

巷道围岩地质结构探测与稳定性分析探究

赵星辉

准格尔旗永智煤炭有限公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要：巷道围岩地质结构的探测精度与稳定性研判水平，直接制约着地下工程的施工安全与长期运行。本文围绕围岩常见地质结构特征展开梳理，剖析岩体组成、不良构造及赋存环境对围岩承载性能的影响，同时指出当前探测技术在覆盖范围、数据采集与处理环节存在的短板。在此基础上，从内部结构、外部环境及施工扰动三个维度分析围岩失稳演化机理，并提出多技术融合探测、数据精细化处理、失稳诱因针对性防控及长效管控模式构建等改进路径，为提升巷道围岩安全管控水平提供参考。

关键词：巷道围岩；地质结构探测；稳定性分析；失稳机理；管控措施

引言：地下巷道掘进过程中，围岩地质结构的复杂程度往往远超设计预期，结构面发育、含水构造赋存及地应力异常分布等因素交织叠加，给施工安全带来严峻挑战。围岩稳定性分析依赖于地质结构探测数据的完整度与解析精度，然而现有探测手段在复杂地质条件下的适应性不足，数据处理流程缺乏统一规范，导致围岩真实状态难以被精准还原。厘清围岩地质结构特征与失稳机理之间的内在关联，探索探测技术与管控模式的优化方向，对于保障巷道施工与长期运营安全具有迫切的现实需要。

1 巷道围岩常见地质结构特征

1.1 围岩岩体结构组成特征

地质沉积与构造运动的长期作用，让巷道围岩岩体形成独具特点的原生结构形态，岩层颗粒排布方式、胶结形式均会随地质演变产生差异化变化^[1]。不同沉积阶段形成的岩体拥有专属的结构发育规律，岩层堆积厚度、胶结密实度的差异，直接影响岩体基础承载能力与抗变形能力。巷道围岩大多由多层性质不同的岩体叠加组成，分层排布具备稳定的分布规律，岩层组合形式会随巷道延伸方向产生平缓变化。多样的岩体组合形态，构成围岩整体的承载基础，决定岩体形变发展趋势。岩体内部结构状态存在明显区分，结构紧密的岩体整体稳定性更强，天然孔隙与内部缺陷较多的岩体完整性偏弱，对外界开挖扰动的抵御能力更低，更容易产生结构性形变与破损问题。

1.2 围岩不良地质构造类型

地壳构造运动持续作用于地下岩层，会催生大量结构面、节理与裂隙，裂隙延展尺度、张开程度及分布密度呈现无序化特点，不断切割完整岩体，破坏岩体结构的整体连续性。巷道掘进区域常分布破碎带与软弱夹

层，这类岩体胶结程度较差，整体结构松散，承载性能远低于常规硬质岩体。软弱夹层多呈薄层穿插分布在硬质岩层之间，弱化岩层整体的连续完整性。断层与褶皱构造广泛分布于各类巷道围岩之中，挤压、拉伸等构造作用改变岩层原始排布形态，造成岩层错位、弯曲等形态变化。构造发育区域的岩体破碎程度显著提升，结构连续性遭受破坏，大幅提升围岩失稳破坏的发生概率。

1.3 围岩赋存环境结构属性

地下深部巷道形成独特的地应力场环境，应力分布状态会随埋藏深度、地质构造的变化产生动态改变，应力集中区域会对围岩岩体形成持续性挤压作用，改变岩体原始力学平衡状态。地下水依托岩体孔隙与裂隙完成储存与流动，渗流通道会随岩体结构缺陷持续拓展，水体长期浸润会弱化岩体胶结强度，逐步侵蚀内部结构，降低岩体整体稳固性。巷道围岩所处空间的温度与湿度保持动态变化规律，偏高的环境湿度会加速岩体风化软化进程，温度的小幅波动会引发岩体周期性胀缩形变，持续作用于围岩结构，逐步改变岩体原始力学参数与结构状态。

2 巷道围岩地质结构探测技术与现存问题

2.1 围岩地质结构常用探测技术

岩体结构浅表探测技术多用于巷道表层围岩检测工作，能够精准捕捉巷道表层岩体的裂隙发育、岩层松散及风化破损状态，适配巷道表层结构的常态化排查工作^[2]。技术依托表层扫描与近距离勘测模式开展作业，能够快速获取浅表岩体的结构分布状态，为表层围岩隐患排查提供有效技术支撑。围岩深部构造探测技术聚焦巷道地下深层岩体，针对深部隐藏构造、断层发育及破碎带分布开展勘测作业，依托深度传输的探测信号穿透岩层结构，实现对巷道纵深区域地质状态的有效掌握。围

岩物理参数探测技术主要针对岩体力学特性、结构密实程度等关键指标开展勘测,通过专业设备采集岩体各项物理特征数据,清晰反映围岩内部结构的稳定状态,为后续围岩状态分析提供基础数据支撑。

