

文章编号: 1673-3363-(2013)02-0159-06

密实充填采煤沿空留巷巷旁支护体合理宽度研究

张吉雄¹, 姜海强¹, 缪协兴¹, 周楠¹, 咎东峰²

(1. 中国矿业大学矿业工程学院, 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西 西安 710054)

摘要 基于固体密实充填采煤的覆岩移动规律, 分析了沿空留巷围岩变形特征及巷旁支护体的作用机理, 得出夯实机构夯实充填体而传递来的侧压力是导致巷旁支护体失稳和变形的主要因素, 据此建立了侧向压力与巷旁支护体稳定性力学模型, 推导出巷旁支护体宽度计算公式。根据花园煤矿的具体条件, 对不同宽度巷旁支护体的变形特征进行了数值模拟分析。结果表明, 当支护体宽度大于 2.5 m 并采用锚带网联合支护加固后, 侧压力引起的巷旁支护体变形可得到有效控制。现场工程实践证明该项技术成功有效, 巷旁支护体稳定性力学模型及宽度计算公式合理。

关键词 固体充填采煤; 沿空留巷; 巷旁支护体; 合理宽度

中图分类号 TD 822

文献标志码 A

The rational width of the support body of gob-side entry in fully mechanized backfill mining

ZHANG Ji-xiong¹, JIANG Hai-qiang¹, MIAO Xie-xing¹, ZHOU Nan¹, ZAN Dong-feng²

(1. School of Mines, Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China,

China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. China Coal Xi'an Design Engineering Co Ltd, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract In this paper, we analyzed the surrounding rock deformation features of retained entry and the action mechanism of gob-side support body based on the strata movement characteristics in solid backfill mining. The main factor influencing the deformation and instability of the support body is the lateral force caused by tamping operation. A mechanical model of support body stability influenced by lateral force was established, and the width calculation formula of the support body was deduced. The deformation of the support bodies of different widths was analyzed using numerical simulation method with relevant parameters of Huayuan mine. The result shows that the deformation of the support body can be effectively controlled when its width is more than 2.5 m and it is supported by bolts together with bands and net. The field test proves that the technology is successful and effective; the mechanical model of support body stability as well as the width calculation formula is rational.

Key words solid backfill mining; gob-side entry retaining; gob-side support body; rational width

收稿日期: 2012-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51074165); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-11-0728); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ12_0952); 江苏高校优学科建设工程项目

作者简介: 张吉雄(1974-), 男, 宁夏回族自治区中卫市人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 从事固体充填开采与岩层控制等方面的研究。

E-mail: zjxiong@163.com

Tel: 13912005505

近年来, 固体密实充填采煤技术在我国矿区得到广泛的应用。该项技术采用矸石等固体废弃物置换“三下”(建筑物、水体下、铁路下)压煤, 实现了提高资源采出率、规模性处理固体废弃物、保护地表环境及控制覆岩移动等多重目标。由于矸石等固体充填体有效控制了采空区上覆岩层的移动, 充填采煤工作面推进相当于切眼前移, 从根本上改变了长壁综采工作面采场岩层移动特征及矿压显现规律, 从而为实施沿空留巷提供了良好的条件^[1-5]。

沿空留巷技术自 20 世纪 50 年代在我国开始使用以来, 一直是我国煤炭开采的重要技术发展方向。到目前为止, 国内外学者在垮落法管理顶板工作的沿空留巷理论与技术研究方面做了大量的研究, 沿空留巷的巷旁支护、巷内支护、加强支护及煤帮加固技术已日趋成熟^[6-10]。但是固体密实充填采煤工作面的岩层移动特征及矿压显现规律与传统长壁综采工作面已完全不同^[11-14], 传统的沿空留巷理论及技术不能直接应用。

学者根据综合机械化固体充填采煤工作面采场围岩变形结构特征^[15], 进行综合机械化固体充填采煤工作面沿空留巷方式、巷道支护参数及留巷充填体支护方法等方面的研究。本文主要分析固体密实充填采煤下沿空留巷巷旁支护体受力特征及合理宽度, 进一步完善固体充填采煤沿空留巷理论。

