

文章编号: 1673-3363-(2013)01-0074-06

废石胶结充填体强度特性及其应用研究

贺桂成^{1,2}, 刘永², 丁德馨², 张志军²

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 南华大学核资源与核燃料工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要 宝山矿西部2[#]矿体为深部难采矿体, 采用废石胶结充填法回采。为确保其回采的安全, 采用RMT-150B岩石力学试验机, 对7种配比的废石胶结充填体在不同龄期的抗压强度进行了测试, 利用龄期为28 d的废石胶结充填体的力学参数对试验采场进行了充填法回采的FLAC^{3D}模拟, 根据模拟结果选用C组配比的废石胶结充填体对该矿试验采场进行了充填, 同时还对其进行了应力测试。研究结果表明: 水灰比和灰砂比是控制废石胶结充填体抗压强度的关键因素; 龄期为28 d的C组废石胶结充填体的抗压强度大于2 MPa; 采空区围岩的最大主应力和竖向最大位移随废石胶结充填体强度的增加而减小, 而最小主应力则与之相反; 选用C组配比的废石胶结充填体的试验采场的应力测试结果与模拟结果吻合良好, 能有效地控制该试验采场深部开采的地压。

关键词 深部开采; 废石胶结充填; 配比; 抗压强度; FLAC^{3D}模拟

中图分类号 TD 862

文献标志码 A

Strength characteristic of cemented waste rock backfills and its application

HE Gui-cheng^{1,2}, LIU Yong², DING De-xin², ZHANG Zhi-jun²

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;
2. School of Nuclear Resources and Nuclear Fuel Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract The No.2 ore body in the western district of Baoshan mine is deep-buried and hard to be mined out, thus, the filling method is adopted by using the backfills of cemented waste rock. In this paper, to ensure the mining safety, the compressive strengths of the backfills with seven different mixture ratios at different solidification durations were measured by using RMT-150B rock mechanics testing machine. In addition, the mechanical parameters for the backfills at the solidification duration of 28 days were used to simulate the mining and filling processes of test stop by using FLAC^{3D}. Based on the simulation results, the backfills of cemented waste rock with type C mixture ratio was used to filling in the test stope, and the stress measurements were conducted for the backfills and surrounding rocks. The results show that the water cement ratio and cement sand ratio are the key factors to control the compressive strength of the backfill, and the compressive strength of the backfill with type C mixture ratio at the solidification duration of 28 days was larger than 2 MPa. Meanwhile, the maximum principal stress and maximum vertical displacement decrease with the increase of backfill strength, while the minimum principal stress is the contrary. The stress measurements of the backfills and surrounding rocks in the test stope are in good agreement with the simulation results, which means that the backfills with type C mixture ratio can be used to effectively control the ground pressure in deep stope mining.

收稿日期: 2012-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(10975071, 51004067); 教育部重点基金项目(2011-126); 高校博士学科点专项基金项目(20104324120001)

作者简介: 贺桂成(1977-), 男, 湖南省衡阳市人, 讲师, 博士, 从事矿山岩土工程灾害预测与控制方面的研究。

通信作者: 刘永

E-mail: liuyong81668@163.com

Tel: 0734-8282337

Key words deep mining; cemented waste rock backfills; mixture ratio; compressive strength; FLAC^{3D} simulation

目前，大多数矿山浅部矿产资源日趋枯竭，正面临着转向深部开采。因此，地压问题将日益突出，成为制约矿山深部安全、高效开采的主要障碍^[1]。充填开采技术在解决深部地压、维护采场稳定、控制地表沉陷、保护生态环境等方面具有十分重要的作用^[2-5]。充填采矿法在金属矿山井下开采中得到了广泛的应用，如加拿大 70% 以上的矿山采用充填采矿法，南非深部开采几乎全部采用充填采矿法^[6]。因此，充填体的力学性质及其对采空区稳定性的影响是目前充填开采技术中亟需研究的重点和热点。

