复杂地质条件下巷道围岩变形破坏特征及控制措施

唐 伟

（宣城华通矿业有限公司，安徽 宣城 242000）

摘 要 复杂地质条件下巷道围岩变形破坏特征明显，受断层破碎带、软弱膨胀岩层、高地应力、层状节理岩体以及富水条件等多种因素影响，呈现出非对称、突发性、时效性以及强耦合性等特点。本文系统解析不同地质条件下的破坏模式，建立包含岩体完整性系数、单轴抗压强度、地下水影响程度等指标的稳定性评价体系，并且提出高预紧力锚杆支护、全断面注浆加固以及动态监测反馈等控制技术，以期为巷道围岩稳定性控制提供理论参考。

关键词 复杂地质；巷道围岩；变形破坏；高地应力；富水条件

中图分类号：TD353；TD322 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.29.001

0 引言

巷道掘进时，围岩暴露、开挖卸荷与支护施工连续进行，现场需要判断变形原因，并选择处置方法。相似的拱顶下沉、侧墙内挤或底鼓现象，在不同岩性与应力环境下可能对应不同的破坏过程，仅凭表面变形难以确定控制重点。若支护措施与主导破坏机制不匹配，围岩变形可能持续发展，增加后续维护难度。本文从工程辨识与支护选择的联系出发，讨论不同地质条件下破坏特征对稳定性评价和控制措施选择的影响，为现场判断与处置提供参考。

1 复杂地质条件下巷道围岩变形破坏特征

1.1 断层破碎带影响下的破坏特征

断层破碎带是岩体受断裂构造作用直接形成的产物，其内部岩块破碎且裂隙发育胶结程度差，显著呈现出低强度高压缩性和易透水性，在隧道或者地下工程进行开挖时，断层破碎带通常会成为围岩失稳的关键控制面，其破坏特征主要表现为：开挖后容易发生坍塌掉块，甚至形成整体性滑移，因为破碎带内岩体自稳能力极其差，支护结构可能承受非对称的偏压荷载，致使钢拱架扭曲喷射混凝土开裂剥落。此外，断层带往往是地下水富集和运移的通道，施工中容易引发突涌水灾害，水流携带泥质物质涌出进一步掏空围岩加剧失稳范围[1]。

1.2 软弱膨胀岩层中的破坏特征

软弱膨胀岩层在遇水以后会发生物理化学膨胀，这属于地下工程中极为棘手的围岩类型，其破坏特征和一般软岩存在区别，具有显著的时效性、湿度敏感性和体积扩张性，开挖卸荷之后围岩暴露于空气或者地下水中，会迅速吸水膨胀并产生可观的膨胀压力，使支护结构承受持续不断增长的压力。同时，岩体强度会随着含水量的增加而急剧衰减，经常出现底鼓、侧墙内挤、拱顶下沉等变形现象，要是支护不及时或者刚度不足，膨胀变形能够延续数月甚至数年时间，会造成喷射混凝土压碎、仰拱隆起、衬砌开裂等严重破坏。不同膨胀条件下的典型破坏表现如表 1 所示。

1.3 高地应力条件下（深部）破坏特征

随着开采深度不断增加（通常超过 800 米到 1 000 米），地应力水平会显著升高，围岩进入高地应力乃至极高地应力状态，其破坏特征表现出明显延性化、能量释放剧烈性和分区破裂化。硬脆性围岩常发生岩爆

表 1 不同膨胀条件下的典型破坏表现

膨胀条件	主要破坏形式	典型工程特征
低围压、充分供水	底鼓、侧墙大幅内挤	仰拱断裂，钢架扭曲呈“X”型
高围压、有限供水	衬砌压裂、拱顶下沉	裂缝密集，呈网状或环向分布
干湿交替循环	围岩表层剥落、支护结构疲劳破坏	混凝土表面酥松、钢筋锈蚀

作者简介：唐伟（1994-），男，本科，助理工程师，研究方向：矿井地质。

现象，也就是积聚的弹性应变能突然释放，导致岩块弹射、剥离并伴有清脆声响，严重威胁施工安全。其次，深部软岩呈现大变形特征，围岩向洞内挤压位移量大且速率快，常出现“锚杆拉断、钢架弯折、混凝土衬砌压溃”等现象，且变形持续时间较长。此外，深部围岩破坏往往不是均匀对称的，常沿最大主应力方向产生劈裂或剪切裂缝，形成“V”字形破坏区，在极深部条件下还可能观测到围岩中出现环状裂纹带（分区破裂化），即巷道周边交替出现破裂区与相对完整区[2]。

