

基于松动圈理论的充填体下巷道顶板安全厚度和支护方式

戴兴国¹, 黄毅¹, 谢学斌¹, 汪令辉²

1. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083
2. 铜陵有色金属集团股份有限公司冬瓜山铜矿, 安徽铜陵 244031

摘要 为安全高效回采冬瓜山铜矿盘区隔离矿柱, 在充分利用矿山已有巷道工程的前提下, 仍需在盘区采场充填体下开挖新的出矿巷道。基于松动圈理论, 利用单孔声波检测仪测量巷道围岩松动圈范围, 为确定充填体下开挖巷道的顶板安全厚度、选择巷道支护方式提供依据。现场测试表明, 冬瓜山铜矿-760和-790m巷道的围岩松动圈为0.8~1.3m。根据圣维南局部效应原理, 结合工程技术人员实际经验, 最终确定采场充填体下新开掘出矿巷道的顶板安全厚度为4m。此外, 通过松动圈测定和工程借鉴, 确定新开掘巷道支护采用喷锚支护, 局部破碎地方采用喷锚网联合支护, 经理论计算和现场实测, 总结出新开掘出矿巷道顶板锚杆长度选取2.2m、锚杆网度选取1.0m×1.0m时, 能够安全经济地控制巷道松动圈。

关键词 单孔声波法; 围岩松动圈; 顶板安全厚度; 巷道支护

中图分类号 TD32

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.01.006

Roof Safety Thickness and Support Pattern of Roadway Under Fillings Based on Released Zone Theory

DAI Xingguo¹, HUANG Yi¹, XIE Xuebin¹, WANG Linghui²

1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China
2. Dongguashan Copper Mine, Tongling Nonferrous Metals Group Co. Ltd., Tongling 244031, Anhui Province, China

Abstract In order to mine the insulating pillar of Dongguashan copper mine safely and effectively, with the full use of existing mine roadways, new ore-drawing roadways are needed to be excavated under the filling of the panel stope. Based on the theory of the surrounding rock released zone, the roadway surrounding the rock released zone is measured by the single-hole acoustic detector, to provide the basis of the determination of the roadway roof safety thickness and the support pattern. By means of field tests, the surrounding rock released zone thickness of -760m and -790m levels is 0.8~1.3m. Combining the Saint-Venant principle and the field experience, the roof safety thickness of the new extracted ore-drawing roadway under filling is determined to be 4m. In addition, the shotcrete-bolt support pattern is adopted; as regards to the partial broken area, the spray anchor net united support pattern is adopted. As a result, when the length of the bolt for the new extracted ore-drawing roadway is determined to be 2.2m, and the grid is 1.0m×1.0m, the roadway surrounding the rock released zone can safely and economically be controlled.

Keywords single-hole acoustic method; surrounding rock released zone; roof safety thickness; roadway support

0 引言

冬瓜山铜矿是一个铜金属储量100万t以上的特大型矽卡岩型铜矿体。矿体开采方案是将矿体划分成盘区, 盘区长为矿体的宽度, 宽82m; 再将每个盘区间隔划分成18m宽的矿房和矿柱, 相邻盘区之间暂留18m宽的隔离矿柱。矿体采用3个步骤回采, 第1步为回采盘区矿房采场, 第2步为回

采盘区矿柱采场, 第3步为回采盘区间隔离矿柱。冬瓜山铜矿盘区隔离矿柱的矿量占矿山地质总储量近20%, 由于隔离矿柱的回采是在盘区采场回采充填完毕后进行的, 两侧均是胶结充填体, 其回采条件变化较大, 因此为安全高效回采盘区隔离矿柱, 在充分利用原有井巷作为其采准切割和回采工程的基础上, 还需开掘新的出矿巷道。新开掘的出矿巷道在

收稿日期: 2012-10-15; 修回日期: 2012-11-12

基金项目: “十一五”国家科技支撑项目(2007BAK22B04, 2006BAB02B04-1-3-2)

