

文章编号: 1673-3363-(2012)02-0162-06

充填体压实率对综合机械化固体充填采煤 岩层移动控制作用分析

黄艳利, 张吉雄, 张强, 聂守江, 安百富

(中国矿业大学矿业工程学院, 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要 以地面矸石、粉煤灰、黄土等固体废弃物为充填材料的综合机械化固体充填采煤技术为“三下”压煤的安全高效回收创造了条件。结合现场地质条件并根据等价采高的概念, 分析了不同矸石与粉煤灰充填体压实率对等价采高的影响规律; 并通过数值模拟分析了矸石与粉煤灰充填体不同压实率条件下对综合机械化固体充填采煤岩层移动控制与地表沉陷的控制作用, 提出了保持地表沉陷在允许范围之内的充填体压实率为15%; 最后通过工程实践得出综合机械化固体充填采煤技术工作面的岩层移动及地表沉陷控制效果良好, 基本没有影响到地表的建筑和设施的正常使用, 研究成果可为综合机械化固体充填采煤技术的有效实施提供技术参考。

关键词 充填体; 压实率; 岩层移动; 等价采高; 数值模拟

中图分类号 TD 315

文献标识码 A

Strata Movement Control due to Bulk Factor of Backfilling Body in Fully Mechanized Backfilling Mining Face

HUANG Yan-li, ZHANG Ji-xiong, ZHANG Qiang, NIE Shou-jiang, AN Bai-fu

(School of Mines, State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract Fully mechanized coal mining and backfilling with solid waste, such as waste rock, fly ash, and loess, creates advantages for effective mining of coal under buildings, railroads, and water bodies. According to field geological conditions and the equal mining height concept, we analyzed the effect law of the equal mining height arose from different bulk factors of backfilling bodies. Moreover, we numerically simulated the strata movement and surface subsidence control under the condition of different bulk factors, and put forward that the allowable bulk factor of backfilling body is 15% based on allowable ground subsidence. Finally, the engineering application confirmed that the strata movement controlling is effective, and the surface buildings and facilities are not severely influenced. The research results has provided references for the effective execution of fully mechanized coal mining with solid waste backfilling.

Key words backfilling body; bulk factor; strata movement; equal mining thickness; numerical simulation

收稿日期: 2011-05-25

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(CXZZ11-0311); 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 黄艳利(1978-), 男, 山东省临沂市人, 博士, 从事固体废弃物充填开采及采动岩体控制方面的研究。

E-mail: huangyanli6567@163.com

Tel: 13905207498

随着我国煤炭资源的不断开采，“三下”（建筑物下、铁路下、水体下）压煤的合理高效开采问题已成为我国煤炭资源可持续开采和矿区生产稳定发展的重要问题，据不完全统计，目前我国仅统配煤矿的生产矿井“三下”压煤就达 137.9 亿 t，其中建下 94.68 亿 t，占总压煤量的 69%^[1-2]，几乎每一个矿井都有建筑物下压煤的问题，一般都占矿井储量的 10%~30%，有的高达 40%。传统的顶板垮落法开采方式开采后将引起地表的沉陷，并造成以下问题^[3]：土地资源的破坏；地面公用设施包括道路、桥梁、各种管道、通信和输电线路等遭破坏；对地面工业厂房、设施产生影响；对居民住房产生影响；对水体及其设施的破坏。因此，改革传统的煤炭开采方式，实施“绿色采矿”技术，是实现煤炭资源可持续开采的根本。随着以矸石、粉煤灰、黄土等固体废弃物为充填材料的综合机械化固体充填采煤技术及相关充填开采岩层控制理论日益成熟^[3-5]，采用固体废弃物直接充填开采的方法解放“三下”压煤成为可能，并成为减少地表沉陷，改善矿区环境的有效途经。由于受矸石与粉煤灰等充填材料的力学特性、充填工艺及充填质量、地质条件等多方面因素的影响，采空区充填后矸石与粉煤灰充填体的压实率对上覆岩层的活动规律及其稳定性的控制作用将决定综合机械化固体充填采煤技术的成败^[6-7]。为此，本文在这方面进行了初步探讨。

