

快速掘进巷道空顶区顶板稳定性的分析与控制

郭瑞

(冀中能源峰峰集团新屯矿, 河北 邯郸 056000)

【摘要】在巷道快速掘进施工中, 空顶区域顶板的稳定性是关系掘进进度和施工安全性的重要因素。一旦控制不当, 很容易导致空顶区域围岩变形和顶板失稳冒落, 继而引发安全生产事故, 并影响施工进度。因此, 在巷道掘进施工中, 必须严格控制空顶距离、空顶区域宽度和减少空顶时间, 并严禁在空顶区域无保护作业。本文对掘进巷道空顶区顶板稳定性的相关影响因素进行了分析, 并提出了合理控制空顶距离和控制围岩变形的相关技术措施, 以保证掘进中空顶区域围岩的稳定性, 确保巷道掘进快速、安全施工。

【关键词】巷道掘进; 空顶; 稳定性; 分析与控制

随着各类机械化、自动化矿井采掘设备的应用, 极大提高了矿井巷道的掘进速度, 为煤矿增产、增效打下了基础。但是巷道掘进速度不仅在于大型自动化掘进机械设备的使用, 也与巷道围岩的稳定性有很大的关系。巷道掘进破坏了地下岩层原有的应力平衡, 破坏了岩体结构稳定性。在巷道刚刚掘进, 还未采取有效支护措施时, 顶板会处于一种缺少支撑的“空顶”状态。“空顶”状态下, 巷道两侧和上部岩体会向巷道空间产生一种挤压力。在这种挤压力的作用下, 巷道两侧和上部岩体会逐渐向巷道空间移动, 进而导致巷道变形、围岩失稳。空顶状态下巷道围岩和顶板的稳定性一般较差, 如果只求进度贸然施工的话, 很容易发生顶板冒落的安全事故。巷道空顶区顶板的稳定性主要与顶板结构的整体性、掘进迎头支护结构、空顶距离、巷道支护强度等因素有关。在目前的巷道快速掘进施工中, 受掘进机设备工艺的影响, 其掘进速度受到循环进尺大小的很大制约。在保证安全的前提下, 适当增加循环进尺即空顶距离, 可有效提高掘进机的掘进效率, 并增大支护作业空间, 实现锚杆、锚索支护平行作业, 从而保证巷道快速掘进。因此, 在巷道快速掘进施工中, 需要合理控制空顶距离, 并及时采取有效的支护措施, 协调好空顶距离、支护与施工进度的关系, 才能保证巷道掘进的安全、高效施工。

一、施工区域岩层与地质概况

冀中能源峰峰集团新屯矿位于邯郸市峰峰矿区大社镇, 是一座具有六十多年开采历史的老矿井。随着多年开采, 井田可采储量日渐减少。目前主要的开采区域集中在矿井—600 水平的 14275、14276 和 14269 工作面, 煤层平均厚度 2.85m。主采煤层伪

顶均厚 0.4m, 为碳质泥岩; 直接顶平均厚度 6m, 为粉砂岩质泥岩; 基本顶平均厚度 5m, 为细砂岩。在 14269 工作面掘进和对接的过程中, 为控制围岩变形和防止顶板过大的下沉, 同时协调掘进生产, 需要合理控制空顶距离和采取合理的支护措施, 以解决顶板冒落及巷道围岩较大的问题。

二、巷道快速掘进空顶区顶板围岩变形失稳机理与特征

在巷道掘进破坏了地下岩体原有的应力平衡之后, 在巨大的矿压作用下和围岩应力作用下, 围岩的受力状态会发生变化。当矿压和应力作用大于围岩自稳性时, 围岩会以移动和变形的方式来释放压力作用并再次寻求应力的平衡状态。因此, 可以说在采掘扰动的影响下, 掘进区域围岩的失稳和变形也是难以避免的。特别是空顶区域, 其顶板会受到破坏, 以至于出现变形与失稳。

