

文章编号:0253-9993(2010)09-1419-06

# 水体下急倾斜煤层采空区矸石充填顶板控制

李永明<sup>1,2</sup>,刘长友<sup>1</sup>,李西蒙<sup>1</sup>,张宁波<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221008;2. 山西大同大学 矿业工程学院,山西 大同 037003)

**摘 要:**采用数值计算和物理模拟方法,分析了水体下急倾斜煤层开采采空区矸石自溜充填顶板控制效果。结果表明:采空区矸石充填可以有效降低工作面顶板下沉挠度,减小区段平巷围岩变形;矸石充填限制了相邻分带煤柱的横向变形,减小其变形破坏程度以及降低相邻分带回采时的矿压显现;矸石充填使覆岩内的应力发生转移和重新分布,有效降低了覆岩导水断裂带的高度,减少了防水煤柱的塑性破坏范围。

**关键词:**水体下采煤;急倾斜煤层;矸石充填;防水煤柱;突水防治

**中图分类号:**TD823.83

**文献标志码:**A

## Roof control effect for gangue backfilling of goaf in thin steeply inclined seam under water body

LI Yong-ming<sup>1,2</sup>, LIU Chang-you<sup>1</sup>, LI Xi-meng<sup>1</sup>, ZHANG Ning-bo<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China; 2. School of Mining Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037003, China)

**Abstract:** Numerical calculation and physical simulation methods were used to analyze the roof control effects of gangue self-rolling backfilling in the goaf of steeply inclined seam under water body. The results show that: subsidence deflection of roof and deformation of surrounding rock in section gallery can be effectively decreased by gangue backfilling; gangue backfilling can limit the transverse deformation of adjacent zoning pillar and reduce its failure deformation and strata behaviors degree when mining adjacent coal face; gangue backfilling technology in the goaf of steeply inclined coal seam can decrease the height of water-flowing fractured zone and plastic zone of waterproof coal pillar as well as transition and redistribution of stress in the mass.

**Key words:** mining under water body; thin steeply inclined seam; gangue backfilling; waterproof coal pillar; water inrush precaution and control

“三下”采煤日趋成为我国煤炭资源开采的一个重要部分<sup>[1-2]</sup>。和建筑物下、铁路下采煤相比,水体下采煤开采技术难度更大,它不仅需要保护矿井本身,当地表水沿矿层或岩层裂缝灌入井下时,采煤作业牵涉到工人的生命安全和难能再生的水资源的保护<sup>[3]</sup>。水体下采煤开采技术措施主要包括<sup>[4]</sup>:充填开采、柱式开采、分区开采、分层间歇式开采和协调开采等。其中,充填开采是最有效的防止顶板下沉破坏的方法,在“三下”采煤中有着广阔的应用前景,是煤

矿绿色开采的发展方向之一<sup>[5-8]</sup>。

许多学者对充填体的力学机制进行了研究<sup>[9-12]</sup>,布雷迪和布朗认为,采场充填体一般能对围岩起支护作用,可以防止围岩的整体失稳或局部垮落。北京科技大学于学馥教授提出了充填体的3种机理:①应力转移和吸收;②应力隔离机理;③系统的共同作用。急倾斜煤层开采采空区矸石自溜充填技术具有工艺简单、充填材料丰富等优点,已被许多矿井使用,但对急倾斜煤层开采采空区充填顶板控制效果和机

制等研究尚有待完善。本文从矿山压力显现的角度,采用离散元数值计算软件 Udec<sup>2D</sup> 3.10 分析水体下急倾斜煤层开采采空区矸石充填顶板控制效果,为急倾斜煤层开采采空区矸石充填技术提供理论依据。

