

钢棚-钢筋混凝土联合支护技术在铜矿斜井工程中的应用

李志强^{1,2}

(1. 紫金矿业集团股份有限公司, 福建 龙岩 364200; 2. 紫金矿业建设集团(厦门)有限公司, 福建 厦门 361000)

摘要: 钢棚-钢筋混凝土联合支护技术在近年来的工程实践中得到成功应用, 试验验证和后评价结果表明, 该技术在破碎、软弱围岩等复杂地质条件下具有较高的综合可行性。然而, 现有文献鲜有关于该联合支护方法及其关键技术的详细阐述与分析。本研究采用文献分析、案例研究、数据解析等方法, 以某大型铜矿胶带斜井明槽段所采用的钢棚-钢筋混凝土联合支护工程为例, 结合后续质量观测与效果评价, 论证了该联合支护方法的技术可行性, 并详述了钢棚施作、钢筋混凝土拱形骨架施作、混凝土工程施作、明槽-暗硐过渡段施作四大核心工序施工的关键技术要点及适用情形, 为相似工况下的铜矿井巷支护工法优选及施工组织提供了借鉴和参考。

关键词: 胶带斜井; 钢筋混凝土; 钢棚支护; 联合支护; 矿山建设

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.02.014

中图分类号: TD353 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)02-0131-10

钢棚-钢筋混凝土联合支护技术适用于破碎围岩条件下井巷掘进支护。其具体施工方法是: 将型钢制作的钢棚结构作为外围受力骨架, 将钢筋混凝土拱形结构作为内部受力承重结构, 二者通过混凝土同时浇筑为一个整体, 构成更高韧性和坚固性的联合支护体。其材料结构本质是钢骨-钢筋混凝土结构, 即型钢结构和混凝土结构相结合的一种复合结构体系。其构成特点是钢结构与混凝土结构相互协同, 优势互补: 型钢结构能够承受较大的荷载, 同时在加工制造和现场施工方面具有较大的优势; 混凝土结构则具有较好的耐久性和抗震性能, 能够保证结构的长期稳定性。相较于传统单一的支护结构, 钢骨-钢筋混凝土结构具有更好的抗震性、耐久性, 施工效率更高, 因而在复杂工况下具有更好的适用性, 但施工难度更大, 材料与施工成本更高。

张伟^[1]基于巷道围岩变形机理和动因分析, 研究了“管缝式锚杆+注浆锚索+液压伸缩钢棚”联合支护方法的技术要点, 及其应对超前应力区围岩变形和提高工作面高效安全回采所起到的作用。吴已成^[2]以破碎软弱岩层中的大断面铜矿巷道开挖工程为案例, 研究了超前锚杆临时支护、槽钢棚以及喷锚联合支护技术的操作方式与可行性。阎志晋^[3]根据穿越断层时受应力叠加影响巷道围岩变形严重

条件下的工程实例分析, 阐述了“桁架锚索+让压锚索+梯形钢棚”联合支护技术的要点与实践成效。孟建国^[4]根据地下采矿巷道围岩破碎机理的研究, 结合掘进工程实际需求提出了“注浆与钢棚协同支护技术”, 并通过工程实例检验了该方法的稳定性和实际成效。张晓飞^[5]基于巷道项目现场实际案例, 论证了在巷道应力区采用架设可调节钢棚支护方法对提高围岩稳定性的显著作用。黄宝龙^[6]通过工程实例分析了管棚联合钢拱架支护塌方段技术方案的可行性。

文献研究表明, 当前有关钢棚支护及联合支护的文献中尚未发现专门针对“钢棚结构+钢筋混凝土拱结构”联合支护方法的系统论述, 然而实践中该支护方式对于软弱破碎围岩不同断面采掘巷道的支护具有很强的适用性^[7]。本研究以某大型铜矿胶带斜井明槽段施工为案例, 总结和研究采用该支护方法的技术可行性与施工关键技术要点, 一方面补充该研究领域的空缺, 另一方面为相似工况下的铜矿井巷支护工程工法优选提供技术借鉴。

1 工程背景

某欧洲大型铜矿位于山脉东麓的低矮丘陵区域, 矿区整体地形平缓, 相对高差一般为100~150 m, 属

收稿日期: 2025-08-27; 修订日期: 2026-02-04

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2024ZKPYLJ05)资助

作者简介: 李志强(1984—), 男, 山西临汾人, 博士, 高级工程师, 研究方向: 矿山工程建设, E-mail: 183614433@qq.com

温带大陆性气候区。矿区第四系覆盖广泛，自然露头稀少，地表植被发育，以灌木为主。

该铜矿胶带斜井用于连接地下采矿区域，进硐区域正在进行明槽段施工作业，井口净断面尺寸为 $6.5\text{ m} \times 4.8\text{ m}$ ，面积为 29.5 m^2 ，坡度为 15%(下坡)。明槽段长约 5 m，围岩以Ⅳ级和Ⅴ级泥灰岩为主，局部地段含砂岩、粉砂岩和砾岩，岩体松软、易碎，围岩单轴抗压强度 $<20\text{ MPa}$ 。随着硐口区域明槽施工的推进，地下涌水情况越来越严重，对施工造成较大困扰。作业面曾在中型降雨后发生垮塌，塌方量超过 30 m^3 ，土石散落至明槽底部。

在上述复杂工况下，为确保胶带斜井施工正常推进，并防止作业面进一步垮塌，项目组对原工程设计方案及施工组织方案进行了全面优化，最终决定对该明槽段采用“型钢钢棚结构+钢筋混凝土拱形结构”的联合支护方案。其中，硐身断面形式为三心拱形，采用 C30 钢筋混凝土墙拱支护，墙拱支护厚度为 500 mm、底板厚度为 600 mm，回填土厚度为 5 m。