1 充填工作面概况

某矿 7606 充填综采工作面对应地面位置位于工业广场西北部，矿区专用铁路线和南三环公路从工作面上方穿过，工作面正上方为矿机修厂电器车间，以南分别为矿标宿楼、机修车间、地面注浆站，距工作面水平距离最近点在 80~140 m 之间，地面标高+85 m，工作面标高-210~-250 m。

7606 充填综采工作面为该矿第 1 个充填综采工作面，倾斜长度为 50 m，走向长度为 460 m，煤层倾角 7°~10°，平均倾角 9°，所采煤层为 2[#]煤，煤层平均厚度为 5.79 m，工作面平均埋深为 320 m，其顶底板条件见表 1。采用分层充填综采的方法进行开采，第 1 分层的采高为 3.0 m，采用一定比例的矸石与粉煤灰作为充填体对采空区进行充填，从而达到控制地表沉陷保护地表建筑物的目的。

表 1 7606 充填工作面顶底板情况
Table1 Roof and Floor Lithology of 7606 Face of filling

状柱	厚度/m	岩石名称及描述
	1.1~15.03 2.8	细砂岩，黑色，含云母，泥质胶结。
	1.8~5.3 4.5	砂质页岩，黑色，含有植物化石，以泥质为主。
	5.19~6.12 5.79	黑色粉末，煤质良好，含植物化石，中部有一层夹矸，厚度约 0.4 m。
	4.6~7.08 6.69	砂质页岩，黑灰色，含有植物化石，以泥质为主，底部微受挤压。
	7.2~13.6 9.25	中细砂岩，灰白色，成份以石英为主，颗粒分选好，中下部含炭质层理。

2 充填综采基本原理

在综合机械化固体充填采煤技术中，以地面矸石、粉煤灰、黄土等固体废弃物为主的充填材料，通过固体充填物料垂直连续输送系统输送至井下，再经过皮带输送机运输至充填采煤工作面，借助充填开采输送机、充填采煤液压支架、压实机等设备实现采空区充填与压实。

综合机械化固体充填采煤工作面布置方式(见图 1)与传统综采工作面布置基本相同，不同之处在于：在综合机械化固体充填采煤工作面的后部，即在采空区一侧布置充填作业面，再在工作面回风巷内布置一条充填材料的运输皮带，将充填材料输送至充填开采输送机上。在这种工作面布置方式中，可实现充填与采煤在同一工作面系统中并行作业。

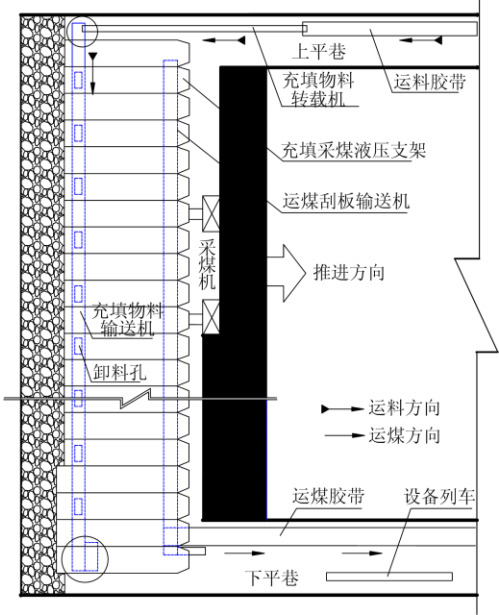


图 1 充填综采工作面布置方式
Fig.1 Workface arrangement of fully mechanized coal mining with filling

