

潘二矿松软破碎巷道群大变形失稳机理及 支护技术优化研究

卢兴利¹, 刘泉声¹, 苏培芳², 崔文泰¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院
国家大坝安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 随着煤炭资源转入深部开采阶段, 深井巷道尤其是巷道群的围岩稳定控制已成为重大的技术难题。基于淮南潘二矿东二采区井底车场巷道群现场工程, 采用现场工程地质调查、室内试验、数值仿真和理论分析等手段, 系统分析了巷道群围岩及支护结构的变形开裂特征及失稳机理, 提出了预应力组合锚杆(索)-U 型钢支架-分步注浆控制巷道帮顶、帮角/底角锚杆-底板预应力锚索控制底板的深部松散破碎巷道群稳定性综合控制对策和设计方案, 并将研究成果应用于工程实践, 通过现场监测验证了分析方法及控制对策的合理性和有效性。

关键词: 巷道群; 变形开裂; 失稳机理; 支护优化

中图分类号: TU441.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S1-0097-06

作者简介: 卢兴利(1981-), 男, 山东济南人, 博士, 助理研究员, 主要从事地下工程稳定性分析及岩土工程加固技术等方面的研究工作。E-mail: xingli12617@163.com。

Instability mechanism and bracing optimization for roadway groups with soft and fractured surrounding rock in Pan'er Coal Mine

LU Xing-li¹, LIU Quan-sheng¹, SU Pei-fang², CUI Wen-tai¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. National Dam Safety Research Center, Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: Based on the roadway groups in the shaft station of the second east mining area, Pan'er Coal Mine, the characteristics of deformation and fracture of surrounding rock and bracing structure as well as their instability mechanism are analyzed by means of the engineering geological investigation, laboratory experiment, numerical simulation and theoretical analysis. An integrated multiple-step control measure and the design method for the roadway groups with soft and fractured surrounding rock are put forward, which mainly include pretension bolt and cable-steel support-grouting to control the roof and sidewalls, and at the same time side/floor corner bolt-pretension cable in the floor to control the floor. The research achievements are applied, and the in-situ monitoring results show the proposed method and the control strategy are scientific, rational and effective.

Key words: roadway group; deformation and fracture; instability mechanism; bracing optimization

0 引 言

随着煤炭资源转入深部开采阶段, 深井巷道尤其是巷道群的围岩稳定控制已成为重大的技术难题, 而井底车场作为煤炭矿井主要运输和通风巷道, 构成了复杂的巷道群体系。与一般巷道相比, 井底车场巷道群通常断面较大, 且密集布置, 巷道相互间开挖扰动效应显著, 加之服务年限长, 因此其围岩稳定控制设计、施工都提出了一系列严峻挑战^[1]。

当前, 国内外研究学者^[2-9]针对煤矿深井巷道破坏

机理和控制技术已开展了一些有益研究, 逐渐形成了诸多深部软岩工程支理论和支持技术, 解决了大量软岩工程问题。但相关研究成果多是从巷道群中单一巷道稳定性出发, 研究各自的稳定控制技术和支护方法, 难以从总体上阐明巷道群围岩破裂失稳机理及支护结构的力学特性。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202224); 国家自然科学基金重点
项目(41130742); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-05)
收稿日期: 2013-03-01

本文针对深井巷道群围岩稳定性控制和支护技术难题,以淮南潘二矿东二采区井底车场巷道群为工程原型,采用现场工程地质调查、室内试验、数值仿真和理论分析等手段,系统分析了巷道群围岩及支护结构的变形开裂特征及失稳机理,并在此基础上提出了松软破碎巷道群围岩稳定性综合控制技术,以期对矿井的安全生产及今后开展的类似工程提供参考依据。

1 巷道群工程地质条件分析

1.1 工程概况

潘二矿东二采区井底车场巷道群由轨道巷、胶带机巷、回风巷组成,巷道群处于-520 m水平,且布置于11层煤底板。由于地质结构复杂、岩体强度相对较低、高地应力等因素的影响,其3条大巷在施工过程中面临前所未有的支护难题。井底车场自开工建设时起就出现了较多的围岩变形开裂现象,而且混凝土喷层开裂片帮,U型钢支护体失效等现象严重威胁到巷道群的稳定性和施工运营期安全,虽采用各种现有的支护工艺、翻修多次仍然未实现成功支护。

