

高应力节理软岩巷道变形特征及其变形机理

杜少华¹, 余伟健¹, 冯涛¹, 张田莲², 吴勇², 武剑¹

(1. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

2. 贵州渝能矿业有限责任公司 木孔矿, 贵州 金沙 551800)

摘要:为了解决高应力大变形节理软岩巷道支护控制难题,本文以贵州木孔煤矿+600 m运输大巷作为研究对象,进行现场调查原支护巷道围岩变形情况,分析围岩体物理力学性质,测定矿物成分,模拟围岩体节理分布状况,并研究了该巷道变形破坏特征及其变形机理。最后,通过对改进支护方案后的巷道进行现场实测数据收集,分析并验证新支护方案的合理性和有效性。

关键词:节理软岩巷道;变形机理;运输大巷;围岩

中图分类号:TD353 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2015)03-0019-07

Study of deformation characteristics and its mechanism of high stress and joint soft rock roadway

DU Shaohua¹, YU Weijian¹, FENG Tao¹, ZHANG Tianlian², WU Yong², WU Jian¹

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Mukong Coal Mine Affiliating Yuneng Mining Limited Liability Company, Jinsha 551800, China)

Abstract: In order to solve the support problem of high stress and large deformation soft rock roadway, +600 m main haulage roadway in Mukong Coal Mine is studied, and much work has been done, including investigating the surrounding rock deformation of the original supporting roadway, analysis of the physical and mechanical properties of surrounding rock, determining the mineral composition, simulating the distribution of rock joints, and studying on the failure characteristics and deformation mechanism of roadway. Finally, for the improved support scheme, some relevant data are collected in the field, and rationality and validity of the new support scheme has been analyzed and verified.

Key words: joint soft rock roadway; deformation mechanism; main haulage roadway; surrounding rock

复杂地质条件下软岩巷道的支护控制一直以来都是煤矿生产建设的难题,特别是在构造应力大的节理软岩巷道中,巷道支护问题就尤为突出^[1-3]。近年来,诸多学者研究了许多有关高应力软岩变形破坏机理,例如:何满潮^[4]认为,复杂地质条件下的巷道围岩作用是多相力学行为,特别是对于深埋岩体,低温、高地应力、地下水等形成多相作用,导致围岩产生非线性力学机制;郑榕明等^[5]认为,高地应力作用下的软岩和软黏土所表现的流变特性都是非线性的;冯利民等^[6]认为,对于高应力软岩巷道,应先根据“先让后顶”的思想设计其支护形式,以实现控制巷道围岩大变形,才确保其安全可靠;余伟健等^[7,8]认为,在复杂地质条件下的软岩巷道受到高应力作用时,特别是水平构造应力,其围岩结构强度大大降低,甚至遭到

收稿日期:2015-01-13

基金项目:湖南省教育厅科学研究重点资助项目(14A045);湖南省科技厅计划资助项目(2014FJ3046);国家自然科学基金资助项目(51434006);湖南科技大学研究生创新基金资助项目(S140001)

通信作者:余伟健(1978-),男,江西都昌人,博士,副教授,研究方向:岩石力学与围岩控制等. E-mail: ywjlah@163.com

松动破坏,而且巷道两帮及底板会受到挤压、剪切滑移等碎胀作用,导致巷道底鼓、两帮内挤现象时有发生,并且当其变形收缩发展到一定程度,就会发生严重的片帮或顶板垮冒等现象.针对复杂地质条件下高应力软岩巷道围岩变形破坏机理,本文以贵州木孔煤矿 +600 m 运输大巷为例,进行了现场调查变形情况、围岩变形位移观测等一系列调查和实验,并据此分析研究了高应力节理软岩巷道的破坏变形的基本特征及其机理,为同类巷道维护提供借鉴意义.