1 开采条件及水文地质特征

1.1 急倾斜煤层赋存及开采技术条件

龙煤集团七台河分公司龙湖煤矿南二采区煤层赋存条件复杂,设计开采 44、46、48、49、54<sub>上</sub>、57、58<sub>上</sub>、59 八层煤,多为急倾斜薄及中厚煤层,倾角最大 73°,平均 60°。48 煤层为南二采区首采煤层,首采工作面埋深 320 ~ 400 m,煤层平均厚度 0.7 m,平均倾角 63°,顶、底板均为坚硬砂岩层,综合柱状图如图 1 所示。

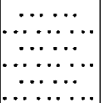
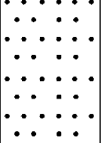
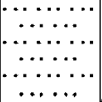
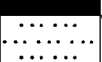

柱 状	名 称	煤厚/m	岩性描述
	粉砂岩	10.0	灰黑色,层理发育,多为水平层理
	中砂岩	18.0	灰白色,无层理,坚硬,厚层状构造,结构致密
	粉砂岩	5.0	灰黑色,水平层理发育,整合接触,结构致密,坚硬
	48 煤	0.4~1.0 0.7	黑色,半暗型煤,层理发育,局部夹矸
	粉砂岩	2.2	灰黑色,岩石层理发育,结构致密

图 1 48 煤层综合柱状图

Fig. 1 Geological histogram of 48 coal seam

48 煤层采用分带仰斜采煤方法,如图 2 所示。首采分带走向长度 25 m,倾斜推进长度 80 m,分带之间留设 5 m 的保护煤柱。工作面采用爆破落煤,木支柱支护,间排距 1.0 m×1.0 m。上下巷均为半圆拱形,巷道宽度 3.6 m,直墙边高 2.0 m,采用锚杆+锚索,配合木板进行联合支护。

1.2 矿井水文地质特征

由于南二采区急倾斜煤层地表露头塌陷,雨季时地表水沿煤层露头灌入上覆废弃小窑,使小窑采空区内含有大量积水,并与地表水体形成水力联系。当煤层回采后,顶板大面积悬顶发生破断将使覆岩导水断裂带向上扩展,同时,防水煤柱在水头压力和矿山压力作用下产生塑性破坏,均可导致上覆小窑采空区积水和地表水体进入矿井形成透水事故,因此,南二采

区急倾斜煤层开采存在严重的安全生产隐患。

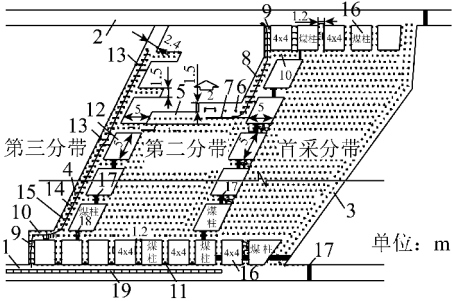


图 2 48 煤层分带仰斜采煤方法

Fig. 2 Strip and up-dip mining method of 48 coal seam

1—工作面运输巷;2—工作面回风巷;3—切眼;4—进风上山;5—回采工作面;6—临时柱;7—作业平台;8—回风上山;9—安全出口;10—横川;11—放煤仓口;12—煤柱;13—挡矸板;14—防滑;15—防滑木;16—煤柱;17—密闭;18—调节风窗;19—刮板输送机

1.3 采空区矸石自溜充填工艺

为了保证南二采区急倾斜煤层的安全回采,龙湖煤矿南二采区八层可采煤层首采工作面采空区均进行矸石充填。矸石从掘进工作面运输至 48 煤层工作面上巷,在自重的作用下沿倾斜方向充填进入采空区。同时,为保证矿井生产的正常进行,回采工艺与充填工艺平行作业,即回采下一分带时对相邻已采分带采空区进行充填。

48 煤层首采分带回采后采空区进行矸石充填,可以使分带煤柱的受力状态由单向受力向双向受力转变,从而提高了分带煤柱的强度,确保了分带煤柱在回采期间的稳定。同时,采空区矸石充填,降低了顶板大面积悬顶范围,使相邻分带开采时边界近于四边固支状态,因此,可以减小相邻分带回采期间的矿压显现,保证相邻分带的安全回采。

