

基于 Hoek-Brown 准则分析工作面围岩应力场

田茂霖^{1,2}, 肖洪天^{1,2}, 赵 军³

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 3. 同煤集团技术中心, 山西 大同 037003)

摘 要: 围岩应力场分布特征是矿山开采与巷道支护的重要依据。本研究发展了基于 Hoek-Brown 强度准则的数值方法, 并应用微地震监测资料获取岩体的力学参数, 分析了塔山煤矿特厚煤层开采工作面围岩应力场。首先通过 FISH 语言二次开发平台在 FLAC 软件中创建基于 Hoek-Brown 准则的力学模型, 然后根据微震监测得到的数据确定力学模型所需的力学参数, 最后由数值模拟得围岩应力集中区及峰值应力值。结果表明: 采用该方法所获得的数值模拟结果与塔山煤矿 8103 工作面现场监测值有较好的一致性, 为进行下一步煤层开采和超前支护方案的设计提供了依据, 也为有效利用微震监测资料提供了新思路。

关键词: Hoek-Brown 准则; 微震监测; 二次开发; 数值模拟; 围岩应力场

中图分类号: TD323

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2017)01-0078-08

Analysis of Stress Field in Surrounding Rocks of Working Face Based on Hoek-Brown Criterion

TIAN Maolin^{1,2}, XIAO Hongtian^{1,2}, ZHAO Jun³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of

Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and

Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

3. Datong Coal Group Co. Ltd, Datong, Shanxi 037003, China)

Abstract: The distribution of stress field around a working face plays a very important role in mine excavation and supporting. In this paper the stress field around the working face of extremely thick coal mining in Tashan Colliery was analyzed by developing a numerical method based on Hoek-Brown strength criterion and using the data of microseismic monitoring to determine the mechanical parameters of rock. A mechanical model based on Hoek-Brown criterion was firstly established by using the secondary development platform of FISH in FLAC. Then parameters needed by the proposed model were determined by using microseismic monitoring data. Finally, the stress concentration area of surrounding rock and the peak stress value were obtained by numerical simulation. Results show that the simulated results obtained by adopting the proposed method are in good agreement with the in-situ measurements at 8103 working face in Tashan Colliery. Thus, the proposed method can provide not only reference for the design of further coal mining and advance supporting but also a new method for the rational and effective use of microseismic monitoring data.

Key words: Hoek-Brown criterion; microseismic monitoring; secondary development; numerical simulation; stress field of surrounding rocks

收稿日期: 2015-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172242); 山东科技大学研究生科技创新基金项目(YC150216)。

作者简介: 田茂霖(1991—), 男, 山东新泰人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程数值方法研究。E-mail: maolintml@163.com

肖洪天(1964—), 男, 河北孟村人, 教授, 博士生导师, 主要从事梯度材料断裂力学新型边界元法研究, 本文通信作者。E-mail: xiaohongtian@tsinghua.com

随着计算机技术、数字技术、量化地震学和地球物理学的快速发展,微地震监测技术在加拿大、澳大利亚、南非等国的矿山中得到了广泛应用。但国内应用相对较少,姜福兴等^[1-2]成功研制 BMS 微震监测系统,取得了很好的研究成果;徐奴文等^[3-4]用于岩质边坡稳定性分析;杨承祥等^[5]用于研究深井地压开采活动规律;陈炳瑞等^[6]结合声发射和微震监测技术对锦屏二级水电站深埋隧洞岩体损伤及岩爆问题进行了研究。通常在现场微地震监测中可获得微地震事件的空间分布规律,但如何充分利用微地震监测资料一直是微地震分析的重要一环。

对于微地震监测的研究一般采用统计分析和数值计算的方法,但数值计算结果的准确性往往取决于岩体力学参数和本构模型的选取,科学选取岩体力学参数是准确分析工程问题的重要前提。国内外学者在工程实践的基础上,总结出了多种用于确定岩体强度参数的方法,如数值分析法、工程类比法、参数反演法等^[7-8],但准确确定工程岩体力学参数仍十分困难。

很多学者对 FLAC 及 FLAC^{3D}的二次开发工作进行了大量研究^[9-10],本研究基于 Hoek-Brown 强度准则(以下简称 H-B 准则),利用微地震监测资料确定开采扰动煤岩体力学参数,在 FLAC 提供的 FISH 语言二次开发平台中,对 FLAC 自带的 Mohr-Coulomb 准则模型(以下简称 M-C 准则)进行改造,成功开发出等效 M-C 准则的计算模型,并将其用于分析塔山煤矿工作面围岩应力场。