作者简介: 戴兴国, 教授, 研究方向为采矿技术及采矿装备, 电子邮箱: xgdai@mail.csu.edu.cn

一侧盘区充填体的下方,对出矿巷道的参数选择、施工和支护提出了更高的要求,尤其是对巷道顶板安全厚度以及支护方式提出了更为严格的要求。

陈庆发^[1]、张子飞^[2]和吕兆海等^[3]对复杂条件下巷道围岩松动圈进行了测试,根据测得的围岩松动圈大小分别对巷道顶板位移进行监测,提出相应的矿压控制措施和巷道支护方式。实践经验表明,松动圈测试作为巷道内部变形的监测手段,为有效评价巷道稳定状态及巷道变形支护提供了科学的指导。本文利用 RSM-SY5 非金属声波检测仪对冬瓜山 -760m、-790m 水平已有的出矿穿脉和出矿进路围岩松动圈进行测试,以期为确定盘区充填体下开挖的新出矿巷道所需预留的顶板安全厚度和选择巷道支护方式提供理论依据。

1 松动圈测试原理

1.1 松动圈定义

围岩松动圈是指在地下空间开挖时,原岩中三维应力平衡状态被打破,围岩应力发生重分布,由三维应力组件转变为近似二维应力,巷道周边径向应力消失,环向应力集中,且围岩强度明显下降。当集中应力超过围岩强度时,巷道周边岩体首先被破坏,产生裂隙,并向深部扩展;达到一定深度,集中应力小于或等于岩体强度时,岩体重新达到应力平衡状态,破坏停止。破裂的围岩逐渐形成松动带,由于该区域围岩体均已屈服,故称为塑性松动圈,简称松动圈^[4,5]。其主要特征是松动圈内应力和围岩强度均有较明显的下降,巷道围岩裂隙扩张增多,出现明显的塑性滑移。诸多经验表明,巷道松动圈大小决定了巷道的稳定性以及支护方式的选择和支护的难易程度,松动圈越大,巷道稳定性越差,支护也就越困难。

1.2 单孔声波法测试原理

超声波在岩土介质和结构物中的传播参数(声时值、声速、波幅、衰减系数等)与岩土介质和结构物的物理力学指标(弹性模量、密度、强度等)之间存在较大的相关性(式(1))。用声波法测试围岩松动圈的原理是基于声波在围岩中传播速度的变化,围岩应力越大,岩体越致密,裂隙越少,声波在岩体的传播速度就越快,反之亦然。围岩若未受爆破影响,完整性好,其纵波速度高;围岩若受爆破影响大,节理裂隙多或较破碎,其纵波速度低。因此,可以根据松动圈理论,测出离孔口不同深度处的波速,并绘制出波速-深度曲线,再结合围岩具体情况便可得出围岩松动圈的厚度及其分布情况^[6,7]。

由于纵波具有传播速度快、能量高、现场容易实现等特性,因此利用纵波进行围岩松动范围探测。根据弹塑性介质中波动理论,应力波纵波波速 V_p 与岩石弹性模量 E (GPa)、泊松比 σ 、密度 ρ (g/m^3)之间的关系式为

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1-2\sigma)(1+\sigma)}} \quad (1)$$

RSM-SY5 声波仪通过专用一发双收换能器在钻孔中测量岩土孔壁滑行波的波速,从而判断围岩的破碎程度,反映的是环向裂隙特征。图 1 为单孔测试工作原理示意图,发射

换能器 F 在钻孔中发射的超声波沿钻孔壁滑行传播,当分别测得从 F 发射的声波到达接收换能器 S_1 、 S_2 的时间为 t_1 、 t_2 时,声波速度 V_p 为

