

大断面软岩斜井支护支架选型优化研究

武 涛

(国投哈密能源有限责任公司 新疆 哈密 839003)

摘要:鉴于哈密南湖一矿斜井埋深浅、地应力小、岩性软弱等特点导致支护困难的问题,提出采用金属支架和混凝土砌碹的联合支护方式。为提高斜井断面利用率,降低支护成本,采用实验室试验的方法测试了工字钢拱形支架的承载力,进行了金属支架优选,试验结果表明16号工字钢支架承载能力较强,连接部位未出现破坏。现场应用结果表明:主斜井最大变形量为31.6 mm,副斜井最大为11.4 mm,16号工字钢拱形支架能够满足支护要求,且比同强度的U型钢支架成本缩减3/4,技术及经济效益显著。

关键词:大断面巷道;软岩斜井;支架优化;工字钢拱形支架

中图分类号:TD323 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2015)12-0018-05

Study on optimization of support selection for mine large cross section soft rock inclined shaft

Wu Tao

(SDIC Hami Energy Company Limited Hami 839003 China)

Abstract: In view of support difficult question caused by the shallow depth, low stress, weaken lithology and other features of the mine inclined shaft in Nanhу No. 1 Mine of Hami, a combined support mode with metal support and concrete lining was provided. In order to improve the cross section utilization rate and to reduce the support cost, the optimized selection of the metal support was conducted. An indoor lab experiment method was applied to test the loading of the steel I-beams support. The results showed that the steel I-beams support would have a high loading capacity, the integration deformation occurred and there was no failure occurred at the connection part. The underground mine support experiment showed that a max deformation value of the mine main inclined shaft was 31.6 mm, a max deformation value of the mine auxiliary inclined shaft was 11.4 mm, both small deformation could meet the safety and operation requirements. The lab and underground experiment results showed that No. 16 steel I-beams support could meet support requirements and the cost of U type steel powered support could be reduced by 3/4 in comparison with the same strength. The technical and economic benefits were obvious.

Key words: large cross section roadway; soft rock inclined shaft; support optimization; steel I-beams support

0 引言

随着我国西部煤炭资源的开采步伐逐渐加快,矿井建设模式更加快速高效。因埋深普遍较浅,且规划产能较大,大部分矿井采用斜井开拓方式。斜井筒支护当前主要有锚网索支护、混凝土砌碹支护和金属支架支护等形式,可以根据不同条件单独使用或联合使用。目前国内主要的斜井支护模式为表土层混凝土砌碹支护、基岩段锚网喷支护^[1-2],根

据不同的地质条件,支护方式也在不断变革^[3-7],如钢管混凝土、锚注等新型支护方式等。锚网索支护应用较为广泛,具有施工速度快、主动支护等特点,但是对于围岩条件极差、有底鼓倾向的巷道,由于锚固质量达不到设计要求,影响了锚网索支护方式的控制围岩效果,而且由于地下工程的隐蔽性,这部分锚固质量不合格的支护不能全部、及时地发现,易留下冒顶隐患。混凝土砌碹支护方式在大巷及井筒的施工中也较常采用,但这种支护方式的局限性

收稿日期:2015-05-11;责任编辑:杨正凯 DOI:10.13199/j.cnki.est.2015.12.004

作者简介:武 涛(1971—)男,山东临沂人,工程师,现任国投哈密能源有限责任公司南湖一矿总工程师。

引用格式:武 涛. 大断面软岩斜井支护支架选型优化研究[J]. 煤炭科学技术 2015 A3(12):18-22,35.

Wu Tao. Study on optimization of support selection for mine large cross section soft rock inclined shaft [J]. Coal Science and Technology 2015 A3(12):18-22,35.