1 强度准则的选取

1.1 H-B 准则

H-B 准则^[11-12]是由 Hoek 和 Brown 通过对 Bougainville 矿山岩石大量测试以及室内三轴试验,再进行曲线拟合后得出的。为了使其能更好地用于实际工程,Hoek 等^[9]对 H-B 准则进行了修正,得到广义 H-B 准则

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

式中, σ_1 、 σ_3 为岩体破坏时的最大、最小主应力, σ_{ci} 为岩块单轴抗压强度, m 和 s 为与岩石特性有关的材料常数, m 反映岩石的软硬程度, s 反映岩体破碎程度, a 为针对不同岩体的经验参数。

$$m = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right); \quad (2)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right); \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} [\exp(-GSI/15) - \exp(-20/3)] \quad (4)$$

式中: GSI 为地质质量指标,由工程岩体的岩体结构、结构面特征等因素综合确定; m_i 为完整岩石材料参数; D 为扰动权重系数。

H-B 准则与 M-C 准则相比,可更好地反映扰动后岩体的非线性破坏特征,更符合工程实际。因此,有必要将 H-B 准则参数转化成等效 M-C 准则强度参数,以便更好在数值软件中应用。

1.2 基于 H-B 准则的等效 M-C 准则

通过 H-B 准则参数 m 、 s 和 a ,计算 M-C 准则中的黏聚力和内摩擦角是 H-B 准则在岩土工程数值模拟软件中得以应用的关键。H-B 准则与 M-C 准则之间并没有直接的关系,但可以通过大小主应力表示的直线型 M-C 准则来计算黏聚力和内摩擦角。M-C 准则的直线型表达式为

$$\sigma_1 = k\sigma_3 + \sigma_{ci} = k\sigma_3 + b \quad (5)$$

式中: k 为斜率; b 为截距,其值等于 σ_{ci} 。

黏聚力和内摩擦角的表达式分别为:

$$\sin\varphi = \frac{k-1}{k+1}, c = \frac{\sigma_{ci}}{2\sqrt{k}} \quad (6)$$

Hoek 等^[13]提出广义 H-B 准则的同时,提出了估算等效 M-C 强度参数的计算公式为:

$$\varphi = \sin^{-1} \left[\frac{3am(s + m\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) + 3am(s + m\sigma_{3n})^{a-1}} \right]; \quad (7)$$

$$c = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m\sigma_{3n}] (s + m\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + [6am(s + m\sigma_{3n})^{a-1}] / [(1+a)(2+a)]}}. \quad (8)$$

式中, $\sigma_{3n} = \sigma_{3\max} / \sigma_{ci}$, $\sigma_{3\max}$ 为等效条件下最小主应力上限值, 与工程岩体的类型有关。

岩石的弹性模量是描述岩体变形特性的重要参数, Hoek 等^[14] 引入扰动权重系数 D 获得弹性模量修正公式为:

$$E = E_i \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + \exp((60 + 15D - GSI)/11)} \right). \quad (9)$$

式中为 E_i 完整岩石的弹性模量。

本文选取等效 M-C 准则进行应力场分析, 综合考虑岩体强度、结构面强度、岩块结构等多种因素的影响, 可更好地反映扰动后岩体的非线性破坏特征, 更符合工程实际。

1.3 等效 M-C 准则在 FLAC 中的二次开发

等效 M-C 准则计算模型通过 FISH 语言二次开发平台在 FLAC 中实现, 由于等效 M-C 准则计算模型是在 M-C 本构模型基础上改造而来, 所以选择 M-C 模型为开发蓝本进行二次开发, 等效 M-C 准则计算模型在 FLAC 中计算流程如图 1 所示。

