

# 玲珑金矿深部地应力测量及 矿区地应力场分布规律

蔡美峰, 刘卫东, 李 远

(北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 介绍玲珑金矿主矿区深部和浅部两期地应力测量的过程和结果。为提高测量结果的可靠性和准确性, 采用完全温度补偿技术和实现完全温度补偿的空心包体应变计等一系列新的技术和方法, 对传统的应力解除法进行重大改进。通过实测, 获得矿区 7 个水平, 18 个测点的三维地应力大小和方向。根据实测结果, 对玲珑金矿主矿区地应力场的分布规律进行定量的综合分析与研究。研究结果表明: (1) 玲珑金矿主矿区地应力场以水平构造应力为主导, 最大水平主应力平均为自重应力的 2.26 倍; (2) 最大水平主应力的走向为 NW 向, 基本与区域构造应力场最大主应力的方向相一致; (3) 垂直主应力值基本上等于或略大于自重应力值; (4) 深部与浅部相比, 尽管岩性有较明显变化, 但地应力场分布规律并没有显著改变; (5) 最大水平主应力、最小水平主应力和垂直主应力值均随深度呈几乎线性增长关系。

**关键词:** 岩石力学; 玲珑金矿; 深部; 地应力测量; 应力解除法; 完全温度补偿; 分布规律

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)02 - 0227 - 07

## IN-SITU STRESS MEASUREMENT AT DEEP POSITION OF LINGLONG GOLD MINE AND DISTRIBUTION LAW OF IN-SITU STRESS FIELD IN MINE AREA

CAI Meifeng, LIU Weidong, LI Yuan

(School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To ensure mining safety, in-situ stress measurement in Linglong gold mine is carried out in two periods. The first period measurement is performed in the shallow position and the second period measurement is performed in the deep position. The measurement process and results are introduced. In order to increase reliability and accuracy of the measurement, a series of new techniques including complete temperature compensation technique and improved hollow inclusion strain devices are used in the measurement. Through in-situ measurement, 3D geostresses at 18 points, which are distributed in 7 levels, are determined. Based on the measuring results, comprehensive study of distributing law of the in-situ stress field in the mine is completed. Some conclusions are drawn as follows: (1) The in-situ stress in Linglong gold mine is dominated by horizontal tectonic stress field rather than the gravity stress field. The magnitude ratio of maximum horizontal principal stress to gravity stress in the mine is 2.26 in average. (2) The maximum horizontal principal stress is oriented in NW direction which is approximately coincided with the orientation of the maximum principal stress of tectonic stress field. (3) The vertical principal stress is basically equal to or a little larger than the gravity. (4) Despite the rock nature in deep

**收稿日期:** 2009 - 08 - 21; **修回日期:** 2009 - 11 - 07

**基金项目:** “十一五” 国家科技支撑计划(2006BAK04B02)

**作者简介:** 蔡美峰(1943 - ), 男, 博士, 1967 年毕业于上海交通大学工程力学专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石力学和采矿工程领域方面的教学与研究工作。E-mail: caimeifeng@ustb.edu.cn

position is changed; and the distribution law of in-situ stress state is not remarkably changed in deep position compared with that in shallow position. (5) The maximum horizontal principal stress, minor horizontal principal stress and vertical principal stress are almost linearly increased with depth.

**Key words:** rock mechanics; Linglong gold mine; deep position; in-situ stress measurement; overcoring technique; complete temperature compensation technique; distribution law

## 1 引言

玲珑金矿地处山东省招远市境内, 由位于玲珑金矿田的玲珑主矿区和位于焦家断裂带的灵山分矿 2 部分组成, 其中玲珑主矿区的产量占 80% 以上。玲珑主矿区面积约  $9 \text{ km}^2$ , 其地理坐标为东经  $120^\circ 27'00'' \sim 120^\circ 33'45''$ , 北纬  $37^\circ 26'00'' \sim 37^\circ 30'00''$ , 地表高程  $250 \sim 350 \text{ m}$ , 平均为  $300 \text{ m}$ ; 矿脉主要赋存于玲珑混合花岗岩低次序断裂构造带内, 由于构造的多期活动和成矿期次的多阶段化, 导致矿体形态和赋存条件的复杂性, 给开采带来不利影响<sup>[1]</sup>。