2 钢棚-钢筋混凝土联合支护施工方法

本工程所采用的钢棚-钢筋混凝土联合支护施工方法包括四个核心工序：钢棚施作、钢混拱形结构骨架施作(模板和钢筋工程)、混凝土工程整体施作、明槽-暗硐过渡段施作(超前导管注浆+自钻式锚杆)。本研究重点分析上述核心工序中的关键技术，而明槽土方开挖、回填等非核心工序及核心工序中的非关键技术不作赘述。

2.1 钢棚施作

2.1.1 钢棚加工制作

经比选论证发现，虽然 U 型钢更加适合平巷采掘支护^[8]，尤其适用于在巷道交叉情况下施工^[9]，但 H 型钢适用性更加广泛，且在斜井支护中的受力性能与稳定性更优，故本工程最终选用 H 型钢。钢棚支撑整体外形尺寸为：宽度 7.5 m(与明槽底同宽)、高度 6.56 m、沿斜井中线方向长度 5.2 m。鉴于钢棚支护既要满足支撑强度，又要具有一定的柔韧性以保持抗震动性能^[10]，本工程按图 1 所示，设计钢棚横断面形状。钢棚采用 6 根 20#H 型钢作为骨架，14#槽钢作为连接筋，除硐口段外，钢棚顶板、两侧

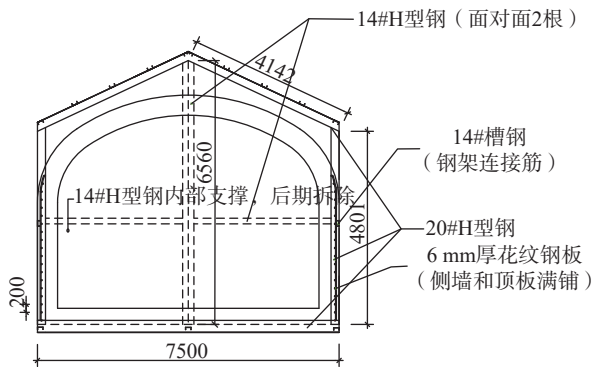


图 1 明槽钢棚支撑断面图(单位: mm)

Fig. 1 Cross section of the steel shed for open slot (unit: mm)

边墙及硐口对侧均采用 6 mm 厚钢板封闭，内侧用 14#H 型钢作支撑，整架钢棚质量约 17 t。

先在钢结构厂制作钢棚构件，然后将两侧墙体、顶板、底板等半成品构件运送至斜井硐口进行组装。组装时将钢棚从侧立面的中线分为两段，依次吊装至明槽作业面，再在明槽内焊接成整体，焊接作业在钢棚内进行。最后在钢棚与作业面之间空隙量取实际尺寸后，对钢棚进行焊接加长以封闭作业面。如图 2 所示。

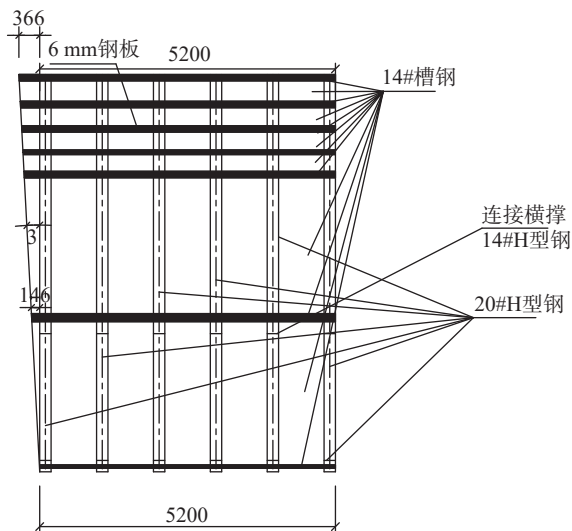


图 2 明槽钢棚作业面纵向剖面图(单位: mm)

Fig. 2 Longitudinal section of the steel shed for open slot (unit: mm)

2.1.2 钢棚现场组装

钢棚半成品采用平板车运送至斜井硐口，在组装平台上完成组装、调试。组装平台采用 2 块厚 20 cm、尺寸为 $8\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ (长 $\times$ 宽) 的钢板与 4 根

400 mm × 400 mm 的 H 型钢制作而成。H 型钢铺在地面上, 钢板横置在 H 型钢上, 并通过焊接连接成整体, 如图 3 所示。

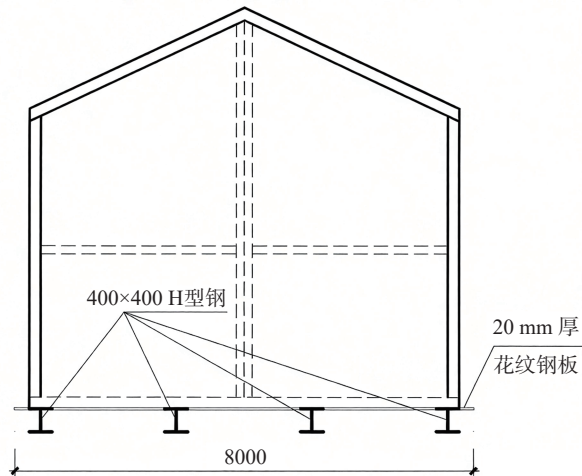


图3 钢棚组装平台截面图(单位: mm)

Fig. 3 Cross section for assembly of steel shed (unit: mm)

2.1.3 清理明槽作业面

钢棚组装完毕后, 需清理斜井明槽作业面的堆渣。采用挖掘机(48 t 或 35 t)将明槽底部的堆渣装至自卸汽车运出, 挖掘机只清理明槽内的堆渣, 马道以上的堆渣待自然滑落至槽底后再清理干净, 直至无渣滑落; 马道以上的堆渣不主动清理。清理完作业面堆渣后, 使用全站仪检查明槽底板高程, 如底板欠挖, 须继续清理。

