

构造应力场中巷道围岩破坏机理研究

赵红超¹, 张东升^{1,2}, 刘洪林^{1,2}, 吕金星¹, DAO VIET DOAN³, 温颖远¹

(1. 新疆大学 地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 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; 3. 越南河内矿业地质大学, 越南 河内 910000)

[摘要] 针对构造应力场中巷道围岩变形破坏基本特征, 采用FLAC^{3D}数值计算软件, 依次分析侧压系数、内摩擦角、黏聚力对矩形巷道周边应力分布、位移和塑性区扩展的影响。结果表明: 侧压系数对巷道围岩变形破坏具有敏感性, 随着侧压系数的增大, 巷道两帮移近量呈现正比增加的趋势且明显大于顶底移近量; 内摩擦角在一定的取值范围内, 与巷道围岩塑性区变化存在着负相关性, 但是当其增大到相对的临界点($30^\circ \leq \varphi \leq 35^\circ$)时, 塑性区的变化将不再明显; 当黏聚力增大到一定程度($C=5.0\text{MPa}$)时, 巷道围岩塑性区的变化将保持在一个相对稳定的水平。在此基础上提出高强让压支护的基本思路, 开发了“多孔循环注浆, 深浅孔结合”工艺, 在工程实践中取得较好效果。

[关键词] 构造应力; 围岩; 侧压系数; 黏聚力; 内摩擦角

[中图分类号] TD353 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225 (2014) 02-0013-04

Mechanism of Surrounding Rock Failure of Roadway in Tectonic Stress Field

ZHAO Hong-chao¹, ZHANG Dong-sheng^{1,2}, LIU Hong-lin^{1,2}, LV Jin-xing¹, DAO VIET DOAN³, WEN Ying-yuan¹

(1. Geology & Mining Engineering School, Xinjiang University, Wulumuqi 830000, China;

2. State Key Laboratory of Coal Resource & Safety Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China;

3. Vietnam Hanoi University of Mining, Hanoi 910000, Vietnam)

Abstract: In order to obtain surrounding rock's deformation and failure characteristic of roadway in tectonic stress field, FLAC^{3D} was applied to analyzing the influence of side pressure coefficient, internal friction angel and cohesion on stress distribution, displacement and plastic zone development of rectangle roadway. Results showed that with side pressure coefficient increasing, the direct ratio increasing tendency of two-side divergence was obviously larger than that of roof-to-floor. Within some value range, internal friction angle was negatively related with plastic zone area, but when it increased to relative limit ($30^\circ \leq \varphi \leq 35^\circ$), plastic zone would keep stable. On the basis of this, basic thinking of high-strength yieldable support was put forward and technique of "circulation grunting with deep and shallow drill-holes" was developed. Engineering practice showed good effect.

Keywords: tectonic stress; surrounding rock; side pressure coefficient; cohesion; internal friction angle

作为典型的地下工程, 煤矿巷道围岩应力环境对巷道变形破坏的基本形式及特征具有显著的影响, 通常认为巷道处于自重应力场和构造应力场共同组成的叠加应力场中。随着埋深的增大, 构造应力对于巷道围岩稳定的影响程度进一步加强。国内外相关学者对于自重应力场中由于梯度变化造成的巷道变形机理已经有了较为深入的研究, 开发了与之相适应的耦合支护、二次柔性支护等技术手段, 并取得了技术经济效益^[1]。由于构造应力分布的复杂性, 考虑到应力集中程度, 相关研究普遍采用圆形巷道代替实际巷道断面。虽然简化了分析过程, 但是与我国普遍存在的矩形巷道不相匹配, 部

分结论不能直接应用于工程实践^[2-3]。本文以矩形断面巷道为研究对象, 深入分析影响构造应力场中巷道变形破坏的主要因素, 包括侧压系数、内摩擦角、黏聚力, 得出了部分参数合理的取值范围。在此基础上, 提出了以“高强让压”支护为主的围岩控制技术, 开发了“多孔循环注浆, 深浅孔结合”的施工工艺, 并成功应用于巷道支护设计。

1 巷道围岩应力环境及变形特征

结合矿山岩石力学基本原理和一般规律, 为研究方便, 在保证不丧失研究对象基本特征前提下, 对构造应力场中巷道应力环境作如下基本假设^[4]:

[收稿日期] 2013-09-24

[DOI] 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2014.02.004

[基金项目] 国家自然科学基金青年科学基金项目(51204166); 新疆维吾尔自治区高校科研计划项目(XJEDU2012S09); 新疆维吾尔自治区科技援疆项目(2013911031); 国家大学生创新训练计划项目(201310755018); 新疆大学大学生创新训练计划项目(XJU-SRT-13093) [作者简介] 赵红超(1988-), 男, 陕西眉县人, 硕士研究生, 从事巷道支护理论与围岩控制技术方面的研究。

[引用格式] 赵红超, 张东升, 刘洪林, 等. 构造应力场中巷道围岩破坏机理研究[J]. 煤矿开采, 2014, 19(2): 13-16, 50.