为了给采矿设计提供科学依据, 1995~1998 年玲珑金矿与北京科技大学合作完成了“玲珑金矿深部岩石力学与采矿方法研究”项目。研究过程中, 实施了矿区第一期地应力测量。采用应力解除法, 通过实测获得矿区 12 个测点的三维地应力大小和方向<sup>[2]</sup>。这 12 个测点分别位于 5 个水平上, 其中:  $+50 \text{ m}$  水平 2 个测点,  $+10 \text{ m}$  水平 5 个测点,  $-70 \text{ m}$  水平 2 个测点,  $-110 \text{ m}$  水平 2 个测点,  $-270 \text{ m}$  水平 1 个测点。12 个测点的埋深为  $250 \sim 570 \text{ m}$ 。

近 10 a 来, 玲珑金矿开采速度迅速增加, 目前开采深度已接近  $1\ 000 \text{ m}$ , 开拓深度将很快超过  $1\ 200 \text{ m}$ , 成为我国开采深度最大的矿山之一。在主竖井开拓延深到  $-620 \text{ m}$  水平(埋深  $920 \text{ m}$ )以下过程中, 出现了典型的岩石迸裂、抛射等岩爆现象。为了解决我国金属矿山深部开采中的关键技术问题, 包括岩爆等开采动力灾害的预测与防治问题, “深部开采岩爆灾害危险性分析与防控技术研究及示范工程”被列为“十一五”国家科技支撑计划的子课题进行研究, 玲珑金矿被选为子课题的工程依托单位。玲珑金矿深部地应力测量(矿区第二期地应力测量)是子课题实施的重要内容之一<sup>[3]</sup>。

## 2 测量方法和测点布置

矿区地应力场测量采用应力解除法的测量原理和空心包体应变测量技术, 为了提高测量结果的可

靠性和准确性, 对传统的应力解除法进行了重大改进, 采用了完全温度补偿技术和实现完全温度补偿的空心包体应变计等一系列新的技术和方法<sup>[4, 5]</sup>。

### 2.1 完全温度补偿技术

空心包体应变计和其他许多应变测量仪器一样, 均采用电阻应变片作为测量元件, 并根据惠特斯通电桥原理, 将应变变化转换成电阻变化再转化成电压变化测量并记录下来。

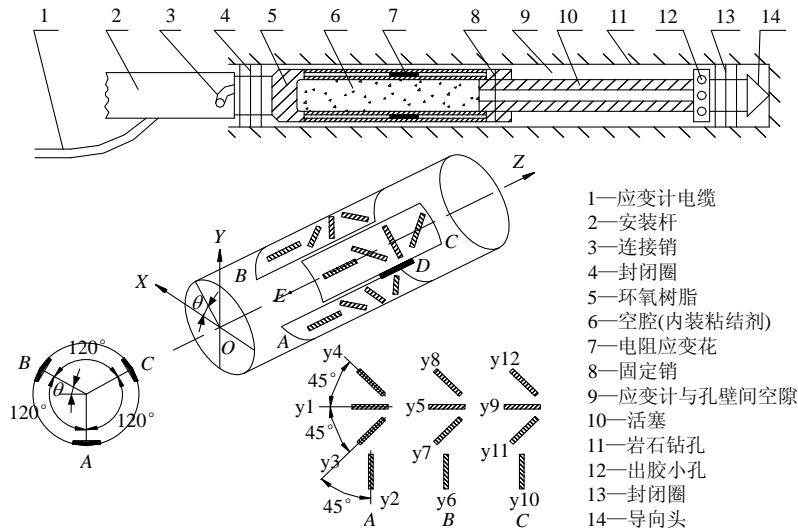
电阻应变片对温度非常敏感, 温度变化时其阻值会发生相应变化, 并在电桥中产生相应的输出电压, 进而计算出虚假的附加应变值。为了消除这一部分温度附加应变值, 必须采取相应的补偿措施<sup>[6]</sup>。传统的补偿方法是在惠特斯通电桥中与工作应变片相邻的桥臂中接入一个与工作应变片完全相同的应变片(称为补偿片), 以期在温度变化时, 补偿片和工作应变片产生相同的电阻变化, 从而相互抵消, 而不产生附加温度应变值。但从原理上讲, 这种方法不适用于胶结式应变片的温度补偿之用。因为在胶结式应变计中, 工作应变片是直接或间接胶结在岩石钻孔壁上的, 用于测量应力解除过程中孔壁的变形。它们的变形行为主要被孔壁岩石所控制。补偿片必须也和岩石胶结在一起, 才能在温度变化时和工作应变片产生相同的应变值。而一经和岩石胶结在一起, 就必然要感受由于应力变化引起的变形, 这对补偿片来说是不允许的。为此, 本次测量中采用了蔡美峰<sup>[7]</sup>发明的完全温度补偿技术, 其基本原理见其的研究。

