

文章编号: 1673-3363-(2013)04-0495-06

深部原岩应力对巷道围岩破裂范围的影响规律研究

杨旭旭, 靖洪文, 陈坤福, 王文龙

(中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要 为研究煤矿深部原岩应力对巷道围岩破裂范围的影响规律, 采用空心包体法在郅城千米埋深煤矿井底车场进行地应力实测, 得到了煤矿深部原岩应力状态, 并应用声波测试方法, 测量得到了不同巷道帮部的围岩破裂范围。将原岩应力转化为与巷道帮部直墙面平行截面上的初始径向应力和初始剪切应力, 研究不同初始应力状态下巷道围岩破裂范围发现: 初始径向应力对深部围岩破裂范围影响较为显著, 且初始径向应力越大破裂范围就越小; 而初始剪切应力对围岩破裂范围的影响显著性较小。此外, 实测结果还证实了围岩岩性和巷道断面大小是影响围岩破裂范围的重要因素。

关键词 原岩应力; 围岩破裂范围; 初始径向应力; 初始剪切应力

中图分类号 TD 325

文献标志码 A

Study on influence law of in-situ stress in deep underground rocks on the size of failure zone in roadway

YANG Xu-xu, JING Hong-wen, CHEN Kun-fu, WANG Wen-long

(State Key Laboratory for Geo-Mechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract In order to study the influence law of deep underground in-situ stress on the size of failure zone in surrounding rocks of mining roadway, an in-situ stress measurement was conducted under Yuncheng one kilometer-depth mine by means of hollow inclusion gauge method, and the in-situ stress state around the shaft station was obtained. Then the sizes of surrounding rocks' failure zone in the walls of different roadways were measured with acoustic wave. The in-situ stress was transferred into initial radial stress and initial shearing stress on the vertical walls' parallel sections. Through comparing the sizes of failure zones under different initial stress state, it was discovered that the influences of initial radial stress on failure zone in surrounding rocks were remarkable and the range of failure zones would be smaller with higher initial radial stress. Nevertheless, the influences of initial shearing stress were much less obvious. Besides, the measuring results also confirmed that the property of surrounding rocks and the size of roadway section were significant factors influencing the dimensions of failure zone.

Key words in-situ stress; size of failure zone; initial radial stress; initial shearing stress

收稿日期: 2012-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51074162); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ12_0938, CXLX13_943)

作者简介: 杨旭旭(1989-), 男, 山东省金乡县人, 博士, 主要从事岩石力学与工程以及巷道支护理论与技术方面的研究。

E-mail: yangxucumt@126.com

Tel: 18952160249

地应力又称岩体初始应力或原岩应力,是天然环境下地壳岩体内所固有的应力状态,主要由自重应力场和构造应力场组成^[1-2]。原岩应力是造成煤矿巷道、隧道、硐室等地下工程变形和破坏的根本作用力^[3],是决定围岩稳定性的重要因素。随着煤矿采深的不断加大,地下力学环境越来越复杂,传统的依靠经验来进行支护设计的方法已不再适用^[4]。

国内外学者对于原岩应力对巷道围岩破坏的影响作用进行大量研究^[5-7],有的学者甚至采用原岩应力对巷道围岩的作用规律反演地应力状态^[8-10]。如赵继银等^[5]为研究构造应力场对深井巷道围岩稳定性的影响,采用数值模拟的方法对巷道在构造应力场中不同布置方向的稳定性进行了分析,得出随着巷道轴向与构造应力场方向夹角的增大,巷道围岩受力状况逐渐趋于恶化的结论;张宜虎等^[7]深入研究了围岩片帮面上张拉裂纹的成因机制,明确了巷道围岩片帮破坏特征与地应力方向的关系;陆家佑^[9]、汪波^[10]等则研究了岩体初始应力对隧洞围岩岩爆的影响作用,并利用岩爆破坏形迹反演原岩应力。上述成果多是基于连续介质的弹塑性理论进行研究的,与巷道围岩中存在大量节理和软弱结构面的工程实际不符,而且在研究巷道围岩变形破坏时也没有考虑支护体的作用。