2.1.4 钢棚吊装

本工程钢棚吊装采用 160 t 汽车起重机, 臂杆仰角为 20°~80°。钢棚分两段吊装, 先吊装靠近明槽作业面的部分, 安放至设计位置后, 再吊装另一部分。吊装作业要点如下:

1) 严格检查吊装机具性能, 准确标注钢棚中心线、标高线、重心和吊点。

2) 在斜井井口位置架设全站仪, 放出明槽作业面 7 m 范围内的中线和右侧 3.75 m 边线, 拉设建筑线并撒白石灰标识。

3) 钢棚组装完毕后, 利用平台车将索具连接在吊点上。起吊前先进行试吊, 将钢棚吊起离开地面 200~300 mm 后, 停止提升, 检查吊车的稳定性, 以及吊具、索具的可靠性, 确认无误方可进行正式吊装。

4) 起吊平稳再匀速转动吊臂, 靠近明槽作业面后, 使用吊钩接住牵引绳并将钢棚缓慢拉到安装位置的上方, 缓慢下落至放好的石灰线内, 并通过全站仪测量调整、复核钢棚位置。

2.2 钢筋混凝土拱形结构骨架施作

2.2.1 模板工程

1) 底板模板

底板模板采用双面涂塑优质胶合板, 以钢筋焊接加长对拉螺栓将模板拉结牢固, 间距为 600 mm × 600 mm; 次背楞采用 50 mm × 70 mm 木方, 间距 200 mm; 水平钢管间距 400 mm, 纵向钢管间距 500 mm。剪力墙模板采用 M14 对拉螺杆将模板拉结牢固, 间距为 400 mm × 600 mm; 次背楞采用 50 mm × 70 mm 木方, 间距 300 mm; 水平钢管间距 400 mm, 纵向钢管间距 600 mm。拱顶模板采用 U 型钢制作拱架辅以施工, 拱架间距 1.1 m; 次背楞采用 50 mm × 70 mm 木方, 间距 300 mm。

2) 底板边模及剪力墙模板

(1) 工艺流程: 安装前准备→一侧柱模安装就位→安装斜撑→清扫杂物→对面模板安装就位→安装另一方向模板→调整模板位置→紧固对拉螺栓→斜撑加固→预检。

(2) 施工方法要点: 支设前, 将胶合板按尺寸拼装成型; 在指定模板边角处, 用铁钉将倒角条钉在木模板内侧, 铁钉间距 200 mm。模板底部板面应平整, 沿柱边线向外 3~5 mm 贴好海绵条; 检查柱模板编号, 检查模板是否清理干净、预埋件是否安装到位。模板就位后, 安装斜撑调整至模板与楼面呈 60° 夹角, 使其稳定坐落于基准面上, 并进行临时固定。

3) 拱顶板模板

施工前应先弹 1 m 标线并据此架设钢拱架; 拱架下垫好木枋, 放好位置线, 采用吊线坠的方式将位置线引至拱架上。调整拱架标高, 调平后铺设板拱顶底模, 底模两侧用扣件锁紧, 防止梁底模跑位。铺设主龙骨, 按配置方案摆放模板, 确保拼缝严密, 并用钉子将模板固定。拱顶板模板铺设于主龙骨上。加固调整拱架, 用拉杆逐架拉结, 并以钢管对拉斜撑保证架体稳定。