3 充填体压实率对等价采高影响分析

在充填综采过程中，矸石及粉煤灰充填体与煤壁、综采支架共同承担上覆岩层的载荷，采场矿压显现特征将会发生改变。根据等价采高的概念^[8-9]，等价采高为工作面采高减去采空区充填体压实后的高度，充填综采等价采高 H_z

$$H_z = h_d + h_w + k(H - h_d - h_w) \tag{1}$$

式中： H_z 为充填综采等价采高，m； h_d 为未充填时顶板下沉量，根据邢台矿现场实测未充填时顶板下沉量为 0.22 m； h_w 为充填综采未充填高，充填采煤液压支架夯实机构能够使充填体充分接顶，取 0 m； H 为采高，3.0 m； k 为矸石与粉煤灰充填体的压实率。

由式（1）可知，充填体的压实率与等价采高的大小有很大的关系。不同矸石与粉煤灰充填体的压实率 k 变化对等价采高的影响如图 2 所示。

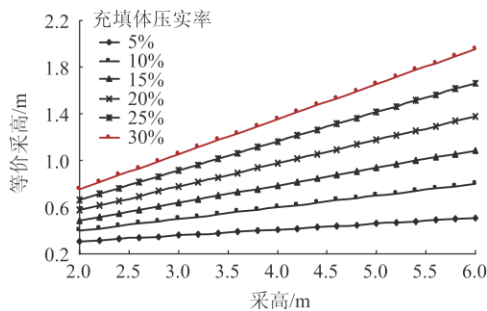


图 2 不同矸石与粉煤灰充填体的压实率 k 变化对等价采高 H_z 的影响

Fig.2 The influence of the bulk factor k of filling body on the equivalent mining thickness H_z

由图 2 可知，随着工作面实际采高的增大，矸石与粉煤灰直接充填综采的等价采高也增大，但随着压实率 k 增加，等价采高变化幅度较大；在采高为 3.0 m 时，随着矸石与粉煤灰直接充填综采充填体压实 k 由 30%~5%变化，等价采高由 0.99~0.35m 变化，减小幅度达 64.6%。由此可见，提高矸石与粉煤灰充填体进行初步的压实率，可大幅度减小等价采高，从而达到控制采空区上覆岩层移动的作用。

4 充填体压实率对岩层移动控制作用分析

4.1 数值模型的建立

模拟分析采用适于岩土工程力学行为特征的数值分析软件 UDEC3.1，对不同充填体压实率条件

下的基本顶弯曲下沉、煤壁超前支撑应力分布规律及地表变形规律进行模拟分析。根据工作面的几何和受力特点，简化结构为平面应变模型，设置模型两侧边界为水平方向的滑动铰支约束，下部边界为固支约束。文中将围岩简化为分层各向同性介质，岩层间以自重相互叠加作用，材料模型选用 Mohr-Coulumb 模型，模拟模型如图 3 所示。按围岩条件模型所取煤岩层力学参数见表 2。模拟方案见表 3。

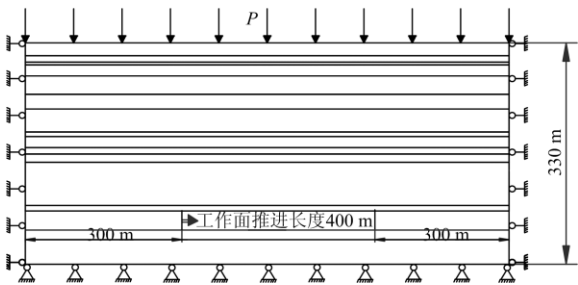


图 3 数值模拟分析模型

Fig.3 Mechanical model of numerical simulation

表 2 UDEC 模拟中煤岩层力学参数

Table 2 Mechanical parameters of coal (rock) strata in simulation

力学指标 岩性	厚度/m	弹性模量/GPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	密度/(kN m ⁻³)	泊松比
老底	6.69	30	10	30	2.7	0.3
岩 煤	3.0	3	1.5	18	1.4	0.3
体 直接顶	4.5	10	2	21	2.6	0.3
基本顶	2.8	30	10	30	2.7	0.3
节理 真节理		20	5	15		0.2
假节理		20	0	10		0.2