2 强度准则参数的确定

确定等效 M-C 准则参数, 首先要确定 H-B 准则的 4 个基本参数: 完整岩石单轴抗压强度 σ_{ci} , 由单轴压缩试验得到; 完整岩石材料参数 m_i , 可由实验室单轴试验得到, 若无实验数据, 可查表^[15] 确定; 扰动权重系数 D , 其取值范围为 $0 \sim 1$, $D=0$ 表示非扰动岩, $D=1$ 表示扰动剧烈岩体, Hoek 等^[12] 给出了 D 的建议值; 地质质量指标 GSI , 其取值范围为 $0 \sim 100$, 常见岩体的 GSI 值在 $10 \sim 100$ 之间。可引入岩体质量 RMR 分级法定量得到岩体质量等级, Hoek 等^[12] 建立了 GSI 值和 RMR 值间的关系式, 对于 $GSI > 25$ 的岩体:

$$GSI = RMR_{76}, RMR_{76} > 18; \quad (10)$$

$$GSI = RMR_{89} - 5, RMR_{89} > 23. \quad (11)$$

式中, RMR_{76} 、 RMR_{89} 为 Bieniawski 分类系统值。

确定地质质量指标 GSI 值, 需计算微震震源尺寸, 采用 Cai 等^[17] 提出的拉伸震源模型计算震源尺寸, 模型假设裂纹均为 I 型裂纹, 裂纹开裂方向平行于最大主应力方向, 且裂纹面没有错位现象, 模型方程为

$$\frac{-8(1-\mu^2)\sigma_n^2 r^3}{3E} + 2\pi\gamma_s r^2 + E_0 = 0. \quad (12)$$

式中: σ_n 为裂纹面上正应力; E 为完整岩石弹性模量; μ 为完整岩石泊松比; r' 为半裂纹长度; γ_s 为表面能; E_0 为监测到微震能量, 可通过微震监测资料计算得来。

在计算 GSI 时, 将监测到的微震事件产生的裂隙视为新的节理面与岩体中存在的断层、节理构成扰动

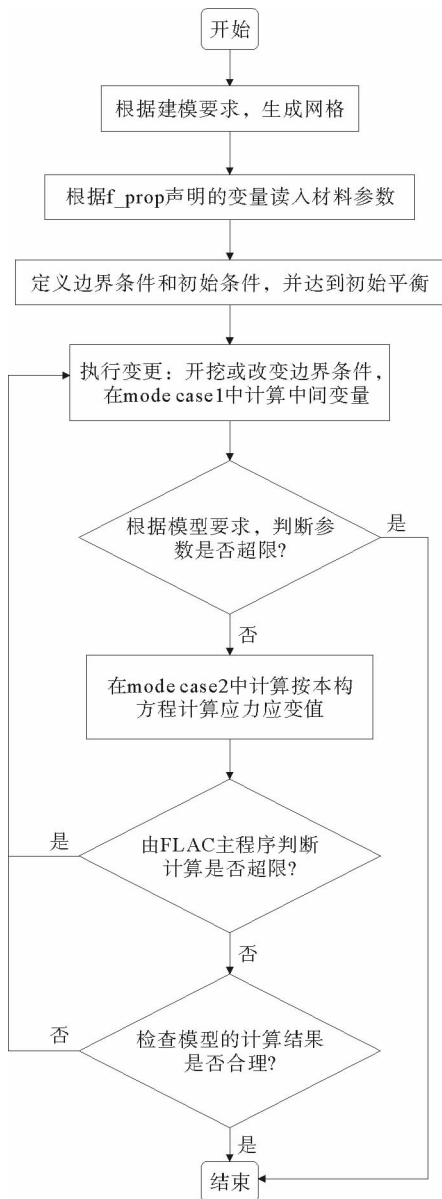


图 1 等效 M-C 准则模型计算流程图

Fig. 1 Program flowchart of the numerical model

后的岩体,扰动后岩体的 RMR 值可通过节理因子 J_f 计算得到,关系式^[15]为

$$RMR = 100 - (J_f/5) \quad (13)$$

式中: $J_f = J_n/nr$, J_n 为岩体节理线密度,即节理间距的倒数; n 为节理倾角因子,反映节理面与最大主应力 σ_1 夹角对岩体强度的影响; r 为节理强度参数,与节理面强度有关。 n 、 r 均可查表得到^[15-16]。

