

深部复杂地质条件下矿井交岔点支护关键技术研究

刘文涛¹, 杨生彬¹, 王晓义², 张艳博³

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)岩土工程研究所, 北京 100083;
3. 河北理工大学, 河北唐山 063009)

摘要: 由于具有断面大、结构复杂、施工扰动次数多等特点, 深部条件下的矿井交岔点工程支护难度一般比较大。通过现场地质条件的调查, 用确定施工工程难度系数的方法, 选择对应的支护形式和参数。深部复杂地质条件下的大断面交岔点, 主要具有 4 种变形力学机制, 即构造应力作用力学机制、自重应力作用力学机制、结构变形力学机制和与施工过程有关的变形力学机制。在分析变形力学机制的基础上, 可以进行最优的支护参数设计和过程设计。优化后的试验方案应用于具体的工程实例, 取得了良好的支护效果。

关键词: 深部复杂地质条件; 软岩; 矿井交岔点; 构造应力; 锚网索支护

中图分类号: TD353 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2006)11-0054-04

The Key Technology for the Cross Section Supporting under Complex Geological Condition at Great Depth/LIU Wen-tao¹, YANG Sheng-bin¹, WANG Xiao-yi², ZHANG Yan-bo² (1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Geotechnic Institute, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 3. Hebei University of Science and Technology, Tangshan Hebei 063009, China)

Abstract: Due to the characteristics of large span, complex structure, and liability to the disturbance of operation, cross sections of deep engineering are somewhat difficult to support. Through the field investigation in geological condition, a difficulty coefficient and the corresponding supporting types and parameters were determined. Four primary deformation mechanics, i. e. mechanics of tectonic stress interaction, mechanics of self-weight stress interaction, mechanics of structure deformation, as well as deformation related to operational sequence were summarized out. Based on the analysis of these deformation mechanics, the cable and bolt supporting parameters and operation sequences were optimized. The supporting plan was put into operation and a sound effect has been achieved.

Key words: complex geological condition at great depth; soft rock; cross section; tectonic stress; cable and bolt support

交岔点是矿井运输的咽喉部位, 跨度大, 服务年限长, 支护可靠性程度要求高。在交岔点支护技术中, 以往用的较多的为料石砌碛、钢梁棚式支护、锚杆支护。近年来, 由于锚网索支护具有主动、让压以及施工快速等优越性, 已逐渐成为大断面交岔点支护技术的主流^[1]。但是, 在深部复杂高构造应力和岩性状况不利的情况下, 由于对交岔点变形机理研究不够深入, 支护技术不到位, 锚杆支护的交岔点出现局部支护状况恶化, 失稳返修现象较为普遍, 不得不采用二次支护或用锚网与钢架联合支护, 且支护效果不太理想。

本文从具体工程实例出发, 通过对交岔点变形机理的研究, 探讨深部高应力条件下的支护关键技术及主要对策。

1 工程背景

试验交岔点位于大屯煤电公司徐庄矿Ⅱ₃采区, 为 Y 形交岔点。工程底板标高 -750 m。最大净宽度 8.532 m, 最大净高 5.466 m。掘进总工程量 535.16 m³。施工地段的岩性主要为泥岩和砂质泥岩, 局部受构造影响存在挤压变形带, 围岩松软、易碎, 层节理较发育, 为典型的碎裂岩体结构类型。巷道开挖后, 受高地应力影响, 岩体质量显著降低, RQD 指标一般为 25%~45%。具体情况见图 1。

由于处于东西向秦岭构造和新华夏构造两种构造体系的复合部位, 受两种构造体系的交替作用, 徐庄井田地质构造较为复杂。据初步测算, 全井田落差大于 20 m 的断层密度达到 1.1 条/km², 区内小型断层密度更大, 达到 3.1 条/km², 中、小断层互交叉切割, 给采掘生产带来一定的难度。