2.2 地质结构探测工作存在短板

现阶段常规探测技术的勘测覆盖范围存在明显局限,探测作业多集中于巷道重点区域,对巷道边角、延伸段等偏僻区域的勘测力度不足,容易出现探测空白区域。各类探测技术的适配场景存在固定限制,面对岩层交错、裂隙密集、岩体破碎的复杂地质环境时,探测信号容易受到岩层干扰,勘测精度会出现明显下降。现有探测模式对围岩细微结构、隐蔽裂隙及薄层软弱结构的识别力度不足,难以精准捕捉小规模地质缺陷,对围岩精细化结构的识别精度无法满足高质量勘测工作要求。细微地质结构的遗漏会造成围岩真实地质状态无法完整呈现,影响后续围岩稳定性研判的准确性。

2.3 探测数据采集与处理短板

探测数据采集工作的开展模式较为单一,数据采集多聚焦常规地质参数,对围岩环境变化、结构动态变化相关数据的收集力度不足,采集数据整体完整度有所欠缺。数据筛选与梳理环节缺少标准化执行流程,采集的原始数据未经过系统分类与甄别,无效数据、干扰数据无法及时剔除,干扰后续数据利用质量。地质结构信息解译工作的精细化程度偏低,工作人员多依托常规经验完成数据解析,对复杂地质构造、隐蔽结构的数据特征解析不够细致,无法通过数据深度还原围岩真实结构状态,制约地质探测工作整体质量的提升。

3 巷道围岩稳定性影响因素及失稳机理

3.1 内部地质结构影响因素

围岩整体稳定状态依托岩体原始结构形态维持,岩体结构完整程度直接决定岩层承载性能与抗变形能力。结构致密、整体性良好的岩体可以有效抵御外部荷载带来的形变作用,长期保持稳定的岩层状态^[3]。岩体内部发育的软弱结构面与各类裂隙会持续切割岩层主体,打乱岩体内部连续的结构体系,削弱岩层内部颗粒之间的粘结作用力。结构面的无序分布会大幅降低岩体整体的均匀性,让围岩受力状态呈现不均衡分布。断层褶皱等特殊地质构造会重塑岩层原始分布形态,构造运动产生的挤压与错动作用会让局部岩体变得松散破碎,原生结构遭到严重破坏,岩层自身承载基础持续弱化,让围岩具备较高的失稳潜在风险。

3.2 外部环境扰动影响因素

地下深部岩体长期保持原始应力平衡状态,巷道空

间形成后会打破原有应力分布格局,围岩内部应力会发生重新分配与持续调整,应力集中区域会持续承受超额荷载,诱发岩体微变形与细微损伤。地下水活动会持续作用于围岩岩体,水体不断渗入岩体孔隙与裂隙内部,逐步溶解弱化岩体胶结物质,降低岩层整体结构强度。长期渗透侵蚀作用会持续软化软弱岩层,扩大岩体内部空隙空间,加剧岩体松散程度。巷道所处地下空间的温度波动、空气湿度等环境条件会产生持续性作用,长期风化作用会缓慢损耗岩体力学性能,逐步引发岩层结构劣化蜕变,不断削弱围岩整体稳定性能。

3.3 巷道施工扰动影响因素

地下岩体在自然状态下维持稳定的应力平衡体系,巷道开挖作业会直接剥离部分岩体结构,解除周边岩层的原始约束条件,彻底破坏天然应力平衡状态,促使围岩进入应力重调整的不稳定阶段。施工过程产生的振动冲击能量会逐层传导至围岩深部结构,激活岩体内部原有细微裂隙,推动裂隙持续发育、延展与扩张,不断增大裂隙开度与贯通范围。各类掘进、支护工序交替开展的过程中,持续扰动会反复改变围岩内部受力状态,让岩层产生持续性微量位移,诱发局部结构偏移、错位等结构变异问题,不断累积结构性损伤,逐步恶化围岩整体稳定条件。

3.4 围岩失稳演化机理

围岩失稳的产生遵循循序渐进的发育规律,各类内外扰动引发的细微结构损伤会不断累积,从零星的局部破损逐步向着大范围结构性破损转变。岩体内部分散的细微裂隙会随着受力持续加剧不断拓展延伸,无序发育的裂隙会逐步相互搭接、贯通,形成贯穿岩体内部的大型破损结构面。完整的围岩岩体被贯通性裂隙分割为多个独立块体,岩体内部整体联结性能大幅衰减直至完全丧失。各类结构损伤持续叠加发育后,围岩整体承载体系会逐步失效,岩层会逐步出现松动、脱落、滑移等现象,最终完成从局部结构破损到整体结构失稳坍塌的完整演变过程。

4 巷道围岩探测优化与稳定性管控提升对策

4.1 优化围岩地质结构探测工作体系

单一探测手段存在固有适用局限,单一设备与单一技术无法全面适配巷道复杂多变的地质环境,难以完整捕捉围岩深浅层的结构变化特征。依托不同探测技术的作业原理与勘测优势开展搭配应用,能够弥补单一技术的探测短板,实现浅表岩体结构勘测与深部构造探测的互补结合。多技术融合的作业模式可以有效覆盖岩体裂隙发育、岩层破碎状态、深部构造分布等多项地质内