2 急倾斜煤层采空区充填数值分析

2.1 数值计算模型

以 48 煤层工作面地质条件和开采技术条件为依据,采用离散元数值计算软件 Udec<sup>2D</sup> 3.10 进行模拟研究。模拟模型范围 80 m×160 m(长×高),采用围岩本构关系为莫尔-库仑模型,模型采用应力-位移混合边界,上表面施加均匀的垂直压应力,两侧面施加随深度变化的水平压应力,数值计算力学模型如图 3 所示。

2.2 数值计算方案

考虑经济等方面的因素,许家林教授等提出了煤矿部分充填开采技术的概念,通过减少充填材料的用量和充填量来降低充填成本<sup>[13-14]</sup>。为了研究急倾斜煤层开采采空区不充填、部分充填和整体充填不同顶板控制方式以及充填体强度对顶板控制效果的影响,

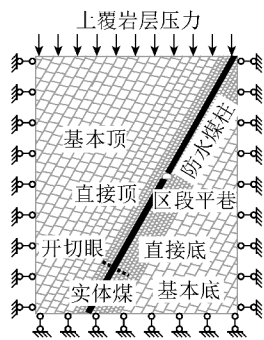


图 3 数值计算力学模型

Fig. 3 Mechanical model of numerical simulation

数值计算采用以下 3 种方案：

(1)采空区不充填。48 煤层工作面回采后采空区不进行充填。

(2)部分充填。48 煤层回采后,仅充填工作面下部距开切眼距离 40 m 范围,充填体的弹性模量分别为 0.1、0.5 和 1.0 GPa。

(3)整体充填。48 煤层回采后,对整个采空区的 80 m 范围进行充填,充填体的弹性模量分别为 0.1、0.5 和 1.0 GPa。

同时,在工作面顶板和防水煤柱上方布置测线,分别记录不同控顶条件下顶板的下沉量、区段上巷围岩变形量、防水煤柱塑性区范围以及采空区充填前后覆岩应力变化等。

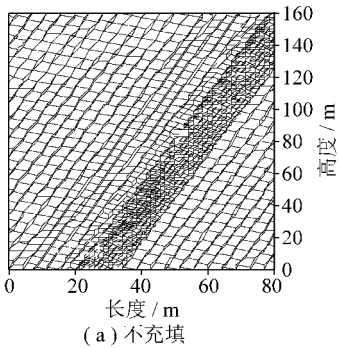
3 急倾斜煤层采空区矸石充填围岩控制效果分析

水体下急倾斜煤层开采采空区进行矸石充填,是防止围岩移动、变形、弯曲下沉乃至冒落破坏的有效措施。

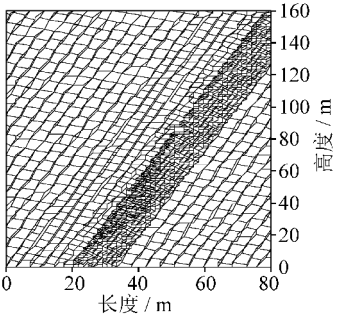
3.1 降低顶板移近量

48 煤层工作面开采采空区不充填、整体充填和部分充填不同顶板控制条件下,工作面顶板位移如图 4 所示,其中充填体的弹性模量为 0.5 GPa。采空区不同顶板控制条件下顶板位移最大值对比如图 5 所示。由图 5 可知:① 48 煤层回采后采空区不进行充填,顶板位移量为 90.8 mm;② 部分充填和整体充填顶板移近量均随充填体强度的增加呈降低趋势;③ 整体充填顶板控制效果显著高于部分充填,部分充填时充填体弹性模量 1.0 GPa 和整体充填充填体弹性模量 0.1 GPa 基本相等;④ 采空区整体充填充填体弹性模量为 0.5 GPa 时,比充填体弹性模量为 0.1 GPa 时顶板下沉量降低 44.2%;整体充填充填体弹性模量 1.0 GPa 时,比充填体弹性模量 0.5 GPa 顶板下沉量降低 28.4%,即随着充填体强度的增加,采