$$V_p = \frac{\Delta L}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

其中, ΔL 为接收换能器 S_1 、 S_2 之间的距离, m; t_1 、 t_2 分别为声波到达接收换能器 S_1 、 S_2 的时间, s。

将各测点所得的波速值绘制成孔深 L 与波速 V_p 的关系曲线,根据曲线中的波速变化划分松动圈范围。

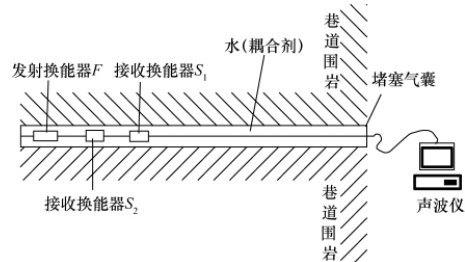


图 1 单孔声波测试示意

Fig. 1 Schematic diagram of single-hole acoustic test

2 冬瓜山铜矿底部结构巷道围岩松动圈测试

2.1 测试位置选择

冬瓜山铜矿采用 3 步骤回采,其采场划分示意图如图 2 所示。盘区第 1 步和第 2 步采场回采完毕后,进行胶结充填。为充分利用原盘区采场采矿方法、爆破落矿和出矿的现场施工和管理经验,进行现场调查,发现盘区隔离矿柱仍具备与盘区采场相同的大直径深孔落矿阶段空场嗣后充填法回采技术条件,采用长进路双采场堑沟式底部结构(图 3)。

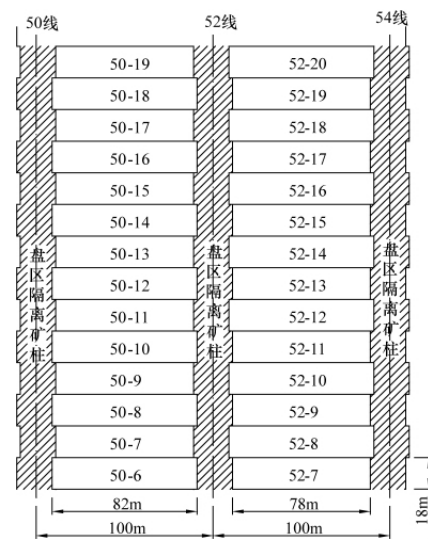


图 2 50~54 线采场划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of stope division from lines 50 to 54

注:双号为第 1 步骤回采,单号为第 2 步骤回采。

Notes: Even number stops are mined in the first step, and odd number stops are mined in the second step.

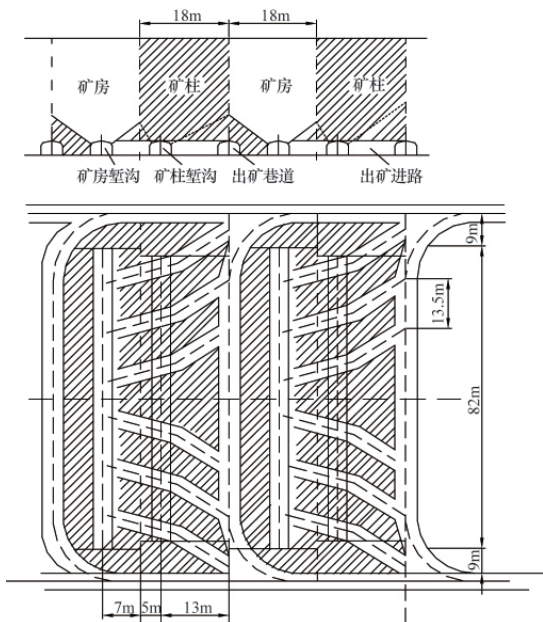
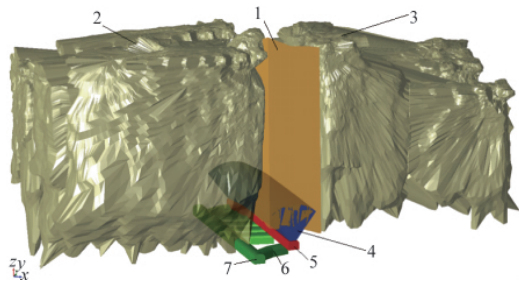


图3 长进路双采场堑沟式底部结构

Fig. 3 Trench bottom structure of long access for double stope

50~54线盘区作为冬瓜山首采盘区,截至2012年4月,其第1步骤采场基本回采充填完毕,仅50盘区50-19、50-20采场处于采准阶段,52盘区52-1、52-19采场尚未动工,54盘区54-1、54-3、54-5、54-17、54-19这5个采场未动工。因此综合考虑,将52线隔离矿柱作为首采隔离矿柱,本文也是围绕回采该条矿柱进行底部结构方案研究。

