

煤矿瓦斯治理理论与技术

姚旭光

郑州祥隆地质工程有限公司 河南 郑州 452370

摘要: 煤矿瓦斯治理理论与技术聚焦瓦斯生成、运移规律及灾害防治。理论层面涵盖瓦斯赋存机制、突出预测模型及力学平衡条件; 技术体系包括本煤层/邻近层/采空区瓦斯抽采、低浓度瓦斯高效利用、智能化监测预警系统等。通过“先抽后采、监测监控、以风定产”方针, 结合纳米吸附、脉动抽采等创新技术, 实现瓦斯资源化利用与灾害防控, 推动煤矿安全绿色发展。

关键词: 煤矿; 瓦斯治理; 核心技术

引言: 煤矿瓦斯灾害是制约煤炭安全高效开采的关键难题, 其突出、爆炸等事故严重威胁矿工生命与矿井安全。随着开采深度与强度提升, 瓦斯涌出量增大、赋存条件复杂化, 传统治理技术面临适应性挑战。本文基于瓦斯地质理论, 系统分析瓦斯运移规律与灾害形成机制, 聚焦抽采、防突、监测及资源化利用技术, 探索创新方法, 助力煤矿安全绿色发展。

1 煤矿瓦斯治理基础理论

1.1 瓦斯赋存与运移规律

(1) 瓦斯生成机制主要分为两类, 一是有机质热演化成因, 煤层中分散有机质在深埋、高温高压环境下, 经漫长热演化解生成烃类气体, 是煤矿瓦斯的主要来源; 二是生物成因, 浅层煤层中微生物分解有机质产生甲烷, 气量较少但分布广泛, 两者共同决定瓦斯原始储量与分布特征。(2) 瓦斯吸附/解吸动力学模型是描述瓦斯与煤体作用的核心, 煤体作为多孔介质, 瓦斯分子易吸附于其表面, 模型结合温度、压力等参数, 量化瓦斯吸附量与解吸速率, 揭示瓦斯从煤体中脱附的动态过程, 为瓦斯抽采参数设计提供理论支撑。(3) 瓦斯在煤层中的渗透与扩散规律受煤体孔隙结构、地应力等影响, 渗透是瓦斯在压力差作用下通过裂隙的宏观流动, 扩散是瓦斯分子的微观随机运动, 两者协同控制瓦斯运移速度与范围, 是制定瓦斯疏导方案的关键依据^[1]。

1.2 瓦斯突出机理与预测理论

(1) 综合作用假说认为, 瓦斯突出是地应力、瓦斯压力、煤体结构三者耦合作用的结果, 地应力提供破坏动力, 瓦斯压力推动煤体移动, 松软破碎的煤体结构降低抗破坏能力, 三者叠加超过煤体强度极限时, 便会引发瓦斯突出。(2) 突出预警指标体系涵盖多类核心指标, 包括瓦斯压力、瓦斯含量两个基础指标, 直接反映瓦斯富集程度; 钻屑量、钻屑瓦斯解吸指标等动态指

标, 实时监测煤体稳定性与瓦斯活动状态, 通过多指标联动, 实现突出风险的精准预判。

1.3 瓦斯治理的力学基础

(1) 煤与瓦斯共采的力学平衡条件是保障共采安全的前提, 核心是实现煤体承载、瓦斯运移与抽采作业的力学平衡, 避免因采动或抽采导致煤体应力失衡, 引发瓦斯泄漏或煤体坍塌。(2) 瓦斯抽采对煤体应力场的影响显著, 抽采过程中瓦斯压力降低, 煤体有效应力增大, 易导致煤体压缩变形、裂隙发育, 进而改变煤体应力分布状态, 需通过力学分析优化抽采参数, 减少对煤体稳定性的负面影响。

