

煤矿井下地质条件对巷道稳定性影响的研究

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: 煤矿井下地质条件对巷道稳定性的影响主要体现在围岩性质、地质构造、地应力环境及地下水作用等方面,地质构造作用,断层、褶皱等构造易引发围岩裂隙发育,导致顶板位移或破碎带形成,显著削弱支护效果。结构面(如节理、层理)的倾角与密度控制围岩破坏范围,特定方向的裂隙会加剧剪切滑移风险。

关键词: 煤矿; 井下地质条件; 巷道稳定性; 影响

地质条件是巷道稳定性的基础变量,需结合工程位置、开采深度等因素实施精细化控制,并通过数值模拟与现场监测实现动态优化。

1 煤矿井下地质条件复杂性的表现

(1) 地质构造发育。构造多样化,断层、褶皱、陷落柱、岩浆岩侵入等构造普遍发育,破坏煤层连续性,增加巷道掘进难度。断层破碎带易引发顶板位移和围岩失稳,显著削弱支护结构的有效性。结构面控制围岩破坏,节理、层理等结构面的倾角与密度直接影响围岩破坏范围,特定方向的裂隙易诱发剪切滑移。地质构造复杂程度高的矿井中,仅部分区域可划分正规采区,甚至难以规划合理采区。

(2) 围岩性质多变。岩体强度差异大,煤系地层普遍存在“三软”特征(软弱煤层、软弱顶底板、软弱夹矸),遇水泥化膨胀,导致支护失效。硬岩(砂岩、石灰岩)与软岩(煤层)强度差异显著,硬岩稳定性可达软岩的8-10倍。破碎与高地应力耦合,深部开采(>800米)高地应力(>20MPa)诱发围岩大变形,如底鼓、塑性区扩展。岩体呈现“深、软、碎、冲”特性,结构面发育导致整体强度低,对应力变化敏感。

(3) 灾害复合叠加。多灾害共存,高瓦斯、煤与瓦斯突出、冲击地压、富水地层、高温热害等灾害交织,全国约1500处煤矿受此影响。水文地质条件复杂区(如岩溶地层)疏干排水易引发突水事故及地面塌陷。灾害治理难度大,承压水通过断层破碎带渗透,导致围岩泥化失稳;渗流场与应力场耦合加速围岩软化。

(4) 资源赋存条件复杂。煤层赋存不稳定,煤层倾角大(>25°)、厚度变化剧烈(<1.3米或>10米),倾斜急倾斜煤层产量占全国7%。薄煤层(0.8-1.3米)占全国储量20%,但机械化开采困难,劳动效率低。开采环境受限,“三下”压煤量超440亿吨,开采需兼顾地表保护与安全。近距离多煤层开采时,采动支承压力叠加影响

范围达70-90米,加剧围岩变形。

2 地质条件如何影响巷道稳定性

(1) 围岩力学性质的决定性作用。岩石强度差异,硬岩(砂岩、石灰岩)普氏坚固系数达8-10,软岩(煤层)仅0.5-1.5,硬岩稳定性可达软岩的8-10倍。软弱岩层(如泥岩)遇水泥化膨胀,显著降低围岩自承能力,导致支护失效。岩体结构与完整性,节理、层理等结构面密度和倾角控制破坏范围:高密度裂隙易诱发剪切滑移,倾角>45°时滑移风险倍增。

(2) 地质构造的破坏效应。断层与褶皱,断层破碎带削弱围岩连续性,引发顶板位移或冒落,支护结构在破碎带内承载力下降30%-50%。巷道轴线与断层走向夹角<30°时,围岩失稳概率提高2倍以上;优化夹角至45°-65°可降低风险。构造应力集中,构造残余应力叠加原岩应力,局部应力集中系数达1.5-2.0,加速塑性区扩展。

(3) 地应力场的动态影响。深度效应,开采深度>800米时,垂直应力>20MPa,诱发底鼓和两帮收敛,深部巷道变形量可达浅部的3-5倍。水平应力与垂直应力比值(λ)>1.5时,巷道顶底板更易发生拉伸破坏。采动应力干扰,邻近工作面开采使超前支承压力影响范围达70-90m,峰值应力区位于工作面前方21.7m处,加剧围岩塑性变形。

(4) 水文地质的弱化机制。水-岩相互作用,地下水软化岩体:砂岩饱和抗压强度降低15%-30%,泥岩遇水膨胀应力可达2-5MPa,挤压支护结构。渗流场与应力场耦合加速裂隙扩展,渗透压力每增加0.1MPa,围岩变形速率提高20%-40%。灾害链触发,高承压水通过断层破碎带渗透,引发突水或围岩泥化,导致瞬时失稳。巷道稳定性本质是围岩强度与应力动态平衡的结果。

