

软岩巷道掘进支护失效原因及改进对策

邓国兴 亢旭东 刘义虎

陕西彬长大佛寺矿业有限公司 陕西 咸阳 713500

摘 要: 软岩巷道支护失效是影响我国煤矿以及地下工程建设重大问题, 具有广泛性、重复性和突发性特点。本文基于软岩工程性质, 详细探讨软岩巷道支护失效内部机理及外部因素, 认为目前支护失效主要由于忽视软岩“强度低、膨胀性强、流变更明显”力学特性造成支护方式与围岩变形不匹配所致。因此提出包括锚杆(索)支护参数优化、高阻让压支护方式、底鼓综合防治、围岩改性和全生命周期监控反馈等一系列改进措施并突出动态设计理念重要性。本文意在为解决软岩巷道安全有效施工提供完整思路。

关键词: 软岩巷道; 支护失效; 流变特性; 底鼓控制; 动态设计

引言

随着我国煤炭资源开采逐步向深部发展, 软岩巷道所占比重不断增加。软岩巷道开挖后围岩变形量大、变形快、时间长, 支护结构由于承受较大变形而导致短时间内损坏, 造成巷道反复修复, 极大降低掘进速度, 增加维护费用, 甚至发生事故。典型“先掘后修”, “反复维修”的问题在软岩矿井中普遍存在。大量研究表明, 传统的刚性支护思想以及通用方案无法满足软岩独特的力学特性要求。支护失败不是某一方面的原因造成的, 是多种因素相互影响的结果。但目前很多煤矿仍然采用硬岩巷道支护方法, 忽视了软岩特有的“大变形、强流变”的特点, 使得支护方式选择不合理, 参数不合适。因此, 分析软岩巷道支护失效率根源并给出针对性、全面合理的建议有很重要的必要性和重要性。

1 软岩巷道围岩力学特性与变形规律

1.1 软岩的工程定义与分类

软岩并不是一个严格意义上的岩石学概念, 而是根据工程力学特性划分的一种力学弱化岩体。国际岩石力学学会规定单轴抗压强度小于 25MPa 的岩石属于软岩, 在实际工程中一般认为强度小于 30MPa 并且具有明显塑性的岩层为软岩。依据其中所含膨胀性矿物的数量以及强度的不同可分为强膨胀性软岩(蒙脱石含量大于 15%)、中膨胀性软岩(以伊利石为主)、弱膨胀性软岩(以高岭石为主)及高地应力条件下硬质软弱夹层等不同类型。不同类型软岩发生破坏的方式不同, 对于支护的反应也大相径庭, 应区别对待。

1.2 软岩的强度衰减与流变特性

软岩不同于硬岩最突出特点就是其强度的时间依赖性和环境敏感性。软岩强度随着时间推移而不断降低, 残余强度一般仅为峰值强度的 30%-50%, 因此巷道开挖后围岩承受力不断下降。而且更严重问题是软岩有明显的流变性质, 即初始蠕变、稳态蠕变以及加速蠕变等过程。如果支护抵抗不足以阻止围岩塑性区发展, 则围岩处于稳态甚至加速蠕变状态, 出现长时间缓慢变形或者瞬间垮落现象^[1]。由于流变性导致支护受力随时间不断增加, 刚性支护一般几个月就失效而出现破坏。

1.3 膨胀性与水化作用的影响

含有膨胀性黏土矿物软岩遇水后会明显发生物理化学膨胀, 膨胀量可达到 5%-20%, 产生的膨胀力有时超过几兆帕, 可以破坏一般锚喷支护。地下水对膨胀起直接作用的同时也使软岩软化而使其凝聚力、内摩擦角下降, 从而减弱围岩自承能力。同时, 开挖爆破震动以及暴露面风化都会使软岩结构受到进一步破坏。所以软岩巷道变形是“塑性挤出一膨胀扩帮—重力冒落”的综合结果, 单一支撑方式不能有效控制这种多种模式变形。

2 软岩巷道支护失效的主要表现形式

软岩巷道支护失效表现形式多种多样并且是逐步发展的过程, 在不同位置、不同情况下出现不同现象。根据其破坏位置及特征可以总结出以下几种常见情况。顶板下沉以及离层冒顶是最普遍的现象。锚固区整体下沉或者锚杆锚固区域外深层离层造成顶板呈弧形下沉, 严重的甚至形成网兜或直接冒顶。监测结果显示, 强烈软

