

铁法矿区巨厚火成岩覆岩下开采地 裂缝形成机理研究^{*}

杨帆¹, 常俊飞¹, 郭正一², 梁树民³

(1. 辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 天津华北地质勘查局 承德华勘五一四地质队, 河北 承德 067000; 3. 铁法矿业(集团)有限责任公司, 辽宁 调兵山 112700)

摘要: 采用实地调查和数理统计的方法对采动地裂缝进行分类, 并分析不同类型地裂缝的主要成因。针对铁法矿区巨厚火成岩覆岩采动诱发的地裂缝问题, 采用平衡拱-梁理论建立了火成岩体断裂破坏的力学模型, 利用FLAC3D数值软件模拟计算了巨厚火成岩覆岩采动过程中应力分布规律和地表裂缝发育的机理。

关键词: 开采沉陷; 采动地裂缝; 巨厚火成岩; 力学模型; 数值模拟

中图分类号: TD32

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)01-0101-06

0 引言

煤炭开采引起的地表沉陷是严重的环境地质灾害和安全生产隐患, 会给煤炭企业造成巨大的经济损失, 已成为影响各大矿区经济发展和社会安定的重要因素(范立民, 1995; 郭文兵等, 2013)。其中, 地表沉陷诱发的地裂缝灾害是地质灾害中一种地面形变灾害, 广泛发育于煤矿区内(颜景生, 2014; 苏凯峰, 2014; 白海波, 2002; 张玉宝, 刘军波, 2013)。在众多煤矿区地裂缝灾害中, 尤其以厚硬火成岩覆岩断裂后形成的地裂缝危害性最大。辽宁铁法矿区有5个矿覆岩中侵入了火成岩(于成龙等, 2013; 梁越, 2006; 刘心广, 2010; 朱建建, 李娜, 2007; 轩大洋等, 2012), 火成岩厚度在24~400 m。2010年4月, 晓南矿西二采区老张庄村附近突然出现了一条大的地裂缝, 长1 000 m, 宽5.8 m, 深约10 m, 后经调查, 在查采动火成岩覆岩区发现8条大的地裂缝, 这些地裂缝长50~1 000 m, 宽0.5~8 m, 深1~10 m。在煤矿开采形成大量开采地裂缝的同时, 还常常会引发滑坡、坍塌等地质灾害, 导致矿区生态环境产生不可逆的破坏, 并且给井下生产造成重大安全隐患, 尤其是当地裂缝与采空区贯通时, 常发生漏风、溃水、

溃沙等安全事故(康建荣, 2008; 邢大韦等, 1994; 刘辉等, 2013; 许延春等, 2009)。因此, 加强对火成岩断裂形成地裂缝机理的研究具有十分重要的理论价值和应用价值。

1 铁法矿区采动地裂缝类型及分布特征

1.1 煤炭开采诱发地裂缝的类型

煤炭开采诱发的地表裂缝多种多样, 据不完全统计, 有直线型、曲线型、雁裂型和排列型等。地裂缝长度为0.5~1 000 m不等, 可按照平面几何形态、剖面形态、力学性质、规模大小、形成时间对其进行不同的分类。

1.2 铁法矿区火成岩及地裂缝分布情况

铁法能源集团公司位于辽宁省调兵山市, 铁法矿区由3个煤田组成, 即铁法煤田、康平煤田和康北煤田, 总含煤面积773.22 km², 原始累计探明工业储量22.59亿吨。整个矿区侵入地层的火成岩主要为第三纪辉绿岩、喷出岩为玄武岩和英安岩; 主要集中在大兴和大隆井田, 小青、晓南井田局部有出露, 使本区煤层与煤质受到较大的影响。铁法矿区火成岩和地裂缝分布概况如表1所示, 其主要特点有:

(1) 火成岩大多随煤层的顶底板入侵, 被影

^{*} 收稿日期: 2015-11-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50604009)资助.

