

文章编号:0253-9993(2011)01-0001-06

高应力软碎煤岩区废矸置换开采技术及工艺

何富连¹,康 荣^{2,3},李宏彬²,谢生荣²,张 辉²,张军辉²

(1. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室(中国矿业大学),北京 100083;2. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院,北京 100083;3. 中国煤炭工业协会,北京 100713)

摘 要:针对褶曲断层区、两侧采空、空间交叉巷道等条件下的煤柱区废矸置换开采难题,运用数值模拟方法分析锚索桁架的应力场和支护优越性,并确定了合理的支护参数。依据废矸抛掷机抛掷出废矸的运动特点,建立废矸抛掷机抛掷的运动力学模型,分析废矸抛掷机运移步距与巷道充填率之间的耦合关系,确定废矸抛掷机工艺步距。结合新三煤矿生产条件设计置换开采技术,该研究成果在新三煤矿成功应用并取得了良好效果。

关键词:置换开采;锚索桁架;抛掷运动力学模型;充填步距

中图分类号:TD823.7 **文献标志码:**A

Mining techniques and technology of waste gangue replacement in soft-broken coal-rock region under high stress

HE Fu-lian¹,KANG Rong^{2,3},LI Hong-bin²,XIE Sheng-rong²,ZHANG Hui²,ZHANG Jun-hui²

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining(CUMT), Beijing 100083, China;2. College of Resources & Safety Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China;3. China National Coal Association, Beijing 100713, China)

Abstract: For the waste gangue replacement mining problems at the pillar region on the condition of fold-fault zone, gob area of the both sides and spatially cross tunnel, numerical simulation was applied to analyze stress field and supporting superiority of cable truss and reasonable support parameters were determined. According to moving characteristics of the waste casted by the machine, the movement mechanical model of the throwing machine casting was established, coupled relation between machine migration step and filling rate was analyzed and finally the technology step of the machine was determined. The replacement exploitation technology was designed combined with Xinsan Coal Mine production condition, the research results were in successful application and good results are achieved.

Key words: replacement exploitation; cable truss; casting motion mechanical model; filling step

资源与环境协调开采是煤矿的发展方向,减轻或消除煤炭开采对环境的不良影响并提高资源采出率是协调开采的重要内容^[1-2]。冀中能源峰峰集团有限责任公司新三煤矿存在的可采储量有限、滞留煤炭多且赋存条件复杂、矸石山污染等问题严重制约企业的发展。实现矸石不升井,消灭矸石山以及回收煤炭,成为资源枯竭型矿井亟待解决的难题^[3]。国内外学者主要对“三下”压煤^[4-11]或赋存条件简单煤层^[12]的矸石充填开采进行了较深入研究,但对于褶

曲断层区、两侧采空、空间交叉巷道等条件下提高煤柱区采出率研究较少。本文研究以高应力软碎煤岩区大断面巷道控制和充填开采关键工艺为主要内容的废矸置换开采技术,实现了煤炭资源与环境协调开采。

1 高应力软碎煤岩区大断面巷道围岩控制原理及参数

为了尽可能多的回收煤炭和充填矸石,置换巷道

收稿日期:2010-11-22 责任编辑:柴海涛

基金项目:煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课题资助项目(SKLCRSM 10B08);国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(010CB226802);教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(2007-1108)

作者简介:何富连(1966—),男,浙江临海人,教授,博士生导师。Tel:010-62339989, E-mail:fulianhe@sohu.com

断面尽可能大并且巷道变形量小,高应力软碎煤岩区大断面巷道的支护问题成为该技术的难题之一。由于普通支护方式对浅部围岩的支护力较低,高应力软碎围岩巷道易发生冒顶片帮等事故。提高锚索支护性能可显著增加巷道围岩安全性^[13],为了清晰反映锚索支护方式产生的应力场,在不考虑重力场的情况下^[14],采用FLAC^{3D}软件^[15]模拟分析锚索桁架和单体锚索应力场分布特征。

1.1 数值模拟模型

本模型尺寸为长×宽×高=50.0 m×15.0 m×50.0 m,巷道宽×高=4.5 m×4.5 m。围岩本构关系采用摩尔-库仑模型。巷道顶板为炭质泥岩,底板为粉砂岩。