1 煤矿深部原岩应力量测

1.1 工程背景

郛城煤矿位于山东省郛城县境内,是巨野矿区规划建设的7对矿井之一,井田位于巨野煤田最北端,井田南北长约16~19 km,东西宽约9~14 km,面积约198 km²。井田为全隐蔽的华北型石炭、二叠系煤田。井田构造发育情况明显受区域构造控制,主要褶曲轴向、断层走向多与区域性断裂——田桥断层、汶泗断层走向一致,西部煤系地层露头走向则基本与田桥断层平行。井田总体呈走向近南北,倾向东的单斜构造,发育次一级宽缓褶曲并伴有一定数量的断层,中西部煤系地层中有岩浆岩侵入,构造复杂程度属中等偏复杂。

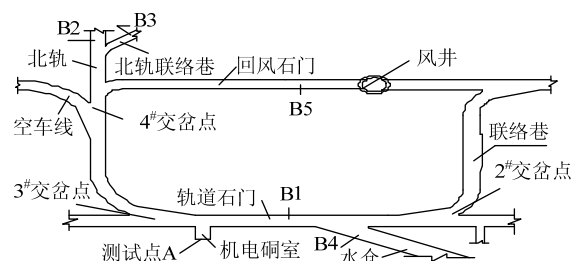
煤矿井底车场位于-860 m水平,埋深近千米,属于深部地下工程范围。由于前期对深部地下力学环境认识不足,支护设计不合理,以及巷道中泥质软岩在水的作用下软化膨胀等作用,引起巷道和硐室的较大变形,原巷道支护结构严重挤压破坏,造成了巨大的经济损失。为确保煤矿建设的安全及进度,对井底车场开拓水平地应力的大小和方向进行

了测量,得到了煤矿深部原岩应力状态。对巷道的支护结构重新进行了设计,在原设计基础上增强了外部支护结构的刚度和强度,并在新掘和返修巷道中应用。为了验证新的支护结构是否可有效地控制巷道稳定性,采用声波测试方法对巷道帮部围岩的破裂区范围进行了量测。

1.2 测量方法及测点布置

采用空心包体应变计对郛城煤矿地应力进行应力解除测量。所谓空心包体应变计是把应变片粘贴在预制的环氧树脂薄筒上,再浇注一层薄的环氧树脂制成的应变计^[11]。空心包体法测量较为准确,在煤矿的地应力测量实践中,得到大量应用^[12-15]。

由于深部地下工程复杂的地质和力学环境,选择合适的测站位置对减小测量结果的误差具有重要的意义。结合郛城煤矿的具体条件,根据一般地应力测点的确定原则^[16],以轨道石门3#交岔点处机电硐室(未投入使用)为测站钻取3个测孔,其中1#测孔由于在测量过程出现塌孔,只采用了2#和3#测孔的测量数据。测站的具体位置如图1。



A — 地应力测站; B1~B5 — 声波测试测站

图1 测站布置图

Fig.1 Disposition of measuring station

1.3 测量过程及数据

空心包体法测量地应力的主要过程包括:1) 施工地应力测量导孔,导孔的深度为测试巷道跨度的3~5倍,直径为130 mm;2) 在导孔孔底使用变径钻头施工变径孔后,钻取1个同心的直径为38 mm的安装小孔,该孔深度为0.40 m,取出的岩芯岩性为砂岩,岩性稳定,取芯完整,取芯率较高,岩石质量指数RQD可达80%;3) 采用黏结的方法安装空心包体应变计,黏结剂固化约24 h后,对装有应力计的岩体进行了套芯应力解除。应力解除完成后,得到2#测孔和3#测孔解除岩样及相应的应力解除应变值。