1.2 地层岩性

东二采区井底车场巷道群位于寒武系、下奥陶统、上石炭统、二叠系和三叠系、第四系煤系地层中,总体地质构造形态为单斜构造,地层倾角在 10° 左右。3条平行大巷走向与岩层走向一致,为NE342°,岩层倾向为SW72°。沿巷道走向,断层及次生断层发育,掘进期间岩性变化比较大,岩性破碎。从揭露岩性来看,巷道围岩主要分为两类工程岩组:泥岩岩组(包括泥岩、含炭泥岩和砂质泥岩)和砂岩岩组(包括中细砂岩和细砂岩)。

通过室内岩石物理力学试验,并结合现场工程地质调查和淮南矿区深部岩巷围岩分级标准^[10],东二采区井底车场巷道群一般地质情况下围岩分级为Ⅱ级,断层破碎带围岩为Ⅲ级。表1为采用广义Hoek-Brown强度准则^[11-12]估算的典型岩性物理力学特性。

表1 典型岩性物理力学特性

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock

岩体	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)
砂质泥岩	3.6	1.80	1.10	33
泥岩	1.8	0.45	0.85	28
炭质泥岩	1.2	0.40	0.65	27
细砂岩	4.3	3.90	9.00	23

此外,对巷道底板软岩黏土矿物所做的X射线衍射试验结果表明,该处岩样成分主要以石英、高岭石为主,其含量分别达到22%和50%,还有部分绿泥石、伊利石和少量的长石等矿物,但不含蒙脱石,说明岩样为弱膨胀性岩石,但其遇水软化,饱水后力学性质

严重劣化,抗压强度和弹性模量显著降低。

1.3 地应力

东二采区井底车场地应力分布状况则是采用水压致裂法,在回风巷及轨胶联巷现场地应力测试基础上分析得到。测试钻孔分别布置在巷道顶板、底板中部,孔深30 m,钻孔直径为90 mm,测量水平面上的最大与最小水平主应力,而垂直应力则由上覆岩层自重计算得出。

测试分析结果表明,该区域最大水平主应力量值在20.2~21.41 MPa之间,最小水平主应力值也在10.84~10.99 MPa之间,且最大水平主应力方向为NE83°左右;此外,水平应力远大于垂直应力,实测侧压系数平均在1.63~1.70之间,说明该区域水平地应力以构造应力为主。

2 巷道群变形破坏机制分析

2.1 围岩变形破坏特征

东二采区井底车场巷道断面为直墙半圆拱形,净断面尺寸为5100 mm×4050 mm。由于初期对该区域工程支护难度估计不足,巷道原支护形式设计为半封闭U型棚架棚支护,而局部段更是直接采用了锚网喷支护的形式,底板则未采取任何支护措施,其具体支护参数如表2所示。

表2 原支护材料及规格参数

Table 2 Specifications of original bracing materials

支护形式	规格参数
29U钢支架	排距500 mm
锚杆	$\Phi 20 \times 2200$ mm,排间距700 mm×700 mm
金属网	$\Phi 6$ mm钢筋,网格尺寸100 mm×100 mm,每片尺寸2200 mm×800 mm
喷浆	喷厚100 mm,强度C20

采用上述支护形式,在初期掘进过程中,就出现了围岩及支护体变形,巷道破坏严重,虽经数次翻修,但变形还在持续加剧,直接威胁巷道安全。经大量现场调查和实测分析,东二采区井底车场巷道群变形破坏以水平收敛和底臃变形为主,巷道围岩变形表现出非对称变形的特点,且具有以下鲜明特征(图1):

(1)巷道两帮收敛量较大,右帮移近量明显高于左帮,且顶板出现不同程度离层,变形严重地段巷道断面形状由直墙半圆拱形变为三角形或其它不规则形状。

(2)巷道底臃量大,且明显地偏于右侧,导致轨道不均匀抬起和扭曲,严重影响巷道正常使用。同时,多次卧底也加剧了顶板和两帮的变形。

(3)支护体破坏失效,U型棚腿普遍出现明显

收缩, 多处出现棚腿弯曲, 卡缆开裂, 部分锚杆拉断失效。

较显著, 同时应力和位移均呈现出明显的非对称性。3 条巷道围岩应力分布明显偏于右侧, 但左帮附近压应力均大于右帮, 这一方面将造成左帮出现片剥现象, 另一方面, 较高压应力导致左帮发生压缩变形, 宏观表现为左帮的压缩沉降; 同时, 巷道群各巷道间围岩应力集中程度较大, 对帮部稳定不利。