### 2.2 实现完全温度补偿的空心包体应变计

为了使用完全温度补偿技术, 对传统的空心包体应变计进行了如下改进<sup>[8, 9]</sup>(见图 1):

(1) 在应变花 A, C 之间的点 D 嵌贴了一个热敏电阻, 用以测量应力解除过程中测点的温度变化。

(2) 为了消除电阻应变片导线在温度变化时所引起的附加应变值, 在点 E 将 2 根和电阻应变片导线相同的空载导线焊接在一起, 并和其他应变片导线一起由电缆引出, 接入与工作应变片相邻桥臂

图 1 实现完全温度补偿的空心包体应变计示意图<sup>[8, 9]</sup>Fig.1 Sketch of improved hollow inclusion strain cell to ensure complete temperature compensation<sup>[8, 9]</sup>

中。这样,在温度发生变化时,2 个相邻桥臂中由于导线长度相同,产生电阻变化也相同,故达到相互抵消的作用。

### 2.3 测点布置

玲珑金矿第二期(深部)地应力测量共布置 6 个测点,分别位于-620 和-670 m 两个中段水平上,每个水平 3 个测点。这样,玲珑金矿第一、二两期一共完成了 18 个测点的地应力测量,测点埋深为 250~970 m。

深部 6 个测点的位置分布见图 2。为了便于第一、二期测量结果的统一分析与比较,对矿区地应力测量的测点进行统一编号,一期 12 个测点的编号为 1<sup>#</sup>~12<sup>#</sup>,二期(深部)6 个测点的编号为 13<sup>#</sup>~18<sup>#</sup>。

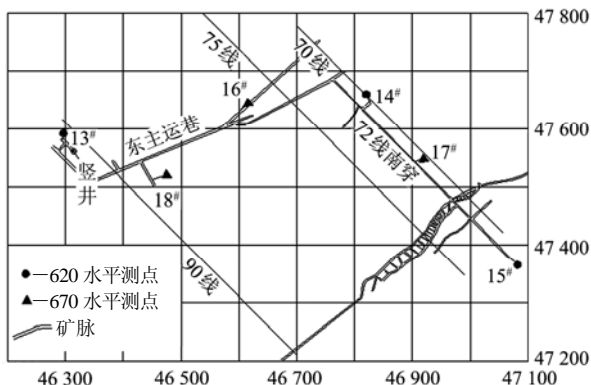


图 2 玲珑金矿深部地应力测点水平投影位置图(单位: m)

Fig.2 Projective position of in-situ stress measuring points in deep levels of Linglong gold mine(unit: m)

## 3 测量结果

### 3.1 深部各测点应力解除试验结果

应力解除过程中空心包体应变计中各应变片测得的应变值由 DDS-60 应变数据记录仪自动采集并记录。矿区深部 6 个测点应力解除测得的最终稳定应变值见表 1(其中, y1~y12 为应变片号,下同),其排列位置见图 1;最后一列“温度变化”为应力解除过程中各测点应变片部位的温度变化值。

### 3.2 深部各测点温度标定试验结果

试验时将套孔岩芯置于一个可调温的恒箱中,将应变计导线接入 DDS-60 应变数据记录仪中。然后每隔 4 h 将温度改变(升温阶段提高或降温阶段降低)5 °C,记录每一温度段内各应变片所测得的应变值。由此即可求得每一应变片的温度应变率,即温度每变化 1 °C,在应变片中引起的附加温度应变值。将其乘以应力解除过程中应变片部位的温度变化值,即可获得应力解除过程中各应变片由于测点温度变化引起的附加应变值。将这部分附加应变值从应力解除过程中测得的最终稳定应变值中清除出去,即得到真正由于应力解除引起的应变值,作为计算地应力的正确数据<sup>[10]</sup>。矿区深部 6 个测点套孔岩芯温度标定试验的结果见表 2。经过温度标定修正的用于计算地应力的应力解除应变数据见表 3。

