

破碎顶板条件下巷道掘进支护方案优化分析

刘义虎 邓国兴 亢旭东

陕西彬长大佛寺矿业有限公司 陕西 咸阳 713500

摘要:破碎顶板是巷道掘进中普遍存在的一个难题,也是一个严重的安全隐患,在巷道开掘的过程中会经常遇到这种地质情况,主要表现就是岩石的整体性很差、强度较低、稳定性较差,给巷道开掘工作及支护带来极大困难。本文以破碎顶板为背景,对其工程地质特点进行分析,然后对其发生巷道顶板冒落的原因进行了探讨,认为目前支护失效主要是由于忽视了对破碎岩层结构破坏作用的认识,同时支护时间选择不合理造成的。在此基础上提出了五点建议:一是加强超前支护;二是优化锚杆-锚索配合使用;三是采用注浆改善;四是用金属网和喷射混凝土封闭承载;五是适时由临时支护向永久支护过渡。希望可以为破碎顶板巷道的安全高效掘进提供指导性意见。

关键词:破碎顶板;巷道掘进;支护方案;锚杆;锚索配合使用;注浆加固

引言

在煤矿以及地下工程巷道掘进时,由于地质构造运动、层理发育、风化以及采动应力等因素的影响,顶板岩层一般都比较破碎,在这种情况下,岩层中的节理裂隙发育严重,使得整体性差,自承能力低,巷道开挖之后顶板容易出现离层、掉块,严重时还会造成大范围冒顶,严重影响掘进速度并且对工人生命造成极大危害。长期以来,对于完整或者中等稳定的顶板而言,人们已经总结出了一套相对完善的支护方法,但是当遇到破碎顶板时,传统的锚网喷支护就显得力不从心,主要问题在于锚杆的锚固力不能满足要求、金属网被撕裂、喷射混凝土表面产生裂缝剥落等。造成这些问题并不是因为锚杆数量少或者是所用材料强度小,而是由于支护方式不能很好地适应破碎岩体的力学性质。破碎顶板失稳是突发性和连锁性的,在局部锚固失效的情况下就会迅速扩展为大面积失稳,所以对破碎顶板进行支护时必须改变以往只注重支护密度的做法而要重视整体协调性和及时承载能力的提高。

1 破碎顶板的工程地质特征与失稳机理

1.1 破碎顶板的成因类型与结构特征

破碎顶板是由于各种因素导致顶板破坏而形成的,可以分为三类。一类是构造破碎型,主要是由于断层、褶皱轴部以及次生裂隙发育地带,岩石受到剪切力或者张力影响而产生大量裂缝,甚至碎裂成散体结构,此类破碎严重并且成线状分布。第二类是层间破碎型,是由于沉积时代水动力变化产生的软弱夹层或者薄互层所组成,层理非常发育,层间结合力较弱,在开挖后容易沿

着层面下滑或者剥落,这种破碎方向性明显。第三类是风化崩解型,由于地表水下渗或者是地下水位下降造成岩石中矿物成分发生变化,强度大大下降并且遇水膨胀崩解,在巷道暴露之后迅速恶化。从结构面上分析,破碎顶板岩体完整性一般小于0.5,岩体质量一般为IV~V级,节理间距一般小于0.3m,节理数目大于3组,岩块较小而且形状不规则,自稳时间很短,在裸露后几分钟到几小时内就会出现掉块或者冒顶现象。

1.2 破碎顶板失稳的内在机理

破碎顶板的失稳机理不同于完整的岩层。在完整岩层中,顶板破坏一般是梁或者板的弯曲拉裂,失稳之前会有一定的变形预兆;而在破碎岩层中,失稳主要是由结构面所决定,是块体之间的滑移以及松散物质的流动导致破坏。巷道开挖之后,周围岩石受到重新加载作用,在破碎岩层中原有的结构面张开、位移从而产生一个较大的松动区,在这个松动区内,如果其高度大于锚杆的锚固长度,则上方未被锚固的破碎岩体会因失去支持而垮落,甚至会出现逐层塌落现象^[1]。破碎顶板承受能力主要取决于结构面之间的摩擦抗剪强度,在支护提供的法向压力不能使结构面处于足够的正应力下时,摩擦力会大大降低,岩块之间相互嵌固作用消失,整个系统的刚度迅速减小,而且该过程是非连续性的并且突然发生,因此很难提前进行变形预报,给治理带来困难。

1.3 掘进扰动与水致弱化的外在诱因

掘进本身是造成顶板失稳的一个重要原因。爆破振动产生的应力波在破碎的岩石中传播过程中,在结构面上产生反射和折射,导致裂缝扩大以及石块松动;综掘

机截割时所引起的振动也使破碎的石块脱离母体。更重要的是,由于掘进而引起围岩应力瞬时释放,在破碎岩石中产生卸载裂隙,使岩石更易破坏。地下水对破碎顶板的影响十分显著。破碎岩石中的节理裂隙既是水流通道,也是弱化带。水进入后降低了结构面之间的摩擦系数,产生静水压力以及水力劈裂作用,另外溶解或者软化胶结物,使岩块之间连接强度进一步下降。很多破碎顶板失稳发生在停止开采或生产之后,是由于水—岩之间长期作用所致。

