

中国大陆金属矿区实测地应力分析及应用

李鹏^{1 2)}, 苗胜军^{1 2)}✉

1) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083 2) 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083
✉通信作者, E-mail: miaoshengjun@163.com

摘要 以迄今为止查阅到的中国大陆金属矿区实测地应力数据为基础, 经优化处理后最终采用 165 组数据, 基本覆盖了我国大陆主要金属矿山分布地区。采用回归分析法给出了中国大陆金属矿区测量埋深范围内的地应力场特征, 并尝试从地应力的角度对中国大陆金属矿区断层的稳定性进行了讨论。结果显示, 中国大陆金属矿区垂直主应力、最大与最小水平主应力总体上随埋深呈线性增加; 最大与最小水平主应力之差 $\Delta\sigma$ 随埋深的增加有增大的趋势, 但规律性不显著; 最大水平主应力与垂直主应力之比 $K_{h,max}$ 主要集中在 1.00 ~ 2.50 之间, 最小水平主应力与垂直主应力之比 $K_{h,min}$ 主要集中在 0.50 ~ 1.50 之间, 平均水平主应力与垂直主应力之比 $K_{h,av}$ 主要集中在 1.00 ~ 2.00 之间。随着埋深的增加, 3 个侧压系数的变化幅度逐渐减小, $K_{h,max}$ 趋向于 1.83, $K_{h,min}$ 趋向于 0.80, $K_{h,av}$ 趋向于 1.31; 最大与最小水平主应力之比与埋深没有显著的关系, 主要集中在 1.5 ~ 2.0 之间, 近似服从正态分布; 断层在埋深小于 500 m 范围内有滑动的可能, 埋深超过 500 m 时, 逆断层有滑动的可能, 走滑断层处于相对稳定状态。

关键词 岩石力学; 井下工程灾害; 金属矿区; 优化处理; 地应力场; 分布规律; 断层稳定性
分类号 P642.3

Analysis and application of in-situ stress in metal mining area of Chinese mainland

LI Peng^{1 2)}, MIAO Sheng-jun^{1 2)}✉

1) School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2) State Key Laboratory of the Education Ministry for High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Beijing 100083, China
✉Corresponding author, E-mail: miaoshengjun@163.com

ABSTRACT Based on the measured in-situ stress data of the metal mining area in China, 165 sets of data were finally adopted after optimized treatment, which basically covers the distribution area of the main metal mines in the Chinese mainland. The characteristics of in-situ stress field in the buried depth of the metal mining area in China were presented by regression analysis method, and the stability of the fault of the metal mining area in China was discussed from the ground stress. The results show that the vertical principal stress, the maximum horizontal principal stress and the minimum horizontal principal stress in the metal mining area of Chinese mainland generally increase linearly with the depth. The difference between maximum and minimum horizontal principal stresses ($\Delta\sigma$) increases with the depth, but the regularity is not significant. The ratio of maximum horizontal principal stress to vertical principal stress ($K_{h,max}$), the ratio of minimum horizontal principal stress to vertical principal stress ($K_{h,min}$) and the ratio of average horizontal stress to vertical principal stress ($K_{h,av}$) mainly concentrate in the interval of 1.00 to 2.50, 0.50 to 1.50, and 1.00 to 2.00, respectively. With the increase of depth, the variation amplitudes of the three lateral pressure coefficients decrease gradually: $K_{h,max}$, $K_{h,min}$ and $K_{h,av}$ tend to 1.83, 0.80 and 1.31, respectively. The ratio of maximum horizontal principal stress to minimum horizontal principal stress has no obvious regularity with the depth, and the values mainly concentrate from 1.5 to 2.0, approximate to normal distribution. Metal mining area has the possibility of fault slip when the depth is less than 500 m, and the reverse fault has the possibility of sliding.

收稿日期: 2016-05-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2015CB060200); 国家自然科学基金资助项目(51574014); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-16-017A3)

while the strike slip fault is in a relatively stable state when the depth is more than 500 m.

KEY WORDS rock mechanics; underground engineering disaster; metal mining area; optimized processing; in-situ stress field; distribution rules; fault stability

地应力是客观存在于地层中的天然应力,它是引起采矿工程及其他地下工程变形与破坏的根本驱动力^[1-2]对地下工程的安全稳定起着决定性作用。有研究认为,地壳浅层变形和内部构造活动、断裂滑动失稳以及地震等也与地应力状态密切相关。地应力大小是地下工程设计的基本参数,直接影响工程岩体的力学行为。为了合理进行地下工程的开挖设计与施工,必须提前详细了解拟建工程区域的地应力场状态。特别是对于深部地下工程,往往会出现高地应力、高地温和高岩溶水压的情况,为了保障工程安全就需要准确地掌握工程区域的地应力状态。就金属矿而言,合理的巷道布置、开采方法的选择、巷道断面形状及尺寸的确定以及支护形式的选择等都需要了解具体工程区域的地应力分布规律^[3-4],这对优化采矿方法、提高资源回收率及预防岩爆等灾害具有积极作用。

自从 Hast^[5]在纳维亚半岛进行了地应力测量工作,世界各国逐渐开始对地应力进行广泛而深入的研究。随着地应力测量工作的开展,实测地应力数据不断积累,基于大量实测数据利用数学手段定量描述地应力场的分布特征,这一方法是有效可行的。Worotnicki 和 Denham^[6]根据实测应力资料,建立了平均水平应力和垂直主应力随埋深的线性回归关系。Brown 和 Hoek^[7-8]根据世界不同地区地应力测量结果,得到了世界范围内地应力随深度分布特征。Zoback^[9]绘制了世界应力图,并逐渐修改完善,现已被广泛引用。黄禄渊等^[10]以中国大陆地壳应力环境基础数据库为基础,选取华北地区水压致裂法与应力解除法的实测地应力数据,得到华北地区及研究子区宏观应力场特征。康红普等^[11]基于实测地应力数据,统计分析了山西煤矿矿区地应力与测点埋深的关系,绘制出了山西省煤矿矿区井下地应力分布图。李新平等^[12]根据地应力实测资料,研究了我国大陆深部(埋深大于 500 m)地应力随埋深分布规律。王章琼等^[13]根据收集的实测数据分析了我国大陆地区地下水封洞库工程区的地应力分布特征。

实测地应力数据不仅可以描述地应力分布特征,而且越来越多地应用于分析断层稳定性、地震活动等。Sibson^[14]讨论了在 Anderson 断层系统下的最易滑动平面及所需的最小差应力。Yin 等^[15]讨论了确定方向的断层在非 Anderson 断层系统下摩擦滑动的临界应力。臧绍先等^[16]根据 Byerlee 定律推导出了逆断层、正断层及走滑断层的摩擦滑动强度(临界主应力差)公式,来判断断层的活动性强度。王成虎等^[17]提出利用平

均差应力和平均有效应力之比和最大主应力方向与断层面夹角来评价区域断裂强度和应力积累水平,进而评价断裂的稳定性。孟文等^[18]根据测得的新加坡地区地应力数据,分析了新加坡地区断层产生摩擦滑动的可能性。秦向辉等^[19]基于实测应力数据,评价了北京地区主要断裂稳定性。曹辉等^[20]通过测量安第斯山中段地应力数据,探讨了震源深度处的应力状态。

矿产资源特别是金属矿产资源的开发与利用已成为一个国家经济起飞的首要条件,是影响国民经济与社会发展的重要因素。据不完全统计,我国地下金属矿山约占矿山总数的 89%,目前一些大中型露天矿山也相继转入地下开采,地下金属矿山的开采将发挥更加重要的作用。随着世界经济的快速发展,对能源和资源的需求日益增多,浅部资源日益枯竭,已不能满足当今社会发展的需求,国内外矿山都相继向深部延伸,增加开采深度以求开采出更多的资源。目前,国内外深部金属矿山基本都处于地表以下 500 m 甚至几 km,矿体在此深度下受到高应力的作用^[21]。当前我国金属矿山的开采深度大多在 1000 m 以内,有一些已超过 1000 m,如河南灵宝崆鑫金矿、夹皮沟金矿、红透山铜矿及云南会泽铅锌矿等,国内金属矿山的开采深度还在不断地刷新。据国内金属矿山地应力测量数据,深度为 1000 m 左右时,地应力水平约 52 ~ 61 MPa,在高应力状态下进行工程开挖,将面临严峻挑战。随着开采深度的增加,工程地质状况会变得更加复杂,工程灾害也会随之发生,如岩爆、矿压显现加剧、地温升高、巷道围岩大变形、流变等,应力水平的增加和应力状态的改变是造成这些工程灾害的根本原因^[22-23]。高应力的存在是深部采矿和浅部采矿最大区别之一,地应力在深部开采中的作用将越来越突出,对工程的影响也会更加明显。因此,统计分析我国金属矿区地应力分布规律意义重大,可以深化对其认识,用以指导生产实践。