也比较突出:施工速度慢,影响巷道的成形速度;巷道扩修不便,工程量大,既不能起到良好的刚性支护作用,也不能做到与巷道围岩协调变形,因此这种支护方式不适应快速建设,只能作为二次永久支护。金属支架支护的主要优点是:矿用工字钢支架支护阻力大,U型钢支架协调变形能力强;其缺点主要为:常规的工字钢支架抗扭能力弱、不能控制底鼓,架间是其薄弱环节;U型钢支架造价较高,抗扭能力弱,巷道断面利用率不高。型钢支架的使用时间较长,从单纯的重视承载强度到重视支架与围岩的耦合关系以及提高薄弱部位承载力方面,相关研究逐渐细致^[8~12]。侯公羽等^[13]分别对素喷混凝土、锚杆和U型钢等3种支护结构的支护作用效果进行了理论计算与分析,结果表明3种支护结构能提供的支护承载力相对于原岩应力来说量级太低,控制5~6 m及更大直径的巷道围岩弹性变形是无效的,但控制4 m直径的巷道围岩弹性变形是有效的。张盛等^[14]分析了不同U型钢支架支护方案的控制变形效果,现场应用证明采用横梁和两侧纵撑的增强型U型钢棚的整体承载能力较高,能有效控制变形。

在隧道建设中型钢支护也发挥了重要作用,张德华等^[15]进行了高应力软岩隧道中型钢与格栅支护适应性现场对比试验研究,表明现场采用“先柔后刚”的支护原则,即先架立格栅后加设套拱对高地应力软岩隧道进行支护,可有效控制软岩大变形及支护内力,结构合理。徐帮树等^[16]对公路隧道型钢喷射混凝土初期支护进行了安全评价,发现型钢拱架喷射混凝土初期支护能发挥型钢强支护作用,而喷射混凝土达到设计强度后,混凝土起主要支撑作用,型钢间距对提高初期支护安全系数不显著。不同井筒支护形式各有利弊,可选择支护参数也很多,进行支护方案选择时应根据不同的地质条件合理选择。

1 南湖一矿斜井地质条件概况及分析

国投哈密南湖一矿主副井均为斜井,穿越多层地层,但埋深较浅,地质条件相对简单。按照勘探结果,南湖一矿主副斜井揭露地层有主要含煤地层为侏罗系中统西山窑组(J_2x);中统头屯河组(J_2t):上部褐黄色砾岩,紫红色砾岩,泥岩互层;下部为杂色泥岩、泥质粉砂岩互层,夹中细砂岩,底部夹灰白色泥灰岩,与下伏地层整合接触,钻孔钻探平均厚度118.73 m。新近系葡萄沟组(N_2p):为河流相土灰

黄色浅红色泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩互层,底部以砾岩与砂砾下伏地层侏罗系、石炭系等地层呈超覆不整合接触。钻孔控制厚度4.26~188.80 m,平均厚度53.75 m。第四系(Q):本区广泛分布,为冲积、洪积、风积层及盐碱沼泽沉积层。岩性主要为黄土、砂质黏土、砾石、细砂、砂砾层、风成砂土,盐碱砂质黏土,与下伏地层不整合接触,厚度0.85~33.98 m,平均厚度10.43 m。

设计开采煤层最浅埋深150 m左右,赋存条件为埋藏浅、基岩薄且性质软弱、上覆厚松散层,在我国的神府、东胜、灵武、黄陵煤田大量赋存。从理论上看,该类煤层由于埋深不大,地应力一般也不大,水平应力对巷道围岩的稳定性影响不显著。但实践表明,这种条件下井筒围岩矿压显现却很明显,顶板下沉和两帮移近量有时很大,甚至出现冒顶和底鼓的现象。围岩的特殊地质条件是造成这一现象的主要原因。浅埋煤层基岩性质多较软弱,顶板岩层解理离层比较发育,岩层暴露在空气中极易风化崩解,遇水后岩石强度急剧下降,锚杆与锚索锚固效果较差,造成大部分地段锚固质量达不到设计要求,留下了冒顶隐患。

