棉花坑矿井地应力测量及其应力状态分析

谢国森[1],付宏宁[2],宋丽霞[1],蒋 畅[3],秦旭忠[1],杨 帆[2]

(1.核工业北京化工冶金研究院,北京 101149;
2.中核韶关锦原铀业有限公司,广东 韶关 512329;
3.南华大学 资源环境与安全工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘要:地应力测量是确定工程岩体力学属性,进行围岩稳定性分析,实现岩石工程开挖设计和决策科学化的前提条件。随着棉花坑矿井开采深度的不断增加,复杂构造应力对巷道和采场围岩稳定性产生的影响日趋显现。为了掌握该矿深部岩体地应力分布情况,提高井下工程设计的科学性、安全性和经济合理性,采用空心包体应力解除法对该矿开展地应力测量研究,分析其应力状态和分布规律。研究结果表明,在该矿区埋深 615～715 m范围内,水平最大主应力为 22.5～29.8 MPa,最大主应力与垂直应力分量之比为 1.5～1.7;各主应力大小随深度增加呈线性增长;各测点水平最大主应力方向具有较强的一致性,介于 91.2～110.3°,为北西西-南东东方向。

关键词:岩石力学;地应力;应力解除;应力恢复;空心包体应力解除法

中图分类号:TD853 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-8063(2023)04-0001-07

DOI:10.13426/j.cnki.yky.2023.06.02

地应力是造成地下工程变形及破坏的根本原因,开展地应力测量是采矿、土建等地下工程设计和施工的前提条件[1]。只有对特定工程区域地应力状态具备详细的认识,才能设计出经济、安全又实用的工程[2]。在矿山工程中,掌握地应力分布规律,可为地下硐室及巷道主轴线方向的确定及布置形状选择,地下硐室群之间合理间距的确定,以及采场稳定性评估、巷道的支护形式和支护参数确定等提供依据[3-4]。

地应力测量是研究岩体内某一点的主应力大小和方向,以此来确定地应力的状态分布、活动规律以及地应力随深度的变化规律。随着计算机和数值模拟分析的飞速发展,采矿工程逐渐变成可定量设计计算与分析的科学工程;若不了解工程区域真实地应力场,则在计算与分析中会由于缺乏边界条件的真实性和可靠性数据而与实际情况产生较大偏差[5]。构造运动及重力作用是地应力产生的根本原因,构造应力场是在多阶段构造运动和新构造活动的影响下形成的[6],构造应力的状态反映了构造现象的性质和内部关系[7]。构造运动导致地应力状态复杂多变[8];构造活动还导致岩体产生变形破坏,改变地质环境条件,诱发新的地应力积累。开展地应力现场实测是了解某一区域地应力状态的主要途径。

棉花坑矿区内有 3 组主要构造,分别是北东东向、北西西向和北北西向(近南北向),其中北东东向为控矿构造,北西西向既是控矿构造又是成矿构造,北北西向(近南北向)为成矿构造,区内主次构造叠加,应力状态复杂。随着开采深度的增加,井下矿岩复杂构造应力对巷道和采场围岩稳定性产生的影响日趋显现。为了准确掌握该矿山深部岩体地应力分布情况,采用空心包体应力解除法对矿区进行地应力实测,分析地应力场,以供该矿山生产设计参考。

1 应力解除法地应力测量原理

假设岩石恢复变形为线弹性变形,即当岩体受到载荷的作用和解除载荷时的应力应变加载与恢复曲线轨迹一样。因此,只要能借助空心包体传感器测出岩体卸载瞬间的弹性应变恢

收稿日期:2023-06-06

第一作者简介:谢国森(1970—),男,江西上饶人,学士,正高级工程师,从事铀矿开采技术研究。

复量，就能由岩石的应力应变关系求解原岩应力值[9]1。

由弹性力学理论可知，可先通过与岩壁紧贴且被环氧树脂包裹在空芯包体上的 12 个应变片记录岩体应力解除后的弹性应变恢复量，然后通过这些应变可计算出 6 个应力分量，从而计算得到原岩应力[10]。