对于金属矿山地应力分布规律的研究,前人已经做了很多有益工作,但主要是针对具体某个矿山进行的测量分析,而且大多数矿山要考虑成本经费问题,所选测点较少,有些甚至只有 1 ~ 2 个测点,难以较全面地反映真实地应力状态。我国已积累了一定量的金属矿山实测地应力数据资料,希望通过收集到的国内各地的实测地应力数据,系统地分析我国金属矿区的地应力场变化特征,以求能较全面地展现我国金属矿区应力场宏观分布规律,为今后与地应力有关的矿山开采设计、断层稳定性评价及工程灾害预防与治理等工作提供一定的科学依据。依据实测数据,对我国金属

矿区地应力特征进行了初步分析,并根据库伦滑动摩擦准则和 Byerlee 定律,从地应力的角度评价了我国大陆金属矿区断层的稳定性,探讨了地应力状态与断层稳定性之间的关系。

1 地应力数据资料

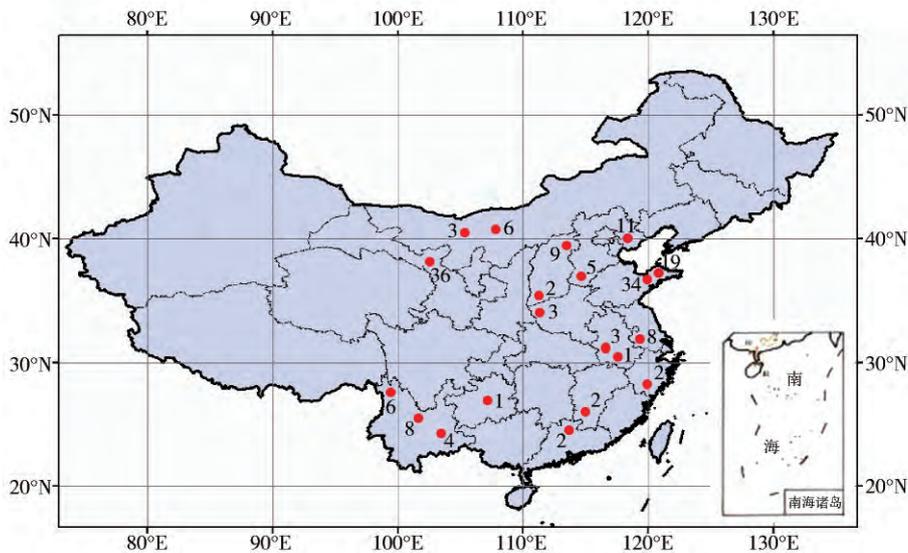
1.1 地应力测量方法

地应力测量方法可分为直接测量法和间接测量法两类。直接测量法无需知道岩石的物理力学性质与应力-应变关系,可由测量所得的补偿应力、平衡应力或其他应力值获得地应力数据,主要包括:扁千斤顶法、水压致裂法、刚性圆筒应力计和声发射法等。间接测量法通过记录一些与应力相关的变形和应变等间接物理量根据已知公式算出地应力值,主要有:应力解除法、实心(或空心)包体应变测量、地球物理探测法及地质方法等^[24-25]。这些测量方法在测定不同岩性地应力、操作难易程度等方面各有优缺点,适用条件、测量精度也有所差别。其中水压致裂法与应力解除法是比

较成熟的地应力测量手段,测量精度较高,是目前进行地应力测量的主要方法,实际应用比较广泛。本文统计的地应力实测数据,主要是由应力解除法测得,还有少量数据由水压致裂法测得。

1.2 数据分布

本文共收集了迄今为止查阅到的国内多个金属矿山的实测地应力数据,包括岭南金矿、大红山铁矿、夜长坪钼矿、铜矿峪铜矿、峨口铁矿、凡口铅锌矿、获各琦铜矿、金川各矿区、玲珑金矿、六苴铜矿、梅山铁矿、三山岛金矿、狮子山铜矿、水厂铁矿、安庆铜矿、图古日格金矿、遂昌金矿、新城金矿、良山铁矿及开阳磷矿等金属矿山。由于参考的资料及文献较多,这里不再一一引用。数据分布地点基本覆盖了我国大陆主要金属矿山所在地区(见图1),这些数据具有良好的代表性。目前我国金属矿山的绝大部分应力测量深度仅数百m,超过1000m的深井测量则十分少见。从本次收集到的地应力数据看,地应力测量深度都在1000m以内,最大测量深度为975m。



注:图中红色实心圆点代表所收集地应力所在的大致区域,蓝色数字代表该区域的实测地应力数量。

图1 实测地应力数据分布

Fig.1 Distribution of measured in-situ stress data

1.3 数据优化

对于采用应力解除法测试得到的3个主应力,根据所收集的数据发现,一般情况下其中一个主应力的方向并不绝对指向垂直方向,而是与垂直方向存在一定夹角,另外2个主应力一般也与水平方向存在一定夹角,有时夹角还比较大。为便于分析,仅从近似垂直与水平两个方向研究地应力状态。考虑到我国金属矿区地应力数据整体还不是太丰富,一些地区实测地应力数据较少,为了能较全面地了解我国金属矿区的地应力特征,因此适当放宽了水平与垂直两个方向的划定标准。对于本文收集的数据,最大主应力 σ_1 的倾角

绝对值小于 30° 时,可以认为是近似水平的,将其标定为最大水平主应力($\sigma_{h,max}$);还有一个主应力,可能是 σ_2 或 σ_3 也比较接近于水平方向,当其倾角绝对值小于 30° 时,标注为最小水平主应力($\sigma_{h,min}$);剩下的一个主应力(σ_2 或 σ_3)比较接近于垂直方向,当其倾角绝对值大于 60° 时,可以认为是近似垂直的,将其标定为垂直主应力(σ_v)。

为了能得到可靠的研究结果,对收集到的地应力数据进行质量评价及优化处理^[26]。将数据进行线性拟合,以所得的拟合直线为中心,在其两侧作两条对称的直线,使95%的数据落到两条对称线内侧,这部分

数据认为是有效的,落在对称线外侧的 5% 的数据,认为偏离回归线较远,视为异常数据,则将其剔除,具体处理方式见图 2. 经过数据优化处理后,将低质量、低可靠性的数据删去,只采用较高质量的数据进

行分析,最终选取了 165 组(图 1)有效数据作为地应力统计分析样本. 其中水压致裂数据 16 组,埋深范围为 99 ~ 302 m; 应力解除数据 149 组,埋深范围为 44 ~ 975 m.