本研究引入微地震活动对岩体的扰动影响,令 $J_n = J_{ni} + J_{nm}$, J_{ni} 为岩体受扰动前节理线密度; J_{nm} 为微地震产生的节理的线密度。扰动前节理线密度 J_{ni} 的值,可采用测线法统计获得,对于岩质边坡工程,可在岩体露头的某一方向上布置多组勘测线,获得节理线密度;对于巷道、隧道等地下工程,可在巷道、隧道的两帮及顶板布置测线获节理线密度,为获得理想的测量结果,对巷道进行区域划分,在每个区域的两帮及顶板处间隔布置多组测线,求取该区域的节理线密度均值作为该区域节理线密度,并以此近似代替岩体内节理线密度。微地震产生节理线密度 J_{nm} 的值,可结合拉伸震源模型确定的震源尺寸、节理面倾角等,由震源分布位置及尺寸绘制相应的分布图,沿竖直方向间隔布置多条测线,统计每条测线上的节理数,最后取其平均值即得 J_{nm} 。

3 工程实例

3.1 塔山煤矿 8103 工作面微震监测

塔山煤矿 8103 工作面为典型特厚煤层综放工作面,主采煤层平均厚度为 15 m,煤层倾角 $2^\circ \sim 5^\circ$,为特厚近水平煤层。工作面地表标高 1 408~1 561 m,底板标高 1 010~1 045 m,埋深 398~516 m,顶、底板为粉砂岩和粗砂岩。由于 8103 工作面煤层厚度大,放顶煤厚度大,且煤层含有多层夹矸,夹矸硬度大,影响顶煤的冒落方式,并有火成岩入侵,煤层与顶板受到不同程度的破坏,开采难度极大。在此之前由于顶板和顶煤受力及活动情况不清楚,工作面曾多次出现压架事故。

8103 工作面的微震监测资料^[18]显示,11 月份共进行 27 天监测,监测期间工作面共推进 181.18 m,工作面平均进尺 6.71 m/d。微震事件走向分布见图 2,深色点代表震源位置。在走向上微震集中分布在距切眼位置 250~600 m 的范围内,在距离切眼 350~500 m 处的顶板位置,有两条“穿面”断层,随着工作面的开采,断层区活化,导致此区域频繁出现微震事件;在高度方向上,顶板 0~100 m 范围内微震事件密集分布,100~200 m 范围内微震事件分布较分散。

3.2 塔山煤矿岩体力学参数确定

塔山煤矿完整岩石力学参数值见表 1。

GSI 的取值可结合图 2 进行分区域讨论,将微震事件分布密集区分成基本顶、直接顶和底板三个关键区域,其他区域距开采煤层较远,且监测到的微地震事件分散,故按原始岩体参数取值。各关键区域 GSI 值如表 2 所示。

为提高数值模型运算效率,结合岩层分布状况,对 GSI 取值进行分岩层简化,结合查表得 σ_{ci} 、 m_i 和 D ,得到塔山煤矿 4 个基本参数值如表 3 所示。

3.3 FLAC 数值模型的构建

结合矿区开采情况,避免边界效应,采用大模型,模型尺寸为:水平方向为 1 000 m,竖直方向为 815 m。

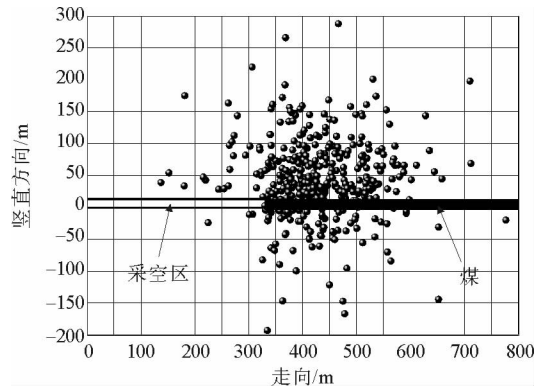


图 2 工作面微震事件走向分布图

Fig. 2 Distributions of the microseismic events along the strike for working face

表 1 塔山煤矿完整岩石力学参数值

Tab. 1 Complete coal and rock mechanics parameters of Tashan Colliery

岩层	σ_{ci}/MPa	E/GPa	μ	$\varphi/(\text{^\circ})$	c/MPa
粉砂岩	49.67	23.17	0.15	41.64	9.11
粗砂岩	44.54	24.55	0.22	48.23	8.69
泥岩	39.72	18.35	0.15	32.00	4.98
煤	27.00	4.18	0.30	34.45	1.43

