煤矿深部软岩巷道拱形支护和锚网支护的优劣分析

谷　伟

郑州煤炭工业（集团）有限责任公司大平煤矿　河南　登封　452473

摘　要：深部软岩巷道高地应力、围岩破碎、流变变形显著，支护难度远大于浅部巷道，是制约深部矿井安全开采的主要难题。本文以拱形支护与锚网支护为研究对象，结合井下实际施工工况，系统分析两种支护方式的结构体系、施工工艺与现场应用特性。从承载性能、围岩控制、施工效率、工程成本及后期维护等方面开展优劣对比，总结两类支护的常见病害形式与失效机理。

关键词：深部软岩巷道；拱形支护；锚网支护；优劣分析

引言：随着煤炭开采深度持续增加，井下巷道地质条件愈发复杂，高地应力、软岩风化、围岩流变等问题愈发突出，常规支护手段极易出现破损失效，引发巷道变形、片帮甚至垮落隐患。目前国内深部矿井普遍采用拱形支护与锚网支护两大主流支护形式，但现场支护选型缺乏精准依据，常出现支护参数与地质条件不匹配的问题，造成支护浪费或支护失效。为有效解决深部软岩巷道支护难题，本文针对性开展两种支护技术的对比分析，梳理各自应用优势与工程缺陷，为现场支护优化提供可靠依据。

1 煤矿深部软岩巷道地质力学特性

煤矿深部巷道埋深偏大，围岩多为泥岩、页岩、砂质软岩，地质条件繁杂，岩体力学性能偏弱。受自重应力和构造应力共同作用，深部地应力水平偏高，巷道掘进之后，围岩应力快速释放、重新排布，扰动作用明显。软岩胶结程度低、岩体强度不足，内部孔隙与裂隙密布，接触地下水后容易软化、崩解、膨胀，岩体完整度快速降低，承载能力随之下降。

巷道开挖会破坏岩体原始应力平衡，围岩产生持续性流变蠕变，普遍存在顶板下沉、巷帮收缩、底板鼓起等变形现象。深部区域断层、破碎带、软弱夹层广泛发育，围岩整体性差，自稳能力不足。受多重地质条件影响，普通支护结构容易开裂变形乃至整体失效，对支护结构承载力、环境适配能力以及抵抗围岩变形的性能都有更严苛的要求[1]。

2 深部软岩巷道拱形支护技术体系与应用特性

2.1 拱形支护常用结构类型

煤矿深部软岩巷道所用拱形支护以刚性金属拱形支架为主，结合巷道断面、围岩破碎状态及地应力条件选型，适配各类深部开采工况。（1）U 型钢拱形支护现场应用最为广泛，包含 25U、29U、36U 多种规格，采用搭接可缩设计，结构韧性好、抗挤压性能优异，可适应软岩大变形，多用于高地应力、围岩破碎的回采与开拓巷道。（2）工字钢拱形支护刚度大，巷道成型规整，稳定性良好，能够满足通风、运输生产需求，适合围岩较完整、变形量小的巷道，但可缩性能不足，无法用于强流变大变形软岩巷道。（3）混凝土拱形支护依靠现浇或喷射混凝土形成拱体，封闭效果优异，可阻隔空气与地下水侵蚀围岩，适合水文地质条件复杂、围岩遇水易软化的固定巷道，具备较好的长期支护稳定性。

2.2 拱形支护现场施工工艺

深部软岩巷道拱形支护施工遵循“先护后支、随挖随支、整体成型”的现场原则，适配软岩巷道开挖后围岩快速变形的特点，整套施工流程标准化、符合井下实际作业场景。（1）巷道开挖修整，爆破或机械开挖后，及时对巷道顶板、两帮浮矸危岩进行清理修整，保证巷道拱部轮廓规整，避免局部应力集中造成支架偏载受力，为支护安装提供标准作业断面。（2）支架组装安装，按照设计间距架设拱形支架，调整支架垂直度、拱度及间距，保证支架整体线形一致，支架之间采用拉杆、卡缆固定连接，形成整体框架结构，杜绝支架歪斜、松动问题。（3）背板充填封闭，支架与围岩间隙采用木板、钢筋网或矸石密实充填，消除空帮空顶现象，让支架与围岩紧密贴合，避免局部悬空受力导致支架变形损坏。（4）后期补强加固，针对深部大变形巷道，完成初支后根据围岩变形情况，增设锁脚锚杆、横向加固构件，提升整体支护结构的整体性。

2.3 拱形支护现场应用特性

结合深部软岩巷道高地应力、大流变、易破碎的地质条件，拱形支护在现场应用中呈现出鲜明的工程特性。（1）整体承载性能稳定，拱形结构依托弧形力学造型，可将围岩竖向压力转化为水平挤压力，实现应力均匀分散，结构整体刚度高，抗冲击、抗挤压能力强，能够承受深部巷道高地应力荷载，有效抵御围岩整体变形。（2）环境适配性较强，金属拱形支架可重复拆装复用，适配巷道扩修、返修、搬迁等井下动态作业场景，混凝土拱形结构可长期封闭围岩，有效解决软岩遇水崩解、风化失稳问题。（3）现场施工适配性局限，拱形支护构件自重较大，井下搬运、安装劳动强度高，施工速度较慢，且支架成型后柔性调节能力有限，面对软岩持续流变变形，易出现卡缆松动、支架扭曲、拱体变形等现场病害，需定期开展巷道巡检和支护补强作业[2]。

