矿山巷道围岩变形机理及支护控制对策

杨帅楠（山西焦煤集团吉县盛平煤业有限公司，山西　临汾　042103）

摘　要：社会经济的发展对矿产资源的需求量有所增加，开采规模随之扩大，正逐步从原有的浅部向深部延伸，以获得更为可观的矿产资源。但随之伴随而来的是巷道工程的地质条件复杂化问题，由于开采作业的扰动性影响，围岩有不同程度的变形现象，为了保证安全，需要采取行之有效的支护措施。显然，在深部矿产资源开采中，必须探明围岩变形的具体机理，再确定具有可行性的支护措施，以保证开采安全。在本文中，首先围绕矿山巷道围岩变形机理展开探讨，在此基础上进一步提出具体的支护策略，以供同仁参考。

关键词：矿山巷道；安全防控；围岩变形机理；支护措施

随着矿山开采规模的扩大，在深部开采矿产资源时面临更加复杂的地质条件，同时开采方式也在炮采、普采的基础上加以升级，逐步转变为综采的方式，配套的机械设备更具大型化、复杂化的特征，在如此大规模的开采作业下，容易引发巷道围岩失稳问题。纵观矿井生产活动可以发现，巷道围岩变形颇为棘手，部分项目一度因为该现象而阻断正常开采进度。由此充分凸显出加强围岩支护的重要性，而在此之前需探明具体的巷道围岩变形机理，进而以针对性的方式加以支护。

1 巷道围岩变形机理分析

深井巷道的开挖环境错综复杂，在尚未开挖时，岩体可保持相对稳定的状态；而在开挖的扰动作用下，巷道围岩应力重新分布，呈现出切向力增加的变化趋势，与此同时径向应力较之于开挖前有所减小，产生显著的应力差，巷道围岩在短时间内遭到破坏，但经过一段时间后，破坏延伸至围岩深部，此时围岩将逐步转变为平衡状态。由此可见，巷道围岩破坏具有阶段性的变化特征，最初显现出破坏区，后续有扩展的迹象，达到某破坏范围后趋于稳定。

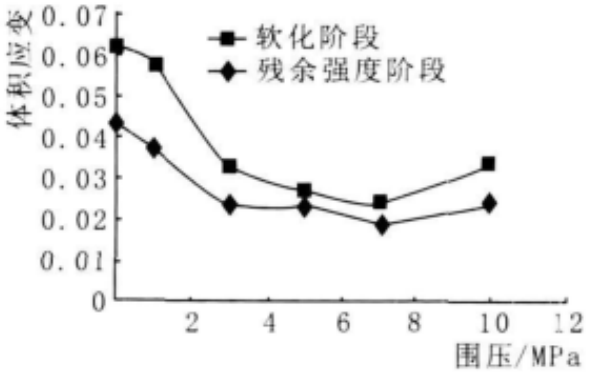

图 1　体积应变与围压关系曲线

在低围压状态下，岩石以脆性状态为主；而高围压时，则表现出较为明显的塑性强化特征。在矿井生产中，随着生产作业的持续推进，逐步进入深部开挖巷道，此时将存在较为明显的压力差，在其干扰下，浅部围岩应力发生改变，该区域原闭合的结构面的形态逐步呈现出张开滑移的特点，在该变动下，可见其存在新的裂隙，破坏围岩的完整性，降低其强度。应力差较大时将直接对浅部围岩的应力和强度带来影响，与此同时还会导致浅部围岩的水文地质条件发生改变，而由于裂隙的存在，给水的流动提供了通道，使其经由裂缝发生渗流，浅部围岩的强度因此而降低。加之开采作业的扰动作用，浅部围岩呈现出较为明显的破碎状。随着应力差的增加，巷道深部围岩的受力条件较差，有屈服破坏，随之显现出较大幅度的变形问题，具体如图 1 所示。

2 矿山巷道围岩支护措施

2.1 提高围岩的残余强度

受低围压、高应力差的双重影响，深井动压巷道围岩以岩石峰后残余强度阶段为主，在生产作业中，需要有效提高围岩残余强度，具体可从如下几个方面着手：

①增加支护阻力：在采取此方法后，支架对围岩的围压有所增加，巷道围岩可达到三向应力状态，此方式下自然有利于增加围岩的残余强度；

②合理设置锚杆：根据巷道围岩的实际特性，设置适量的锚杆，通过此类构件的应用使原本相对破碎的围岩转变为锚固状态，残余强度增加；

③注浆加固：前述提及的锚杆加固是一种较为常见的方法，但对于破碎状较为明显的围岩而言，其应用效果有限，为此可采取注浆的方法，依托于浆液的固结作用，使围岩由破碎、失稳状态转变为完整、稳定状态。