1 巷道工程概况

木孔煤矿 +600 m 运输大巷,位于 +600 m 水平,副斜井东侧,长为 1 457 m,与 +600 m 水平车场相交,长为 194.2 m. +600 m 运输大巷顶板设计布置在硅质灰岩层位中下部,巷道底板为粉砂岩,在掘进过程中局部出现小型地质构造,对掘进无太大影响,掘进揭露的硅质灰岩、粉砂岩、粉砂质泥岩,均为弱隔水层,区域内主要水源为裂隙水,预计最大流量 5 ~ 10 m³/h,对生产无太大影响.

2 巷道现场变形情况及围岩特征分析

主要针对木孔煤矿 +600 m 运输大巷进行了大量现场围岩的变形调查、岩体内部裂隙结构窥视、围岩岩样矿物成分分析和节理裂隙调查等工作,并根据这些现场调查和测试进行了分析,具体如下.

2.1 岩石巷道围岩变形情况及破坏机制

针对 +600 m 运输大巷的变形和破坏情况进行了调查与分析后发现,其围岩的变形与破坏形式主要表现在以下 4 个方面:

1) 巷道两帮在较大的水平构造应力作用下,发生严重内挤现象,导致两帮侧墙严重张裂.这种破坏形式如图 1 所示.

2) 巷道顶板在高应力作用下发生较大下沉,作用其上的锚杆、锚索及混凝土喷层部分或完全失效而破坏,拱顶也向上产生较大位移.另外,由于巷道两帮出现严重内挤导致拱顶出现尖桃形破坏.其破坏形式如图 2 所示.

3) 在强大的构造压力作用下,岩性较弱的巷道底板产生严重底鼓变形和底角破坏,大部分巷道的底鼓量大于 600 mm,甚至达到 1 000 mm,导致巷道底板两侧发生倾斜,严重着其混凝土底板从中部或者两端被掀起.其破坏形式如图 3 所示.

4) 由于巷道围岩体的剪切碎胀作用,致使巷道顶板及两帮岩体较为破碎,经常有垮冒、片帮等现象发生.

从以上各段巷道的调查结果来看, +600 m 运输大巷的变形与破坏主要表现为大的底鼓变形、两帮严重内挤以及顶板较大下沉的现象,对于底板的变形是由底鼓引起的底板和底角破坏,导致巷道两侧不平严重者使混凝土底板发生强烈破坏.而对于两帮和顶板,由于较大水平应力的作用使得两帮内挤也比较严重,伴随着巷道顶板下沉量较大.由此可得,巷道破坏的主要原因有 2 个:一是围岩强度较低,且节理裂隙发育,自稳能力差;二是贵州地形复杂,地质构造多,水平构造应力大.



图 1 帮部变形实物



图 2 顶板变形实物



图 3 底板变形实物

2.2 +600 m 运输大巷钻孔探测

采用岩层探测记录仪(YTJ20型),对 +600 m 运输大巷岩体内裂隙发育情况、围岩变形发展及松动范

围进行了窥视和分析,整理出整个钻孔内部信息结果如图4和图5所示.由此可看出,对于+600 m运输大巷顶板,距孔口0.25 m处顶板内部岩体呈现局部破碎、细小裂纹,距孔口1.1 m处孔壁出现裂隙,2.4 m附近出现破碎带和次生裂隙,距孔口4 m处孔壁部分出现纵横交错的裂隙,顶板5.2 m以上的位置,岩体内部比较完整,没有明显的裂纹存在;对于巷道两帮,距孔口0.15 m处内部岩体呈现破碎带、裂隙,距孔口2.1 m附近出现局部破碎、裂隙,2.4 m附近出现局部破碎,再往深处岩体逐渐变得完整.

结果表明:+600 m西运输大巷围岩的松动范围在2.4~3.9 m,离巷道越近,裂隙越发育.