坐标系中的应力分量 σ_r、σ_θ、$\sigma_{z'}$、$\tau_{r\theta}$、$\tau_{\theta z'}$、$\tau_{rz'}$ 与笛卡尔坐标系中的应力分量的关系见式(1)～式(6)[11-13]：

$$\sigma_r=\frac{\sigma_x+\sigma_y}{2}\left[1-\left(\frac{a}{r}\right)^2\right]+\frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\left[1-4\left(\frac{a}{r}\right)^2+3\left(\frac{a}{r}\right)^4\right]\cos2\theta+\tau_{xy}\left[1-4\left(\frac{a}{r}\right)^2+3\left(\frac{a}{r}\right)^4\right]\sin2\theta, \tag{1}$$

$$\sigma_\theta=\frac{\sigma_x+\sigma_y}{2}\left[1+\left(\frac{a}{r}\right)^2\right]+\frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\left[1+3\left(\frac{a}{r}\right)^4\right]\cos2\theta-\tau_{xy}\left[1+3\left(\frac{a}{r}\right)^4\right]\sin2\theta, \tag{2}$$

$$\sigma_{z'}=-\mu\left[2(\sigma_x-\sigma_y)\left(\frac{a}{r}\right)^2\cos2\theta+4\tau_{xy}\left(\frac{a}{r}\right)^2\sin2\theta\right]+\sigma_z, \tag{3}$$

$$\tau_{r\theta}=\frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\left[1+2\left(\frac{a}{r}\right)^2-3\left(\frac{a}{r}\right)^4\right]\cos2\theta+\tau_{xy}\left[1+2\left(\frac{a}{r}\right)^2-3\left(\frac{a}{r}\right)^4\right]\sin2\theta, \tag{4}$$

$$\tau_{\theta z'}=(-\tau_{zx}\sin\theta+\tau_{yz}\cos\theta)\left[1+\left(\frac{a}{r}\right)^2\right], \tag{5}$$

$$\tau_{rz'}=(\tau_{zx}\cos\theta+\tau_{yz}\sin\theta)\left[1-\left(\frac{a}{r}\right)^2\right], \tag{6}$$

式中：r、θ、z'和 x、y、z 分别是柱坐标和笛卡尔坐标系；σ—正应力，MPa；τ—剪应力，MPa；a—钻孔半径，mm；r—计算点到钻孔中心的距离，mm；θ—应变花所在极径与钻孔坐标系 x 轴的夹角，(°)；μ—岩体泊松比。

因测量点在孔壁上，即 $r=a$，式(1)～式(6)可简化为式(7)～式(10)[12,14-15]：

$$\sigma_r=\tau_{r\theta}=\tau_{rz'}=0, \tag{7}$$

$$\sigma_\theta=\sigma_x+\sigma_y-2(\sigma_x-\sigma_y)\cos2\theta-4\tau_{xy}\sin2\theta, \tag{8}$$

$$\sigma_{z'}=-\mu[2(\sigma_x-\sigma_y)\cos2\theta+4\tau_{xy}\sin2\theta]+\sigma_z, \tag{9}$$

$$\tau_{\theta z'}=2\tau_{yz}\cos\theta-2\tau_{zx}\sin\theta, \tag{10}$$

等式右侧含有 6 个在直角坐标系下的未知应力分量，等式左侧的量可由应变解除法测得。但 3 个方程不能求出 6 个未知数，所以在实测中每个点都要至少采集 6 个应变数据，才能在直角坐标中确定 6 个应力分量。

2 弹性参数测定与计算

双轴围压率定试验主要作用：1)直接测量从钻孔内取出的岩芯的弹性模量和泊松比，用于地应力场计算，保证实测结果更加准确；2)检测岩芯内空心包体中心的 12 个应变片的工作状态，若发现某个应变片工作异常，则在解除岩芯时剔除掉对应的应变片值，以消除应变片自身问题对地应力测量值的影响。

双轴围压率定试验步骤：1)将钻孔解除取出的完整岩芯放入装有耐油液压套的双轴腔内，空心包体应变片须置于双轴腔的中心位置，连接双轴腔与手摇式液压泵，将液压油充满手摇式液压泵。2)通过手摇式液压泵对双轴腔加压，从 0 开始，按每隔 1 MPa 逐级加压，共加压 7 级，每个压力下应变采集仪进行连续读数 10 min，至其读数趋于稳定。3)将应变采集结果导入计算机，并画出围压与应变量的关系曲线。4)按式(11)～式(12)计算出测点解除岩芯的弹性模量和泊松比[9]3。

$$E=\frac{P}{\varepsilon_\theta}\cdot\frac{2}{1-\left(\frac{D_i}{D_j}\right)^2}, \tag{11}$$

