

复合顶板煤层巷道掘进扰动范围数值模拟与支护体系优化

容宾宾

陕西彬长小庄矿业有限公司 陕西 咸阳 713500

摘要：复合顶板煤层巷道普遍存在围岩结构复杂、掘进扰动响应显著、围岩稳定性差等问题，极易引发顶板离层、围岩变形等巷道病害。本文梳理矿区复合顶板赋存的空间分布特征，剖析巷道掘进全过程的围岩应力传递规律与扰动演化机制，阐明不同掘进阶段、不同巷道区域的扰动发育差异。结合围岩扰动分区特点与层状岩体结构特性，搭建适配性强的分层分时支护体系，优化构件排布、施工时序与协同支护模式，有效改善复合顶板巷道围岩的整体稳定状态。

关键词：复合顶板；煤层巷道；掘进扰动；应力传递；支护优化

引言：煤层巷道顶板多存在软硬岩层交替堆叠的复合结构，层间胶结性能薄弱，围岩整体稳定性较差。井下掘进施工会打破围岩原始应力平衡，诱发应力重分布与裂隙持续发育，扩大围岩扰动范围。矿区地质条件的差异化，会进一步加剧巷道顶板离层、帮部变形等围岩失稳问题，提升巷道支护管控难度。针对复合顶板巷道的扰动发育规律开展系统分析，搭建适配围岩损伤特征的支护体系，能够有效改善井下巷道围岩控制效果，保障矿井掘进作业安全有序开展。

1 彬长小庄矿业复合顶板赋存空间特征

1.1 矿区煤层顶板岩层序列排布

彬长小庄矿业主采煤层顶板属于典型复合型层状岩体，岩层堆叠层次分明，整体以软硬岩层交替排布为主要赋存形式。煤层直接顶以泥岩、砂质泥岩为主，单层厚度集中在1.2~2.6m，岩体质地偏软，胶结程度偏弱，岩层整体性相对有限。直接顶上部依次分布细砂岩、粉砂岩等硬质岩层，整体厚度可达3.0~5.5m，构成巷道顶板的主要承载结构^[1]。深部区域局部夹杂薄层泥质夹层与炭质纹理带，夹层厚度多介于0.1~0.3m，岩层纵向排布连续性存在自然差异。整套顶板岩层自上而下形成硬质砂岩、软弱泥岩、薄层夹层交替叠加的复合结构，岩层组合形式复杂，为巷道掘进施工带来天然的地质不确定性。

1.2 顶板各岩层原生结构面延展状态

矿区顶板各岩层内部发育大量原生结构面，以层理、弱面、原生裂隙为主要构造形态。层理结构延展范围较广，贯穿多数泥岩与砂岩岩层内部，走向保持稳定。原生裂隙多以细微闭合形态分布，裂隙开度较小，无明显贯通性破损特征。不同岩层结构面发育密度存在

明显区别，软质泥岩结构面数量更多，岩体完整性更低。硬质砂岩结构面分布相对稀疏，岩体整体均匀性更强。结构面的无序分布状态，改变岩层自身受力特性，降低复合顶板整体结构的完整程度。

1.3 煤层与顶板岩层接触关系分布

小庄矿业煤层与上部顶板岩层的接触面整体呈现平缓起伏的赋存形态，界面不存在剧烈突变构造。煤层顶界面与直接顶泥岩接触面胶结能力较差，界面位置易形成软弱滑移带。局部区段煤层顶板界面存在薄层炭质富集带，接触面摩擦阻力偏低，结构稳定性不足。岩层接触界面整体连续性较好，但界面力学性能薄弱，受采掘活动影响容易出现离层现象。界面结构的不稳定特征，是复合顶板巷道围岩变形、顶板沉降的重要诱因。