近年来，国内外学者对充填体材料的力学性质和破坏特征进行了研究，并取得了一些具有指导意义的研究成果。Fall^[7-8]对充填体力学性质、破坏特征等进行了研究。李一帆^[9]利用正交试验研究影响尾砂充填体强度的因素，分析了尾砂胶结充填体强度特性。刘志祥^[10]分析了不同配比尾砂胶结充填体变形与破坏特征，并用损伤力学建立了充填体损伤本构方程。李永明^[11]采用试验方法，研究了以矽石作为充填料、水泥-水玻璃作为注浆胶结料进行采空区胶结充填时胶结充填体的力学特性和影响因素。徐俊明^[12]研究了矽石-粉煤灰充填材料压实过程中的变形规律，得出了矽石与粉煤灰充填体的最佳配比。史俊伟^[13]研究了水泥、粉煤灰和煤矽石不同配比和膏体浓度对煤矽石膏体充填各性能指标的敏感程度，以及各指标随各因素的变化趋势。

这些研究成果在一定程度上保障了矿山安全开采，促进了充填开采技术的发展。然而这些研究成果大都采用经验法或经验类比法确定充填体材料的构成和强度设计，往往造成水泥浪费或充填体强度达不到控制地压的实际要求。

因此，本文拟以黄土、水泥和废石作为胶结充填料，研究其强度特性，并将其应用于试验采场，进而得到胶结充填体最合适地配比，实现矿山在最优化成本下的安全、高效开采。

1 工程背景

宝山矿西部 2[#]矿体赋存于宝岭倒转背斜西北部牛心倒转向斜构造内，产于梓门白云岩中。-70~-30 m 中段矿体埋深约 400 m，东西长约 1 000 m，南北宽约 700 m，厚 4~10 m，平均为 6 m。矿体呈倾斜产状，变化大，形态复杂，走向近东西，

倾向南西，倾角为 35°~75°，平均倾角为 45°。矿体及围岩物理力学参数如表 1 所示。

表 1 矿体及围岩力学参数
Table 1 Mechanical parameters of the surrounding rock mass and ore-body

矿岩名称	白云岩	砂页岩	矿体	灰岩
容重/(kN·m ⁻³)	24.9	27.2	26.4	25.8
抗压强度/MPa	24.33	23.28	18.14	84.10
抗拉强度/MPa	2.24	3.02	1.22	3.56
弹性模量/GPa	22.5	17.67	3.21	26.30
剪切模量/GPa	9.3	7.32	1.18	10.89
泊松比	0.27	0.26	0.36	0.21
内摩擦角/(°)	39	42	32	43
黏聚力/MPa	1.12	0.82	0.65	1.23

宝山矿西部 2[#]矿体上盘围岩为碳质页岩，其成分为绢云母砂岩、粉砂岩，夹泥质、炭质等成分，岩性极不稳固，见水容易粉化、泥化。直接顶为白云岩，厚约 5 m，极其破碎，随采随冒。因此，必须采用充填采矿法保证采场的安全与稳定。

宝山矿西部 2[#]矿体试验采场采用上向水平分层充填采矿法进路式回采，试验采场沿矿体走向布置，阶段高为 40 m，采场长为 30 m，宽为矿体厚，分层高为 2 m。

回采顺序为：在同一分层内按奇数进路回采，采完后进行废石胶结充填；然后按偶数进路回采，采完后进行充填。以此顺序依次分层回采。

2 废石胶结充填体试验及结果分析

2.1 废石胶结充填体材料

宝山矿西部 2[#]矿体井下开采产生大量废石，提升费用高且废石堆积在地表破坏生态环境，另外宝山矿距区内最近的锅炉厂发电站有一定距离，若采用部分炉渣、粉煤灰做充填胶结材料与水泥相比并未明显降低成本。而黄土是一种良好的黏结材料，且来源丰富，价格便宜，另外破碎的废石表面不平整，有起伏菱角，在井下充填管道中输送时，摩擦阻力大，对管道内壁的磨损大，而加入黄土后，黄土包围在碎石表面，有效地降低了摩擦阻力，减小了对管道壁的磨损。因此，宝山矿西部 2[#]矿体采用黄土、标号为 425 的普通硅酸盐水泥和废石为充填料，经泵压管道输送至采空区进行胶结充填。

