

岩巷下方交错煤岩巷道掘进迎头涌水机制研究

姜永丰¹, 赵宝友²

(1. 本溪钢铁(集团)有限责任公司 歪头山铁矿, 辽宁 本溪 117006; 2. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

[摘要] 基于有限差分数值计算方法, 对某矿既有水平岩巷下方交错煤岩巷道掘进至交错位置附近迎头涌水现象进行数值模拟, 综合交错巷道围岩的塑性区、位移场、应力场的分析, 揭示了该交错巷道涌水的原因和机制, 并结合实际工程情况, 设计了采用注浆加固围岩堵水的工艺, 并取得了良好的现场堵水效果, 为类似工程的防水设计提供参考依据。

[关键词] 交错巷道; 涌水机制; 数值模拟; 注浆加固技术

[中图分类号] TD745 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225 (2013) 03-0120-05

Research on Mechanism of Water-burst from Intersected Coal and Rock Roadway Face under Rock Roadway

JIANG Yong-feng¹, ZHAO Bao-you²

(1. Waitoushan Iron Mine, Benxi Iron Co., Ltd., Benxi 117006, China;

2. Mechanics & Engineering School, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Water-burst from intersected coal and rock roadway face under rock roadway was simulated by finite difference numerical software. By analysis of plastic zone, displacement field, stress field, water-burst reason and mechanism was discovered. Technique of grouting reinforcement against water was designed and it made good water plugging effect and provided reference for similar engineering.

Key words: intersected roadway; water-burst mechanism; numerical simulation; grouting reinforcement

矿山巷道及硐室的掘进、支护施工期及运行服役期, 地下水的存在对施工安全和工程长期稳定将产生重要影响: 一方面地下水可能引起淋水、涌水, 甚至是突水等事故的发生; 另一方面由于地下水对围岩的溶解、溶蚀、冲刷、软化, 或产生静水压力, 或引起膨胀压力, 可导致围岩物理力学性能的严重弱化, 改变了岩体的物理力学性质, 破坏了岩体的完整性, 引起围岩的变形破坏, 影响支护方案的设计和支护结构的稳定, 甚至使围岩发生失稳坍塌。

据统计, 60% 的矿井事故与地下水作用有关^[1]。如: 1988 年发生在淮北杨庄煤矿Ⅱ617综采工作面的特大突水灾害, 瞬时水量高达 3153t/h, 造成二水平被淹^[2]; 东滩矿 3 煤顶板的突水事故^[3]; 2007 年 3 月 10 日抚顺老虎台煤矿回采工作面上隅角发生突发透水事故, 工作面被迫停产^[4]; 2010 年 3 月 28 日山西王家岭煤矿发生的透水事故^[5]。

目前, 有关煤矿突水或涌水机制的研究主要是基于现场量测或实验方法^[2-4, 6-7]和理论分析方

法^[1, 8-9]。如: 罗立平和彭苏萍^[2]通过对突水地段地质与水文地质情况、突水水源与导水通道、底板防隔水性能、不同应力场相互作用的研究, 认为淮北杨庄矿Ⅱ617综采工作面特大底板突水灾害的发生是其岩性场、应力场与渗流场耦合作用的结果。许家林等^[6]采用现场测试和模拟实验方法, 对松散承压含水层下采煤顶板突水机理、突水危险区域预测与突水灾害防治对策等进行了研究, 得到了祁东煤矿工作面突水灾害和覆岩破断的关系。郑红等^[1]针对红透山深部断层下巷道围岩破坏诱发的涌水现象, 以该矿水文地质条件为基础, 建立了岩体水力学模型, 应用 RFPA 数值计算软件, 模拟研究了深部断层下巷道围岩破坏过程, 揭示了巷道应力重新分布诱发损伤及渗流涌水规律。武强等^[9]基于流-固耦合理论, 提出弹塑性应变-渗流耦合、流变-渗流耦合及变参数流变-渗流耦合 3 种突水模拟的评价模型, 应用 FLAC^{3D} 软件, 对上述 3 种评价模型进行数值模拟, 研究了矿井断裂构造带滞后突水的原因。

由于煤层沉积地质环境的复杂性及井下采掘系

[收稿日期] 2012-12-19

[基金项目] 高等学校博士学科点专项科研基金新教师类资助项目 (20112121120004); 辽宁工程技术大学校基金资助项目 (2010115; 2011188)