(一) 巷道快速掘进中空顶区顶板破坏机理

在巷道掘进期间, 空顶区顶板与周围岩体的划分区域包括: 空顶区、支护区以及 V 型结构区。其中空顶区是掘进后没有对顶板采取有效支护措施的区域, 顶板下部无任何支撑, 完全靠顶板自身结构和岩壁的支撑作用来保持其比较脆弱的稳定性; 支护区属于掘进后采取支护措施的区域, 支护的支撑作用使围岩再次建立起一个应力平衡的状态, 顶板相对运动比较稳定; 迎头 V 型结构区分为迎头岩体和两帮岩体两个部分, 承担了空顶区域的绝大多数荷载; 而支护区则主要承担了空顶区后方的荷载。在巷道掘进的过程中, 空顶长度和面积越大, 围岩所承受的压力作用越显著, 围岩的变形破坏也会随之加剧, 两者呈正相关。当空顶长度在 3m 以内时, 空顶区荷载主要由迎头 V

型结构承担,再加上支护的共同作用,使得空顶区能够得到比较有效的支撑,并保持基本结构的稳定,一般不会发生变形破坏;当空顶长度在3~8m范围时,空顶区前部荷载主要由V型结构承担,后部荷载则主要由支护区承担。而空顶区中部荷载则由V型结构和支护区协同承担,其支撑作用较弱。因此,该区域顶板也可能出现一定量的下沉;当空顶区长度达到8m以上时,其中部基本不存在有效的支撑,顶板较容易出现弯曲和比较大的下沉。

(二) 空顶区顶板失稳变形特征

在巷道掘进过程中,影响围岩稳定性的因素有很多,主要包括围岩结构的强度、围岩结构的整体性、空顶长度、支护强度等,空顶区由于缺乏有效的支撑,因而容易出现失稳变形。首先,围岩结构的整体性和强度决定了围岩的自稳性。岩体结构越完整,强度越大,其自稳性越高,越不容易发生变形和顶板冒落。比如较为完整的火成岩顶板,自稳性很强,空顶距离有时达到几十米时仍然不会冒落;而软弱、破碎的围岩,空顶距离3~5m时,就有可能发生小规模冒落。而有效的支护措施则可防止围岩的失稳变形。可以说,空顶区顶板的失稳变形是多种因素共同相互作用的结果。空顶区由于前部和后部都有比较坚强的支撑,因而其中部往往成为应力集中的区域,其变形失稳也一般由该区域开始。当顶板岩梁跨度达到一定长度时,空顶区中部应力集中的情况会更加突出。而当该区域岩体所承受应力达到一定程度并大于岩体的自稳性时,其顶板岩梁就会逐渐发生失稳变形,最终冒落。因此,为了防止顶板岩梁的失稳变形,必须采取强有力的支护措施以承担上部岩层的荷载,减少空顶区中部应力集中的情况。受空顶区顶板结构因素的影响,支护强度的增加也会导致下沉的问题。应在迎头推进时采用高强度的支护结构,以保证空顶区后方顶板的稳定性。

三、空顶区顶板力学模型的建立

顶板的应力状态会随着巷道的掘进开挖而发生变化,浅部围岩由原来的三向应力状态转变为二向应力状态,使围岩承载能力降低。围岩的破坏是由浅部向深部逐渐发生的。巷道的掘进首先会改变岩体原有的应力平衡,并使空顶区出现应力集中。当围岩应力超过其自稳性及其极限强度时,围岩便会寻求应力的释放并再次建立新的应力平衡,继而发生破坏和变形。同时,应力向深部转移。由此可见,巷道掘进后的短时间内主要是浅部围岩的破坏和直接顶的下沉。为了减少直接顶的下沉量,防止空顶区冒顶,可采取

假设工字钢等方式进行临时支护。但临时支护对于深部围岩的控制作用较小。因此,为了有效控制空顶区顶板围岩的变形量,应保持直接顶的稳定性。

一般情况下,巷道掘进的宽度多在3.5~4.5m范围内,两帮对顶板具有有效支撑,巷道冒顶一般多是沿两帮切落。因此,在分析空顶区直接顶稳定性时,应沿巷道轴向建立力学模型。模型高度取直接顶厚度;长度取空顶区沿巷道的轴向长度,再加上锚杆支护端和煤壁支撑端的长度。在实际施工时,由于空顶时间较短,故可忽略空顶时间的影响。在直接顶整体性较好的情况下,可将直接顶视为连续均匀的介质,荷载均匀分布施加于直接顶上部。

