

玲珑金矿主运巷塌陷治理区稳定性 动态综合监测与评价

蔡美峰¹, 孔留安^{1, 2}, 李长洪¹, 来兴平^{1, 3}

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003;
3. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 山东省玲珑金矿有新、旧2条相互平行、相距10 m左右的主运巷(主运输巷道), 其下方为一垂直穿过的脉群采空区。为保护主运巷安全, 在主运巷与采空区之间留有保安矿柱, 并对空区进行毛石充填。由于主运巷下方受到非法民采的破坏, 包括保安矿柱被盗采, 导致新、旧主运巷均发生急剧的塌陷和变形破坏。为维持安全和正常生产, 首先采取一系列特殊技术对旧主运巷进行加固治理, 以恢复其正常运输通行能力。旧主运巷加固治理完毕后, 运输线由新主运巷移至旧主运巷。按原方案, 下一步应采取措施加固治理新主运巷, 但由于经费困难, 此步未能实施。大规模的新主运巷塌陷空区必将对已恢复运行的旧主运巷的稳定性产生重大影响。为监测这种影响, 保证主运输线的安全, 采用多点位移计监测、断面收敛测线、水准测量、应力监测和声发射监测5种手段建立塌陷治理区稳定性监测网。通过对多种手段获得的监测结果进行多元信息耦合分析, 证实玲珑金矿旧主运巷采用符合岩石力学原理的高压锚注技术进行加固治理所取得的突出效果, 同时对已加固治理的旧主运巷和未加固治理的新主运巷共存情况下主运巷的稳定性状态及其发展趋势作出评价, 从而为主运巷下一步加固治理提供依据。

关键词: 采矿工程; 塌陷区; 加固治理; 稳定性; 监测; 评价

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2007)05-0886-09

DYNAMIC COMPREHENSIVE MONITORING AND ASSESSMENT OF STABILITY OF COLLAPSED AREA AFTER SUPPORTING IN MAIN TRANSPORT ROADWAY IN LINGLONG GOLD MINE

CAI Meifeng¹, KONG Liu'an^{1, 2}, LI Changhong¹, LAI Xingping^{1, 3}

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China;
3. School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: There are two parallel main transport roadways in Linglong Gold Mine in which one is old and the other is new. They are apart about 10 m and both cross the mined-out area of a stripe-shaped mineral vein. Due to illegal mining under the roadways, which leads to the safety pillar at the bottom of the roadways being mined out, serious collapsing deformation and subsidence appeared in both transport roadways. In order to maintain normal production and safe operation, the collapsed area of the old transport roadway was firstly treated to recover its normal transport capacity. Some special reinforcing techniques were used for the treatment. After the completion of the reinforcement, the working transport line was moved from the new transport roadway to the old one. At the

收稿日期: 2006-08-11; **修回日期:** 2006-09-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50074002)

作者简介: 蔡美峰(1943-), 男, 博士, 1967年毕业于上海交通大学工程力学专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石力学和采矿工程方面的教学与研究工作。E-mail: caimeifeng@ustb.edu.cn

meantime, the large scale of collapsed area in the new transport roadway was not treated due to financial difficulty, which would give strong influence on stability of the old transport roadway. In order to monitor the stability of the working transport roadway, multipoint displacement measurement, cross-section convergence measurement, leveling measurement, stress measurement and acoustic emission measurement were carried out. The monitoring results showed that the stability of the old transport roadway was quite well in 4 years after it was put into operation, which indicates that the support effect of the special reinforcing techniques used for the old transport roadway is excellent. Due to lasting influence of collapsed area in the new transport roadway, remarkable deformation and local damage were later found in the old transport roadway. An assessment on stability status and its developing tendency was made out based on coupling analysis of monitoring information obtained by different monitoring measures. It provided a reliable basis for decision-making of further reinforcement of the main transport roadway.

Key words: mining engineering; collapsed area; reinforcement; stability; monitoring; assessment

1 引言

1.1 主运巷塌陷区概况

山东省玲珑金矿是我国最大的黄金矿山之一, 1995年前黄金产量长期位居全国第一。255 m 水平主运巷是生产人员、风水电和材料通往主井的必经之路, 也是部分废渣的出口通道, 因而是全矿的咽喉工程。旧主运巷开掘于20世纪70年代, 使用了近20 a。在1992年新建主井时, 作为新主井的措施工程, 又开掘了一条新主运巷, 并将运输线由旧主运巷移至新主运巷。新、旧主运巷相距10 m左右(见图1)。

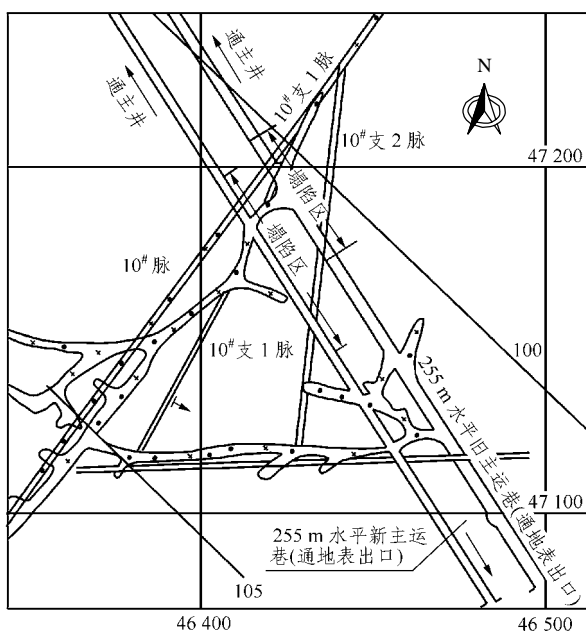


图1 255 m 水平主运巷平面位置图

Fig.1 Plane of main transport roadways in level 255 m

255 m 水平主运巷垂直穿过10#脉群。该矿脉长约2 000 m, 宽10~80 m, 于20世纪80年代开采, 采空区位于255 m 水平主运巷的下方。为保护主运巷安全, 在主运巷与采空区之间留有11 m 厚的保安矿柱, 并对下部空区进行了毛石充填。