2.2.2 钢筋工程

本工程抗震设防烈度为 7 度, 框架结构抗震

等级为二级，主要钢筋型号包括Ⅰ（HPB300）和Ⅲ（HRB400）。钢筋直径为22 mm。图4为胶带斜井明槽支护断面图，钢筋加工绑扎严格按照设计要求施工。

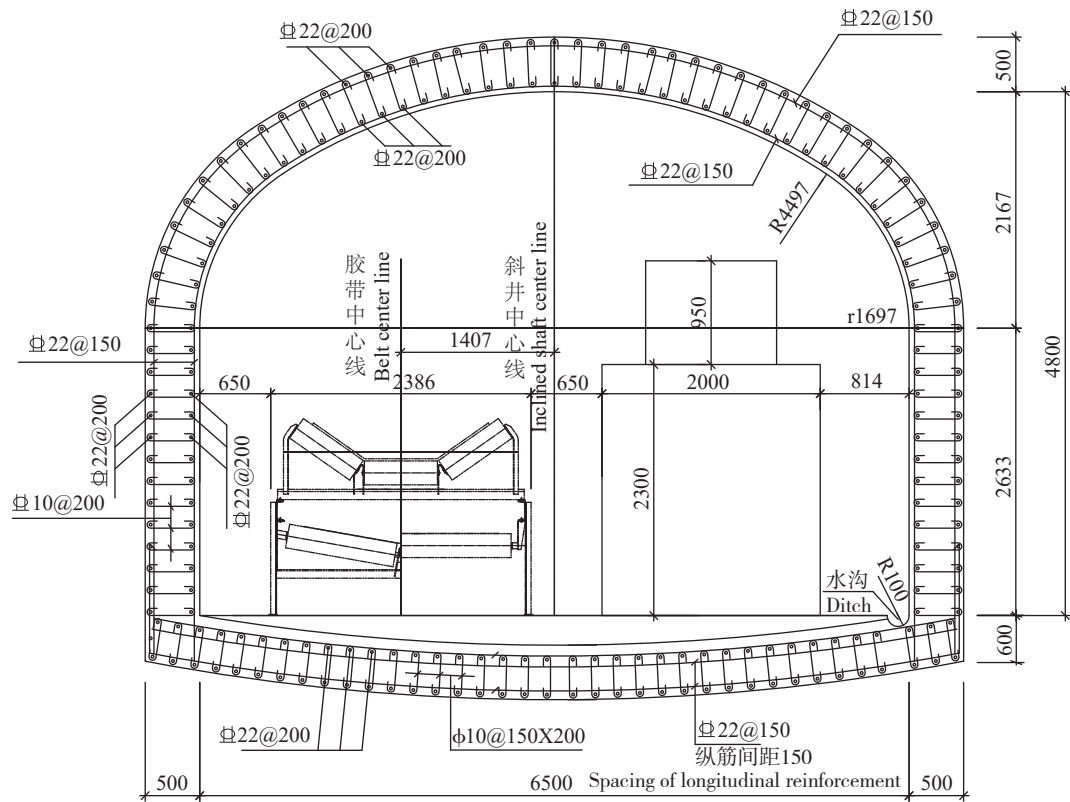


图4 胶带斜井明槽支护断面图(单位: mm)
Fig. 4 Cross section of the open slot support for inclined shaft (unit: mm)

1) 钢筋加工制作

钢筋(含箍筋)采用机械加工,其形式尺寸必须符合设计要求;使用前需将钢筋表面清理干净,确保无损伤、油污或铁锈。钢筋的弯钩必须严格按照设计要求和规范进行加工,箍筋的末端应做135°弯钩,其弯曲直径应大于受力钢筋直径且不小于箍筋直径的4倍,弯钩平直部分的长度不小于箍筋直径的10倍。

2) 拱形结构钢筋绑扎

基础放线完成后,依据配筋图在垫层划出钢筋位置线,定出基础钢筋的位置。基础钢筋网四周两行钢筋交叉点应逐点扎牢,中间部分可交错隔点扎牢,但必须保证受力钢筋不位移。双向主筋钢筋网的相交点需全部扎牢。绑扎时相邻绑扎点的铁丝应扣成八字形,以免网片歪斜变形。

3) 钢棚-拱结构钢筋连接

在本工程中,为确保后续钢棚-钢筋混凝土拱

形结构浇筑成为整体受力的支护结构,按照设计图纸将钢棚与拱结构钢筋骨架进行充分绑扎连接是重点工作之一。

4) 明槽-暗硐过渡段预埋钢筋

为确保明槽-暗硐过渡段的刚性与稳定性,需根据设计图在过渡段作业面标识钢筋孔位置,用凿岩台车在暗硐端面钻凿出钢筋孔,并打入预埋钢筋(22 mm),钢筋外露长度应长短交错布置,最大差值不小于钢筋直径的52倍。作业面预埋钢筋施工完毕后,即具备混凝土浇筑作业条件。

2.3 混凝土工程整体施作

将型钢棚与钢筋混凝土拱形骨架构成的联合支护结构浇筑成为一个整体,保证二者联合后的整体刚度、强度和稳定性能够满足要求,共同对围岩起到有效的支护作用。

2.3.1 混凝土运输

混凝土由本地搅拌站供应,搅拌站距斜井工地

约 12 km，运输时间控制在 30 min 以内。在运输过程中需保持持续搅拌，并采取缓凝措施，确保混凝土运抵现场时质量达标。

2.3.2 混凝土等级与浇筑方式

不同施工部位适用的混凝土等级与浇筑方式见表 1。

表 1 各施工部位混凝土等级与浇筑方式
Table 1 Concrete grade and casting method for different sections

序号	施工部位	混凝土等级	浇筑方式	备注
1	垫层	C15	搅拌车	直接运输至现场，自下而上，自卸浇筑
2	底板	C30	汽车泵	优先采用汽车泵，如汽车泵施工困难则使用汽车吊协同作业
3	剪力墙	C30	汽车泵	
4	拱顶板	C30	汽车泵	

2.3.3 混凝土浇筑与振捣

每层浇筑高度应根据结构特点和钢筋疏密程度决定，一般分层高度为振捣棒有效工作长度的 1.25 倍，最大不超过 50 cm。使用插入式振捣器时应快插慢拔，插点要均匀排列，逐点移动，做到均匀捣实，移动间距应不大于振捣器作用半径的 1.5 倍。振捣上一层时，应插入下层 5 cm，以消除两层间的施工缝。

2.3.4 混凝土养护与拆模

混凝土浇筑完毕后，应在 12 h 以内加以覆盖和浇水养护，浇水次数应保持混凝土处于湿润状态，养护用水应与拌制用水相同。对于普通硅酸盐水泥或矿渣硅酸盐水泥拌制的混凝土，浇水养护时间不得少于 7 d。在拆模过程中，如发现有影响结构安全的质量问题，应暂停拆模，经过处理并验收合格后可继续拆除。

2.3.5 混凝土试验

1) 坍落度试验：搅拌站混凝土出站前应做坍落度试验，进场后随机抽查。

2) 试块留置及送检：将普通混凝土和抗渗混凝土分别按照规范规定的分组数量，根据划分的流水段，以同一浇筑部位、同一强度等级、同一配合比、同一工作台面，按要求进行试块取样和送检。

2.4 明槽-暗硐过渡段支护施作

相关研究与工程实践表明，超前导管注浆支护不仅能有效保证巷道支护结构和围岩的稳定，实现快速、安全进洞，而且能尽可能地保持洞口原有地貌，综合成效较好^[11]。此外，该胶带斜井明槽进入暗硐区域后涌水越来越明显，而对于富水破碎区，利用超前小导管注浆加固能够为硐身稳固提供保证^[12]。因此，本工程在拆除模板和钢棚内支撑后，针对明槽与暗硐的过渡段（即钢棚-钢筋混凝土复合硐身结构与后续 V 级围岩作业面接茬部位），采用“超前导管注浆+加强喷锚支护”方式处理，确保该部位具备足够的刚度、强度和稳定性，避免因应力集中而出现变形。明槽开挖完成后，斜井作业面再向前掘进 20 cm，之后对整个作业面进行素喷砼，喷砼厚度 5 cm；然后施工超前导管注浆加固，并采取“自钻式锚杆+喷砼”方式进行支护。