表 3 模拟方案

Table 3 Numerical simulation scheme

埋深/m	320	320	320	320	320	320	320
压实率/%	5	10	15	20	25	30	不充填
未充填时顶板下沉量/mm	220	220	220	220	220	220	
未充填高度/mm	0	0	0	0	0	0	

4.2 数值模拟结果分析

4.2.1 基本顶弯曲下沉量

不同矸石与粉煤灰充填体压实率条件下，基本顶的弯曲下沉量分布规律如图 4 所示。

由图 4 可知，充填开采工作面基本顶的弯曲下沉量随充填体压实率的增加而增大。当不充填时（采高 3.0 m），顶板结构的下沉量达到 1.92 m，基本顶关键层结构此时已经发生破断；当充填体的压

实率小于 15% 时, 等价采高小于 0.61 m, 基本顶关键层结构最大弯曲下沉量为 152 mm, 此时基本顶不会产生垮落破断, 只是发生弯曲下沉, 即工作面没有明显的来压现象, 这是充填开采一个显著矿压特征; 因此, 为了控制顶板的稳定性, 必须尽可能地降低充填矸石与粉煤灰的初步压实率, 并控制在 15% 以内。

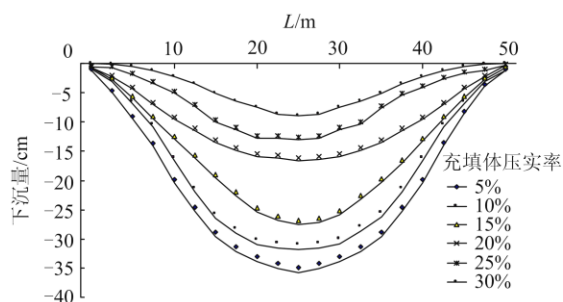


图4 基本顶弯曲下沉量随压实率变化规律

Fig.4 The variety rule of the main roof strata deformation

4.2.2 超前支撑应力

根据数值模拟结果可知, 不同矸石与粉煤灰充填体压实率条件下工作面超前 25 m 范围应力的分布规律如图 5 所示。

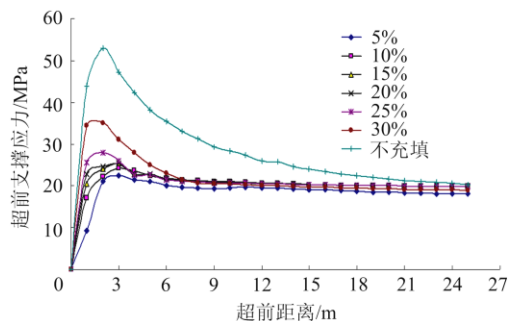


图5 超前支撑应力随压实率变化规律

Fig.5 The variety rule of the advancing support pressure

由图 5 可知, 矸石与粉煤灰充填体的压实率越大, 工作面超前支撑应力峰值与影响范围越大, 最大应力集中系数也越大。当压实率为 5%~30% 时, 应力峰值变化范围为 22.5 MPa~35.0 MPa, 应力集中系数变化范围为 1.25~1.81; 当采空区不充填时 (采高为 3.0 m), 应力峰值和应力集中系数分别增大为 53.0 MPa, 2.75, 超前影响范围也比充填时要大。随着矸石与粉煤灰充填体压实率的增大, 充填体不有效支撑采空区顶板, 顶板的破坏将结构载荷转移至煤层, 引起应力峰值及集中系数的增加, 充填体压实率越大, 超前应力集中现象就越明显。所以控制矸石与粉煤灰充填体压实率的增大, 可有效