将稳定下来的应变平均值作为解除终值,减去初始值得到各测点应变值,见表1。

表 1 解除应变平均变化值($\mu\epsilon$)
Table 1 Average change values of strain rescission

通道	2#孔	3#孔	通道	2#孔	3#孔
1	1 385	1 848	7	1 704	1 144
2	1 825	867	8	1 625	1 589
3	1 673	1 547	9	1 477	1 922
4	1 585	1 454	10	1 975	1 820
5	1 590	1 158	11	1 692	1 767
6	1 794	1 779	12	1 894	2 137

1.4 测量结果

用钻孔得到的岩芯经加工成标准试样后在试验机上分别进行单轴压缩试验，获得两测孔所对应的岩样力学参数值，见表 2。

表 2 岩样的力学参数
Table 2 Mechanical parameters of rock samples

试样	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
2#孔	89.88	14.1	0.28
3#孔	85.38	11.7	0.30

根据表 1，2 中的解除应变值和力学参数，利用相应的软件计算测试结果，得到郅城煤矿深部原岩应力状态，见表 3。

表 3 郅城煤矿地应力测试结果
Table 3 The results of in-situ measurement in Yuncheng coal mine

测孔	主应力	测量值/MPa	倾斜角/(°)	方位角/(°)
2#孔	σ_1	33.3	15.3	130.1
	σ_2	14.0	12.1	36.7
	σ_3	13.1	70.3	270.0
3#孔	σ_1	30.4	17.6	127.6
	σ_2	13.1	10.2	34.0
	σ_3	11.0	76.3	261.7
平均值	σ_1	31.9	16.5	128.9
	σ_2	13.6	11.2	35.4
	σ_3	12.1	73.3	265.8

2 原岩应力对巷道围岩破裂范围的影响

2.1 巷道围岩破裂范围量测

为了得到郅城煤矿深部巷道围岩的破裂范围，采用声波测试仪对巷道围岩松动圈进行了测量。声波测试是常用的获得巷道围岩松动圈范围的方法之一^[17]，其基本测试方法及原理^[18]为：在巷道围岩内钻一定深度的孔，然后将声波探头置入钻孔内，孔内注满水以使探头与孔壁岩体耦合，从里至外逐点测试，获得各个测点的波速值，波速值较小的测

试范围(设波速值 < 2 500 m/s)即为围岩破裂区范围，如图 2 所示。在郅城煤矿井底车场共设置了 5 个测站，各测站布置如图 1 所示。在各测站位置，垂直于巷道帮部直墙面钻孔 5~6 m，各测站围岩破裂区范围测量结果见表 4。

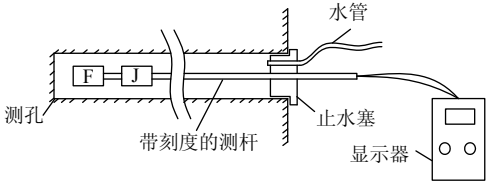


图 2 声波测试方法
Fig.2 Acoustic test method

表 4 围岩破裂区范围测试结果
Table 4 The measuring results of broken zone size in inclosing rocks

测站	破裂区范围/m	测站位置	断面面积/m ²	岩性
B1	2.5	轨道石门	34	泥质砂岩
B2	2.2	北 轨	34	泥质砂岩
B3	1.6	北轨联络巷	17	泥质砂岩
B4	1.4	水 仓	17	泥质砂岩
B5	2.4	回风石门	34	细砂岩

注：测试巷道断面形式为直墙圆拱巷道，采用“锚网喷+钢拱架”支护形式。

2.2 初始径向应力与初始剪切应力

巷道在开挖扰动后，围岩内部产生应力重分布。以巷道帮部表面围岩为例，垂直于巷道表面的径向应力减小为 0，而平行于巷道表面的切向应力则因为应力集中增大至围岩破坏，切向应力下降；随后切向应力峰值向围岩内部移动，但由于已破坏围岩仍具有一定的抵御压力的作用，造成随着围岩岩体距离巷道表面越深切向应力峰值越小，径向应力值越大，直到低于围岩岩体的强度应力逐渐稳定下来趋于原岩应力值。可以看出，应力重分布是造成围岩岩体破坏的重要原因，且随着破坏和变形的深入，最终稳定于地应力初始值。所以，深部原岩应力特征必然会对松动圈范围产生一定的影响。