响煤层均受到不同程度的破坏，比如煤层被隔断或者消失，火成岩侵入区域煤变质程度较高。

(2) 在地层含有矿区内，部分火成岩距地表约 20~60 m，且覆盖面积较大，可能造成严重的地质灾害，如地裂缝或者突发性塌陷。

(3) 整个矿区各个煤田均有火成岩的存在，并且与煤层有一定的关系，或者在顶板，或者在底板。这种地质构造能引起地表不规则移动和变

形，极可能产生地表裂缝和地表不规则塌陷等地质灾害。

地裂缝按其分布状况大致可分为两类：一类是对应于开采边界的裂缝，另一类为开采动态裂缝。按照采煤诱发地表裂缝的形成原因，铁法矿区的地表裂缝主要有：下沉盆地边缘产生的地裂缝，由断层采动活化引起的地裂缝，由火成岩断裂引起的地裂缝，综合作用影响形成的地裂缝。

表 1 铁法矿区火成岩和地裂缝分布概况

Tab. 1 Igneous rock in Tiefa mining area and the distribution of ground fissures

井田名称	火成岩	断层	裂缝位置	裂缝描述
晓南	有	F ₃₈ 、F ₃₉	东西走向、略向东北西南方向挑头	最大裂缝长 450 m，宽度 5 m 以上，可见深度大于 10 m
大隆	有	F ₅₆ 、F ₉ 、F ₂₆	井田西南部、东南部	共两条：西南向长约 150 m；东南向长约 280 m
大兴	有	F ₅₆	井田北二采区	共 3 条：其中两条位于 N2405 及 N2705 工作面的正上方，宽约 0.2~0.3 m；另一条位于北二采区井田西边界上方，裂缝宽度 1.0 m，长约 570 m
小青	无	——	井田内多处	无较大裂缝，裂缝宽度和落差较小，分布广泛
大明	有	——	井田南部	长 30 m、宽 0~0.5 m
晓明	有	F ₃₂₀	井田北三采区	长 20 m、宽 0~0.8 m，可见深度 0~1.0 m
大平	无	无	井田西北方向	共 3 条：一条位于 N1N2 工作面回风巷外 14~35 m，长 97 m、宽 10 m；另两条位于 N1S2 工作面运输巷外 31~104 m，长分别为 72 m、50 m，最大宽度达 430 mm，可见深度 4.5 m

2 采动火成岩覆岩断裂的力学模型

依据铁法矿区物探结果，将火成岩覆岩岩体形状分为楔形、矩形、椭圆形，如图 1 所示。所有岩体形状均可由这 3 种组合而成，如有弱面的火成岩（图 2a），以及没有弱面火成岩（图 2b）。有弱面火成岩，受到均匀荷载时，断裂处就位于弱面处；没有弱面火成岩，断裂处的形成则与荷载、采空区有关（khachai, Shupletsov, 1998；Shapletsov, 1990）。

火成岩体在地层中的分布主要有：（1）分布在地表，即火成岩体出露于地表或者火成岩体浅埋于地表下；（2）位于地层中间部位，即火成岩体位于可采煤层和地表的中间部位；（3）位于顶板，即火成岩在煤层上方不远处部位；（4）位于底板，即火成岩体位于开采煤层底板或者距离底板不远处。

采空区与火成岩体的关系可分为：（1）全覆盖火成岩体，即火成岩体位于采空区上方，且火成岩体覆盖整个采空区，如图 3a 所示；（2）半覆



图 1 火成岩形状图

(a) 楔形；(b) 矩形；(c) 椭圆形

Fig. 1 Diagram of igneous shape

(a) wedge; (b) rectangular; (c) oval

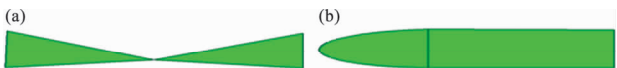


图 2 火成岩形状组合图

(a) 有弱面的火成岩；(b) 没有弱面的火成岩

Fig. 2 Diagram of igneous shape combination

(a) igneous rock with a weak side; (b) igneous rocks with no weak side

盖火成岩体，即火成岩体位于采空区上方，但是没有全部覆盖采空区，如图 3b 所示。平衡拱与采空区之间的分布可分为 3 类：（1）与平衡拱有两个交点，如图 4a 所示，由此可形成简支梁模型，根据简支梁模型可准确算出有两个交点时火成岩体的破断距；（2）与平衡拱有一个交点，如