表 1 深部各测点应力解除试验结果

Table 1 Results of overcoring experiments for measuring points at deep position

| 测点编号            | 最终稳定应变值/ $10^{-6}$ |       |       |       |     |       |       |       |       |       |       |       | 温度变化<br>/ $^{\circ}\text{C}$ |
|-----------------|--------------------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------------|
|                 | y1                 | y2    | y3    | y4    | y5  | y6    | y7    | y8    | y9    | y10   | y11   | y12   |                              |
| 13 <sup>#</sup> | 495                | 853   | 873   | 828   | 588 | 717   | 875   | 648   | 415   | 794   | 928   | 742   | -1.4                         |
| 14 <sup>#</sup> | 266                | 796   | 972   | 898   | 222 | 829   | 711   | 280   | -     | 718   | 1 087 | 1 422 | -1.4                         |
| 15 <sup>#</sup> | 226                | 696   | -     | 858   | 382 | 970   | -     | 782   | 127   | 371   | 1 052 | 1 378 | -1.1                         |
| 16 <sup>#</sup> | 501                | 1 512 | -     | 1 025 | 549 | 490   | 743   | 774   | -     | 1 338 | 1 437 | 1 051 | -1.1                         |
| 17 <sup>#</sup> | 1 069              | 946   | 1 437 | 967   | 884 | 1 048 | 603   | 1 343 | 1 163 | 788   | 1 568 | -     | -1.5                         |
| 18 <sup>#</sup> | 713                | 909   | 1 389 | 802   | 572 | 1 215 | 1 653 | -     | 783   | 1 009 | 684   | 1 215 | -1.6                         |

表 2 深部各测点温度应变率标定试验结果

Table 2 Temperature calibration results for measuring points at deep position  $10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

| 测点<br>编号        | 温度应变率 |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |
|-----------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|                 | y1    | y2 | y3 | y4 | y5 | y6 | y7 | y8 | y9 | y10 | y11 | y12 |
| 13 <sup>#</sup> | 14    | 60 | 63 | 49 | 13 | 55 | 53 | 40 | 21 | 56  | 69  | 58  |
| 14 <sup>#</sup> | 57    | 68 | 54 | 67 | 65 | 61 | 70 | 62 | -  | 47  | 60  | 66  |
| 15 <sup>#</sup> | 48    | 62 | -  | 68 | 62 | 6  | -  | 39 | 31 | 63  | 65  | 18  |
| 16 <sup>#</sup> | 23    | 44 | -  | 59 | 50 | 67 | 64 | 41 | -  | 56  | 50  | 34  |
| 17 <sup>#</sup> | 32    | 44 | 51 | 34 | 55 | 31 | 58 | 51 | 67 | 53  | 60  | -   |
| 18 <sup>#</sup> | 62    | 35 | 21 | 55 | 67 | 41 | 19 | -  | 64 | 51  | 12  | 48  |

3.3 深部各测点地应力测量结果

由表 3 中经过温度标定修正的各测点真正由于应力解除引起的应变值, 并通过套孔岩芯围压试验<sup>[11]</sup>获得各测点的岩石弹性模量和泊松比值(见表 4), 采用专门的计算程序, 即可计算出各测点的地应力状态, 包括各测点 3 个主应力的方向和大小<sup>[12]</sup>, 深部 6 个测点(测点 13<sup>#</sup>~18<sup>#</sup>)的计算结果见表 5。为了方便下节对矿区整体地应力场分布规律进行分析研究, 第一期(浅部)地应力测量 12 个测点的测量结果<sup>[2]</sup>也列于表 5。

4 矿区地应力场分布规律综合研究

4.1 整体分布规律

对表 5 中所示第一、二两期 18 个测点地应力测量数据的分析, 可以发现各点地应力状态具有如下相似的规律:

- (1) 各点 3 个主应力中, 有 2 个位于近于水平方向, 其倾角一般不大于  $10^{\circ}$ , 最大不超过  $16^{\circ}$ ; 另一主应力接近于垂直方向, 其倾角不小于  $70^{\circ}$ 。
- (2) 2 个近水平方向的主应力中, 有 1 个是最大主应力。也就是说, 各测点最大主应力均位于近水平方向。18 个测点中, 有 9 个测点最大主应力的倾角小于  $5^{\circ}$ , 最小  $0.1^{\circ}$ ; 另有 3 个为  $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ , 6 个为  $10^{\circ}\sim 16^{\circ}$ 。最大主应力值与自重主应力相比, 仅有 1 个点小于 2 倍, 为 1.99 倍, 其他 17 个点均超过 2 倍, 有 2 个点达到 2.61 倍, 平均为 2.26 倍。这反映了矿区地应力场是以水平构造应力为主导, 而不是以自重应力为主导的事实。下面将位于近水平方向的 2 个主应力分别称为最大水平主应力( $\sigma_{h, \max}$ )和最小水平主应力( $\sigma_{h, \min}$ ), 位于近垂直方向的主应力称为垂直主应力( $\sigma_v$ )。

表 3 深部各测点应力解除应变值

Table 3 Strain values caused by stress relief at deep measuring position

$10^{-6}$

| 测点<br>编号        | 应力解除应变值 |       |       |       |     |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|---------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | y1      | y2    | y3    | y4    | y5  | y6    | y7    | y8    | y9    | y10   | y11   | y12   |
| 13 <sup>#</sup> | 515     | 937   | 961   | 897   | 606 | 794   | 949   | 704   | 444   | 872   | 1 025 | 823   |
| 14 <sup>#</sup> | 346     | 891   | 1 048 | 992   | 313 | 914   | 809   | 367   | -     | 784   | 1 171 | 1 514 |
| 15 <sup>#</sup> | 279     | 764   | -     | 933   | 450 | 977   | -     | 825   | 161   | 440   | 1 124 | 1 398 |
| 16 <sup>#</sup> | 526     | 1 560 | -     | 1 090 | 604 | 564   | 813   | 819   | -     | 1 400 | 1 492 | 1 088 |
| 17 <sup>#</sup> | 1 117   | 1 012 | 1 514 | 1 018 | 967 | 1 095 | 690   | 1 420 | 1 264 | 968   | 1 658 | -     |
| 18 <sup>#</sup> | 812     | 965   | 1 423 | 890   | 679 | 1 281 | 1 683 | -     | 885   | 1 091 | 703   | 1 292 |

表 4 深部各测点岩石弹性模量和泊松比值  
Table 4 Values of elastic moduli and Poisson's ratios of rock at deep measuring points

| 测点编号            | 弹性模量 $E/\text{GPa}$ | 泊松比 $\nu$ |
|-----------------|---------------------|-----------|
| 13 <sup>#</sup> | 46.2                | 0.24      |
| 14 <sup>#</sup> | 50.3                | 0.25      |
| 15 <sup>#</sup> | 43.1                | 0.25      |
| 16 <sup>#</sup> | 45.8                | 0.20      |
| 17 <sup>#</sup> | 42.6                | 0.24      |
| 18 <sup>#</sup> | 44.0                | 0.21      |

(3) 最大水平主应力的走向基本与区域构造应力场最大主应力的方向相一致。18 个测点中, 15 个点位于 SE~NW 向, 3 个位于 SW~NE 向, 其中有 10 个点集中在 S50°~90°E 范围内。

(4) 垂直主应力值与自重应力的比值, 18 个测点中有 3 个测点小于 1(分别为 0.97, 0.98 和 0.99), 其余 15 个测点均大于 1, 最大一点为 1.32, 18 个测点的平均比值为 1.12。说明矿区垂直主应

力值基本等于或略大于自重应力值。

4.2 浅部和深部地应力场分布规律比较

玲珑金矿第一期测量的 12 个测点位于-270 m 水平(埋深 570 m)以上, 可视为浅部; 二期测量的 6 个测点位于-620 m 水平以下, 埋深接近 1 000 m, 可视为深部。对比浅部和深部测量结果, 可得到如下几点认识:

(1) 如表 4 所示, 深部 6 个测点的岩石弹性模量值最大为 50.3 GPa, 平均为 45.3 GPa; 而浅部 12 个测点的岩石弹性模量值最大为 73 GPa, 平均为 57.2 GPa<sup>[2]</sup>; 深部岩石的弹性模量比浅部平均低 20%左右。说明随着深度的增加, 岩性有变软的趋势。但是, 地应力值的增长, 却没有随深度呈现显著减缓的趋势。