1.4 不同区域顶板岩层厚度变化规律

矿区井田范围内顶板各分层岩层厚度存在区域性波动，无完全均匀的赋存状态。泥岩类软弱岩层在井田中西部区域厚度偏大，局部最大厚度可达2.8m，岩层软弱结构占比更高，顶板整体稳定性偏弱。东部区域砂岩硬质岩层厚度有所提升，平均厚度稳定在4.0m以上，岩体承载能力相对更优。薄层夹层在井田全域零散分布，厚度起伏幅度较小，但会持续破坏顶板岩层的整体均质特性。岩层厚度的空间差异性，造成不同掘进区段顶板结构强度、变形特性存在明显区别，直接影响巷道围岩扰动发育状态与围岩稳定条件。

2 巷道掘进过程中围岩应力传递路径

2.1 掘进作业引发的围岩应力重新分布过程

巷道掘进作业会打破井下围岩原始应力的平衡状态，移除煤层岩体后，巷道周边形成临空自由面，原有

岩体承载结构出现空缺。原始地应力无法维持原有传递体系,会向临空面周边岩体发生转移与重构。围岩内部应力逐步释放、调整,临近巷道表层岩体压力快速衰减,深层岩体出现应力集中现象。应力调整并非瞬时完成,会伴随掘进作业持续推进逐步演化,形成动态变化的应力圈层^[2]。不同岩体力学性质存在差异,应力释放与集聚的速率各不相同,让巷道周边应力分布呈现不均匀的空间特征,间接影响围岩整体稳定状态。

2.2 应力沿顶板不同岩层的传导走向

小庄矿业复合顶板软硬岩层交替分布的结构特征,对应力传导走向形成明显约束。硬质砂岩岩体结构致密、整体性较好,应力可沿岩层层面平稳延展、逐层传递,传导范围覆盖更广。软弱泥岩与薄层夹层岩体强度低、内部结构面发育,应力传递会出现明显阻滞现象。这类岩层无法高效承接上部传递的压力,易在层理、裂隙等薄弱位置出现应力堆积。应力在多层岩体中交替传导、逐级耗散,竖向自上而下的传递规律清晰,水平向顺着岩层延展方向持续扩散,形成多层差异化的应力传导格局。

2.3 掘进扰动在煤层帮部的延伸方向

巷道帮部煤层岩体结构松散、原生裂隙发育,对掘进扰动的敏感度远高于顶板硬质岩层。掘进产生的扰动作用会从巷道临空帮部出发,优先沿煤层原生裂隙与结构薄弱带向内延伸。扰动范围会顺着煤层赋存倾角与岩体破碎趋势,向巷道两侧实体煤体内部拓展。帮部岩体缺乏完整的约束结构,扰动传播过程中会诱发裂隙持续发育、扩张。扰动延伸具备明显的方向性,集中沿煤体结构缺陷密集区域推进,逐步改变帮部岩体的受力状态与结构完整性。

2.4 扰动影响向巷道深部围岩的扩展趋势

掘进扰动的传播具备由浅至深的递进特征,表层围岩率先出现变形与应力调整,后续逐步向巷道深部围岩延伸拓展。浅层围岩以应力释放、岩体松弛为主要变化形式,深部围岩以应力集聚、势能累积为主要状态。随着与巷道临空面距离增加,扰动影响强度逐步衰减,岩体原始结构与应力状态慢慢恢复。复合顶板的层状结构会减缓深部扰动的传播速度,让扰动影响呈现浅层剧烈、深层平缓的空间分布规律,形成界限清晰的围岩扰动影响圈层。

3 掘进扰动范围的动态演化规律

3.1 随掘进进尺推进的扰动区域扩展形态

巷道掘进属于持续性向前推进的动态施工过程,开挖空间的持续拓展会带动围岩扰动区域不断发育扩张。

掘进工作面每向前延伸一段距离,新的临空面随即形成,未受影响的原始围岩进入应力调整阶段。扰动区域会以掘进迎头为核心,沿着巷道轴向向前延伸,逐步覆盖前方未开挖岩体。围岩变形与应力调整不会局限于迎头表层位置,会超前于掘进工作面在前方岩体中形成预扰动区域^[3]。随着掘进进尺持续增加,后方已成型巷道围岩的扰动状态会逐步趋于稳定,变形速率逐步放缓。整体扰动形态呈现前部超前发育、中部剧烈调整、后部缓慢稳敛的空间发育模式,扰动区域规模随掘进推进呈现渐进式扩张特征。