3 地质条件如何影响巷道稳定性

(1) 围岩力学性质的核心作用。强度差异与变形特性,硬岩(砂岩、石灰岩)普氏坚固系数达8-10,软岩

(煤层)仅0.5-1.5,前者稳定性可达后者的8-10倍;软弱岩层遇水泥化膨胀,显著削弱自承能力。岩体结构面(节理、层理)密度与倾角控制破坏范围:裂隙密度高时易诱发剪切滑移,倾角 $>45^\circ$ 时滑移风险倍增。

(2)地质构造的破坏性影响。断层与破碎带,断层破碎带降低围岩连续性,导致顶板位移或冒落,使支护结构承载力下降30%-50%;巷道轴线与断层夹角 $<30^\circ$ 时,失稳概率提高2倍以上。褶皱构造区应力重分布,加速塑性区扩展,诱发非对称变形。构造应力集中,构造残余应力叠加原岩应力,局部应力集中系数达1.5-2.0,加剧围岩裂隙发育。

(3)地应力场的动态控制。深度效应,深度 >800 米时,垂直应力 >20 MPa,引发底鼓和两帮收敛,深部巷道变形量可达浅部的3-5倍。水平应力与垂直应力比值(λ) >1.5 时,顶底板更易发生拉伸破坏。采动应力干扰,邻近开采工作面形成的超前支承压力影响范围达70-90m,峰值位于工作面前方21.7m处,显著加剧围岩塑性变形。

(4)水文环境的弱化机制。水-岩物理化学作用,地下水软化岩体:砂岩饱和抗压强度降低15%-30%,泥岩遇水膨胀应力达2-5MPa,挤压支护结构。渗流场与应力场耦合加速裂隙扩展,渗透压力每增加0.1MPa,围岩变形速率提高20%-40%。灾害链触发,高承压水通过断层破碎带渗透,引发突水或围岩泥化,导致瞬时失稳。

4 影响巷道稳定性的主要因素

(1)围岩自身性质。岩体强度,硬岩(砂岩、石灰岩)普氏坚固系数达8-10,软岩(煤层)仅0.5-1.5,强度差异直接影响承载能力。软弱岩层遇水泥化膨胀(如泥岩),导致支护失效和底鼓变形(>300 mm)。岩体完整性,节理、层理等结构面密度高时,易诱发剪切滑移;倾角 $>45^\circ$ 时滑移风险倍增。破碎带内围岩松动圈扩大,降低自承能力。

(2)地应力环境。原始应力状态,深度 >800 米时,垂直应力 >20 MPa,巷道变形量可达浅部3-5倍。水平应力与垂直应力比值(λ) >1.5 时,顶底板易拉伸破坏。采动应力干扰,邻近工作面开采形成超前支承压力,影响范围达70-90m,峰值应力位于工作面前方21.7m处。构造残余应力叠加采动应力,局部应力集中系数达1.5-2.0。

(3)地质构造与水文条件。断层与褶皱,断层破碎带降低围岩连续性,使支护承载力下降30%-50%;巷道轴线与断层夹角 $<30^\circ$ 时失稳概率提高2倍。褶皱构造区应力非均匀分布,诱发非对称变形。地下水作用,地下水软化岩体:砂岩饱和抗压强度降低15%-30%,泥岩遇

水膨胀应力达2-5MPa。承压水通过断层渗透引发突水,导致围岩瞬时泥化失稳。

(4)工程因素。支护与施工方式,被动支护(如U型钢)难以调动深部围岩自承力,主动支护(锚杆锚索)更有效。爆破施工扩大围岩松动圈,而机械掘进扰动较小。巷道几何参数,断面形状:圆形/椭圆形应力分布均匀,梯形/矩形易应力集中。

5 巷道稳定性直接和间接的影响因素

(1)直接影响因素。围岩力学特性,强度控制:硬岩(砂岩/石灰岩)普氏系数达8-10,软岩(煤层)仅0.5-1.5,强度差异导致稳定性相差8-10倍;软弱岩层遇水泥化膨胀(如泥岩),膨胀应力达2-5MPa,直接引发底鼓变形 >300 mm。结构面效应:高密度节理/层理诱发剪切滑移,倾角 $>45^\circ$ 时滑移风险倍增。应力动态失衡,原始应力:深度 >800 m时垂直应力 >20 MPa,巷道变形量达浅部3-5倍;水平/垂直应力比 $\lambda > 1.5$ 时顶底板易拉伸破坏。应力集中:断层区构造应力集中系数达1.5-2.0,直接削弱围岩连续性。支护失效,被动支护(U型钢)在破碎带内承载力下降30%-50%;主动支护(锚索)未及时施作时,围岩变形速率可超5 mm/d。