[作者简介] 姜永丰 (1978-), 男, 内蒙古赤峰人, 采矿工程师, 现从事采矿工艺设计及矿山爆破技术工作。

统功能性的需求，使得井下巷道数量众多，相互之间关系错综复杂，巷道之间有的直接相交连通，有的则空间交错，尤其是近水平多煤层开采情况，为开采下水平煤层，常利用上水平巷道组成采掘巷道系统，也就很难避免遇到空间交错巷道。由于巷道交错位置的煤岩柱厚度往往较薄，使得交错巷道围岩的稳定性是影响整个采掘系统设计的关键因素之一。若煤层地下水丰富，即便没有断层、大型联通裂隙面、节理面或软弱夹层等软弱岩体结构面的存在，受采掘爆破及开挖卸荷的影响，下水平交错巷道掘进时，有可能诱发淋水、涌水，甚至突水的灾害，严重威胁着井下采煤的安全生产。然而，针对交错巷道涌水机制的研究却罕见报道。因此，本文以某矿的实际工程为背景，基于数值模拟的方法，对既有水平岩巷下方交错煤岩斜巷（井）掘进迎头涌水现象进行研究，揭示其涌水机制，并依此设计了防治措施，为类似工程的施工设计提供可参考性的意见。

1 工程背景

某矿煤（岩）层走向 $114 \sim 118^\circ$ ，平均倾角 28° 。预掘的西翼回风井（下段）位于 -1100m 水平后六采区，现揭露煤₁₉ 及其顶板粉砂岩，与西翼回风井（上段）贯通。预掘巷道为半煤岩巷道，断面形状为半圆拱形，断面净宽 4.5m ，净高 4.0m ，其中拱高 2.25m ，墙高 1.75m ，巷道开门底板标高 -871m ，埋深 $900 \sim 1100\text{m}$ ，倾角 28° ，与后六石门交错角约 21° ，全长 447.6m 。西翼回风井在

从底过后六石门过程中，在掘进至标高为 -742m 时，有 4 根锚索渗水，出水孔深 5.0m ，涌水量约 $4\text{m}^3/\text{h}$ ，最小岩柱厚约为 10m 。巷道交错位置附近围岩并不断层和大型联通的结构面存在。预掘的西翼回风巷与邻近的交错巷道的局部平面布置图和剖面见图 1 和图 2 所示。其中，后六石门为水平布置的半圆拱形巷道，巷道净宽 4.0m ，净高 3.4m 。墙高 1.4m ，拱高 2.0m 。巷道煤岩体的物理力学参数详见表 1。

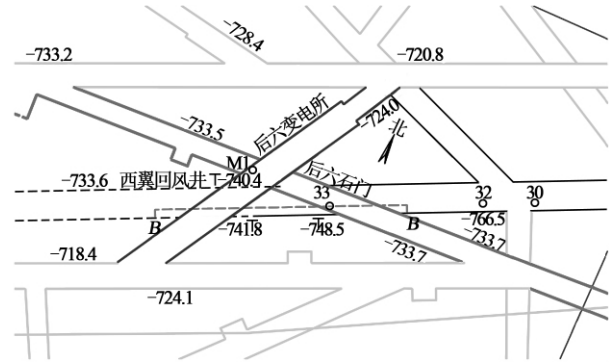


图 1 巷道布置平面

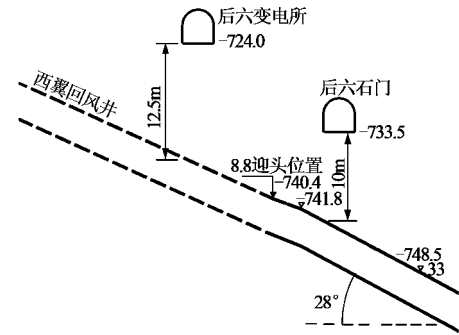


图 2 巷道布置 B-B 剖面

表 1 煤岩体物理力学参数

名称	岩性	地质强度 指标 GSI	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	坚固性系 数 f	抗压强度 σ_c/MPa	抗拉强度 σ_t/MPa	黏聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
煤	煤	60	0.6	0.33	1300	0.5	5	0.05	0.82	33.7
基本顶	中砂岩	55	4.5	0.22	2600	6	60	0.29	2.51	51.1
直接顶	粉砂岩	50	1.6	0.25	2600	3~4	30	0.14	1.52	42.1
直接底	砂土岩	45	1.3	0.28	2500	2~3	20	0.06	1.16	38.4
基本底	细砂岩	60	4.0	0.23	2600	5~6	50	0.35	2.56	51.0