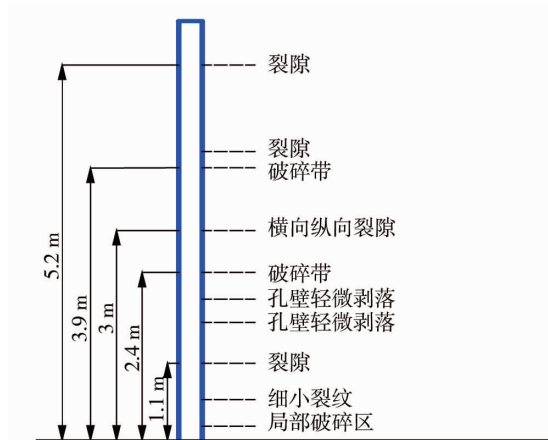


图4 +600 m 运输大巷帮部裂隙发育分布

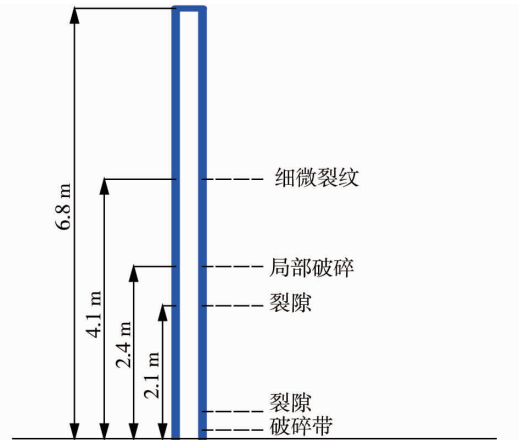


图5 +600 m 运输大巷顶板裂隙发育分布

2.3 围岩岩样矿物成分

通过X射线衍射仪对+600 m运输大巷围岩矿物成份进行了分析,如表1所示.可知,+600 m运输大巷围岩含氧化钼磷酸钾、铍云母、斜绿泥石等矿物较多,此种围岩遇水和空气后容易软化、泥化和氧化等,影响巷道的稳定.

表1 巷道围岩矿物成份

地点	石英	斜绿泥石	氧化钼磷酸钾	铍云母	斜方钙沸石	%
底板	4.0	6.0	90.0	/	/	
左帮	5.6	/	61.4	26.5	6.5	

2.4 岩石巷道节理调查

为了分析木孔煤矿煤岩巷道围岩的节理发育情况,针对+600 m运输大巷试验阶段进行了现场调查和节理围岩体不连续面的二维网络模拟.部分调查结果见表2所示,其对应的岩体网络模拟见图6和图7所示.根据调查结果,可以直观形象地了解节理岩体的结构网络图像,被调查的整个矿区内的节理间距小、密度大、岩体完整性差;而且岩体各项异性显著,各个调查地区的节理分布差别较大.因此可知,该巷道主要以硅质灰岩为主,属中等风化,节理裂隙比较发育,为碎裂状结构类型.

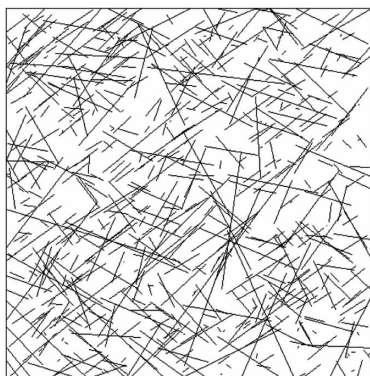


图6 I号地点的岩体网络模拟图

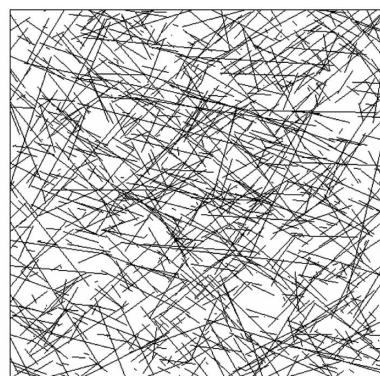


图7 II号地点的岩体网络模拟图

表 2 木孔煤矿 +600 m 巷道围岩节理调查表(部分数据)