为分析南湖一矿斜井井筒顶板赋存特征,采用TYGD12型岩层钻孔探测仪,分析顶板岩层岩性、岩层组合特征及顶板岩层离层分布情况如下:主斜井60 m处为7 m厚的泥岩,黄色、中间夹有土灰色粉砂质泥岩;主斜井120 m处,为2.5 m厚泥岩和4.5 m厚泥质泥岩,其中泥岩为黄色、中间夹有土灰色粉砂质泥岩,泥质砂岩为土黄色,中间为粉砂质泥岩、泥质粉砂岩互层;副斜井160 m处为7 m厚泥岩,黄色、中间夹有土灰色粉砂质泥岩;副斜井200 m处,为5.8 m厚泥岩和1.2 m厚粉砂岩,其中泥岩为黄色、中间夹有灰色粉砂质泥岩,粉砂岩为土灰色细粒粉砂岩;副斜井220 m处为4.9 m厚泥岩、1.2 m厚粉砂岩和0.9 m厚泥岩,其中泥岩为黄色、中间夹有土灰色粉砂质泥岩,粉砂岩为灰色细粒粉砂岩,泥岩黄色、致密。

由于岩体强度低,弱胶结,锚杆锚固力低,不具备使用锚杆、锚索等主动支护的条件,为此设计采用了金属支架加喷射混凝土一次支护,混凝土砌碹永久支护。由于主副斜井直墙半圆拱断面较大,宽度达6.5 m,高度达到5.0 m,掘进断面面积约45 m²,为降低建设成本,在保证支护效果的前提下,进行了型钢支架的优化选型。

2 工字钢支架承载能力试验及选型

传统的半圆拱断面支架通常由U型钢制作而成，其成本也比较高。按照现在钢材市场价格，1架U型钢棚的价格为2 000~4 000元(不同断面大小，价格不同)。由于工字钢的抗弯截面模量相比U型钢较高，而工字钢的质量较低，如果工字钢的力学性能能够达到相应要求，则可以降低支护成本。因此，在实验室内对常用的16号工字钢的承载性能进行测试。

2.1 试验目的及设备

此次试验的目的为测试拱形工字钢支架不同方向受力产生破坏时所加荷载大小及其产生的弹性变形量，总结拱形工字钢支架力学性能参数和使用方法。试验系统由液压泵站、液压缸、高压管、拱形工字钢支架、试验台、控制台组成，16号普通工字钢支架试验油缸编号如图1所示。

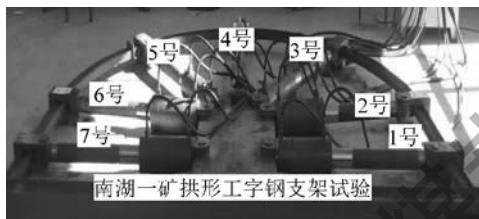


图1 工字钢支架试验油缸编号

Fig. 1 Serial number of oil cylinder in I-beam steel support experiment

2.2 试验原理及过程

1) 首先将拱形工字钢和油缸卡具首段处于接触状态，再将油缸压力调到最小值，其次逐一调试到4.35 t。缩进所有油缸，使油缸处于静止状态为止，记录初始油缸伸缩量、工字钢跨度、工字钢高度。

2) 其次做支架顶部承载力试验，只给3、4、5号油缸加压，每次加14.5 kN，使油缸处于静止状态，然后测量油缸缩进量、工字钢跨度、工字钢高度，随后再进行加压，以此循环，直到支架发生变形破坏为止。当3、4、5号油缸加压到203 kN时，5号油缸处开始变形，向上拱起。

3) 再后进行支架腿部承载力试验，只给1号加压，每次加14.5 kN，其他油缸处于静止，当1号油缸加压到116 kN时，支架腿部开始变形；当加压到130.5 kN时，支架变形破坏，用同样的方法给7号油缸加压，得到同样的结果。

