

文章编号: 1000-7598-(2007) 07-1343-05

岩层组合劣化型冒顶机制研究

贾明魁

(焦作煤业集团公司, 河南 焦作 454002)

摘 要: 通过对 162 起锚杆支护煤巷冒顶事故实例分析研究, 顶板岩层组合劣化是引起冒顶事故的主要原因, 占事故总数的 66%。应用东北大学岩石破裂过程分析系统 (RFPA^{2D}), 对不同组合的层状顶板的劣化过程进行了数值模拟研究。通过数值分析可知: 岩层组合劣化与顶板岩层组合中软弱夹层位置变化、坚硬岩层厚度及高跨比变化有关; 与直接顶板岩层组合中软岩层厚度变化有关。岩层组合劣化破坏的主要是拉破坏、剪切破坏及其共同作用的结果, 在剪应力的作用下层状顶板发生整体跨落; 在自重应力作用下顶板岩层发生弯曲破坏; 剪应力和拉应力共同作用下层状顶板破坏形式为拱形冒落。

关 键 词: 层状顶板; 组合劣化; 冒顶机制; 数值模拟

中图分类号: TD 322⁺.1

文献标识码: A

Research on roof falling mechanism of deteriorative strata combination supported by bolts

JIA Ming-kui

(Jiaozuo Coal (Group) Corporation Limited, Jiaozuo 454002, China)

Abstract: It is known from the analysis and research on 162 roof-falling accidents occurring in coal mining roadway supported by bolts that the deteriorative combination of roof strata is the major reason that accounts for percent 66 of the total accidents. RFPA^{2d} system (the system of rock failure process analysis, developed by Northeastern University) is used to simulate the deteriorative process of different strata combination roof. The result suggest that the deterioration of strata combination is related to the change of soft interlayer positions, the thickness of hard strata, the ratio of height and span, and the thickness change of soft strata in the direct roof. The deteriorative rupture of strata combination results from the tensile failure, shear failure and their mutual action. Under the action of shear stress, the whole roof falls down; under the action of deadweight stresses, flexural failure of roof strata takes place; whereas under the mutual action of shear stress and tensile stress, the failure configuration of the laminated roof strata presents a form of roof-falling arch.

Key words: laminated roof; deteriorative combination; roof-falling mechanism; numerical simulation

1 前 言

顶板事故是煤矿生产的五大灾害之一, 地下煤矿开采过程中, 冒顶是一个主要的问题。据统计, 在煤矿的各种自然灾害中, 顶板事故造成人员伤亡比率几乎占井下所有事故死亡人数的一半, 加强顶板管理对于保证安全生产, 减少资源损失, 提高经济效益具有十分重要的地位^[1]。

为了解我国锚杆支护煤巷冒顶事故现状, 分析冒顶事故成因, 研究预测预防措施, 笔者于 2002 年 11 月至 2004 年 1 月先后对 18 个大型矿区进行调

研。共收集到 1996 年以来锚杆支护煤巷冒顶事故实例 162 起。按事故发生原因将冒顶事故分为岩层组合劣化型、岩层结构缺陷型、应力突变型和施工不良型四类。岩层组合劣化型是指顶板岩层组合由稳定型向非稳定型转变而导致巷道冒顶的顶板岩层组合, 此型冒顶分为 4 个亚类, 包括非稳定岩层变厚且层厚大于锚杆 (锚索) 长度导致的冒顶、稳定岩层变薄导致的冒顶、锚固范围外的岩层间存在软弱夹层导致的冒顶和受水分影响导致的冒顶^[2]。岩层组合裂化型冒顶共发生 107 起, 占调查事故总数的 66.04%, 是引起冒顶事故的主要原因, 如何有效防