2 有限差分数值计算模型

本文拟采用有限差分数值模拟的研究方法，对西翼回风井（下段）掘进至与后六石门交错附近的涌水现象进行模拟计算，通过开挖扰动引起的位移场、应力场、塑性区的分布规律，详细探究诱发涌水的原因及机制，为实践工程及类似工程的涌水防治提供有意义的结论。

2.1 数值计算模型

2.1.1 交错巷道模型的建立

西翼回风巷掘进过程中先后会遇到后六石门和后六变电所 2 条交错巷道，但由于掘进巷道涌水位置发生在与后六石门交错位置附近，且后六变电所位于后六石门之上的高程，因此，对实际情况进行合理简化，数值计算中不考虑事先存在的后六变电所对与后六石门交错位置巷道涌水的影响。简化后的西翼回风巷与后六石门的交错位置情况见图 3 的几何模型，两巷道之间岩柱最薄处约为 10m ，

且在水平投影的交角约 22° 。

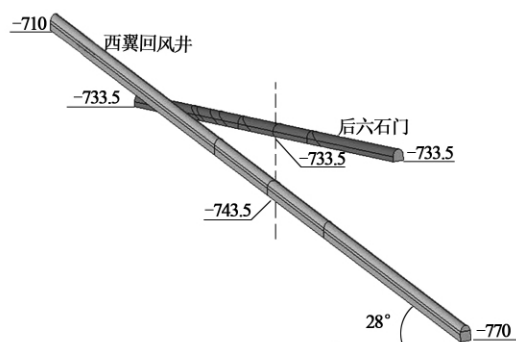


图 3 交错巷道的几何模型示意

参照该矿地质剖面图, 数值计算模型由地下 -1000m 高程建至地表 200m 高程。为消除数值模型边界效应的影响, 在巷道四周向外截取 200m 厚度的岩体, 采用关心区域网格细化, 其他区域渐变增大的原则进行有限差分网格的划分。坐标系的规定: 水平向右为广义坐标系 X 轴正向, 即西翼回风井在水平的投影沿 X 轴方向, 以水平垂直向里为广义坐标系 Y 轴正向, Z 轴竖直向上, 三者遵循右手定则。

2.1.2 煤岩体的力学本构模型

煤岩体的力学本构模型采用经典的弹塑性模型, 对应的屈服准则为 Mohr Coulomb 拉剪复合破坏准则。基于煤岩体力学特性的试验结果及分段线性拟合 Hoek-Brown (HB) 模型获得煤体等效 MC 模型的物理力学参数^[10-12], 见表 1 所示。

2.1.3 边界条件及开挖支护模拟

有限差分模型底部三向位移约束, 四周边界法向位移约束; 竖向应力为岩层自重, 水平侧压力系数 λ_x 和 λ_y 分别为 1.25 和 1.5, 三向地应力的方向分别与广义坐标系方向一致。

洞室开挖前, 先进行地应力场的模拟, 待地应力场平衡后, 将模型的位移清空, 并进行后六石门的开挖支护模拟, 待后六石门开挖支护完成后, 将模型位移场清零, 再进行西翼回风井的分步开挖支护模拟, 完整围岩和破碎围岩情况下的开挖步距分别为 1.6m 和 0.8m。

根据工程类比法确定西翼回风井采用锚网索作为永久支护。拱顶和两帮分别采用 5 根和 3 根 $\phi 22\text{mm} \times 2400\text{mm}$ 的全螺纹钢式树脂锚杆; 锚杆间排距为 $800\text{mm} \times 800\text{mm}$; 岩层和煤层中锚杆的设计锚固力分别不小于 130kN 和 70kN。金属网采用 8 号镀锌铁丝编结的菱形金属网, 网孔规格为 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 。锚索长 6m, 对应的材料为 $\phi 17.8\text{mm}$ 高强度、低松弛、粘结式 1×7 钢绞线; 在拱顶呈三花

布置单根锚索梁, 间距 1.2m, 排距为 2.4m, 单根锚索设计锚固力不小于 200kN。

3 结果分析

西翼回风井下段与上段连通开挖后, 交错巷道围岩的塑性区分布见图 4 所示。从中可直观地看出, 处于 30MPa 左右的三向地应力下的煤岩巷道开挖稳定后, 在交错位置的西翼回风井四周围岩均产生了一定深度的拉剪塑性区, 巷道顶板和两帮的塑性区深度基本在系统锚杆的长度范围内, 且交错巷道之间岩柱内的塑性区并未发生贯通。从塑性区分布情况来看, 上水平岩层内后六石门的的存在对交错巷道稳定性的影响不大。