为了便于研究，根据以上分析，假设巷道围岩岩体破坏形式为剪切破坏，将深部岩体内的地应力 $\sigma_i(i=1\sim3)$ 经过计算^[19]转换为垂直于各声波测试测站所在巷道帮部直墙面的正应力和平行于各声波测试测站所在巷道帮部直墙面的切应力，为了与围岩岩体破坏时的径向应力和剪切应力对应，将该转换值分别称为初始径向应力(σ_0)和初始剪切应力(τ_0)。以 B1 测站为例，其帮部直墙面处初始径向应力和

初始剪切应力计算过程如下:

设主应力 σ_i 的方向余弦, 在 $o-xyz$ 坐标系中(取 x 指向东, y 指向北, z 为铅垂向, 向上为正)为 l_i , m_i , n_i ($i=1, 2, 3$), 则:

$$l_1 = \cos(16.5^\circ) \sin(128.9^\circ) = 0.746$$

$$m_1 = \cos(16.5^\circ) \cos(128.9^\circ) = -0.602$$

$$n_1 = \sin(16.5^\circ) = 0.284$$

$$l_2 = \cos(11.2^\circ) \sin(35.4^\circ) = 0.568$$

$$m_2 = \cos(11.2^\circ) \cos(35.4^\circ) = 0.800$$

$$n_2 = \sin(11.2^\circ) = 0.194$$

$$l_3 = \cos(73.3^\circ) \sin(265.8^\circ) = -0.287$$

$$m_3 = \cos(73.3^\circ) \cos(265.8^\circ) = -0.021$$

$$n_3 = \sin(73.3^\circ) = 0.958$$

由于

$$l_1 l_2 + m_1 m_2 + n_1 n_2 =$$

$$0.746 \times 0.568 - 0.602 \times 0.800 + 0.284 \times 0.194 = -0.003 \approx 0$$

则 σ_1 , σ_2 相互垂直。

同理,

$$l_2 l_3 + m_2 m_3 + n_2 n_3 = 0$$

则 σ_2 , σ_3 相互垂直。进一步说明了地应力测量结果的可信性。

以 3 个主应力建立的应力椭球, 其坐标系以 $O-1, 2, 3$ 表示, B1 截面(轨道大巷帮部直墙面)的方向余弦(l_a , m_a , n_a)为

$$l_a = m_1 = -0.602$$

$$m_a = m_2 = 0.800$$

$$n_a = n_2 = -0.021$$

则该截面上的初始径向应力、初始剪切应力采用式(1), (2)计算:

$$\sigma_0^a = \sigma_1 l_a^2 + \sigma_2 m_a^2 + \sigma_3 n_a^2 \quad (1)$$

$$\tau_0^a = 2\sqrt{\tau_{12}^2 l_a^2 m_a^2 + \tau_{23}^2 m_a^2 n_a^2 + \tau_{31}^2 n_a^2 l_a^2} \quad (2)$$

$$\tau_{12} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (3)$$

$$\tau_{23} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \quad (4)$$

$$\tau_{31} = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \quad (5)$$

通过以上各式可以计算出 B1 截面上初始径向应力和初始剪切应力。按照以上计算过程同样可以计算出 B2(北轨帮部直墙面)、B3(北轨联络巷帮部直墙面)、B4(水仓帮部直墙面)和 B5(回风石门帮部直墙面, 与 B1 相同)等截面的初始径向应力值和初始剪切应力值, 计算结果见表 5。

表 5 各截面上初始径向应力值和初始剪切应力值
Table 5 The initial radial stress and initial shearing stress values in each cross-section

截面	截面法线方位角/(°)	初始径向应力值/MPa	初始剪切应力值/MPa
B1	0	20.27	8.82
B2	90	23.14	8.84
B3	120	29.41	4.74
B4	30	14.00	2.70
B5	0	20.27	8.82

