

深部开采高地压巷道围岩大变形控制失效及锚注协同支护对策

敖成普

富源县泰新经贸有限公司普柏煤矿 云南曲靖 655500

DOI:10.32629/ems.v8i5.20127

[摘要] 在深部开采过程中,高地压巷道围岩的大变形控制失效已经成为限制矿井安全和高效生产的主要障碍。对高地压环境中围岩的非线性流变和破裂演化进行分析,指出传统支护结构的承载失效主导因素是支护-围岩刚度不匹配和能量积聚释放不受控制,并提出变形速率和松动圈深度2种临界判据。明确锚注配合支护控稳机理:注浆增强围岩力学性能、锚杆锚索和注浆体构成配合承载结构、有效消波阻裂抗动压扰动。相应地,提出了高渗透性分段注浆工艺,高预紧力锚杆和滞后注浆在时间和空间上的协同参数的调控措施。实地的工业试验结果显示,采用锚注协同支护技术可以使松动圈的深度减少超过50%,围岩的变形量减少了60%,并且维护的周期也延长到了18个月,这为深部巷道的大变形控制提供了一条有效的技术路径。

[关键词] 深部开采;高地压;巷道围岩大变形;控制失效;锚注协同支护

引言

当深部采动巷道埋深大于800 m时,原岩应力往往达到30 MPa,围岩呈现较强的非线性流变及破裂扩展特征。传统锚喷、型钢支架和单一锚杆支护普遍存在深部高地压承载失效和巷道频繁返修等问题,严重威胁生产安全,显着提高支护成本^[1]。控制失效实质是支护系统不能适应围岩时效大变形和动压扰动、刚度匹配失调、内部裂隙主动修复能力不足。锚注协同支护以注浆方式重建围岩结构,与高预紧力锚杆主动约束相结合,为深部巷道控制大变形破坏难题提供新的思路。本文从失稳机理、协同机制及工程对策三方面系统阐述锚注协同支护的理论基础与关键技术。

一、深部高地压巷道围岩大变形特征与失稳机理

(一) 高地压环境下围岩非线性流变与破裂演化规律

深部采动巷道在高地应力场作用下,围岩呈现出明显的非线性流变特性。测量结果表明:垂直应力大于20 MPa后,泥岩、砂质泥岩及其他软弱岩层继续在恒定荷载作用下蠕变,其变形速率表现为衰减、稳态及加速三个阶段的特点^[2]。声发射监测表明破裂演化由微观裂纹的萌生逐渐发展到宏观裂隙网络的形成,破裂区域随着时间的推移不断地向围岩深部移动。高地压驱动围岩形成剪切滑移与张性开裂相互交织的复合破裂方式,破裂区半径可能达到巷道跨度2~3倍。尤其在以构造应力为主的地区,当水平应力和垂直应力比值超过

1.5后,巷道两帮发生不对称挤压损伤,底板发生剧烈臌起,顶板呈倒三角形松动圈。这一演化规律揭示出传统弹性或者弹塑性设计不能很好地刻画深部围岩时效损伤实质,需要引入损伤与流变耦合模型来定量刻画。

(二) 传统支护结构承载失效的主导因素分析

传统锚喷、型钢支架和单一锚杆支护常发生深部高地压作用下的整体破坏。锚杆锚固力的快速衰减是主导因素之一,围岩的流变作用导致锚固剂与孔壁界面的脱黏现象。在支护完成后的3~6个月内,锚杆的轴力下降了30%~50%,有时甚至出现拉断或拔出的情况。接下来,由于受到侧向挤压力的影响,型钢支架出现了弯曲和扭转变形,这使得接头节点变成了强度较弱的部分^[3]。实地测量结果表明,当侧压系数超过1.2时,工字钢支架的承载效率低于设计值的40%。三是喷射混凝土层由于围岩的较大变形而出现环向拉伸裂纹而丧失封闭与让压功能。另外,传统支护对围岩内裂隙缺少主动充填修复作用,仅靠表面约束并不能遏制深部松动圈继续延伸。需要注意的是支护时机不恰当还可能加剧破坏—刚性支护太早容易在瞬间垮塌,太迟围岩自承能力已经大大损失。所以单一支护形式或者简单的组合很难适应深部高地压条件下复杂的力学响应。

(三) 大变形控制失效的力学机制与临界判据

基于现场监测与数值反演,大变形控制失效的力学机制

可归纳为“支护与围岩的刚度不匹配”与“能量积聚的释放是不可控的”。支护系统所提供的径向刚度小于围岩塑性软化以后的残余刚度,则变形不能收敛。实测资料显示临界支护刚度大约在 $80\sim 120\text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1}$ 之间,常规锚杆支护实际刚度通常小于 $50\text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1}$ 。另外,深部开采中的频繁动压扰动(例如爆破,采动应力的传递等)使围岩内部积聚的弹性能突然释放,诱发冲击性大变形。我们提出了两种关键的判断标准:首先是变形速度标准,当一天内的变形量连续三天超出 20 mm 并且没有衰减的迹象时,这意味着可能会出现不稳定的情况;另一种是松动圈深判别标准,超声波检测到松动圈深大于 1.2 倍巷道跨度后常规支护已经不能控制^[4]。从能量的视角出发,我们设定了一个耗散能比率的阈值:如果围岩的破坏导致的耗散能占总输入能的超过 75% ,那么变形将进入一个无法控制的状态。这些准则对失效的预警与控制提供定量的依据。