1 充填采煤沿空留巷巷旁支护体支护受力特征分析

传统垮落法管理顶板条件下沿空留巷时, 在采空区靠巷道一侧进行充填形成条带, 整个充填带在采空区里面, 不受原巷内支护的保护, 沿空留巷的巷旁支护体需提供较大的切顶力^[16]。对于固体充填采煤工作面, 采空区由密实的矸石等固体废弃物充填, 上覆岩层压力由未开采前的实体煤转移至开采后的煤壁、充填采煤液压支架及采空区充填体, 顶板不会出现垮落, 仅会形成裂隙带和弯曲下沉带, 工作面也不会出现明显的初次来压和周期来压现象^[17-20]。随着工作面的推进, 充填体被上覆岩层逐步压实, 其内部垂直应力接近原岩应力, 充填体承载了上覆岩层的大部分压力, 工作面及巷道上方的顶板不会形成传统的“O-X”断裂, 而是形成一端固定在煤壁、一端固定在充填体的两端固支结构。因此, 沿空留巷的巷旁支护体不需要提供较大的切顶力, 即固体密实充填采煤沿空留巷巷旁支护体所提供的垂直向上的支撑力远小于垮落法管理顶

板的工作面。

由上分析可知, 充填采煤采空区充填体的充实率直接影响沿空留巷巷旁支护体的稳定性。为确保采空区充实率, 在充填采煤液压支架后方装配了夯实机构, 其夯实力达 2 MPa, 可实现了采空区的密实充填, 在充填夯实过程中, 其夯实力作用于充填体之后, 传递的力对巷旁支护体形成侧向压力, 侧向压力会造成巷旁支护体的变形或失稳, 如图 1。

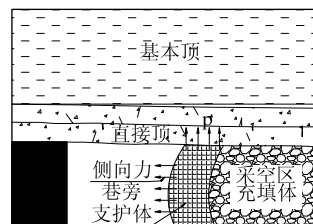


图 1 巷旁支护体侧向变形

Fig.1 The lateral deformation of gob-side support body

同时, 随着充填采煤工作面的推移, 在上覆岩层作用下, 采空区充填体与巷旁支护体也会被逐步压实, 巷旁支护体进一步受到来自充填体压实变形产生的侧向压力。但从现场实践情况来看, 只要在夯实机构作用下沿空留巷巷旁支护体能保持稳定, 在此侧向压力下也不会失稳。因此, 本次研究主要考虑在夯实机构夯实力作用下巷旁支护体稳定性。

2 沿空留巷巷旁支护体合理宽度力学分析

2.1 力学模型建立

夯实机构的夯实力可以简化为一个集中作用在半无限大物体上的力 F , 力学模型如图 2 所示。

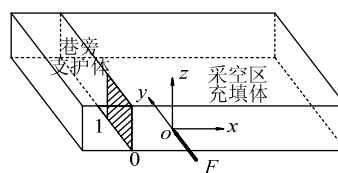


图 2 夯实机构侧压力力学模型

Fig.2 The mechanical model of lateral force caused by tamping operation

夯实机构的夯实力 F 可由下式计算

$$F = p\pi \frac{D^2}{4} n\eta \quad (1)$$

式中: p 为夯实千斤顶内乳化液压力, MPa; D 为夯实千斤顶缸径, mm; n 为夯实千斤顶数量, 取 2; η 为夯实机构内部摩擦损耗系数。

利用弹性力学中半空间体在边界上受法向集中力的解析解, 可求出夯实机构的夯实力 F 对沿空留巷巷旁支护体产生的侧压力, 巷旁支护体宽度等

参数的选择应以此侧压力作用不产生失稳为前提。

2.2 力学计算

集中载荷作用下的应力分布如图 3 所示。图中以夯实力 F 的作用点 O 为原点, 则 M 点的坐标为 x, y, z , $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为 x, y, z 方向的法向应力, $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 为切应力, $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 。

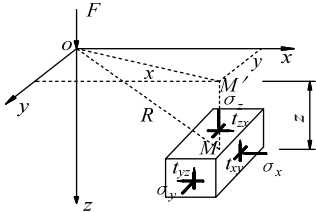


图 3 集中载荷作用下的应力

Fig.3 The stress field caused by a concentrated load

当半无限弹性体表面作用有集中力 F 时, 根据布森涅斯克解答^[21], 在弹性体内任意点 M 所引起的应力解如下:

$$\sigma_x = \frac{3F}{2\pi} \left\{ \frac{x^2}{R^5} + \frac{1-2\mu}{3} \left[\frac{1}{R(R+z)} - \frac{(2R+z)x^2}{(R+z)^2 R^3} - \frac{z}{R^3} \right] \right\} \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{3F}{2\pi} \left\{ \frac{y^2 z}{R^5} + \frac{1-2\mu}{3} \left[\frac{1}{R(R+z)} - \frac{(2R+z)y^2}{(R+z)^2 R^3} - \frac{z}{R^3} \right] \right\} \quad (3)$$