2.3 初始应力对巷道围岩破裂范围的影响规律

由表 4, 5, 对比 B1 和 B2(测站)截面处松动圈测试结果和初始径向应力值、初始剪切应力值可知, 两处初始剪切应力值接近, 但由于初始径向应力的差异, 导致围岩破裂区范围相差较大, 分别为 2.5, 2.2 m, 且随着初始径向应力值的增大而减小。结合 B1~B3 可知, B3 截面相对于 B2 截面初始径向应力增大 27.1%, 切向应力减小了 45.0%, 而 B3 测站的围岩破裂范围却大幅减小为 1.6 m, B1~B3 处围岩破裂范围随初始径向应力变化曲线如图 3 所示。

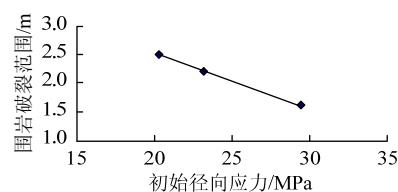


图 3 B1~B3 围岩破裂范围随初始径向应力变化关系
Fig.3 The change of broken zone size in B1~B3 inclosing rocks with initial radial stress

由图 3 可知, 围岩破裂区范围随初始径向应力的变化近似为线性负相关关系, 但由于围岩破裂区的形成较为复杂, 且测试点较少, 不能简单认为二者的关系即为线性相关, 但是可以确定在围岩岩性相同、巷道断面大小相似的前提下, 初始径向应力对巷道围岩破裂区的影响较大, 而初始剪切应力对巷道围岩破裂区范围的影响较小。

此外, 对比 B4 与 B1~B3 截面, 初始径向应力值相差较大, 且岩性相同, 这主要是由于 B4 截面所处水仓的断面较小造成的; 对比 B5 与 B1, 由于所在巷道走向相同, 二者初始径向、切向应力相同, 断面大小也相同, 但是由于岩性的差异, B5 处巷道围岩破裂区范围较 B1 处小, 即岩性越好, 围岩的破裂范围就越小, 进一步说明了围岩岩性对巷道稳定性的影响作用。

2.4 初始应力对围岩的作用机理

郓城煤矿深部巷道围岩破裂范围随原岩应力状态的变化规律符合岩体压剪破坏的模式。根据摩尔-库伦准则, 岩体的破坏多是沿结构弱面的压剪破坏, 即岩石破裂需要达到下式^[20]中的条件:

$$\tau_s \geq \tau_f = f(\sigma_n) = \sigma_n \tan \varphi_j + c_j \quad (6)$$

式中: τ_s 为岩体结构破坏时的剪切应力; τ_f 为岩体的抗剪强度; σ_n 为正应力; c_j 和 φ_j 分别为岩体的黏滞系数和内摩擦角。

式(6)表明, 岩体破坏时所受剪切应力需达到抗剪强度 τ_f , 但随着正应力的增大, 抗剪强度随之增大, 正应力增加了岩石破坏的难度。

巷道在开挖后, 围岩中原来的三维应力状态被破坏, 巷道表面的岩石受平面应力作用, 在巷道表面施加支护作用后又转化为三维应力作用, 相当于压剪试验中施加了正应力的作用, 如图4所示。

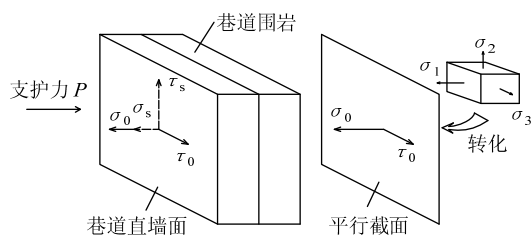


图4 初始应力对围岩的作用

Fig.4 The influence of initial stress on the inclosing rocks

在支护体施加后, 初始径向应力越大, 对支护结构的挤压力就会越大, 巷道围岩所受围压作用越大, 相当于压剪试验中正应力增大, 围岩抵抗剪切破坏的能力增强, 其破裂范围相应地减小。当然, 这需要在较强的外部支护力作用才能达到, 如果巷道表面位移较大则不满足该情况。

