

煤矿顶板事故常见诱因及支护方案优化研究

刘志平

内蒙古蒙泰不连沟煤业有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘要：煤矿顶板事故是威胁矿井安全生产的主要灾害类型，事故起数和死亡人数长期位居各类煤矿事故前列。本文系统分析了顶板事故的多维诱因，从地质条件、采动应力、支护设计、施工质量及监测管理五个维度构建系统性归因框架，揭示了各因素间的耦合作用关系。在此基础上，梳理了锚杆支护的理论基础与设计方法，提出了涵盖差异化支护体系设计、施工工艺优化、动态监测系统完善及安全管理保障的综合优化方案。研究表明，顶板事故防治须坚持“地质先行、设计科学、施工规范、监测有效”的系统化治理理念，实现由经验型管理向科学化、精准化防控的转变。

关键词：煤矿安全；顶板事故；事故诱因；围岩控制；支护优化

引言：煤矿顶板事故在我国煤矿安全事故中占比突出，事故起数和死亡人数长期位居各类事故前列。随着煤矿开采深度逐年增加，部分矿井已超千米，高应力、复杂地质条件下的顶板管理难度持续加大。顶板事故的突发性和群死群伤特征使其成为煤矿安全治理的重中之重。基于此，本文从系统视角出发，对顶板事故诱因进行层次化分析，并围绕支护方案优化展开研究，以期为煤矿顶板安全管理提供理论支撑与技术参考。

1 煤矿顶板支护基础理论与技术概述

1.1 顶板围岩结构与力学特性

煤层顶板由赋存于煤层上方的岩层构成，自下而上分为伪顶、直接顶和老顶。伪顶为紧邻煤层的软弱岩层，厚度一般不超过0.5m，随采随落；直接顶是回采工作面支护的直接对象，其稳定性对顶板管理至关重要；老顶厚度大、强度高，对工作面矿压显现具有控制性影响。围岩力学特性取决于岩性、结构面发育程度及赋存环境。单轴抗压强度是衡量顶板承载能力的核心指标，软弱岩层低于20MPa，中硬岩层为40~80MPa，坚硬岩层超过80MPa。岩体结构面（层理、节理、裂隙）显著削弱顶板完整性，降低其抗拉与抗剪强度。地应力场特征同样关键，侧压系数（水平应力与垂直应力之比）决定顶板受力状态与破坏模式，高应力区易引发岩爆或大变形失稳。

1.2 顶板灾害基本类型与特征

煤矿顶板灾害按发生地点分为采煤工作面、掘进工作面及巷道顶板事故三大类。按失稳形态划分，主要包括局部冒顶、大范围冒顶、片帮和漏顶四种形式。局部冒顶多发生在断层破碎带、裂隙发育区等特殊构造部位，波及范围小但突发性强；大范围冒顶涉及工作面或

巷道大面积垮落，常造成重大人员伤亡和设备损毁，与老顶来压步距和强度密切相关^[1]。片帮是煤壁在水平应力或采动压力作用下的片状剥落，多见于高应力软岩巷道；漏顶是破碎顶板在未及时支护时小块岩体持续坠落的现象。顶板灾害特征表现为突发性（缺乏明显预兆）、群死群伤性（大范围冒顶伤亡严重）、诱因复杂性（多因素耦合）及破坏性（对巷道、设备和人员安全造成严重损毁）。

2 顶板事故常见诱因的系统性分析

2.1 地质条件诱因

地质条件是决定巷道顶板稳定性的先天主控因素。顶板岩性与岩层结构是最根本的影响条件，软弱夹层会大幅降低岩层粘结强度，在采动扰动下极易产生层间离层，进而引发局部冒顶。断层、褶皱、裂隙发育等地质构造会破坏岩体完整性，降低围岩整体强度，使顶板处于不稳定状态。同时，煤层倾角增大易造成顶板顺层滑动，开采深度增加会提升原岩应力，使围岩由脆性向延性转变，显著增加管控难度。此外，地下水会软化围岩、降低岩体强度，改变内部应力状态，加速裂隙发育扩展，进一步诱发顶板失稳破坏。

2.2 采动应力诱因

井下采掘活动会打破原岩应力平衡，引发围岩应力重分布，应力集中是顶板失稳破坏的直接诱因。工作面推进过程中，前方煤体形成高支承压力区，应力集中系数可达原岩应力的2~4倍，超过围岩承载极限便会造成顶板破损失稳。工作面推进速度过快会增大顶板来压步距与来压强度，易诱发大面积冒顶；推进速度过慢则会累积围岩蠕变变形，削弱顶板自稳能力。相邻采空区会产生应力叠加效应，使孤岛工作面巷道应力高度集中。