收稿日期: 2006-07-25

作者简介: 刘文涛(1968-), 男(汉族), 山西大同人, 中国地质大学(北京)在读博士研究生, 地质工程专业, 从事地质工程、岩石力学与工程方面的研究工作, 北京市海淀区学院路 29 号中国地质大学工程技术学院探工楼 502 室, 13811421309、(010)82321884, llwtt123@sina.com。

标高/m	层厚/m	柱状 1:200	岩石名称
			泥岩
724.44	1.24		灰岩 L1
	1.28		煤
729.90	4.18		细砂岩
	0.65		破碎带
	0.48		煤
737.70	5.66		砂质泥岩
	9.13		灰岩 L4
746.83			

图 1 -750 水平综合柱状图

-750 水平主要以构造应力为主。区域地应力测试结果表明,最大主应力 σ_1 为 15.43 MPa,与垂直向夹角为 76.44°,近水平方向;垂直方向的最大应力分量为 9.18 MPa。

2 巷道变形破坏机理及原因分析

2.1 变形破坏调查及难度评价

根据现场实地调研,在 -750 水平巷道的施工过程中,主要出现了以下几种变形破坏现象:(1)两帮收敛(如 -750 采区车场最大两帮收缩量达 500 mm);(2)巷道底臃(-750 东翼轨道大巷最大底臃量达 300~400 mm);(3)局部地段巷道混凝土剥落,围岩外露;(4)由于受构造应力影响,巷道变形具有非对称性。上述变形及破坏现象,采取局部补强措施后,巷道基本能保持完好。

通过实测临界深度 H_{cr} ,采用难度系数 D_r 和危险指数 D_e [2] 来评价 1 号交岔点的施工难度,以便确定相应的支护形式。难度系数指深部地下工程的所处深度与其临界深度的比值,危险指数指地下工程岩体所承受的垂直应力与其工程岩体强度的比值。由计算及现场调查知,-750 水平泥岩组的临界深度为 -600 m,巷道支护工程难度系数为 1.3。煤体组的临界深度为 -650 m,巷道支护工程的难度系数为 1.2。

泥岩组和煤体组在 -750 水平已进入非线性大变形状态,两个岩组支护难度系数 D_r 在 1~1.5 的范围,危险指数 D_e 均大于 1,已进入非线性大变形状态,受地质构造影响时,交岔点稳定性控制难度加大。需要采用控制底臃的锚网索支护形式。

2.2 变形破坏机理分析

复杂地质条件下,影响交岔点稳定性的主要因素为构造应力,软弱岩性和巷道空间结构,其变形力学机制,主要归结为以下 4 种类型,即构造应力作用机制、自重应力作用机制、岩体结构变形机制和大硐室开挖施工过程有关的变形力学机制 [3]。

2.2.1 构造应力作用机制

岩层在巷道成形时,应力状态从三维向二维转变,在构造应力作用下,极易发生破坏而产生非线性弹塑性变形,这是一种与时间有关的变形。这种变形往往导致软岩大断面交岔点支护发生宏观破坏,由于构造应力一般以水平构造应力为主,在构造应力显著地区,巷道两帮的破坏往往颇为明显。在底板岩性较为软弱的情况下,易发生塑性臃出变形。-750 水平巷道的变形有一定的构造应力作用机制。

2.2.2 自重应力作用机制

由于上覆围岩自重引起的应力主要为垂直应力,软岩巷道的破坏表现出明显的与深度有关而与方向无关的特点。即在开挖浅部巷道时,按常规支护形式,巷道变形破坏不很明显。随深度增加,开挖到深部巷道时,变形破坏变得严重起来,而破坏的方向性不甚明显。主要表现形式是顶、底板在垂向应力强大的压模作用下,向临空区塑性挤出,发生较为严重的顶沉和底臃。

2.2.3 结构变形力学机制

-750 交岔点处围岩为倾斜层状岩层,平均倾角为 17°。巷道开挖后,围岩应力发生较大变化,在巷道沿岩层倾斜方向的下肩部,切向应力显著增高,成了最易失稳的关键部位。通过对巷道下肩部取单元体进行研究,得到该区域岩体沿节理面向临空区方向的法向应力,可由如下公式 [5] 表示为:

$$\sigma_n = 2c / [(1 - \operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{ctg}\gamma) \sin 2\gamma] \quad (1)$$