$$\mu=\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_\theta}, \tag{12}$$

式中：E—弹性模量，MPa；P—围压，MPa；μ—泊松比；ε_θ、ε_j分别为环向和纵向应变；D_i、D_j分别为岩芯内外直径，mm。

3 地应力测点的确定

地应力测点布置原则：1)测点通常布置在工程研究范围的矿体或围岩内，根据地质资料在对后续设计具有指导意义和代表性的位置布点；2)被测岩体应该避免破碎带，要保证岩体的完整性；3)测点要尽可能远离工程活动区；4)测点要尽可能远离断层；5)钻孔时需要上仰 2～5°，以便于清理岩屑和排水。

综合考虑矿区地应力测量现场施工作业条件及矿区开拓现状，确定分别在 11 号勘探线的－100、－150、－200 m 水平(埋深分别为 615、

665、715 m)各选择 1 个测点，共布置 3 个测点，每个测点进行 4～5 次试验，对矿区的地应力场进行测量。3 个测点均布置在原岩体中，在确定测点时基本避开了断层、破碎带以及与巷道相交或拐角的应力集中区域。

应力解除法测试的各测孔钻孔参数见表 1。每个测点在各自水平的具体位置见图 1。

表 1　各水平测点参数

Table 1　Parameters of each horizontal measuring point

测点编号	钻孔方位/(°)	钻孔倾角/(°)	钻孔埋深/m	巷道断面/(m×m)
DYL-100	266	4	615	2.5×2.5
DYL-150	89	2	665	2.5×2.5
DYL-200	116	5	715	2.5×2.5