2.2 提高围岩的承载能力

2.2.1 采取二次支护措施

一次支护的关键作用在于有效加固围岩，使其有较高的残余强度；而通过二次支护措施的应用，有利于强化加固效果，此时围岩应力以变形的形式释放。为探讨二次支护的应用效果，考虑到巷道的支护原理，具体如下：

$$P_T=P_D+P_R+P_S$$

式中：P_T– 巷道开挖后向临空运动的合力；P_D– 以变形转化的工程力；P_R– 围岩自承力；P_S– 工程支护力。

随着巷道开挖作业的持续开展，围岩有更为明显的变形现象。在整个变形过程中，呈现出阶段性的特征，其中以加速变形阶段较为特殊，原因在于岩体结构有所变化，显现出裂纹，严重破坏岩体结构的完整性，导致其强度也有所下降，但需注意的是，此阶段的 P_D 值可

以达到最大状态。为此，合理设定二次支护的时间极为关键，需要使（P_R+P_D）达到最大的支护时间 T，具体如图 2 所示。

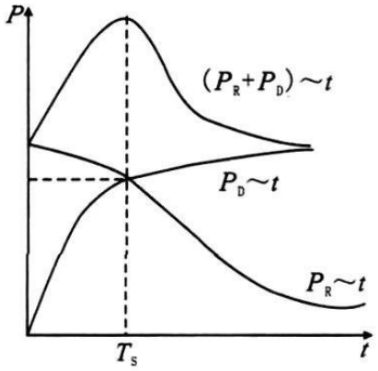

图 2 最佳支护时间 T_s 的意义

2.2.2 发挥出巷道深部围岩的强度优势

巷道开挖对围岩有扰动作用，并且在不同部位的影响不尽相同，相比于浅部围岩，巷道深部围岩的强度更大，为此可以合理调动深部围岩强度，采取此方法来有效控制深井动压巷道地压。从既有的项目经验来看，向深部围岩锚入锚索后，可以充分提高深部岩体的强度，进而调节围岩的应力状态，有利于提升围岩的性能。之所以能够取得该效果，是因为在锚索的作用下充分调动深部围岩的强度优势，使其承受源自于浅部围岩的荷载，受力状态得以优化，围岩变形得到控制。

2.3 加强对巷道围岩弱结构的支护

巷道开挖后，两帮及顶底板均有一定程度的变形破坏现象，但各自并不具有均匀性，而是从巷道某处开始变形破坏，后续逐步向周边延伸，随之威胁到整个巷道的稳定性。在以往的工作中，巷道支护通常采取的是全断面均匀支护的方法，但实际应用效果却相对有限，原因在于薄弱部位未得到针对性的加强支护处理，因此更为合适的是加大对巷道弱结构的支护力度。此外，巷道两帮及顶底板变形破坏存在密切的关联，即某部分存在破坏时均会对其他部位造成影响，因此为了减小不良影响范围，首先要从弱结构面着手，保证该部分有足够的稳定性，在此前提下才可以有效控制巷道围岩变形。

3 锚网索和 U 型棚的联合支护方式

围岩岩性条件差时，仅设置锚杆的方法并不能起到良好的支护效果，在深井巷道的施工中，较为合适的是采取锚网索和 U 型棚相综合的方案。深部围岩在开采扰动作用下的变形移动具有阶段性的特征，初期显现剧烈变形，后续趋于平缓，并随着时间的推移，最终逐步达到相对稳定的状态。为此，根据前述提及的变形特征采取针对性的支护措施。其中，一次支护以锚索网为宜，有效释放围岩变形能，且锚杆的应用对于增加围岩高预紧力而言有积极的意义，可以防止不连续变形现象。锚杆具有延伸性，能够规避巷道围岩因变形而导致的能量聚积问题，同时还可实现对围岩变形的有效控制，将其稳定在许可范围内，以防因大幅度的变形而导致围岩承载性能受损。针对围岩的不连续变形现象，较为合适的是采取锚索支护的方法，有效阻止局部的异常破坏，确保整体支护不会因此而受到影响。虽然锚索网支护的方法在增加围岩强度方面有良好的应用优势，但对于深井高地应力区而言，由于现场条件的复杂性，并不能有效地抑制围岩的位移。为此，需注重二次支护，通过 U 型可缩性支架的应用来限制围岩的位移。从综合应用效果来看，由于锚杆支护作用，围岩变形具有均匀性，由此优化了荷载的分布状态，设置的 U 型钢支架可以更为均匀地承受荷载，从而限制围岩的整体位移。