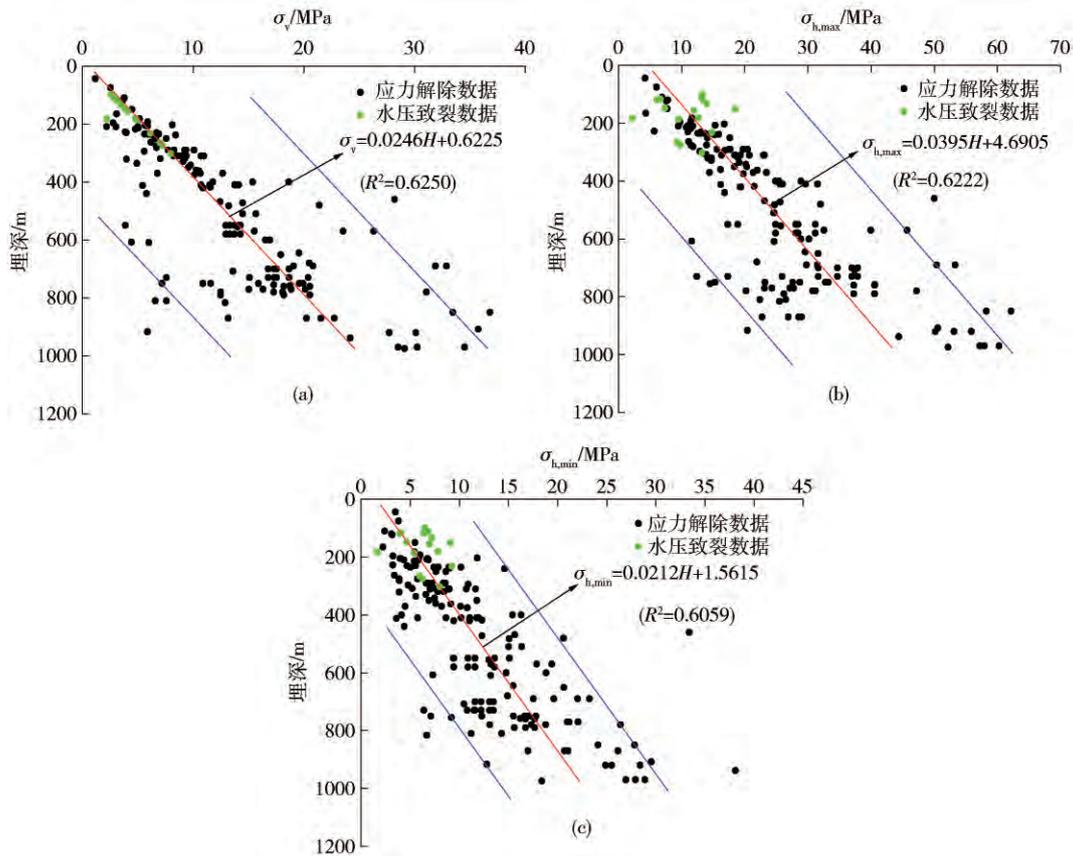


图 2 实测地应力数据优化

Fig. 2 Optimized processing of measured in-situ stress data

2 数据资料分析

2.1 金属矿区地应力场特征分析

2.1.1 垂直主应力随埋深变化

对于垂直主应力的测量数据,水压致裂法采用的是二维测试系统,采用该方法实际上无法测量真实的垂直主应力,而应力解除法得到的是实测垂直主应力数据. 因此,在研究垂直主应力随埋深分布规律时,将水压致裂法得到的数据与应力解除法得到的数据分开处理. 鉴于水压致裂法测量数据很少,不作具体分析,利用应力解除法测得的垂直主应力数据来研究我国金属矿区的垂直主应力分布规律.

垂直主应力的取值范围为 1.19 ~ 34.52 MPa, 平均为 12.11 MPa. 从图 3 中可以看出垂直主应力整体上随着埋深增加而增大,具有明显的线性相关性,符合已有的认识和规律. 但由于国内各地区矿区地质条件(如地形地貌、断层、褶皱、构造运动和地下水)差异较大,而且地应力测量不可避免地会受到矿山开采扰动

的影响,导致地应力测量数据离散性也较大. 有的离散数据表明即使在同一地区相同埋深的情况下,垂直主应力也相差很大,这与地质因素有重要关系. 对应力解除法得到的垂直主应力数据与埋深的关系进行线性回归,结果为

$$\sigma_v = 0.0242H + 0.5672 \quad R^2 = 0.7153. \quad (1)$$

式中: σ_v 为应力解除法得到的垂直主应力, MPa; H 为深度, m.

σ_v 的相关系数超过了 0.71, 垂直主应力与埋深具有一定的线性关系. 式(1)中的应力变化梯度较小,而且还有一个较小常数项,这种偏差除可能与测量误差有关外,还可能与板块移动、岩浆活动、构造运动等地质作用有关,这是地质因素及其他因素综合影响的结果. 采用地表值为 0 的约束回归方法(即常数项为 0)时,得到 σ_v 随埋深变化的线性回归方程为

$$\sigma_v = 0.0251H \quad R^2 = 0.7139. \quad (2)$$

Brown 和 Hoek^[7-8] 统计得到的全球范围内垂直主应力随埋深的变化规律为

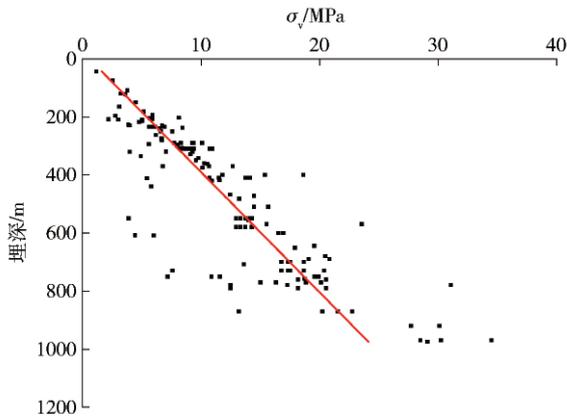


图3 垂直主应力随埋深分布图

Fig. 3 Distribution of vertical stress with depth

$$\sigma_v = 0.027H. \quad (3)$$

式(2)与式(3)相比,我国金属矿区垂直主应力的应力变化梯度略小于全球垂直主应力的应力变化梯度,但我国金属矿区垂直地应力随埋深分布规律与全球实测地应力随埋深分布规律基本一致.若取岩体平均密度为 $26.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,我国金属矿区垂直主应力在数值上基本等于或略小于上覆岩体重量.

2.1.2 水平主应力随埋深变化

我国大陆金属矿区最大水平主应力 $\sigma_{h,max}$ 、最小水

平主应力 $\sigma_{h,min}$ 与平均水平主应力 $\sigma_{h,av}$ 随埋深分布变化规律如图4所示.图4表明 $\sigma_{h,max}$ 、 $\sigma_{h,min}$ 与 $\sigma_{h,av}$ 数据分布具有一定的离散性,总体上随埋深增加而增大,与已有的结论一致.在埋深小于500 m 范围内,散点比较集中分布在回归直线两边,而埋深超过500 m 以后,散点相对离散,但仍分布在回归直线两侧.这可能与样本数据相对较少和测量误差有关.比较图4(a)、(b)可知,相同埋深下的 $\sigma_{h,max}$ 与 $\sigma_{h,min}$ 相差较大,显示出很强的方向性.我国不同地区金属矿山在相同埋深下水平应力有一定的差别,相差较小的几乎相等,相差较大的超过10 MPa.最大水平主应力的取值范围为2.16~60.26 MPa,平均为22.21 MPa;最小水平主应力的取值范围为1.66~28.90 MPa,平均为10.85 MPa;平均水平主应力的取值范围为1.91~44.10 MPa,平均为16.53 MPa.对 $\sigma_{h,max}$ 、 $\sigma_{h,min}$ 、 $\sigma_{h,av}$ 与埋深的关系进行了回归拟合,结果为

$$\sigma_{h,max} = 0.0401H + 4.2364, R^2 = 0.7308, \quad (4)$$

$$\sigma_{h,min} = 0.0209H + 1.4960, R^2 = 0.7293, \quad (5)$$

$$\sigma_{h,av} = 0.0305H + 2.8662, R^2 = 0.7895. \quad (6)$$

3个水平主应力回归方程的相关系数均大于0.72,说明各水平主应力随埋深具有一定的线性关系.