容,提升整体勘测的全面程度^[4]。持续推进探测范围的全方位拓展,突破传统重点区段集中探测的局限模式,对巷道延伸区域、边角隐蔽区域以及围岩深部盲区开展全面勘测,彻底消除探测空白区域。不断丰富探测工作的开展维度,跳出传统结构形态探测的单一模式,融入岩体物理特性、结构密实程度等多项勘测内容。针对岩层破碎程度高、裂隙交错发育、构造复杂多变的特殊作业场景,主动调整现有探测作业模式,优化设备安放位置与勘测作业流程,适配复杂地质环境的勘测需求,有效提升特殊工况下地质探测的精准程度与作业质量。

4.2 完善探测数据精细化处理体系

全面升级地质数据采集工作模式,打破传统数据采集内容单一、维度狭窄的问题,在常规结构数据基础上,扩充围岩环境变化特征、岩体形变规律、构造发育程度及岩层胶结状态等多元化数据内容,充实地质信息储备,为后续结构分析提供充足的数据支撑。搭建标准化的数据处理工作范式,统一数据筛选、分类、归档的完整流程,对现场采集的原始勘测数据进行系统性梳理,清理外界干扰产生的无效数据,留存具备分析价值的有效数据资源,保障数据基础质量。逐步细化地质信息解译工作标准,结合巷道地质演化规律与岩体发育特点,细化细微裂隙、软弱夹层、隐蔽断层等特殊地质结构的识别标准,优化地质信息解析思路与研判方式。通过精细化的数据处理手段,精准还原围岩内部真实结构状态,提升地质信息解译的精细水平与准确程度。

4.3 针对性防控围岩失稳诱因

主动针对围岩原生地质缺陷开展前置防控工作,针对裂隙集中发育、岩体破碎、夹层分布等结构薄弱区域,提前落实结构加固与缺陷处置措施,从源头削弱地质结构缺陷带来的失稳风险,阻断内部结构破损持续发育的路径。持续落实环境扰动防控举措,搭建完善的巷道防水与防潮体系,有效阻隔地下水渗透通道,减少水体长期浸润对岩体胶结结构的弱化作用。针对地下温湿度长期变化带来的风化劣化问题,落实常态化防护手段,减缓岩体力学性能衰减速度。系统优化巷道整体施工流程,细化掘进、钻孔、支护等各项作业的操作标准,规范现场作业行为,合理控制施工扰动强度,减少作业振动与岩体开挖对围岩原始结构的破坏,最大限度降低人为作业带来的结构扰动,稳定围岩原始力学结构

状态。

4.4 构建围岩长效稳定性管控模式

建立覆盖巷道全周期运行状态的动态监测工作机制,持续跟踪围岩形变位移、裂隙扩张、应力调整等动态变化情况,及时捕捉围岩稳定性的细微演变趋势,实现隐患早发现、早处置。依据不同巷道区段的岩体属性、地质构造发育特点以及周边环境条件,匹配差异化、针对性的防护加固手段,摒弃统一固化的防护模式,提升防护方案与现场地质条件的适配程度。深度串联地质探测、结构分析、隐患排查、加固防控等各项工作环节,打通各流程之间的衔接壁垒,构建闭环式的作业链路^[5]。持续梳理管控工作中的薄弱环节,补齐动态监测与日常管控短板,形成系统化的一体化管理管控体系,持续维系巷道围岩整体结构的稳定性,保障地下巷道作业环境的长期安全。

结束语

巷道围岩稳定性受制于地质结构本身的复杂程度,也与探测手段的精度、数据处理的深度以及施工管控的细致程度紧密相关。从多技术融合探测到数据精细化解析,从失稳诱因的前置防控到全周期动态管控模式的搭建,每一个环节的优化都在为围岩安全筑牢一道防线。将地质探测、结构研判与工程管控有机串联,形成闭合的作业链路,方能在复杂地质条件下持续维系巷道围岩的整体稳定,守住地下工程安全运行的底线。

参考文献

- [1]周志斌,赵善坤,高飞,等.深部矿井大变形巷道围岩结构控制与效果评价方法研究[J].煤矿安全,2026,57(3):97-113.
- [2]许磊,郭帅,DavideElmo,等.深部不同断面巷道分区破裂形态与围岩结构控制[J].岩土工程学报,2023,45(4):720-729.
- [3]张富魁,任国胜,申阳平.基于复杂地质条件下的巷道围岩变形及控制技术研究[J].现代矿业,2025,41(11):232-236,242.
- [4]张书晨.巷道破碎围岩地质力学测试分析及支护设计研究[J].山西冶金,2023,46(10):80-83.
- [5]李士召.深部煤矿巷道支护结构优化与稳定性分析[J].中国科技纵横,2026(2):3-5.