采用应力差分法建立空顶条件下直接顶力学计算模型,如图1所示。假设直接顶厚度为2.5m,空顶距离为6m,以此建立顶板受力模型。同时在横向与纵向方向上将该顶板划分为均匀的,总体呈长方形的经纬线网格,内部网格为正方形。模型垂直高度以直接顶厚度为标准,取2.5m,模型长度由6m空顶距离,再加上空顶区前后的煤壁支撑区和永久支护区,取10m。网格每格边长0.5m。设直接顶力学模型上方承受的岩层压力荷载集度为 q_1 ;下边界煤壁支撑段和永久支护段所提供的支撑荷载集度分别为 q_2 和 q_3 。模型所取空顶距、煤壁支撑段长度、永久支护段长度分别为 L_1 、 L_2 和 L_3 。

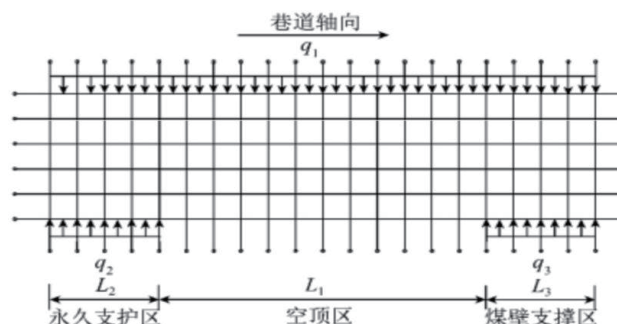


图1 空顶条件下直接顶受力模型

四、空顶距离的确定

掘进时,首先分析直接顶岩体性质和厚度,测定直接顶的单轴抗压强度和抗拉强度。一般情况下,根据巷道地质情况,有4、6、8、10m这四种空顶距离方案可供选择。在正常完整的顶板条件下,空顶距离和巷道宽度相对于基本顶的承载能力均较小,故可不考虑基本顶对直接顶的荷载作用,直接在受力模型边界上施加直接顶空顶距离的岩体自重即可。空顶条件下上边界在垂直方向上的应力平衡关系式为:

$$q_1(L_1 + L_2 + L_3) = q_2L_2 + q_3L_3$$

永久支护端和煤壁支撑端施加荷载为:

$$q_2 = q_3 = q_1 (L_1 + L_2 + L_3) / (L_2 + L_3)$$

根据现场测定, 泥岩直接顶的抗拉强度和单轴抗压强度分别为 0.9MPa 和 21.9MPa。应用 Mathcad 数学软件, 将测定的直接顶抗拉强度、单轴抗压强度输入建立的顶板受力数学模型中。然后分别代入 4、6、8、10 这四个空顶距离参数, 通过模型和计算公式分别得出不同空顶距离下, 模型各结点的水平应力与垂直应力分布, 以及不同空顶距离条件下直接顶的最大拉应力和最大压应力。将计算得出的最大拉应力和最大压应力与实测的岩体抗压强度相比较, 即可判断某一空顶距离下, 直接顶会不会发生拉破坏。在留有一定富余安全系数的前提下, 确定直接顶最大空顶距离和生产中的最大循环进尺。保证巷道围岩的变形量均小于 100mm。

经过计算, 在 4、6、8、10 这四个空顶距离下, 直接顶施加的荷载分别为 127kPa、159kPa、190kPa、222kPa。产生的最大拉应力分别为 0.24MPa、0.43MPa、0.7MPa 和 1MPa。由此可判断空顶距离为 10m 时, 泥岩直接顶会无法承受拉应力破坏, 形成较大的下沉甚至坍塌; 空顶距离 8m 时, 虽然不会发生拉应力破坏, 但富余量较小, 在掘进施工扰动下并不安全; 而空顶距离 4m 时, 循环进尺又太小, 不利于快速掘进。因此空顶距离宜选择 6 ~ 7m。