(2)间接影响因素。地质构造诱导效应,断层/褶皱:巷道轴线与断层夹角 $<30^\circ$ 时失稳概率提高2倍;褶皱区应力重分布引发非对称变形。水文弱化:地下水渗透使砂岩抗压强度降低15%-30%,渗压每增0.1MPa变形速率升20%-40%。工程决策关联因素,断面设计:圆形/椭圆形断面应力分布均匀,梯形/矩形易应力集中;宽度增10%导致变形量增15%-20%。施工扰动:爆破扩大松动圈,机械掘进扰动较小;沿空巷道受采动支承压力影响范围达70-90m。环境长期作用,采动叠加:邻近工作面开采时超前应力峰值位于巷帮21.7m处,加速塑性区扩展。水岩反应:承压水通过断层渗透触发突水或围岩泥化,造成瞬时失稳。关键治理逻辑,巷道失稳本质是围岩强度-应力平衡破坏。需针对性调控:直接因素控制:硬岩采用高预紧力锚固,软岩实施注浆改性提升强度;间接因素规避:轴线平行最大主应力,避让断层 >30 m;富水区采用疏干+抗渗衬砌;动态监测:微震探测构造破碎带,实时预警应力异常区。

6 不同地质条件下巷道稳定性影响因素的变化

(1)围岩性质差异主导稳定性分级。硬岩巷道(砂岩/花岗岩),优势:普氏系数8-10,自承能力强,松动圈厚度 <1.5 m。风险点:高地应力区(埋深 >800 m)易引发岩爆,水平应力比 $\lambda > 1.5$ 时顶板拉伸破裂概率增加。支护重点:高预紧力锚杆锚固,抑制岩爆能量释放。软

岩巷道（泥岩/煤层）。强度弱化：普氏系数0.5-1.5，遇水膨胀应力2-5MPa，底鼓量 > 300mm，水敏效应：含水率每增10%，抗压强度降幅达15%-30%，对策：注浆改性+封闭式衬砌，阻断水岩反应。

（2）地质构造区的突变效应。断层破碎带，失稳加速：破碎带内围岩松动圈扩大2-3倍，支护承载力下降30%-50%，方位控制：巷道轴线与断层夹角 < 30°时，冒顶风险提高2倍；优化至45°-65°可降低应力集中。褶皱构造区，非对称变形：向斜轴部垂直应力集中（增幅40%），背斜轴部易产生张裂隙，监测重点：位移监测点布设于应力转折区（如翼部与轴部过渡带）。

（3）水文地质条件的动态影响。富水砂岩层，渗流压力每增0.1MPa，围岩变形速率升20%-40%，治理核心：超前疏干+抗渗衬砌（渗透系数需 < 10^{-7} cm/s），承压水断层带，突水临界水压：破碎带宽度 > 0.2m时需启动帷幕注浆阻断，监测预警：微震探测水力破裂前兆（事件频次突增 > 5次/h）。

7 巷道稳定性研究方法

（1）理论分析法。强度准则法，通过计算巷道周边的最大环向应力与岩石极限强度对比，判断稳定性（如应力集中系数法），适用条件：脆性围岩（如花岗岩、砂岩），重点分析顶底板及两帮中点的应力状态。变形准则法，监测围岩实际变形量（如收敛位移），与极限变形阈值对比评估失稳风险。适用条件：弹塑性围岩（如泥岩、煤层），需结合长期变形速率分析（> 5mm/d为高风险）。极限平衡分析法，构建顶底板岩层破坏的力学模型（如弹塑性破坏方程），计算临界承载能力，

适用条件：断层破碎带或高地应力区（埋深 > 800m），量化松动圈扩展范围。

（2）数值模拟技术。应力-应变动态模拟，再现采动过程（如工作面推进），分析超前支承压力分布及塑性区演化（峰值应力位于巷帮21.7m处），动静载耦合模型。模拟重复冲击载荷下裂隙扩展规律（浅部张拉裂隙+深部剪切滑移主导失稳），关键输出：推导动静载叠加时的破碎区平衡方程，指导防冲支护设计。

（3）实验与物理模拟。相似材料模拟，按几何相似比（1:50-1:100）构建巷道模型，直观展示煤柱应力传递及顶板垮落过程。优势：验证锚索作用机理、揭露非对称变形机制（如褶皱构造区）。

（4）现场监测与预警。变形实时监测，安装多点位移计、收敛计，跟踪顶板下沉（> 200mm报警）及两帮收缩趋势，数据应用：动态修正支护参数（如锚索预紧力调整），微震/应力动态感知，捕捉断层活化前兆（事件频次 > 5次/h）或应力突变（集中系数 > 1.5）。功能：突水、岩爆灾害超前预警。

总之，当地质条件导致应力超过岩体强度极限时，需通过调整巷道位置（避让破碎带）、优化轴线方向（平行最大主应力）及差异化支护（硬岩锚固、软岩注浆）重构平衡。

参考文献

- [1]刘筠.试论煤矿井下地质条件对巷道稳定性影响的探讨.2023.
- [2]张宏宇,浅谈煤矿井下地质条件对巷道稳定性影响的研究.2022.