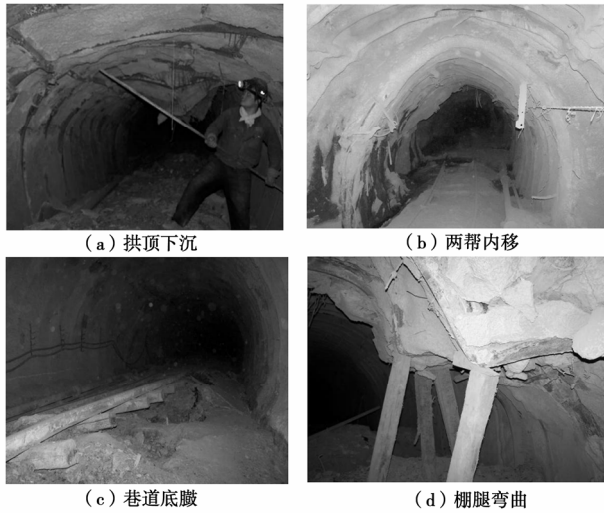


图 1 巷道变形破坏特征

Fig. 1 Characteristics of deformation of roadway

2.2 围岩变形破坏模拟分析

基于潘二矿东二采区井底车场工程地质概况, 并参考 3 条大巷的空间位置关系, 采用国际通用的有限差分法程序 $FLAC^{3D}$ 进行了巷道群围岩稳定性数值分析。计算模型范围为 $115\text{ m} \times 15\text{ m} \times 45\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高), 共划分为 171500 个单元, 191464 个节点 (如图 2 所示)。该模型侧面限制水平移动, 底部固定, 模型上表面为应力边界, 施加的载荷为 11.88 MPa, 模拟上覆岩体的自重边界; 水平 x 向和 y 向侧应力荷载大小分别取 20.8, 10.9 MPa, 其中 x 向水平主应力与巷道走向的夹角为 79° 。模型中围岩材料采用 Mohr-Coulomb 屈服准则, 并根据表 1 确定计算模型的基本参数。模拟开挖顺序采用原设计开挖方案: 胶带机巷 \rightarrow 轨道巷 \rightarrow 回风巷。

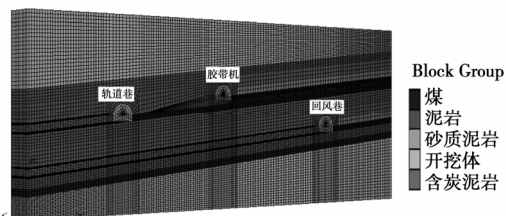


图 2 工程地质计算模型

Fig. 2 Model of engineering geology

图 3~5 分别为开挖原支护条件下巷道群围岩位移、应力和塑性区分布图。从图 3~5 中可以看出, 巷道群开挖后顶、底板围岩局部区域产生较大的拉应力, 同时两侧拱肩、帮角和底角应力集中现象明显, 发生剪切屈服。由于没有采取任何加固措施, 最大位移出现在巷道底板围岩中, 而两帮位移、顶板下沉量也比