基距/m	产状/(°)		类型	持续长度/cm	粗糙度类型	张开类型	充填及类型	风化程度
	倾角	倾向						
0.21	50	26	1	20	II	张开	少量粘土	中等
0.35	35	105	1	75	III	张开	少量滑石	高等
0.70	60	86	1	25	II	闭合		轻微
1.53	35	160	1	25	II	闭合		轻微
1.59	60	175	1	26	VIII	张开		中等
2.98	51	86	1	78	II	张开	少量滑石	中等
3.26	37	9	1	26	III	闭合	少量滑石	中等
3.85	60	118	1	46	VIII	张开		中等
4.01	64	156	1	18	V	张开		中等
1.58	32	253	2A	21	III	张开	少量滑石	高等
1.86	31	334	2A	30	I	张开	少量滑石	中等
1.99	26	226	2A	37	II	张开	少量滑石	中等
2.15	56	256	2A	63	II	闭合		中等
0.35	67	75	2B	32	VIII	张开		高等
0.72	50	290	2B	30	IX	闭合		中等
1.51	63	23	2B	30	II	张开		中等
1.63	49	155	2B	56	VII	愈合		中等
2.06	37	163	2B	55	VIII	愈合	少量滑石	轻微

3 +600 m 运输大巷变形破坏机理分析

针对木孔煤矿的具体情况,我们对 +600 m 运输大巷围岩变形破坏机理进行了分析:

1) 底板机理分析. 影响和制约巷道底板变形的因素, 总的来讲有 3 个重要因素即: 水平构造应力、软弱破碎底板的岩性以及水的物理化学力学作用. 巷道成形后, 由于其底板极为软弱破碎, 在水平构造应力作用下, 底板的软弱破碎岩体沿自由面向上被挤压流动到巷道内, 同时, 底板主要是粉砂岩, 其力学特性遇到水会软化会大大降低, 这样便使得底板结构失去平衡而发生严重的底臃现象^[9]. 其力学模型如图 8 所示.

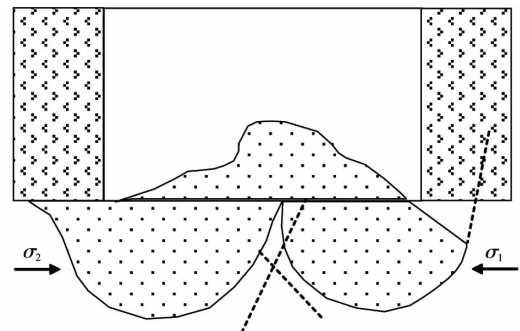


图 8 挤压流动性底鼓

2) 顶板冒顶机理分析. 该巷道采用锚网喷联合设计, 通过现场松动圈测试以及运用围岩松动圈支理论^[10,11]可知, 巷道支护方案必须形成有效的组合拱, 并且在局部关键部位进行加强支护, 以便形成显著有效的整体支护结构. 然而, 该软岩巷道在施工时由于人为因素, 导致支护施工不到位, 影响整个工程质量, 并且设计的支护参数也不合理, 仅有部分锚索锚固到稳定岩层, 使得巷道围岩没有形成有效的支护结构, 由于巷道两帮严重内挤造成顶板较大下沉, 直至破坏.

3) 巷道两帮变形分析. 由于巷道两帮破碎程度较低并且有一定的支撑强度, 在大的重力场的作用下, 两帮受到压缩剪切破坏且破坏会沿着压力方向向岩体更深部位转移, 同时变形会随底臃持续直至两帮的岩体不断剪切破坏为止^[12], 如图 9 所示.

