

地应力测量在煤与瓦斯突出灾害研究中的应用

孙东生 王连捷 赵卫华 王红才

(国土资源部 新构造运动与地质灾害重点实验室, 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要:为减轻和防治煤与瓦斯突出灾害,对红菱煤矿进行了地应力测量、岩石力学参数测试和瓦斯气体压力量测,以及地质构造分析。在此基础上,应用突出破坏判断准则,提出了煤层稳定性评价的定量指标,从区域上预测了煤与瓦斯突出的潜在危险区,与现场实际情况吻合较好。提出了区域性与局部相结合的防突措施,取得了良好效果,表明区域煤与瓦斯突出潜在危险区预测对区域性防突措施的选择具有一定指导意义。

关键词:地应力测量;煤与瓦斯突出;破裂准则;突出区预测

中图分类号:P554 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2010)01-0223-06

沈阳煤业集团红菱煤矿位于沈阳市苏家屯区红菱堡镇,地理坐标为东经 123°18'26",北纬 41°33'08"。该矿始建于 1969 年,1976 年 3 月移交生产,设计能力 90 万 t/年,1986 年改扩建设计能力 150 万 t/年,现生产能力可达 180 万 t/年。矿区含煤地层由太原组和山西组组成,共含煤 14 层,其中 7 煤、12 煤为主要可采煤层,3 煤为局部可采薄煤层,井田煤层倾角 12~45°,深部局部可达 50°。

红菱煤矿为高煤与瓦斯突出矿井,自 1972 年以来共发生煤与瓦斯突出事故 136 次,造成严重损失,影响生产。煤与瓦斯突出是发生在煤矿生产中的一种极其复杂的地质动力现象,它不仅取决于煤层赋存的地质条件,还与煤岩体的力学性质、煤层中的瓦斯压力和地应力有关,是多种因素综合作用下,引起煤岩体的突然破坏、能量突然释放的结果^[1,2]。本文对红菱煤矿地应力状态、岩石力学性质和瓦斯压力进行研究,应用突出破坏判断准则从区域上对该矿老区 12 煤的煤与瓦斯突出潜在危险区进行预测,并提出了防治措施。

1 地质构造与突出概况

研究区为浑河、太子河冲积平原掩盖下的古生

代石炭—二叠系煤田。构造上位于新华夏第二巨型沉降带中,下辽河断陷带的东坡与东西向太子河拗陷带复合部位。早期吕梁运动发育的温香—鞍山东西向断裂和北东向的苏家屯—浑河断裂,使煤田南侧营口背斜和北侧沈阳隆起的古老地层抗起,从而控制了本区古生代地层的沉积范围,也是煤田的南部和北部的自然边界。井田内构造方向与区域构造大体一致。该区因受北西—南东方向挤压力产生北东及北西两组断裂,其中北东向断裂在后期因下辽河凹陷在中生代的大幅下降而再次活动,比北西向断裂发育。

红菱煤矿突出事故中,平均涌出瓦斯 14750 m³/次,平均突出强度 166 t/次,最大一次事故发生在 1996 年 6 月 20 日,突出煤量 5390 t,涌出瓦斯 420420 m³,造成 14 人被埋或瓦斯窒息死亡。同时煤层具有较高的瓦斯压力,实测瓦斯压力最大达 7.6 MPa。随着开采深度的增加,突出发生的频率明显增加,在 3 煤、7 煤和 12 煤 3 个可采煤层中 12 煤突出频率最高、强度较强,占总突出次数的 90%。

2 岩石力学参数及地应力测量

岩石力学参数及原地应力测量结果,为数值模

收稿日期:2009-04-24;改回日期:2009-08-07

基金项目:中国地质科学院基本科研业务费专项(Ywzf060717)、地质力学研究所基本科研业务费专项(DZLXJK200705)资助。

作者简介:孙东生,男,1980 年生,助理研究员,从事地应力测量、构造应力场数值分析及工程应用研究;E-mail:sdsgl2005@tom.com。

拟计算的边界和约束条件提供原始数据。

2.1 岩石力学参数

对该矿的主要岩石进行了力学参数测定, 结果如表1。可以看出, 辉绿岩弹性模量最高, 抗张强度也高, 泥质砂岩和泥岩的弹性模量及抗张强度都低于辉绿岩。煤体的弹性模量及抗张强度最低。其中煤体的弹性模量根据坚固性系数获得^[9], 这些参数将应用于应力场的反演和危险区的预测中。