255 m 水平旧主运巷从1990年开始变形, 经调查发现变形是由于非法民采所造成, 原先预留的保安矿柱均被民采破坏。1995年, 新、旧主运巷均发生急剧的下沉和变形破坏, 旧主运巷最大下沉达0.6 m, 新主运巷最大下沉达0.5 m, 并伴随大面积片帮、冒顶, 巷道围岩严重松动。前期所作支架变形破坏严重, 巷道断面仅剩原断面的1/2, 断面最小处的尺寸仅为1.4 m×1.9 m, 而原断面尺寸为2.4 m×2.6 m, 电机车几乎不能通行。

主运巷围岩由混合花岗岩、闪长岩、煌斑岩和绢英岩化混合花岗岩组成。岩体中节理、裂隙较为发育。从总体上看, 节理、裂隙的走向集中于NE20°~30°, 倾角普遍较陡, 且节理、裂隙埋藏越浅密度越大、越发育。在正常情况下, 按照CSIR岩体质量分级指标(RMR), 混合花岗岩和闪长岩属于II级岩体(较好), 煌斑岩和绢英岩化混合花岗岩属于III级岩体(中等), 但对于主运巷塌陷段围岩, 由于发生严重松动、破坏, 质量已经很差。

1.2 塌陷区加固治理技术及其特点

由于255 m 水平主运巷是全矿的咽喉工程, 在新、旧主运巷同时发生破坏的情况下, 为了维持正常生产, 矿方采取了一系列的支护加固措施, 如灌浆、钢支架、木架、铁轨钢板铺底等, 花费400~500万元, 年均花费超过200万元。但到1996年底, 巷道的变形破坏已达到无法控制的严重地步。若不

采取断然有效的措施,从根本上对塌陷段进行治理,矿山将陷于停产,后果不堪设想。为此,玲珑金矿委托北京科技大学进行了 255 m 水平主运巷塌陷段加固技术的研究并负责工程施工。由于当时新主运巷是生产运输巷道,因此为了不影响正常生产,必须先加固和恢复旧主运巷,达到彻底加固和根治的目的,待旧主运巷加固完毕后,将运输线改到旧主运巷,然后再采取措施加固新主运巷^[1]。

从 1996 年底开始,对旧主运巷进行加固治理。由于巷道围岩已处于松散状态,而该巷道原先又没有混凝土砌碇之类的衬砌层,因此根本无法直接注浆。其原因一是无法埋设注浆孔口,二是即使直接注浆,也会发生大面积跑浆现象,无法使浆液充分扩散而达到有效加固的目的。同时,由于巷道已严重变形收缩,其断面已不能满足生产运输要求,需要首先拆除钢支架、木棚子等临时支护,将巷道断面扩至原设计大小,然后才能采取喷锚网、混凝土砌碇等加固措施。但由于围岩松动,一经拆除临时支护、顶板围岩就会塌落下来,而无法进行施工。为此,作者改变传统的支护加固方法,采用符合岩石力学原理的“反向思维”加固治理方法^[2-3],即先用废石封堵塌陷段巷道,然后采用“散体成孔”和“双泵双液高压控制注浆”等专有技术对四周围岩进行注浆和锚固^[4-5],待其稳定后重新掘成成巷。由于在加固后的旧主运巷上方围岩中形成了一个拱形承载结构,在其下方形成了一座由锚注结构体组成的跨越空区的桥梁,在其四周形成了一个包围主运巷的管状安全通道,从而实现了加固后旧主运巷的稳定。1998 年初加固治理工程完成后,生产运输线随即由新主运巷移至旧主运巷。移后仅半个月,新主运巷即发生了大规模塌陷。若不是旧主运巷的及时加固治理成功,该矿当时就会发生一次重大安全事故,并使全矿陷于停采。

2 稳定性动态综合监测方法和监测网布置

2.1 监测方法

按原计划,在旧主运巷加固治理完成后,将立即开始治理新主运巷。但由于当时资金紧张等原因,该计划未能按时执行。由于新、旧主运巷相距只有 10 m 左右,那么新主运巷不治理将对旧主运巷的稳定性产生严重影响。为了保证作为运输线的旧主运巷的安全和正常运营,北京科技大学再次受山东黄

金集团公司玲珑金矿委托,进行了主运巷塌陷治理区稳定性的现场监控与评价研究。研究的主要目标是对旧主运巷的地压活动规律、稳定性状况以及新主运巷围岩的变形破坏动态和对旧主运巷稳定性的影响进行实时监测,对危险情况作出预测和预报,以便及时采取相应措施,控制主运巷的变形和破坏,保证运输和生产的安全^[6-7]。