运用库仑-摩尔强度理论分析可知, 剪切滑移面与岩体表面之间的夹角 β 为

$$\beta = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}. \quad (1)$$

式中, φ : 岩体内摩擦角. 最大片帮深度约为

$$\Delta a = M \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right). \quad (2)$$

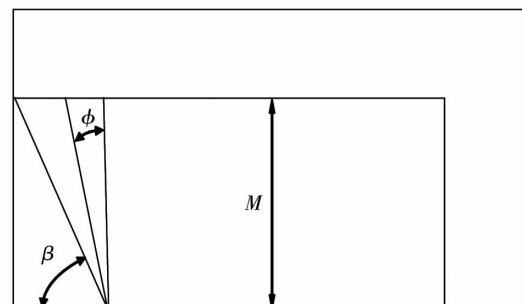


图 9 压剪、滑落式片帮

4 支护方案设计及应用效果

4.1 支护方案设计

针对木孔煤矿+600 m运输大巷围岩变形情况及原支护方案失效原因分析,建议提出并实施了改进后的支护形式.由于该巷道围岩稳定性类别为Ⅲ类,采用“锚杆+金属网+喷浆+锚索”支护,具体方案为:初次支护:采用锚杆、金属网、梯子梁;二次支护:采用锚索、喷层.

锚杆支护:采用 $\Phi 20$ mm \times 2 200 mm左旋无纵肋螺纹钢,间、排距800 mm \times 800 mm,每根锚杆采用2节Z2335型中速树脂药卷加长锚固(1支快凝,1支中等凝固速度);全断面挂钢丝网和钢筋梯子梁,金属网参数为 $\Phi 6.5$ mm,网格100 mm \times 100 mm,规格(长 \times 宽)为1 000 mm \times 800 mm;金属网搭接处必须有锚杆加钢筋梯子梁将其上紧并紧贴于围岩表面,网间搭接100 mm以上,钢筋梯子梁由直径12 mm圆钢焊接而成.

锚索支护:两帮和拱顶锚索由 $\Phi 17.8$ mm \times 7 000 mm,1 \times 9的钢绞线制成,间、排距1 600 mm \times 1 600 mm.采用树脂端部锚固,锚固长度不小于1 400 mm.每根锚索使用4卷Z2335型树脂锚固剂,锚固力不低于12 t.锚索垫板采用大小2块正方形垫板叠加,其规格分别为350 mm \times 350 mm \times 10 mm和150 mm \times 150 mm \times 10 mm,大垫板在上,小垫板在下.

喷射混凝土层:采用120 mm,水泥标号不低于425[#].具体支护如图10所示.

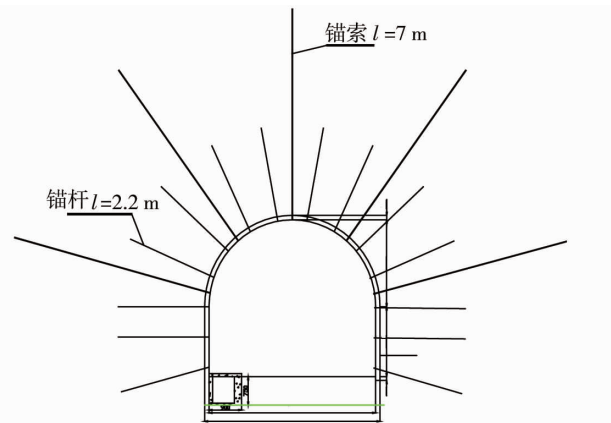


图10 全断面“锚杆+锚索”联合支护方案

4.2 巷道变形监测与分析

监测用锚杆钉可以采用 $\Phi 20$ mm或 $\Phi 16$ mm的锚杆制成,在锚杆长度为600 mm,锚杆螺母焊接一根长为25 mm的 $\Phi 5$ mm的钢筋,具体尺寸和实物如图11所示.

巷道变形监测主要量测两帮收敛值,在两帮各固定一个点,定时地量测这2个点的距离值,然后进行简单的计算,即可得到这2个点的收敛值.根据测量结果,分析巷道围岩相对位移变化速度、变化量与掘进时间之间的关系,从而得到巷道围岩的最终位移值,据此判断方案的支护效果以及围岩的稳定状况,为完善支护参数提供依据.其主要监测工具是卷尺和垂线.根据现场实际情况,本次对+600 m水平运输大巷的监测选取了3个测点,分别为点4,点5,点6.巷道断面监测共从2014年7月5号到2014年11月2号近4个多月的数据,观测点位移及变化量的数据见表3所示,根据这些数据可得到监测时期内观测点的巷道两帮与顶底板表面位移变化趋势图,如图12所示.