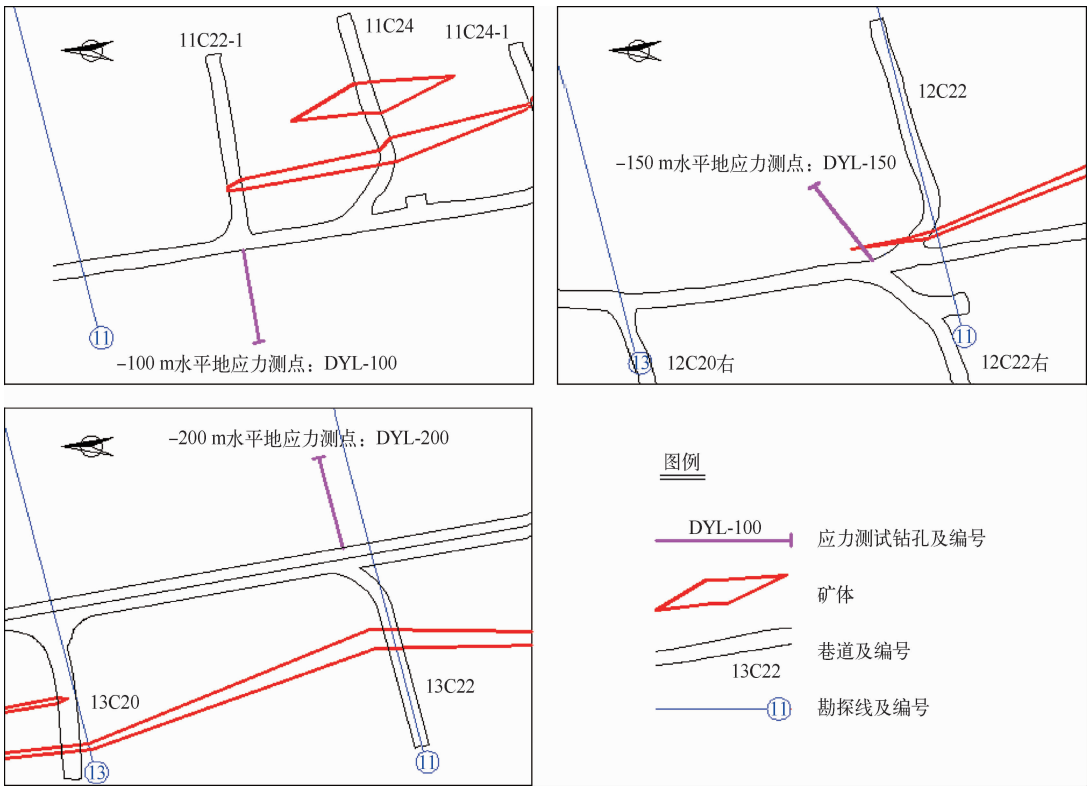


图 1　地应力测点位置示意图

Fig. 1　Position diagram of in-situ stress measuring points

4　地应力测试结果分析

4.1　绘制应力解除曲线

应力解除法地应力测量主要由两部分数据计算而成，一部分是现场实测空心包体得到的岩芯接触时释放的弹性应变恢复量；另一部分是取出来的岩芯经过围压率定后得到的数据。将这两部分数据综合计算可得出被测岩体的地应力状态。以－150 m 水平的 DYL-150 测点第 3 次测试试验为例，结果见图 2，ε_1～ε_{12}是现场解除压力时采集到的空心包体 12 个应变片的变化值。

表 2　地应力测点 DYL-150-3 应变变化值

Table 2　Strain variation value of DYL-150-3 at in-situ stress measuring points

ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6	ε_7	ε_8	ε_9	ε_{10}	ε_{11}	ε_{12}
900	774	－400	200	520	1 520	1 350	1 200	2 890	1 650	1 888	2 569

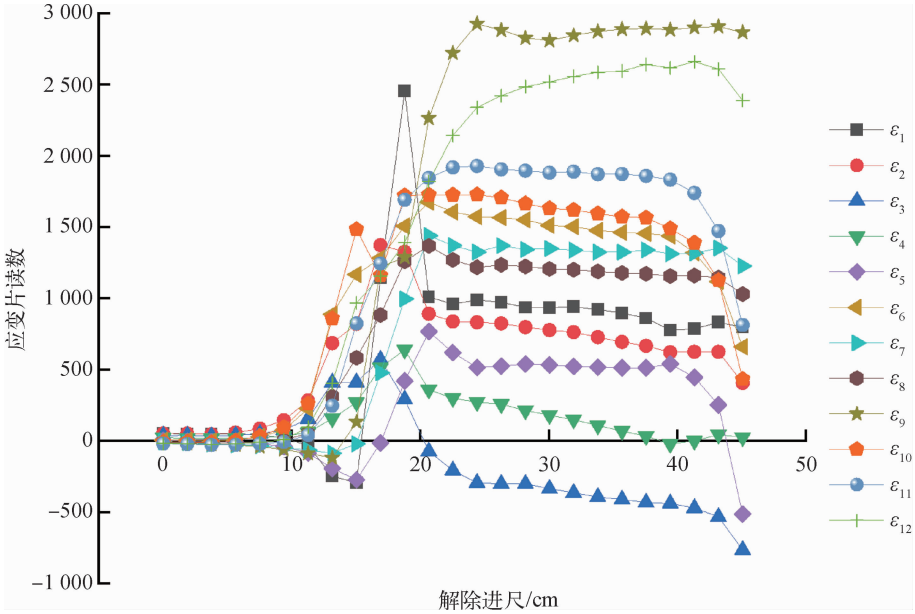


图 2 各通道应变片变形随时间变化曲线

Fig. 2 Deformation curve of each channel strain gauge with time

4.2 确定弹性参数

以−200 m 水平 DYL-200 测点第 2 次围压率定试验为例，计算过程：1)将围压率定试验所采集到的数据导入到 Excel；2)在加载围压-应变全过程曲线上，选择一组环向和纵向应变，绘制在不同围压下的微应变变化曲线(图 3)；3)将不同围压下所对应的环向及纵向应变值代入式(11)～式(12)，计算出被测点岩体的弹性模量和泊松比；4)按步骤 3 计算同一个应变花组的每个不同围压下弹性模量和泊松比及平均值；5)按步骤 3 计算出 3 个应变花组的弹性模量和泊松比的平均值(表 3)。式(11)～式(12)中的 ε_θ、ε_j 是指取出岩(岩芯内径 37 mm，外径 110 mm)在地表做围压率定时，7 次加压过程中分别读取的空芯包体内的环向和纵向应变数据，分别对应表 3 中的 ε_1、ε_2、ε_5、ε_6 和 ε_{10}、ε_{11}。

