

深部软岩巷道锚网索联合支护参数优化分析

刘 志

四川川煤华荣能源有限责任公司 四川 达州 610000

【摘 要】：深部软岩巷道受高应力、强扰动、岩性软弱和水理作用影响，容易出现顶板下沉、两帮挤出、底鼓和支护结构失效等问题。锚网索联合支护能够兼顾浅部围岩护表、深部围岩约束和关键部位补强，但参数配置若与围岩条件、变形特征和施工能力脱节，容易出现局部过强、整体不足或后期失稳。文章从深部软岩巷道变形特征入手，分析锚杆、金属网、锚索和辅助措施的协同关系，提出参数优化应遵循分区控制、强弱匹配、动态反馈和施工可控原则。

【关键词】：深部软岩巷道；锚网索联合支护；参数优化；围岩控制；动态调整

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.013

引言

深部矿井巷道处于复杂应力环境中，软岩遇到开挖卸荷、采动扰动和水理弱化后，常表现出持续变形和反复破坏。锚网索联合支护因能同时发挥锚杆浅部加固、金属网护表约束和锚索深部悬吊补强作用，成为深部软岩巷道治理的重要选择。深部矿井软岩巷道锚网索支护参数需要围绕软岩变形机制和承载协同进行组织。但在一些工程中，联合支护容易被简化为“多上材料”，参数选择依赖经验，锚杆、网片和锚索之间缺少力学关系和施工顺序的统筹。参数优化的关键不是盲目提高强度，而是让不同支护构件在合适部位、合适时机发挥作用，并随围岩响应及时调整。因此，本文把参数优化理解为一个由围岩识别、构件组合、施工落地和监测修正共同组成的过程。只有在这个过程中保持反馈，锚网索联合支护才能避免“参数很满、效果不稳”的问题。

1 深部软岩巷道变形与支护需求识别

1.1 软岩变形具有持续性和耦合性

深部软岩巷道开挖后，原有应力平衡被打破，围岩会沿层理、节理和软弱夹层释放变形。与浅部硬岩巷道相比，软岩变形往往不是短时间内完成，而是在支护安装后仍持续发展。顶板下沉、两帮内挤、肩角剪切和底板鼓胀常常相互牵连，任何一个部位控制不足，都可能破坏整体支护效果。深部软岩巷道支护方案应围绕围岩变形特征和支护结构适配展开^[1]。在这种条件下，单一锚杆支护往往难以兼顾护表、加固和深部约束，金属网和锚索的组合价值由此显现。参数优化首先要识别主要变形部位和控制对象，判断是浅部破碎主导、深部滑移主导，还是底鼓和两帮挤出共同控制，不能在不同软岩条件下套用同一组参数。

1.2 高应力扰动放大支护滞后风险

深部软岩巷道受采动影响时，围岩应力路径会不断变化。开挖初期看似稳定的断面，可能在邻近工作面推进、煤柱受压或构造带揭露后出现变形加速。若支护参数只按照初始揭露情况设置，缺少后期扰动预判，锚网索体系容易在服务过程中出

现承载不足。煤矿深部软岩控制已经从单纯加固扩展到卸压、让压和支护协同等综合方向^[2]。这意味着参数优化不能只问锚杆多密、锚索多长，还要判断围岩是否需要卸压、是否需要释放部分变形、是否需要加强关键部位补强。支护滞后的另一表现是施工跟进和监测反馈慢，变形已经发展到护表构件鼓包、锚杆托盘松动或锚索受力异常时，现场才开始补强，治理成本和安全风险都会增加。

2 锚网索联合支护参数配置逻辑

2.1 锚杆参数侧重浅部加固与初期控形

锚杆是联合支护体系中最先参与围岩约束的构件，参数配置应围绕浅部破碎圈、岩性完整性和巷道断面受力特点展开。锚杆长度、间排距、锚固方式、安装角度和预紧质量共同决定浅部围岩能否形成较稳定的组合承载层。深部软岩巷道支护参数选择应与围岩变形控制目标对应，而不是把某个参数孤立放大^[3]。在顶板较破碎、两帮挤出明显或肩角应力集中区域，锚杆布置应强化连续性和贴合度，使金属网、钢带和托盘形成有效护表面。若锚杆间距过大，网片容易鼓出；若锚杆长度不足，浅部破碎层与相对稳定岩层不能有效联结；若预紧和锚固质量不稳定，设计强度也难以发挥。锚杆参数优化应与施工可达性同时考虑，避免参数看似先进却在狭窄、潮湿、破碎作业面无法稳定实施。

