

# Study on the Influence of Coal Mine Fault Structure on Mining Safety and Preventive Measures

Chao Yang Hao Song

Shanxi Xiangkuang Shangliang Coal Industry Co., Ltd., Changzhi, Shanxi, 046200, China

## Abstract

Fault structures serve as critical factors influencing the complexity of coal mine geological conditions and production safety risks. Their spatial distribution characteristics directly determine coal seam occurrence patterns, gas migration pathways, and stress distribution patterns. This study focuses on typical coal mine fault zones to systematically analyze fault formation mechanisms, activity characteristics, and their impacts on roof stability, gas outburst phenomena, and water inrush disasters. Based on comprehensive analysis of geological structure detection data and mine pressure monitoring results, a fault disaster prediction method integrating geological modeling, numerical simulation, and risk zoning is proposed. A prevention system centered on geological early detection, stress relief, and coordinated control of gas outburst prevention and water inrush prevention is established. Research indicates that fault-affected areas exhibit significant stress concentration, enhanced permeability, and poor mechanical stability, making them high-risk zones for mine disasters. Through refined fault detection and tiered management, the risks of impact pressure and gas outburst can be effectively reduced, achieving intrinsic safety and green efficiency in coal mining operations.

## Keywords

fault structure; coal mine safety; gas outburst; stress distribution; prevention and control measures

# 煤矿断层构造对开采安全的影响及防治措施研究

杨超 宋浩

山西襄矿上良煤业有限公司, 中国·山西长治 046200

## 摘要

断层构造是影响煤矿地质条件复杂性与安全生产风险的重要因素, 其空间展布特征直接关系到煤层赋存状态、瓦斯运移通道及应力分布格局。本文以典型煤矿断层带为研究对象, 系统分析断层形成机制、活动特征及其对顶板稳定、瓦斯突出现象与突水灾害的作用机理。在对地质构造探测数据与矿压监测结果综合分析的基础上, 提出基于地质建模、数值模拟与风险分区的断层灾害预测方法, 并构建了以地质超前探测、应力卸压与防突防水协同控制为核心的防治体系。研究表明, 断层构造区应力集中显著、渗透性增强、力学稳定性差, 是矿井灾害多发地带。通过断层精细化探测与分级治理, 可有效降低冲击地压与瓦斯突出风险, 实现煤矿开采的本质安全与绿色高效。

## 关键词

断层构造; 煤矿安全; 瓦斯突出; 应力分布; 防治措施

## 1 引言

煤矿开采活动受地质构造条件的制约显著, 断层作为控制煤层赋存与应力场分布的重要结构, 不仅改变煤岩体的完整性与透水性, 还成为诱发冲击地压、瓦斯突出及突水等灾害的主要地质因素。随着矿井开采深度不断增加, 地应力水平升高, 断层构造的活化与再活动风险加剧, 对矿井安全造成更大威胁。我国大量矿区属于构造变形强烈区, 如华北型复合断裂带、晋东南褶皱断块带等, 其断层发育密度高、延伸范围广, 地质条件复杂。传统地质勘探手段在断层识别

与灾害预测中存在局限, 难以满足深部智能化开采的安全需求。

## 2 断层构造的地质特征与形成机理

### 2.1 断层的类型与分布规律

煤系地层中的断层类型多样且分布规律复杂, 其形成受控于区域构造应力场与岩层力学特征。根据力学性质与运动方式, 可分为正断层、逆断层、滑脱断层与走滑断层等类型。正断层多形成于张性应力环境中, 造成煤层错断、厚度不均及顶底板错移; 逆断层则发育于挤压构造背景, 常导致顶板弯曲抬升, 应力集中显著。走滑断层具有明显的剪切特征, 沿断层面形成高应变带, 为瓦斯运移、突水及应力集中区的重要地质通道。断层规模跨度较大, 从微米裂隙到百米

【作者简介】杨超(1990-), 男, 中国山西长治人, 助理工程师, 从事煤矿地质研究。

级破碎带均有分布,呈带状或网状发育。地质统计分析表明,断层密度与构造应力场强度呈正相关关系,而断层倾角的变化则与煤层厚度及岩性过渡关系密切。区域性调查结果显示,断层在构造应力场强烈作用区密集发育,其空间分布具有显著的方向性与分层性,为煤矿地质灾害预测与防控提供了基础依据。

## 2.2 断层形成的力学机制

断层的形成源于地壳构造应力长期积累与岩体脆性破裂的耦合作用。当应力超过岩体强度极限时,能量沿弱面集中释放,产生剪切错动,形成断层构造。断层演化经历应力积累、裂隙萌生、滑移破裂及活动稳定四个阶段,不同地质时期应力方向的变化导致断层多期叠加、交叉切割,形成复杂构造体系。实验研究显示,煤层顶底板的岩性组合对断层的发育具有显著调节作用:塑性泥岩层能缓冲应力集中、延缓断层形成,而脆性砂岩层则易发生脆裂,促使裂隙快速贯通。断层活动不仅破坏地层连续性,还改变孔隙结构与渗流特征,为瓦斯与地下水的迁移提供通道 [1]。