根据盘区采场回采的底部结构设计方案,52线隔离矿柱内部已有1条服务于两侧采场的出矿穿脉,为充分利用该巷道,将该巷道用作隔离矿柱回采底部结构中的堑沟巷道。为构成完整的出矿系统,保证铲运机高效运行,需开掘新的出矿巷道和出矿进路。巷道断面为三心拱,宽和高分别为4.2m和3.8m,进路长约15m,出矿巷道处于50线盘区一侧充填体下方,运用DIMINE软件进行三维建模(图4)。由于新开掘出矿巷道和出矿进路均处于-760m和-790m 2个水平,故进行围岩松动圈测试的巷道也主要选择在-760m和-790m水平



1—52线盘区隔离矿柱;2—50线盘区充填体;3—52线盘区充填体;
4—堑沟结构;5—原有出矿穿脉;6—新开挖出矿进路;
7—新开挖出矿巷道

图4 隔离矿柱回采底部结构 DIMINE 模型

Fig. 4 DIMINE model of insulating pillar mining bottom structure

的原出矿穿脉和出矿进路,并最终确定对这2个水平的8个巷道断面进行测试。

2.2 现场测试

在已选定的-760m和-790m水平的8个巷道断面各分别布置3个测孔,共24个测孔,每个孔深2.2~2.5m,直径38~42mm。断面松动圈测试孔布置如图5所示。

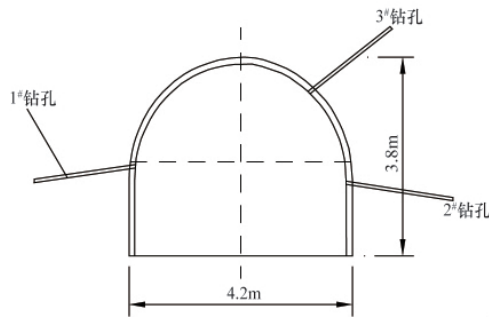


图5 巷道断面松动圈测孔断面布置

Fig. 5 Released zone measuring hole layout of roadway cross-section

现场测试时将传感器和声波仪连接好,启动程序并设置好参数,把探头放入已钻好的测孔;孔口用橡皮囊堵住,以清水作为耦合剂,用水泵向孔内注水直至灌满整个孔为止,然后密切观测波形的变化;波形稳定后进行采样、保存。限于篇幅,此处只给出第7个断面2#孔的波形图(图6)。沿孔口方向每隔0.2m布置1个测点,直至对整孔测试完毕。

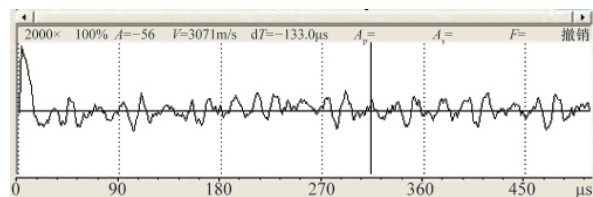


图6 第7个断面2#孔波形

Fig. 6 Hole 2# waveform of 7th cross-section

2.3 测试结果分析

对8个断面共24个孔测试完毕后,将每个测孔各测点的波速 V_p 值作为纵坐标,孔深 L 为横坐标,绘制出每个断面的 V_p-L 曲线。限于篇幅,只给出第6个断面和第8个断面的 V_p-L 曲线(图7和图8)。