根据该矿采用 HBTS60-13-90 混凝土泵，泵压

管道输送废石胶结充填体，塌落度要求 8~23 mm。该矿在-30 m 中段建废石破碎站，废石经破碎系统粗、细两级破碎后粒径为 1~20 mm，其中 3 mm 以下的粒径占 90%。

根据宝山矿西部 2[#]矿体目前的生产工艺，废石

胶结充填体强度应满足如下要求：1) 假底充填体强度在龄期为 28 d 时不低于 2 MPa；2) 分层充填体强度在龄期为 28 d 时不低于 1 MPa；3) 胶面层充填体强度在龄期为 28 d 时不低于 2 MPa。根据上述要求，进行了废石胶结充填体配比试验，如表 2 所示。

表 2 废石胶结充填体的配比
Table 2 Mixture ratios of the backfills of the cemented waste rock with cement and loess

组别	废石/kg	水泥/kg	黄土/kg	用水量/kg	水：黄土：水泥	水泥：黄土：废石
A	1000	50	96	193	1：1.03：0.54	1：1.92：20
B	1000	50	64	173	1：0.88：0.68	1：1.28：20
C	1000	100	32	184	1：0.38：1.19	1：0.32：10
D	1000	0	96	161	1：1.57：0	
E	1000	150	0	196	1：0：1.56	1：0：6.67
F	1000	208.1	0	232	1：0：1.58	1：0：4.81
G	1000	132.7	0	185	1：0：1.55	1：0：7.54

2.2 废石胶结充填体强度试验

按表 2 中配制的废石胶结充填体，加工成 $\Phi 50$ mm \times L100 mm 的圆柱体标准试样，在 RMT-150B 岩石力学试验机上进行测试，得到了充填体不同龄期的抗压强度，如表 3 所示。

表 3 不同龄期的废石胶结充填体的抗压强度

Table 3 Compressive strength of the cemented waste rock with cement and loess at different solidification durations

组别	抗压强度/MPa				
	3 d	7 d	14 d	21 d	28 d
A	0.60	0.80	1.30	1.55	1.85
B	0.80	1.05	1.40	1.72	2.10
C	1.50	1.95	2.65	3.25	4.85
D	0.11	0.13	0.18	0.24	0.25
E	2.40	3.75	5.55	6.15	7.05
F	3.10	4.60	5.84	7.35	8.15
G	2.30	2.55	3.65	4.45	5.50

2.3 废石胶结充填体强度试验结果

由表 3 可知，龄期为 7 d 时，A 组和 D 组充填体的抗压强度均小于 1 MPa，其余组的抗压强度超过了 1 MPa；龄期为 14 d 时，D 组充填体的抗压强度小于 1 MPa，其余组的抗压强度超过了 1 MPa，且大部分达到了 2 MPa；龄期为 28 d 时，A 组和 D 组充填体的抗压强度均小于 2 MPa，其余组的抗压强度超过了 2 MPa。由此可知，龄期为 28 d 时，A 组和 D 组充填体的抗压强度不能满足该矿对充填体强度的要求，其余组的抗压强度均能满足要求。

由图 1 可知，龄期为 3~7 d 时，充填体的抗压强度较低，且随龄期增加缓慢；龄期为 7~14 d 时，其抗压强度随龄期急剧增加，尤其是 A 组和 D 组的抗压强度增加明显；随后充填体的抗压强度随龄期增长缓慢。从表 3 和图 1 中可看出，充填体的抗

压强度随水泥含量的增加而增大。如 D 组不含水泥，水灰比为 1：1.57，龄期为 28 d 的抗压强度最小，仅为 0.25 MPa；F 组，水灰比为 1：1.58，灰砂比为 1：4.81，龄期为 28 d 的抗压强度最大，为 8.15 MPa。由此可知，水灰比和灰砂比是控制废石胶结充填体抗压强度的关键因素。

