

煤矿通风系统与瓦斯抽采一体化的技术与经济性分析

黄 健

云南东源镇雄煤业有限公司 云南 昭通 657200

摘要：煤矿通风系统与瓦斯抽采一体化是指通过系统性协同设计，将通风系统优化与瓦斯抽采技术深度融合，形成时空衔接、功能互补的安全治理模式。通过计算流体力学（CFD）模拟优化通风路径，降低气流阻力，同时结合智能风量调控技术，动态匹配瓦斯抽采需求。智能监测与控制：集成三维通风仿真平台实时解算瓦斯浓度分布，并利用UWB定位与F5G通信实现抽采设备精准联动。采用地面钻孔预抽、采动层抽采及老空区抽采等技术，降低煤层瓦斯含量和压力，减少开采时瓦斯涌出量。

关键词：煤矿通风系统；瓦斯抽采一体化；技术；经济性

煤矿通风系统与瓦斯抽采一体化是指通过系统性协同设计，将通风系统优化与瓦斯抽采技术深度融合，形成时空衔接、功能互补的安全治理模式。

1 煤矿通风系统与瓦斯抽采一体化概念

1.1 时间协同。实施全生命周期瓦斯治理序列：开采前：对瓦斯含量 $> 16\text{m}^3/\text{t}$ 区域提前5-10年实施地面钻井预抽采，使瓦斯含量降至安全阈值以下；开采中：针对瓦斯含量 $8\text{--}16\text{m}^3/\text{t}$ 区域，采用井下定向钻机递进式预抽采，确保开采时瓦斯含量 $< 8\text{m}^3/\text{t}$ ；开采后：持续开展采空区卸压抽采，消除残余瓦斯风险。

1.2 空间协同。实现井上下立体化布局：地面钻井按200-300米网格化布置，覆盖高瓦斯区域；井下构建“本煤层预抽+采动区动态抽采+采空区低负压抽采”多系统，形成分层治理网络；通风路径通过CFD模拟优化风道设计，降低气流阻力，与抽采点位精准匹配。

1.3 功能协同。突出资源与安全双效合一：瓦斯抽采井兼具地质勘探、消突、采前/采动/采后抽采的“一井五用”功能；通风系统集成智能调控技术，动态匹配抽采需求，同步稀释作业面瓦斯浓度；抽采瓦斯用于发电或供热，实现减排增效。本质目标：通过时空资源优化配置，突破传统分治模式，达成“先抽后采、抽采平衡”的本质安全目标，同时提升资源利用率与经济性。

2 瓦斯抽采技术基本原理

瓦斯抽采技术的基本原理是通过人工建立负压系统，改变煤层瓦斯赋存状态与运移路径，实现瓦斯安全高效抽取。

2.1 压力驱动解吸原理。负压环境构建，利用真空泵在抽采管路内形成负压（压强低于煤层气压），打破瓦斯吸附平衡状态。吸附态瓦斯解吸转化，根据朗格缪尔吸附方程，压力降低促使85%以上的吸附态瓦斯解吸转化

为游离态，形成可抽采气体。

2.2 气体运移机制。浓度梯度驱动，煤层内部解吸的游离态瓦斯向钻孔或巷道方向扩散，形成“高浓度→低浓度”的定向流动。渗流通道优化，通过钻孔（地面钻井/井下钻孔）或巷道构建瓦斯运移通道，配合水力压裂、氮气注入等技术扩大煤层裂隙，提升渗透率。

2.3 安全阈值控制。含量与压力双降，持续抽采使煤层瓦斯含量降至安全阈值（通常 $< 8\text{m}^3/\text{t}$ ），瓦斯压力降至0.74MPa以下，消除突出风险。涌出量控制，开采前预抽可减少回采期间60-70%的瓦斯涌出量，避免工作面超限。本质目标：通过改变瓦斯赋存状态（吸附→游离）与运移路径（无序扩散→定向抽采），达成“抽采达标、先抽后采”的安全开采条件，同时实现资源化利用。

3 煤矿通风系统与瓦斯抽采一体化技术经济性分析

3.1 煤矿通风系统与瓦斯抽采一体化如何降低开采成本。煤矿通风系统与瓦斯抽采一体化通过工程协同、资源复用和智能调控实现吨煤成本降低5%~10%，其降本路径包含以下核心维度：工程协同降本，巷道工程量压缩，优化钻孔布置：依据瓦斯抽采半径精准设计钻孔间距，减少无效钻孔进尺；通风系统降阻：通过CFD模拟优化巷道断面与支护形式，降低通风阻力30%以上，减少降阻巷道工程量；抽采-通风联合布巷：共用巷道系统，避免重复掘进（如底抽巷与回风巷协同设计）。材料成本控制，差异化管路配置：按抽采量匹配管路规格（“一巷一策”），减少管材浪费；封孔工艺升级：改进带压封孔技术，降低封孔材料消耗量20%以上；连接件标准化：自制抽采管路连接短节，降低采购成本。装备与能效优化，智能调控减耗，通风机变频控制：根据瓦斯浓度动态调节风量，降低空转能耗；抽采系统并网运行：分区抽采管网智能联调，提升真空泵利用效率。技术提效降