2.2 地应力测量

进行原地应力测量的方法有水压致裂法、空芯包体式解除法, 其中 KX-81 型空芯包体式解除法地应力测量以其使用方便、安装操作简单、成本低、效率高等优点在矿山、隧道等工程领域具有广泛应用。

2.2.1 地应力测量方法

采用 KX-81 型空芯包体式三轴地应力计, 用解除法进行了地应力测量^[4-6]。应力计如图 1 所示, 应变花如图 2 所示。它可在单孔中通过一次套芯解除获得三维应力状态, 在红菱煤矿的 -680、-710 和 -780 三个水平进行了原地应力测试工作。

地应力测量过程, 首先在测点处钻直径为 130 mm 的钻孔至预定深度(一般大于巷道直径), 用尖钻头打喇叭口, 再用直径 36 mm 钻头钻深度为 280 mm 左右的小孔。钻孔上倾 5~10° 以便于岩粉和泥浆排出。用清水、棉纱和丙酮清洗和擦拭小孔, 将搅拌均匀的粘结剂倒入应力计空腔, 铆好柱塞, 装在带有定向装置的安装杆上送入预定位置后, 用力推进安装杆并慢慢前进, 此时粘结剂从空腔小孔流进测孔孔

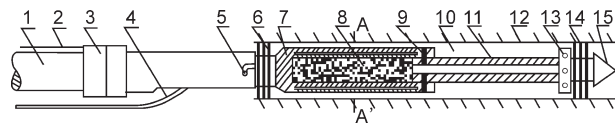


图 1 KX-81 型空芯包体三轴地应力计结构示意图
1—安装杆; 2—定向器导线; 3—定向器; 4—读数电缆;
5—定向销; 6—密封圈; 7—环氧树脂筒; 8—空腔; 9—固定销;
10—应力计与孔壁之间的空隙; 11—柱塞; 12—岩石钻孔;
13—出胶孔; 14—密封圈; 15—导向头

Fig.1 Structural of KX-81 triaxial hollow inclusion-gauges for in-situ stress
1-Pole; 2-Direction finder lead; 3-Direction finder;
4-Cable; 5-Dowel; 6-Rubber seals; 7-Hollow resin pipe;
8-Cavity; 9-Dowel; 10-Clearance between triaxial hollow inclusion-gauges and surface of bore; 11-Piston; 12-Borehole;
13-Hole for gluewater; 14-Rubber seals; 15-Centering tip

壁和元件的空隙, 经过 24 h 的固化, 使元件和孔壁牢固胶结, 并记录应变花的角度, 然后取出定向仪, 将导线从钻杆中心穿出与应变仪连接, 冲水数分钟, 待应变仪读数稳定后, 即可进行套芯解除, 边套芯边跟踪记录, 待套芯进尺超过元件位置后, 读数平稳不再发生变化时, 停钻并取出岩心, 进行率定, 最后利用专用软件计算得到地应力的大小和方向^[7,8]。

2.2.2 地应力测量结果^[9]

从地应力测量结果(表 2)可以看出: 该矿以水平应力为主, 最大水平主应力方向为北东 20~30°, 水平最大主应力为 17.5~21.1 MPa。

3 突出准则

含瓦斯煤岩的突出问题是在地应力与瓦斯气体压力耦合作用下, 能量突然释放, 煤岩突出破坏的结果。一些文献使用相类似破裂准则^[10,11], 本文采用 Hoek-Brown 的破裂准则^[12,13]:

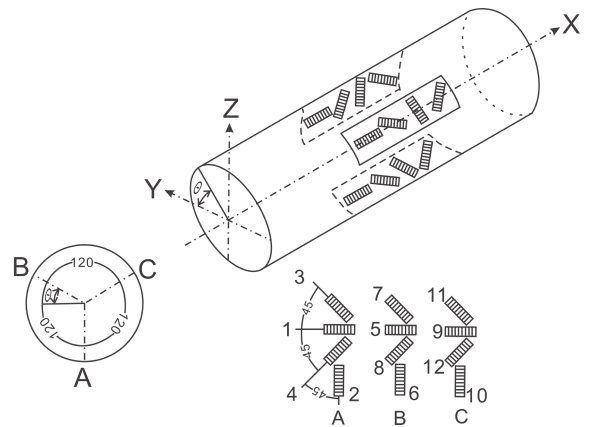


图 2 KX-81 型应力计应变花的分布 (A、B、C 为三组应变花)