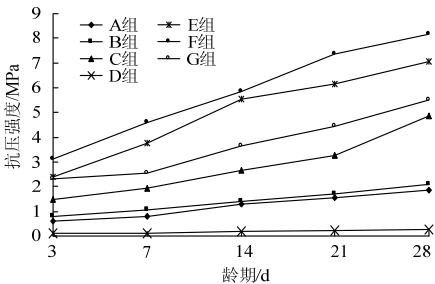


图 1 废石胶结充填体抗压强度随龄期的变化曲线图
Fig.1 The curve of compressive strength of the cemented waste rock with cement and loess at different solidification durations

2.4 废石胶结充填体力学参数试验结果

将龄期为 28 d 的废石胶结充填体的标准试样，在试验机上进行单轴抗压、间接拉伸和三轴试验，得到了废石胶结充填体的力学参数，如表 4 所示。

表 4 龄期为 28 d 的废石胶结充填体力学参数

Table 4 Mechanical parameters of the cemented waste rock with cement and loess at the solidification duration of 28 days

组别	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ MPa
A	1.85	0.22	0.92	0.36	48.4	0.18
B	2.10	0.31	1.25	0.32	48.1	0.29
C	4.85	0.47	2.33	0.28	47.9	0.62
D	0.25	0.03	0.16	0.39	49.3	0.03
E	7.05	0.72	3.15	0.25	46.5	0.73
F	8.15	0.93	3.34	0.23	45.9	0.81
G	5.50	0.58	2.54	0.24	46.1	0.69

由表 4 可知：龄期为 28 d 的废石胶结充填体的弹性模量随灰砂比的增加而增大，如 F 组的弹性模量最大为 3.34 GPa，但不超过 4 GPa。而泊松比、黏聚力随灰砂比的增加而变化小，黏聚力的最大值不超过 0.9 MPa。内摩擦角的值较大，均超过了 45°。

3 宝山矿西部 2[#]矿体废石胶结充填回采的 FLAC^{3D} 模拟

3.1 FLAC^{3D} 建模

本文采用 FLAC^{3D} (Fast Lagrangin Analysis of Continua) 模拟宝山矿西部 2[#]矿体试验采场废石胶结充填回采。FLAC^{3D} 是一个用于分析和解决工程力学问题的三维显式差分法程序，主要适用于模拟围岩的变形和围岩达到屈服极限以后所产生的塑性流动，特别适合于模拟大变形和扭曲，能使计算结果与实际情况更加吻合。目前 FLAC^{3D} 软件在采矿工程界得到了广泛的认可和应用^[14-15]，并取得了具有工程指导意义的应用成果。

根据宝山矿西部 2[#]矿体的开采现状，建立了 FLAC^{3D} 数值模拟模型，模型长 1 000 m，宽 500 m，矿体埋深 400 m，矿体厚 6 m，其中矿体阶段高 40 m，走向长 500 m，倾角 45°。约束条件取两侧为限制水平方向位移的滑动支座，底部为限制垂直方向和水平方向位移的固定支座。模型共划分 68 600 个八节点等参单元，73 950 个网格节点，如图 2 所示。

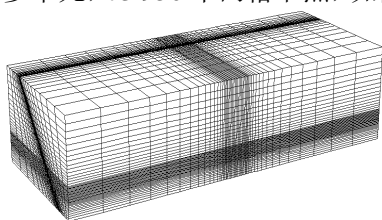


图 2 FLAC^{3D} 模型及网格划分
Fig.2 FLAC^{3D} model and grid mesh

3.2 宝山矿西部 2[#]矿体 FLAC^{3D} 模拟结果分析

根据上述建立的模拟模型回采后，得到了采空区围岩的最大主应力、最小主应力、最大位移以及采空区废石胶结充填体的强度，如表 5 所示。

从表 5 可知：采空区围岩的最大主应力、竖向最大位移随充填体强度的增加而减小；最小主应力则与之相反。这表明采空区的围岩压力和影响范围随充填体强度的增加而减小，有利于采场的稳定。