本，定向长钻孔替代密集短孔：单孔深度突破500米，减少钻探工程投入60%；水力压裂增透技术：提升煤层渗透率5倍以上，缩短预抽时间。资源化增值路径，瓦斯发电创收抽采瓦斯纯度 $>30\%$ 时用于发电，单矿年发电收益超1亿元；“三区联动”抽采模式：单口地面钻井5年可解放煤量150万吨，降低吨煤治理成本88元/吨。管理协同增效，部门壁垒破除：通风与抽采团队统一考核，避免责任推诿；修旧利废激励：废旧材料回收指标与工资挂钩，吨煤材料费降低8%。本质效益：通过工程复用（巷道/钻孔）→能源循环（瓦斯发电）→管理协同三级降本路径，突破传统分治模式下通风与抽采的双重成本叠加，实现安全投入与经济效益的平衡。

3.2 煤矿通风系统与瓦斯抽采一体化如何提高生产效率。煤矿通风系统与瓦斯抽采一体化技术通过优化治理流程、释放采掘空间及智能协同管理，可显著提升生产效率，掘进效率倍增，定向长钻孔技术，采用千米定向钻机施工500米以上深孔，替代密集短钻孔，单孔覆盖范围扩大3倍，减少钻孔工程量60%以上。煤矿应用后煤巷单月掘进达252米，创区域纪录。水力增透技术，超高压水力割缝泵使单孔瓦斯流量提高5倍，消突达标时间缩短60%，直接加速巷道掘进。回采工作面提效，瓦斯预抽提速，地面钻井网格化布局（200-300米间距）实现采前5-10年超前抽采，煤层瓦斯含量降至安全阈值（ $<8\text{m}^3/\text{t}$ ），消除回采停滞隐患。卸压瓦斯高效抽采，顶板走向长钻孔“以孔代巷”技术，配合采动区动态抽采系统，降低工作面瓦斯涌出量70%，保障连续开采。运维效率升级，智能监控减干扰，自动计量与防喷孔装置实现钻孔封孔-抽采-计量全流程无人干预，减少人工巡检频次50%。跨部门协同管理，通风与抽采团队统一考核，技术攻关（如瓦斯防治创新工作室）加速问题解决，设备故障率下降30%。技术革新协同性突破：水力割缝增透（单孔浓度70%）+地面钻井全覆盖（5500口井最高日产气2万 m^3 ）+自动计量系统，本质增效：通过技术替代（长钻孔→短钻孔）→时间置换（超前抽采→回采连续）→管理重构（多岗合一）三重突破，将瓦斯治理由“生产制约项”转化为“效率助推器”。

3.3 煤矿通风系统与瓦斯抽采一体化如何减少安全事故。防止瓦斯超限与积聚，通风稀释优化：动态调节风量确保井下瓦斯浓度始终低于爆炸阈值（ $<1\%$ ），采用分区通风设计避免风流死角，减少局部瓦斯积聚风险。瓦斯源头控制：一体化抽采系统通过地面钻井网格化布局（200-300米间距）提前5-10年预抽煤层瓦斯，将瓦斯含量降至安全水平（ $<8\text{m}^3/\text{t}$ ），消除突出事故隐患。

智能监控与预警联动，实时监测系统：集成瓦斯传感器与通风设备，当浓度超限或风机停风时自动断电闭锁，响应时间 ≤ 30 秒，防止电火花引发爆炸。突出危险性预测：实施“四位一体”策略（突出预测、防治措施、效果检验、安全防护），定期测定瓦斯参数（如压力、含量），指导针对性治理。工程协同与风险管理，区域递进式治理：采用“三区联动”模式（规划区预抽、准备区联合抽采、生产区强化抽采），缩短瓦斯治理周期50%，避免采掘交替延误。应急预案强化：一体化系统支持自动喷雾降尘和封闭爆炸区域，结合矿工安全培训，减少二次灾害发生概率。制度与技术创新，责任体系构建：明确矿长负责制和技术总工责任制，统一考核通风与抽采团队，破除部门壁垒；资金与设备投入：专项经费用于通风系统升级和抽采设备更新，提升系统可靠性。