其中,煤层厚度为 15 m,倾角为 0°,煤层上覆岩层厚度取 500 m,底板岩层厚度取 300 m。为使数值计算更加准确,对模型的煤层及其顶板 150 m 和底板 100 m 范围进行加密处理,模型网格总数为 27 599 个。模型 y 方向顶边为自由边界, y 方向底边限制竖向位移, x 方向各边界均限制水平位移,根据矿区实测值赋予模型初始应力,等效 M-C 准则计算模型的各煤层岩层参数详见表 1、表 3。

表 2 8103 工作面关键区域 GSI 取值表

Tab. 2 Value of GSI in critical regions of the 8103 working face

距开切眼的距离		300~350 m	350~400 m	400~450 m	450~500 m	500~550 m	550~600 m
基本顶	100~150 m	$J_{ni}=48$	$J_{ni}=60$	$J_{ni}=60$	$J_{ni}=60$	$J_{ni}=48$	$J_{ni}=48$
		$J_{nm}=2$	$J_{nm}=9$	$J_{nm}=10$	$J_{nm}=4$	$J_{nm}=3$	$J_{nm}=2$
		$GSI=74$	$GSI=69$	$GSI=69$	$GSI=71$	$GSI=74$	$GSI=74$
	50~100 m	$J_{ni}=48$	$J_{ni}=60$	$J_{ni}=60$	$J_{ni}=60$	$J_{ni}=48$	$J_{ni}=48$
		$J_{nm}=14$	$J_{nm}=18$	$J_{nm}=21$	$J_{nm}=16$	$J_{nm}=16$	$J_{nm}=8$
		$GSI=71$	$GSI=67$	$GSI=65$	$GSI=68$	$GSI=70$	$GSI=73$
直接顶	0~50 m	$J_{ni}=48$	$J_{ni}=60$	$J_{ni}=60$	$J_{ni}=60$	$J_{ni}=48$	$J_{ni}=48$
		$J_{nm}=12$	$J_{nm}=21$	$J_{nm}=26$	$J_{nm}=16$	$J_{nm}=18$	$J_{nm}=6$
		$GSI=65$	$GSI=57$	$GSI=53$	$GSI=60$	$GSI=63$	$GSI=68$
底板	-50~0 m	$J_{ni}=48$	$J_{ni}=60$	$J_{ni}=60$	$J_{ni}=60$	$J_{ni}=48$	$J_{ni}=48$
		$J_{nm}=6$	$J_{nm}=16$	$J_{nm}=15$	$J_{nm}=13$	$J_{nm}=5$	$J_{nm}=4$
		$GSI=69$	$GSI=62$	$GSI=62$	$GSI=63$	$GSI=69$	$GSI=69$

表 3 塔山煤矿 H-B 准则基本参数取值表

Tab. 3 Basic parameters values of Hoek-Brown criteria for Tashan Colliery

位置	岩层	岩层厚度/m	σ_{ci}/MPa	m_i	D	GSI
基本顶	粉砂岩	50	49.67	9	0.7	70
	粗砂岩	50	40.54	16	0.7	68
直接顶	粉砂岩	30	49.67	9	0.7	60
	泥岩	20	39.72	4	0.7	59
煤层	煤	15	27.00	15	0.7	55
底板	粉砂岩	30	49.67	9	0.7	66
	粗砂岩	20	40.54	16	0.7	66

3.4 数值模拟结果及分析

3.4.1 8103 工作面走向数值模拟结果及分析

开采 100 m 工作面超前应力分布如图 3 所示,结合图 4 开采 100 m 顶板竖向应力曲线,可以看到,受工作面开采影响,工作面超前应力分布分为三个区域:距工作面煤壁约 70 m 范围内为采动影响剧烈区(应力峰值区);距工作面煤壁约 70~110 m 的范围为采动影响明显区;距工作面煤壁 110~160 m 为采动影响弱化区。数值模拟计算得到的原岩应力约为 12.5 MPa,采动影响剧烈区应力约为 19 MPa,应力集中系数为 1.52;采动影响明显区应力约为 16.5 MPa,应力集中系数为 1.32;采动影响弱化区应力约为 13.5 MPa,应力集中系数为 1.08。高度方向,煤层上方 0~100 m 范围内应力集中较为明显,高度方向采动影响区与微地震活动分布密集区相符。