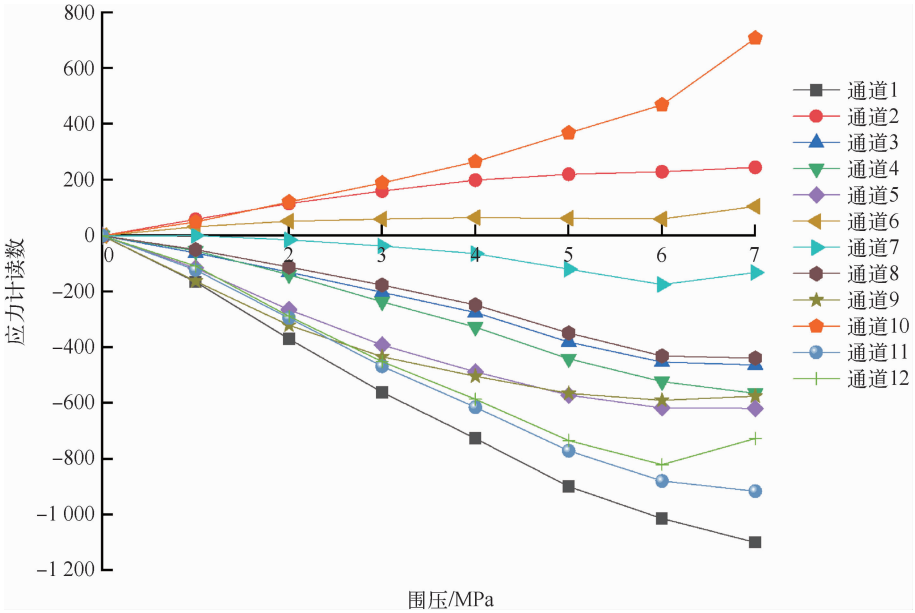


图 3 DYL-200-2 围压率定曲线

Fig. 3 Confining pressure rate fixed curve of DYL-200-2

表 3　DYL-200-2 弹性参数计算结果

Table 3　Calculation results of elastic parameter of DYL-200-2

卸载围压/MPa	应变花 1		应变花 2		应变花 3	
	ε_1	ε_2	ε_5	ε_6	ε_{10}	ε_{11}
1	−166	58	−116	32	49	−123
2	−370	115	−265	52	121	−295
3	−561	160	−392	59	189	−468
4	−727	199	−488	65	265	−615
5	−899	220	−571	62	368	−771
6	−1 014	229	−617	60	469	−879
7	−1 099	245	−619	105	708	−916
每组平均弹性参数	E/MPa	μ	E/MPa	μ	E/MPa	μ
	12 927	0.274	19 912	0.162	15 714	0.490
三组平均弹性参数	平均弹性模量为 16 185 MPa,平均泊松比为 0.308					

5　地应力测试结果分析与建议

5.1　应力计算结果

将地应力解除测量数据和岩石力学参数(弹性模量和泊松比)输入三维应力计算程序中即可求得 3 个测点的主应力大小、方向及倾角(表 4)。矿区各测点的笛卡尔坐标系下 6 个应力分量见表 5。

表 4　各测点实测地应力结果

Table 4　Geostress results measured at each measuring point

测点编号	埋深/m	最大主应力(σ_1)			中间主应力(σ_2)			最小主应力(σ_3)		
		大小/MPa	方位/(°)	倾角/(°)	大小/MPa	方位/(°)	倾角/(°)	大小/MPa	方位/(°)	倾角/(°)
DYL-100	615	22.5	92.0	2.8	16.2	6.6	−58.3	7.4	180.3	−31.5
DYL-150	665	26.0	93.3	−6.7	17.6	14.0	57.6	8.4	179.2	31.6
DYL-200	715	31.4	112.6	20.1	18.9	74.2	−64.9	9.5	197.3	−14.3

注:表中方位表示主应力在水平面上的投影与正北方向间的夹角,以正北为 0°,顺时针为正;倾角为主应力同水平面间夹角,仰角为正。

表 5　各测点笛卡儿坐标系应力分量计算结果

Table 5　Calculation results of stress components in Descartes coordinate system at each measuring point

测点编号	σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}
DYL-100	22.5	9.8	13.8	−0.3	−3.9	0.3
DYL-150	25.8	11.0	15.2	−0.4	4.2	−1.0
DYL-200	27.5	12.4	19.8	−6.4	−3.7	3.0

注:取 x 轴为正北,y 轴为正东,z 轴垂直向上。

根据弹性力学理论,可用表 5 内各测点应力分量求出各测点水平最大及最小主应力($\sigma_{h,max}$、$\sigma_{h,min}$)、水平最小与最大主应力之比($\sigma_{h,min}/\sigma_{h,max}$),以及水平最大主应力与垂直应力分量之比