从表 5 中还可知：采空区中充填体的应力较小，最大不超过 3 MPa。这表明矿体回采后，废石胶结充填体的强度能满足该矿对充填体强度大于 2 MPa

的要求，控制了采场地压。

表 5 充填采空区后的 FLAC^{3D} 模拟结果

Table 5 FLAC^{3D} simulation results of the test stope backfilled by the cemented waste rock with cement and loess

充填体组别	最大主应力/MPa	最小主应力/MPa	竖向最大位移/cm	采空区充填体的应力/MPa
A	15.916	0.58431	1.7157	1.5354
B	15.903	0.59806	1.7139	0.8547
C	15.894	0.59564	1.7112	2.1029
D	15.920	0.60084	1.7175	0.4577
E	15.891	0.59517	1.7097	2.7559
F	15.888	0.59470	1.7094	2.9652
G	15.892	0.59543	1.7106	2.3211

根据上述模拟结果，综合考虑该矿现有的充填开采技术水平，以及充填料的经济合理性，确定选用 C 组废石胶结充填体的配比作为该矿合适的配比，并将其应用于模拟试验采场充填回采，其模拟结果如图 3 所示。

从图 3 中可知：采用 C 组废石胶结充填体，充填奇数进路和偶数进路回采后，采空区的最大主应力分别为 15.894 MPa，13.0634 MPa；最小主应力分别为 0.59564 MPa，0.1552 MPa；竖向最大位移分别为 1.7112 cm，6.7656 cm；奇数进路回采的破坏范围小于偶数进路回采的破坏范围。由此可知，采用 C 组配比的废石胶结充填体充填奇数进路回采的充填效果比充填偶数进路回采的充填效果要好。这是由于奇数进路回采后围岩受开采扰动产生了变形和破坏，导致偶数进路回采时围岩强度降低。因此，在充填奇数进路回采时必须严格控制充填体的质量，以最低限度的减少对围岩的扰动，在充填体强度达到设计要求时，再进行偶数进路回采。

但采用 C 组配比的废石胶结充填体无论是充填奇数进路回采还是充填偶数进路回采，上述采空区围岩的最大主应力、最小主应力、位移值以及拉伸破坏的程度和影响范围均较小。这表明 C 组配比的废石胶结充填体充填采空区后，能满足该矿对充填体强度的要求。

宝山矿西部 2[#]矿体试验采场于 2010 年进行了工业性试验回采，同年采用 C 组配比的废石胶结充填体对该工业性试验采场进行了胶结充填。项目组成员于 2011 年底对该工业性试验采场的充填体采用应力解除法开展了应力测试，其值为 2.25 MPa，与模拟结果吻合良好，相对误差约为 7%。