2.4.1 超前导管注浆

在超前导管注浆施工操作中，导管施工参数、注浆孔间距、注浆材料参数等直接关系到注浆加固效果，因此必须根据理论公式结合现场实际进行计算和选取^[13]。

关键施工参数包括以下方面：

1) 导管施工参数：采用外径 40 mm 无缝钢管，壁厚 3 mm，长度 6 m，外插角 10°，外侧导管间距根据类似工程施工经验取 20 cm。

2) 孔间距验算方法

注浆压力计算：

$$P_{\max} = \gamma_n h_0 / (10 \times \mu) = 2.8 \times 4 / (10 \times 0.5) = 2.24 \text{ MPa}$$

式(1)

式中， $P_{\max}$ 为理论注浆压力， γ_n 为岩层重力密度， h_0 为导管嵌入深度， μ 为岩层裂隙及空隙流动阻力系数（取 0.4~0.5）。

注浆孔扩散半径计算：

$$R = (0.65 \sim 0.7) \times L = 0.46 \sim 0.49 \text{ m}$$

式(2)

其中，支撑体设计厚度 $L = 4 \sin(10^\circ) = 0.7 \text{ m}$ 。

注浆孔环向间距计算：

$$a = (0.45 \sim 0.65) \times L = 0.315 \sim 0.455 \text{ m}$$

式(3)

实际施工中为便于操作，取 $P_{\max} = 2 \text{ MPa}$ ， $R = 0.47 \text{ m}$ ， $a = 0.45 \text{ m}$ 。

3) 注浆材料参数：浆液扩散半径（即浆液在岩

土体裂隙中能有效自然扩散达到的最远距离)为0.7~1.1 m,注浆终止压力2 MPa。注浆材料采用水泥浆或者水泥水玻璃浆液,水泥为425号普通硅酸盐水泥,水玻璃进场后调成35°Bé。水泥浆的水灰比为0.8:1~1.5:1,水泥浆与水玻璃的体积比宜为1:1~1:0.3。

4) 衔接要点:如图5所示,第一排超前管尾部与钢筋砼硐身的外层钢筋绑扎连接并浇筑成整体,并且钢筋砼浇筑应深入作业面20 cm。

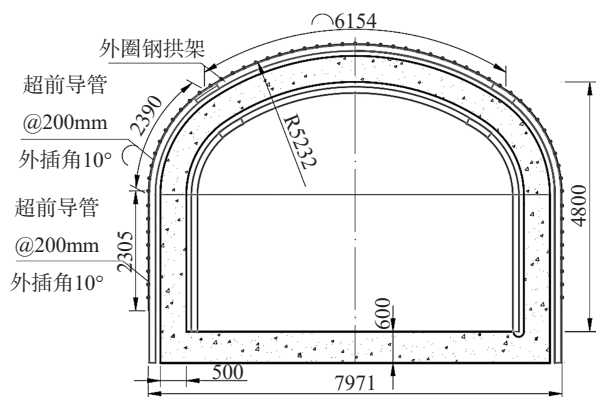


图5 超前导管施工断面图(单位: mm)

Fig. 5 Cross section for construction arrangement of advancing duct (unit: mm)

导管的加工制作:导管采用40 mm直径钢管加工,长6 m,管口位置设加强环;钢管尾端1.5 m范围内不钻出浆孔,其余段每隔15 cm在环向钻4个孔,孔呈梅花形布置交错45°;管前端加工成尖端,尖长10 cm。

施工要点:为保证施工精度,采用全液压凿岩台车进行导管的钻进、顶管作业;顶管施工采用钻杆连接套连接钻杆。为加快注浆进度,在导管前孔口安设分浆器,一次可注入4根导管。注浆施工的两项技术重点,一是设计应符合实际施工要求,二是强化注浆施工作业中的过程控制。

关键试验项目:1)分别用波美度计、黏度计、温度计检测水玻璃的配制参数、注浆浆液黏度及温度是否在设计范围内,分析温度对注浆浆液凝胶时间的影响;2)现场测定注浆浆材凝胶时间,验证施工配比压力;3)基于流量、流速等参数,进行现场注浆设计调整与优化。

2.4.2 喷锚施工

在破碎围岩中,普通锚杆的实际托锚力普遍不

足,因此需对锚杆支护体系进行加强或改进^[14]。自钻式锚杆具有造孔、注浆、锚固功能,对破碎地质适应性强,且施工简便、造价可控^[15],因此本工程在喷锚中采用自钻式锚杆施工,喷锚常规施工流程不作赘述。

1) 工艺流程:施工准备→测定孔位→锚杆自钻进→安装止浆塞→注浆→安装垫板和螺母→检测验收。

2) 钻孔:采用凿岩台车钻孔,沿钢筋混凝土硐身外圈500 mm轮廓线钻进,设计深度6 m,杆体直径32 mm,环向间距200 mm,外插角4°~6°(本工程取5°),加长锚杆采用联结套进行联结。锚杆布设几何方位见图6。钻孔深度必须达到设计长度,孔深偏差不大于50 mm,当钻孔方位偏差过大破坏周边其他孔时必须进行补孔。

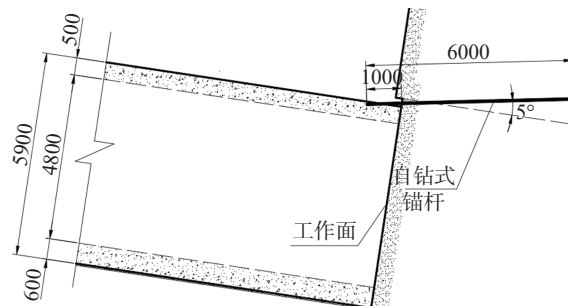


图6 自钻式锚杆布设图(单位: mm)