Anderson 根据断层类型,将地应力划分为正断层应力类型、逆断层应力类型和走滑断层应力类型3种.根

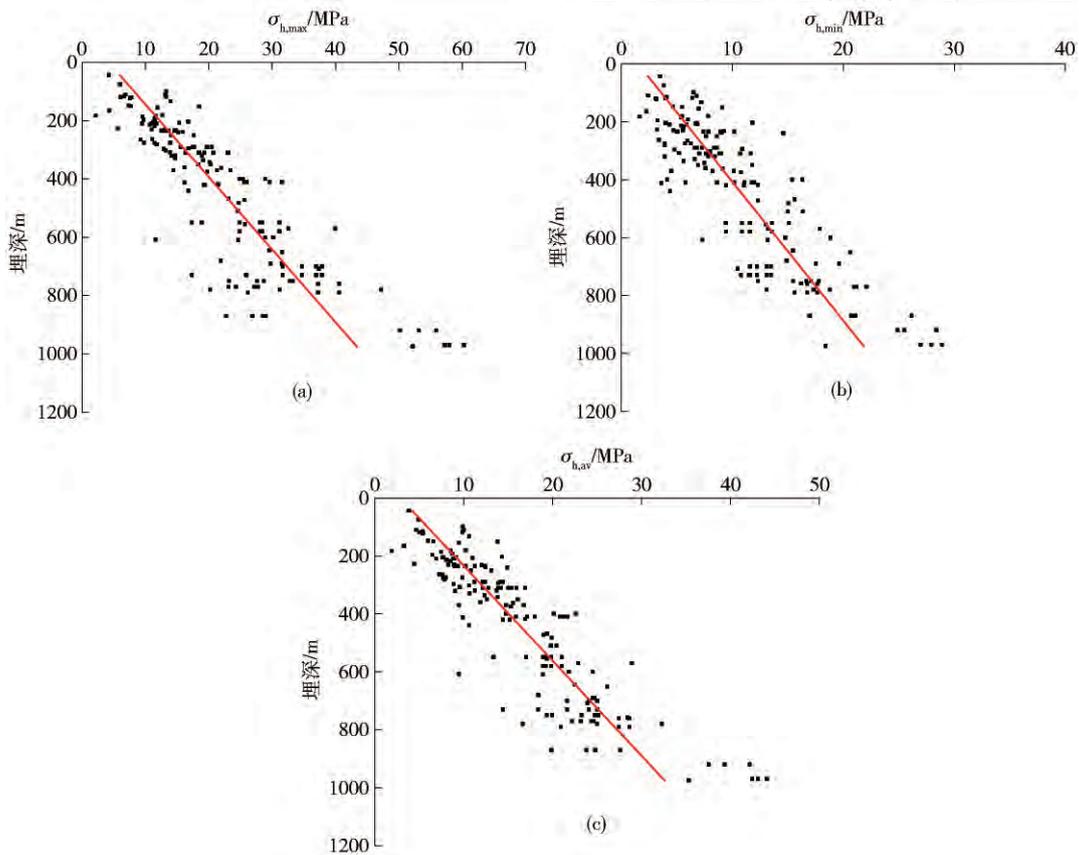


图4 水平主应力随埋深分布图

Fig. 4 Distribution of the horizontal principal stress with depth

据式(1)、(4)和(5)理论计算可得 $44 < H < 281 \text{ m}$ 时, 3 个主应力的大小关系表现为 $\sigma_{h \text{ max}} > \sigma_{h \text{ min}} > \sigma_v$, 属逆断层型应力状态, 有利于逆断层的发育活动; $281 < H < 975 \text{ m}$ 时, 3 个主应力的大小关系表现为 $\sigma_{h \text{ max}} > \sigma_v > \sigma_{h \text{ min}}$, 属走滑型应力状态, 有利于走滑断层的发育活动. 统计埋深范围内, 应力状态的转变, 反映出深部地下岩体、断裂构造等所处的力学环境发生了一定变化. 比较式(1)、(4)和(5)可知, $\sigma_{h \text{ max}}$ 的应力变化梯度(0.0401)最大, σ_v 的应力变化梯度略大于 $\sigma_{h \text{ min}}$ 的, 表明在 1000 m 左右的埋深范围内, $\sigma_{h \text{ max}}$ 随埋深的增加速度较大, 最大水平主应力在地应力变化中起主导作用. 式(4)中的数值大于 1 的常数项比式(1)中的常数项大, 表明我国大陆金属矿山地区地壳中存在较大水平应力的事实, 这与水平方向的构造运动(板块移动、碰撞等)密切相关.

王连捷等^[27]给出了中国大陆科学钻主孔 S_H (最大水平主应力)、 S_h (最小水平主应力)随深度变化的回归结果:

$$S_H = 0.031H + 5.5, \quad (7)$$

$$S_h = 0.0229H + 2.5. \quad (8)$$

将式(4)、(5)与式(7)、(8)对比可知, 二者最大水平主应力的应力变化梯度相差较大, 约为 22.7%, 而最小水平主应力相对应的应力变化梯度非常接近, 式(4)、(5)中的常数项均相对较小. 可以看出, 我国大陆金属矿区水平主应力与我国大陆科学钻主孔水平主应力的变化情况大体一致. 又将本次计算结果与前人统计结果相比, 发现地应力变化趋势基本相符, 但在应力变化梯度和常数项值上存在一些差异, 这可能是由于回归计算使用的数据量、统计深度范围不同及回归结果中包含有影响地应力的开采扰动因素等原因造成的, 但可能表明我国大陆金属矿区地应力场特征确实具有其自身的特殊性.

2.1.3 最大与最小水平主应力之差随埋深变化

最大与最小水平主应力之差 $\Delta\sigma$ ($\Delta\sigma = \sigma_{h \text{ max}} - \sigma_{h \text{ min}}$) 与岩体中的剪应力密切相关, 其在一定程度上可以反映井下岩体是否处于稳定状态. $\Delta\sigma$ 值较大时, 岩体承受的剪应力往往也较大, 则发生剪切破坏的可能性也较大, 较高的差应力是影响井下围岩稳定的重要因素. 本文给出了 $\Delta\sigma$ 随埋深的分布变化规律, 如图 5 所示. 图 5 表明 $\Delta\sigma$ 随埋深分布整体离散性比较大, 在埋深小于 500 m 时数据较为集中, 超过 500 m 后, 离散性变大. 对 $\Delta\sigma$ 随埋深的变化进行回归分析, 回归拟合结果为

$$\Delta\sigma = 0.0192H + 2.7404. \quad (9)$$

根据式(9), $\Delta\sigma$ 大致随埋深的增加有增大的趋势, 存在一定的线性关系, 但规律性并不十分显著. 本文对其进行回归分析, 主要是为了解 $\Delta\sigma$ 随埋深的变

化趋势. $\Delta\sigma$ 整体上随埋深是增长的, 这可能与岩石的弹性模量、强度随埋深的增大有关.

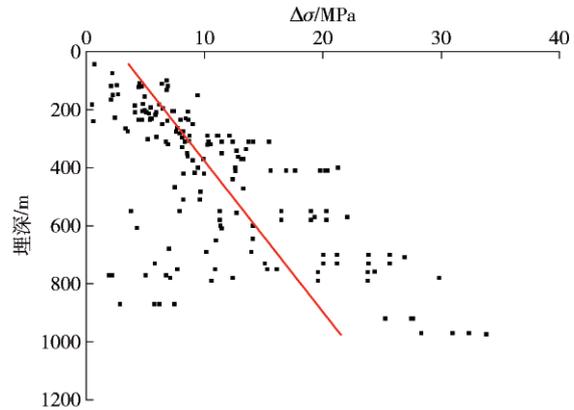


图 5 $\Delta\sigma$ 随埋深分布图

Fig. 5 Distribution of $\Delta\sigma$ with depth

经统计得, $\Delta\sigma$ 最小值为 0.50 MPa, 最大值为 33.80 MPa, 平均为 11.37 MPa. 在埋深介于 44 ~ 200 m 时的 $\Delta\sigma$ 平均值约为 4.41 MPa, 200 ~ 500 m 埋深段的 $\Delta\sigma$ 平均值约为 9.45 MPa, 埋深大于 500 m 时的 $\Delta\sigma$ 平均值约为 16.01 MPa. 可以看出, $\Delta\sigma$ 在以上埋深段近似以 2 倍的速度增加. 当埋深较大时, 过大的 $\Delta\sigma$ 值可能导致岩体内形成较大的剪应力, 岩体将发生断裂, 容易形成断层、节理等构造, 严重影响井下巷道及采场的安全. 尤其是在深部地区, 应当引起重视, 高水平应力以及高差应力可能导致不良结构面、岩体的变形破坏. 对于矿山自身, 围岩内高的差应力会引起岩体储存能量的变化, 并有可能引发岩石片帮、顶板冒落, 甚至岩爆等灾害, 对地下采矿工程的稳定性有很不利的影响.

在金属矿山开采中常会遇到岩爆等工程灾害, 这对井下设施及人员安全构成严重的威胁. 随着开采深度的增加, 大范围岩体分区破裂化和岩爆事故等的出现更加频繁^[28]. 金属矿山的矿岩基本都属于硬岩岩性, 深部岩体在高应力的作用下, 会在岩体内部积聚大量的变形能, 在一定的诱发条件下, 如果岩体内积累的变形能以动能的形式突然释放出来, 容易引发岩爆. 深部岩体所处的应力构造环境更容易在巷道、采空区等临空面形成高的差应力, 有研究认为, 岩体中的高应力尤其是高的差应力也是岩爆发生的必要条件^[29].