由图4可知, 初始剪切应力与围岩破裂时的临界剪切应力方向不相同, 而且由表5计算结果可知, 初始径向应力的值往往较小, 即初始剪切应力与围岩破坏时的临界剪切应力关系不大, 造成初始剪切应力对围岩的破裂作用较小, 对巷道围岩破裂范围的影响也较小。

3 结论

1) 采用空心包体法对郓城煤矿地应力进行了量测, 得到了三维地应力状态, 其中最大主应力为31.9 MPa, 倾角为16.5°, 接近水平, 说明该煤矿深部以水平构造应力为主。

2) 采用声波测试方法对多个巷道帮部围岩破

裂范围进行了测量, 得到了B1~B5巷道截面处的围岩破裂范围的大小。

3) 研究结果验证了巷道围岩岩性、巷道断面的大小是影响深部巷道围岩破裂区范围大小的重要因素, 围岩岩性越差, 巷道破裂范围就越大; 巷道断面越大, 巷道围岩越容易发生破坏。

4) 通过计算将深部原岩应力转化为与巷道直墙面平行截面上的初始径向应力和初始剪切应力, 对比各截面上的围岩破裂范围实测值发现, 初始径向应力与围岩破裂范围的大小呈负相关关系, 而初始径向应力对巷道围岩破裂范围的影响较小, 即原岩应力对围岩破裂区的影响存在一定的规律性。

5) 揭示了深部原岩应力对巷道围岩破裂范围的影响作用机理, 指出山东郓城千米埋深煤矿巷道围岩的破坏模式在一定程度上为压剪破坏, 即巷道围岩在破坏时所受剪切应力应达到岩体在一定围压下的抗剪强度。

6) 研究得到的初始径向应力对巷道围岩破裂区的影响关系与基于弹塑性理论、无支护条件下的分析结果不同, 高强度的外部支护与较大的径向应力为巷道围岩提供高围压, 降低围岩破裂范围。

参考文献:

- [1] 康红普, 林健, 张晓, 等. 潞安矿区井下地应力测量及其分布规律研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 827-831. KANG Hong-pu, LIN Jian, ZHANG Xiao, et al. In-situ stress measurements and distribution laws in Lu'an underground coal mines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 827-831.
- [2] 王连国, 陆银龙, 杨新华, 等. 霍州矿区地应力分布规律实测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊): 2768-2774. WANG Lian-guo, LU Yin-long, YANG Xin-hua, et al. Study of distribution characteristics of in-situ stresses for Huozhou mining area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Supp): 2768-2774.
- [3] 罗超文, 李海波, 刘亚群. 深埋巷道地应力测量及围岩应力分布特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1418-1423. LUO Chao-wen, LI Hai-bo, LIU Ya-qun. Study of distributing characteristics of stress in surrounding rock masses and in-situ stress measurement for deeply buried tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1418-1423.
- [4] 张百红, 韩立军, 韩贵雷, 等. 深部三维地应力实测与巷道稳定性研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2547-2555.