图4b所示,形成一端固支的简支梁模型,根据力学知识也能准确得出其火成岩的断裂部位;(3)与平衡拱没有交点,如图4a、b所示,此条件下火成岩与采空区之间关系相对而言较简单,此种情况下的火成岩不论是分布在地表、底层中间还是底板,其与地表的移动关系都较简单,且

建模较为方便。

综上,在建立模型时,以均匀层状火成岩为主要研究对象,其他形状(楔形、椭圆形)暂不作为主要研究对象。在此条件下,主要以一端固支且与平衡拱最少有一个交点的情况下为主要研究对象,如图4a、b所示,使得建模更为简便。

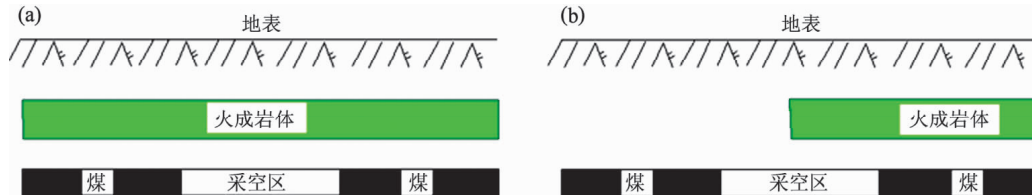


图3 火成岩体与采空区关系图

(a) 全覆盖火成岩体; (b) 半覆盖火成岩体

Fig. 3 Diagram of the relationship between igneous rock and goaf

(a) full cover igneous rock body; (b) half covered igneous rock body

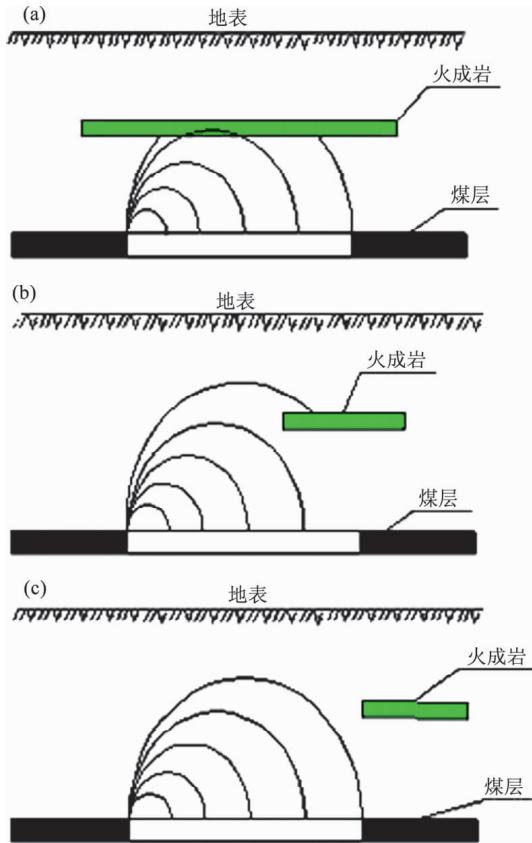


图4 有两个交点(a)、一个交点(b)和没有交点(c)的火成岩体与平衡拱关系图

Fig. 4 Diagram of the relationship between igneous rock and balance arch of two intersection point (a), a intersection point (b), and no intersection point (c)

