

煤矿井下瓦斯治理与安全防控策略分析

韩永清

准格尔旗神陶煤炭运销有限责任公司营沙壕煤矿 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘要：瓦斯治理需融合精准抽采技术、智能通风系统、严格管理制度及地质适应性措施，同时通过新技术应用推动安全与资源协同发展。煤矿瓦斯的主要成分是甲烷（ CH_4 ），其含量通常占瓦斯总量的70%~95%。次要成分包括少量二氧化碳（ CO_2 ）和氮气（ N_2 ）等气体，二者合计占比一般不超过15%。爆炸危险性，甲烷浓度在5%~16%时遇火源即可爆炸，冲击波速度超1000 m/s，火焰温度达2650℃。资源化利用，瓦斯（煤层气）作为非常规天然气，可通过抽采技术转化为能源。环境影响，直接排放时，甲烷的温室效应是二氧化碳的25倍，我国已将低浓度瓦斯纳入碳减排项目（CCER）。

关键词：煤矿；井下瓦斯治理；安全防控；策略

瓦斯危害本质是能量突然释放（爆炸/突出）与环境破坏（窒息/火灾）的综合作用，需通过精准监测、强化抽采及严格管理进行防控。

1 煤矿瓦斯的形成

1.1 瓦斯形成的核心阶段。泥炭化阶段（生物化学成气期），植物遗体在沼泽中经厌氧微生物分解，生成甲烷、二氧化碳和水。温度条件： $\leq 50^\circ\text{C}$ ，氧气隔绝环境。此阶段瓦斯大部分逸散至大气，少量保留于浅层煤层。煤化阶段（变质作用期）。随地层沉降，泥炭在高温高压下转化为褐煤→烟煤→无烟煤。温度条件： $50 \sim 220^\circ\text{C}$ ，有机物热解生成大量甲烷。此阶段产生的瓦斯被封闭在煤层及围岩裂隙中，构成现代矿井瓦斯主体。

1.2 赋存状态与释放机制。赋存形式：游离态：存在于煤体裂缝、孔隙中的自由气体（约10%~20%）。吸附态：瓦斯分子吸附于煤微孔表面（占80%以上），开采时压力降低解吸释放。释放诱因：采掘活动破坏煤岩结构→压力下降→吸附瓦斯解吸→通过裂隙涌向巷道。

1.3 补充来源。除成煤作用外，矿井瓦斯还可能来自：地下水释放的溶解瓦斯煤炭生产过程中新生成的瓦斯（如机械切割产气），煤矿瓦斯本质是地质历史时期有机质转化的甲烷富集体，其形成受控于成煤环境、埋深及地质构造，并通过抽采技术可转化为清洁能源。

2 煤矿瓦斯对煤矿的危害

2.1 瓦斯爆炸（最致命危害）。爆炸条件，甲烷浓度处于5%~16%区间（最剧烈为9.5%），遇 650°C 以上火源（如电火花、爆破火焰）即爆。冲击波速度超1000 m/s，火焰温度高达2650℃，破坏巷道支护、损毁设备。次生灾害，爆炸扬起煤尘引发二次爆炸，压力可达初始10

倍；2024年某矿瓦斯突出诱发爆炸，致16人死亡。

2.2 窒息风险。作用机制：瓦斯（ CH_4 ）挤压氧气空间，浓度 $>40\%$ 时氧气含量降至12%以下，致人缺氧昏迷（5分钟内死亡）。高风险场景：通风不良的盲巷、采空区、断层带易积聚高浓度瓦斯。

2.3 煤与瓦斯突出。突发性灾害，地压与瓦斯压力共同作用，瞬间喷出数万吨煤岩及数万立方米瓦斯。破坏通风系统，诱发爆炸或掩埋人员。诱因，断层带、高地应力区未执行“四位一体”防突措施（预测→区域措施→检验→防护）。瓦斯危害本质是能量突然释放（爆炸/突出）与环境破坏（窒息/火灾）的综合作用，需通过精准监测、强化抽采及严格管理进行防控。