2.3 试验结果分析

通过本次试验得出了工字钢支架各部位所能承

受的极限荷载及其发生变形破坏时的最大变形量，当1—6号测点加压至43.5、43.5、156.0、203.0、156.0、58.0、43.5 kN时，对应变形量分别为174、174、625、812、625、232、174 mm。

由此可知，工字钢支架拱部所能承受的重力方向的荷载为504.2 kN，支架最弱的部位在支架腿部与上部拱形结合处(2、6号)，仅能承受116 kN的荷载。工字钢支架底端(1、7号)发生破坏时能够产生的弹性形变为2 mm，支架拱形(3、4、5号)能够产生的弹性形变为35 mm。由此可知，工字钢支架可承受的弹性变形量很小，支撑力很大，抗侧弯能力比较弱。可以与局部锚杆、焊网、喷浆结合，进一步增加支架的抗侧弯能力，例如锚杆锁腿、结构补偿、增加耦合装置和壁后充填等^[10-12]，大幅提高围岩的安全稳定性和永久巷道的刚性支护效果。由于工字钢变形尺寸小，巷道断面利用率高。此工字钢支架结构设计合理，工字钢支架破坏时连接处完好。主要型钢参数对比见表1。

表1 主要型钢参数对比

Table 1 Comparison of main shape steels parameters

材料	质量/(kg·m ⁻³)	抗弯截面模量/cm ³
18 U钢	18.96	57.43
25 U钢	24.95	85.71
29 U钢	29.00	92.00
36 U钢	35.87	141.22
16号工字钢	20.51	141.00

由表1可知，36U型钢的质量是16号工字钢的1.74倍，但他们的抗弯截面模量基本相同，这说明16号工字钢和36U型钢的承载力相当，使用工字钢材料加工支架能够节省3/4的支护成本。

3 井下工业试验及监测分析

采用多基点位移观测仪进行不同深度围岩的移动和变形情况。多基点位移观仪采用4个基点，实时监测记录顶板各位置岩层位移情况，及时发现冒顶隐患，进行冒顶监测与预报，判断支护设计的合理性。

多基点观测仪器可以设置4个不同的观测基点，改变以往的观测仪器只具有1个或2个观测点的情况，计数和数据存储也是自动的，计数频率很高，所存数据用红外技术存取，彻底改变了以前的测试指示仪器人为读数误差、数据少、工作量大的弊