锚索采用CABLE结构单元模拟,锚索弹性模量为200 GPa,直径为17.8 mm,长度为7.0 m,拉断载荷为500 kN,锚固长度为1.8 m,预紧力200 kN。垂直单体锚索、倾斜单体锚索和锚索桁架^[16]三种布置方式。顶板锚索长7.0 m,帮锚索长5.0 m。顶板锚索桁架与垂直线夹角20°,且尾部用专用联接锁紧器张拉锁紧;帮锚索桁架上部锚索与水平线夹角20°,下部锚索与水平线夹角-10°,尾部用钢筋托梁(或槽钢)连接;顶锚索间距2.3 m,帮锚索间距1.625 m。

1.2 废矸置换巷道锚索桁架支护原理

锚索支护是利用锚索对岩体产生的压应力作用提高锚固范围内岩体抗拉和抗剪强度,增加围岩的承载能力。因此,锚索支护性能主要是分析锚索对围岩应力的性质以及锚索施加压应力的大小和范围。废矸置换巷道浅部岩体由于完整性差承载能力低是顶板维护的重点。

由图1可以看出,顶锚索桁架能对碎裂顶板施加水平和垂直挤压应力。图2为沿巷道跨度方向不同锚索支护方式对巷道顶板0.5 m处岩体的应力分布。从图2可看出,锚索底部对巷道浅部围岩的应力最大并且向两侧递减,巷道中部和肩角位置压应力最小。由图2(a)看出三种锚索支护施加的最大水平压应力相差不大,约为19 kPa。倾斜单体锚索对顶板中部1.6 m左右区间内施加水平拉应力,最大水平拉应力为10 kPa;垂直单体锚索对顶板中部1.0 m左右区间内施加水平拉应力大小为2.9 kPa;锚索桁架对顶板中部施加水平压应力,最小水平压应力为3.7 kPa。倾斜单体锚索和垂直单体锚索对顶板中部施加拉应力,容易导致岩体拉伸破坏,不利于顶板维护;锚索桁架对顶板中部为压应力能促进浅部围岩稳定。由图2(b)看出单体锚索垂直压应力最大约为30 kPa;垂直单体锚索和倾斜单体锚索对顶板中部1.0 m区间

内垂直应力接近0,单体锚索对巷道顶板中间区域的控制效果较差;锚索桁架对顶板中部垂直应力约为2.6 kPa,能有效控制巷道中部顶板的垮落。

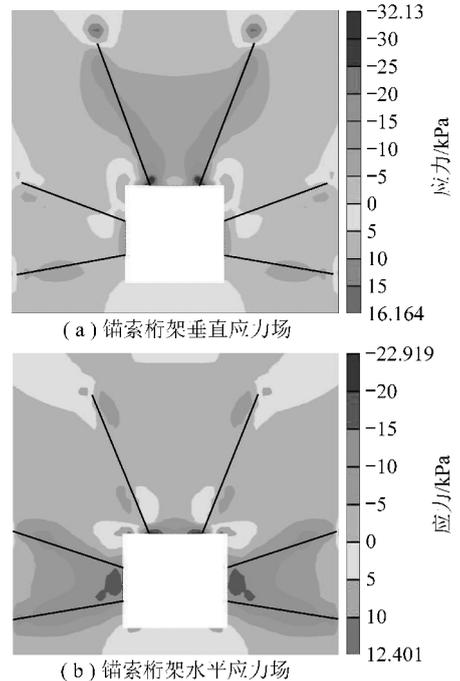


图1 锚索桁架支护的应力场分布

Fig. 1 Support stress field distribution of cable truss

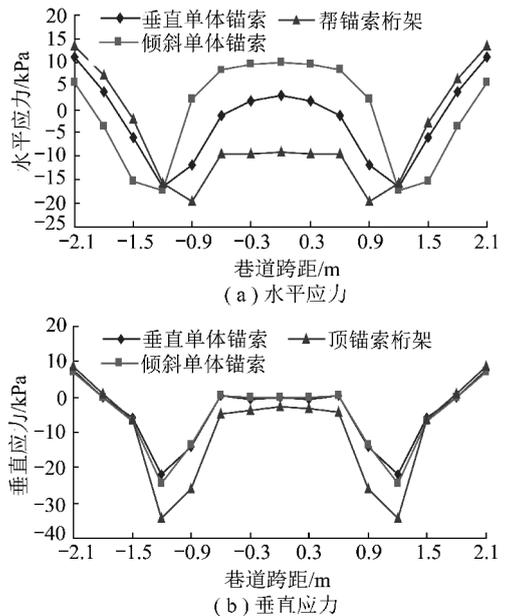


图2 顶锚索桁架和单体锚索支护的应力分布

Fig. 2 Support stress distribution of top cable truss and single cable

由图1(b)可知,帮锚索桁架在巷帮中部产生水平应力集中,支护范围呈“凹槽型”分布。图3为不同锚索支护方式对巷帮0.5 m处岩体的应力分布。由图3(a)可看出单体锚索支护对巷帮施加的最大水平应力分别集中于1.25、2.75 m处,约为25 kPa;单