3.2 复合顶板内不同层位的扰动先后顺序

小庄矿业复合顶板多层交替的岩体结构,让各层岩层受掘进扰动的响应时间存在明显差异。靠近煤层的直接顶岩层距离开挖空间最近,临空条件改变后会最先出现应力释放与结构调整,裂隙发育与岩体松弛现象最为提前。直接顶上方的夹层软弱岩体力学性能偏弱,结构面发育丰富,会在直接顶扰动后快速进入变形响应阶段。高位硬质砂岩岩层整体性更强,岩体承载能力突出,受掘进开挖的影响存在明显滞后性。高位岩层的扰动变化多通过层间应力传递逐步诱发,响应进程更慢、变形幅度更低。不同层位岩层的响应时序差异,造就顶板自上而下逐级扰动的演化特点。

3.3 扰动范围在巷道断面周边的分布形态

完整巷道断面涵盖顶板、两帮与底板多个围岩区域,各区域岩体结构与受力条件不同,扰动发育程度存在显著区别。巷道顶板复合岩层结构软弱夹层富集,层间粘结强度有限,顶板扰动发育深度可达4~7m,裂隙扩展范围更广。两帮煤体结构破碎、原生缺陷繁多,开挖后应力释放更为明显,扰动区域沿着煤体内部持续延伸。底板岩体受竖向应力传导与侧向挤压作用,会出现小幅的应力扰动与岩体松弛。整体来看,巷道断面周边扰动区域呈现非对称分布形态,顶板扰动发育程度最高,两帮次之,底板扰动影响相对微弱,形成差异化的空间分布格局。

3.4 多循环掘进作业下扰动区域的叠加特征

井下巷道施工依靠多循环分步掘进完成整体开挖,单次掘进产生的扰动场会在围岩内部留存残余应力与变形缺陷。后续掘进循环产生的新生扰动会作用于已经发育扰动的围岩区域,形成扰动叠加效应。前期开挖造成的岩体裂隙、结构损伤会为新生扰动提供扩展路径,加剧围岩内部结构破损程度。多次循环作业持续累积,会扩大整体扰动圈层的空间范围,提升围岩破碎程度。叠加作用会弱化围岩整体力学性能,让巷道周边围岩稳定

性持续下降。长期多循环掘进形成的累积扰动效果，是复合顶板巷道围岩变形持续发育、顶板易出现离层失稳的重要诱因。

4 适配扰动特征的支护体系构建

4.1 不同扰动分区对应的支护构件排布方式

彬长小庄矿业复合顶板巷道受层状岩体结构影响，掘进扰动在围岩内部形成层次分明的扰动分区，不同区域岩体破损程度、裂隙发育状态存在明显差异。剧烈扰动分区集中在巷道表层围岩，岩体原生结构被充分破坏，裂隙贯通性强，岩体自稳能力大幅弱化，需要采用密集组合的支护构件布置形式，通过多重约束限制裂隙扩张与岩体松散变形^[4]。轻度扰动分区岩体仅出现轻微松弛，结构完整性保留较好，可适度降低支护布设密度，充分利用围岩自身承载性能。深部稳定分区岩体未受扰动影响，结构状态完好，无需额外强化支护配置。结合矿区顶板软硬互层、软弱夹层零散分布的特点，针对性加强软弱岩层对应的支护点位，抑制层间滑移与表层离层，让支护布局精准适配巷道围岩差异化的扰动发育特征。

