

doi: 10.11799/ce201810028

# 红柳林煤矿火烧区烧变岩巷道稳定性研究

张恩强<sup>1</sup>, 陈泽年<sup>1,2</sup>, 侯兰涛<sup>1</sup>, 邵亚武<sup>1</sup>, 杨正春<sup>3</sup>

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054;

2. 陕西汇森煤业开发有限责任公司, 陕西 西安 710064;

3. 陕煤集团神木红柳林矿业有限公司, 陕西 榆林 719300)

**摘要:** 为解决红柳林煤矿火烧区巷道支护困难问题。以该矿4<sup>-2</sup>煤回风大巷为工程背景, 通过理论分析、数值模拟及工程实践, 对火烧区巷道围岩工程地质力学和相应的支护技术进行了研究。结果表明: 火烧区巷道变形破坏主要原因是煤岩体受到热损伤、物理膨胀及氧化变质等复杂物化影响导致煤岩力学强度降低、节理裂隙发育及矿物成分改变, 导致锚杆(索)难以锚固, 使巷道顶板初期变形量和离层量较大以致破坏。因此应提高锚杆(索)预应力, 增加锚固剂数量, 使巷道顶板形成稳定的挤压平衡拱, 充分发挥锚杆(索)主动支护作用。

**关键词:** 火烧区; 数值模拟; 热损伤**中图分类号:** TD322.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2018)10-0121-05

## Research on the stability of burned rock roadway in fire area of Hongliulin Coal Mine

ZHANG En-qiang<sup>1</sup>, CHEN Ze-nian<sup>1,2</sup>, HOU Lan-tao<sup>1</sup>, SHAO Ya-wu<sup>1</sup>, YANG Zheng-chun<sup>3</sup>

(1. College of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of mining and disaster prevention in western mines of Ministry of Education, Xi'an 710064, China;

3. Shenmu Hongliulin Coal Mine of Shaanxi Coal Industry Co., Ltd., Yulin 719300, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of roadway support in the burning area of Hongliulin Coal Mine, the engineering geological mechanics and corresponding supporting technology of roadway surrounding rock engineering are studied by theoretical analysis, numerical simulation and engineering practice. Results show that the main reason is that the coal fire area of roadway deformation and destruction is caused by complex physical and chemical effect such as thermal damage of rock mass, the physical expansion and the oxidation, which leads to the decrease of strength of coal and rock mechanics, joint fissure development and mineral composition change, and results in inadequate anchor bolt (cable), large initial deformation and roof delamination of roadway. Therefore, it is necessary to improve the pre-stress of the bolt (cable), increase the number of anchoring agents, and make the roof of the roadway form a stable extrusion balance arch, and give full play to the active support of the bolt (cable).

**Keywords:** fire area; numerical simulation; heat injury

我国陕北地区煤层具有埋深浅、基岩薄及上覆厚松散沙层等特点, 煤层易自燃, 自燃火区分布范围广泛。烧变岩是浅埋煤层在地质历史时期自燃使围岩受到火烧而形成的特殊类型岩体, 煤岩受到热损伤、物理膨胀及氧化变质等复杂物化影响导致煤岩力学强度降低、节理裂隙发育和

矿物成分改变。长期以来, 烧变岩受到了国内专家的广泛关注, 董守华等根据烧变岩  $\Delta T$  磁异常特征, 利用多边形为反演模型, 通过阻尼最小二乘法自动迭代反演, 精确地圈定了火烧区边界<sup>[1]</sup>; 侯恩科等通过分析烧变岩分布特征、水力联系和富水特征, 研究了受采煤引起的烧变岩水量损

**收稿日期:** 2017-11-14**作者简介:** 张恩强(1957—), 男, 陕西扶风人, 教授, 现主要从事矿山开采方法与矿山压力等方面教学与科研工作, E-mail: zheq@xust.edu.cn。**引用格式:** 张恩强, 陈泽年, 侯兰涛, 等. 红柳林煤矿火烧区烧变岩巷道稳定性研究 [J]. 煤炭工程, 2018, 50(10): 121-125.