体锚索对巷帮中部 2.25 m 处应力为 0, 单体锚索对巷帮中部支护力不足, 易发生片帮事故; 帮锚索桁架在支护范围内的平均应力是单体锚索的 2 倍, 能有效防止巷帮中部的变形。由图 3(b) 看出单体锚索底部对浅部顶板围岩施垂直压应力最大约为 15 kPa, 对巷帮中部应力接近 0; 帮锚索桁架最大垂直应力为单体锚索的 86%, 但帮锚索桁架对岩体施加的垂直应力分布较均匀。

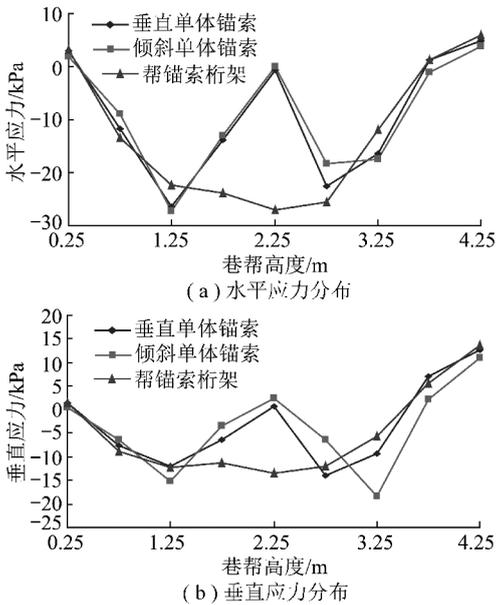


图3 帮锚索桁架和单体锚索支护的应力分布

Fig.3 Support stress distribution of side cable truss and single cable

1.3 锚索桁架支护参数设计

依据新三煤矿现场生产条件, 采用 1.1 节模型数值分析巷道变形与锚索桁架倾角、长度和孔口帮距的关系, 优化设计锚索桁架关键技术参数。根据对褶曲孤岛煤柱的应力分析, 确定模型上边界施加 28.5 MPa 的均布铅垂压应力, 左右边界施加 23.75 MPa 的均布水平压应力。顶锚索桁架角度选取 40°、50°、60° 和 80° 进行模拟, 顶锚索桁架长度选取 6.0、6.5、7.0、7.5 和 8.0 m, 顶锚索桁架孔口帮距选取 0.2、0.5、0.8、1.1 和 1.4 m; 帮锚索桁架参数模拟方案角度选取 10°、15°、20°、25° 和 30°, 长度选取 3.5、4.0、4.5、5.0 和 5.5 m, 孔口帮距取 0.4、1.0、1.6、2.2 和 2.8 m。对以上 5 种支护方案下的顶板下沉量和两帮移近量数据进行无量纲化处理^[17], 得到不同支护方案下锚索桁架参数与围岩变形的关系如图 4 所示。