1.4 层状/节理发育岩体中的破坏特征

在层状或者节理高度发育的岩体中，结构面（层面、节理、劈理）的产状和组合关系主导围岩破坏模式，其破坏特征呈现出强烈的各向异性和结构控制性。首先，破坏通常是沿着最不利的结构面发生，而并非穿越完整的岩块，当层面或节理与洞室轴线呈小角度时，容易发生顺层滑移或者楔形体坍塌；当层面陡倾且切割强烈时，顶拱常常出现“板梁弯曲”直至折断坠落，侧墙则有可能发生块体剥落或者倾倒。其次，节理发育会导致岩体被分割成不连续块体，使自稳能力大幅降低，开挖之后极易沿着多组节理面形成可移动的危岩块。施工中多次爆破震动会沿着结构面产生张开、错动，进一步劣化岩体的完整性，引起渐进式松动区扩大。和断层破碎带不同，此类破坏经常呈局部、离散分布，但若结构面组合形成大型不稳定块体，则可能突发整体塌方[3]。

1.5 富水条件下的破坏特征

富水条件是加剧围岩破坏非常关键的外部因素，它的核心作用在于降低岩体强度并且诱发水动力破坏，水的物理化学软化效应十分显著。对于软岩而言，水化会导致黏土矿物膨胀崩解，强度能降低80%以上。对于硬岩来说，水通过润滑裂隙面降低摩擦角，使结构面抗剪能力大幅下降，从而诱发沿节理或断层的滑移破坏。其次，渗流产生的动水压力和静水压力会直接作用于围岩，高水压可撑开已有裂隙引发水力劈裂甚至使完整岩体产生新裂缝。渗流梯度则驱动细颗粒迁移造成管涌或流土逐步掏空围岩，典型破坏形式包含：隧道内发生突水溃砂和围岩大规模失稳坍塌、边坡中水位骤降引发顺层滑塌以及含水层上方的底板发生鼓起或突水。与无水条件相比，富水破坏具有突发性强、破坏范围大、治理成本高的特点，常常形成“水-力”耦合的恶性循环[4]。

2 复杂地质条件下巷道围岩评价与控制技术

2.1 稳定性评价体系

2.1.1 评价指标

巷道围岩稳定性评价要综合考量岩体结构、地应力环境、地下水作用以及工程扰动等多方面因素，其核心指标包含岩石单轴抗压强度、岩体完整性系数、结构面摩擦角与黏聚力、地应力大小与侧压系数、地下水渗流压力及软化系数、巷道埋深和开挖断面尺寸。在软弱夹层、膨胀性矿物所在区域或者高地应力区，还需要引入膨胀率、崩解耐久性指标和岩爆倾向性指数，这些指标通过现场地质素描、钻孔取芯、声波测试、水压致裂法以及室内试验来获取，它们构成多参数评判基础，可避免单指标误判问题，能为后续分级提供量化依据。

2.1.2 分级标准

根据上面提到的评价指标，将复杂地质条件下的巷道围岩稳定性划分成五个等级，分别是Ⅰ级（极稳定）、Ⅱ级（稳定）、Ⅲ级（中等稳定）、Ⅳ级（不稳定）和Ⅴ级（极不稳定），分级是依据各指标的取值区间以及权重来综合判定的。比如：岩体完整性系数大于0.75并且单轴抗压强度高于60 MPa就对应Ⅰ级；完整性系数在0.55到0.75之间、强度在30 MPa到60 MPa之间且没有明显地下水影响的属于Ⅱ级；完整性系数在0.35到0.55之间、强度在15 MPa到30 MPa之间或者存在中等渗水情况的为Ⅲ级；完整性系数在0.15到0.35之间、强度在5 MPa到15 MPa之间且结构面发育、有持续滴水现象的是Ⅳ级；完整性系数小于0.15、强度低于5 MPa或者遇水崩解、存在高地压大变形情况的为Ⅴ级[5]。复杂地质条件下巷道围岩稳定性分级标准如表2所示。

表2 复杂地质条件下巷道围岩稳定性分级标准

稳定性等级	岩体完整性系数	单轴抗压强度（MPa）	地下水影响程度	典型变形特征
Ⅰ级（极稳定）	＞0.75	＞60	干燥或微湿润	无明显变形
Ⅱ级（稳定）	0.55～0.75	30～60	偶见渗水	弹性变形为主
Ⅲ级（中等稳定）	0.35～0.55	15～30	中等淋水	局部塑性区
Ⅳ级（不稳定）	0.15～0.35	5～15	持续滴水	大变形、掉块
Ⅴ级（极不稳定）	＜0.15	＜5	涌水或软化严重	冒顶、底鼓

2.2 控制技术

2.2.1 地质改良

对于复杂地质条件下的软弱破碎围岩而言，地质改良是利用注浆、锚固等手段来提升岩体整体性与承载力的关键技术。注浆能够充填裂隙、胶结松散结构，形成注浆帷幕封闭水源并提高围岩内聚力和内摩擦角。锚固是借助锚杆或锚索把松散层与深部稳定岩体连接成一体，实现荷载传递与应力的重分布。依据地质条件选择水泥浆、化学浆液或者复合浆材，合理确定注浆压力与范围，并且配合超前小导管或管棚支护，能够显著改善巷道周边围岩的物理力学性能，为后续支护创造稳定的基础。

