

# 岩巷掘进巷道长压短抽通风系统参数优化

蒋仲安 闫 鹏 陈举师 张中意

(北京科技大学 土木与环境工程学院 北京 100083)

**摘 要:** 为了减少掘进巷道的粉尘危害,以岩巷掘进工作面为研究对象,采用 Fluent 软件对岩巷掘进巷道长压短抽通风系统参数进行了优化。结果表明,矿山井下巷道利用长压短抽通风系统除尘效果较压入式通风系统提高 30%~50%,在距离工作面 20 m 处粉尘质量浓度降低到  $20 \text{ mg/m}^3$  以下;采用数值模拟结合现场试验得出吸尘罩罩口最优宽、高为 0.6 m、0.8 m。经过试验得出,掘进巷道通风系统负压风筒高度优化为 2 m,可以进一步提高系统的除尘效率。

**关键词:** 井下巷道;长压短抽通风系统;吸尘罩;负压风筒

中图分类号:TD72

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2015)01-0054-05

## Optimization on parameters of long distance forced and short distance exhausted ventilation system in mine rock heading roadway

JIANG Zhong-an, YAN Peng, CHEN Ju-shi, ZHANG Zhong-yi

(School of Civil and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to reduce the dust harm occurred in a mine roadway heading, based on a mine rock roadway heading face as a study object, Fluent software was applied to optimize parameters of a long distance forced and short distance exhausted ventilation system in a mine rock heading roadway. The results showed that a dust control effect of the long distance forced and short distance exhausted ventilation system applied in the underground mine roadway could be improved by 30%~50%, which was higher than the forced type ventilation system and the dust quantity and concentration at a place with a distance of 20 m to the mine roadway heading face was reduced below  $20 \text{ mg/m}^3$ . An optimized width and height were 0.6 m and 0.8 m was obtained for a hood lock of the dust collection hood with the application of the numerical simulation and in combination with the site test. The site test showed that a height of a negative pressure air duct in the ventilation system of the mine heading roadway was optimized as 2 m and could further improve the dust collection efficiency of the system.

**Key words:** underground mine roadway; long distance forced and short distance exhausted ventilation system; dust collection hood; negative pressure air duct

## 0 引 言

在煤矿、金属矿和交通岩巷隧道掘进开拓过程中,粉尘浓度大、工作面空气流通不畅等问题一直是危害工人健康和减缓施工进度的重要因素。随着掘进距离的增加、断面的不断扩大,这些问题逐渐凸显出来。国家计生委最新数据显示,目前尘肺病仍是我国最严重的职业病,尘肺病报告病例数占 2012 年职业病报告总例数的 88.28%。因此,必须采取有

效措施降低巷道掘进过程中粉尘的浓度<sup>[1-5]</sup>。长压短抽通风系统中,气流从正压风筒射出时,与周围空气之间形成了速度不连续的间断面。间断面一般受到多个方向的风流流场的干扰,失去稳定而产生涡旋。涡旋卷吸周围空气进入涡旋,同时不断移动和干扰附近的流场,把携带有大量粉尘的风流卷吸其中,产生粉尘聚集而不能有效扩散。涡流形成对掘进工作面粉尘的扩散与排除非常不利,这时就需要在掘进巷道工作面加装负压风筒来纠正和消除涡

收稿日期:2014-08-30;责任编辑:王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2015.01.013

基金资助:国家自然科学基金资助项目(51274024)

作者简介:蒋仲安(1963—),男,浙江诸暨人,教授,博士。通信作者:闫 鹏, Tel: 13581967908, E-mail: 770242464@qq.com

引用格式:蒋仲安,闫 鹏,陈举师,等.岩巷掘进巷道长压短抽通风系统参数优化[J].煤炭科学技术,2015,43(1):54-58.

JIANG Zhong-an, YAN Peng, CHEN Ju-shi, et al. Optimization on parameters of long distance forced and short distance exhausted ventilation system in mine rock heading roadway [J]. Coal Science and Technology 2015, 43(1): 54-58.