地改善围岩应力, 工作面和两巷围岩的承载能力, 有利于充填开采的成功实施。

4.2.3 地表下沉分析

由于实施充填开采的重要目的是为了控制地表变形在地表建筑物允许的范围之内, 分析矸石与粉煤灰充填体压实率对地表变形的影响情况, 对充填开采能否成功实施具有重要的指导意义, 为了充分掌握开采影响情况, 取整个模型长度范围内的下沉和水平变形进行分析, 模拟结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 地表下沉和水平变形随压实率的增加而增大, 压实率为 5%~30% 时的地表最大下沉量和最大水平变形范围分别为 1.1~6.7 cm, 0.24~3.04 mm/m; 当不充填时, 地表的最大下沉和水平变形值分别为 92.7 cm, 5.56 mm/m。另外, 由模拟可知, 当压实率大于 15% 时, 地表水平变形达到 2.02 mm/m, 超过了国家规定的砖混 (石) 结构建筑物损坏等级的 I 级标准^[10], 这就要求在实施充填开采过程中要严格控制矸石与粉煤灰的充填效果, 取一定的安全系数, 在充填过程中保证矸石与粉煤灰充填体压实率不能超过 15%。

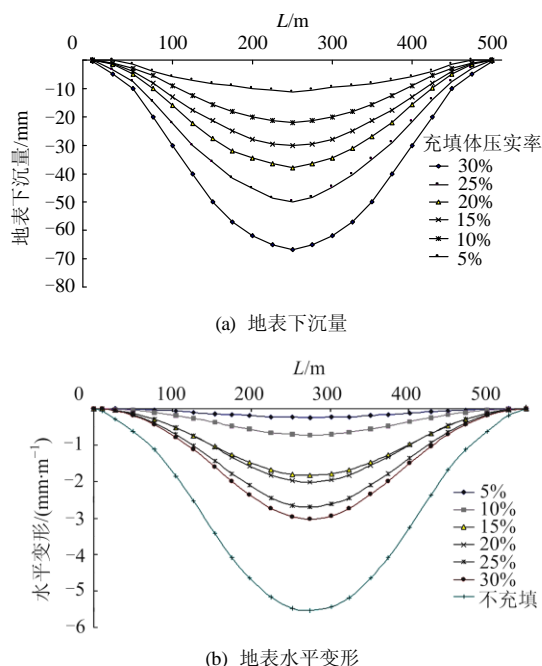


图6 模拟结果

Fig.6 Simulation results

5 工程实践

根据上述分析结果及相关文献^[11], 最终确定配比为对 7606 充填综采工作面采空区进行充填, 由 1:0.3 矸石与粉煤灰充填体压实特性曲线 (图 7) 可知,

1: 0.3 矽石与粉煤灰充填体最终的压实率为 13%。

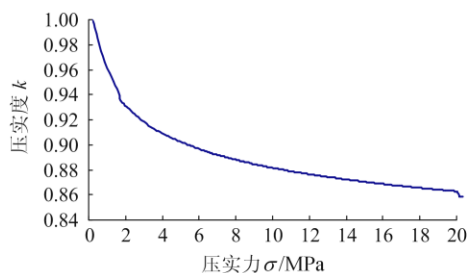


图 7 配比为 1: 0.3 的矽石与粉煤灰充填体压实度随压实力变化曲线

Fig.7 Compression curves of specimen with 1: 0.3 proportion by weight of waste and fly ash

在 7606 充填综采工作面推进过程中, 在其正上方-210 西翼大巷以及对应地面位置布置测点, 进行岩层移动及地表沉陷进行观测, 其中-210 西翼大巷的测点布置如图 8 所示。

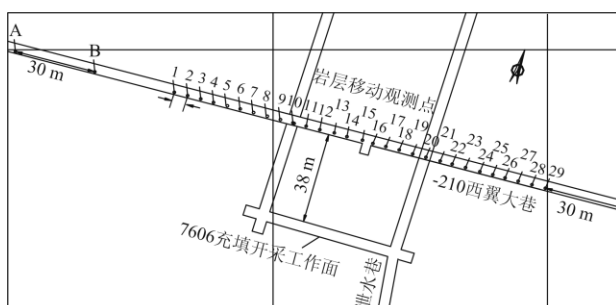


图 8 -210 西翼大巷 7606 工作面相对位置及测点布置

Fig.8 Relative position of return airway and 7606 workface and the measuring point arrangement