3 煤矿通风排瓦斯技术

3.1 核心排放技术措施。分级管控排放，低浓度瓦斯（ $\text{CH}_4 < 3\%$ ）：由通风队采用风筒分风法限量排放，回风流浓度严格控制在 $<1.5\%$ 。高浓度瓦斯（ $\text{CH}_4 \geq 3\%$ ）：由矿山救护队按应急预案处置，执行“撤人→断电→限量”三步原则。均压防漏风技术，调节通风压力平衡，减少采空区向工作面的瓦斯泄漏（如均压风机系统）。适用于封闭采空区或断层带瓦斯控制，降低常规通风能耗。超低浓度瓦斯（ $\text{CH}_4 < 0.75\%$ ）处理，蓄热氧化（RTO）：将甲烷浓度1%左右的乏风瓦斯加热至 900°C 无焰氧化，摧毁率 $\geq 99\%$ ，同时输出热能（如余吾煤矿供热项目）。催化氧化：在 350°C 催化剂作用下分解甲烷，适用于分散式乏风源。

3.2 安全防护与管理规范。实时监测要求，作业全程连续监测 CH_4 、 O_2 （ $\geq 20\%$ ）、 CO_2 浓度，至少配备2台光学瓦检仪。抽放管路安装孔板流量计（精度 $\pm 1.5\%$ ），监控瓦斯抽采量。设备与人员防护，排放区域切断电

源,设置警戒线,作业人员佩戴隔绝式自救器。抽放泵站距井口 $\geq 50\text{m}$,配备防爆阻火器和放水装置。法规强制要求,新版《煤层气(煤矿瓦斯)排放标准》(GB 21522—2024)要求:甲烷浓度 $\geq 8\%$ 的瓦斯必须抽采利用,禁止直接排放;矿井绝对瓦斯涌出量超限(采面 $> 5\text{m}^3/\text{min}$ 、掘进面 $> 3\text{m}^3/\text{min}$)必须建立抽放系统。

3.3 技术发展趋势。井下-地面联动抽采,地面水平井分段压裂,单井日产气量突破 1.1万m^3 ,替代井下钻孔预抽。低碳资源化利用,超低浓度瓦斯氧化供热/发电纳入CCER项目(如科技项目年减排23万吨 CO_2e)。智能通风系统,基于瓦斯浓度动态预测模型,自动调节风门与风机参数(需融合物联网实时数据)。煤矿通风排瓦斯技术正从被动防控转向“抽采资源化+智能调控”模式,核心是通过系统设计优化、分级管控及新技术应用,在保障安全的前提下实现甲烷减排与能源回收。

4 如何选择适合的煤矿瓦斯治理技术

4.1 基础条件评估。瓦斯参数测定,优先实施:准确测定煤层瓦斯压力、含量、透气性系数及吸附常数。新技术应用:采用井下一站式自动化测定仪(30分钟内完成含量测定),替代传统分阶段测量。

4.2 场景化技术匹配。巷道掘进瓦斯治理,高效技术:定向长钻孔条带预抽:覆盖巷道轮廓线外 30m ,超前钻孔 300m ;穿层钻孔群:针对断层带等复杂地质区域。禁忌:未达标区域(残余瓦斯含量 $> 8\text{m}^3/\text{t}$)禁止掘进。

4.3 管理保障要求。机构配置:设立专职防突队,瓦检员与爆破工禁止兼职;总工程师需具备5年以上突出矿井管理经验。过程控制:执行“日分析”制度:通风参数、抽采数据实时诊断;抽采达标评判:钻孔密封质量(负压 $> 13\text{kPa}$)、计量误差 $< 1.5\%$ 。

4.4 技术发展趋势。智能监测:孔-地联合监测:融合声电信号预警突出风险;动态调风系统:基于瓦斯浓度AI预测自动调节风门。低碳利用:乏风氧化($\text{CH}_4 < 0.75\%$)供热:摧毁率 $> 99\%$;纳入CCER碳交易:单项目年减排可达23万吨 CO_2e 。