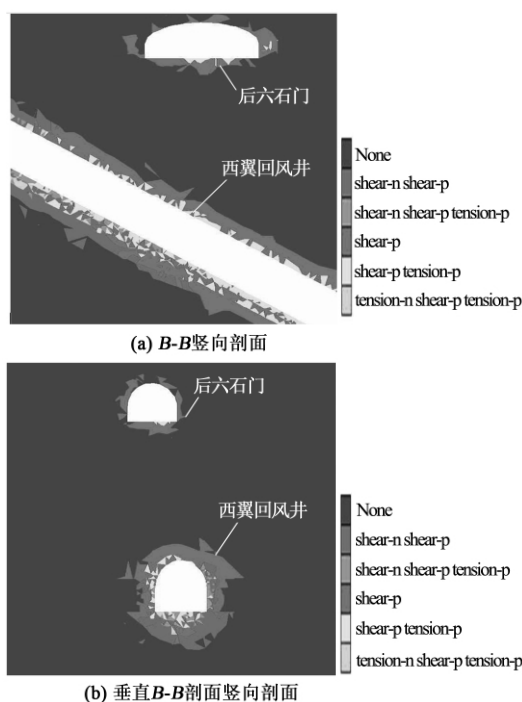
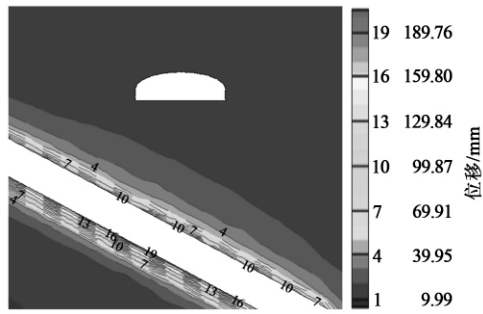


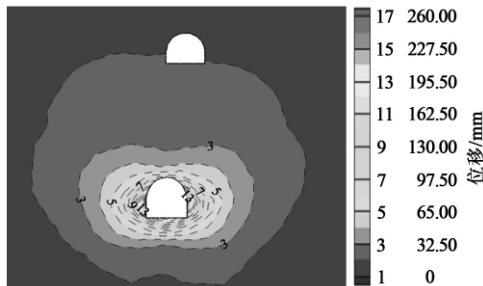
图 4 开挖后交错巷道围岩塑性区分布

图 5 给出了西翼回风井下段开挖期间两竖向剖面上总位移的分布情况。从中可知, 巷道开挖后, 西翼回风井四周的围岩均向巷道内产生一定的变形; 由于水平地应力略大于竖向地应力, 加之拱形结构自身的稳定性及煤岩体力学特性的差异, 使得巷道两帮的位移要大于巷道拱顶的位移, 两帮的最大位移量可达 0.26m; 受西翼回风井下段开挖的影响, 后六石门在巷道交错位置附近发生了朝向西翼回风井的不均匀沉降, 如图 6 所示, 围岩最大下沉位移量达 20mm。

巷道开挖后交错巷道围岩的最大主应力分布图直观地表明 (图 7 和图 8), 受爆破开挖卸荷扰动的影响, 两巷道四周均产生了一定深度的应力重分布, 重分布的最大主应力较开挖前围岩的地应力明