Fig.2 Distribution of strain rosette of KX-81 (three group strain rosette of A, B, C)

表 1 红菱矿区主要岩石力学参数
Table 1 Mechanical parameters of rocks in the Hongling coal mine

岩性	弹性模量 /MPa	泊松比	抗拉强度 /MPa
辉绿岩	33000	0.24	7.2
泥质砂岩	17000	0.26	4.6
煤体	1200~2100	0.29~0.35	0.2~0.5
泥岩	11000	0.28	1.7

表 2 红菱煤矿实测地应力
Table 2 Results of in-situ stress measurement in the Hongling coal mine

测点	最大主应力 (σ_1)			中间主应力 (σ_2)			最小主应力 (σ_3)			最大	最小	距地表
	大小	方位	倾角	大小	方位	倾角	大小	方位	倾角	水平主应力	水平主应力	深度
	/MPa	/°	/°	/MPa	/°	/°	/MPa	/°	/°	/MPa	/MPa	/m
-680 水平	18.3	202.4	25.2	13.9	9.8	64.3	12.7	110.1	4.9	17.5	12.7	680
-710 水平	19.4	209.3	-10.0	13.1	64.7	-77.8	9.5	120.5	6.9	19.2	9.6	710
-780 水平	21.5	192.3	15.0	14.8	0.2	74.6	13.1	101.5	3.1	21.1	13.1	780

在压破裂区:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sqrt{m \sigma_{ic} + s \sigma_{ic}^2} \quad (1)$$

在张破裂区:

$$\sigma'_3 = \sigma_t \quad (2)$$

$$\sigma'_i = \sigma_i - p \quad (3)$$

式中: p 为煤层中的瓦斯压力, σ'_i 为有效应力; σ'_1 为破坏时的最大主应力, σ'_3 为最小主应力, σ_t 为抗拉强度, σ_{ic} 为完整岩石的单轴抗压强度, m 、 s 为常数,取决于岩石的性质和岩石的完整性^[4]。

上述关系式可用图 3 表示。从图中可以看出,岩石的强度与应力状态有关,围压越大,强度越大。如果某一点的应力状态在强度曲线的右侧,则不发生破坏。只有最大主应力等于或大于强度的地方,才有

可能发生破坏,即发生煤与瓦斯突出事故。为数据处理方便,计算中引入一个系数 R ,称之为含瓦斯煤岩体的稳定性系数,定义为:

$$R = \frac{\sigma_t}{\sigma_3} \text{ 或 } R = \frac{\sigma'_3 + \sqrt{m \sigma_{ic} + s \sigma_{ic}^2}}{\sigma'_1}$$

$R \geq 1.0$, 含瓦斯煤岩体处于稳定状态; $R \leq 1.0$ 则处于非稳定状态。

4 区域煤与瓦斯突出潜在危险区预测

用力学方法进行煤与瓦斯突出危险区预测,就是利用所获取的地应力实测数据和试验获得的煤岩体参数及瓦斯压力信息,进行地应力场反演计算。然后将计算出的各单元的主应力值和试验中获得的材料参数,带入已建立的稳定性系数判断准则,求得各点的稳定性系数 R 值,并画出等值线,根据稳定性系数等值线就可以划分出煤层中的最危险区、危险区和威胁区。

本文根据现场瓦斯地质图,应用 Ansys 有限元软件建立了有限元模型,并应用接口程序将 Ansys 软件建立的有限元模型导入到 Flac3D 有限元软件^[15]。计算过程采用 Hoek-Brown 模型,进行了数值分析计算。根据计算结果和实测瓦斯压力值,引入了有效应力关系式进行了地应力和瓦斯压力的耦合分析,得到了该矿老区 12 煤层的稳定性系数分布图(图 4)。笔者根据含瓦斯煤岩体稳定性系数 R 将红菱煤矿老区 12 煤的突出划分为 4 个区:突出最危险区、危险区、威胁区和相对安全区。判断标准: $R \geq 1$ 的区域为相对安全区, $0.9 < R < 1.0$ 的区域为突出威胁区, $0.8 < R < 0.9$ 的区域为突出危险区, $R < 0.8$ 的区域定义为突出最危险区。计算结果表明,已突出点