Fig. 6 Layout of self-drilling anchor (unit: mm)

3) 安装止浆塞:钻孔至设计深度后,卸下钻机,安装止浆塞,安装位置在锚孔内距离孔口250 mm处。当遇注浆压力较大或围岩极度破碎等特殊情况下,可采用锚固剂封孔。

4) 注浆并安装垫板与螺母。

3 联合支护质量观测与效果评价

联合支护工程完成后,需按照相关标准对硐身水平位移、竖向沉降和其他变形情况的重要指标进行持续观测,以保证工程质量达标且结构始终处于安全状态,并验证本联合支护工法的有效性。

3.1 观测点布置

根据该钢棚-钢筋混凝土拱形复合结构的整体受力特点与应力分布特征,在拱形结构顶板中心线与六榀型钢骨架的重合点,分别布置6处位移观测点

(DJ1~DJ6), 标记各点的水平坐标(X , Y)及竖向坐标(Z)的初始值, 并按下述频次进行观测与记录。

3.2 观测时长与频次

观测持续两年(24个月), 观测频次按照表2进行, 最初每日一测, 如未出现异常值, 则在下一观测阶段降低频次, 最终降至每月一测。

表2 支护沉降与变形观测频次

Table 2 Observation frequency of support settlement and deformation					
观测阶段	第1~2月	第3~5月	第6~10月	第11~18月	第19~24月
观测频次	每日一测	两日一测	三日一测	周一一测	每月一测

3.3 观测结果与指标统计

3.3.1 位移观测结果

所选6个观测点(DJ1~6)在 X , Y , Z 三个方向的

累计位移变化趋势如图7所示。其中, X 为横向水平坐标, Y 为纵向坐标, Z 为竖向坐标。根据观测结果可知, 所有观测点的水平和竖向位移最终累计值和历史最大值均未超过10 mm。

观测期末(24个月末)的累计位移(见表3), 其中, 竖向累计位移 ΣZ 负值表示向下沉降。由表3可知, 最大水平位移为4.7 mm, 最大竖向沉降为6.8 mm。

3.3.2 位移及沉降数据稳定程度

由各观测点累计位移及沉降监测结果的折线趋势图(图7)可见, 以横坐标中央为分界线, 观测首年(分界线左侧)各方向的累计位移数据(即相对坐标值)上下浮动明显, 而观测次年(分界线右侧)各位移数据趋于稳定。据此计算并对比首年及次年位移观测数据的标准差(表4), 可知观测次年所有观测点在各方向的累计位移的标准差均有所降低, 且整体平均降低比例达到74.5%。