2.1.4 侧压系数随埋深变化

目前, 在研究地应力场时通常用两个水平应力与垂直主应力的比值(即侧压系数)来描述地下某点的应力状态和地应力随埋深的变化规律, 这种方法已被国内外学者所认可, 具有一定的合理性. 式(10)便是世界不同地区侧压系数随深度的变化范围, 为研究侧压系数与埋深的关系提供了基本判据. 本文主要研究最大水平主应力与垂直主应力之比($K_{h \text{ max}}$)、最小水平主应力与垂直主应力之比($K_{h \text{ min}}$)、平均水平应力与垂

直主应力之比 ($K_{h,av}$) 3 个侧压系数随埋深的变化规律. 对 3 个侧压系数随埋深的变化进行回归分析, 并拟合出 3 个侧压系数的内外包络线, 结果分别为式 (11) 和 (12).

$$\frac{100}{H} + 0.3 \leq K_{h,av} \leq \frac{1500}{H} + 0.5. \quad (10)$$

$$\begin{cases} K_{h,max} = \frac{103.70}{H} + 1.83, \\ K_{h,min} = \frac{80.62}{H} + 0.80, \\ K_{h,av} = \frac{92.16}{H} + 1.31. \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \frac{38.23}{H} + 1.05 \leq K_{h,max} \leq \frac{267.73}{H} + 2.49, \\ \frac{18.52}{H} + 0.49 \leq K_{h,min} \leq \frac{155.69}{H} + 1.38, \\ \frac{25.66}{H} + 0.74 \leq K_{h,av} \leq \frac{201.97}{H} + 1.89. \end{cases} \quad (12)$$

图 6 为 3 个侧压系数随埋深分布图(图中红色曲线为各侧压系数的拟合曲线,蓝色曲线为拟合的内外包络线)拟合结果基本上能反映其随埋深的分布规律,与前人的统计分析结果总体上比较相似.从图中可以看出,3 个侧压系数的散点图均较离散,这可能与地形地貌、沉积环境、局部断裂构造以及岩石风化程度

的差异有关.整体上 $K_{h,max}$ 的分布范围为 0.85 ~ 5.12, 平均为 2.16; $K_{h,min}$ 的分布范围为 0.27 ~ 3.12, 平均为 1.06; $K_{h,av}$ 的分布范围为 0.71 ~ 4.06, 平均为 1.61. 随着深度的增加,3 个侧压系数逐渐收敛,最后趋向于一个恒定值.具体来看,由图 6(a) 知, $K_{h,max}$ 值几乎全部大于 1, 主要集中在 1.00 ~ 2.50 之间, 有 135 个数据, 约占全部数据的 81.8%. 埋深 H 在 44 m ~ 400 m 时, $K_{h,max}$ 多为 1.00 ~ 3.00; 随着 H 的增加, $K_{h,max}$ 有下降趋势, 400 m < H < 975 m 时, 主要在 1.50 ~ 2.50 之间. $K_{h,max}$ 最后趋向于 1.83. 由图 6(b) 知, $K_{h,min}$ 主要集中在 0.50 ~ 1.50 之间, 有 146 个数据, 约占全部数据的 88.5%. 44 m < H < 400 m 时, $K_{h,min}$ 多为 0.50 ~ 1.50; 400 m < H < 975 m 时, $K_{h,min}$ 的变化范围减小, 主要在 0.70 ~ 1.20 之间. $K_{h,min}$ 最后趋向于 0.80. 由图 6(c) 知, $K_{h,av}$ 主要在 1.00 ~ 2.00 范围内, 有 136 个数据, 约占全部数据的 82.4%. 随着埋深的增加, $K_{h,av}$ 变化幅度逐渐减小, 向 1.31 逼近. 由此可见, 在地层浅部, 构造应力处于主要地位, 逐渐过渡到深部后, 3 个主应力的差距在缩小, 表明水平构造应力场的主导作用逐渐减弱, 垂直主应力作用有增强的趋势, 地应力场逐步转化为自重应力与构造应力相当的情形. 由于本次统计的数据埋深都在 1000 m 以内, 我国大陆金属矿区深部是否会出现静水压力状态还未可知, 需要大量更深度

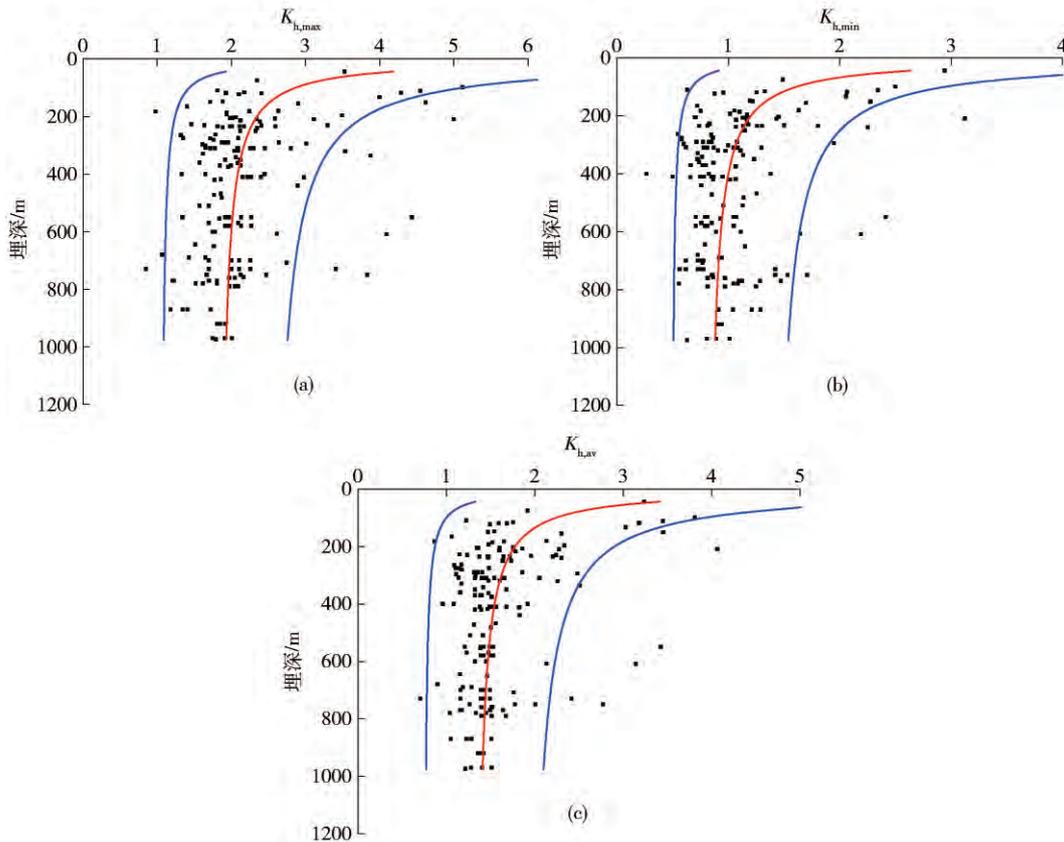


图 6 3 个侧压系数随埋深分布图
Fig. 6 Distribution of three lateral pressure coefficients with depth

的地应力数据进一步研究.

在地壳内平均水平应力等于垂直主应力时的深度,也即是 $K_{h,av} = 1$ 时的深度称为临界深度^[30]. 由图 6 (c) 知,除少数几个数据点外, $K_{h,av}$ 基本大于 1,由式 (11) 也知 $K_{h,av}$ 最后只是趋向于 1.31,可认为在本文的研究埋深范围内,还未出现临界深度. 而根据文献 [26] 得到的中国大陆地壳浅层的 $K_{h,av}$ 表达式计算出临界深度约为 465 m,可见我国大陆金属矿区地应力场水平主应力偏大,垂直主应力相对偏小,造成侧压系数整体大于 1,这与我国大陆地壳浅层地应力场特征有很大的差别,导致这种差别的原因与金属矿山自身的工程特点有很大关系.

2.1.5 最大与最小水平主应力之比随埋深变化

最大与最小水平主应力之比 $\lambda (\lambda = \sigma_{h,max} / \sigma_{h,min})$ 反映了水平构造应力特征, λ 随埋深分布规律如图 7 所示. 图 7 表明, λ 分布范围较大,离散性大,与埋深没有显著的关系,但主要集中在 $\lambda = 2.1$ 的两侧,随埋深增加而左右波动. 王艳华等^[31] 在分析中国大陆地壳上部应力状态时认为 λ 随埋深更接近于线性分布,也有学者对中国大陆浅层地应力统计得到的 λ 具有良好的双曲线分布形式,可见我国金属矿区的 λ 表现出了特异性,关于 λ 随埋深的分布规律有待进一步探讨.