由图 4(a) 可知, 顶锚索桁架对顶板的变形影响较大, 对两帮的影响较小。顶锚索桁架孔口帮距对巷道顶板影响最大, 其次为顶锚索桁架角度, 顶锚索桁

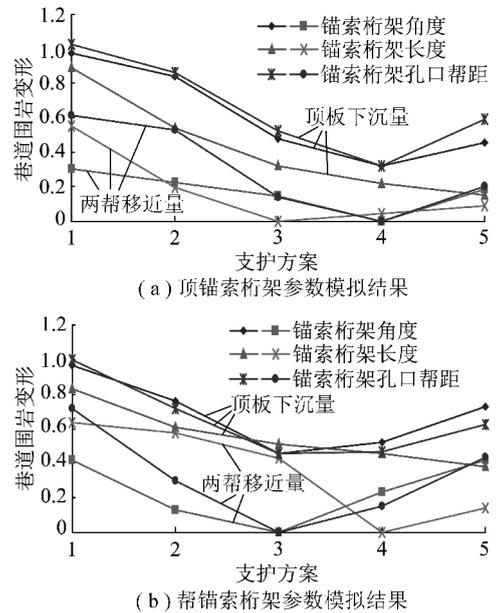


图4 锚索桁架关键参数的模拟结果

Fig.4 Simulation results of key parameters of cable truss

架长度影响较小。当孔口帮距由 0.2 变化到 1.1 m 时, 顶板下沉量减小 25.59%, 两帮移近量减小 15.56%; 当孔口帮距由 1.1 m 增大到 1.4 m 后, 顶板下沉量增加 7%, 由此可见当孔口帮距为 1.1 m 时, 顶板支护效果最好。顶锚索桁架角度为 70° 时, 顶板下沉量最小并且两帮变化平稳; 当顶锚索桁架长度为 7.0 m 时, 顶板下沉量稳定于一个较低水平, 随着锚索长度增加没有明显减小。

由 4(b) 可知, 帮锚索桁架对两帮影响较大, 对顶板影响较小, 其中帮锚索桁架孔口帮距对巷帮影响最大, 其次是锚索长度, 锚索角度影响较小。当帮桁架孔口帮距由 0.4 m 变化到 1.6 m 时, 两帮移近量减小 31.1%, 顶板下沉量减小 21.2%; 当孔口帮距增大时, 两帮移近量和顶板下沉量增大。帮锚索桁架长度由 3.5 m 增加到 5.0 m 时, 两帮移近量减少 15.6%, 但随着锚索长度继续增加两帮移近量变化不大。当顶锚索桁架角度为 20° 时, 两帮移近量最小。

2 废矸抛掷运动力学模型及其关键技术参数

废矸抛掷机在工作过程中, 抛出的废矸堆积成锥体, 锥体角度为岩石的自然安息角, 锥体高度为矸石上升的最大高度; 废矸抛掷机后撤一个施工步距后重新抛射, 形成第二个锥体, 两个锥体部分重叠, 在废矸堆顶部出现波状起伏, 导致巷道充填率降低。废矸堆顶部未充填区域的大小与废矸抛掷机施工步距、设计充填能力有密切关系。

废矸抛掷机施工步距与废矸堆两个波峰之间的距离相等, 振幅与废矸抛掷机的抛射皮带角度、速度、

抛出点位置等因素有关。根据废矸运动特点建立模型(图5)。

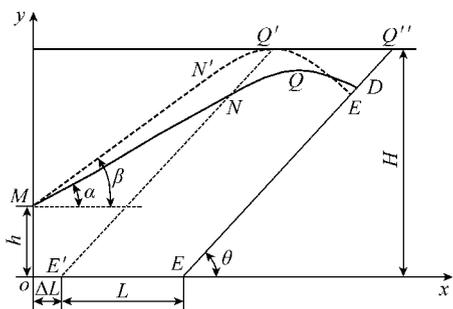


图5 波状起伏幅度与施工步距模型

Fig. 5 Wavy relief intensity and model maps of construction step

废矸抛掷机底座高 h , 抛射皮带为 MN , 废矸由 N 点抛出, 经过最高点 Q , 落于 D 点, 运动轨迹为抛物线, 初始速度 v 和角度 α 为废矸抛掷机按抛射皮带的带速和角度, ΔL 为废矸抛掷机后撤之前废矸堆距离抛掷机底座的距离, $Q'E$ 为废矸堆的一侧, 倾角 θ 为废矸的自然安息角。

废矸抛射的最高点 Q 点随抛射角度 α 和抛射速度 v 变化, 根据动力学计算废矸运动的最高点的轨迹方程为

$$y = x \cot \alpha + h + \frac{v^2}{2g} (\sin^2 \alpha - 2 \cos^2 \alpha) \quad (1)$$

废矸堆的一侧斜边的方程为

$$y = \tan \theta (x - L - \Delta L) \quad (2)$$

当抛射皮带达到最大仰角时, 废矸达到的最高点 Q' 点位于巷道顶板, Q' 点和 Q'' 点间的距离为废矸抛掷机的充填步距 L , 废矸抛射的最高点运动轨迹与废矸堆一侧相交。