流<sup>[6-8]</sup>。因此,有必要针对通风系统中关键参数进行优化。笔者对抽出式风筒的高度和吸尘罩罩口形状等关键参数的优化进行了研究。

1 离散相模型

目前数值模拟使用的模型比较多,在煤矿井下通风系统中的气固两相流符合“离散相模型”。离散相模型(DPM)是欧拉-拉格朗日模型的一种,即用欧拉观点和拉格朗日观点分别描述气相流场和颗粒的运动。离散相模型要求第二相均匀、连续分布在第一相中,即球形颗粒分布在气体中。

离散相的求解过程:①求解连续相流场:求解连续相时模型采用  $k-\varepsilon$  双方程模型,同时采用二阶迎风模式求解,得出连续相流场信息。②创建离散相面源:主要设定面源的尺寸、位置以及初速度和质量流率。③求解耦合流动:在已经求解出来的连续相流场上加入面粉尘源,进行耦合流动求解,得出粉尘与连续气体相互作用下的颗粒运动信息。④用软件自带的图形界面来跟踪离散相,从而得出离散相的流场分布以及浓度分布<sup>[9-16]</sup>。

2 数值模型及参数

2.1 物理模型

试验所采用的巷道长×宽×高为 30 m×5 m×5 m,巷道形状为半圆下接矩形的类三心拱。压入式通风的风筒布置在巷道的左侧壁,风筒出口距离工作面 10 m,高度固定为 2 m,直径 0.8 m;抽出式风筒距工作面 3 m,直径 0.6 m,高度分别为 2 和 3 m。数值模拟的模型尺寸与实际尺寸比例为 1:1。整个综掘巷道设备布置如图 1 所示。

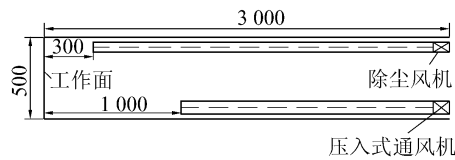


图 1 综掘巷道设备布置

2.2 掘进巷道几何模型

笔者运用计算流体力学 Fluent 软件,对掘进巷道粉尘运动进行数值模拟,使用 GAMBIT 2.2 建立岩巷掘进巷道压入式通风三维几何模型。长压短抽式通风使用的几何模型与之相似,只是在掘进巷道的另外一侧增加了 1 个抽出式风筒,如图 2 所示。

2.3 参数求解设置

根据某矿掘进工作面的具体情况及相关实测数

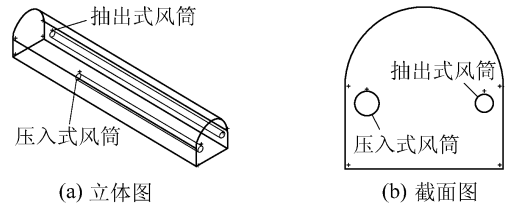


图 2 掘进巷道的几何模型

据结合数学模型和 Fluent 的模拟方法,确定数值模拟采用非耦合求解法,湍流方程为  $k-\varepsilon$  双方程模型,在加入粉尘源的情况下打开离散相模型;求解采用 SIMPLEC 算法,离散格式采用二阶迎风格式,收敛标准为  $10^{-3}$ 。边界条件设定见表 1,计算模型及尘源参数如下:

求解器	耦合求解法
离散相模型阻力特征	球形颗粒
尘源类型	面尘源
材质	白云石
粒径分布	Rosin-rammler
最小颗粒直径/m	$1\times 10^{-6}$
最大颗粒直径/m	$100\times 10^{-6}$
分布指数	2.83
初始速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0
全尘质量流率/( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0.007

表 1 边界条件设定

项目	入口速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	水力直 径/m	湍流强 度/%	巷道壁边 界条件
正压风筒	13.27	0.8	2.97	捕捉(底板)
负压风筒	-19.66	0.6	2.93	反弹(侧壁)