治“岩层组合劣化型”冒顶是保证锚杆支护煤巷安全的首要任务。因此,深入分析引起岩层组合劣化的各种因素,对于预防和控制煤巷冒顶事故具有重要的理论指导意义。

2 数值模型设定

煤系地层多为沉积形成的层状岩体,由于受沉积环境控制,沉积岩性、岩相及其组合特征各异,在垂向上岩性、岩相旋回变化,在侧向上发生增厚、变薄甚至尖灭,从而决定了顶板岩体力学性质在空间上表现出明显的差异性^[1]。对于煤层巷道而言,直接顶板是巷道支护的重要对象。我国煤矿煤层直接顶板大部分是炭质页岩、页岩、砂质页岩、泥岩和粉砂岩等强度较低的岩层或这些岩层的互层组成,岩石的抗压强度在15~40 MPa之间,在有些条件下,巷道的直接顶或底板是煤体,煤的单轴抗压强度一般在3~20 MPa之间。顶板岩层结构复杂,有下软上硬型、下硬上软型、软硬互层型、岩层间存在软弱夹层型(煤线、泥质或炭质泥岩,一般厚度在几毫米到几十毫米之间)和厚层软岩(煤)型等。因此,本文应用东北大学岩石破裂过程分析系统(RFPA^{2D}),对不同的层状顶板岩层组合劣化的演化过程进行了数值计算^[3-9]。主要包括:软弱夹层位置的变化对顶板岩层组合劣化的影响;软岩层顶板中硬岩层厚度变化以及高跨比变化对顶板岩层组合劣化的影响;软岩层厚度变化对顶板岩层组合劣化的影响。

本文采用平面应变模型来模拟不同组合层状岩体的变形、破坏过程。根据马念杰教授煤巷支护的理论与实践,认为巷道浅部围岩,即巷道两帮、 $1.5h$ (h 为巷道高度)顶板岩层以及 $1.0h$ 底板岩层的强度特征对巷道围岩稳定性起决定性作用。因此,本模型沿水平方向取20 m,沿垂直方向取11 m。煤层厚度为2 m,煤层的赋存深度为500 m。其具体的岩石力学参数参见表1,模型单元划分为 $110 \times 200 = 22\,000$ 个单元,每个单元格 0.01 m^2 直接代表细观的岩石实际情况。采用Weibull分布,通过调整Weibull分布函数参数改变材料的非均匀性,其中弹性模量与岩石单轴抗压的均质度为5,泊松比与岩石重度的均质度为100。采用修正的库仑(Coulomb,可考虑拉伸破坏)判据作为单元破坏准则,设准则中基元材料的拉、压强度比为1/5,内摩擦角为 30° 。数值计算图中的每一层灰度代表岩层的力学参数(弹性模量、抗压强度等)的大小,灰度越亮,值越大。

表1 层状顶板各层岩石力学参数
Table 1 The rock mechanical parameters of every rock stratum of roof strata

岩性	单轴抗压强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	弹性模量 / MPa	泊松比 μ	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
砂岩	45.5	5.1	5 680	0.25	2.5
页岩	37.8	1.126	4 910	0.24	2.3
泥岩	29.2	2.92	4 470	0.25	2.3
煤	14.5	1.21	1 430	0.33	1.84
石灰岩	57.3	6.08	8 890	0.23	2.6
夹层	10	0.94	1 000	0.39	2.4

模型边界条件为:水平方向采用位移约束,位移约束为0;在垂直方向上,利用岩体上部的500 m厚岩层自重应力传递到模型上部作为模型垂直方向约束条件。设定模型上部岩层的平均自重为 2.5 kN/m^3 ,选择模型的厚度为1 m,则模型上部的载荷为12.5 MPa,则在模型上部转化为1 m高的等效重力岩层的自重为 12.5 kN/m^3 ,其具体模型见图1。