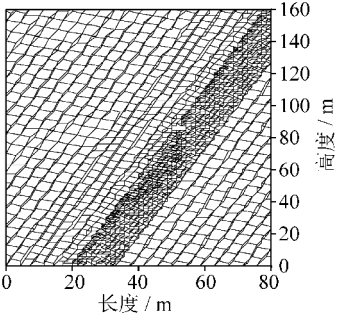
空区整体充填顶板下沉量降低的幅度减小。



(a) 不充填



(b) 整体充填



(c) 部分充填

图 4 采空区不同控顶方式顶板位移

Fig. 4 Roof displacement with different roof control type of goaf

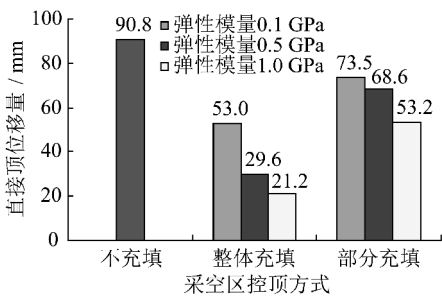


图 5 采空区不同控顶方式顶板位移对比

Fig. 5 Comparison of roof displacement with different roof control type of goaf

3.2 减小巷道围岩变形

48 煤层工作面回采后采空区不进行充填区段上巷围岩变形如图 6 所示。由图 6 可知,区段巷道左帮变形明显大于右帮,因此,仅对不同控顶条件区段巷道左帮变形进行对比,结果如图 7 所示。由图 7 可知,采空区不进行充填左帮位移量为 21 ~



23 mm,部分充填次之,为 15 ~ 16 mm,整体充填最小,为 11 ~ 13 mm,仅是采空区不充填的 50% 左右。同时,不同控顶条件下巷道左帮在 0.6 ~ 1.0 m 处均发生突变,因此,在 0.6 ~ 1.0 m 处应该采取加固措施,如加打帮锚杆等。

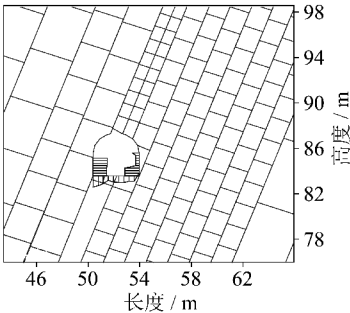


图 6 工作面回采后采空区不充填巷道围岩变形  
Fig. 6 Surrounding rock deformation of roadway without backfilling of goaf after coal face ends up

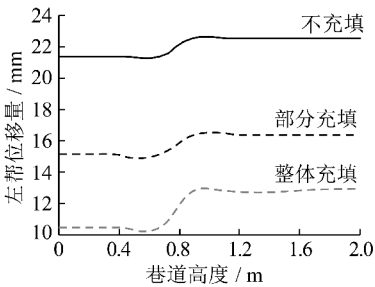


图 7 采空区不同顶板控制方式巷道左帮位移对比  
Fig. 7 Displacement comparison of left sides of roadway with different roof control type of goaf

3.3 降低导水断裂带高度

采用相似材料试验研究,48 煤层采空区不进行充填时导水断裂带分布如图 8 所示。顶板分层垮落,初次垮落带高度 8 m。在平行于回采方向 15 和 19 m 位置分别产生长度 34 和 30 m 的导水裂隙。而对采空区进行充填后,覆岩仅在平行于回采方向 6 ~ 8 m 位置处产生了的离层裂隙。因此,采用充填方法可以有效降低覆岩的导水断裂带高度。