$$\sigma_z = \frac{3Fz^3}{2\pi R^5} \quad (4)$$

根据计算可得, 夯实机构夯实力 F 产生的侧压力对 1.0 m 内范围巷旁支护体的稳定性影响较大, 因此, 仅对图 2 中阴影部分所受压力进行积分, 阴影部分巷旁支护体所受侧压力 F' 为:

$$F' = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_0^1 \sigma_x dy dz \quad (5)$$

式中 h 为巷旁支护体高度, m。

巷旁支护体可以提供的静摩擦力 f 可用下式计算:

$$f = dlh\rho\gamma \quad (6)$$

式中: d 为巷旁支护体宽度, m; l 为积分计算中巷旁支护体的长度, 1.0 m; ρ 为巷旁支护体的密度, t/m³; γ 为静摩擦系数, 取 0.3。

由式(5), (6)分析计算可知, 若保持沿空留巷巷旁支护体稳定性, 巷旁支护体能提供的静摩擦力 f 应不小于侧压力 F' , 即

$$f \geq F' \quad (7)$$

根据工程实践矿井花园煤矿的基本条件, 取参数 p 为 20 MPa, D 为 160 mm, h 为 2.5 m, ρ 为 2.7 t/m³ 代入式(5)~(7), 可得出沿空留巷巷旁支护体不失稳的宽度应不小于 2.5 m。

3 沿空留巷巷旁支护体合理宽度数值模拟分析

3.1 模型建立及模拟方案提出

结合工程实践矿井花园煤矿的地质采矿条件, 采用 UDEC 数值模拟软件分析沿空留巷巷道围岩变形情况, 岩层力学参数见表 1。根据力学分析得出沿空留巷巷旁支护体合理宽度不小于 2.5 m 的结论, 设计 4 个模拟方案, 即沿空留巷巷旁支护体宽度分别为 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 m。

表 1 岩层力学参数表
Table 1 The mechanical parameters of strata

序号	岩性	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	内摩擦角/(°)	内聚力/MPa	抗拉强度/MPa
1	泥岩-粉砂岩	30	0.16	2 500	30	35	2
2	泥岩	15	0.2	2 500	19	10	1.5
3	煤层	10	0.3	1 400	17	1	1
4	粗砂岩	36	0.14	2 500	38	15	6
5	粉砂岩	40	0.1	2 500	36	18	5
6	细砂岩	28	0.19	2 500	28	32	8
7	中砂岩	33	0.1	2 500	23	36	10
8	充填体	0.15	0.1	1 700	15	0.1	0

建立模型尺寸宽×高为 400 m×80.8 m, 模型上边界施加等效于上覆岩层自重的均布载荷 13.25 MPa, 两侧固定水平位移, 下边界固定垂直位移, 夯实机构对采空区充填体的夯实力简化为 z 方向(垂直于 x, y 方向)。考虑采空区充填体形状的任意性和随机性, 充填体采用 VORONOI 命令生成随机

多边形节理; 沿空留巷巷旁支护体为锚网加固垒砌矸石带, 采用 Mohr-Coulomb 模型。

3.2 数值模拟结果分析

不同沿空留巷巷旁支护体宽度下, 巷旁支护体侧向变形量及顶板下沉量如图 4 所示。

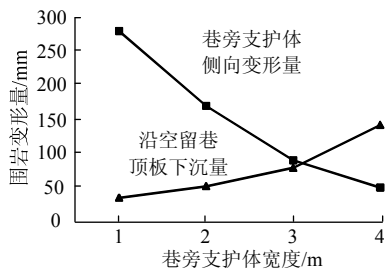


图 4 不同巷旁支护体宽度下沿空留巷围岩变形量
Fig.4 The surrounding rock deformation for different width of support body

由图 4 可知,巷旁支护体的侧向变形量以及巷道顶板下沉量与巷旁支护体宽度密切相关。随着沿空留巷巷旁支护体宽度由 1.0 m 增至 4.0 m,巷旁支护体侧向变形量减小幅度达 82.1%,而顶板下沉量增幅达 75.4%。其主要原因为:1)巷旁支护体宽度的增加提高了巷旁支护体抵抗侧向力的能力,有效限制了巷旁支护体的侧向变形量;2)由于巷旁支护体由锚网加固的垒砌矸石带构成,其控顶能力明显小于采空区密实的充填体,随着巷旁支护体宽度的增加,对沿空留巷顶板的支撑能力减小,从而导致了巷道顶板的下沉量增加。