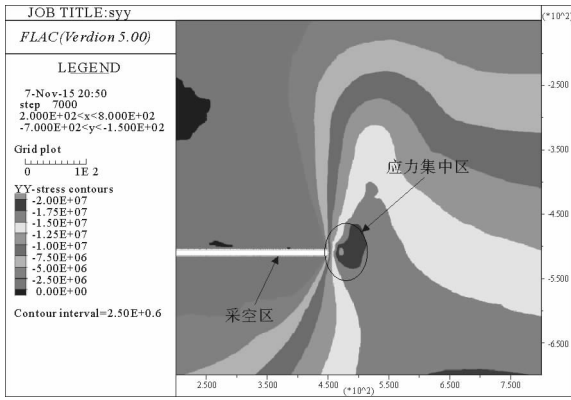


图 3 开采 100 m 工作面超前应力分布

Fig. 3 Distributions of the advance stress of caving 100 m coal in working face

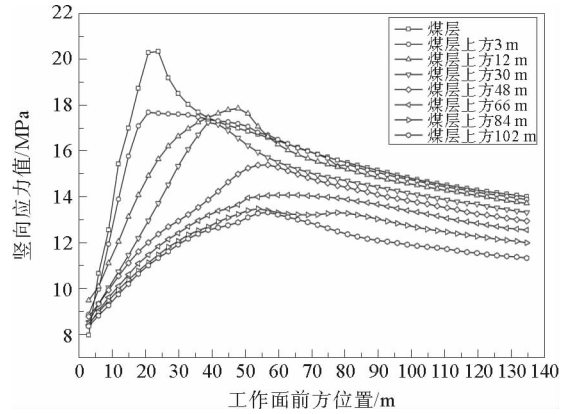


图 4 开采 100 m 沿走向顶板竖向应力曲线

Fig. 4 Vertical stress curve of caving 100 m coal along the strike

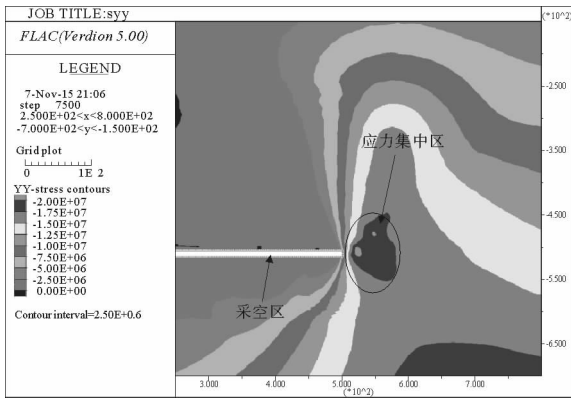


图 5 开采 150 m 工作面超前应力分布

Fig. 5 Distributions of the advance stress of caving 150 m coal in working face

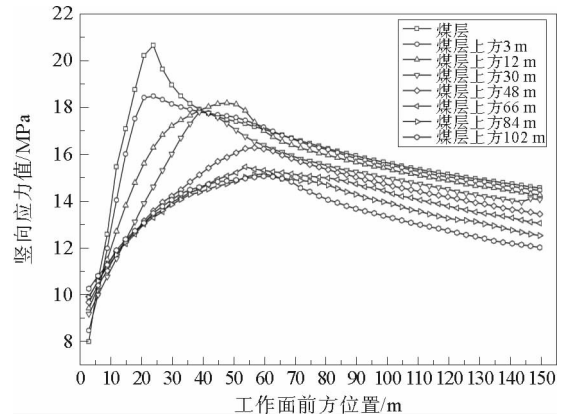


图 6 开采 150 m 沿走向顶板竖向应力曲线

Fig. 6 Vertical stress curve of caving 150 m coal along the strike

开采 150 m 工作面超前应力分布如图 5 所示,结合图 6 开采 150 m 顶板竖向应力曲线得到,工作面超前应力分布分为三个区域:距工作面煤壁约 80 m 范围内为采动影响剧烈区(应力峰值区);距工作面煤壁约 80~130 m 的范围内为采动影响明显区;距工作面煤壁 130~200 m 为采动影响弱化区。数值模拟计算得到的原岩应力约为 12.5 MPa,在采动影响剧烈区最大应力约为 20.6 MPa,应力集中系数为 1.65,在采动影响明显区应力约为 18 MPa,应力集中系数为 1.32,在采动影响弱化区应力约为 13.9 MPa,应力集中系数为 1.08。高度方向,煤层上方 0~100 m 范围内应力集中较为明显,与微地震活动分布密集区相符。