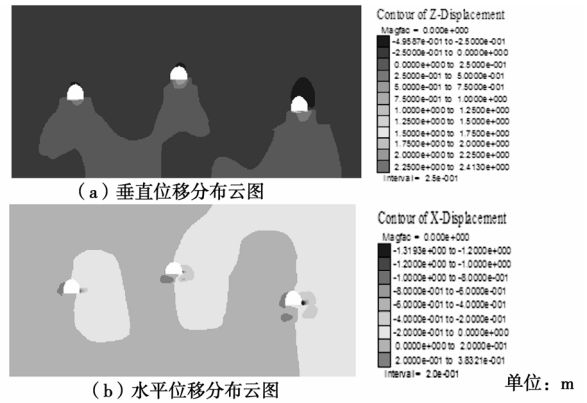


图 3 原支护条件下位移分布云图

Fig. 3 Distribution of displacements under original bracing

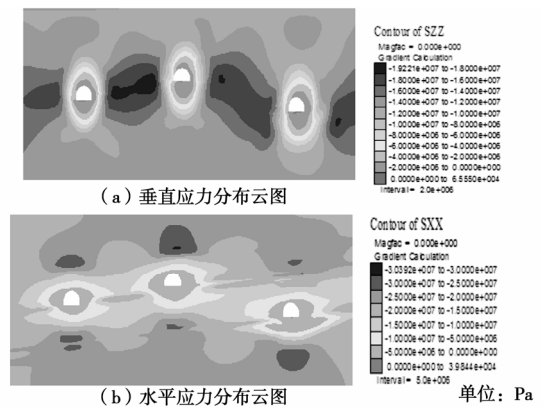


图 4 原支护条件下应力分布云图

Fig. 4 Distribution of stresses under original bracing

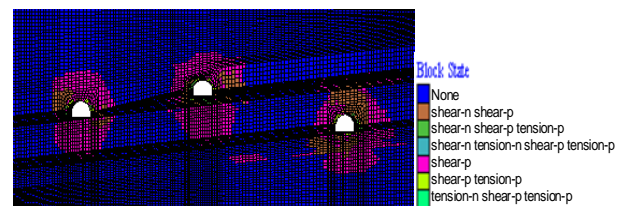


图 5 原支护条件下塑性区分布

Fig. 5 Distribution of plastic zones under original bracing

2.3 围岩变形失稳机理

根据现场工程地质调查并结合上述模拟分析, 东二采区井底车场巷道群变形失稳机理分析如下:

(1) 从力学角度看, 地应力是引起巷道变形和破坏的根本作用力。因此, 在矿井巷道布置设计初期, 就需掌握巷道工程的应力环境, 确定是否有构造应力作用以及构造应力的大小和方向。显然, 东二采区井

底车场巷道群巷道设计前期并没有对巷道围岩地应力场进行系统分析研究。而根据现场地应力测试分析结果,东二采区井底车场巷道布置极不合理,其实测最大水平主应力方向为 NE83°左右,而3条主要大巷走向为 NE342°,二者夹角近乎垂直,这也是导致巷道变形破坏普遍以水平收敛和底臃变形为主的主要原因。

(2) 东二采区井底车场围岩强度低,松软破碎,表现出极强的流变性,加之巷道群断面较大,密集布置,巷道相互间受工程扰动影响很大。此种围岩条件下,不同的施工顺序会产生完全不同的应力分布结果,然而原巷道设计没有考虑到这一点,更没有进行相应的开挖顺序优化。

(3) 受东二采区地应力赋存环境、岩层产状及巷道空间布置等方面的影响,一方面巷道群单个巷道围岩应力场表现出一定的非对称,另一方面这种非对称应力场彼此间相互作用,在巷道群围岩更大范围内形成相互贯通的非对称应力场,从而导致变形的非对称。

(4) 东二采区井底车场巷道群布置在缓倾岩层岩体结构中,围岩松散、软弱,整体性差,承载能力较低,碎胀特点明显(见图6)。层理与巷道轮廓线为锐角的部位,法向应力分量 σ_n 加强了层理间法向的约束作用,剪切滑移变形较小,而层理与巷道轮廓线为钝角的部位,法向应力分量 σ_n 会削弱层理间法向的约束作用,剪切滑移变形较大。同时,由于巷道帮部与底板岩性更为软弱,在高应力作用下,巷道变形破坏的产生与发展将始于帮部和底角,尤其是巷道右帮与右侧底角在发生剪切滑移的基础上产生挠曲变形,松软破碎的岩体沿最大应力梯度方向向临空区挤出,发生挤出型流动性破坏,并最终导致巷道变形的非对称。

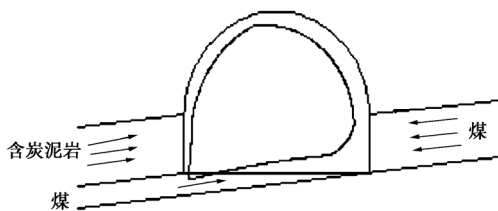


图6 典型巷道非对称变形模式

Fig. 6 Asymmetric deformation pattern of a typical roadway

3 支护对策及优化方案

3.1 支护对策

根据现场调查及模拟分析结果,结合现场施工的可靠性及经济合理性,东二采区井底车场巷道群围岩变形控制措施主要从以下5个方面考虑:

(1) 加强围岩中关键部位(巷道顶、底板及两侧

边墙)的控制,采用高强或超高强锚索及时主动控制围岩,以提高围岩抗剪强度,调动深部围岩承载能力。

(2) 高应力软弱围岩松散破碎,可锚性差,必须对破裂围岩进行固结,以恢复提高围岩的完整性和整体强度,并配合锚网索支护,扩大支护结构有效承载圈范围。

(3) 采取有效的底臃控制措施。在锚网索耦合支护控制好巷道顶帮围岩的同时,必须对巷道底板进行控制,以防止巷道底臃。一方面通过采取打帮角锚杆及底角注浆锚杆的方式,减弱该处围岩的应力集中程度,避免帮角过早破坏而引起巷道两帮与底板的较大变形,以有效防止底臃或减小底臃量。另一方面,通过底板锚注支护,加固巷道围岩的松动破碎带,增强围岩的完整性,提高岩体强度和锚索的锚固力。

(4) 针对非对称变形,还应采取非对称支护形式。为防止帮部大变形,在U型棚支护基础上,采用锚索结合槽钢梁在巷道右帮合适位置进行锁棚,以改善拱形支架抗侧压低的弱点,并提高拱形支架的承载能力。

(5) 对巷道群而言,还须考虑巷道开挖顺序引起的施工过程力学效应,减少巷道相互间开挖扰动的影。根据前期优化分析^[13],先开挖、支护两侧巷道,后开挖、支护中间巷道对围岩应力扰动最小,即回风巷和轨道巷超前,迎头远超前迎头胶带机巷。

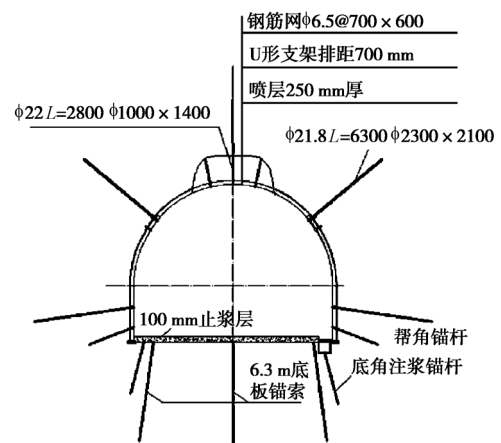


图7 支护设计布置图

Fig. 7 Layout of bracing design

3.2 支护参数优化

根据上述确定的巷道群围岩稳定性控制对策,在原支护的基础上提出以下支护加固方案(图7):

(1) 巷道刷扩后,采用29U型钢支架作为临时支护,支架间距为700mm,采用传统卡子连接,地面预制,井下装配。同时,在巷道拱部和直墙铺设钢筋笆片,规格为 $\phi 6.5$ mm,网格尺寸为100mm \times 50mm,每片尺寸700mm \times 600mm。

(2) 初喷厚度50mm,并覆盖型钢支架,喷射

混凝土强度等级 C20。

(3) 帮顶全断面注浆。首先进行浅孔注浆, 注浆参数为: 注浆孔长 1000 mm, 注浆管长 500 mm, 其排距为 2100 mm, 间距为 1.5 m。每断面布置 7 根, 注浆压力 1.5 MPa, 封孔长度 300 mm。待浅孔注浆形成强度后, 再进行深孔注浆, 注浆参数为: 注浆孔长度 5000 mm, 注浆管长 3000 mm, 排距 2.1 m, 间距为 1.5 m。每断面共布置 8 根深孔注浆管, 注浆压力大于 4.0 MPa, 封孔长度 500 mm。

(4) 根据前期锚杆支护受力状况和围岩软弱的特点, 帮顶高强预应力锚杆规格设计为 M24- ϕ 22 L =2800 mm, 间距 1000 mm, 排距 1400 mm, 配有 150 mm \times 150 mm \times 8 mm 托盘, 预应力 50 kN, 锚杆抗拔力不小于 100 kN, 扭矩不小于 120 N \cdot m。每孔使用 2 卷 Z2850 型树脂药卷。