4.2 沿巷道掘进走向的支护作业时序安排

巷道掘进为循环递进的动态施工过程，围岩扰动存在超前发育、持续演化、后期收敛的完整时序规律，支护作业需要匹配扰动演化节奏分步开展。掘进工作面开挖后，新生临空面暴露会快速触发表层围岩应力释放，及时开展初次支护作业可以快速封闭围岩表层，阻断新生裂隙持续延展的通道，削弱超前扰动带来的结构破损。巷道成型后围岩应力调整仍会持续一段时间，后续跟进二次补强支护，能够抵消多循环掘进累积产生的扰动影响，约束围岩后期缓慢变形。延后开展的精细化支护作业可修复围岩细微结构损伤，逐步推动巷道围岩进入稳定收敛状态。科学排布支护时序，能够有效规避支护滞后引发的围岩失稳隐患，适配矿区深部巷道动态扰动的发育规律。

4.3 顶板与帮部支护构件的协同作用模式

小庄矿业复合顶板巷道围岩失稳形式具备明显的区域关联性，顶板层间离层、竖向沉降与帮部煤体碎胀变形相互影响，单一区域支护难以实现全域围岩有效管控。顶板支护构件主要作用于多层复合岩层，通过锚固结构串联软硬交替的顶板岩体，约束层间错动与竖向沉

降，搭建稳固的上部承载结构。帮部支护构件可以压实松散煤体，限制煤体内部裂隙发育延伸，减弱侧向围岩变形对顶板岩体的挤压作用。顶板稳固结构能够分摊上部围岩荷载，减少竖向应力向帮部煤体传导，完整的帮部岩体也能为顶板两侧提供侧向支撑。两类支护结构相互制约、相互辅助，补齐单一支护形式的管控短板，整体提升巷道围岩结构的完整性与稳定性。

4.4 针对复合顶板层间特征的支护参数匹配逻辑

矿区顶板由泥岩、砂质泥岩与细砂岩、粉砂岩交替组成，层间胶结强度薄弱，岩层力学性能差异显著，统一标准化的支护参数无法适配复杂的层状结构。支护参数设计需要贴合各岩层的力学特性与层间接触状态差异化调整。软弱夹层集中分布的区段，通过加长锚固深度，让支护构件穿透软弱层位，嵌固至上部完整的硬质岩层，实现深浅岩层的整体联动，杜绝层间分离问题。针对岩层厚度起伏、界面稳定性较差的区段，优化支护布设间距与锚固角度，贴合岩层自然延展走向优化受力传导路径。依托小庄矿业实际地质条件定制支护参数，能够从源头遏制复合顶板层间失稳隐患，搭建完全适配巷道扰动发育特征的精细化支护体系。

结束语

复合顶板巷道围岩失稳问题，本质源于层状岩体的结构缺陷与掘进扰动的叠加作用，应力传递不均、扰动范围无序扩张都会破坏巷道围岩稳态。结合小庄矿业顶板赋存特征，厘清掘进扰动的传播路径与动态演化规律，能够精准定位围岩薄弱区域与失稳诱因。差异化分区支护、分时施工时序与多部位协同支护的组合模式，可适配复合顶板层间结构特点，有效抑制围岩扰动发育，为同类地质条件巷道围岩管控提供科学的优化思路。

参考文献

- [1]许起.人工复合假顶技术在近距离煤层巷道掘进中的应用[J].煤,2022,31(5):20-22,26.
- [2]康志鹏,罗勇,任波,等.复合顶板倾斜薄煤层小煤柱稳定机理与控制研究[J].矿业研究与开发,2024,44(9):40-47.
- [3]赵宽.万峰煤矿软岩复合顶板巷道支护优化研究[J].冶金与材料,2023,43(3):20-22.
- [4]韩图门乌力吉.复杂条件下掘进巷道过巷贯通支护技术优化[J].江西煤炭科技,2022(1):82-83,87.