现场监测采用断面收敛监测、水准测量、多点位移计监测、应力监测和声发射监测等多种手段,建立监测网,进行全方位的实时监测。一种监测手段所获得的数据往往带有局限性或偶然性,很难做出正确判断。采用 5 种监测手段建立的现场监测网覆盖整个新、旧主运巷塌陷段变形破坏的影响范围,通过 5 种监测手段所获得的监测结果进行耦合分析,就可以做出比较准确和可靠的分析与判断,真正达到预测预报的目的^[8-9]。

2.2 监测手段

(1) 多点位移计监测

本文采用钻孔式多点位移计监测旧主运巷顶部围岩中不同位置深度的位移变化情况。其中,在旧主运巷右上侧围岩(从巷道入口往里看)安装 1 套多点位移计,在左侧围岩(即新、旧主运巷之间的岩墙附近)安装 1 套多点位移计,每套多点位移计安装 2 个监测点。通过多点位移计监测所得位移变化量和位移变化速度,以位移值突然加大、位移变化速度突然加快作为危险情况发生的主要依据。

(2) 断面收敛监测

在旧主运巷安装 5 个监测断面,每个断面采用断面收敛计监测 5 条测线(AB, AC, AD, BC 和 DE 测线,见图 2)的长度变化,从而分析围岩的变形情况。

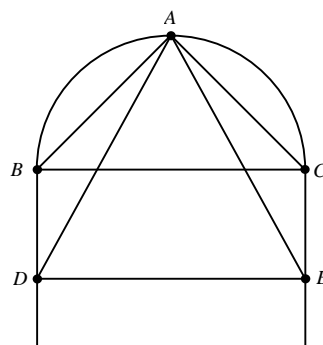


图 2 断面收敛测线布置

Fig.2 Arrangement of cross-section convergence measurement

(3) 水准测量

在巷道内外选择固定点作为基准点,在旧主运

巷原塌陷加固段选择 3 个断面, 另外在距巷道入口 50 m 处加设 1 个断面, 进行水准测量。每个断面安装 4 个测点, 其中顶、底板和两侧各 1 个点, 其主要目的是监测顶、底板的绝对下沉量, 同时也为多点位移计和断面收敛测量结果对比分析提供参考依据。

(4) 应力监测

本文采用钻孔式应力计监测围岩应力的变化情况, 共安装 7 个应力测点, 其中在旧主运巷右侧围岩安装 2 个测点, 在新、旧主运巷之间的岩墙上安装 5 个测点。通过应力监测获得围岩的应力变化量、变化速度及其分布情况, 确定应力集中和应力变化最大的部位, 为分析围岩可能的破坏部位和破坏范围提供依据, 而且主要是以监测的应力值趋近破坏极限和应力变化速度突然加快作为危险情况发生的依据。

(5) 声发射监测

声发射监测是一种新型的综合监测手段。现场共安装了 4 个声发射传感器, 从巷道入口往里依次为 1[#], 2[#], 3[#], 4[#] 传感器。其中, 4[#] 传感器因后来遭破坏, 未能测得完整数据。声发射是岩体破裂发生的一种现象, 通过测量声发射特征参数, 可以判断围岩内部能量的集中和释放, 破裂的发生和发展情况, 为预测围岩内部即将发生的破坏提供了依据, 是一种最直观的岩石临界破坏预测预报手段。可采用声发射的突然加密作为危险情况可能发生的判断依据^[10~12]。

2.3 监测网布置

由上述 5 种监测手段组成的监测网如图 3 所示。

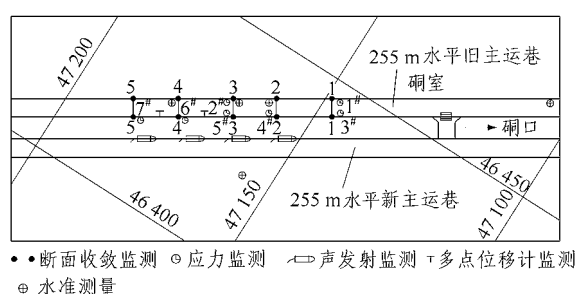


图 3 现场围岩稳定性监测网

Fig.3 Layout of monitoring net in main transport roadway

3 监测结果及其分析

3.1 巷道断面收敛监测

巷道断面收敛监测采用总参工程兵科研三所研制的 QJ85 型收敛计。该仪器监测基线长度为 1.0~15.0 m, 如有特殊要求其长度可为 30.0 m; 读数精

度为 0.01 mm, 量测精度为 0.05 mm。

旧主运巷于 1998 年初完成加固治理后投入使用, 2000 年 3 月在旧主运巷 5 个断面进行收敛变形监测。测量结果及其分析如下:

(1) 2000 年 3 月 1 日~2001 年 12 月 30 日近 2 a 时间中, 各监测断面各测线的收敛变形值如表 1 所示。

表 1 2000 年 3 月 1 日~2001 年 12 月 30 日各监测断面各测线的收敛变形值

监测断面	AB 测线	AC 测线	AD 测线	BC 测线	DE 测线
1-1	3.02	1.98	1.53	-0.49	2.42
2-2	3.09	1.91	-0.11	2.91	2.76
3-3	5.10	4.81	6.47	-5.91	4.87
4-4	-4.58	4.54	3.71	-4.14	1.84
5-5	-2.45	-0.02	-3.93	5.46	6.09