重复采动会持续损伤岩体结构、降低围岩强度,若支护体系无法有效适配动态应力变化,极易引发顶板灾害。

2.3 支护设计诱因

支护设计不合理是引发顶板事故的核心人为技术诱因。部分矿井支护形式与现场顶板条件不匹配,在破碎软弱顶板采用单一端部锚固锚杆,无法有效控制围岩大变形。同时普遍存在支护参数设计偏低问题,锚杆长度不足无法深入稳定岩层、间排距过大、杆体直径偏小,导致整体支护承载力不足、构件易失效破坏。支护体系未能适配围岩变形特性,刚性支护无法适应软岩大变形,柔性支护在坚硬顶板中支护阻力不足^[2]。巷道交叉点、断层破碎带、大跨度硐室等高危区域缺乏专项补强设计,沿用常规支护参数,支护承载力无法满足现场围岩控制需求。

2.4 施工质量诱因

现场施工质量不达标,是支护设计效果无法落地、顶板隐患频发的主要原因。井下锚杆安装角度偏差超出规范允许范围,锚固受力方向偏移,大幅降低实际支护效果。锚固剂充填不密实、锚固长度不足,会导致锚杆锚固力不达标,采动扰动下易出现滑脱失效。锚杆预紧扭矩不足、预应力施加不到位,无法发挥主动支护作用,不能有效抑制顶板离层变形。同时钢带、金属网搭接不规范,破坏支护体系整体性,局部破损后易引发围岩垮落。此外,支护材料质量不达标、现场验收管控松散、隐蔽工程监管缺失、作业人员操作不规范,都是诱发支护失效、顶板失稳的重要原因。

2.5 监测与管理诱因

监测体系不完善、现场管理缺失,是顶板隐患演变为安全事故的关键诱因。矿井顶板监测设备布设数量不足、监测频次偏低,无法全面采集顶板变形、离层等关键数据,难以掌握围岩动态变化规律。多数矿井仅简单记录监测数据,未设置预警阈值与应急响应机制,无法及时识别顶板异常隐患。现场敲帮问顶、隐患排查制度流于形式,无法及时处置潜在风险。同时一线作业人员专业能力不足、安全意识薄弱,专项培训落实不到位,顶板隐患辨识能力差。顶板事故多为多因素耦合导致,支护缺陷、施工隐患叠加采动应力作用,最终引发顶板失稳垮落事故。

3 支护方案优化的理论基础与设计方法

3.1 煤矿常用支护方式及适用条件

煤矿巷道支护类型丰富,不同支护方式的受力机理与适用场景存在明显差异。锚杆支护是矿井主流主动支护手段,依靠锚固作用联动深部稳定岩层,形成有效承

载结构,主要适用于顶板完整、岩性中硬的常规巷道。锚索支护锚固深度可达8~15m、承载能力更强,常作为加强支护手段,适配大跨度巷道、巷道交叉点及断层破碎带等复杂地段,可有效抑制顶板离层与下沉。注浆加固技术主要针对裂隙发育、岩体破碎的软岩巷道,通过浆液胶结围岩裂隙,提升岩体整体强度与完整性。U型钢支架等被动支护适配强采动、大变形巷道,具备良好的让压性能。喷砼、砌碇等刚性支护多用于服务年限长、围岩稳定的主要巷道,现场多采用锚网索喷联合支护模式,充分发挥各类支护的协同优势。

3.2 锚杆支护设计方法

锚杆支护设计已从传统经验类比,逐步转变为理论计算与现场适配相结合的科学设计模式。其中悬吊理论通过锚杆将浅层软弱岩层悬吊至上部稳定基本顶,有效控制松散岩层垮落,适用于老顶埋藏浅、稳定性好的巷道工况。组合梁理论依托锚杆预紧力压实层状顶板,提升层间摩擦阻力,将多层薄层岩层整合为整体承载梁,多用于层理发育的薄岩层顶板巷道。组合拱理论依靠锚杆锚固压应力叠加形成连续承压拱,适合软弱破碎围岩支护^[3]。围岩强度强化理论以高预紧力锚杆提升围岩自身承载能力,是高应力软岩巷道的核心设计理论。各类理论各有侧重,工程设计中需结合顶板结构、岩性及应力条件综合选用,实现互补优化设计。

3.3 基于数值模拟的支护参数优化方法

数值模拟是现阶段煤矿支护参数优化的核心技术手段,可高效完成多方案对比优选,弥补传统经验设计的局限性。建模时需按照巷道跨度3~5倍合理设定模型尺寸,精准界定边界条件与岩体力学参数,根据围岩特性选取适配本构模型,完整岩体选用摩尔-库仑模型,软弱破碎围岩采用应变软化模型。通过设置不同锚杆长度、间排距、预紧力的参数组合开展模拟运算,以顶板下沉量、围岩离层值、塑性区范围及锚杆受力状态作为核心评判指标,对比各类支护方案的围岩控制效果,筛选出安全可靠、经济合理的最优参数,同时结合工程经验相互印证,大幅提升支护设计的科学性与精准度。

3.4 动态支护设计理念

动态支护设计强调根据地质条件变化和监测反馈持续优化方案。传统方法基于有限勘探资料确定参数,施工揭示的实际条件可能与勘探存在偏差,动态设计允许在施工过程中据新揭露信息调整方案。其核心是“设计→施工→监测→反馈→修正”闭环流程:施工前编制初步设计,过程中开展地质编录和围岩监测,当监测数据反映的变形规律与预期不一致时,及时分析原因并调整