式中: σ_n ——单元体法向应力,MPa; c ——节理岩体的粘聚力,MPa; φ ——节理岩体的内摩擦角; γ ——岩层层理面与巷道壁面夹角。

由上式可以看出,在应力条件和巷道围岩结构给定的情况下,巷道下肩部的稳定性主要取决于围岩节理面的粘聚力 c 和内摩擦角。在满足式(1)的失稳条件时,下肩部高应力区层状岩体由于法向应力降低,沿原有软弱面或潜在剪切面易发生剪切蠕滑变形,致使巷道在该处发生沿周向的收敛位移。而且,这种位移导致巷道下肩部区域切向应力进一步降低,破坏范围逐渐扩大。由于层状岩体和混凝土喷层抗弯和抗剪能力较低,巷道下肩部易发生挤

压拉裂破坏。

2.2.4 施工过程力学机制

大型地下交岔点开挖的一个最主要的特点是围岩各部位的反复加、卸荷过程以及相互之间的扰动。在此过程中,地下工程围岩都同时存在加载区(能量积聚区)和卸载区(能量释放区)^[4]。而且,它们都是成对相向出现的,且发生能量的传递和转化。复杂岩体的施工,对围岩是一个非线性的力学加、卸载过程,其稳定性与应力路径及过程相关。不合理的开挖顺序和支护方式,会对局部区域产生过度加载和卸载,造成塑性区域范围扩大,最终导致局部岩体失稳。因此,施工过程的不同,会对局部区域产生不同的力学效应^[6]。

3 支护对策

3.1 变形力学机制转化

初步分析,徐庄-750水平深部巷道主要变形力学机制 I_C:微裂隙膨胀机制; II_{ABD}:重力机制+构造应力机制+工程偏应力机制; III_{CA}:层理走向型作用机制。

对 I_C II_{ABD} III_{CA}复合型软岩大断面巷道,首先经过扩刷巷道、预留变形空间以及局部卸压等措施,释放大量的非线性膨胀能和塑性能,使其转化为比较简单的 II_{BD} III_{CA}型,通过采用锚网索+底角锚杆支护技术进一步转化为 II_{BD}型,再采用锚索关键部位二次支护耦合支护技术,变为简单的 II_B型。-750交岔点复合型软岩具体转化力学对策如图2所示。

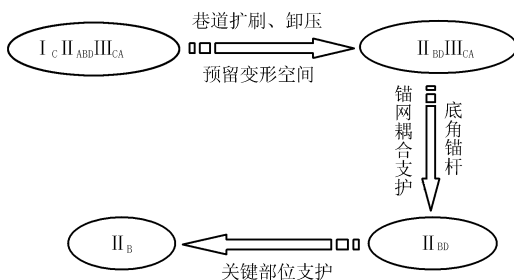


图2 变形力学机制转化图

3.2 主要支护对策及分析

3.2.1 锚索关键部位耦合支护技术

巷道开挖后,首先对围岩施加锚网支护,通过巷道顶底板、两帮移近量以及锚杆托盘应力的监测,确定支护的最佳时间(段),对巷道围岩关键部位施加高预应力的锚索,使围岩和支护体达到耦合支护力学状态。其支护的主要特点是:(1)施加锚索时,锚索的预紧力要和锚杆的预紧力相匹配,最大限度地

发挥刚性锚杆的支护能力;(2)利用锚索的二次支护时间间隔,充分转化围岩中膨胀性塑性能,最大限度地利用围岩的自承能力;(3)合理确定锚索的二次支护时间,适时支护巷道,发挥锚索的最佳效应。