监测结果表明, 各监测断面测线的收敛变形呈现缓慢增加趋势; 多数测线的变形朝一个方向(增加或减少)发展, 少数测线出现增加或减少(拉伸或压缩)的摆动; 不同监测断面相同测线的变化值出现不同的符号, 有的是拉伸, 有的是压缩, 说明不同监测断面处于不同的受力和变形状态; 5 个监测断面的 DE 测线(即下腰线)的变形值均为正值, 处于相同的变形状态。因此, 巷道的变形状态受底部的影响小, 受顶部围岩变形的影响大。在 5 个监测断面中, 3-3 监测断面的收敛变形值相对较大, 该监测断面位于塌陷加固区的中部, 因此其变形值最大是合理的。3-3 监测断面各测线的收敛变形值曲线如图 4 所示。

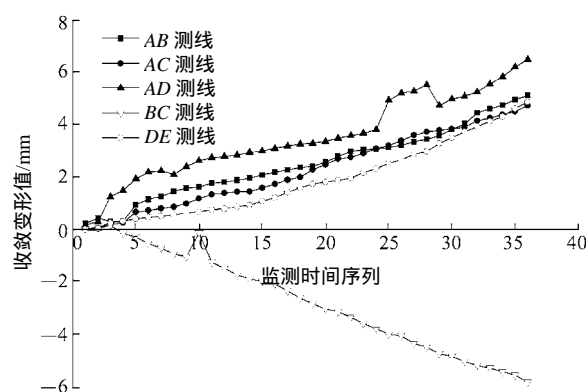


图 4 3-3 断面各测线的收敛变形值曲线

Fig.4 Converging deformation curves of measuring lines in cross-section 3-3

从表 1 可以看出,在近 2 a 的时间内,各监测断面各测线的变形值是很小的,最大变形值仅为 6.47 mm。此时,加固后的旧主运巷已运行了近 4 a 时间,说明在此期间内旧主运巷的稳定性状态是很好的,1997 年加固治理的突出效果得到证实。

(2) 在 2001 年 12 月~2003 年 1 月的 1 a 时间中,巷道的收敛变形出现了大幅度的增加,各监测断面各测线的收敛变形值如表 2 所示。

表 2 2003 年 1 月 5 日各监测断面各测线的收敛变形值

Table 2 Convergence results of measuring lines of various cross-sections on Jan. 5, 2003 mm

监测断面	AB 测线	AC 测线	AD 测线	BC 测线	DE 测线
1-1	-101.15	-162.14	-7.80	-23.16	24.56
2-2	91.00	-77.22	-12.29	118.90	-37.09
3-3	-74.54	36.93	-33.03	6.98	-34.12
4-4	-57.08	-3.13	-50.09	-16.85	-10.65
5-5	-36.23	-2.08	-42.21	52.57	-9.23

对比表 1, 2 可以发现,2002 年巷道的变形形态和 2001 年底之前相比发生了很大变化。很多断面很多测线的变形状态发生了改变,有些由拉伸状态变成了压缩状态,而另一些则由压缩状态变成了拉伸状态,说明其受力状态发生了改变,反映了旧主运巷的围岩受力和变形处于一个动态的变化过程中,而且各监测断面多数测线的变形值为负值,说明巷道断面处于压缩状态的趋势。

各监测断面 AB 测线的变形值普遍较大,该测线位于旧主运巷左上方顶角,是与新主运巷相邻的部位,因而受新主运巷变形破坏的影响较大。这再次说明新主运巷是影响旧主运巷变形和稳定性的控制因素。

变形速度是反映巷道围岩变形和稳定性状态的重要指标。表 3 给出了 2000 年 3 月 1 日~2001 年 12 月 30 日和 2002 年 11 月 5 日~2003 年 1 月 5 日两个期间各监测断面各测线的收敛变形速度。

从表 3 中可以看出,2002 年末,各监测断面各测线的收敛变形速度均比 2001 年底之前有很大增加,普遍高 1~2 个数量级。

从旧主运巷的收敛变形值和变形速度来看,2002 年末该巷道的稳定性趋势已经向不良方向发展,新主运巷的大规模变形破坏是造成旧主运巷不稳定性的关键因素,只有尽早采取有效措施加固治理新主运巷,才能控制不利趋势,保证旧主运巷的

表 3 不同期间各断面各测线的收敛变形速度

Table 3 Deformation speed of measuring lines obtained by convergence measurement in different periods mm/d

监测断面	期间	AB 测线	AC 测线	AD 测线	BC 测线	DE 测线
1-1	①	0.017	0.014 0	0.011 0	0.009	0.018
	②	2.778	2.685 0	1.389 0	0.556	0.089
2-2	①	0.021	0.020 0	-0.000 6	0.355	0.019
	②	0.278	0.463 0	0.185 0	0.185	-0.093
3-3	①	0.035	0.032 0	0.170 0	-0.040	0.042
	②	0.963	-1.481 5	0.388 9	-0.648	-0.222
4-4	①	-0.029	0.025 0	-0.034 0	-0.028	0.012
	②	0.322	-0.148 0	0.500 0	-0.370	-0.370
5-5	①	-0.032	0.001 0	-0.029 0	0.244	0.044
	②	0.648	-0.463 0	0.463 0	-0.556	0.111

