行风险预测。例如，可以采用长短期记忆网络（LSTM）构建瓦斯涌出量预测模型。该模型以历史瓦斯浓度、掘进速度、地质构造标志层距离、割煤机电流等作为输入特征，能够提前10-30分钟预测工作面瓦斯涌出趋势。同样，可以利用卷积神经网络（CNN）分析巷道断面图像，识别煤岩界面变化，辅助判断前方是否存在瓦斯富集区。通过融合多个预测模型的输出，平台可以生成一个综合性的“通风安全指数”，对当前及未来一段时间内的安全风险进行量化评估和分级预警。

2.3.3 多系统联动的协同应急处置

当平台判定风险等级超过阈值时，将自动触发协同应急处置预案。这不再是简单的声光报警，而是一系列跨系统的智能联动：通风系统立即向变频局扇发送指令，提升风量至应急水平。防尘系统自动开启工作面及回风巷的全断面喷雾降尘装置。瓦斯抽采系统（如有）增大邻近钻孔的抽采负压。人员信息系统通过精确定位，向风

险区域内的所有人员手持终端推送撤离路线和语音提示。视频监控系统自动调取相关摄像头画面，供调度员远程确认现场状况。这种高度集成的协同机制，将事故响应时间从分钟级缩短至秒级，极大地提升了矿井的本质安全水平。

3 结语

本文针对煤矿长距离掘进工作面高效通风难题，提出了一套集成硬件升级、精准调控与智能协同的优化技术体系。研究发现，风筒漏风是制约通风效率的瓶颈，采用热合式高强柔性风筒与智能漏风在线监测可提升有效风量率；变频调速局扇结合CFD动态模拟，可实现通风精准化与最优化，保障通风质量；“一通三防”一体化智能预警平台是未来方向，可提升通风安全。展望未来，随着新一代信息技术深度融合，煤矿通风系统将更自主、智能、绿色。下一步研究可聚焦开发自适应决策算法、探索分布式风机群协同供风模式、实现通风优化与多环节深度耦合，持续技术创新将为煤矿安全、高效、可持续发展筑牢防线。

参考文献

- [1]霍江伟.煤矿长距离掘进工作面通风技术分析[J].矿业装备,2023,(10):69-71.
- [2]高嵩,师泽轩.煤矿掘进工作面长距离通风应用研究[J].煤矿现代化,2022,31(05):88-91.
- [3]王学峰.煤矿长距离掘进工作面通风技术研究[J].山西化工,2022,42(03):173-175.
- [4]王小锋.煤矿井下长距离作业通风的重要性及技术发展研究[J].矿业装备,2025,(04):93-95.