3 深部软岩巷道锚网支护技术体系与应用特性

3.1 锚网支护核心结构组成

深部软岩巷道所用锚网支护为复合型一体化支护结构，整体构件搭配贴合高地应力、围岩破碎的井下工况，各构件规格均依据巷道断面及围岩等级针对性选取。（1）锚固构件，现场多采用高强度螺纹钢锚杆、预应力锚索，锚杆常规规格为 Φ20mm、Φ22mm，适配常规软岩巷道支护；锚索以高强度低松弛锚索为主，多用于深部顶板破碎、地应力集中区域，可延伸锚固深度，适配深层围岩控制需求。（2）护表构件，主要由金属网、钢筋网、钢带组成，金属网柔韧性强、搭接便捷，可全覆盖巷道围岩表面，封堵围岩裂隙与破碎矸石；钢带分为 W 钢带、平钢带，可串联单根锚杆，让零散锚固结构形成整体支护体系。（3）辅助紧固构件，包含锚杆托盘、螺母、锚固剂等配件，托盘采用高强度冲压钢板，保障锚杆受力均匀，锚固剂采用树脂锚固剂，固化速度快、锚固强度高，适配井下快速支护施工要求。

3.2 锚网支护现场施工流程

深部软岩巷道锚网支护施工遵循“及时支护、闭环成型”的现场原则，贴合软岩开挖后易风化、快速变形的特点，施工工序标准化、适配井下作业环境。（1）巷道围岩修整，巷道掘进完成后，及时清理顶帮浮矸、松动岩块，平整围岩表面，排查局部裂隙发育区域，规避支护后围岩局部脱落问题。（2）钻孔与锚固施工，按照设计孔距、排距定点钻孔，清理孔内岩粉后装入树脂锚固剂，安装锚杆并搅拌固化，深部高危区域同步补打锚索，保证锚固深度与预紧力达标。（3）护表结构铺设，待锚杆固化完成后，铺设金属网与钢带，保证网片搭接紧密、钢带贴合围岩，无悬空、无褶皱。（4）整体紧固成型，拧紧锚杆螺母、加压托盘，对支护结构整体调校，确保所有构件贴合紧密，形成完整的整体支护结构。

3.3 锚网支护现场应用特性

结合深部软岩巷道复杂地质条件，锚网支护在现场应用中具备显著的工程实操特性。（1）施工便捷性高，整体支护构件体量小、重量轻，无需大型架设设备，井下搬运、安装难度低，施工工序简单，可有效缩短掘进支护循环周期，提升巷道掘进效率。（2）巷道断面利用率高，锚网支护构件贴合围岩表面安装，无外部支护结构占用巷道空间，能够最大程度保留巷道有效断面，满足深部巷道通风、运输、设备通行的生产需求。（3）现场适配存在局限，该支护方式对围岩表层完整性要求较高，在极破碎软岩、强底鼓巷道中，易出现锚杆锚固失效、网片鼓包开裂等问题，且整体抗冲击刚度较弱，面对深部剧烈地应力挤压，相较于刚性拱形支护，结构抗变形能力存在一定短板[3]。

4 煤矿深部软岩巷道拱形支护和锚网支护的优劣分析

4.1 拱形支护与锚网支护的优势对比分析

4.1.1 结构承载能力与围岩控制效果优势对比

在深部软岩巷道高地应力、围岩流变、破碎严重的工况下，两种支护结构的承载特性与围岩控制效果存在明显差异。（1）拱形支护整体为刚性承载结构，以 U 型钢、工字钢拱架为主体，结构刚度大、整体稳定性好。拱形结构可将围岩竖向压力有效转化为水平向结构内力，应力分布均匀，不易出现局部应力集中，能够抵抗软岩持续挤压变形和采动冲击荷载，对巷道整体大变形、顶板大面积下沉的控制效果显著，适合高地应力、强扰动的深部巷道。（2）锚网支护属于柔性耦合支护体系，依靠锚杆、锚索锚固深层稳定岩体，配合网、钢带约束表层围岩，无法提供刚性抗力。该支护方式可允许围岩产生适量卸压变形，适合围岩完整性较好、变形均匀的巷道，但整体抗挤压、抗冲击承载力有限，对深部软岩大规模流变变形的抑制能力较弱。

4.1.2 施工效率与工程成本优势对比

从井下现场施工与经济成本角度来看，两种支护方式适配不同矿井生产节奏。（1）拱形支护施工工序繁琐，拱架自重较大，井下搬运、对位、架设和紧固需要多人协同作业，施工循环周期长，大幅降低巷道掘进推进速度。同时钢拱架耗材量大、单价高，初期支护投入成本较高，后期调架、补填返修费用持续增加，整体工程经济性较差。（2）锚网支护构件轻便、运输便捷，钻孔、锚固、铺网工序衔接紧凑，可与掘进作业同步开