火成岩覆岩断裂处拉应力公式大致分为两种:

$$\begin{cases} L = \sqrt{\frac{10\sigma_t + 2q - 5\gamma h}{30(q - \gamma h)}}, \\ L_j = h \sqrt{\frac{4\sigma_t + q(3\mu - 2)}{q}}. \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{12\mu qa^4 b^2}{h^2 \pi^2 (3a^4 + 2a^2 b^2 + 3b^4)}. \quad (2)$$

式(1)中, L 为简支梁模式下发生火成岩覆岩断裂的极限跨距, L_j 为悬臂梁模式下火成岩覆岩断裂极限跨距; σ_t 为覆岩抗拉强度; q 为均布荷载; μ 为泊松比; γ 为覆岩自身重量; h 为覆岩岩层的平均厚度。

式(2)中, σ_{\max} 为覆岩的抗拉强度; q 为均布荷载, 其中 $q = pg(H - L)$; μ 为泊松比; a 为覆岩的悬空长度; b 为覆岩的悬空宽度; h 为覆岩岩层的平均厚度。

巨厚火成岩具有整体结构, 其极限破坏距计算公式有3类, 其中公式(3)为弯拉破坏模型, 式(4)为两端固支梁模型, 式(5)为正方形岩板模型:

$$L = H_0 \sqrt{\frac{2\sigma_{\max}}{q}}. \quad (3)$$

$$L = H_0 \sqrt{\frac{2\sigma_{\max}}{5q_1}}. \quad (4)$$

$$b_m = H_0 \sqrt{\frac{\sigma_{\max} H_0}{6kq_1}} \quad (5)$$

式中, L 为岩层极限破断步距; H_0 为火成岩厚度; q 为岩梁(板)上覆荷载; q_1 为硬岩层上的软岩的重量; k 为薄板的形状系数; b_m 为岩板的极限尺寸。

3 采动火成岩覆岩断裂数值模拟

模型以晓南煤矿 82-82' 号勘探剖面线地质采矿条件为原型, 建立平面应变数学模型, 模拟煤层为 7 号煤层, 为缓倾斜煤层, 平均倾角为 6° , 数学模型按水平煤层考虑, 采厚 0.8 ~ 7.3 m, 平均采厚为 2.8 m, 模拟工作面平均采深 510 m, 工作面长度按 7 号勘探剖面上开采长度 400 m, 建立

200 m × 500 m × 623 m 的平面模型, 数值计算模型如图 5 所示。模型中均采用 Mohr-Coulomb 判断岩体的屈服准则破坏, 并且均不考虑塑性流动(不考虑剪胀)。由图 5 的模型可以得到开采厚度为 6 m 的煤层覆岩的应力分布, 如图 6 ~ 7 所示。

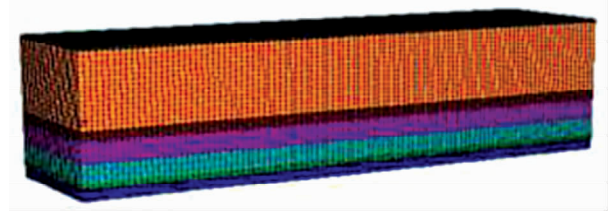


图 5 数值计算模型

Fig. 5 Numerical calculation model



图 6 煤层开采采厚 6 m 水平方向应力云图

(a) 工作面推进 200 m; (b) 工作面推进 300 m; (c) 工作面推进 400 m

Fig. 6 Horizontal stress nephogram of the thick of coal seam mining with 6 m

(a) working face advancing 200 m; (b) working face advancing 300 m; (c) working face advancing 400 m