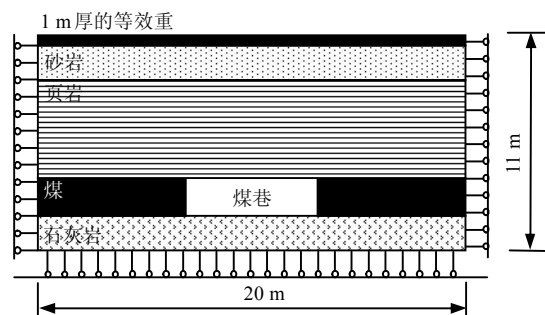


图1 数值计算模型

Fig.1 Numerical calculation model

3 数值计算结果及分析

3.1 软弱夹层位置变化对顶板岩层组合劣化的影响

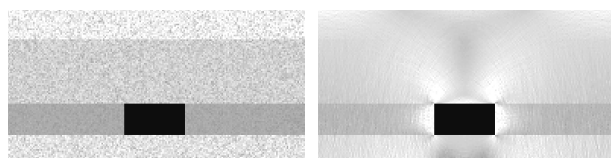
本模型中的岩层主要由砂岩、页岩、煤和石灰岩组成,其赋存状态为水平。模型主要考虑层状顶板中软弱夹层(软弱夹层厚度为50 mm)的位置变化对顶板岩层组合劣化的影响,设定的软弱夹层距离顶板的距离分别为0(代表没有软弱夹层),1, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 m。

从数值计算结果图2中可以看出:

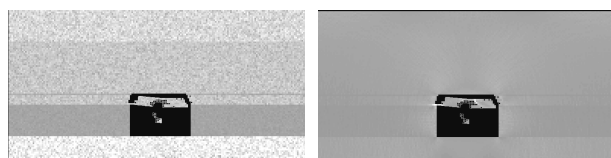
(1) 在50 mm厚的软弱夹层变为距顶板1, 1.5, 2.0 m和2.5 m时(图2(b)~图2(e)),随着巷道掘进,层状顶板悬空以后,在垂直应力和顶板岩层的自重应力作用下,首先在岩层组合中软弱夹层部分产生拉破坏,然后沿着软弱夹层层理逐步向两侧扩展,且围岩应力随之发生转移,应力转移造成岩层的进一步破坏;同时,软弱夹层及其下部岩层

在巷道两端发生剪应力集中，在剪切应力和拉应力的共同作用下，顶板岩层发生变形、整体垮冒，但夹层上部的岩体没有发生破坏，基本保持完好；

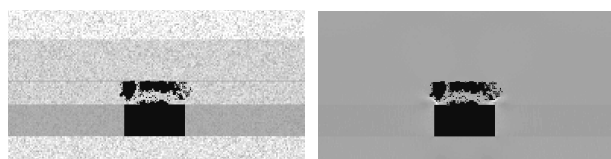
(2) 从数值模拟的结果中（图 2(f)、图 2(a)）可以看出：当软弱夹层位于巷道上部 3.0 m 处或顶板岩层组合中没有软弱夹层时，顶板没有发生变形破坏，只是在暴露顶板的中部有拉应力集中，在巷道 4 角压应力集中，巷道保持完好。



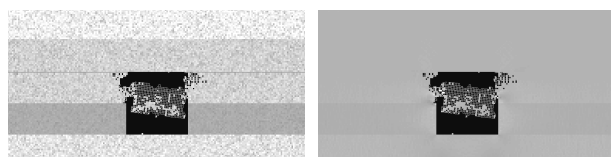
(a) 软弱夹层距顶板距离为 0 m



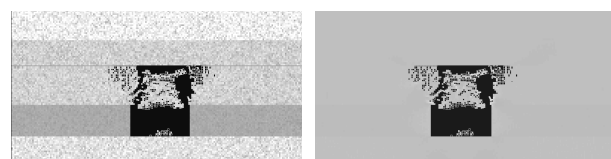
(b) 软弱夹层距顶板距离为 1.0 m



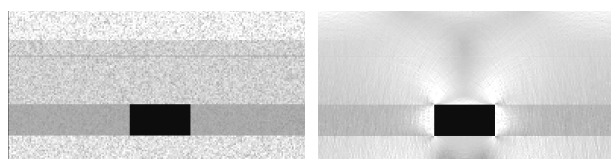
(c) 软弱夹层距顶板距离为 1.5 m



(d) 软弱夹层距顶板距离为 2.0 m



(e) 软弱夹层距顶板距离为 2.5 m



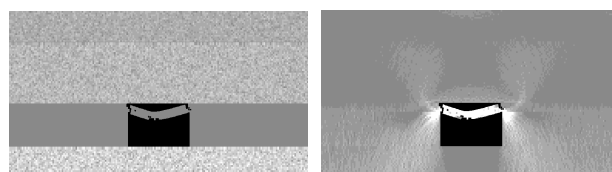
(f) 软弱夹层距顶板距离为 3.0 m

图 2 层状顶板中软弱夹层位置变化时顶板破坏情况

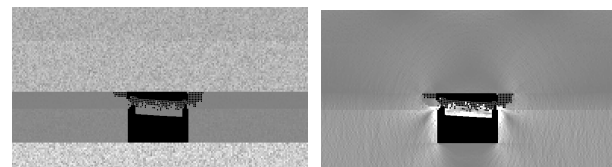
Fig.2 The variety of soft interlayer in the laminated roof