5 新技术在煤矿瓦斯治理中的应用

5.1 地面抽采技术创新。碎软煤层水平井分段压裂技术,案例:某煤矿LG03井采用顶板超长水平段压裂(1219米),单井日产气量达 $11,129\text{m}^3$,累计产气 835万m^3 ,解决碎软低渗煤层“抽不动”难题。突破点:首创“地质导向布井+饱和体积压裂”(单段加砂量 526.5m^3 ,排量 $24\text{m}^3/\text{min}$),效率较传统井下抽采提升3倍。地面U型井高效预抽,案例:某煤业建成U型井群,日产气量峰值 $9,200\text{m}^3$ (为直井18倍),累计产气 930万m^3 ,替代井下

高抽巷。

5.2 井下钻孔工艺革新。大直径“以孔代巷”技术,案例:集团一矿应用 1.4米 直径倾斜长钻孔(55° 倾角),替代传统 45° 坡度高抽巷,工期从50天缩短至20天,成本降低 60% 。工艺:井下反井钻机精准定位(方位偏差 $\leq 0.5\%$) + 地面扩孔技术。钻孔防喷与智能管控,案例:矿业下峪口矿建成独立低负压防喷抽采系统,22306底板岩巷打钻超限率下降 90% 。配套:瓦斯治理实训基地“四区一室”模拟系统,规范钻孔操作流程。

5.3 资源化利用技术。超低浓度瓦斯蓄热氧化,例:南风井项目采用君发科技无焰氧化系统(900°C),将 CH_4 浓度 0.75% 乏风转化为热能,甲烷摧毁率 $\geq 99\%$,年供热量 $114,900\text{GJ}$,减排23万吨 CO_2e 。延伸:三期工程将实现热电联产(3MW 发电+供热),年发绿电 $1,200\text{万度}$ 。低浓度瓦斯发电集群,案例:低浓度瓦斯发电项目入选国家能源转型典型案例,年发电 $8,891\text{万度}$,替代燃煤锅炉供热。

5.4 智能监测与管理升级。瓦斯抽采动态调控,应用:矿融合声电信号预警系统,实现“日分析”制度动态优化抽采参数。5G+AI安全防控,案例:煤矿部署5G+AI分析平台,实时诊断通风异常,减少作业人员112人。前技术迭代正推动瓦斯治理从被动防控转向“地面预抽-井下精准治理-全浓度资源利用”的低碳闭环模式。

6 煤矿瓦斯安全防控策略

6.1 基础防控技术。通风系统优化,Y型通风系统:消除采面上隅角瓦斯积聚(浓度降至 0.7% 以下),人员全程处于新鲜风流。均压防漏风:调控通风压力平衡,减少采空区瓦斯泄漏(适用封闭区域或断层带)。强制标准:工作面进风流中氧气浓度 $\geq 20\%$ 、 $\text{CO}_2 \leq 0.5\%$,有害气体浓度严控上限。瓦斯抽采强化,高瓦斯矿井:建立永久地面抽采系统,工作面绝对涌出量 $> 5\text{m}^3/\text{min}$ 时必须抽采。抽采质量管控:钻孔密封负压 $> 13\text{kPa}$,计量误差 $< 1.5\%$ 。

6.2 防突与风险管控。“四位一体”防突体系,区域防突:预测→措施→效果检验→区域验证;局部防突:工作面预测→措施→检验→安全防护(如便携式孔口钻屑采集装置提升预测精度)。禁忌:残余瓦斯含量 $> 8\text{m}^3/\text{t}$ 或未达标区域严禁掘进。分级排放管理,低浓度瓦斯($\text{CH}_4 < 3\%$):限量分风排放,回风流浓度 $< 1.5\%$;高浓度瓦斯($\text{CH}_4 \geq 3\%$):撤人→断电→限量排放,由救护队处置。