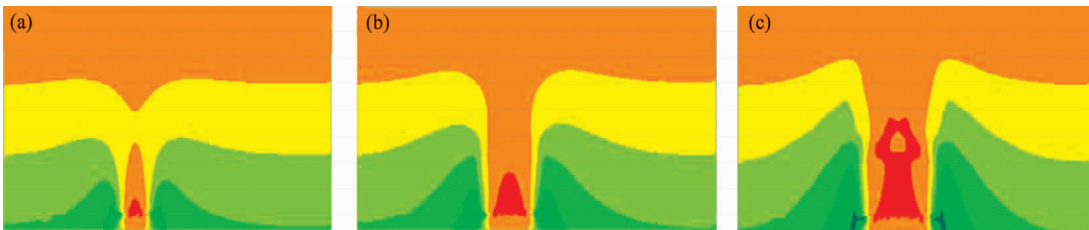


图 7 煤层开采采厚 6 m 垂直应力云图

(a) 工作面推进 200 m; (b) 工作面推进 300 m; (c) 工作面推进 400 m

Fig. 7 Vertical stress nephogram of the thick of coal seam mining with 6 m

(a) working face advancing 200 m; (b) working face advancing 300 m; (c) working face advancing 400 m

当采面推进 200 m 时, 切眼处和掘进处前方均出现应力集中区, 其垂直应力最大 -3.0×10^7 Pa ($-$ 表示压应力), 工作面上、下方为减压区, 各岩层应力状态由下向上逐渐减小。靠近工作面处存在垂直应力正向分布, 说明岩层移动、变形、弯曲过程中存在受拉应力或不受力的情况。工作面推进 300 m, 采动覆岩应力集中区域范围增大,

其垂直应力最大为 -3.2×10^7 Pa, 减压区范围也逐渐增加, 工作面上方缓慢降低。在工作面不断推进的过程中, 在采空区上盘将会出现最大拉应力集中区。顶板拉应力大部分位于顶板中间附近。在采空区顶板中央形成等值应力迹线拱, 在未充填情况下靠近顶板中央为拉应力, 往上等值迹线拱径逐渐变大, 拉应力减小, 最终变为压应力,

越往上拱径越大,压应力越大。在采空区左右两侧各存在一个高压应力集中区,往远处则压应力又逐渐变小,但变化梯度远远小于矿体附近应力变化梯度。

由图8可见,当工作面推进到火成岩下方时,火成岩所受应力明显集中,由于火成岩厚度较大、强度较高,对上覆岩体的移动和变形起到了控制作用。随着工作面的推进,采空区暴露面积不断增大,火成岩受到的拉应力也不断增大,与岩体抗拉强度逐步接近,当水平应力达到 1.243×10^7 Pa时,火成岩断裂破坏,这是导致地表产生裂缝及塌陷的最主要力源。

图9为采区塑性区分布,从图中可以看出,煤层开采后,塑性区主要分布在煤层顶板岩层上和地表土层下,地表土层主要受剪切破坏;而煤层顶底板岩层则会出现垮落现象,在采空区顶部出