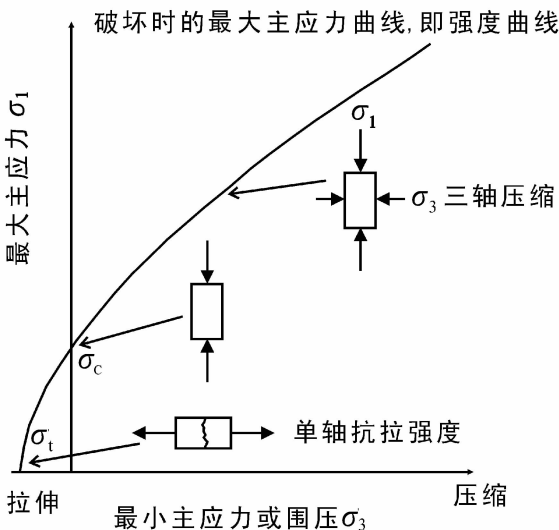


图 3 岩石破坏时最大和最小主应力关系曲线

Fig.3 Curve of relationship between the maximum principal stress and the minimum principal stress during fracturing

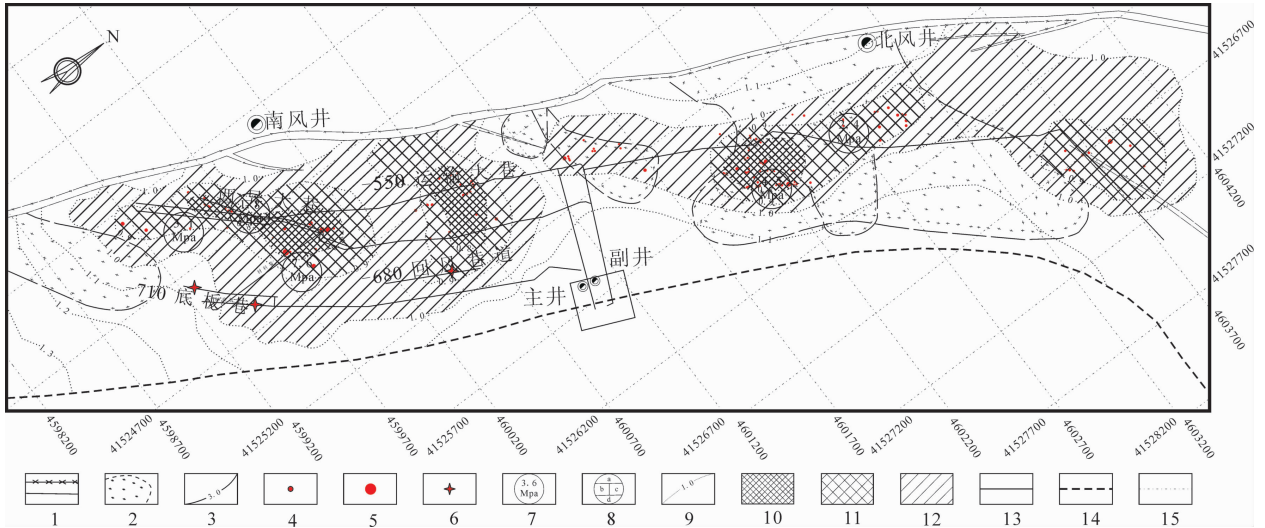


图4 红菱煤矿12号煤层突出潜在危险区预测图

- 1—断层;2—火成岩侵入区域;3—煤层厚度等值线;4—小型突出点;5—大型突出点;6—地应力测点;7—瓦斯压力测点;
- 8a—突出次数,b—始突深度,c—最大突出强度,d—平均强度;9—R值等值线;10—突出最危险区;11—突出危险区;
- 12—突出威胁区;13—巷道;14—计算边界;15—整体坐标线

Fig.4 Forecast map for the potential dangerous zone of coal and gas outburst in No. 12 coal seam of the Hongling coal mine