从而真正实现实时监测,对井筒围岩的破坏范围提供比较准确的预报,为井筒支护参数的设计和优化提供重要的理论依据。

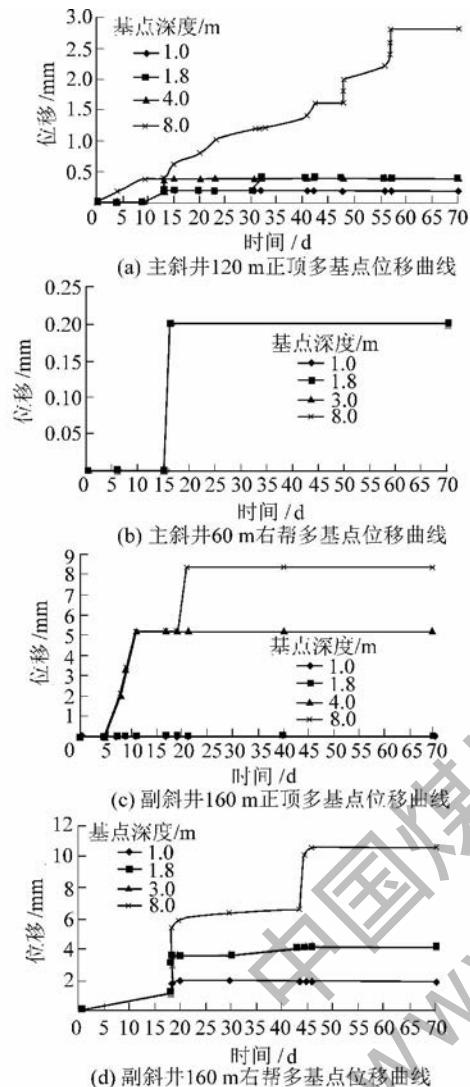


图2 第1次监测结果

Fig. 2 Monitoring results for the first time

根据理论计算,巷道变形范围一般为巷道宽度的1.5~2.5倍,在每个测站的井筒两帮分别施工

1个φ28 mm 钻孔,安设不同深度的观测基点。根据巷帮变形破坏剧烈程度预计和现场条件,设计两帮及顶板均采用1.0、1.8、4.0、8.0 m 四基点式观测仪器,根据仪器读数算出各点相对位移,得出围岩内部松动破坏范围。根据经验以及巷道内深部位移实际位移规律,深部位移测点布置不宜太密,也不能太疏。第1次在主副斜井布置了3个全断面,共4个测点,监测结果如图2所示。安装后第5天开始产生位移,然后逐渐增大,第60天后,顶板逐渐趋于稳定,累计位移为2.8 mm,位移主要发生在顶板深4~8 m处,约为2.4 mm。主斜井60 m处围岩变形不明显,仅在右帮产生了0.2 mm的变形,且之后一直保持稳定状态。安装后的第5天开始有微量变形,第20天左右时累计变形量为8.4 mm,之后一直保持稳定状态。0~1.8 m内基本没产生位移,1.8~4.0 m内位移为5.2 mm,4~8 m内位移为3.2 mm。可以看出,安装后开始发生变形,第18天时位移量迅速增加,然后缓慢增加,第45天时位移又迅速增加,累计变形量10.6 mm,之后不再变形。0~1 m位移为2 mm,1.0~1.8 m位移为2 mm,2~4 m没产生位移,3~4 m位移为6.4 mm。