注: ①表示 2000 年 3 月 1 日~2001 年 12 月 30 日; ②表示 2002 年 11 月 5 日~2003 年 1 月 5 日。

稳定和正常运行。

3.2 围岩应力监测

围岩应力监测采用煤炭科学研究总院北京开采研究所研制的 KS-1 型钻孔应力计,该型应力计采用钢弦振动原理与液压技术相结合,其压力枕采用充液膨胀的结构形式,与 KSE-1 型频率计配套使用,可用于监测围岩内部的相对应力。该仪器量程为 20~30 MPa,灵敏度为 0.03 MPa/Hz,标定精度为 1.5%,适用钻孔直径为 43~50 mm。

在现场布置的 7 个钻孔应力计中,2-2 监测断面上安装的 4[#]钻孔应力计是垂直放置的,即读数应该为水平应力;其余的应力计全部为水平放置,即读数为垂直应力。需要说明的是,所监测的不是岩体中的绝对应力,而是反映岩体中的应力随时间的变化值,是一个相对值,测量结果(见表 4)反映了岩体中应力的增大或减小趋势。

表 4 各钻孔应力计测量最大值

Table 4 The maximum values of measured stress with stressometer in different boreholes

应力计编号	应力最大值/MPa	位置
1 [#]	15.8	1-1 断面旧主运巷右侧
2 [#]	9.7	3-3 断面旧主运巷右侧
3 [#]	7.8	1-1 断面岩墙
4 [#]	12.4	2-2 断面岩墙
5 [#]	7.1	3-3 断面岩墙
6 [#]	6.8	4-4 断面岩墙
7 [#]	3.6	5-5 断面岩墙

从表 4 中可以看出, 7 个钻孔应力计测得的围岩应力均呈不断增大的趋势。其中, 位于新、旧主运巷之间岩墙上的 3[#], 5[#], 6[#], 7[#]钻孔应力计(分别对应 1-1, 3-3, 4-4, 5-5 断面)的应力最大值分别为 7.8, 7.1, 6.8 和 3.6 MPa, 说明岩墙 1-1, 3-3, 4-4 断面的垂直应力变化基本接近, 而 5-5 断面处的应力最大值较小。这是因为 5-5 断面已处于塌陷加固区的端部, 且其下部基本没有采空区, 因此其稳定性状态更好。岩墙 2-2 断面 4[#]钻孔应力计测的是岩墙中部水平应力变化, 最大值为 12.4 MPa, 表明岩墙中水平应力比垂直应力变化更大。说明在新主运巷及其周围采空区变形、破坏的带动影响下, 旧主运巷在水平方向受到的影响更大。1[#], 2[#]应力计监测的是旧主运巷右侧围岩的垂直应力变化, 分别为 15.8 和 9.7 MPa, 此结果表明旧主运巷右侧围岩中的应力变化比左侧围岩(即岩墙)中的大, 这是因为岩墙的坚固性已受到新主运巷及其周围采空区变形破坏的影响, 其承载能力已大大低于旧主运巷右侧加固后的整体围岩。1-1 断面虽然也处于塌陷加固的端部(与 5-5 断面相反的另一端), 但其下部有较大空区, 故其应力最大值比 3-3 断面处还大。总的来说, 应力最大值是非常显著的, 但对旧主运巷右侧来说, 应力最大值与其强度相比还较低, 不会影响其整体稳定性。但对新、旧主运巷之间厚度很小且强度已受到很大损伤的岩墙来说, 7.8 MPa(垂直方向)和 12.4 MPa(水平方向)的应力最大值已经负担很大。图 5 给出了 1[#], 2[#], 3[#]钻孔应力计所测垂直应力演化趋势。不断增加的应力变化趋势更对围岩稳定性构成了严重威胁。

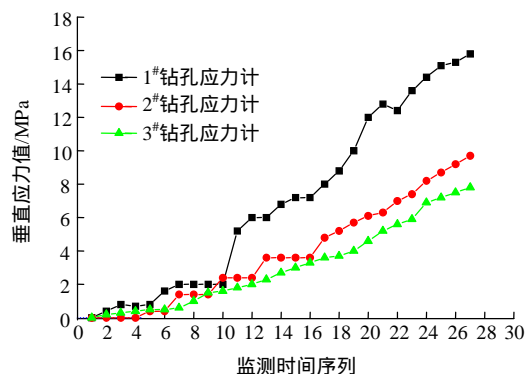


图 5 1[#], 2[#], 3[#]钻孔应力计所测垂直应力演化趋势

Fig.5 Developing tendency of vertical stress at measuring boreholes #1, 2, 3

3.3 多点位移计监测结果

现场共安装了 2 个多点位移计测量孔(位置见图 3), 测量钻孔位于巷道顶部, 近垂直方向。位移

计在钻孔内有 2 个锚头(见图 6)。①号锚头位于围岩深部(距孔口 16 m), 是基准锚头, 该处的围岩位移为 0; 该锚头伸出的钢尺端部和孔口的距离变化即反映了孔口围岩的位移值; ②号锚头距孔口 6 m, 其伸出的钢尺端部和①号锚头伸出的钢尺端部距离的变化, 即反映了②号锚头处的围岩位移值。