3.2 软弱岩层厚度对层状顶板岩层组合劣化影响

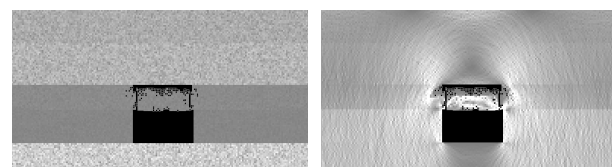
当巷道层状顶板上部的软弱岩层在 0.5~2 m 之间的厚度（图 3(a)~图 3(d)）时，巷道开挖以后，软弱岩层暴露出来，由于软弱岩层和坚硬岩层之间赋存有层理面，在自重应力作用下，软弱层状顶板下沉，发生弯曲变形，首先在层理面上发生拉伸离层破坏，然后向两侧扩展，最终软弱岩层在巷道顶板的两端发生剪切破坏，造成层状顶板整体冒落，但在软弱岩层上部的坚硬岩体没有发生破坏，基本保持完好；从此计算结果也可以得出，当巷道上部的软弱岩层厚度在 2 m 以内时，主要是发生拉伸破坏与剪切破坏，但最终还是由于在巷道顶板两端的剪切破坏，造成巷道顶板的整体冒落。



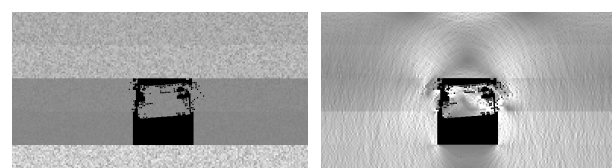
(a) 软弱夹层厚度为 0.5 m



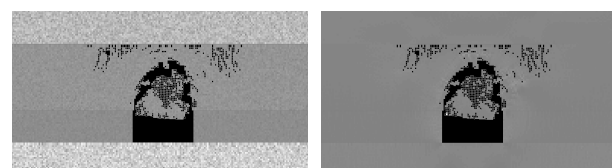
(b) 软弱夹层厚度为 1.0 m



(c) 软弱夹层厚度为 1.5 m



(d) 软弱夹层厚度为 2.0 m



(e) 软弱夹层厚度为 4.0 m

图 3 层状顶板上部软弱岩层情况

Fig.3 The condition of soft strata in the laminated roof

当巷道顶板上部存在有较厚的软弱岩层（图 3(e)）时，在自重应力作用下，首先在顶板上部软弱岩层约 2 m 处产生局部拉伸离层，这种破坏随着应力的重新分布，逐渐向上发展，造成围岩的破坏变得越来越剧烈，最后在剪切应力的作用下，发生整体冒落，由于顶板为较厚的软弱岩层组成，冒落体的形状表现为拱形，即为冒落拱。

3.3 软弱岩层中含有不同厚度的坚硬岩层情况下对顶板岩层组合劣化的影响

在层状顶板软弱岩层中含有 0.5 m 和 1 m 厚的坚硬岩层（图 4(a)~图 4(b)）情况下，巷道开挖以后，层状顶板出现悬空，在坚硬岩层下面的软弱岩层首先发生冒落，逐步向上传递，最后导致坚硬岩层和坚硬岩层下面的软弱岩层均发生变形破坏，说明薄的坚硬岩层不能控制软弱岩层顶板的冒落形态；当层状顶板软弱岩层中含有 2 m 厚（图 4(c)）坚硬岩层时，仅仅是坚硬层状岩层下面的软弱岩层发生变形破坏，而坚硬岩层上面的软弱岩层没有发生变形破坏，坚硬厚层状岩层上面的软弱岩层基本保持完好。