- (1) 巷道围岩为均质、各向同性的。
- (2) 巷道围岩变形破坏遵循库伦 – 摩尔岩石变形破坏准则。
- (3) 巷道围岩应力场为三向不等压状态，即 $\sigma_x = \sigma_y = \lambda \sigma_z$ 。
- (4) 不考虑相邻巷道或回采工作的二次采动影响。

对于深埋地下工程，当水平应力为最大主应力时，表现出与自重应力场明显不同的变形破坏特征，如图 1 所示。

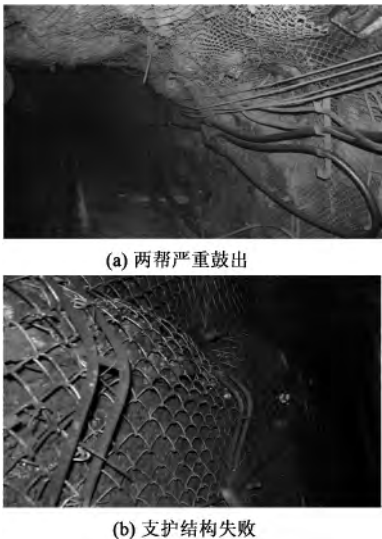


图 1 构造应力场中围岩变形破坏状况

- (1) 巷道肩角处变形严重，具有典型的挤压型变形破坏特征。在水平应力作用下，巷道开挖短期内出现两帮移近大于顶底移近的现象，且变形从肩角处不断向两帮扩展。
- (2) 支护结构破坏失效。锚杆破坏形式以剪切为主，托盘出现明显外翻和扭曲变形。随着围岩变形，两帮大部分锚杆出现松动。钢筋梯子梁严重扭曲，甚至断裂。顶板铁丝网严重变形，部分铁丝网撕裂，失去护表作用。
- (3) 围岩出现不同程度的压酥现象。伴随着支护结构的失效，大部分煤岩体出现不同程度的酥软破坏，不能保持完整的结构，整个围岩出现结构性弱化。

2 构造应力场中巷道周边应力分布与变形分析

构造应力场对巷道变形破坏的主要影响体现在侧压系数、岩石内摩擦角、岩体黏聚力 3 个方面，为简化计算过程，建立统一的计算模型，埋深选取 800m，对各个影响因素依次分析。

其中，巷道断面选择矩形（宽 4m，高 3.5m），

模型参数选取以海石湾矿 6113 工作面下运输巷为依据：直接顶为 6m 的泥灰岩，基本顶为 10m 的粉砂岩，直接底为 4m 的油页岩，基本底为 4.9m 的粉砂岩。模型大小为 60m × 30m × 60m，模型 x 方向施加水平约束， y 方向施加约束， z 方向只约束模型下部。

模拟巷道开挖后无支护情况下的塑性区分布、应力分布、顶底板位移以及其他影响巷道变形破坏的相关因素。表 1 为模拟岩层岩石力学基本参数。

表 1 模拟岩石基本力学参数

岩层	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	黏聚力 c/MPa	抗压强度 MPa
上覆岩层	9.80	8.00	34	5.50	2.10
基本顶	5.40	5.30	30	3.30	1.80
直接顶	4.00	4.00	26	2.60	1.31
油页岩	3.50	3.50	24	0.80	0.37
直接底	4.50	4.50	28	1.45	0.59
基本底	6.40	5.30	30	3.30	1.80
下伏岩层	9.80	8.00	34	5.50	2.10

2.1 巷道围岩塑性区分布及变形特征

为详细分析侧压系数对巷道围岩应力环境的影响，分别选取 $\lambda = \text{span}\{1.0, 2.0, 3.0, 3.5\}$ 进行分析比较。计算模型和围岩力学参数与表 1 保持一致。分别模拟不同侧压系数条件下巷道围岩塑性区范围和巷道围岩变形规律。