失和烧变岩水保护问题<sup>[2]</sup>；范立民等在“保水采煤”的基础上，研究了陕北地区烧变岩地下水的成因并为保水采煤提出新思路<sup>[3]</sup>；柴敬等以枣泉煤矿烧变岩地质条件为基础，采用相似模拟实验方法，研究回采工作面开采后敷衍垮落特征和火烧区岩层移动情况，为该矿掘进和回采工作是否进行探放水提供依据<sup>[4]</sup>。

以往的研究多侧重于火烧区边界确定及火烧区烧变岩富水特征等问题，而对其巷道稳定性的研究较少。为此，本文通过分析火烧区烧变岩强度、矿物组成成分和完整性程度，研究红柳林北一盘区4<sup>-2</sup>煤回风大巷围岩力学性质，并提出了相应的巷道支护对策，采用数值计算的方法对支护方案进行理论验证，并将其应用到实践。

## 1 工程概况

红柳林煤矿北一盘区位于井田东北部，区内共有六层煤(2<sup>-2</sup>、3<sup>-1</sup>、4<sup>-2</sup>、4、-3、4<sup>-4</sup>和5<sup>-2</sup>)，4<sup>-2</sup>、5<sup>-2</sup>煤为主采煤层。4<sup>-2</sup>煤埋深66.30~125.0m，上覆基岩厚度13.1~45.4m，其上距3<sup>-1</sup>煤层约33.85~60.20m，平均为42.48m；下距5<sup>-2</sup>煤层约55~65m。根据钻孔地质资料显示，在整个盘区内4<sup>-2</sup>煤上部各煤层已完全被氧化剥蚀，并且4<sup>-2</sup>煤东部也被氧化并有自燃现象。4<sup>-2</sup>煤回风大巷是红柳林煤矿最为重要的永久大巷之一，巷道设计断面为拱形，净宽5300mm，墙高1400mm。大巷初期自开口处以+6°的坡度向上掘进至约50m处揭露烧变岩，节理裂隙发育、结构松散，掘进期间巷道变形加剧，锚杆锚索难以锚固，巷道顶板及两帮出现开裂，采用较强支护后仍不能控制巷道变形。为降低火烧区对巷道的影响，被迫将盘区大巷组向北平移了160m，使回风大巷距4<sup>-2</sup>煤火烧区边界最近约74m，4<sup>-2</sup>煤回风大巷平面及空间布置如图1、2所示。

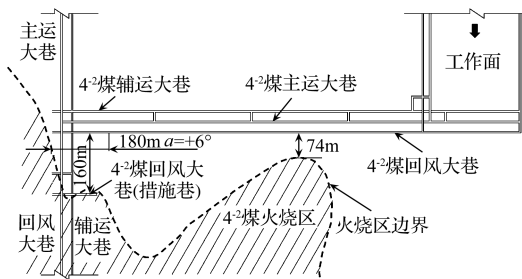


图1 回风大巷平面布置图

位置优化后的实验回风大巷从4<sup>-2</sup>煤底板开始，以+6°的坡度向上掘进约180m处进入煤层，然后沿煤层顶板掘进，当掘进至250m时，根据钻孔探查，煤层之上为厚约6m的较松软的泥岩，取芯率低，再上为厚度约7m的严重风氧化的黄色砂岩，局部已泥化，极为松软破碎。目前巷道顶板及两帮均采用Φ20mm×2600mm的高强螺纹钢锚杆，间排距均为800mm×800mm，锚固方式均为点锚(一卷K350型树脂锚固剂)；顶板布置2根规格为Φ17.8mm×7300mm锚索，间排距1600mm×2400mm，采用1卷K350型

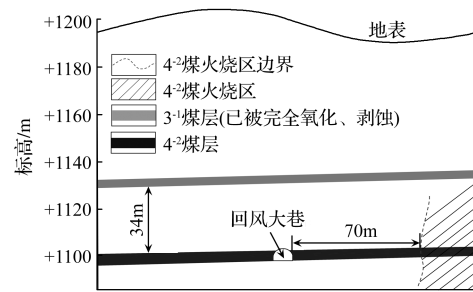


图2 4<sup>-2</sup>煤回风大巷空间位置关系

锚固剂和1卷Z600型锚固剂。根据现场拉拔试验，随机测试锚杆的锚固力约为60kN/根，同时掘进中发现锚索钻孔已经进入黄色的风化岩层中，成孔很难，造成锚索难以锚固，250m处钻孔资料如图3所示。