3.2.2 双控锚杆“牛鼻子”加固

资料表明^[7],交岔点掘进后,由于受交接巷道顶板卸压区和两帮的支承压区相互叠合影响,“牛鼻子”为交岔点施工的应力最集中的部位,应力集中系数较开凿前提高 40%~50%。在交岔点的“牛鼻子”部位,岩体两次遭到爆破作用。因此,交岔点周围形成裂隙区的深度,往往增大若干倍,支护体的承载能力增大后,工作条件恶化。交岔点维护良好,不仅可以减小高应力积聚,而且起到一定的减跨作用。当巷道掘到“牛鼻子”处后,设计要求采用双向锚杆加槽钢穿眼加固“牛鼻子”部位。“牛鼻子”掘出后,最小处不能打锚杆,初喷混凝土 50 mm,两边铺网处加 4 道钢带,用螺栓锚杆全长紧固固定,安装好后复喷混凝土 100 mm。

3.2.3 底角锚杆+底板卸压控制底板

深部高应力条件下,对底板未采取任何支护或相应措施的开放式支护结构,会导致巷道出现不同程度的底臃,不利于巷道的维护。使用底角锚杆可以有效切断滑移线场,控制底板变形。为验证底角锚杆的力学效应,采用了 Flac^{3D} 软件,模拟交岔点在最大水平应力作用下的底板变形情况。分为开放式底板和施加底角锚杆后的底板 2 种工况,模拟结果见图3和图4。可以看出,在底板无支护的情况下,位移相对较大,最大值达 10 cm,底臃区域范围扩大。根据底板 Z 向位移监测曲线分析,底臃仍在继续,可见在未设底角锚杆的情况下巷道底臃很难得到有效控制。

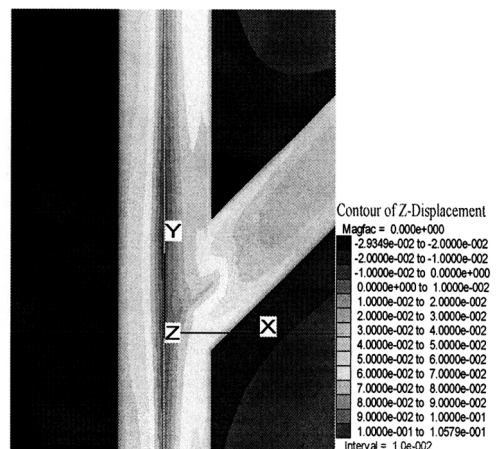


图3 开放式底板 Z 向位移分布图

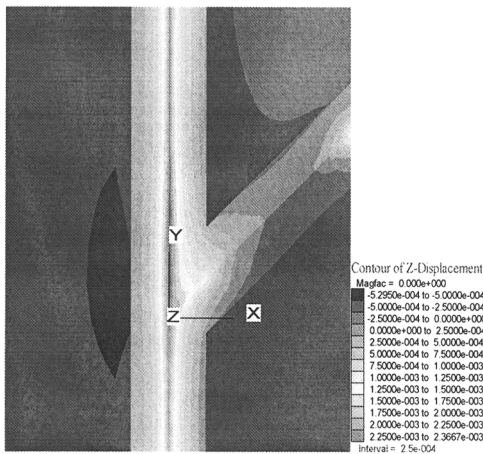


图 4 采取有效控底措施后的底板 Z 向位移分布图

为加设底角锚杆的底板垂向位移图,由于底板采取了支护措施,底板集中应力降低,底臃量减小。同时对改善顶板及两帮的受力、控制两帮变形起到了积极作用。

针对水平构造应力对底板的横向挤压作用,在巷道局部配合使用了卸压孔。卸压钻孔施工后,为底板的膨胀提供了自由空间,初步计算,卸压钻孔的施工工程量可以为单位巷道长度提供的空间为 $1 \times 3.14 \times (0.042 \div 2)^2 \times 2 = 0.029 \text{ m}^3$ 。按平均巷道宽度 4 m 计算,这就意味着该区域单位巷道的底臃量减少近 0.01 m。参见图 5。