2 破碎顶板条件下支护的技术难点与现有方案局限

2.1 锚杆锚固力难以保证

破碎顶板条件下锚杆支护面临的最大问题是锚固基础差,在碎裂岩体中打眼容易出现坍塌、扩孔等问题,不利于树脂锚固剂充填,即使树脂锚固剂固化也无法保证锚固段周围有足够的强度围岩承受锚固反力,一根锚杆所受拉力一般仅为设计值的一半以下。而且,破碎岩体受到锚杆预紧力后有可能发生局部压碎或者整个锚固区域脱落,使得预应力快速下降,锚杆变成一种被动悬挂物而不是起到加固作用的结构。

2.2 金属网与喷层联合支护的薄弱环节

在破碎顶板中,金属网与喷射混凝土是防止大块掉落的主要屏障,但是实际使用中,这种组合在破碎状态下有很多问题。金属网与顶板之间容易产生“空顶”,当大块掉落时会受到冲击力的作用而造成网片撕裂或者锚杆托盘脱落。喷射混凝土在破碎岩石表面上不易牢固地结合,在岩石变形不均匀的情况下,喷层常常会出现各种各样的裂缝,在裂缝出现之后,水分进入后会导致喷层脱落以及钢筋腐蚀。

2.3 支护时机与工序衔接的矛盾

破碎顶板自稳时间很短,在掘进后要立即进行临时支护以及永久支护,但是在实际施工中由于工序组织不合理造成的问题,比如永久锚杆施工需较长时间,而在该段时间内顶板已经开始出现初步变形及掉落;爆破之后不得不使用时间较长的临时支柱支撑,但是临时支柱支撑范围较小,无法起到系统锚杆对于顶板的控制作用,支护时机的延迟使得围岩松动范围增大,给后续永久支护带来较大困难及费用。

3 支护方案优化核心要素与实施策略

3.1 超前支护与顶板预加固

超前支护是破碎顶板下保证安全掘进的基础性工作,在巷道掘进工作面前方一定距离内,超前对顶板岩

石进行支护或者加固,使其具有一定强度后进行掘进,而不是让破碎顶板直接承受应力释放。最常用方法为超前锚杆。超前锚杆是从掘进工作面后方已支护区域向掘进方向斜向打设,与巷道轴线成 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 角度,长度一般为 $4 \sim 6\text{m}$,间距根据顶板破碎情况一般为 $0.3 \sim 0.5\text{m}$ 。起到将前方顶板悬吊在较深处稳固岩层上,同时将破碎块连成一片,阻止松动区向上发展。对顶板非常破碎的情况下还可以采取超前管棚支护,就是在拱顶位置施工 $\phi 89 \sim \phi 108\text{mm}$ 钢管,然后在其内部灌注浆液形成刚性梁来防止顶板垮塌。超前管棚搭接长度不能小于 2m 以便在推进过程中有支护作用^[2]。此外还需要进行超前注浆预加固。向掘进工作面前方顶板打入速凝化学浆液或超细水泥浆,填充裂缝并且增强岩体强度,使得破碎岩石在掘进之前具有一定自稳能力。注浆孔分布呈扇形,延伸范围要超过整个顶板危险区域,注浆压力要依据裂缝发育程度确定,一般为 $1.0 \sim 1.5\text{MPa}$,以免高压浆液劈裂岩石或者大量损失。

3.2 锚杆-锚索协同支护的参数优化

在破碎顶板下,锚杆与锚索作用不同:锚杆起浅部支护作用以及块体连结作用,而锚索是起到深部悬吊作用及整体承重作用。优化主要是这两类锚固件配合使用效果好。锚杆参数优化应以“短、密、强”为主。因为破碎岩体中锚固力大小不一,适当减小锚杆间排距到 $0.6 \sim 0.8\text{m}$,可以增加锚固点数量,使顶板块体受力更加均匀。同时锚杆也不能太长,防止钻孔过程中引起周围岩石扰动太大,一般为 $1.8 \sim 2.4\text{m}$,在松动圈之上约 1.0m 处较为合适位置,杆体用左旋无纵筋螺纹钢,延伸率大于等于 15% ,端部加长锚固,锚固长度不少于 600mm 。锚索是重要加强手段,在巷道方向上每隔 $2 \sim 3$ 排锚杆设置一排,每排 $2 \sim 3$ 根呈“W”型或“V”型布置。锚索要穿过顶板破碎带延伸到稳固岩层中不少于 2m ,一般为 $6 \sim 10\text{m}$ 。预紧力为锚索破断力的 $60\% \sim 70\%$,既可以起到一定主动抗御作用又不至于使索体提前疲劳。需要注意的是,锚索施工必须在锚杆安装完成并且施加一定预紧力之后才可以进行,以防锚索拉伸造成浅部锚固破坏。