岩石名称	柱状	层厚/m	岩性描述
细粒砂岩		7.80	浅灰色，成分以石英为主，长石次之，棱角状，泥钙质胶结，RQD值65%
粉砂岩		5.80	深灰色，具水平层理，岩芯短柱状，RQD值64%
粉砂岩		3.00	深灰色，具水平层理，岩芯短柱状，RQD值64%
泥岩		4.35	深灰色，含大量植物化石碎片，具滑面，RQD值59%
4 <sup>-2</sup> 煤		3.40	黑色，阶梯状断口，条带状结构，内生裂隙较为发育，被方解石充填
粉砂岩		2.93	灰色、深灰色，泥质胶结，具水平层理及小型交错层理，含植物化石碎片

图3 回风大巷250m处钻孔煤岩柱状图

## 2 火烧区煤岩地质特征及力学特性

### 2.1 煤岩基础矿物成分

利用黏土矿物成分的测试方法<sup>[5,6]</sup>，分析粉砂岩和泥岩的矿物组成成分，研究表明：组成泥岩和粉砂岩的矿物成分主要为黏土矿物和石英。其中组成泥岩和粉砂岩黏土矿物的含量平均值分别为57.9%、55.6%，石英含量平均值分别为39.1%、37.4%，且组成泥岩黏土矿物的主要成分为高岭石、伊利石、长石和绿泥石，含量分别为57%、17%、7%和19%；组成粉砂岩黏土矿物的主要成分及含量分别为高岭石37%、伊利石20%和绿泥石10%。研究表明，伊利石膨胀能力最强，高岭石膨胀能力最弱，几乎不具有膨胀性，但遇水易软化<sup>[7]</sup>。综合以上测定数据可以看出，岩样遇水易软化，吸水能力强，膨胀性弱。

### 2.2 煤岩本构关系特征

沿回风大巷走向自西向东40m和150m处两个位置钻孔取岩芯并进行室内岩石力学实验，将岩样加工成50mm×100mm(直径×高)的圆柱状试件。分别对两个位置的泥岩、粉砂岩和煤试件进行单轴抗压强度试验，加载速度为0.5~1.0MPa。

从煤岩全应力应变曲线可以看出(图4、图5)，经过氧化后，煤、泥岩和粉砂岩试件的单轴抗压强度明显低于未经氧化的试件，单轴抗压强度均小于23MPa，*f*系数小于

2.3, 属于不稳定围岩。被氧化后煤岩体的弹性模量也同样降低, 说明煤岩体在受高温氧化的过程中, 组成煤岩体的矿物成分及内部构造发生改变, 节理裂隙发育, 导致煤岩体强度降低, 为围岩的稳定性控制带来极大困难。

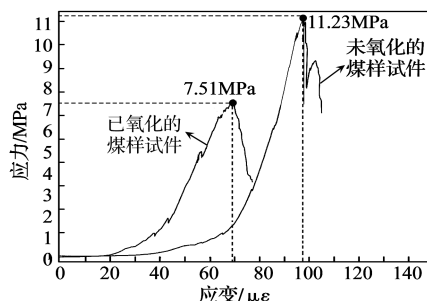


图4 煤应力-应变全程曲线

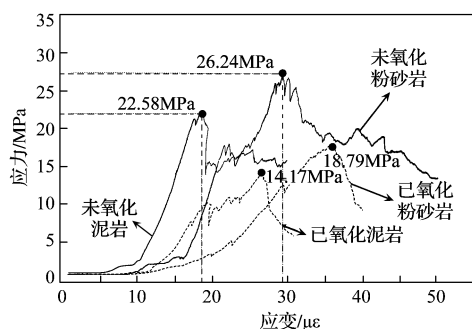


图5 岩石应力-应变全程曲线

### 2.3 煤岩 RQD 完整性分析

巷道的稳定性主要取决于围岩完整性程度和围岩强度。RQD 值是按岩石质量指标对岩石进行分类, 是描述围岩稳定性分类的指标之一<sup>[8]</sup>。对北一盘区 4<sup>-2</sup>煤钻取岩芯, 测得 4<sup>-2</sup>煤试验回风大巷顶底板围岩 RQD 值见表 1。

表 1 4<sup>-2</sup>煤及顶底板岩层完整性结果表

等底板岩性	RQD 值/%	围岩稳定性划分
泥岩	67.00~76.00 71.30	属软弱岩石、岩体中等完整、不稳定性顶板
粉砂岩	60.60	属软弱岩石、岩体中等完整、不稳定性顶板
4 <sup>-2</sup> 煤	—	—
砂质泥岩	50.00	属软弱岩石、岩体中等完整、不稳定性底板
泥岩	28.00~78.00 58.80	属软弱岩石、岩体中等完整、不稳定性底板
粉砂岩	56.00	石质量中等、岩体中等完整、不稳定性底板