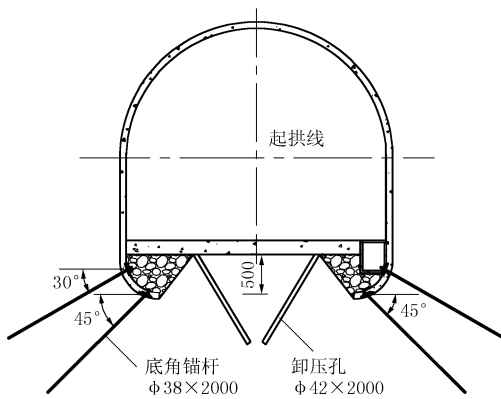


图 5 底角锚杆与卸压孔结合控制底臃示意图

3.2.4 施工顺序的优化

根据施工过程优化原则,采用先掘主巷,后开挖支巷的施工顺序。初喷 50 mm 厚混凝土,然后打锚杆、挂网,复喷 100 mm 厚的混凝土。“牛鼻子”和迎脸施工完成后,掘副巷开窝。

断面掘进采用上下台阶施工,交岔点由小到大正向施工,每前进一步左帮扩大 300 mm,顶板抬高 100 mm。当两帮刷大到 7400 mm 时,以 7400 mm 中线为准,掘至 5 断面处后回头刷大交岔点,并逐渐扩

大到最大断面。

施工中要求减小“牛鼻子”两侧的炮眼间距,从底板向上都要留光爆层,必要时可增加一部分空眼。两侧巷道炮眼同时起爆,尽量减少对“牛鼻子”的震动。施工中如顶板围岩破碎,可及时采用超前锚杆支护法,有效地控制顶板,预防顶板冒落。所以,在交岔点的施工应推广使用光爆锚喷技术。在条件允许时,尽量采用全断面一次成巷,以防止围岩松动。

3.2.5 支护参数的优化

深部大跨度软岩巷道支护参数的确定,原则上依据弹塑性理论和围岩软化模型,并结合工程类比方法进行确定。

3.2.5.1 锚索

锚索的长度应在巷道极限跨度的 1.5 倍左右,取 8 m。由于深部工程载荷加大,且有剪应力存在,最大断面采用 7 根 $\text{Ø}18.9 \text{ mm}$ 钢绞线锚索,树脂药卷 CK2335 一个,Z2360 二个,锚索间排距 2.1 m,随断面减小,锚索逐次减少到 3 根,为非对称布置。

3.2.5.2 锚杆

锚杆的长度以产生塑性软化区的范围确定,沿巷道周边布置 $\text{Ø}20 \text{ mm} \times 2200 \text{ mm}$ 的左旋无纵筋螺纹钢锚杆,最大断面锚杆数量为 21 根,间排距 800 mm \times 800 mm。树脂药卷 CK2335 一个,Z2360 二个,采用加长锚固锚杆。

3.2.5.3 底角锚杆

底角锚杆的力学机理是切断软弱岩层在深部高应力作用下产生的塑性滑移线,削弱水平方向应力对底板的挤压。施工中,专门设计选用了具有较高抗弯刚度的中空管作底角锚杆。

3.2.5.4 金属网

软岩巷道对网的作用要求很高,通过网对巷壁的约束,能够有效改善围岩应力状态,发挥锚固体的整体效能。采用专门设计的具有较高刚度的 6 号钢筋焊接平网,将网格尺寸减小为 80 mm \times 80 mm,改善了帮顶部的整体支护效果。

4 支护效果

从徐庄矿 II₃ 采区 1 号交岔点采用新支护方案的情况看,支护状况良好,近 2 个月的观测显示,巷道两帮的最大相对移近量仅为 75 mm,顶底板的相对移近量为 60 mm,最大离层量为 10 mm,工程围岩变形已基本稳定。实践证明,采用锚网(索)喷 + 底角锚杆的支护方案较为成功。

(下转第 47 页)

2 为验证数据统计表,从表中数据看出,2 台样机的技术参数达到了设计的技术指标,井下解卡打捞时方便、可靠,能够满足现场使用要求。

表 2 设计图样完成后第一、二台样机试验数据表

工作压力/MPa	上提拉力/kN	
	第一台样机	第二台样机
1	28.5	29.4
5	143.8	147.2
10	289.1	294.5
15	435.3	441.6
20	578.4	589.0
25	720.7	736.3