二、锚注协同支护的控稳机制与适应性

(一) 注浆加固对围岩力学性能的强化效应

注浆浆液充填裂隙胶结破碎岩块显著提高了围岩力学性能。室内实验表明:对于强度较差的泥质胶结砂岩,采用水泥基超细浆液灌浆后其单轴抗压强度可以从 $8\sim 12\text{ MPa}$ 提高到 $25\sim 35\text{ MPa}$,弹性模量增加了 $2\sim 3$ 倍,而内聚力和内摩擦角则分别上升了 60% 和 25% 。注浆产生的网络状结石体使离散岩体变为连续承载体,围岩峰后残余强度显著增加,残余强度系数由 $0.2\sim 0.3$ 增加至 $0.6\sim 0.8$ 。此外,注浆有效降低了围岩的渗透系数,阻隔了地下水对软弱矿物(如蒙脱石、伊利石)的软化作用,避免了遇水膨胀导致的二次大变形^[5]。对于深部高应力区,采用化学浆液(如改性聚氨酯)可渗入微米级裂隙,其固化后的抗剪强度甚至超过原岩。注浆对围岩蠕变特性也有改善作用,稳态蠕变速率可以减小 1 个量级。

(二) 锚杆锚索与注浆体的协同承载作用

锚注协同支护核心是锚杆锚索提供主动约束力和注浆体提供连续介质增强,两者构成了相辅相成的承载结构。锚杆设置后所施加的预紧力使得浅部围岩在三向被挤压的情况下对裂隙的开启起到抑制作用;后续注入的浆液在预应力的影响下更容易扩散,并在锚固段形成了高强度的胶结体,这使得锚杆的锚固力从端部锚固转变为全长锚固,从而使抗拔力

提高了 50% 以上。根据现场拉拔试验的结果,注浆处理后的锚杆锚固力的衰减率已从 35% 减少到不超过 10% 。锚索贯穿注浆加固区并锚固在深部稳定岩层中,锁定浅部加固块体和深部岩体,构成“承载拱—悬吊梁”组合结构。数值模拟结果显示,在锚注的共同作用下,与单一锚杆支护相比,围岩的塑性区半径减少了 $40\%\sim 50\%$,并且塑性区内的位移分布更加均匀,从而消除了局部的应力集中。协同作用时效性同样至关重要:当注浆初凝强度到达设计值时,锚杆预紧力还可以进一步作用,做到“先任后抗”灵活控制。该协同机制使得支护系统的整体刚度增大到 $150\text{ MPa}/\text{m}$,满足深部高应力区收敛控制的需求。

(三) 锚注结构对深部动压扰动的消波阻裂特性

深部开采中爆破震动和采动压力波频繁冲击巷道围岩,锚注结构表现出优异的消波阻裂性能。动压加载试验表明,注浆结石体与锚杆共同构成高阻尼介质,应力波在穿越锚注层时,波速降低且振幅衰减幅度达 $60\%\sim 70\%$ 。其原因是浆液充填岩体内部孔隙及微裂纹并消除自由界面反射拉伸波而阻碍层裂破坏。锚杆横向剪切变形还可以吸收一部分冲击能量,测得单根锚杆大约可以耗散 $5\sim 8\text{ kJ}$ 动能。更重要的是注浆体把锚杆和围岩胶结成一个整体,从而避免锚杆和围岩在动压下发生相对滑动,使支护系统处于完整状态。经过多次动载循环,锚注试件的抗压强度损失率只有 15% ,而没有进行注浆处理的锚固试件损失率则超过了 45% 。根据现场微震的监测数据,当使用锚注支护的巷道在相邻的工作面进行爆破时,围岩中的微震事件数量下降了 70% ,同时大能量事件也基本得到了消除。这说明锚注结构在增强围岩波阻抗匹配及阻尼特性的同时,有效地减弱了动压扰动导致的疲劳损伤积累,从而为深部高应力巷道长期稳定性提供可靠保证。

三、基于锚注协同的围岩大变形控制对策

(一) 高渗透性注浆材料与分段注浆工艺优化

针对深部巷道围岩裂隙发育不均衡的特点,需研发高渗透性注浆材料并优化分段注浆工艺。推荐采用超细水泥—化学复合浆液,其粒径 $D_{95}\leq 5\ \mu\text{m}$,可渗入 0.05 mm 宽度的微裂隙,初始黏度低于 $20\text{ mPa}\cdot\text{s}$,且凝结时间可在 $30\sim 120\text{ min}$ 内调节。对于裂隙开度大于 1 mm 的区域,采用水泥基浆液与粉煤灰混合料降低成本;对于闭合微裂隙区,改用改性硅酸