岩巷道顶板下沉量可达到 300~800 毫米,远远超出允许值。两帮内挤及锚杆拉断为巷道两帮向巷道内部发生较大范围水平位移,挤压使金属网发生形变、锚杆托盘嵌入煤岩体或者锚杆杆体被拉断。当帮部位移量达到锚杆长度时,整个支护体系失效。底鼓是软岩巷道特有的问题,底鼓量一般占巷道断面缩小面积的 60% 以上。底鼓不但占据了行车行人空间,而且破坏了帮锚杆的支护条件,从而带来一系列连锁反应。支护体结构性破坏主要有喷射混凝土开裂剥落、金属支架弯曲断裂、锚索断裂或锚固剂失效等。这种破坏说明支护结构所受荷载已经超过其承载力,围岩不能起到良好支撑作用。

3 支护失效原因系统分析

3.1 地质条件认知不足与设计依据缺陷

软岩巷道支护失效的主要原因是地质情况掌握程度不高,很多煤矿地质工作关注煤层发育情况,而对于顶底板岩石种类、矿物成分、强度、膨胀性和地应力等却很少进行量测,因此造成支护设计缺少依据。特别是在深部开采情况下,高应力与软岩低强度形成强烈对比,在围岩变形区内,围岩塑性区半径可达到巷道等效半径的 3-5 倍,在设计时又往往忽视这一点,从而造成锚杆长度以及支护强度偏小。

3.2 支护理念与围岩变形特征失配

传统的支护设计是建立在“围岩-支护共同作用”基础上,重视利用围岩承受荷载。但在软岩条件下,“围岩-支护共同作用”的概念往往被误解为“强顶弱帮”或者“重顶轻底”,而忽略了软岩大变形的特点及其发展过程,在底板未支护或者支护薄弱时,底板就成为围岩变形的一个自由边界,产生底鼓使得两帮向内滑动造成支护失稳^[2]。刚性支护则是使用较高刚度、较低延伸率支护材料来抵抗大变形,使得支护很快达到最大承载力而损坏。

3.3 支护材料与施工质量控制不严

锚杆(索)材质性能不合格、防腐措施不到位、锚固剂凝结时间和围岩条件不匹配等原因造成的质量问题都会降低锚固的效果。在施工中钻孔直径与锚杆直径不符合要求、锚固剂搅拌不均匀、锚杆预紧力不够或者施加不及时、金属网搭接宽度不够且连接不牢固、喷射混凝土配合比失控以及厚度不够等问题都会使得设计支护作用大大降低。另外,掘进成巷后未能及时封闭围岩,使软岩长期处于潮湿环境中造成其强度降低,此后进行

的支护也无法对其进行修复。

3.4 时效效应与扰动累积影响

软岩流变性质导致支护与围岩之间存在明显时效效应,在支护初期虽然合理但是随着时间推移围岩塑性区不断扩大,施加于支护的压力不断增大;另外由于临近巷道开挖、采煤工作面开采造成采动应力叠加以及反复爆破所造成的低周疲劳作用使得支护受到周期性载荷从而造成锚杆松弛、混凝土裂缝产生。这就是所谓的“变形增加——支护恶化——承载力降低——进一步变形加剧”。

4 支护失效改进对策

4.1 强化地质超前探测与动态设计理念

改进首先是要解决地质信息掌握不够充分以及设计方法过于简单的问题。要使用钻探与物探相结合的方法进行超前地质预报,掌握巷道前方岩性变化带、含水层、构造破碎带所在位置及其范围,同时对软岩进行取样分析其膨胀性、崩解性、蠕变等特性,在此基础上摒弃“一次设计、终身不变”,实行“动态设计、信息反馈”的设计理念。即以最初的设计为基础,根据巷道暴露后的围岩监测结果不断调整支护参数,使设计符合实际情况。而动态设计需有相应的设计变更制度来保证其有效实施,包括规定谁有权提出设计变更申请、如何审批等内容,保证反应迅速。

4.2 构建高阻让压联合支护体系

根据软岩大变形特点,“先柔后刚、刚柔并济”是必要的支护理念。选择高延展性、高冲击吸收功的锚杆(索),其延伸率不应低于 20%,托盘使用可变形让压托盘,在围岩变形初期具有恒定工作阻力而不断裂。锚杆布置距离根据围岩松动圈实测结果确定,一般为松动圈厚度的 0.6~0.8 倍,保证锚固段处于稳定岩体中。对严重的破碎带,可采取锚注相结合方法——即先锚后注,通过注浆使破碎围岩固结为整体,然后再施加高强度预应力锚索加固^[3]。至于支护,建议采用 U 型钢可缩性支架,其搭接长度以及卡缆预紧力需适当配合,使支架有足够的回缩空间(一般不少于 300mm)。支架与围岩间填充炉渣或者泡沫混凝土作为隔离层,使围岩能够释放一定能量的同时也为支架提供均布支护力。上述“锚杆(索)+可缩支架+围岩注浆”的综合支护手段已经在很多地方得到了很好的应用。