参数。分类分段支护是动态设计的具体实现,根据围岩类别(I~V类)分别制定对应方案。信息化施工要求建立监测数据快速反馈通道,参数调整须在发现问题后最短时间内完成。实施需要施工、设计、监理三方密切配合,突破“一次设计、一成不变”的传统模式。

4 煤矿顶板支护方案优化设计

4.1 差异化支护体系优化设计

差异化支护是解决“一套参数管全部”问题的核心路径。根据围岩分类制定分级标准:I类(稳定顶板)采用基本锚杆支护,锚杆长度1.8~2.2m、间排距1000×1000mm;II类(中等稳定)采用“锚杆+金属网”,锚杆长度2.2~2.6m、间排距900×900mm;III类(不稳定)采用“锚杆+锚索+金属网+钢带”联合支护,锚杆长度2.4~2.8m、锚索6~10m、间排距800×800mm;IV~V类(极不稳定及破碎带)还需注浆加固或架设金属支架。特殊地段单独加强:交叉点采用锚索桁架,断层破碎带采用超前注浆+加密锚索,应力集中区采用全长锚固高预紧力锚杆+大直径锚索。参数优化应综合考虑“锚杆长度×间排距×预紧力×锚固方式”四要素协同匹配,使支护强度与围岩承载需求精准适配^[4]。

4.2 支护施工工艺优化措施

施工工艺优化旨在保障设计意图向工程实体准确转化。锚杆安装须严格执行“钻孔—清孔—装锚固剂—插入锚杆—搅拌—凝固—安装托盘—施加预紧力”标准流程,孔深偏差±30mm以内,角度偏差不得超过±5°。锚固剂搅拌时间按说明书执行(20~30秒),凝固不少于3分钟。预紧力采用扭矩倍增器或液压扳手施加,确保达到设计值。金属网搭接宽度不小于100mm,每200mm绑丝紧固。锚索张拉控制应力为极限承载力的60%~70%。注浆压力控制在1.5~3.0MPa。锚杆拉拔力检测按每300根不少于3根比例抽检,结果低于设计值90%的须及时补打。

4.3 顶板动态监测系统优化

顶板动态监测是实现顶板状态可知可控的技术保障。应采用“离层监测+锚杆受力监测+表面位移监测+微震监测”多元一体方案,实现全空间、全时段覆盖。离层仪沿巷道每50~100m布置一组,每组设深浅基点各一个,深基点锚入老顶、浅基点锚入直接顶。锚杆测力计安装在代表性锚杆尾部,受力超过屈服强度80%时预警。

表面位移监测采用十字布点法。冲击地压矿井需增设微震监测系统。监测数据应建立自动预警阈值(离层量超过设计值70%、锚杆受力超过75%为警戒值,超过85%为报警值),通过信息化平台实时传输、分析与预警推送,确保异常信息快速传达至决策层^[5]。

4.4 安全管理保障措施优化

安全管理保障将技术方案转化为现场执行力,质量验收须建立“班组自检—区队全检—矿井抽检”三级制度,拉拔力与张拉检测留存影像资料。隐蔽工程(锚固剂充填、锚杆安装、锚索张拉)全程录像存档,实现质量可追溯。专职安检员每个采掘工作面每班不少于1人。典型事故案例警示教育每月至少一次。应急预案须每季度组织一次冒顶演练,配备足够抢险物资(工字钢、道木、千斤顶等),并保持与矿山救护队联动,通过制度化将安全防控措施落到实处。

结束语

通过系统分析顶板事故的多维诱因,揭示了地质条件是先天基础、采动应力是外部驱动、支护设计是核心保障、施工质量是关键环节、监测管理是最后防线的内在逻辑。在此基础上,围绕差异化支护体系优化、施工工艺标准化、动态监测系统完善及安全管理保障四个维度,构建了从设计到施工再到监测管理的完整优化闭环。实现顶板事故由被动应对向主动防控转型,必须将科学地质探测、精准支护设计、规范施工质量、动态监测反馈与严格制度管理有机融合,形成系统化顶板安全治理体系,为煤矿安全生产提供坚实保障。

参考文献

- [1] 张志荣.煤矿顶板事故分析[J].科学与信息化,2021(9):100,106.
- [2] 曹东强,刘业娇,李绪萍,等.煤矿顶板事故致因因素耦合效应研究[J].煤矿安全,2026,57(3):244-253.
- [3] 赵广轩,赵德龙.煤矿顶板事故特征及规律研究[J].内蒙古煤炭经济,2024(19):40-42.
- [4] 马秋聪,卢晗,朱春.煤矿顶板事故分析与防治对策研究[J].内蒙古煤炭经济,2024(12):100-102.
- [5] 王捞捞,陈俊智,张伟光.新疆煤矿顶板事故现状及控制对策研究[J].新疆地质,2022,40(4):561-565.