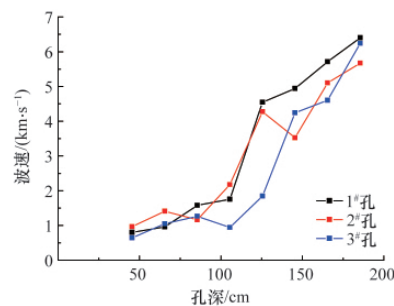


图7 第6个断面松动圈 V_p-L 曲线

Fig. 7 V_p-L curve of 6th section released zone

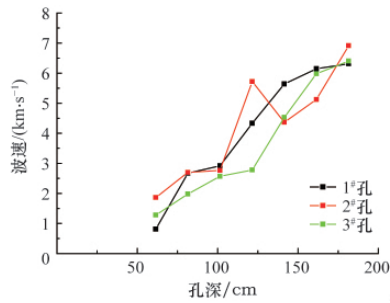


图8 第8个断面松动圈 V_p - L 曲线

Fig. 8 V_p - L curve of 8th section released zone

不同断面各个测孔的松动圈测试结果如表1所示(其中2个测孔质量较差,无法顺利完成测试,故没有数据)。-760m水平的巷道围岩松动圈厚度 L_p 为0.80~1.20m,-790m水平的巷道围岩松动圈厚度 L_p 为0.90~1.30m,说明埋深与松动圈的大小基本呈正相关。此外还可以看出,同一断面顶板的松动圈值比两帮的松动圈值略大。

表1 不同断面测孔的围岩松动圈厚度 L_p 测试结果

Table 1 Released zone test results of different cross-section measuring holes

| 所在水平/m | 断面号 | 围岩松动圈厚度/m | | |
|--------|-----|-----------|------|------|
| | | 1#孔 | 2#孔 | 3#孔 |
| -760 | 1 | 0.80 | — | 1.00 |
| | 2 | 1.00 | 1.00 | — |
| | 3 | 0.90 | 0.90 | 1.10 |
| | 4 | 0.98 | 1.00 | 1.18 |
| -790 | 5 | 1.05 | 1.10 | 1.25 |
| | 6 | 1.28 | 1.08 | 1.30 |
| | 7 | 0.97 | 0.90 | 1.15 |
| | 8 | 1.01 | 1.05 | 1.20 |

3 出矿巷道顶板安全厚度的确定和支护方式选择

3.1 顶板安全厚度确定

通过对-760m和-790m水平原出矿穿脉和出矿进路进行围岩松动圈测试,了解了巷道周边松动带的范围,确定了巷道围岩的不稳定区域,从而可以指导盘区充填体下方新开挖出矿巷道所需预留的顶板安全厚度。

由圣维南局部效应原理可知,岩体局部开挖仅对一定范围有明显影响,周传波等^[8]对采矿巷道的围岩变形机制进行模拟发现,局部开挖影响范围为塑性松动圈大小的3~4倍。

此外,结合矿山现场实际及工程经验,李术才等^[9]对淮南矿区丁集矿-910m轨道大巷围岩进行破裂化现场监测,研究发现其围岩松动圈范围为1.5~3.0m,完整区平均深度为5m,在进行合理支护后能有效控制松动圈。王其胜等^[10]对马路坪矿埋深560m的巷道进行研究,发现其塑性区范围约为3m,采用“喷-锚网-喷”方式进行支护后较好地控制了顶板围岩的变形。结合以上研究和工程类比,针对冬瓜山铜矿-760m

和-790m新开巷道,最终确定新开挖出矿巷道的顶板安全厚度 H 应不小于4m(图9),配以合理支护能够保证充填体下巷道围岩的稳定。

3.2 支护方式和参数选择

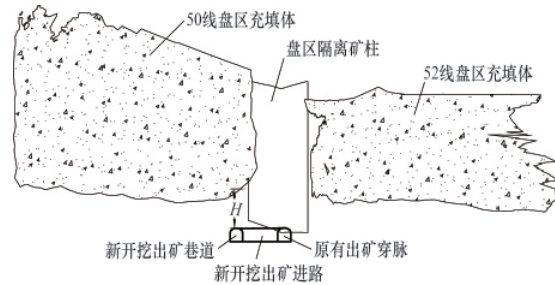


图9 新开挖出矿巷道顶板安全厚度示意

Fig. 9 Roof safety thickness of new extracted ore-drawing roadway

巷道支护的主要目的是控制巷道大的变形,防止围岩松动圈内一定程度上裂隙化岩石的垮落。要达到这样的目的,首先要阻止巷道围岩裂隙化圈层的形成^[11],但这往往比较困难。经济、有效的措施是控制松动圈的扩大,改善其应力状态,提高围岩自身的承载能力。不同的支护方式对松动圈的控制会产生不同的效果。