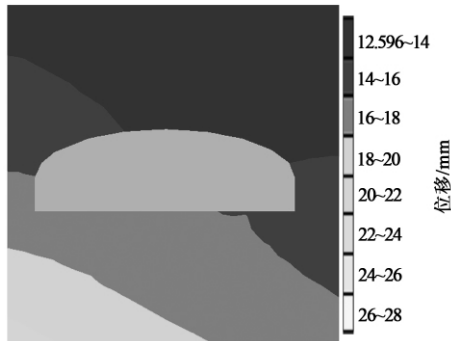


(a) B-B 竖向剖面

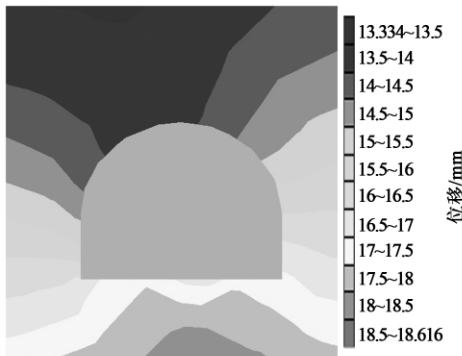


(b) 垂直 B-B 剖面竖向剖面

图 5 开挖后交错巷道围岩总位移分布



(a) B-B 竖向剖面



(b) 垂直 B-B 剖面竖向剖面

图 6 开挖引起的后六石门围岩位移分布

显降低，越靠近巷道表面，围岩的最大主应力越接近拉应力状态，越易造成围岩的拉伸破坏；另外，开挖后围岩的应力场还表明，应力重分布后的最大主应力在两交错巷道之间的岩柱内已连通，在一定程度上影响着交错巷道围岩的稳定性。

因此，综合上述西翼回风井下段开挖后的塑性

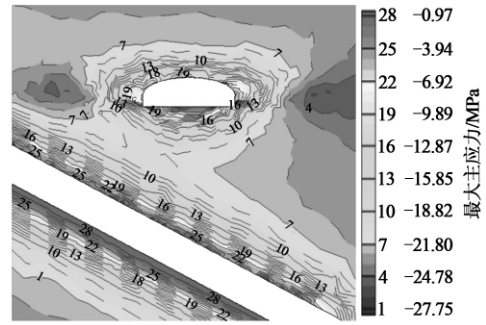
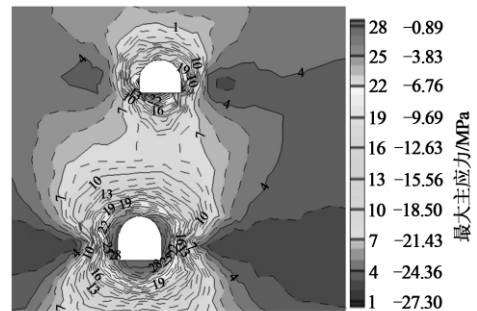


图 7 B-B 剖面巷道围岩最大主应力分布

图 8 垂直 B-B 剖面的竖向剖面
内交错巷道围岩最大主应力分布

区、位移场、应力场的分析可知，受既有巷道下方巷道爆破开挖扰动的影响，使得开挖期间上水平的岩层巷道向开挖巷道一侧发生不均价沉降变形，加之交错巷道岩柱厚度在开挖扰动范围内，应力重分布后的最大主应力较原岩地应力显著降低，且在岩柱内已和两巷道的顶底板相互连通；因此，受开挖扰动卸荷的影响，导致交错巷道之间岩柱的不均匀变形和应力卸荷重分布，围岩松动，容易使开挖前闭合且稳定的岩体原生结构面产生拉伸破坏及朝向开挖巷道一侧的错动剪切变形，降低围岩的阻水能力，即使没有断层等大型导水结构面的存在，若围岩的地下水丰富，有可能诱发淋水、涌水，甚至突水的灾害。这也揭示了西翼回风井掘进至交错位置附近时，掘进迎头发生涌现现象的原因和机制，为该工程合理防水治理措施的设计提供了参考依据。

4 实际涌水的防治方案设计

结合现场地测信息，水文观测孔流量、水压、水温可知，涌水的水源为后六石门内水沟的水，再考虑诱发涌水的原因和机制，巷道涌水防治的方案是对出水区域及两巷叠加区域及岩柱进行高分子注浆堵水加固处理。即在出水点处注浆，以巷道中心为基准，巷道中心布置 1 个注浆孔，垂直于巷道轮廓线 1m 间距向两侧各布置 2 个注浆孔，共施工 5

个注浆孔, 注浆孔深度为 6m, 封孔深度 3m, 注浆孔排距为 3m, 单孔注浆量根据现场情况确定, 对应的施工流程图见图 9。后续注浆堵水加固围岩的防水措施的信息反馈表明, 该防治措施效果显著, 有效地抑制了巷道围岩的涌水现象, 保证了巷道的顺利掘进及安全运行。