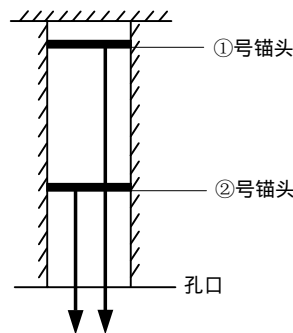
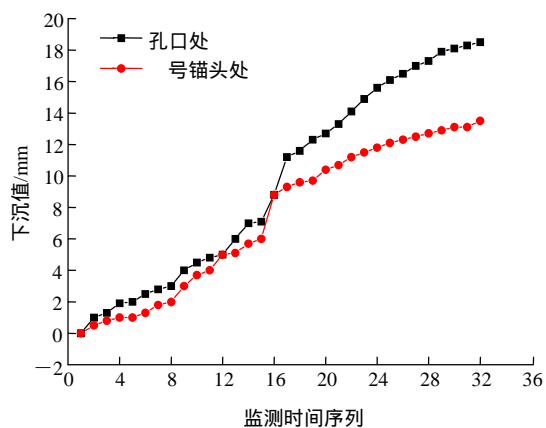


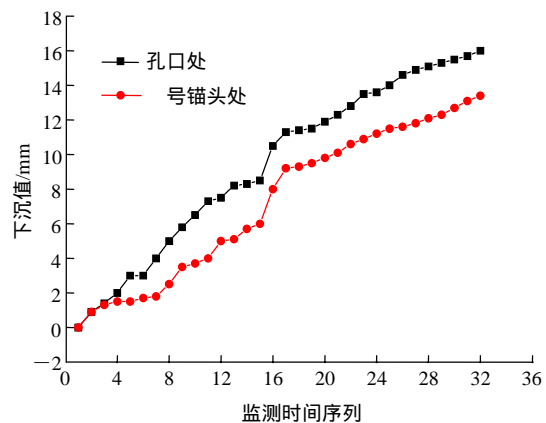
图 6 多点位移计测量孔内测点分布示意图

Fig.6 Layout of measuring points of multipoint displacement meter in borehole

2000 年 7 月~2002 年 12 月的多点位移计监测结果如图 7 所示。由于多点位移计钻孔位于近垂直



(a) 1[#]多点位移计监测结果



(b) 2[#]多点位移计监测结果

图 7 多点位移计监测结果

Fig.7 Monitoring results of multipoint displacement meters

方向, 所以图中所测量数据反映了顶板和围岩内部 6 m 处的下沉值。

从图 7 中可以看出, 旧主运巷所在塌陷区顶部围岩有明显的位移和下沉迹象, 而且位移和下沉量呈不断增加的趋势。2 个多点位移计测得 6 m 深处围岩的下沉值基本接近, 分别为 13.4 和 13.5 mm; 孔口即顶板处的下沉值也比较接近, 分别为 18.5 和 16.0 mm。多点位移观测数据和断面收敛测量及水准测量数据均有良好的一致性。应该指出, 多点位移计观测的顶板位移值偏小, 其主要是因为: ①号锚头的深度不够, 按设计要求, ①号锚头应位于围岩不动处, 大约在 30 m 深处, 由于现场钻孔条件限制, 不能满足此要求, 这样①号锚头也可能有下沉位移, 孔口和 6 m 深处的下沉位移应加上①号锚头处的下沉位移值。

3.4 巷道顶板水准测量结果

为了了解主运输巷顶板的变形情况与断层和采空区工程地质的关系以及其对运输巷道的影响, 先后进行了多次水准测量, 固定点选择在旧主运巷出口顶板处, 1[#]观测点选择在巷道里面距离巷道出口 50 m 处, 2[#], 3[#]和 4[#]观测点分别位于 2-2, 3-3 和 4-4 监测断面附近(见图 3)。图 8 为顶板下沉值水准测量结果(2000 年 1 月 9 日~2002 年 11 月 26 日)。监测结果显示, 旧主运巷顶板下沉变化比较显著, 特别是原塌陷区上部顶板的下沉比较大。水准测量结果和多点位移计监测结果基本一致。

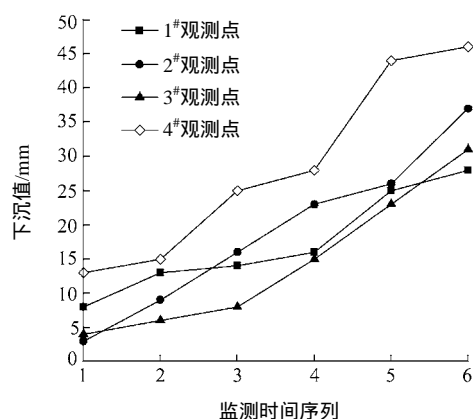


图 8 顶板下沉值水准测量结果

Fig.8 Ceiling subsidence of roof obtained by leveling measurement

3.5 巷道围岩声发射监测

通过声发射监测获得的信号, 可以分析出其 3 个主要特征参数: 总事件数(频率)、大事件数和能率。其中总事件数是单位时间内仪器检测到的声发

射事件累计总数(个/min), 反映声发射频率, 它是岩体出现破坏的重要标志。大事件数是单位时间内仪器检测到的振幅大于设定值(阈值)的声发射事件次数(个/min), 反映声发射幅度, 在总事件中, 大事件所占比例预示了岩体破坏的趋势。能率是单位时间内仪器检测到的声发射能量的相对累计值。在声发射中, 是将声发射信号的幅度平方, 然后进行包络检波, 求出检波后的包络线所围的面积, 作为信号所包含能量的量度^[13], 能率是岩体破坏速度和大小变化程度的重要标志。