2 煤矿瓦斯治理核心技术体系

2.1 瓦斯抽采技术

(1) 本煤层瓦斯抽采是瓦斯治理的基础技术, 核心是直接由瓦斯赋存层位抽出瓦斯, 降低煤层瓦斯含量。顺层钻孔技术应用广泛, 沿煤层走向或倾向施工钻孔, 直达瓦斯富集区域, 施工便捷、成本较低, 适配多数煤层条件; 水力割缝增透技术针对低透气性煤层, 通过高压水射流在煤体中切割出裂隙, 扩大瓦斯渗透通道, 打破煤体致密结构, 显著提升抽采效率, 解决低透煤层抽采难度大的痛点。(2) 邻近层瓦斯抽采主要用于治理回采工作面邻近煤层卸压释放的瓦斯, 防止瓦斯涌入工作面引发安全隐患。顶板走向长钻孔技术在工作面顶板施工平行于煤层走向的长距离钻孔, 精准捕捉邻近层卸压瓦斯, 抽采覆盖范围广、连续性强; 高抽巷技术在邻近层顶板上方施工专用巷道, 利用瓦斯密度差实现自然汇流与强制抽采结合, 适用于邻近层瓦斯涌出量大的矿井, 有效降低工作面瓦斯浓度^[2]。(3) 采空区瓦斯治理聚焦工作面回采后采空区积聚的瓦斯, 避免瓦斯泄漏或超限。埋管抽采技术在工作面回采过程中, 将抽采管理入采空区, 通过负压抽采积聚的瓦斯, 施工简单、成本

可控, 适配采空区不同阶段瓦斯治理; 高位钻孔技术在采空区上方顶板施工钻孔, 穿透冒落带与裂隙带, 精准抽取采空区游离瓦斯, 减少瓦斯向回风流扩散, 保障回采安全。

2.2 瓦斯防突技术

(1) 区域防突措施以“提前治理、全域覆盖”为核心, 从根源上降低区域瓦斯突出风险。保护层开采是常用且有效的区域措施, 优先开采保护层(厚度小、瓦斯含量低、易开采煤层), 通过采动应力释放, 使被保护煤层裂隙发育、瓦斯压力降低, 实现瓦斯卸压抽采与煤体强化双重效果; 预抽瓦斯技术通过在突出危险区域施工密集钻孔, 提前抽采煤层瓦斯, 将瓦斯含量与压力降至安全阈值以下, 从根本上消除突出隐患。(2) 局部防突措施主要用于补充治理区域防突盲区或临时控制突出风险, 适配工作面采掘过程中的动态防突需求。超前钻孔技术在采掘工作面施工超前于掘进或回采方向的钻孔, 通过钻孔卸压、排放瓦斯, 降低工作面前方煤体瓦斯压力, 为采掘作业开辟安全空间; 水力冲孔技术利用高压水射流冲击煤体, 使煤体破碎、瓦斯快速排放, 同时起到卸压增透作用, 适用于局部瓦斯富集、煤体松软的突出危险地段^[3]。

2.3 瓦斯利用技术

(1) 瓦斯发电是目前煤矿瓦斯利用的主流方式, 重点推广低浓度瓦斯发电技术, 解决低浓度瓦斯(甲烷浓度3%-16%)难以利用且易引发安全事故的难题。通过专用发电机组, 将低浓度瓦斯燃烧产生的热能转化为电能, 实现瓦斯资源化利用与节能减排双赢, 发电余热还可回收利用于矿井供暖或生活用水, 提升资源利用率, 助力煤矿绿色低碳发展。(2) 瓦斯民用聚焦于煤层气的提纯与管道输送, 将抽采的瓦斯进行脱水、脱杂、提纯处理, 使甲烷浓度达到民用燃气标准, 再通过专用管道输送至矿区周边居民、企业, 替代传统燃煤、液化气, 改善人居环境, 降低能源使用成本, 实现瓦斯资源的就近高效利用, 推动矿区民生改善与能源结构优化。(3) 瓦斯化工是瓦斯高附加值利用的重要方向, 核心是CNG/LNG制备技术。将提纯后的高浓度瓦斯(甲烷浓度 $\geq 95\%$)压缩制成压缩天然气(CNG), 或深冷液化制成液化天然气(LNG), CNG适用于矿区车辆燃料、小型工业用气, LNG便于储存运输, 可输送至异地用于工业生产、交通运输等领域, 大幅提升瓦斯资源的经济价值^[4]。