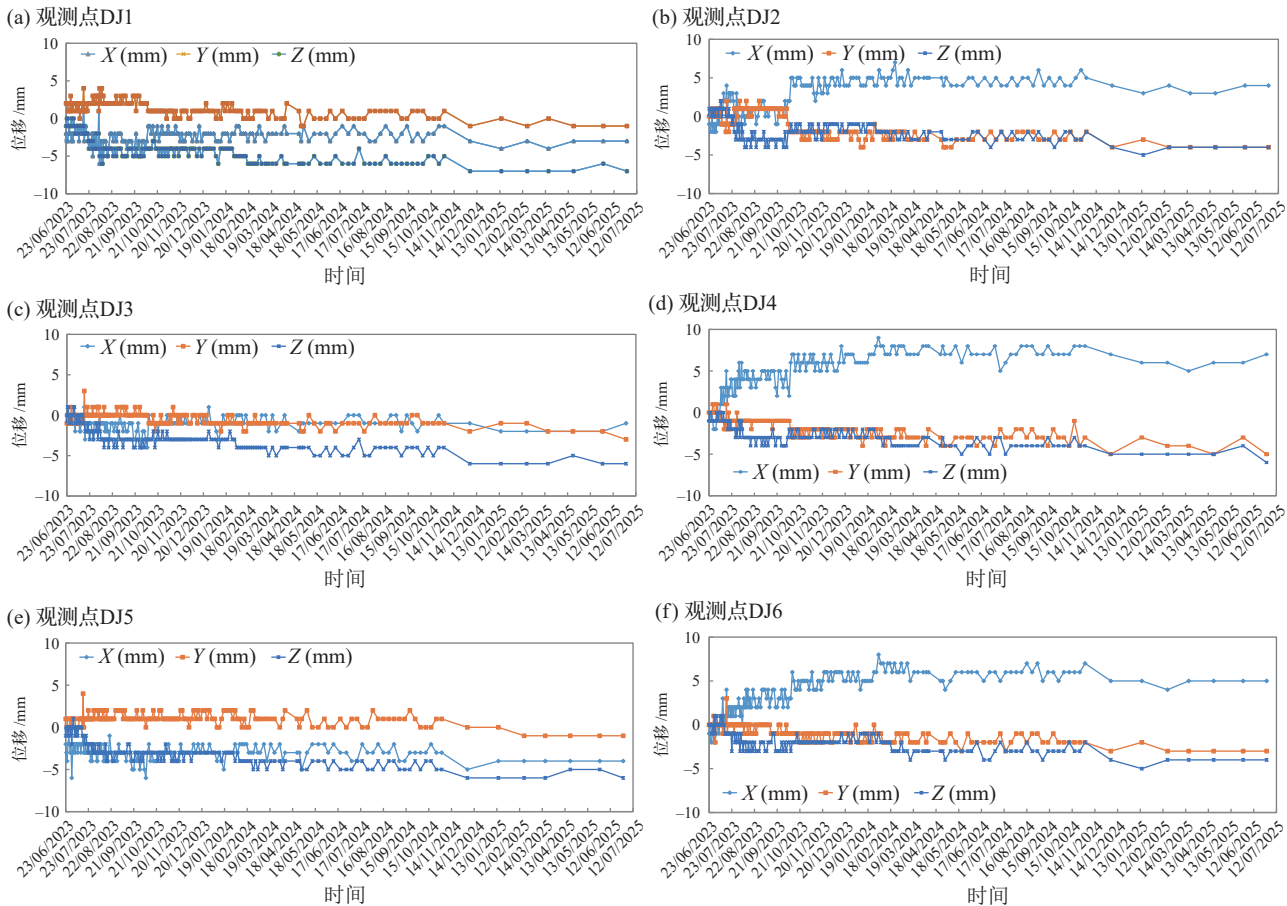


图7 观测点的位移变化趋势

Fig. 7 Variation trend of displacement of testing point: (a) DJ1; (b) DJ2; (c) DJ3; (d) DJ4; (e) DJ5; (f) DJ6

表 3 水平位移(X, Y)与竖向沉降(Z)累计值

Table 3 Accumulated value of X, Y and Z						
累计位移/mm	DJ1	DJ2	DJ3	DJ4	DJ5	DJ6
水平位移 ΣX	-2.6	4.4	-1.2	7.2	-4.3	4.6
水平位移 ΣY	-1.2	-4.3	-2.7	-4.7	-0.7	-3.3
竖向沉降 ΣZ	-6.8	-3.9	-5.7	-5.5	-5.8	-4.1

表 4 位移及沉降数据稳定程度对比表

Table 4 Comparison for stability of displacements				
观测点 编号	位移坐 标方向	首年位移 标准差	次年位移 标准差	标准差 降低比例
DJ1	X	1.065	0.875	21.8%
	Y	0.961	0.735	30.8%
	Z	1.589	0.734	116.6%
DJ2	X	2.307	0.782	195.2%
	Y	1.635	0.751	117.8%
	Z	1.446	0.847	70.8%
DJ3	X	0.821	0.734	11.9%
	Y	0.764	0.662	15.5%
	Z	1.317	0.867	52.0%
DJ4	X	2.580	0.898	187.3%
	Y	1.103	1.001	10.2%
	Z	1.126	0.735	53.2%
DJ5	X	0.883	0.773	14.2%
	Y	0.842	0.750	12.3%
	Z	1.313	0.698	88.2%
DJ6	X	2.360	0.722	227.0%
	Y	0.851	0.706	20.5%
	Z	1.067	0.750	42.3%
平均值		1.335	0.789	74.5%

3.3.3 变形情况

基于上述 6 个观测点，选取 3 条测线 DJ1~DJ2、DJ3~DJ4 和 DJ5~DJ6 分别记录其线性变形情况，结果见表 5。

表 5 观测线段的累计线性变形

Table 5 Accumulated deformation of the selected segments		
测线	累计线性变形/mm	历史最大变形/mm
DJ1~DJ2	-7.9	-9.6
DJ3~DJ4	-8.5	-9.9
DJ5~DJ6	-9.2	-9.7

3.4 效果评价

综上所述，本研究所采用的钢棚-钢筋混凝土结构为主，过渡段辅以喷射混凝土及锚杆支护的联

合支护形式，适用于围岩条件很差或因地质问题需要特别加强支护的工况。由于该形式并非矿山井巷常见支护形式，所以现有井巷工程设计、施工及验收类规范并未针对该联合支护下允许的变形和沉降给出详细规定。鉴于《公路隧道设计规范(第一册-土建工程)(JTG 3370.1—2018)》(以下简称《规范》)中将隧道“复合式衬砌”定义为“由喷射混凝土、锚杆、钢筋网、钢架等初期支护和钢筋混凝土等二次衬砌组合而成的衬砌形式”，与本工程联合支护形式基本相同，且该规范质量要求比矿山井巷工程更加严格，故援引该规范中的变形标准进行效果评价。

1)《规范》指出：为减小衬砌所承受的变形压力，围岩在开挖暴露后允许产生一定变形，释放能量，故需预留变形量，该预留变形量即“围岩在支护控制的条件下设计所允许的变形量”，其中Ⅳ级围岩允许变形量为 50~120 mm，Ⅴ级围岩允许变形量为 80~150 mm^[16]。本工程属Ⅳ~Ⅴ级围岩，根据图 7、表 3 和表 5 可知，所有观测点的水平位移、竖向沉降及变形指标均控制在 10 mm 以内，均远远小于允许变形量的最小值。

2)数据标准差代表其离散程度，标准差减小说明数据离散程度降低，即结构稳定程度增加。根据表 4 可知，观测次年所有观测点的累计位移数据离散度均有所降低(10.2%~227.0%)，表明所有点的水平位移及竖向沉降均趋于稳定；累计位移标准差的平均水平降低了 74.5%，表明随完工时间的推移，该联合工程支护结构的整体稳定性显著增强，在使用期间的安全性能得到保障。

综上所述，在该工程明槽段施工完成后，历经两年的变形和沉降观测，结果不仅完全满足设计要求，而且表现出优异的支护成效，充分证明钢棚-钢筋混凝土联合支护技术具备很好的强度、刚度和韧性，应用于地质条件复杂和不稳定矿山巷道时的支撑能力和抗变形性能更好，可有效维持巷道结构安全。

3)进一步分析位移及沉降的标准差变化特征发现，部分观测点某一轴向的累计位移数据的稳定性低于平均水平。以“次年位移标准差高于均值”和“标准差降低比例低于均值”作为评判标准，可知观