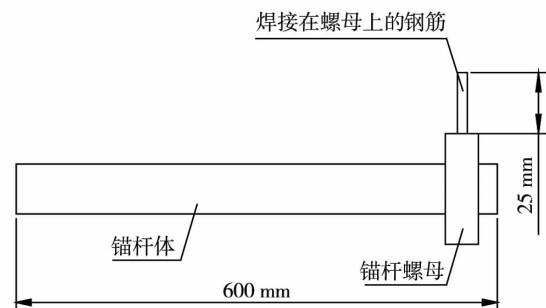


图11 监测用锚杆钉

通过+600 m运输大巷表面3个测点的位移数据可以看出,观测期间内,随着巷道的掘进,在第23 d左右巷道两帮位移变化量开始增大,巷道两帮最大移近量为87 mm,现场实地观测巷道底鼓明显,整体来看,巷道表面位移较小.

通过+600 m运输大巷表面3个测点的位移数据可以看出,观测期间内,随着巷道的掘进,在第23 d左右巷道两帮位移变化量开始增大,巷道两帮最大移近量为87 mm,现场实地观测巷道底鼓明显,整体来看,巷道表面位移较小.

表 3 木孔煤矿 +600 m 大巷表面位移值和位移移近量

日期	位移值			移近值		
	4 号测点	5 号测点	6 号测点	4 号测点	5 号测点	6 号测点
2014-07-05	5 236	5 162	5 307	0	0	0
2014-07-08	5 230	5 156	5 298	6	6	9
2014-07-11	5 222	5 149	5 291	14	13	16
2014-07-14	5 215	5 144	5 286	21	18	21
2014-07-17	5 209	5 140	5 280	27	22	27
2014-07-20	5 204	5 134	5 272	32	28	35
2014-07-23	5 196	5 134	5 267	40	28	40
2014-07-26	5 193	5 134	5 262	43	28	45
2014-07-29	5 190	5 132	5 256	46	30	51
2014-08-03	5 186	5 127	5 254	50	35	53
2014-08-08	5 184	5 121	5 251	52	41	56
2014-08-13	5 182	5 116	5 250	54	46	57
2014-08-18	5 179	5 113	5 248	57	49	59
2014-08-23	5 175	5 113	5 243	61	49	64
2014-08-28	5 175	5 109	5 239	61	53	68
2014-09-02	5 175	5 103	5 234	61	59	73
2014-09-07	5 172	5 103	5 232	64	59	75
2014-09-14	5 169	5 103	5 229	67	59	78
2014-09-21	5 167	5 099	5 226	69	63	81
2014-09-28	5 165	5 096	5 224	71	66	83
2014-10-05	5 163	5 096	5 223	73	66	84
2014-10-12	5 162	5 096	5 222	74	66	85
2014-10-19	5 162	5 094	5 220	74	68	87
2014-10-26	5 162	5 094	5 220	74	68	87
2014-11-02	5 162	5 094	5 220	74	68	87

4.3 巷道围岩应力监测

液压枕用于测定巷道支架、巷道围岩、充填体的受力状态. 本实验采用充填式安装, 安装好后, 即时记录压力表数据, 其读数为零, 在之后的巷道掘进过程中, 每隔固定时间记录一次压力表的变化情况. 对 +600 m 运输大巷围岩应力观测结果如图 13 所示, 可知 +600 m 运输大巷的围岩应力变化较小, 巷道整体处于稳定状态.