展，有效提升巷道成巷速度，适配矿井快速掘进生产需求。且锚杆、锚索、金属网耗材成本低，无需大型辅助设备，人工投入少，初期施工与后期运维综合成本优势明显。

4.1.3 适应性、稳定性与后期维护优势对比

结合深部复杂地质条件与长期服役需求，两种支护的环境适应性和维护特性各有优劣。（1）拱形支护围岩适配性更广，不依赖表层岩体自稳能力，在极度破碎围岩、断层破碎带、强风化软岩巷道中均可使用，抗地质扰动、抗爆破震动能力强，长期整体稳定性好，不易发生整体失稳垮塌。（2）锚网支护断面适应性强，构件紧贴围岩布置，不占用巷道有效空间，通风、运输断面利用率高，满足深部大型设备通行需求。同时支护灵活性高，可针对局部应力集中、围岩破碎区域进行定点补强，但围岩极差时支护稳定性大幅下降，后期需频繁排查锚固失效、网片破损等问题，维护频次更高[4]。

4.2 拱形支护与锚网支护的劣势及工程缺陷分析

4.2.1 拱形支护在深部软岩巷道的应用短板

拱形支护在深部软岩大变形工况中存在明显应用局限。（1）结构可缩性不足，适配流变变形能力差。钢拱架刚性强、变形余量小，深部软岩持续蠕变挤压过程中，极易出现拱架扭曲、侧弯、卡缆松动及接口滑移等病害，导致支护结构整体失效。（2）围岩贴合度难以保障，易形成悬空受力。井下施工难以实现支架与围岩完全密实贴合，普遍存在空帮、空顶间隙，围岩应力无法均匀传递至拱架，易出现局部集中荷载，引发巷道鼓帮、底鼓问题。（3）后期维护工程量大。拱架变形后无法自行复位，巷道变形稳定后需人工调架、重新充填加固，返修工序复杂、作业量大，严重影响巷道正常生产使用。

4.2.2 锚网支护在深部软岩巷道的应用局限

锚网支护对围岩自身条件依赖性较强，在深部极端地质条件下短板突出。（1）锚固可靠性差，极易出现支护失效。极破碎软岩岩体松散、裂隙发育，锚固剂无法有效固结，锚杆、锚索难以形成有效锚固力，易出现脱锚、拔锚、托盘悬空等问题，丧失支护功能。（2）整体刚度偏低，抗冲击能力弱。面对深部强烈采动应力、高地应力瞬时释放工况，柔性支护体系无法有效抵抗瞬时冲击荷载，易出现钢带弯折、网片撕裂、围岩表层鼓包开裂等病害。（3）封闭防护能力不足，加速围岩劣化。单纯锚网支护无法封堵围岩裂隙，地下水与潮湿空气可持续侵入岩体，造成软岩遇水软化、崩解，围岩强度持续衰减，形成恶性循环，逐步引发整体支护失效。

4.2.3 两种支护方式的常见病害与失效机制

结合井下现场监测情况，两种支护结构的失效形式存在明显区别。（1）拱形支护典型病害主要为拱架扭曲变形、卡缆滑脱、支架歪斜、背板压碎、巷道整体收缩变形。其失效机制以刚性结构过载破坏为主，软岩持续流变产生的持续性挤压荷载超过拱架屈服强度，导致结构塑性变形，间隙悬空引发应力集中，最终造成局部或整体支护失效。（2）锚网支护典型病害包含锚杆失效、网片鼓裂、表层围岩脱落、巷道持续大变形。其失效机制为围岩基础强度不足，锚固系统失去受力载体，柔性支护无法约束深部岩体流变，表层防护结构破损后围岩持续风化劣化，从局部破损逐步扩散为整体支护失稳[5]。

结束语：通过对深部软岩巷道两类主流支护技术的系统分析，明确了拱形支护刚度大、围岩适应性强、整体稳定性好，但施工效率低、后期返修量大。锚网支护成巷速度快、成本低、断面利用率高，但承载刚度有限，对破碎软岩支护适配性较差。两种支护的失效模式存在明显差异，分别表现为刚性结构过载变形与柔性锚固系统失效。

参考文献

[1] 周琼阳, 张洋. 高应力软岩巷道锚网索注联合支护技术研究 [J]. 煤炭技术,2025,44(12):60-64.

[2] 王凯, 张岂豪, 卢周周, 等. 临涣煤矿深部软岩巷道围岩支护技术优化 [J]. 科学技术与工程,2026,26(2):534-543.

[3] 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.

[4] 王世友. 煤矿深部软岩巷道拱形支护和锚网支护的优劣分析 [J]. 内蒙古煤炭经济,2024,(4):22-24.

[5] 崔森浩. 深部软岩顶板巷道支护优化设计研究 [J]. 石化技术,2026,33(7):451-452.