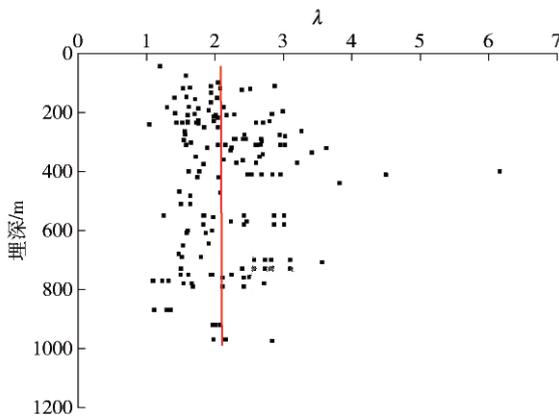


图 7 λ 随埋深分布图

Fig. 7 Distribution of λ with depth

在 165 个计算数据中, λ 的最小值为 1.04,最大值为 6.16,平均为 2.18. λ 主要集中在 1.00 ~ 3.00 范围内,尤以 λ 在 1.50 ~ 3.00 之间的数据居多. 图 8 为统计所得的 λ 不同取值范围所占比例,可以看出我国金属矿区的 λ 值在 1.50 ~ 2.00 之间所占比例最大,为 35.2%,但分布于 2.50 ~ 3.00 之间的数据也相对较多,占 24.8%,而 λ 值大于 3.00 的数据所占比例最少,为 9.1%. 这与前人统计结果有一定的差异. 图 9 为根据 λ 值得到的统计分布直方图,采用高斯函数 (式 (13)) 对其进行正态分布拟合,所得到的高斯拟合

曲线表达式为式 (14). 拟合曲线的相关性系数达到了 0.91,拟合精度较高, λ 数据整体上服从正态分布.

$$y = y_0 + Ae^{-\frac{(\lambda - \lambda_c)^2}{2w^2}} \quad (13)$$

式中: y_0 为补偿值; A, λ_c, w 为实数常数,且 $A > 0$.

$$y = 0.30 + 53.75e^{-\frac{(\lambda - 2.05)^2}{0.72}} \quad R^2 = 0.9057 \quad (14)$$

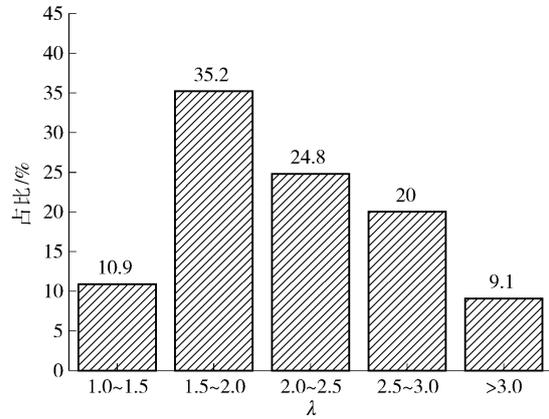


图 8 λ 不同取值范围所占比例

Fig. 8 Proportion of different range of values of λ

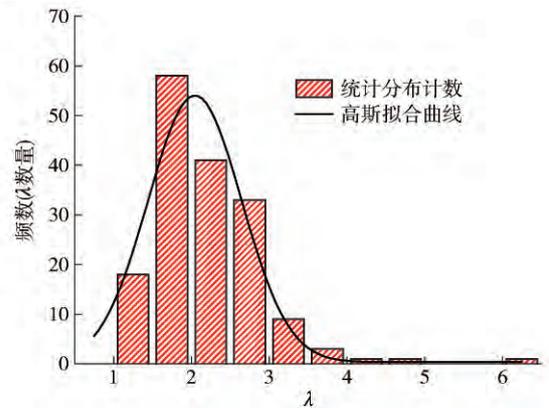


图 9 λ 正态分布拟合

Fig. 9 Normal distribution fitting of λ

综合以上分析可知,我国大陆金属矿区地应力场特征有其自身的特殊性,与我国大陆地壳浅部的地应力场特征还是有一定区别的,这也是金属矿山自身的工程特点决定的. 矿体开挖会导致原岩地应力状态的重新分布,任何一个采场的落矿及其工程开挖扰动都会导致整个采矿系统的应力变化,在整个矿山服务期内这种应力重分布是一直持续的,矿山区域地应力场的动态演化效应更为显著. 矿井不只受原岩应力场作用,还受到采动应力场与支护应力场的综合作用,三者形成了矿山井下的综合应力场^[11],井下围岩要经受综合应力场的叠加影响. 因此,在进行与金属矿山地应力有关的工程设计、岩爆灾害分析等工作时,不能仅靠简单的经验类比,应掌握金属矿区本身的地应力分布变化特征,这样才能更有利于实现采矿工程开采设计

和决策科学化,进而更好地对矿产资源进行安全高效回收。

2.2 金属矿区断层稳定性分析

地应力场是一种动态演化的过程,特别是断裂带附近的地应力场,由于受到断裂蠕动和滑动的影响,地应力的变化会更为突出^[32]。在矿井实际生产中,往往会遇到不同类型的断层,严重影响工作面的推进速度和矿井生产安全。断层发育的复杂程度与地应力状态的变化密切相关^[33]。断裂对地应力的影响范围与断裂的规模成正比。断层及其附近地应力值的变化较为复杂,应力值既有偏大情况,也有偏小情况,主要与断裂带附近应力随时间的变化有关^[34],最大主应力方向也会发生不同程度的偏转,断层的稳定性受其所处的应力状态控制。当最大水平主应力、最小水平主应力和垂直主应力的关系分别为: $\sigma_{h \max} > \sigma_{h \min} > \sigma_v$ 、 $\sigma_{h \max} > \sigma_v > \sigma_{h \min}$ 和 $\sigma_v > \sigma_{h \max} > \sigma_{h \min}$ 时,应力结构分别有利于逆断层、走滑断层和正断层的活动。根据实测数据统计得,我国金属矿区应力场类型主要有2种: $\sigma_{h \max} > \sigma_{h \min} > \sigma_v$ 型,占45.45%; $\sigma_{h \max} > \sigma_v > \sigma_{h \min}$ 型,占54.55%。

库仑摩擦滑动准则认为,当断层面上的剪应力 τ 大于或等于滑动摩擦阻力 $\mu\sigma_n$ 时(即 $\tau \geq \mu\sigma_n$)。断层会发生滑动失稳。Byerlee^[35]总结了大量的岩石实验资料,得到了剪应力 τ 与正应力 σ_n 的分段线性关系。有学者^[10]尝试利用最大主应力与最小主应力的差值($\sigma_1 - \sigma_3$)进行断层稳定性分析,但目前常用最大与最小主应力的比值进行区域地壳稳定性分析,该方法主要通过比较实测最大主应力与Byerlee摩擦范围所限定的主应力关系,判定在该应力状态下断层是否稳定。为了可以采用实际的应力进行计算,通常将库仑摩擦滑动准则变换为用反映应力状态的主应力表示,即改写成最大与最小主应力比(σ_1/σ_3)与摩擦系数 μ 的关系式,用 σ_1/σ_3 作为判断依据,见式(16)。在式(16)中,不考虑孔隙压力 P_0 的影响,若 σ_1/σ_3 小于右边值,则断层面稳定;若 σ_1/σ_3 大于右边值,则断层面可能沿某一层面发生滑动,该层面为断层面的法线方向与最大主应力 σ_1 夹角为 φ 的面, φ 与 μ 的关系为 $\varphi = (\pi/2 + \arctan\mu)/2$ ^[36]。本文尝试将式(16)引入到采矿领域,应用地应力实测数据来判断我国金属矿区断层的稳定性,不考虑孔隙压力的影响。

$$(\sigma_1 - P_0) / (\sigma_3 - P_0) = [(1 + \mu^2)^{1/2} + \mu]^2. \quad (15)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为最大主应力和最小主应力; μ 为断层滑动摩擦系数; P_0 为孔隙压力。

采用式(15)判断断层稳定性时,首先要确定 μ 的取值。Byerlee^[35]根据各类岩石试验数据发现,应力值小于200 MPa时,大部分岩石的 μ 值为0.85。Sibson^[14]在分析断层滑动时,取 μ 为0.75。Zoback等^[37-38]分析

世界范围内6口深孔资料认为,地壳浅表层应力状态基本符合 μ 取0.6~1.0。Verberne等^[39]得到龙门山断裂带汶川地震震后映秀—北川断裂带上的八角庙露头断层泥的稳态摩擦系数为0.4。苏恺之等^[36]的研究结果认为,在应力值介于150~250 MPa时, μ 的上限为1.1,下限为0.65,平均为0.85,并认为在评价浅部断层稳定性时 μ 取0.6~1.0是合理的。丰成君等^[40]得到北京十三陵钻孔南口山前断层面上的摩擦系数平均为0.22。杜建军等^[41]在评价陕西汉中盆地断层滑动危险性时选取 μ 为0.6~1.0。依据前人研究成果,本文取 $\mu=0.6$ 和 $\mu=1.0$ 分别作为判断断层失稳时的下限值和上限值。