- ZHANG Bai-hong, HAN Li-jun, HAN Gui-lei, et al. Study of 3D in-situ stress measurement and stability of roadways in depth[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(9): 2547-2555.
- [5] 赵继银, 张传信. 构造应力场对深井巷道围岩稳定的影响[J]. *金属矿山*, 2005(5): 21-23.
- ZHAO Ji-yin, ZHANG Chuan-xin. Effect of structural stress field on stability of rock surrounding deep underground roadway[J]. *Metal Mine*, 2005(5): 21-23.
- [6] 牛双建. 深部巷道围岩强度衰减规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 2011.
- [7] 张宜虎, 卢铁然, 周火明, 等. 围岩破坏特征与地应力方向关系研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(2): 3526-3535.
- ZHANG Yi-hu, LU Yi-ran, ZHOU Huo-ming, et al. Study of relationship between failure properties of surrounding rock and direction of gestress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2): 3526-3535.
- [8] 江权, 冯夏庭, 徐鼎平, 等. 基于围岩片帮形迹的宏观地应力估计方法探讨[J]. *岩土力学*, 2011, 32(5): 1452-1459.
- JIANG Quan, FENG Xia-ting, XU Ding-ping, et al. Evaluation method of general geostress based on spalling features of wall rock [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(5): 1452-1459.
- [9] 陆家佑, 王昌明. 根据岩爆反分析岩体应力研究[J]. *长江科学院院报*, 1994, 11(3): 27-30.
- LU Jia-you, WANG Chang-ming. Study on back analysis for stress of rock mass based on the occurred rock-bursts[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1994, 11(3): 27-30.
- [10] 汪波, 何川, 吴德兴, 等. 基于岩爆破坏形迹修正隧道区地应力及岩爆预测的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(4): 811-817.
- WANG Bo, HE Chuan, WU De-xing, et al. Study on modification of geostress and forecast of rockburst based on destructive size of rockburst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(4): 811-817.
- [11] 刘允芳, 朱杰兵, 刘元坤. 空心包体式钻孔三向应变计地应力测量的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(4): 448-453.
- LIU Yun-fang, ZHU Jie-bing, LIU Yuan-kun. Research on hollow inclusion triaxial strain gauge for geostress measurement[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(4): 448-453.
- [12] DUNCAN FAMA M E, PENDER M J. Analysis of the hollow inclusion technique for measuring in situ rock stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 1980, 17(3): 137-146.
- [13] NOROTNICK G, WALTON R J. Triaxial hollow inclusion gauges for the determination of rock stress in situ[C]//*Proceedings ISRM Symposium on Investigation of Stress in Rock and Advances in Shear Measurement*. Sydney: Sydney Supplement, 1976: 1-8.
- [14] 吴满路, 廖椿庭, 张春山, 等. 红透山铜矿地应力测量及其分布规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(23): 3943-3947.
- WU Man-lu, LIAO Chun-ting, ZHANG Chun-shan, et al. Research on in-situ stress measurement and its distribution law in Hongtoushan copper mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(23): 3943-3947.
- [15] 蔡美峰, 刘卫东, 李远. 玲珑金矿深部地应力测量及矿区地应力场分布规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(2): 227-233.
- CAI Mei-feng, LIU Wei-dong, LI Yuan. In-situ stress measurement at deep position of Linglong gold mine and distribution law of in-situ stress field in mine area[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2): 227-233.
- [16] 李玉寿, 王衍森, 周刚, 等. 邢台矿区三维地应力测量及应力场分析[J]. *中国矿业大学学报*, 1998, 27(2): 213-216.
- LI Yu-shou, WANG Yang-sen, ZHOU Gang, et al. Measurement of in-situ stress and analysis of stress field in Xingtai mining area[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1998, 27(2): 213-216.
- [17] 贾颖绚, 宋宏伟. 巷道围岩松动圈测试技术与探讨[J]. *西部探矿工程*, 2004(10): 148-150.
- JIA Ying-xun, SONG Hong-wei. The measuring technology of fractural rock ring in roadway and discussion[J]. *West-Exploration Engineering*, 2004(10): 148-150.
- [18] 龚建武, 夏才初, 朱合华. 鹤上隧道围岩松动圈测试与分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2007, 3(3): 475-478.
- GONG Jian-wu, XIA Cai-chu, ZHU He-hua. Measurement and analysis on releasing zone of surrounding rock in Heshang tunnel[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2007, 3(3): 475-478.
- [19] 潘立宙. 应力椭球与应力椭圆[J]. *中国地质科学院地质力学研究所所刊*, 1989(12): 113-143.
- Pan Li-zhou. Stress ellipsoid and stress ellipse[J]. *Bulletin of the Institute of Geomechanics CAGS*, 1989(12): 113-143.
- [20] 陈明, 卢文波, 周创兵, 等. 初始地应力对隧道开挖爆生裂隙区的影响研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(8): 2254-2258.
- CHEN Ming, LU Wen-bo, ZHOU Chuang-bing, et al. Influence of initial in-situ stress on blasting-induced cracking zone in tunnel excavation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2254-2258.