微裂隙的演化过程是岩体失稳声发射信号的产生与消亡过程。围岩不同失稳阶段声发射特征参数变化趋势可以反映围岩的结构破坏特征。声发射监测结果表明, 不但巷道围岩不同部位的声发射特征参数不一样, 而且同一部位在不同监测时间段内, 岩体声发射的大事件数、总事件数和能率也不尽相同。这反映了岩体不同变形和破坏阶段声发射特征参数的变化, 现场实测结果证实了这种现象。表 5 为 1[#], 2[#], 3[#]传感器在相同时间段和 1[#]传感器在不同时间段内测得的总事件数、大事件数和能率的平均值。

表 5 现场声发射监测结果比较

Table 5 Comparison of in-situ AE monitoring results

传感器编号	监测时间/年-月	总事件数/(个·min ⁻¹)	大事件数/(个·min ⁻¹)	能率
1 [#]	2000-06~2000-09	1 436	1 257	4 602
2 [#]	2000-06~2000-09	1 474	1 372	5 560
3 [#]	2000-06~2000-09	1 538	861	5 193
1 [#]	2001-03~2001-06	1 526	1 030	4 827
1 [#]	2001-10~2002-01	1 615	848	8 455

通过声发射、应力和位移监测信息的耦合分析, 可以对围岩稳定性和破坏状态作出评价。作者提出了由声发射、压力和位移耦合分析表示岩体稳定性的“4 种判别模式”, 即升压稳定模式 1、升压稳定模式 2、降压稳定模式和降压不稳定模式^[14]。具体表现为:

(1) 升压稳定模式 1。岩体在该监测期内, 应力不断升高, 声发射信号也愈来愈强, 但是岩体保持稳定。根据岩石具有凯塞效应这一事实, 岩体内部虽然应力不断升高, 并且岩体内部有新的损伤扩展, 但是此时的应力还没有超过岩石的极限承载力, 所

以岩体继续保持稳定。但出现这种模式时必须引起足够重视,因为此时岩体内部已经有了损伤的新扩展。进入此阶段要特别注意位移监测信息的耦合分析,如位移有明显变化,则说明岩体内部的裂隙、损伤已比较严重,岩体将临近破坏阶段。

(2) 升压稳定模式 2。岩体在该监测期内,应力不断升高,但声发射却比较“平静”,岩体也保持稳定。根据声发射的不可逆性,声发射表现“平静”,说明此时虽然应力不断升高,但此时的应力还没有超过历史最大应力,这相当于岩石卸载以后的再加载过程。

(3) 降压稳定模式。岩体在该监测期内,应力不断下降,相应的声发射也比较“平静”,岩体保持稳定。这相对于岩石加载以后的卸载过程。

(4) 降压不稳定模式。岩体在该监测期内,应力持续下降,而声发射却非常活跃。这说明此时岩体中的应力已超过了历史最大应力,岩体本身已破坏,因而承载力不断下降,故监测到的岩体内部应力值也持续下降。此时要特别注意位移监测信息的耦合分析,若位移出现突然加速趋势,说明岩体即将进入失稳阶段。故此时千万不能麻痹,很多事故往往就在这一阶段发生,这一特征对采空区的有效治理有很大的借鉴意义^[15]。

通过对新、旧主运巷之间的岩墙中获得的现场声发射信息、现场应力和位移监测结果进行耦合分析,发现上述4种模式在新、旧主运巷之间的岩墙中全部存在。由于第(1)种模式表明岩体已经出现新的损伤和破坏,第(4)种模式预示岩体已经处于较危险的状态,出现这两种模式说明岩墙新主运巷一侧的稳定性状态已相当差,对旧主运巷的稳定性有很大威胁。

4 结 论

(1) 应力、位移、声发射等多种手段的监测结果表明,采用“拱桥法”高压锚注技术加固治理的玲珑金矿旧主运巷,在加固后投入运行的前4a中一直处于稳定状态,断面收敛监测、多点位移计监测、水准测量3种手段测得的位移和变形值均很小。在相邻不足10m处存在没有加固治理的新主运巷大塌陷空区,且在原两巷底部塌陷空区几乎相连的情况下,加固治理后的旧主运巷的稳定性能达到如

此高的水平是非常少见的,说明“拱桥法”锚注加固治理的技术及其实施取得了突出效果。这再次证明了“从加固围岩入手,充分发挥围岩自身的强度维持岩石工程稳定性”的岩石力学支护理论的正确性。

(2) 位移监测结果显示,旧主运巷右侧的位移和变形比与新主运巷相邻的左侧要小得多。应力监测结果表明,旧主运巷右侧围岩中的应力比其强度极限还要低很多,而左侧与新主运巷相连的岩墙应力状态已相当危险,特别是岩墙中的水平应力比垂直应力大得多,突显了左侧塌陷空区的牵动破坏作用。多点位移计监测和水准测量结果均显示,顶板处于均匀下沉状态,尽管出现较为明显的变形和局部的损伤和与破坏,但此时旧主运巷本身从整体上看还是稳定的。所以,2002年以后旧主运巷出现较为明显的变形和局部的损伤和破坏,是由于新主运巷塌陷区的大规模变形破坏的牵动所引起的。

(3) 采用多点位移计监测、断面收敛监测、水准测量、应力监测和声发射监测等5种手段获得的监测结果的多元信息耦合分析结果表明,主运巷的稳定性趋势已经加速向不良方向发展,特别是新、旧主运巷之间岩墙的应力、变形和稳定性状态已经到了较危险的程度,新主运巷的大规模变形破坏是造成旧主运巷不稳定性的关键因素,只有尽早采取有效措施加固治理新主运巷,才能控制不利趋势,保证旧主运巷的稳定和正常运行。