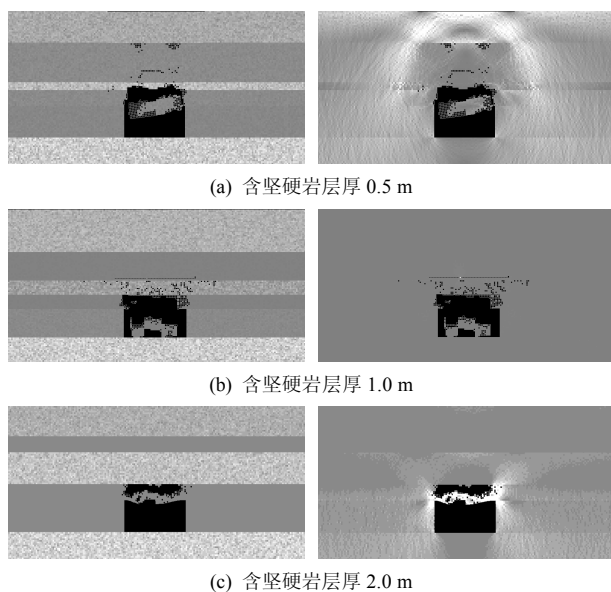


图 4 层状顶板软弱岩层中坚硬岩层情况
Fig.4 The condition of hard strata in the soft laminated roof

3.4 高跨比对层状顶板岩层组合劣化的影响

对于在层状岩层中开挖巷道，通常要考虑高跨比对巷道自身稳定性的影响，因为不同的高跨比对巷道稳定性的影响也不尽相同^[10-11]。本部分主要考虑复合层状顶板情况下，不同高跨比对巷道稳定性的影响。

①在复合层状岩层顶板中，开挖高跨比为 1:1（图 5(a)）的巷道时，巷道顶板承受的拉应力小于顶板围岩抗拉强度，巷道围岩没有发生弯曲变形破坏，巷道稳定性良好；

②在巷道高跨比为 1:2（图 5(b)）的情况下，巷道顶板受到的拉应力大于顶板围岩抗拉强度，顶板围岩发生弯曲变形破坏。正是由于临近巷道的第一层岩层的变形破坏，给第二层的岩层的变形破坏创造了空间，造成第二层岩层也发生局部破坏。从此破坏结果可以看出，层状顶板的冒落是不断向上传递的过程，而并非是突然间整体垮冒。

③在巷道高跨比为 1:3（图 5(c)）情况下，巷道的断面积明显增大，给层状顶板的冒落创造了较大的空间，巷道层状顶板发生严重破坏，其顶板的冒落形态为拱形。而且随着顶板围岩的冒落，巷道顶板围岩应力也发生了转移，转移到上部顶板岩层中，在上部岩层中出现了拉应力集中，但此拉应力没有造成顶板的进一步破坏。