图 2 为不同侧压系数部分巷道围岩塑性区分布。由图 2 可以看出：

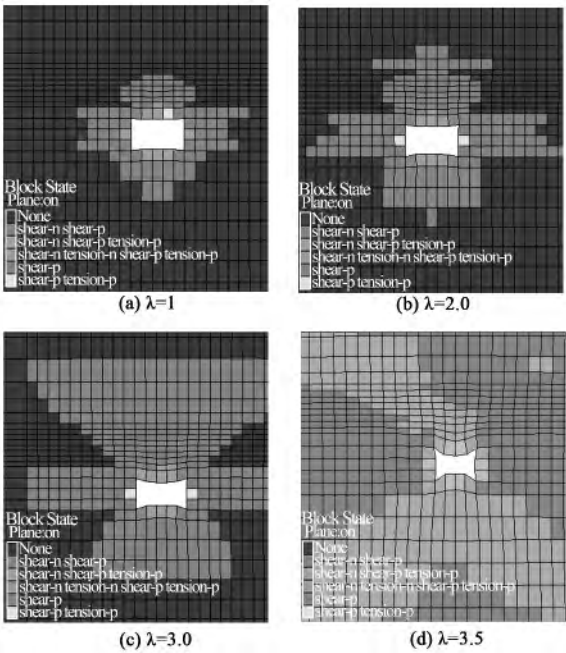


图 2 不同侧压系数部分巷道塑性区分布

- (1) 侧压系数 $\lambda = 1$ 时，即垂直应力等于水平应力条件下，巷道顶底板和两帮的塑性区呈均匀对

称分布。

(2) 侧压系数在 $1 < \lambda \leq 3$ 之间, 随着侧压系数的增大, 巷道塑性区范围逐渐扩大, 且表现出相对的一致性, 顶底板塑性区范围基本呈现出对称分布的特征, 此时巷道周边只有压应力没有拉应力, 在实际破坏过程中主要体现为剪切破坏而不出现拉伸破坏。在初始地应力场中, 围岩处于三向平衡的应力状态, 随着巷道开挖, 原有的应力环境遭到破坏, 为保证岩体结构的稳定, 需要通过施加一定的支护阻力平衡二次应力和岩体强度之间的差值。

(3) 当侧压系数 $\lambda > 3$ 之后, 塑性区范围急速扩展, 向深部岩层转移, 此时两帮塑性区范围相对有所减小。巷道周边不仅存在压应力还存在拉应力, 在实际破坏过程中可能出现拉伸破坏。

(4) 巷道塑性区范围与侧压系数表现出明显的敏感性, 较小的侧压系数变化范围对塑性区扩散起到重要的影响作用。

图 3 为不同侧压系数巷道表面位移关系图。从图 3 可以看出:

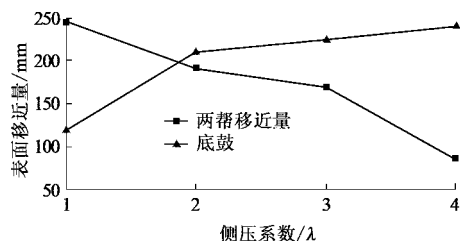


图 3 不同侧压系数下巷道表面位移

(1) 随着侧压系数的增大, 巷道两帮移近量呈现增加的趋势, 在侧压系数较小 ($1 < \lambda \leq 3$) 时, 两帮移近量变形速率相对较小, 侧压系数较大时 ($\lambda > 3$) 时, 两帮移近速率急剧增加, 巷道两帮向巷道内侧鼓出, 表现在现场则为片帮或者支护结构的破坏。

(2) 随着侧压系数的增加, 顶板下沉量有所减少, 分析原因主要是由于侧压系数增加, 侧向压力促使顶板应力向深部转移, 同比条件下减少了巷道顶板的下沉量。

(3) 随着侧压系数的增大, 巷道底鼓量呈现增大趋势, 分析原因可以认为向深部转移的应力促使巷道表面应力集中, 从而在两帮和底板自由面处出现应力集中现象, 从而导致底板变形速率增大。

2.2 不同内摩擦角下巷道周边应力与塑性区分布

内摩擦角对巷道变形破坏的影响主要是通过围岩自身力学条件的改变而产生变化, 为了进一步分析内摩擦角在巷道围岩稳定过程中所起的作用, 分

别选取 $\varphi = \text{span} \{24^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ\}$, 计算模型和围岩力学参数与表 1 保持一致, 研究不同内摩擦角条件下巷道变形破坏特征和变形机理。