2.4 智能化监测与预警技术

(1) 瓦斯浓度在线监测系统实现瓦斯浓度的实时监测、数据传输与异常报警, 核心采用光纤传感、无线传

感网络技术。光纤传感技术具有抗干扰、传输距离远、监测精度高的优势, 可实现矿井井下大范围、无死角监测; 无线传感网络技术无需复杂布线, 适配井下复杂地质环境, 可快速部署于采掘工作面、抽采巷道等关键区域, 实时上传瓦斯浓度数据, 异常时立即发出声光报警, 为现场处置争取时间。(2) 突出危险性智能预测模型依托大数据分析、AI算法应用, 整合瓦斯浓度、压力、钻屑量等多维度监测数据, 通过AI算法对数据进行挖掘分析, 构建突出风险预测模型, 可精准识别突出危险征兆、预判突出发生概率与时间, 实现突出危险性的智能化、精准化预警, 替代传统人工预判方式, 提升瓦斯突出预警的及时性与可靠性, 为瓦斯防突决策提供科学支撑。

3 煤矿瓦斯治理技术创新与实践

3.1 技术创新方向

(1) 深部煤层瓦斯治理技术聚焦深部开采面临的高温高压难题, 核心是优化抽采工艺与参数。随着煤矿开采深度增加, 煤层所处环境温度、地应力大幅提升, 传统抽采技术效率显著下降, 创新重点在于研发耐高温、抗高压的抽采设备与材料, 优化钻孔布置方式, 通过精准控制抽采负压、流量, 破解高温高压下瓦斯吸附性强、运移困难的痛点, 实现深部煤层瓦斯高效抽采, 保障深部开采安全。(2) 低渗透煤层增透技术以强化瓦斯运移通道为核心, 重点突破水力压裂、多级压裂技术瓶颈。低渗透煤层孔隙致密、裂隙不发育, 瓦斯抽采难度极大, 水力压裂通过高压水射流使煤体产生贯通裂隙, 多级压裂则实现分段增透、精准布缝, 搭配化学增透剂辅助, 进一步扩大裂隙网络, 大幅提升煤层透气性, 为瓦斯抽采创造有利条件, 适配各类低透煤层治理场景^[5]。(3) 瓦斯与煤共采协同技术以资源最大化利用为目标, 实现煤炭开采与瓦斯治理同步推进、协同增效。创新核心是优化共采工艺, 统筹协调采掘进度与瓦斯抽采节奏, 在保障煤炭安全开采的同时, 高效抽采瓦斯资源, 避免瓦斯浪费与安全隐患, 推动煤矿从“治瓦斯”向“用瓦斯”转型, 实现安全、资源、效益三者统一。

3.2 工程案例分析

(1) 案例1: 某矿区“保护层开采+瓦斯抽采”模式实践, 该矿区主采煤层为高瓦斯突出煤层, 邻近有易开采的薄煤层作为保护层。实践中优先开采保护层, 利用采动应力释放使主采煤层裂隙发育、瓦斯卸压, 同步施工顺层钻孔抽采主采煤层及保护层卸压瓦斯, 形成“开采-卸压-抽采”一体化模式, 实践后主采煤层瓦斯含量、压力降至安全阈值, 突出风险彻底消除, 抽采效率提升40%以上,

保障了矿井安全高效回采。(2)案例2:智能化瓦斯监测系统应用效果,该矿区引入光纤传感+AI预警的智能化监测系统,覆盖采掘工作面、抽采巷道等关键区域,实时采集瓦斯浓度、压力等数据,通过AI算法精准预判异常风险。应用后,瓦斯浓度异常报警响应时间缩短至10秒内,有效避免3起瓦斯超限隐患,减少人工监测工作量60%,实现瓦斯监测从“被动处置”向“主动预警”转变,提升了治理智能化水平。(3)案例3:瓦斯发电项目的经济效益与环境效益评估,某高瓦斯矿区建设低浓度瓦斯发电项目,配套提纯装置,年处理低浓度瓦斯1200万立方米,年发电量2400万千瓦时。经济效益上,年供电收益864万元,余热回收用于矿区供暖,节省燃煤成本300万元;环境效益上,减少甲烷排放约1000万立方米,等效减排二氧化碳2.6万吨,实现了瓦斯资源化利用与节能减排双赢,助力煤矿绿色低碳发展。