-210 西翼大巷中间 14, 15, 16 测点底板下沉量随充填采煤工作面推进变化情况如图 9 所示。

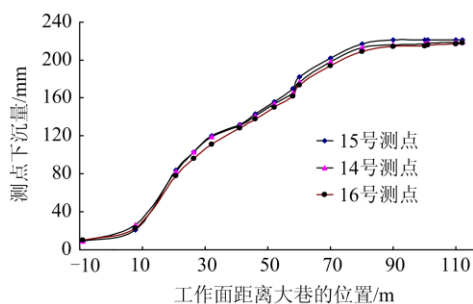


图 9 下沉曲线

Fig.9 Subsidence curve

由图 9 可知, -210 西翼大巷在正下方充填开采工作面推进过后无需维修仍能正常使用, 最大下沉量仅为 23 cm。事实证明, 该充填开采工作面的岩层移动控制效果良好。

同时通过对布置在地表的沉陷测点监测, 7606 充填工作面东侧水平距离距离约 37 m 处, 测得矿用铁路沿线最大下沉值为 16 mm, 工作面正上方对应地面最大下沉值为 29 mm, 沿南外环公路的观测线没有任何下沉变化, 7606 充填开采工作面的开采基本上没有影响到地表的建筑和设施的正常使用。

6 结 论

1) 在充填开采过程中, 矽石与粉煤灰充填体的压实率对等价采高的影响显著, 随着压实率 k 增加, 等价采高增幅变化较大, 提高矽石与粉煤灰充填体的初步压实率, 可大幅度减小等价采高;

2) 矽石与粉煤灰充填体的压实率对于采空区上覆岩层的活动规律有显著的影响, 充填体压实率越大, 岩层的活动范围与影响程度越大, 越不利于岩层移动的控制, 从控制地表沉陷小于允许的范围考虑, 充填体的压实率应控制在 15% 以内。

3) 通过现场工程实践, 得出充填综采工作面的岩层移动控制效果良好, 基本没有影响到地表的建筑和设施的正常使用。

参考文献:

- [1] 张吉雄, 缪协兴. 煤矿矽石井下处理的研究[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.
- [2] 张文海, 张吉雄, 赵计生, 等. 矽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 Wen-hai, ZHANG Ji-xiong, ZHAO Ji-sheng, et al. Research on waste filling technology and its matching equipment in coal mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(1): 79-83.
- [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.
ZHANG Ji-xiong, MIAO Xie-xing, 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.
- [4] 张吉雄, 吴强, 黄艳利, 等. 矽石充填综采工作面矿压显现规律[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1-4.
ZHANG Ji-xiong, WU Qiang, HUANG Yan-li, et al. Strata pressure behavior by raw waste backfilling with coal mining technology [J]. Journal of China Coal So-

- ciety, 2010, 35(8): 1-4.
- [5] 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.
- [6] 刘长友, 杨培举, 侯朝炯, 等. 充填开采时上覆岩层的活动规律和稳定性分析[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 166-169. LIU Chang-you, YANG Pei-ju, HOU Chao-jiong, et al. Movement law and stability analysis of overlaying strata under the condition of mining with filling[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 166-169.
- [7] ZHANG Ji-xiong, ZHOU Nan, HUANG Yan-li, et al. Impact law of the bulk ratio of backfilling body to overlaying strata movement in fully mechanized backfilling mining[J]. Journal of Mining Science, 2011, 47(1): 73-84.
- [8] 缪协兴, 张吉雄. 矸石充填采煤中的矿压显现规律分析[J]. 采矿工程与安全学报, 2007, 24(4): 379-382. MIAO Xie-xing, ZHANG Ji-xiong. Analysis of strata behavior in the process of coal mining by gangue backfilling[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(4): 379-382.
- [9] 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.
- [10] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
- [11] 徐俊明, 张吉雄, 黄艳利, 等. 充填综采矸石-粉煤灰压实变形特性试验研究及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 158-162. XU Jun-ming, ZHANG Ji-xiong, HUANG Yan-li, et al. Experimental research on the compress deformation characteristic of waste-flyash and application in backfilling fully mechanized coal mining technology[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(1): 158-162.