图 4 为不同内摩擦角条件下部分塑性区分布。由图 4 可以看出:

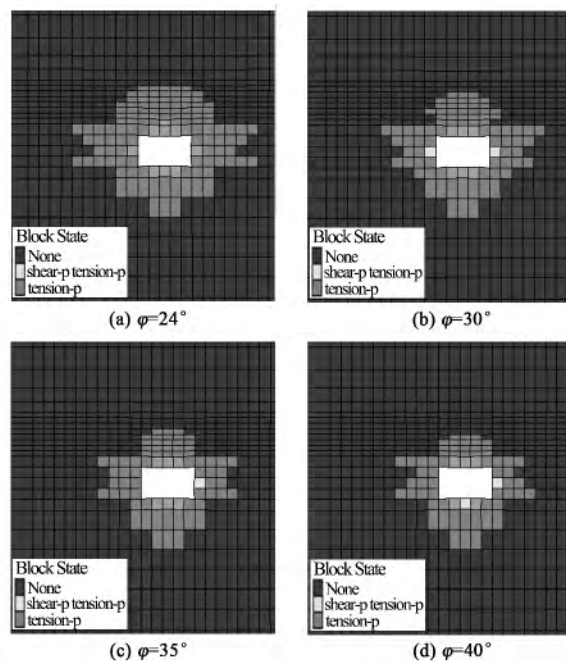


图 4 不同内摩擦角条件下塑性区分布

(1) 随着内摩擦角 φ 的增大, 巷道围岩塑性区的范围呈现不断缩小的趋势, 基本呈现出以巷道中心线为对称轴的分布形态。

(2) 随着内摩擦角 φ 的增大, 巷道两帮围岩塑性区变化比较明显, 而顶底板围岩塑性区虽然随着内摩擦角的增大呈减小的趋势, 但是减小的值不是十分显著。

(3) 随着内摩擦角 φ 的变化, 巷道顶底板和两帮的变形破坏形式发生变化。当 $24^\circ < \varphi \leq 30^\circ$ 时, 巷道顶底板以拉伸破坏为主, 两帮以剪切破坏为主。结果表明在较小的内摩擦角条件下, 两帮塑性区扩展以剪切破坏为主, 在实际支护设计过程中应该重点分析考虑, 采取一定的措施防止或抑制这种破坏形式的出现。当 $30^\circ < \varphi \leq 40^\circ$ 时, 巷道顶板和两帮的变形机理没有发生较大的变化, 但是底板由原来的拉伸破坏变为拉伸破坏和剪切破坏的共同作用。说明随着内摩擦角的增大, 围岩的力学性能得到了较大提高。

(4) 随着内摩擦角 φ 的增大, 巷道围岩塑性区由原来的“倒三角形”分布发展为“正三角形”, 即巷道围岩塑性区的扩展由原来的两帮及底板较大范围变化为顶板塑性区范围较大的形式。

(5) 随着内摩擦角 φ 的增大,在一定取值范围内,巷道围岩塑性区变化与内摩擦角的取值存在着负相关性,但当角度增大到一定值的时候,塑性区的变化将不再明显,包括顶底板和两帮。

2.3 不同黏聚力条件下塑性区分布特征

为研究不同黏聚力条件下巷道变形破坏特征,分别选取黏聚力 $C = \text{span} \{1.0, 2.0, 3.0, 5.0\}$, 计算模型和围岩力学参数与表 1 保持一致,对塑性区分布特征展开研究。图 5 为不同黏聚力条件下巷道围岩塑性区分布。

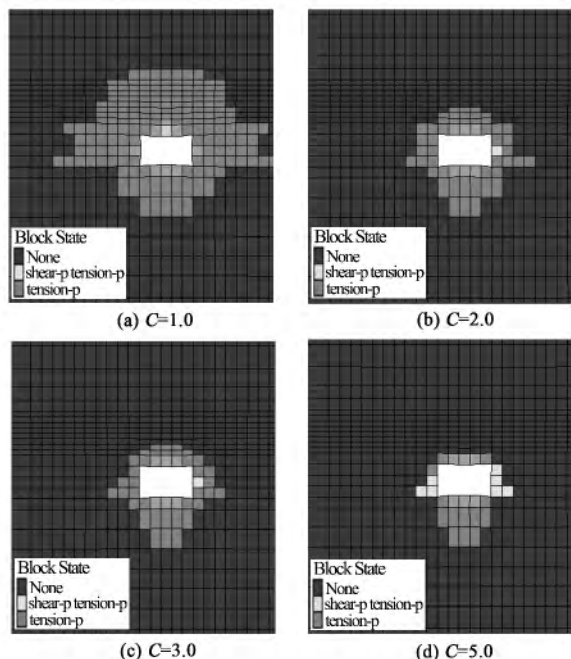


图 5 不同黏聚力条件下塑性区分布

由图 5 可知,不同黏聚力条件下巷道围岩塑性区分布具有如下基本特征:

(1) 巷道围岩塑性区的分布呈现出以巷道中心线为中心分布的轴对称形式。

(2) 巷道围岩塑性区的分布范围随着黏聚力的增大而呈现逐渐减小的趋势,且减小的幅度相对较大。巷道围岩塑性区递减趋势明显强于底板,最大时为 50% 左右。随着黏聚力的增大,巷道底板塑性区的深度范围没有明显的变化,仅表现出宽度方向上的缩小,且缩小幅度在 20% 左右。

(3) 巷道围岩塑性区分布形状表现出一定的差异性。由“倒锥形”逐步发展为“近平底锥形”。随着黏聚力 C 的增大,巷道围岩塑性区范围的变化由最初的敏感的正相关逐渐过渡为不明显。在 $2.0 \text{ MPa} < C \leq 5.0 \text{ MPa}$ 范围内,随着黏聚力的增大,塑性区范围基本在 50% 的变化范围之内;当 $C > 5.0 \text{ MPa}$ 时,随着黏聚力的增大,塑性区范围基

本处于缓慢减小的状态。

3 工程实践

3.1 工程地应力测试结果

海石湾矿煤 1 层为油页岩,平均埋深 800m,倾角在 $8^\circ \sim 14^\circ$,平均倾角 10° 。根据海石湾矿水压致裂测试结果^[5-6],侧压系数在 1.2 ~ 1.5 之间,水平地应力明显大于垂直应力,构造应力场的影响强于自重应力场。根据岩石力学实验室性能测试,内摩擦角为 24° ,黏聚力 1.45MPa。

3.2 构造应力场中巷道变形破坏分析

由于水平应力明显大于垂直应力,在巷道开挖初期出现显著的变形破坏。围岩变形量一直处于持续增加的状态。部分巷道在掘进半年后两帮移近量和顶板下沉量依然保持在 140mm, 260mm,为保证正常的安全生产需要,巷道在整个使用周期内多次翻修。由于侧压系数较大,加之围岩力学性质较差,采用直径 22mm 长 2400mm 的 HRB335 预应力让压锚杆 + 碟形锰板托盘 + 高强螺母,配合直径 18.9mm 长 8300mm 的小孔径预应力锚索补强支护代替原有螺纹钢锚杆,开发“多孔循环注浆,深浅孔结合”的注浆工艺(如图 6 所示排距按 2400mm, 1600mm 交替布置),通过分阶段深浅孔结合的方式提高围岩的内摩擦角和黏聚力,有效地控制了巷道两帮和顶底板的变形,巷道两帮变形控制在 35mm,顶底板移近控制在 50mm。

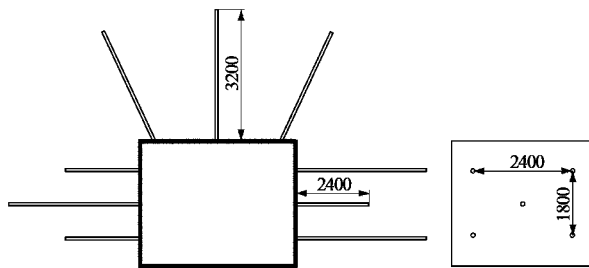


图 6 “多孔循环注浆,深浅孔结合”注浆钻孔布置

4 结论

(1) 巷道塑性区范围与侧压系数表现出明显的敏感性,较小的侧压系数变化范围对塑性区扩散起到重要的影响作用。随着侧压系数的增大,巷道两帮移近量呈现正比增加的趋势。

(2) 巷道围岩内摩擦角存在一个相对的临界点 ($30^\circ \leq \varphi \leq 35^\circ$),在小于这个临界角度时,巷道围岩塑性区随之减小,当大于这个角度时,围岩塑性区的变化基本不明显。

(下转 50 页)

ZY3200/07/13 型掩护式液压支架移架速度快, 最短时间内可有效地支护顶板, 大大减少了空顶时间, 避免了工作面端面顶板破碎、冒顶等事故的发生。支架工作过程稳定, 邻架操作, 保证了顶板支护效果和作业人员有限作业空间, 保障了操作人员的安全。