基于上述模拟结果和测试结果，宝山矿西部 2[#]矿体必须采用废石胶结充填法分层回采，并严格控制废石胶结充填体的充填质量。

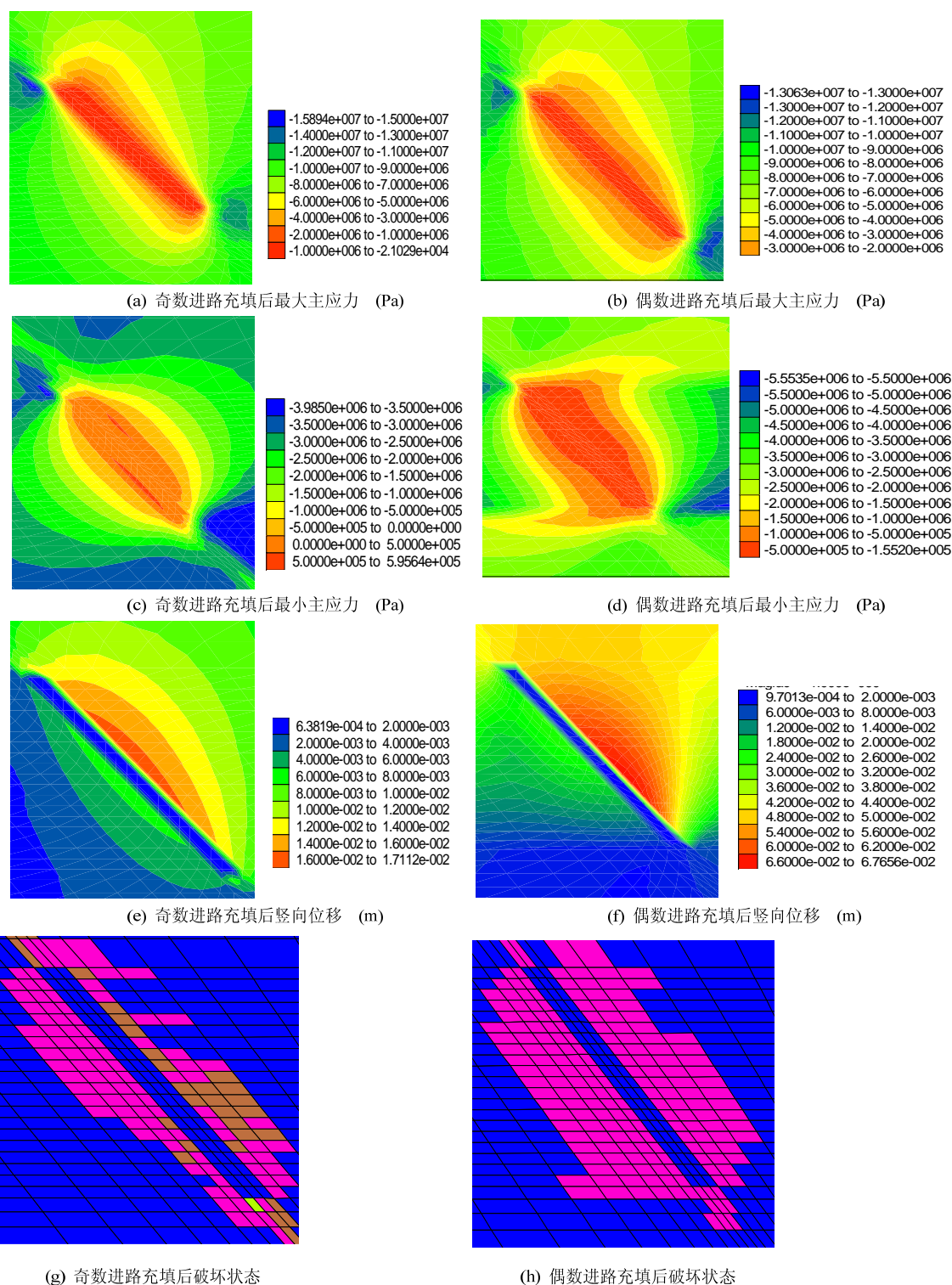


图 3 C 组废石胶结充填体充填试验采场的模拟结果

Fig.3 FLAC^{3D} simulation results of the test stope backfilled with C mixture ratio at the solidification duration of 28 days

4 结 论

1) 将 7 种配比的废石胶结充填体标准试样, 在 RMT-150B 岩石力学试验机上进行了不同龄期的抗压强度试验, 试验结果表明: 龄期为 28 d 的 C 组废石胶结充填体的抗压强度大于 2 MPa; 且灰砂比是

控制胶结充填体抗压强度的关键因素。

2) 通过对龄期为 28 d 的 7 种配比的废石胶结充填体进行力学参数测试, 测试结果表明: 弹性模量随灰砂比的增加而增大, 最大值为 3.34 GPa; 泊松比、黏聚力较小; 内摩擦角较大, 均超过了 45°。

3) 对宝山矿西部 2[#]矿体试验采场的采空区, 采用龄期为 28 d 的废石胶结充填体进行了充填回采的 FLAC^{3D} 模拟, 模拟结果表明: 采空区围岩的最大主应力和竖向最大位移随废石胶结充填体强度的增加而减小, 而最小主应力则与之相反。