3 应用效果及经济效益分析

液压式井下解卡器打捞工艺技术已经在胜利油田孤东区块水平井上成功应用,试验施工成功率达到 100%。其中孤东 7 - 平 3 井,该井水平段长 601.31 m,井内落物为皮碗式封隔器 + $\varnothing 108$ mm 镶嵌式金属棉管 25 根,总长度为 184.25 m。该井在应用液压式井下解卡器打捞工艺技术之前进行过 3 次作业,均在几天内砂埋关井,分析为防砂管损坏。针对该水平井实施液压式井下解卡器打捞工艺技术,经多次井下增力打捞,将全部防砂管柱一次捞出。该井经重新防砂作业后,目前生产情况正常稳定。

此外,液压式井下解卡器打捞工艺技术在吉林油田应用效果较好,并取得规模效益。2007 年,我厂将进一步开展液压式井下解卡器打捞工艺技术现

场应用试验。

实践证明,使用液压式井下解卡器打捞工艺技术经济效益明显。

(1) 针对作业拔不动的油水井施工时,避免了采用地面解卡机存在的安全隐患,整个液压井下解卡过程中不存在安全隐患。

(2) 解决拔不动管柱采用全部上大修架子处理则需要大量的作业成本的实际问题,按照每上一部大修架子费用为 5000 元,则针对拔不动作业井每口可节约 5000 元,减少了施工工序,提高了作业施工效率。

4 结论及认识

(1) 使用液压式解卡工艺管柱可使打捞管柱的受力状况发生改变,该项工艺技术可应用于各种管柱拔不动的作业施工井。

(2) 由于液压式井下解卡器以上管柱在打捞过程中不受力,因此该项技术也可在常规小修队打捞作业中推广应用。

(3) 这项打捞工艺技术的研究成功,解决了水平井落物管柱不能打捞难题,并在国内首次从水平段内整体打捞出 184 m 长的防砂管柱。

参考文献:

- [1] 叶金胜,等. 水平井防砂管柱打捞技术[J]. 石油机械,2002,(9).

(上接第 57 页)

5 结语

(1) 锚索网支护体系可以有效控制深部交岔点工程的变形,支护结构合理,可以充分发挥其支护的柔性、主动、高强以及让压等特点,对复杂地质条件下的软岩交岔点也是较为适用的。

(2) 深部交岔点的支护设计,应通过对其变形力学机制的研究,确定最优的支护参数设计和最佳的施工过程设计。

(3) 锚索在调动深部岩体应力、发挥支护体的整体力学效应方面具有很大的优越性,锚索支护要强调最佳支护时间和选择关键部位进行二次支护。

(4) 深部高应力软岩条件下,交岔点工程底板必须采用有效的控制措施。底角锚杆与卸压孔相结合可以改善底板应力集中,起到一定的卸压作用,有

利于整个支护系统的优化设计。

(5) 深部交岔点关键支护技术中所采用的施工工艺已趋完善,可以在类似条件下推广应用。

参考文献:

- [1] 靖洪文,何国彬,等. 深井软岩巷道锚网支护试验研究[J]. 建井技术,1994,(4,5):28-30.
- [2] 何满潮. 深部的概念体系及工程评价指标[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16):2854-2857.
- [3] 何满潮,景海河,孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [4] 朱维申,李术才,程峰. 能量耗散模型在大型地下洞群顺序优化分析中的应用[J]. 岩土工程学报,2001,23(3):333-336.
- [5] 谭学术,鲜学福,郑道访,等. 复合岩体力学理论及其应用[M]. 北京:煤炭科学出版社,1998. 38-46.
- [6] 朱维申,何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京:科学出版社,1995.
- [7] 史天生. 巷道交岔点的围岩变形规律及支架计算方法[J]. 冶金矿山设计与建设,1995,(5):7-11.