3.3 注浆加固与围岩改性技术

当裂隙很发育或者松散结构顶板时,仅靠锚杆锚索是不能形成可靠支护结构,还需配合注浆加固。注浆作用有充填裂隙、胶结碎石以及增强周围岩石强度来增加支护范围。而不同破碎程度顶板选择不同注浆方案。一般而言,在中等破碎(节理间距 $0.1 \sim 0.3\text{m}$)情况下使用水泥—水玻璃双液浆,凝胶时间为 $30 \sim 60\text{s}$,注浆孔距为

1.5~2.0m, 孔深为锚索长度 1.5 倍;而在严重破碎(散体结构)条件下则需选用流动性更好化学浆液, 注浆孔距缩短到 1.0~1.2m 并且采用低压力、慢速注入方法(压力小于 0.8MPa), 以防浆液串通^[3]。注浆应在锚杆安装以后、锚索张拉以前完成, 利用锚杆孔作为注浆孔, 即所谓“一孔两用”。注浆后养护时间不得低于 4 小时, 直到浆液完全固化才可以继续施加预应力和开挖工作面。注浆是否成功可以通过钻孔取芯或者使用超声波检测判断, 浆液扩散范围及结石体强度都应当满足要求。

3.4 金属网与喷射混凝土的联合封闭优化

表面封闭结构的作用是阻止小块体掉落的同时, 还起到均布切向力的作用使顶板表面处于受压状态。金属网应使用焊接钢筋网或者高强度经纬网, 其孔径不应超过 100mm×100mm, 网片搭接宽度不应小于 100mm, 相邻网片之间应用钢丝绑扎或专用卡扣固定以保证整体性。网片与顶板表面应紧密结合, 不得有较大缝隙, 如有必要可在其背面铺设一层塑料网以防小块岩石从网孔中掉出^[4]。喷射混凝土配合比中应适当提高硅酸盐水泥比例并掺入适量速凝剂以便快速提高强度。喷射量一般分为两遍进行, 第一遍喷射厚度为 30-50mm, 在开挖之后立刻进行, 起到临时封闭及找平的作用;第二遍喷射至设计厚度(一般为 100-150mm), 在锚杆安装之后进行。喷射顺序应由下至上分段进行, 喷嘴应对准喷涂面且两者之间间距应在 0.8 到 1.2 米之间。对于淋水地段的顶板, 在喷射之前必须做好排水工作, 否则喷射出来的混凝土与岩面之间会产生一层水膜降低它们之间的粘结力。

3.5 临时支护向永久支护转换的工序优化

在破碎顶板情况下, 临时支护与永久支护之间过渡是支护成败一个窗口。最佳支护顺序是: 开挖之后及时进行一次喷射混凝土(封闭暴露面)→安装临时支护(单体柱或者液压临时支架, 承受顶板初期载荷)→施

工顶板锚杆(浅部加固)→施工锚索(深部悬吊)→二次喷射混凝土直至设计厚度(形成整体承载层)→撤除临时支护。每一步之间间隔时间要严格控制: 初喷要在开挖之后 30 分钟之内完成, 锚杆施工要在初喷之后 2 小时之内完成, 锚索施工要在锚杆之后 4 个小时之内完成。临时支护必须等到永久支护完全达到设计强度之后才能拆除, 而且这个拆除过程不能低于 8 小时。采用早强型锚固剂以及速凝喷浆可以大大减少各个步骤之间的等待时间, 加快支护系统形成承载力速度。

4 结语

破碎顶板巷道支护的核心挑战在于岩体非连续性 & 自稳能力匮乏。本文分析指出, 现有方案失效主因是对结构面控制认识不足、锚固基础难建及工序匹配不佳。提出的优化方案涵盖超前预加固、锚索协同、注浆改性等维度, 强调由被动抵抗向主动加固、单一手段向系统协同、经验施工向精细控制转变。鉴于破碎顶板的地域差异性和动态演化性, 不存在固定“最优方案”, 真正优化需基于精准地质信息和快速反馈的动态迭代。未来技术应聚焦破碎岩体参数快速原位测试、智能化超前探测装备及数字化支护决策支持系统, 以提升设计的科学性与适应性。

参考文献

- [1] 康红普, 王金华, 林健. 煤矿巷道锚杆支护参数设计方法及应用 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 1-14.
- [2] 张农, 高明仕, 许兴亮. 破碎顶板巷道围岩稳定性分析与控制技术 [J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 657-666.
- [3] 刘长武, 曹胜根, 陈光光. 注浆加固破碎岩体的力学机理与工程实践 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(10): 2041-2051.
- [4] 柏建彪, 侯朝炯, 黄汉富. 深部破碎顶板巷道锚梁网索联合支护技术 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(8): 12-20.