4 数值模拟分析

为了更为直观地分析巷道弱结构面锚杆支护效果，此处以数值模拟的方式展开分析。以帮部弱结构面为例，具体如图 3 所示。

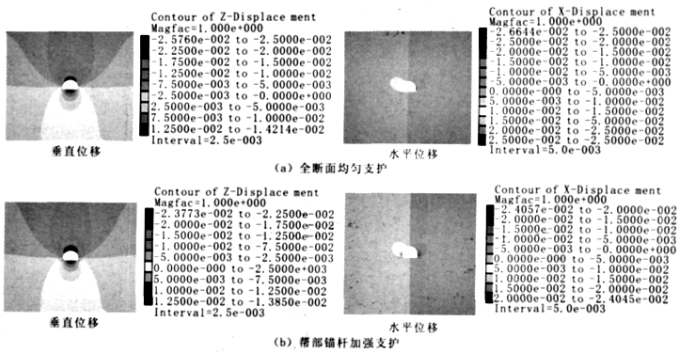

图 3 数值模拟分析图

以锚杆支护的方法处理帮部后，巷道的整体稳定性得到提升，无论是水平位移还是垂直位移均有减小的变化，减幅约为 25%。以打设加强锚杆的方法处理巷道的帮部后，可减小位移量。弱结构是最初显现出异常的部位，对该处采取加强支护措施后，可遏制弱结构面的延续，提高围岩的承载性能。应当说，在深井巷道围岩的支护工作中，弱结构面是极为关键的部位，加强对该处的支护极具重要性。

5 基于工程实例的分析

某矿山工作面回采巷道，标高 –900m，支护采取的是锚网索和 U 型钢棚的综合型方案。直接顶为平均厚度 6.38m 的复合顶板；老顶平均厚度 11.6m，包含细中砂岩及少量的砂泥岩互层；直接底为平均厚度 5.2m 的复合底板。各锚杆类型均一致，即选用的是高性能等强预应力锚杆，配套适量的锚索以起到补强支护的作用。

滞后锚网索支护一段距离后，设置棚距为 500mm 的 29#U 型棚，共包含两节棚梁，形成 400mm 的搭接长度。U 型棚用金属网（搭接量 100mm）和长塘柴棍（布设间距统一按 200mm 予以控制）进行腰帮背顶，金属网后用矸石填充，以保证该部位的密实性，避免空帮空顶问题。施工期间加强监测，以便掌握各部位的位移情况，具体如图 4 所示。

分析发现，巷道掘进初期有较为明显的位移变化；

但随着时间的延长，约一个月后，表面位移逐步转变为稳定的状态。总体来看，经过多重措施的支护处理后，巷道围岩整体稳定性较好。

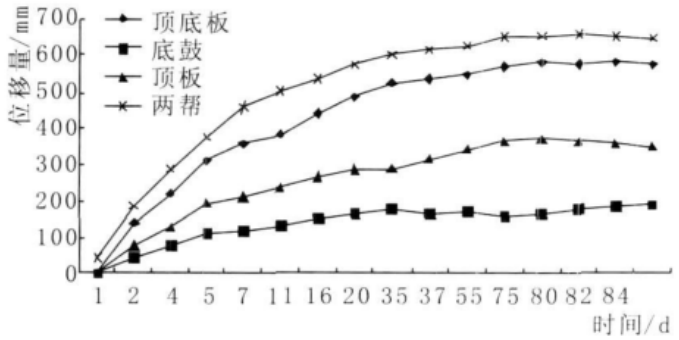

图 4 巷道表面位移

6 临时支护的注意事项

①放炮后，需要根据现场情况随即设置临时支护设施，同时辅以拱部锚网支护。空顶距≥ 200mm 时，出于安全考虑，需要设临时支护；

②吊环式前探梁临时支护施工中，需注重如下几点：严格控制吊环的前后、左右间隔，较为合适的是 1400mm，或是根据需求加密至 700mm；每个头面分别设置至少 3 根的前探梁，遵循均匀布置的基本原则；为了保证下部底板岩巷的稳定性，需要为该部分设 3 套临时支护设施；

③在安装临时支护吊环或前探梁时，需要搭建稳定可靠的操作平台，由专员在该处安全施工。取锚杆外露丝头旋装吊环，配套合适尺寸的螺帽和丝扣，以保证两者能够保持稳定连接的状态；每两个吊环视为一组，安装时注重对各组吊环眼孔的检查，予以灵活的调整，保证位置的准确性；遇吊环变形、螺帽滑丝或是其他异常状况时，需要及时予以换新，以免造成不良影响；