由图也可看出,巷旁支护体宽度由 3.0 m 增至 4.0 m,沿空留巷顶板下沉量增幅达 44.4%,占巷旁支护体宽度由 1.0 m 增至 4.0 m 顶板下沉量增幅的 58.9%。结合力学分析沿空留巷巷旁支护体宽度应不小于 2.5 m,可得出沿空留巷巷旁支护体的合理宽度应为 2.5~3.0 m。

4 工程实践

4.1 工程概况

工程实践矿井为济宁矿业集团花园煤矿,主采二叠系山西组 3 煤,埋藏深度为-500~-800 m,煤层平均采高 2.5 m,平均倾角 12°。设计 1316 充填采煤工作面面长 100 m,推进长度 289 m。工作面采

用了仰采俯充的前进式充填采煤法,两条回采巷道均需沿空留巷,本文仅以轨道巷为例进行说明。1316 轨道巷长度 304 m,标高-510~-550 m,巷道净宽 3.4 m,净高 2.5 m,巷道顶底板情况见表 2。设计充填采煤工作面采空区及垒砌巷旁支护体的充填材料均为粒径不大于 50 mm 矸石,巷旁支护体宽度取 3.0 m。

表 2 1316 工作面轨道巷顶底板情况表

Table 2 The roof and floor conditions of the 1316 tail gate

位置	名称	厚度/m	位置	名称	厚度/m
顶板	中砂岩	21.30	底板	泥岩	1.7
	细砂岩	6.00		炭质泥岩	0.6
	粉砂岩	15.20		泥岩	1.6
	粗砂岩	1.80		粉砂岩	6.7

4.2 沿空留巷支护方案

1316 工作面轨道巷原支护方案:顶板采用 18 mm×1800 mm 螺纹钢锚杆、金属网以及钢筋梯进行联合支护,锚杆间排距为 800 mm×1000 mm,每排 4 根锚杆。两帮支护采用 18 mm×1800 mm 的螺纹钢锚杆、塑料网进行支护,锚杆间排距 1000 mm×1000 mm。

设计 1316 工作面回采前轨道巷的加强支护方案:顶板采用 $\Phi 17.8$ mm×L4800 mm 的锚索加槽钢支护,沿巷道走向布置 2 列锚索,其间排距为 2000 mm×800 mm。

1316 工作面沿空留巷巷旁支护体支护方案:巷旁垒砌矸石支护体宽度 3 000 mm,高度接顶接底,采用 $\Phi 20$ mm×L3200 mm 双头螺纹式锚杆加网、钢筋梯和钢带进行固定。钢带与钢筋梯采用“十字”交叉布置的方式,垂直于巷道顶底板布置 2 500 mm 的钢带,沿巷道走向布置 1 000 mm 的钢筋梯。