4.3 强化底板治理与全封闭支护

底鼓控制是软岩巷道支护中一个重要难题。底鼓处治方法要依据底鼓种类不同而采取不同的措施：浅部底鼓（底板破坏深度小于1.5m）使用底板锚杆结合反拱混凝土浇筑，锚杆与底板成 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 角度布置，使底板与两帮基础连为一体；深部底鼓需要开挖底板卸压槽或者切缝，人为减小底板水平应力后，再用底角锚索加固。底角锚索必须延伸到底板稳固位置至少2m，并与帮锚杆组成桁架，以防止水平构造应力作用^[4]。全封闭支护理念是要使顶板、两帮以及底板支护强度相互协调一致，不能存在支护薄弱环节。回填混凝土反拱厚度一般为巷道宽度的 $1/8\sim 1/10$ ，强度等级应大于等于C25并要与两帮喷射混凝土良好搭接，形成封闭圈支护系统。

4.4 围岩改性注浆与封闭防潮

注浆可提高软岩力学性能一种有效方法，在施工中根据需要可采用预注浆或者后注浆。当遇到断层破碎带或者强风化带时，应在掘进之前进行超前预注浆，浆液扩散半径一般取1.5~2.0m，待围岩稳定后再进行掘进；而后注浆是在巷道掘进之后进行，在锚固范围外2~3m处松动圈内进行。浆液种类要根据软岩裂隙情况确定——微细裂隙用超细水泥或化学浆液填充，张开裂隙用水泥浆或水泥—水玻璃双液浆。注浆压力一般为1~2MPa，过大压力会造成岩体破裂而增大渗漏风险。同时还要做好封堵防潮工作。巷道暴露后要及时用C20以上强度混凝土封闭围岩，喷射厚度不低于100mm，分段分层进行喷射，间隔时间不宜超过4小时，防止由于失水导致混凝土开裂或者吸水膨胀。对于有淋水地段还要铺设防水布或者增加导水管来排除积水对围岩的影响。

4.5 全过程监测与预警反馈机制

监测是动态设计的重要依据，也是检查支护效果的一种有效方法。应设置从巷道开始到结束的监测系统，监测内容至少要有以下几个方面：巷道表面位移（收敛量测）、深部位移（离层监测）、锚杆（索）受力情况（锚杆测力计）、围岩内部应力变化（压力盒）以及喷射混凝土应变等。监测断面间距在破碎地带应加密到

10~15米，在一般地段应控制为30~50米。数据采集频率在掘进之后的一段时间内（前7天）应加密到每天两次，在此之后可以逐渐减少为每周一次^[5]。建立监测数据分析预警平台，对各种监测项目设定警戒线和极限值。一旦出现连续三天以上的变形速度大于警戒线的情况，就自动发出报警信息，提醒工作人员及时改变支护方式或者加强支护。所有的监测资料都应妥善保存，用于以后巷道支护的设计借鉴，实现“监测—分析—修正—再验证”的过程。

5 结语

本文从地质条件、设计理念、材料施工和时效效应四个层面系统诊断了支护失效的致因，并据此提出了涵盖动态设计、高阻让压联合支护、底板全封闭治理、围岩注浆改性与全过程监测的综合性改进对策。核心观点是：软岩支护必须尊重重大变形规律，从“刚性抵抗”转向“刚柔协同”，从“经验类比”转向“动态适配”，从“单点治理”转向“全断面协同”。应当指出，软岩支护问题涉及岩体力学、支护工程学、材料科学和施工管理学等多学科交叉，其复杂性和地域差异性决定了不存在放之四海而皆准的标准支护方案。未来的研究方向应聚焦于软岩流变参数快速测定技术、智能化让压支护装备研发以及基于大数据的学习型动态设计系统，进一步提升软岩巷道支护的科学性和可靠性。

参考文献

- [1] 何满潮, 孙晓明, 王炯. 软岩巷道大变形机理及刚柔耦合支护理论 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(8): 1521-1532.
- [2] 康红普, 王金华, 林健. 煤矿巷道锚杆支护技术现状与发展趋势 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 1-15.
- [3] 余伟健, 高谦, 张延新. 锚注联合支护在软岩巷道修复中的应用及机理分析 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(4): 1188-1197.
- [4] 陈卫忠, 谭贤君, 伍国军. 软岩巷道围岩改性注浆材料与工艺研究进展 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 793-805.
- [5] 王卫军, 袁超, 彭刚. 软岩巷道变形监测与动态反馈设计方法 [J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(2): 401-412.