五、围岩控制技术及支护方案

高性能锚杆支护是控制巷道变形的重要措施, 应根据掘进施工中围岩的变形特征, 同时结合空顶区顶板稳定性的分析结果来确定锚杆布置的间距和排距, 确定锚杆锚入深度、锚固长度、锚杆预紧力等参数。通过支护区与迎头 V 型结构区的协同作用, 实现对空顶区荷载的稳定支撑, 提高巷道空顶区顶板的稳定性。具体支护参数的确定可参考以下:

(一) 顶锚杆与帮锚杆的长度

顶锚杆与帮锚杆的长度的确定, 可根据松动圈理论的长度表达式进行计算。顶锚杆长度 L 计算式:

$$L(\text{顶}) = kh + L_1 + L_2$$

式中 L 为顶锚杆长度 (m); k 为安全系数, 取值根据锚杆服务年限的长短, 取 1~2.5; h 为围岩破坏高度 (m); L_1 和 L_2 分别为外露的锚杆长度和稳定地层中锚杆插入的深度 (m)。

帮锚杆长度计算公式:

$$L(\text{帮}) = L_1 + L_2 + L_3$$

式中: L 为帮锚杆长度 (m); L_1 为外露的锚杆长度 (m); L_2 围岩松动圈厚度 (m); L_3 锚杆进帮

长度 (0.3 ~ 0.4m)。

(二) 锚杆、锚索的直径与预紧力

采用经验公式 $D_{mzj} = L_{mg}/110$ 进行计算。结合新屯矿常用的螺纹钢左旋纵筋锚杆的规格, 确定掘进面所用锚杆、锚索直径为 22mm。根据施工经验、现场地质情况和锚杆规格参数, 确定锚杆和锚索的预紧力分别为 60kN 和 250kN。

(三) 锚杆间排距

根据工作面地质情况, 设定 1100mm、900mm、750mm 等多个锚杆间距方案, 其他支护参数相同, 锚杆直径为 22mm。通过对不同方案条件下巷道围岩受力状态的分析, 以确定最为合理的锚杆排间距。通过分析和数值模拟结果可知, 锚杆间距由 750mm 增大到 900mm, 再到 1100mm。随着锚杆间距的增大, 巷道围岩的塑形区域也随之增大, 特别是顶板岩层塑形区深度的增加更为明显。综合考虑岩层塑形区、围岩岩层条件等因素, 确定顶板锚杆间距为 900mm, 帮部锚杆间距为 1100mm。

确定顶板和两帮锚杆间距后, 在同样的锚杆规格参数下, 再分别选取 1000mm 和 1200mm 这两个不同的锚杆排距参数, 对不同锚杆排距参数下巷道围岩的塑性区分布进行分析。通过分析可知, 当锚杆排距增大时, 顶板塑性区面积显著增大, 两帮塑性区域变化量较小。通过适当缩短锚杆排距, 可以起到增加围岩岩体相互之间挤压力的作用, 从而提高围岩的稳定性、整体性, 有效控制巷道塑性区范围。结合巷道顶板条件, 确定锚杆排距为 1000mm。

六、控制效果分析

通过上述方案确定空顶距离和确定支护参数并按照方案施工后, 对巷道顶板下沉量和围岩变形情况进行一个月的持续监测。发现在前 10d 时, 围岩变形较大; 15d 变形基本趋于稳定。顶板和两帮最大移近量分别为 73mm 和 100mm。在巷道掘进期间, 无冒顶现象发生。因此认为采取此方案可有效控制围岩变形, 并尽可能地提高了掘进进尺, 保证了掘进施工的效率。

参考文献:

- [1] 王磊. 快速掘进巷道空顶区顶板稳定性分析及支护方案[J]. 山东煤炭科技, 2019 (5) 61
- [2] 师宝军. 巷道快速掘进空顶区顶板稳定性控制关键技术[J]. 内蒙古煤炭经济, 2022 (17) 36~38
- [3] 王威. 巷道掘进施工作业中空顶区顶板稳定性控制研究[J]. 西部探矿工程, 2020 (06) 172-174