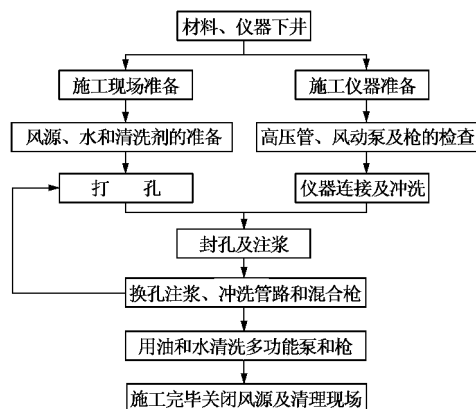


图 9 注浆工艺

5 结论

基于有限差分数值计算方法, 对某矿过既有岩巷底板掘进交错巷道时, 交错位置附近掘进迎头涌水的现象进行数值模拟, 通过开挖后交错巷道围岩塑性区、位移场、最大主应力分布规律的分析, 揭示了掘进巷道涌水的机制, 并结合实际工程情况, 设计了涌水防治的注浆加固堵水技术及施工工艺。可防治巷道局部淋水、涌水和突水事故的发生, 可为类似工程的设计提供参考依据。

[参考文献]

- [1] 郑红, 刘洪磊, 石长岩, 等. 深部断层下巷道围岩破坏诱发涌水的模拟研究[J]. 力学与实践, 2009, 31(2): 69-53.
- [2] 罗立平, 彭苏萍. 承压水体上开采底板突水灾害机理的研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(4): 459-503.
- [3] 周笑绿, 杨国勇, 郑世书. 东滩矿 3 煤顶板突水的影响因素[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(3): 281-285.
- [4] 高致宏. 老虎台矿“3.10”透水事故的水文地质分析[J]. 煤矿安全, 2010, 41(7): 131-132.
- [5] 李湖生, 刘铁民. 从“3·28”王家岭煤矿透水事故抢险救援反思中国事故灾难应急准备体系[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(3): 5-12.
- [6] 许家林, 朱卫兵, 王晓振. 松散承压含水层下采煤突水机理与防治研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 333-339.
- [7] 赵苏启, 武强, 尹尚先. 广东大兴煤矿特大突水事故机理分析[J]. 煤炭学报, 2006, 31(5): 618-622.
- [8] 韩江水, 赵婷, 武谋达. 综采放顶煤工作面顶板涌水机理分析[J]. 西安科技大学学报, 2012, 32(2): 144-148.
- [9] 武强, 朱斌, 刘守强. 矿井断裂构造带滞后突水的流-固耦合模拟方法分析与滞后时间确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 93-104.
- [10] MEDHURST T P, BROWN E T. A study of the mechanical behavior of coal for pillar design[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(8): 1087-1105.
- [11] OKUBO S, FUKUI K, Qi Q X. Uniaxial compression and tension tests of anthracite and loading rate dependence of peak strength[J]. International Journal of Coal Geology, 2006, 68(3-4): 196-204.
- [12] EVERT H. Practical rock engineering [OL]. http://www.rocsience.com/education/hoek_corner, 2012.

[责任编辑: 林健]

(上接 127 页)

[参考文献]

4 结论

(1) 以矿井年产量规划和不同地质条件下煤炭资源开采量应与当年矿井总产量相匹配为约束条件, 以矿井不同地质条件下煤炭资源开采的经济成本、技术成本最低为优化目标, 建立基于多目标优化算法的矿井可持续开采模型。

(2) 通过对某煤矿动态盈亏平衡点的计算分析, 得出某煤矿 2011-2020 年产量规划合理可行的结论, 且 2020 年矿井开始进入亏损阶段。

(3) 以计算得到的某煤矿多目标优化产量为基准, 对比分析了某煤矿剩余煤炭资源开采规划的合理性, 为矿井合理的产量规划设计提供了有益借鉴。

- [1] 赵富, 安伯超, 赵琦. 建筑物下压煤开采方案技术经济评价模型研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(11): 1-3.
- [2] 胡清淮. 受限条件下的矿山生产配矿数模研究[J]. 矿业研究与开发, 2002, 22(6): 1-3.
- [3] 郭金陵, 杜娟, 李兰兰. 基于目标规划的煤炭企业采掘接替计划优化[J]. 煤炭技术, 2011, 30(9): 1-4.
- [4] 高岳, 隋旺华. 多目标决策法在含水层下开采方案选择中的应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 55-59.
- [5] 王挺. 应用多目标规划实现衰老矿井资源优化开发[J]. 江西煤炭科技, 2006, 28(1): 74-76.
- [6] 吴贵龙, 张志礼, 李绍文. 矿山企业晚期盈亏平衡点的分析[J]. 河北理工学院学报, 1997, 30(4): 7-11.
- [7] 刘宏, 谢海娟. 财务盈亏平衡点在项目投资中的运用[J]. 财会通讯, 2006, 27(9): 1-3.

[责任编辑: 李青]