分析逆断层时 $\sigma_1 = \sigma_{h \max}$, $\sigma_3 = \sigma_v$;分析走滑断层时 $\sigma_1 = \sigma_{h \max}$, $\sigma_3 = \sigma_{h \min}$ 。将 μ 的两个值0.6和1.0分别带入式(16)计算得 $\mu=0.6$ 时: $\sigma_{h \max} = 3.12\sigma_v$ (逆断层), $\sigma_{h \max} = 3.12\sigma_{h \min}$ (走滑断层); $\mu=1.0$ 时: $\sigma_{h \max} = 5.83\sigma_v$ (逆断层), $\sigma_{h \max} = 5.83\sigma_{h \min}$ (走滑断层)。

图10给出了具体计算结果。可以看出,在埋深小于500 m范围内,有部分最大水平主应力值已进入逆断层和走滑断层摩擦滑动的临界区,尤其是在埋深200 m以内,有少量最大水平主应力值甚至超过了走滑断层的上限,这种情况在一定程度上表明,在现今应力水平作用下两类断层均有滑动的可能。埋深超过500 m时,除了970 m附近的个别点达到甚至超过了逆断层的最小临界值,其余最大水平主应力值都小于逆断层和走滑断层的最小临界值,可认为在埋深超过500 m时,逆断层有滑动失稳的风险,而走滑断层不会发生瞬间滑动。由此判断,有少部分金属矿山在埋深小于500 m的范围内积累有较高的应变能,断裂处于走滑与逆冲活动的临界状态,这一现象值得进一步关注和研究。埋深超过500 m的范围内,除个别点外,应力状态尚未达到断层滑动失稳所需要的水平,两类断层不易发生瞬间滑动,基本处于相对稳定状态,但需对逆断层所处的应力状态多加关注。需要指出的是,上

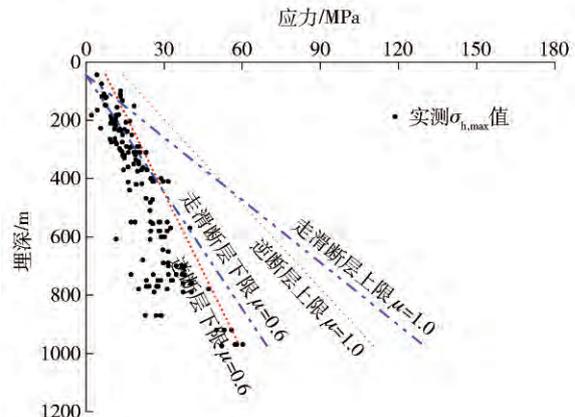


图10 断层滑动判别界限

Fig. 10 Limit of fault slip

述分析并未完全考虑断层的实际产状与理想滑动角之间的差别,而是假定断层沿着夹角为 φ 的面滑动失稳.

3 结论

(1) 以应力解除法得到的数据分析我国金属矿区垂直主应力随埋深分布规律. 垂直主应力与埋深具有较好的线性关系,我国金属矿区垂直地应力与埋深分布规律与全球实测地应力随埋深分布规律十分相似,垂直主应力在数值上基本等于或略小于上覆岩体重量.

(2) 最大水平主应力的取值范围为 2.16 ~ 60.26 MPa,平均为 22.21 MPa;最小水平主应力的取值范围为 1.66 ~ 28.90 MPa,平均为 10.85 MPa. 2 个水平主应力随埋深呈线性增长关系. 根据实测数据统计得到我国金属矿区应力场类型主要有 2 种: $\sigma_{h,max} > \sigma_{h,min} > \sigma_v$ 型和 $\sigma_{h,max} > \sigma_v > \sigma_{h,min}$ 型.

(3) 最大与最小水平主应力之差 $\Delta\sigma$ 的大小范围为 0.50 ~ 33.80 MPa,平均为 11.37 MPa. $\Delta\sigma$ 随埋深的增加有增大的趋势,但规律性不明显. 高水平应力以及高差应力可能导致不良结构面、岩体的变形破坏,容易引发岩爆等工程灾害.

(4) 金属矿区的 $K_{h,max}$ 主要集中在 1.00 ~ 2.50 之间, $K_{h,min}$ 主要集中在 0.50 ~ 1.50 之间, $K_{h,av}$ 基本在 1.00 ~ 2.00 范围内. 随着埋深的增加,3 个侧压系数的变化幅度逐渐减小, $K_{h,max}$ 趋向于 1.83, $K_{h,min}$ 趋向于 0.80, $K_{h,av}$ 向 1.31 逼近.

(5) 最大与最小水平主应力之比 λ 分布较离散,主要集中在 $\lambda = 2.1$ 的两侧,与埋深没有显著的关系,并非传统上随埋深呈双曲线形式分布. 我国金属矿区的 λ 值主要集中在 1.50 ~ 2.00 之间,但介于 2.50 ~ 3.00 之间的数据也相对较多, λ 值近似服从正态分布.

(6) 通过断层稳定性分析可知,在埋深小于 500 m 范围内,有一些最大水平主应力值已进入逆断层和走滑断层摩擦滑动的临界区,尤其是在埋深 200 m 以内,有少量最大水平主应力值甚至超过了走滑断层的上限,两类断层均有滑动的可能,这一情况值得继续关注和深入研究. 埋深超过 500 m 时,逆断层有滑动失稳的风险,而走滑断层不易发生瞬间滑动,总的来看,两类断层基本处于相对稳定状态.

参 考 文 献

[1] Cai M F, He M C, Liu D Y. *Rock Mechanics and Engineering*. Beijing: Science Press, 2002
(蔡美峰,何满潮,刘东燕. 岩石力学与工程. 北京: 科学出版社, 2002)

[2] Cai M F, Qiao L, Li C H, et al. Results of in situ stress measure-

ment and their application to mining design at five Chinese metal mines. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2000, 37(3): 509

[3] Cai M F, Chen C Z, Peng H, et al. In-situ stress measurement by hydraulic fracturing technique in deep position of Wanfu Coal Mine. *Chin J Rock Mech Eng*, 2006, 25(5): 1069
(蔡美峰,陈长臻,彭华,等. 万福煤矿深部水压致裂地应力测量. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 1069)

[4] Cai M F, Peng H, Qiao L, et al. Distribution law of in-situ stress field and its relationship to regional geological structures in Wanfu Coal Mine. *J China Coal Soc*, 2008, 33(11): 1248
(蔡美峰,彭华,乔兰,等. 万福煤矿地应力场分布规律及其与地质构造的关系. 煤炭学报, 2008, 33(11): 1248)

[5] Hast N. The state of stress in the upper part of the earth's crust. *Tectonophysics*, 1969, 8(3): 169

[6] Worotniki G, Denham D. The state stress in the upper part of the Earth's crust in Australia according to measurements in mines and tunnels and from seismic observation // *Symposium on Investigation of Stress in Rock: Advances in Rock Measurement*. Sydney, 1976: 71

[7] Brown E T, Hoek E. Trends in relationships between measured in-situ stress and depth. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 1978, 15: 211

[8] Hoek E, Brown E T. *Underground Excavations in Rock*. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980

[9] Zoback M L. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project. *J Geophys Res Solid Earth B*, 1992, 97(8): 11703

[10] Huang L Y, Yang S X, Cui X F, et al. Analysis of characteristics of measured stress and stability of faults in North China. *Rock Soil Mech*, 2013, 34(Suppl 1): 204
(黄禄渊,杨树新,崔效锋,等. 华北地区实测应力特征与断层稳定性分析. 岩土力学, 2013, 34(增刊 1): 204)

[11] Kang H P, Lin J, Yan L X, et al. Study on characteristics of underground in-situ stress distribution in Shanxi coal mining fields. *Chin J Geophys*, 2009, 52(7): 1782
(康红普,林健,颜立新,等. 山西煤矿区井下地应力场分布特征研究. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1782)

[12] Li X P, Wang B, Zhou G L. Research on distribution rule of geostress in deep stratum in Chinese mainland. *Chin J Rock Mech Eng*, 2012, 31(Suppl 1): 2875
(李新平,汪斌,周桂龙. 我国大陆实测深部地应力分布规律研究. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 2875)