3 流场特性与参数优化

3.1 流场特性模拟与现场实测

1) 流场特性模拟。采用前文所述巷道模型,分别进行巷道内未加装负压风筒和加装负压风筒数值模拟,风流流场如图 3 所示。

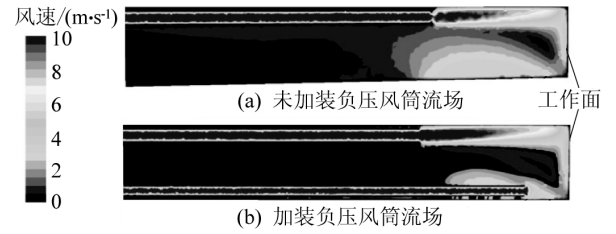


图 3 掘进巷道风流流场云图

图 3a 数值模拟结果表明,风流从正压风筒口射出后,沿着巷道侧以自由射流的方式向前流动,在该区域内始终保持风流流出风筒时的流速,射流直径

和流量都依次增大;由于存在巷道边壁,射流在巷道壁面一侧不能卷吸空气,而在另一侧则不断卷吸空气和向外扩散,形成贴附射流区;当风流到达综掘工作面端头后,风流前进方向受阻,被迫形成冲击射流附壁区;由于独头巷道空间的限制和风流的连续性,冲击贴附风流方向发生改变,与自由射流相反方向往外流动,从而形成回流区;由于射流和回流的方向相反,受风流卷吸的作用,在进风与回风交汇的区域形成涡流。涡流区极易形成粉尘聚集,在此区域粉尘浓度比较高。图 3b 的数值模拟结果表明,由于负压风筒的抽吸作用,使涡流区风流流场得到有效改善,回流区明显变窄,与射流区的相互影响基本消除,进而消除涡流区域。另外,负压风筒增大了回风侧粉尘的控制风速,增加了粉尘排除的动力,使除尘效率明显提高。

2) 现场实测。根据上述模拟结果,在实际巷道与风筒高度同一水平面布置了若干风速测点,2 种情况下的风速等速线如图 4 所示。

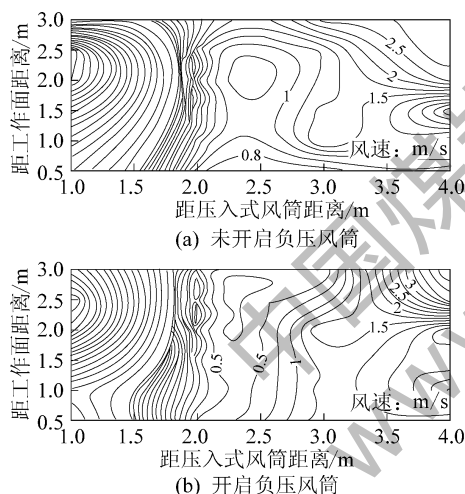


图 4 不同情况下风速等速线

由图 4a 可以看出,在巷道中心位置出现了长度 1 m、宽度 0.5 m 的无风区域,并且无风区域靠近工作面一侧的风速小于其他三侧的风速,在该处会形成粉尘聚集区,不利于粉尘的扩散排出。对图 4b 与图 4a 对比可以看出,在此情况下形成的无风区域明显比没有开启负压风筒的无风区域要小得多,并且在无风区域的四周风速都一样,且负压风筒侧流场比较规则,有利于粉尘随风流排出,不会形成涡流。

在长压短抽通风系统中,压入式风筒一侧的风流为射流区,抽出式风筒一侧为回流区。图 5 为粉尘浓度沿程变化曲线,可以看出未开启负压风筒时射流区和回流区的粉尘浓度都比较大,最高达到了

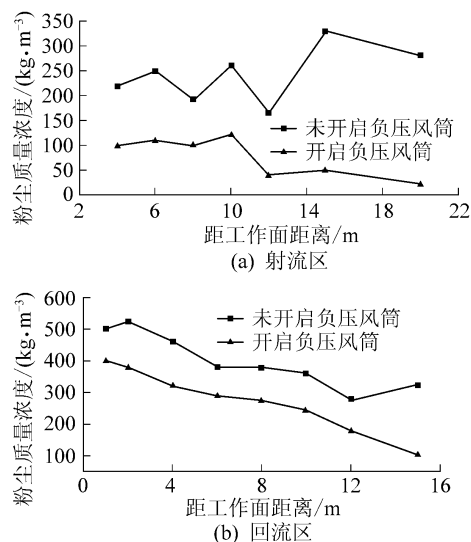


图 5 粉尘浓度沿程变化曲线

500  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;开启负压风筒之后,沿程粉尘浓度都明显降低,除尘率达到 30%~50%。