6.3 智能监测与预警。实时监测要求,作业面连续

监测CH₄、O₂、CO₂，配备双光学瓦检仪；推广5G+AI平台，实时诊断通风异常（如老石旦煤矿减少作业人员112人）。预警响应机制，执行“瓦斯零超限”管理，超限即按事故处理；建立“日分析”制度：动态优化通风与抽采参数。

6.4 资源化利用与应急。瓦斯低碳转化，超低浓度瓦斯（CH₄ < 0.75%）：采用蓄热氧化（RTO）技术，甲烷摧毁率 ≥ 99%，输出热能或发电；政策支持：甲烷浓度 ≥ 8%的瓦斯禁止直排，强制抽采利用，纳入CCER碳交易。应急处理流程，爆炸事故响应：切断电源→封闭爆炸区→洒水降温→检测气体达标后恢复通风；防护装备：救援人员佩戴隔绝式自救器，确保氧气 > 19%、CH₄ < 1%再行动。瓦斯安全防控需以“通风可靠、抽采达标、监控有效、管理到位”为原则，结合智能技术提升预警速度，通过资源化利用实现安全与减排双目标。2025年新规要求矿井绝对瓦斯涌出量超限必须建立抽采系统，违者依法严惩。

7 如何有效避免煤矿瓦斯事故

7.1 强化通风核心防控。通风系统优化，采用Y型通风消除采面上隅角瓦斯积聚（浓度控制在0.7%以下），确保人员全程处于新鲜风流中。实施均压防漏风技术，减少采空区瓦斯泄漏（尤其适用于封闭区域或断层带）。强制标准：进风流氧气浓度 ≥ 20%、CO₂ ≤ 0.5%，瓦斯浓度严格低于爆炸下限（1%）。抽采达标管理，高瓦斯矿井必须建立永久地面抽采系统，工作面绝对涌出量 > 5m³/min时强制抽采。钻孔密封负压 > 13kPa，计量误差 < 1.5%，确保抽采有效性。

7.2 深化防突与风险管控。四位一体防突体系，区域防突：地质预测→预抽措施→效果检验→区域验证；局

部防突：工作面预测（如便携式孔口钻屑采集装置提升精度）→卸压措施→效果检验→安全防护。红线管理：残余瓦斯含量 > 8m³/t或未达标区域严禁掘进。分级排放技术，低浓度瓦斯（CH₄ < %）：限量分风排放，回风流浓度 < 1.5%；高浓度瓦斯（CH₄ ≥ %）：严格执行撤人→断电→限量排放流程，由专业救护队处置。

7.3 智能监控与预警升级。全流程智能防控，部署AI摄像机实时识别顶板裂缝、瓦斯异常区域及违规操作（未戴安全帽等），联动5G网络传输数据。执行“瓦斯零超限”制度，超限即按事故追责，建立通风参数“日分析”机制。精准预测技术，定期测定煤层瓦斯压力、含量、吸附常数等基础参数；推广井下声电信号融合预警系统，超前识别突出风险。

7.4 资源化利用与应急响应。瓦斯低碳转化，超低浓度瓦斯（CH₄ < 0.75%）采用蓄热氧化技术摧毁率 ≥ 99%，输出热能或发电；甲烷浓度 ≥ 8%的瓦斯禁止直排，强制抽采利用并纳入碳交易。应急标准化流程，爆炸事故响应：立即断电→封闭爆炸区→洒水降温→气体检测达标后恢复通风；救援防护：救援人员需佩戴隔绝式自救器，确认氧气 > 19%、CH₄ < 1%方可行动。

总之，瓦斯事故防控依赖“通风可靠、抽采达标、监控有效、管理到位”四原则，结合智能技术将事故响应时间缩短60%以上。新规要求矿井绝对瓦斯涌出量超限必须建立抽采系统，违者依法停产整顿。

参考文献

- [1]李盼.煤矿井下瓦斯治理与安全防控策略.2022.
- [2]张媛媛,煤矿井下瓦斯治理与安全防控策略探讨.2023.