[13] Wang Z Q, Yan E C, Lu G D, et al. Statistical analysis of in-situ stress field for underground water-sealed storage cavern in Chinese mainland. *Rock Soil Mech*, 2014, 35(Suppl 1): 251
(王章琼,晏鄂川,鲁功达,等. 我国大陆地下水封洞库库址区地应力场分布规律统计分析. 岩土力学, 2014, 35(增刊 1): 251)

[14] Sibson R H. Frictional constraints on thrust, wrench, and normal faults. *Nature*, 1974, 249: 542

[15] Yin Z M, Ranalli G. Critical stress difference, fault orientation and slip direction in anisotropic rocks under non-Andersonian stress systems. *J Struct Geol*, 1992, 14(2): 237

[16] Zang S X, Li C, Wei R Q. The determination of rheological me-

- chanics of lithosphere and the influencing factors on the rheological strength of lithosphere. *Prog Geophys*, 2002, 17(1): 50
(臧绍先, 李昶, 魏荣强. 岩石圈流变机制的确定及影响岩石圈流变强度的因素. 地球物理学进展, 2002, 17(1): 50)
- [17] Wang C H, Song C K, Guo Q L, et al. Stress build-up in the shallow crust before the Lushan Earthquake based on the in-situ stress measurements. *Chin J Geophys*, 2014, 57(1): 102
(王成虎, 宋成科, 郭启良, 等. 利用原地应力实测资料分析芦山地震震前浅部地壳应力积累. 地球物理学报, 2014, 57(1): 102)
- [18] Meng W, Chen Q C, Du J J, et al. In-situ stress measurement in Singapore. *Chin J Geophys*, 2012, 55(8): 2611
(孟文, 陈群策, 杜建军, 等. 新加坡地应力测量. 地球物理学报, 2012, 55(8): 2611)
- [19] Qin X H, Zhang P, Feng C J, et al. In-situ stress measurements and slip stability of major faults in Beijing region, China. *Chin J Geophys*, 2014, 57(7): 2165
(秦向辉, 张鹏, 丰成君, 等. 北京地区地应力测量与主要断裂稳定性分析. 地球物理学报, 2014, 57(7): 2165)
- [20] Cao H, Sun D S, Meng W, et al. In-situ stress measurement in the central section of Andes and its relation to seismicity. *Acta Geosci Sin*, 2015, 36(2): 250
(曹辉, 孙东生, 孟文, 等. 安第斯山中段现今地应力测量及地震相关性分析. 地球学报, 2015, 36(2): 250)
- [21] Li X B, Yao J R, Gong F Q. Dynamic problems in deep exploitation of hard rock metal mines. *Chin J Nonferrous Met*, 2011, 21(10): 2551
(李夕兵, 姚金蕊, 宫凤强. 硬岩金属矿山深部开采中的动力学问题. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2551)
- [22] He M C, Xie H P, Peng S P, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering. *Chin J Rock Mech Eng*, 2005, 24(16): 2803
(何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803)
- [23] Xie H P, Gao F, Ju Y. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering. *Chin J Rock Mech Eng*, 2015, 34(11): 2161
(谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究与探索. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161)
- [24] Cai M F. Review of principles and methods for rock stress measurement. *Chin J Rock Mech Eng*, 1993, 12(3): 275
(蔡美峰. 地应力测量原理和方法的评述. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(3): 275)
- [25] Ge X R, Hou M X. A new 3D in-situ rock stress measuring method: borehole wall stress relief method (BWSRM) and development of geostress measuring instrument based on BWSRM and its primary applications to engineering. *Chin J Rock Mech Eng*, 2011, 30(11): 2161
(葛修润, 侯明勋. 三维地应力 BWSRM 测量新方法及其测井机器人在重大工程中的应用. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2161)
- [26] Yang S X, Yao R, Cui X F, et al. Analysis of the characteristics of measured stress in Chinese mainland and its active blocks and North-South seismic belt. *Chin J Geophys*, 2012, 55(12): 4207
(杨树新, 姚瑞, 崔效锋, 等. 中国大陆与各活动地块、南北地震带实测应力特征分析. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4207)
- [27] Wang L J, Cui J W, Zhang X W, et al. In-situ stress state in the main borehole of the Chinese continental scientific drilling. *Earth Sci J China Univ Geosci*, 2006, 31(4): 505
(王连捷, 崔军文, 张晓卫, 等. 中国大陆科学钻主孔现今地应力状态. 地球科学——中国地质大学学报, 2006, 31(4): 505)
- [28] Li X B, Yao J R, Du K. Preliminary study for induced fracture and non-explosive continuous mining in high-geostress hard rock mine—a case study of Kaiyang phosphate mine. *Chin J Rock Mech Eng*, 2013, 32(6): 1101
(李夕兵, 姚金蕊, 杜坤. 高地应力硬岩矿山诱导致裂非爆连续开采初探——以开阳磷矿为例. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1101)
- [29] Sun D S, Feng C J, Xu H B, et al. In-situ stress measurement at deep borehole of Dataigou Iron Mine area and its application. *J Cent South Univ Sci Technol*, 2015, 46(4): 1384
(孙东生, 丰成君, 许洪斌, 等. 大台沟矿区深孔水压致裂原地应力测量及应用. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(4): 1384)
- [30] Gay N C. In-situ stress measurements in Southern Africa. *Tectonophysics*, 1975, 29(1): 447
- [31] Wang Y H, Cui X F, Hu X P, et al. Study on the stress state in upper crust of China mainland based on in-situ stress measurements. *Chin J Geophys*, 2012, 55(9): 3016
(王艳华, 崔效锋, 胡幸平, 等. 基于原地应力测量数据的中国大陆地壳上部应力状态研究. 地球物理学报, 2012, 55(9): 3016)
- [32] Fan T Y, Long C X, Yang Z Y, et al. Comprehensive modeling on the present crustal stress of China mainland with the viscoelastic spherical shell. *Chin J Geophys*, 2012, 55(4): 1249
(范桃园, 龙长兴, 杨振宇, 等. 中国大陆现今地应力场黏弹性球壳数值模拟综合研究. 地球物理学报, 2012, 55(4): 1249)
- [33] Tan C X, Sun W F, Sun Y, et al. A consideration on in-situ crustal stress measuring and its underground engineering application. *Acta Geol Sin*, 2006, 80(10): 1627
(谭成轩, 孙炜锋, 孙叶, 等. 地应力测量及其地下工程应用的思考. 地质学报, 2006, 80(10): 1627)
- [34] Zoback M D, Tsukahara H, Hickman S. Stress measurements at depth in the vicinity of the San Andreas Fault: implications for the magnitude of shear stress at depth. *J Geophys Res*, 1980, 85(B11): 6157
- [35] Byerlee J D. Friction of rocks. *Pure Appl Geophys*, 1978, 116(4): 615
- [36] Su K Z, Li F Q, Zhang B C, et al. *Comprehensive Study of Crustal Stress and Pore Pressure at the Site of Three Gorges Dam*. Beijing: Seismological Press, 1996
(苏恺之, 李方全, 张伯崇, 等. 长江三峡坝区地壳应力与孔隙水压力综合研究. 北京: 地震出版社, 1996)
- [37] Zoback M D, Townend J. Implications of the hydrostatic pore

- pressures and high crustal strength for the deformation of intra-plate lithosphere. *Tectonophysics*, 2001, 336(1): 19
- [38] Zoback M D. *Reservoir Geomechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- [39] Verberne B A, He C R, Spiers C J. Frictional properties of sedimentary rocks and natural fault gouge from the Longmen Shan Fault Zone, Sichuan, China. *Bull Seismol Soc Am*, 2010, 100(58): 2767
- [40] Feng C J, Zhang P, Sun W F, et al. The application of in situ stress measuring and real-time monitoring results to analyzing the fault activity hazard at Ming tombs borehole in Changping District, Beijing. *Acta Geosci Sin*, 2014, 35(3): 345
(丰成君, 张鹏, 孙炜锋, 等. 北京昌平十三陵钻孔地应力测量与实时监测在断层活动危险性分析中的应用探讨. *地球学报*, 2014, 35(3): 345)
- [41] Du J J, Chen Q C, An Q M, et al. Hydrofracturing in-situ stress measurement in Hanzhong Basin, Shanxi Province. *Acta Seismol Sin*, 2013, 35(6): 799
(杜建军, 陈群策, 安其美, 等. 陕西汉中盆地水压致裂地应力测量分析研究. *地震学报*, 2013, 35(6): 799)