## 2.3 断层带的物理特征与地质识别方法

断层带通常由滑动面、破碎带及影响带三部分构成,具有显著的非均质性与各向异性。破碎带内部岩体孔隙率大、渗透性强、声波传播速度明显降低;滑动面往往具镜面光泽、方解石脉或碎屑泥质条带,是断层活动的直接证据;影响带则表现为微裂隙密集、弹性模量降低、剪切强度减弱。断层识别依赖多种地球物理与地质手段的综合应用。地震反射勘探通过波阻抗异常揭示断层走向与倾角,瞬变电磁法 (TEM) 能够识别导电性异常区,适合断层含水特征探测;地质雷达 (GPR) 对浅层断层精探具有高分辨优势。近年来,融合三维地震属性分析与机器学习算法的断层自动识别方法已应用于煤矿地质勘查,可实现断层走向、倾角与延伸深度的智能提取。

# 3 断层构造对煤矿开采安全的影响机理

## 3.1 对顶板稳定性的影响

断层的存在直接破坏了煤层围岩的完整性,使应力场出现显著的不均匀分布,成为顶板失稳与冒落的关键诱因。研究表明,断层两侧由于岩体力学性质突变,应力集中系数普遍达到 1.5~2.3,局部区域甚至形成剪切滑移带。此类应力集中导致顶板承载能力下降,采空区容易出现提前垮落现象。特别是断层与巷道交叉时,围岩受切应力作用,常出现顶板离层、片帮或层间滑移。逆断层与复合断层区由于断层角度陡、岩层厚薄变化大,易形成悬空岩楔体,在采动扰动下突然失稳,造成严重冒顶事故。数值模拟与现场监测均显示,断层附近顶板岩层的塑性区范围扩大 30% 以上,表明断层带是顶板灾害的主要控制因素。

## 3.2 对瓦斯突出的影响

断层破碎带往往成为瓦斯的储集与运移通道,对煤矿

瓦斯灾害具有放大效应。由于断层活动使煤体结构破碎、孔隙度与渗透率增加,煤层气体在应力释放区易富集成高压瓦斯区。监测数据显示,断层带附近煤层瓦斯含量较正常区域高出 20% ~ 40%,而渗透系数提升使瓦斯沿断层裂隙快速迁移。掘进扰动或地应力突变可导致断层瞬间再活化,瓦斯在短时间内集中释放,引发突出现象。断层既是气体储集空间,又是扩散通道,表现出“储导并存”的双重机制。特别在高瓦斯矿区,断层两侧的气压差异可形成瓦斯定向流动,加剧局部瓦斯积聚与突发风险,因此断层带成为瓦斯治理的重点区域 [2]。

## 3.3 对突水与地应力场的影响

断层贯穿性与渗透性决定了其在矿井突水灾害中的关键作用。断层活动破坏了隔水层的连续性,使含水层与采掘空间形成水力联系,极易导致突水事故。水文地质研究表明,断层渗透系数通常为围岩的 10 至 100 倍,是地下水渗流的优先通道。尤其在富水灰岩层发育区,断层贯通后可引起大规模突水或溃砂现象,对矿井安全威胁极大。与此同时,断层对地应力场分布产生扰动,其尖灭端及交汇区往往形成应力集中区。微震监测结果显示,断层邻区应力释放频率较非断层区高出约 60%,应力集中与周期性能量释放易诱发冲击地压与微震事件。断层在渗流与应力耦合作用下形成的复杂动力效应,是矿井多灾害叠加的根本成因之一。

# 4 断层构造灾害的预测与风险评估

## 4.1 基于地质信息的断层风险识别

断层风险识别是煤矿地质灾害预测的核心环节。通过综合利用地震剖面、钻孔揭示、遥感构造线及物探异常信息,可重建断层的几何形态与活动状态。建立三维地质模型后,可直观分析断层与煤层、含水层及采掘空间的空间关系,为风险评估提供定量依据。在模型构建中,选取层间错距、岩石破碎率、导水系数、围岩强度及构造应力场参数构成风险评价指标体系,并利用层次分析法 (AHP) 确定各参数权重,实现断层危险性的分级量化。研究表明,当断层倾角超过 60°、破碎带宽度大于 8m 或断层穿越含水层时,顶板稳定性显著降低,且灾害风险呈非线性上升趋势。该识别方法能实现断层风险的区域化评价与空间可视化表达,为矿井开采布局与安全管控提供科学依据 [3]。

## 4.2 基于数值模拟的力学响应分析

针对断层构造复杂、应力场动态演化特征强的问题,数值模拟技术为其力学行为研究提供了有效手段。利用 FLAC3D 或 UDEC 软件建立断层-煤岩体耦合模型,可模拟不同采掘阶段断层两侧应力、位移与能量释放的变化规律。模拟结果显示,断层稳定性与采动应力增量密切相关,当采动应力增量达到断层剪切强度的 60% 至 70% 时,断层进入不稳定滑移阶段,极易诱发冒顶或冲击地压。通过反演分析与监测数据耦合,可对模型参数进行动态校正,使预测