2.2 采煤机对工作面适应性分析

MG100/238 - WD 型采煤机在割煤时, 由于 17 煤硬度较大且存在夹矸, 割煤时滚筒截割阻力指向煤壁侧过大, 对采煤机的工作稳定性有一定影响, 采煤机行星头、截齿、齿座及滚筒自身的损坏非常明显, 采煤机装煤效果较差。为解决以上问题, 减小滚筒截割阻力, 尽量使各项截割阻力消耗在滚筒自身, 达到内部平衡, 采取以下措施:

(1) 在滚筒前端面安装 4 个 7655 风钻钻头, 且大都向煤壁倾斜布置, 以使产生较大的截割阻力且指向采空区侧。

(2) 将截齿座按不同角度布置试验后, 根据试验效果调整截齿座角度及截齿布置方式, 定做调整后的新滚筒。

(3) 对工作面硬度较大的结核或夹矸区域, 采取放松动炮的方式减小截割阻力。

(4) 采煤机进刀方式由端头斜切进刀改为中部斜切进刀, 回空刀拾煤, 增强采煤机装煤效果。

新型 MG100/238 - WD 电牵引采煤机结构性能基本能够适应 17 煤煤层特性的截割性能, 通过改进措施, 基本解决了由于 17 煤存在夹矸, 造成采煤机在割煤过程中截齿磨损严重的问题。

2.3 刮板输送机对工作面适应性分析

SGZ630/220 型刮板输送机的结构尺寸与采煤机和液压支架的配套合理, 使采煤机能以输送机为轨道往返运行割煤, 满足了液压支架推移支护的需

要。输送机的运输能力与采煤机割煤能力相适应, 并具备足够的强度、刚度和耐磨性, 满足了工作面生产能力的要求。输送机的结构尺寸充分考虑了薄煤层开采的需要, 保证了足够的作业人员空间。输送机机头、机尾电机及减速箱沿工作面上、下巷走向布置, 避免占据工作面上、下端头空间。

3 结束语

通过对里彦煤矿近距离薄煤层群中上临 16_上煤采空区的 17 煤顶板受 16_上煤采动影响程度的分析, 得出 17 煤顶板变为类拱结构, 在此基础上进行了综采设备选型配套, 并在 17304 工作面进行了应用及改进, 有效地解决了 17 煤顶板不稳定、完整性较差、控制困难的问题, 提高顶板控制的安全系数, 为工作面提供了安全可靠的操作空间, 减少了薄煤层操作人员作业空间有限情况下的大强度劳动, 降低操作人员劳动量, 提高了工效等, 为其他矿井同等条件的薄煤层工作面开采提供了技术支持, 将推动我国上临采空区的薄煤层综合机械化开采水平的进一步发展。

【参考文献】

- [1] 张百胜. 极近距离煤层开采围岩控制理论及技术研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
- [2] 张金才, 张玉卓, 刘天泉. 岩体渗流与煤层底板突水 [M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [3] 姜福兴, 宋振骐, 宋 扬. 老顶的基本结构形式 [J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12 (4): 366 - 379.
- [4] 宋振骐. 实用矿山压力控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988.
- [5] 胡美红. 薄煤层综采“三机”设备配套技术研究 [J]. 煤矿机械, 2009, 30 (10): 172 - 173.
- [6] 黄 嵘. 分岔合并煤层采空区下工作面破碎顶板控制技术 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2012. [责任编辑: 邹正立]
- [2] 郭建卿, 杨子泉, 唐 辉. 侧压系数对巷道变形及周边应力分布规律影响 [J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28 (4): 566 - 571.
- [3] 黄龙见, 杨天鸿, 郑 超, 等. 不同侧压系数下各向异性巷道围岩破坏模式研究 [J]. 东北大学学报, 2011, 33 (5): 739 - 742.
- [4] 鲁 岩. 构造应力场影响下的巷道围岩稳定性原理及其控制研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
- [5] 赵红超, 曹胜根, 张科学, 等. 深部油页岩巷道变形破坏机理及稳定性控制研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29 (2): 178 - 183.
- [6] 赵家巍, 柏建彪, 赵红超, 等. 深井软岩巷道均衡让压控制技术 [J]. 煤炭科学技术, 2013, 41 (4): 40 - 44.

【参考文献】

- [1] 赵红超. 海石湾矿深部油页岩巷道变形机理与围岩控制技术研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.

[责任编辑: 邹正立]