由式(1)、(2)得出 D 点运动轨迹方程为

$$y = \frac{\cot \alpha}{1 - \cot \alpha \cot \theta} L + \frac{\Delta L \cot \alpha + h + \frac{v^2}{2g} (\sin^2 \alpha - 2 \cos^2 \alpha)}{1 - \cot \alpha \cot \theta} \quad (3)$$

未充填的面积与充填步距的关系方程为

$$S = -\frac{1}{2} AL^2 + \frac{1}{2} (H - B - A \Delta L - AH \cot \theta + AC) L + \frac{1}{2} (H - B) (\Delta L + H \cot \theta - C) \quad (4)$$

其中, $A = \cot \alpha / (1 - \cot \alpha \cot \theta)$; $B = \left[\Delta L \cot \alpha + h + \frac{v^2}{2g} (\sin^2 \alpha - 2 \cos^2 \alpha) \right] / (1 - \cot \alpha \cot \theta)$; $C = \left[H - h - \frac{v^2}{2g} (\sin^2 \alpha - 2 \cos^2 \alpha) \right] / \cot \alpha$; A 、 B 、 C 的值与废矸

抛掷机的参数有关。

取 $\alpha = 16^\circ$, $\theta = 35^\circ$, $\Delta L = 0.4 \text{ m}$, $h = 1.5 \text{ m}$, $v = 2.5 \text{ m/s}$, $H = 4.5 \text{ m}$ 代入式(4), 拟合充填步距与充填面积的曲线如图6所示。

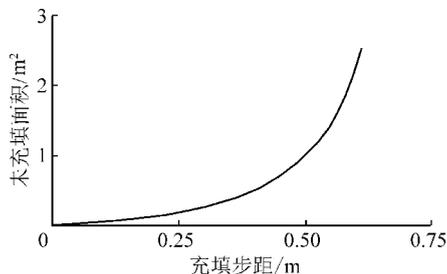


图6 充填步距与充填面积的关系

Fig. 6 Relationship between filling step and filling area

由图6可知, 在 $0 \sim 0.5 \text{ m}$ 的区间内, 充填步距的改变对未充填面积的影响较小; 但当充填步距大于 0.5 m 后, 充填步距增大, 巷道未充填面积急剧增加。当充填步距为 0.5 m 时, 巷道未充填部分的面积为 0.951 m^2 , 巷道充填率可以达到 95.3% 。

3 现场应用实践

新三煤矿作为冀中能源峰峰集团有限责任公司重要的焦煤生产矿井, 剩余可采储量仅为 $2\ 809.8$ 万 t , 井下滞留煤炭资源达 $1\ 656.2$ 万 t , 矿井累计产出矸石 192.97 万 t 。新三煤矿滞留煤炭位于各家沟向斜轴部, 区域内分布 7 条落差在 $1.0 \sim 2.5 \text{ m}$ 的断层, 并且两侧采空, 区域内存在多条废弃巷道。该区域垂直应力集中系数达 $3 \sim 3.5$, 最大水平应力集中系数达 2 ; 煤层及顶底板松软破碎, 围岩裂隙发育。

3.1 高应力软碎煤岩区巷道支护方案

通过数值模拟优化锚索桁架参数, 综合理论分析和工程类比等方法, 确定废矸置换巷道的支护方案(图7)。

顶板采用锚索桁架-单体锚索-锚杆-W钢带-金属网联合支护。锚索桁架采用 $\phi 15.24 \text{ mm} \times 8.10 \text{ m}$ 钢绞线锚索, 排距为 1.6 m , 眼深 7 m , 锚索孔口距煤帮 1.1 m , 锚索钻孔与铅垂线的夹角为 20° 。每两排锚索桁架之间打一根单体锚索且位于巷道中间位置, 单体锚索采用 $\phi 17.8 \text{ mm} \times 7.3 \text{ m}$ 眼深 7 m , 排距 1.6 m 。顶锚杆为 $\phi 20 \text{ mm} \times 2\ 500 \text{ mm}$ 高强锚杆, 间排距 $700 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ 。

巷帮采用锚杆(索)-金属网-钢筋托梁组合支护。锚索采用 $\phi 15.24 \text{ mm} \times 5.30 \text{ m}$ 钢绞线锚索排距 800 mm , 成五花布置。一排两根锚索, 上部锚索距顶板 1.6 m , 与水平面夹角为 $+20^\circ$, 下位锚索距底板 1.275 m , 与水平面夹角为 -10° , 两根锚索尾部用钢