2.2 金属网和钢带承担护表与力传递功能

金属网和钢带并不是附属材料，而是锚杆之间传递约束力、控制浅部破碎岩块掉落和保持支护连续性的关键构件。软岩巷道表面容易风化、片落和鼓包，若只有点状锚杆约束，锚杆之间的岩块仍可能松动外移。金属网可以增强护表范围，钢带可以把多个锚杆连接成线状受力单元，使浅部围岩的变形更容易被整体控制。深部软岩巷道支护结构需要适应软岩变形和地压释放过程^[4]。因此，网片搭接、钢带贴合、托盘压紧和表面清理都应纳入参数优化范围。若网片搭接随意、钢带悬空或托盘压在浮矸上，锚杆参数再合理也会出现护表失效。对软弱破碎部位，可通过提高护表构件连续性、改善搭接质量和增加

局部约束来减少浅部破坏向深部扩展。

2.3 锚索参数服务深部承载和关键补强

锚索在联合支护中的作用更偏向深部承载、关键部位补强和整体稳定控制。深部软岩巷道如果只依赖浅部锚杆,支护结构可能随着浅部破碎圈扩展而整体失效;锚索能够把较深部位的稳定岩体与浅部支护结构联系起来,提升顶板和肩角区域的承载能力。复杂应力区支护优化需要关注空间位置和受力差异,交岔点等部位更应避免平均化布置^[5]。锚索参数配置应围绕顶板关键层、两帮深部滑移趋势和交岔点、断层邻近区等薄弱部位展开。过少会造成深部约束不足,过密则可能增加施工负担并改变局部应力分布。锚索安装还要与锚杆、网片和钢带形成协同顺序,避免锚索补强滞后到围岩已经大幅松动之后。参数优化的目标,是让锚索承担深部稳定任务,而不是简单替代锚杆或弥补前期施工粗糙。

3 参数优化中的施工与反馈控制

3.1 以分区分级思路调整支护强度

深部软岩巷道并非全断面、全长度都需要同一支护强度。断层破碎带、煤岩交界、交岔点、采动影响区和淋水软化段的变形机制不同,锚网索参数也应有所差异。深部软岩巷道支护需要结合围岩状况和施工条件优化技术组合,不能把支护方案简化为固定材料清单^[6]。分区分级的意义在于把强支护用在真正需要的位置,把常规支护做稳做实,避免一味加密造成施工效率下降和材料浪费。现场可根据揭露岩性、变形迹象、钻孔成形情况和支护构件状态划分重点段、过渡段和常规段。重点段强调锚索补强、护表连续和必要卸压;过渡段强调参数平顺衔接,防止刚度突变;常规段则强调锚杆安装质量和巡检维护。这样的参数调整更接近现场真实需求,也便于班组执行和质量追溯。

3.2 以施工质量保障参数落地

联合支护参数只有通过稳定施工才能转化为围岩控制效果。深部软岩巷道常存在孔壁破碎、钻孔返水、岩面不平、作业空间受限和设备转场频繁等问题,容易导致锚固剂搅拌不充分、锚杆角度偏差、网片贴合差和锚索张拉不到位。参数优化不能停在设计表格上,而要同步规定钻孔验收、材料保管、安装顺序、紧固复核和隐蔽问题处理办法。对顶板破碎区,应先处理浮矸和危岩,再保证网片压实;对两帮软弱区,应防止片帮后再补网造成护表空鼓;对锚索补强区,应核对孔深、锚固质量和张拉记录。施工质量检查应使用断面化、部位化记录,把问题定位到具体巷道段和具体构件。只有施工过程受控,锚网索参数之间的协同关系才能形成,而不是停留在材料堆叠。

3.3 以监测结果修正后续参数

深部软岩巷道支护参数优化应具有反馈性。初始方案再充分,也难以完全覆盖掘进后围岩的实际响应。现场应把顶板离

层、两帮收敛、底鼓发展、锚杆受力、锚索受力、网片变形和巷道断面变化纳入持续观察。若某一部位变形持续发展,说明参数与围岩响应之间存在偏差,需要分析是浅部护表不足、深部锚索约束不足、卸压措施不足,还是施工质量影响了参数发挥。后续同类巷道施工中,应把这些反馈转化为参数修正,例如调整锚杆布置、优化锚索补强位置、加强肩角控制或改变支护跟进节奏。监测不是为了形成资料堆积,而是让支护设计持续靠近现场。通过监测反馈,联合支护可以从一次性设计变为分阶段优化过程,更适应深部软岩巷道的长期变形特点。