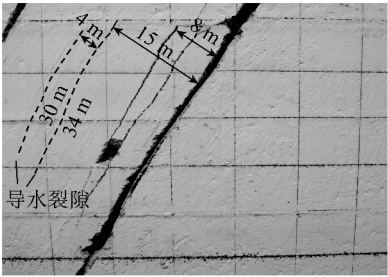


图 8 采空区不充填时导水断裂带高度  
Fig. 8 Height of water-flowing fractured zone without backfilling of goaf

3.4 降低覆岩应力集中程度

48 煤层采空区不充填和整体充填条件下覆岩主应力分布如图 9 所示。急倾斜煤层工作面回采后,采空区不充填和整体充填时最大主应力分别为 7.799 和 5.997 MPa,因此,采空区充填后顶板受到支撑,使覆岩内的应力发生转移和重新分布达到新的平衡状态。

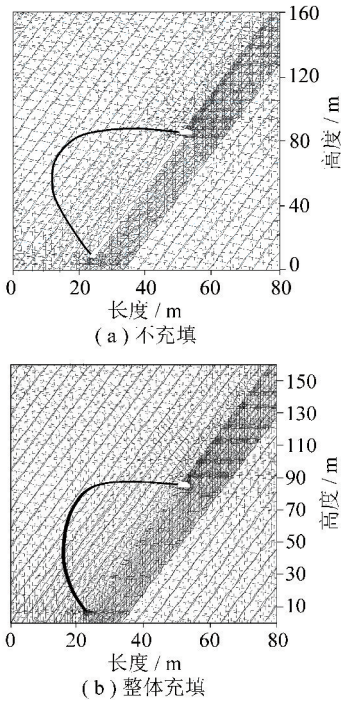


图 9 采空区不充填与整体充填应力分布  
Fig. 9 Stress distribution between no-backfilling and backfilling of goaf

将工作面上方方向一致的应力矢量连接起来,形成主应力迹线,即应力卸荷拱。从图 9 可知,卸荷拱高降低,表明采空区充填使覆岩内的应力发生转移和重新分布。同时,防水煤柱侧应力降低有助于防水煤柱的稳定,减少了上覆水体沿防水煤柱进入矿井的可能性。

3.5 降低煤柱塑性区范围

以防水煤柱与区段上巷交界处为坐标原点,防水煤柱沿煤层倾斜方向为  $x$  轴向,研究 48 煤层采空区不充填和整体充填条件下,防水煤柱法向位移与距巷道周边位置的关系如图 10 所示。

从图 10 中可知,采空区不进行充填和整体充填不同顶板控制条件下,随着距巷道周边距离的增加,防水煤柱法向位移均呈抛物线型降低趋势,采空区不充填时,防水煤柱位移与距巷道周边距离满足

$$S = 0.006 4L^2 - 0.515 8L + 12.048 \tag{1}$$
$$R^2 = 0.968 5$$

采空区充填防水煤柱位移与距巷道周边距离满

足

$$S = 0.004\ 1L^2 - 0.529\ 08L + 5.700\ 4$$
$$R^2 = 0.911\ 5$$

(2)

式中, $S$  为防水煤柱位移量; $L$  为煤柱距巷道周边的距离。

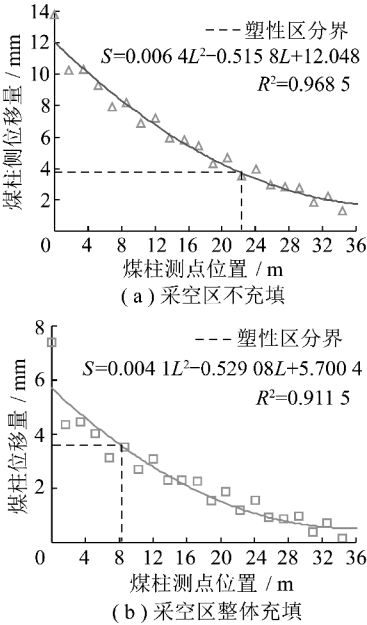


图 10 采空区不充填和整体充填防水煤柱位移比较  
Fig. 10 Displacement comparison between no-backfilling and backfilling of goaf