结合微地震监测并对比图 3 与图 5 的超前应力分布图可得,随着工作面不断推进,开采造成的微震事件增多,微震产生的节理数也不断增加,进一步降低岩体强度参数,造成工作面围岩应力场增大,对支护方案提出了更高的要求。

根据微地震监测和数值模拟结果及顶板竖向应力曲线图 4 和图 6 得,工作面高位顶板超前煤壁 75 m 左右受工作面开采影响明显,顶板在此处开始断裂,中部超前支撑压力范围位于煤壁前方约 75 m 处,采动影响剧烈区在煤壁前方 50 m 范围内,根据岩石力学理论,可得超前支护段范围可取 50 m。在超前支护段内,岩体已经破坏,裂隙发育,采用超前预注浆方法进行加固处理。

3.4.2 8103 工作面倾向数值模拟结果及分析

倾向数值模拟结果如图 7 所示,可以看出,受工作面开采影响,侧向煤柱应力分布可分为三个区域:应力

峰值区,距工作面顺槽约 25~35 m 范围内,应力峰值约为 21.1 MPa,应力集中系数为 1.69;高应力区,距工作面顺槽约 35~70 m 范围内,应力约为 18.5 MPa,应力集中系数为 1.48;采动影响弱化区,距工作面顺槽约 70~150 m 范围内,应力约为 15.5 MPa,应力集中系数为 1.24。其中原岩应力为 12.5 MPa。

不同应力区域微地震事件分布如图 8 所示,可以看出,侧向煤柱微地震事件分布密集区为高应力区,从而说明微地震监测技术可以对特厚煤层综放面围岩运动及矿井动力灾害进行有效预警。

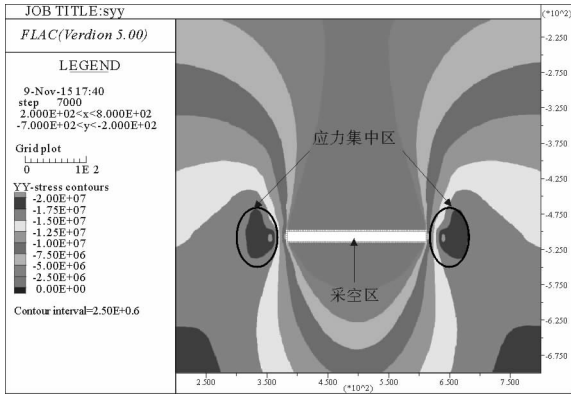


图 7 侧向煤柱垂直应力分布
Fig. 7 Distributions of the vertical stress of lateral pillar

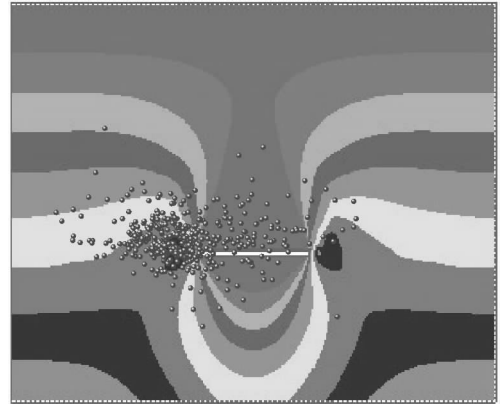


图 8 不同应力区域微地震事件分布
Fig. 8 Distributions of the microseismic events in different stress areas

4 结论

1) 塔山特厚煤层综放开采引起的围岩应力场较一般煤层开采更复杂。基于 H-B 强度准则,并利用微震监测资料确定岩体的力学参数,提出的方法可以较好地获取复杂开采条件下的煤岩体力学参数。然后,将等效 M-C 准则计算模型在 FLAC 软件中实现对复杂问题的分析。该分析方法可以更好模拟采场应力分布,为微震监测数据的利用提供了较为合理的方法。

2) 结合微震监测资料和数值分析结果可以发现,塔山煤矿采动影响剧烈区约分布在工作面煤壁前方 0~60 m 范围内,该区域内垂直应力集中系数约为 1.65,岩体破坏严重,故采用超前支护方式加固,支护段范围可取 50 m。工作面侧向煤柱微地震事件分布密集区范围与侧向煤柱高应力区范围一致,表明微震监测可以对开采工作面围岩应力场分布进行有效预测。

参考文献:

[1]姜福兴,叶根喜,王存文,等.高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J].岩石力学与工程学报,2008,27(9):1932-1938.
JIANG Fuxing, YE Genxi, WANG Cunwen, et al. Application of high-precision microseismic monitoring technique to water inrush monitoring in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1932-1938.