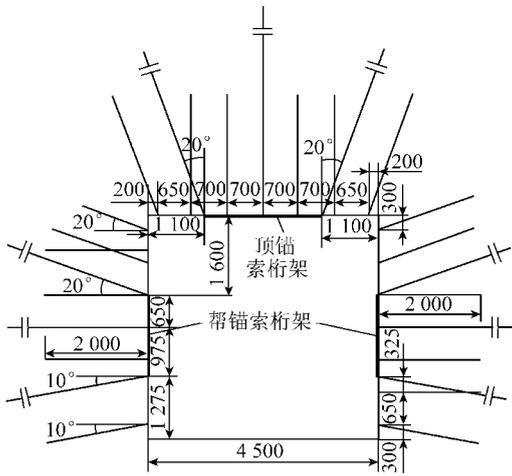


图 7 废矸置换巷道支护方案

Fig. 7 Support program scheme of the waste gangue replacement tunnel

筋托梁联接;另一排单体锚索,巷帮中间水平布置。锚杆与锚索布置在同一排,采用 $\phi 18 \text{ mm} \times 2 \text{ m}$ 等强锚杆,间排距为 $650 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ 。

3.2 置换开采系统及工艺

新三煤矿废矸置换区域内布置 4 条巷道,巷道断面 $4.5 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ (宽 \times 高),废矸置换巷道 1 600 m,辅助巷道 424 m,其中岩巷 180 m,煤巷 224 m。

(1)废矸置换系统包括翻矸车场、废矸仓、返矸巷、废矸置换巷及其它辅助巷道等。翻矸车场与南正巷在同一水平;废矸仓位于翻矸车场与返矸巷的空间交叉部位,上口位于翻矸车场中部并设置有翻车器,下口位于返矸巷安装给煤机;返矸巷一端与南翼轨道平巷相连,另一端与废矸仓下口相连,返矸巷中布置有胶带输送机(图 8)。



图 8 废矸置换系统布置

Fig. 8 Layout plan of the waste gangue replacement system

(2)废矸置换开采的主要工艺流程:地面矸石山的矸石 \rightarrow 副井(经预处理块度 $<150 \text{ mm}$)(岩巷掘进工作面产生的矸石) \rightarrow (装车后经各运输巷道)南正巷 \rightarrow 翻矸车场 \rightarrow (由推车机、翻车机)废矸仓 \rightarrow 给料机 \rightarrow 返矸巷 \rightarrow (胶带输送机运输)废矸置换巷 \rightarrow 废矸抛掷机 \rightarrow 迎头充填。

(3)置换出的煤炭运输工艺流程:废矸置换巷掘进出的煤炭经南翼轨道平巷 \rightarrow 主出煤巷、 -390 主胶带机道 \rightarrow 井底煤仓,然后由箕斗运到地面。

现场实践效果:在掘进期间一个月的观测结果显示两帮移近量最大不超过 145 mm ,顶板下沉量最大不超过 166 mm ,在巷道充填时巷道断面变形率为 79.2% 。废矸置换系统于 2010 年 7 月份开始充填,当月充填矸石 1.96 万 t ,实现矸石不升井的目标并且有部分地面矸石充填在井下,巷道充填率达 90% 以上。

4 结 论

(1)单体锚索对中部顶板有拉应力作用,顶锚索桁架能对破碎顶板施加水平和垂直挤压力;单体锚索对巷帮中部支护力接近 0,帮锚索桁架促使支护力较均匀分布且控制范围呈“凹槽型”。优化顶、帮锚索桁架支护参数确定废矸置换巷道的支护方案。

(2)分析废矸抛掷机的抛掷点位置、抛掷角度、抛掷速度与运移步距及巷道几何尺寸之间的耦合关系,确定废矸抛掷机工艺步距为 0.5 m 。

(3)废矸置换煤炭开采技术在新三煤矿实现高应力软碎煤岩区孤岛煤柱的井下清洁开采,提高煤炭资源采出率,解决矿井矸石处理难题,取得了良好的经济与社会效益。

参考文献:

[1] 钱鸣高,许家林,缪协兴. 煤矿绿色开采技术[J]. 中国矿业大学学报,2003,32(4):343-348.
 Qian Minggao, Xu Jialin, Miao Xiexing. Green technique in coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(4):343-348.