2.2.2 施工工艺

施工工艺直接决定着巷道成型质量和围岩扰动程度。在复杂地质条件下要按照“短进尺、弱爆破、强支护、早封闭”原则，掘进方式优先选择机械开挖或者控制爆破，以此减少对围岩的震动损伤，要及时喷射混凝土来封闭岩面，从而防止其风化与剥落，并且根据监测数据动态调整锚杆间距、钢架型号和喷层厚度，如锚杆安装、注浆与喷层施工等关键工序应形成流水作业，以此缩短围岩暴露时间。同时，配合超前地质预报调整循环进尺，实现“随掘随支”来有效控制变形与坍塌风险[6]。

3 复杂地质条件下巷道围岩变形破坏控制措施

3.1 复杂地质条件下巷道围岩控制关键技术

3.1.1 高预紧力强力锚杆（索）支护技术

针对复杂地质条件下巷道围岩松散破碎且自承能力差这一特点，高预紧力强力锚杆（索）支护技术通过施加较大初始预紧力，主动把松散围岩压紧并使其闭合，形成具备足够刚度和强度的承载结构。该技术采用高强度与高延伸率材料制作的锚杆和锚索，配合大直径托板以及专用锁具，能够显著提高锚固系统的初锚力和工作阻力，及时抑制围岩早期离层和裂隙扩展。高预紧力形成的压应力区可有效改善围岩应力状态，将被动支护转变为主动支护，充分发挥围岩自身的承载能力，进而控制变形持续发展。

3.1.2 全断面封闭式注浆加固技术

在复杂地质条件下，单纯使用锚杆支护难以封堵围岩贯穿裂隙和空洞。全断面封闭式注浆加固技术是往巷道周边围岩注入高渗透性且快凝早强的水泥基或化学浆液，对松动圈和裂隙带进行整体充填胶结，采用分序、分段以及带压的注浆工艺，先对浅层围岩实施低压渗透注浆来封堵表层裂隙，然后对深层进行高压劈裂注浆以形成多层加固圈。注浆之后，围岩的完整性和抗渗性得到大幅提升，内部裂隙被有效充填，力学参数显著改善，浆液凝固形成的结石体与围岩构成承载环[7]。

3.2 复杂地质条件下巷道变形动态监测与反馈控制

复杂地质条件下的巷道围岩变形有着非线性、时变性和突发性等特点，所以必须建立动态监测与反馈控制体系来实现全过程调控。该体系在巷道关键断面布置多点位移计、锚杆（索）测力计、收敛计及压力盒等传感器，以此实时采集围岩深部与表面位移、支护体受力、接触压力等参数，并且通过井下工业环网把数据上传至地面分析平台。基于监测数据，采用灰色预测、神经网络等模型对变形趋势进行短期和中期预报，当监测值接近或超过预警阈值时就自动触发级预警机制，现场工程师依据“监测→分析→判断→调整”的闭环流程，动态优化支护参数（补打锚索、加密注浆、增设支架等），从而实现从“被动应变”到“主动控变”的转变，保障复杂地质条件下巷道安全高效施工[8]。

4 结束语

复杂地质条件下巷道围岩变形破坏存在多因素耦合以及时空演化复杂等特点，需要综合考虑地质结构、地应力、地下水和工程扰动等影响因素。通过建立稳定性分级标准，采用高预紧力锚杆、全断面注浆和短进尺强支护等关键技术，再配合动态监测与反馈调控，能够有效控制围岩变形并防止灾害发生，从而为类似工程条件下巷道设计与施工提供参考。

参考文献：

[1] 廉海龙.复用巷道围岩变形破坏特征及柔模墩柱支护技术研究[J].陕西煤炭,2026,45(02):145-149,168.

[2] 韩震宇,弓昊,李地元,等.深部巷道围岩变形破坏特征与吸能锚杆支护参数设计研究[J/OL].采矿与岩层控制工程学报,1-21[2026-01-06][2026-05-29].https://link.cnki.net/urlid/10.1638.TD.20260105.1753.003.

[3] 廉海龙.大断面软岩巷道变形机理与新型支护方案研究[J].能源技术与管理,2025,50(06):75-78,157.

[4] 李国帅.过断层破碎带巷道围岩变形破坏特征及支护技术研究[J].煤炭与化工,2025,48(11):14-17,22.

[5] 李宇飞.不同倾角层状岩体巷道围岩变形破坏特征及机制研究[J].西部探矿工程,2025,37(09):157-159,162.

[6] 薛彦平.差异化影响因素对巷道围岩变形破坏特征影响的数值研究[J].中国矿业,2025,34(10):185-193.

[7] 王胜开,方旭刚,李华华,等.地下金属矿山层状岩体巷道围岩变形破坏特征研究[J].矿业研究与开发,2025,45(06):119-129.

[8] 高新雨.金矿构造应力作用对巷道围岩变形破坏特征的影响研究[J].山西冶金,2025,48(05):121-123.