3.2.1 支护方式选择

松动圈支护理论是进行巷道支护的主要依据,根据不同的松动圈对巷道采取不同的支护方式。董方庭^[12]做了大量的现场松动圈测试,并对松动圈与巷道支护难易程度相关关系进行调研,结合喷锚支护机理,根据围岩松动圈厚度和围岩碎胀变形的大小将围岩分为小松动圈围岩、中松动圈围岩和大松动圈围岩3类(表2)。

表2 巷道围岩松动圈分类

Table 2 Classification of roadway surrounding rock released zone

| 围岩类别 | 围岩松动圈厚度/m | 支护机理 | 支护方式 |
|------|-----------|----------|--------|
| 小松动圈 | 0~0.4 | 围岩自稳理论 | 喷混凝土支护 |
| 中松动圈 | 0.4~1.5 | 锚杆悬吊支护理论 | 锚喷联合支护 |
| 大松动圈 | >1.5 | 锚杆组合拱理论 | 锚喷网支护 |

冬瓜山-760m和-790m水平的巷道松动圈厚度基本在0.8~1.3m之间,因此属于中等水平松动圈。根据已有研究以及现场施工经验,新开挖出矿巷道和出矿进路的支护方式采用喷锚联合支护;对出矿口眉线和局部破碎区域,采用喷锚网联合支护或“喷锚网+锚索”联合支护。

3.2.2 支护参数确定

(1) 锚杆长度的确定

松动圈支护理论经过大量的工程实践已经证明,在中等水平松动圈条件下将松动岩石用锚杆悬吊在松动圈以外的围岩上可以有效地进行支护,其锚杆长度为

$$L' = L_1 + L_p + L_2 \quad (3)$$

其中, L' 为锚杆长度, mm; L_1 为锚杆外露长度, 通常取 50~100mm; L_2 为锚杆锚入弹塑性区的深度, 常取 300~400mm。

为使支护安全可靠, 留有安全系数, 锚杆参数设计时围岩松动圈厚度取 1.3m。经过计算, 确定锚杆长度为 2.2m。

(2) 锚杆间排距的确定

对锚杆间排距的确定, 应充分利用已有支护设备和支护经验, 矿山现有锚杆直径为 16mm, 其设计锚固力约为 90kN。根据锚杆支护松动圈理论, 锚杆的锚固力应不小于锚杆悬吊范围内破碎围岩的重量, 锚杆间排距 a 为

$$a \leq \sqrt{\frac{Q}{kL_p \cdot r}} \quad (4)$$

其中, Q 为锚杆的设计锚固力, 取 90kN; r 为破碎岩层容重, 取 2720kg/m³; L_p 取 1.3m; k 为安全系数, 取 1.3。

计算得出, 锚杆间排距 a 应不大于 1.4m, 故最终确定锚杆间排距为 1.0m, 即锚杆网度为 1.0m×1.0m; 对局部破碎区域和出矿口眉线支护, 除打锚杆外, 还需挂金属网, 金属网片为 2m×3m, 金属网钢筋直径为 6mm, 网格尺寸为 100mm×100mm。最后再进行喷浆, 达到 100mm 的永久喷层厚度。

3.3 巷道支护效果

通过单孔声波仪对巷道围岩松动圈范围进行测定, 并据此提出对新开挖出矿巷道和出矿进路的支护方式以及相应支护参数。巷道支护的根本作用是保持和提高围岩的强度, 充分利用围岩自身强度维护巷道的稳定。-760m 和 -790m 水平的出矿巷道和出矿进路经喷锚联合支护, 局部破碎区域采用喷锚网联合支护后, 强化了锚固区域内岩体的峰值强度及残余强度, 提高了巷道围岩的强度和自身承载能力。

现场情况反馈表明, 巷道顶板及两帮围岩基本无垮落现象, 出矿口眉线和局部破碎区域经喷锚网支护后能有效控制破碎围岩进一步变形, 喷浆维护后巷道表面平整, 未发生大位移。实践证明, 采用联合支护方式能较好地控制围岩破碎区和塑性区的发展, 从而抑制围岩变形, 保持巷道稳定性。