研究表明<sup>[15]</sup>,岩体位移量超过 5 mm/m 时,认为岩体已经进入塑性破坏阶段,岩体微观裂隙已经在移动岩体中产生。48 煤层首采工作面采高 0.7 m,则当岩体的位移量超过 3.5 mm 时,即认为岩体已经进入塑性破坏阶段。

从图 10 可知,48 煤层采空区不进行充填,防水煤柱的塑性区范围为 22.2 m,而当充填体弹性模量为 0.5 GPa 时,采空区整体充填防水煤柱的塑性区仅为 8.1 m,比采空区不进行充填防水煤柱塑性区降低了 63.5%,即采用充填法可以有效降低防水煤柱的塑性区宽度,从而可以提高煤层的开采上限,减小煤炭资源的损失。

综上所述,急倾斜煤层开采采空区矸石充填是工作面回采的逆过程,充填工序可以降低和减缓一系列因煤层回采而引起的矿山压力现象和负面效应。水体下急倾斜煤层开采采空区矸石充填对围岩的控制效果:

(1) 充填体起支护作用,通过充填体支撑上覆岩层顶板,可以降低顶板下沉挠度、区段巷道围岩变形量和导水断裂带高度,从而有效阻止上覆水体沿导水断裂带进入矿井。

(2) 应力发生转移和重新分布,采空区上方形成的顶板卸压区又逐渐受到充填体支撑力的作用,使顶板重新处于三向受力状态,防水煤柱的应力集中程度和塑性区范围均降低,从而确保矿井在回采期间的安全。

4 结 论

(1) 急倾斜煤层开采采空区不进行充填,顶板下沉挠度和区段平巷围岩变形最大。采空区采用矸石自溜充填技术,可以有效降低顶板的下沉挠度和区段平巷围岩变形。同时,随着矸石充填体强度的增加顶板下沉量呈降低趋势,且采空区整体充填顶板控制效果显著高于部分充填。

(2) 48 煤层开采采空区整体充填充填体弹性模量为 0.5 GPa 时,继续增加充填体强度,顶板下沉量降低的幅度减小,当充填体强度为 0.5 GPa 时,顶板位移量为 29.6 mm,可以确保工作面回采后覆岩的稳定。

(3) 急倾斜煤层采用分带仰斜采煤方法,采空区采用矸石充填可以改变分带煤柱的受力状态,从而提高了分带煤柱的强度,确保了分带煤柱在回采期间的稳定性。同时,采空区矸石充填,降低了顶板大面积悬顶范围,可以减小相邻分带回采期间的矿压显现,保证相邻分带的安全回采。

(4) 急倾斜煤层水体下开采采空区矸石自溜充填,使覆岩重新处于三向应力状态,可以有效抑制导水断裂带向上扩展,减小防水煤柱的塑性破坏范围,有利于水体下煤炭资源的安全回采。

参考文献:

[1] 刘天泉.“三下一上”采煤技术的现状及展望[J]. 煤炭科学技术,1995,23(1):5-8.

Liu Tianquan. The actuality and outlook of mining technique under “three under” and “one above” conditions [J]. Coal Science and Technology, 1995, 23(1): 5-8.

[2] 杨宗震,王吉才,陆飞伟. 淮南煤矿进行“三下”采煤的技术对策[J]. 煤炭学报,1994,19(1):5-12.

Yang Zongzhen, Wang Jicai, Lu Feiwei. Technical counter measures for coal mining under buildings, water-bodies and railways in Huainan coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(1): 5-12.

[3] 王永红,沈文. 中国煤矿水害预防及治理[M]. 北京:煤炭工业出版社,1996.