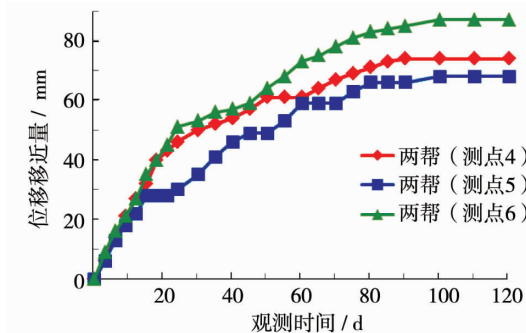


图 12 +600 m 运输大巷巷道表面位移变化趋势

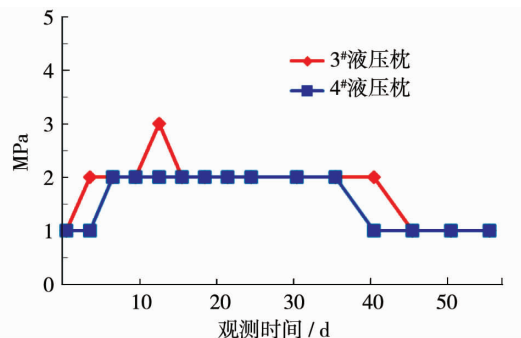


图 13 +600 m 运输大巷液压枕观测结果

5 结论

1) 木孔煤矿 +600 m 运输大巷主要以硅质灰岩为主, 属中等风化, 节理裂隙比较发育, 为碎裂状结构类型, 含氧化钼磷酸钾、铵云母、斜绿泥石等矿物较多, 此种围岩遇水和空气后容易软化、泥化和氧化等, 影

响巷道的稳定,其围岩松动范围为2.4~3.9 m,离巷道越近,裂隙越发育.巷道变形破坏的主要原因有2个:一是围岩强度较低,且节理裂隙发育,自稳能力差;二是贵州地形复杂,地质构造多,水平构造应力大.

2) +600 m 运输大巷其巷道底臃机理主要由于水平构造应力、软弱破碎底板的岩性以及水的物理化学力学作用造成的;顶板发生大变形和冒顶机理由于人为施工不到位以及设计的支护参数不合理,导致巷道围岩不能形成有效的支护结构,两帮内挤造成顶板的下沉和破坏.而软岩巷道两帮变形分析主要是由于大的重力场的作用,两帮受到压缩剪切破坏.

3) +600 m 运输大巷道的监测数据表明,巷道围岩应力变化逐渐变小,巷道围岩整体处于稳定状态.

参考文献:

- [1] 尹光志,王登科,张东明,等.高应力软岩下矿井巷道支护[J].重庆大学学报,2007,30(10):87-91.
- [2] 胡文广.高水平应力软岩巷道围岩变形机理研究[J].煤炭与化工,2014,37(6):66-68.
- [3] 王其洲,谢文兵,祖梦柯,等.高应力软岩巷道围岩控制技术研究[J].中国煤炭,2011,37(10):60-74.
- [4] 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):2854-2869.
- [5] 郑榕明,陆浩亮,孙钧.软土工程中的非线性流变分析[J].岩土工程学报,1996,18(5):1-2.
- [6] 冯利民,黄玉东,张得现,等.高应力软岩巷道围岩变形机理及支护技术研究[J].煤炭工程,2014,46(9):86-88.
- [7] 余伟健,高谦.高应力巷道围岩综合控制技术及应用研究[J].煤炭科学技术,2010,38(2):1-5.
- [8] 余伟健,王卫军,黄文忠,等.高应力软岩巷道变形与破坏机制及返修控制技术[J].煤炭学报,2014,39(4):614-623.
- [9] 王进学,杨胜利,陈忠辉,等.膨胀软岩巷道底鼓机理与耦合支护技术研究[J].金属矿山,2008(12):16-20.
- [10] 尹光志,王登科.高应力软岩下矿井巷道支护[J].重庆大学学报,2007,30(10):8-11.
- [11] 靖洪文,付国彬,郭志宏,等.深井巷道围岩松动圈影响因素实测分析及控制技术研究[J].岩石力学与工程学报,1999,18(1):70-74.
- [12] 靖洪文,李元海,赵保太,等.软件巷道支护理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2008.