4 结论

冬瓜山铜矿埋藏较深, 赋存条件特殊, 回采技术条件复杂, 尤其是作为第 3 步骤的盘区隔离矿柱回采, 对回采技术提出了更高的要求。因此, 在对盘区隔离矿柱回采之前有必要对深部巷道的围岩松动变化规律进行研究, 掌握巷道围岩的松动圈范围, 从而为安全、高效回采隔离矿柱的开拓设计和施工积累经验。

新开挖出矿巷道位于盘区充填体下方, 采用 RSM-SY5 非金属声波检测仪对 -760m 和 -790m 水平已有出矿穿脉和出矿进路的围岩松动圈进行测试, 得出 -760m 和 -790m 水平的巷道松动圈厚度为 0.8~1.3m, 结合圣维南局部效应原理, 确定隔离矿柱回采出矿巷道顶板的安全厚度为 4m。

松动圈支护理论为新开挖巷道的支护方式选择提供了理论依据, 实践证明喷锚联合支护能够有效避免新开挖出矿

巷道和出矿进路围岩发生较大位移或垮塌现象; 对局部破碎区域和出矿口眉线, 采用喷锚网联合支护或“喷锚网+锚索”联合支护也能达到理想支护效果。

参考文献 (References)

- [1] 陈庆发, 张世雄, 王官宝, 等. 倾斜薄层岩体巷道围岩松动圈测试研究 [J]. 矿山压力与顶板管理, 2005, 22(2): 61-65.
Chen Qingfa, Zhang Shixiong, Wang Guanbao, et al. Ground Pressure and Strata Control, 2005, 22(2): 61-65.
- [2] 张子飞, 柴鑫. 复杂地质条件下急斜特厚煤层巷道松动圈监测分析 [J]. 神华科技, 2009, 7(2): 27-29.
Zhang Zifei, Chai Xin. Shenhua Science and Technology, 2009, 7(2): 27-29.
- [3] 吕兆海, 来兴平. 松动圈测试技术在巷道支护设计中的应用 [J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(2): 336-340.
Lü Zhaohai, Lai Xingping. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(2): 336-340.
- [4] 董方庭, 宋宏伟, 郭志宏. 巷道围岩松动圈支护理论及应用技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
Dong Fangting, Song Hongwei, Guo Zhihong. Roadway surrounding rock loose circle supporting theory and applied technology [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2001.
- [5] 钱鸣高, 石平五, 邹喜正, 等. 矿山压力与岩层控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
Qian Minggao, Shi Pingwu, Zou Xizheng, et al. Mining pressure and strata control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.
- [6] 李伟利, 王磊, 常聚才. 基于 Hoek-Brown 准则的围岩松动圈计算及现场测试 [J]. 煤炭工程, 2011(2): 97-99.
Li Weili, Wang Lei, Chang Jucai. Coal Engineering, 2011(2): 97-99.
- [7] 胡文义. 单孔声波法在岩体松动圈测试中的应用 [J]. 四川水力发电, 2009, 28(5): 64-67.
Hu Wenyi. Sichuan Water Power, 2009, 28(5): 64-67.
- [8] 周传波, 郭廖武, 姚颖康, 等. 采矿巷道围岩变形机制数值模拟研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 654-658.
Zhou Chuanbo, Guo Liaowu, Yao Yingkang, et al. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 654-658.
- [9] 李木才, 王汉鹏, 钱七虎. 深部巷道围岩分区破裂化现象现场监测研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1545-1553.
Li Shucai, Wang Hanpeng, Qian Qihu. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1545-1553.
- [10] 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 Qisheng, Li Xibing, Li Di Yuan. Journal of China Coal Society, 2008, 33(4): 364-367.
- [11] 李德忠, 李冰冰, 檀远远. 矿井深部巷道围岩变形浅析及控制 [J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 109-112.
Li Dezhong, Li Bingbing, Tan Yuanyuan. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 109-112.
- [12] 董方庭. 巷道围岩松动圈支护理论 [C]//中国岩石力学与工程学会软岩工程专业委员会第二届学术大会论文集. 北京: 中国矿业大学出版社, 1999: 52-60.
Dong Fangting. Theory of roadway surrounding rock loose zone supporting [C]//The Second Conference Proceedings of Soft Rock Engineering Professional Committee, Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 1999: 52-60.

(责任编辑 孙秀云, 马骁骁)