第2次在主副斜井布置了3个测点,结果如图3所示。安装后第7天左右开始发生变形,一直到第52天左右始趋于稳定,累计变形量为28.4 mm。0~1 m位移为9 mm,1.0~1.8 m位移为6 mm,1.8~4.0 m位移为3.4 mm,4~8 m位移为10 mm。位移计安装后第5天左右开始发生变形,一直到第64天左右始趋于稳定,累计变形31.6 mm。0~1 m位移为11 mm,1.0~1.8 m位移为5 mm,1.8~4.0 m位移为9 mm,4~8 m内位移为6.6 mm。安装后第7天左右开始发生变形,累计变形11.4 mm。1~1.8 m范围内位移为3 mm,1.8~4 m范围内位移为5.2 mm,4~8 m范围内位移为3 mm。从趋势来看,该处顶板在之后一段时间还将发生轻微下沉。

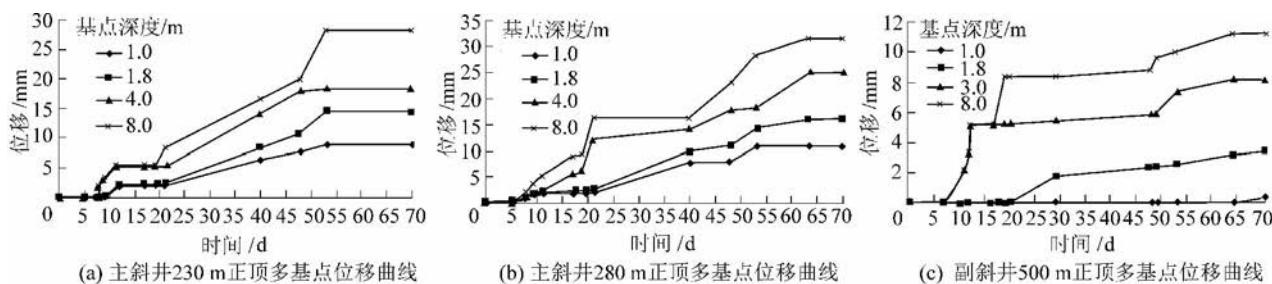


图3 第2次监测结果

Fig. 3 Monitoring results for the second time

从前2个阶段的观测结果来看,主副斜井井筒围岩变形特征略有不同,如图4所示。主副斜井在观测期间的顶板下沉量都不大,说明现在的支护形式能够满足要求。主副斜井位移均随掘进深度增加而增加,因而需要进一步加强深部井筒的位移观测,检验该支护方式能否继续满足要求,起到良好的支护效果。