[2] 宋振骥,崔增娣,夏洪春,等. 无煤柱矸石充填绿色安全高效开采模式及其工程理论基础研究[J]. 煤炭学报,2010,35(5):705-710.
 Song Zhenqi, Cui Zengdi, Xia Hongchun, et al. The fundamental theoretical and engineering research on the green safe no coal pillar mining model by mainly using coal gangue backfill[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(5):705-710.

[3] 缪协兴,张吉雄,郭广礼. 综合机械化固体充填采煤方法与技术研究[J]. 煤炭学报,2010,35(1):1-6.
 Miao Xiexing, Zhang Jixiong, Guo Guangli. Study on waste-filling method and technology in fully-mechanized coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1):1-6.

[4] Senyur M G. Fabric of coal-mine refuse as backfilling material and its relation to grain-size distribution parameters[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1998, 98(1):39-48.

[5] Siriwardane Hema J, Kaman R S S, Ziemkiewicz Paul F. Use of waste

- materials for control of acid mine drainage and subsidence[J]. Journal of Environmental Engineering, 2003, 129(10): 910-915.
- [6] 张文海, 张吉雄, 赵计生, 等. 矸石充填采煤工艺及配套设备研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(1): 79-83.
Zhang Wenhai, Zhang Jixiong, Zhao Jisheng, et al. Research on waste filling technology and its matching equipment in coal mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007, 24(1): 79-83.
- [7] 马立强, 李永升. 煤矿井下矸石置换煤炭清洁生产技术[J]. 煤炭学报, 2010, 35(5): 816-819.
Ma Liqiang, Li Yongsheng. The clean production technology of replacement of coal gangue in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(5): 816-819.
- [8] 张 蓓. 矸石充填综采大垂深投料及堵管监控系统设计[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(3): 386-390.
Zhang Bei. Design of the deep batching system and blockage supervisory system for waste backfilling with fully-mechanized coal mining technology [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(3): 386-390.
- [9] 孙希奎, 李学华. 利用矸石充填置换开采条带煤柱的新技术[J]. 煤炭学报, 2008, 33(3): 259-263.
Sun Xikui, Li Xuehua. The new technology of waste-filling replacement mining on strip coal pillar[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(3): 259-263.
- [10] 陈 杰, 张卫松, 闫 斌, 等. 井下矸石充填工艺及普采工作面充填装备[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(4): 32-34.
Chen Jie, Zhang Weisong, Yan Bin, et al. Underground mine coal rejects backfill technique and backfill equipment buildings of conventional coal mining face [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(4): 32-34.
- [11] 吴立新, 王金庄, 刘延安, 等. 建(构)筑物下压煤条带开采理论与实践[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.
Wu Lixin, Wang Jinzhuang, Liu Yan'an, et al. Theory and practice of strip extraction under building [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1994.
- [12] 许家林, 尤 琪, 朱卫兵, 等. 条带充填控制开采沉陷的理论研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(2): 119-122.
Xu Jialin, You Qi, Zhu Weibing, et al. Theoretical study of strip-filling to control mining subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(2): 119-122.
- [13] 康红普, 林 健, 吴拥政. 全断面高预应力强力锚索支护技术及其在动压巷道中的应用[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1 153-1 159.
Kang Hongpu, Lin Jian, Wu Yongzheng. High pretensioned stress and intensive cable bolting technology set in full section and application in entry affected by dynamic pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1 153-1 159.
- [14] 张 镇, 康红普, 王金华. 煤巷锚杆-锚索支护的预应力协调作用分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 881-886.
Zhang Zhen, Kang Hongpu, Wang Jinhua. Pre-tensioned stress coordination function analysis of bolt-cable anchor support in coal roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 881-886.
- [15] Flavio C, Achille G, Domenico G. Small-angle scattering data analysis for dense polydispers system; the FLAC program[J]. Computer Physics Communications, 1999(10): 66-75.
- [16] 赵洪亮, 姚精明, 何富连, 等. 大断面煤巷预应力桁架锚索的理论与实践[J]. 煤炭学报, 2007, 32(10): 1 061-1 065.
Zhao Hongliang, Yao Jingming, He Fulian, et al. Application of prestress truss cable in large cross section coal roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(10): 1 061-1 065.
- [17] 邱 东. 多指标综合评价的系统分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 1991.
Qiu Dong. System analysis of multi-index comprehensive evaluation [M]. Beijing: National Bureau of Statistics of China, 1991.