对比图 4、图 5 和图 3 可以看出:负压风筒有效地消除了流场中涡流的出现,有利于粉尘的排出,现场数据与数值模拟结果一致。

### 3.2 风筒关键参数优化

1) 抽出式风筒高度优化。关键参数优化采用开启 DPM 离散相的模型,在掘进工作面的右上、左上、右下和左下平分的四部分分别添加质量流率为 0.007 kg/s 的 4 个面粉尘源(图 6)。巷道地面边界条件设为捕捉,其余壁面边界条件设置为反弹。

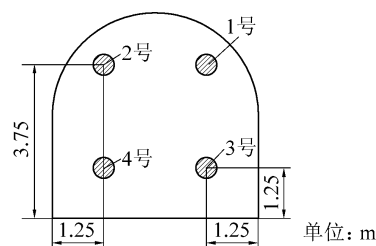


图 6 粉尘源位置及其编号

负压风筒高度分别设置为 1.5、2.0、2.5、3.0 m 来进行比较,不同尘源位置时巷道中心线上粉尘浓度沿程分布曲线如图 7 所示。可以看出当负压风筒高度设置为 2 m 时,沿程粉尘浓度都是最小的,跟尘源的位置无关。对比负压风筒高度为 2 和 3 m 时中心线上的粉尘浓度沿程分布曲线,如图 8 所示。可以看出 2 条曲线的趋势相同,高度 2 m 的曲线整体在 3 m 曲线的下方,表明负压风筒设置在高度 2 m 时抽尘效果明显大于 3 m 时。尤其在巷道后半程,抽尘效率增加将近 50%。

综上所述,在正压风筒高度在 2 m 时,负压风筒

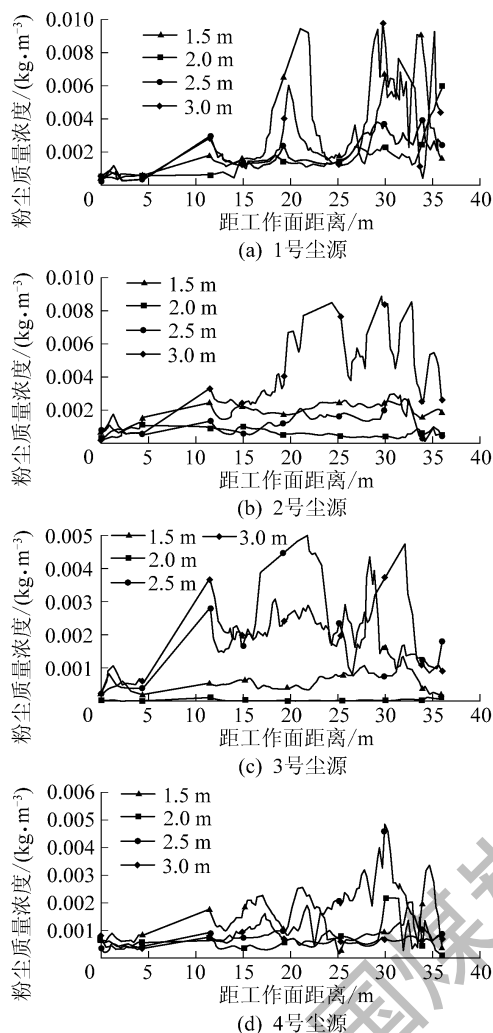


图7 不同尘源位置粉尘浓度沿程变化曲线

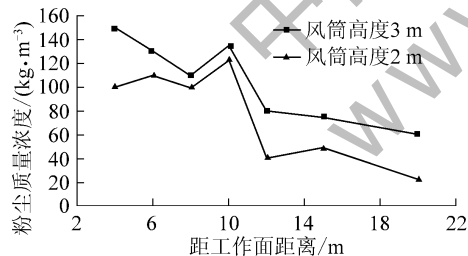


图8 不同高度负压风筒粉尘浓度沿程分布曲线

的高度也在2 m时除尘效果最好,与粉尘源的位置无关。

2) 抽出式风筒吸尘罩尺寸优化。吸尘罩选用上圆下方的结构。笔者主要优化吸尘罩罩口的尺寸以及吸尘罩的长度。在实际生产场所,如果加入长压短抽除尘系统,粉尘通常会贴着巷道侧壁流动,笔者依据这一特点和抽尘风筒的直径,确定以下吸尘罩宽×高参数来进行模拟对比:0.6 m×0.6 m、0.6 m×0.8 m、0.6 m×1.0 m、0.6 m×1.2 m。