[2]孔令海,姜福兴,刘杰,等.基于高精度微震监测的特厚煤层综放工作面顶板运动规律研究[J].北京科技大学学报,2010,32(5):552-558.
KONG Linghai, JIANG Fuxing, LIU Jie, et al. Roof strata movement in extra-thick coal seam in fully mechanized sublevel caving mining based on high precision microseismic monitoring system[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(5): 552-558.

[3]徐奴文,唐春安,沙椿,等.锦屏一级水电站左岸边坡微震监测系统及其工程应用[J].岩石力学与工程学报,2010,29(5):915-925.
XU Nuwen, TANG Chunan, SHA Chun, et al. Engineering applications to left bank slope of Jingping I hydropower station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 915-925.

[4]徐奴文,梁正召,唐春安,等.基于微震监测的岩质边坡稳定性三维反馈分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增1):

3093-3014.

XU Nuwen, LIANG Zhengzhao, TANG Chunan, et al. Three-dimensional feedback analysis of rock slope stability based on microseismic monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 3093-3014.

[5] 杨承祥, 罗周全, 唐礼忠. 基于微震监测技术的深井开采地压活动规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 818-824.

YANG Chengxiang, LUO Zhouquan, TANG Lizhong. Study on rule of geostatic activity based on microseismic monitoring technique in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 818-824.

[6] 陈炳瑞, 冯夏庭, 曾雄辉, 等. 深埋隧道 TBM 掘进微震实时监测与特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 275-283.

CHEN Bingrui, FENG Xiating, ZENG Xionghui, et al. Real-time microseismic monitoring and its characteristic analysis during TBM tunneling in deep-buried tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 275-283.

[7] 陈晓祥, 谢文兵, 荆升国, 等. 数值模拟研究中采动岩体力学参数的确定[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(3): 341-345.

CHEN Xiaoxiang, XIE Wenbing, JING Shengguo, et al. Determination of mechanics parameters of mining induced rock mass for numerical simulation[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2006, 23(3): 341-345.

[8] 李同录, 罗世毅, 何剑, 等. 节理岩体力学参数的选取与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2182-2186.

LI Tonglu, LUO Shiyi, HE Jian, et al. Determination and application of mechanical parameters for jointed rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2182-2186.

[9] 张玉宝, 赵同彬, 谭云亮, 等. 基于 Z-P 准则的煤巷围岩稳定性数值模拟研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2014, 33(2): 75-80.

ZHANG Yubao, ZHAO Tongbin, TAN Yunliang, et al. Numerical study on the stability of wall rock in coalroad based on Z-P criterion[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2014, 33(2): 75-80.

[10] 陈育民, 刘汉龙, 邓肯-张本构模型在 FLAC^{3D} 中的开发与实现[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2123-2126.

CHEN Yumin, LIU Hanlong. Development and implementation of Duncan-Chang constitutive model in FLAC^{3D}[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2123-2126.

[11] BROWN E T. Strength of models of rock with intermittent joints[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Div, 1970, 96(6): 1935-1949.

[12] HOEK E, KAISER P K, BAWDEN W F. Support of underground excavations in hard rock[M]. Rotterdam: Balkema, 1995.

[13] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1997, 34(8): 1165-1186.

[14] HOEK E, DIEDERICH M S. Empirical estimation of rock mass modulus[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(2): 203-215.

[15] RAMAMURTHY T. A geo-engineering classification for rock and rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41: 89-101.

[16] RAMAMURTHY T, ARORA V K. Strength prediction for jointed rocks in confined and unconfined states[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1994, 31(1): 9-22.

[17] CAI M, KAISER P K, MARTIN C D. A tensile model for the interpretation of microseismic events near underground openings[J]. Pure Applied Geophysics, 1998, 153: 67-92.

[18] 于斌, 赵军, 姜福兴, 等. 塔山煤矿特厚煤层综放开采覆岩破坏微震监测研究[R]. 大同: 同煤集团, 2008: 32-61.

(责任编辑: 吕海亮)