(5) 帮顶锚索垂直于巷道轮廓线布置, 每断面布置 5 根锚索, 设计参数为 ϕ 21.8 mm, L =6000 mm, 排距 2100 mm, 预应力大于 150 kN。并配合 400 mm \times 400 mm \times 15 mm 大托盘安装, 每孔使用 4 卷 Z2850 型树脂药卷。锁腿锚梁采用 #20 槽钢 (或 110 mm 高工字钢) 制作, 内加 160 mm \times 160 mm \times 10 mm 的钢板。相邻锚梁交错布置, 其位置关系见图 8。

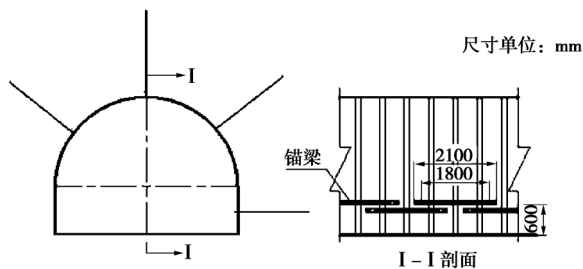


图 8 锚索梁布置示意图

Fig. 8 Layout of cable with channel steel

(6) 底臃治理采用预应力锚索加底板注浆的联合支护技术, 底板锚索孔施工采用 DZQ-300 型风动底板锚索钻机, 该钻机的一个显著特点就是干孔钻进, 冲击碎岩, 强风排渣, 从而减小了围岩遇水软化及膨胀的可能性。底板锚索为 3 根 21.8 mm, L =6300 mm, 排距 3000 mm, 与巷道底板成 15° 或者垂直, 预应力不小 150 kN。底板注浆在锚索孔中进行, 注浆深度 6.0 m, 压力 4 MPa。同时, 在两帮墙脚向上 0.2~0.3 m 处各增加一根俯角为 45° 倾斜向下的帮角锚杆, 并在底板两端距边墙 0.2 m 的位置按外倾 15° 角各施作一根底角注浆锚杆。

4 支护效果评价

4.1 现场工程应用效果

现场采用新支护方案后, 为检验支护效果, 完善、优化设计方案, 在试验段设置了若干监测断面, 对围岩变形进行了详细观测和记录, 优化支护后巷道群各巷道围岩变形的现场观测曲线见图 9 所示。从中分析可知:

(1) 巷道围岩变形得到了较好控制。巷道各部分变形量明显降低, 围岩变形速率最终控制在 0.1 mm/d 以下, 水平收敛、拱顶下沉和底臃 3 条曲线均趋于稳定。以轨道巷为例, 监测断面围岩的累计顶板下沉量为 55 mm, 两帮收缩量为 144 mm, 底臃量 218 mm。

(2) 巷道开挖初期曲线快速上升, 存在明显震荡, 随着锚杆 (索) 特别是底板锚注支护发挥作用, 后期变形速率逐渐减小。

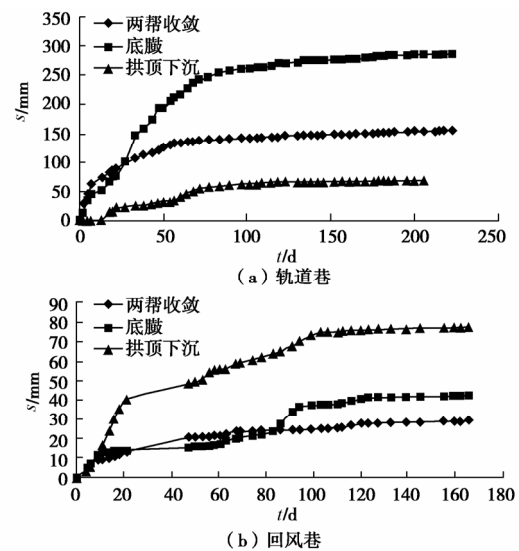


图 9 巷道围岩变形现场实测曲线

Fig. 9 Deformation curves of measuring points

5 结 论

本文在对潘二矿东二采区井底车场巷道群工程地质条件和变形失稳机理综合分析的基础上, 有针对性地提出了深部松软破碎巷道群围岩支护对策与方案, 并通过数值模拟与现场监控量测相结合的方法进行了分析验证, 得出如下 5 点主要结论。