地应力变化趋势用最大水平主应力与自重应力之比作为比较指标较为客观。由表 5 中的地应力测量结果, 计算出浅部 12 个测点最大水平主应力与自重应力的比值平均为 2.29, 深部 6 个测点平均为 2.18, 二者相差不到 5%。表明深部与浅部相比, 尽

表 5 玲珑金矿 18 测点主应力测量结果  
Table 5 Measured results of principal stresses at 18 points in Linglong gold mine

| 测点编号            | 深度/m | $\sigma_1$ |        |        | $\sigma_2$ |        |        | $\sigma_3$ |        |        |
|-----------------|------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|
|                 |      | 数值/MPa     | 方向/(°) | 倾角/(°) | 数值/MPa     | 方向/(°) | 倾角/(°) | 数值/MPa     | 方向/(°) | 倾角/(°) |
| 1 <sup>#</sup>  | 250  | 17.63      | 52.6   | 4.7    | 8.62       | 321.9  | 7.7    | 7.58       | 353.6  | -81.0  |
| 2 <sup>#</sup>  | 250  | 14.06      | 287.7  | -14.4  | 7.63       | 19.4   | -6.6   | 6.63       | 133.5  | -74.1  |
| 3 <sup>#</sup>  | 290  | 15.58      | 141.4  | -3.0   | 8.28       | 24.5   | -83.3  | 6.84       | 51.8   | 5.9    |
| 4 <sup>#</sup>  | 290  | 17.51      | 294.8  | -0.1   | 9.37       | 26.3   | -84.3  | 7.26       | 24.8   | 5.7    |
| 5 <sup>#</sup>  | 290  | 17.68      | 280.3  | -13.5  | 9.25       | 322.8  | 72.0   | 6.61       | 193.2  | 11.7   |
| 6 <sup>#</sup>  | 290  | 20.45      | 343.5  | -6.4   | 8.36       | 75.3   | -15.1  | 7.75       | 51.2   | 73.5   |
| 7 <sup>#</sup>  | 290  | 19.74      | 91.3   | -2.1   | 10.09      | 171.9  | 77.1   | 8.58       | 1.8    | 12.7   |
| 8 <sup>#</sup>  | 370  | 23.43      | 138.2  | -9.3   | 12.69      | 12.7   | -74.2  | 10.13      | 50.3   | 12.6   |
| 9 <sup>#</sup>  | 370  | 21.32      | 103.6  | -12.0  | 10.68      | 237.4  | -72.9  | 8.20       | 103.6  | -12.0  |
| 10 <sup>#</sup> | 410  | 25.77      | 255.7  | 2.6    | 10.73      | 155.4  | 75.6   | 10.18      | 166.4  | -14.1  |
| 11 <sup>#</sup> | 410  | 25.55      | 218.0  | 2.1    | 11.51      | 118.8  | 77.1   | 8.64       | 128.5  | -12.7  |
| 12 <sup>#</sup> | 570  | 32.53      | 92.2   | -3.8   | 15.54      | 199.0  | -77.0  | 13.21      | 181.4  | 12.4   |
| 13 <sup>#</sup> | 920  | 53.13      | 134.7  | -5.3   | 27.72      | 81.4   | 81.2   | 25.51      | 44.1   | -7.0   |
| 14 <sup>#</sup> | 920  | 55.88      | 128.1  | -3.8   | 30.12      | 229.2  | -71.2  | 28.41      | 216.0  | 10.7   |
| 15 <sup>#</sup> | 920  | 50.17      | 273.3  | -15.8  | 27.72      | 314.1  | 70.2   | 24.89      | 187.0  | 13.1   |
| 16 <sup>#</sup> | 970  | 60.26      | 335.0  | 11.0   | 34.52      | 34.0   | 72.2   | 27.93      | 246.0  | -13.1  |
| 17 <sup>#</sup> | 970  | 57.92      | 136.1  | -0.5   | 30.24      | 227.1  | -70.0  | 26.96      | 226.0  | 15.0   |
| 18 <sup>#</sup> | 970  | 57.22      | 295.2  | 10.4   | 28.90      | 205.1  | 3.5    | 28.52      | 36.3   | 80.0   |