抽出式风筒高度为2 m的情况下选择不同形状

的吸尘罩,取2 m高度巷道中心线上的粉尘浓度沿尘分布做比较如图9所示。

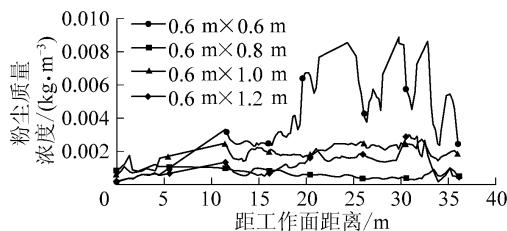


图9 不同吸尘罩下粉尘浓度沿程变化曲线

由图9可以看出,在这4种吸尘罩中,宽和高分别为0.6和0.8 m的吸尘罩的抽尘效果最好。这是因为吸尘罩的吸尘效率主要受2个方面因素影响:前方的控尘速度与吸尘罩罩口面积 $S$ 。吸尘罩控尘速度越大,能够控制到粉尘的距离越远;吸尘罩罩口面积越大,能够接触到进而吸收到的粉尘越多。由于除尘风机的通风量 $Q$ 一定,且 $Q=Sv$ ( $v$ 为控制风速),所以罩口面积与控制风速有一个最优值。该研究中罩口最优尺寸宽×高为0.6 m×0.8 m。

现场加装不同尺寸吸尘罩,待巷道内粉尘稳定后测量的粉尘浓度曲线如图10所示。

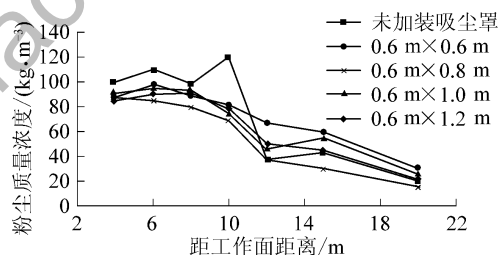


图10 不同吸尘罩下粉尘稳定后的浓度分布曲线

由图10可以看出,加装吸尘罩之后前半程吸尘效果都比未加装吸尘罩的时候效果要好;巷道后半程,风流稳定之后,大部分吸尘罩的吸尘效果要比不加装吸尘罩的效果差。在5组数据曲线中,加装0.6 m×0.8 m尺寸吸尘罩的曲线与其他4组曲线有少量交叉,但是总体都在其余曲线下方,说明实际测量的数据与数值模拟结果基本吻合。

综上所述,吸尘罩的罩口的最优尺寸为宽×高为0.6 m×0.8 m。

## 4 结 论

1) 岩巷掘进巷道采用长压短抽式通风比压入式通风除尘效果要好,掘进巷道工作面风流流场比较平稳,不易产生涡流,有利于粉尘的排出。

2) 长压短抽式通风系统中负压风筒的高度对抽尘效率有较大影响,经过数值模拟与现场数据对

比得出高度 5 m 左右的岩巷掘进巷道负压风筒布置高度为 2 m 时抽尘效果最好,与粉尘源的位置无关。

3) 长压短抽系统中,在负压风筒前端加装合适尺寸的吸尘罩能够提高系统的除尘效率,其效果同时受罩口控尘风速和罩口面积的影响,实际生产中需要找到两者的最优值。对于试验巷道实际情况,吸尘罩的罩口的最优尺寸为宽×高为 0.6 m×0.8 m。

4) 经过与现场测量数据相比较,数值模拟在掘进巷道长压短抽系统中应用有其一定的可靠性,与传统实验室相似模拟相比具有成本低、速度快和操作简单等优点,因此可以在特定条件下作为相关生产活动和试验的参考。

#### 参考文献:

- [1] 孙丙坤. 某矿区煤矿尘肺流行病学调查[J]. 职业与健康, 2007(6): 410-411.
- [2] 王海桥, 施式亮, 刘荣华, 等. 独头巷道附壁射流通风流场数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(4): 425-428.
- [3] 王晓珍, 蒋仲安, 刘毅. 抽出式通风煤巷掘进过程中粉尘浓度分布规律的数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2006, 2(5): 24-28.
- [4] 王辉, 蒋仲安, 黄丽婷, 等. 掘进巷道长压短抽式通风合理压抽比实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版,

2011, 30(2): 168-171.