1316 工作面轨道巷原设计支护方案、加强支护方案及沿空留巷巷旁支护体支护方案均如图 5。

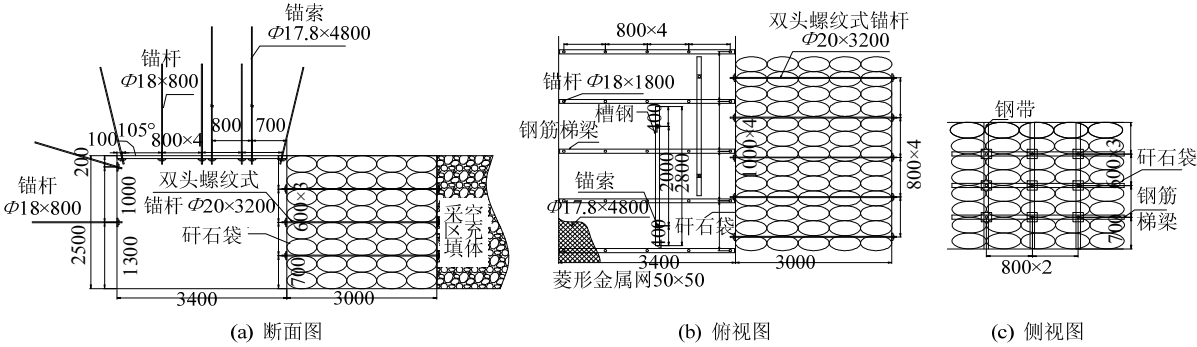


图 5 1316 工作面轨道巷支护方案 (mm)
Fig.5 The support scheme for the 1316 tail gate

4.3 沿空留巷变形监测分析

1316 工作面轨道巷沿空留巷期间, 设计在垒砌巷旁支护体内埋设了 3 个压力传感器监测其内部应力, 并监测了巷道的表面位移, 其监测结果如图 6, 7 所示。

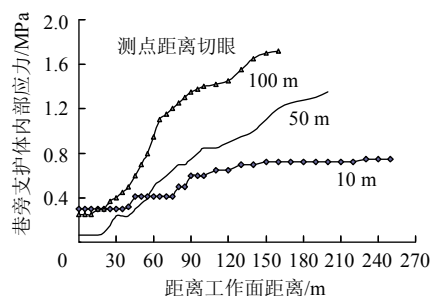


图 6 工作面推进过程中巷旁支护体内部应力变化

Fig.6 The internal stress in the support body in the advancing process of 1316 panel

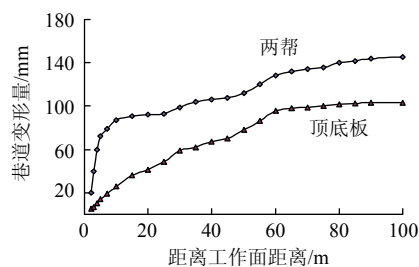


图 7 工作面推进过程中沿空留巷变形量

Fig.7 The roadway deformation in the advancing process of 1316 panel

由图 6, 7 可知: 1) 随着工作面推进距离增加, 沿空留巷巷旁支护体内部应力不断增大, 但最大值仅达到 1.8 MPa, 远低于原岩应力 13.25 MPa。主要是由于煤体及采空区内密实充填体承受了大部分上覆岩层的压力, 巷旁支护体承受较小的压力。2) 随着工作面推进距离增加, 沿空留巷两帮及顶底板移近量逐渐增大。两帮移近量最大值为 157 mm, 其中距工作面 10 m 范围内两帮移近量达 86 mm, 占两帮总移近量的 55%, 距工作面 5 m 以内变形速度较大, 主要是由夯实机构夯实力传递至巷旁支护体形成的侧压力造成。3) 当工作面推进 60 m 后, 巷道两帮及顶底板移近量均趋于稳定, 主要是由于采空区充填体在覆岩层作用下进一步压实, 有效控制了顶板移动, 沿空留巷所受的采动影响也随之减小。

综上所述, 沿空留巷加固垒砌矸石巷旁支护体宽度为 3.0 m 时, 其留巷两帮最大移近量仅为 157 mm, 顶底板最大移近量为 104 mm, 留巷断面保持

在原断面 85% 以上, 满足使用要求。

5 结 论

1) 相比垮落法开采工作面, 固体密实充填采煤沿空留巷的巷旁支护体不需要提供较大的切顶力。沿空留巷巷旁充填体保持稳定性条件是能承受在夯实机构夯实力作用下产生的侧向压力。

2) 结合工程实践矿井花园煤矿的具体条件, 通过力学分析得出了当巷旁支护体能提供的静摩擦力不小于侧压力时可保持稳定, 数值模拟得出不同巷旁支护体宽度下沿空留巷围岩变形特征, 并最终确定了沿空留巷巷旁支护体的合理宽度范围为 2.5~3.0 m。

3) 根据巷旁支护体的受力特征和稳定性要求, 工程实践矿井花园煤矿沿空留巷巷旁采用了宽度为 3.0 m 的加固垒砌矸石支护体, 留巷断面保持在原断面 85% 以上, 应用效果良好。

参考文献:

- [1] 缪协兴, 钱鸣高. 中国煤炭资源绿色开采研究现状与展望[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(1): 1-14.
MIAO Xie-xing, QIAN Ming-gao. Research on green mining of coal resources in China: current status and future prospects[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(1): 1-14.
- [2] 缪协兴, 张吉雄, 郭广礼. 综合机械化固体废弃物充填采煤方法与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [3] 张吉雄, 缪协兴. 煤矿矸石井下处理的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(2): 197-200.
ZHANG Ji-xiong, MIAO Xie-xing. Underground disposal of waste in coal mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(2): 197-200.
- [4] 张吉雄, 缪协兴, 郭广礼. 矸石(固体废物)直接充填采煤技术发展现状[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 395-401.
ZHANG Ji-xiong, MIAO Xie-xing, GUO Guang-li. Development status of backfilling technology using raw waste in coal mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(4): 395-401.
- [5] 巨峰. 建筑物下矸石与粉煤灰充填综采关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学矿业工程学院, 2009.
- [6] 华心祝. 我国沿空留巷支护技术发展现状及改进建议[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(12): 78-81.
HUA Xin-zhu. Development status and improved proposals on gob-side entry retaining support technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(12): 78-81.

- 78-81.
- [7] 柏建彪, 周华强, 侯朝炯, 等. 沿空留巷巷旁支护技术的发展[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 183-186. BAI Jian-biao, ZHOU Hua-qiang, HOU Chao-jiong, et al. Development of support technology beside roadway in goaf-side entry retaining for next sublevel[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 183-186.
- [8] 王卫军, 侯朝炯. 沿空巷道底鼓力学原理及控制技术的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 69-74. WANG Wei-jun, HOU Chao-jiong. Study on mechanical principle and control technique of floor heave in roadway driven along next goaf[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 69-74.
- [9] 唐建新, 胡海, 涂兴东, 等. 普通混凝土巷旁充填沿空留巷试验[J]. 煤炭学报, 2010, 35(9): 1425-1429. TANG Jian-xin, HU Hai, TU Xing-dong, et al. Experimental on roadside packing gob-side entry retaining for ordinary concrete[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(9): 1425-1429.
- [10] 康红普, 牛多龙, 张镇, 等. 深部沿空留巷围岩变形特征与支护技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1977-1987. KANG Hong-pu, NIU Duo-long, ZHANG Zhen, et al. Deformation characteristics of surrounding rock and supporting technology of gob-side entry retaining in deep coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1977-1987.
- [11] 张吉雄. 矸石直接充填综采岩层移动控制及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学矿业工程学院, 2008.
- [12] 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 Xie-xing, ZHANG Ji-xiong, GUO Guang-li. Study on waste-filling method and technology in fully-mechanized coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 1-6.
- [13] JU Feng, ZHANG Ji-xiong, HUANG Yan-li, et al. Waste filling technology under condition of complicated geological condition working face[C]//The 6th International Conference on Mining Science & Technology. Procedia Earth and Planetary Science, 2009: 1220-1227.
- [14] 缪协兴. 综合机械化固体充填采煤矿压控制原理与支架受力分析[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(6): 795-801.
- MIAO Xie-xing. Principle of underground pressure control in fully-mechanized coal mining with solid filling and force analysis of mining support[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(6): 795-801.
- [15] 黄艳利, 张吉雄, 张强, 等. 综合机械化固体充填采煤原位沿空留巷技术[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1623-1628. HUANG Yan-li, ZHANG Ji-xiong, ZHANG Qiang, et al. Technology of gob-side entry retaining on its original position in fully-mechanized coalface with solid material backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1623-1628.
- [16] 李化敏. 沿空留巷顶板岩层控制设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 651-654. LI Hua-min. Control design of roof rocks for gob side entry[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 651-654.
- [17] 缪协兴. 采动岩体的力学行为研究与相关工程技术创新进展综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1988-1998. MIAO Xie-xing. Review of research on mechanical behaviors of mining rock mass and its related engineering technological innovation progress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1988-1998.
- [18] ZHANG Ji-xiong, ZHOU Nan, HUANG Yan-li, et al. Impact law of the bulk ratio of backfilling body to overlying strata movement in fully mechanized backfilling mining[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2010, 47(1): 73-84.
- [19] 张吉雄, 吴强, 黄艳利, 等. 矸石充填综采工作面矿压显现规律[J]. 煤炭学报, 2010, 35(增刊): 1-4. ZHANG Ji-xiong, WU Qiang, HUANG Yan-li, et al. Strata pressure behavior by raw waste backfilling with fully-mechanized coal mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(Supp): 1-4.
- [20] 张吉雄, 李剑, 安泰龙, 等. 矸石充填综采覆岩关键层变形特征研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 357-362. ZHANG Ji-xiong, LI Jian, AN Tai-long, et al. Deformation characteristic of key stratum overburden by raw waste backfilling with fully-mechanized coal mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 357-362.
- [21] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.