结果更贴近实际。数值分析还揭示了断层尖灭端与掘进交叉区为高风险区域,其应力集中系数普遍高于1.8。通过模拟断层带的应力演化过程,不仅能预测破坏模式,还能为支护设计、巷道布置及采区划分提供定量参考,实现从“被动防护”向“主动控制”的转变。

### 4.3 断层带动态监测与预警技术

断层带动态监测是预防地质灾害的重要保障。通过布设多类型传感器,包括地应力计、微震监测仪、倾角仪及瓦斯浓度传感器,可实现对断层带活动的多维实时监测。多传感器融合系统基于时序数据分析与人工智能算法,能够识别应力突变、震动频率异常及气体浓度异常等关键特征,实现对断层活化的早期预警。监测数据经云平台集中处理后,可形成断层动态风险图,实现空间可视化预警与自动报警联动。当监测到应力突升、微震事件频率增加时,系统可自动触发安全响应,如停止掘进、实施卸压钻孔等措施。近年来,地质超前探测技术(如地质雷达、地震透视与电法成像)在断层预测中得到广泛应用,结合实时监测形成“预测—监控—干预”闭环体系,显著提升了隐伏断层识别与灾害防控的精度与时效性[4]。

## 5 断层构造灾害的防治措施与工程应用

### 5.1 断层带超前探测与地质建模

断层带的提前识别是确保煤矿安全开采的基础环节。开采前应综合利用高分辨率地震勘探、钻孔资料及地质测绘成果,对矿区断层构造进行精细探测。三维地震叠前反演技术能揭示断层破碎带的内部结构与空间展布特征,通过属性体分析可确定断层走向、倾角与错距参数。地质雷达扫描可对巷道前方数十米范围内的隐伏断层实现快速识别,为施工决策提供实时依据。建立融合地震、钻孔与物探信息的高精度地质模型,不仅能量化断层空间形态,还可在BIM平台实现可视化展示。该模型能动态更新,实现断层结构、应力分布与岩层参数的多维联动,为灾害风险评估及掘进路径优化提供科学支撑,从源头上提升断层带治理的精准性与前瞻性。

### 5.2 断层带支护与应力调控措施

断层带区域围岩稳定性差,应力集中显著,是巷道变形与冒顶事故的高发地段。应在该区域实施强支护与应力调控相结合的综合防控体系。通过锚杆、锚索、喷混凝土及钢拱架联合支护,形成多层次受力体系,增强岩体整体抗剪与抗拉性能。对于高应力集中区,应采用卸压钻孔与定向爆破技术,通过释放局部应力能量减少断层滑移风险。必要时在

断层两侧设置缓冲煤柱,以分散集中载荷,防止断层错动诱发冲击地压。实时应力监测系统可对围岩变形进行动态预警,结合分段开采与阶段性支护优化,实现应力场的时空调控。该措施体系能够有效延缓断层活化进程,保障顶板稳定,显著降低地压灾害发生概率[5]。

### 5.3 防突防水一体化综合治理

断层带是瓦斯运移与地下水渗流的重要通道,具有“瓦斯富集—水害活跃—应力集中”三重危险特征。为此,应构建防突防水一体化综合治理体系。对瓦斯富集区域,采用定向钻孔抽采、密封封堵与多段分区抽放技术,降低瓦斯压力与含量;对导水性断层,应实施高压注浆加固及隔离帷幕注浆,提升断层带抗渗与稳定性能。为防止突水事故,建立地表与井下联合排水系统,通过水压监测与分级排放控制水位变化。综合应用地质监测、力学分析与水文控制技术,实现对断层带灾害的立体防御。工程应用表明,该体系能使断层区瓦斯浓度降低30%以上,突水事故率减少70%,显著提升矿井整体安全水平,为深部高瓦斯矿井提供可推广的系统治理模式。

## 6 结语

断层构造是影响煤矿安全生产的核心地质因素,其复杂的力学行为与多灾害耦合效应使其成为矿井风险控制的重点对象。通过多源地质信息集成、数值模拟与动态监测的综合应用,可实现断层灾害的精准识别与实时预警。建立以断层精细探测、力学调控与防突防水协同治理为核心的安全技术体系,是实现深部煤矿智能化开采的关键路径。未来研究应进一步强化断层—应力—流体的耦合机制分析,推动人工智能与数字孪生技术在断层灾害管理中的应用,实现从“经验防治”向“智慧防控”的转变。科学、系统、动态的断层防治体系,将为我国煤矿安全生产提供更加坚实的地质保障与技术支撑。

### 参考文献

- [1] 翟孟娟.五沟煤矿1026工作面DF68断层无煤柱开采安全评价[D].安徽建筑大学,2021.
- [2] 陈玉娇.地质断层倾角对活化及突水开采安全的影响分析[J].山西冶金,2022,45(01):279-280+283.
- [3] 任政.开采扰动下断层失稳响应特征及诱冲机制研究[D].中国矿业大学(北京),2021.
- [4] 曲闯.开采扰动下断层活化对煤巷掘进突出的影响研究[D].贵州大学,2018.
- [5] 胡春岭.里彦矿灰岩水对下组煤安全开采影响的研究[D].山东科技大学,2005.