由表 1 可以看出巷道顶底板泥岩、粉砂岩和砂质泥岩的 RQD 值在 50%~75% 之间, 按岩石质量指标分类, 工程分级属于 III 级中等围岩, 且均属于软弱岩石, 顶底板力学强度差, 属于不稳定顶底板, 且具有遇水易膨胀的性能。

## 3 烧变岩巷道稳定性数值试验研究

### 3.1 巷道支护方案设计

对应优化调整后的北一盘区 4<sup>-2</sup>煤回风大巷的布置位置, 根据盘区地质资料和措施巷的掘进支护试验情况和探孔探查结果, 以松动圈理论和加固拱理论为主, 设计 4<sup>-2</sup>煤盘区回风大巷的支护方案。4<sup>-2</sup>煤回风大巷埋深约 100m, 巷道断面形状为半圆拱形, 巷道净宽 5300mm, 净高 4050mm, 原岩应力主要来源于上覆岩层的自重应力, 约 2.5MPa, 巷道围岩破坏松动范围小, 因此该巷道支护采用锚-网-喷支护方式。

根据地质资料和实验室测定, 考虑到围岩受氧化和火烧区的影响, 设计计算的煤层力学参数取为: 煤体  $f=1.5$ , 基岩容重  $\gamma=25\text{kN/m}^3$ , 煤层内聚力  $C=1.20\text{MPa}$ , 煤层内摩擦角  $\Phi=31^\circ$ , 计算不支护时巷道内部最大塑性区半径  $R_0$  为 3.014m, 两帮非弹性区深度为 0.365m, 顶板非弹性区深度为 0.989m。最终设计支护参数为: 顶板及两帮均采用  $\Phi 20\text{mm} \times 2600\text{mm}$  的高强螺纹钢锚杆, 间排距为  $800\text{mm} \times 800\text{mm}$ , 将原来的点锚改为半锚, 均采用 1 卷 K350 型和 1 卷 Z600 型树脂锚固剂, 以增加锚杆的有效锚固长度, 锚固力大于  $100\text{kN/根}$ 。顶板布置 3 根规格为  $\Phi 17.8\text{mm} \times 7300\text{mm}$  锚索, 间排距  $1600\text{mm} \times 2400\text{mm}$ , 采用 1 卷 K350 型锚固剂和 2 卷 Z600 型锚固剂, 增加锚索的有效锚固长度, 并对锚索施加  $120\text{kN}$  的预应力, 起到主动支护的作用, 具体支护参数见表 2。

表 2 北一盘区 4<sup>-2</sup>煤回风大巷支护参数

类别	规格/mm	间排距/mm	数量/根	锚索数量
每排锚索	17.8×7300	1600×2400	1 卷 K350+2 卷 Z600	3
每排锚杆	20×2600	800×800	1 卷 K350+1 卷 Z600	13

### 3.2 原始地层模型构建

为了研究烧变岩巷道变形规律, 为其支护方案的可靠性提供依据, 利用 Midas GTX NX 建立半圆拱形巷道模型, 直墙高 1.4m, 拱半径为 2.65m, 大小为  $43\text{m} \times 4\text{m} \times 25\text{m}$  (长×宽×高) 的模型如图 6 所示。利用 FLAC<sup>3D</sup> 对回风大巷锚杆支护设计进行数值计算, 模型上部边界施加  $2.06 \times 10^6\text{MPa}$  的垂直荷载, 水平方向和底部垂直方向均采用位移约束, 单元体破坏的强度准则采用摩尔-库伦强度准则, 煤岩强度参数见表 3。

表 3 煤岩力学参数表

名称	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	内聚力 /MPa	内摩擦角 /( $^\circ$ )	抗拉强度 /MPa	密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
砂质泥岩	2.6	1.3	0.68	27	2.6	2625
粉砂岩	1.92	1.156	3.0	42.5	3.6	2340
细砂岩	4.1	3.6	6.29	39	3.2	2520
4 <sup>-2</sup> 煤	1.46	0.81	1.43	22.4	1.46	1270