4 提升联合支护参数优化质量的建议

4.1 避免经验套用导致结构失衡

深部软岩巷道支护中,经验参数具有参考价值,但不能替代现场判断。不同矿井的埋深、岩性、构造、采动条件、巷道断面和服务功能不同,同一套锚网索参数可能在一个巷道有效,在另一个巷道却出现支护滞后或局部浪费。优化时应先明确控制目标,是控制顶板下沉、两帮挤出、底鼓发展,还是控制交岔点和硐室变形,再选择相应支护组合。对变形机制复杂的区段,应通过现场揭露、监测反馈和技术复盘逐步校正参数。管理上还要防止只重材料投入、不重构件协同的倾向。锚杆、网片、钢带和锚索的作用层次不同,缺少哪一环都会影响整体效果。参数优化越精细,越要保持施工可执行性,确保班组知道为什么这样布置、怎样安装、哪些现象需要上报。经验参数还容易造成另一个问题,即支护结构表面看起来完整,实际关键部位没有形成有效承载^[7]。比如顶板深部滑移明显时,只加密浅部锚杆难以控制整体下沉;两帮软弱破碎时,只强化顶板锚索会让帮部继续挤出;底鼓发展较快时,只处理顶帮也会让断面维护陷入反复。参数优化应先回答变形从哪里开始、向哪里发展、哪个部位最先失控,再决定锚杆、网片、钢带、锚索和卸压措施的配置。对复杂地段,可以先设置试验段,通过施工记录和变形反馈检验方案,再推广到相邻巷道。这样能避免把经验当成定值,也能让支护投入更集中地服务稳定目标。参数复核还应关注构件之间的刚度差异。若锚杆、钢带和锚索刚度配置不协调,软岩变形会集中到相对薄弱的位置,形成新的破坏通道。现场优化时,应把顶板、肩角、两帮和底板作为相互影响的整体,而不是分专业分别处理。对支护效果较好的区段,也要提炼其有效条件,判断是岩性较完整、施工质量较稳,还是参数本身更适合当前巷道。这一判断过程应留下简明记录,便于后续复盘。

4.2 形成设计、施工和运维一体化机制

联合支护参数优化不是技术人员单独完成的设计工作,而是设计、施工和运维共同参与的闭环。设计阶段要明确围岩分区、支护构件功能和重点控制断面;施工阶段要保证钻孔、锚固、护表、张拉和复核质量;运维阶段要通过巡查和监测判断

参数是否继续适用。若后期巷道出现局部变形、构件松动或维护频繁,应把问题反馈到下一循环设计和相邻巷道施工中。项目部可建立支护参数台账,把每段巷道的围岩条件、支护方案、施工记录、变形表现和补强措施关联起来,形成可追溯资料。这样做既能减少同类问题重复发生,也便于在地质条件变化时快速调整方案。深部软岩巷道治理强调长期稳定,锚网索参数优化也应从一次验收转向全周期管理。一体化机制还应重视信息留存和责任衔接。设计人员需要拿到真实的揭露岩性和变形反馈,施工人员需要知道参数调整背后的控制意图,运维人员则需要掌握哪些构件是后期巡查重点。若三方信息断开,现场就可能出现设计不断加固、施工仍按旧习惯操作、维护只在变形后补救的局面。项目部可把支护参数、施工质量、监测趋势和维修记录汇入同一台账,定期对变形明显区段复盘,明确下一阶段是调整锚杆密度、加强锚索补强、改善护表连续性,还是配合卸压治理。参数优化的质量,最终要通过巷道长期可维护性来检验。运维阶段的反馈还可以反向校正材料和工艺选

择。某些构件如果安装后维护频繁,可能不是单次施工粗糙,而是材料刚度、护表能力或施工顺序与软岩变形不匹配。项目部应把返修原因分类,区分托盘松动、网片破损、锚索补强滞后、底鼓牵动和局部淋水软化等情形。只有原因分清,下一轮参数调整才不会简单加量,而能真正提高联合支护的适应性。这种台账还便于识别同类巷道的共性风险,为后续支护参数预判提供依据。维护结论应及时回传。

5 结语

深部软岩巷道锚网索联合支护参数优化,应建立在围岩变形机制识别和支护构件协同关系之上。锚杆负责浅部加固和初期控形,金属网与钢带承担护表和力传递,锚索侧重深部承载与关键补强。参数配置既要避免经验套用,也要防止单纯加密加长造成结构失衡。通过分区分级设计、施工质量控制和监测反馈修正,联合支护才能更好适应深部软岩巷道持续变形和扰动变化,提升巷道长期稳定水平。

参考文献:

- [1] 杭帅杰.深部矿井软岩巷道锚网索支护参数优化[J].凿岩机械气动工具,2026,52(6):61-64.
- [2] 叶明才.深部软岩巷道支护方案及参数优化设计[J].凿岩机械气动工具,2026,52(1):73-75.
- [3] 康永水,黄友琦,李翔,等.煤矿深部软岩巷道钻孔卸压技术研究进展综述[J].采矿与岩层控制工程学报,2026,8(2):77-99.
- [4] 李鹏飞,李亮,李德阳.深部软岩巷道支护参数优化研究[J].建井技术,2025,46(5):74-79.
- [5] 王楠,何源,孙怀明.深部软岩巷道支护和地压控制问题[J].内蒙古煤炭经济,2024,(15):48-50.
- [6] 刘小虎,查文华,姚直书,等.采动应力作用巷道交岔点稳定性分析及支护优化[J].煤炭技术,2024,43(7):14-19.
- [7] 李辰伟.煤矿深部开采软岩巷道支护技术优化分析[J].江西煤炭科技,2023,(3):36-39+43.