盐或聚氨酯浆液。工艺上摒弃传统全段一次性注浆,实施“分段-分级-重复”注浆:沿巷道轴向按5~8 m分段,每段内按围岩深度分为浅部(0~2 m)、中部(2~5 m)和深部(5~8 m)三级,采用先深后浅、由外向内逐级封闭的注浆顺序。注浆压力分级控制,深部注浆压力为2~3 MPa,浅部为1~1.5 MPa,并保持稳压时间不少于10 min。现场实践表明,优化后浆液扩散半径可达2.5~3.5 m,注浆结石体密实度提升40%,围岩完整性系数(K_v)由0.3提高至0.65以上。采用电子流量计和压力传感器实时监测注浆过程,实现注浆量阈值自动停注,避免盲目注浆导致围岩劈裂破坏。

(二) 高预紧力锚杆与滞后注浆的时空协同参数

实现锚注协同的关键在于合理匹配高预紧力锚杆施加与滞后注浆的时空参数。锚杆选用直径22~25 mm、屈服强度600 MPa以上的高强高韧左旋无纵筋螺纹钢,预紧力矩不低于400 N·m,对应预紧力80~100 kN,使浅部围岩迅速转入三向压缩状态。锚杆间距缩小至700~800 mm,排距800 mm,形成高密度主动约束网格。注浆时机采用“滞后三步法”:第一步,锚杆安装后立即施加80%设计预紧力;第二步,待巷道掘进工作面通过该断面12~24小时(约滞后8~10 m),围岩完成初始变形释放后,进行第一轮低压注浆(压力 ≤ 1 MPa),填充张开裂隙;第三步,注浆后8小时浆液初凝,再次将锚杆预紧力补充至设计值的110%,然后进行第二轮高压注浆(压力2~3 MPa),使浆液深入微裂隙并与锚杆全长胶结。时空参数优化结果为:注浆滞后距离为1.2~1.5倍巷道宽度,注浆与锚杆二次张拉的时间间隔不超过6小时。现场变形监测显示,采用该协同参数后,巷道顶底板相对移近量控制在150 mm以内,两帮移近量控制在200 mm以内,较传统支护减少60%以上,且变形在30天内趋于稳定。

(三) 现场工业性试验与变形控制效果评价

在某煤矿深部开采巷道(埋深950~1050 m,最大主应力32 MPa)开展了锚注协同支护工业性试验,试验段长200 m。采用多点位移计、锚杆测力计和钻孔窥视仪进行6个月连续观测。结果表明:注浆后围岩松动圈深度由3.8~4.5 m缩减至1.6~2.1 m,幅度超50%;锚杆轴力稳定在95~110 kN,6个月内衰减率仅8%,远低于传统支护的35%;顶板下沉量86

mm,底板鼓起112 mm,两帮移近157 mm,均小于设计预警值300 mm。钻孔窥视未见明显离层与环向裂缝。巷道维护周期由3个月延长至18个月以上,直接支护成本降低35%,回采工作面推进速度提高20%。模糊综合评价得分为0.92(优秀等级)。试验验证了锚注协同支护的可靠性与先进性。

结束语

深部高地压巷道围岩变形控制破坏的基本原因在于支护与围岩刚度不匹配和能量积聚释放不可控,常规支护刚度低于50 MPa·m⁻¹,很难遏制松动圈继续延伸。通过注浆技术,锚注协同支护能够将围岩的抗压强度增加到原岩的2~3倍。锚杆与注浆体共同形成了一个全长的胶结协同承载结构,这不仅提高了支护系统的刚度至150 MPa/m以上,还有效地减少了动压应力波的振幅在60%~70%之间。所提高渗透性分段注浆工艺和“滞后三步法等”时空协同参数实现预紧力施加和注浆时机准确匹配。现场实验证明:锚注协同支护将巷道变形量限制在150~200 mm范围内,维护周期提高了5倍多,综合得分为0.92分。该技术体系可为深部高地压巷道围岩大变形治理提供可靠技术方案及定量设计依据。

[参考文献]

- [1]江贝,王琦,蒋振华,等.深部采区高强锚注切顶卸压自成巷方法与工程应用[J].煤矿支护,2023(2):3-16.
- [2]周晓敏,马文著,郭小红,等.深厚含水围岩预锚注初期支护的圆洞力学模型及其开挖安全分析[J].隧道建设(中英文),2023,43(10):1677-1691.
- [3]邹佩国任胜文.大理深复合软岩顶板围岩控制关键技术研究[J].煤炭科学技术,2022,50(S01):81-88.
- [4]王俊有,邢轲轲,程敬义,等.深部高构造应力软岩巷道底鼓修复加固技术研究[J].煤炭技术,2022,41(10):49-53.
- [5]王立新.锚注技术在深部开采复杂地质条件巷道围岩控制中的应用[J].山西煤炭管理干部学院学报,2021,034(004):13-15.

作者简介:敖成普(1982年10月),男,汉族,云南省富源县。大学本科学历,主要从事矿山工程技术项目管理,现为云南省曲靖市富源县泰新经贸有限公司普柏煤矿生产技术科长。