($\sigma_{h,max}/\sigma_z$)。取 $g=10$ m/s^2,$\rho=2.56$ g/cm^3,算出各测点自重应力 σ_V,结果见表 6。

表 6 各测点水平最大、最小主应力及相应数据

Table 6 The maximum and minimum horizontal principal stress of each measuring point and the corresponding data

测点编号	埋深/m	$\sigma_{h,max}$/MPa	$\sigma_{h,min}$/MPa	σ_z/MPa	σ_V/MPa	$\sigma_{h,min}/\sigma_{h,max}$	$\sigma_{h,max}/\sigma_z$	$\sigma_{h,max}$方位/(°)
DYL-100	615	22.5	9.8	13.8	15.7	0.4	1.6	91.2
DYL-150	665	25.8	11.0	15.2	17.0	0.4	1.7	91.5
DYL-200	715	29.8	10.1	19.8	18.3	0.3	1.5	110.3

5.2 应力状态分析

综合分析表 4～表 6 结果,得出以下几点认识:1)该矿区实测的地应力最大主应力(σ_1)和最小主应力(σ_3)为近水平主应力,倾角为 2.8～31.6°;中间主应力(σ_2)为近垂向的应力,倾角为 57.6～64.9°。2)该矿区实测水平方向比近垂向的应力值大,以近水平方向的构造应力在地应力场中占主导地位,3 个方向主应力间的关系总体表现为 $\sigma_H>\sigma_v>\sigma_h$,地应力结构有利于走滑断层的发育和活动。3)该矿水平最小与最大主应力之比($\sigma_{h,min}/\sigma_{h,max}$)为 0.3～0.4,最大主应力与垂直应力分量之比($\sigma_{h,max}/\sigma_z$)为 1.5～1.7,各测点垂直应力分量(σ_z)的大小与自重应力(σ_V)相差不大。4)各测点水平最大主应力方向具有较强的一致性,介于91.2～110.3°,可以推断该矿区地应力场水平最大主应力方向总体上为北西西-南东东方向,这一实测结果与该矿区的地质构造分布特征相吻合。

通过对测量数据进行线性拟合(图 4),得到各主应力随深度(H)变化的关系,见式(13)～式(15),主应力大小随深度呈线性增长关系。

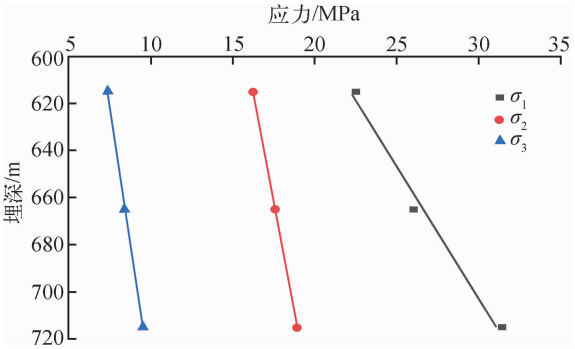


图 4 主应力随局部深度变化

Fig. 4 Change of principal stress with local depth

$$\sigma_1 = 0.089H - 32.551\ 67, R^2 = 0.98; \quad (13)$$

$$\sigma_2 = 0.027H - 0.388\ 33, R^2 = 0.99; \quad (14)$$

$$\sigma_3 = 0.021H - 5.531\ 67, R^2 = 0.99。 \quad (15)$$

6 结论和建议

6.1 结论

1)该矿区的地应力最大主应力(σ_1)和最小主应力(σ_3)为近水平主应力,倾角为 2.8～31.6°,中间主应力(σ_2)为近垂向的应力,倾角为 57.6～64.9°。各测点水平最大主应力方向具有较强的一致性,介于 91.2～110.3°,推断该矿区地应力场水平最大主应力方向总体上应为北西西-南东东方向,这一实测结果与该矿区的地质构造分布特征相吻合。

2)该矿区埋深 615～715 m 范围内水平最大主应力为 22.5～29.8 MPa,水平最小主应力为 9.8～11.0 MPa,各主应力大小随深度呈线性增长关系。实测水平方向的应力值比近垂向的应力值大,说明以近水平方向的构造应力在地应力场中占主导地位,符合浅部地壳应力分布基本规律。