- [5] 咎军, 刘祖德, 赵云胜. 独头巷道受限贴附射流特征参数对流场的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(3): 24-27.
- [6] 王晓珍, 蒋仲安, 王善文, 等. 煤巷掘进过程中粉尘浓度分布规律的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2007, 32(4): 386-390.
- [7] 刘毅, 蒋仲安, 蔡卫, 等. 综采工作面粉尘运动规律的数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(4): 351-353.
- [8] 张设计, 刘勇, 周润金, 等. 掘进工作面粉尘分布规律及控降尘工艺技术试验[J]. 矿业安全与环保, 2010, 37(2): 30-33.
- [9] 秦跃平, 张苗苗, 崔丽洁, 等. 综掘工作面粉尘运移的数值模拟及压风分流降尘方式研究[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(7): 790-794.
- [10] 胡方坤, 时国庆, 张义坤, 等. 基于非稳态 DPM 模拟研究长压短抽式掘进面粉尘运移规律[J]. 中国煤炭, 2013(12): 104-108.
- [11] 荔军. 岩巷掘进工作面除尘技术与装备研究[J]. 煤矿机械, 2013, 34(2): 144-147.
- [12] 赵肖冰, 陶占宇, 吴福喜, 等. 压短抽式通风掘进面粉尘浓度分布规律数值模拟研究[J]. 中州煤炭, 2014(1): 34-37.
- [13] 施国华, 马威, 张建斌, 等. 综掘工作面粉尘运移规律及其控降尘技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2013, 40(3): 25-28.
- [14] 张国枢. 通风安全学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [15] 蒋仲安, 杜翠凤, 牛伟. 工业通风与除尘[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [16] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT——流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.

(上接第 40 页)

共性,当开切眼附近煤体处于高自重应力、高构造应力和高采动应力共同作用时,极易发生冲击地压。

2) 在多应力综合作用下,高压应力差导致剪切失稳型冲击和高拉剪应力导致结构失稳型冲击是开切眼附近巷道发生冲击地压的主要类型。

3) 针对高压应力差导致剪切失稳型冲击,开切眼附近尽可能不留底煤,将巷道底板放到坚硬的岩层上,作半煤岩巷或全岩巷道。

4) 针对高拉剪应力导致结构失稳型冲击,可在开切眼两帮实施大直径深孔卸压,将巷道侧向支承压力峰值向深部转移,将底板的屈曲性破坏转化成缓慢弯曲变形,以避免冲击地压事故发生。

#### 参考文献:

- [1] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2010.
- [2] 齐庆新, 李晓璐, 赵善坤. 煤矿冲击地压应力控制理论与实践[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6): 1-5.
- [3] 蓝航, 齐庆新, 潘俊锋, 等. 我国煤矿冲击地压特点及防治技术分析[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 11-15.

- [4] 姜红兵, 王黑丑, 张松军. 义马跃进煤矿冲击地压发生原因分析[J]. 煤炭技术, 2013, 27(3): 161-162.
- [5] 李希勇. 岩层断裂防治冲击地压的应用实践[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(6): 55-57.
- [6] 史红, 姜福兴. 基于微地震监测的覆岩多层空间结构倾向支承压力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S1): 3274-3280.
- [7] 潘一山, 李忠华, 章梦涛. 我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1844-1851.
- [8] Luo X, Hatherly P. Application of microseismic monitoring to characterise geomechanic conditions in longwall mining[J]. Exploration Geophysics, 1998(29): 489-493.
- [9] 姜耀东. 煤岩冲击动力失稳的机理和实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 10-15.
- [10] 姜福兴, 王平, 冯增强, 等. 复合型厚煤层“震-冲”型动力灾害机理、预测与控制[J]. 煤炭学报, 2009, 34(12): 1605-1609.
- [11] 王淑坤. 冲击地压机理[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(S0): 500-503.
- [12] 李志华, 襄林名, 曹安业, 等. 采动影响下断层滑移诱发煤岩冲击机理[J]. 煤炭学报, 2011, 36(S1): 68-73.
- [13] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 17-28.
- [14] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学 I[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.