- 1—Fault; 2—Pyrocrystalline; 3— Contour line of coal seam; 4—Outburst of small type; 5—Outburst of large type; 6—Position of in-situ stress; 7—Position of gas pressure; 8 a—Times of outburst, b—Depth of outburst, c—The largest grade of outburst, d— Average grade; 9— Contour line of R value;10—The most dangerous zone; 11—Dangerous zone; 12—Threatening area; 13—Laneway; 14—Calculated boundary; 15—Coordinate line

均分布在 $R < 1.0$ 的区域,即存在突出危险的区域,表明应用突出破坏判断准则对区域上的煤与瓦斯突出危险区预测的可能性。根据上述结果,可对该矿老区12煤的未采区域的潜在危险区进行预测,并根据预测的突出危险程度的不同,有针对性地制定防治措施,以降低人员伤亡事故和财产损失。

5 防治措施

(1)区域性防突措施:一般包括开采保护层,预抽煤层瓦斯和煤层注水等措施。目前该矿采用保护层可采和煤层瓦斯抽放相结合的防治措施,并取得了较好的效果,预测12煤瓦斯压力为6~7 MPa,保护层开采和瓦斯抽放后,测得瓦斯压力为0.2~0.3 MPa,达到了安全开采的目的。

(2)经区域预测具有突出危险性的掘进工作面,坚持掘进预测同步进行,根据预测结果采取相应的防突措施,如深孔松动爆破、钻孔瓦斯抽放、水力冲孔、开卸压槽、水力割缝等,待工作面前方一定范围内的煤层中瓦斯压力降到安全值以下时,可采用综

掘或远距离放炮施工,即采用行之有效的局部防突措施,释放煤与瓦斯突出动力源,逐步减少或防治煤与瓦斯突出灾害。

6 结论

(1)本文在实测地应力、煤岩体力学性质及瓦斯压力的基础上,建立了力学判断准则,提出了煤层稳定性评价的定量指标,即稳定性系数R,为煤层稳定性分析提供了依据。

(2)从区域煤与瓦斯突出潜在危险区预测结果与现场实际突出情况对比可以看出,现场突出事故基本上发生在预测结果的突出危险区和威胁区,表明区域煤与瓦斯突出潜在危险区预测对区域性防突措施的选择具有一定指导意义。

(3)众所周知,力学方法预测的可靠性取决于所用地质资料和力学参数的准确度,这在地学研究中具有一定难度。煤与瓦斯突出是地质因素和非地质因素综合作用的结果,且地质体复杂多变。所以在区域预测的基础上,与局部预测相结合,以达到防灾减