Wang Yonghong, Shen Wen. The prevention and control of coal mine flood catastrophes in China [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1996.

[4] 邹友峰,邓喀中. 矿山开采沉陷工程[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2003.

Zou Youfeng, Deng Kazhong. Mining subsidence engineering [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.

[5] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 资源与环境协调(绿色)开采[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 1-7.

Qian Minggao, Miao Xiexing, Xu Jialin. Mining coordinating with resource and environment[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 1-7.

[6] 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 Jixiong, Miao Xiexing. Underground disposal of waste in coal mine [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(2): 197-200.

[7] 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): 253-263.

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): 253-263.

[8] 刘长友, 杨培举, 侯朝炯. 充填开采时上覆岩层的活动规律和稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2004, 33(2): 167-169.

Liu Changyou, Yang Peiju, Hou Chaojiong. Movement law and stability analysis of overlaying strata under the condition of mining with filling[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 33(2): 167-169.

[9] 张吉雄, 李 剑, 安泰龙. 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): 357-340.

Zhang Jixiong, Li Jian, An Tailong. Deformation characteristic of key stratum overburden by raw waste backfilling with fully-mechanized coal minning technology[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 357-340.

[10] 李兴尚, 许家林, 朱卫兵. 垮落矸石注浆充填体压实特性的颗粒流模拟[J]. 煤炭学报, 2008, 33(4): 373-377.

Li Xingshang, Xu Jialin, Zhu Weibing. Simulation of backfill compaction character by particle flow code[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(4): 373-377.

[11] 胡炳南, 郭爱国. 矸石充填材料压缩仿真实验研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1 076-1 080.

Hu Bingnan, Guo Aiguo. Testing study on coalwaste back filling material compression simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1 076-1 080.

[12] 朱卫兵, 许家林, 赖文奇. 覆岩离层分区隔离注浆充填减沉技术的理论研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(5): 458-460.

Zhu Weibing, Xu Jialin, Lai Wenqi. Research of isolated section-grouting technology for overburden bed separation space to reduce subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(5): 458-460.

[13] 许家林, 尤 琪, 朱卫兵. 条带充填控制开采沉陷的理论研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(2): 120-122.

Xu Jialin, You Qi, Zhu Weibing. Theoretical study of strip-filling to control mining subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(2): 120-122.

[14] 李兴尚, 许家林, 朱卫兵. 从采充均衡论煤矿部分充填开采模式的选择[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, 27(2): 168-171.

Li Xingshang, Xu Jialin, Zhu Weibing. Choice of coal mine partial-filling technology according to balance between mining and filling [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2008, 27(2): 168-171.

[15] 桂和荣. 防水煤(岩)柱合理尺寸留设的应力分析算法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1997.

Gui Herong. The method of stresses analysis and calculation for designing reasonable waterproof coal (rock) block [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1997.

我国煤制烯烃示范项目取得突破性进展

日前,世界首套、全球最大的甲醇制低碳烯烃工业装置(年产 60 万 t 烯烃)投料试车一次成功,标志着我国煤制烯烃新兴产业取得了里程碑式的进展,开创了煤基能源化工产业新途径,奠定了我国在世界煤基烯烃工业化产业中的领先地位,对于我国石油化工原料替代、保障国家能源安全具有重要意义。该装置采用了中国科学院大连化学物理研究所具有自主知识产权的甲醇制烯烃(DMTO)技术。

据了解,DMTO 技术是在中国科学院大连化学物理研究所原创技术的基础上,联合新兴能源科技公司和 中国石化集团洛阳石油化工工程公司,通过工业性试验,开发的具有完全自主知识产权的甲醇制烯烃成套技术。2007 年 9 月与神华集团签订了工业应用技术许可合同,2008 年 9 月该项目开工建设,2010 年 5 月装置建设完毕。

摘自“科学时报”