④以弯钩连网标准为基准，有效完成金属网的连接作业，在此前提下方可穿插前探梁；

⑤前探梁与巷道中线保持平行的位置关系，分别为每根前探梁配套 2 个专用吊环，具体可根据实际情况适当增加。在设置前探梁后端固定部位时，严格控制该部位的外露长度，至少达到 200mm，前控悬臂长度则不大于自身长度的 1/2。考虑到前探梁的稳定性要求，配套防滑装置，同时辅以连接措施，切实提高稳定性。若岩壁有片落现象，则对前探梁的实际状况做详细的检查，若该装置具备继续前移的条件，则按照特定的距离将其前移至紧贴岩壁的部位；而针对无法继续前移的情况，此时前探梁与矿岩壁距离在 200mm 以上的可不视为违反安全红线，但需注意的是，应当针对掘进迎头做有效的防护处理，例如采取防冒顶、防片帮处理措施，以免诱发安全事故。锚网时，允许前探梁按照特定的距离适当向前后方向移动，严格控制好锚杆间排距；

⑥在设置锚杆、地锚的基础上，联合应用硬塑料网，通过多类设施的共同应用，实现对迎面墙的全方位防护。防护作业涉及到的要点较多，需予以准确的把控。放炮后，用吊环穿杆式临时支护，在此前提下，将永久护顶锚杆打设到位，以保证护顶效果。以锚网支护的方法对帮部做有效的防护处理，而针对帮部偏破碎的情况，以挂网的方法加强防护，网边弯钩连接量控制在 100mm，同时以喷浆的方法对围岩做有效的封闭处理，使围岩保持固结状态，喷浆厚度约为 10~15mm。锚杆打设阶段，需要做到边打眼、边安装，若因围岩条件特殊而需采取挂网措施，则必须在一排锚杆打设工作落实到位后方可安装。为保证施工安全，禁止员工进入空顶区域作业；

⑦岩巷正前方防护：对于迎面墙，可以联合应用硬塑料网和特殊地锚，起到联合防护的作用。实际操作中，用特殊地锚在正前岩壁处设置硬塑料网，地锚布设间距按 1.5~2m 予以控制。放炮时，可将该部分防护设施去除，除此之外的其他各时段均不允许去除，以免因防护不当而出现异常；

⑧岩巷两帮防护：关键作业思路在于打设正前岩壁的锚杆，或是设置地锚并配套适量的钢筋网；

⑨防片帮网打设区域的控制：视现场情况做灵活的调整，平巷或上山掘进时，需要确保自巷道底板处开始均打设到位，或是完成浮矸 1m 以上的打设作业。而对于硬塑料网覆盖不到位的区域，则要严格控制尺寸，要求高或宽不超过 500mm，否则需要采取补网护帮应对措施。部分岩壁呈裸露的状态，较为合适的处理方法是敲帮问顶，以便有效处理活矸。对于下山掘进的施工情况，较为合理的打设区域为自巷道底板处开始完全打设，或是处理浮矸 1.5m 以上的区域；

⑩对于无需使用的前探梁、螺母吊环等相关装置，禁止随意堆放在现场，而是需要将其统一放置在材料架上，根据具体的类别有序放置到位，挂牌标识，采取有效的防护措施。

7 结语

综上所述，巷道围岩支护是矿山开采领域的重点工作内容，传统巷道支护方法存在范围不足、效果有限等局限性，而在联合应用锚网索和 U 型棚后，可以有效提高支护水平，以免弱结构面处出现问题，有效保证了巷道围岩的整体质量。并且，通过锚网索与 U 型棚的共同应用，还可保证煤层顶板的稳定性，以免该处二次松动，有利于创造安全的生产环境。总体来看，锚网索与 U 型棚的综合型方案具有良好的应用效果，富有推广价值。

参考文献：

[1] 曹平，李好月 . 深部高侧压巷道围岩失稳机理及控制对策 [J]. 岩土工程学报 ,2016,38(12):10.

[2] 郭相平 . 强烈动压巷道围岩变形破坏机理及加固技术 [J]. 煤矿开采 ,2016,21(6):5.

[3] 周旭明 . 高压破碎围岩变形机理与控制对策研究 [J]. 煤炭技术 ,2013,32(12):2.

作者简介：

杨帅楠（1986-），男，汉族，山西原平人，本科学历，工程师，2011 年毕业于中国矿业大学，主要从事煤矿安全生产管理工作。