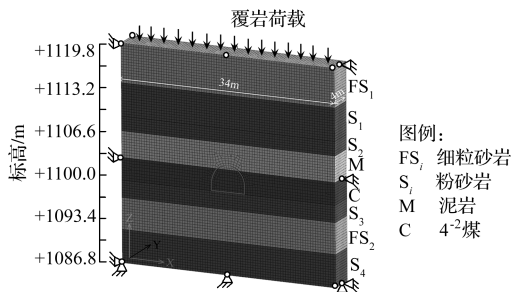


图6 数值模型构建

### 3.3 巷道变形破坏分析

巷道支护后塑性区破坏如图7所示，垂直和水平位移如图8、图9所示。

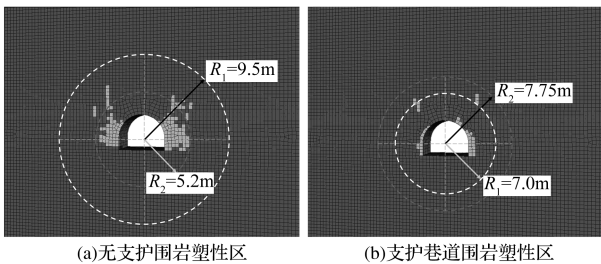


图7 巷道围岩塑性区

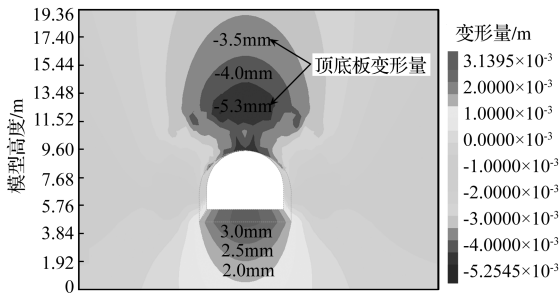


图8 支护后垂直位移云图

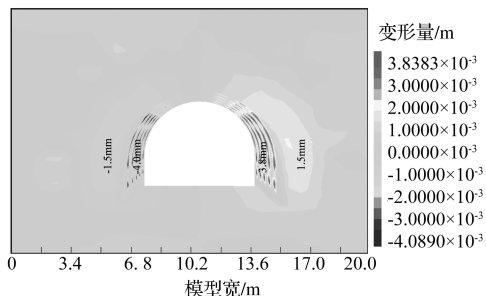


图9 支护后水平位移云图

由图7可以看出，巷道在未支护的情况下，塑性区呈两翼型分布，翼长为9.5m，两帮塑性区半径为5.2m，顶板几乎无塑性区产生；巷道进行支护后，塑性区呈环形分布，内环半径为7.75m，中环半径为7m，外环半径为7.75m。说明锚杆锚固效果较好，锚杆预应力使巷道周围形成挤压

加固拱，锚杆与围岩形成共同支护体，即锚岩支护体，锚岩体具有一定强度阻止巷道变形。

由图8可以看出，巷道最大垂直位移向巷道顶板上部移动，移动距离约3m，此时顶板最大位移量为5.3mm，直接顶下沉量为4mm左右，变形量较小。由图9可以看出巷道支护后，左右两帮变形量均成对称分布，且变形量均较小，均小于6mm，说明巷道两帮支护可靠。

## 4 现场工程应用及效果评价

在理论分析和数值模拟的基础上，验证了该支护方案的可行性，针对表2的支护参数，选取优化后实验回风大巷250m处进行工业性实验，巷道支护设计及离层检测如图10所示。

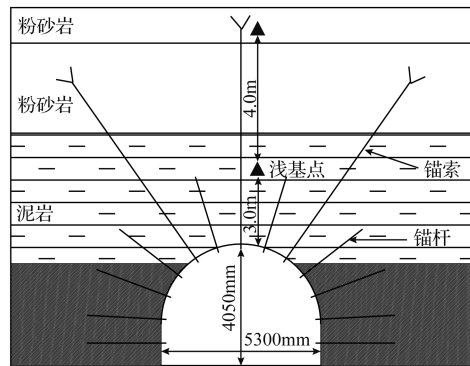


图10 支护结构图

在试验回风大巷内每隔45m布置一组巷道离层检测站，每个测站内布置两个监测孔，分别为深基岩检测孔和浅基岩检测孔，在测站附近1m范围内选取一根锚杆进项锚杆受力检测，选取其中四个测站结果进行分析，检测结果如图11—13所示。