4) 根据模拟结果的比较分析, 选用 C 组配比的废石胶结充填体能控制该试验采场的变形和破坏。同时对该工业性试验采场的废石胶结充填体开展了应力测试, 测试结果与模拟结果吻合良好。

参考文献:

- [1] 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): 357-361.
ZHANG Ji-xiong, LI Jian, AN Tai-long, et al. Research on the deformation characteristics of waste filling fully mechanized mining mantle rock critical zone[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 357-361.
- [2] HASSANI F P, MORTAZAVI A, SHABANI M. An investigation of mechanisms involved in backfill-rock mass behavior in narrow vein mining[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2008, 108(8): 463-472.
- [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 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.
- [4] RANKINE R, PACHECO M, SIVAKUGAN N. Underground mining with backfills[J]. Soils and Rocks, 2007, 30(2): 93-101.
- [5] 余伟健, 王卫军. 矸石充填整体置换“三下”煤柱引起的岩层移动与二次稳定理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 105-112.
YU Wei-jian, WANG Wei-jun. Strata movement induced by coal-pillar under three circumstances exchange by gangue backfill and quadratic stability law[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 105-112.
- [6] 刘志祥, 李夕兵, 赵国彦, 等. 充填体与岩体三维能量耗损规律及合理匹配[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 344-348.
LIU Zhi-xiang, LI Xi-bing, ZHAO Guo-yan, et al. Three-dimensional energy dissipation laws and reasonable matches between backfill and rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 344-348.
- [7] 李一帆, 张建明, 邓飞, 等. 深部采空区尾砂胶结充填体强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 865-868.
LI Yi-fan, ZHANG Jian-ming, DENG Fei, et al. Experimental study on strength characteristics of tailings cement backfilling at deep-seated mined-out area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 865-868.
- [8] 刘志祥, 李夕兵, 戴塔根, 等. 尾砂胶结充填体损伤模型及与岩体的匹配分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1442-1446.
LIU Zhi-xiang, LI Xi-bing, DAI Ta-gen, et al. On damage model of cemented tailings backfill and its match with rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1442-1446.
- [9] FALL M, BENZAAZOUA M. Modeling the effect of sulphate on strength development of paste backfill and binder mixture optimization[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(2): 301-314.
- [10] FALL M, BENZAAZOUA M, SAA E G. Mix proportioning of underground cemented tailings backfill[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(1): 80-90.
- [11] 李永明, 刘长友, 邹喜正, 等. 急倾斜薄煤层胶结充填开采合理参数确定及应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增刊): 7-12.
LI Yong-ming, LIU Chang-you, ZOU Xi-zheng, et al. Determination and application of reasonable parameters of cemented backfilling mining technology in thin steeply inclined seam[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(Sup): 7-12.
- [12] 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 its application in backfilling fully mechanized coal mining technology[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(1): 158-162.
- [13] 史俊伟, 魏中举, 刘庆龙, 等. 基于正交试验的煤矿安全开采充填材料配比优化研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(6): 111-115.
SHI Jun-wei, WEI Zhong-ju, LIU Qing-long, et al. Research on proportion optimizing of paste filling material based on orthogonal experiment in coal mine[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(6): 111-115.
- [14] 闫长斌, 徐国元, 李夕兵. 爆破震动对采空区稳定性影响的 FLAC^{3D} 分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2894-2899.
YAN Chang-bin, XU Guo-yuan, LI Xi-bing. Stability analysis of mined-out areas influenced by blasting vibration with FLAC^{3D}[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 24(16): 2894-2899.
- [15] 史秀志, 黄刚海, 张舒, 等. 基于 FLAC^{3D} 的复杂条件下露天转地下开采空区围岩变形及破坏特征[J]. 中南大学学报, 2011, 42(6): 1710-1718.
SHI Xiu-zhi, HUANG Gang-hai, ZHANG Shu, et al. Goaf surrounding rock deformation and failure features using FLAC in underground mining shifted from open-pit in complex situation[J]. Journal of Central South University, 2011, 42(6): 1710-1718.