2004年,玲珑金矿已经再次采用“拱桥法”高压锚注技术对新主运巷塌陷区进行了加固治理。目前,玲珑金矿255m水平主运巷处于正常的运行状态。

参考文献(References):

- [1] 北京科技大学,山东黄金集团公司玲珑金矿. 玲珑金矿255m水平主运巷塌陷段“拱桥法”锚注技术研究及其工程应用研究报告[R]. 北京:北京科技大学,山东黄金集团公司玲珑金矿,1998.(University of Science and Technology Beijing, Linglong Gold Mine of Shandong Gold Company. Study and application of grouting and bolting methods to treat collapsed transport roadways in Linglong Gold Mine[R]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, Linglong Gold Mine of Shandong Gold Company, 1998.(in Chinese))
- [2] 蔡美峰,何满潮,刘冬燕. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版

- 社, 2002.(CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))
- [3] 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒, 等. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.(YU Xuefu, ZHENG Yingren, LIU Huaiheng, et al. Stability analysis of surrounding rock in underground engineering[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1983.(in Chinese))
- [4] 李长洪, 蔡美峰, 乔 兰, 等. 某矿主溜井塌落破坏成因分析及其防治对策[J]. 中国矿业, 1999, 8(6): 37 - 39.(LI Changhong, CAI Meifeng, QIAO Lan, et al. Analysis of failure mechanism of the main draw raise and study on its treating method in a gold mine[J]. China Mining Magazine, 1999, 8(6): 37 - 39.(in Chinese))
- [5] 李长洪, 蔡美峰. 宾汉流体浆液渗流的力学机制[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(增): 146 - 149.(LI Changhong, CAI Meifeng. Penetration mechanical mechanism of Binhan fluid[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2003, 25(Supp.): 146 - 149.(in Chinese))
- [6] 北京科技大学, 山东黄金集团公司玲珑金矿. 玲珑金矿主运巷塌陷段非线性动态耦合监控与稳定性预报研究报告[R]. 北京: 北京科技大学, 山东黄金集团公司玲珑金矿, 2003.(University of Science and Technology Beijing, Linglong Gold Mine of Shandong Gold Company. Dynamic coupling-monitoring and forecasting of stability of reinforced collapsed-section of main transport roadway in Linglong Gold Mine[R]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, Linglong Gold Mine of Shandong Gold Company, 2003.(in Chinese))
- [7] 蒋树屏, 赵 阳. 复杂地质条件下公路隧道围岩监控量测与非确定性反分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3 460 - 3 464.(JIANG Shuping, ZHAO Yang. Study on monitoring and back analysis of road tunnel with complex geology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3 460 - 3 464.(in Chinese))
- [8] 蔡美峰, 来兴平, 李长洪. 非线性地下岩体结构与工程安全监控新理论[J]. 金属矿山, 2000, 15(11): 4 - 6.(CAI Meifeng, LAI Xingping, LI Changhong. New theory of the safety monitoring of nonlinear underground geotechnical structure and engineering[J]. Metal Mine, 2000, 15(11): 4 - 6.(in Chinese))
- [9] 袁 勇, 王胜辉, 杜国平, 等. 双连拱隧道支护体系现场监测试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 480 - 484.(YUAN Yong, WANG Shenghui, DU Guoping, et al. In-situ testing study on lining system of double-arched tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 480 - 484.(in Chinese))
- [10] 纪洪广, 蔡美峰. 混凝土材料声发射与应力 - 应变参量耦合关系及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 227 - 231.(JI Hongguang, CAI Meifeng. Coupling constitutive relation between AE parameter and stress-strain and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 227 - 231.(in Chinese))
- [11] 纪洪广, 蔡美峰. 混凝土材料断裂的声发射自相似识别特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 157 - 160.(JI Hongguang, CAI Meifeng. Recognition characterization of acoustic emission self-similarity in concrete fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 157 - 160.(in Chinese))
- [12] 吴立新, 唐春安, 钟 声, 等. 非连续断层破裂红外辐射与声发射、应力场的对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1 111 - 1 117.(WU Lixin, TANG Chun'an, ZHONG Sheng, et al. Comparison of thermal infrared radiation from discontinuous jointed faults fracturing with its acoustic emission and stress field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1 111 - 1 117.(in Chinese))
- [13] 秦四清, 李造鼎, 张倬元, 等. 岩石声发射技术概论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993.(QIN Siqing, LI Zaoding, ZHANG Zhuoyuan, et al. An introduction to acoustic emission techniques in rock[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1993.(in Chinese))
- [14] 北京科技大学, 海沟金矿. 海沟金矿地压活动规律与控制方法试验研究报告[R]. 北京: 北京科技大学, 海沟金矿, 2003.(University of Science and Technology Beijing, Haigou Gold Mine. Experiment and study on active regularity and control method of ground pressure in Haigou Gold Mine[R]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, Haigou Gold Mine, 1999.(in Chinese))
- [15] 蔡美峰. 金属矿山采矿设计优化与地压控制——理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2001.(CAI Meifeng. Optimization of mining design and control of ground pressure in metal mines—theory and practice[M]. Beijing: Science Press, 2001.(in Chinese))