3.4 煤矿通风系统与瓦斯抽采一体化经济效益评估方法。基础财务评价指标，静态经济分析法，投入产出比：对比巷道共用节约工程量（减少重复掘进30%）与设备投入成本，计算吨煤成本降幅；收益成本比：瓦斯发电收益（纯度 $>30\%$ 时单矿年收益超1亿元）对冲抽采系统运维成本。动态经济分析法，净现值（NPV）：考虑5-10年超前抽采周期，贴现瓦斯发电与碳交易长期收益；动态投资回收期：定向长钻孔技术（单孔深500米+）降低钻探成本60%，回收期缩短至3-5年。资源化增值路径，瓦斯发电收益：按度电成本0.2元/ kWh +政府补贴0.3元/ kWh 测算，内部收益率（IRR）可达18%；碳减排交易：每抽采1万 m^3 瓦斯减少 CO_2 当量150吨，创造碳汇收益。政策与风险管理评估，政策激励整合，专项补贴（如瓦斯发电上网电价溢价）、安全投入税费抵扣，降低项目初期现金流压力；政府专项奖励覆盖设备更新费用的20-30%。风险成本控制，应用《煤矿瓦斯防治能力评估评分表》量化事故风险成本，达标矿井（评分 ≥ 80 分）安全投入减少15%；突出事故概率下降70%，间接降低吨煤安全成本88元。

4 煤矿通风系统与瓦斯抽采技术创新与挑战

4.1 核心技术创新。智能化控制技术，动态调风系统：实时监测瓦斯浓度，自动调整风量（响应时间 ≤ 30 秒），避免局部瓦斯积聚；智能抽采装备：定向钻机结合水力压裂技术，单孔抽采量提升5倍，渗透率提高300%。新材料与工艺突破，纳米吸附材料：增强低浓度瓦斯富集效率（如石墨烯基复合材料提升吸附率40%）；脉动抽采技术：优化压力波动参数，打破瓦斯吸附平衡，抽采周期缩短60%。多技术协同应用，地面-井下联合抽采：网格化钻井（200-300米间距）实现超前5-10年

预抽，降低煤层瓦斯含量至安全阈值（ $< 8\text{m}^3/\text{t}$ ）；通风-抽采一体化设计：共用巷道减少掘进量30%，吨煤成本降低5-8元。

4.2 关键技术挑战。地质适应性瓶颈，深部开采（>800米）高地压、低透气性煤层导致抽采效率骤降，常规钻孔技术失效；断层发育区易引发钻孔塌孔，瓦斯抽采浓度波动超30%。安全与运维风险，智能设备抗爆等级不足，井下电磁干扰致传感器误报率15%；复合型技术人才缺口超40%，故障修复时间延长50%。

4.3 创新突破路径。技术融合方向，开发地质自适应钻机（如震波导向钻头），提升复杂构造区成孔率；构建统一数据平台（如矿山物联网），打破系统壁垒。政策与产业协同，设立专项补贴（覆盖设备更新费用20-30%），激励瓦斯发电并网；建立“产学研用”基地，定向培养复合型技术人员。核心矛盾：深部开采需求↑（占产能35%）↔现有技术适应性↓（抽采率<40%）。需通过跨学科协作（材料学+地质工程）↔全链条优化（抽采-输送-利用）实现本质突破。

5 新技术在煤矿通风系统与瓦斯抽采中的应用机遇挑战

5.1 技术应用带来的核心机遇。智能化控制突破，动态调风系统实现瓦斯浓度超标（>1%）30秒内自动调整风量，消除局部积聚风险；定向钻进技术配合水力压裂，单孔抽采量提升5倍，渗透率提高300%，显著缩短治理周期。资源化利用拓展，瓦斯发电商业化加速：浓度>

30%时发电内部收益率（IRR）达18%，结合碳交易收益形成新增长点；保压封孔技术实现抽采浓度提升30%，降低综合成本20%以上。系统协同增效通风-抽采一体化设计减少巷道掘进量30%，吨煤成本降低5-8元；地面钻井网格化布局（200-300米间距）实现超前5-10年预抽，煤层瓦斯含量降至安全阈值（ $< 8\text{m}^3/\text{t}$ ）。

5.2 技术落地面临的关键挑战。地质适应性瓶颈，深部开采（>800米）高地压导致常规钻孔塌孔率超30%，抽采浓度波动剧烈；断层发育区渗透率骤降60%，现有增透技术失效。安全运维风险，井下电磁干扰致传感器误报率达15%，抗爆设备研发滞后；复合型技术人才缺口超40%，故障修复时间延长50%。

5.3 破局方向。技术融合创新，开发震波导向钻头等地质自适应装备，提升复杂构造区成孔率；构建矿山物联网统一平台，打通数据链壁垒。政策与产业协同，设立专项补贴覆盖设备更新费用20-30%，激励低浓度瓦斯发电；建立“产学研用”基地定向培养技术人才。

总之，深部产能占比↑（35%）现有技术抽采率↓（<40%）。需通过跨学科协作（材料学+地质工程）与全链条优化（抽采-输送-利用）实现本质突破。

参考文献

- [1]周艳红.浅谈煤矿通风系统与瓦斯抽采一体化的技术与经济性分析,2022.
- [2]赵秀丽.关于煤矿通风系统与瓦斯抽采一体化的技术与经济性探讨,2023.