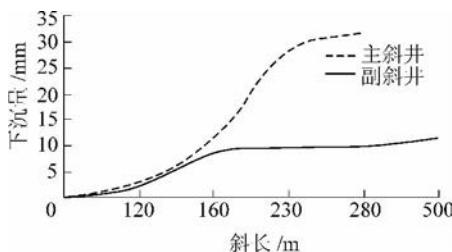


图4 主副斜井顶板位移变化趋势

Fig. 4 Graph of roof displacement trend chart in main & auxiliary inclined shaft

4 结 论

1) 南湖一矿斜井主要揭露地层中除表土层外,以泥岩、粉砂岩为主,易风化、强度低,锚固性能差,因此确定支护形式为金属支架和混凝土砌碹联合支护。

2) 选用抗弯截面较高但价格相对低廉的工字钢进行了拱形支架实验室试验,支架承载力较高,连接处不易破坏,抗侧压能力稍差。

3) 井下工业试验及监测表明,斜井的深部及浅部变形量均较小,围岩稳定。

4) 采用工字钢拱形支架后,支架成本降低 $3/4$,支护效果良好,取得了较好的技术和经济效益,可在类似条件矿井进行推广应用。

参考文献:

- [1] 刘耀明,王剑峰,阚文涛等.富水松散地层斜井井筒普通综掘法施工技术[J].煤炭科学技术,2012,40(11):54-57.
Liu Yaoming,Wang Jianfeng,Kan Wentao *et al.* Construction technology on inclined shaft in watery loose strata with fully mechanized excavation method [J]. Coal Science and Technology 2012, 40(11):54-57.
- [2] 许华春,秦玉明.锚网索喷联合支护在荣华斜井施工中的应用[J].煤炭科学技术,2005,33(6):12-14.
Xu Huachun,Qin Yuming. Bolt/steel mesh/anchor/shotcrete combined support system applied to construction of Ronghua Mine Inclined shaft [J]. Coal Science and Technology,2005,33(6):12-14.
- [3] 陈金宇,谢文兵,赵晨光.斜井巷道锚注加固支护技术研究[J].煤炭科学技术,2007,35(7):51-55.
Chen Jinyu,Xie Wenbing,Zhao Chenguang. Research on bolt and grouting reinforced technology for mine inclined shaft roadway [J]. Coal Science and Technology 2007,35(7):51-55.
- [4] 李喜柱.极软弱围岩主斜井支护技术研究[J].中国科技信息,2013(10):78-80.
Li Xizhu. Supporting technology research of main inclined well in extremely soft rock mining area [J]. China Science and Technology Information 2013(10):78-80.
- [5] 牛学超,杨仁树,孙忠辉等.卵砾石层大断面斜井井筒支护方法现场试验研究[J].岩土力学,2009,30(S1):72-77.
Niu Xuechao,Yang Renshu,Sun Zhonghui *et al.* Field test study of methods for supporting large-section inclined shaft in gravel layer [J]. Rock and Soil Mechanics 2009,30(S1):72-77.
- [6] 静玉涛.浅部基岩层下主斜井井筒支护设计[J].陕西煤炭,2011(3):50-51.
Jing Yutao. Support design of main inclined shaft under thin bed rock in shallow [J]. Shaanxi Coal 2011(3):50-51.
- [7] 刘永宝.锚注支护在清水营煤矿副斜井掘进中的应用[J].山东煤炭科技,2012(5):51-52.
Liu Yongbao. Application of anchor and grouting support in excavation of vice inclined shaft of Qingshuiying Coal Mine [J]. Shandong Coal Science and Technology 2012(5):51-52.
- [8] 梁国栋,惠长德,韩昌良等.煤矿巷道金属支架的发展及应用[J].能源技术与管理,2010(1):70-72.
Liang Guodong,Hui Changde,Han Changliang *et al.* Development and application of metal support in coal mine roadway [J]. Energy Technology and Management 2010(1):70-72.
- [9] 高明中,李伟.封闭式金属支架型架优选及应用[J].煤炭科学技术,2007,35(2):16-19,23.
Gao Mingzhong,Li Wei. Type optimized selection and application of closed metal supports [J]. Coal Science and Technology 2007, 35(2):16-19,23.
- [10] 谢文兵,荆升国,王涛等.U型钢支架结构稳定性及其控制技术[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S1):3743-3748.
Xie Wenbing,Jing Shengguo,Wangtao *et al.* Structural stability of U-steel support and its control technology [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering 2010,29(S1):3743-3748.
- [11] 陈新年,王爱辉,张琨.U型钢支架-围岩应力耦合装置试验研究[J].煤炭科学技术,2013,41(12):4-7.
Chen Xinnian,Wang Aihui,Zhang Kun. Experimental research on coupling device of u-steel support-surrounding rock stress [J]. Coal Science and Technology 2013,41(12):4-7.
- [12] 张宏学,姚卫粉,王运臣.深部软岩巷道U型钢支架承载能力增强技术[J].煤炭科学技术,2013,41(5):39-42,46.
Zhang Hongxue,Yao Weifan,Wang Yunchen. Loading capacity enhancement technology of u type steel support applied to soft rock roadway in deep mine [J]. Coal Science and Technology, 2013,41(5):39-42,46.
- [13] 侯公羽,李晶晶,杨悦等.围岩弹性变形条件下锚杆、喷