(1) 巷道轴向与最大水平主应力的夹角近乎垂直是导致东二采区井底车场巷道群变形破坏普遍以水平收敛和底臃变形为主的主要原因。

(2) 缓倾岩层巷道中围岩岩体结构的不对称往往导致应力场分布的非对称, 并进而导致巷道变形破坏的非对称。由于东二采区井底车场巷道群布置在缓倾岩层岩体结构中, 围岩松软破碎, 在高应力作用下, 巷道右帮与右侧底角首先发生剪切滑移, 并产生挠曲变形, 松软破碎的岩体沿最大应力梯度方向向临空区

挤出,发生挤出型流动性破坏,并终导致巷道变形的非对称。

(3) 巷道支护是一个复杂的系统工程,单纯对帮顶进行加固难以奏效,必须通过对顶底板、两帮和底角的联合控制来实现。此外,对巷道群而言还须考虑巷道群施工过程力学效应。

(4) 现场量测结果表明,采用新支护设计方案后,巷道变形得到了较好控制,围岩位移在允许的变形范围之内,说明该设计方案能较好地控制围岩变形,现巷道的长期稳定性,因而可在淮南矿区其他类似深部巷道群围岩中推广应用。

参考文献:

- [1] 刘泉声,高玮,袁亮. 煤矿深部岩巷稳定控制理论与支护技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (LIU Quan-sheng, GAO Wei, YUAN Liang, Stability control theory and support technology of roadway in deep coal and its application[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [2] 刘泉声,张华,林涛. 煤矿深部岩巷围岩稳定与支护对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3732-3737. (LIU Quan-sheng, ZHANG Hua, LIN Tao. Study on stability of deep rock roadways in coal mines and their support measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3732-3737. (in Chinese))
- [3] 孙晓明,何满潮,杨晓杰. 深部软岩巷道锚网索耦合支护非线性设计方法研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1061-1065. (SUN Xiao-ming, HE Man-chao, YANG Xiao-jie. Research on nonlinear mechanics design method of bolt-net-anchor coupling support for deep soft rock tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 27(7): 1061-1065. (in Chinese))
- [4] 康红普,王金华,林健. 高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(12): 1233-1238. (KANG Hong-pu, WANG Jin-hua, LIN Jian. High pretensioned stress and intensive bolting system and its application in deep roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(12): 1233-1238. (in Chinese))
- [5] 王其胜,李夕兵,李地元. 深井软岩巷道围岩变形特征及支护参数的确定[J]. 煤炭学报, 2008, 33(4): 364-367. (WANG Qi-sheng, LI Xi-bing, LI Di-yuan. Surrounding rock deformation properties and determination of support parameters of soft rock roadway in deep mine[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(4): 364-367. (in Chinese))
- [6] 王卫军,李树清,欧阳广斌. 深井煤层巷道围岩控制技术及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2102-2107. (WANG Wei-jun, LI Shu-qing, OUYANG Guang-bin. Study on technique and test of surrounding rock control of deep shaft coal roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2102-2107. (in Chinese))
- [7] 刘泉声,卢兴利. 煤矿深部巷道破裂围岩非线性大变形及支护对策研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3273-3279. (LIU Quan-sheng, LU Xing-li. Research on nonlinear large deformation and support measures for broken surrounding rocks of deep coal mine roadway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3273-3279. (in Chinese))
- [8] 何满潮,景海河,孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (HE Man-chao, JING Hai-he, SUN Xiao-ming. Soft rock engineering mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [9] 靖洪文,许国安. 地下工程破裂岩体位移规律数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1281-1286. (JING Hong-wen, XU Guo-an. Numerical analysis on displacement law of underground broken rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1281-1286. (in Chinese))
- [10] 袁亮. 深井巷道围岩控制理论及淮南矿区工程实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006. (YUAN Liang. Control of surrounding strata in deep mine roadway and practice in Huainan area[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2006. (in Chinese))
- [11] HOEK E, CARRANZA-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition[C]// Proceedings of NARMS-TAC 2002, Mining Innovation and Technology. Toronto: University of Toronto, 2002: 26-273.
- [12] HOEK E. Practical rock engineering[M]. North Vancouver BC: Evert Hoek Consulting Engineer Inc, 2006.
- [13] 刘泉声,卢兴利,刘滨,等. 潘二矿井底车场高应力大变形软岩巷道群开挖支护顺序优化研究[R]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 2011. (LIU Quan-sheng, LU Xing-li, LIU Bin, et al. Study on excavation and support optimization for roadway groups with large deformation and high ground stress in paner coal mine[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)