现拉张破坏,这主要是由于采空区外部岩层向采空区垮落,产生拉张应力的作用。

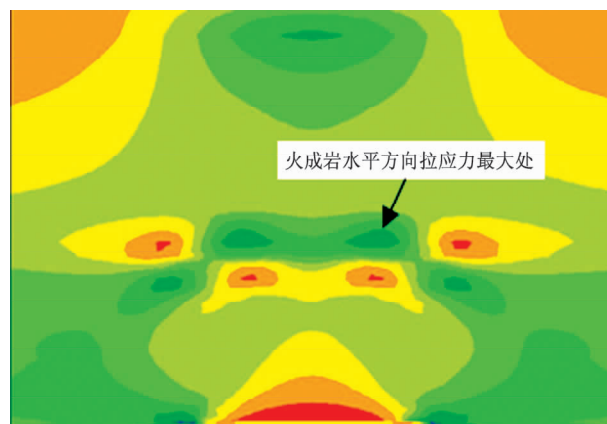


图8 煤层开采水平方向应力云图

Fig. 8 Horizontal stress nephogram of coal mining

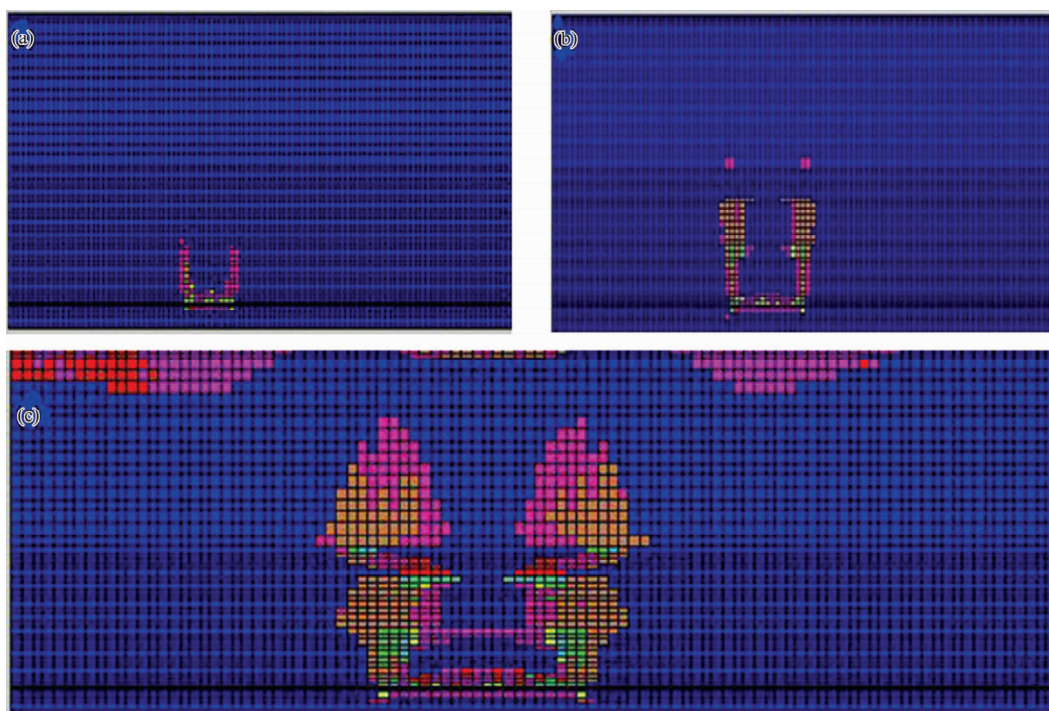


图9 煤层开采采厚6 m 塑性区分布图

(a) 工作面推进 200 m; (b) 工作面推进 300 m; (c) 工作面推进 400 m

Fig. 9 Plastic zone distribution map of the thick of coal seam mining with 6 m

(a) working face advancing 200 m; (b) working face advancing 300 m; (c) working face advancing 400 m

4 结论

本文针对巨厚火成岩覆岩下开采对地裂缝的形成机理进行探索性研究,采取数值模拟、现场

实测资料整理、理论分析相结合的科研手段,对采动地裂缝进行分类,并分析不同类型地裂缝的主要成因。对巨厚火成岩下开采上覆岩层的应力分布情况及火成岩体断裂的部位进行了分析研究,得出以下结论:

(1) 火成岩作为关键层控制着地裂缝的发育,火成岩的断裂是形成地裂缝的主要原因。应用平衡拱-梁理论建立火成岩覆岩的力学模型,可以揭示地裂缝发育的力学机理。

(2) 采用有限差分软件 FLAC3D 对晓南矿进行了数值模拟,探讨了巨厚火成岩下煤层开挖后地表的沉陷规律。通过采场上覆岩体的塑性云图的扩展情况分析覆岩塑性破坏范围,通过主应力云图分析了覆岩内部的应力场分布规律和采区上方地表裂缝及塌陷的形成原因。

参考文献:

- 白海波. 2002. 徐州矿区地裂缝成因机制的探讨[J]. 煤田地质与勘查, 30(2): 46-49.
- 范立民. 1995. 煤矿地裂缝研究(三辑)[M]. 北京: 地震出版社.
- 郭文兵, 杨治国, 詹鸣等. 2013. “三软”煤层开采沉陷规律及其应用[M]. 北京: 科学出版社.
- 康建荣. 2008. 地表移动破坏裂缝特征及其控制方法[J]. 岩石力学与工程学报, 27(1): 59-64.
- 梁越. 2006. 辽宁省铁法煤田大隆矿区地表沉陷地质灾害危险性分区研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学.
- 刘辉, 何春桂, 邓喀中等. 2013. 开采引起地表塌陷型裂缝形成机理分析[J]. 采矿与安全工程学报, 30(3): 17-22.
- 刘心广. 2010. 巨厚岩浆岩下开采覆岩移动规律及动力灾害危险性分析与防控技术[J]. 山东煤炭科技, (2): 100-101.
- 苏凯峰. 2014. 河南永城煤炭矿区环境地质问题及防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 25(1): 39-42.
- 邢大伟, 张卫, 王百群. 1994. 神府-东胜矿区采煤对水资源影响的初步评价[J]. 水土保持研究, 1(4): 92-99.
- 许延春, 杨峰, 李旭东. 2009. 西部煤矿开采地表冲沟水害的预计评价[J]. 华北科技学院学报, 6(4): 34-38.
- 轩大洋, 许家林, 朱卫兵等. 2012. 注浆充填控制巨厚火成岩下动力灾害的实验研究[J]. 煤炭学报, 37(12): 1967-1974.
- 颜景生. 2014. 山东省地裂缝灾害的现状与防治对策建议[J]. 山东国土资源, 30(5): 55-58.
- 于成龙, 郑百功, 杨雷等. 2013. 玄武岩台地采空塌陷发育特征——以吉林省三合城村地面塌陷为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 24(2): 68-71.
- 张玉宝, 刘军波. 2013. 河南唐山市巍山长山地裂缝及其防治[J]. 中国地质灾害与防治学报, 24(1): 89-93.
- 朱建建, 李娜. 2007. 巨厚岩浆岩下开采地表变形的相似材料模拟[J]. 采矿技术, 7(2): 28-40.
- Khachai O A, Shupletsov Y P. 1998. Use of methods of the mathematical theory of entropy for analysis of temporary processes in stressed deformable medium[J]. Journal of Mining Science, 34(1): 38-42.
- Shupletsov Y P. 1990. Computation of stress concentration factors(SCF) in pillars with consideration of their stiffness and the dimensions of the excavated space[J]. Soviet Mining Science, 25(3): 211-216.

Study on Formation Mechanism of Ground Fissures Exploitation under Extremely Thick Igneous Rock Strata in Tiefa Mining Area

YANG Fan¹, CHANG Junfei¹, GUO Zhengyi², LIANG Shu-min³

(1. Mapping and Geographic Sciences, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

(2. Tianjin North China Geological Exploration Bureau, Chengde Five Hundred Fourteen Geological Survey Team, Chengde 067000, Hebei, China)

(3. Tiefa Coal Industry (Group) Co., Ltd. Diaobingshan 112700, Liaoning, China)

Abstract

The method of field investigation and mathematical statistics is adopted to classify mining ground fissures, and analyze the causes of different types of ground fissures. To address the problem of ground crack induced by the mining of the extremely thick igneous rock strata in Tiefa mining area, the balancing arch-beam theory is used to establish the mechanics model of igneous rock body fracture damage. The stress distribution rule in the process of mining of thick of igneous rock strata and the mechanism of the surface crack growth is simulated and calculated by using software FLAC3D numerical software.

Key words: mining subsidence; mining ground fissures; extremely thick igneous rock; mechanics model; numerical simulation