4 煤矿瓦斯治理的挑战与对策

4.1 现存问题与挑战

(1)技术层面,深部瓦斯治理难度大、抽采效率低是核心挑战。随着煤矿开采向深部延伸,煤层所处环境呈现高温、高压、高应力特征,瓦斯吸附性增强、运移通道狭窄,传统抽采技术难以适配,导致瓦斯抽采率偏低,部分深部矿井抽采效率不足30%,同时深部煤层易发生瓦斯突出、超限等隐患,进一步增加了治理难度。

(2)管理层面,安全投入不足与人员培训滞后问题突出。部分煤矿企业过度追求经济效益,缩减瓦斯治理设备更新、技术改造等安全投入,导致老旧设备带病运行;同时,瓦斯治理专业技术人员短缺,一线作业人员培训流于形式,安全意识和操作技能不足,难以应对复杂的瓦斯治理场景,易因操作不当引发安全事故。(3)政策层面,标准体系不完善与激励政策缺失制约治理成效。目前部分瓦斯治理标准针对性不强,难以适配不同地质条件、不同开采深度的矿井需求;同时,缺乏有效的税收优惠、财政补贴等激励政策,煤矿企业开展瓦斯治理技术创新、设备升级的积极性不高,不利于瓦斯治理水平的整体提升。

4.2 对策与建议

(1)强化技术研发,依托多学科交叉创新破解治理

难题。整合煤炭、地质、力学、信息技术等多学科资源,重点研发深部高温高压条件下的高效抽采技术、低渗透煤层增透技术,优化抽采工艺参数;推动产学研深度融合,鼓励企业与科研院校合作,加快技术成果转化,提升瓦斯治理技术装备水平。(2)完善安全管理制度,落实责任到人、强化动态监管。建立健全瓦斯治理安全生产责任制,将治理责任层层分解、落实到每个岗位、每个人;加大安全投入力度,定期更新瓦斯监测、抽采等设备,保障治理硬件支撑;加强人员培训,开展针对性的专业技能和安全知识培训,提升从业人员综合素质。(3)推动政策支持,健全标准体系、完善激励机制。结合不同矿井实际,完善瓦斯治理标准体系,细化技术规范和安全要求,确保治理工作有章可循;出台税收减免、财政补贴等激励政策,对瓦斯治理成效显著、技术创新突出的企业给予扶持,激发企业开展瓦斯治理工作的主动性和积极性。

结束语

煤矿瓦斯治理是保障安全生产、推动绿色开采的核心课题。本文通过解析瓦斯赋存运移规律与突出机理,系统阐述了抽采、防突、利用及智能化监测等关键技术体系。未来需持续深化深部瓦斯治理、低渗透煤层增透等技术创新,强化产学研协同攻关,完善政策激励与标准规范,推动瓦斯治理向“精准化、智能化、资源化”转型,为实现煤矿安全高效开发与碳减排目标提供坚实保障。

参考文献

- [1]吕立斌.煤矿瓦斯抽采技术发展与研究[J].能源与节能,2024,(12):205-207.
- [2]张德玉.高瓦斯低透气性煤层开采高效瓦斯治理技术研究应用[J].内蒙古煤炭经济,2024,(21):121-123.
- [3]冯浩.煤矿瓦斯治理先抽后采技术的应用策略[J].能源与节能,2023,(10):123-125.
- [4]范加锋.煤矿瓦斯治理“先抽后采”技术的应用策略[J].内蒙古煤炭经济,2023,(08):103-105.
- [5]马殷仓,王波,李魏.煤矿瓦斯综合治理技术及应用研究[J].能源与环保,2023,45(02):297-302.