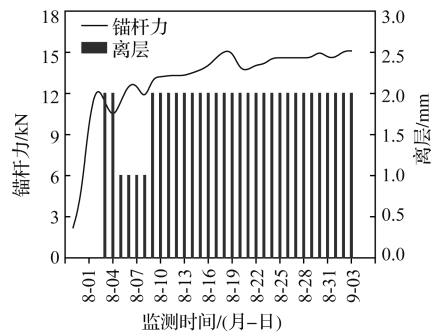


图11 1号测站监测曲线

由图11—13可以看出：①试验回风大巷顶板变形量一般为6mm以内，离层量为0~3mm。说明总体上盘区巷道围岩变形量小，巷道围岩稳定性比较好。分析认为浅埋煤层巷道原岩应力小是其围岩变形量小的根本原因；②巷道顶板变形期一般为5~12d，变形期相对较短，巷道围岩可以较快趋于稳定状态；③锚杆受力监测结果表明，监测期间

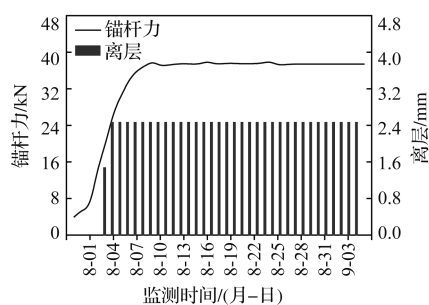


图12 2号测站监测曲线

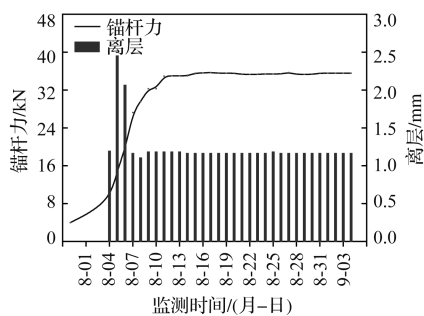


图13 3号测站检测曲线

锚杆预紧力为8~25kN/根,监测初期预紧力变小,加强施工质量管理后有了明显改进;锚杆受力多数在5~10d左右可以达到约40kN/根,说明多数锚杆受力只达到其屈服强度的一半左右,锚杆强度还有较大的富裕。

## 5 结论

1) 本文研究的巷道属于典型的浅埋薄基岩巷道,在研究区域内无大的地质构造,地应力来源主要为上覆岩层产生的自重应力。由于井田边界火烧和风化剥蚀区的影响,锚杆锚索难以锚固,使原有的锚网索巷道支护方案难以满足矿井安全高效的需要。

2) 通过RQD指标测试,可将4<sup>-2</sup>煤试验回风大巷围岩完整性程度划分为Ⅲ级中等围岩,表现为节理裂隙发育,

围岩松散破碎。岩石力学实验结果表明:围岩经高温氧化后,由于热膨胀和氧化变质作用致使围岩强度降低,节理裂隙发育,岩石力学指标均降低。

3) 综合顶板变形监测和锚杆受力监测结果可以看出,锚杆受力增加过程与顶板变形期基本同步,说明顶板变形是锚杆受力增长的主要因素;顶板变形量总体比较小,但锚杆受力增加相对较大,这在一定程度上说明浅埋薄基岩巷道围岩-支护结构的承载结构体变形特点,即巷道围岩变形量较小。

## 参考文献:

- [1] 董守华,李志聃,邵玉宏. 火烧区烧变岩多边形体 $\Delta T$ 人机联作最优化反演[J]. 煤炭学报, 1996(2): 124-127.
- [2] 侯恩科,童仁剑,冯洁,等. 烧变岩富水特征与采动水量损失预计[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 175-182.
- [3] 范立民,蒋泽泉. 烧变岩地下水的形成及保水采煤新思路[J]. 煤炭工程, 2006, 38(4): 40-41.
- [4] 柴敬,张建星,魏成,等. 枣泉煤矿T-2火烧区下开采模拟实验[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(4): 379-383.
- [5] Yang Xiaojie, Pang Jiewen, Liu Dongming, et al. Deformation mechanism of roadways in deep soft rock at Hegang Xing'an Coal Mine [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(2): 307-312.
- [6] Sun Jun, Wang Sijing. Rock Mechanics and Rock Engineering in China: Developments and Current State-of-the-Art [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2000, 37(3): 447-465.
- [7] 郭建伟,刘泉声,杨战标,等. 平顶山矿区深部大规模松软围岩巷道支护技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3904-3910.
- [8] 蔡美峰,何满潮,刘东燕,等. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] 崔亮,雷学峰,赵飞虎,等. 基于加权平均法的围岩稳定性评价研究[J]. 煤炭工程, 2011, 43(6): 77-78, 81.

(责任编辑 杨蛟洋)