(下转第35页)

内,灾害性事故数为0,顺利通过了顶板来压的冲击危险时期,保证了21141工作面的安全回采。

4 结 论

1) 长壁工作面顶板来压对冲击地压有显著影响,来压时上覆岩层下沉、翻转和断裂使煤体内静载应力升高,同时引发高位岩层运动,产生高能量的动载荷,动载荷释放的高能量和产生的高应力容易使得煤层附近的围岩发生突然破坏,从而诱发冲击地压的发生。

2) 冲击地压的发生一般滞后于顶板来压,针对顶板来压诱发的冲击地压,准确判断来压时间,采取有效的卸压解危措施和效果检验方法,可以提高冲击地压的可控性,降低冲击危险,保证工作面的安全生产。

参考文献:

- [1] 齐庆新,窦林名.冲击地压理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社 2008.
- [2] 窦林名,何学秋.冲击地压理论与防治技术[M].徐州:中国矿业大学出版社 2001.
- [3] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等.我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J].煤炭学报 2014,39(2):205-213.
Jiang Yaodong, Pan Yishan, Jiang Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China [J]. Journal of China Coal Society 2014, 39(2): 205-213.
- [4] 蓝航,齐庆新,潘俊锋,等.我国煤矿冲击地压特点及防治技术分析[J].煤炭科学技术 2011,39(1):11-15.
Lan Hang, Qi Qingxin, Pan Junfeng, et al. Analysis on features as well as prevention and control technology of mine strata pressure bumping in China [J]. Coal Science and Technology 2011, 39(1): 11-15.
- [5] Kang Hongpu. Support technologies for deep and complex roadways in underground coal mines: a review [J]. International Journal of Coal Science & Technology 2014, 1(3): 261-277.
- [6] 鞠文君,李文洲.急倾斜特厚煤层水平分段开采老顶断裂力学模型[J].煤炭学报 2008,33(6):606-608.
- [7] 毛德兵,尹希文,张会军,等.我国煤矿顶板灾害防治与监测监控技术[J].煤炭科学技术,2013,41(9):105-108,121.
Mao Debing, Yin Xiwen, Zhang Huijun, et al. Technology of prevention roof disasters and monitoring and controlling in China coal mines [J]. Chinese Journal of Coal Science and Technology 2013, 41(9): 105-108,121.
- [8] 王存文,姜福兴,王平,等.煤柱诱发冲击地压的微震事件分布特征与力学机理[J].煤炭学报 2009,34(9):1169-1173.
Wang Cunwen, Jiang Fuxing, Wang Ping, et al. Micro-seismic events distribution characteristics and mechanical mechanisms of rock bursting induced by a coal pillar [J]. Journal of China Coal Society 2009, 34(9): 1169-1173.
- [9] 潘俊锋,宁宇,毛德兵,等.煤矿开采冲击地压启动理论[J].岩石力学与工程学报 2012,31(3):586-596.
Pan Junfeng, Ning Yu, Mao Debing, et al. Theory of rock burst start-up during coal mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2012, 31(3): 586-596.
- [10] 何江,窦林名,贺虎,等.综放面覆岩运动诱发冲击地压机制研究[J].岩石力学与工程学报 2011,30(S2):3920-3927.
He Jiang, Dou Linming, He Hu, et al. Mechanism study of overlying strata movement inducing rock burst on top-coal caving face [J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering 2011, 30(S2): 3920-3927.
- [11] 曹安业,范军,牟宗龙,等.矿震动载对围岩的冲击破坏[J].煤炭学报 2010,35(12):2006-2010.
Cao Anye, Fan Jun, Mu Zonglong, et al. Burst failure effect of mining-induced tremor on roadway surrounding rock [J]. Journal of China Coal Society 2010, 35(12): 2006-2010.
- [12] 何江,窦林名,蔡武,等.薄煤层动静组合诱发冲击地压的机制[J].煤炭学报 2014,39(11):2177-2182.
He Jiang, Dou Linming, Cai Wu, et al. Mechanism of dynamic and static combined load inducing rock burst in thin coal seam [J]. Journal of China Coal Society 2014, 39(11): 2177-2182.

(上接第22页)

- 混凝土和U型钢的支护效果研究[J].岩土力学,2014,35(5):1357-1366.
Hou Gongyu, Li Jingjing, Yang Yue, et al. Support effects of anchor bolt, shotcrete and U-steel in elastoplastic stage of surrounding rock [J]. Rock and Soil Mechanics 2014, 35(5): 1357-1366.
- [14] 张盛,张易飞,申光明.高应力煤巷结构增强型U型钢棚支护技术研究[J].河南理工大学学报:自然科学版,2012,31(5):518-524.
Zhang Sheng, Zhang Yifei, Shen Guangming. Research on support technology with reinforced U shaped steel stents in high stress coal roadway [J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science 2012, 31(5): 518-524.

Ju Wenjun, Li Wenzhou. Fracture mechanical model of main roof along inclined for fully-mechanized top-coal caving in steep and extra-thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(6): 606-608.

- [15] 张德华,刘士海,任少强.高应力软岩隧道中型钢与格栅支护适应性现场对比试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(11):2258-2266.
Zhang Dehua, Liu Shihai, Ren Shaoqiang. Research on selection of steel and steel grid for tunnel support in soft rock with high geostress [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering 2014, 33(11): 2258-2266.
- [16] 徐帮树,杨为民,王者超,等.公路隧道型钢喷射混凝土初期支护安全评价研究[J].岩土力学,2012,33(1):248-254.
Xu Bangshu, Yang Weimin, Wang Zhechao, et al. Study of initial support safety evaluation about shape steel reinforced shotcrete in highway tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics [J], 2012, 33(1): 248-254.