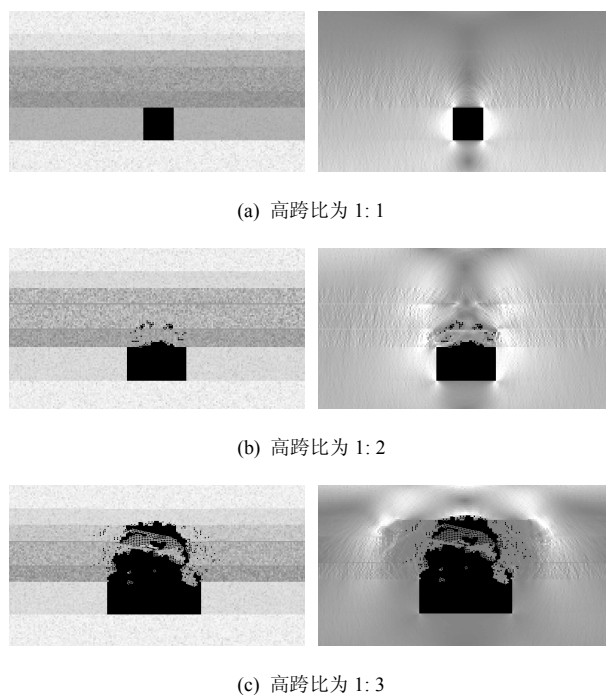


图 5 不同高跨比情况
Fig.5 The ratio condition of height and span

4 结 论

通过对不同层状顶板岩层组合劣化过程的数值模拟分析可知：

（1）煤系层状赋存顶板的变形破坏是一个复杂的问题，而岩层组合对巷道变形破坏特征有重要影响；

(2) 巷道变形破坏特征与顶板岩层组合中是否有软弱夹层及赋存位置、坚硬岩层厚度及高跨比、软弱岩层厚度等有关;

(3) 随着岩层组合中软弱夹层向巷道移近、坚硬岩层厚度变薄、软弱岩层厚度加大, 围岩破坏范围加大, 变形破坏加剧, 控制难度增加, 围岩明显劣化;

(4) 岩层组合劣化导致顶板岩层破坏的主要形式是拉破坏、剪切破坏及其共同作用。在剪切应力的作用下, 层状顶板发生整体跨落; 在自重应力作用下, 顶板岩层发生拉伸弯曲破坏; 剪切应力和拉应力共同作用下, 层状顶板破坏形式为拱形冒落;

(5) 岩层组合劣化型冒顶事故的发生, 主要是在生产推进过程中岩层组合发生劣化, 这种“劣化”过程在现场实践中隐蔽性极强, 往往无法发现并得到正确支护, 是导致冒顶的最大隐患。因此, 加大区域围岩劣化探测, 确切掌握具体地点的岩层组合劣化状况是开挖方案设计的基础和安全生产的前提, 对于预防和控制煤巷冒顶事故具有重要意义。

参考文献

- [1] 孟召平. 煤层顶板沉积岩体结构及其对顶板稳定性的影响[博士学位论文 D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 1995.
- [2] 贾明魁. 锚杆支护煤巷冒顶事故研究及其隐患预测[博士学位论文 D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2005.
- [3] 刘红元, 刘建新, 唐春安. 采动影响下覆岩垮落过程的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 201—204.
LIU Hong-yuan, LIU Jian-xin, TANG Chun-an. Numerical simulation of failure process of overburden rock strata caused by mining excavation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(2): 201—204.
- [4] 唐春安, 刘红元. 非均匀性对岩石介质中裂纹扩展模式的影响[J]. 地球物理学报, 2000, 43(1): 116—119.
TANG Chun-an, LIU Hong-yuan. Influence of heterogeneity on crack propagation modes in brittle rock[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2000, 43(1): 116—119.
- [5] 黄明利, 唐春安. 非均匀因素对 I 型裂纹扩展、相互作用影响的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1 111—1 114.
HUANG Ming-li, TANG Chun-an. Effect of heterogeneity on propagation and interaction of type I crack[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(8): 1 111—1 114.
- [6] 唐春安. 岩石声发射规律数值模拟探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(4): 368—374.
TANG Chun-an. Numerical simulation of an in rock failure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(4): 368—374.
- [7] 唐春安, 赵文. 岩石破裂全过程分析软件系统 RFPA^{2D}[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 507—508.
TANG Chun-an, ZHAO Wen. RFPA^{2D} system for rock failure process analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(5): 507—508.
- [8] Tang C A. Numerical Simulation of rock failure and associated seismicity[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 1997, 34: 249—262.
- [9] 黄明利, 唐春安, 朱万成. 岩石破裂过程的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 468—471.
HUANG Ming-li, TANG Chun-an, ZHU Wan-cheng. Numerical simulation on failure process of rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(4): 468—471.
- [10] 杨天鸿, 刘庭金, 刘红元. 广州地铁二号线大跨度洞室开挖对基础影响分析[J]. 西部探矿工程, 2000, 12(6): 65—67.
YANG Tian-hong, LIU Ting-jin, LIU Hong-yuan. Analysis of affect on foundation during the large span cavern excavation process on Guangdong subway[J]. **West_China Exploration Engineering**, 2000, 12(6): 65—67.
- [11] 马念杰, 侯朝炯. 采准巷道矿压理论及应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995.