管岩性有较明显变化,但地应力分布规律并没有显著改变。这进一步说明,一个小范围岩体(如一个矿区)内的地应力状态及其分布规律主要是由区域构造应力场所控制,小范围的岩性变化对其影响并不显著。

(2) 根据地壳构造分析,平均水平主应力与垂直应力之比将随深度的增加逐渐减小,在地壳深部将是液态静水应力状态。早期估计,平均水平主应力与垂直应力之比在深度超过 1 000 m 之后可能出现明显的变化,即水平主应力增大的速度将会放缓<sup>[13, 14]</sup>。近年来深部地应力测量的成果,包括本次玲珑金矿测量结果,不能证明这一估计。水平主应力的增速在何深度会出现拐点,需要更大量、更深部的地应力测量数据才能作出判断<sup>[15, 16]</sup>。

(3) 由表 5 中的地应力测量结果计算得出,浅部 12 个测点最大水平主应力与最小水平主应力的比值,最大一点为 2.96,平均为 2.40;深部 6 个测点中,最大一点为 2.16,平均为 2.07。说明同一平面内的地应力分布状态,深部比浅部趋向均匀。

(4) 应力解除过程中测得的应变值的大小和地应力的值是一致的,所以表 1 中给出的最浅部 7 个测点(370 m 深度以上)的 84 个应力解除应变数据,除 1 个外,均小于  $400 \times 10^{-6}$ 。这 7 个测点各应变片的温度应变率多数为  $(30 \sim 60) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (这和深部各点几乎相同),而应力解除过程中各测点温度变化一般为  $1 \text{ } ^\circ\text{C} \sim 3 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。由此,这 7 个测点应力解除过程中由于温度变化引起的虚假应变值最大可超过  $100 \times 10^{-6}$ 。所以,浅部地应力测量中,温度标定试验对于保证测量结果的准确性显得尤为重要。

#### 4.3 地应力值随深度变化的规律

18 个点的测量结果和上述分析表明,矿区最大水平主应力、最小水平主应力和垂直主应力值均随深度呈近似线性增加的关系,地应力值(MPa)随深度的线性回归方程为

$$\sigma_{h, \max} = 0.4612 + 0.0588H \quad (1)$$

$$\sigma_{h, \min} = -0.4346 + 0.0286H \quad (2)$$

$$\sigma_v = -0.4683 + 0.0316H \quad (3)$$

式中:  $H$  为埋深(m)。

相应的回归曲线见图 3。最大水平主应力,垂直主应力和最小水平主应力的线性相关系数( $R$ )分别为 0.994 8, 0.989 6 和 0.987 3,一方面说明线性

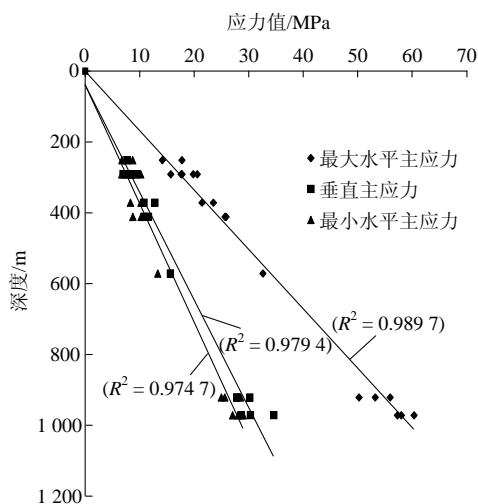


图 3 主应力随深度变化回归曲线

Fig.3 Linear regression lines of principal stresses with depth

相关的程度高,另一方面再次说明上、下部地应力增长规律没有出现明显改变。

## 5 结 论

采用应力解除法和实现完全温度补偿的空心包体应变测量技术,通过第一、二两期现场实测,获得玲珑金矿主矿区 7 个水平,18 个测点的三维地应力大小和方向。通过对实测结果的综合分析与比较,表明玲珑金矿主矿区地应力场分布状态具有如下主要规律:

(1) 矿区地应力场是以水平构造应力为主导的,而不是以自重应力为主导的,最大水平主应力平均为自重应力的 2.26 倍;垂直主应力基本上等于或略大于自重应力。

(2) 最大水平主应力,最小水平主应力和垂直主应力值均随深度呈几乎线性增长的关系。

(3) 深部与浅部相比,岩性有较明显变化,但地应力场分布规律并没有显著改变。说明一个矿区的地应力状态主要是由区域构造应力场所控制,局部岩性变化对其影响并不显著。

## 参考文献(References):

- [1] 乔 兰, 蔡美峰, 付学生. 玲珑金矿工程地质调查与评价[J]. 黄金, 2000, 21(5): 1-6. (QIAO Lan, CAI Meifeng, FU Xuesheng. Investigation and evaluation of engineering-geological conditions in Linglong gold mine[J]. Huang Jin, 2000, 21(5): 1-6. (in Chinese))

- [2] 蔡美峰, 王双红. 玲珑金矿地应力场测量结果及其分析[J]. 中国矿业, 2000, 9(5): 46 - 51.(CAI Meifeng, WANG Shuanghong. Results and their analysis of in-situ stress measurement in Linglong gold mine[J]. China Mining Magazine, 2000, 9(5): 46 - 51.(in Chinese))
- [3] 蔡美峰, 王金安, 王双红. 玲珑金矿深部开采岩体能量分析与岩爆综合预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 38 - 42.(CAI Meifeng, WANG Jin'an, WANG Shuanghong. Analysis of energy distribution and prediction of rock burst during deep mining excavation in Linglong gold mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 38 - 42.(in Chinese))
- [4] 蔡美峰. 地应力测量原理和技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.(CAI Meifeng. Principle and techniques of rock stress measurement[M]. Beijing: Science Press, 2000.(in Chinese))
- [5] CAI M, QIAO L, YU B. Study and tests of techniques for increasing overcoring stress measurement accuracy[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1995, 32(4): 375 - 384.
- [6] AMADEI B, STEPHANSSON O. Rock stress and its measurement[M]. London: Chapman and Hall, 1997.
- [7] 蔡美峰. 地应力测量中温度补偿方法的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(3): 227 - 235.(CAI Meifeng. Studies of temperature compensation techniques in rock stress measurements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(3): 227 - 235.(in Chinese))
- [8] 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.(WANG Lianjie, PAN Lizhou, LIAO Chunting, et al. Rock stress measurement and its engineering application[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.(in Chinese))
- [9] CAI M F, QIAO L, LI C H, et al. Improvement on hollow inclusion technique and its application to in-situ stress measurement[C]// Proceedings of the International Symposium on Rock Stress. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1997: 89 - 93.
- [10] 苗胜军, 万林海, 来兴平, 等. 三山岛金矿地应力场与地质构造关系分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 3 996 - 3 999.(MIAO Shengjun, WAN Linhai, LAI Xingping, et al. Relation analysis between in-situ stress field and geological tectonism in Sanshandao gold mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 3 996 - 3 999.(in Chinese))
- [11] 刘允芳, 刘元坤. 围压试验在空心包体式应变计地应力测量中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 3 932 - 3 937.(LIU Yunfang, LIU Yuankun. Function of confining pressure test on hollow inclusion triaxial strain gauge for geostress measurement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 3 932 - 3 937.(in Chinese))
- [12] DUNCAN F M E, PENDER M J. Analysis of the hollow inclusion technique for measuring in-situ stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1980, 17(3): 375 - 384.
- [13] 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒, 等. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.(YU Xuefu, ZHENG Yingren, LIU Huaiheng, et al. Stability analysis of surrounding rock mass in underground engineering[M]. Beijing: Coal Industry Publishing House, 1983.(in Chinese))
- [14] BROWN E T, HOEK E. Trends in relationship between measured in-situ stresses and depth[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1978, 15(4): 375 - 384.
- [15] 蔡美峰, 乔 兰, 于 波, 等. 金川二矿区深部地应力测量及其分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 414 - 418.(CAI Meifeng, QIAO Lan, YU Bo, et al. Results and analysis of in-situ stress measurement at deep position of No.2 mining area of Jinchuan nickel mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(4): 414 - 418.(in Chinese))
- [16] 蔡美峰, 陈长臻, 彭 华, 等. 万福煤矿深部水压致裂地应力测量[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 1 069 - 1 074.(CAI Meifeng, CHEN Changzhen, PENG Hua, et al. In-situ stress measurement by hydraulic fracturing technique in deep position of Wanfu coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 1 069 - 1 074.(in Chinese))