灾的目的。

致谢: 现场工作得到了红菱煤矿梁俊义总工程师、王平副总工程师及瓦斯科和地质科多位工程师的帮助,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出过程中能量耗散规律的研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(2):173-178.
Jiang Chenglin, Yu Qixiang. Rules of energy dissipation in coal and gas outburst [J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21 (2): 173-178(in Chinese).
- [2] 梁冰, 章梦涛. 从煤和瓦斯的耦合作用及煤的失稳破坏看突出的机理[J]. 中国安全科学学报, 1997, 7(1):6-9.
Liang Bing, Zhang Mengtao. A sumption of the instable mechanism of coal and gas outburst from the consideration of their coupling effect and instable fracture of coal [J]. China Safety Science Journal, 1997, 7(1):6-9(in Chinese).
- [3] 文光才. 煤与瓦斯突出能量的研究[J]. 矿业安全与环保, 2003, 30(6):6-9.
Wen Guangcai. Study of coal and gas outburst energy [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2003, 30(6):6-9 (in Chinese).
- [4] 王连捷, 潘立宙, 廖椿庭, 等. 地应力测量及其在工程中的应用[M]. 北京:地质出版社, 1991:110-145.
Wang Lianjie, Pan Lizhou, Liao Chunting, et al. Crustal Stress Measurements and Their Application in Engineering [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991:110-145(in Chinese).
- [5] 王连捷, 任希飞, 丁原辰, 等. 地应力测量在采矿工程中的应用[M]. 北京:地震出版社, 1994:29-45.
Wang Lianjie, Ren Xifei, Ding Yuanchen, et al. Crustal Stress Measurements and Their Application in Mining Engineering [M]. Beijing: Seismological Press, 1994:29-45(in Chinese).
- [6] J.C.耶格, N.G.W. 库克. 岩石力学基础(中国科学院工程力学研究所译)[M]. 北京:科学出版社, 1981:478-483.
Jaeger J C, Cook G W .Fundamentals of Rock Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1981:478-483(in Chinese).
- [7] 王连捷, 王薇. 多种方法得到的地应力测量资料的综合处理[J]. 地质力学所所刊, 1989,(14):159-170.
Wang Lianjie, Wang Wei. Computation of rock stress from readings by different methods of measurements [J]. Bulletin of the Institute of Geomechanics CAGS, 1989, (14):159-170(in Chinese).
- [8] 杨小聪, 王连捷. 地应力测量的误差处理及精度评定 [J]. 地质力学学报, 2000, 6(2):53-63.
Yang Xiaocong, Wang Lianjie. Error processing and precision estimation for rock stressmeasurement [J]. Journal of Geomechanics, 2000, 6(2):53-63(in Chinese with English abstract).
- [9] 赵卫华, 孙东生, 王红才, 等. 沈阳红菱煤矿地应力测量 [J]. 地质力学学报, 2008, 14(3):286-291.
Zhao Weihua, Sun Dongsheng, Wang Hongcai, et al. Measurement of rock stress of HongLing coal mine [J]. Journal of Geomechanics, 2008,14(3):286-291 (in Chinese with English abstract).
- [10] 鲜学福, 许江, 王宏图. 煤与瓦斯突出潜在危险区(带)预测[J]. 中国工程科学, 2001, 3(2):39-46.
Xian Xuefu, Xu Jiang, Wang Hongtu. An intelligent expert system on rough sets[J].Engineering Science, 2001, 3(2):39-46(in Chinese with English abstract).
- [11] 王连捷, 孙东生, 张利容, 等. 地应力测量在岩石与 CO₂ 突出灾害研究中的应用[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1):28-32.
Wang Lianjie, Sun Dongsheng, Zhang Lirong, et al. Application of in-situ stress measurement on bursts disasters of rock and carbon dioxide gas in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1):28-32(in Chinese with English abstract).
- [12] Hoek E, Brown E T. 岩石地下工程[M]. 北京:冶金工业出版社, 1986:107-108.
Hoek E, Brown E T. Underground Excavation in Rock [M]. Beijing:Metallurgical Industry Press, 1986:107-108(in Chinese).
- [13] 王薇, 王连捷, 王红才, 等. 青藏铁路昆仑山隧道稳定性分析[J]. 地球学报, 2002, 23(4):359-362.
Wang Wei, Wang Lianjie, Wang Hongcai, et al. Stability analysis of Kunlun mountain tunnel for Qinghai-Tibet railway [J]. Acta Geoscientia sinica, 2002, 23(4):359-362 (in Chinese with English abstract).
- [14] Hoek, E, Brown, E.T. The Hoek-Brown failure criterion——a 1988 update. Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp[C]//(Curran J C ed.), Toronto, Dept. Civil Engineering, University of Toronto, 1988:31-38.
- [15] 王连捷, 周春景, 吴珍汉. 用有限元极限平衡法分析边坡的稳定性[J]. 中国地质, 2008, 35(5):1031-1036.
Wang Lianjie, Zhou Chunjing, Wu Zhenhan, et al. Slope stability analysis by the limit equilibrium method based on the finite element method[J]. Geology in China, 2008, 35(5):1031-1036 (in Chinese with English abstract).

The application of in-situ stress measurement to the study of coal and gas outburst in coal mines

SUN Dong-sheng, WANG Lian-jie, ZHAO Wei-hua, WANG Hong-cai

(Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard, MLR; Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China)

Abstract: For the purpose of reduction and prevention of coal and gas outburst disaster, the authors conducted measurement of in-situ stress and mechanical parameters of rocks, and studied geological structure and gas pressure. On such a basis, criteria were established for appropriate quantitative evaluation of the stability. The dangerous areas of coal and gas outburst were predicted regionally, and the results are consistent well with the in-situ situation. The regional and local prevention measures were put forward, which have been proved to be effective. All this suggests that the prediction of regional dangerous areas is important for the selection of prevention measures.

Key words: in-situ stress measurement; coal and gas outburst; criteria of burst; outburst danger prediction

About the first author: SUN Dong-sheng, male, born in 1980, assistant researcher, engages in the study of in-situ stress and rock mechanics; E-mail: sdsgl2005@tom.com.