测点DJ1的X方向、DJ2的Z方向、DJ3的Z方向和DJ4的Y方向4项数据(见表4粗斜体数据)的稳定性尚未达到平均水平,须作为重点项进行继续观测和分析。

4 结论

1)提出了钢棚-钢筋混凝土联合支护方法在钢棚施作、钢筋混凝土拱形骨架施作、混凝土工程整体施作、明槽-暗硐过渡段支护施作等四大核心工序的关键技术要点。

2)位移监测显示,本工程所有观测点的位移、沉降及变形指标远低于规范允许值,且随完工时间的推移该支护结构的整体稳定性显著增强,验证了该联合支护技术用于复杂围岩下铜矿斜井支护的可行性、稳定性与安全性,证实了该支护技术具有十分显著的技术优势。

3)深入分析了累计位移及沉降数据稳定性变化的具体特征,建立了“次年位移标准差高于均值”且“标准差降低比例低于均值”的双指标评价体系和评价标准,确定了有待继续实施位移观测及评估的4个观测点的具体轴向,为同类支护结构的精细化观测与评价提供了具体方法。

相较于其他简易或单一支护技术,钢棚-钢筋混凝土联合支护技术施工工序复杂,施工技术难度大,工期也更长。因此,在选用该支护技术时,需要针对具体项目的围岩条件、工况特点和功能要求进行综合可行性论证。该工法中型钢棚与钢筋混凝土之间的联合力学作用特征及协同机制尚未完全明确,有待于建立力学计算模型并结合工程实例开展进一步研究。以此为基础,可进一步探讨如何加强系统整体协同受力作用、减少结构设计和施工冗余,从而优化支护结构各部分施工工艺,并增加施工便捷性、减少材料耗费和工期消耗。

参考文献:

- [1] 张伟. 联合支护在采面回风顺槽超前应力区的应用[J]. 江西煤炭科技, 2025(2): 26-28.
- [2] 吴已成. 槽钢棚锚网喷砼联合支护在巷道施工中的应用[J]. 铜业工程, 2015(2): 30-32.
- [3] 阎志晋. 掘进巷道过断层破碎区联合支护技术[J]. 机械管理开发, 2024, 39(8): 302-303, 306.
- [4] 孟建国. 掘进巷道破碎顶板注浆与钢棚协同支护技术应用[J]. 山西冶金, 2023, 46(3): 209-210, 228.
- [5] 张晓飞. 掘进巷道应力破碎区可调节钢棚支护应用探讨[J]. 江西煤炭科技, 2023(3): 23-25.
- [6] 黄宝龙. 管棚联合钢拱架穿越煤矿斜井塌方段施工[J]. 建井技术, 2019, 40(1): 19-22.
- [7] 刘超. 双梁钢棚支护在顺槽超前应力区中应用[J]. 西部探矿工程, 2023, 35(11): 154-155, 158.
- [8] 张相焕. U型钢管棚联合支护工艺在软弱岩层掘进中的应用[J]. 湖南有色金属, 2025(4): 9-13.
- [9] 李鹏, 郇恒恒. 巷道交叉口C形U钢棚支护工艺实践探究[J]. 山东煤炭科技, 2025, 43(1): 41-45, 51.
- [10] 张立华, 张林, 张利军. 复杂环境下铁路柔性钢棚洞施工关键技术[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(18): 113-116, 132.
- [11] 吴旦, 皮圣, 荆永波, 等. 超前小导管支护快速进洞技术在软弱围岩隧道工程中的应用[J]. 中外公路, 2021, 41(1): 186-189.
- [12] 李志永. 富水破碎围岩区隧道注浆加固技术[J]. 西部探矿工程, 2025, 37(4): 184-187.
- [13] 陈晓祥, 韩文字. 托顶煤巷道易片冒顶板变形机理与超前导管预注浆控制技术研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2024, 43(4): 1-11.
- [14] 何建元, 贾峰, 程继辉, 等. 复杂破碎巷道支护效果分析与评价[J]. 铜业工程, 2013(2): 37-41.
- [15] 温贵明, 刘伟丽. 自钻式注浆锚杆在引水隧洞塌方处理中的应用[J]. 水利水电工程设计, 2012, 31(4): 23-25.
- [16] 交通运输部. 公路隧道设计规范(第一册-土建工程: JTG 3370.1—2018)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.

Application of Steel Shed Reinforced Concrete Composite Support Technology in Inclined Shaft Engineering of Copper Mine

LI Zhiqiang^{1,2}

(1. Zijin Mining Group Co., Ltd., Longyan 364200, China; 2. Zijin Mining Construction Group (Xiamen) Co., Ltd., Xiamen 361000, China)

Abstract: Steel shed reinforced concrete combined support technology has been well applied in recent engineering practices. Based on tests and post-evaluations, this technology is considered highly suitable for complex geological conditions such as fractured and weak surrounding rocks in terms of technical comprehensive feasibility. However, there is little detailed research or analysis about this composite support method and related critical technologies. This paper, adopting methods of references study, practical cases study and data analysis, studied and summarized the technical feasibility of adopting steel shed reinforced concrete composite support method through post evaluation of the open slot section construction of a large copper mine's belt inclined shaft. It outlined key techniques and corresponding applicable situations of four core processes: construction of steel shed, construction of reinforced concrete arch skeleton, integrated construction of concrete work, and construction of transition section between open slot and underground tunnel. The aim was to provide references for support method selection and construction of copper mine roadway support under similar working conditions.

Key words: inclined shaft for belt; reinforced concrete; steel shed support; composite support; mine construction

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.02.014

引文格式: 李志强. 钢棚-钢筋混凝土联合支护技术在铜矿斜井工程中的应用[J]. 铜业工程, 2026(2): 131-140.

LI Zhiqiang. Application of steel shed reinforced concrete composite support technology in inclined shaft engineering of copper mine [J]. Copper Engineering, 2026(2): 131-140.

投稿网址: www.tygc.net

微信公众号: jxtygc