6.2 建议

1)棉花坑矿井水平最大主应力方位角为90～110°,在北西西-南东东向。当前矿区内主巷布置为南北向,主巷轴线与水平最大主应力大角度相交,不利于主巷两帮的稳定,应加强支护。

2)当前开拓埋深已达 800 m,属于浅部开采向深部开采过渡区间。进入深部后,应及时关注主巷帮面的稳定性,若出现较为显著的屈服破坏现象,应及时调整巷道支护方案和采矿工艺。

参考文献:

[1] 侯奎奎,吴钦正,张凤鹏,等. 不同地应力测试方法

在三山岛金矿 2005 m 竖井建井区域的应用及其地应力分布规律研究[J]. 岩土力学，2022，43(4)：1093-1102.

[2] LI P，WU Y，CAI M. Implications of in-situ stress measurement in mining engineering[J]. IOP Conference Series：Earth and Environmental Science，2021(833)：012140.

[3] 李玉峰. 地应力及其在地下工程中的应用[J]. 企业技术开发，2004(7)：16-17＋21.

[4] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京：科学出版社，2013：125-170.

[5] 孙中想，张朝贤，侯明勋. 空心包体式钻孔应力解除法数值模拟研究[J]. 人民黄河，2022，44(11)：94-99.

[6] CAI Z. A continuous crustal stress monitoring method for earthquake prediction[J]. Pure & Applied Geophysics，2008，165：1879-1889.

[7] LI P，CAI M F，GUO Q F，et al. In situ stress state of the northwest region of the Jiaodong Peninsula，China from overcoring stress measurements in Three Gold Mines[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2019，52(3)，4497-4507.

[8] LI P，CAI M，GLADE T，et al. Insights into seismicity from the perspective of the crustal stress field：a comment[J]. Natural Hazards，2022：1-26.

[9] 冯兴隆，刘华武，高兆伟，等. 普朗铜矿地应力测量及其结果分析[J]. 湖南有色金属，2015，31(1)：1-4＋32.

[10] 马春德，徐纪成，陈枫，等. 海下矿区三维地应力测量及分布规律研究[J]. 矿冶工程，2011，31(5)：9-12＋17.

[11] 高会春，杨胜利，刘新杰，等. 空心包体地应力测试方法与工程应用[J]. 煤炭工程，2015，47(4)：83-85＋89.

[12] 孙鹏. 金川二矿区深部地应力测量及其应力状态分析[D]. 西安：长安大学，2019.

[13] 孙中想. 空心包体地应力测量方法研究及其应用[D]. 上海：上海交通大学，2020.

[14] 马春德. 深部复合型破坏高应力软岩巷道支护技术研究[D]. 长沙：中南大学，2010.

[15] 刘孝杰. 金川三矿区地应力测量结果及应力分布状态分析[D]. 西安：长安大学，2019.

Geostress Measurement and State Analysis of Mianhuakeng Mine

XIE Guosen[1]，FU Hongning[2]，SONG Lixia[1]，JIANG Chang[3]，QIN Xuzhong[1]，YANG Fan[2]

(1. Bejing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy，CNCC，Beijing 101149，China；
2. Shaoguan Jinyuan Uranium Co.，Ltd.，CNNC，Shaoguan 512329，China；
3. School of Resource & Environment and Safety Engineering，University of South China，Hengyang 421001，China).

Abstract：Geostress measurement is a necessary prerequisite for determining the attributes of engineering rock body mechanics，analyzing the stability of the surrounding rock，and realizing the scientific excavation design and decision-making of rock engineering. With the depth of mining of Mianhuakeng mine，the impact of complex structural stress on the stability of the lane roads and lying surrounding rocks has become increasingly apparent. In order to master the terrain distribution of the rock body in the deep part of the mine and improve the scientific，safety and economic rationality of the underground engineering design，the hollow inclusion stress relief method is used to carry out the stress measurement of the mine，and analyze its stress status and distribution rules. The results show that the maximum main stress is between 22.5 and 29.8 MPa and the ratio of the maximum main stress to vertical stress is 1.5 ～ 1.7 in the buried depth of 615～715 m. The main stress increases linearly with the depth and the maximum main stress direction of each measurement point level is in the direction of from 91.2 to 110.3°(North West West-South East East)，which has a strong consistency.

Key words：rock mechanics；geostress；stress relief；stress recovery；hollow inclusion stress relief method